

ارتقای خواص و عملکرد نمک‌زدایی غشاهای مرکب نازک لایه اسمز معکوس با استفاده از نانوذرات

موسی‌الرضا جلیلی پالندی^۱، سید سعید حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۹

پیام‌نگار: saeid.hosseini@modares.ac.ir

چکیده

فناوری غشایی اسمز معکوس (RO) یکی از روزآمدترین و پیشرفته‌ترین روش‌های نمک‌زدایی از آب‌های شور و لب‌شور است. غشای مرکب نازک لایه (TFC) پلی‌آمیدی پر مصرف‌ترین غشای مورد استفاده در این فرایند به‌شمار می‌رود. با این حال، موانعی چون برقراری تبادل بین شار آب تراویده، دفع نمک، و گرفتگی، به خصوص گرفتگی زیستی، باعث افت عملکرد آن می‌شود. یکی از راهبردهای امیدوارکننده برای بهبود خواص غشاء TFC، ترکیب نانوذرات و نانولوله‌ها در نازک لایه این غشاء است. ترکیب نانوذرات و نانولوله‌ها در خلال بسپارش بین سطحی غشا TFC آثار گوناگونی دارد. نانوذراتی چون زئولیت و نانولوله‌های کربنی به بهبود عملکرد نمک‌زدایی و نانوذراتی نظیر نقره به بهبود مقاومت در برابر گرفتگی زیستی منجر می‌شود. در این مقاله، به بررسی آثار نانوذرات مختلف بر عملکرد نمک‌زدایی، خواص سطحی و کنترل گرفتگی زیستی غشاهای اسمز معکوس و موانع تجاری شدن آنها پرداخته می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نمک‌زدایی، اسمز معکوس، مرکب نازک لایه، نانوذرات، نانولوله‌ها

۱. مقدمه

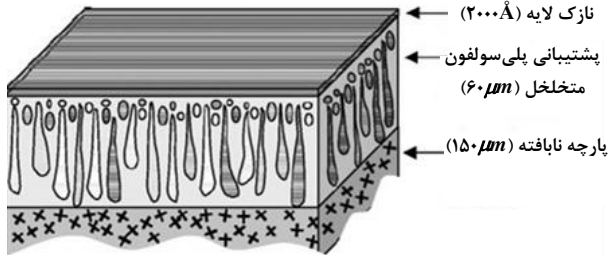
در حالی که ۹۷٪ آن را آب دریا تشکیل می‌دهد، نمک‌زدایی از آب دریا و سفره‌های آب شور به یکی از امیدوارکننده‌ترین و مهم‌ترین روش‌های تصفیه آب تبدیل شده است [۲]. با توجه به ساز و کار جداسازی، فناوری‌های نمک‌زدایی را می‌توان به دو دسته نمک‌زدایی حرارتی و غشایی تقسیم کرد. نمک‌زدایی حرارتی شامل تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای^۱ (MSF)، تقطیر مؤثر چند مرحله‌ای^۲ (MED) و تقطیر فشرده‌سازی بخار^۳ (VCD)، و

در جهان امروز، رشد سریع جمعیت و ارتقاء استانداردهای زندگی، در کنار توسعه کشاورزی و صنعتی در سراسر جهان، باعث افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین شده است. نیاز فوری و فزاینده‌ای برای تأمین آب سالم آشامیدنی با کیفیتی مطلوب به وجود آمده است. بنابراین، فناوری‌های تصفیه آب، توجه بی سابقه‌ای را در سال‌های اخیر به خود معطوف داشته است [۱]. با توجه به این واقعیت که تنها ۰/۵٪ از منابع کل آب بر روی زمین قابل شرب و آب شیرین است،

1. Multi-Stage Flash
2. Multi-Effect Distillation
3. Vapor Compression Distillation

* تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه تحقیقاتی علوم و فناوری غشایی

مرکب به کار گرفته می‌شود که در بین آن‌ها غشا مرکب نازک لایه^۶ (TFC) بسیار متداول است. غشاء TFC اسمز معکوس متشکل از سه لایه، تقویت‌کننده از جنس پارچه^۷ بافته شده و یا منسوج بی‌بافت است؛ لایه‌ای از بسیار ریزمتخلخل (معمولاً پلی‌سولفون) که بر روی تقویت‌کننده پوشش داده شده است، و در نهایت یک نازک لایه از جنس پلی‌آمید آروماتیک اتصال عرضی شده که بر روی سطح بستر نهایی غشا قرار دارد. بستر تقویت‌کننده به‌همراه زیرلایه متخلخل پلی‌سولفون استحکام مکانیکی غشا را تأمین می‌کند، در حالی که لایه پلی‌آمید نازک وظیفه جداسازی را در فرایند غشایی بر عهده دارد. در شکل (۲)، بخش‌های تشکیل‌دهنده غشای RO-TFC را مشاهده می‌کنید [۷].



شکل ۲. نمایش غشا اسمز معکوس مرکب نازک لایه (TFC).

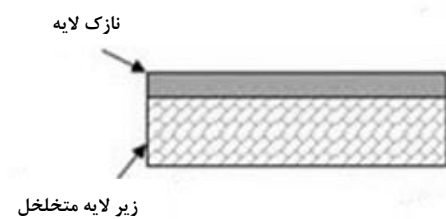
نازک لایه فوقانی غشای TFC معمولاً با استفاده از تکپارهای متا فنیلین دی آمین^۸ (MPD) و تری مسویل کلرید^۹ (TMC) از طریق بسپارش بین‌سطحی^{۱۰} (IP) بر روی بستر تقویت‌کننده تولید می‌شود. فرایند بسپارش بین‌سطحی و چگونگی تشکیل نازک لایه فوقانی را در شکل (۳) مشاهده می‌کنید [۸]. در فرایند بسپارش بین‌سطحی برای ساخت نازک لایه فوقانی، ابتدا بستر تقویت‌کننده در محلول آبی MPD و سپس درون محلول آلی (حلالی نظیر هگزان) TMC غوطه‌ور می‌شود و یک نازک لایه پلی‌آمیدی بر اثر واکنش این دو ماده در فصل مشترک دو فاز آبی و آلی بر روی بستر تقویت‌کننده شکل می‌گیرد.

6. Thin Film Composite
7. Fabric
8. Meta Phenylene Diamine
9. Trimesoyl Chloride
10. Interfacial Polymerization

نمک‌زدایی غشایی شامل اسمز معکوس^۱ (RO)، نانوفیلتراسیون^۲ (NF)، الکترودیالیز^۳ (ED) و برخی فناوری‌های جدید، مانند تبادل یونی، می‌شود [۳].

فرایندهای جداسازی غشایی، به ویژه اسمز معکوس، به سرعت در طول سه دهه گذشته به فناوری غالب نمک‌زدایی تبدیل شده است که عمدتاً ناشی از مصرف کم انرژی است. هزینه انرژی فناوری RO از حدود ۵ kwh/m³ در دهه ۱۹۹۰ میلادی، به ۱/۸ kwh/m³ در حال حاضر کاهش یافته است، که چندین بار کمتر از فناوری‌های دیگر، مانند روش‌های نمک‌زدایی حرارتی است. واحدهای نمک‌زدایی، به طور عمده شامل سامانه RO هستند؛ در بیش از ۲۰۰ کشور در سراسر جهان (به ویژه در شمال آفریقا و خاورمیانه) ساخته شده‌اند [۴].

غشاهای اسمز معکوس به طور عمده دارای دو ساختار نامتقارن^۴ و مرکب^۵ هستند [۵]. ساختار غشاهای اسمز معکوس نامتقارن به صورت یک لایه جدا کننده بسیار نازک متراکم بر روی بدنه ریزمتخلخل است (شکل (۱)) [۶]. لایه متراکم ضخامت بین ۰/۱ تا ۰/۵ میکرون و بدنه ریزمتخلخل، ضخامت حدود ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون دارد [۵]. به‌طور کلی، در این نوع غشاها، تخلخل از سمت خوراک به سمت جریان تراویده افزایش می‌یابد. در غشاهای نامتقارن، مقاومت در برابر انتقال جرم از طریق ضخامت کلی غشا تعیین می‌شود. از این‌رو، کاهش ضخامت غشا افزایش نفوذپذیری را در پی دارد.



شکل ۱. نمایش غشای نامتقارن.

نوع دیگری از غشای RO با عملکرد عالی، که طراحی و ساخت آن به کمک برخی موسسه‌ها و شرکت‌ها از دهه ۱۹۷۰ دنبال شده است، غشاء مرکب است. امروزه روش‌های مختلفی برای ساخت غشاهای

1. Reverse Osmosis
2. Nano Filtration
3. Electro Dialysis
4. Asymmetric
5. Composite

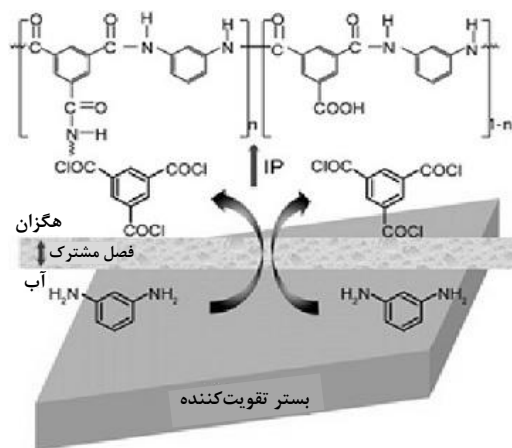
را برای تمیز کردن دوره‌ای غشاها به کار می‌برند. با این حال، غشاهای مرکب نازک لایه پلی آمیدی همواره در معرض حمله کلر قرار دارند و تمیز کردن آن‌ها همواره باعث بدتر شدن کارایی غشاها می‌شود. بنابراین، گرفتگی، و آسیب‌رسانی کلر به‌عنوان دو مشکل عمده در برنامه‌های کاربردی غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه پلی آمیدی به‌شمار می‌رود و به یکی از مسائل مهم در تحقیق روی خواص ضدگرفتگی و مقاومت در برابر کلر این نوع غشاها تبدیل شده است. تبادل میان شار آب تراویده و دفع نمک، و نیز گرفتگی دو مورد از چالش‌های بسیار مهم در ارتباط با غشاهای اسمز معکوس مرکب نازک لایه به‌شمار می‌رود.

۲.۱. تبادل بین شار آب تراویده و دفع نمک

برقراری تبادل^۴ بین شار آب تراویده و دفع نمک همواره یک مشکل کلیدی بوده است؛ یعنی، تلاش برای برقراری شار تراویده بالاتر، باعث دفع نمک پایین‌تر می‌شود و برعکس. این امر یک مشکل جدی در راه ساخت و توسعه غشاهای اسمز معکوس برای برقراری شار آب عبوری بالاتر به همراه دفع نمک زیاد است. بنابراین، دفع نمک زیاد و ثابت، شاخص مهمی برای ارزیابی راهبردهایی به‌شمار می‌آید که هدف آن بهبود جریان آب در غشاهای اسمز معکوس است.

۲.۲. گرفتگی

گرفتگی عمدتاً به نهشت و انباشت رسوب‌ها روی سطح و یا در داخل منافذ غشا اطلاق می‌شود. گرفتگی غشاهای اسمز معکوس را عمدتاً به چهار دسته تقسیم می‌کنند: غیر آلی (رسوبات نمک مانند هیدروکسیدهای فلزی و کربنات)؛ آلی (مواد آلی طبیعی مانند اسید هیومیک)؛ کلوئیدی (ذرات معلق مانند سیلیس)؛ و زیستی (مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها). از آنجا که غشاء اسمز معکوس بدون منافذ مشخص روی سطح است، تشکیل یک لایه رسوب بر روی سطح غشاء به عنوان ساز و کار غالب گرفتگی در این غشاها اشاره شده است. گرفتگی عملکرد غشا را مختل می‌کند و باعث کوتاه شدن عمر آن و افزایش هزینه‌های انجام عملیات نمک‌زدایی می‌شود [۲]. گرفتگی زیستی مهم‌ترین نوع گرفتگی‌های غشایی به‌شمار می‌رود. گرفتگی زیستی هنگامی رخ می‌دهد که سلول‌های میکروبی روی



شکل ۳. ساخت لایه فعال PA بر روی بستر تقویت‌کننده با استفاده از تکپارهای MPD و TMC.

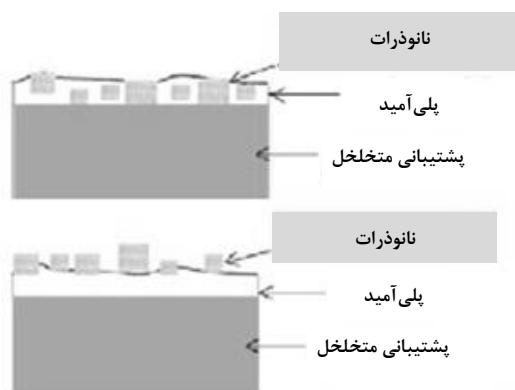
علی‌رغم استقبال بسیار از این نوع غشاها، موانع و چالش‌های درخور توجهی نیز بر سر راه کاربردشان در صنعت وجود دارد که در واقع از انگیزه‌های اصلی برای انجام پژوهش‌های مختلف برای بهبود عملکرد غشا و مقابله با این موانع به‌شمار می‌رود.

۲.۲. موانع و چالش‌های پیش روی غشاهای مرکب نازک لایه اسمز معکوس

در فرایند اسمز معکوس، آب ناخالص تحت فشار زیاد از میان غشای نیمه تراوا نفوذ می‌کند. هرچند، اسمز معکوس از روش‌های حرارتی مؤثرتر است، اما نیاز به فشار زیاد باعث شده تا از نظر انرژی هزینه زیادی داشته باشد. بنابراین، امروزه چالشی برای بهبود تراوایی آب همراه با کاهش تقاضای مصرف انرژی، مصرف مواد شیمیایی برای تمیز کردن و هزینه‌های عملیاتی برقرار است. از این‌رو، تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود عملکرد غشای اسمز معکوس به منظور بهبود دفع نمک و یا شار آب، و یا هر دو، انجام شده است. علاوه بر این، در طول بهره‌گیری از غشای اسمز معکوس، گرفتگی^۱ به‌خصوص گرفتگی زیستی^۲ (که همیشه در سطح غشا به شکل نازک لایه زیستی^۳ یافت می‌شود)، به رسوب‌گذاری بر روی سطح غشا می‌انجامد. گرفتگی غشا به‌طور جدی می‌تواند عملکرد و طول عمر غشا را کاهش دهد. بنابراین، همیشه ضدعفونی‌کننده‌ها (معمولاً کلر)

1. Fouling
2. Biofouling
3. Biofilm

4. Trade-Off



شکل ۴. نمایش غشای اسمز معکوس TFN.

۱.۳ نانوذرات

به منظور ساخت غشاهای نانومرکب، نانوذرات معدنی با توجه به خواص نوری^۲، کاتالیزوری و ضد میکروبی‌اشان، پتانسیل زیادی از خود بروز داده‌اند. مواد معدنی ترکیب شده در شبکه بسپاری مورد توجه بسیاری از پژوهشگران عرصه علوم غشایی قرار گرفته است، زیرا با بهبود خواص نظیر آب‌دوستی، مشکل گرفتگی غشا را کاهش می‌دهد. خواص مختلف غشاهای بسپاری مانند نفوذپذیری، گزینش‌پذیری، پایداری، مساحت سطح و فعالیت کاتالیزوری در فرایندهای مختلف جداسازی غشایی، به طور موثری می‌تواند با بهره‌گیری از مواد متخلخل افزایش یابد. علاوه بر این، شبکه‌های بسپاری می‌توانند از خواص فیزیکی (مکانیکی، مغناطیسی، نوری، رسانایی، کاتالیزوری) و زیست‌پزشکی (ضد میکروبی، ضد سرطان) نانوذرات معدنی جاسازی شده بهره‌مند شوند. علاوه بر این، نانوذرات معدنی می‌توانند نفوذپذیری غشاء را در مقایسه با غشاهای پلی‌آمیدی خالص افزایش دهد، زیرا با ارائه یک مسیر مستقیم برای انتقال آب و یا اصلاح ساختار شبکه غشا، موجب ارتقای نفوذپذیری آب می‌شود. بنابراین، عملکرد جداسازی غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه پلی‌آمیدی PA-TFC RO با ترکیب مواد متخلخل معدنی بهتر می‌شود و بهبود می‌یابد [۴].

در جدول (۱)، انواع نانوذرات به کار رفته در نازک لایه پلی‌آمیدی با ذکر دامنه بارگذاری آن‌ها در محلول فاز آلی و مراجعشان درج شده است. نانوذرات ژئولیت به‌طور ویژه در نازک لایه غشا تعبیه شده و برای اصلاح غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه پلی‌آمیدی

سطح غشا انباشته و به یکدیگر متصل می‌شوند و تشکیل نازک لایه زیستی می‌دهند. با وقوع گرفتگی غشایی، عملکردهای پایه‌ای غشاء، مانند افزایش عبور نمک از طریق غشا، افت شار تراویده و افت فشار در سراسر غشا تضعیف می‌شود. بهره‌گیری از ضدعفونی‌کننده‌هایی چون کلر و ازن، تابش فرابنفش برای غیر فعال کردن باکتری‌ها و استفاده از فرایندهای پیش تصفیه، مانند MF یا UF، سه راهکاری‌اند که معمولاً در واحدهای نمک‌زدایی برای جلوگیری از گرفتگی زیستی به کار برده می‌شوند [۹ و ۲].

با توجه به مطالب یادشده، تلاش برای بهبود شار آب تراویده از غشاء همراه با حفظ دفع نمک بالا و مقابله با گرفتگی غشاء (به‌خصوص گرفتگی زیستی) چالش‌هایی‌اند نیازمند ارائه راهبردهایی کاربردی. یکی از این راهبردها، ترکیب نانوذرات و نانولوله‌ها در نازک لایه غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه است. برای درک بهتر این روش بسیار مهم، به منظور مقابله با مشکلات غشایی اسمز معکوس، آشنایی با مفاهیمی چون غشای نانومرکب نازک لایه (TFN)، نانوذرات و نانولوله‌های به کار رفته در غشا، میزان بارگذاری آن‌ها در محلول‌هایی که از واکنش آن‌ها نازک لایه فوقانی تشکیل می‌شود، ضروری است.

۳. غشاء نانومرکب نازک لایه

در طول دهه گذشته، استفاده از مفاهیم نانو فناوری به غشاهای تصفیه آب جدیدی منجر شد که عملکردی فراتر از فناوری‌های روز داشت و قابلیت‌های جدید، مانند نفوذپذیری بالا، واکنش‌پذیری کاتالیزتی، و مقاومت در برابر گرفتگی را ممکن کرد [۴]. در سال ۲۰۰۵، هوک^۲ و همکاران [۱۰] مفهوم جدیدی را ارائه دادند. این مفهوم، بسپارش بین‌سطحی غشاء اسمز معکوس نانومرکب نازک لایه (TFN) بود. هدف این است که نانوذرات از طریق پراکندن و بارگذاری در فاز آلی (محلول TMC در حلالی نظیر هگزان) و سپس در ضمن بسپارش بین‌سطحی در سرتاسر نازک لایه پلی‌آمیدی غشای RO-TFC ترکیب شود. شکل (۴)، غشاهای اسمز معکوس نانومرکب نازک لایه را نشان می‌دهد. تاکنون، در این زمینه نانوذراتی نظیر ژئولیت، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و همچنین پرکننده‌های دیگر مانند نقره، تیتانیوم دی‌اکسید (TiO₂) و ذرات سیلیکا مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

1. Thin Film Nanocomposite
2. Hoek

3. Optical

ممکن می‌کند. علاوه بر این، مطالعات تجربی اخیر نشان داده‌اند که خروج یون را می‌توان با تعامل الکتروستاتیکی بین یون‌ها و نانولوله‌های کربنی کنترل کرد [۴]. در جدول (۲) نتایج پژوهش‌های انجام شده در مورد ترکیب نانولوله‌ها در غشاهای اسمز معکوس درج شده است.

جدول ۱. انواع نانوذرات به کار رفته در نازک لایه غشاء نانومرکب نازک لایه و دامنه بارگذاری آن‌ها.

مرجع	مقادیر بارگذاری (wt%)	نوع نانوذره
[۱۳]	۰/۰۰۴-۰/۴	زئولیت NaA
[۱۴]	۰/۲	زئولیت NaA (با سه اندازه مختلف)
[۱۵]	۰/۴	زئولیت NaA
[۱۶]	۰/۰۰۴-۰/۲	زئولیت NaX
[۱۷]	۱-۹	TiO ₂
[۱۸]	۰/۰۰۵-۰/۰۵	TiO ₂
[۱۹]	۱	آلومینا
[۲۰]	۰/۰۰۵-۰/۱	سیلیکا
[۲۱]	۱۰	نقره (nAg)
[۱۲]	-	مس (nCu)

جدول ۲. انواع نانولوله‌های ادغام شده در نازک لایه غشاء نانومرکب نازک لایه و مقادیر بارگذاری آن‌ها.

مرجع	مقادیر بارگذاری (wt%)	نوع نانولوله
[۲۱]	۱-۵	نانولوله کربنی چند جداره (در بستر تقویت کننده)
[۲۲]	۰/۰۰۱-۰/۱	نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده
[۲۳]	۰/۰۵-۰/۲	نانولوله آلومینا سیلیکاته تک جداره

مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختلاط نانوذرات زئولیت با نازک لایه پلی‌آمیدی غشای مرکب نازک لایه، شار آب را تحت فشار بالای فرایند اسمز معکوس، به میزان چشمگیری بهبود می‌بخشد، بدون این‌که دفع نمک کاهش چشمگیری یابد. پژوهشگران زئولیت‌های مختلفی (نظیر NaA و NaX) و با اندازه‌های مختلف را بررسی کرده‌اند. نانوذرات دیگری چون تیتانیم دی‌اکسید (TiO₂)، آلومینا و سیلیکا در پژوهش‌های مختلف به کار گرفته شدند که بسته به نفوذپذیری یا نفوذناپذیری، شکل منافذ داخلی، بار سطحی، آب‌دوستی و ویژگی‌های دیگر تأثیرهای مختلفی بر غشا TFN در قیاس با غشا TFC بدون ترکیب این نانوذرات دارد.

همچنین، نانوذرات نقره بیشتر به عنوان عامل ضد میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربرد این نانوذرات در مهار گرفتگی زیستی بسیار مؤثر است. علاوه بر این، بسیاری از نانوذرات غیر آلی دیگر مانند طلا، مس، اکسید مس (CuO)، تیتانیم دی‌اکسید (TiO₂) و اکسید روی (ZnO)، نیز خواص ضد میکروبی بروز داده‌اند. البته، همه نانوذرات ذکر شده در نازک لایه غشاء اسمز معکوس ترکیب نشده است، بلکه عموماً به صورت پوشش‌دهی و بر روی غشاهای مختلف انجام شده و خاصیت ضد گرفتگی زیستی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بهره‌گیری از نانوذرات معدنی می‌تواند به عامل‌دار شدن غشاء منجر شود و به‌طور مؤثری برخی خواص غشا را بهبود بخشد [۱۱]. در جدول (۱) در مورد نانوذرات مس به کار رفته، از مقادیر بارگذاری ذکر شده به میان نیامده است، به این دلیل که اتصال نانوذرات باردار مثبت مس با سطح باردار منفی غشا از طریق پیوند الکتروستاتیکی بین بارهای مثبت و منفی انجام شده است و ترکیب در خلال بسپارش بین سطحی صورت نگرفته است [۱۲].

۲.۳ نانولوله‌ها

نانولوله‌های به کار رفته در غشاهای اسمز معکوس، عمدتاً نانولوله‌های کربنی (CNTs) اند. نانولوله‌های کربنی به علت تشابه بین خواص انتقال مایعات و کانال‌های انتقال آب در غشاهای زیستی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان می‌دهد که غشا دارای نانولوله با قطر مناسب در دفع یون بسیار کارآمد است، در حالی که انتقال آب را

۳.۳ تأثیر نانوذرات و نانولوله‌ها بر عملکرد جداسازی غشاء

RO

عملکرد نمک‌زدایی غشاء RO معمولاً با دو مشخصه شار تراویده و دفع نمک تعریف می‌شود. گاهی به جای شار تراویده، نفوذپذیری آن گزارش می‌شود. شار تراویده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{V}{At} \quad (1)$$

که F (L/m^2h یا m^3/m^2day) شار جریان تراویده، V (L یا m^3) حجم تراویده، A (m^2) سطح غشاء و t (h یا day) مدت زمان جمع‌آوری ماده تراویده است.

دفع نمک (R) از این قرار محاسبه می‌شود:

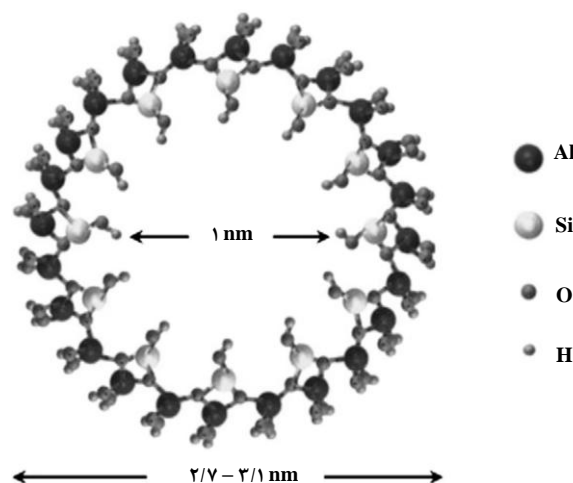
$$R = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \times 100 \quad (2)$$

که C_1 و C_2 (ppm یا g/L)، به ترتیب، غلظت خوراک و غلظت تراویده هستند.

درصد بهبود شار تراویده و درصد بهبود دفع نمک برای ترکیب نانوذرات و نانولوله‌های مختلف در غشا TFC در جدول (۳) درج شده است. با توجه به این نکته که معمولاً در هر یک از این پژوهش‌ها، مقادیر مختلفی از این مواد در محلول آلی پخش شده است، تا اثر افزایش نانوذرات و نانومواد بر عملکرد غشا سنجیده شود، در این جدول، مقداری از نانوذرات یا نانولوله‌ها که بهترین عملکرد را نشان داده است، ذکر شده است. همچنین، هر یک از این پژوهش‌ها غشاء پایه مرکب نازک لایه بدون هر گونه نانوذره یا نانولوله ساخته شده است، بنابراین مقایسه در بهبود عملکرد (بهبود شار تراویده و بهبود دفع نمک) در مقایسه با غشا پایه‌ای که هر یک از پژوهشگران به طور جدا تهیه کرده‌اند، ذکر شده است. شرایط عملیاتی موارد اشاره شده چون فشار و غلظت خوراک ممکن است متفاوت باشد. همچنین، منظور از «عامل‌دار شده» در نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار شده، این است که طی واکنش‌هایی که در مراجع آن‌ها آورده شده است، این نانوذرات و نانولوله‌ها به گروه عاملی هیدروکسیل مجهز شده‌اند.

راتو^۱ و همکاران [۲۴]، ساخت غشاهای نانومرکب نازک لایه را از طریق جاسازی نانولوله‌های ته باز^۲ در یک شبکه بسپاری به ثبت رساندند. نانولوله‌ها به طور تصادفی در سراسر شبکه بسپاری جهت‌دار می‌شود؛ در حالی که کانال‌های گسترده‌ای در سراسر شبکه بسپاری را بر اساس اندازه برای عبور انتخابی مولکول‌های گونه‌ها و ذرات مختلف فراهم می‌آورند. این روش به بسترها و مراحل پرهزینه یا تجهیزات پیشرفته و یا به روش‌های تخصصی برای ساخت نانولوله‌ها نیاز ندارد. نانولوله‌ها را می‌توان به صورت عمده فراهم کرد و لازم نیست با استفاده از روش شناخته شده‌ای، ساخته شوند، و در صورتی که نانولوله‌ها در ابتدا ته باز نباشند، می‌توان آن‌ها را با اصلاحی ساده و ارزان ته باز کرد [۴].

علاوه بر نانولوله‌های کربنی، ترکیب نانولوله‌های تک‌جداره آلومینا سیلیکاته نیز در نازک لایه غشاء مرکب اسمز معکوس گزارش شده است [۲۳]. در این پژوهش، نانولوله‌های آلومینا سیلیکاته با قطر داخلی ۱ nm و قطر خارجی بین ۲/۳ nm تا ۲/۷ nm در نازک لایه سطحی ترکیب شدند. متوسط طول این نانولوله‌های تک‌جداره ۱۰۰ nm بود. فرمول تجربی این نانولوله‌ها عبارت است از $(OH)_3Al_2O_3SiOH$ ، و حضور گروه‌های هیدروکسیل به صورت (Si-OH) در جداره داخلی و (Al-OH) در جداره خارجی باعث آب‌دوستی آن شده است. در شکل (۵)، ساختار نانولوله‌های آلومینا سیلیکاته تک‌جداره را مشاهده می‌کنید.



شکل ۵. ساختار نانولوله آلومینا سیلیکاته تک‌جداره.

1. Ratto
2. Open-ended

جدول ۳. میزان بهبود شار تراویده و بهبود دفع نمک در بهترین مقدار بارگذاری نانوذرات یا نانولوله‌ها.

مرجع	بهبود دفع نمک	بهبود شار تراویده (%)	شار تراویده ثانویه (L/m ² . h)	شار تراویده اولیه (L/m ² . h)	شرایط عملیاتی		بهترین مقدار بارگذاری (wt%)	نوع نانوذره یا نانولوله
					غلظت خوراک (ppm)	فشار (bar)		
[۱۳]	ناچیز	۸۱	۱۶/۹	۹/۴	۲۰۰۰	۱۲/۴	۰/۴	زئولیت NaA
[۱۴]	ناچیز	۴۷	۶۳/۷	۴۳/۲	۲۰۰۰	۱۵/۵	۰/۲	زئولیت NaA
[۱۶]	ناچیز	۷۶	۱۴/۶۱	۸/۳۲	۲۰۰۰	۱۲	۰/۲	زئولیت NaX
[۱۷]	۱۹٪	-۹	۱۰	۹/۱	۲۰۰۰	۶	۵	TiO ₂
[۱۸]	ناچیز	۱۵	۳۸/۷۸	۳۳/۶۱	۲۰۰۰	۱۵/۵	۰/۰۱	TiO ₂
[۱۹]	ناچیز	۷۲	۵	۲/۹	۱۰۰۰	۱۰	۱	آلومینا
[۲۰]	ناچیز	۱۷۹	۵۳	۱۹	۲۰۰۰	۱۶	۰/۱	سیلیکا
[۲۱]	-۰/۹٪	۲۰	۶۰	۵۰	۲۰۰۰	۲۴	۱۰	نقره (nAg)
[۱۲]	ناچیز	۵/۴	۷۰/۱	۶۶/۵	۲۰۰۰	۲۷/۶	-	مس (nCu)
[۲۲]	ناچیز	۸۹	۲۸/۰۵	۱۴/۸۶	۲۰۰۰	۱۶	۰/۱	نانولوله کربنی چندجداره عامل دار شده
[۲۳]	ناچیز	۱۵۰	۲۴/۶	۱۰/۵	۲۰۰۰	۱۶	۰/۲	نانولوله آلومینا سیلیکاته تک جداره

نسبت داده می‌شود [۱۹]. بسیاری از خواص منحصر به فرد نانوذرات سیلیکا نظیر میان‌منافذ^۱ یکنواخت، سطح ویژه بالا، آب‌دوستی سطح با توجه به گروه‌های Si-OH متعدد و نانوساختارهای قابل کنترل سیلیکای میان‌متخلخل، افزایش شار آب را در پی داشته است [۲۰]. نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار شده نیز علاوه بر این که قابلیت ایجاد کانال‌های ترجیحی در نازک لایه غشا را دارند، با گروه‌های هیدروکسیل عامل‌دار شده است و توانایی بالاتری در برقراری پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب دارند. این قابلیت‌ها برای نانولوله‌های آلومینای سیلیکاته تک جداره نیز صادق است [۲۲ و ۲۳]. اما در مورد نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید،

این جدول نشان می‌دهد که انواع نانوذرات زئولیت، آلومینا، سیلیکا و نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار شده و نانولوله‌های آلومینای سیلیکاته تک‌جداره در بهبود شار تراویده بسیار توانمندند. در حالی که دفع نمک را در حد مطلوبی ثابت نگه می‌دارند. علت این امر آن است که نانوذرات زئولیت بر اثر وجود منافذ در مقیاس نانومتری که به خوبی در آن‌ها ایجاد شده‌اند، باعث ارائه کانال جریان ترجیحی برای مولکول‌های آب می‌شود؛ در حالی که به طور موثری قادر است مواد محلول مانند یون‌های سدیم آب‌پوشی شده را دفع کند [۱۳ و ۱۶]. در مورد نانوذرات آلومینا، افزایش شار تراویده به اثر این نانو ذرات در تنظیم شکل ساختار سطح و اصلاح ساختار هندسی غشا

1. Mesopores

باشد، استعداد گرفتگی غشا کمتر می‌شود. آب‌دوستی بالاتر نه تنها به ترشوندگی بهتر، بلکه به شار تراویده بالاتر منجر می‌شود که مقاومت گرفتگی غشا را بهبود می‌بخشد. با این حال، غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه با شبکه اتصال عرضی بالا، از آب‌دوستی مناسبی بهره‌مند نیست. از این‌رو، ارتقاء آب‌دوستی غشا از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. آب‌دوستی و بار سطحی غشا دو ویژگی مهم غشایی مرتبط با هم هستند. باردار بودن سطح غشا به گروه‌های عاملی نظیر گروه‌های کربوکسیلیک و هیدروکسیل در سطح غشا نسبت داده می‌شود. این گروه‌های عاملی که عمدتاً دارای بار منفی‌اند، می‌توانند از طریق برقراری پیوندهای دوقطبی و یا پیوند هیدروژنی، آب را بر روی سطح غشا جذب و آنیون‌های محلول در آب را از غشا دور کنند. در واقع، وجود این گروه‌های عاملی، آب‌دوستی سطح را در پی دارد و همچنین با بهبود آب‌دوستی و به عبارتی بیشتر شدن بار منفی سطح، مقاومت غشا در برابر گرفتگی هم بهبود می‌یابد. در جدول (۴)، تغییرات ایجاد شده در خواص سطحی غشاء بر اثر استفاده از نانوذرات و نانولوله‌های مختلف درج شده است.

۳.۵. تأثیر نانوذرات و نانولوله‌ها بر کنترل گرفتگی زیستی

رشد سریع نانو فناوری توجه زیادی را در برنامه‌های کاربردی زیست محیطی نانومواد جلب کرده است. بخصوص، توانایی بالقوه خوبی را برای تحول فرایندهای تصفیه آب مرسوم نشان داده است. اخیراً، نانومواد طبیعی و مصنوعی مانند نانوذرات نقره، نانوذرات مس و نانولوله‌های کربنی، خواص ضد گرفتگی زیستی قوی بروز داده‌اند. با توجه به حضور طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها در آب و تنوع در خواص آن‌ها، مراحل متعددی از تصفیه (مثلاً، استفاده از ضد عفونی‌کننده و جز آن) برای به حداقل رساندن یا تأخیر در نهشت آن‌ها روی غشا ضروری است. با ادغام مناسب نانومواد ضد میکروبی، غشاء به جای یک مانع فیزیکی ساده، به یک مانع فعال تبدیل می‌شود و این امکان را فراهم می‌آورد تا گرفتگی را به حداقل برساند.

علی‌رغم استفاده از درصد وزنی زیاد این نانوذرات در نازک لایه نسبت به سایر نانوذرات بهبود چندانی در شار تراویده مشاهده نمی‌شود. همچنین، این نانوذرات فاقد میان‌منافذ متخلخل‌اند که در نتیجه افزایش شار آب از طریق ایجاد نقص در سطح روی می‌دهد که به عبور نمک نیز منجر می‌شود و دفع نمک کاهش می‌یابد [۱۷].

به طور کلی، از لحاظ نظری، نفوذ پذیری غشاء نانومرکب نازک لایه حاوی نانوذرات نفوذ ناپذیر (مثلاً، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید) باید کاهش یابد، در حالی که نفوذ پذیری غشاء نانومرکب نازک لایه با استفاده از نانوذرات نفوذپذیر (مثلاً، نانوذرات زئولیت) باید افزایش یابد. هر نانوذره با تراوش پذیری آب بالاتر از شبکه بسیاری می‌تواند تراوش پذیری غشاء نانومرکب نازک لایه حاصل را با ارائه مسیرهای جریان ترجیحی از میان نازک لایه، افزایش دهد. درصد وزنی نانوذرات مورد نیاز برای بهبود معقول و منطقی، به تراوش‌پذیری ذاتی هر دو فاز (نانوذرات و شبکه بسیاری) بستگی دارد. در مقابل، نانوذرات نفوذ ناپذیر مانند تیتانیوم دی‌اکسید تنها قادرند نفوذپذیری آب از یک غشا را به واسطه کاهش سطح قابل دسترس برای نفوذ از طریق لایه بسیاری کاهش دهند. بنابراین، مواد غیر قابل نفوذ می‌توانند نفوذپذیری غشاء را از طریق ایجاد نقص افزایش دهند که ممکن است با بهبود دفع نمک سازگاری نداشته باشد [۴].

۳.۴. تأثیر نانوذرات و نانولوله‌ها بر خواص سطحی غشاء اسمز معکوس

خواص سطحی غشای اسمز معکوس مرکب نازک لایه RO-TFC با ناهمواری، آب‌دوستی و بار سطحی مشخص می‌شود. ناهمواری‌های سطح در عملکرد غشاء اثری دوگانه دارد. از آن‌جا که سطح ناهموارتر می‌تواند مساحت مؤثر بزرگتری را فراهم آورد، بنابراین، منجر به ترشوندگی^۱ بهتر و در پی آن شدت جریان آب تراویده بالاتر می‌شود. با این حال، ناهمواری سطحی نیز در ارتباط نزدیکی با گرفتگی غشا قرار دارد و غشای با سطح ناهموارتر مقاومت در برابر گرفتگی پایین‌تری دارد. بار سطحی نیز در ارتباط با گرفتگی است و به بار رسوب‌ها بستگی دارد. غشاء با بار سطحی منفی، قادر به جذب بهتر مولکول‌های قطبی آب است و می‌تواند آنیون‌ها را دفع و کاتیون‌ها را جذب کند. با این حال، هرچه گرایش آب به سطح بیشتر

1. Wettability

جدول ۴. تغییرات ایجاد شده در خواص سطحی غشا نانومرکب نازک لایه TFN نسبت به مرکب نازک لایه TFC به واسطه ترکیب نانوذرات یا نانولوله‌ها.

مرجع	تغییرات ایجاد شده در خواص سطح نسبت به غشا پلی آمید اولیه	نوع نانوذره یا نانولوله
[۱۳]	افزایش آبدوستی، بار سطحی منفی بیشتر، ناهمواری کمتر	زنولیت NaA
[۱۵]	افزایش آبدوستی، بار سطحی منفی، ضخامت بیشتر نازک لایه	زنولیت NaA
[۱۴]	افزایش آبدوستی، بار سطحی منفی بیشتر، ناهمواری کمتر	زنولیت NaA
[۱۶]	افزایش آبدوستی، ضخامت کمتر نازک لایه	زنولیت NaX
[۱۷]	گزارشی ارائه نشده است.	TiO ₂
[۱۸]	افزایش آبدوستی	TiO ₂
[۱۹]	افزایش آبدوستی، افزایش بار سطحی منفی	آلومینا
[۲۰]	افزایش آبدوستی، افزایش بار سطحی منفی	سیلیکا
[۲۱]	افزایش آبدوستی، افزایش بار سطحی منفی، ناهمواری بیشتر	نقره (nAg)
[۱۲]	افزایش آبدوستی، بار سطحی مثبت، ناهمواری بیشتر	مس (nCu)
[۲۱]	افزایش آبدوستی (نانولوله‌ها به بستر تقویت کننده اضافه شده اند و به طور مستقیم بر نازک لایه سطح تأثیری نداشته اند)	نانولوله کربنی چند جداره
[۲۲]	افزایش آبدوستی، افزایش بار سطحی منفی	نانولوله کربنی چندجداره عامل دار شده
[۲۳]	افزایش آبدوستی، افزایش زبری سطحی	نانولوله آلومینا سیلیکاته تک جداره

آثار قوی ترکیبات و یون‌های نقره برای طیف گسترده ای از فعالیت‌های ضد میکروبی شناخته شده است [۲۷]. به طور کلی، یون‌های نقره از طریق واکنش با گروه تیول (-SH) در سلول‌های میکروبی نقش مهمی را در نافع‌سازی باکتری‌ها ایفا می‌کند. علاوه بر این، یون‌های نقره از تکثیر DNA جلوگیری می‌کنند و بر ساختار و نفوذپذیری غشای سلولی تأثیر می‌گذارند [۲۶]. کیم^۱ و همکارانش [۲۱] نشان دادند که در غشاء TFN نقره، ۹۶٪ سلول‌های باکتری چسبیده به غشاء مرده بودند، در حالی که این مقدار برای غشاهای TFC کمتر از ۳٪ بود.

ساز و کار سمی بودن مس برای باکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها پیچیده و به طور کامل درک نشده است [۱۲]. مس و گونه‌های اکسیژن فعال درون سلولی را افزایش می‌دهد، که منجر به تنش اکسایشی و آسیب رسیدن به DNA می‌شود. علاوه بر این،

اتصال نانوذرات تیتانیوم دی اکسید روی سطح پلی آمیدی غشا RO-TFC به منظور افزایش خواص ضد گرفتگی با خودآرایی از طریق تعامل بین کلونیدهای TiO₂ با بار مثبت و گروه‌های کربوکسیلیک منفی در سطح غشا برقرار می‌شود. نانوذرات TiO₂ با توزیع بر روی سطح غشا می‌تواند گونه‌های اکسایشی قوی، مانند رادیکال هیدروکسیل (H•)، سوپر اکسید (O₂•-)، رادیکال هیدروپروکسیل (HO₂•-)، را تحت تابش نور فرابنفش آزاد کند، که می‌تواند به طور مؤثری اکثر ریزاندامگان‌های آزاد را از بین ببرد، تشکیل لایه زیستی را مهار کند و در پی آن خواص ضد گرفتگی زیستی غشا را ارتقاء دهد. با این حال، این راهبرد نیاز به امکانات اضافی مانند تابش نور فرابنفش دارد، که ناگزیر هزینه آن افزایش خواهد یافت. بنابراین، به منظور بهبود خواص ضد گرفتگی غشا با ترکیب آن با نانوذرات TiO₂ در سال‌های اخیر پژوهش‌های نسبتاً کمی را به خود اختصاص داده است [۲۶ و ۲۵].

1. Kim

است و هنوز باید بسیاری از مشکلات بر طرف شوند. دو چالش عمده در این راه عبارت‌اند از هزینه‌های بالای تولید مواد نانوساختار، و مشکل در فرایند تولید غشاهای نانومرکب در مقیاس بالا برای مصارف تجاری [۲۸].

به منظور ارزیابی تاثیر فناوری غشایی جدید، دو دسته عوامل باید در نظر گرفته شوند: اول بهبود عملکرد، که مربوط به تراوش پذیری، گزینش، و استحکام است، و دوم ماندگاری تجاری، که مربوط به هزینه مواد، مقیاس پذیری و سازگاری با زیرساخت‌های تولید موجود است.

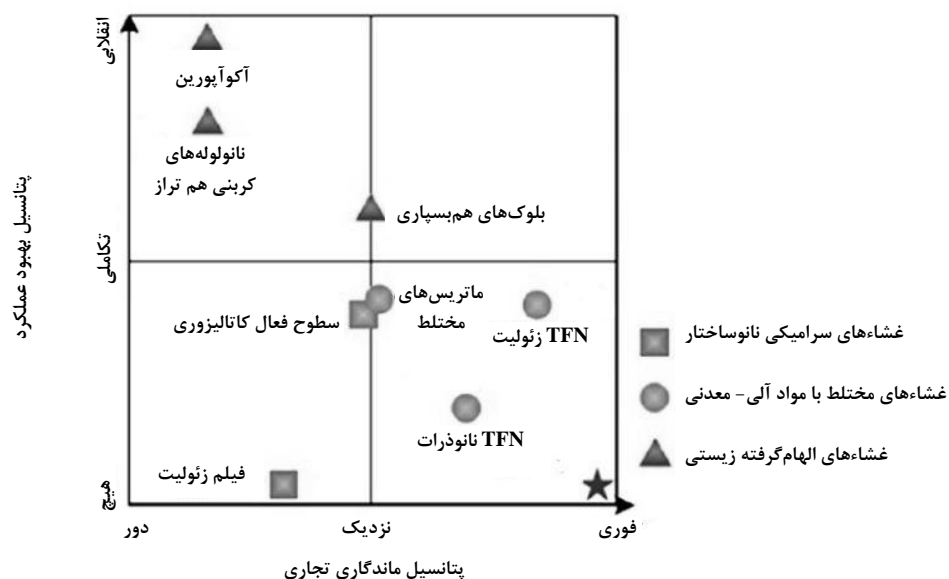
هوک^۱ و پندرگست^۲ [۲۹] یک رتبه بندی کلی از نظر بهبود عملکرد در برابر ماندگاری تجاری ارائه داده اند که در شکل (۶) مشاهده می‌کنید. هر چند این شکل همه موارد کاربرد فناوری نانو در تولید غشا برای نمک‌زدایی را در بر می‌گیرد، و در این مقاله تنها به نانوذرات یا نانولوله‌ها (دایره‌های روی شکل (۶)) پرداخته شده است، فناوری آرمانی آن است که هم پیشرفت عملکرد انقلابی و هم قابلیت ماندگاری تجاری داشته باشد (ربع بالایی سمت راست) اما در این نمودار، هیچ یک از غشاهای نانومرکب نازک لایه در ربع بالایی سمت راست نمودار قرار ندارد. با این وجود ممکن است در طی زمان به سرعت تغییر کند.

مس به غشا سلولی صدمه می‌رساند. عامل‌دار کردن غشا با نانوذرات مس فعالیت ضد باکتریایی چشمگیری بروز می‌دهد، به طوری که منجر به کاهش ۸۰ تا ۹۵ درصدی سه مدل مختلف از باکتری‌های زنده متصل به غشا می‌شود [۱۲].

نانولوله‌های کربنی به عنوان مواد بالقوه ضد باکتری مورد توجه چندانی قرار نگرفته‌اند، زیرا احتمالاً دستیابی به یک پراکندگی یکنواخت و همگن آن‌ها در آب دشوار است. همچنین، این نکته وجود دارد که فعالیت ضد میکروبی نانولوله‌های کربنی نیازمند تماس مستقیم بین نانولوله‌ها و ریزاندامگان‌های هدف است. گرچه سرعت غیر فعال کردن باکتری‌ها از طریق نانولوله‌ها نسبت به مواد ضد عفونی کننده‌ی مرسوم نسبتاً کم است، ممکن است برای جلوگیری از تشکیل لایه زیستی و گرفتگی زیستی متعاقب آن بر روی سطح غشا RO کافی باشد [۲۶].

۳.۶ آینده و ماندگاری تجاری غشاهای نانومرکب نازک لایه

غشاهای نانومرکب نازک لایه ویژگی‌های تراوش پذیری قابل توجهی بروز داده‌اند. پژوهشگران حوزه غشا بر این باورند که فناوری نانو احتمالاً می‌تواند پیشرفت‌های انقلابی عظیمی در صنعت نمک‌زدایی به ارمغان بیاورد. با این حال، توسعه چنین غشاهایی در مراحل اولیه



شکل ۶. پتانسیل بهبود عملکرد در برابر پتانسیل ماندگاری تجاری بر اساس رتبه‌بندی هوک و پندرگست [۲۹].

1. Hoek
2. Pendergast

غشا و نیز کاهش و یا از بین بردن گرفتگی (به خصوص گرفتگی زیستی) شود. هدف از ساخت غشاهای اسمز معکوس نانومرکب نازک لایه، ترکیب نانوذرات معدنی/ آلی و یا نانولوله‌ها در نازک لایه غشای بسیاری به منظور بهبود شار تراویده با حفظ دفع نمک بالا، تغییرات مفید شکل ساختاری سطح و بهبود مقاومت در برابر گرفتگی زیستی است. ترکیب نانوذراتی چون زئولیت، سیلیکا، آلومینا و نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار شده و نانولوله‌های آلومینا سیلیکات تک‌جداره، منجر به افزایش ناهمواری سطح منجر می‌شود که می‌تواند مساحت مؤثر در تماس با آب را افزایش دهد و نیز آب‌دوستی سطح و بار سطحی منفی را بهبود بخشد، که به جذب آب بر روی سطح و بهبود تراوایی آن کمک کند که در نتیجه، شار تراویده بالاتری را به همراه دفع نمک بالا در پی دارد. همچنین، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، نقره و مس که خواص ضد باکتریایی دارند و نیز خود نانولوله‌های کربنی، در صورت ترکیب در نازک لایه غشای مرکب نازک لایه می‌تواند به‌طور مؤثری به کاهش استعداد غشاء برای گرفتگی زیستی کمک کند.

با این وجود، ترکیب نانوذرات و نانولوله‌ها در غشای مرکب نازک لایه و تولید این غشاها در مقیاس صنعتی با موانعی رو به‌رو است. مراحل ساخت این مواد، پیچیده، دشوار و هزینه‌بر و بارگذاری آن‌ها در نازک لایه غشاء با دشواری‌هایی مواجه است، زیرا باید از پراکندگی مؤثری در تمام سطح غشا برخوردار و از کلوخه شدن آن‌ها جلوگیری شود تا موجب ایجاد نقص در سطح غشا و افت عملکرد آن نشود. پژوهش‌های جدید در این زمینه باید این امر متمرکز شود تا نانوذرات و نانولوله‌ها با فرایندهای آسان و کم‌هزینه تری ساخته شوند و نیز روش‌هایی ابداع شود که این مواد به خوبی در تمام نازک لایه غشا پراکنده شود و نیز تولید این مواد و ساخت این غشاها را در مقیاس صنعتی تسهیل کند و شتاب بخشد.

مراجع

- [1] Zhao, L., Ho, W. S. W., "Novel reverse osmosis membranes incorporated with a hydrophilic additive for seawater desalination", *Journal of Membrane Science*, 455, 44-54, (2014).
- [2] Misdan, N., Lau, W. J., Ismail, A. F., "Seawater Reverse Osmosis (SWRO) desalination by thin-film composite membrane—Current development, challenges and future prospects", *Desalination*, 287, 228-237, (2012).

اگر چه تراوایی افزایش یافته غشاهای نانومرکب نازک لایه حاوی زئولیت در مقایسه با غشاهایی که نانولوله‌های کربنی دارند پایین‌تر است، اما به نظر می‌رسد به دلیل شباهت بیشتر با غشاهای RO تجاری کنونی، قابلیت انطباق بیشتری برای استفاده تجاری دارند (همان‌طور که در شکل قابل ملاحظه است). با این حال، مقرون به صرفه بودن آن‌ها باید بررسی شود، زیرا هزینه اضافی چشمگیری به دلیل ساخت پیچیده‌ی نانوذرات و انرژی اضافی مورد نیاز برای پراکنده کردن مؤثر آن‌ها در نازک لایه غشا، مورد نیاز است. مطالعات فنی بیشتر، مانند بهینه‌سازی اندازه نانو ذرات و مقدار بارگذاری آن‌ها، رفع نقایص بلوری، و ساده سازی روش‌های ساخت نانوذرات می‌تواند به تسهیل استفاده از این نانوذرات و تولید غشا TFN حاوی آن‌ها کمک کند [۲۸].

۴. نتیجه‌گیری کلی

استفاده از غشاهای اسمز معکوس به‌خصوص غشاهای مرکب نازک لایه پلی‌آمیدی، امروزه به یکی از مؤثرترین فناوری‌های نمک‌زدایی از آب دریا تبدیل شده است و به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند. با این احوال، این نوع غشاها با چالش‌ها و موانع متعددی رو به‌رویند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تبادل میان تراوایی و دفع نمک و نیز گرفتگی اشاره کرد، که به‌طور جدی مانع عملکرد بهتر غشاهای اسمز معکوس مرکب نازک لایه پلی‌آمیدی هستند. خواص سطحی غشا نظیر آب‌دوستی، ناهمواری سطح و بار الکتریکی سطحی در عملکرد نمک‌زدایی و نیز مستعد بودن غشا برای گرفتگی نقش مستقیم دارند. این عوامل در ارتباط تنگاتنگ با هم هستند. ناهمواری بیشتر سطح، مساحت مؤثر سطح غشا را افزایش می‌دهد و شار آب تراویده افزایش می‌یابد، ولی در عین حال استعداد گرفتگی غشا را نیز تقویت می‌کند و برعکس. از سوی دیگر، افزایش آب‌دوستی به جذب آب بر روی سطح کمک می‌کند و مانع از جذب رسوبات و ریزاندامگانها می‌شود و کنترل گرفتگی غشا را بهبود می‌بخشد. بار سطحی منفی بیشتر سطح که معمولاً از گروه‌های عاملی آب‌دوست حاصل می‌شود، اثری مشابه اثر افزایش آب‌دوستی دارد و به جذب آب روی سطح و کنترل گرفتگی غشا کمک می‌کند.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ترکیب نانوذرات و نانولوله‌ها راهبرد مؤثری است که می‌تواند منجر به بهبود عملکرد جداسازی

- [3] Waterlines, "Emerging Trends in Desalination: A Review, in Waterlines Report Series". UNESCO Centre for Membrane Science and Technology University of New South Wales. (2008).
- [4] Buonomenna, M. G., "Nano-enhanced reverse osmosis membranes", *Desalination*, 314, 73-88, (2013).
- [5] Mulder, M., "Basic Principles of Membrane Technology Second Edition", Kluwer Academic Pub, (1996).
- [6] Kurihara, M., Tomioka, H., "Preparation of industrial RO, NF membranes, and their membrane modules and applications", *Comp. Membr. Sci. Eng*, 2, 23-34, (2010).
- [7] Ba, C., "Design of Advanced Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification", thesis in Materials Science and Engineering, University of Illinois. (2010).
- [8] Li, D., Wang, H., "Recent developments in reverse osmosis desalination membranes", *Journal of Materials Chemistry*, 20, 4551-4566, (2010).
- [9] Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P., "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Research*, 43, 2317-2348, (2009).
- [10] Hoek, E. M. V., Jeong, B. H., Yan, Y., "Nanocomposite membranes and methods of making and using same, in US 60/660, 428, (2005).
- [11] Schwartz, V. B., Thétiot, F., Ritz, S., Pütz, S., Choritz, L., Lappas, A., Förch, R., Landfester, K., Jonas, U., "Antibacterial Surface Coatings from Zinc Oxide Nanoparticles Embedded in Poly(N-isopropylacrylamide) Hydrogel Surface Layers", *Advanced Functional Materials*, 22, 2376-2386, (2012).
- [12] Ben-Sasson, M., Zodrow, K. R., Gengeng, Q., Kang, Y., Giannelis, E. P., Elimelech, M., "Surface Functionalization of Thin-Film Composite Membranes with Copper Nanoparticles for Antimicrobial Surface Properties", *Environmental Science & Technology*, 48, 384-393, (2013).
- [13] Jeong, B. -H., Hoek, E., Yan, Y., Subramani, A., Huang, X., Hurwitz, G., Ghosh, A. K., Jawor, A., "Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: a new concept for reverse osmosis membranes", *Journal of Membrane Science*, 294, 1-7, (2007).
- [14] Lind, M. L., Ghosh, A. K., Jawor, A., Huang, X., Hou, W., Yang, Y., Hoek, E. M., "Influence of zeolite crystal size on zeolite-polyamide thin film nanocomposite membranes", *Langmuir*, 25, 10139-10145, (2009).
- [15] Lind, M. L., Jeong, B. -H., Subramani, A., Huang, X., Hoek, E., "Effect of mobile cation on zeolite-polyamide thin film nanocomposite membranes", *Journal of Materials Research*, 24, 1624-1631, (2009).
- [16] Fathizadeh, M., Aroujalian, A., Raisi, A., "Effect of added NaX nano-zeolite into polyamide as a top thin layer of membrane on water flux and salt rejection in a reverse osmosis process", *Journal of Membrane Science*, 375, 88-95, (2011).
- [17] Lee, H. S., Im, S. J., Kim, J. H., Kim, H. J., Kim, J. P., Min, B. R., "Polyamide thin-film nanofiltration membranes containing TiO_2 nanoparticles", *Desalination*, 219, 48-56, (2008).
- [18] El-Aassar, A. -H. M. A., "Improvement of reverse osmosis performance of polyamide thin-film composite membranes using TiO_2 nanoparticles", *Desalination and Water Treatment*, 1-12, (2014).
- [19] Saleh, T. A., Gupta, V. K., "Synthesis and characterization of alumina nano-particles polyamide membrane with enhanced flux rejection performance", *Separation and Purification Technology*, 89, 245-251, (2012).
- [20] Bao, M., Zhu, G., Wang, L., Wang, M., Gao, C., "Preparation of monodispersed spherical mesoporous nanosilica-polyamide thin film composite reverse osmosis membranes via interfacial polymerization", *Desalination*, 309, 261-266, (2013).
- [21] Kim, E. -S., Hwang, G., Gamal El-Din, M., Liu, Y., "Development of nanosilver and multi-walled carbon nanotubes thin-film nanocomposite membrane for enhanced water treatment", *Journal of Membrane Science*, 394, 37-48, (2012).
- [22] Zhao, H., Qiu, S., Wu, L., Zhang, L., Chen, H., Gao, C., "Improving the performance of polyamide reverse osmosis membrane by incorporation of modified multi-walled carbon nanotubes", *Journal of Membrane Science*, 450, 249-256, (2014).
- [23] Baroña, G. N. B., Lim, J., Choi, M., Jung, B., "Interfacial polymerization of polyamide-aluminosilicate SWNT nanocomposite membranes for reverse osmosis", *Desalination*, 325, 138-147, (2013).
- [24] Ratto, T. V., Holt, J. K., Szmodis, A. W., "Membranes with embedded nanotubes for selective permeability", US Patent 7, 993, 524, . (2011).
- [25] Xu, G. -R., Wang, J. -N., Li, C. -J., "Strategies for improving the performance of the polyamide thin film composite (PA-TFC) reverse osmosis (RO) membranes: Surface modifications and nanoparticles incorporations", *Desalination*, 328, 83-100, (2013).
- [26] Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S., Boyce, M., "Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: phenomena and prevention", *Desalination*, 281, 1-16, (2011).
- [27] Perera, D. H. N., Nataraj, S. K., Thomson, N. M., Sepe, A., Hüttner, S., Steiner, U., Qiblawey, H., Sivaniah, E., "Room-temperature development of thin film composite reverse osmosis membranes from cellulose acetate with antibacterial properties", *Journal of Membrane Science*, 453, 212-220, (2014).
- [28] Lee, K. P., Arnot, T. C., Mattia, D., "A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential", *Journal of Membrane Science*, 370, 1-22, (2011)..
- [29] Pendergast, M. M., Hoek, E. M., "A review of water treatment membrane nanotechnologies", *Energy & Environmental Science*, 4, 1946-1971, (2011).