

## مروری بر غشاهای جدید اسمز معکوس و کاربردهای آن

مهرنوش محمدی<sup>۱\*</sup>، زینب روزبهانی<sup>۲</sup>، امیرعلی معصومی زنجانی<sup>۳</sup>

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

### چکیده ...

اسمز معکوس در بین دیگر فرایندهای غشایی محبوبیت بیشتری دارد؛ به طوری که پیش بینی شده است که ارزش بازار جهانی آن تا سال ۲۰۲۶ به ۵ میلیارد دلار برسد. عدم استفاده از مواد شیمیایی، مقاومت مکانیکی بالا، تعمیر، نگهداری و توسعه آسان از ویژگی های غشای اسمز معکوس است. غشای سلولزاستات قدیمی ترین نوع غشای اسمز معکوس است که شامل یک لایه بالایی روی یک لایه متخلخل پشتیبان است که با افزایش درجه استیل دار شدن، انتخاب پذیری و شار عبوری از غشا نیز افزایش پیدا می کند. غشای لایه نازک کامپوزیتی در ترکیب با پلی آمید ضعف های غشای سلولزاستات را کاهش داده است. ساختار غشای لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمیدی شامل لایه انتخاب پذیر نازک روی پشتیبان متخلخل است. لایه پشتیبان خواص مکانیکی غشا را افزایش می دهد. استفاده از نانوذرات و نانولوله های کربنی در ساختار غشای لایه نازک می تواند به طور قابل توجهی سبب افزایش شار عبوری از غشا با حفظ میزان حذف املاح شود. نمک زدایی از آب لب شور و دریا، کاهش سختی آب ورودی به دیگ بخار، تصفیه پساب نفتی، حذف فلزات سنگین و... تعدادی از کاربردهای غشای اسمز معکوس است. در این مقاله به جنس، کاربرد و توسعه های اخیر غشاهای اسمز معکوس پرداخته شده است.

### واژه های کلیدی:

غشای اسمز معکوس،  
سلولزاستات،  
لایه نازک کامپوزیتی،  
پلی آمید،  
نانوذرات

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Mehrnoush\_mohammadi@yahoo.com

## ۱ مقدمه

فناوری غشا امروزه به یکی از محبوب ترین فناوری ها در تصفیه پساب و جداسازی اجزای نامطلوب از جریان مورد نظر به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی، سادگی در فرایند و مصرف کم انرژی تبدیل شده است [۱، ۲]. غشاها موانع انتخابی هستند که دو فاز مختلف را از هم جدا و فقط اجازه عبور به اجزای خاصی را می دهند. فرایندهای غشایی، روشی فیزیکی، معمولاً بدون تغییر فاز و بدون اضافه کردن مواد شیمیایی به جریان خوراک است؛ بنابراین به عنوان روش جایگزین جداسازی یا تصفیه پساب برای فرایندهای معمولی (نظیر تقطیر، لخته شدن، جذب توسط کربن فعال، تبادل یون، تصفیه زیستی و غیره) شناخته می شود. دسته بندی مختلفی بر اساس سازوکار جداسازی، ساختار، جنس، اندازه تخلخل و اجزای سازنده و نوع نیروی محرکه برای غشاها در نظر گرفته شده است [۱، ۳]. در فرایندهای غشایی، جریان نسبی و میزان انتقال از طریق غشا، کیفیت محصول و نفوذ پذیری غشا و نیروی محرکه فرایند، خصوصیات انتقال املاح از طریق غشا کنترل و تعیین می کند. نیروی محرکه باعث عبور ترجیحی برخی مواد از غشاهای نیمه تراوا و جابه جایی جریان می شود. این نیرو می تواند اختلاف فشار، غلظت، دما یا پتانسیل الکتریکی بین دو طرف غشا باشد [۱، ۳].

بر اساس انواع سازوکار جداسازی در غشا، آن ها به دو دسته غربال مولکولی و نفوذی تقسیم می شوند. در غشاهای ریز متخلخل بر اساس صافش مولکولی (غربال مولکولی) از طریق منافذ کوچک با موقعیت و اندازه ثابت اجزای خوراک جدا می شوند؛ در حالی که در غشاهای متراکم تفاوت در حلالیت و تحرک گونه های موجود عامل جداسازی است و ماده غشایی، لایه پلیمری متراکم و فاقد منافذ است. مواد نفوذی در غشا حل شده، سپس به دلیل گرادیان غلظت در میان غشا پخش می شوند [۳]. توانایی جداسازی غشا با میزان انتخاب پذیری و

جدول ۱ دسته بندی غشاها بر مبنای نیروی محرکه [۴].

اختلاف فشار	اختلاف غلظت	اختلاف دما	اختلاف پتانسیل الکتریکی
میکروصافش	جداسازی گاز		
اولترافافش	تبخیر تراوشی		
نانو صافش	انتقال با واسطه حامل		الکترو دیالیز
اسمز معکوس	دیالیز		
پیرو دیالیز	دیالیز انتشاری		

شار جریان محصول از طریق غشای نیمه تراوا (نفوذپذیری) مشخص می شود؛ در حالی که عملکرد غشا براساس میزان نفوذپذیری، پایداری مکانیکی، شیمیایی و حرارتی خوب مواد غشایی، حداقل رسوب پذیری و سازگاری خوب با محیط و شرایط عملیاتی تعیین می شود. انتخاب پذیری غشا به طور مستقیم با ماهیت فیزیکی و شیمیایی جنس غشا ارتباط داشته، تفاوت در اندازه و شکل، خواص شیمیایی یا بار الکتریکی از عوامل تعیین کننده انتخاب پذیری غشا هستند [۳].

از بین فرایندهای غشایی، اسمز معکوس قادر به حذف بیش از ۹۹٪ از نمک های نامحلول، کلونیدها، مواد آلی و باکتری های بر اساس اندازه و بار آن ها از جریان خوراک است و تأثیر چشمگیری در کاهش سختی آب دارد [۵]. مصرف کم انرژی، کاهش تعداد مراحل فرایند، بازده جداسازی، کیفیت بالای محصول نهایی، عدم استفاده از حلال، امکان توسعه سامانه به سادگی و تعویض غشای معیوب بدون توقف کامل سامانه از اصلی ترین دلایل محبوبیت اسمز معکوس در مقایسه با سایر روش های جداسازی غشایی است [۳، ۴، ۶]. از یک طرف کمبود آب و از طرف دیگر افزایش جمعیت، نیاز روزافزون به تصفیه آب و پساب را بیشتر می کند؛ به طوری که پیش بینی می شود که ارزش بازار جهانی غشای اسمز معکوس تا سال ۲۰۲۶ از ۳/۱ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱، به ۵ میلیارد دلار برسد [۷].

## ۲ مبنای اسمز معکوس

اسمز فرایندی طبیعی است که حلال (آب) از طریق ماده مرزی نیمه تراوا مانند غشا از سمت رقیق به سمت غلیظ می رود و این حرکت تا زمان تعادل ادامه پیدا می کند [۸]. در فرایند اسمز معمولی محلول آب و نمک، اختلاف در غلظت منجر به جاری شدن آب به طرف با غلظت بیشتر در غشا می شود که باعث ایجاد اختلاف فشار اسمزی می شود. در سامانه های اسمز معکوس وجود نیروی محرکه مانند فشار، جریان را معکوس می کند؛ به طوری که آب از محلول نمک به سمت آب خالص در غشا حرکت می کند. فشار وارد شده باید از اختلاف فشار اسمزی بیشتر باشد [۳]. شکل ۱ طرح واره اسمز و اسمز معکوس را نشان می دهد [۹].

## ۳ ماژول غشایی اسمز معکوس

برای فرایندهای غشایی در مقیاس بزرگ، مانند کاربردهای صنعتی یا تجاری، سطح غشای بزرگی مورد نیاز است. این سطوح طبق ملاحظات اقتصادی دسته بندی می شوند که معروف به ماژول هستند. در اصل ماژول یک واحد کامل مهندسی شده است که غشا را مرتب و سطح را افزایش می دهد. ماژول، به

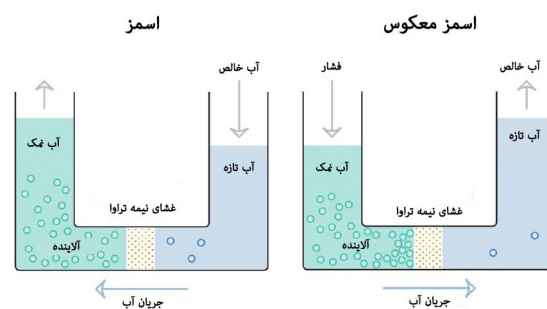
بیشتری نسبت به ماژول الیاف توخالی در فرایندهای غشایی اسمز معکوس دارد. غشای ماریپچ از تعدادی غشا، فاصله‌دهنده‌های مرکزی جریان نفوذی، فاصله‌دهنده‌های جریان خوراک و لوله مرکزی تشکیل شده است. محلول خوراک از طریق فاصله‌دهنده خوراک، به موازات لوله مرکزی جریان می‌یابد. جریان نفوذی نیز از طریق فاصله‌دهنده مربوط به خود، به صورت ماریپچ، عمود بر جهت جریان خوراک، جریان می‌یابد و توسط لوله مرکزی جمع‌آوری می‌شود [۱۰، ۱]. فاصله‌دهنده خوراک که معمولاً از نوع پلی‌پروپیلنی با ضخامت خالص ۰/۶ تا ۰/۹ میلی‌متر دو وظیفه حفظ فاصله بین دو غشا و افزایش اختلاط به منظور ایجاد غلظت یکنواخت را بر عهده دارد. فاصله‌دهنده جریان نفوذی مجرای فراهم می‌کند که اجازه می‌دهد جریان نفوذی از غشا به سمت لوله جمع‌آوری مرکزی جریان یابد [۱۰].

#### ۴ جنس غشای اسمز معکوس

جنس غشای اسمز معکوس می‌تواند آلی یا غیرآلی و تابعی از کاربرد آن باشد. غشای اسمز معکوس باید مقاوم در برابر مواد شیمیایی با خواص مکانیکی پایدار در طول زمان و انتخاب‌پذیری بالا باشد [۸]. مقاوم در برابر رسوب، دوام، مقاومت در pH های متفاوت، هزینه کم، مقاوم در برابر کلر از دیگر ویژگی‌های جنس مطلوب برای غشای اسمز معکوس است [۱۳].

#### ۴-۱ غشاهای مبتنی بر سلولز

غشای سلولزاستات، قدیمی‌ترین نوع غشای اسمز معکوس متقارن است. سلولزاستات، استراستات سلولز بوده، ترکیبی آلی است. در سال ۱۹۵۵ غشای سلولزاستات توسط Reid و همکاران تهیه و معرفی شد. با این‌که غشای آن‌ها تا ۸۰٪ نمک را از جریان خوراک حذف کرده بود اما شار عبوری بسیار کمی داشت [۱۴، ۱۵]. Leob و همکاران در سال ۱۹۶۳ اولین غشای اسمز معکوس سلولز دی‌استات را تهیه کردند که نسبت به غشای سلولزاستات شار بالاتری داشت اما در مقابل واکنش‌های



شکل ۱ طرح‌واره اسمز و اسمز معکوس [۹].

اندازه خود غشا، در کارایی غشا تعیین‌کننده است و به‌طور کلی فرایند غشایی، نوع ماژول مناسب را برای کارکرد تعیین می‌کند [۱، ۳]. الیاف توخالی، لوله‌ای، ماریپچ و صفحه و قاب، چهار دسته کلی ماژول‌های غشایی هستند؛ اما دو نوع ماژول الیاف توخالی و ماریپچی در غشاهای اسمز معکوس به کار می‌رود [۱۰، ۱]. هر دوی این ماژول‌ها برای افزایش نسبت سطح به حجم طراحی شده‌اند اما ماژول الیاف توخالی نسبت سطح به حجم بیشتری در مقایسه با ماژول ماریپچ دارد [۱۱].

#### ۳-۱ غشای الیاف توخالی

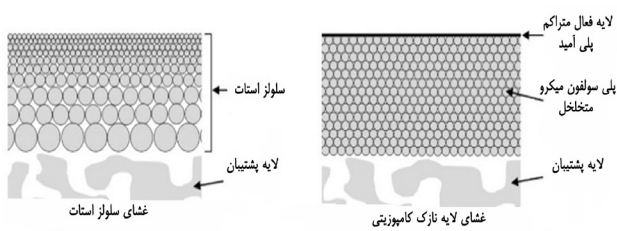
غشاهای الیاف توخالی در دهه ۱۹۶۰ برای کاربردهای اسمز معکوس توسعه یافت و در تصفیه آب، نمک‌زدایی، کشت سلولی و در زمینه‌های پزشکی و دارویی استفاده می‌شوند. این نوع ماژول، دسته‌ای از الیاف توخالی به صورت انتهابسته و باز در مخزنی تحت فشار هستند و از لایه پشتیبانی متخلخل و لایه فعال انتخاب‌پذیر تشکیل شده است. لایه فعال برای مقاومت در برابر فشار هیدرواستاتیک نیاز به لایه پشتیبانی دارد. غشاهای الیاف توخالی به دلیل نیاز کم به انرژی، سادگی کار و سطح زیاد بسیار محبوب هستند [۱۲، ۱].

#### ۳-۲ غشای ماریپچ

این ماژول غشایی به دلیل فراهم کردن سطح بیشتر، کاربرد

جدول ۲ مقایسه ماژول الیاف توخالی با ماریپچ [۳].

مشخصات	تراکم	مصرف انرژی	پتانسیل رسوب	تمیزکاری و شستوشو	فناوری تولید	هزینه تولید
الیاف توخالی	زیاد	کم	خیلی زیاد	شستوشوی معکوس	متوسط	کم
ماریپچ	زیاد	متوسط	زیاد	سخت	پیچیده	متوسط



شکل ۲ مقایسه غشای سلولز استات با لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمیدی [۱۹].

می کند؛ در حالی که لایه مانع، عملکرد جداسازی یونی را برعهده دارد [۱۵، ۱۸]. پلی اتیلن ترفتالات، سلولز-استات، پلی آمید، پلی پروپیلن، پلی کتون از پلیمرهایی هستند که به عنوان پشتیبان متخلخل کاربرد دارند؛ در بین آن ها پلی سولفون یکی از بهترین پشتیبان های میکرومتخلخل برای غشای TFC با تخلخل هایی از ۱۵-۱/۹ نانومتر است [۱۵].

به منظور افزایش کارایی غشای لایه نازک کامپوزیتی اصلاح سطح غشا انجام می شود [۱۸]. استفاده از مونومر آمین آب دوست، مواد افزودنی برای فاز آبی، خیساندن و لایه نشانی، تعدادی از روش های اصلاح سطح غشای لایه نازک کامپوزیتی است [۱۰].

از سال ۱۹۷۰ تحقیقات گسترده ای پیرامون استفاده از غشای لایه نازک کامپوزیتی با بازده و کارایی بالا انجام شد. از آن زمان شکل جدیدی از غشاها با استفاده از نانو مواد در لایه پلی آمید یکی دیگر از روش های موثر برای ساخت غشاها اسمز معکوس در دست تحقیق و بررسی قرار گرفت که به عنوان غشای لایه نازک نانوکامپوزیتی (Thin Film Nano Composite) شناخته می شود [۱۸، ۲۰]. اختراع غشای TFN برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط هوک و همکارانش گزارش شد. آن ها دریافتند که قراردادن نانو مواد معدنی ژئولیت در لایه نازک پلی آمید غشای کامپوزیتی می تواند باعث افزایش قابل توجه جریان آب غشای لایه نازک کامپوزیتی شود؛ در حالی که مقدار رد نمک بدون تغییر باقی می ماند [۲۱]. در مقایسه با غشاها لایه نازک کامپوزیتی، نفوذپذیری آب غشاها لایه نازک نانوکامپوزیتی معمولاً به دلیل مجاری داخلی یا طبیعت آب دوستی نانو مواد تعبیه شده به طور قابل توجهی تسهیل می شود، به طوری که شار آن ۱-۲ برابر (با رد نمک مشابه) در مقایسه با TFC افزایش یافته است [۲۰]. Ma و همکاران [۲۲] رویکرد آسانی برای ساختن غشای اسمز معکوس با عملکرد بالا با تولید نانوحفره در لایه پلی آمید برای تغییر نفوذپذیری آب و انتخاب پذیری غشاها TFC پیشنهاد کردند. با افزودن بی کربنات سدیم غشای حاصل ۵۲٪ نفوذپذیری آب را با رد نمک مشابه نسبت به TFC

زیستی محدودیت داشت [۱۵]. غشاها مبتنی بر سلولز تری استات نوعی از غشاها مبتنی بر سلولز هستند که نسبت به انواع پیشین پایداری حرارتی، مکانیکی و زیستی بهتری دارد [۱۴، ۱۵]. سلولز تری استات ترکیب شیمیایی تولید شده از سلولز با منبع استراسات است که با نام تری استات شناخته می شود [۱۱]. به طور کلی غشای مبتنی بر سلولز شامل لایه بالایی روی لایه متخلخل پشتیبان است و بازده صافش آن وابسته به درجه استیل دار کردن است؛ به طوری که غشای مبتنی بر سلولز استات با ۴۰٪ وزنی استات و ۲/۷ درجه استیل دار شدن ۹۸ الی ۹۹ درصد نمک را حذف می کند. استیل دار کردن بیشتر، انتخاب پذیری را افزایش و شار عبوری را کاهش می دهد [۱۵]. از غشای سلولز استات برای سالیان متوالی به منظور نمک زدایی آب های لب شور و دریا، صاف کردن متانول، اتانول و اوره استفاده می شد. امروزه از غشاها الیاف توخالی سلولز استات همچنان در نمک زدایی آب دریا استفاده می شود [۱۱]. نوع جدیدی از غشاها سلولز استات که حذف نمک بالاتری نسبت به نوع ابتدایی غشای سلولز استات دارد، با قیمت پایین تری در حال توسعه است [۱۱]. Duarte و همکاران [۱۶] ترکیب بهینه درصد های جرمی شامل حلال ها (۴۵/۷۷٪ دی اکسان، ۱۷/۶۱٪ استون، ۸/۴۵٪ استیک اسید)، پلیمرها (۴/۲۲٪ سلولز تری استات و ۹/۸۶٪ سلولز دی استات) و ۱۴/۰۹٪ متانول غیر حلال و ۵٪ الیاف سلولز را برای تهیه غشای سلولز استات اسمز معکوس با قیمت پایین تر و درصد حذف بالاتر پیشنهاد دادند. Silva و همکاران [۱۷] غشای ترکیبی مبتنی بر سلولز استات با نانوذرات نقره و آلومینیوم را برای جلوگیری از رشد ریزاندام واره ها پیشنهاد دادند. همچنین این غشا برای کاهش آلودگی آب با یون فسفات هم کاربرد دارد.

#### ۴-۲ غشای لایه نازک کامپوزیتی TFC

غشای لایه نازک کامپوزیتی توسط Cadotte در سال ۱۹۷۰ اختراع شد؛ ولی از نیمه دوم ۱۹۸۰ به صورت گسترده در صنایع مورد استفاده قرار گرفت [۸، ۱۵]. غشای پلی آمیدی نیز توسط Hoehn و همکاران توسعه یافت که بازده خالص سازی آب خوبی داشت. محدودیت اصلی غشای پلی آمیدی حساسیت به کلر آزاد است. بعد از توسعه غشاها لایه نازک کامپوزیتی، ترکیبی از پلی آمید با TFC حاوی مواد پلی استری که کارایی و مقاومت بهتر به کلر آزاد را داشت، مد نظر قرار گرفت [۱۱، ۱۵]. ساختار لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمیدی شامل لایه انتخاب پذیر نازک روی پشتیبان متخلخل است. پشتیبان با ساختاری میکرومتخلخل، مقاومت مکانیکی و شار بالای آب را فراهم

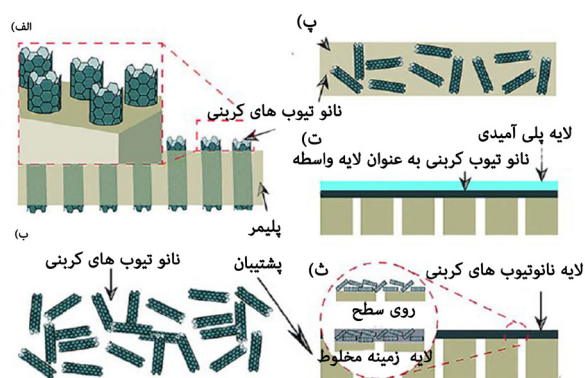
از خواص نانولوله‌های کربنی است. CNTها مولکول‌های استوانه‌ای ترکیبی از ورقه‌های گرافیت پیچیده شده از قطر ۱ نانومتر تا چندین سانتی متر است. براساس تعداد لایه‌های گرافیت، نانولوله‌های کربنی به سه دسته تک، دو و چنددیواره تقسیم می‌شوند. هزینه بالا، انتخاب پذیری کم برای یون‌های مشخص (آرسنات، آرسنیک و سدیم) از محدودیت‌های این غشا است [۱۴، ۱۵]. به طور کلی غشاهای حاوی نانولوله کربنی مقاومت شیمیایی و دوام بالاتری را از خود نسبت به غشاهای معمولی نشان می‌دهد [۱۱].

### ۵ غشاهای توسعه یافته

پیشرفت‌های زیادی در زمینه توسعه غشاهای سلولز و کامپوزیتی پلی آمیدی به منظور افزایش شار عبوری و آب دوستی، کاهش رسوب پذیری و هزینه تمام شده غشا انجام شده است [۱۱]. جدول ۳ تعدادی از مطالعات روی غشاهای توسعه یافته و اصلاح شده را به همراه نتایج نشان می‌دهد.

### ۶ کاربرد غشاهای اسمز معکوس

یکی از متداول‌ترین کاربردهای غشای اسمز معکوس نمک زدایی از آب دریا و اقیانوس‌ها با سطح نمک ۳۵۰۰۰ میلی گرم بر لیتر و آب‌های لب شور حاوی نمک‌های غیرمحلول از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به مقدار ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر (مقدار استاندارد نمک پیشنهاد شده از طرف WHO برای آب قابل شرب) است [۳۱]. استفاده از غشای الیاف توخالی مبتنی بر سلولزتری استات توسعه یافته در نمک زدایی آب دریا موفقیت آمیز بوده است؛ به طوری که حذف نمک تا ۹۷/۵٪



شکل ۳ غشای نانولوله کربنی با ساختارهای متفاوت (الف) عمودی (ب) ورقه بسیار نازکی از نانولوله‌های کربنی (پ) زمینه مخلوط (ت) غشاهایی با نانولوله‌های کربنی در لایه میانی (ث) غشاهایی با نانولوله‌های کربنی روی سطح یا لایه پشتیبان [۴].

عادی بهبود بخشید. به همین ترتیب وانگ و همکارانش [۲۳] مفهوم رویکرد الگوسازی را برای تولید نانوحفره‌ها در داخل لایه پس زنده پلی آمید با پیش بارگذاری نانوذرات مس در لایه پلی آمید آغاز و سپس آن‌ها را با اسید حکاکی کردند. غشای TFC حاوی نانوحفره‌ها در مقایسه با غشای اصلاح نشده، شار آب بیشتری با رد نمک مشابه نشان داد [۲۳، ۲۴].

### ۴-۳ غشای پلی آمیدی با نانولوله‌های کربنی

غشاهای پلی آمید اسمز معکوس همراه با نانولوله‌های کربنی توسط Kim و همکاران با روش پلیمری شدن سطحی تهیه شدند [۱۱]. سطح زیاد، ساختار یکپارچه، پیوندهای اتمی قوی تعدادی

جدول ۳ تعدادی از مطالعات و بررسی‌های انجام شده روی غشاهای توسعه یافته و اصلاح شده.

عنوان	غشای اصلاح شده	کاربرد/خواص	مرجع
سلولزی	ترکیب پلی استر و دی استات سلولز	بهبود خواص مکانیکی مخلوط غشا، حذف نمک تا ۹۹٪	[۲۵]
	سلولز استات، روش شبیه سازی	حذف بیش تر از ۹۸٪ یون آمونیوم از محلول آبی	[۲۶]
لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمید	کاهش ضخامت لایه انتخاب پذیری	افزایش نفوذ آب	[۲۷]
	پلی آمید-نانولوله کربن	حذف نمک به میزان ۹۷/۶۹٪ و افزایش دوبرابری شار عبوری از غشا نسبت به حالت بدون نانولوله کربنی	[۲۸]
	نانولوله کربنی چنددیواره با پلی آمید آروماتیک	بهبود عملکرد غشا از نظر جریان و رسوب پذیری، عدم تجزیه کلر در این غشا	[۲۹]
	سیلیکون دی اکسید-پلی آمید	افزایش آب دوستی سطح غشا، افزایش شار به تدریج در سطوح پایین تر نانوذرات	[۳۰]



که پوشش PVA لایه کیک کمتر و ذرات جذب شده کمتری در تصفیه پساب PRW ایجاد می‌کند. ونزکه و همکاران [۳۷] تأثیر سامانه ترکیبی الکترودیالیز معکوس و اسمز معکوس را با استفاده از غشای ماریچ پلی آمیدی بر روی پساب پتروشیمی جنوب برزیل به منظور دستیابی به آب استاندارد برای استفاده مجدد در برج‌های خنک کننده بررسی کردند. نتایج بیانگر حذف COD به میزان ۹۷/۶۴٪، کدورت به میزان ۹۹/۶۶٪، TSS به میزان ۹۵/۸۲٪ و حذف ذرات به میزان بیش از ۹۵٪ درصد بود. نتایج نشان داد که فرآیند EDR-RO می‌تواند روش مناسبی برای تولید آب مورد نیاز برج‌های خنک کننده باشد. قذک و همکاران [۳۸] به منظور حذف فلزات سمی و خطرناک مانند جیوه که به طور طبیعی در ترکیبات نفت و گاز استحصال می‌شود وجود دارد، مطالعه آزمایشگاهی تصفیه پساب پالایشگاه با مقدار جیوه حدوداً ۲ میلی گرم بر لیتر را با استفاده از غشای لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمید اسمز معکوس به ثبت رساندند. نتایج بیانگر بازده حذف جیوه برابر ۹۷/۵٪، COD ۹۹/۷۵٪ و کل جامدات محلول ۹۳/۲۹٪ و عملکرد قابل قبول برای این سامانه تصفیه بود. یکی دیگر از کاربردهای غشای اسمز معکوس در تصفیه و جداسازی مخلوط گازهاست. انتشار  $SO_2$  و  $CO_2$  از نیروگاه‌های زغال سنگ و حاصل از سوختن گازهای سوختنی مانند متان و گاز طبیعی و کنترل، جداسازی و بازیافت آن‌ها پس از احتراق، پیش از احتراق و احتراق با اکسیژن خالص بسیار حائز اهمیت است.  $CO_2$  بازیافتی را می‌توان برای تولید آمونیاک، اوره، کپسول‌های اطفای حریق و همچنین بهبود بازیابی نفت در مخازن نفت/گاز استفاده کرد [۳۹]. جینگ سون و همکاران [۳۹] در مطالعه‌ای اثر غشاهای پلی آمیدی اسمز معکوس اصلاح شده را بر روی جداسازی  $CO_2$  بررسی کردند. از پلی اتیلن ایمین (PEI) به عنوان پلی کاتیون برای آماده سازی غشا استفاده شد. در نتیجه مشخص شد که این سامانه توانایی نفوذ  $CO_2$  به میزان ۷۷ GPU و انتخاب پذیری  $N_2/CO_2$  در حدود ۶۳ را دارد. کیم و همکاران [۳۲] با پوشاندن PEI HF با پلی (وینیل کلرید)-گرافت پلی (اکسی اتیلن-متاکریلات (PVC-g-POEM)) غشایی کامپوزیتی با الیاف توخالی تهیه کرد. قطر داخلی و خارجی HFM به ترتیب ۲۶۱ و ۴۲۹ میکرومتر بود و لایه پوشش انتخابی در سطح بیرونی حدود ۰/۱ میلی متر بود. این غشا از نظر نفوذ گازهای خالص ( $CO_2$ ،  $SO_2$  و  $N_2$ ) در شرایط مختلف عملکرد آزمایش شد. گزارش شده است که میزان نفوذ  $SO_2$ ، ۲۷۰۵-۱۰۵ GPU و انتخاب پذیری  $SO_2/CO_2$ ، ۶/۹-۱۷۵/۳ بود. از آزمایش جداسازی گاز مخلوط، حداکثر بازده حذف  $SO_2$  به ۸۴/۵٪ رسید.

انجام شده است. این نوع از غشای توسعه یافته در اصل غشای نامتقارن دارای لایه نگهدارنده متخلخل متراکم و همگن تر نسبت به غشای الیاف توخالی مبتنی بر سلولز استات معمولی است [۳۲]. قاسمی نژاد و همکاران [۳۳] با بهبود مقاومت مکانیکی، پایداری حرارتی غشای اسمز معکوس سلولز استات با اضافه کردن اکسیدگرافن به منظور نمک زدایی آب دریا به حذف ۹۰٪ نمک و شار آب به میزان ۶۵ ( $L/m^2.h$ ) در غلظت ppm ۲۵۰۰۰ نمک رسیدند. یکی دیگر از کاربردهای غشای اسمز معکوس در کاهش سختی آب است. استفاده از آب با سختی بالا در دیگ‌های بخار و خنک کننده‌های صنعتی باعث مشکلاتی مانند جامدشدن نمک‌های غیرآلی نامحلول در خوراک، کاهش انتقال حرارت، افزایش زمان تمیزکاری، کاهش عمر مفید تجهیزات می‌شود [۳۱]. بهترین راه برای حذف آلاینده‌ها از آب خوراک دیگ بخار غشای اسمز معکوس سلولز استات یا لایه نازک کامپوزیتی است [۳۴]. از طرف دیگر غشای اسمز معکوس توانایی جداسازی تا ۹۹ درصد جامدات معلق، BOD، COD، را دارد. از این رو در تصفیه پساب پالایشگاه نفت که حاوی غلظت‌های بالایی از مواد آلی، غیرآلی و ترکیبات فنولی و آمونیاک است، کارآمد است. پساب پالایشگاه نفت (PRW) برای محیط زیست، به ویژه برای سلامت انسان مضر است و تصفیه نادرست آن می‌تواند مشکلات جدی ایجاد کند [۳۵]. صالحی و همکاران [۳۶] در پژوهش خود از غشای اسمز معکوس لایه نازک کامپوزیتی-پلی آمیدی در اندازه آزمایشگاهی برای خالص سازی تصفیه پساب نفتی پالایشگاه تهران به صورت ترکیبی با روش تصفیه زیستی استفاده کردند. جریان خوراک حاوی اجزای آلی (نفت، گریس، صابون و...) و اجزای غیرآلی (کلسیم، منیزیم، سولفات و...) بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی و بازدهی بالای سامانه ترکیبی اسمز معکوس و تصفیه زیستی و همچنین کاهش کل جامدات معلق، COD و BOD است. توتوک و همکاران [۳۵] از غشای نانوهیبرید PSF به عنوان غشای پشتیبانی استفاده کردند و لایه پلی وینیل الکل (PVA) برای بهبود خواص سطح غشا به آن اضافه کردند. PVA پلیمری ارزان قیمت است که دارای پایداری شیمیایی و مکانیکی خوب و آب دوستی عالی است که به طور گسترده‌ای به عنوان مواد پوششی استفاده می‌شود. استفاده از PVA بر روی غشای PSF به منظور افزایش کارایی حذف فنول و آمونیاک در فاضلاب نفت و بهبود خواص مکانیکی غشا و همچنین به حداقل رساندن رسوب غشا در طول عملیات بود. غشا میزان بازدهی حذف فنول و آمونیاک را به ترتیب تا ۸۲/۶۸ و ۹۲/۴۲ درصد نشان داد و همچنین ارزیابی رسوب گذاری نیز نشان داد

## ۷ نتیجه گیری

۱. در بین فناوری های غشایی اسمز معکوس قادر به حذف ۹۹٪ اجزای نامطلوب، باکتری ها، کل جامدات نامحلول و کاهش سختی آب با مصرف کم انرژی، تعمیر و نگه داری آسان و عدم استفاده از مواد شیمیایی است.
۲. مقاومت در برابر مواد شیمیایی، خواص مکانیکی پایدار در طول زمان، انتخاب پذیری مطلوب، هزینه کم از ویژگی های ماده مناسب برای تهیه غشای اسمز معکوس از آن است.
۳. غشاهای سلولزاستات (قدیمی ترین غشای اسمز معکوس تهیه شده) تحت تأثیر درجه استیل دار شدن است و با افزایش این درجه، مقدار حذف نمک و سایر اجزای نامطلوب افزایش می یابد. همچنین ترکیبات بهینه ای از سلولزاستات با دیگر حلال ها و پلیمرها برای کاهش قیمت تمام شده غشا و افزایش کارایی آن پیشنهاد شده یا در حال توسعه است.
۴. ترکیبی از پلی آمید حاوی مواد پلی استری با غشای لایه نازک کامپوزیتی توانسته مقاومت غشای اسمز معکوس را در مقابل کلر آزاد افزایش بدهد.
۵. مطالعات نشان داده است که قرار دادن نانوذرات داخل

ساختار غشای لایه نازک کامپوزیتی اسمز معکوس، مقدار عبور جریان را در مقدار ثابت حذف نمک (یا سایر آلاینده ها) افزایش می دهد.

۶. استفاده از نانولوله های کربنی به عنوان پرکننده در غشاهای پلی آمیدی مقاومت شیمیایی و دوام غشا را افزایش داده است.
۷. نمک زدایی از آب دریا و لب شور، نرم کردن آب خوراک دیگرهای بخار، تصفیه پساب نفتی، حذف فلزات و... تعدادی از کاربردهای غشای اسمز معکوس پلیمری یا کامپوزیتی است.

## ۸ پیشنهادها

بررسی سامانه های بازیابی انرژی به منظور بازیابی و به حداقل رساندن انرژی مصرف شده در واحد غشایی اسمز معکوس، اصلاح سطح غشا به کمک نانوذرات به منظور افزایش بازدهی و کاهش زبری و افزایش آب دوستی آن به منظور جلوگیری از رسوب گذاری، بررسی و پیشنهاد ترکیبات یا ساختارهای بهینه از پلیمر و کامپوزیت ها به منظور افزایش حذف اجزای نامطلوب و از طرف دیگر افزایش شار عبوری از غشا از موضوعاتی هستند که برای تحقیقات آتی پیشنهاد می شود.

## مراجع

1. Ezugbe E.O., Rathilal S., Membrane Technologies in Wastewater Treatment :A Review, *Membranes*, 10, 89, **2020**.
2. Zioui D., Tigrine Z., Aburideh H., Hout S., Abbas M., Merzouk N.K., Membrane Technology for Water Treatment Applications, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 153-157, **2015**.
3. Zirehpour A., Rahimpour A., Membranes for Wastewater Treatment, *Nanostructured Polymer Membranes; John Wiley & Sons Ltd.: London, UK*, 2, 159-207, **2016**.
4. Takht Ravanchi M., Kaghazchi T., Kargari A., Application of Membrane Separation Process in Petrochemical Industry: A Review, *Desalination*, 235, 199-244, **2009**.
5. Jafarinejad S.h., A Comprehensive Study on the Application of Reverse Osmosis Technology for the Petroleum Industry Wastewater Treatment, *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 2, 243-264, **2017**.
6. Garud R.M., Kore S.V., Kullarani G.S., A Short Review on Process and Applications of Reverse Osmosis, *Universal Journal of Environmental Research & Technology*, 1, 233-238, **2011**.
7. Reverse Osmosis Membrane Market by Type, End-Use Industry, Filter Module, Application and Region - Global Forecast To 2026 - Researchandmarkets.Com, <https://www.businesswire.com/news/home/20210817005723/en/Reverse-Osmosis-Membrane-Market-by-Type-End-use-Industry-Filter-Module-Application-and-Region---Global-Forecast-to-2026---ResearchAndMarkets.com> (<https://www.businesswire.com/news/home/20210817005723/en/Reverse-Osmosis-Membrane-Market-by-Type-End-use-Industry-Filter-Module-Application-and-Region---Global-Forecast-to-2026---ResearchAndMarkets.com>).htm available in **2021**.
8. Ghernaout D., Ei-Wakil A., Short Communication: Requiring Reverse Osmosis Membranes Modifications- An Overview, *American Journal of Chemical Engineering*, 5, 81-88, **2017**.
9. What is Reverse Osmosis?, <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis> (<https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis>).htm available in 2021.
10. Ismail A.F., Khulbe K.C, and Matsuura T., Reverse Osmosis, 1st Edition, USA, *Elsevier*, **2018**.
11. Khulbe K.C., Matsuura T., Recent Progress in Preparation and Characterization of RO Membranes, *Journal of Membrane Science*, 3, 174-186, **2017**.
12. Khulbe K.C., Matsuura T., Thin Film Composite and/ or Thin Film Nanocomposite Hollow Fiber Membrane for Water Treatment, Pervaporation, and Gas/Vapor Separation, *Polymers*, 10, 1051, **2018**.
13. Warsinger D.M., Chakraborty S., Tow E.W., Plumlee M.H., Bellona C., Loutatidou S., Karimi L., And et al., A Review of Polymeric Membranes and Processes for Potable Water Reuse, *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237, **2018**.
14. Peng Lee K., Arnot T.C., Mattia D., A Review of Reverse Osmosis Membrane Material for Desalination Development to Date and Future Potential, *Journal of Membrane Science*, 370, 1-22, **2011**.
15. Yang Z., Zhou Y., Feng Z., Rui X., Zhang T., Zhang Z., A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification, *Polymers*, 11, 1252, **2019**.
16. Duarte A.P., Cidade M.T., Bordado J.C., Cellulose Acetate Reverse Osmosis Membranes: Optimization of the Composition, *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 4052-4058, **2007**.
17. Silva J., Abreu A.S., Oliveira M., Machado A.V., Development of Cellulose Acetate Membranes Containing Nanoparticles for Water Applications, *Materials*, 21-23, **2015**.
18. Mayyahi A.A., Important Approaches to Enhance Reverse Osmosis Thin Film Composite Membrane Performance, *Membranes*, 8, 68, **2018**.
19. Wiles L., Peirtsegele E., Reverse Osmosis: A History and Explanation of the Technology and How It Become So Important for Desalination, *IWC*, 18, 49, **2018**.
20. Li W.X., Yang Z., Liu W.L., Huang Z.H., Zhang H., Li M.P., Ma X.H., Polyamide Reverse Osmosis Membranes Containing 1D Nanochannels for Enhanced Water Purification, *Journal of Membrane Science*, 618, 118681, **2021**.
21. Ng Z.C., Lau W.J., Matsuura T., Ismail A.F., Thin Film Nanocomposite RO Membranes: Review on Fabrication Techniques and Impacts of Nanofiller Characteristics on Membrane Properties, *Chemical Engineering Research and Design*, 165, 81-105, **2020**.
22. Ma X.H., Yao Z., Yang Z., Guo H., Xu Z., Tang C.Y., Elimelech M., Nanofoaming of Polyamide Desalination Membranes to Tune Permeability and Selectivity, *Environmental Science & Technology Letters*, 5, 123-130, **2018**.
23. Wang R., Chen D., Wang Q., Ying Y., Geo W., Xie L., Recent Advances in Applications of Carbon Nanotubes for



- Desalination: A Review, *Nanomaterials*, , 10, 1203, **2020**.
24. Yang Z., Huang X., Ma X.H., Zhou Z.W., , Guo H., Yao Z., Feng S.P., Fabrication of a Novel and Green Thin-Film Composite Membrane Containing Nanovoids for Water Purification, *Journal of Membrane Science*, 570, 314-321, **2019**.
25. Ali S.S., Abdallah H., Development of PES/CA Blend RO Membrane for Water Desalination, *International Review of Chemical Engineering*, 4, 316-323, **2012**.
26. Bodalo, A., Gomez, J. L., Gomez, E., Leon, G., Tejera, M., Ammonium Removal From Aqueous Solutions by Reverse Osmosis Using Cellulose Acetate Membranes, *Desalination*, 184, 149-155, **2005**.
27. Khorshidi B., Thundat T., Fleck B.A., Sadrzadeh M., A Novel Approach Toward Fabrication of High Performance Thin Film Composite Polyamide Membranes, *Scientific Reports*, 6, 1-10, **2016**.
28. Kim H.J., Choi K., Baek Y., Kim D.G., Shim J., Yoon J., Lee J.C., High-Performance Reverse Osmosis CNT/Polyamide Nanocomposite Membrane By Controlled Interfacial Interactions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6, 2819-2829, **2014**.
29. Inukai S., Cruz-Silva R., Ortiz-Medina J., Morelos-Gomez A., Takeuchi K., Hayashi T., Tanioka A., and et al, High-Performance Multi-Functional Reverse Osmosis Membranes Obtained by Carbon Nanotube/Polyamide Nanocomposite, *Scientific Reports*, 5, 1-10, **2015**.
30. Peyki A., Rahimpour A., Jahanshahi M., Preparation and Characterization of Thin Film Composite Reverse Osmosis Membranes Incorporated With Hydrophilic SiO<sub>2</sub> Nanoparticles, *Desalination*, 368, 152-158, **2015**.
31. Reverse Osmosis (RO): Know About Its Industrial Applications, <https://www.intec-america.com/blog/reverse-osmosis-ro-industrial-applications/> (<https://www.intec-america.com/blog/reverse-osmosis-ro-industrial-applications/>).htm, available in **2021**.
32. Kim K.H., Hong S., Kim J., Lee H., Preparation and Performance Evaluation of Composite Hollow Fiber Membrane for SO<sub>2</sub> Separation, *AIChE Journal*, 60, 2298-2306, **2014**.
33. Ghaseminezhad S.m., Barikani M., Salehirad M., Development of Graphene Oxide-Cellulose Acetate Nanocomposite Reverse Osmosis Membrane for Seawater Desalination, *Composites Part B: Engineering*, 161, 320-327, **2019**.
34. Ranaraja C.D., Devasurendra J.W., Maduwantha M., Madhuwantha G., Hansa R., Optimization of an Industrial Boiler Operation, *Journal of Research Technology And Engineering*, 1, 126-134, **2020**.
35. Kusworo T.D., Kumoro A.N., Utomo D.P., Phenol and Ammonia Removal in Petroleum Refinery Wastewater Using A Poly(Vinyl) Alcohol Coated Polysulfone Nanohybrid Membrane, *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101718, **2021**.
36. Salehi A., Mohammadi T., Nikbakht M., Golshenas M., Noshadi I., Purification of Biologically Treated Tehran Refinery Oily Wastewater Using Reverse Osmosis, *Desalination Water Treatment.*, 48, 27-37, **2012**.
37. Venzke C.D., Giacobbo A., Bernardes A.M., Rodrigues M., Petrochemical Industry: Wastewater Treatment for Water Reuse, *Proceedings of 15th International Conference on Environmental Science and Technology-CEST2017, Global NEST, Rhodes, Grece*, **2017**.
38. Ghadak P., Fardi G.R., Mirbagheri S.A., Application of Reverse Osmosis Membranes for Mercury Removal from Refinery Wastewater, *Modares Civil Engineering Journal*, 15, 91-101, **2015**.
39. Sun J., Yi Z., Zhao X., Zhou Y., Gao C., CO<sub>2</sub> Separation Membranes with High Permeability and CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Selectivity Prepared by Electrostatic Self-Assembly of Polyethylenimine on Reverse Osmosis Membranes, *RSC Advances*, 7, 14678-14687, **2017**.

