

## تهیه آزمایشگاهی غشای نانوفیلتراسیون ارتقا یافته متشکل از سلولز استات بوتیرات / نانوذرات مکسین برای حذف رنگ و نمک از آب

امیرحسین دشت بزرگ، احسان سلجوقی\*، سید محمود موسوی، شیرین کیانی، حامد کارخانه چی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۴۰۰

دریافت پس از اصلاح: ۵ اردیبهشت ۱۴۰۱

پذیرش نهایی: ۲۴ خرداد ۱۴۰۱

کلمات کلیدی:

غشا

نانوفیلتراسیون

سلولز استات بوتیرات

مکسین

### چکیده

در این پژوهش برای اولین بار نانوفیلترهای متشکل از پلیمر سلولز استات بوتیرات و نانوذرات مکسین ساخته شده و برای حذف رنگ و نمک از آب مورد استفاده قرار گرفتند. به این منظور ابتدا نانوذرات مکسین از پیش ماده‌ی  $Ti_3AlC_2$  سنتز شده و وجود ساختار لایه‌ای و نیز ایجاد گروه عاملی  $-OH$  در آنها به اثبات رسید. سپس نانوفیلترهای سلولز استات بوتیرات در غلظت‌های ۰ تا ۰.۴٪ وزنی از نانوذره ساخته شده و ارزیابی‌های مختلفی در خصوص آنها به انجام رسید. نتایج حاصله حاکی از افزایش تخلخل، کاهش زاویه تماس آب، افزایش شار آب و نیز ارتقای نسبت بازیابی شار غشاها با افزایش غلظت نانوذرات بود. همچنین با افزودن مکسین به پلیمر و افزایش غلظت آن تا ۰.۳٪ وزنی، ویژگی‌های مکانیکی، شامل استحکام کششی، مدول الاستیک و افزایش طول در نقطه شکست افزایش یافتند در حالی که افزایش بیش‌تر در غلظت نانوذره، افت این ویژگی‌ها را به دنبال داشت. در تمامی غشاها و تا سطح ۳ درصد وزنی از نانوذرات، میزان دفع رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی و نیز نمک دو ظرفیتی، بالای ۹۰٪ بود.

حقوق ناشر محفوظ است.

\* عهده دار مکاتبات

saljoughi@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

آب به عنوان یکی از اصلی ترین نیازهای بشر شناخته می شود. امروزه با رشد صنعت، افزایش تولید کارخانه ها و در نتیجه ایجاد فاضلاب های بیش تر توسط آن ها، آلودگی آب های زیر زمینی، دریاچه ها و سایر منابع آبی رو به افزایش است. از طرفی روز به روز مشکل کمبود آب در کره ی زمین ملموس تر شده و به یک دغدغه و معضل جهانی تبدیل شده است. امروزه روش های مختلفی به منظور تصفیه ی آب به کار گرفته می شوند که فناوری غشایی از جمله پرکاربردترین آنها می باشد [۱].

فناوری جداسازی غشایی نسبت به فرآیندهای معمول و رایج جداسازی، دارای برتری های فراوانی می باشد. به عنوان مثال، به علت عدم تغییر فاز در اکثر زیرمجموعه های این فناوری و نیز قابلیت انجام جداسازی در دماهای پایین توسط آنها، مصرف انرژی در فناوری غشایی پایین است. از طرفی این فناوری از توانایی جداسازی مواد حساس به دما در صنایع دارویی، بیوفناوری و غذایی برخوردار می باشد. بالا بودن نرخ انتقال جرم، سهولت در افزایش مقیاس، زیست سازگاری و نیز هزینه های کم تعمیر و نگهداری از دیگر مزایای جداسازی توسط غشاها می باشند. این محاسن موجب شده اند که فرآیندهای غشایی به عنوان جایگزینی مناسب برای فرآیندهای قدیمی همچون تقطیر، تبخیر، استخراج و ... مطرح شوند [۲]. شواهد حاکی از آن است که نانوفیلتراسیون (NF) به عنوان یکی از اصلی ترین و مهم ترین فرآیندهای غشایی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. غشاهای نانوفیلتراسیون در ابتدا در صنایع غذایی و به منظور جداسازی لاکتوز از نمک های تک ظرفیتی موجود در آب پنیر (whey) مورد استفاده قرار می گرفتند، اما به تدریج با افزایش انواع غشاهای ساخته شده، در تصفیه ی آب و پساب نیز از آن ها استفاده شد. با وجود کاربردهای قابل توجه غشاهای نانوفیلتراسیون، می توان به معایب و محدودیتهایی نظیر شار کم و گرفتگی زیاد آنها نسبت به غشاهای اولترافیلتراسیون (UF) و نیز انتخاب پذیری کمترشان در مقایسه با غشاهای اسمز معکوس (RO) اشاره کرد. برای رفع این نقایص امروزه از افزودن نانوذرات آبدوست به غشاها استفاده می شود که در نتیجه، شار و انتخاب پذیری غشاها افزایش یافته و تمایلشان به گرفتگی کاهش می یابد [۳].

در سال ۲۰۱۱ دسته ای جدید از نانوذرات دوبعدی، موسوم به نانوذرات کاربید فلزی یا مکسین (MXene)، کشف و سنتز شدند که از خواص منحصر بفردی مانند پایداری قابل

توجه، سطح ویژه بالا و رسانایی الکتریکی/گرمایی بسیار زیادی برخوردار بودند [۴]. این مواد که ۲۰ ترکیب مختلف از آن ها به مرور توسط پژوهشگران ارائه شده اند، به دلیل دارا بودن گروههای مختلف شامل هیدروکسیل (-OH)، اکسیژن (-O)، فلوئور (-F) و ... که در حین سنتز ایجاد می شوند، محدوده وسیعی از خواص آبدوستی تا آبگریزی را فراهم می کنند [۵]. به طور خلاصه می توان گفت که مکسین ها از قابلیت جداسازی کاتیون های مختلف برخوردار می باشند. نوع آبدوست این مواد مولکول های آب را در بین لایه های خود پذیرا بوده و بنابراین شار بسیار بالایی برای آب عبوری حاصل می کنند. غشاهای مکسینی برای کاتیون هایی که شعاع هیدراسیون بزرگ تری نسبت به فاصله بین لایه های مکسین دارند ناتراوا هستند و بنابراین می توانند میزان دفع زیادی را در مواجهه با انواع کاتیون های فلزی و رنگ های کاتیونی با اندازه های مختلف از خود نشان دهند.

استفاده از صفحات نانومتری مکسینی به عنوان غشای لایه ی نازک بر روی پایه از جنس PVDF و مقایسه خواص و عملکرد آن با غشای اکسید گرافن توسط چانگ و همکارانش [۶] به انجام رسید. طی این پژوهش میزان دفع یون های مختلف شامل پتاسیم، سدیم و لیتیم، به عنوان یون های تک ظرفیتی، نیکل، کلسیم و منیزیم به عنوان یون های دو ظرفیتی و همچنین آلومینیوم به عنوان یون سه ظرفیتی توسط غشاهای مورد اشاره اندازه گیری شدند. نتایج حاصله حاکی از آن بود که غشای مکسینی در مقایسه با غشای اکسید گرافن انتخاب پذیری بهتری نسبت به کاتیون های فلزی حاصل می کند که این مساله با افزایش میزان بار کاتیونها تشدید می شد.

کاربرد دیگر غشاهای حاوی مکسین، توسط شیائولی و همکارانش [۷] در نانوفیلتراسیون مقاوم به حلال (SRNF) مورد بررسی قرار گرفت. موضوع حائز اهمیت، برقراری تعادل بین شار و درصد دفع توسط غشاها بود. نانوذرات مکسین - که حاوی گروه عاملی -OH - بودند به عنوان نانوپرکن در شبکه غشای آبدوست پلی اترایمید (PEI) و نیز غشای آبگریز پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که با استفاده از نانوذرات یاد شده، شار برای غشاهای PEI و PDMS به ترتیب تا ۳۰٪ و ۱۶۰٪ افزایش می یابد. طی پژوهشی که توسط هان و همکارانش [۸] به انجام رسید، لایه ای از مکسین توسط عملیات فیلتراسیون بر روی غشای اولترافیلتراسیون پلی اتر سولفونی نشانده شد. نتایج نشان داد که در اثر لایه نشانی مورد اشاره، شار کاهش و میزان آبدوستی و نیز دفع رنگ و نمکهای دو ظرفیتی افزایش می یابند.

غشای بهینه به میزان  $60^\circ$  گزارش شد که نشان دهنده مقاومت خوب آن در برابر گرفتگی می‌باشد.

در پژوهشی دیگر، الفاهل و همکارانش [۱۴] به تولید غشاهای اسمز مستقیم (FO) متشکل از سلولز استات/مکسین مبادرت ورزیده و عملکرد آنها را در آب‌گیری از پساب فاضلاب تصفیه شده با استفاده از آب دریا به عنوان محلول کشنده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مقادیر شار و مقاومت در برابر گرفتگی در خصوص غشای حاوی ۸٪ وزنی نانوذرات مکسین در مقایسه با غشای تجاری موجود بسیار بیشتر بودند.

عباسی و همکارانش [۱۵] نیز در سال ۲۰۲۱ به ساخت غشای زیست تخریب پذیر متشکل از پلیمر پلی کاپرولاکتون (PCL) و نانوذرات مکسین مبادرت ورزیده و آن در حذف رنگ از آب مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که افزودن ۴ درصد وزنی از نانوذرات مکسین به ایجاد حداکثر آبدوستی منجر شده و شاری معادل ۴ برابر شار مربوط به غشای خالص را حاصل می‌کند. افزایش زیست تخریب پذیری و استحکام مکانیکی از دیگر محاسن حضور نانوذرات مکسین در کنار PCL بودند. اما با این حال، میزان دفع رنگ در حضور این نانوذره با اندکی کاهش همراه بود.

با توجه به پژوهشهایی که در بالا مورد بررسی قرار گرفتند، تاثیر بسزای نانوذرات مکسین بر ارتقای خواص و عملکرد غشاهای پلیمری بویژه آبدوستی، شار و استحکام مکانیکی آنها مشخص گردید. بنابراین به نظر می‌رسد که این نانوذره مستعد استفاده هر چه بیشتر در فناوری غشایی بوده و می‌توان با بهره گیری از آن، غشاهای ارتقا یافته از جنسهای مختلف را تولید کرد. از طرفی آبدوستی، قیمت نسبتاً پایین و قابلیت ساخت غشا با انواع روشهای رایج، به عنوان مزیت‌های مهم برای پلیمر سلولز استات بوتیرات مطرح هستند.

قیمت پایین پلیمر، اقتصاد فرآیند را به طور مستقیم تحت تاثیر قرار داده و آبدوستی اولیه آن موجب بهتر هر چه بیشتر شدن خاصیت ضد گرفتگی در اثر حضور نانوذرات مکسین می‌شود. این در حالی است که استحکام مکانیکی کم به عنوان یک نقص مهم برای پلیمر سلولز استات بوتیرات محسوب می‌گردد. بنابراین استفاده از مکسین به منظور بهبود بیشتر در خاصیت آبدوستی و ارتقای استحکام مکانیکی غشاهای حاصل از پلیمر سلولز استات بوتیرات در دستور کار قرار گرفت. در واقع هدف از این پژوهش، سنتز نانوذرات کاربرد تیتانیوم و تهیه غشاهای نانوکامپوزیت از جنس سلولز استات بوتیرات و سپس استفاده از

در سال ۲۰۲۲، دشت بزرگ و همکارانش [۹] به ساخت نانوفیلترهای متشکل از پلی سولفون/مکسین مبادرت ورزیده و آن‌ها را جهت جداسازی رنگ و نمک‌ها از آب مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که حضور مکسین باعث افزایش مواردی مانند تخلخل، آبدوستی و خواص مکانیکی غشاها شده و انتخاب‌پذیری آنها را نیز ارتقا می‌دهد. حضور ۴ درصد وزنی از نانوذرات مکسین در کنار پلی سولفون به افزایش ۴ برابری شار منجر شده و تمایل غشا به گرفتگی را به میزان تقریبی ۷۰ درصد کاهش داد.

در دیگر پژوهش انجام شده در سال ۲۰۲۲، لی و همکارانش [۱۰] غشای ترکیبی پلی وینیل الکل و مکسین را ساخته و جهت ارتقای خواص و عملکرد الیاف موجود در تبخیرکننده خورشیدی مورد استفاده قرار دادند. در نتیجه این کار، شار و آبدوستی الیاف حاصله به میزان قابل توجهی ارتقا یافتند. به دنبال این رخداد، نرخ تبخیر آب تا میزان  $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$  <sup>۱</sup> افزایش یافت که از تاثیر بسزایی بر افزایش بازده سیستم برخوردار بود.

در سال ۲۰۲۱، ژو و همکارانش [۱۱] غشاهای نانوکامپوزیت پلی سولفونی حاوی نانوذرات مکسین را سنتز کردند. در این غشاها میزان دفع نمک  $Na_2SO_4$  تا ۹۷/۶٪ افزایش یافته و مقدار شار عبوری در قیاس با غشای خالص به میزان ۷۰ درصد بیشتر شد.

در پژوهشی دیگر، ژانگ و همکارانش [۱۲] با استفاده از آمینوتری پروپیل اتوکسی سیلان (APTES) به ارتقاء نانوذرات مکسین مبادرت ورزیدند. ایشان به منظور کنترل فاصله بین لایه‌های مکسین از نانولوله های کربنی عاملدار شده آمینی استفاده نموده و غشاهای نانوکامپوزیت حاصله را برای جداسازی مخلوط آب و روغن مورد استفاده قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از آبدوستی مناسب و عملکرد مطلوب غشای تولیدی در جداسازی آب و روغن بود بطوریکه مقدار جداسازی روغن‌های روان کننده و گیاهی بالای ۹۹٪ گزارش شد. همچنین مقدار شار در غشای بهینه‌ی حاوی نانوذره افزایش ۶ برابری داشته و خواص ضد گرفتگی آن نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته بود.

پاندی و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۲۰ غشاهای نانوکامپوزیتی را با استفاده از نانوذرات مکسین ساخته و آنها را در جداسازی رنگها مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که میزان دفع رنگهای رودامین B و متیل سبز به ترتیب ۹۲٪ و ۹۸٪ می‌باشد. همچنین مقدار زاویه تماس آب برای

و  $327/3 \text{ g/mol}$  بودند نیز تهیه شده و در عملیات نانوفیلتراسیون مورد استفاده قرار گرفتند

## ۲-۲- سنتز نانوذرات مکسین

با هدف سنتز نانوذرات مکسین، در ابتدا  $0/5$  گرم از پودر ماده ی اولیه  $Ti_3AlC_2$  در  $50$  میلی لیتر از محلول  $30\%$  وزنی هیدروفلوئوریک اسید (HF) ریخته شده و سپس به مدت  $10$  ساعت در دمای اتاق بر روی یک همزن مغناطیسی، هم زده شد [۱۶]. در ادامه لایه ی نقره ای رنگ ایجاد شده بر سطح محلول به آرامی تخلیه شد. با این کار اتم های Al از پیش ماده جدا شدند. در ادامه ذرات جامد موجود در محلول با استفاده از کاغذ صافی از آن جدا شدند. سپس پودر خیس تولیدی چندین بار توسط آب دیونیزه شست و شو داده شد. هدف از این مرحله، عامل دار کردن  $Ti_3C_2$  با گروه عاملی  $-OH$  می باشد.

سپس ماده تولید شده به مدت  $25$  دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت  $5000 \text{ rpm}$  قرار گرفت. با این کار مواد جامد تا حد زیادی از آب جدا می شوند. پس از سانتریفیوژ، سیال بالایی تخلیه شده و باقی مانده در ظرفی دیگر ریخته شد و به مدت  $18$  ساعت تحت شرایط خلاء در دمای  $90$  درجه سلسیوس خشک شد. سپس پودر مکسین تولیدی در  $80$  میلی لیتر DMSO ریخته شده و به مدت  $24$  ساعت هم زده شد. در این مرحله درشت مولکول های دی متیل سولفوکساید با قرار گرفتن در بین صفحات مکسین باعث جدایش این صفحات از یکدیگر می شوند تا ساختار لایه لایه ی بهتری را شکل دهند.

در ادامه مجدداً محلول حاصله به مدت  $25$  دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت  $5000 \text{ rpm}$  قرار گرفت که در نتیجه ی آن، حلال DMSO جدا شد. سپس صفحات در هم آمیخته ی مکسینی در آب هوازداپی شده ریخته شدند تا بار دیگر در معرض مولکول های آب قرار گرفته و بیش ترین مقدار عامل دار شدن بوسیله  $-OH$  حاصل گردد. در ادامه، نمونه ی تولید شده به مدت  $8$  ساعت در محیط آرگون، همزده شد. هدف از این بخش، جدایش بیش تر صفحات مکسین می باشد. سپس مخلوط مکسین - آب حاصله به مدت  $4$  ساعت و با سرعت  $1000$  دور در دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفت و پس از اتمام عملیات، فاز سیال بالای ذرات جامد جدا گردیده و دور ریخته شد.

## ۲-۳- سنتز نانوذرات مکسین

آنها در حذف رنگ و املاح از آب می باشد که برای اولین بار در سطح جهان به انجام رسیده است. زمینه ی اصلی این پژوهش تلفیقی از فناوری نانو، مسائل زیست محیطی و غشاها می باشد. نکته ی مهم این است که دو حوزه ی پرکاربرد و نوین یعنی فناوری نانو و مسائل زیست محیطی به صورت همزمان در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش از پلیمر سلولز استات بوتیرات با نام اختصاری CAB و جرم مولی  $65000 \text{ g/mol}$  که ساخت شرکت سیگما می باشد، جهت ساخت غشاها استفاده شد. n-متیل-۲-پیرولیدون (NMP) از شرکت مرک (Merck) آلمان خریداری شده و به عنوان حلال برای ساخت غشاها مورد استفاده قرار گرفت. فرارایت اندک و امتزاج پذیری بالا با آب از ویژگی های مهم این حلال جهت ساخت غشاها ی پلیمری می باشد. همچنین توانایی بالای این حلال در پراکنده کردن نانوذرات مکسین در خود، از دیگر ویژگی های آن می باشد. آلومینیوم تیتانیوم کاربید با فرمول شیمیایی  $Ti_3AlC_2$  و خلوص  $99\%$  از شرکت بیجینگ چین تهیه شده و به عنوان پیش ماده برای ساخت صفحات مکسین مورد استفاده قرار گرفت. دی متیل سولفوکساید با نام اختصاری DMSO از شرکت مرک آلمان خریداری شده و به عنوان حلال درشت مولکول برای ایجاد فاصله بین صفحات مکسین مورد استفاده قرار گرفت.

هیدروفلوئوریک اسید با علامت اختصاری HF - که یک اسید بسیار خورنده بوده و قابلیت امتزاج بالایی با آب دارد- از شرکت مرک آلمان خریداری شده و در فرآیند بیرون کشیدن آلومینیوم از پیش ماده، مورد استفاده قرار گرفت. سرم آلومین گاو ی با نام اختصاری BSA که متوسط جرم مولکولی آن برابر  $66/5 \text{ kDa}$  می باشد، از شرکت اویتک بایو (Avitech Bio) خریداری شده و در ارزیابی تمایل غشاها به گرفتگی مورد استفاده قرار گرفت. دو نمک کلرید سدیم (NaCl) و سولفات منیزیم  $7$  آبه ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) به منظور ارزیابی عملکرد غشاها ی سنتز شده در حین عملیات فیلتراسیون مورد استفاده قرار گرفتند. کلرید سدیم به صورت بلورهای سفید رنگ و با وزن مولکولی  $58/44 \text{ g/mol}$ ، از شرکت مجللی ایران تهیه شد. سولفات منیزیم به صورت بلورهای سفید رنگ و با وزن مولکولی  $246/48 \text{ g/mol}$  از شرکت مرک آلمان خریداری شد. دو رنگ متیلن آبی و متیل نارنجی که به ترتیب دارای جرم مولی  $319/8$

ساعت به محلول زمان داده شد تا حباب زدایی به صورت کامل انجام شود. در ادامه با استفاده از فیلم کش که ضخامت آن بر روی ۲۰۰ μm تنظیم شده بود، ریخته گری محلول همگن حاصله بر روی شیشه به انجام رسید. سپس شیشه ای که لایه نازک بر روی آن ایجاد شده بود بلافاصله درون حمام آب با دمای ۳۰ °C قرار گرفت و بعد از گذشت دقایقی با خروج حلال از درون فیلم در حال ترسیب و همزمان، ورود آب از نقاط متعدد موجود بر سطح فیلم به درون آن، حفرات شکل گرفته و غشا حاصل گردید. غشاها پس از ۲۵ دقیقه به حمام آب تازه منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت درون آن باقی ماندند. سپس غشاهای حاصله در دمای محیط قرار گرفتند تا خشک شوند.

به منظور بررسی تأثیر نانوذرات مکسین بر عملکرد غشاهای پلیمری، از پلیمر CAB برای ساخت غشاها استفاده شد و نانوذرات فوق با غلظت های ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ وزنی (نسبت به وزن پلیمر) به محلول ساخت غشا اضافه گردیدند (جدول (۱)). به این منظور ابتدا مقدار مورد نظر از نانوذرات مکسین به همراه افزودنی حفره زای PEG 400، به حلال NMP اضافه شدند. محلول حاصله به مدت ۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۴۰ KHz و دمای ۳۰ °C قرار گرفته و سپس، وزن مشخصی از پلیمر به ویال حاوی حلال، نانوذرات و پلی اتیلن گلایکول اضافه شد.

در ادامه ویال مربوطه به مدت ۱۲ ساعت بر روی همزن مغناطیسی و در دمای محیط قرار گرفت تا پلیمر به طور کامل در حلال حل شود. سپس مگنت از درون ویال خارج شده و ۲

جدول (۱) مشخصات ترکیب محلول های پلیمری جهت ساخت غشاها

نام غشا	پلیمر مربوطه	غلظت پلیمر (درصد وزنی)	غلظت حلال (درصد وزنی)	غلظت PEG (درصد وزنی)	غلظت نانوذره (درصد وزنی نسبت به پلیمر)
CAB0	سلولز استات بوتیرات	۱۶	۸۳	۱	۰
CAB1			۸۲/۸۶		۱
CAB2			۸۲/۷۲		۲
CAB3			۸۲/۵۸		۳
CAB4			۸۲/۴۴		۴

در این پژوهش قطرات آب با حجم ۳۰ μL در دمای اتاق بر روی سه نقطه از سطح غشا چکانده شده و بلافاصله تصاویر میکروسکوپی از این قطرات توسط دوربین اولیمپوس (DP71) نصب شده بر روی میکروسکوپ استریو اولیمپوس (SZH10) تهیه شد. سپس تصاویر توسط نرم افزار پردازش تصویر آنالیز شده و متوسط زاویه تماس گزارش گردید.

#### ۲-۴-۲- محاسبه ی تخلخل غشاها

یکی از روش های اندازه گیری میزان تخلخل غشا، استفاده از روش وزن سنجی یا خیساندن است. این روش یک تکنیک نسبتاً ساده در تعیین میزان تخلخل غشا محسوب شده و با استفاده از آن می توان درصد تخلخل هر نمونه غشایی را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نمود [۱۷]:

$$\varepsilon (\%) = \frac{W_w - W_d}{\rho \cdot A \cdot \delta} \times 100 \quad (2)$$

#### ۲-۴-۱- سنتز نانوذرات مکسین

به منظور بررسی مورفولوژی سطح مقطع غشاهای ساخته شده و همچنین ساختار نانوذرات مکسین سنتز شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO1450VP ساخت شرکت Zeiss آلمان استفاده شد. برای بررسی ساختار شیمیایی مکسین و حصول اطمینان از عاملدار شدن آن بوسیله گروه عاملی OH- یک غشای عاری از نانوذره و یک غشای حاوی نانوذره تحت آنالیز ATR - FTIR قرار گرفتند. به این منظور از دستگاه طیف سنج مدل Thermo Nicolet (Nicolet 370) مجهز به ATR افقی (ZnSe, 45°) استفاده گردید و طیف ارتعاشی نمونه ها در محدوده طول موج ۴۰۰-۱۴۰۰ cm<sup>-1</sup> اندازه گیری شد.

جهت بررسی تأثیر نانوذرات مکسین بر آبدوستی غشاهای سنتز شده از آزمون اندازه گیری زاویه تماس آب استفاده گردید.

میزان کارایی غشاهای سنتز شده در فیلتراسیون محلول-های حاوی رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی و نیز نمک های  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgSO}_4$  توسط اندازه گیری شار تراوه و میزان دفع صورت گرفت. خوراک های مورد بررسی شامل غلظت های  $100 \text{ ppm}$  برای رنگ ها،  $9000 \text{ ppm}$  برای  $\text{NaCl}$  و  $4000 \text{ ppm}$  برای  $\text{MgSO}_4$  بودند. برای این منظور، خوراک در فشار  $6 \text{ bar}$  تحت عملیات فیلتراسیون قرار گرفت. پس از  $5$  ساعت، شار عبوری برای خوراک‌های مورد نظر به تعادل رسیده و مقدار ثابتی را در بازه های زمانی مختلف از خود نشان داد. در این مرحله غلظت خوراک و تراوه اندازه گیری شدند. در ادامه برای محاسبه ی میزان دفع از رابطه (۴) استفاده گردید:

$$R (\%) = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \times 100 \quad (4)$$

در خصوص محلول‌های نمکی، غلظت آنها با استفاده از اندازه گیری TDS خوراک و تراوه عبوری از غشا به انجام رسید. به این منظور دستگاه Extech مدل EC400 مورد استفاده قرار گرفت. غلظت رنگها نیز به وسیله ی دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SP-UV 300SRB - که ساخت کشور آلمان بود- اندازه گیری شدند.

علاوه بر انجام آنالیز زاویه تماس آب که معیاری برای تعیین آبدوستی غشاهای می‌باشد، آزمون ارزیابی تمایل به گرفتگی نیز برای غشاهای سنتز شده به انجام رسید. جهت ارزیابی میزان تمایل غشاهای به گرفتگی، از فیلتراسیون محلول پروتئینی استاندارد حاوی BSA استفاده گردید. بدین صورت که ابتدا سیستم فیلتراسیون برای غشای مورد نظر با استفاده از خوراک حاوی آب مقطر در فشار  $6 \text{ bar}$  راه‌اندازی شده و پس از رسیدن به شرایط پایدار، شار تراوه اندازه‌گیری شد ( $J_{w1}$ ).

در ادامه محلول همگن حاوی پروتئین BSA با غلظت  $1000 \text{ mg/L}$  در ظرف خوراک ریخته شده و به مدت  $2$  ساعت تحت فشار  $6 \text{ bar}$  در سیستم فیلتراسیون به گردش درآمد. در قدم بعد، سیستم فیلتراسیون که اکنون غشای دارای گرفتگی ناشی از رسوب پروتئین را در بر داشت، توسط آب مقطر شست و شو داده شد. سپس عملیات فیلتراسیون مجدداً به وسیله آب مقطر در فشار  $6 \text{ bar}$  به انجام رسید و شار آب عبوری پس از رسیدن به شرایط پایدار ثبت شد ( $J_{w2}$ ). در نهایت، نسبت بازیابی شار که شاخصی برای بیان میزان تمایل غشا به گرفتگی می‌باشد، از رابطه (۵) محاسبه گردید [۱۸]:

$$FRR(\%) = \frac{J_{w2}}{J_{w1}} \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه  $Wd$  و  $Ww$  به ترتیب بیانگر وزن‌های خیس و خشک غشاهای (پس از قرارگیری  $48$  ساعته در آون با دمای  $50^\circ\text{C}$  و سپس ماندگاری  $12$  ساعته در آون خلأ با همان دمای  $50^\circ\text{C}$ ) می‌باشند.  $\delta$ ،  $A$  و  $\rho$  نیز به ترتیب بیانگر ضخامت غشاهای در حالت خیس، سطح غشاهای و نیز چگالی آب می‌باشند.

### ۳-۴-۲- ارزیابی استحکام مکانیکی

برای سنجش و مقایسه ویژگی‌های مکانیکی غشاهای آزمون کشش استفاده شد. این آزمون به وسیله دستگاه SANTAM مدل STM-20 ساخت کره جنوبی و بر اساس استاندارد ASTM-D822 به انجام رسید. در این آنالیز برای کاهش خطا و حصول به جواب قابل اطمینان، از هر غشا سه نمونه با اندازه ی  $1 \times 7 \text{ cm}^2$  برش داده شد که پس از قرارگیری در دستگاه با سرعت  $12/5 \text{ mm/min}$ ، تحت کشش قرار گرفتند. در پایان، میانگین داده‌های به دست آمده برای هر نمونه، به عنوان نتیجه‌ی نهایی گزارش شد.

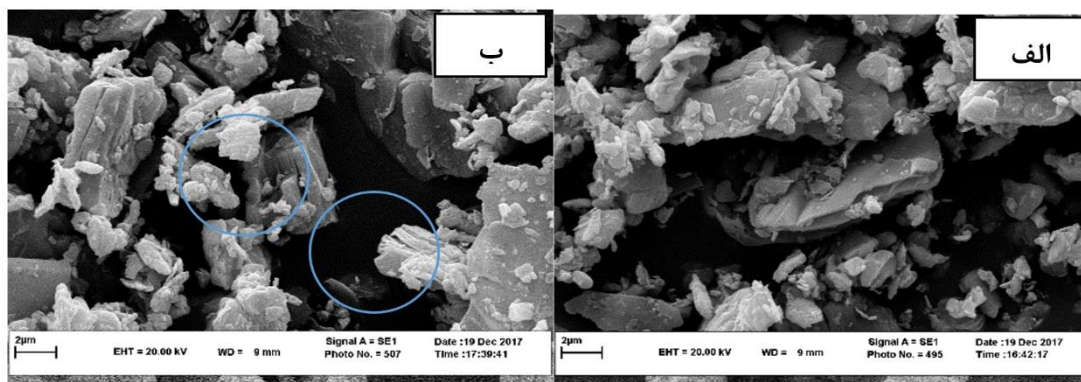
### ۳-۴-۳- آزمایش‌های عملکردی

جهت انجام آزمایش‌های عملکردی از یک سیستم فیلتراسیون غشایی استفاده گردید. با استفاده از این سیستم شار آب خالص، توانایی غشاهای در جداسازی نمک‌ها و رنگ‌ها و همچنین میزان تمایل آنها به گرفتگی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای اندازه گیری شار و تراوایی آب خالص، ابتدا غشا به صورت دایره ای برش داده شده و درون مدول غشایی قرار گرفت. پس از راه‌اندازی سیستم فیلتراسیون، آب مقطر درون ظرف خوراک قرار گرفته و دستگاه روشن شد. سپس با بستن تدریجی شیر موجود در مسیر خروجی ناتراوه، فشار به آرامی افزایش یافته و به عدد  $6 \text{ bar}$  رسید. در ادامه حجم تراوه عبوری از غشا در بازه‌های زمانی معین اندازه‌گیری شد. این نمونه‌گیری مادامی که در سه بازه زمانی متوالی تغییر محسوسی در حجم جمع‌آوری شده مشاهده نگردید، ادامه داشت. پس از رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار و ثابت ماندن حجم تراوه ی عبوری با زمان، از رابطه (۲) برای محاسبه شار آب خالص مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]:

$$PWF (L/m^2 \cdot h) = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

همچنین، شاخص تراوایی آب خالص به صورت مقدار شار آب خالص به ازای اختلاف فشار اعمال شده تعریف می‌شود. این شاخص که برای تعیین نوع غشا استفاده می‌گردد به صورت رابطه (۳) محاسبه گردید [۱۷]:

$$Permeance (L/m^2 \cdot h \cdot bar) = \frac{PWF}{\Delta p} \quad (3)$$



شکل (۱) تصاویر SEM مربوط به الف) پیش ماده  $Ti_3AlC_2$  و ب) صفحات سنتز شده مکسین

گفت که تمامی غشاهای ساخته شده در این پژوهش از ساختاری نامتقارن شامل لایه ی نازک، متراکم و انتخابگر فوقانی و نیز لایه ی متخلخل زیرین تشکیل شده اند.

با توجه به شکل (۳) که بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر را نشان می دهد و نیز شکل (۴) که نمایانگر بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر از تصاویر SEM است، با حضور و افزایش غلظت نانوذرات، تعداد حفرات موجود در برش عرضی و همچنین نظم ساختاری غشاها بیش تر شده است که این افزایش در نظم ساختاری به ویژه در غشای حاوی ۳٪ وزنی از نانوذره کاملاً مشهود می باشد. به طور کلی در این غشا افزایش در تعداد حفرات و کشیدگی عمودی آن ها نیز کاملاً محسوس است. همچنین در غشای CAB حاوی ۴٪ وزنی نانوذره نیز افزایش بسیار زیاد تخلخل و بزرگ شدن حفرات در قیاس با غشاهای پیشین بارز است.

با توجه به مطالب فوق می توان این گونه جمع بندی کرد که به طور کلی حضور نانوذرات مکسین به افزایش ضخامت و تخلخل غشاها منجر شده و همچنین نظم ساختاری آن ها را افزایش داده است. پیش از این، موارد مشابه دیگری نیز در خصوص تأثیر نانوذرات آبدوست بر ساختار غشاهای پلیمری گزارش شده اند. به عنوان مثال رضایی و همکارانش [۲۲] با افزودن نانوذرات اکسید گرافن به غشای پلی سولفونی، آرسنات را از محلول آبی حاوی آن جدا کردند. نتایج پژوهش آن ها حاکی از افزایش کلی ضخامت غشاها با افزایش غلظت نانوذرات اکسید گرافن بود. همچنین نتایج حاصل از آنالیز SEM پژوهشگران مورد اشاره حاکی از آن بود که تخلخل غشاها با افزایش غلظت اکسید گرافن بیشتر می شود. همان طور که اشاره شد، افزایش تخلخل و نظم غشاها را می توان به افزودن نانوذره ی مکسین - با خاصیت ضد حلالی - به محلول پلیمری نسبت داد.

هرچه مقدار نسبت بازیابی شار برای یک نمونه غشایی بالاتر باشد، تمایل آن به گرفتگی کمتر است.

### ۳-۱- ارزیابی نتایج و تحلیل یافته ها

#### ۳-۱- مورفولوژی مکسین

تصاویر SEM از پیش ماده و نانوذرات سنتز شده در شکل (۱) ارائه شده اند. همان طور که در تصاویر مشهود است لایه های مکسین در پیش ماده، به هم چسبیده بوده و فاصله ای بین آن ها وجود ندارد. این پیوستگی ناشی از حضور اتم Al و وجود نیروهای بین اتمی در لایه های مکسین می باشد. اما همان طور که مشاهده می شود پس از سنتز مکسین از پیش ماده، یعنی پس از بیرون کشیدن اتم های Al از بین صفحات، ساختاری لایه لایه در آن ها ایجاد شده است [۷،۸].

#### ۳-۲- ساختار شیمیایی مکسین

به منظور اثبات ایجاد گروه OH- در مکسین، آنالیز ATR-FTIR بر روی غشای خالص و غشای حاوی مکسین به انجام رسید. طیف حاصله در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که در غشای خالص اثری از حضور گروه عاملی OH- وجود ندارد. این در حالی است که در غشای حاوی نانوذرات مکسین، وجود پیک در محدوده ی  $3310\text{ cm}^{-1}$  نشان از حضور پیوند با گروه عاملی OH- دارد [۱۹،۲۰،۲۱].

#### ۳-۳- مورفولوژی غشاها

تصاویر SEM سطح مقطع غشاهای CAB در شکل های (۳) و (۴) مشاهده می شوند. با توجه به تصاویر SEM می توان

سطح پخش شده و زاویه تماس کمتری حاصل می گردد [۲۴]. به طور کلی ارتقای آبدوستی با هدف کاهش ایجاد رسوب و ممانعت از گرفتگی غشا در حین جداسازی محلول های آبی صورت می گیرد. خاصیت آبدوستی غشا موجب خیس شدن آن در مواجهه با محلول های آبی گردیده و به عبارت دیگر، لایه ای نازک از آب در همان لحظات اولیه ی تماس غشا با خوراک بر سطح حفرات آن شکل می گیرد. وجود این لایه تا حد زیادی از تماس مستقیم و سایش ذرات معلق موجود در محلول آبی با غشا ممانعت به عمل آورده و در نتیجه، فرآیند گرفتگی و رسوب گذاری را به تأخیر می اندازد [۱۸].

نتایج حاصل از اندازه گیری زاویه تماس آب با غشاهای سنتز شده در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهدات حاکی از آن است که با افزودن نانوذرات، زاویه تماس آب به میزان چشم گیری کاهش می یابد که علت آن وجود گروه عاملی OH- در مکسین است که تمایل مولکول های آب به غشا را افزایش داده و در نتیجه، موجب افزایش آبدوستی می شود. همان طور که مشاهده می شود در غشاهای سنتز شده، بیش ترین میزان آبدوستی زمانی اتفاق می افتد که نانوذرات به میزان ۴٪ به غشا افزوده شده اند. در این حالت زاویه تماس از  $52/7^\circ$  (غشای خالص) به  $33/9^\circ$  (غشای ترکیبی) کاهش می یابد.

منظور از خاصیت ضد حلالی این است که نانو ذرات در عین آبدوستی، امتزاج پذیری کمی با پلیمر داشته و در نتیجه با افزودن نانوذره به محلول، فرآیند ترسیب و نهایتاً شکل گیری غشا به نفوذ آب کمتری احتیاج دارد. پس می توان گفت که در این حالت زمان مورد نیاز جهت تشکیل غشا کمتر شده و در نتیجه، محصولی با ضخامت و تخلخل بیش تر حاصل خواهد شد. طبق یک اصل کلی هرچه فرآیند ترسیب طولانی تر باشد، ضخامت لایه ی پلیمری بیش تر کاهش یافته و در نتیجه، جرم پلیمر موجود در واحد حجم آن افزایش می یابد و این بدان معنی است که غشای نهایی از تخلخل کمتری برخوردار خواهد بود [۲۳].

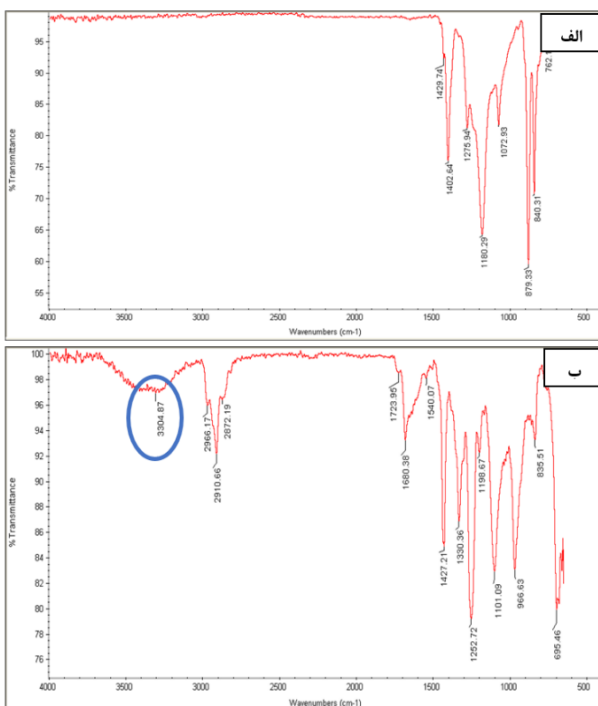
در واقع نانوذرات به دلیل امتزاج پذیری ضعیف با پلیمر، ناپایداری ترمودینامیکی فیلم غوطه ور شده را تشدید کرده و در نتیجه می توانند فرآیند جدا شدن فازها و شکل گیری غشا را تسهیل و تسریع کنند [۲۳]. از طرفی آبدوستی نانوذرات مکسین باعث می شود که نقاط حضور این افزودنی بر سطح لایه ی پلیمری غوطه ور شده به درون حمام انعقاد مورد هجوم و نفوذ آب قرار گرفته و در نتیجه، تبادل حلال با ضدحلال (آب) سریع تر انجام شود. نتیجه ی این امر، افزایش سرعت شکل گیری غشا و بنابراین ایجاد ساختاری با ضخامت و تخلخل بیش تر می باشد.

#### ۳-۴- تخلخل غشاها

نتایج حاصل از اندازه گیری تخلخل غشاهای تهیه شده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده اند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش غلظت نانوذرات مکسین از ۰ به ۴٪ وزنی، تخلخل از ۵۵٪ به ۶۵٪ افزایش می یابد. این روند تأیید کننده ی تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی می باشد. به بیان دیگر با بررسی تصاویر SEM مشخص گردید که با حضور و افزایش غلظت نانوذرات مکسین، میزان تخلخل غشاها بیش تر می شود. اعداد حاصل از این بخش، تأیید کننده ی مشاهدات کیفی تصاویر مقطع غشاها می باشند.

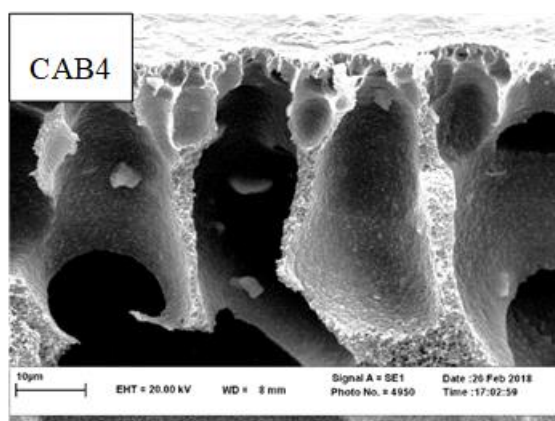
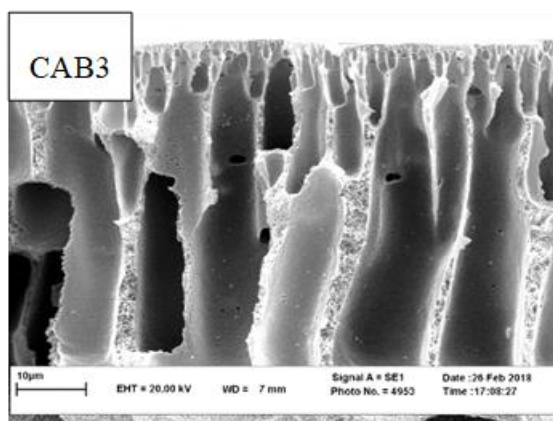
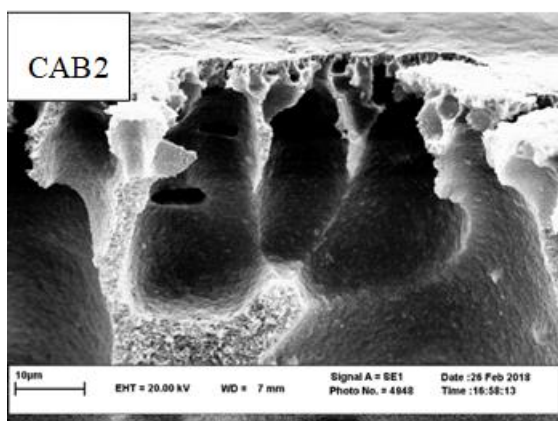
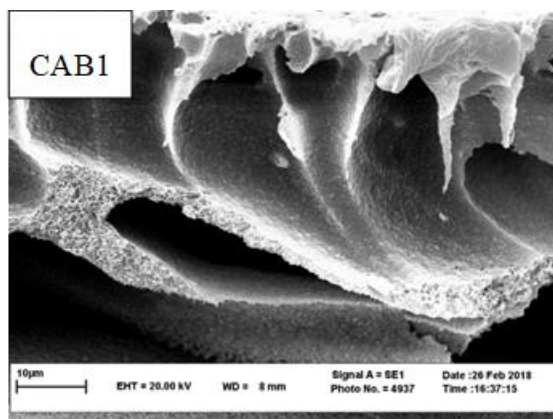
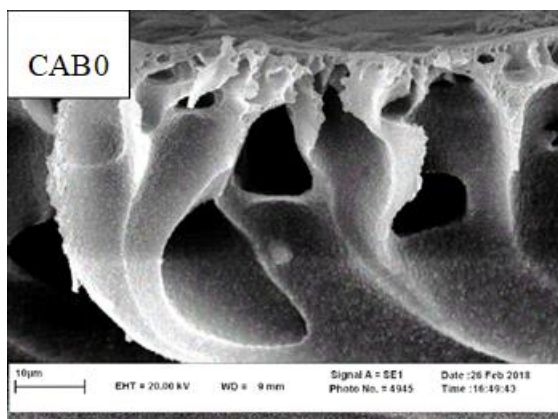
#### ۳-۵- زاویه تماس آب با غشاها

آبدوستی سطح به وسیله ی اندازه گیری زاویه تماس آن با قطرات آب تعیین می شود. زاویه تماس برای سطوح متخلخل تابعی از تخلخل و جنس غشا می باشد. برای سطوح با تخلخل زیاد، قطره ی آب در اثر فرو رفتن در حفرات به راحتی بر روی

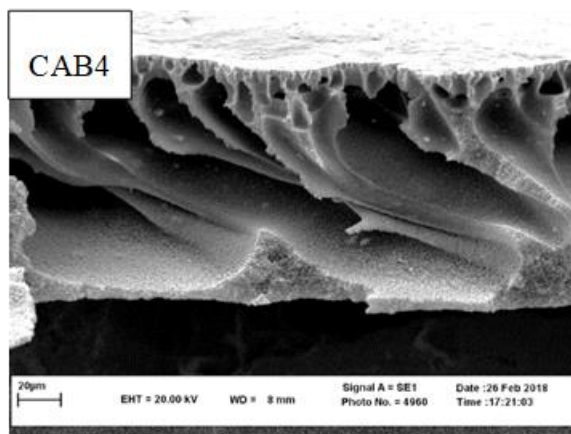
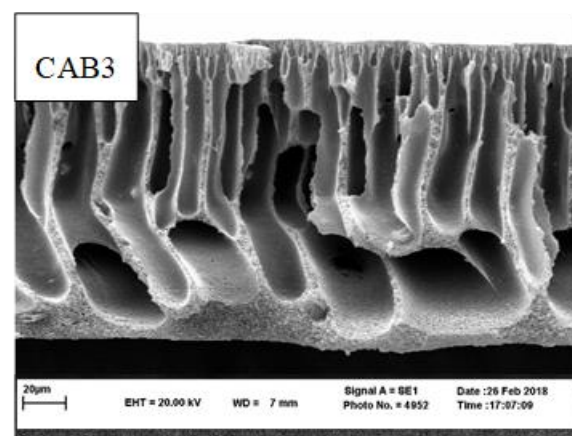
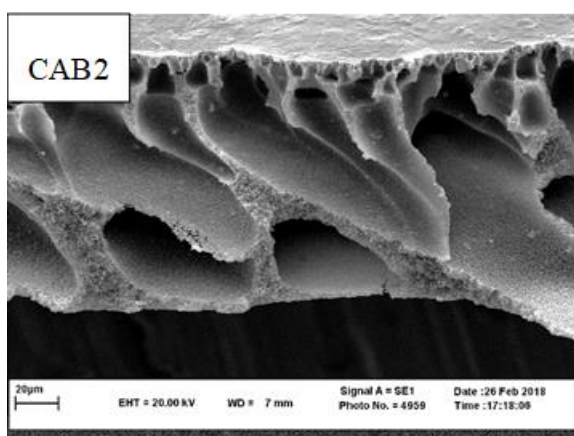
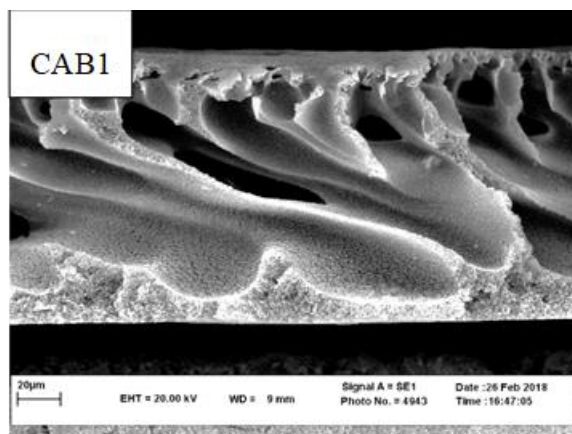
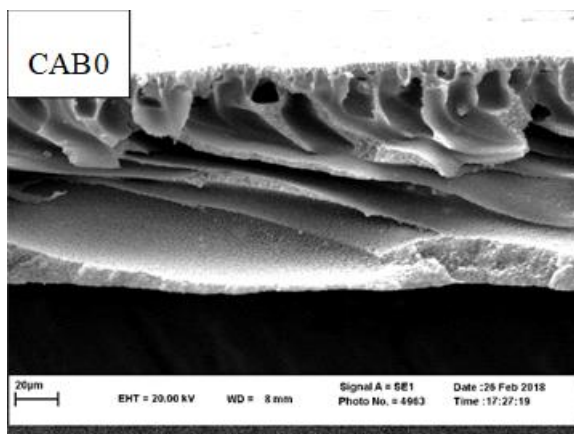


شکل (۲) نتایج حاصل از آنالیز ATR-FTIR مربوط به الف) غشای خالص ب) غشای حاوی نانوذرات MXene

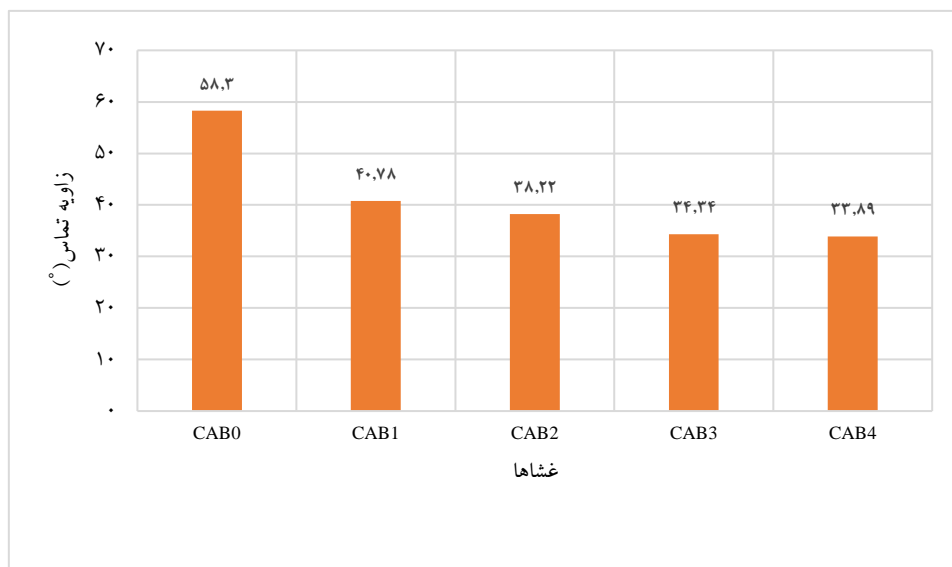




شکل (۳) تصاویر SEM حاصل از غشاهای سنتز شده با بزرگنمایی ۱۵۰۰



شکل (۴) تصاویر SEM حاصل از غشاهای سنتز شده با بزرگنمایی ۵۰۰۰



شکل (۵) نتایج حاصل از اندازه گیری زاویه تماس برای غشاهای سنتز شده در غلظت‌های مختلف نانوذره

### ۶-۳- ویژگی‌های مکانیکی غشاهای

به منظور بررسی اثر نانوذرات مکسین بر پایداری مکانیکی غشاهای ترکیبی ساخته شده، آزمایش کشش بر روی غشاهای انجام گرفت. سپس ویژگی‌های مکانیکی شامل استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست از نتایج این آزمون استخراج شدند که متوسط آنها در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به جدول (۳)، با افزودن نانوذره‌ی مکسین و افزایش غلظت آن تا ۳٪ وزنی، هر سه ویژگی مکانیکی شامل استحکام کششی، مدول الاستیک و افزایش طول در نقطه‌ی شکست به طور پیوسته افزایش یافته‌اند.

این در حالی است که افزایش غلظت مکسین به بیش از ۳٪ وزنی، افت هر سه ویژگی مکانیکی را به همراه داشته است. بنابراین می‌توان گفت که بیشترین مقادیر استحکام کششی، مدول الاستیک و افزایش طول در نقطه‌ی شکست در غلظت ۳٪ وزنی از نانوذره حاصل شده و این ۳ پارامتر به ترتیب به میزان ۷۴٪، ۳۶٪ و ۴۱٪ نسبت به غشای خالص افزایش یافته‌اند.

برای توجیه موارد فوق باید به این مطلب توجه داشت که وجود نانوذرات مکسین در ترکیب غشاهای از یکسو با توجه به استحکام کششی و مدول الاستیک بالای خود [۲۵] و از سوی دیگر به دلیل افزایشی که در نظم حفرات ایجاد می‌کنند می‌توانند ارتقای ویژگی‌های مکانیکی را به دنبال داشته باشند. از طرف دیگر، افزایش تخلخل ناشی از حضور نانوذرات مکسین می‌تواند به افت هم‌زمان هر سه ویژگی مکانیکی منجر شود. بر اساس تصاویر SEM و نیز نتایج حاصل از اندازه‌گیری تخلخل، افزودن نانوذرات مستحکم مکسین تا غلظت ۳٪ وزنی به افزایش هم‌زمان تخلخل و نظم ساختاری حفرات منجر می‌گردد که در نتیجه، افزایش استحکام مکانیکی تا این غلظت از نانوذرات منطقی و مطابق انتظار است. اما افزایش بیش‌تر در غلظت مکسین از ۳٪ به ۴٪ وزنی، افت هر سه ویژگی مکانیکی را در پی دارد که با توجه به افزایش تخلخل، بزرگ‌تر شدن حفرات و همچنین به هم ریختگی نظم ساختاری غشاهای که در غلظت بالاتر از نانوذره (۴٪) رخ می‌دهند، افت خواص مکانیکی منطقی و قابل انتظار است.

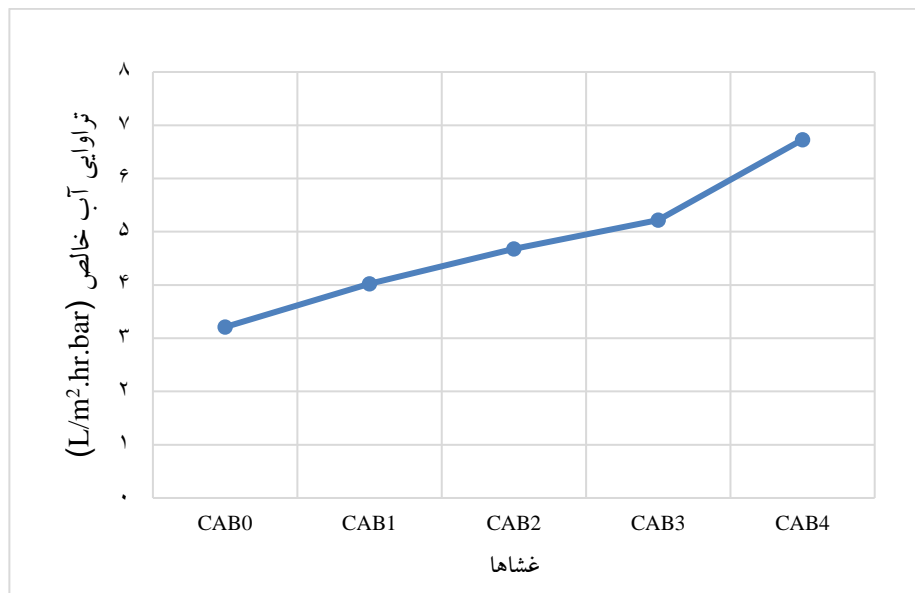
جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون استحکام کششی در خصوص غشاهای تهیه شده

نام غشا	CAB0	CAB1	CAB2	CAB3	CAB4
استحکام کششی (MPa)	۴/۲ ± ۰/۲۴	۵/۹ ± ۰/۳۶	۶/۹ ± ۰/۴۲	۷/۳ ± ۰/۲۴	۴/۸ ± ۰/۳۳
مدول الاستیک (MPa)	۱۹۴/۳۲ ± ۰/۳۷	۲۰۱ ± ۰/۴۳	۲۳۱/۴۵ ± ۰/۸۷	۲۶۴/۱۲ ± ۰/۷۵	۱۹۸/۴۴ ± ۰/۶۶
ازدیاد طول در نقطه شکست (%)	۲۷/۱۸ ± ۰/۴۱	۲۹/۷۸ ± ۰/۰۳	۳۴/۶۱ ± ۰/۷۳	۳۸/۳۴ ± ۰/۰۲	۲۷/۹۹ ± ۰/۳۲

### ۷-۳- شار آب خالص عبوری از غشاهای

نتایج حاصل از اندازه‌گیری شار آب خالص عبوری از غشاهای سنتز شده در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان طور که مشهود است، افزودن نانوذرات آبدوست مکسین همواره به افزایش شار عبوری از غشاهای منجر شده است به طوری که با افزایش غلظت مکسین از ۰ به ۴٪ وزنی، شار از ۳ به  $7 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$  افزایش یافته است.

افزایش شار در اثر حضور افزودنی مکسین را می‌توان به افزایش تخلخل و آبدوستی ناشی از حضور این نانوذره نسبت داد که پیش از این و در بخش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است که با افزایش تخلخل، مقاومت ناشی از غشا در برابر عبور جریان کمتر می‌شود. همچنین وجود عامل  $\text{OH}^-$  در نانوذرات مکسین، موجب افزایش تمایل آب به غشا شده و افزایش شار آب را در پی دارد.



شکل (۶) شار آب خالص عبوری از غشاهای سلولز استات بوتیراتی در غلظت‌های مختلف نانوذره

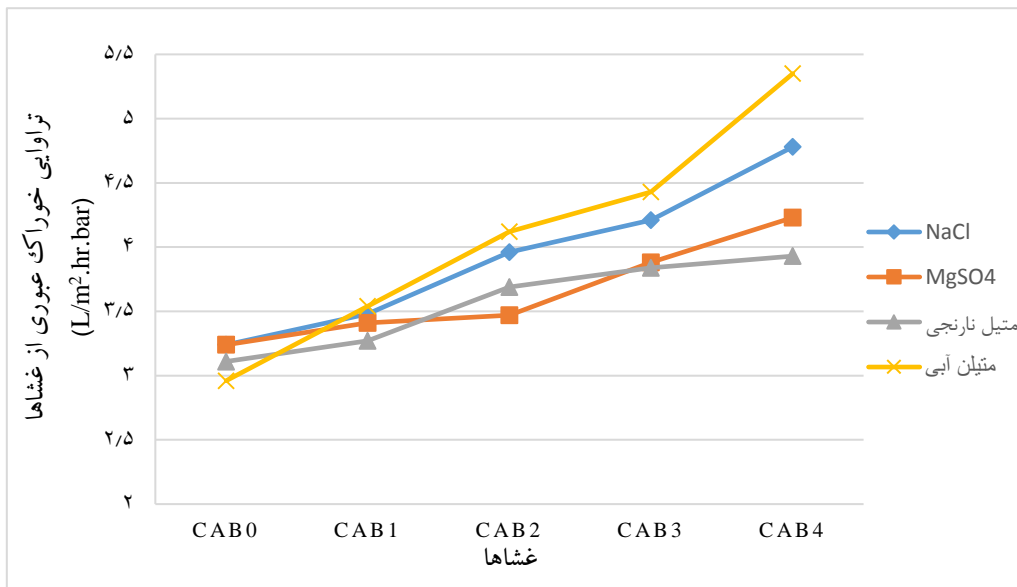
### ۸-۳- نتایج فیلتراسیون محلول‌های نمک و رنگ

در این پژوهش فیلتراسیون محلول‌های نمکی شامل  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgSO}_4$  و نیز محلول‌های رنگی شامل متیل نارنجی و متیلن آبی به انجام رسید. نتایج شار عبوری از غشاهای برای خوراک‌های مختلف حاوی نمک و رنگ در شکل (۷) آورده شده است. با توجه به منحنی‌های موجود در شکل (۷)، با افزودن نانوذرات مکسین به غشاهای ساخته شده و افزایش غلظت آنها، شار عبوری از غشاهای همواره و درخصوص تمام خوراک‌های مورد بررسی افزایش یافته است. همان طور که پیش از این نیز بیان شد، ذرات مکسین موجب افزایش تخلخل و آبدوستی غشاهای می‌شوند و بنابراین افزایش شار در خصوص آنها کاملاً منطقی و مطابق انتظار است. از طرفی مکسین دارای گروه عاملی  $\text{OH}^-$  می‌باشد که بار آن منفی است. بنابراین انتظار می‌رود خوراکی که دارای بار منفی باشد توسط غشای حاوی این نانوذرات به میزان بیش تری دفع شده و بنابراین شار کمتری

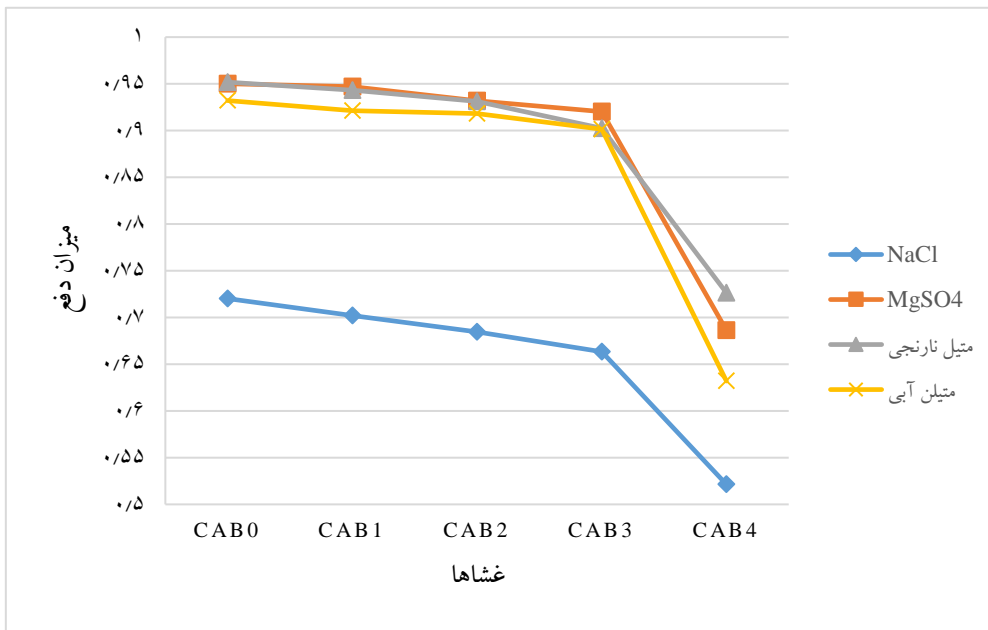
در خصوص آن حاصل گردد. همان طور که مشاهده می‌گردد شار خوراک حاوی متیلن آبی که دارای بار مثبت است با افزایش نانوذرات مکسین در محلول ریخته‌گری - که پیامد آن افزایش حضور این نانوذرات بر روی سطح و درون ساختار غشاهای حاصله می‌باشد - به میزان بیش تری در قیاس با سایر خوراک‌ها افزایش پیدا کرده است. چرا که بار منفی گروه عاملی  $\text{OH}^-$  در مکسین‌ها، جاذب این خوراک حاوی بار مثبت بوده و در نتیجه، شار بیشتری در خصوص آن حاصل می‌کند. از طرف دیگر، رنگ متیل نارنجی دارای بار منفی می‌باشد، بنابراین توسط مکسین - که دارای گروه عاملی  $\text{OH}^-$  منفی است - دفع می‌شود. به این ترتیب میزان افزایش شار برای خوراک حاوی متیل نارنجی، کمتر از متیلن آبی است. البته همان طور که گفته شد عواملی چون نزدیک شدن حفرات به سطح غشا و نیز بزرگ تر شدن اندازه آنها - که همگی ناشی از حضور نانوذرات مکسین می‌باشند - نیز به عنوان عوامل مثبت

نتایج حاصل از بررسی دفع رنگ ها و نمک ها توسط غشاها به عنوان تابعی از غلظت‌های مختلف نانوذره در شکل (۸) نمایش داده شده اند.

در بهبود شار غشا عمل کرده و موجب می شوند که حتی با وجود هم نام بودن بار خوراک با غشا، همواره در اثر افزایش غلظت مکسین، شار تراوه بیش تر شود.



شکل (۷) شار تراوه غشاهای سلولز استات بوتیرانی در خصوص خوراک های مختلف حاوی رنگ و نمک



شکل (۸) میزان دفع نمک ها و رنگ ها توسط غشاهای ساخته شده در غلظت‌های مختلف از نانوذرات

ای از رنگ بر روی آن می‌شود [۲۶،۲۷]. پس از رخ دادن پلاریزاسیون غلظتی بر سطح غشا، اختلاف غلظت حل شونده در دو طرف آن افزایش می‌یابد که این امر انتقال بیش تر حل شونده‌ها به طرف دیگر غشا را به دنبال دارد. بنابراین غلظت اجزاء در فاز عبوری از غشا بیش تر شده و در نهایت میزان دفع کاهش می‌یابد [۲۸،۲۹،۳۰].

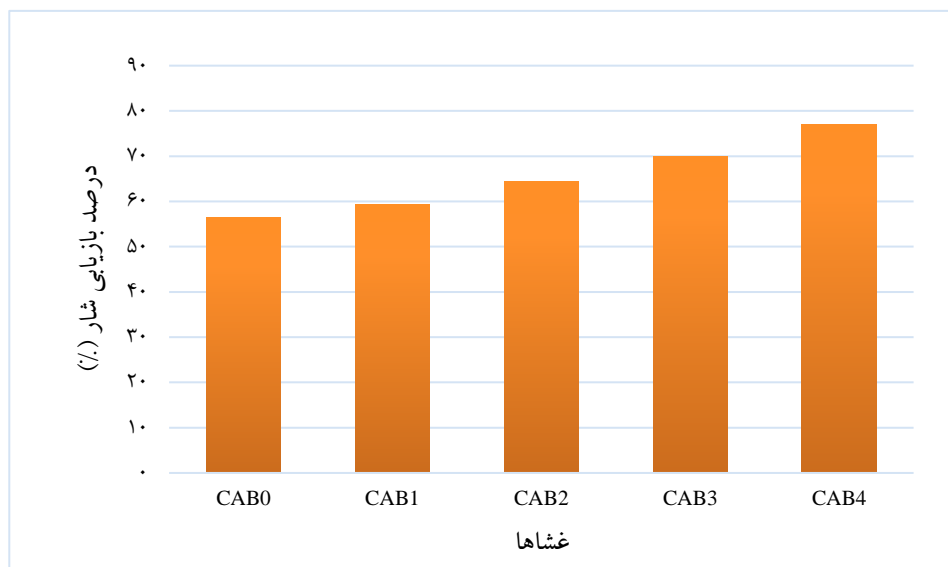
لازم به توضیح است که میزان دفع نمک تک ظرفیتی کلرید سدیم نسبت به سایر خوراک‌های مورد بررسی بسیار کمتر است که این امر حاکی از نامناسب بودن فرآیند نانوفیلتراسیون برای حذف این نمک یا مولکول‌های کوچک است. حتی مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذره، میزان دفع کلرید سدیم به مرور کاهش یافته است که ناشی از افزایش تخلخل غشا می‌باشد [۸]. باید توجه کرد که کاهش ناگهانی دفع در غلظت ۴٪ از نانوذره - که در خصوص تمامی حل شونده‌ها رخ داده است - به دلیل افزایش بیش از اندازه و ناگهانی تخلخل و اندازه حفرات می‌باشد که در تصاویر SEM نیز کاملاً مشهود بود.

### ۹-۳- نسبت بازیابی شار

به منظور بررسی مقاومت غشاها در برابر پدیده‌ی نامطلوب گرفتگی، نسبت بازیابی شار آن‌ها محاسبه شد. درصد بازیابی شار برای غشاهای سنتز شده در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت افزودنی مکسین، نسبت بازیابی شار به طور پیوسته افزایش یافته است. با افزایش غلظت نانوذرات از ۰ به ۴٪ وزنی، نسبت بازیابی شار بیش تر شده و از ۵۶/۴٪ به ۷۷/۲٪ رسیده است. علت افزایش نسبت بازیابی شار و به عبارت دیگر، افزایش مقاومت غشاها در برابر گرفتگی در اثر حضور افزودنی مکسین را بایستی در خاصیت آبدوستی این نانوذره جست و جو کرد. به عبارت دیگر آبدوستی زیاد این نانوذره به غشاهای حاصله نیز منتقل شده و به ارتقای آبدوستی آن‌ها منجر شده است. نتیجه‌ی بدیهی این امر، کاهش تمایل به پدیده‌ی نامطلوب گرفتگی می‌باشد. به طور کلی نتایج این آزمایش حاکی از افزایش مقاومت در برابر گرفتگی غشاها با افزودن نانوذرات مکسین است. بنابراین افزودن نانوذرات مکسین باعث افزایش طول عمر عملیاتی این غشاها شده و استفاده مکرر و طولانی مدت از آن‌ها را در عملیات جداسازی به دنبال دارد [۳۱]

با توجه به شکل (۸) میزان دفع رنگ‌ها و نمک دو ظرفیتی سولفات منیزیم توسط اکثریت قریب به اتفاق غشاهای سنتز شده بیش از ۹۰٪ می‌باشد که نشان از قرار گرفتن این غشاها در محدوده‌ی نانوفیلترها دارد. از طرفی همان‌طور که مشاهده می‌شود در غشاهای سنتز شده میزان دفع رنگ متیل نارنجی که درشت مولکولی با بار منفی است در قیاس با رنگ متیل آبی با بار مثبت، بیشتر می‌باشد.

به تدریج با اضافه شدن میزان نانوذره‌ی افزوده شده انتظار می‌رود که میزان دفع برای متیل نارنجی، کلرید سدیم و سولفات منیزیم افزایش یابد زیرا هرچه میزان نانوذره با گروه عاملی - OH که دارای بار منفی است، بیش تر باشد، با قدرت بیش تری می‌تواند مواد یاد شده را دفع کند. اما با این حال عوامل دیگری نیز در میزان دفع اثرگذار هستند که از مهم ترین آن‌ها می‌توان به ساختار و اندازه حفرات غشا اشاره کرد. همان‌طور که در تصاویر SEM نیز دیده شد، در غشاهای سنتز شده با افزایش غلظت نانوذره، تخلخل افزایش می‌یابد. بنابراین یکی از مهم ترین عواملی که موجب شده است میزان دفع حل شونده‌های مختلف در اثر حضور نانوذرات مکسین کاهش یابد، بیش تر شدن تخلخل غشاها و بزرگ تر شدن اندازه حفراتشان در حضور افزودنی مکسین می‌باشد. اثر افزایش تخلخل و کاهش میزان دفع، توسط رضایی و همکارانش [۲۲] در مورد غشای پلی سولفونی حاوی نانوذرات اکسید گرافن نیز بررسی شد که نتایج حاکی از کاهش میزان دفع در اثر افزایش تخلخل در غلظت‌های بالای نانوذره بود. علاوه بر این، یکی دیگر از عواملی که بر روی میزان دفع اثر گذار است، پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظتی می‌باشد. این پدیده در مورد غشاهای سنتز شده طبیعتاً باید زمانی رخ دهد که خوراک عبوری باری مخالف با بار سطحی غشا داشته باشد. با توجه به منفی بودن بار غشا، این پدیده می‌تواند در مورد خوراک حاوی رنگ متیل آبی - که دارای بار مثبت است - با احتمال بیش تری رخ دهد. مشاهده می‌شود که با وجود درشت تر بودن این رنگ نسبت به سایر حل شونده‌های مورد بررسی، میزان دفع آن در قیاس با رنگ متیل نارنجی و نمک سولفات منیزیم کمتر می‌باشد. علت این مشاهده در مرتبه اول به ناهمنام بودن بار رنگ متیل آبی با بار گروه عاملی هیدروکسید موجود در غشا مرتبط می‌باشد که خودبخود جذب به سمت غشا را تسهیل کرده و از میزان دفع می‌کاهد. از سوی دیگر، پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظتی نیز می‌تواند در خصوص رنگ متیل آبی رخ دهد که ناشی از جذب مولکول‌های مثبت آن بر روی سطح غشا (اثر دونان) بوده و منجر به تشکیل لایه



شکل (۹) نسبت بازبایی شار غشاهای سلولز استات بوتیراتی در غلظت‌های مختلف از نانوذره

### ۹-۳- مقایسه با سایر پژوهش‌ها

مقایسه میان خواص و عملکرد غشاهای حاصل از این پژوهش با سایر غشاهای نانوکامپوزیتی که در تحقیقات اخیر برای حذف نمک‌های مشابه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با استفاده از داده‌های درج شده در جدول ۴ قابل انجام است. همانطور که مشاهده می‌شود غشای سلولز استات بوتیرات تهیه شده در این پژوهش با زاویه تماس حدود ۳۴ درجه از اکثریت قریب به اتفاق سایر غشاهای آبدوست تر بوده و بنابراین از تمایل کمتری به گرفتگی در حین عملیات جداسازی برخوردار می‌باشد. البته پژوهشی که در آن غشا، متشکل از اکسید گرافن بوده و اطلاعات مربوط به آن در ردیف ۵ از جدول ۴ درج شده است، زاویه تماس بسیار کمی در حدود ۱۷ درجه را حاصل کرده است. اما با این حال همان‌طور که مشاهده می‌شود توانایی آن در حذف نمک‌ها بسیار کمتر از غشای سلولز استات بوتیرات می‌باشد. از نظر میزان دفع نمک‌ها نیز غشای ساخته شده در این پژوهش به ترتیب مقادیر بالای ۶۶ و ۹۱ درصد را برای NaCl و  $MgSO_4$  حاصل کرده است که در قیاس با اکثریت قریب به اتفاق داده‌های درج شده از سایر پژوهش‌ها بیشتر می‌باشند.

در این میان غشای پلی آمیدی حاوی نانوذره با نام تجاری UIO-66 هر چند که میزان دفع بیشتری در حدود ۹۴ درصد را برای  $MgSO_4$  حاصل کرده است، اما با این حال این غشا از تراوایی بسیار کمی در حدود  $1 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$  برخوردار می‌باشد

که حدود ۷ برابر از تراوایی مربوط به غشای ساخته شده در این پژوهش کمتر است.

### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوذرات به هم چسبیده ی کاربرد آلومینیوم تیتانیوم پس از اسید شویی و طی مراحل سنتز، به صفحات جدا از هم مکسین تبدیل شده و گروه عاملی OH- در آن‌ها ایجاد شد. با توجه به نتایج حاصله، با افزودن نانوذرات مکسین، تخلخل غشاهای و نظم ساختاری آنها افزایش یافتند. همچنین در اثر حضور نانوذرات سنتز شده، آبدوستی غشاهای همواره افزایش یافته و زاویه تماسشان به حدود ۳۴° رسید که نشان دهنده کاهش محسوس تمایل غشاهای نسبت به پدیده نامطلوب گرفتگی می‌باشد.

گواه دیگر ارتقای آبدوستی و افزایش مقاومت در برابر گرفتگی، پارامتر نسبت بازبایی شار می‌باشد که از حدود ۵۶٪ در خصوص غشای خالص، به حدود ۷۷٪ در خصوص غشای حاوی ۴٪ وزنی از نانوذره افزایش یافته بود. افزایش غلظت نانوذرات مکسین به ۳٪ وزنی نسبت به پلیمر CAB، ارتقای هر سه ویژگی مکانیکی (شامل استحکام کششی، مدول الاستیک و افزایش طول در نقطه‌ی شکست) را در پی داشت، ولی در غلظت ۴٪ وزنی از نانوذره، غشا نظم ساختاری خود را از دست داده و حفرات درشتی در بدنه آن ایجاد گردید که به کاهش استحکام مکانیکی غشا منجر شد. شار آب خالص و نیز شار تراوه ی حاصل از فیلتراسیون انواع خوراکی‌های حاوی رنگ و نمک با افزودن

اندک میزان دفع حل شونده‌های مختلف در اثر افزودن نانوذرات را می‌توان به افزایش تخلخل غشاها نسبت داد. با توجه به مجموع آنالیزها و ارزیابی‌های صورت گرفته می‌توان گفت که نمونه غشایی حاوی ۳٪ وزنی از نانوذره مکسین سنتز شده، در قیاس با سایر غشاها از خواص و عملکرد مطلوب تری برخوردار می‌باشد.

نانوذره و افزایش غلظت آن تا ۴٪ وزنی نسبت به پلیمر، همواره افزایش یافتند. میزان دفع رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی و نیز نمک سولفات منیزیم توسط غشای خالص و همچنین غشاهای حاوی غلظت‌های ۱، ۲ و ۳٪ وزنی از نانوذره، بالای ۹۰٪ بود.

این نتیجه حاکی از آن است که غشاهای مورد اشاره همگی در محدوده نانوفیلتراسیون قرار دارند. همچنین کاهش

جدول (۴) نتایج حاصل از آزمون استحکام کششی در خصوص غشاهای تهیه شده

ردیف	نانوذره	پلیمر	تراوایی آب (L/m <sup>2</sup> .h.bar)	زاویه تماس	میزان دفع نمک (%)	مرجع
۱	مکسین عاملدار شده	سلولز استات بوتیرات	۶/۷	۳۳/۰۹	NaCl : ۶۶٪/۳ MgSO <sub>4</sub> : ۹۱٪	پژوهش حاضر
۲	بنتونیت ارتقایافته	پلی آمید	3	۵۰°	MgSO <sub>4</sub> : ۱۰٪	[۳۲]
۳	سیلیکا/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	پلی اتر سولفون	۱۴	۵۴°	MgSO <sub>4</sub> : ۵۸٪ NaCl : ۲۵٪	[۳۳]
۴	نانولوله بورون نیتريد	پلی آمید	۴/۵	۲۵°	MgSO <sub>4</sub> : ۹۰٪ CaCl <sub>2</sub> : ۸۰٪	[۳۴]
۵	اکسید گرافن	فیلم اکسید گرافن	۱۶	۱۷°	NaCl : ۲۷٪/۹ MgSO <sub>4</sub> : ۴۲٪	[۳۵]
۶	UIO-66	پلی آمید	۱/۱	۴۱°	MgSO <sub>4</sub> : ۹۴٪	[۳۶]
۷	ZIF-8	پلی آمید	۱/۵	۵۹°	MgSO <sub>4</sub> : ۸۱٪	[۳۷]
۸	نانولوله کربنی	پلی اترسولفون	۷/۲	۴۷°	MgSO <sub>4</sub> : ۵۸٪	[۳۸]
۹	نانولوله کربنی کربوکسیلدار	پلی اترسولفون	۷	۳۴°	MgSO <sub>4</sub> : ۸۹٪ NaCl : ۱۲٪	[۳۹]

## ۵- علائم اختصاری و نمادها

PVF  
V  
t  
A  
Δp  
R  
C<sub>p</sub>  
C<sub>f</sub>  
J<sub>w</sub>  
W<sub>w</sub>  
W<sub>f</sub>  
ε  
ρ  
δ

شار آب خالص عبوری  
حجم تراوه  
زمان  
سطح مؤثر غشا  
اختلاف فشار اعمال شده به دو سمت غشا  
درصد دفع حل شونده  
غلظت حل شونده در نمونه تراوه  
غلظت حل شونده در نمونه خوراک  
شار تراوه  
وزن غشای خیس  
وزن غشای خشک  
تخلخل  
دانسیته‌ی آب  
ضخامت غشا



## مراجع

- incorporation of APTES and amine functionalized carbon nanotubes". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(6). 106658.
- [13] R.P. Pandey, P.A. Rasheed, T. Gomez, R.S. Azam, and K.A. Mahmoud (2020) "A fouling-resistant mixed-matrix nanofiltration membrane based on covalently cross-linked Ti3C2Tx (MXene)/cellulose acetate". *Journal of Membrane Science*. 607. 118139.
- [14] R. Alfahel, R.S. Azzam, M. Hafiz, A.H. Hawari, R.P. Pandey, K.A. Mahmoud, and A.A. Elzatahry (2020) "Fabrication of fouling resistant Ti3C2Tx (MXene)/cellulose acetate nanocomposite membrane for forward osmosis application". *Journal of Water Process Engineering*. 38. 101551.
- [15] M.H. Abbasi-Geravand, E. Saljoughi, S.M. Mousavi, and S.Kiani (2021) "Biodegradable polycaprolactone/MXene nanocomposite nanofiltration membranes for the treatment of dye solutions". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 128.124-139.
- [16] M. Naguib, O. Mashtalir, J. Carle, V. Presser, J. Lu, L. Hultman, and M.W. Barsoum (2012) "Two-dimensional transition metal carbides". *ACS nano*. 6(2). 1322-1331.
- [۱۷] احسان سلجوقی، وحیده غفاریان و احمد اخوت (۱۳۹۲) "فناوری ساخت، اصلاح و ارزیابی غشاهای پلیمری"، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی
- [18] N.N. Li, A.G. Fane, W.W. Ho, and T. Matsuura (2011) *Advanced membrane technology and applications*. John Wiley & Sons Publication.
- [19] M. Han, X. Yin, H. Wu, Z. Hou, C. Song, X. Li, and L. Cheng (2016) "Ti3C2 MXenes with modified surface for high-performance electromagnetic absorption and shielding in the X-band". *ACS applied materials & interfaces*. 8(32). 21011-21019.
- [20] Y. Gogotsi (2015) "Transition metal carbides go 2D". *Nature materials*. 14(11). 1079-1080.
- [21] R. Kefirov, E. Ivanova, K. Hadjiivanov, S. Dzwigaj, and M. Che (2008) "FTIR characterization of Fe 3+–OH groups in Fe–H–BEA zeolite: Interaction with CO and NO". *Catalysis letters*. 125(3). 209-214.
- [22] R. Rezaee, S. Nasser, A.H. Mahvi, R. Nabizadeh, S.A. Mousavi, A. Rashidi, and S. Nazmara. (2015) "Fabrication and characterization of a polysulfone-graphene oxide nanocomposite membrane for arsenate rejection from water". *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 13(1). 1-11.
- [23] M.M. Pendergast, and E. M. Hoek (2011) "A review of water treatment membrane nanotechnologies". *Energy & Environmental Science*. 4(6). 1946-1971.
- [24] A. Rahimpour, and S.S. Madaeni (2007) "Polyethersulfone (PES)/cellulose acetate phthalate (CAP) blend ultrafiltration membranes: preparation, [1] T. Mohammadi, and E. Saljoughi (2009) "Effect of production conditions on morphology and permeability of asymmetric cellulose acetate membranes". *Desalination*. 243. 1-7.
- [۲] علی حسین زاده بهرمند (۱۳۹۵) "ساخت غشای پلی بوتیلن ساکسینات/سلولز استات/دکستران". پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- [3] J.M.K. Timmer (2001) "Properties of nanofiltration membranes: model development and industrial application". Technische Universiteit Eindhoven.
- [4] Y.A.J. Al-Hamadani, B-M. Jun, M. Yoon, N. Taheri-Qazvini, S.A. Snyder, M. Jang, J. Heo, and Y. Yoon (2020) "Applications of MXene-based membranes in water purification: A review" *Chemosphere*. 254. 126821.
- [5] B. Anasori, MR. Lukatskaya, and Y. Gogotsi (2017) "2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage". *Nature Reviews Materials*. 2(2). 1-17.
- [6] C.E. Ren, K.B. Hatzell, M. Alhabebe, Z. Ling, K.A. Mahmoud, and Y. Gogotsi (2015) "Charge-and size-selective ion sieving through Ti3C2T x MXene membranes". *The journal of physical chemistry letters*. 6(20). 4026-4031.
- [7] X. Wu, L. Hao, J. Zhang, X. Zhang, J. Wang, and J. Liu (2016) "Polymer-Ti3C2Tx composite membranes to overcome the trade-off in solvent resistant nanofiltration for alcohol-based system". *Journal of membrane science*. 515. 175-188.
- [8] R. Han, X. Ma, Y. Xie, D. Teng, and S. Zhang (2017) "Preparation of a new 2D MXene/PES composite membrane with excellent hydrophilicity and high flux". *Rsc Advances*. 7(89). 56204-56210.
- [9] A. Dashtbozorg, E. Saljoughi, S.M. Mousavi, S. Kiani (2022) "High-performance and robust polysulfone nanocomposite membrane containing 2D functionalized MXene nanosheets for the nanofiltration of salt and dye solutions" *Desalination*. 527. 115600.
- [10] W. Li, X. Tian, X. Li, J. Liu, C. Li, X. Feng, and Z.Z. Yu (2022) "An environmental energy-enhanced solar steam evaporator derived from MXene-decorated cellulose acetate cigarette filter with ultrahigh solar steam generation efficiency" *Journal of Colloid and Interface Science*. 606. 748-757.
- [11] Q. Xue, and K. Zhang (2021) "MXene nanocomposite nanofiltration membrane for low carbon and long-lasting desalination". *Journal of Membrane Science*. 640. 119808.
- [12] L. Zhang, K. Wei, G. Zeng, Q. Lin, X. Liu, Y. Chen, and A. Sengupta (2021) "High-efficient oil/water separation membrane based on MXene nanosheets by co-

- promoting agent". *Chemical Engineering Journal*. 358. 821-830.
- [33] S. Kamari, and A. Shahbazi (2020) "Biocompatible Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> nanocomposite as a green nanofiller embedded in PES-nanofiltration membrane matrix for salts, heavy metal ion and dye removal: long-term operation and reusability tests". *Chemosphere*. 243. 125282.
- [34] S. Casanova, T.Y. Liu, Y.M.J. Chew, A. Livingston, and D. Mattia (2020) "High flux thin-film nanocomposites with embedded boron nitride nanotubes for nanofiltration". *Journal of Membrane Science*. 597. 117749
- [35] L. Chen, J.H. Moon, X. Ma, L. Zhang, Q. Chen, L. Chen, R. Peng, P. Si, J. Feng, Y. Li, J. Lou, and L. Ci (2018) "High performance graphene oxide nanofiltration membrane prepared by electrospraying for wastewater purification". *Carbon* 130. 487-494.
- [36] Y. He, Y.P. Tang, D. Ma, and T.S. Chung (2017) "UiO-66 incorporated thin-film nanocomposite membranes for efficient selenium and arsenic removal". *Journal of Membrane Science*. 541, 262-270.
- [37] F. Xiao, B. Wang, X. Hu, S. Nair, and Y. Chen (2018) "Thin film nanocomposite membrane containing zeolitic imidazolate framework-8 via interfacial polymerization for highly permeable nanofiltration". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 83. 159-167.
- [38] M. Peydayesh, T. Mohammadi, and O. Bakhtiari (2019) "Water desalination via novel positively charged hybrid nanofiltration membranes filled with hyperbranched polyethyleneimine modified MWCNT". *Journal of industrial and engineering chemistry*. 69. 127-140.
- [39] H. Li, W. Shi, Y. Su, H. Zhang, X. Qin (2017) "Preparation and characterization of carboxylated multiwalled carbon nanotube/polyamide composite nanofiltration membranes with improved performance". *Journal of Applied Polymer Science*. 134(36). 45268.
- morphology, performance and antifouling properties". *Journal of Membrane Science*. 305(1-2). 299-312.
- [25] X.H. Zha, K. Luo, Q. Li, Q. Huang, J. He, X. Wen, and S. Du (2015) "Role of the surface effect on the structural, electronic and mechanical properties of the carbide MXenes". *EPL (Europhysics Letters)*. 111(2). 26007.
- [26] E.M. Abdelrazek, I.S. Elashmawi, and S. Labeeb (2010) "Chitosan filler effects on the experimental characterization, spectroscopic investigation and thermal studies of PVA/PVP blend films". *Physica B: Condensed Matter*. 405(8). 2021-2027.
- [27] S. Cao, Y. Shi, and G. Chen (1998) "Blend of chitosan acetate salt with poly (N-vinyl-2-pyrrolidone): Interaction between chain-chain" *Polymer Bulletin*. 41(5). 553-559.
- [28] D.A. Musale, and A. Kumar (2000) "Effects of surface crosslinking on sieving characteristics of chitosan/poly (acrylonitrile) composite nanofiltration membranes". *Separation and purification technology*. 21(1-2). 27-37.
- [29] A.R. Fajardo, L.C. Lopes, A.F. Rubira, and E.C. Muniz (2012) "Development and application of chitosan/poly (vinyl alcohol) films for removal and recovery of Pb (II)". *Chemical Engineering Journal*. 183. 253-260.
- [30] G.Z. Kyzas, and N.K. Lazaridis (2009) "Reactive and basic dyes removal by sorption onto chitosan derivatives". *Journal of Colloid and Interface Science*. 331(1). 32-39..
- [31] Y.Q. Wang, T. Wang, Y.L. Su, F.B. Peng, H. Wu, and Y.Z. Jiang (2005) "Remarkable reduction of irreversible fouling and improvement of the permeation properties of poly (ether sulfone) ultrafiltration membranes by blending with pluronic F127". *Langmuir*. 21(25). 11856-11862.
- [32] R.N. Maalige, K. Aruchamy, A. Mahto, V. Sharma, D. Deepika, D. Mondal, and S.K. Nataraj (2019) "Low operating pressure nanofiltration membrane with functionalized natural nanoclay as antifouling and flux

# Preparation of enhanced nanofiltration membranes containing Cellulose acetate butyrate/Mxene nanoparticles for separation of salt and dye from water

Amirhosein Dashtbozorg, Ehsan Saljoughi\*, Seyed Mahmoud Mousavi, Shirin Kiani, Hamed Karkhanечи

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

---

## ABSTRACT

In this study, for the first time, nanofiltration membranes containing cellulose acetate butyrate polymer and MXene nanoparticles were prepared and used to remove dye and salt from water. MXene nanoparticles were synthesized from  $Ti_3AlC_2$  precursor and the existence of a layered structure as well as the formation of OH-functional group in them was proved. Then, Cellulose acetate butyrate nanofiltration membranes were prepared from MXene nanoparticles at concentrations of 0 to 4 wt.% and various characterizations were performed on the mentioned prepared membranes. The results showed that increase in concentration of MXene nanoparticles results in formation of membranes with higher porosity, hydrophilicity, pure water flux and flux recovery ratio. Also, with the addition of MXene to the polymer and increase in its concentration up to 3 wt.%, mechanical properties, including tensile strength, elastic modulus and elongation at breakpoint increased, while further increase in nanoparticle concentration decreased these properties. In all membranes up to 3 wt.% of nanoparticles, the rejection of methylene blue and methyl orange dyes as well as rejection of divalent salt were above 90%.

All right reserved.

---

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: January 31, 2022

Received in revised form: April 25, 2022

Accepted: June 14, 2022

---

**Key words:**

Membrane

Nanofiltration

Cellulose acetate butyrate

MXene

\* Corresponding author  
saljoughi@um.ac.ir