

بررسی استفاده از نانوکامپوزیت های حاوی پلی پیروول در غشاهای پلیمری جهت حذف آلودگی پسابهای حاوی

عناصر فلزی در فرآیند تصفیه به روش نانوفیلتراسیون

هانیه مومنی کوچکسرائی^۱، محمدرضا طوسی جمالی^{۲*}

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائمشهر، گروه شیمی کاربردی، دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائمشهر، گروه شیمی کاربردی، عضو هیات علمی

*نویسنده مسئول: mrtoosi@gmail.com

چکیده

عناصر فلزی از عوامل مهم آلودگی منابع آبی به شمار می رود. ورود فلزات به آب های طبیعی معمولاً از محل های تخلیه فاضلاب های شهری، کشاورزی و صنعتی صورت می گیرد. با توجه به اهمیت خطرات احتمالی بهداشتی عناصر فلزی و همچنین اهمیت اکوسیستم های آبی به ویژه رودخانه ها، در این تحقیق ساخت غشاهای نانوکامپوزیتی پلی سلفون با استفاده از مزوپورهای سیلیکاتی پوشیده با پلی پیروول و توانایی آنها در حذف عناصر فلزی نیکل و کبالت از پساب های آلوده بررسی شد. آزمایش فیلتراسیون محلولهای عناصر فلزی در سیستم پیوسته (Dead end flow) در فشارهای مختلف جریان محلول صورت گرفت. نتایج نشان داد که ممبرانهای ساخته شده قابلیت خوبی در حذف نیکل و کبالت از خود نشان می دهند. همچنین کارایی غشاهای سنتز شده در فشارهای مختلف نشان از مقاومت مکانیکی بالای غشاها دارد. طبق نتایج می توان گفت در فشارهای مختلف برای غشاهای ساخته شده حذف یون کبالت بیشتر از یون نیکل انجام شده است.

کلمات کلیدی: آلودگی عناصر فلزی، تصفیه آب، غشاهای پلی سولفونی، نانوفیلتراسیون، نانوکامپوزیت

مقدمه

آلودگی روان آبها با عناصر فلزی سمی یکی از معضلات اصلی زیست محیطی به حساب می آید زیرا حضور عناصر فلزی سمی در این دسته از آبها در نهایت موجب آلودگی آبهای زیرزمینی و همچنین مخازن آبی مختلف اعم از دریاچه ها و دریاها می شود. انباشتگی این عناصر در آبریان مختلف ضمن اینکه مخاطرات جدی برای آنها به دنبال خواهد داشت موجب انتقال آنها به بدن سایر جانوران و در نهایت انسان خواهد شد که یکی از عوامل اصلی بیماریهای مزمن کبدی، گوارشی و سرطانهای متنوع در این اندامها می باشند (Fu, 2011). روشهای متداول در حذف عناصر فلزی عبارتند از ترسیب شیمیایی، انعقاد، جذب سطحی به وسیله جاذبهای طبیعی و سنتزی و روشهای فیلتراسیون. یکی از مزایای فرایندهای فیلتراسیون قابلیت استفاده از آنها در مقیاسهای وسیع است. امروزه تکنیک استفاده از غشا در واحدهای مختلف مانند تولید آب آشامیدنی از آب دریا با استفاده از پدیده اسمز معکوس، تفکیک ماکرومولکولها در صنایع غذایی و دارویی به وسیله الترافیلتراسیون، پاکسازی پساب کارخانجات صنعتی به وسیله فرایندهای دیالیز و نانوفیلتراسیون و همچنین تصفیه پسابها به کمک بیوراکتورهای غشایی مورد استفاده قرار می گیرد (Pendergast, 2011).

بیشتر غشاهایی که در فرایندهای تصفیه پسابها مورد استفاده قرار می گیرند غشاهای پلیمری هستند که بر پایه مکانیسم حلالیت - نفوذ عمل می کنند. این سازوکار در مقیاس مولکولی به معنی عبور مولکول ها از غشای پلیمر است بر این اساس که مولکول از یک طرف غشا جذب می شود و از میان فضاهای خالی زنجیرهای پلیمر نفوذ و سرانجام از سمت دیگر غشا خارج می شود. مطابق مدل حلالیت - نفوذ، نفوذ مولکول ها از میان غشاها با دو پارامتر اصلی ضریب نفوذ و ضریب حلالیت کنترل می شود (Jun, 2015). در یک حالت ایده آل برای توصیف عملکرد خوب غشا، تراوایی بالا همراه با گزینش پذیری خوب نسبت به پس زنی و حذف آلاینده همواره موضوعی است که مدنظر محققان فعال در زمینه غشاهای پلیمری بوده است. هر چه تراوایی غشا بالا باشد هزینه انرژی مصرفی در فرایند فیلتراسیون کاهش می یابد و گزینش پذیری بالا در شرایط تراوایی یکسان عملکرد غشا را در تصفیه پساب افزایش می دهد. این مسأله به روشهای مختلفی در ساخت غشاها مورد توجه قرار می گیرد. یکی از شیوه های مرسوم افزودن ترکیبات پیشرفته به بافت پلیمری غشا در حین فرایند تولید آن است که به آنها غشاهای بستر آمیخته گفته می شود (Ismail, 2013). غشاهای پلیمری بستر آمیخته قابلیت بالایی در جذب ترکیبات مختلف موجود در سیالات در فاز گازی و مایع را دارند. این غشاها علاوه بر دارابودن خاصیت تراوایی مناسب، بدلیل دارابودن گروههای عاملی در سطوح خارجی می توانند ترکیبات آلی و معدنی را بخوبی روی سطح بیرونی خود جذب و مولکولهای سیال را از منافذ خود براحتی عبور دهند (Liu, 2011).

پژوهش بر روی غشاهای بستر آمیخته از سال ۱۹۸۰ با سرعت قابل ملاحظه ای به صورت پیوسته رو به افزایش است. اکنون یافته های تجربی و آزمایشگاهی، برتری نسبی جداسازی غشاهای بستر آمیخته نسبت به غشاهای پلیمری خالص را نمایان

ساخته است. استراتژی مورد استفاده در غشاهای بستر آمیخته مربوط به ترکیب خواص غشاهای پلیمری و افزودنیهای آلی یا معدنی در یک غشا است و این کار با پخش پرکننده ها در بستر پلیمرها انجام می شود.

بازده جداسازی غشاهای بستر آمیخته می تواند با اصلاحات شیمیایی بهبود یابد. وجود گروه های عاملی آلی بر سطح پرکن غیرآلی علاوه بر این که برای پخش بهتر مواد غیرآلی در فاز پلیمری کمک می نماید، بلکه موجب افزایش گزینش پذیری نیز می شود. در مقادیر کم فاز غیر آلی، ذرات پرکن می توانند در جداسازی موثر باشند، در مقادیر بالای پرکن، ناحیه هایی از ذرات به هم متصل شده، تشکیل می شود. حتی ممکن است در مقادیر بالاتر این ناحیه ها رشد کرده و مسیرهای پهنی را ایجاد کنند. در مقادیر بالاتر، کانال های پیوسته در داخل غشا شکل می گیرد (Blanco, 2006).

غشاهای بستر آمیخته معمولاً در دسته بندی فرایندهای نانوفیلتراسیون قرار می گیرند. این نوعی از فیلتراسیون است که غشاها را به منظور جداسازی سیالات یا یونهای گوناگون بکار می گیرد. نانوفیلتراسیون به صورت اسمز معکوس ملایم تری عنوان می گردد، چرا که حفرات غشایی بزرگتری در مقایسه با غشاهای اسمز معکوس دارد. بدلیل اینکه این غشاها در فشارهای بسیار پایین تری کار کرده و برخی از مواد معدنی را از خود عبور می دهند، نانوفیلتراسیون می تواند در مواردی که حذف بالای مواد آلی مورد نیاز است و همچنین در حذف متوسط مواد معدنی کاربرد داشته باشد. این روش قادر به حذف عناصر فلزی دو ظرفیتی می باشد. مزیت این روش بر اسمز معکوس این است که نانوفیلتراسیون معمولاً در بازافت های بالاتری کار می کند در نتیجه در انرژی مصرفی کل صرفه جویی خواهد شد (Reid, 2001).

نانوذرات آمیخته با غشاها به دلیل داشتن توانایی برای افزایش نفوذپذیری غشا، خواص مکانیکی، آب دوستی و انتخاب پذیری در برخی نمونه ها، توجه زیادی را بدست آورده بودند (Nasir, 2013). افزودنی ها باعث تشکیل روزنه ها، افزایش آب دوستی غشا و پس زنی و ایجاد ساختار اسفنجی در غشا می شود. مواد معدنی متفاوتی، مانند زئولیت ها، غربال مولکولی کربن، سیلیکا، نانولوله های کربنی، آلومینیوم اکسید، اکسید آهن و منگنز، برای بهبود غشاها مورد استفاده قرار می گیرند. پوشش دهی مواد مزوپوری از جمله مزوپوره های سیلیکاتی با پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین و پلی پیروول، مواد کامپوزیتی مناسب در ابعاد نانو تولید می کند که می تواند فلزات سنگین آلوده کننده را از محلول های آبی به آسانی حذف کند. غشاهای بستر آمیخته اولترافیلتراسیونی منگنز دی اکسید آبدار (HMO) و پلی اتروسولفون (PES)، برای حذف سرب (II) با نسبت های وزنی مختلفی از HMO به PES در غشا، از ۰ تا ۲، تهیه و تأثیر بار غشا روی شار آب خاص غشا، آب دوستی، تخلخل و همچنین ظرفیت جذب سرب (II) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اندازه منفذ غشا، با افزایش نسبت وزنی HMO به PES، تمایل به کاهش یافتن دارد، در عوض، شار آب غشا با افزایش بار غشا، افزایش یافته بود که به مقدار زاویه تماسی کاهش یافته (آب- دوستی بیش تر)، تخلخل افزایش یافته و زبری سطحی بزرگتر، نسبت داده بودند. با استفاده از این غشای بستر آمیخته جذب سرب (II) تا ۹۷/۵ درصد افزایش یافت (Jamshidi, 2013). غشای بستر آمیخته از پلی سولفون و نانوکامپوزیت Fe_3O_4 و

تالک با روش وارونگی فاز تهیه گردید. غشاهای PSF/talc-Fe₃O₄ پس زنی بالاتر سرب (۰/۹۹/۴) و نیکل (۰/۹۶/۲) را در مقایسه با غشاهای PSF/talc داشتند. پس زنی فلزات سنگین در غلظت های بالاتر نانوکامپوزیت (۱۱ و ۱۳ درصد وزنی) به- دلیل شکل گیری حفرات بزرگ تر در ساختار غشاء کاهش یافت (Abdullah, 2016).

مواد و روش کار

ساخت نانوکامپوزیت

در این تحقیق از مزوپور سیلیکاتی (HMS) جهت تهیه نانوکامپوزیت استفاده شد. HMS با استفاده از روش سل ژل (Sol-gel) تهیه گردید (Pinnavaia, 1995). در این روش از دودسیل آمین (C₁₂H₂₅NH₂) به عنوان فعال کننده سطحی (سورفکتانت) استفاده شده است. در یک ارلن مقدار ۲۱/۰۰۳۳ گرم اتانول را به ۱۵/۰۴۲۶ گرم تترا اتیل اورتو سیلیکات (TEOS) افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط با همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه همزده شد. در ارلن دیگری، مقدار ۴۶/۰۰۱۱ گرم آب مقطر بدون یون را به ۳/۵۰۰۲ گرم دو دسیل آمین (DDA) و ۱/۴ میلی لیتر اسید کلریدریک ۱ مولار اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط با همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه همزده شد. محتویات دو ارلن با یکدیگر مخلوط و در دمای محیط به مدت ۵ ساعت با همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه همزده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد تا محلول ژل ای مانندی حاصل شود، آنگاه ژل را با سینتر گلاس صاف نموده و چندین بار با آب مقطر و استون شستشو داده شد. سپس رسوب سفید رنگ بدست آمده به مدت ۶ ساعت در آون در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد در آون خشک گردید. در نهایت رسوب خشک شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت کلسینه شد.

برای تهیه نانوکامپوزیت، مقدار ۳۳۵ میلی لیتر محلول اسید سولفوریک ۱ مولار را داخل یک عدد بشر ۵۰۰ میلی لیتر ریخته و به آن ۲/۳۵ گرم یدات پتاسیم (اکسیدانت) اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه با میکسر مغناطیسی در دمای محیط همزده شد، سپس مقدار ۱۷/۲۵ گرم سورفکتانت (CTAB) به محلول اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه همزده شد (تشکیل رنگ زرد روشن). سپس مقدار ۳/۳۵ گرم پودر مزوپور HMS به محلول اضافه و به مدت ۵ دقیقه همزده شد، آنگاه مقدار ۳/۳۵ گرم پیرول را به محلول حاصل اضافه گردید و به مدت ۵ ساعت همزده شد در این مدت به تدریج رنگ محلول از زرد روشن به زرد تیره و با تشکیل پلیمر پیرول به سبز متمایل به سیاه تغییر یافت که این تغییر رنگ نشانگر پیشرفت واکنش پلیمریزاسیون و تشکیل پلی پیرول است. سپس همزن خاموش و محلول به مدت ۴ ساعت در دمای محیط به حالت راکد نگهداری شد تا کامپوزیت تشکیل شده کاملاً ته نشین شود. پس از این مدت و ته نشینی کامل نانوکامپوزیت مزوپور/پلی پیرول (PPyr/HMS)، محلول سیاه رنگ فاز بالایی را جدا کرده و دور ریخته شد و سپس به آن آب مقطر بدون یون افزوده و خوب بهم زده شد و به وسیله فیلتر گلاس صاف گردید آنگاه کامپوزیت سبزرنگ متمایل به سیاه روی کاغذ صافی سه بار با آب مقطر بدون یون و سه بار با

استون و در نهایت سه بار با آب مقطر بدون یون شستشو داده شد و بمدت ۲۴ ساعت در اون در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد خشک گردید. وزن کامپوزیت خشک شده ۷/۱۷۱۱ گرم بوده است (شکل ۱).



شکل ۱- مزوپور HMS (راست) و نانوکامپوزیت HMS/PPyrr (چپ)

ساخت غشا

برای تهیه غشاهای نانوکامپوزیتی، ابتدا مقدار ۳/۴ گرم پلی سولفون به ۱۴/۵۹۶۶ گرم حلال NMP اضافه و به مدت ۱۸ ساعت با همزن مگنتی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس همزده شد. سپس مقدار مشخص از نانوکامپوزیت به ۲ گرم حلال NMP اضافه و به مدت ۲ ساعت با همزن مگنتی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه همزده شد. آنگاه دو محلول حاصل در یک ارلن مایر مخلوط و به مدت ۸ ساعت با همزن مگنتی با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس همزده شد تا محلول لزج کاملاً یکنواخت و همگنی بدست آمد. مدت ۲۴ ساعت محلول حاصل در دمای محیط نگهداری شد تا کاملاً حباب زدایی شود. عملیات قالب گیری غشا با فیلم کش ۲۰۰ میکرونی بر روی شیشه هایی که به همین منظور تهیه شده بودند انجام شد و در تشت آب مقطر غوطه ور گردید و بلافاصله وارونگی فاز اتفاق افتاد و غشا روی آب شناور شد و جهت حلال زدایی به مدت ۱۲ ساعت در دمای محیط در تشت آب مقطر نگهداری گردید.

شناسایی غشا

تعیین میزان آبدوستی و اثر افزودن نانوکامپوزیت بر قطبیت و آبدوستی سطح غشاها از روش تعیین زاویه تماس به کمک عکسبرداری میکروسکوپی از قطره و پردازش تصویر استفاده شد. تخلخل غشاها با استفاده از رابطه زیر حساب شد.

$$\text{porosity (\%)} = \{(W_{\text{wet}} - W_{\text{net}}) / \rho Ah\} \times 100$$

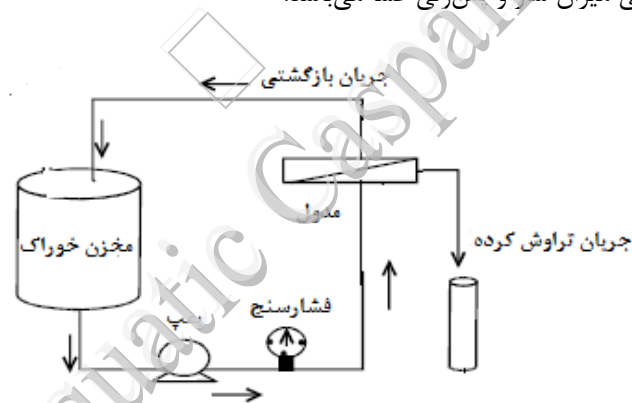
در این رابطه صورت کسر به ترتیب وزن غشای خیس و وزن غشای خشک می باشد. ρ چگالی آب مقطر، A مساحت غشا و h

ضخامت آن می باشد. غشاها به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب مقطر خیسانده و سپس وزن شدند. ضخامت غشاها ۲۰۰

میکرون در نظر گرفته شد. ساختار سطحی و سطح مقطع غشاهای ساخته شده با عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شد.

تست تراوایی و فیلتراسیون

تست تراوایی غشا با استفاده از سیستم پیوسته گردش آب و ماژول با مساحت مؤثر ۱۳ سانتیمتر مربع انجام شد. فشار آب از یک تا پنج بار متغیر و با استفاده از شیر مقدار فشار اعمال شده روی غشا تنظیم گردید. مقدار شار بر حسب لیتر بر ساعت بر متر مربع از غشا اندازه گیری شد. برای این کار مقدار آب عبوری از غشا در مدت زمان پنج دقیقه به وسیله ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه گیری شد. مقدار دو لیتر محلول نیترات نیکل و یا کبالت با غلظت ۱۰۰ ppm تهیه و در مخزن نگهداری شد تا به وسیله پمپ در فشار معین از غشا عبور داده شود. برای هر فشار از یک غشای تازه در ماژول استفاده شد. مقدار غلظت یونهای نیکل یا کبالت در فشار معین با دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد. شکل (۲) شماتیک ساده‌ای از سیستم فیلتراسیون بن‌بستی مورد استفاده جهت بررسی میزان شار و پس‌زنی غشا می‌باشد.



شکل ۲- شماتیکی از سیستم فیلتراسیون بن‌بستی

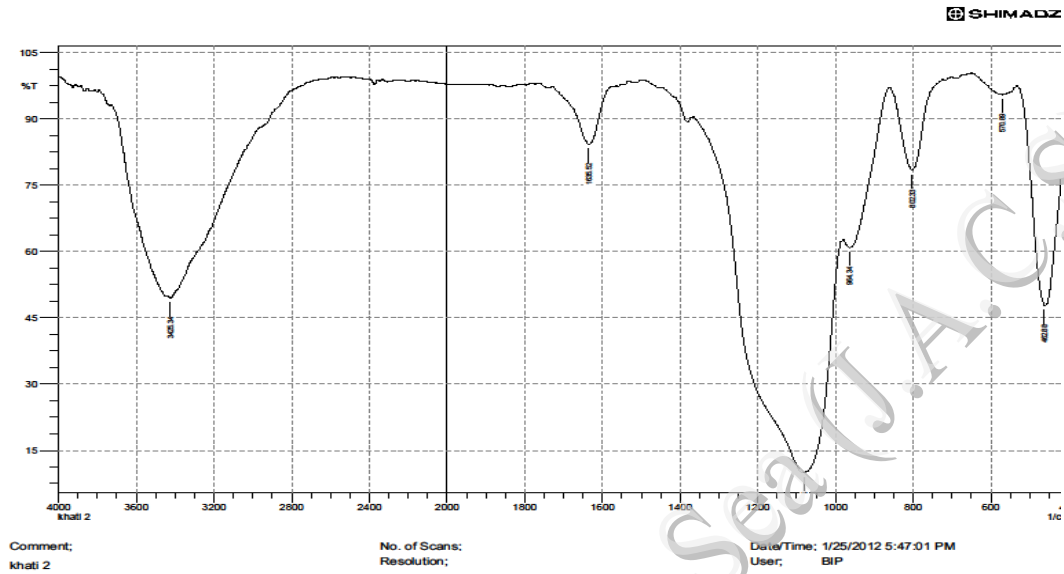
برای اندازه‌گیری پس‌زنی یون سرب از معادله زیر استفاده شده است:

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

که C_f و C_p ، به ترتیب، غلظت‌های یون سرب تراوش شده و محلول اولیه هستند. برای اندازه‌گیری مقدار C_f و C_p از دستگاه جذب اتمی استفاده می‌شود.

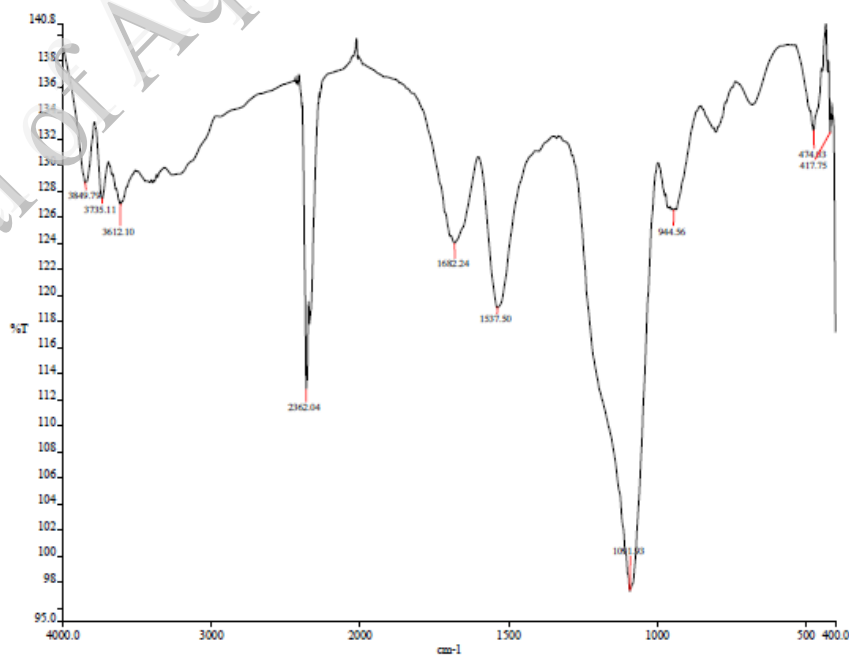
نتایج و بحث

ساختار گروه‌های عاملی سطحی در مزوپور و همچنین نانوکامپوزیت توسط آزمون FTIR مورد بررسی قرار گرفت. طیف FTIR مزوپور HMS و نانوکامپوزیت PPyrr/HMS در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.



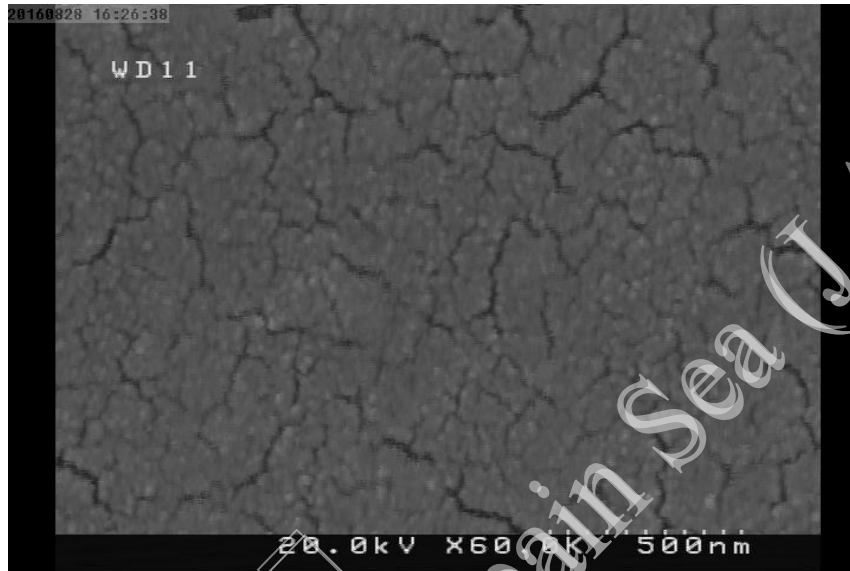
شکل ۳- طیف FTIR مزوپور HMS

در شکل (۳) پیک های مشاهده شده در ناحیه $1000-1200 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروههای سیلوکسان سطحی است. در واقع ارتعاشات Si-O-Si در 1095 cm^{-1} مربوط به کشش غیرمستقران، 814 cm^{-1} مربوط به کشش متقارن و 460 cm^{-1} مربوط به کشش خمشی دیده شده است. باند پهن و گسترده در ناحیه $3760-3055 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به واکنش ساختار گروههای Si-OH با مولکولهای آب جذب شده است. همچنین در طیف شکل (۴) پیکهای 1640 cm^{-1} و 1650 cm^{-1} مربوط به گروههای آمین می باشند.

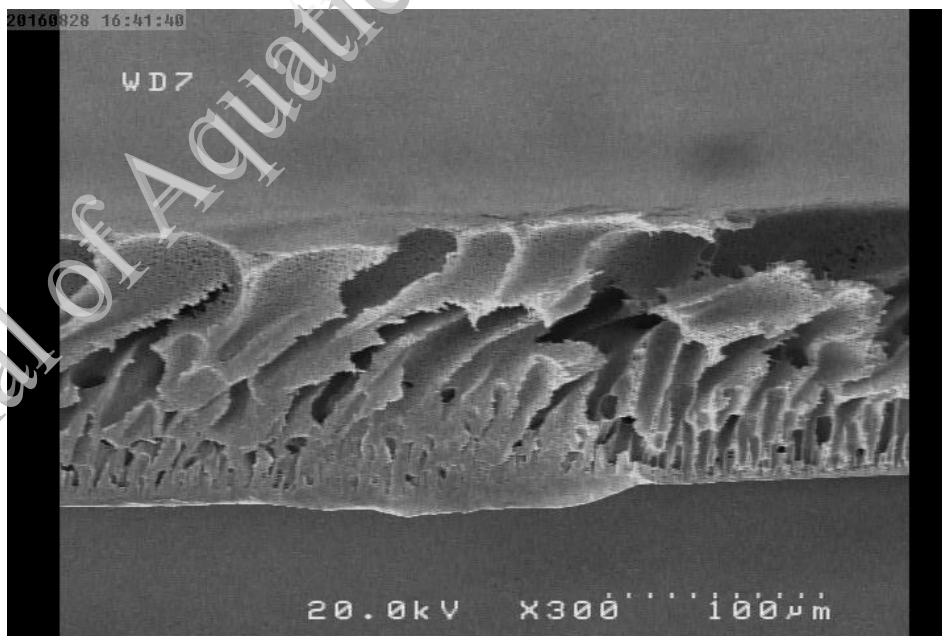


شکل ۴- طیف FT-IR نانو کامپوزیت (PPYRR/HMS)

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح بالای غشا را نشان می دهد. همانطور که در تصویر پیداست ذرات نانوکامپوزیت روی سطح انتشار یافته و به شکل کرات ریز در تصویر مشخص هستند.



شکل ۵- عکس میکروسکوپ الکترونی از سطح رویی غشای M_2



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع غشای پلی سولفون

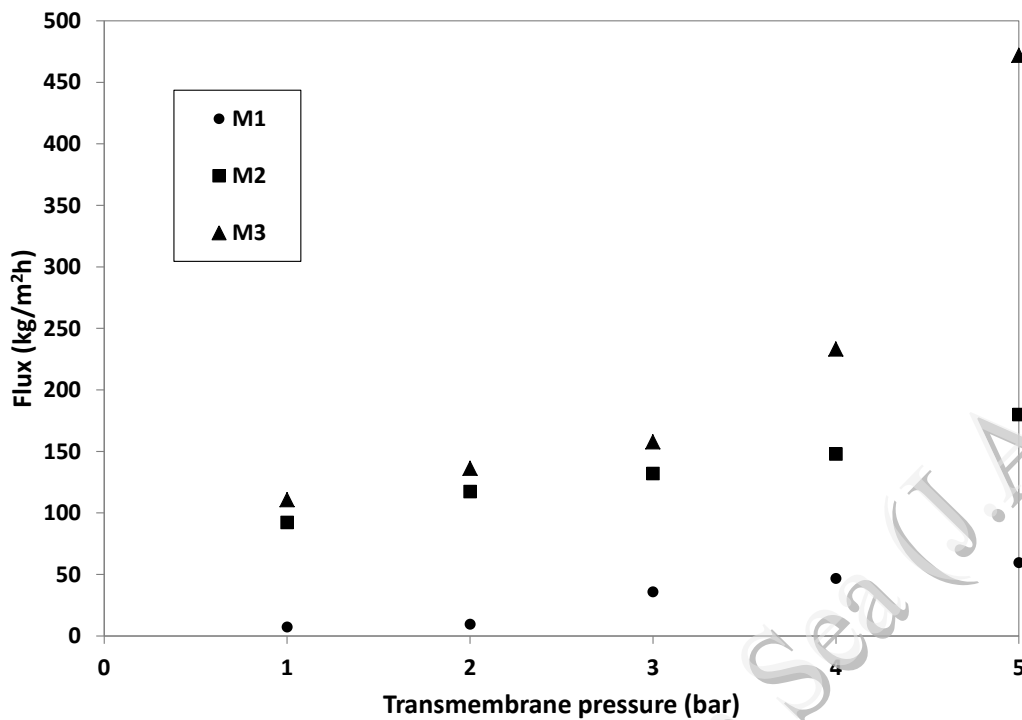
در شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع غشا نشان داده شده است. بافت کلی غشا بصورت اسفنجی و دارای منافذ بسیار ریز می باشد که تخلخل غشا را موجب می شود. جدول (۱) تخلخل غشاهای ساخته شده را نشان می دهد. همانطور که در بخش پیشین ذکر شد افزایش نانوکامپوزیت در بافت غشا موجب افزایش تخلخل گردیده است.

جدول ۱- مقدار تخلخل اندازه گیری شده غشاها

نام غشا	وزن غشای خشک (g)	وزن غشای خیس (g)	درصد تخلخل (%)
پلی سولفون خالص	۰/۰۷۶۱	۰/۳۱۸	۵۳
۰/۳٪ نانوکامپوزیت	۰/۳۶۴	۰/۲۷۶	۵۷
۰/۶٪ نانوکامپوزیت	۰/۴۹۶	۰/۳۱۸	۵۹

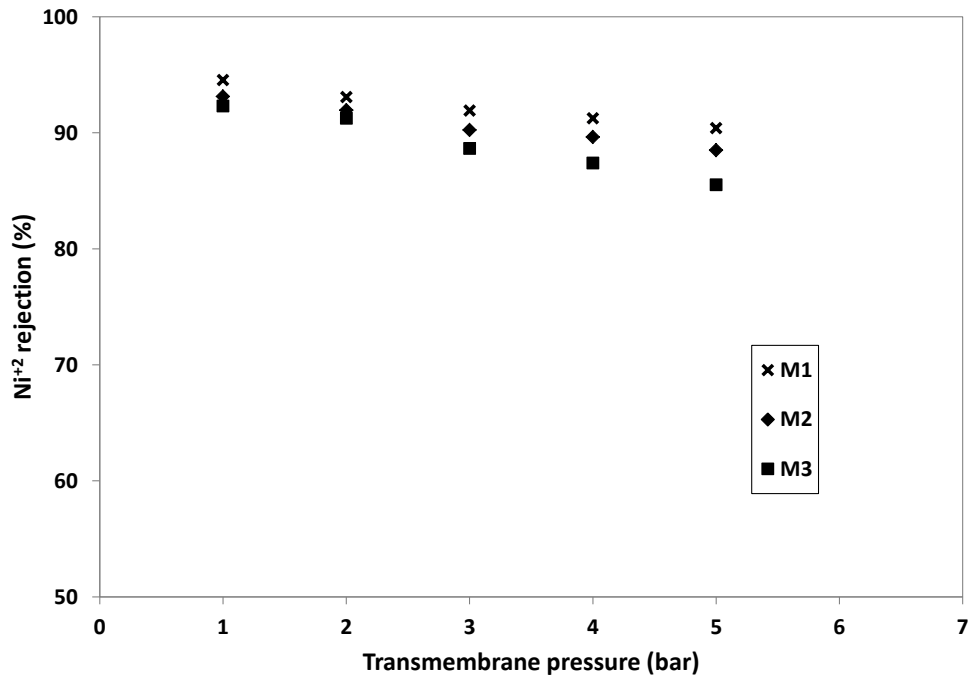
از داده های جدول پیداست با افزایش نانوکامپوزیت و با افزایش تخلخل می توان انتظار داشت که مقدار شار عبوری از غشا بیشتر شود.

با توجه به ویژگی های قابل توجه پلیمرهای پلی سولفون (تراوایی، گزینش پذیری) به منظور افزایش کارایی غشاهای ساخته شده، نانوکامپوزیت پلی پیرول بر پایه مزوپور HMS به بستر پلیمر اضافه شد تا عملکرد غشاها مورد بررسی قرار گیرد. غشاهای پلیمری پلی سولفون با ترکیب درصدهای مختلف نانوکامپوزیت به روش بستر آمیخته ساخته شدند. با توجه به مطالعات انجام شده درصدهای وزنی بین ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۶ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. در درصدهای وزنی بالاتر، فضاهای خالی در غشا افزایش می یابد که این عامل قطعاً باعث افزایش توانایی تراوایی این غشاها می شود. با افزایش مقدار نانوکامپوزیت نفوذپذیری غشاهای پلی سولفون افزایش می یابد. شکل (۷) نشان می دهد که در فشارهای مختلف جریان محلول، افزایش مقدار نانوکامپوزیت فاکتور نفوذپذیری سیال را افزایش می دهد.

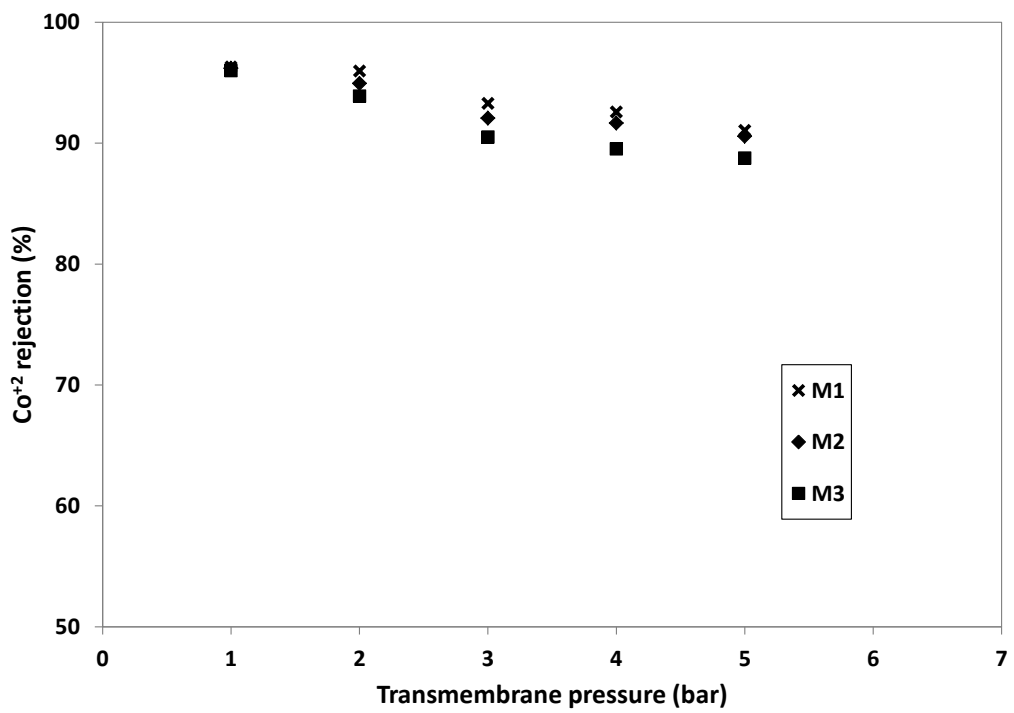


شکل ۷- شار تجویزی از غشاهای ساخته شده بر حسب فشار جریان آب

شکل (۸) درصد حذف یون فلزی نیکل را در مقادیر مختلف فشار جریان محلول نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش شار مقدار درصد حذف نیکل کاهش می یابد. البته مقدار حذف در حد قابل قبول می باشد. همچنین در شکل (۹) درصد حذف یون کبالت در فشارهای مختلف برای غشاهای ساخته شده نشان داده شده است. ملاحظه می شود حذف یون کبالت بیشتر از یون نیکل انجام شده است.



شکل ۸- درصد حذف یون نیکل در فشارهای مختلف جریان



شکل ۹- تغییرات درصد حذف کبالت بر حسب فشار اعمال شده بر محلول

یافته پژوهشی

افزودن نانوکامپوزیت HMS/PPy_r در ساختار غشاهای پلی سولفونی با ایجاد گروههای عاملی آبدوست در بافت غشا ضمن افزایش تراوایی آب و افزایش شار عبوری توانایی غشا را در حذف عناصر فلزی کبالت و نیکل در محدوده قابل قبولی حفظ می کند. این امر به دلیل مکانیسم حذف جذبی روی سایتهای نانوکامپوزیتی در ساختار غشا رخ می دهد. گروههای پلی پیروول در غشا با داشتن عامل -NH₂ توانایی جذب کاتیونهای فلزی از آب را دارند. طی این مکانیسم عناصر فلزی در حین عبور از غشا توسط این سایتهای جذب و از فاز سیال حذف می شوند. هرچند در درازمدت این پدیده می تواند به گرفتگی منافذ و کاهش شار عبوری منجر شود.

منابع

- Abdullah, A.H., Kalantari, K., Moradihamedani, P., Morad, A. Z., 2016. High efficient removal of lead(II) and nickel(II) from aqueous solution by novel polysulfone/Fe₃O₄-talc nanocomposite mixed matrix membrane, *Desalination and Water Treatment*, 0:1-10.
- Blanco, J-F., Sublet, J., Nguyen, Q. T., Schaetzel, P., 2006. Formation and morphology studies of different polysulfones-based membranes made by wet phase inversion process, *Journal of Membrane Science* 283: 27-37.
- Fu, F., and Wang, Q. (2011). "Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review." *J. of Environmental Management*, 92(3), 407-418
- Ismail, A.F., Kusworoa, T.D., Mustafaa, A., 2008. Enhanced gas permeation performance of polyethersulfone mixed matrix hollow fiber membranes using novel Dynasylan Ameo silane agent, *Journal of Membrane Science*, 319: 306-312.
- Jamshidi Gohari, R., Lau, W.J., Matsuura, T., E., Halakoo, Ismail, A.F., 2013. Adsorptive removal of Pb(II) from aqueous solution by novel PES/HMO ultrafiltration mixed matrix membrane, *Separation and purification Technology*, 120: 59-68.
- Jun, Y., Baolin, D., 2015. Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 479: 256-275.
- Liu, S.X., Kim, J.T., 2011. Characterization of surface modification of polyethersulfone membrane, *Journal of Adhesive Science and Technology*, 25: 193-212.
- Nasir, R., Mukhtar, H., Man, Z., Mohshim, D. F., 2013. Material Advancements in Fabrication of Mixed-Matrix Membranes, *Chemical Engineering & Technology*, 36: 717-727.
- Pendergast, M.M., Hoek, E.M.V., 2011. A review of water treatment membrane nanotechnologies, *Energy and Environmental Science*, 4: 1946-1971.
- Reid, B.D., Ruiz-Trevino, F.A., Musselman, I.H., Kenneth, J., Balkus, J., Ferraris, J.P., 2001. Gas Permeability Properties of Polysulfone Membranes Containing the Mesoporous Molecular Sieve MCM-41, *Chemistry of Materials*, 13: 2366-73.

Tanev, P.T., Pinnavaia, T.J., 1995 A Neutral Templating Route to Mesoporous Molecular Sieves. Science 267: 865-867.

Journal of Aquatic Caspian Sea (J.A.C.S.)