

# غشاهای مبتنی بر گرافن اکسید با کاربرد در فرایند تصفیه آب

میترا مهرابی\*، فاطمه هنرآسا

گروه شیمی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

**چکیده:** در سال های اخیر گرافن اکسید به دلیل داشتن ویژگی های منحصر بفرد مانند داشتن سطح تماس بالا، خصوصیات مکانیکی خوب، روش های آسان سنتز، وجود گروه های عاملی مختلف بر روی سطح و امکان اصلاح سطح به یکی از جذاب ترین مواد در طراحی و ساخت غشاهای مورد استفاده در فرایندهای تصفیه آب تبدیل شده است. برای ساخت این دسته از غشاهای روش های گوناگونی پیشنهاد شده است که هر یک به نوبه خود دارای معایب و مزایایی هستند. از طرف دیگر با دستکاری در فرایند سنتز و یا اصلاح گرافن اکسید می توان عملکرد این دسته از غشاهای جداسازی را کنترل و تنظیم کرد. در این مقاله ابتدا به بررسی انواع روش های متداول در تهیه غشاهای جداسازی ساخته شده بر مبنای گرافن اکسید پرداخته می شود و در ادامه نحوه ی کنترل و تنظیم عملکرد این دسته از غشاهای برای رسیدن به شرایط مطلوب تر در فرایند تصفیه آب بررسی می شود.

**واژگان کلیدی:** غشا، گرافن اکسید، درجه اکسیداسیون، تصفیه آب.

mehrabimithra@gmail.com

تخلخل به دلیل ساختار متراکمشان کم می باشد که همین موضوع باعث محدود شدن کاربرد این غشاهای شده است [۱]. برای عبور مواد از غشاهای متراکم باید از یک نیروی خارجی مانند فشار، غلظت و میدان الکتریکی استفاده کرد [۲]. غشاهای ریز متخلخل ایزوتروپی به طور گسترده در غشاهای میکروفیلتراسیون کاربرد دارند. از طرف دیگر سطح غشاهای ایزوتروپی غیر یکنواخت می باشد و از لایه های مختلف با ساختار و ترکیبات متفاوت تشکیل شده اند. این غشاهای دارای یک لایه نازک انتخاب پذیر هستند که این لایه نازک توسط یک لایه ضخیم تر و بسیار نفوذپذیر پشتیبانی می شود. غشاهای ایزوتروپی به ویژه در فرایند اسمز معکوس کاربرد دارند [۱].

از نظر مواد تشکیل دهنده غشا، غشاهای ریز متخلخل به دو دسته آلی و معدنی تقسیم بندی کرد. غشاهای آلی از پلیمرهای آلی مصنوعی ساخته می شوند [۱]. معمولاً، غشاهای مورد استفاده در فرایندهای جداسازی تحت فشار (میکروفیلتراسیون،

## ۱- مقدمه

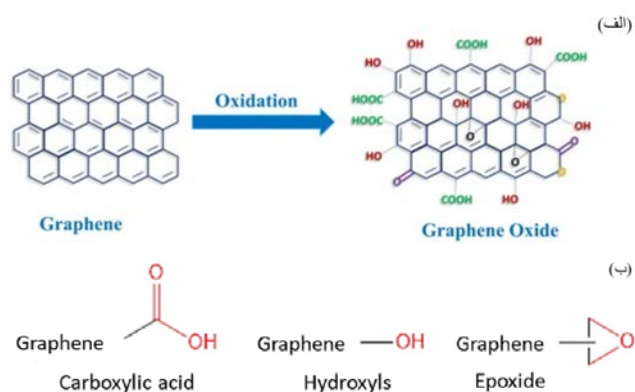
در دهه های اخیر، استفاده از فناوری غشاهای جداسازی در تصفیه آب به دلیل مزایایشان رشد قابل توجهی داشته است. این مزایا می توان به کاهش اندازه تجهیزات، کاهش انرژی و کاهش قابل توجه هزینه ها اشاره کرد. اساس کار غشاهای جداسازی بر این است که حرکت اجزای یک محلول را به صورت انتخابی محدود کرده تا دو فاز از هم جدا شوند [۱]. به طور کلی غشاهای جداسازی را می توان به دو دسته ایزوتروپی و ایزوتروپی طبقه بندی کرد. غشاهای ایزوتروپی از لحاظ ترکیب شیمیایی یکنواخت می باشند. از انواع غشاهای ایزوتروپی می توان به غشاهای ریز متخلخل<sup>۱</sup> و بدون تخلخل<sup>۲</sup> اشاره کرد [۲]. شار نفوذ در غشاهای ریز متخلخل نسبت به غشاهای بدون تخلخل (غشاهای متراکم) بیشتر است. شار نفوذ در غشاهای بدون

<sup>1</sup> Microporous membranes

<sup>2</sup> Non-porous membranes

های عاملی، خواص شیمیایی گرافن اکسید را بسیار فعال تر از گرافن می کنند و جایگاه های فراوانی را برای انجام واکنش های شیمیایی و هم چنین برهمکنش های یونی/مولکولی فراهم می کنند [۳]. به دلیل حضور گروه های عاملی حاوی اکسیژن بر روی صفحات و لبه های گرافن اکسید می توان غشاهای جداسازی با قابلیت اصلاح شدن به وسیله نانولوله های کربن [۸]، مواد آلی [۹] و یون ها [۱۰] را طراحی کرده و آن ها را ساخت [۱۱].

علاوه بر این، گرافن بسیار آبریز است و این امر باعث محدودیتی برای این ترکیب می شود. بنابراین گرافن اکسید از گرافیت اکسید شده تهیه شد [۱۱]. به دلیل وجود گروه های عاملی حاوی اکسیژن بر روی گرافن اکسید، این ترکیب به عنوان یک آب دوست خوب شناخته می شود [۱۲]. شکل ۱، ساختار گرافن اکسید، گرافن و برخی گروه های عاملی موجود بر روی سطح گرافن اکسید را نشان می دهد.



شکل ۱. الف) ساختار گرافن اکسید و گرافن [۱۳] و ب) گروه های عاملی حاوی اکسیژن احتمالی موجود بر روی سطح گرافن اکسید [۱۴].

اخیرا گرافن اکسید پتانسیل قابل توجهی در زمینه ساخت غشاهای مورد استفاده در فرایندهای جداسازی از خود نشان داده است. علت این امر ساختار دو بعدی منحصر به فرد، استحکام مکانیکی بالا و خواص جذب فوق العاده این ترکیب است. در واقع با تغییر فاصله بین لایه ها، اندازه منافذ و گروه های عاملی، گرافن اکسید به یک ماده ایده آل برای غشای فیلتراسیون تبدیل می شود [۳].

نانوصفات گرافن اکسید به نسبت مواد دو بعدی دیگری که معمولا در ساخت غشاهای به کار می روند، دارای چندین مزیت هستند [۳] که از جمله آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد؛ غشاهای گرافن اکسید دارای منافذ درون صفحه ای هستند و می

اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس) از پلیمرهای آلی مصنوعی ساخته می شوند. از این پلیمرها می توان به پلی اتیلن، پلی پروپیلن و استات سلولز اشاره کرد. غشاهای معدنی از موادی مانند سرامیک ها، فلزات، زئولیت ها و سیلیکا ساخته می شوند. این دسته از غشاهای از نظر شیمیایی و حرارتی پایدار هستند و به طور گسترده در فرایندهای جداسازی اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون استفاده می شوند [۱]. مواد به کار گرفته شده در ساخت غشاهای باید هم عبور آلاینده ها را غیر ممکن کنند و هم نفوذ پذیری غشا را تنظیم کنند. کارآمد بودن جلوگیری از عبور آلاینده ها ارتباط نزدیکی با ساختار منافذ غشا دارد و از طرف دیگر ضخامت غشا بر نفوذ پذیری آن تأثیر می گذارد [۳]. از این نظر غشاهای معدنی و پلیمری گزینه های خوبی برای ساخت غشا نیستند. اما مواد دو بعدی به مواد ایده آلی برای ساخت غشا تبدیل شده اند. از این مواد دو بعدی می توان به مواد بر پایه گرافن، چهارچوب های آلی کوالانسی و چهارچوب های آلی - فلزی اشاره کرد [۳].

از زمان کشف گرافن تا به امروز، سعی شده است تا از گرافن در صنایع مختلف استفاده شود. به دلیل امکان پذیر بودن اصلاح سطح گرافن از طریق اضافه کردن گروه های عاملی مختلف به آن، گرافن ماده ای بسیار پرتعداد در حوزه تصفیه آب است. گرافن در سال ۲۰۰۴ توسط دو فیزیکدان به نام های گایم و نووسلوف کشف شد. این ماده یکی از نانومواد کربن است که از یک لایه اتم کربن تشکیل شده است و این اتم های کربن در یک شبکه شش ضلعی قرار گرفته اند. گرافن بر خلاف گرافیت، ساختار دو بعدی (۲D) دارد [۴]. گرافن یکی از نازک ترین نانومواد است که تاکنون در جهان سنتز شده است (ضخامت آن بین ۰/۴ تا ۱/۷ nm می باشد). سبک و منعطف است، از لحاظ مکانیکی بسیار قوی می باشد و همچنین رسانای عالی الکتریسیته است [۵۶].

از مشتقات گرافن می توان به گرافن اکسید (GO)، گرافن اکسید کاهش یافته (rGO)، نانولوله های کربن، فولرن ها و گرافیت اشاره کرد [۷]. همانطور که گفته شد گرافن اکسید یکی از مشتقات گرافن می باشد. گرافن اکسید به دلیل داشتن گروه های عاملی حاوی اکسیژن شامل گروه های هیدروکسیل، کربوکسیل، و اپوکسی دارای خواص شیمیایی بسیار خوبی است [۳]. این گروه

پوشش غوطه وری<sup>۵</sup>، پوشش پاششی<sup>۶</sup> و خودآرایی لایه به لایه<sup>۷</sup> تهیه کرد که در ادامه در مورد هر یک توضیحاتی آورده شده است.

## ۲-۱- روش فیلتراسیون خلاء

از بین تمام روش ها، فیلتراسیون خلاء محبوب ترین روش برای تولید غشای بر پایه گرافن اکسید است. در این روش محلول گرافن اکسید با غلظت معین بر روی یک بستر متخلخل ریخته می شود و همزمان در جهت مخالف ریزش محلول، خلاء اعمال می شود (شکل ۲الف). با تغییر غلظت محلول حاوی گرافن اکسید، ضخامت غشا را می توان به راحتی از چند نانومتر تا چند میکرومتر کنترل کرد [۱۷]. ینگ و همکاران یک غشای گرافن اکسید با ضخامت نانومتری به روش فیلتراسیون خلاء برای استفاده در فرایند نانوفیلتراسیون حلال های آلی (OSN) تهیه کردند. آن ها از آلومینا ( $Al_2O_3$ ) متخلخل و نایلون متخلخل به عنوان بستر استفاده کردند [۱۸]. از آنجایی که فشار در نزدیکی بستر متخلخل بیشتر است، برای ساخت غشاهای ضخیم تر، ممکن است مورفولوژی نامنظم تری نزدیک به سطح غشا ایجاد شود. علاوه بر این، به دلیل زمان فیلتراسیون طولانی تر برای آماده سازی غشاهای ضخیم از گرافن اکسید، تولید این دسته از غشاها دشوارتر می شود [۱۷].

## ۲-۲- روش فیلتراسیون به کمک فشار

در حال حاضر مهم ترین روش برای تهیه غشاهای بر مبنای گرافن اکسید چند لایه ای، روش خودآرایی به کمک فشار است. این روش با تهیه غلظت معینی از سوسپانسیون گرافن اکسید شروع می شود و سپس لایه های ورق گرافن اکسید بر روی بستر قرار می گیرند تا با کمک فشار، غشای گرافن اکسید بدست آید (شکل ۲ب) [۳]. در این روش برخلاف روش فیلتراسیون خلاء، فشار وارد شده هم جهت با ریختن محلول گرافن اکسید می باشد [۱۷]. متداول ترین بسترهای مورد استفاده در این روش، غشاهای مبتنی بر پلیمرهای مورد استفاده در میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون هستند. از مزیت های این روش می توان به این

توانند به طور انتخابی آلاینده ها را جذب کنند. همچنین این نانوساختارها، مساحت سطح ویژه بالایی دارند و اندازه منافذشان قابل کنترل است. علاوه بر این، امکان تولید گرافن اکسید در مقیاس بزرگ وجود دارد. بنابراین با توجه به ساختار منحصر به فرد و امکان تغییر و بهبود ساختار گرافن اکسید، می توان از آن ها برای ساخت یک غشای جداسازی بهینه تر دست پیدا کرد. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۲، گایم و همکاران [۱۵] دریافتند که غشاهای گرافن اکسید نسبت به مولکول های آب نفوذپذیر هستند، اما نسبت به نیتروژن، هیدروژن، آرگون و هلیوم غیرقابل نفوذ هستند [۱۶].

در این مقاله به بررسی انواع روش های ساخت غشاهای بر پایه گرافن اکسید پرداخته می شود. همچنین در ادامه به چگونگی بهبود عملکرد این دسته از غشاها اشاره خواهد شد. در نهایت به چند مورد از کاربردهای مختلف این دسته از غشاها در فرایند تصفیه آب اشاره خواهد شد.

## ۲- روش های تهیه غشاهای بر مبنای گرافن اکسید

در حال حاضر روش های مختلفی برای ساخت غشاهای بر پایه گرافن اکسید پیشنهاد شده است. روش متداول آماده سازی بدین صورت است که مقدار مشخصی از گرافن اکسید در آب پراکنده شده تا به غلظت مورد نظر محلول ریخته گری<sup>۱</sup> برسد. سپس با استفاده از روش های مختلفی که در ادامه بررسی می شوند، فیلم های ساخته شده روی هم چیده می شوند [۳]. به دلیل وجود گروه های عاملی حاوی اکسیژن آبدوست و دارای بار منفی، گرافن اکسید می تواند به خوبی بدون ایجاد ساختار های تجمعی و کلوخه ای در آب پراکنده شود [۱۶]. بنابراین به راحتی و بدون هیچ دغدغه ای می توان محلول ریخته گری را تهیه کرد. غشاهای بر پایه گرافن اکسید را می توان با استفاده از روش های فیلتراسیون خلاء<sup>۲</sup>، فیلتراسیون به کمک فشار<sup>۳</sup>، پوشش اسپینی<sup>۴</sup>

<sup>5</sup> Dip-coating method

<sup>6</sup> Spray coating method

<sup>7</sup> Layer-by-layer self-assembly method

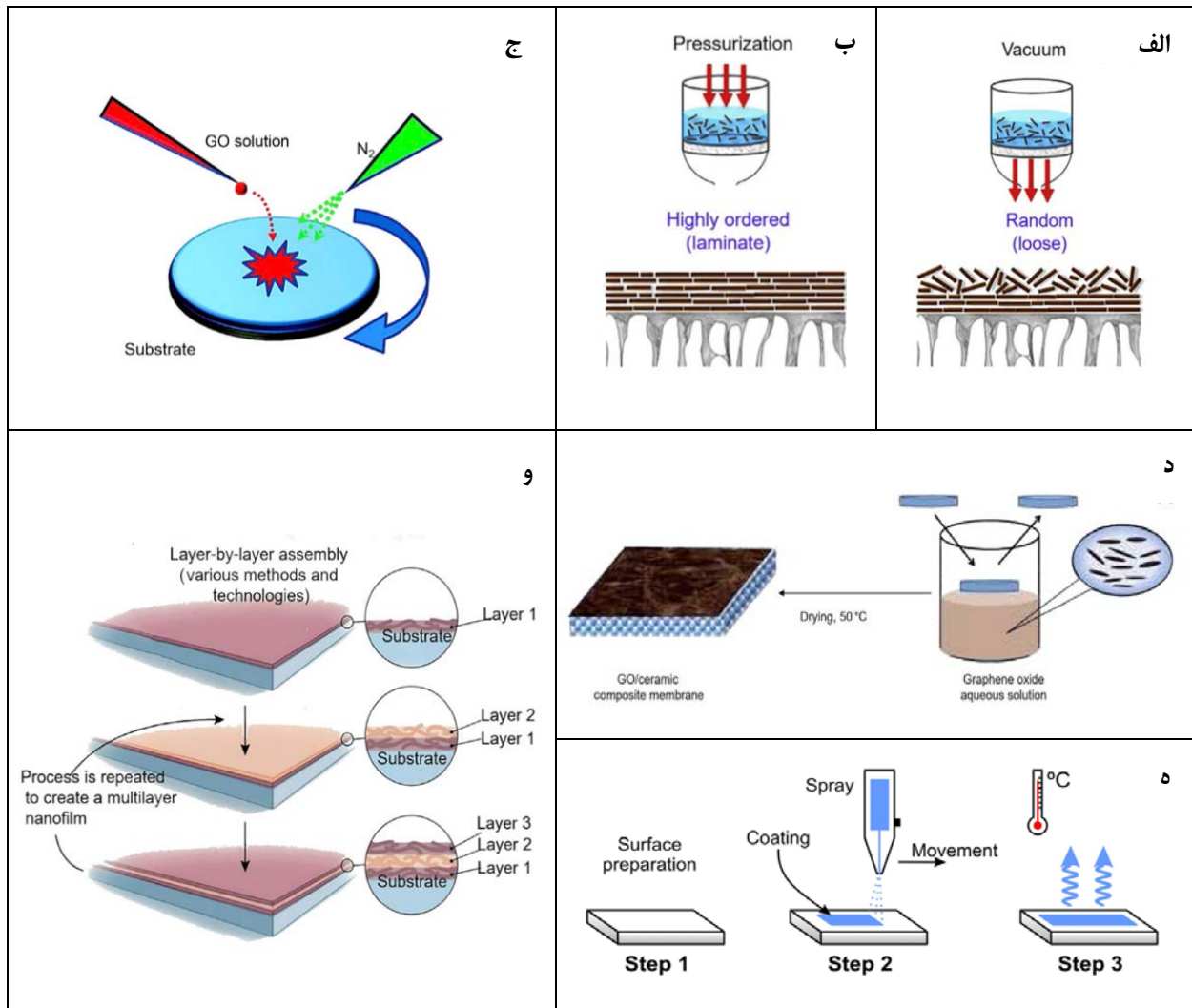
<sup>8</sup> Organic solvents nanofiltration

<sup>1</sup> Casting solution

<sup>2</sup> Vacuum filtration method

<sup>3</sup> Pressure-assisted filtration method

<sup>4</sup> Spin coating method



شکل ۲. الف) شماتیک از غشای کامپوزیتی GO/mPAN، تهیه شده به روش فیلتراسیون خلاء [۱۹]، ب) شماتیک از غشای کامپوزیتی GO/mPAN، تهیه شده به روش فیلتراسیون تحت فشار [۱۹]، ج) شماتیک از تهیه غشای گرافن اکسید به روش پوشش اسپینی [۲۰]، د) شماتیک از تهیه غشای گرافن اکسید به روش پوشش غوطه وری [۲۱]، ه) مکانیسم تهیه غشا به روش پوشش پاششی [۲۲]، و) شماتیک از تهیه غشای گرافن اکسید به روش خودآرایی لایه به لایه [۲۳].

فیلتراسیون خلاء، نتایج تجربی نشان داده که غشاهای ساخته شده از طریق روش فیلتراسیون تحت فشار دارای ساختار لایه ای است. همچنین در این مورد سطح غشای بدست آمده، نسبتاً صاف بوده و این دسته از غشاها خاصیت آب دوستی بهتری از خود نشان می دهند. غشاهای بر پایه گرافن اکسید تهیه شده توسط فیلتراسیون خلاء بعد از غشاهای تولید شده توسط روش تحت فشار بهترین بوده اند و در ردیف دوم قرار می گیرند. زیرا در روش فیلتراسیون خلاء ورق های گرافن اکسید نمی توانند به طور منظم روی سطح غشاء چیده شوند و در نتیجه آب دوستی کاهش یافته و فاصله لایه ها افزایش می یابد [۳].

### ۲-۳- روش پوشش اسپینی

مورد اشاره کرد که روش تحت فشار، دارای فرآیند عملیاتی ساده است و غشای مسطح تشکیل می دهد. همچنین گزینه های زیادی برای انتخاب بستر وجود دارد. علاوه بر این، شرایط تولید غشاء به راحتی قابل تنظیم و سرعت دفع آلاینده ها بالاست. در روش فیلتراسیون تحت فشار، فاصله بین لایه های گرافن اکسید را با تغییر pH و فشار، و ضخامت غشا را می توان با تغییر غلظت و مقدار سوسپانسیون گرافن اکسید تنظیم کرد [۳].

تسو و همکاران در مطالعه ای [۱۹] غشای گرافن اکسید به روش های فیلتراسیون خلاء و فیلتراسیون تحت فشار تهیه کردند. آن ها از پلی اکریلونیتریل اصلاح شده (mPAN) به عنوان بستر استفاده کردند و گرافن اکسید را بر روی این بستر پوشش دادند (شکل ۲الف، ب). در مقایسه با غشاهای ساخته شده از روش

روش پوشش اسپینی به این صورت است که محلول گرافن را به صورت قطره ای بر روی بستری که بر روی یک دیسک چرخشی در حال حرکت است، می ریزند. در این مرحله سرعت چرخش دیسک گردان و بستر را تنظیم می کنند. به این ترتیب محلول به طور یکنواخت روی سطح بستر پخش می شود. در نهایت بستر خشک می شود (شکل ۲ج) [۱۷، ۱۲]. در این روش، با تنظیم دما برای تبخیر سریع حلال موجود روی سطح و سپس تنظیم سرعت برای بدست آوردن یک غشای گرافن اکسید یکنواخت و مسطح می توان شرایط را برای ساخت یک غشای بهتر بهینه کرد [۳]. در مطالعه ای، هو و همکاران یک غشای کامپوزیتی  $GO/Al_2O_3$  به روش پوشش اسپینی برای حذف موثر فنل از محلول آبی تهیه کردند. این غشای کامپوزیتی دارای ساختار چند لایه می باشد که در آن گرافن اکسید به طور یکنواخت بر روی غشای آلومینیوم اکسید پخش می شود [۲۴]. به طور کلی در مقایسه با روش های فیلتراسیون این روش از نظر انتخاب بستر نسبت به روش های دیگر آزادی عمل بیشتری دارد [۳].

## ۲-۴- روش پوشش غوطه وری

در روش پوشش غوطه وری، بستر در یک محلول از گرافن اکسید با غلظت معین غوطه ور می شود. سپس با استفاده از یک دستگاه بایستی بستر را جدا کرده و به یک پلیت متصل کرده تا به صورت طبیعی خشک شود (شکل ۲د) [۱۲، ۳]. در این روش ضخامت غشا را می توان به کمک دما، غلظت محلول و سرعت حذف بستر کنترل کرد [۱۷، ۱۲]. در مطالعه ای، لی و همکاران غشای بر مبنای گرافن اکسید به روش پوشش غوطه وری تهیه کردند [۲۵]. برای تهیه این غشا از الیاف توخالی زیرکنیای تثبیت شده با ایتريوم به عنوان بستر استفاده شد. فرایند غوطه وری ۶ مرتبه تکرار شد تا یک غشای الیاف توخالی گرافن اکسید با ضخامت خوب ساخته شود. روش پوشش غوطه وری جزء روش های ساده محسوب می شود اما تهیه غشاهای یکنواخت از طریق این روش اغلب کار مشکلی است [۱۷].

## ۲-۵- روش پوشش پاششی

در این روش با استفاده از یک تفنگ پاششی محلول گرافن

اکسید را به صورت قطرات ریز در آورده و سپس بر روی سطح مورد نظر پراکنده می کنند. با خشک شدن حلال بر روی بستر، لایه های گرافن اکسید تشکیل می شوند (شکل ۲ه). هیو و همکاران فیلم های گرافن اکسید سد اکسیژن<sup>۱</sup> را با روش خودآرایی لایه به لایه و به کمک روش پوشش پاششی تهیه کردند [۲۶]. در این مطالعه، دو نوع گرافن اکسید تهیه شد: گرافن اکسید با بار منفی و گرافن اکسید حاوی بار مثبت اصلاح شده به وسیله گروه عاملی آمین. سپس این دو نوع گرافن اکسید به طور متناوب بر روی بستر اسپری شدند. به دلیل اینکه لایه های گرافن اکسید دارای بار مخالف هستند، چسبندگی بین لایه ها افزایش و در نتیجه نفوذ اکسیژن کاهش یافت [۲۶]. مشابه روش پوشش غوطه وری، پوشش پاششی نسبتاً به شکل بستر حساس نیست [۱۷]. مزیت روش اسپری این است که راندمان تولید نسبتاً بالا است و می توان سطح وسیعی را تهیه کرد. همچنین فرآیند ساده، کم هزینه و سریع است و می توان محلول را روی هر بستری پاشید. با این حال، یکنواختی غشاء تهیه شده با این روش نسبتاً کم است [۱۲].

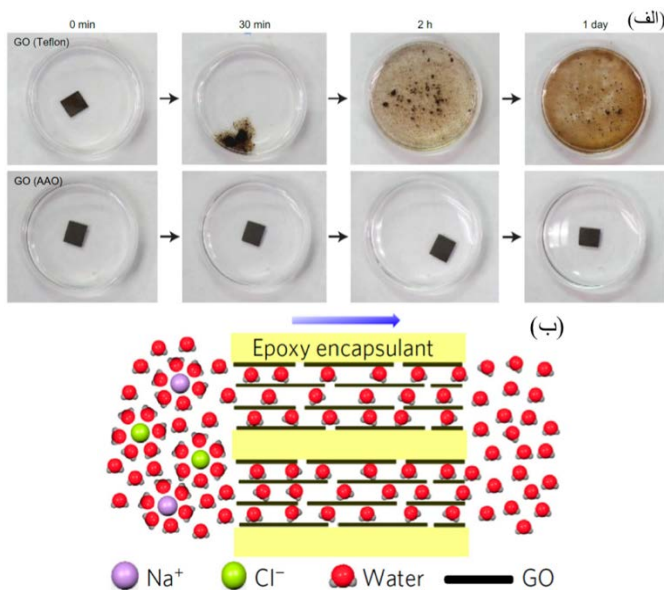
## ۲-۶- روش خودآرایی لایه به لایه

روش خودآرایی لایه به لایه (LBL) می تواند با خودآرایی پلی الکترولیت هایی با بار مخالف نسبت به غشاهای چند لایه ای، لایه های نازک باردار در سطح مولکولی تولید کند. مواد متداول مورد استفاده برای غشاهای LBL شامل پلی کاتیون ها و پلی آنیون ها هستند که از طریق برهم کنش های الکترواستاتیک و یا پیوند شیمیایی می توان آن ها را بر روی بستر قرار داد [۱۶، ۳]. با تکرار مراحل بالا به یک غشا با ساختار ساندویچ مانند خواهیم رسید (شکل ۲و). گرافن اکسید به دلیل ساختار ورقه ای و گروه های عاملی باردار حاوی اکسیژن، ماده ای مناسب برای روش خودآرایی لایه به لایه است [۳]. قبل از شروع این فرآیند، بستر باید برای تشکیل یک سطح باردار اصلاح شود. به عنوان مثال ژانگ و همکاران لایه بستر را با HPEI<sup>۲</sup> پیوند دادند و سپس چرخه ی رسوب دادن گرافن اکسید و اتیلن دی آمین را با خیس کردن غشاء به ترتیب در محلول های گرافن اکسید و اتیلن دی

<sup>1</sup> Oxygen barrier

<sup>2</sup> Hyperbranched polyethyleneimine

های غشا زمانی که در معرض محلول های آبی قرار می گیرند، جلوگیری می کند (شکل ۳ ب).



شکل ۳. الف) مقایسه پایداری دو غشای گرافن اکسید در آب. غشای گرافن اکسید خالص (ردیف بالا) در آب متلاشی می شود، اما غشای Al-GO (ردیف پایین) در آب پایدار است [۳۵]. ب) اصلاح مشکل ورم کردن غشای گرافن اکسید در محیط های آبی به کمک رزین اپوکسی [۳۴].

### ۳- کنترل و بهبود عملکرد جداسازی توسط غشاهای بر مبنای گرافن اکسید چند لایه

غشاهای گرافن اکسید جزء فناوری های نوظهور می باشند. غشاهای بر پایه گرافن اکسید مزایایی مانند پایداری شیمیایی خوب، خاصیت آبدوستی، نفوذپذیری و انتخاب گری خوب دارند [۱۶، ۳۶]. با این حال برای تولید یک سطح بزرگ از غشای گرافن اکسید، هنوز مشکلاتی مانند هزینه تولید وجود دارد [۳۶]. غشاهای گرافن اکسید نانوکanal هایی قابل تنظیم برای عبور مولکول ها از بین نانوصفحات فراهم می کنند. اساس جداسازی در غشاهای گرافن اکسید بر پایه اندازه ذرات و دفع بار می باشد. در نتیجه مولکول هایی که کوچکتر از اندازه نانوکanal های غشای گرافن اکسید هستند، سریعتر از باقی مولکول ها در بین لایه های غشا نفوذ می کنند. ولی مولکول های بزرگتر به راحتی توسط این نانوکanal ها متوقف می شوند. در نتیجه، می توان با استفاده از روش های مختلف عملکرد این غشاها را بهبود داد [۳۶]. در این مقاله دو روش برای کنترل و بهبود فرایند جداسازی غشاهای بر مبنای گرافن اکسید چند لایه که شامل تنظیم ضخامت غشاهای

آمین تکرار کردند. در این مورد خاص سطح بستر به وسیله HPEI با بار مثبت اصلاح شد [۲۷]. در مطالعه ای دیگر برای تنظیم فاصله بین لایه ها در یک غشای گرافن اکسید تهیه شده به روش LBL، کانگ و همکاران [۲۸] با متصل کردن دو نانوماده به یکدیگر غشاهای گرافن اکسید با مورفولوژی ساندویچ مانند تهیه کردند. در این مطالعه، گرافن اکسید و نانولوله های کربنی اکسید شده به طور متناوب برای تشکیل یک ساختار ساندویچ مانند بر روی هم قرار گرفتند و این لایه ها به وسیله یک پلی الکترولیت به هم متصل شدند. با این کار، نانولوله های کربنی اکسید شده، نفوذپذیری و ناهمواری سطح غشا را به شدت افزایش دادند [۱۶].

به طور کلی، روش خودآرایی لایه به لایه، یک روش کلاسیک برای تهیه مواد غشایی فوق نازک است. با این روش می توان لایه هایی با خواص متفاوت را برای تولید غشاهای کامپوزیتی به هم متصل کرد. همچنین با این روش می توان مولکول های عاملی را برای اصلاح غشاها وارد لایه ها کرد. برخلاف روش های دیگر، غشاهای گرافن اکسید تهیه شده توسط این روش معمولاً دارای خواص فیزیکوشیمیایی قابل تنظیم هستند، اما این روش معمولاً نیاز به پیش فرآوری گرافن اکسید دارد و فرآیند آماده سازی به نسبت پیچیده است [۳].

غشاهای گرافن اکسید در محیط بدون آب دارای استحکام مکانیکی بسیار خوبی هستند [۲۹، ۳۰]. با این حال در محیط های آبی، فاصله بین لایه های غشا به دلیل آب پوشی افزایش می یابد و در نتیجه غشاهای گرافن اکسید خالص ساخته شده به روش خودآرایی لایه به لایه، تحت فشار در آب ناپایدار هستند (شکل ۳ الف) [۳۱-۳۳]. به دلیل این ناپایداری، غشا می تواند ورقه ورقه شود و در نتیجه بر محیط های آبی طبیعی و محیط زیست تاثیر بگذارند [۱۶]. برای حل مشکل ورم کردن غشا در محیط های آبی، نیر و همکاران، فاصله بین لایه ها را به کمک رزین اپوکسی کنترل کردند [۳۴]. در این روش، اطراف غشا را به کمک رزین اپوکسی محدود می کنند. به غشاهای ساخته شده به وسیله این روش غشاهای گرافن اکسید محدود شده فیزیکی می گویند، زیرا رزین اپوکسی به صورت مکانیکی از ورم کردن لایه

<sup>1</sup> Physically confined GO membrane (PCGO)

چندلایه گرافن اکسید و تنظیم درجه اکسیداسیون نانوصفحات گرافن اکسید و غشاهای گرافن اکسید می باشد، بررسی می شود. در ادامه جزئیات هر روش بررسی خواهد شد.

### ۳-۱- تنظیم ضخامت غشاهای چندلایه گرافن اکسید

همانطور که می دانیم ضخامت لایه غشایی بر نفوذپذیری غشا تأثیر می گذارد. در اینجا روش های کنترل ضخامت غشاهای چند لایه گرافن اکسید سنتز شده به وسیله فرایند های فیلتراسیون و خودآرایی لایه به لایه بررسی می شود. در فرایندهای فیلتراسیون، ضخامت غشا را می توان با تغییر حجم و غلظت سوسپانسیون گرافن اکسید تنظیم کرد. با افزایش ضخامت لایه های گرافن اکسید، کاهش نمایی در شار آب مشاهده می شود [۱۶]. در فرایند خودآرایی لایه به لایه افزایش زمان خیس کردن و تعداد چرخه های LBL می تواند غشا را ضخیم تر کند و میزان طرد شدن<sup>۱</sup> را بهبود بخشد [۱۶]. در مطالعه ای ژانگ و همکاران نشان دادند که کاهش زمان رسوب گذاری و افزایش تعداد چرخه های رسوب گذاری می تواند غشاهای عالی با میزان طرد شدن و شار بالا تولید کند [۲۷]. از بین دو روش افزایش ضخامت غشا یعنی افزایش زمان خیس کردن و تعداد چرخه ها، راهکار افزایش تعداد چرخه های LBL می تواند منجر به نفوذپذیری بهتر شود و در عین حال عملکرد جداسازی را بهبود بخشد [۱۶].

### ۳-۲- تنظیم درجه اکسیداسیون نانوصفحات گرافن اکسید و غشاهای چندلایه گرافن اکسید

درجه اکسیداسیون گرافن اکسید، ضخامت، آب دوستی و میزان بار آن را تعیین می کند که این مورد می تواند مستقیماً بر عملکرد غشاهای چند لایه گرافن اکسید تأثیر بگذارد. علاوه بر این، درجه اکسیداسیون می تواند بر همواری نانوصفحات ساخته شده، مساحت ناحیه غیر اکسید شده، اندازه و تعداد نانوحفره ها تأثیرگذار باشد. از این رو، کنترل درجه اکسیداسیون، یک راه موثر برای کنترل عملکرد غشا است. در این بخش به عنوان نمونه دو روش از روش های کنترل درجه اکسیداسیون گرافن اکسید

<sup>1</sup>Rejection rate

بررسی می شود. این دو روش شامل فرایند هیدروترمال و تغییر مقدار ماده اکسید کننده در فرایند اکسیداسیون گرافیت و ساخت گرافن می باشند [۱۶].

### ۳-۲-۱- فرایند هیدروترمال

لی و همکاران، به طور همزمان یک غشای بر پایه گرافن اکسید کاهش یافته را توسط روش هیدروترمال و یک غشای مشابه دیگر را به روش خودآرایی به کمک خلاء تهیه کردند. نتایج نشان داد که غشای گرافن اکسید کاهش یافته ساخته شده در دمای هیدروترمال بالاتر، موج دارتر است [۳۷]. تمام غشاهای تهیه شده ساختار لایه ای دارند. غشاهای rGO سنتز شده در دمای هیدروترمال ۱۰۰°C ساختار یکدستی دارند. با افزایش دما به ۱۴۰°C فاصله بین لایه های غشا افزایش می یابد. لایه های غشای تهیه شده در دمای ۱۸۰°C برخلاف غشاهای تهیه شده در دماهای پایینتر، به صورت نامنظم بر روی هم قرار گرفته اند [۳۷]. وسعت این موج خوردگی، که منجر به تشکیل نانوکanal های تار و مبهم در غشاء می شود، می تواند با کاهش دمای هیدروترمال کنترل شود. علاوه بر این، تشکیل و گسترش نانوحفره ها را می توان با روش هیدروترمال در دماهای بالا افزایش داد. نانوحفره های روی سطح گرافن اکسید اجازه عبور مولکول های آب را به لایه گرافن اکسید بعدی می دهند [۱۶].

### ۳-۲-۲- تغییر مقدار ماده اکسید کننده در فرایند اکسیداسیون گرافیت و سنتز گرافن

روشی دیگر برای تنظیم درجه اکسیداسیون گرافن اکسید، تغییر مقدار عامل اکسید کننده در فرایند سنتز است. گروه های عاملی حاوی اکسیژن که در نتیجه فرایند اکسیداسیون تولید شده اند، می توانند مناطق آبدوست زیادی را در گرافن اکسید ایجاد کنند. به همین دلیل بهره فیلتراسیون غشاهای گرافن اکسید برای نفوذ سریع آب کم می شود [۳۸، ۳۹]. علاوه بر این موضوع، نقص های زیادی بر روی گرافن اکسید وجود دارد [۴۰]. با انجام واکنش های کاهش می توان گروه های عاملی روی سطح گرافن اکسید را حذف کرد و تعداد مناطق آبدوست را کاهش داد ولی با انجام این کار نقص های بیشتری بر روی غشا به وجود می آید [۴۱-۴۴]. به همین دلیل کنترل و تنظیم درجه اکسیداسیون گرافن اکسید در

استفاده کرد. در فرایند نانوفیلتراسیون، عملکرد غشاهای GO بستگی به عواملی مانند حلال، pH و دما دارد [۱۶].

در یک مطالعه، چن و همکاران دریافتند که فاصله بین لایه های غشای گرافن اکسید وابسته به محلول یونی استفاده شده است. آن ها عملکرد غشاهای GO را در دو محلول یونی KCl و NaCl و همچنین آب خالص بررسی کردند. فاصله بین لایه های غشای گرافن اکسید در دو محلول KCl و NaCl کمتر از فاصله بین لایه های غشا در آب خالص بود. همچنین دفع نمک غشاهای گرافن اکسیدی که در دو محلول KCl و NaCl قرار داده شده بودند، بالاتر بود. فاصله بین لایه ای در غشاهای گرافن اکسید را می توان با افزودن کاتیون های خاصی تا دقت ۰/۱ nm کنترل کرد [۴۷].

فاکتور موثر دیگر بر عملکرد غشاهای مبتنی بر گرافن اکسید، بار روی سطح می باشد که به pH مربوط می شود. درباره غشاهای گرافن اکسید تهیه شده به روش خودآرایی لایه به لایه، بار غشای پایه با تغییرات pH، تغییر می کند. به عنوان مثال در ساخت یک غشا از پلی (آلیل آمین هیدروکلرید) به عنوان غشای پایه استفاده شد. در  $pH=10$ ، این پلیمر، بار مثبت خود را از دست می دهد که باعث به وجود آمدن دافعه بار بین لایه های غشای گرافن اکسید با بار منفی می شود. در نتیجه ی این فرایند، مقدار ورم کردن غشا افزایش می یابد [۱۶]. برای حذف فلزات سنگین، یکی از فاکتورهای مهم وابسته به pH که باید در نظر گرفته شود پتانسیل زتا می باشد. پتانسیل زتا اندازه گیری دافعه یا جاذبه الکترواستاتیکی میان ذرات است و بهترین شاخص برای اندازه گیری پایداری سوسپانسیون ها می باشد [۴۸]. در واقع پتانسیل زتا تفاوت میان پتانسیل الکترواستاتیک نانوذره و محلول بالک را اندازه می گیرد [۴۹]. از تحقیقات ژانگ و همکاران [۲۷] در بخش ۲-۶ که بستر را با HPEI اصلاح کردند، می توان دریافت که اصلاح سطح غشای GO با بار مثبت برای حذف فلزات سنگین ضروری است.

#### ۴-۲- اسمز مستقیم

اسمز مستقیم (FO)، یک فرایند غشایی می باشد که از اختلاف فشار اسمزی به عنوان نیروی محرکه استفاده می کند. در این

ساخت غشا امری مهم می باشد. ما و همکاران غشای بر مبنای گرافن اکسید با سه نوع درجه اکسیداسیون کم، متوسط و زیاد را با تغییر در مقدار فسفریک اسید مورد استفاده در فرایند اکسیداسیون گرافیت ساختند. پس از بررسی شار عبوری از غشاها دریافتند که برای هر سه نوع غشا، شار آب تقریباً به صورت خطی با فشار تغییر می کند. شار آب عبوری از غشاهایی با درجه اکسیداسیون کمتر، با افزایش فشار، افزایش بیشتری دارند. از طرف دیگر در فشار یکسان، شار آب با افزایش درجه اکسیداسیون کاهش می یابد. در واقع غشاها با درجه اکسیداسیون پایین تر دارای شار آب بالاتر هستند که این موضوع به دلیل نسبت بالای نواحی کریستالی می باشد و در نتیجه منجر به افزایش نفوذپذیری غشا نسبت به آب می شود. در واقع نواحی اکسید شده به دلیل پیوندهای هیدروژنی، مولکول های آب را جذب می کنند. بنابراین غشاهای با درجه اکسیداسیون متوسط و بالا، به دلیل داشتن نواحی اکسید شده بیشتر شار آب کمتری دارند [۱۱].

در یک مطالعه دیگر، ژانگ و همکاران پس از تهیه غشای بر مبنای گرافن اکسید، با استفاده از بخار هیدروژن یدید (HI) یک غشای گرافن اکسید کاهش یافته تهیه کردند. نتایج این کار نشان داد که این غشا نسبت به یک غشای گرافن اکسید خالص دارای شار آب کمتر و دفع نمک بیشتر است [۴۵].

#### ۴- کاربرد غشاهای چندلایه گرافن اکسید در تصفیه آب

استفاده از غشاهای چند لایه گرافن اکسید اولین بار توسط لی و همکاران بررسی شد [۴۶]. در حال حاضر مطالعات بسیاری در مورد کاربرد غشاهای جداسازی مبتنی بر گرافن اکسید در فرایندهای غشایی متفاوتی وجود دارد. در این مقاله کاربرد این نوع از غشاها در نانوفیلتراسیون و اسمز مستقیم (FO) بررسی شده است.

#### ۴-۱- نانوفیلتراسیون

از این دسته از غشاها می توان برای حذف مواد آلی طبیعی، حذف فلزات سنگین، جداسازی حلال آلی، نرم کردن آب و رنگ زدایی

<sup>1</sup> Forward osmosis



آبدوستی بالای آن ها می باشد. البته مطالعات نشان داده است که اگر در ساخت غشاهای اسمز مستقیم از یک ماده آبدوست خالص استفاده شود، غشا متورم شده و باعث ضعیف شدن ساختار و کاهش طول عمر غشا می شود [۵۲]. در مطالعه ای داران و همکاران [۵۲]، برای ساخت غشای گرافن اکسید مورد استفاده در فرایند اسمز مستقیم از ترکیب دو ماده استات سلولز که یک ماده بسیار آب دوست می باشد و پلی وینیلیدین فلورید که یک ماده آبگریز است، استفاده کردند. البته طبق تحقیقات انجام شده، مشخص شده است که کاهش آبگریزی از طریق ترکیب آن با یک پلیمر تنها راه بهبود عملکرد غشا نیست و می توان با افزودن نانوذرات به ماتریس غشا مزایای مختلفی مانند افزایش آبدوستی، بهبود در استحکام مواد و افزایش انتخاب گری غشا را مشاهده نمود [۵۲].

## ۵- نتیجه گیری

گرافن اکسید به دلیل داشتن گروه های عاملی حاوی اکسیژن (گروه های هیدروکسیل، کربوکسیل و اپوکسی)، از لحاظ شیمیایی بسیار فعال است و همچنین ویژگی آب دوستی بسیار خوبی دارد. در نتیجه می توان از گرافن اکسید در ساخت غشاهای جداسازی بهره برد. روش های متعددی برای تهیه غشاهای جداسازی بر پایه گرافن اکسید وجود دارد که شامل روش های فیلتراسیون خلاء، فیلتراسیون به کمک فشار، پوشش اسپینی، پوشش غوطه وری، پوشش پاششی و خودآرایی لایه به لایه است. از میان این روش ها، فیلتراسیون خلاء یک روش بسیار پرتعداد برای ساخت این غشاها است ولی نتایج تجربی نشان داده است که در غشاهای ضخیم سنتز شده با استفاده از فیلتراسیون خلا مورفولوژی سطح غشا نامنظم است. در مقابل با استفاده از روش فیلتراسیون تحت فشار، یک غشای مسطح و یکنواخت می توان به دست آورد. از طرف دیگر، روش های پوشش غوطه وری و پوشش پاششی با اینکه جز روش های ساده هستند اما تهیه غشاهای یکنواخت از طریق این دو روش کار مشکلی است. هرچند با استفاده از روش خودآرایی لایه به لایه می توان غشاهای چندلایه تهیه کرد.

فرایند، آب از محلول خوراک<sup>۱</sup> با فشار اسمزی پایین به سمت محلول کششی<sup>۲</sup> با فشار اسمزی بالا حرکت می کند. در مقایسه با فرایندهای غشایی متداول تحت فشار دیگر مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، اسمز مستقیم دارای مزایایی می باشد. به عنوان مثال در اسمز مستقیم تمایل به رسوب گرفتن غشا کمتر و مقدار آب بازیابی شده بیشتر است [۵۰]. طبق مطالعات انجام شده، غشاهای مبتنی بر گرافن اکسید در اسمز مستقیم عملکرد خوبی از خود نشان می دهند و حتی از برخی جهات از غشاهای اسمز مستقیم معمولی بهتر می باشند [۱۶]. به صورت کلی، غشاهای مبتنی بر گرافن اکسید را می توان به دو دسته غشاهای مستقل<sup>۳</sup> و غشاهای انباشته<sup>۴</sup> با یک بستر تقسیم بندی کرد. غشاهای rGO مستقل دارای لایه جداسازی متراکم هستند و لایه پشتیبانی متخلخل ندارند، از این جهت در این نوع از غشاها مشکل قطبش غلظت داخلی وجود ندارد [۱۶]. قطبش غلظتی داخلی (ICP) یک مشکل بسیار جدی در فرایند اسمز مستقیم می باشد که می تواند به طرز چشمگیری شار آب را کاهش دهد [۵۰]. به طور کلی، در فرایند های غشایی قطبش غلظتی زمانی رخ می دهد که غلظت یک جزء خاص در لایه مرزی نزدیک به سطح غشا به دلیل انتقال انتخابی اجزا از طریق غشا کاهش یا افزایش یابد [۵۱]. طبق مطالعات انجام شده توسط ژانگ و همکاران، شار غشاهای rGO مستقل به صورت خطی با غلظت نمک تغییر می کند، که نشان دهنده حذف کامل اثر ICP می باشد. در این مطالعه، شار غشاهای rGO مستقل ۵ برابر بیشتر از غشاهای اسمز مستقیم سلولز استات تجاری بود [۴۵].

غشای اسمز مستقیم باید یکسری ویژگی هایی داشته باشد. این غشاها باید انتخاب گری بالایی داشته باشند تا فقط به مولکول های آب اجازه عبور دهند. همچنین باید متخلخل باشند تا سرعت انتقال آب افزایش یابد. در ضمن باید پیچ خوردگی و انحنای کمی داشته باشند تا اثر ICP کاهش یابد [۵۲]. از طرف دیگر، ماده مورد استفاده برای ساخت غشا باید از استحکام مکانیکی خوبی برخوردار باشد تا بتواند در برابر جریان محلول مقاومت خوبی از خود نشان دهد [۵۲]. ویژگی اصلی غشاهای اسمز مستقیم،

<sup>1</sup> Feed solution

<sup>2</sup> Draw solution

<sup>3</sup> Freestanding membranes

<sup>4</sup> Stacked membranes

<sup>5</sup> Internal concentration polarization

6. C. J. Shearer, A. D. Slattery, A. J. Stapleton, J. G. Shapter, and C. T. Gibson, *Nanotechnology* 27, 125704 (2016).
7. A. Hashmi, V. Nayak, K. R. Singh, B. Jain, M. Baid, F. Alexis, and A. K. Singh, *Mater Today Adv* 13, 100208 (2022).
8. H. R. Byon, S. W. Lee, S. Chen, P. T. Hammond, and Y. Shao-Horn, *Carbon N Y* 49, 457 (2011).
9. A. B. Dichiara, T. J. Sherwood, and R. E. Rogers, *J Mater Chem A Mater* 1, 14480 (2013).
10. S. Park, K.-S. Lee, G. Bozoklu, W. Cai, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, *ACS Nano* 2, 572 (2008).
11. G. Shi, Q. Meng, Z. Zhao, H.-C. Kuan, A. Michelmore, and J. Ma, *ACS Appl Mater Interfaces* 7, 13745 (2015).
12. Y. Liu, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 94, 012060 (2017).
13. A. Ricci, A. Cataldi, S. Zara, and M. Gallorini, *Materials* 15, 2229 (2022).
14. T. M. Magne, T. de Oliveira Vieira, L. M. R. Alencar, F. F. M. Junior, S. Gemini-Piperni, S. V. Carneiro, L. M. U. D. Fachine, R. M. Freire, K. Golokhvast, P. Metrangolo, P. B. A. Fachine, and R. Santos-Oliveira, *J Nanostructure Chem* 12, 693 (2022).
15. R. R. Nair, H. A. Wu, P. N. Jayaram, I. V. Grigorieva, and A. K. Geim, *Science* 335, 442 (2012).
16. Y. Wei, Y. Zhang, X. Gao, Z. Ma, X. Wang, and C. Gao, *Carbon N Y* 139, 964 (2018).

برای بهبود فرایند جداسازی غشاهای چند لایه گرافن اکسید می توان از دو روش تنظیم ضخامت غشاهای چندلایه گرافن اکسید و تنظیم درجه اکسیداسیون نانوصفحات گرافن اکسید و غشاهای چندلایه گرافن اکسید بهره گرفت. در فرآیندهای فیلتراسیون، ضخامت غشا را با تغییر در حجم و غلظت محلول گرافن اکسید می توان تنظیم کرد. در فرایندهای خودآرایی لایه به لایه با افزایش تعداد چرخه های LBL و زمان خیس کردن می توان غشا را ضخیم تر کرد و میزان طرد شدن را بهبود داد. ضخامت، آب دوستی و میزان بار گرافن اکسید توسط درجه اکسیداسیون آن تعیین می شود. از این رو، با کنترل درجه اکسیداسیون می توان عملکرد غشا را نیز کنترل کرد. با استفاده از دو روش فرایند هیدروترمال و تغییر مقدار ماده اکسید کننده در فرایند اکسیداسیون گرافیت و سنتز گرافن می توان غشای گرافن اکسید با درجه اکسیداسیون قابل کنترل ساخت. از غشاهای مبتنی بر گرافن اکسید تهیه شده می توان در فرایندهای نانوفیلتراسیون و اسمز مستقیم استفاده کرد.

## مراجع

1. E. Obotey Ezugbe and S. Rathilal, *Membranes (Basel)* 10, 89 (2020).
2. A. Lee, J. W. Elam, and S. B. Darling, *Environ Sci (Camb)* 2, 17 (2016).
3. F. Jia, X. Xiao, A. Nashalian, S. Shen, L. Yang, Z. Han, H. Qu, T. Wang, Z. Ye, Z. Zhu, L. Huang, Y. Wang, J. Tang, and J. Chen, *Nano Res* 15, 6636 (2022).
4. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* 306, 666 (2004).
5. K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, and K. Kim, *Nature* 490, 192 (2012).

30. S. P. Koenig, L. Wang, J. Pellegrino, and J. S. Bunch, *Nat Nanotechnol* 7, 728 (2012).
31. A. Lerf, A. Buchsteiner, J. Pieper, S. Schöttl, I. Dekany, T. Szabo, and H. P. Boehm, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 67, 1106 (2006).
32. Y. Zhang, S. Zhang, and T.-S. Chung, *Environ Sci Technol* 49, 10235 (2015).
33. D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, and R. S. Ruoff, *Chem. Soc. Rev.* 39, 228 (2010).
34. J. Abraham, K. S. Vasu, C. D. Williams, K. Gopinadhan, Y. Su, C. T. Cherian, J. Dix, E. Prestat, S. J. Haigh, I. V. Grigorieva, P. Carbone, A. K. Geim, and R. R. Nair, *Nat Nanotechnol* 12, 546 (2017).
35. C.-N. Yeh, K. Raidongia, J. Shao, Q.-H. Yang, and J. Huang, *Nat Chem* 7, 166 (2015).
36. Y.-C. An, X.-X. Gao, W.-L. Jiang, J.-L. Han, Y. Ye, T.-M. Chen, R.-Y. Ren, J.-H. Zhang, B. Liang, Z.-L. Li, A.-J. Wang, and N.-Q. Ren, *Environ Res* 223, 115409 (2023).
37. Y. Zhao, C. Li, X. Fan, J. Wang, G. Yuan, X. Song, J. Chen, and Z. Li, *Appl Surf Sci* 384, 279 (2016).
38. J. U. Lee, W. Lee, J. W. Yi, S. S. Yoon, S. B. Lee, B. M. Jung, B. S. Kim, and J. H. Byun, *J Mater Chem A Mater* 1, 12893 (2013).
39. R. Verdejo, M. M. Bernal, L. J. Romasanta, and M. A. Lopez-Manchado, *J. Mater. Chem.* 21, 3301 (2011).
40. L. Wang, X. Lu, S. Lei, and Y. Song, *J. Mater. Chem. A* 2, 4491 (2014).
17. O. Kwon, Y. Choi, E. Choi, M. Kim, Y. C. Woo, and D. W. Kim, *Nanomaterials* 11, 757 (2021).
18. Q. Yang, Y. Su, C. Chi, C. T. Cherian, K. Huang, V. G. Kravets, F. C. Wang, J. C. Zhang, A. Pratt, A. N. Grigorenko, F. Guinea, A. K. Geim, and R. R. Nair, *Nat Mater* 16, 1198 (2017).
19. C.-H. Tsou, Q.-F. An, S.-C. Lo, M. De Guzman, W.-S. Hung, C.-C. Hu, K.-R. Lee, and J.-Y. Lai, *J Memb Sci* 477, 93 (2015).
20. J. T. Robinson, M. Zalalutdinov, J. W. Baldwin, E. S. Snow, Z. Wei, P. Sheehan, and B. H. Houston, *Nano Lett* 8, 3441 (2008).
21. Y. Lou, G. Liu, S. Liu, J. Shen, and W. Jin, *Appl Surf Sci* 307, 631 (2014).
22. D. Frederichi, M. H. N. O. Scaliante, and R. Bergamasco, *Environmental Science and Pollution Research* 28, 23610 (2021).
23. J. J. Richardson, M. Björnmalm, and F. Caruso, *Science* 348, (2015).
24. X. Hu, Y. Yu, S. Ren, N. Lin, Y. Wang, and J. Zhou, *Journal of Porous Materials* 25, 719 (2018).
25. J. Y. Chong, B. Wang, C. Mattevi, and K. Li, *J Memb Sci* 549, 385 (2018).
26. J. Heo, M. Choi, and J. Hong, *Sci Rep* 9, 2754 (2019).
27. Y. Zhang, S. Zhang, J. Gao, and T.-S. Chung, *J Memb Sci* 515, 230 (2016).
28. H. Kang, J. Shi, L. Liu, M. Shan, Z. Xu, N. Li, J. Li, H. Lv, X. Qian, and L. Zhao, *Appl Surf Sci* 428, 990 (2018).
29. M. Hu and B. Mi, *Environ Sci Technol* 47, 3715 (2013).

41. A. B. Dichiara, T. J. Sherwood, J. Benton-Smith, J. C. Wilson, S. J. Weinstein, and R. E. Rogers, *Nanoscale* 6, 6322 (2014).
42. B. Adhikari, A. Biswas, and A. Banerjee, *ACS Appl Mater Interfaces* 4, 5472 (2012).
43. Z. Tang, X. Wu, B. Guo, L. Zhang, and D. Jia, *J Mater Chem* 22, 7492 (2012).
44. L.-C. Tang, X. Wang, L.-X. Gong, K. Peng, L. Zhao, Q. Chen, L.-B. Wu, J.-X. Jiang, and G.-Q. Lai, *Compos Sci Technol* 91, 63 (2014).
45. H. Liu, H. Wang, and X. Zhang, *Advanced Materials* 27, 249 (2015).
46. L. Qiu, X. Zhang, W. Yang, Y. Wang, G. P. Simon, and D. Li, *Chemical Communications* 47, 5810 (2011).
47. L. Chen, G. Shi, J. Shen, B. Peng, B. Zhang, Y. Wang, F. Bian, J. Wang, D. Li, Z. Qian, G. Xu, G. Liu, J. Zeng, L. Zhang, Y. Yang, G. Zhou, M. Wu, W. Jin, J. Li, and H. Fang, *Nature* 550, 380 (2017).
48. M. İlhan, H. E. Gültekin, S. Rençber, Z. Şenyiğit, and H. H. Aydın, in *Systems of Nanovesicular Drug Delivery* (Elsevier, 2022), pp. 191–206.
49. A. Parupudi, S. H. R. Mulagapati, and J. A. Subramony, in *Nanoparticle Therapeutics* (Elsevier, 2022), pp. 3–46.
50. Q. Liu, J. Li, Z. Zhou, J. Xie, and J. Y. Lee, *Sci Rep* 6, 19593 (2016).
51. P. Luis, in *Fundamental Modelling of Membrane Systems* (Elsevier, 2018), pp. 1–23.
52. J. Dharan M.P, H. P.V., and P. K.S, *Mater. Today Proc.* (2023) doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.074

# Graphene oxide based membranes with application in water treatment process

M. Mehrabi\*, F. Honarasa

Department of Chemistry, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

**Abstract:** In recent years, graphene oxide has become one of the most attractive materials for design and manufacturing of membranes used in water treatment processes. Because graphene oxide shows unique properties, such as a high surface area, good mechanical properties, simple synthesis techniques, presence of various functional groups on its surface and the possibility of surface modification. Various methods have been proposed for preparing graphene oxide membranes, each of which has its own advantages and disadvantages. On the other hand, it is possible to control and adjust the functions and performance of these separation membranes by making changes in the synthesis process or by modifying graphene oxide itself. Here, Firstly, the various common methods for preparing separation membranes based on graphene oxide will be discussed. Then, methods of controlling and adjusting the performance of these membranes to attain more favorable conditions for water treatment processes will be developed.

**Keywords:** Membrane, Graphene oxide, Degree of oxidation, Water treatment