

مروری بر غشاهای نانوصافش بستر مختلط برپایه پلی سولفون و پلی اترسولفون / نانوذرات کربنی

نادر غلامی^۱ و حسین مهدوی^{۲*}

۱. دکترای شیمی در دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: مرداد ۹۹ بازنگری: مرداد ۹۹ پذیرش: شهریور ۹۹

چکیده: باوجود آنکه فناوری غشایی نسبت به روش‌های متداول جداسازی، دارای مزایایی مانند توانایی حذف بالا، انعطاف‌پذیری عملیات، اثربخشی بهتر در جداسازی است، ولی گرفتگی محدودیت اصلی در به‌کارگیری بیشتر فناوری غشایی است که دلیل اصلی آن آب‌گریزی ذاتی مواد سازنده غشا است. برای غلبه بر این اشکال از غشاهای نانوجندسازه استفاده می‌شود. در بین فرایندهای غشایی، نانوصافش (NF) کاربردهایی در تصفیه انواع آب‌های زیرزمینی و سطحی، تصفیه پساب و پیش عملیات نمک‌زدایی دارد. از آنجا که فرایند NF در فشار پایین‌تری انجام می‌شود، از دید مصرف انرژی فرایندی بسیار با صرفه‌تر است. در این مقاله مروری، اصلاح غشاهای پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون در رابطه با عملکرد ضدگرفتگی و سازوکار کاهش گرفتگی برپایه روش‌های متفاوت اصلاح غشا بررسی شده است. این بررسی نشان می‌دهد که آب‌دوستی در سطح غشا پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون بهبود می‌یابد. همچنین، مطالعه‌ای جامع در باره ساخت غشاهای نانوجندسازه‌ای به‌دست آمده از به‌کارگیری نانوذرات در غشا بسپاری بستر مختلط، ویژگی و کاربرد آن‌ها با پرکننده‌های آلی (مانند گرافن و نانولوله کربنی) انجام شده است. روش‌های شناسایی به‌کارگرفته‌شده برای غشاهای اصلاح شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: نانوصافش، گرفتگی، آب‌دوستی، آب‌گریزی، پلی‌اترسولفون، پلی‌سولفون، غشا بستر مختلط

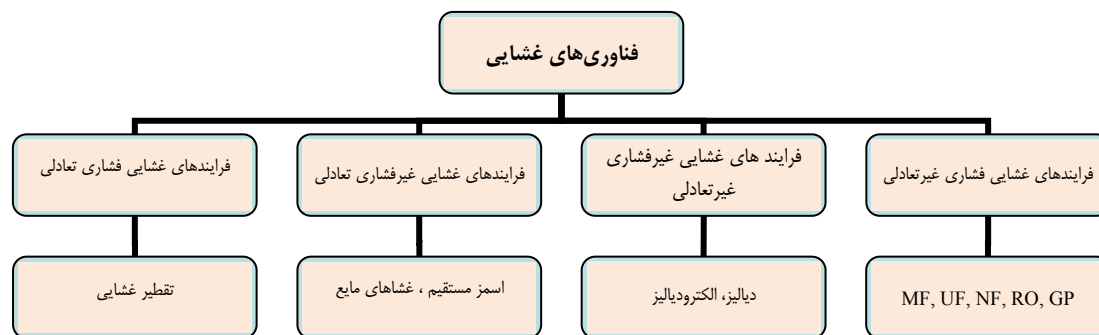
مقدمه

[۱]. به‌منظور تحقق این امر باید از فرایندهای جداسازی مدرن و مقرون به‌صرفه در صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی، بیوفناوری و زیست محیطی، برای تهیه آب آشامیدنی از آب دریا، تصفیه پساب‌های صنعتی، جداسازی مواد اضافی از آن و بازیافت اجزاء با ارزش، استفاده شود. خوشبختانه، تاکنون

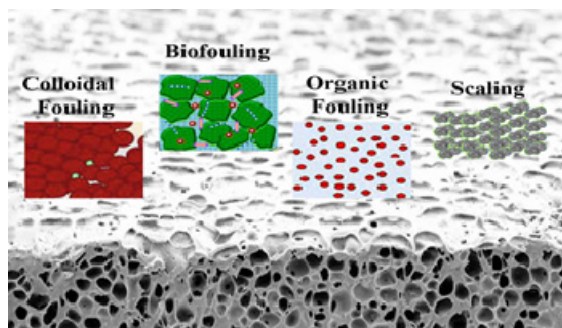
بارزترین چالش امروز بشر به‌دست آوردن آب آشامیدنی تمیز از آب شور دریا به‌عنوان فراوان‌ترین منبع آب جهان، تصفیه و بازیافت پساب و حذف ترکیبات خطرناک تولیدی به‌وسیله صنایع متفاوت مانند نساجی، چرم، رنگ و ... است

تغییر فاز، سازگاری با محیط زیست (دوست‌دار محیط زیست)، دسترسی آسان نسبت به روش‌های متداول جداسازی است [۳]. در اصلی‌ترین فرایندهای غشایی از نیروی فشار به‌عنوان نیروی جلوبرنده استفاده می‌شود که شامل میکروصافش، فراصافش (UF) Ultrafiltration) نانوصافش (Nanofiltration (NF))، اسمز معکوس (Reverse Osmosis (RO)) و سایر فرایندها مانند جداسازی گاز و پیش‌تبخیری (Pre-evaporation (PV)) است [۴]. ثابت شده است که فرایندهای جداسازی غشایی، یک روش مؤثر در از بین بردن طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آب است [۵]. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایندهای غشایی متفاوت نشان داده شده است.

روش‌های متفاوت تصفیه آب توسعه داده شده و آب آشامیدنی سالم تأمین می‌شود. این روش‌ها شامل: انعقاد/لخته‌شدن (Flocculation)، ته‌نشینی (Sedimentation)، صافش (Filtration)، و انواع روش‌های غشایی است [۲]. لازم به‌ذکر است که هیچ یک از این روش‌ها به‌تنهایی به‌کارگرفته نشده و به‌طور معمول با توجه به منبع و کیفیت آب مورد تصفیه، ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود. به‌هر حال، فناوری غشا در بسیاری از بخش‌های صنایع غذایی، پزشکی، دارویی، فرایندهای تصفیه پساب و مواد شیمیایی نسبت به سایر روش‌های جداسازی و تصفیه اهمیت زیادی پیدا کرده است. دلیل این موضوع مزایای بیشتر این فناوری مانند توانایی حذف بالا، انعطاف‌پذیری عملیات، اثربخشی در جداسازی، سادگی شرایط عملیاتی، مصرف کم انرژی، عدم



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایندهای غشا

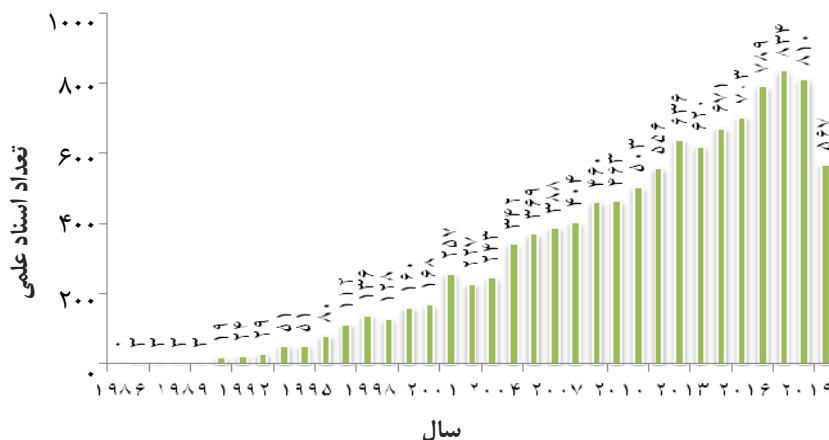


شکل ۲ تصویر کلی انواع گرفتگی و رسوب بر غشا

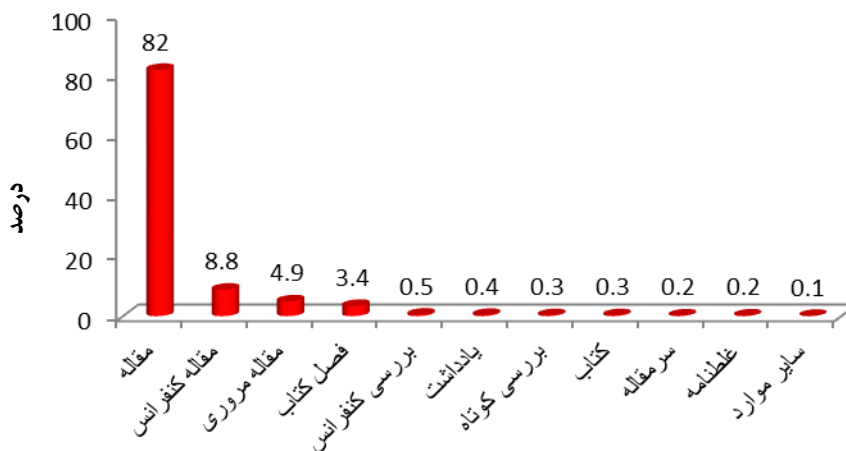
به موازات قابلیت فرایندهای جداسازی غشایی در افزایش کیفیت آب به‌دست‌آمده از پساب، چالش بروز پدیده گرفتگی و هزینه‌های مرتبط بر آن به‌ویژه در رابطه با فرایندهای فراصافش، نانو صافش و اسمز معکوس بسیار جدی [۶] بوده و در واقع نقطه ضعف اصلی به‌کارگیری فناوری غشایی، کاهش شار در حین صافش به‌دلیل همین پدیده گرفتگی است. تصویر کلی انواع متفاوت گرفتگی و رسوب بر غشاها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

عملیاتی است [۸]. از فرایند NF در موارد بسیاری به‌ویژه در تصفیه آب و پساب، داروسازی، زیست‌فناوری و مهندسی مواد غذایی استفاده می‌شود. برپایه پایگاه اطلاعاتی Scopus (نمودار شکل ۳)، از سال ۱۹۸۶ تا سال ۲۰۲۰ حدود ۱۰۸۱۳ سند علمی مانند کتاب، مقاله، پتنت و ... منتشر شده که، به تفکیک در نمودار شکل ۴ آمده است.

در بین فرایندهای غشایی، نانوصافش از اواخر دهه ۱۹۸۰ وارد عرصه شده و جنبه‌های متفاوتی از آن در مقاله‌های بررسی شده است [۷]. غشاهای نانوصافش از نظر ویژگی‌های عملکردی مابین غشاهای اسمز معکوس و فراصافش قرار گرفته است. از مهم‌ترین مزایای فرایند نانوصافش، نیاز به فشارهای کم، شار زیاد، پس‌زنی بالایی نمک‌های چندظرفیتی، هزینه‌های کم سرمایه‌گذاری و



شکل ۳ نمودار تعداد اسناد منتشر شده در زمینه فرایند نانوفیلتراسیون از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹



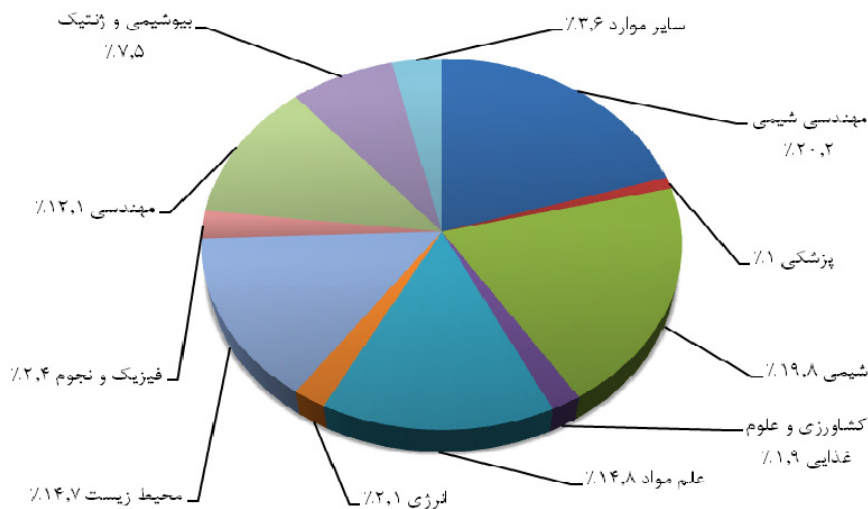
شکل ۴ نمودار درصد نوع اسناد منتشرشده در زمینه فرایند نانوفیلتراسیون از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹

فرایند NF از سال ۱۹۸۶ تا سال ۲۰۲۰ مشاهده می‌شود. تمرکز اصلی در این مقاله‌های بر غشاهای NF در کاربردهای

برپایه اطلاعات به دست آمده از پایگاه اطلاعاتی یاد شده، در شکل ۵ گروه‌بندی مقاله‌های چاپ‌شده در زمینه

(۲۱٪)، فیزیک و نجوم (۲/۴٪)، مهندسی (۱۲/۱٪) و سایر موارد (۳/۶٪) است.

محیط زیست (۱۴/۷٪)، مهندسی شیمی (۲۰/۲٪)، بیوشیمی و ژنتیک (۷/۵٪)، پزشکی (۱٪)، شیمی (۱۹/۸٪)، کشاورزی و علوم غذایی (۱/۹٪)، علم مواد (۱۴/۸٪)، انرژی



شکل ۵ نمودار گروه‌بندی مقاله‌های چاپ‌شده در زمینه فرایند نانوصافش از سال ۱۹۸۶ تا سال ۲۰۲۰

مقاومت شیمیایی، ویژگی گرمایی و مکانیکی بسیار مناسب به‌طور گسترده در ساخت غشا استفاده شده است [۱۱]. از طرف دیگر پلی‌سولفون به‌دلیل کم هزینه‌تر و در دسترس بودن [۱۲] و پایداری شیمیایی و گرمایی بسیار مناسب، گسترده‌ترین ماده غشایی مورد استفاده است [۱۳]. پلی-سولفون به‌طور گسترده در زمینه‌های متفاوتی مانند میکروصافش [۱۴] فراصافش [۱۵]، و همچنین غشاهای نانوصافش [۱۶] در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی [۱۷] مورد استفاده قرار گرفته است. معایب پلی‌سولفون و پلی‌اتر سولفون ویژگی به نسبت آب‌گریزی آن است که منجر به گرفتگی در غشاها و ناشی از جذب محلول‌های خوراک بر سطح غشا و حفره‌ها شده و منجر به کاهش شدید در شار نفوذی در طول زمان عملیات می‌شود [۱۱].

ساختار و ویژگی مواد بسیاری سازنده غشاها

به‌طور کلی مواد بسیاری سازنده غشاها ساختار و ویژگی متنوعی دارند. در این میان بسپارهای متفاوتی مانند سلولز نیترات، پلی‌سولفون (Polysulfone (PSF)، پلی‌اتر سولفون (Polyethersulfone (PES)، پلی‌اکریلونیتریل (Polyacrylonitrile (PAN)، پلی‌وینیلیدن فلوراید (Polyvinylidene fluoride (PVDF)، پلی‌پروپیلن (Polypropylene (PP)، پلی‌وینیل‌الکل (Polyvinyl alcohol (PVA)، پلی‌تترافلورواتیلن (Polytetrafluoroethylene (PTFE) و پلی‌ایمید (Polyimide (PI)، سلولز استات (Celuloseacetate (CA)، پلی‌آمید (Polyamide (PA)، پلی‌اتریمید (Polyetherimide (PEI) و پلی (فنیلن‌اتر سولفون) (Polyetherimide (PEI)، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن و ... به‌طور گسترده به‌عنوان مانند پایه در ساخت غشا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹ و ۱۰]. پلی‌اتر سولفون به‌دلیل

متفاوتی مانند TiO_2 ، Ag، ZnO، CNT، GO و غیره در تهیه غشاهای نانوجندساز در کاربردهای جداسازی استفاده شده است [۲۵]. از میان روش‌های اصلاحی مربوط به توده بسیار، سولفون‌شدن و کربوکسیله‌شدن بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند، هرچندکه بیشتر از سولفون‌شدن استفاده می‌شود. به‌منظور افزایش آب‌دوستی، بهبود ویژگی ضدگرفتگی و عامل‌دارکردن سطح غشاها و اصلاح سطح آن‌ها از روش‌های پیش‌جذبی [۲۰]، آمایش با پلاسما [۲۶]، بسیارش پیوندی روی سطح غشا، القا بسیارش پیوندی با تابش UV یا پیوندزدن با UV القایی [۲۷]، بسیارش پیوندی القاشده با تابش‌های یونی یا پیوندزدن از راه تابش پرتو یون [۲۸]، بسیارش پیوندی القاشده با آغازگرهای اکسایش-کاهش یا پیوندزدن پس از آغاز اکسایش-کاهش [۲۹]، شبکه‌ای‌شدن القاشده گرمایی [۳۰]، اصلاح به‌کمک نانوذرات، اصلاح سطح با مواد افزودنی، اصلاح سطح باروش‌های پوشش‌دهی، اکسایش شیمیایی، واکنش‌های آلی کلاسیک استفاده می‌شود. آلیاژکردن و مخلوط‌سازی پلی‌سولفون و پلی‌اترسولفون به‌طور معمول به افزایش آب‌دوستی کمک می‌کند. با بررسی پژوهش‌های متمرکز بر اصلاح غشاهای تهیه‌شده برپایه خانواده پلی‌سولفون، به‌صورت خلاصه مهم‌ترین کارهای انجام شده در این زمینه در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، در جدول ۲، روش‌های متفاوت دیگر اصلاح غشاها نشان داده شده است.

روش‌های اصلاح غشاهای پلی‌سولفون و پلی‌اترسولفون یکی از مهم‌ترین رویکردهای اصلاح غشاهای پلی‌سولفونی آب‌دوست‌کردن سطح غشا است. با انجام اصلاح، غشا تمایل بیشتری برای تماس با آب پیدا کرده و در نتیجه مواد آلاینده نمی‌توانند به‌راحتی بر روی سطح غشا بچسبند و غشا خیلی دیرتر دچار پدیده گرفتگی^۱ می‌شود و کاربرد غشا در فرایند بهبود می‌یابد [۱۸]. گرفتگی غشاها به‌دلیل وجود مواد پروتئینی و آلی آب‌گریز طبیعی و پذیرفته شده است. از این‌رو، افزایش آب‌دوستی غشا می‌تواند موجب کاهش گرفتگی شود. محدودیت اصلی پلی‌سولفون و پلی‌اترسولفون ویژگی به‌نسبت زیاد آب‌گریزی آن‌هاست که به‌دلیل جذب املاح غیرقطبی و ذرات آب‌گریز یا باکتری‌ها روی سطح آن‌ها می‌تواند به گرفتگی شدید غشا منجر شود [۱۹]. این روند منجر به کاهش تدریجی شار، نیاز به تمیزسازی مداوم غشا، کاهش عمر مفید غشا و کاربردهای آن می‌شود [۲۰]. بنابراین، دستیابی به ویژگی مطلوب سطح با اصلاح در ویژگی غشا پلی‌سولفون و پلی‌اترسولفون، هدفی سودمند و مهم برای پژوهشگران و صنایع غشایی است. ساخت غشاهای بسیاری آب‌دوست با روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. برای مثال، پولورونیک F127 یک هم‌بسیار دوگانه‌دوست بوده که به‌عنوان عامل اصلاح‌کننده سطح و حفره‌ساز برای ساخت غشاهای فراصافش پلی‌اترسولفون (PES) استفاده شده است [۲۱]. به‌طور کلی اصلاح و بهبود ویژگی غشاهای بسیاری به سه روش اصلاح توده^۲ بسیار، اصلاح سطح و آلیاژکردن^۳ بسیارها انجام می‌گیرد [۲۲]. مهم‌ترین روش‌های اصلاح توده؛ افزودن نانوذرات متفاوت [۲۳]، سولفون‌شدن [۲۲]، کربوکسیله‌شدن [۲۲]، نیترودارشدن PES [۲۴] و نیز پیوندزدن بسیارهای عاملی متفاوت بر پیکره PES است [۲۲]. تاکنون از نانوذرات

جدول ۱ مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه اصلاح غشاهای پلی‌سولفونی

ماده غشایی	اصلاح
PES	تهیه CNT پوشش شده با Ni-Pd-Sn به‌عنوان کاتالیست در بستر غشا مختلط پلی‌اترسولفون اصلاح‌شده با بسپار پرشاخه [۳۱]
PES	نوع جدیدی از چارچوب آلی فلزی ^۱ بر پایه Zn برای تهیه غشاهای بستر مختلط* PES برای افزایش نفوذپذیری CO ₂ و CH ₄ و کاهش انتخاب‌پذیری [۳۲]
PES	اصلاح کارآمد و تهیه غشا مختلط PES/SMA با استفاده از هم‌بسپار آب‌دوست انیدرید استایرن-مالئیک (SMA) از طریق واکنش باز شدن حلقه گروه‌های انیدریدی آن با دی‌اتانول آمین (DEA) [۳۳]
PES	تهیه غشا نانوصافش چندسازه‌ای لایه نازک** کارآمد پلی‌اورتان بر روی پشتیبان PES از طریق بسپارش بین‌سطحی متیلن‌دی‌فنیل‌دی‌ایزوسیانات (MDI) و تولید پلی‌استرهای پرشاخه ۲ و ۲-بیس (هیدروکسی متیل) پروپیونیک اسید (بیس-MPA) (HBPE) یا Boltron® [۳۴]
PES	آمایش با پلاسما سطح غشا PES با واکنش بین ۳-آمینو پروپیل‌تری‌اتوکسیلان (APTES) و ۲-پیریدین کربآلدهید بر سطح PES تحت آمایش با پلاسما و تولید غشا ۲-پیریدین کربآلدئید-پلی‌اترسولفون (PY-PES) [۳۵]
PSf	بررسی اثر هم‌بسپارهای پیوندی پلی‌سولفون به‌عنوان عوامل اصلاح‌شده در غشاهای ترکیبی و تهیه غشا ترکیب پلی‌سولفون با (پلی‌سولفون-گرافت‌شده-پلی (n-بوتیل آکریلات) و پلی‌سولفون-گرافت‌شده-پلی (tert-بوتیل آکریلات) با روش ترکیب کردن*** [۳۶]
PES	ساخت غشاهای نانوجندسازه‌ای PES/GO و PES/sulfonated GO [۲۵]
PES	تهیه دو بسپار ترکیبی پلی‌اترسولفون/پلی‌استر پرشاخه و پلی‌آمین استر پرشاخه و استفاده از پلی‌استر و پلی (آمین استر) پرشاخه، به‌عنوان مواد افزودنی در تهیه آن‌ها [۳۷]
PSf	تهیه غشا ترکیبی هم‌بسپار پلی‌سولفون-پیوندزدن-پلی (tert-بوتیل‌آکریلات) و پلی‌سولفون با کمک روش پیوندزدن ATRP، tert-butylacrylate از پلی‌سولفون کلرومتیله‌شده برای تهیه هم‌بسپار پیوندشده [۳۸]
PSf	پلی‌سولفون پیوندی اصلاح‌شده با پیوند ATRP، پیوندزدن ATRP، tert-butylacrylate از پلی‌سولفون کلرومتیله‌شده [۳۹]

* Mixed Matrix Membrane ** Thin-film composite (TFC) *** Blending

جدول ۲ روش‌های متفاوت دیگر اصلاح غشاهای پلی‌سولفونی

ماده غشایی	الف-اصلاح سطح غشا
PES	جذب سطحی PVA و شبکه‌ای شدن با محلول بوراکس [۴۰]
PSf	بسپارش پیوند القایی UV با نمک (۳-متاکریلویلامینو) پروپیل-دی‌متیل (۳ سولفو پروپیل) آمونیم هیدروکسید (MPDSAH) با استفاده از بنزوفنون به‌عنوان آغازگر نوری [۴۱]
PES	پوشش PVA و غوطه‌وری در حمام شبکه‌ای‌کننده ۵٪ وزنی گلو تار آلدئید و ۵٪ / ۰ / ۵ وزنی H ₂ SO ₄ [۴۲]
PES	پوشش O،N-کربوکسی متیل کیتوسان (NOCC) بر روی غشا PES و سپس شبکه‌ای کردن با استفاده از گلو تار آلدئید [۴۳]
PES	ریختن مخلوط بسپار آکریلونیتریل بوتادین استایرن/ کیتوسان بر روی بستر PES [۴۴]
ماده غشایی	ب-اصلاح واکنشی
PES	تترائیل تیتانات (TET) با مقدار مناسب HCl و آب یون زدوده (DI) به DMAC برای تهیه محلول TET اضافه و سپس افزودن به محلول PES-DMAC [۴۵]

1. Metal organic framework

آمده است. بالتا و همکارانش [۵۳] از ZnO به منظور جایگزینی برای TiO_2 در قالب مواد با هزینه پایین استفاده کردند. آن‌ها تهیه و بررسی عملکرد غشاهای چندسازه PES/ZnO با مقادیر متفاوت نانوذرات ZnO را گزارش کردند. نتایج بهبود تراوایی، پس‌زنی رنگ، و مقاومت در برابر گرفتگی با افزودن نانوذرات ZnO را نشان داد. در پژوهشی دیگر، هس و همکارانش [۵۴] از مشارکت نانوذرات ZnO با قطر حفرات (کمتر از ۲۰ تا بیش از ۱۰۰nm) همراه با گلیسرول برای بستر PES استفاده کردند. افزودن نانوذرات ZnO بهبود تراوایی، پس‌زنی رنگ، و مقاومت در برابر گرفتگی را نشان داد. در پژوهشی دیگر، افزودن تیتانیوم دی‌اکسید به پلی‌اتر سولفون موجب کاهش اندازه حفرات و نفوذپذیری شد [۵۵]. سوتو و همکارانش [۵۶] به منظور اصلاح ویژگی غشاهای PES از نانوذرات TiO_2 به همراه حلال دی‌متیل‌فرمامید (DMF) و اتانول استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد اندازه و نوع حفرات، ساختار بخش پشتیبان و زیرلایه و نفوذپذیری بستگی محسوسی به غلظت TiO_2 و اتانول داشت و موجب بهبود ویژگی ضد گرفتگی شد، ولی در بازداری تغییر چشم‌گیری دیده نشد. در پژوهشی دیگر، پراشاتا [۵۷] از TiO_2 به منظور تقویت بستر PES سولفون استفاده و نتایج کاهش نفوذپذیری نسبت به متانول و کاهش هدایت پروتون در غشاهای پیل سوختی^۲ را نشان داد. باعه و گروه پژوهشی وی [۵۸] نیز غشا چندسازه‌ای را از غوطه‌وری PES در محلول حاوی TiO_2 تهیه و بهبود ویژگی ضد گرفتگی را مشاهده کردند.

در پژوهشی دیگر، لای و همکارانش [۵۹] غشاهای چندسازه‌ای PES- TiO_2 را به روش وارونگی فاز^۳ با پراکنده‌سازی نانوذرات TiO_2 در محلول ریخته‌گری PES تهیه کردند. نتایج نشان داد که با افزودن نانوذرات TiO_2

اصلاح غشاهای پلی‌سولفونی با نانوذرات

غشاهای نانوجندسازه‌ای از اختلاط نانوذرات (NPs) معدنی، آلی با بستر غشا بسپاری ساخته می‌شوند. نانوذرات موردنظر در توسعه غشاهای نانوجندسازه‌ای به طور معمول عبارت‌اند از: تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2)، آلومینیم اکسید (Al_2O_3)، روی‌اکسید (ZnO)، سیلیکا (SiO_2)، زیرکونیا (ZrO_2)، منگنز دی‌اکسید آبدار (HMO)، منیزیم هیدروکسید $Mg(OH)_2$ ، کلسیم کربنات ($CaCO_3$)، اکسید مضاعف سیلیکون تیتانیوم ($TiSiO_4$)، نانوذرات آلی مانند نانولوله‌های کربن (CNT) و گرافن-اکسید (GO)، نانوذرات چندسازه‌ای TiO_2-ZrO_2 ، SiO_2-TiO_2 ، $GO-SiO_2$ ، $Ag-TiO_2$ ، $Ag-SiO_2$ ، Al_2O_3-SiC و $Zn-CeO_2$ و نانوذراتی مانند Ag، Si و زئولیت‌ها [۴۶ تا ۴۸]. تا به امروز، به منظور بهبود آب‌دوستی سطح غشا PES نانوذرات متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور معمول استفاده از نانومواد در ساختار غشا، منجر به ایجاد ساختار متخلخل‌تری در غشا می‌شود که ممکن است نسبت به پلی‌سولفون تنها، شار آب بالاتری داشته باشند [۲۳].

اصلاح غشاهای چندسازه به کمک نانوذرات معدنی (فلزی و اکسید فلزی)

استفاده از نانوذرات فلزی به واسطه روش‌های به نسبت آسان و مقرون به صرفه آن‌ها و همچنین مقدار بالای تأثیر آن‌ها در کارایی غشاهای تهیه شده، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در دو دهه گذشته، مقاله‌های زیادی در ارتباط با کاربرد نانوذرات TiO_2 به دلیل اثر فوتوکاتالیستی عالی آن‌ها در تجزیه مواد آلی ایجادکننده گرفتگی و میکروب‌ها، عملکرد چندمنظوره و کاربردهای گسترده آن در تصفیه آب و پساب در غشاهای بسپاری منتشر شده که این اثر به خوبی در کارهای پژوهشی میائوچی و همکارانش [۴۹] و مدائنی و قائمی [۵۰] و چندین پژوهش دیگر [۵۱ و ۵۲]

1. Dimethyl formamide (DMF)

2. Fuel Cell

3. Phase inversion method

جدول ۳ اصلاح غشاهای پلی سولفونی با نانوذرات فلز/فلز اکسید

ماده غشایی	الف- روش اصلاح به کمک نانوذرات TiO ₂
PES	ترکیب کردن و خودتجمعی [۶۴]
PSf, PVDF, PAN	ترکیب کردن و ترسیب فشاری [۶۵]
Sulfonated PES (s-PES)	خودتجمعی [۵۸]
PES	خودتجمعی [۶۶]
PES	سل- ژل [۶۷]
PSf	ترکیب کردن [۶۸]
PSf	سل- ژل [۶۹]
PES	ترکیب کردن [۷۰]
PSf/Chitosan (CS)	ترکیب کردن نانولوله‌های TiO ₂ [۷۱]
PES	ترکیب کردن نانولوله‌های TiO ₂ [۷۲]
PES	ترکیب کردن [۷۳]
PSf	ترکیب کردن [۷۴]
PES	ترکیب کردن [۵۳]
ماده غشایی	ب- روش اصلاح به کمک نانوذرات SiO ₂
PSf	ترکیب کردن [۷۵]
PES	سل- ژل [۷۶]
PES	ترکیب کردن محلول ZrO ₂ تهیه شده از زیرکونیل کلرید [۷۷]
PSf	ترکیب کردن نانوذرات Fe ₃ O ₄ ، جذب سطحی به کمک آکرلیک اسید مانند سپارش بین سطحی با پلی آمید و نانوذرات آهن اکسید [۷۸]
PES	ترکیب کردن نانوذرات SiO ₂ ، Fe ₃ O ₄ پوشش شده با نانوذرات Fe ₃ O ₄ ، اصلاح آمینه آن و درون محلول ریخته‌گری [۷۹]

اصلاح غشاها بر پایه نانوفناوری کربن

از دهه‌های گذشته، فناوری نانوکربن به دلیل ویژگی متفاوت حیرت‌انگیز در مقایسه با پیش ماده‌های ماکرو یا میکرو آن‌ها، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۸۰]. مواد نانوساختار پایه کربنی مانند گرافن اکسید به دلیل زیادبودن نسبت مساحت به سطح، انعطاف‌پذیری ساختار، تحرک عالی در حمل بار، رسانایی الکتریکی و گرمایی خوبی

به PES، پایداری گرمایی بهبود، استحکام مکانیکی ارتقا و آبدوستی غشاهای چندسازه‌ای افزایش یافت.

مینگل‌یانگ و همکارانش [۶۰] برای تهیه غشا فراسافش PES سولفونه به دلیل پایداری، در دسترس بودن و آبدوستی از TiO₂ استفاده کردند. نتایج بهبودی قابل توجهی را در آبدوستی سطح غشا نشان داد. لیو و همکارانش [۶۱] در پژوهش‌های خود تهیه غشاهای فراسافش چندسازه‌ای آلی-معدنی PES-SiO₂ به روش وارونگی فاز رسوبدهی-غوطه‌وری را بررسی تا از نتایج آن در پیل سوختی H₂/Cl₂ و جایگزینی غشاهای تبادل یونی استفاده کنند. غشا چندسازه‌ای به دست آمده آبدوستی و تخلخل^۱ بالا داشت.

جمشیدی‌گوهری و همکارانش [۶۲] یک غشا بستر مختلط فراسافش منگنز دی‌اکسید آبدار (HMO) در PES را برای حذف Pb(II) تهیه کردند. به دلیل افزایش تخلخل، آبدوستی بیشتر و زبری سطح غشا، شار آب خالص افزایش یافت. نتایج مطالعات جذب نشان داد که PES/HMO قادر به حذف Pb(II) است. جمشیدی‌گوهری و همکارانش [۶۳] در پژوهشی دیگر، به منظور توسعه ویژگی ضد گرفتگی غشا PES، غشاهای بستر مختلط را با وارد کردن نانومواد منگنز دی‌اکسید آبدار در PES به روش رسوبدهی-غوطه‌وری ساختند. نتایج این بررسی نشان داد که HMO آبدوست، موجب ارتقا آبدوستی غشا مختلط PES/HMO، افزایش شار آب نسبت به غشا PES و افزایش مقدار پس‌زنی فاضلاب تهیه شده حاوی ۱۰۰۰ ppm نفت، شده است. در جدول ۳ به صورت خلاصه برخی دیگر از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه آورده شده است.

¹ Porosity

از نانوپندسازه‌های بسپاری مشتقات گرافنی در تهیه غشاهای متفاوت برای کاربردهای تبادل سل سوختی [۹۲]، اولترافاش [۹۳]، نانوصافش [۹۴]، پیش‌تبخیری [۹۵] و جداسازی گاز [۹۶] استفاده شده است. در طی چند سال گذشته، پژوهشگران متعددی مشارکت GO را در بسترهای غشایی بسپاری متداول مانند پلی‌سولفون (PSf)، پلی‌اتر سولفون (PES)، پلی‌وینیلیدن‌دی‌فلوراید (PVDF)، پلی‌آکریلونیتریل (PAN) و هم‌بسپارهای آن‌ها با هدف توسعه غشاهای نانوپندسازه‌ای ضد گرفتگی بررسی کرده‌اند [۹۷ تا ۹۹].

GO به صورت‌های متفاوت مانند غشاهای اصلاح‌شده سطح به کمک GO و غشاهای تهیه شده با اختلاط GO به منظور بهبود ویژگی غشایی برای کاربرد نمک‌زدایی استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داده است که ویژگی متفاوت غشایی مانند مقاومت مکانیکی، ویژگی ضد میکروبی و ضد گرفتگی، انتخاب‌پذیری، شار آب و ویژگی گرمایی و فتوکاتالیستی پس از اختلاط GO به طور قابل توجهی در TFC^۳، RO، NF، UF، MF، زیست‌واکنشگاه‌های غشایی و پیش‌تبخیری نسبت به غشاهای خالص و تنها، بهبود می‌یابد. گزارش عملکرد غشاهای حاوی GO در حذف رنگ‌ها، جداسازی یون‌های یک و دو ظرفیتی، و آب‌گیری از مخلوط‌های حلال و آب مثبت بوده است [۲۵].

رحیمی و همکارانش [۸۶] غشا نانوصافش نوین بستر مختلط پلی‌اتر سولفون حاوی نانوصفحه‌های گرافن اکسید (GO) را ساختند. نتایج نشان داد که پس از افزایش گرافن اکسید به محلول ریخته‌گری شار آب به دلیل آب‌دوستی غشاهای تهیه‌شده، به طور قابل توجهی بهبود و غشاهای بستر مختلط تهیه‌شده ساختار انگشت مانند داشتند. غشاهای حاوی GO ظرفیت لازم برای حذف رنگ قرمز مستقیم ۱۶^۴ را

[۸۱] که دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بسپارها، روش‌های اصلاح غشا با نانوذرات پایه کربنی، مقدار املاح و مواد پس‌زده شده، روش‌های تهیه و روش‌های شناسایی در جدول ۴ آمده است.

مزیت استفاده از GO (با فرم مسطحی که دارد) نسبت به CNTs (همتای لوله‌ای GO) آن است که GO در دو طرف برای عامل‌دار کردن مکان‌های بیشتری دارد [۸۸]. همچنین، در روش‌های تهیه GO، فراورده آب‌دوست از صفحه‌های گرافیت به دست می‌آید، در حالی که CNTs، به طور ذاتی آب‌گریز و بی‌اثرند و از این رو، به اسیدکاری نیاز دارند.

اصلاح غشاها به کمک نانوذرات گرافن اکسید

مواد پایه گرافنی یکی از جدیدترین تحولات مواد در زمینه نانومواد است [۸۹]. گرافن و گرافن اکسید گروهی از نانومواد کربنی با ویژگی چشم‌گیر مانند نسبت بزرگ سطح به وزن، انعطاف‌پذیری، انتقال الکترونی برجسته، ویژگی مکانیکی و گرمایی بسیار مناسب هستند [۲]. صفحه‌های دو بعدی GO پایداری مکانیکی، ویژگی پایداری فیزیکی-شیمیایی قابل قبول و حفرات نانومتری داشته و از این رو، به خوبی کاربردهای آن‌ها را در تصفیه آب توجیه و آن را به یک افزودنی جذاب در تهیه غشاهای چندسازه‌ای تبدیل می‌کند (به‌ویژه برای نانوصافش NF و نمک‌زدایی^۱) [۹۰]. نانوصفحه‌های گرافن اکسید^۲ (GO) دارای اکسیژن فراوان با گروه‌های عاملی (مانند گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل و اپوکسی) هستند و در نتیجه آب‌دوستی بالا و واکنش‌پذیری برای آن‌ها ایجاد می‌شود [۹۱].

1. Desalination

2 Graphene oxide nanosheets

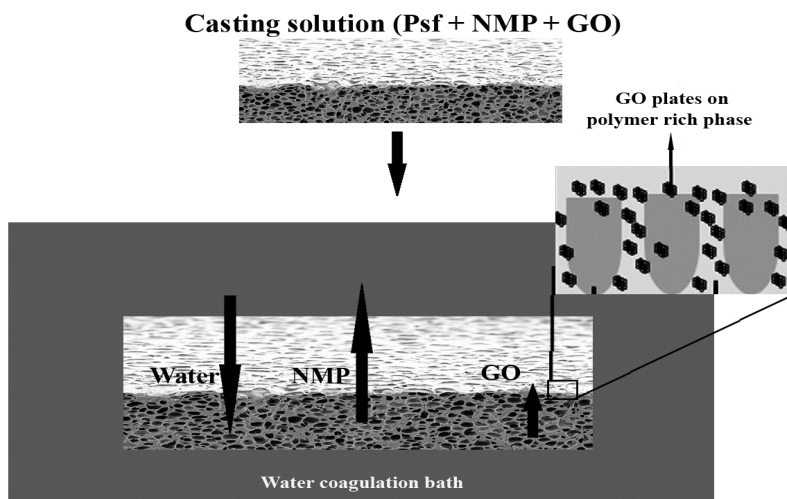
3. Thin-film composite

4. Direct red 16 dye

گانش و همکارانش [۹۴] تهیه غشاهای بستر مختلط GO/PSf را با پراکنده کردن GO در حلال N-متیل پیرولیدون (NMP) و (N-Methyl pyrrolidone (NMP)) و سپس اختلاط آن‌ها در محلول PSf-NMP تهیه کردند. نتایج بررسی نشان داد که عملکرد غشاهای اصلاح شده در پس زنی نمک، شار آب خالص و ویژگی آب دوستی بهبود یافته است. غشا به دست آمده ویژگی مکانیکی مناسب و بازداری نمک در حدود ۷۲٪ در مقابل سدیم سولفات و افزایش شار و آب دوستی داشت. شکل ۶ تصویر کلی تهیه غشا پلی سولفون حاوی گرافن اکسید را نشان می‌دهد.

نسبت به غشاهای PES فاقد GO داشتند. مقاومت غشاها در برابر گرفتگی به کمک صافش محلول پودر شیر نشان داد که از میان غشاهای حاوی GO، غشا حاوی ۰/۵ درصد وزنی GO بهترین ویژگی ضد گرفتگی زیستی، بالاترین میانگین شعاع حفره، تخلخل و شار آب را دارد و نانوصفحه‌های GO، از جمله مواد ضد گرفتگی عالی بوده و کاربردهای جدید این نوع غشا یک امیدواری به حساب می‌آید.

نعمت‌اله‌زاده و همکارانش [۱۰۰] غشاهای نانوجندسازهای پلی سولفون/گرافن اکسید (PSf/GO) را به روش وارونگی فاز تهیه کردند. از غشاهای تهیه شده (PSf و PSf/GO) برای جداسازی متیلن بلو (Methylene blue (MB)) از محلول آبی استفاده شد. غشا چندسازه PSf/GO در مقایسه با غشا PSf، جذب رنگ متیلن بلو بیشتری را نشان داد. با افزایش نسبت GO در غشا PSf به بیش از ۰/۷۵ درصدوزنی، جذب رنگ متیلن بلو تغییر قابل توجهی نکرد. بازده دفع با غشا 1.25% PSf/GO از سایر غشاها بالاتر بود.



شکل ۶ سازوکار NIPS در تهیه غشا پلی سولفون حاوی نانوصفحه‌های گرافن اکسید بر سطح غشا و سطح حفره

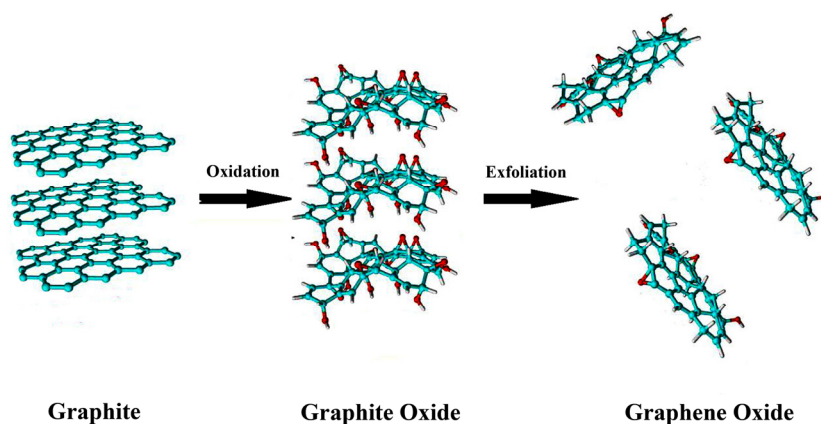
در ساختار غشایی منجر به تشکیل خوشه‌های تجمع یافته می‌شود. این موضوع به دلیل پراکندگی غیرهمسان GO در غلظت‌های بالا بر عملکرد غشاها تأثیر منفی می‌گذارد.

ژانگ و همکارانش [۱۰۱] غشاهای با چارچوب نانومتری گرافن اکسید را برای حذف فلزات سنگین در نانوصافش بررسی کردند. برپایه متون علمی، مقادیر بیش از حد نانومواد

ضدگرفتگی را نشان داد. در پژوهش دیگر، ناصری و همکارانش [۱۰۵] غشا PES فوق‌العاده نازک با پوشش GO را به‌منظور حذف آرسنیک تهیه کردند. نتایج بررسی عملکرد غشا، حاکی از افزایش مقدار حذف آرسنیک بود. هوم و همکارانش [۱۰۶] اصلاح غشاهای میکروصافش PES را با GO به‌منظور حذف رنگ متیلن‌بلو از محلول آبی بررسی کردند. غشا اصلاح‌شده مقدار پس‌زنی بسیار بالاتری را نسبت به غشا اصلاح‌نشده نشان داد و مشخص شد که به‌کارگیری نانوصفحه‌های GO در اصلاح سطح غشا موجب بهبود کارایی آن‌ها شده است. در یک پژوهش، با شبکه‌ای شدن نانوصفحه‌های GO بر روی پشتیبان PES اصلاح‌شده با پلی‌دی‌پامین مقدار شار ۴ تا ۱۰ بار بیشتر از اغلب غشاهای نانوصافش تجاری شد [۱۰۷].

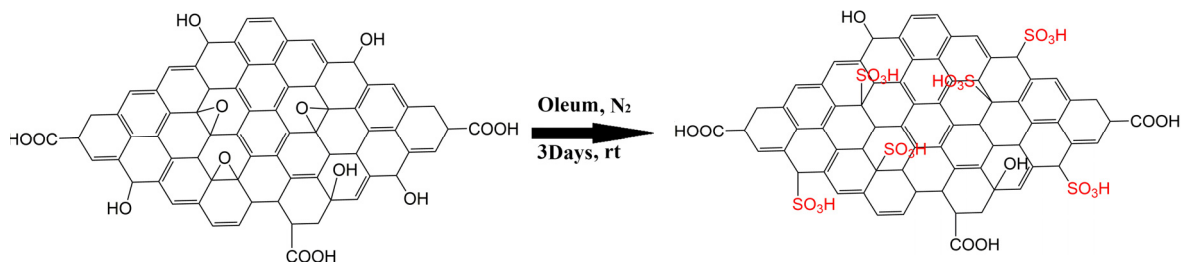
غلامی [۲۵] نانوذرات گرافن‌اکسید و گرافن‌اکسیدسولفونه (Sulfonated graphene oxide) را سنتز و از آن‌ها برای ساخت غشاهای نانوپندسازه PES به روش وارونگی فاز استفاده کرد. گرافن‌اکسید و گرافن‌اکسیدسولفونه به‌ترتیب برپایه شکل‌های ۷ و ۸ تهیه شدند.

زین‌الدینی و همکارانش [۸۶] غشا بستر مختلط نانوصافش PES حاوی نانوصفحه‌های GO با غلظت‌های متفاوت را تولید و با توجه به نتایج بررسی، غشا ۰/۵ درصدوزنی GO بالاترین میانگین شعاع حفره، تخلخل، آب‌دوستی، شار آب خالص و عملکرد ضدگرفتگی را داشت. به‌دلیل تجمع و کاهش مساحت سطح مؤثر نانوصفحه‌های GO در غلظت‌های بالاتر از این مقدار، کاهش این ویژگی‌ها که ناشی از کاهش تعداد گروه‌های عاملی در سطح غشا است، مشاهده می‌شود. در پژوهشی دیگر، مه‌لینگام و همکارانش [۱۰۲] غشاهای اولتراصافش PES جدید را با مقادیر متفاوت نانوذرات GO به‌عنوان پرکننده تهیه و شار بالاتر و ویژگی بازدارندگی خوبی را برای غشاهای اصلاح‌شده مشاهده کردند. گورگوو و همکارانش [۱۰۳] غشاهای اولتراصافش بستر مختلط PES را با نانوذرات GO ساختند. غشاها دارای شار بالاتر، پس‌زنی بیشتر و مقاومت در برابر گرفتگی بهتری نسبت به PES داشتند. در یک کار پژوهشی، جونز و همکارانش [۱۰۴] سطح غشا PES را با روش تابش UV آمینه کردند و سپس سطح غشا را با نانوصفحه‌های GO به‌منظور بهبود ویژگی ضدگرفتگی، پوشش دادند. نتایج به‌دست آمده افزایش ویژگی



شکل ۷ تهیه گرافن اکسید از گرافیت به روش بهبود یافته هامر

درصدوزنی این نانوذرات، کمترین مقادیر کاهش نسبت شار را نشان داد. این نتیجه نشان‌دهنده توانایی ضدگرفتگی بالاتر آن‌هاست. افزون‌براین، پس‌زنی بالای فلزات سنگین (Cr, Cd, Cu و Ni) برای نمونه حاوی ۱ درصدوزنی s-GO، به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از این بررسی نشان داد که نانوذرات GO و به‌ویژه s-GO یک ماده افزودنی عالی به‌عنوان ماده ضدگرفتگی است که برای کاربردهای جدید نویدبخش است.



شکل ۸ تهیه گرافن اکسید سولفونه از گرافن اکسید

میکرومتخلخل)، آب‌دوستی سطح، زبری و بار است. در مقایسه با غشا TFC، غشاهای TFN حاوی GO شار آب خالص بالاتر، نفوذپذیری محلول نمک و پس‌زنی نمک نشان دادند. از همه مهم‌تر، غشا TFN ساخته‌شده از بستر نانوپندسازه‌ای نشان داد که به‌دلیل ویژگی‌های بهبود یافته بستر ناشی از مشارکت نانوصفحه‌های بسیار آب‌دوست و حامل بار منفی GO، آن‌ها به‌عنوان راه حلی امیدوارکننده برای غلبه بر اثر بین شار آب و پس‌زنی نمک غشا TFC مطرح هستند. ایزلور و همکارانش [۹۴] گرافن‌اکسید غشا بستر مختلط پلی‌سولفون را با روش وارونگی فاز تهیه کردند. واردکردن GO به بستر بسیار منجر به افزایش آب‌دوستی، شار آب و ویژگی پس‌زنی نمک Na_2SO_4 شد. همچنین، مشاهده شد که pH محلول خوراک بر عملکرد پس‌زنی

نتایج FTIR نشان داد که با مهاجرت نانوذرات GO و s-GO به بالای سطح، گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل، کربوکسیلیک اسید و حلقه‌های اپوکسی به‌مقدار زیادی در دسترس هستند. عملکرد نانوصافش غشاهای تهیه‌شده به‌کمک بازداری رنگ بررسی شد. به‌روشنی مشاهده شد که پس‌زنی رنگ در مورد غشاهای حاوی ۰/۵ درصدوزنی s-GO نسبت به بالاتر است. همچنین نتایج نشان داد که شار آب خالص غشاهای تهیه‌شده از غشا PES به‌دلیل آب‌دوستی غشا بالاتر است. بستر مختلط PES/s-GO حاوی ۰/۵

لائو و گو [۱۰۸] غشاهای نانوپندسازه لایه نازک (TFN^۱) را با مقادیر متفاوت گرافن اکسید در بستر میکرومتخلخل پلی‌سولفون ساختند و لایه پلی‌آمیدی به‌ترتیب را بر PSf و PSf-GO به‌منظور تولید TFC و غشا TFN با روش بسپارش بین‌سطحی مونومرهای پی‌پرازین و تری‌مزویل کلرید، تشکیل دادند. نتایج نشان داد که افزایش بارگذاری GO در بسترهای PSf می‌تواند علاوه بر تشکیل میکروحفرات بزرگتر، آب‌دوستی بستر را افزایش و منجر به پس‌زنی بیشتر نمک‌های دو ظرفیتی یا چندظرفیتی و نمک‌های تک‌ظرفیتی مانند NaCl نیز بشود. همچنین، نتایج نشان داد که وجود مقدار کمی از GO (۰/۳ درصدوزنی) در بستر PSf قادر به بهبود ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی بستر PSf و لایه انتخابی PA با توجه به ساختار (بستر

نتایج نشان داد که پس‌زنی آرسنیک در غشاهای PSf/GO در مقایسه با غشا PSf خالص به مقدار قابل توجهی به دلیل پدیده دافعه دونان ناشی از بارهای منفی GO سطح غشا افزایش یافت.

ژانگ و همکارانش [۱۱۱] نانوصفحه‌های هیبریدی^۲ (EHT/GO) را از راه رسوبدهی لخته تهیه کردند تا بتواند آن را به‌طور یکنواخت در محلول پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) پراکنده و از آن به‌عنوان فاز آبی در بسپارش بین‌سطحی استفاده کنند. غشاهای هیبریدی پس از مشارکت EHT/GO در غشا PA در مقایسه با غشا NF خالص و غشا NF حاوی GO، ویژگی بار مثبت داشتند. به دلیل اینکه EHT/GO می‌تواند کانال انتقال مطلوب‌تری را برای مولکول‌های آب فراهم کند، شار آب به‌طور چشمگیری بهبود یافت. افزون‌براین، پس‌زنی غشا برای محلول‌های خوراک $MgCl_2$ و Na_2SO_4 یک کاربرد نهانی در نرم‌سازی آب سخت را نشان داد.

اصلاح غشاها به‌کمک نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی نخستین بار در سال ۱۹۹۱ گزارش و به‌عنوان عضوی از خانواده مواد کربنی و در کنار عضو صفر بعدی فولرن‌های کروی با شبکه شش ضلعی کربن یافت شد [۱۱۲]. نانولوله‌های کربنی ویژگی عالی شیمیایی، مکانیکی، گرمایی و جذب سطحی دارند [۱۱۳]. نانولوله‌های کربنی می‌توانند تک‌دیواره ($SWCNT^3$) یا چنددیواره ($MWCNT^4$) باشند. از مزایای نانولوله‌های کربنی (CNTs)، به‌ویژه نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT)، می‌توان به افزایش مقیاس آسان، خلوص بالاتر و هزینه تولید کمتر اشاره کرد [۱۱۴].

در یک کار پژوهشی، سلیک و همکارانش [۱۱۵] غشا چندسازه‌ای PES را به‌روش وارونگی فاز از نانولوله‌های

نمک غشا تأثیر گذاشت و غشا در pH بالاتر، افزایش پس‌زنی نمک را نشان داد. GO نقش عمده‌ای در اصلاح ریخت غشا ایفا کرد. بدان معنا که سطح غشا بار منفی داشت که این بار منفی با گروه‌های عاملی موجود در سطح GO، منتقل می‌شد.

دنگ و همکارانش [۱۰۹] غشا مختلط نوین ضدگرفتگی پلی‌اتر سولفون را به‌روش وارونگی فاز با میدان الکتریکی جریان مستقیم (DC^1) با افزودن غلظت بسیار کم گرافن اکسید تهیه کردند. به‌کمک میدان الکتریکی در غشا مختلط و در مقایسه با غشا PES، نه تنها شار آب خالص بالاتر رفت، بلکه افزایش پس‌زنی متیل‌رد نیز اتفاق افتاد. در غشاهای PES/GO تهیه شده با میدان الکتریکی، نسبت بازیافت شار به‌طور قابل توجهی افزایش و مقدار نسبت گرفتگی برگشت‌ناپذیر به‌حالت فاقد میدان الکتریکی کاهش یافت که نشان‌دهنده توانایی ضدگرفتگی بهبودیافته از میدان الکتریکی در غشاهای مختلط است. نتایج نشان داد که استفاده از میدان الکتریکی روشی مؤثر در دستیابی به عملکرد جداسازی بالای غشاها و توانایی ضدگرفتگی با افزایش بسیار کم غلظت GO است.

ناصری و همکارانش [۱۱۰] غشا نانوجندسازه‌ای پلی‌سولفون/گرافن اکسید را تهیه و مقدار پس‌زنی آرسنات از آب را بررسی کردند. آزمایش‌های نفوذ و زاویه تماس نشان داد که با افزایش GO، آب‌دوستی غشا و شار آب خالص افزایش یافت. وجود گروه‌های عاملی آب‌دوست فراوان بر GO، موجب افزایش قدرت آب‌دوستی و نفوذپذیری غشا شد. با افزایش مقدار GO در محلول ریخته‌گری، ساختار زیر لایه، شکل غشا بهبود، زاویه تماس غشا کاهش، مقدار تخلخل و شار آب خالص افزایش یافت و حفره‌های قطره‌ای شکل در غشا PSf خالص به موازات افزایش تخلخل در غشا PSf/GO به ماکروحفره‌ها تغییر یافت. افزون بر آن،

1. Direct current

2. Exfoliated Hydrothermalite

3. Single-walled carbon nanotube

4. Multi-walled carbon nanotube

(PAA) پیوندزده بر سطح MWCNTs را اصلاح کردند. افزودن مقادیر متفاوت PAA-g-MWCNT (برای مقایسه با MWCNTs و غشا PES) در انتخاب مقدار ۰/۸ درصدوزنی از MWCNTs اصلاح شده به عنوان مقدار بهینه برای بهبود شار آب و پس زنی نمک غشا نتیجه داد و گروه‌های عاملی PAA در PAA-g-MWCNTs علت اصلی پس زنی بیشتر غشا نانوجندسازه بود.

وطن پور و همکارانش [۱۱۸] غشاهای نانوفیلتراسیون نانوجندسازه PES با نانولوله‌های کربنی چنددیواره آمین دار با آمین نامتقارن ورق تخت PES/NH₂-MWCNTs را به روش وارونگی فاز با مقادیر متفاوت نانوپرکننده تهیه کردند. نتایج نشان داد که قراردادن NH₂-MWCNTs به بستر PES موجب افزایش آبدوستی و شار آب غشاها و افزایش pH محلول نمک، موجب بار منفی بیشتر سطح و بازداری بیشتر آن شد.

وانگ و همکارانش [۱۱۹] غشاهای نانوصافش بستر مختلط، PES/CNTs را با روش وارونگی فاز تهیه کردند. CNTs کربوکسیله با اندازه و غلظت متفاوت برای بهبود عملکرد غشاهای NF در بستر بسیار وارد شد و با ورود CNTs، غشاها شار و پس زنی نمک بیشتری را نسبت به غشا PES نشان دادند. غشا PES/CNTs با CNT نازک تر نسبت به غشا با CNT ضخیم تر عملکرد صافش بهتری داشت.

داراموولا و همکارانش [۱۲۰] غشاهای چندسازهای بسیاری را از نانولوله‌های کربنی، پلی سولفون و پلی وینیل الکل تهیه کردند. نتایج نشان داد که غشا PSf با پوشش CNTs بیشترین نفوذپذیری و PSf خالص، کمترین مقدار نفوذپذیری را داشت. غشا تقویت شده fCNTs و پوشش PVA بالاترین پس زنی فنل از پساب را داشت. همچنین، با کاهش فشار و افزایش غلظت CNTs در غشا بسیاری، کاهش پس زنی مشاهده شد. شایان ذکر است که غشا PSf بارگذاری شده با

کربنی چنددیواره برای تصفیه آب و بررسی رفتار گرفتگی با پروتئین BSA ساختند. نتایج نشان داد که جذب غشاهای چندسازهای در مقایسه با غشا PES کمتر بود و غشاهای چندسازهای پتانسیل محدودکننده ضدگرفتگی پروتئین داشتند.

در پژوهشی دیگر، ژانگ و همکارانش [۱۱۶] نانولوله‌های هالوسیت ترکیب شده با نانوذرات نقره را برای اصلاح غشاهای PES به کار بردند. مطالعات بررسی عملکرد غشا نشان داد که شار آب خالص غشا اصلاح شده نسبت به غشا PES بیشتر است.

مدائنی و همکارانش [۸۳] غشا بستر پلی اترسولفون را که بر آن نانولوله‌های کربنی اکسید شده اسیدی چنددیواره (MWCNTs) تعبیه شده بود را تهیه کردند. به دلیل مهاجرت این نانوذرات عامل دار در طی فرایند وارونگی فاز به سطح غشا، آبدوستی غشا مختلط افزایش یافت. نتایج به دست آمده از بررسی عملکرد ضدگرفتگی غشا بستر مختلط PES/MWCNTs، افزایش آبدوستی و شار آب نسبت به غشا PES را نشان داد. زبری سطح غشاها نقش مهمی در مقاومت ضدگرفتگی زیستی غشاهای MWCNT داشت و غشا با زبری کمتر ویژگی ضدگرفتگی بیشتری را نشان داد. رفتار غشاهای مخلوط شده با MWCNT در آزمایش‌های بازداری نمک نشان داد که سازوکار پس زنی نمک سازوکار حذف دونان ناشی از بار منفی سطح غشاهاست. توالی بازداری نمک برای PES/MWCNT پس از ۶۰ دقیقه صافش به صورت: Na₂SO₄ (75%) > MgSO₄ (42%) > NaCl (17%) بود.

در یک پژوهش مهدوی و همکارانش [۱۱۷] نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) به کمک بسپارش درجا محلول آبی اکریلیک اسید (AA) در حضور پتاسیم پرسولفات (KPS) به عنوان آغازگر و اتیلن گلیکول (EG) در نقش عامل شبکه‌ای کردن برای دستیابی به پلی آکریلیک اسید

[۱۲۲]. جهانشاهی و همکارانش [۴۲] غشاهای جدید نانوصافش چندسازه پلی‌اتر سولفون/پلی‌وینیل الکل/TiO₂ را با پوشش‌دهی از راه غوطه‌وری غشا PES در محلول آبی PVA و نانوذرات TiO₂ تهیه کردند. از گلو تار آل‌دئید (GA) به‌عنوان عامل شبکه‌ای‌شدن برای غشا بسپاری چندسازه‌ای به‌منظور تقویت مقاومت شیمیایی، گرمایی و مکانیکی استفاده شد. عملکرد غشاها، از نظر شار نفوذی، پس‌زنی یون بررسی و مشخص شد که افزایش غلظت محلول TiO₂ می‌تواند بر ریخت سطح و عملکرد صافش غشاهای پوشش داده شده بسیار تأثیر بگذارد. ویژگی آب‌دوستی غشا چندسازه‌ای PVA/PES با پوشش نانوذرات TiO₂ به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافت. به‌عنوان نتیجه نهایی، پس‌زنی NaCl به‌طور قابل‌توجهی برای غشا اصلاح‌شده نسبت به غشا اصلاح‌نشده با TiO₂ بهبود یافت.

تانگ و وو [۱۱۲] غشا هیبریدی بر پایه پلی‌سولفون را با تزریق نانوهیبرید SiO₂-GO توسعه دادند. غشاهای ترکیبی با پس‌زنی آلبومین تخم مرغ به‌مقدار بالا، نفوذپذیری آب را بهبود داد. در مقایسه با غشاهای هیبریدی SiO₂/PSf و GO/PSf، غشا هیبریدی SiO₂-GO/PSf بهترین ویژگی از جمله مقدار شار آب، پس‌زنی پروتئین و توانایی ضدگرفتگی را به‌عنوان نتیجه ویژگی بی‌همتای SiO₂-GO نانوهیبرید ارائه داد که در مورد نانوهیبرید SiO₂-GO می‌توان گفت سیلیکا به‌طور متراکم و یکنواخت در سطح GO پراکنده و موجب آب‌دوستی زیاد SiO₂-GO می‌شود. محمد و همکارانش [۱۲۳] غشاهای هیبریدی بر پایه PSf را به‌کمک GO آغشته به نقره ساختند. آب‌دوستی، شار آب خالص، و پس‌زنی برای همه غشاهای نانوهیبریدی (غشا بستر مختلط) افزایش یافت. نتایج به‌دست آمده از این بررسی نشان داد که با زاویه تماس کمتر، شار و تخلخل بالاتر شد. همچنین، غشاهای نانوهیبریدی ویژگی ضدباکتریایی^۲ بسیار

fCNTs و پوشش PVA پس‌زنی (۹۹/۸٪) را برای نفت سفید و بنزین و پس‌زنی به مقدار ۶۵٪ را برای فنل نشان داد.

مامبا و همکارانش [۱۲۱] سه نوع نانولوله کربنی نیتروژن‌دار fN-CNTs، CNTs (fCNTs) و (CNT) فسفردار fP-CNTs به‌عنوان افزودنی‌های عامل‌دار را برای اصلاح غشا PSf به کار بردند و بهبود عملکرد آن‌ها در عامل‌هایی مانند شار و پس‌زنی املاح ناشی از ایجاد ساختارهای انگشتی و افزایش تخلخل غشا و اندازه حفره‌ها را مشاهده کردند. شار آب و پس‌زنی نمک به‌دلیل افزایش اندازه حفره و ماکرو حفره‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت.

اصلاح غشاها به‌کمک نانوذرات تلفیقی/ترکیبی آلی- معدنی

در حالی که پژوهش و توسعه بر نانوذرات پایه کربنی عامل‌دار شده ادامه دارد، پژوهش بر نانومواد نوین از ترکیب مواد (چندسازه‌ها) مانند Ag-SiO₂، TiO₂-SiO₂ و GO-TiO₂ نیز در جریان است [۸۰]. با افزایش تقاضای مواد جدید برای مقابله با بحران‌های آب و انرژی و پایداری محیط زیست، به‌طور کامل بر نوع جدیدی از نانوذرات ترکیبی با ویژگی تقویت‌شده در مقایسه با نانوذرات منفرد توسط بسیاری از پژوهشگران علوم شیمی و مواد، کار شده است. برای مثال، می‌توان به پوشش نانوذرات بر میکروسفرها، تزئین نانوذرات با دیگر نانومواد، مشارکت نانوذرات با سایر نانومواد، عامل‌داری نانوذرات و غیره اشاره کرد [۴].

اصلاح غشاها به‌کمک نانوذرات تلفیقی/ترکیبی حاوی GO به‌تازگی، مواد چندسازه حاوی گرافن (گرافن/TiO₂) به‌عنوان کاتالیست‌های نوری برای تصفیه آلاینده‌ها و جلوگیری از ریزاندامگان^۱ها در آب و هوا ساخته شده‌اند

تجزیه رنگ برلیان سیاه^۲ شد. با توجه به شار زیاد، ویژگی فوتوکاتالیستی و ویژگی پس‌زنی غشاها در فشارهای کم، این غشاها را برای کاربرد با انرژی کم در مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه که آب در آن‌ها بدون هیچ‌گونه روش تصفیه استفاده می‌شود، مناسب است.

مهلنگو و همکارانش [۱۲۶] همچنین، غشاهای پلی‌اتر سولفون اصلاح‌شده GO-ZnO و پلی‌وینیل‌پیرولیدون^۳ (PVP) را برای احیا پساب ساختند. GO-ZnO و PVP موجب افزایش نفوذپذیری آب خالص، آب‌دوستی و استحکام کششی غشا شد در حالی‌که پس‌زنی نمک اندکی افزایش و پس‌زنی ترکیبات آلی کل (TOCs) و ویژگی ضدگرفتگی بهبود یافت. در مقایسه با غشاهای تجاری در شرایط آزمایشگاهی مشابه، غشاهای نوین شار بیشتر، گرفتگی کمتر و پس‌زنی بیشتر TOCs را داشتند. بنابراین، غشاهای جدید GO-ZnO پتانسیل رقابت با غشاهای تجاری برای احیای پساب را دارند و برای کاربردهای کم انرژی و تصفیه پساب آلوده به داروها مناسب هستند.

محمد و همکارانش [۱۲۷] غشاهای نانوهیبریدی به‌دست آمده از دو نانوذره ZnO و GO-ZnO را با جاسازی درصدهای متفاوتی از نانوذرات ZnO و GO-ZnO ساختند. عملکرد این دو غشا مانند بهبود آب‌دوستی، نفوذپذیری و تخلخل زیاد، سرعت پس‌زنی هیومیک اسید^۴ مانند ضدگرفتگی خوب و کنترل ضدباکتریایی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافت. نتیجه گرفته شد که ترکیب نانوذره ZnO و نانوذره کامپوزیتی ZnO-GO در غشاهای PSf رویکردی پیشرفته در ایجاد غشاهای بهتر با آب‌دوستی قابل‌توجه و افزایش کنترل گرفتگی است که برای کاربردهای متفاوت جداسازی و تصفیه مناسب است.

عالی از خود نشان دادند که می‌تواند تشکیل گرفتگی زیستی را به تأخیر انداخته و یا مانع از تشکیل آن بر سطح غشاها شود تا فرصتی را برای کاربردهای جدید در آینده فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که نانوصفحه‌های گرافنی آغشته به نقره یک ماده نانوپرکننده عالی هستند که نویدبخش کاربردهای جدید برای غشاهای PSf است.

دیزجه و همکارانش [۱۲۴] غشاهای چندسازه‌ای پلی‌اتر سولفون را از ترکیب با GO و TiO₂ و ZnO تهیه کردند. نتایج بررسی عملکرد نشان داد کربوکسیلیک‌اسید، هیدروکسیل و سایر گروه‌های عاملی تشکیل‌شده بر گرافن، آب‌دوستی را تأمین و شار آب را افزایش دادند. GO عامل‌دارشده با غشا چندسازه‌ای ZnO، موجب آب‌دوستی بیشتر غشا PES شد اما شار آب غشا GO عامل‌دارشده با TiO₂ کاهش یافت که این نتیجه ناشی از انسداد حفره‌های غشا با نانوذرات TiO₂ است. کمترین مقدار شار از غشاهای عامل‌دارشده با GO-TiO₂ به‌دست آمد. سرعت بازیابی شار غشا عامل‌دارشده بیش از پنج برابر غشا تنها بود و بهبود قابل‌توجهی در جلوگیری از گرفتگی زیستی در GO و غشا چندسازه‌ای GO عامل‌دارشده مشاهده شد. از این بررسی نتیجه گرفته شد که GO ماده ضدگرفتگی عالی بود. همچنین، عامل‌داری این غشاها ویژگی آب‌دوستی غشاها را نسبت به غشا PES بهبود می‌بخشد.

مهلنگو و همکارانش [۱۲۵] با هدف ساختن غشاهای پلی‌اتر سولفون مورد استفاده در تصفیه پساب دارویی، غشاهای ترکیبی GO-ZnO و PES را تهیه کردند. نتایج بررسی عملکرد نشان داد GO-ZnO موجب افزایش آب‌دوستی و نفوذپذیری آب خالص غشا شد. پس‌زنی ترکیبات آلی کل (TOCs^۱) و ضدگرفتگی بهبود یافت. مقاومت در برابر گرفتگی غشاهای GO-ZnO/PES موجب

1. Total organic compounds

2. Brilliant Black

3. Polyvinyl pyrrolidone

4. Humic acid

مشاهده و به دلیل مهاجرت نانوصفحه‌های چندسازه‌ای GOC به بالای سطح و پراکندگی کامل آن‌ها، غشاهای تهیه‌شده، سطحی صافتر در مقایسه با PES و غشا حاوی GO داشتند. به دلیل کاهش تخلخل و وجود مکان‌های فعال‌تر برای جذب، پس‌زنی آن به شدت افزایش یافت. با توجه به پراکندگی غیریکنواخت GOCs، غشاهای یادشده عملکرد ضدگرفتگی بهتری نسبت به غشاهای حاوی GO داشتند.

مهدوی و همکارانش [۱۲۹] غشا RO نوین ZGO/TFN را تهیه و عملکرد غشا بهبود یافته در نتیجه ترکیب با ZGO را بررسی کردند. نتایج به دست آمده از آزمایش تماس نشان داد که سطح غشاهای ZGO/TFN زبری کمتر، آبدوستی بیشتر و زاویه تماس کمتری را در مقایسه با غشا TFC و غشاهای GO/TFN دارند. بارگذاری زیاد ZGO منجر به کاهش شار آب شد که به مقاومت هیدرولیکی اضافی ناشی از مقدار زیاد نانوصفحه‌های ZGO نسبت داده می‌شود. وقتی از نانوذرات ZGO در غشا TFN استفاده شد، اثرات منفی آن (کاهش پس‌زنی نمک و افزایش زبری سطح) که به تمایل تجمع نانوذرات بر عملکرد غشا اشاره دارد، در مقایسه با نانوذرات GO کاهش یافت. سادگی اختلاط بسپارهای زوج-یون به لایه نازک غشا TFC/RO از راه GO اصلاح‌شده زوج-یونی نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌تواند انتخاب امیدوارکننده برای محدودسازی گرفتگی غشا TFC برای کاربردهای تصفیه آب باشد.

محمدی و همکارانش [۸] غشاهای هیبریدی باردار مثبت TETA-MWCNT نانوفیلتراسیون PES با مشارکت MWCNT عامل‌دار (TETA) را با موفقیت ساختند. در مقایسه با غشا PES، شار آب خالص غشا ترکیبی TETA-MWCNT/PES بیش از دو برابر افزایش یافت. پس‌زنی بسیار زیاد دو رنگ کاتیونی و دو رنگ آنیونی، نشانه توانایی چشمگیر غشا در حذف رنگ و به‌ویژه برای کاربردهای فرایند رنگ کاتیونی نساجی است. در سال‌های

زور و همکارانش [۸۷] به کمک روش تهیه سبز، چندسازه PANI/tGO را تولید و غشا بر پایه را ساختند. چندسازه PANI/tGO سازگاری مناسبی را با اجزاء بسپاری به نمایش گذاشت و منجر به تراکم کمی شد. غشا چندسازه‌ای نشان داد که شار آب خالص به دلیل افزایش آبدوستی غشا بالاتر از غشا PSf است. آزمایش‌ها نشان داد که چندسازه PANI/tGO اصلاح‌کننده خوبی برای پس‌زنی نمک است. همچنین، این مسیر تهیه آزمایشی، ساده و سریع بوده و انتظار می‌رود که بستری امیدوارکننده برای ادغام صفحه‌های گرافن با سایر بسپارها برای تهیه چندسازه‌های نوین گرافن/بسپار و تولید غشا چندسازه‌ای پایه گرافنی با استفاده از آنزیم‌های متفاوت و تکپارهای قابل بسپارش باشد.

مقدسی و همکارانش [۱۱] غشا نانوصافش بستر مختلط پلی‌اتر سولفون را به روش وارونگی فاز تهیه کردند. نانوصفحه‌های پلی‌آنیلین/گرافن اکسید (PANI/GO) را به‌عنوان ماده افزودنی در تهیه غشا به کار بردند. پس‌زنی نمک با افزودن نانوصفحه‌های PANI/GO به شدت افزایش و به‌طور معناداری مقدار پس‌زنی نمک غشاهای تهیه‌شده را برای اصلاح PES بهبود بخشید. استحکام کششی غشا با افزایش غلظت PANI/GO در غشا بستر مختلط برپایه PES بهبود و به‌طور قابل‌توجهی قدرت مکانیکی غشاها را افزایش داد. تخلخل غشایی نیز با نانوصفحه‌های PANI/GO افزایش یافت. غشا اصلاح‌شده حاوی نانوصفحه‌های PANI/GO، ویژگی ضدگرفتگی مناسبی را نشان داد.

واندربروگن و همکارانش [۱۲۸] غشاهای نانوصافش نوین با عملکرد برجسته و ویژگی ضدگرفتگی را از مشارکت نانوصفحه‌های چندسازه‌ی گرافن اکسید/کیتوسان (GOC) ساختند. نتایج نشان داد که آبدوستی غشا برای کل غلظت‌های نانوصفحه‌های GOC افزایش یافت. بهبود قابل‌توجهی در مقدار شار آب خالص و ویژگی ضدگرفتگی

اخیر، مواد چندسازهای حاوی گرافن (گرافن/ TiO_2) به عنوان کاتالیست‌های نوری برای تصفیه آلاینده‌ها و جلوگیری از میکروارگانیسم‌ها در آب و هوا ساخته شده‌اند [۱۲۳]. گائو و همکارانش [۱۳۰] غشا تجاری PSf را به کمک TiO_2 و GO اصلاح و تصفیه پساب را با متیلن آبی به عنوان یک آلاینده ارگانیک بررسی کردند. همچنین، شار در غشاهای پلی‌سولفونی که سطحشان با TiO_2 و GO اصلاح شده بود به طور قابل توجهی افزایش و تخریب آلاینده‌ها نیز افزایش یافت.

اصلاح غشاها به کمک نانوذرات تلفیقی/ترکیبی حاوی CNTs

مادائی و همکارانش [۱۳۱] نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) عامل‌دار اسیدی را در واکنش سه بسپار آبدوست اصلاح کردند. برای دستیابی به تعداد بیشتری از گروه‌های عاملی بر MWCNTs، سیتریک اسید (CA)، اکریلیک اسید (AA) و آکریل‌امید (AAM) بر MWCNTs عامل‌دار بسپارش شدند. برپایه نتایج به دست آمده غشاهای بستر مختلط، شار آب خالص بالاتری را نسبت به غشا PES نشان دادند. شار آب خالص بالاتر با افزودن مقدار ثابتی از PAA و PAAM و MWCNT اصلاح شده به بستر غشا، به دست آمد. آبدوستی غشا نانوجندسازه اصلاح شده PES/MWCNT در هر سه بسپار بهبود یافت. پلی‌سیتریک اسید پرشاخه (PCA) بر MWCNTs با تعداد زیادی از گروه‌های عاملی به طور قابل توجهی مقاومت در برابر گرفتگی غشا را در مورد پروتئین‌های آب پنی‌ر بهبود بخشید. پراکندگی مؤثر PCA اصلاح شده بر MWCNT و وجود دندیم‌های PCA در MWCNT با بسیاری از گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل دندیم‌ر تشکیل داده که منجر به آبدوستی بهتر در غشا PES شده و در محلول ریخته‌گری منجر به آبدوستی و صافی سطح غشا و در نتیجه نسبت بالاتر بازافت شار شد.

زین‌الدینی و همکارانش [۱۳۲] نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) پوشش‌دهی شده با نانوذرات روی اکسید (ZnO) با بستر پلی‌اتر سولفون را به منظور بررسی تأثیرات غشا نانوجندسازه تهیه شده بر عملکرد و ویژگی ضدگرفتگی زیستی ترکیب تهیه کردند. شار آب خالص غشا نانوجندسازه پس از افزودن ZnO/MWCNTs به طور قابل توجهی بهبود یافت. همچنین، غشا توانایی بازداری رنگ قرمز مستقیم ۱۶ بیشتری را نسبت به PES تنها داشت. به دلیل کاهش زبری سطح غشا و افزایش آبدوستی، ویژگی ضدگرفتگی غشاهای حاوی نانوذره افزایش یافت. بررسی ضدگرفتگی زیستی با صافش لجن فعال نشان داد که غشا به دست آمده به دلیل آبدوستی زیاد و زبری سطح کم القایی شده از نانوذرات قرارداده شده، بهترین ویژگی ضدگرفتگی زیستی را دارد و ممکن است به ماده غشایی مناسبی در زیست‌واکنشگاه غشایی (MBR^1) تبدیل شود.

نتیجه‌گیری

با بررسی مقاله‌های علمی، به روشنی مشاهده می‌شود که زمینه پژوهشی نانوصافش مورد توجه زیادی قرار گرفته است. موضوعات اصلی مورد علاقه در این زمینه، فرایندهای مربوط به آب شامل تصفیه پساب و تولید آب تمیز، ساخت غشا و اصلاح سطح غشایی بوده است.

در این مقاله مروری، به فرایند NF به عنوان یکی از فرایندهای برپایه فشار (MF، UF، NF و RO) در قالب تمایل به گرفتگی و کنترل گرفتگی به عنوان یک پدیده طبیعی به کمک غشاهای اصلاح شده پرداخته و مشخص شد که غشاهای NF می‌توانند برای تصفیه آب و از بین بردن آلاینده‌ها و مواد آلی مانند مواد آلی طبیعی، سموم دفع آفات، اورانیم محلول، آرسنیت، کرومات و سایر فلزها استفاده شوند و در تصفیه آب و پساب، نمک‌زدایی، داروسازی، زیست‌فناوری و مواد غذایی مناسب

به کمک روش‌های متفاوت اصلاح مانند پیوندزدن، پوشش دادن، شبکه‌ای شدن و آلیاژ کردن انجام شود. آب‌دوستی عاملی مهم به منظور ارتقاء سطح غشا پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون برای به حداقل رساندن گرفتگی است. آلیاژ کردن ساده‌ترین روش است، ولی با توجه به محدودیت امتزاج‌پذیری بسپارهای آب‌گریز و آب‌دوست، کاربرد آن محدود است. در میان روش‌های متفاوت، روش آلیاژ کردن ارزاترین روش و روشی مؤثر به منظور بهبود غشا پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون از راه مشارکت مواد است. روش‌های اصلاح ترکیبی می‌توانند ابزاری مفید و همه‌کاره برای بهبود بی‌همتای ویژگی آب‌دوستی باشد. این مقاله، بررسی جامعی را بر غشاهای بستر مختلط بسپاری (MMM)، ساخت غشا با بسپارهای متفاوت و پرکننده‌های متفاوت آلی و معدنی، ویژگی‌ها و ارتباط آن‌ها، انجام داد. غشاهای بستر مختلط چندسازه‌ای بسپاری، پتانسیلی قوی برای کاربرد در زمینه‌های متنوعی همچون پزشکی، کاتالیست و الکتروشیمیایی دارند.

از دهه گذشته تا به حال نانوذرات TiO_2 به اندازه کافی به کار گرفته شده و باید در استفاده از آن‌ها به عنوان مواد ترکیبی با پرکننده‌های معدنی مانند SiO_2 ، Al_2O_3 و پرکننده‌های آلی مانند GO، MWCNT و فلزها و اکسیدهای فلزی Ag و زئولیت و MOFs به طور گسترده در MMM تلاش شود. نانوذرات اکسید فلزی می‌تواند برای آب‌دوستی سطح غشا و برای بهبود عملکرد ضد گرفتگی استفاده شوند. عامل دار شدن نانومواد پایه کربنی مانند گرافن، گرافن اکسید و نانولوله‌های کربنی به کمک نانوذرات فلز/اکسید فلز، می‌تواند به خوبی موجب ارتقاء ویژگی کاتالیستی و ویژگی آب‌دوستی آن‌ها شود. گرافن و CNT از مهم‌ترین پرکننده‌های آلی با وزن مخصوص کم، قیمت پایین و طبیعتی تجدیدپذیر، هستند. همچنین، امروزه با توجه به ساختارهای متخلخل متنوع و مساحت سطح بالاتر، چارچوب‌های فلزی-آلی (MOF) در مقایسه با پرکننده‌های معمولی، نظرات قابل توجهی را به خود جلب کرده و برای

باشند. روش‌های ساخت غشاهای NF به دلیل انتخاب‌پذیری بهتر، شار بهبود یافته و ویژگی ضد گرفتگی بهتر عمل کرده‌اند. هنوز هم روش اصلی ساخت غشاهای NF بر پایه بسپارش بین‌سطحی در تولید غشاهای چندسازه‌ای لایه نازک یا نانوجندسازه استوار و ورود نانومواد در لایه نازک تأثیر معناداری بر عملکرد غشایی داشته است. سازوکار جداسازی NF بیشتر برخاسته از اثرات فضایی و بار است. بیشتر مدل‌سازی‌ها در NF با مدل‌های مبتنی بر معادله توسعه یافته نرنست-پلانک صورت گرفته است. یک مدل خوب منجر به پیش‌بینی بهتر و بهینه‌سازی فرایندهای غشایی NF خواهد شد. در حال حاضر، گرفتگی غشا هنوز هم بزرگترین چالش و مهم‌ترین مانع در اجرای گسترده فرایندهای غشایی است و به مقدار قابل توجهی عملکرد غشا را کاهش، هزینه‌های عملیاتی را افزایش و عمر غشا را کوتاه می‌کند. متأسفانه، به صفررسانی گرفتگی غشا غیرممکن است اما به کمینه‌رساندن گرفتگی غشا می‌تواند به صورتی کارآمد، انجام شود.

شایان ذکر است به دلیل ویژگی‌هایی مانند مقاومت شیمیایی عالی، حلالیت در برخی حلال‌های قطبی آپروتیک، پایداری اکسایشی، گرمایی، هیدرولیتیکی، پایداری شیمیایی و مکانیکی به دلیل حضور گروه‌های آروماتیک در پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون در ساخت غشاها، حدود ۷۰٪ نشریات مرتبط با اصلاح غشا پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون بر بهبود ویژگی ضد گرفتگی تمرکز یافته‌اند. در دهه‌های اخیر و به ویژه در دهه گذشته، برای بهبود ویژگی ضد گرفتگی غشاهای پلی‌سولفون/پلی‌اترسولفون به روش‌های متفاوتی اصلاح شده اما سه روش متمایز اصلاح غشاها می‌تواند اصلاح توده، اصلاح سطح و آلیاژ کردن باشد. اصلاح توده می‌تواند با کربوکسیل دار شدن انجام شود، ولی بیشتر از سولفون‌شدن استفاده می‌شود. در مورد غشاهای تجاری بیشتر از روش‌های اصلاح توده در زمان تهیه استفاده می‌شود. اصلاح سطح غشا بیشتر یکی از روش‌های مورد استفاده برای افزایش مقاومت غشا در برابر گرفتگی است. بهبود آب‌دوستی می‌تواند

به دلیل ماهیت چندمنظوره و ویژگی قابل توجه، موجب پژوهش‌های جدید و اختراع نانومواد نوین و انواع بسپارهای مصنوعی شده است. بنابراین، نوآوری در روش‌های فرایندهای غشایی برای دستیابی به رفتار مناسب مواد در مقیاس نانو، ضروری است.

کاربردهای مهمی مانند کاتالیست مولکولی انتخابگر اندازه، جذب/ذخیره‌سازی گاز، جذب مولکول‌های آلی، به عنوان حامل ماده میدل پروتون استفاده می‌شوند. MOFs به عنوان موادی بسیار مناسب برای رقابت با نانومواد پایه کربنی در کاربردهای غشایی در حال ظهور هستند. در یک نتیجه گیری، باید گفت غشا چندسازه‌ای با نانوپرکننده آلی یا معدنی

مراجع

- [1] Lee, K.P.; Arnot, T.C.; Mattia, D.; J. Membr. Sci. 370, 1-22, 2011.
- [2] Lee, A.; Elam, J.W.; Darling, S.B.; Environ. Sci. Water Res. Technol 2(1), 17-42, 2016.
- [3] Liu, Y.; Zhang, S.; Wang, G.; Desalination 316, 127-136, 2013.
- [4] Jhaveri, J.-H.; Murthy, Z.V.P.; Desal. Water Treat. 57(55), 1-17, 2016.
- [5] Wang, B.; Liang, W.; Guo, Z.; Liu, W.; Chem. Soc. Rev. 44, 336-361, 2015.
- [6] Shi, Q.; Su, Y.L.; Jian, Z.Y.; J. Membr. Sci. 319, 271-278, 2008.
- [7] Mohammad, A.W.; Teow, Y.H.; Ang, W.L.; Chung, Y.T.; Oatley-Radcliffe, D.L.; Hilal, N.; Desalination 356, 226-254, 2015.
- [8] Peydayesh, M.; Mohammadi, T.; Bakhtiari, O.; Sep. Purif. Technol. 194, 488-502, 2018.
- [9] Soyekwo, F.; Zhang, Q.G.; Deng, C.; Gong, Y.; Zhu, A.M.; Liu, Q.L.; J. Membr. Sci. 454, 339-345, 2014.
- [10] Rakhshan, N.; Pakizeh, M.; Korean J. Chem. Eng. 32, 2524-2533, 2015.
- [11] Moochani, M.; Moghadassi, A.; Hosseini, S.M.; Bagheripour, E.; Parvizian, F.; Korean J. Chem. Eng. 33(9), 2674-2683, 2016.
- [12] Pedicini, R.; Carbone, A.; Saccà, A.; Gatto, I.; Di Marco, G.; Passalacqua, E.; Polym. Test 27(2), 248-259, 2008.
- [13] Barth, C.; Gonçalves, M.C.; Pires, A.T.N.; Roeder, J.; Wolf, B.A.; J Membr Sci. 169(2), 287-299, 2000.
- [14] Liu, S.X.; Kim, J.T.; J Adhes. Sci. Technol. 25(1-3), 193-212, 2012.
- [15] Wang, Y.; Su, Y.; Sun, Q.; Ma, X.; Ma, X.; Jiang Z.; J. Membr. Sci. 282(1-2), 44-51, 2006a.
- [16] Boussu, K.; Van der Bruggen, B.; Volodin, A.; Van Haesendonck, C.; Delcour, J.A.; Van der Meeren, P.; Vandecasteele, C.; Desalination 191(1-3), 245-253, 2006.
- [17] Razali, N.F.; Mohammad, A.W.; Hilal, N.; Leo, C.P.; Alam, J.; Desalination 311, 182-191, 2013.
- [18] Stengaard, F.F.; J. Membr. Sci. 36, 251-275, 1988.
- [19] Khulbe, K.C.; Feng, C.; Matsuura, T.; J Appl Polym Sci. 115(2), 855-895, 2010.
- [20] Zhao, C.; Xue, J.; Ran, F.; Sun, S.; Prog. Mater Sci. 58, 76-150, 2013.
- [21] Zhao, W.; Su, Y.; Li, C.; Shi, Q.; Ning, X.; Jiang, Z.; J. Membr. Sci. 318(1-2), 405-412, 2008.
- [22] Van der Bruggen, B.; J Appl Polym Sci. 114, 630-642, 2009.
- [23] Huang, J.; Wang, H.; Zhang, K.; Desalination 336, 8-17, 2014.
- [24] Chowdhury, S.R.; Kumar, P.; Bhattacharya, P.K.; Kumar, A.; Sep. Purif. Technol. 24, 271-282, 2001.
- [25] Gholami, N.; Mahdavi, H.; Adv Polym Technol. 37, 8, 3529-3541, 2018.
- [26] Mahdavi, H.; Heidari, A.A.; Polym Adv Technol. 29, 2, 989-1001, 2018.
- [27] Peeva, P.D.; Pieper, T.; Ulbricht, M.; J. Membr. Sci. 362, 1-2, 560-568, 2010.

- [28] Keszler, B.; Kova'cs, G.; To'th, A.; Berto'li, I.; Hegyi, M.; *J Membr. Sci.* 62, 201-210, 1991.
- [29] Zhao, X.; Su, Y.; Chen, W.; Peng, J.; Jiang, Z.; *J. Membr. Sci.* 382(1-2), 222-230, 2011.
- [30] Qin, H.; Sun, C.; He, C.; Wang, D.; Cheng, C.; Nie, S.; Sun, S.; Zhao, C.; *J. Membr. Sci.* 468, 172-183, 2014.
- [31] Mahdavi, H.; Kazemi Shariat Panahi, M.; Shahalizade, T.; *Polym. Bull.* 75, 5677-5694, 2018.
- [32] Mahdavi, H.; Moradi-Garakani, F.; *Chemical Engineering Research and Design* 125, 156-165, 2017.
- [33] Mahdavi, H.; Ardeshiri, F.; *J. Iran. Chem. Soc.* 13, 873-880, 2016.
- [34] Mahdavi, H.; Razmi, F.; Shahalizade, T.; *Sep. Purif. Technol.* 162, 37-44, 2016.
- [35] Mahdavi, H.; Heidari, A.A.; *Polym Adv Technol.* 29(2), 989-1001, 2018.
- [36] Mahmoudian, M.; Ghasemi Kochameshki, M.; Mahdavi, H.; Vahabi, H.; Enayati, M.; *Polym Adv Technol.* 29, 2690-2700, 2018.
- [37] Mahdavi, H.; Hosseinzadeh, M.T.; Shahalizade, T.; *J IRAN CHEM SOC.* 12, 1465-1472, 2015.
- [38] Mahdavi, H.; Mahmoudian, M.; Shikhasani, F.; *Polymer Science, Ser. B.* 56(4), 494-503, 2014.
- [39] Mahdavi, H.; Mahmoudian, M.; *J IRAN CHEM SOC.* 11, 1275-1285, 2014.
- [40] Ma, X.; Su, Y.; Sun, Q.; Wang, Y.; Jiang, Z.; *J. Membr. Sci.* 300, 71-78, 2007.
- [41] Yu, H.; Cao, Y.; Kang, G.; Liu, J.; Li, M.; Yuan, Q.; *J. Membr. Sci.* 342, 6-13, 2009.
- [42] Pourjafar, S.; Rahimpour, A.; Jahanshahi, M.; *J. Ind. Eng. Chem.* 18, 1398-1405, 2012.
- [43] Boricha, A.G.; Murthy, Z.V.P.; *J. Appl. Polym. Sci.* 110, 3596-3605, 2008.
- [44] Boricha, A.G.; Murthy, Z.V.P.; *J. Membr. Sci.* 339, 239-249, 2009.
- [45] Luo, M.-l.; Tang, W.; Zhao, J.-q.; Pu, C.-s.; *J. Mater. Process. Technol.* 172, 431-436, 2006.
- [46] Garcia-ivars, J.; Iborra-clar, M.; Alcaina-miranda, M.; *Sep. Purif. Technol.* 135, 88-99, 2014.
- [47] Das, R.; Ali, M.E.; Hamid, S.B.A.; Ramakrishna, S.; Chowdhury, Z.Z.; *Desalination* 336, 97-109, 2014.
- [48] Khorshidi, B.; Hajinasiri, J.; Sadrzadeh, M.; *J. Membr. Sci.* 500, 151-160, 2016.
- [49] Miyauchi, M.; Nakajima, A.; Watanabe, T.; Hashimoto, K.; *Chem. Mater.* 14, 6, 2812-2816, 2002.
- [50] Madaeni, S.S.; Ghaemi, N.; *J. Membr. Sci.* 303, 221-233, 2007.
- [51] Zhang, X.W.; Wang, D.K.; Lopezn, D.R.S.; da Costa, J.C.D.; *Chem. Eng. J.* 236, 314-322, 2014.
- [52] Kanakaraju, D.; Glass, B.D.; Oelgemoller, M.; *Environ. Chem. Lett.* 12, 27-47, 2014.
- [53] Balta, S.; Sotto, A.; Luis, P.; Benea, L.; Van der Bruggen, B.; Kim, J.; *J. Membr. Sci.* 389, 155-161, 2012.
- [54] Hess, S.C.; Kohll, A.X.; Raso, R.A.; Schumacher, C.M.; Grass, R.N.; Stark, W.J.; *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 7(1), 611-617, 2015.
- [55] Yang, Y.; Zhang, H.; Wang, P.; Zheng Q.; Li, J.; *J. Memb. Sci.* 288(1-2), 231-238, 2007.
- [56] Sotto, A.; Boromand, A.; Zhang, R.; Luis, P.; Arsuaga, J. M.; Kim, J.; Van der Bruggen, B.; *J. Colloid Interface Sci.* 363, 2, 540-550, 2011.
- [57] Prashantha, K.; Park, S.G.; *J. Appl. Polym. Sci.* 98(5), 1875-1878, 2005.
- [58] Bae, T.-H.; Kim, I.-C.; Tak, T.-M.; *J. Memb. Sci.* 275(1-2), 1-5, 2006.
- [59] Li, J.-F.; Xu, Z.-L.; Yang, H.; Yu, L.-Y.; Liu, M.; *Appl. Surf. Sci.* 255, 9, 4725-4732, 2009.
- [60] Mingliang, L.; Qingzhi, W.; Jialin, L.; Hongjian, L.; Zilong J.; *Chin. J. Chem. Eng.* 19(1), 45-51, 2011.
- [61] Liu, S.; Yu, H.; Zhou, L.; Wang, P.; Shao, Z.; Yi, B.; *Int. J. Hydrogen Energy.* 37(15), 11425-11430, 2012.

- [62] Jamshidi Gohari, R.; Lau, W.J.; Matsuura, T.; Halakoo, E.; Ismail, A.F.; Sep. Purif. Technol. 120, 59-68, 2013.
- [63] Jamshidi Gohari, R.; Halakoo, E.; Lau, W.J.; Kassim, M.A.; Matsuura, T.; Ismail, A.F.; RSC Adv. 4(34), 17587-17596, 2014.
- [64] Rahimpour, A.; Madaeni, S.S.; Taheri, A.H.; Mansourpanah, Y.; J. Membr. J. Membr. Sci. 313(1-2), 158-169, 2008.
- [65] Bae, T.-H.; Tak, T.-M.; J. Membr. Sci. 249, 1-8, 2005.
- [66] Luo, M.-L.; Zhao, J.-Q.; Tang, W.; Pu, C.-S.; Appl. Surf. Sci. 249, 76-84, 2005.
- [67] Li, X.; Fang, X.; Pang, R.; Li, J.; Sun, X.; Shen, J.; Han, W.; Wang, L.; J. Membr. Sci. 467, 226-235, 2014.
- [68] Hamid, N.A.A.; Ismail, A.F.; Matsuura, T.; Zularisam, A.W.; Lau, W.J.; Yuliyati, E.; Abdullah, M.S.; Desalination 273, 85-92, 2011.
- [69] Yang, Y.; Wang, P.; Polymer 47, 2683-2688, 2006.
- [70] Vatanpour, V.; Madaeni, S.S.; Khataee, A.R.; Salehi, E.; Zinadini, S.; Monfared, H.A.; Desalination 292, 19-29, 2012.
- [71] Kumar, R.; Isloor, A.M.; Ismail, A.F.; Rashid, S.A.; Ahmed, A.A.; Desalination 316, 76-84, 2013.
- [72] Shaban, M.; AbdAllah, H.; Said, L.; Hamdy, H.S.; Khalek, A.A.; Chem. Eng. Res. Des. 95, 307-316, 2015.
- [73] Shen, J.N.; Ruan, H.M.; Wu, L.G.; Gao, C.J.; Chem. Eng. J. 168(3), 1272-1278, 2011.
- [74] Ahmad, A.L.; Majid, M.A.; Ooi, B.S.; Desalination 268(1-3), 266-269, 2011.
- [75] Leo, C.P.; Lee, W.P.C.; Ahmad, A.L.; Mohammad, A.W.; Sep. Purif. Technol. 89, 51-56, 2012.
- [76] Zhao, S.; Yan, W.; Shi, M.; Wang, Z.; Wang, J.; Wang, S.; J. Membr. Sci. 478, 105-116, 2015.
- [77] Pang, R.; Li, X.; Li, J.; Lu, Z.; Sun, X.; Wang, L.; Desalination 332, 60-66, 2014.
- [78] Homayoonfal, M.; Mehrnia, M.R.; Shariaty-Niassar, M.; Akbari, A.; Ismail, A.F.; Matsuura, T.; Desalination 354, 125-142, 2014.
- [79] Ghaemi, N.; Madaeni, S.S.; Daraei, P.; Rajabi, H.; Zinadini, S.; Alizadeh, A.; Heydari, R.; Beygzadeh, M.; Ghouzivand, S.; Chem. Eng. J. 263, 101-112, 2015.
- [80] Jhaveri, J. -H.; Murthy, Z.V.P.; Desalination 379, 137-154, 2016.
- [81] Geim, A.K.; Science, 324(5934), 1530-1534, 2009.
- [82] Choi, J. -H.; Jegal, J.; Kim, W.-N.; J. Membr. Sci. 284, 406-415, 2006.
- [83] Vatanpour, V.; Madaeni, S.S.; Moradian, R.; Zinadini, S.; Astinchap, B.; J. Membr. Sci. 375, 284-294, 2011.
- [84] Son, M.; Choi, H.-G.; Liu, L.; Celik, E.; Park, H.; Choi, H.; Chem. Eng. J. 266, 376-384, 2015.
- [85] Ionita, M.; Pandeale, A.M.; Crica, L.; Pilan, L.; Compos. Part B 59, 133-139, 2014.
- [86] Zinadini, S.; Zinatizadeh, A.A.; Rahimi, M.; Vatanpour, V.; Zangeneh, H.; J. Membr. Sci. 453, 292-301, 2014.
- [87] Akin, I.; Zor, E.; Bingol, H.; Ersoz, M.; J. Phys. Chem. B 118, 5707-5716, 2014.
- [88] Goh, P.S.; Ismail, A.F.; Desalination 356, 115-128, 2015.
- [89] Liu, H.; Wang, H.; Zhang, X.; Adv. Mater. 27, 249-254, 2015.
- [90] Han, Y.; Xu, Z.; Gao, C.; Adv. Funct. Mater. 23, 3693-3700, 2013.
- [91] Zhang, Y.; Chung, T.S.; Current Opinion in Chemical Engineering 16, 9-15, 2017.
- [92] Heo, Y.; Im, H.; Kim, J.; J. Membr. Sci., 425-426, 11-22, 2013.
- [93] Zhao, Y.; Xu, Z.; Shan, M.; Min, C.; Zhou, B.; Li, Y.; Li, B.; Liu, L.; Qian, X.; Sep. Purif. Technol. 103, 78-83, 2013.
- [94] Ganesh, B.M.; Isloor, A.M.; Ismail, A.; Desalination 313, 199-207, 2013.
- [95] Wang, N.; Ji, S.; Zhang, G.; Li, J.; Wang, L.; Chem. Eng. J. 213, 318-329, 2012.
- [96] Liang, J.; Huang, Y.; Zhang, L.; Wang, Y.; Ma, Y.; Guo, T.; Chen, Y.; Adv. Funct. Mater. 19, 2297-2302, 2009.

- [97] Safarpour, M.; Vatanpour, V.; Khataee A.; Desalination 393, 65-78, 2016.
- [98] Yin, J.; Zhu, G.; Deng, B.; Desalination 379, 93-101, 2015.
- [99] Surwade, S.P.; Smirnov, S.N.; Vlassiuk, I.V.; Unocic, R.R.; Veith, G.M.; Dai, S.; Mahurin, S.M.; Nature Nanotechnology 10, 459-464, 2015.
- [100] Badrinezhad, L.; Ghasemi, S.; Azizian-Kalandaragh, Y.; Nematollahzadeh, A.; Polym. Bull. 75, 469-484, 2018.
- [101] Zhang, Y.; Zhang, S.; Chung, T.S.; Environ. Sci. Technol. 49, 10235-10242, 2015.
- [102] Mahalingam, D.K.; Kim, D.L.; Nunes, S.P.; Mater. Res. 2(46), 2505-2511, 2017.
- [103] Abdel-Karim, A.; Leaper, S.; Alberto, M.; Vijayaraghavan, A.; Fan, X.; Holmes, S.M.; Souaya, E. R.; Badawy, M.I.; Gorgojo, P.; Chem. Eng. J. 334, 789-799, 2018.
- [104] Igbiginu, E.; Fennell, Y.; Malaisamy, R.; Jones, K.L.; Morris, V.; J. Membr. Sci., 514, 518-526, 2016.
- [105] Rezaee, R.; Nasser, S.; Mahvi, A.H.; Jafari, A.; Safari, M.; Shahmoradi, B.; Alimohammadi, M.; Khazaei, M.; Maroosi, M.; J. Adv. Environ. Health Res. 4(3), 169-175, 2016.
- [106] Homem, N.C.; Yamaguchi, N.U.; Vieira, M.F.; Amorim, M.T.S.P.; Bergamasco, R.; Chem. Eng. Trans. 60, 259-264, 2017.
- [107] Hu, M.; Mi, B.; Environ. Sci. Technol. 47(8), 3715-3723, 2013.
- [108] Lai, G.S.; Lau, W.J. Goh, P.S.; Ismail, A.F.; Yusof, N.; Tan, Y.H.; Desalination 387, 14-24, 2016.
- [109] Wang, X.; Feng, M.; Liu, Y.; Deng, H.; Lu, J.; J. Membr. Sci. 577, 41-50, 2019.
- [110] Rezaee, R.; Nasser, S.; Mahvi, A.H.; Nabizadeh, R.; Mousavi, S.A.; Rashidi, A.; Jafari, A.; Nazmara, S.; Journal of Environmental Health Science & Engineering 13, 61-71, 2015.
- [111] Wang, X.; Wang, H.; Wang, Y.; Gao, J.; Liu, J.; Zhang, Y.; Desalination 451, 209-218, 2019.
- [112] Wu, H.; Tang, B.; Wu, P.; J. Membr. Sci. 451, 94-102, 2014.
- [113] Kou, L.; Gao, C.; Nanoscale 3(2), 519-528, 2011.
- [114] Goei, R.; Lim, T.; Water Res. 59, 207-218, 2014.
- [115] Celik, E.; Liu, L.; Choi, H.; Water Res. 45(16), 5287-5294, 2011.
- [116] Zhang, J.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Du, L.; Zhang, B.; Zhang, H.; Liu, J.; Wang, K.; Ind. Eng. Chem. Res. 51(7), 3081-3090, 2012.
- [117] Daraei, P.; Madaeni, S.S.; Ghaemi, N.; Ahmadi Monfared, H.; Khadivi, M.A.; Sep. Purif. Technol. 104, 32-44, 2013.
- [118] Vatanpour, V.; Esmaceli, M.; Davood Abadi Farahani, M.H.; J. Membr. Sci. 466, 70-81, 2014.
- [119] Wang, L.; Song, X.; Wang, T.; Wang, S.; Wang, Z.; Gao, C.; Appl. Surf. Sci. 330, 118-125, 2015.
- [120] Daramola, M.O.; Sadare, O.O.; Oluwasina, O.O.; Iyuke, S. E.; J. Membr. Sci. Res. 5, 310-316, 2019.
- [121] Yokwana, K.; Gumbi, N.; Adams, F.; Mhlanga, S.; Nxumalo, E.; Mamba, Bheki; J. Appl. Polym. Sci. 132, 41835-41844, 2015.
- [122] Morales-Torres, S.; Pastrana-Martinez, L.; Figueiredo, J.; Faria, J.; Silva, A.T.; Environ. Sci. Pollut. Res. 19, 3676-3687, 2012.
- [123] Mahmoudi, E.; Ng, L.Y.; Ba-Abbad, M.M.; Mohammad, A.W.; Chem. Eng. J. 277, 1-10, 2015.
- [124] Dizge, N.; Gonuldas, H.; Ozay, Y.; Ates, H.; Ocakoglu, K.; Harputlu, E.; Yildirimcan, S.; Unyayar, A.; Water Sci. Technol. 75(3), 670-685, 2017.
- [125] Mahlangu, O.T.; Nackaerts, R.; Mamba, B.B.; Verliefe, A.R.D.; Water Sci. Technol. 76, 501-514, 2017.
- [126] Mahlangu, O.T.; Nackaerts, R.; Thwala, J.M.; Mamba, B.B.; Verliefe, A.R.D.; J. Membr. Sc. 524, 43-55, 2017.
- [127] Chung, Y.T.; Mahmoudi, E.; Mohammad, A.W.; Benamor, A.; Johnson, D.; Hilal, N.; Desalination 402, 123-132, 2017.

- [128] Bagheripour, E.; Moghadassi, A.R.; Hosseini, S.M.; Van der Bruggen, B.; Parvizian, F.; J. Ind. Eng. Chem. 62(25), 311-320, 2018.
- [129] Mahdavi, H.; Rahimi, A.; Desalination 433, 94-107, 2018.
- [130] Gao, Y.; Hu, M.; Mi, B.; J. Membr. Sci. 455, 349-356, 2014.
- [131] Daraei, P.; Madaeni, S.S.; Ghaemi, N.; Khadivi, M.A.; Astinchap, B.; Moradian, R.; J. Membr. Sci. 444, 184-191, 2013.
- [132] Zinadini, S.; Rostami, S.; Vatanpour, V.; Jalilian, E.; J. Membr. Sci. 529, 133-141, 2017.

A review of polysulfone and polyethersulfone based mixed matrix nanofiltration membranes/carbon nanoparticles

Nader Gholami¹, Hossein Mahdavi^{2,*}

1. Ph.D in Chemistry, School of Chemistry, University College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Professor of Chemistry, School of Chemistry, University College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract: Although the membrane technology has advantages such as the high capability of separation, flexibility of operation, efficiency, etc. compared to conventional methods, fouling is the main limitation for the further use of membrane technology, mainly because of the inherent hydrophobicity of membrane materials. To overcome this drawback, nanocomposite membranes are used. Among membrane processes, nanofiltration has applications in groundwater, surface water and wastewater treatment as well as pre-desalination operations. Since NF process is performed at a lower pressure, it is a much more energy efficient process. In this review, modification of polysulfone/polyethersulfone membranes is investigated with regards to anti-fouling performance. The mechanism of fouling reduction clearly shows that surface hydrophilicity improves at the polysulfone/polyethersulfone membranes, based on different membrane modification methods. In addition, the fabrication of nanocomposite membranes resulting from the participation of nanoparticles in the polymeric matrix mixed membrane, their properties and applications using organic fillers (such as graphene and carbon nanotubes) have been thoroughly studied. Furthermore, the characterization techniques applied for modified membranes have been discussed. This comprehensive study concludes with some recommendations for future research and development of NF membranes.

Keywords: Nanofiltration, Nonocomposite, Fouling, Hydrophilicity, Hydrophobicity, Flux, Desalination, Polyethersulfone, Polysulfone, Rejection, Mixed matrix membrane