

**Review Paper**

**مقاله مروری**

**A Review of the Performance of  
Nanofiltration Membranes Modified with  
Inorganic, Carbon Nanomaterials and their  
Combinations**

**مروری بر عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون  
اصلاح شده با نانومواد معدنی، کربنی و ترکیبی از  
آنها**

**Fatemeh Pasandidehpour<sup>1</sup>, Foad Gholami<sup>2</sup>  
and Azar Asadi<sup>3\*</sup>**

1- M.Sc. Student in Applied Chemistry, Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Ph.D. Student in Applied Chemistry, Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, Razi University, Kermanshah, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Applied Chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran, Iran.

\*Corresponding Author, Email: [a.asadi@yu.ac.ir](mailto:a.asadi@yu.ac.ir)

فاطمه پسندیده پورا<sup>۱</sup>، فواد غلامی<sup>۲</sup> و آذر اسدی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۳- استادیار، گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، گچساران، ایران.

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [a.asadi@yu.ac.ir](mailto:a.asadi@yu.ac.ir)

Received: 21/11/2021

Revised: 11/01/2022

Accepted: 13/01/2022

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

Nowadays, membranes are widely used in various industries due to their advantages such as high removal efficiency and the ease of operation. However, membrane clogging is an important limiting factor in this process which is related to the hydrophobicity of membrane materials. Although reverse osmosis and nanofiltration processes were used to purify water, the use of nanofiltration is more cost-effective as the nanofiltration process is conducted at a lower pressure and plays a major role in water treatment and desalination. Recently, many researches has reported the improvements in the ability of nanofiltration process to reject salts, dyes, and heavy metals and also to reduce the clogging of nanofiltration membranes. Membrane clogging is the largest and most challenging barrier to membrane processes, greatly reducing membrane performance and membrane life, and increasing operating cost. In this review article, different methods of nanofiltration membrane modification using nano-minerals, carbon as well as mineral / carbon composite materials has been investigated in order to improve the performance of nanofiltration membranes.

**Keywords:** Hydrophilic Nanomaterials, Membrane Clogging, Nanofiltration Membrane, Polymer Membranes.

**چکیده**

امروزه غشاها با توجه به مزایایی که دارند از جمله توانایی حذف بالا و سادگی در راهبری کاربرد زیادی در صنعت دارند ولی گرفتگی غشا عاملی مهم در محدودیت این فرآیند است، که به خاصیت آب‌گریزی مواد سازنده غشا مربوط می‌شود. اسمز معکوس و نانو فیلتراسیون برای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما با توجه به این که فرآیند نانوفیلتراسیون در فشار پایین‌تری راهبری می‌شود و در تصفیه آب، پساب و نمک‌زدایی نقش زیادی دارد، به‌کارگیری نانوفیلتراسیون مقرون به‌صرفه‌تر است. امروزه پژوهش‌های زیادی در راستای بهبود توانایی حذف نمک‌ها و هم‌چنین کاهش گرفتگی غشا نانوفیلتراسیون صورت گرفته است. گرفتگی غشا بزرگترین و چالش برانگیزترین مانع در اجرای فرایندهای غشایی است و به‌مقدار زیادی عملکرد غشا و عمر غشا را کاهش و هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. در این مقاله مروری، روش‌های مختلف اصلاح غشای نانوفیلتراسیون با استفاده از نانو مواد معدنی، کربنی و هم‌چنین مواد ترکیبی معدنی/کربنی به‌منظور بهبود عملکرد غشای نانوفیلتراسیون مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** نانوفیلتراسیون، غشاهای پلیمری، نانومواد آب‌دوستی، گرفتگی غشا.

سیالات یا یون‌های گوناگون به‌کار می‌گیرد. به‌دلیل این‌که این غشاهای در فشارهای بسیار پایین‌تری کار کرده و برخی از آن‌ها می‌توانند در مواردی که حذف بالای مواد آلی و حذف متوسط به تغلیظ شکر، نمک‌های دوظرفیتی و پروتئین‌ها است (قنواتی نسب و ابراهیمی، ۱۳۹۵). از غشاهای نانوفیلتراسیون معمولی برای نرم‌سازی آب استفاده می‌شود که در آن سختی آب کم شده و مواد آلی، باکتری‌ها و ناخالصی‌های دیگر از آب جدا می‌شوند. به‌دلیل نیاز به فشار کمتر نانوفیلتراسیون نسبت به اسمز معکوس و کاهش هزینه انرژی، در خصوص نمک زدایی از آب حاوی مقادیر بالا از املاح برای مصارف آشامیدن، توجه به نانوفیلتراسیون فزاینده است. غشاهای نانوفیلتراسیون را می‌توان به دو گروه سرامیکی و پلیمری طبقه‌بندی کرد.

دو نوع غشای سلولز استات و غشای کامپوزیت لایه نازک پلی‌امید موفق‌ترین غشاهای نانوفیلتراسیون در بازار هستند. غشای سلولز استات به‌دلیل تولید آسان و ارزان بودن بخش کوچکی از بازار را در اختیار دارد ولی معایبی دارد که از آن جمله می‌توان به محدوده عملکرد غشا در pH بین ۴ تا ۶، از بین رفتن کارایی غشا در بالاتر از دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و جذب راحت باکتری روی سطح غشا اشاره کرد. غشا کامپوزیت لایه نازک پلی‌امید نیز به‌دلیل قابلیت خوب در پس زدن نمک در بازار تجاری موفق بوده اما معایبی مثل مقاومت کم در برابر فشار، اکسید کننده‌ها، کلر و حرارت را دارد. همچنین غشاهای نانوفیلتراسیون موجود در بازار، به سرعت منافذشان گرفته می‌شود و از طول عمر آن‌ها کاسته می‌شود. در این خصوص، غشاهای جدید پلیمری ترکیب شده با فناوری نانو مشکلات گذشته را برطرف کرده است. از جمله موادی که می‌توانند در بهبود عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون پلیمری نقش ایفا کنند عبارتند از: (۱) غشاهای پوشش داده شده از نانوکانی‌های سیلیکاتی؛ (۲) غشاهای پلیمری-پروتئینی پیوندی و یا شبه‌زیستی؛ (۳) غشاهای ترکیب شده با نانولوله‌های کربنی؛ (۴) غشاهای کوپلیمری خودآرا؛ (۵) غشاهای پایه گرافنی و (۶) نانوکامپوزیت‌های لایه نازک آلی-غیر آلی.

فرایند غشای نانوفیلتراسیون منجر به پس‌زدن ذرات بزرگ‌تر از یک نانومتر مثل مولکول‌های آلی با وزن زیاد، یون‌های چند ظرفیتی و در مواردی یون‌های تک ظرفیتی می‌شود. غشاهای نانوفیلتراسیون معمولاً ضخامتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر با یک لایه تفکیک کننده و منافذی با قطر کمتر از ۰/۰۰۲ میکرومتر را دارا هستند. فشار عبوری غشا معمولاً بین ۳/۵ تا ۱۶ بار است

آب یک منبع اساسی برای زندگی انسان است، با این‌حال، طبق تخمین شورای جهانی آب، ۳/۹ میلیارد نفر در مناطق کم آب روی زمین تا سال ۲۰۳۰ زندگی می‌کنند (Ji et al., 2017). از آنجایی‌که تمام فعالیت‌های بشر وابسته به آب است، با افزایش جمعیت جهان، مقدار زیادی پساب‌های فاضلاب روزانه در مناطق خانگی، صنعتی و کشاورزی تولید می‌شود. با این‌حال منابع آب شیرین مطابق با رشد روزافزون جمعیت و نیازهای استفاده از آب دوباره پر نمی‌شوند. این امر منجر به رقابت شدید و توزیع ناعادلانه منابع آب شیرین در بخش‌های مختلف شده است. تولید فاضلاب اجتناب ناپذیر است؛ زیرا بخشی جدایی ناپذیر در تمام بخش‌های زندگی را تشکیل می‌دهد. همه این فاضلاب‌ها آب تمیز همراه با آلاینده‌ها هستند، بنابراین با تصفیه کارآمد فاضلاب می‌توان منابع آب شیرین را تکمیل کرد و آب آشامیدنی برای همه در دسترس باشد. در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای معرفی انواع تکنولوژی‌های تصفیه فاضلاب صورت گرفته است که می‌توان فیلتراسیون غشایی، انعقاد و لخته‌سازی و تصفیه بیولوژیکی را نام برد. یکی از فناوری‌های تصفیه فاضلاب که افزایش عمده‌ای داشته، فناوری غشا است. فناوری غشا به‌دلیل مزایای هم‌چون انعطاف‌پذیری، انرژی کم، هزینه عملیاتی پایین و همچنین سازگاری با محیط‌زیست قابل توجه بوده و گزینه مطلوبی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب، جداسازی و تصفیه مواد در بخش‌های صنعتی مانند غذایی و دارو است. (Obotey and Rathilal, 2020)؛ صرافزاده، ۱۳۹۶).

غشا وسیله‌ای است که جداسازی را عموماً براساس اندازه مولکولی آن‌ها ممکن می‌سازد. غشا به‌صورت فازی که اجزای جداشونده خوراک با سرعت‌های متفاوت از آن عبور می‌کنند، عمل می‌کند. در این روش، معمولاً تغییر فازی صورت نمی‌گیرد و محصولات نیز در هم‌دیگر قابل امتزاج هستند. چگونگی کار غشا توسط خواص فیزیکی و شیمیایی آن مشخص می‌شود. خواص فیزیکی شامل اندازه و شکل حفره‌های موجود در غشا و نوع آن‌ها است. خواص شیمیایی غشا عبارتند از بار سطحی آن، توانایی جذب اجسام دیگر و امکان انجام واکنش با سایر مواد. آب‌گریزی و یا آب‌دوستی غشا حاصل خواص فیزیکی و شیمیایی آن است (قنواتی نسب و ابراهیمی، ۱۳۹۵؛ یادگاری و همکاران، ۱۳۹۶).

## ۲- نانوفیلتراسیون (NF)

شکلی از فیلتراسیون است که غشاهای را به‌منظور جداسازی

### ۳- ساختار و ویژگی مواد سازنده غشاها

به طور کلی مواد سازنده غشاها ساختار و ویژگی‌های متنوعی دارند. در این میان مواد پلیمری متفاوتی مانند پلی سولفون (PSF) (Polysulfone)، پلی اترسولفون (PES) (Polyethersulfone)، پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) (Polyvinylidene fluoride)، پلی اتر ایمید (PA) (Polyamide)، پلی اتر ایمید (PEI) (Polyetherimide)، پلی وینیل کلراید (PVC) (Polyvinyl chloride) و غیره به عنوان ماده پایه در ساخت غشا مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موادی که به طور گسترده در ساخت غشا قابل استفاده است، پلی اترسولفون است که خواصی از جمله مقاومت شیمیایی، ویژگی گرمایی و مکانیکی بسیار مناسبی دارد. پلی سولفون نیز به دلیل هزینه پایین تر، در دسترس بودن، پایداری شیمیایی و گرمایی مناسب به طور گسترده استفاده می‌شود. عمده ترین مشکل پلیمرهای ذکر شده که در ساخت غشا مورد استفاده قرار می‌گیرند آب‌گریزی نسبی آنها است که عامل گرفتگی غشاها و کاهش شار نفوذی در حین عملیات می‌شود (غلامی و مهدوی، ۱۳۹۹). کاهش شار نفوذی، یکی از محدودیت‌های اساسی در فرآیندهای غشایی است؛ که در نتیجه لایه تشکیل شده از ترکیباتی که از فیلتر غشایی عبور نکرده‌اند، ایجاد می‌شود. به کاهش غیرقابل برگشت و طولانی مدت جریان، انسداد غشایی گفته می‌شود. شکل‌های مختلف انسداد غشا، بستگی به اندازه و شکل ذرات جامد و همچنین اندازه منافذ غشا دارند (رودسری و همکاران، ۱۳۹۱).

انسداد غشایی به چهار صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

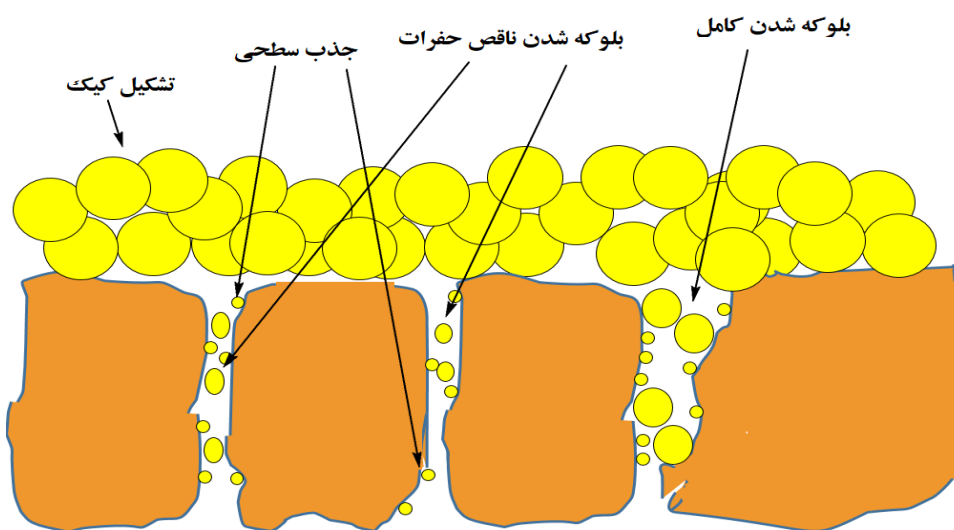
**الف:** بلوکه شدن کامل حفرات غشا (complete pore blocking): (blocking) زمانی اتفاق می‌افتد که اندازه ذرات ورودی بزرگ‌تر از اندازه منافذ غشا باشد و باعث بسته شدن بخشی از منافذ شود. اتفاقی که در نهایت رخ می‌دهد کاهش سطح غشا است (رودسری و همکاران، ۱۳۹۱).

**ب:** بلوکه شدن ناقص حفرات غشا (partial pore blocking): این پدیده هم مانند حالت قبل زمانی اتفاق می‌افتد که درشت مولکول‌ها به داخل منافذ باز دسترسی پیدا کنند و باعث بستن آن شوند. با این تفاوت که ممکن است یک حالت بلوکه شدن یا نشدن اتفاق بیفتد و ذرات عبوری با تشکیل یک پل در ورودی حفرات بدون بلوکه کردن کامل، باعث انسداد شوند (رودسری و همکاران، ۱۳۹۱).

**پ:** تشکیل کیک (cake formation): این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که درشت مولکول‌ها نمی‌توانند به درون منافذ وارد شوند و باعث تشکیل کیک بر روی سطح غشا می‌شوند. بنابراین مقاومت غشا به دلیل وجود لایه کیک ایجاد شده، افزایش می‌یابد (رودسری و همکاران، ۱۳۹۱).

**ت:** بلوکه شدن داخلی منافذ (internal pore blocking): علت این پدیده ورود ذرات به درون منافذ غشا، رسوب بر سطوح منافذ و یا جذب سطحی آنها است و باعث کاهش حجم منافذ می‌شود. در صورت بلوکه شدن داخلی منافذ، مکانیسم انسداد غشایی مستقل از سرعت جریان متقاطع است (رودسری و همکاران، ۱۳۹۱).

چهار حالت مکانیسم انسداد غشایی گفته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شکل گرافیکی از انواع گرفتگی در سطح غشا

#### ۴- روش‌های ساخت غشا

روش‌های زیادی برای ساخت غشاهای پلیمری مورد استفاده است؛ اما در ادامه تعدادی از پرکاربردترین روش‌های ساخت غشا ارائه شده است.

##### ۴-۱- پختن (Sintering)

در این روش ذرات در اندازه‌های مشخصی را فشرده کرده و سپس آن‌را با افزایش دما می‌پزند. این روش برای ساخت غشاهای متخلخل از مواد آلی و معدنی کاربرد دارد. تخلخل غشا در این روش معمولا کم است. غشاهای میکروفیلتراسیون (MF) با این روش ساخته می‌شوند (فردی و همکاران، ۱۳۹۶).

##### ۴-۲- کشیدن (Stretching)

در این روش تخلخل بیشتر از روش پختن است، اما حفرات غشا کماکان در اندازه میکرو هستند. با استفاده از مواد پلیمری نسبتا کریستالی فیلم اکستروژن شده ساخته و سپس در جهت عمود بر جهت اکستروژن کشیده می‌شود. در نتیجه ناحیه کریستالی به موازات جهت اکستروژن قرار می‌گیرد و ساختار متخلخل به دلیل فشار مکانیکی اعمال شده ساخته می‌شود.

##### ۴-۳- قلم زنی (Track-Etching)

در این روش غشا با قرارگیری فیلم در برابر تابش ذرات پر انرژی، که عمود تابیده می‌شوند، به دست می‌آید. در مرحله بعد فیلم در حمام اسیدی یا بازی قرار گرفته و مواد پلیمری به موازات مسیرهای حک شده قرار می‌گیرند تا حفره‌ها با توزیع اندازه ذرات کم تشکیل شود.

##### ۴-۴- شستن قالب (Template Leaching)

در این روش غشا متخلخل با شستن یکی از ترکیبات ذوب شده در ساختار غشا ساخته می‌شود. غشاهای شیشه‌ای با این روش ساخته می‌شوند. قطر حفرات در این روش حداقل ۰/۰۵ μm است.

##### ۴-۵- پوشش دهی (Coating)

غشاهای کامپوزیت شامل دو ماده مختلف هستند، غشا پایه که استحکام غشا را تامین می‌کند و لایه نازک که تعیین کننده انتخاب پذیری و خصوصیات غشا است. این فرآیند به روش‌های پوشش دهی زیر انجام می‌شود.

#### ۴-۵-۱- پوشش غوطه‌وری

در صورتی از این روش استفاده می‌شود که لایه‌ای نازک متراکم و بسیار نازک باشد که در اسمز معکوس، جداسازی گازها و تراوش تبخیری کاربرد دارد. در این روش غشا در حمام شامل محلول پوشش دهنده غوطه‌ور شده، لایه‌ای از ماده روی سطح غشا می‌چسبد که با قراردادن غشا در آون، حلال تبخیر شده و پیوندهای عرضی اتفاق می‌افتد.

##### ۴-۵-۲- پلیمریزاسیون پلاسمایی

در این روش پلاسمای یونیزاسیون گاز با استفاده از تخلیه الکتریکی در فرکانس بالا تولید می‌شود. گاز و واکنش دهنده، جداگانه ولی هم‌زمان وارد راکتور می‌شوند. وقتی گاز وارد راکتور می‌شود، یونیزه شده و رادیکال‌ها تشکیل می‌شوند و با ته‌نشینی محصول بر روی غشا لایه نازک تشکیل می‌شود.

##### ۴-۵-۳- پلیمریزاسیون سطحی

در ابتدا لایه پایه درون حمام محلول آبی که دارای مونومر فعال است حل می‌شود. سپس لایه پایه درون حمام دوم که دارای حلال غیرقابل امتزاج در آب و مونومر فعال است قرار می‌گیرد تا لایه‌ی متراکم پلیمری تشکیل شود.

##### ۴-۵-۴- پلیمریزاسیون در محل

این روش شامل پراکندگی و توزیع لایه خاک رس در مونومر است، که در نتیجه آن پلیمریزاسیون با اعمال حرارت، تابش و غیره انجام می‌شود.

##### ۴-۶- وارونگی فاز (Phase Inversion)

در این فرآیند انتقال پلیمر به صورت کنترل شده از حالت مایع به جامد اتفاق می‌افتد و در نتیجه غشا تشکیل می‌شود (فردی و همکاران، ۱۳۹۶).

#### ۵- روش‌های مختلف اصلاح غشا

یکی از معضلات اصلی استفاده از فرآیندهای غشایی گرفتگی غشا است که راه حل اصلی برای کاهش آن، اصلاح سطح است که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

##### ۵-۱- توسعه غشاهای پلیمری با گرفتگی پایین از طریق پیونددهی آغازشونده با نور

در حال حاضر پلیمریزاسیون پیوندی آغازشونده با اشعه

### ۵-۳- روش پلیمریزاسیون بین سطحی

در ابتدا، پایه متخلخل به درون یک محلول آبی که معمولاً حاوی یک پلیمر واکنش پذیر یا یک دی‌آمین است غوطه‌ور می‌شود. سپس پایه خیس شده به درون یک حلال فرو برده می‌شود. با توجه به عدم امتزاج پذیری فاز آبی و حلال، واکنش در فصل مشترک این دو فاز انجام می‌شود. در غشاهای حاصل از روش پلیمریزاسیون بین سطحی، خواص آب‌دوستی و بار از عوامل مهم تعیین کننده در میزان تراوش‌پذیری آب و یا درصد دفع حل شونده‌های موجود در خوراک باعث می‌شود تا غشا دیرتر دچار خوردگی و آسیب در مقابل این ذرات شود (نبی‌زاده مقدم و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۵-۴- روش‌های جدایی فاز

این روش خود به ۴ روش ترسیب به‌وسیله غوطه‌وری، روش انعقاد حرارتی، ترسیب به‌وسیله جذب با بخار آب و تبخیر حلال تقسیم می‌شود. دو روش اول کاربرد بیشتری دارند که در ادامه توضیح داده خواهند شد (نبی‌زاده مقدم و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۵-۴-۱- ترسیب به‌وسیله غوطه‌وری

ابتدا پلیمر آمورف در یک حلال مناسب به‌طور کامل حل می‌شود و سپس محلول پلیمری بر روی یک سطح مسطح مانند شیشه به وسیله فیلم کش قالب‌گیری می‌شود. سپس شیشه حامل فیلم به درون حمام حاوی ضد حلال غوطه‌ور می‌شود و بعد از آن عملیات حرارتی بر روی غشا با هدف خروج کامل باقی‌مانده حلال صورت می‌گیرد (نبی‌زاده مقدم و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۵-۴-۲- روش انعقاد حرارتی

در این روش ابتدا پلیمر در حلال مناسبی حل می‌شود. سپس محلول می‌تواند به شکل مورد نظر قالب‌گیری شود و با گذشت زمان و سرد شدن فیلم حلال از درون فیلم خارج شده و به‌صورت لایه‌ای در بالای آن ظاهر می‌شود. این روش کاربرد بسیار گسترده‌ای در ساخت غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلترها دارد و در آن غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون از انجام فرآیند پلیمریزاسیون بر روی یک غشا متخلخل حاصل می‌شوند (نبی‌زاده مقدم و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۶- بررسی روش‌های اصلاح غشا

#### ۶-۱- اصلاح غشا با نانومواد معدنی

با توجه به این که استفاده از نانوذرات از جمله روش‌های آسان،

ماورای بنفش (UV) برای اصلاح سطح غشاهای پلیمری کاربرد زیادی دارد. برخی مونومرهای آب‌دوست مختلف مانند: اکریلیک اسید (AA)، هیدروکسی اتیل متاکریلات (HEMA)، آکریلامید و متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) و غیره برای اصلاح غشاهای میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس استفاده می‌شوند.

### ۵-۲- اصلاح پلاسمایی غشاهای پلیمری

این روش در دو دهه گذشته برای افزایش آب‌دوستی سطح غشا بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. اصلاح پلاسمایی غشا معمولاً با ۳ روش مختلف انجام می‌شود: ۱- به‌وسیله بخارهای قابل پلیمر شدن؛ ۲- به‌وسیله مولکول‌های گازی غیر پلیمر شونده و ۳- پیوند زنی القایی پلازما برای زنجیرهای پلیمر به سطح غشا. در میان این روش‌ها، روش‌های ۲ و ۳ بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه این سه روش شرح داده شده‌اند.

### ۵-۲-۱- اصلاح غشا در پلاسمای مولکول‌های قابل پلیمر

شدن

در این روش، از مونومرها برای اصلاح سطح غشا استفاده می‌شود. هم‌چنین، از ته‌نشین کردن لایه‌های پلیمری جدید با ضخامت چند نانومتر تا ۱ میکرومتر استفاده می‌شود (کتابی و دهقانی، ۱۳۹۵).

### ۵-۲-۲- اصلاح غشا در پلاسمای گازهای غیر قابل پلیمر

شدن

این روش بر اصلاح غشاهای پلی سولفون و پلی‌اترسولفون توسط پلاسمای هوا، اکسیژن، نیتروژن، آمونیاک، دی اکسید کربن یا آب تمرکز دارد. نشان داده شده است که گروه‌های کربونیل، هیدروکسیل و کربوکسیل بر سطح غشای پلی‌سولفون به‌وسیله اصلاح با پلاسمای اکسیژن نشانده شدند و نسبت اکسیژن به کربن از ۳۳ درصد در غشاهای اصلاح نشده به ۴۸ تا ۵۴ درصد در غشاهای اصلاح شده افزایش یافت. این امر بیانگر این است که خاصیت آب‌دوستی سطح غشا در طی اصلاح به‌وسیله پلازما، تغییر می‌کند (کتابی و دهقانی، ۱۳۹۵).

### ۵-۲-۳- پیوند سطح غشا به‌وسیله القای پلاسمایی

رادیکال‌های تولید شده بر سطح پلیمر به‌وسیله پلازما در حضور خلاء پایدارند و وقتی که در معرض مونومرهای گازی باشند می‌توانند به سرعت واکنش دهند (کتابی و دهقانی، ۱۳۹۵).

و هم‌چنین باعث افزایش انرژی برهم کنش بین سطح غشا و آب می‌شود و در نتیجه باعث بهبود ترشوندگی و بالا رفتن شار آب خالص می‌شود. افزایش میزان جداسازی و دفع الکتروستاتیکی یون‌های  $SO_4^{2-}$  به دلیل افزایش بار منفی سطح غشا با افزودن سدیم سیترات که دارای گروه‌های هیدروکسیل است، توضیح داده شد.

در پژوهشی دیگر بنده‌علی و همکاران (۱۳۹۸)، ابتدا نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ ) را با استفاده از ترکیب آل-سیستین/گلیسیدیل پاس اصلاح کردند و سپس نانوذرات ترکیبی تهیه شده را برای ساخت و اصلاح غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی اتر ایمید به‌کار گرفتند. امروزه، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید با داشتن خواصی چون سطح ویژه و آب‌دوستی بالا و نیز خاصیت خود تمیز شونده‌گی و ضد گرفتگی مناسب، بسیار مورد توجه صنایع غشایی قرار گرفته است. هم‌چنین، اکتا گلیسیدیل اکسی پروپیل سیلیسیکسان با نام تجاری «پاس» یک مولکول آلی-معدنی با انعطاف‌پذیری بالا برای ایجاد گروه‌های عاملی بر سطح نانوذرات است که سازگاری مناسب با مواد آلی و غیرآلی دارد و خواص مکانیکی و حرارتی آن مطلوب است. نتایج به‌دست آمده، بالاترین میزان شار آب خالص و بیشترین میزان پس‌دهی نمک سدیم سولفات را برای غشای حاوی ۱ درصد وزنی نانوذرات نشان دادند، که به‌دلیل حضور گروه‌های آب‌دوست در سطح غشا نسبت داده شد. هم‌چنین، نتایج به‌دست آمده حاکی از بهبود خواص ضد گرفتگی غشای اصلاح شده محتوی نانوذرات در مقایسه با غشای حالت پایه بودند.

مقدسی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی دیگر غشاهای نانوکامپوزیتی بر پایه پلی اتر سولفون و با استفاده از نانوذرات سولفون‌شده اکسید سیلیس ( $SiO_2-SO_3H$ ) را به‌کمک روش تغییر فاز ساختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد با افزایش نانوذره سیلیکای سولفون‌شده بهبود قابل‌توجهی در میزان شار عبوری و پس‌دهی غشای اصلاح شده حاصل شد. هم‌چنین مقاومت مکانیکی غشای اصلاح شده بین ۱۵ تا ۲۵ درصد نیز افزایش یافت. غشای بهینه حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره گزارش شد.

عشقی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) از غشاهای نانوکامپوزیت پلیمری برای حذف فلزات سنگین از آب با هدف حذف یون‌های مس، استفاده کردند. آن‌ها اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی ( $ZnO$ ) را بر عملکرد غشای نانوفیلتراسیون ساخته شده از پلی وینیل کلراید بر حسب شار آب خالص، درصد پس‌دهی و مقاومت مکانیکی مورد ارزیابی قرار دادند. از آن‌جایی که نانوذرات اکسید روی میل بیشتری به آب دارند، با اضافه شدن این

مقرون به‌صرفه و هم‌چنین موثر در کارایی غشاها است بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوذرات استفاده شده در توسعه غشاهای نانوجندسازهای به‌طور معمول عبارتند از: تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ )، روی اکسید ( $ZnO$ )، اکسید آهن ( $FeO$ )، اکسید سیلیس ( $SiO_2$ )، آلومینیم اکسید ( $Al_2O_3$ ). استفاده از نانومواد در ساختار غشا منجر به ایجاد ساختار متخلخل‌تری در غشا می‌شود که معمولاً نسبت به غشای حالت پایه، شار آب بالاتری دارد (غلامی و مهدوی، ۱۳۹۹).

در یک مطالعه پژوهشی، پرویزیان و همکارانش (۱۳۹۹) تاثیر نانوذره روی اکسید ( $ZnO$ ) را بر بهبود عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه PVDF/PES بررسی کردند. اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات در ساخت غشاها مورد ارزیابی قرار گرفت که حالت بهینه ۰/۱ درصد وزنی نانوذره گزارش شد. نانوذره روی اکسید استفاده شده در این پژوهش نسبت به سایر نانوذرات مقرون به‌صرفه تر است و هم‌چنین، این نانوذره خواص آب‌دوستی، مکانیکی و دیگر خواص و ویژگی‌های جداسازی غشا را ارتقا بخشید. در اثر افزودن نانوذرات روی اکسید کاهش زاویه تماس گزارش شد که به دلیل افزایش خاصیت آب‌دوستی غشا است. در ۰/۱ درصد وزنی از نانوذرات شاهد افزایش فلاکس آب خالص بودند، که علت این افزایش را می‌توان از یک سو به افزایش تخلخل و افزایش اندازه حفرات سطحی و از سوی دیگر، به افزایش میزان آب‌دوستی نسبت داد. هم‌چنین در مورد فاکتور پس‌دهی نمک سدیم سولفات در غشای ۰/۱ درصد وزنی شاهد بالاترین درصد پس‌دهی بودند، که نتیجه گرفتند کاهش خاصیت آب‌گریزی، بهبود خواص ضدگرفتگی و نیروهای دافعه الکتروستاتیک منجر به افزایش میزان پس‌دهی نمک شده است. بنابراین ۰/۱ درصد وزنی از نانوذره روی اکسید ( $ZnO$ ) پس‌دهی بیشتر و میزان شار آب عبوری بیشتری را نشان داد.

در پژوهشی دیگر، مرادی و همکاران (۱۳۹۹) غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی اتر سولفون را با استفاده از روش وارونگی فاز ساختند. در ساخت غشاها از نانوذرات اکسید آهن ( $FeO$ ) با غلظت ۰/۵ درصد وزنی و غلظت‌های مختلف از سدیم سیترات استفاده کردند. در این پژوهش، از ماده سدیم سیترات به‌عنوان افزودنی برای بهبود پراکندگی نانوذرات اکسید آهن استفاده شد. هم‌چنین، محلول آبی  $Na_2SO_4$  با غلظت ۰/۰۱ مولار را به‌عنوان محلول خوراک برای ارزیابی عملکرد نانوفیلتراسیون تهیه کردند. نتایج، بالاترین شار آب خالص و پس‌دهی نمک را در غشای محتوی ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات و ۰/۳ درصد وزنی سدیم سیترات نشان داد. افزایش آب‌دوستی سطح غشا باعث جذب آب

اکسید روی و پلی وینیل کلراید نیاز است. به همین دلیل مقاومت مکانیکی غشاهای نانوکامپوزیتی حاوی نانوذرات تقویت می‌شود. نتایج به دست آمده نشان داد که غشاهای ساخته شده در محدوده غلظت ۰/۲ تا ۰/۳ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی دارای بهترین عملکرد از نظر افزایش شار آب بدون کاهش چشم‌گیر در مقدار پس‌دهی بودند.

در جدول ۱ خلاصه‌ای از عملکرد و نتایج پژوهش‌های ذکر شده آورده شده است.

نانوذرات، سرعت نفوذ آب به داخل فیلم پلیمری افزایش یافته و شاهد افزایش شار عبوری بودند. از طرف دیگر با اضافه شدن نانوذرات اکسید روی، آب‌دوستی سطح غشا نیز افزایش یافت که منجر به افزایش شار عبوری شد. افزودن نانوذرات آب‌دوست اکسید روی در ساختار غشا اثری دو جانبه بر پس‌دهی دارد. در این پژوهش، با توجه به تغییر جزئی میزان پس‌دهی نتیجه گرفتند که این دو اثر تقریباً همدیگر را خنثی کرده‌اند و بنابراین میزان پس‌دهی تغییر خاصی نکرده است. در غلظت‌های ۰/۲ تا ۰/۳ درصد وزنی، انرژی بیشتری برای شکستن پیوند بین نانوذرات

جدول ۱- عملکرد پژوهش‌های اصلاح غشا با نانومواد معدنی

مرجع	پس دهی	فلاکس (L/m <sup>2</sup> .h)	زاویه تماس (°)	غشای مطلوب	روش اصلاح	هدف	نوع پلیمر
پرویزیان و همکاران (۱۳۹۹)	82% (سدیم سولفات) (1000 mg/L)	19.97	66.5	0/1% وزنی	Mix matrix membrane	ساخت غشای نانوفیلتراسیون با مقاومت‌های شیمیایی و حرارتی بالا	پلی وینیلیدین فلوراید/پلی اتر سولفون
مرادی و همکاران (۱۳۹۹)	68% (سدیم سولفات) (0.01 mol/L)	47	51.2	0.3% وزنی سدیم سیترات	Mix matrix membrane	بررسی اثر غلظت سدیم سیترات و اکسید آهن در عملکرد جداسازی غشای NF	پلی اتر سولفون
بنده‌علی همکاران (۱۳۹۸)	78% (سدیم سولفات) (1000 mg/L)	22.03	30-50	1% وزنی	Mix matrix membrane	اصلاح نانوذرات TiO <sub>2</sub> با ال-سیستین/گلیسیدیل پاس و ساخت غشا بر پایه پلی اتر ایمید	پلی اتر ایمید
مقدسی و همکاران (۱۳۹۷)	70% (سدیم سولفات) (0.01 mg/L)	افزایش شار عبوری تا 200%	44	0.1% وزنی	Mix matrix membrane	اصلاح ساختار غشا با استفاده از نانوذرات سولفونه شده اکسید سیلیس	پلی اتر سولفون
عشقی‌پور و همکاران (۱۳۹۴)	48% نیترات مس (1000 mg/L)	32	-	0.2-0.3 % وزنی	Mix matrix membrane	ساخت غشاهای نانوکامپوزیت پلیمری برای حذف فلزات سنگین از آب برای حذف یون‌های مس	پلی وینیل کلراید

نانولوله‌های کربنی نخستین بار در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان عضوی از خانواده مواد کربنی گزارش شدند. نانولوله‌های کربنی، تک دیواره (SWCNT) یا چند دیواره (MWCNT) هستند. نانولوله‌های کربنی (CNTs) به‌ویژه نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) مزایایی از جمله: خلوص بالاتر، هزینه تولید کمتر و افزایش مقیاس آسان دارند.

مزیت استفاده از گرافن اکساید نسبت به CNTs در این است که در روش‌های تهیه گرافن اکساید، فرآورده آب‌دوست از صفحه‌های گرافیت به دست می‌آید، در صورتی که CNTs، به‌طور ذاتی آب‌گریز و بی‌اثرند و بنابراین به اسیدکاری نیاز دارند. هم‌چنین، مزیت دیگر استفاده از گرافن اکساید با فرم مسطحی که دارد نسبت به CNTs (همتای لوله‌ای گرافن اکساید) در این

## ۶-۲- اصلاح با نانومواد کربنی

در طی چند سال گذشته، فناوری نانوکربن به‌دلیل ویژگی متفاوت در مقایسه با پیش ماده‌های ماکرو یا میکرو آن‌ها توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. مواد نانوکربنی مانند گرافن اکساید به‌علت انعطاف‌پذیری ساختار، زیاد بودن نسبت مساحت به سطح، تحرک عالی در حمل بار، رسانایی الکتریکی و گرمایی خوبی که دارند توجه‌های زیادی را به خود جلب کرده‌اند. صفحه‌های دو بعدی گرافن اکساید پایداری مکانیکی، ویژگی پایداری فیزیکی-شیمیایی قابل قبول و حفرات نانومتری داشته و به همین دلیل در تصفیه آب کاربرد داشته که آن‌را به یک افزودنی جذاب در تهیه غشاهای پلیمری تبدیل می‌کند (به‌خصوص برای NF و نمک زدایی).

هیبرید آب دوست MMGO علاوه بر بهبود آب دوستی سطح غشا، باعث بهبود شار آب خالص نیز شده است که نشان دهنده اثر مثبت نانوذرات بر روی انتقال آب در سراسر غشا است. با افزودن ۱ درصد وزنی هیبرید MMGO، شار آب خالص کاهش یافت. این رفتار مشاهده شده را به تجمع هیبرید MMGO در غلظت بالاتر نسبت دادند، که منجر به انسداد منافذ غشا می شود. آن ها پارامترهای زبری سطح را بررسی کردند که زبری سطح غشای PES حالت پایه بیشتر از غشای PES تعبیه شده در MMGO بود. علت این کاهش زبری سطح در غشاهای اصلاح شده، تبادل آهسته حلال و غیر حلال در طی فرایند وارونگی فاز به دلیل گرانیوی بالا گزارش شد. هم چنین مشخص شد که غشایی با زبری کمتر، قابلیت ضد رسوب بالاتر و نسبت بازیابی شار بالاتری دارد و اتم N در گروه آمین به علت دارا بودن جفت الکترون ناپیوندی تاثیر به سزایی بر روی جذب یون های فلزات سنگین دارد. علت به کار بردن متفورمین در این پژوهش این است که از آن به عنوان یک عامل آمینی با محل های اتصال بیشتر برای به دست آوردن یک جاذب مغناطیسی استفاده کردند. غشای نانوفیلتراسیون ساخته شده با ۰/۵ درصد وزنی MMGO بیشترین تمایل را برای حذف یون های مس (۹۲٪) از خود نشان داد. هم چنین، پس دهی رنگ direct red 16 در غلظت های مختلف MMGO تقریباً یکسان بود (۹۹٪)، در حالی که برای غشای PES حالت پایه ۹۱٪ بود. در نتیجه غشای ۰/۵ درصد وزنی MMGO به عنوان بهترین غشا عمل کرد.

Zarrabi et al. (2016) از نانولوله های کربنی چند دیواره آمین دار (NH<sub>2</sub>-MWCNT) به عنوان یک اصلاح کننده آب دوست استفاده کردند. با افزایش غلظت NH<sub>2</sub>-MWCNT در لایه پلی آمید، زاویه تماس کاهش پیدا کرد که نشان دهنده افزایش آب دوستی غشای NF بود. در واقع این کاهش زاویه تماس، می تواند مربوط به ساختار لوله ای MWCNT و ویژگی آب دوستی گروه های آمین روی سطح غشا باشد. شار آب با افزایش غلظت NH<sub>2</sub>-MWCNT تا ۰/۰۱ درصد وزنی، افزایش یافت. علت این افزایش به خواص MWCNT و عملکرد آن با NH<sub>2</sub> نسبت داده شد. با افزایش بیشتر NH<sub>2</sub>-MWCNT، پس دهی نمک های NaCl و Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> افزایش یافت که علت آن وجود بیشتر گروه های عملکردی در سطح لایه پلی آمید بود. به دنبال آن بار سطحی افزایش یافته و دافعه بین املاح و سطح غشا زیاد شد. در نتیجه پس دهی نمک ها بهبود پیدا کرد. در نهایت عملکرد جداسازی مطلوب و بالاترین قابلیت ضد رسوب برای غشای اصلاح شده در ۰/۰۰۵ درصد وزنی NH<sub>2</sub>-MWCNT مشاهده شد.

است که گرافن اکساید در دو طرف برای عامل دار کردن مکان های بیشتری دارد (غلامی و مهدوی، ۱۳۹۹). جدول ۲ خلاصه ای از دستاوردهای چند مطالعه پژوهشی را ارائه می دهد.

مقدسی پور و همکاران (۱۳۹۸) غشاهای نانوفیلتراسیون پلیمری بر پایه پلیمر پلی اتر سولفون را به روش غوطه وری در حمام غیر حلال تهیه کردند و با استفاده از ترکیب پلیمر کیتوسان و نانوصفحه های گرافن اکساید، اصلاح سطح انجام دادند. آن ها اثر این لایه نشانی را بر خواص عملکردی و ضد گرفتگی غشا مورد ارزیابی قرار دادند. میزان آب دوستی سطح غشا را با استفاده از اندازه گیری زاویه تماس آب تخمین زدند. غشای حالت پایه بیشترین مقدار زاویه تماس را نشان داد که این مقدار به دلیل ذات و طبیعت آب گریز پلیمر پلی اتر سولفون است. بعد از فرایند لایه نشانی ترکیب کیتوسان و نانوصفحه های گرافن اکساید بر روی سطح، مقدار زاویه تماس به صورت قابل توجهی کاهش یافت که بیانگر افزایش مقدار آب دوستی سطح غشا در غشاهای اصلاح شده نسبت به حالت پایه است. اگرچه این نتایج به دست آمده از زاویه تماس آب نشان دهنده افزایش میزان آب دوستی در سطح غشاهای اصلاح شده بود و انتظار می رفت که میزان شار آب نیز بهبود یابد؛ اما نکته ای که باید در نظر گرفت، افزایش میزان ضخامت لایه جداساز در سطح غشا در اثر لایه نشانی است که به عنوان پارامتری مهم در مقدار شار آب تاثیر منفی گذاشته است. بر اساس نتایج گزارش شده، میزان پس دهی نمک در غشای اصلاح شده نسبت به غشای اصلاح نشده افزایش گسترده ای داشته که گفته شده می تواند به دلیل قابلیت جذب و پوشش حفره ها با پلیمر کیتوسان موجود در سطح باشد. بنابراین بهبود خواص ضد گرفتگی در غشای حاوی ۲ درصد وزنی نانو صفحه های گرافن اکساید، می تواند به بهبود میزان آب دوستی سطح این غشا نسبت داده شود. علاوه بر آن سطح صاف تر این غشا در مقایسه با نمونه اصلاح نشده نیز عامل مهم دیگری در کاهش پدیده گرفتگی شناخته شده است.

Abdi et al. (2018) MMGO هیبرید (metformin/GO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hybrid) را از طریق وارونگی فاز وارد پلیمر پلی اتر سولفون (PES) کردند. زاویه تماس غشاها با افزایش مقدار ترکیب آب دوست MMGO، کاهش یافت. که دلیل آن، این واقعیت گزارش شده است که آب دوستی سطح غشاها با افزایش غلظت هیبرید MMGO به دلیل ماهیت آب دوست آن ها افزایش یافته است. غشای PES حالت پایه کمترین شار آب خالص و غشای M3 (۰/۵ درصد وزنی) بیشترین شار آب خالص را در بین غشاهای تهیه شده داشت. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن



جدول ۲- نتایج پژوهش‌های اصلاح با نانومواد کربنی

مرجع	FRR (%)	پس‌دهی (%)	فلاکس (L/m <sup>2</sup> .h)	زاویه تماس (°)	غشای مطلوب	روش اصلاح	هدف	نوع پلیمر
مقدسی پور و همکاران (۱۳۹۸)	-	89% (نمک 1000 ppm)	15	47	2% وزنی	لایه نشانی	ترکیب کیتوسان و گرافن اکساید بر غشای PES	پلی اتر سولفون
Abdi et al. (2018)	90.6%	Copper ions=92% (200 mg/L) Direct red 16=99%	36.1	58	0.5 wt.% MMGO	Mix matrix membrane	بررسی عملکرد حذف رنگ و یون مس غشای NF اصلاح شده با MMGO	پلی اتر سولفون
Zarrabi et al. (2016)	-	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =95.72% (2000 ppm) NaCl=36.71% (2000 ppm)	50	47.3	0.005 wt.% NH <sub>2</sub> -MWCNT	اصلاح سطح	بهبود آب‌دوستی و عملکرد جداسازی و مقاومت در برابر رسوب	پلی ایمید
Zhao et al. (2016)	-	ZnCl <sub>2</sub> =93% MgCl <sub>2</sub> =91.5% CuCl <sub>2</sub> =CaCl <sub>2</sub> =90.5%	-	-	M-4 (X <sub>PDA</sub> -MWCNTs/PEI = 0.05)	اصلاح سطح	نرم شدن آب و حذف یون‌های فلزات سنگین	پلی اتیلن ایمید
Vatanpour and Haghghat (2019)	69.6%	lanasol blue 3R dye=86.3% (100 ppm) BSA=97.66% (250 ppm)	107.9	59	0.25wt.% TETA-MWCNT	Mix matrix membrane	ساخت غشای پلیمری و بهبود ویژگی‌های سطح آن برای عملکرد بهتر	پلی وینیل کلراید

(تک ظرفیتی) بر همکنش دافعه الکتروستاتیک ضعیف‌تری نسبت به یون‌های چند ظرفیتی (Zn<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) دارد. هم‌چنین دلیل دیگر این ترتیب، کاهش شعاع کاتیونی هیدراته از Zn<sup>2+</sup> به سمت Ca<sup>2+</sup> گزارش شده است. در شرایط بهینه (X<sub>PDA</sub>-MWCNT/PEI = 0.05) شاهد نرم شدن آب بودند که در واقع Ca<sup>2+</sup> و Mg<sup>2+</sup> حذف شدند. علاوه بر آن، حذف یون‌های فلزی سنگین مانند Zn<sup>2+</sup> و Cu<sup>2+</sup> و بازیابی مولکول‌های کاتیونی به‌عنوان مثال رنگ‌های کاتیونی و آنتی بیوتیک‌ها را به‌دنبال داشت.

Vatanpour and Haghghat (2019) برای ساخت غشای نانوفیلتراسیون پلی وینیل کلراید (PVC) از نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح شده با تری اتیلن تترا آمین (TETA) استفاده کردند. در این پژوهش، درصد‌های مختلف TETA-MWCNTs به محلول اضافه شده و فیلم‌های غشایی تشکیل شده در آب قرار گرفتند. عملکرد غشاها را از نظر نفوذپذیری رنگ، آب و پروتئین و هم‌چنین پس‌دهی پروتئین و رنگ Lanazol blue 3R، مورد بررسی قرار دادند. زاویه تماس با افزودن TETA-MWCNTs،

Zhao et al. (2016) غشاهای نانوفیلتراسیون نانوکامپوزیت را با قراردادن یکنواخت نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با پلی دوپامین (PDA-MWCNT) در غشاهای کامپوزیت پلی‌آمید، ساختند. با اصلاح پلی دوپامین، پراکندگی خوب MWCNTها در محلول‌های آبی پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) به‌دست آمد. اثر غلظت‌های مختلف PDA-MWCNTs را بر روی عملکرد جداسازی NF مورد بررسی قرار دادند. این ترکیب تا آستانه‌ی X<sub>PDA</sub>-MWCNTs/PEI = 0.05 باعث بهبود فلاکس آب شد که فراتر از آن شاهد کاهش شار آب بودند. محتوای PDA-MWCNT بالاتر ممکن است فضای بیشتری از لایه پلی‌آمید را اشغال کند که این لایه در مقایسه با غشای اصلی، لایه ضخیم‌تری را تشکیل می‌دهد. به‌همین علت مقاومت غشا بیشتر از غلظت ۰/۰۵ زیاد شده و در نتیجه باعث کاهش شار آب شد. پس‌دهی هفت نمک معدنی را برای غشای ۰/۰۵ ورزنی مورد بررسی قرار دادند؛ که ترتیب آن‌ها به‌صورت زیر گزارش شد: ZnCl<sub>2</sub> > MgCl<sub>2</sub> > CuCl<sub>2</sub> ≈ CaCl<sub>2</sub> > MgSO<sub>4</sub> > Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl. طبق اصل دافعه الکتروستاتیک، Na<sup>+</sup>

$rGO/TiO_2$  به عنوان اصلاح کننده آب دوست، تهیه کردند. عملکرد جداسازی غشاها با استفاده از محلول های  $Na_2SO_4$  و  $2000 \text{ mg/L NaCl}$  آزمایش شدند. هم چنین مقاومت در برابر گرفتگی غشاها را با استفاده از پروتئین آلبومین سرم گاوی (BSA) به عنوان یک عامل گرفتگی، مورد مطالعه قرار دادند. با افزایش غلظت  $rGO/TiO_2$ ، زبری سطح غشاها کاهش یافت؛ که علت آن پیوند هیدروژنی بین لایه پلی آمید و گروه های عملکردی  $rGO/TiO_2$  گزارش شد. هم چنین این افزایش غلظت نانوکامپوزیت  $rGO/TiO_2$  در لایه فعال TFC، باعث کاهش زاویه تماس شد و این موضوع آب دوستی بهتر غشای TFN را نسبت به غشای TFC تایید کرد. کاهش در زاویه تماس غشاهای TFN را مربوط به حضور گروه های عملکردی اکسیژن دار و آب دوستی گرافن اکساید و  $TiO_2$  و نانوکامپوزیت  $rGO/TiO_2$  دانستند. شار آب غشای  $0/005$  درصد وزنی  $rGO/TiO_2/NF$  در مقایسه با غشاهای  $0/005$  درصد وزنی  $TiO_2/NF$  و  $0/005$  درصد وزنی  $GO/NF$ ، بالاتر بود که عملکرد عالی نانوکامپوزیت ترکیبی  $rGO/TiO_2$  را نشان داد. به علت شارژ منفی غشاهای حاوی گرافن اکساید، انتظار داشتند که غشاهای حاوی  $rGO/TiO_2$  عملکرد دفع نمک بالاتری نشان دهند. غشای TFN با بار منفی پس دهی قابل توجهی برای یون چند ظرفیتی  $SO_4^{2-}$  ( $> 90\%$ ) از خود نشان داد. غشای  $0/005$  درصد وزنی  $rGO/TiO_2/NF$  حداکثر مقدار پس دهی نمک را ارائه داد. آزمایش های ضد گرفتگی BSA برای ارزیابی میل پروتئین برای تجمع روی سطح غشاهای NF آماده شده، انجام شد. همه غشاها مقدار نسبتاً کمی پروتئین جذب کردند. درصد جذب با افزایش غلظت نانوکامپوزیت  $rGO/TiO_2$  کاهش یافت. علت این جذب پایین غشاهای TFN، می تواند مربوط به آب دوستی بالای این غشاها در مقایسه با غشای NF خالص باشد که این موضوع با اندازه گیری زاویه تماس تایید شد. علاوه بر آب دوستی، عواملی مانند زبری سطح و بار نیز بر جذب پروتئین بر روی غشا نیز تاثیر دارند. این محققین مشاهده کردند که غشای NF خالص و اولیه پس از حدود ۱۰۰ دقیقه فیلتراسیون BSA کاهش شار نسبتاً شدیدی را دارد که نشان دهنده گرایش رسوب پذیری بالای آن است. این میزان از دست دادن شار در غشای اصلاح شده کاهش یافت و در نتیجه مقاومت در برابر گرفتگی آن ها را تایید کرد. در نهایت، نتایج نشان داد که شار آب و پس دهی نمک در غشای TFN-NF حاوی مقدار بهینه نانوکامپوزیت  $rGO/TiO_2$  ( $0/005$  درصد وزنی) بیشتر از غشاهای NF تجاری و TFN گزارش شده است.

کاهش یافت. با افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله های کربنی اصلاح شده، زاویه تماس از  $67/7$  درجه برای غشای حالت پایه و اصلاح نشده به  $51/6$  درجه کم شد. علت این افزایش در آب دوستی، وجود گروه های قطبی مانند آمین در TETA-MWCNTs گزارش شد. ایجاد پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب و گروه های عملکردی MWCNT ها، آب دوستی غشاهای ساخته شده را افزایش داده؛ هم چنین باعث افزایش نفوذ پذیری نیز شدند. نفوذ پذیری در غشای حاوی  $0/25$  درصد وزنی TETA-MWCNT به بالاترین مقدار خود رسید و افزودن مقادیر بیشتر با مسدود کردن منافذ غشا باعث کاهش شار شد. علت این که شار آب از  $61/9 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$  برای غشای PVC حالت پایه به  $107/9 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$  برای غشای TETA-MWCNT/PVC با  $0/25$  درصد وزنی رسید، افزایش آب دوستی سطح غشا و ساختار متخلخل تر غشا، گزارش شد. با افزایش مقدار نانولوله های کربنی اصلاح شده، شار به دلیل انسداد منافذ غشا با این مقدار اضافی و کاهش تخلخل، کم شد. همه غشاهای اصلاح شده درصد بازبایی شار بهتر و خواص ضد رسوب بهتری را در مقایسه با غشای PVC خالص، از خود نشان دادند. برای ارزیابی عملکرد ضد رسوب غشاهای NF ساخته شده محلول آلبومین سرم گاوی (BSA) در غلظت  $250 \text{ mg/L}$  استفاده شد. مشاهده شد که غشای NF اصلاح نشده، کمترین شار و کمترین پس دهی را برای BSA و غشای حاوی  $0/25$  درصد وزنی MWCNT اصلاح شده بیشترین شار را از خود نشان داد. هم چنین نتایج درباره پس دهی رنگ به وضوح نشان داد که قابلیت پس دهی برای غشاهای اصلاح شده زیاد شد که به افزایش آب دوستی آن ها نسبت داده شده و در نهایت از جذب مولکول های رنگ جلوگیری کرد. نتایج نشان داد که افزودن  $0/25$  درصد وزنی TETA-MWCNTs برای دستیابی به بهترین نتایج برای فلاکس آب، فلاکس محلول BSA و پس دهی رنگ بهینه است.

### ۳-۶- اصلاح با مواد ترکیبی معدنی/کربنی

همان طور که پژوهش بر روی نانوذرات پایه کربنی و مواد معدنی ادامه دارد، پژوهش بر روی نانومواد نوین از ترکیب موادی مانند  $GO-TiO_2$ ،  $ZnO-MWCNT$  و  $ZnO-GO$  نیز در جریان است. امروزه به دلیل بحران های آب و انرژی، تقاضای زیادی برای به کار بردن نوع جدیدی از نانوذرات ترکیبی با ویژگی های تقویت شده نسبت به نانوذرات منفرد، وجود دارد (غلامی و مهدوی، ۱۳۹۹). جدول ۳ خلاصه ای از این پژوهش ها را ارائه می دهد. Safarpour et al. (2015) غشای TFN-NF را به وسیله پلیمریزاسیون سطحی بین مونومرهای PIP و TMC و

جدول ۳- نتایج پژوهش‌های اصلاح با مواد ترکیبی معدنی/کربنی

مرجع	پس‌دهی (%)	فلاکس (L/m <sup>2</sup> .h)	زاویه تماس (°)	غشای مطلوب	روش اصلاح	هدف	نوع پلیمر
Safarpour et al. (2015)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =93/57% (2000 ppm) NaCl=36.61% (2000 ppm)	60.6	52.9	0.005 درصد وزنی rGO/TiO <sub>2</sub>	اصلاح سطح	بهبود عملکرد جداسازی و ضد رسوب غشای TFN-NF	پلی سولفون
Abadikhah et al. (2019)	Dye retention=98% (0.5 gr/L) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =96% (1 gr/L) CaCl <sub>2</sub> =76% NaCl=55.57%	52	-	MTFN-2 (0.2 درصد وزنی rGO/TiO <sub>2</sub> /Ag)	اصلاح سطح	بررسی عملکرد نمک‌زدایی، حفظ رنگ و خواص ضد باکتری	پلی آمید
Xu et al. (2020)	MgCl <sub>2</sub> =6% MgSO <sub>4</sub> =4.4% NaCl=3.3% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =2.5% Crystal Violet(CV)=99.9% Eriochrome black T(ET)=99/9% Safranin T(ST)=96% Alizarin yellow GG(AG)=89.4% (100 ppm)	41.6	17.5	GDP <sub>1</sub> P <sub>2</sub> -0.6	اصلاح سطح	بررسی تاثیر بارگذاری (dopamine DTiO <sub>2</sub> modified (TiO <sub>2</sub> بر نفوذ، پس‌دهی رنگ‌ها و نمک‌ها	پلی اتر ایمید
Pang et al. (2019)	88/51% (HA=50 mg/L)	44	58.7	PES 3 ZnO=0.5 درصد وزنی (MWCNT=0.5 درصد وزنی)	Mix matrix membrane	ارزیابی عملکرد و خواص ضد رسوب PES ترکیب شده با ZnO, MWCNT	پلی اتر سولفون

ویژگی‌های آب‌دوستی عالی در غشای MTFN-2 (21 °) ثبت شد. در واقع قرار دادن نانوذرات TiO<sub>2</sub> و Ag در ورق‌های گرافن اکساید، آب‌دوستی بالا و خواص ضد رسوب را فراهم کرد. ترکیب نانوذرات باعث افزایش نفوذپذیری و پس‌دهی غشای TFN مقایسه با غشای TFC شد. هم‌چنین با ترکیب rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag شار آب افزایش یافت. بالاترین مقدار حذف نمک (> 95%) برای محلول خوراک Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> گزارش شد و پس‌دهی CaCl<sub>2</sub> در MTFN-2 بالاترین مقدار ۷۶٪ گزارش شد. این مقدار پس‌دهی کمتر در CaCl<sub>2</sub> نسبت به Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> مربوط به شعاع یونی کمتر Cl<sup>-</sup> است. خواص آنتی‌باکتریال در غشاهای مختلف TFC, G-TFN, MTFN (GO = 0005) درصد وزنی و MTFN مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، میزان زنده ماندن باکتری (Escherichia coli) را تا ۶۶/۹٪ کاهش داد. با این حال، غشاهای اصلاح شده مبتنی بر گرافن فعالیت ضد باکتریایی بسیار بهتری در مقایسه با تک گرافن نشان دادند. در واقع، فعالیت آنتی میکروبی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن اصلاح شده با TiO<sub>2</sub> و Ag در غلظت‌های مختلف نانوکامپوزیت‌ها همراه با کاهش سلول‌های

در پژوهشی دیگر، (Abadikhah et al. (2019) عملکرد نمک‌زدایی، حفظ رنگ و خواص ضد باکتریایی غشای TFN ساخته شده توسط ترکیب جدید نانوکامپوزیت rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag بر روی لایه فعال پلی‌آمید را بررسی کردند. خواص فیزیکوشیمیایی و عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون MTFN پس از ترکیب با غلظت‌های مختلف rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag مورد بررسی قرار گرفت. زبری سطح غشای MTFN-1 (۰/۵ درصد وزنی rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag) با R<sub>a</sub> = 72.3 nm زبرتر از غشای TFC با R<sub>a</sub> = 45.1 nm بود و دلیل آن تشکیل ساختار برگ مانند با وجود ترکیب rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag گزارش شد. این قله‌ها و دره‌ها در MTFN-2 (۰/۲ درصد وزنی) و MTFN-3 (۰/۴ درصد وزنی) بیشتر شد. سطوح زبرتر به پوشش سطح غشا با ساختارهای برگ مانند و تجمع نانوذرات نسبت داده شد. اندازه‌گیری زاویه تماس آب، آب‌دوستی سطح غشا را تایید کرد. شکل‌گیری لایه فعال PA روی بستر PES باعث کاهش زاویه تماس از 93 ° (برای لایه PES) به 46 ° برای غشای اصلاح شده شد. زاویه تماس غشاهای MTFN کمتر از 30 ° بود که مزایای ترکیب نانوکامپوزیت‌ها در غشاهای TFN را نشان می‌دهد.

بالاتر است. در طول فرایند NF پس‌دهی  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  نسبتاً کم است (2/1%-3/2%) درحالی‌که برای رنگ ET زیاد و ثابت است (99/9%-99/4%). توضیح این مقدار کاهش حفظ رنگ، قطبی شدن غلظت رنگ بر روی سطح غشا است که باعث نفوذ مولکول‌های رنگ از طریق غشا می‌شود. لازم به ذکر است که غلظت رنگ هم‌چنین انتقال  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  را با جلوگیری از تماس بین نمک و PEI تضعیف می‌کند. به‌طور خلاصه، غشاهای کامپوزیت GO/DTiO<sub>2</sub>-PDA-PEI، به‌خصوص غشای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 توانایی زیادی برای کاربرد در تصفیه رنگ نشان دادند.

Pang et al. (2019) اثر اضافه کردن روی اکسید (ZnO) و نانولوله کربنی چند جداره (MWCNT) در غشای PES را با نسبت‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج، غشای مخلوط با نانوپرکننده در مقایسه با غشای اصلاح نشده ضخیم‌تر بود که با افزودن MWCNT ضخامت کمی کاهش پیدا کرد. زبری سطح در نسبت MWCNT کم و نسبت ZnO بالا (PES 1) به‌دلیل تجمع ZnO بر روی سطح غشا و افزایش تبادل حلال و غیر حلال بالا گزارش شد. درحالی‌که با افزایش نسبت MWCNT ویسکوزیته محلول بالا رفت و تبادل حلال و غیرحلال به تاخیر افتاد. در نهایت، چنین شرایطی سطح غشا را صاف‌تر کرد. زاویه تماس غشای اصلاح شده نیز کمتر از غشای اصلاح نشده بود که علت آن آبدوست بودن سطح غشای اصلاح شده گزارش شد. پس از افزودن ZnO، زاویه تماس به‌دلیل آبدوستی نانوذرات ZnO و کمک به پخش آب، مقداری کاهش یافت. هنگامی‌که بخشی یا تمام پر شونده با MWCNT جایگزین شد، آبدوستی غشا بهبود پیدا کرد و زاویه تماس کمتر شد که ناشی از زبری سطح کمتر است. مشخص شد که یک سطح آبدوست‌تر توانایی بیشتری در دفع مواد آب‌گریز مانند اسید هیومیک، BSA و روغن دارد. افزودن ZnO و MWCNT زمانی که نسبت نانولوله کربنی 0.8 درصد وزنی و نسبت روی اکسید 0.2 درصد وزنی باشد، باعث بهبود فلاکس آب مقطر به‌دلیل افزایش تخلخل غشا، اندازه منافذ و آبدوستی شد. از نظر شار نفوذ HA، روند تقریباً مشابه فلاکس آب مقطر است. این موضوع توسط شار HA غشای PES 1 در مقایسه با PES 0 ثابت شد. با افزودن MWCNT، شار آب به‌میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرد و هم‌چنین افزودن ZnO و MWCNT باعث افزایش شار HA تا ۵ برابر شد؛ که به‌دلیل افزایش اندازه منافذ، تخلخل و آبدوستی غشا بود. بهبود این عوامل باعث کاهش مقاومت انتقال آب در سراسر غشا شد. کاهش شار ناشی از جذب HA روی MWCNT که بر روی سطح غشا یافت شد، باعث تشکیل کیک یا انسداد منافذ شد. کاهش شار

زنده ارائه شد؛ به‌صورتی که در ۰/۵، ۰/۲ و ۰/۴ درصد وزنی از rGO/TiO<sub>2</sub>/Ag این مقدار به‌ترتیب به ۰/۸/۶، ۰/۲/۲ و ۰/۰ رسید. در نتیجه تمام غشاهای نانوکامپوزیت اصلاح شده دارای فعالیت آنتی‌باکتریالی بالایی بودند.

در پژوهش بعدی، Xu et al. (2020) از غشای نانوفیلتراسیون کامپوزیتی GO/DTiO<sub>2</sub>-PDA-PEI استفاده کردند. به‌منظور تجزیه و تحلیل عملکرد غشاهای کامپوزیت GO/DTiO<sub>2</sub>-PDA-PEI، نفوذ و پس‌دهی غشاهای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6، GDP<sub>1</sub>-0.6، GDP<sub>2</sub>-0.6 و GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 مورد بررسی قرار گرفتند. (D = G = GO). (P<sub>2</sub> = PEI و P<sub>1</sub> = PDA، DTiO<sub>2</sub>). اندازه‌گیری زاویه تماس آب به‌منظور ارزیابی آبدوستی سطح غشاهای کامپوزیت انجام شد؛ که غشای اصلاح نشده بالاترین زاویه تماس (۴۶/۸ درجه) را نشان داد. با افزودن DTiO<sub>2</sub> آبدوست، این مقدار به ۳۳/۶ درجه رسید که تاثیر گروه آبدوست -OH و -NH<sub>2</sub> سطح غشاهای GD-0.6 را نشان داد. زاویه تماس غشای GDP<sub>1</sub>-0.6 اصلاح شده با PDA، به ۳۶/۹ درجه افزایش پیدا کرد؛ که مربوط به ذرات PDA روی سطح غشا یا کاهش گروه‌های هیدروکسیل و اپوکسی ناشی از اتصال -NH<sub>2</sub> به صفحات پایه، گزارش شد. در نهایت در مورد غشای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 زاویه تماس به ۱۷/۵ درجه رسید که نشان‌دهنده شدت آبدوستی ناشی از پیوند PEI است. کمترین نفوذپذیری (۳/۲ L/m<sup>2</sup>.h.bar) و بیشترین حذف نمک (۶۱/۹ تا ۴۱/۱٪) برای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 گزارش شد؛ که به نانوصفحات بسیار متراکم گرافن اکساید نسبت داده شد. در مقایسه با GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6، پراکندگی DTiO<sub>2</sub> نفوذپذیری را افزایش داده (۴۱/۲ L/m<sup>2</sup>.h.bar) و حذف نمک‌ها را کاهش داد. علاوه بر این، غشای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 رنگ‌های مختلف را تقریباً کامل حذف کرد که می‌تواند به اثر ترکیبی برهمکنش‌های Donnan و الکتروستاتیک نسبت داده شود. برای بهینه‌سازی نفوذ آب، پس‌دهی رنگ‌ها و نمک‌ها در غشای نانوفیلتراسیون GO/DTiO<sub>2</sub>-PDA-PEI، عملکرد بارگذاری DTiO<sub>2</sub> را بررسی کردند. با افزودن DTiO<sub>2</sub>، نفوذ غشاها از ۱۲/۳ L/m<sup>2</sup>.h.bar برای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.2 به ۷۵/۵ L/m<sup>2</sup>.h.bar برای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-1 رسید. پس‌دهی نمک‌ها و رنگ‌ها با افزودن DTiO<sub>2</sub>، مطابق با اثر متقابل غشای NF، کاهش یافت. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بار غشاهای کامپوزیت سهم زیادی در عملکرد رنگ‌ها دارد؛ به‌طوری‌که رنگ‌های مثبت (CV,ST) را می‌توان به‌راحتی با دفع بار گروه‌های آمینه GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6 در مقایسه با غشاهای GDP<sub>1</sub>-0.6 با بار منفی حذف کرد. در عملکرد بلندمدت غشای GDP<sub>1</sub>P<sub>2</sub>-0.6، با گذشت زمان نفوذپذیری آب کمی کاهش یافته که احتمالاً به‌دلیل تجمع رنگ در غلظت‌های

تیتانیوم"، پژوهش نفت، ۲۹(۹۸-۶)، ۱۰۸-۱۱۹.  
 پرویزیان، ف.، سعدی، س.، حسینی، س.م.، و بنده علی، س.،  
 (۱۳۹۹)، "مطالعه و بررسی تأثیر نانو ذرات روی اکسید بر  
 بهبود عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه PVDF/PES"،  
 پژوهش نفت، ۳۰(۹۹-۲)، ۱۱۳-۱۲۶.  
 فریدی، ا.، و سروری، م.، (۱۳۹۴)، "تصفیه آب با استفاده از غشای  
 پلیمری نانوفیلتراسیون"، فناوری نانو، ۱۴(۲۱۵)، ۲۷-۳۶.  
 صرافزاده، م.ح.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی فنی و اقتصادی روش‌های  
 نمک‌زدایی از آب دریا با در نظر گرفتن ویژگی‌های بومی در  
 نقاط مختلف دنیا"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۱)،  
 ۲۸-۳۷.

رودسری، ل.پ.، هراتیان، پ.، وندی، س.س.، گانی، س.ل.، و  
 بوستانی، ا.، (۱۳۹۱)، "کاربرد فیلتراسیون غشایی در صنعت  
 ماء‌الشعیر"، فصلنامه علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۷(۵)،  
 ۸۸۶-۸۷۷.

عشقی پور، ر.، مقدسی، ع.، حسینی، س.م.، و باقری پور، ا.، (۱۳۹۴)،  
 "بررسی تأثیر نانوذرات اکسید روی بر خواص فیزیکی و  
 عملکرد جداسازی غشای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی وینیل  
 کلراید"، نشریه علمی فرآیند نو، ۱۱(۵۵)، ۵-۱۶.  
 غلامی، ن.، و مهدوی، ح.، (۱۳۹۹)، "مروری بر غشاهای نانوصافش  
 بستر مختلط بر پایه پلی سولفون و پلی اترسولفون/ نانوذرات  
 کربنی"، پژوهش‌های کاربردی در شیمی، ۱۴(۴)، ۱-۲۴.  
 قنوتی نسب، ع.، و ابراهیمی، م.، (۱۳۹۵)، "مطالعه‌ای مروری بر  
 غشا و بررسی انواع فرایندهای جداسازی غشایی"، سومین  
 کنفرانس سراسری نوآوری‌های اخیر در شیمی و مهندسی  
 شیمی، تهران.

کتابی، م.، و دهقانی، ا.، (۱۳۹۵)، "مروری بر روش‌های نوین  
 اصلاح سطح غشاهای پلیمری برای کاهش رسوب  
 بیوکلوئیدی"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس  
 بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم شیمی و مهندسی  
 شیمی و سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی  
 پژوهش‌های کاربردی در زیست‌شناسی، تهران.

مرادی، س.، مقدسی، ع.، و بنده علی، س.، (۱۳۹۹)، "اصلاح  
 غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی‌اترسولفون PES توسط  
 افزودن نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با سورفاکتانت  
 سدیم‌سیترات"، نشریه علوم و مهندسی جداسازی، ۱۲(۲)،  
 ۱-۱۷.

مقدسی، ع.، پور، ا.ب.، حسینی، س.، و پرویزیان، ف.، (۱۳۹۸)،  
 "اصلاح سطح غشای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی اتر سولفون

پس از آزمایش با استفاده از محلول HA به‌طور قابل توجهی در  
 FRR منعکس شد. مقدار FRR بالا در PES 3 به دلیل رسوب HA  
 تشکیل شده بر روی سطح غشا بود که می‌توان آن را شستشو داد.  
 همچنین غشاهای حاوی ZnO خواص ضد باکتریایی قابل توجهی  
 را نشان دادند که به موجب آن باکتری‌های کمتری روی غشا  
 چسبیده بودند. زاویه تماس آب در غشای PES با نسبت مساوی  
 از ZnO و MWCNT (PES 3) پایین بود که نشان دهنده خواص  
 غشای PES و آب‌دوستی بیشتر سطح غشا است. همچنین غشای  
 PES 3 با نسبت بازیابی شار بالاتر، خواص ضد رسوب موثری را  
 نشان داد.

## ۷- نتیجه گیری

در حال حاضر، گرفتگی غشا بزرگترین وچالش برانگیزترین مانع  
 در اجرای فرایندهای غشایی است و به‌مقدار زیادی عملکرد و عمر  
 غشا را کاهش و هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. با بررسی  
 مقاله‌های علمی، مشاهده می‌شود نانوفیلتراسیون (NF) که یکی  
 از فرایندهای برپایه فشار است برای کنترل گرفتگی به‌کمک  
 غشاهای اصلاح شده پرداخته و همچنین از غشاهای NF برای  
 تصفیه آب و پساب و آلاینده‌های مختلف مانند رنگ، یون‌های  
 فلزی سنگین ( $Zn^{2+}$  و  $Cu^{2+}$ ) و نمک‌زدایی استفاده می‌شود. امروزه  
 علاوه بر استفاده از نانومواد معدنی ( $ZnO$ ،  $TiO_2$  و  $FeO$ ) و نانومواد  
 کربنی (GO و MWCNT) در اصلاح غشا، از ترکیب مواد معدنی  
 و کربنی نیز استفاده می‌شود که مزایای زیادی دارد؛ از جمله باعث  
 بهبود در آب‌دوستی سطح غشا، خواص ضد رسوب و ضد باکتری  
 می‌شوند. در نهایت، استفاده از روش‌های نوین و جدید در  
 فرایندهای غشایی برای بهبود ویژگی‌های غشا یک امر لازم و  
 ضروری است.

## ۸- مراجع

اسداله فردی، ا.، غ.، موسوی، س.ز.، و موسوی، س.م.، (۱۳۹۶)،  
 "مروری بر دستاوردهای اخیر در زمینه ساخت غشای  
 نانوفیلتراسیون در تصفیه آب"، دومین کنفرانس ملی  
 یافته‌های نوین پژوهشی و آموزشی عمران معماری شهرسازی  
 و محیط‌زیست ایران، تهران.

بنده علی، س.، مقدسی، ع.، پرویزیان، ف.، و حسینی، س.،  
 (۱۳۹۸)، "بهبود عملکرد جداسازی غشاهای نانوفیلتراسیون  
 بر پایه پلی‌اترایمید توسط نانوذرات عامل‌دار دی اکسید

- Management*, 242, 90-97.
- Xu, Y., Peng, G., Liao, J., Shen, J., and Gao, C., (2020), "Preparation of molecular selective GO/DTiO<sub>2</sub>-PDA-PEI composite nanofiltration membrane for highly pure dye separation", *Journal of Membrane Science*, 601, 117727.
- Zarrabi, H., Yekavalangi, M. E., Vatanpour, V., Shockravi, A., and Safarpour, M., (2016), "Improvement in desalination performance of thin film nanocomposite nanofiltration membrane using amine-functionalized multiwalled carbon nanotube", *Desalination*, 394, 83-90.
- Zhao, F.-Y., Ji, Y.-L., Weng, X.-D., Mi, Y.-F., Ye, C.-C., An, Q.-F., and Gao, C.-J., (2016), "High-flux positively charged nanocomposite nanofiltration membranes filled with poly (dopamine) modified multiwall carbon nanotubes" *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(10), 6693-6700.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

- با استفاده از لایه نازک پلیمری کیتوسان- نانو صفحه هایگرافن اکساید جهت کاهش گرفتگی و بهبود عملکرد غشا"، *مجله پژوهش نفت*، ۲۹(۱۰۵)، ۴۶-۶۰.
- مقدسی، ع.، نژاد، م.ا.، پرویزیان، ف.، حسینی، س.، و پور، اب.، (۱۳۹۷)، "اصلاح خواص جداسازی و ساختاری غشای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی اتر سولفون با استفاده از نانوذرات سولفونه شده اکسید سیلیس"، *مجله پژوهش نفت*، ۲۸(۱۰۰)، ۱۰۸-۱۲۲.
- نبی‌زاده مقدم، ن.، رضانیان، ن.، و ظهوری، غ.، (۱۳۹۴)، "غشاهای پلیمری و کاربرد آن در تصفیه آب"، پنجمین همایش علمی مهندسی فرآیند، پالایش و پتروشیمی، تهران. یادگاری، ف.، عبدالله‌زاده شرقی، ا.، و عدل، م.، (۱۳۹۶)، "حذف بیولوژیکی نیترات از آب آشامیدنی در سیستم هیبریدی بیوراکتور انوکسیک - بیوراکتور غشایی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۲)، ۲۴-۳۳.
- Abadikhah, H., Naderi Kalali, E., Khodi, S., Xu, X., and Agathopoulos, S., (2019), "Multifunctional thin-film nanofiltration membrane incorporated with reduced graphene oxide@ TiO<sub>2</sub>@ Ag nanocomposites for high desalination performance, dye retention, and antibacterial properties", *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(26), 23535-23545.
- Abdi, G., Alizadeh, A., Zinadini, S., and Moradi, G., (2018), "Removal of dye and heavy metal ion using a novel synthetic polyethersulfone nanofiltration membrane modified by magnetic graphene oxide/metformin hybrid" *Journal of Membrane Science*, 552(15), 326-335.
- Ji, Y., Qian, W., Yu, Y., An, Q., Liu, L., Zhou, Y., and Gao, C., (2017), "Recent developments in nanofiltration membranes based on nanomaterials", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(11), 1639-1652.
- Obotey Ezugbe, E., and Rathilal, S., (2020), "Membrane technologies in wastewater treatment: A review", *Membranes*, 10(5), 89.
- Pang, W.Y., Ahmad, A.L., and Zaulkiflee, N.D., (2019), "Antifouling and antibacterial evaluation of ZnO/MWCNT dual nanofiller polyethersulfone mixed matrix membrane", *Journal of Environmental Management*, 249, 109358.
- Safarpour, M., Vatanpour, V., Khataee, A., and Esmaeili, M., (2015), "Development of a novel high flux and fouling-resistant thin film composite nanofiltration membrane by embedding reduced graphene oxide/TiO<sub>2</sub>", *Separation and Purification Technology*, 154, 96-107.
- Vatanpour, V., and Haghghat, N., (2019), "Improvement of polyvinyl chloride nanofiltration membranes by incorporation of multiwalled carbon nanotubes modified with triethylenetetramine to use in treatment of dye wastewater", *Journal of Environmental*