

تهیه و مشخصه‌یابی غشای نانوکامپوزیت الکتروریسی پلی‌اکریلونیتریل / نانولوله هالوزیت در بستر فیلتر لیفی

عرفان صدیقی مشتقین، محمدحسن کنعانی جزئی، سمیه اکبری*

گروه شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

جداسازی آلاینده‌های موجود در هوا نظیر انواع ریزگرد، باکتری و ویروس، نقش مهمی در سلامت انسان دارد. در این زمینه پلیمر اکریلیکی با ویژگی‌های مطلوب فراوان مانند قابلیت الکتروریسی، مقاومت حرارتی و مقاومت شیمیایی بالا به‌عنوان لایه مؤثر در بستر فیلتر لیفی استفاده می‌شود. در این مقاله از نانولوله‌های هالوزیت، به‌عنوان ماده‌ی ارزان قیمت و زیست‌سازگار، به‌منظور بهبود بهره‌وری فیلتراسیون در لایه فعال استفاده شد. دو نمونه غشای پلیمر اکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله‌های هالوزیت به روش الکتروریسی بر روی بستر بی‌بافت تهیه شد. به‌منظور بررسی ساختار و شکل‌شناسی نمونه‌های نانو الیاف تولیدشده، آزمون‌های طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) به کار گرفته شدند. استحکام کششی نمونه‌ها با استفاده از آزمون کششی تک‌محور بررسی شد. در نهایت، به‌منظور بررسی سنجش بهره‌وری فیلتراسیون، از آزمون دیسپرس ذرات دی‌اکتیل فتالات (DOP) استفاده شد. مشاهده شد غشای نانوکامپوزیتی، با قابلیت جداسازی ۹۵/۵٪ ذرات DOP، در مقایسه با غشای پلیمر اکریلیکی از عملکرد بهتری به‌منظور به‌کارگیری در فیلترهای هوا و جداسازی آلاینده‌ها برخوردار است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۵ بهمن ۱۳۹۸

دریافت پس از اصلاح: ۹ مرداد ۱۳۹۹

پذیرش نهایی: ۲۴ آبان ۱۳۹۹

کلمات کلیدی:

بستر فیلتر لیفی

بهره‌وری فیلتراسیون

نانولوله‌های هالوزیت

نانو الیاف کامپوزیتی

جداسازی

ذرات دیسپرس شده روغن

* عهده دار مکاتبات

akbari_s@aut.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

امروزه توسعه صنعت و فعالیت‌های انسانی منجر به افزایش میزان آلودگی‌های موجود در هوا شده است که به شکل جدی به محیط زیست و سلامتی انسان‌ها آسیب می‌رساند [۱]. از طرفی آلاینده‌های موجود در هوا در مباحث شهری و صنعتی دارای اهمیت ویژه‌ای است، به طوری که نیاز به هوای تمیز در شهرهای صنعتی و صنایع مختلف نیازمند جداسازی ذرات آلاینده در گستره‌ی ابعاد میکرومتری تا نانومتری است [۲]. ذرات با ابعاد ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر ۹۰٪ ناخالصی‌های موجود در هوا را تشکیل می‌دهند، باین حال نتایج نشان می‌دهد که ذرات معلق با ابعاد ۲/۵ میکرومتر بیش‌ترین تأثیر را بر روی سلامتی انسان دارد [۳، ۴]. از این رو به منظور کاهش صدمات ذکر شده بر روی سلامتی انسان‌ها، علاقه محققان به زمینه‌ی فیلتراسیون مؤثر آلاینده‌های موجود در هوا افزایش یافته است [۱ و ۵]. این سطح از جداسازی نیازمند بستری متخلخل با حفره‌هایی متناسب با اندازه ذرات آلاینده است، در حال حاضر نانو فناوری فرصت‌هایی را برای حصول این بهره‌وری ایجاد کرده است [۶]. در بین تجهیزات جداکننده، فیلترهای لیفی به طور گسترده به منظور جداسازی ذرات معلق از جریان‌های هوایی استفاده می‌شود. فیلترهای لیفی در دودسته‌ی کلی بی‌بافت و بافته‌شده تقسیم می‌شوند. امروزه فیلترهای بی‌بافت به علت نفوذپذیری بالا، سطح ویژه بالا، قابلیت کنترل توزیع اندازه حفرات، بهره‌وری بالا، مصرف پایین انرژی و جدا شدن راحت رسوبات از سطح مورد توجه قرار گرفته است. در یک فیلتر هوا، معمولاً ذرات معلق طی چندین سازوکار به الیاف فیلتر جذب می‌شوند [۷]. تحقیقات نظری در مورد فیلتراسیون هوا در مدت‌زمان طولانی توسعه داده شده است، بنابراین تحقیقات در این زمینه به بلوغ کافی رسیده است [۸]. فرآیند فیلتراسیون هوا را می‌توان به دو حالت پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی کرد. در مورد حالت ناپایدار، میزان بهره‌وری فرآیند جداسازی و مقاومت در برابر جریان با تجمع ذرات بر روی سطح فیلتر در طول زمان تغییر می‌کند. فیلتر غشایی الکتروریسی شده بحث شده در این تحقیق را می‌توان به عنوان یک فیلتر پایدار در نظر گرفت تا زمانی که غلظت ذرات موجود در هوا کم باشد به طوری که تجمعی بر روی سطح فیلتر صورت نگیرد و ضخامت غشای نانو الیاف الکتروریسی شده در طول دوره کاری تغییر نکند. مطابق نظریه کلاسیک جداسازی، حالت پایدار جداسازی می‌تواند به سازوکارهای زیر تقسیم شود [۸، ۹]. سازوکار جذب ذرات معلق هوا توسط

بسترهای لیفی بر پنج روش برخورد، نفوذ، مسدودسازی، اثر گرانشی و جذب الکترواستاتیک استوار است. در سازوکار جذب به روش مسدودسازی، الیاف به صورت نامنظم بر روی هم قرار گرفته‌اند، و ذرات معلق موجود در جریان هوا در اطراف لیف در یک جریان ساده قرار دارند. در فرضیه‌ای که مرکز ثقل ذرات معلق در هوا یک خط جریان را دنبال می‌کنند و از آن منحرف نمی‌شوند، مسدودسازی ذرات معلق در زمان تماس با سطح الیاف تحت تأثیر نیروهای ولندروالس رخ می‌دهد [۹]. در روش نفوذ، جداسازی به دلیل حرکت کاتوره‌ای ذرات معلق و برخورد به الیاف از هوا جدا می‌شوند. سازوکار جداسازی به روش جذب الکترواستاتیک به این صورت است که ذرات معلق باردار به علت داشتن بار مخالف نسبت به فیلتر جذب خواهند شد [۸]. در سازوکار جذب در اثر گرانش، به نظر می‌رسد نیروی گرانش حداقل در میان سازوکارهای ذکر شده اثر کمتری دارد و می‌توان این اثر را زمانی که اندازه ذرات از ۰/۵ میکرومتر کوچک‌تر هستند نادیده گرفت [۱۰]. در این میان، ساختارهای نانو لیفی به دلیل خواص منحصربه‌فرد و کاربردهای فراوانی که دارند، در فرآیندهای غشایی و جداسازی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با اضافه کردن یک‌لایه نازک از نانو الیاف با توزیع قطری یکنواخت و استحکام بالا به بسترهای معمولی و متداول، کارایی فیلتراسیون تا چندین برابر افزایش می‌یابد. به طور کلی کارایی فیلترهای لیفی با کاهش قطر و تخلخل افزایش می‌یابد، در این شرایط افت فشار بیش‌تر خواهد شد که بر کیفیت فیلتر (کارایی و افت فشار) اثر منفی دارد [۱۱]. از این بین، الکتروریسی یکی از راه‌های متداول تولید نانو الیاف است. راهکار الکتروریسی از محلول پلیمری روشی متداول برای تولید انواع غشاهای کامپوزیتی محسوب می‌شود. در این روش محلول پلیمری به علت اختلاف ولتاژ بین صفحه جمع‌کننده و نوک سوزن به سمت صفحه جمع‌کننده پرتاب می‌شود. عوامل محیطی مانند رطوبت و دما، عوامل محلول ریسندگی مانند غلظت و گرانی و عوامل دستگامی مانند نرخ تغذیه، ولتاژ و فاصله تا صفحه جمع‌کننده از جمله متغیرهای مؤثر در این روش هستند [۱۲]. خواص فیلترهای نانو الیافی معمولاً توسط حذف ذرات روغنی و افت فشار فیلتر با توجه به اختلاف غلظت و اختلاف فشار جریان ورودی و خروجی محاسبه می‌شود. یک فیلتر عالی دو ویژگی بهره‌وری حذف بالا و افت فشار پایین را از خود نشان می‌دهد [۱۳]. میزان بهره‌وری فرآیند جداسازی و افت فشار در طول زمان ثابت هستند و تنها به خصوصیات ذاتی فیلتر، ماهیت ذرات و

کائولین است. آب بین لایه‌ای در هالوزیت یکی از مهم‌ترین ویژگی متمایزکننده‌ی هالوزیت از کائولینیت است. هالوزیت به‌طور طبیعی شامل نانولوله‌های آلومینا سیلیکات با نسبت $Al:Si$ ۱:۱ و فرمول شیمیایی $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot n H_2O$ است که عموماً در چین، نیوزلند، آمریکا، اسپانیا، برزیل و فرانسه یافت می‌شود [۱۹]. هالوزیت ساختار لوله‌ای توخالی دارد. طول هالوزیت در محدوده ۱-۱۵ میکرومتر متغیر و دارای قطر داخلی ۱۰-۳۰ نانومتر و قطر خارجی ۵۰-۷۰ نانومتر است. ساختار لوله‌ای هالوزیت به دلیل پیچیده بودن لایه‌های این ماده معدنی به اطراف خودشان است، علت این رویداد عدم تطابق تعداد اکسیژن‌های به اشتراک گذاشته‌شده توسط دولایه تتراهدرال (SiO_4) و اکتاهدرال (AlO_6) در ساختار لایه‌ای ۱:۱ هالوزیت نانولوله است [۲۰، ۲۱].

در این پژوهش، نمونه‌های الکتروریسی به دو صورت پلیمراکریلیکی خام و حاوی ۱۰ درصد نانولوله هالوزیت به‌منظور ساخت فیلتر نانوکامپوزیتی با میزان بهره‌وری بالا صورت پذیرفت. آزمون‌های طیف‌سنجی مادون قرمز برای بررسی گروه‌های عاملی موجود و برهمکنش بین ماتریس پلیمری و نانو ذرات هالوزیت انجام گرفت. تصاویر SEM برای بررسی شکل‌شناسی نانو الیاف، آزمون EDX برای بررسی عنصری، آزمون کشش برای بررسی استحکام نمونه‌های تولیدشده و آزمون DOP برای بررسی میزان بهره‌وری فیلترها در جداسازی ذرات DOP به کار گرفته شدند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش، پودر صنعتی پلیمراکریلیکی با وزن مولکولی ۷۰ کیلو دالتون از کارخانه پلی‌اکریل اصفهان به‌عنوان بستر نانو لیفی مورد استفاده قرار گرفت. نانولوله‌های هالوزیت از شرکت Sigma-Aldrich با مشخصات سطح مخصوص: m^2/g ۶۴، نانو تیوب، قطر: ۳۰ تا ۷۰ نانومتر تهیه شد. دی‌متیل‌فرم‌آمید (DMF) با خلوص ۹۹٪ خریداری‌شده از شرکت رویالکس به‌عنوان حلال پلیمر استفاده شد. لایه‌ی بی‌باخت پلی‌پروپیلن ملت‌بلون با وزن متر مربع ۱۷ گرم بر مترمربع خریداری شده از و از شرکت بافتینه به‌عنوان زیر لایه الکتروریسی استفاده شد.

۲-۲- دستگاه‌ها

در کار حاضر از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند، دستگاه

نرخ جریان هوا بستگی دارد. پیش‌بینی می‌شود با بهبود بهره‌وری حذف به دلیل بسته شدن منافذ ساختار فیلتر و رسوب ذرات بر روی سطح آن، کاهش نفوذپذیری هوا مشاهده شود. در نتیجه، تلاش‌های فراوانی صورت پذیرفته است تا میزان بهره‌وری حذف یک فیلتر بدون کاهش نفوذپذیری هوا افزایش یابد. از آنجاکه بهره‌وری یک فیلتر توسط هر دو خاصیت ذات شیمیایی و مورفولوژی نانو الیاف تعیین می‌شود، بنابراین انتخاب ماده مناسب به همراه ایجاد ساختار مطلوب بسیار مهم است. پلیمرهای بی‌شماری از جمله پلی‌اکریلونیتریل (PAN)، پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP)، پلی‌وینیل‌استات (PVAs)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌پروپیلن (PP) و غیره، به‌عنوان فیلترهای هوا الکتروریسی شده در کارهای مختلف گزارش شده است [۱۴]. در میان پلیمرهای ذکر شده، غشاهای نانو الیافی پلی‌اکریلونیتریل به‌واسطه پایداری شیمیایی و حرارتی عالی به‌عنوان فیلترهای جداسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این برهمکنش‌های دوقطبی-دوقطبی نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل و ذرات منجر به بهره‌وری حذف بسیار بالای ذرات می‌گردد [۱۳، ۱۴]. امروزه از این پلیمر برای تهیه‌ی صنعتی لایه‌ی ماسک جهت فیلتراسیون هوا استفاده می‌شود. با وجود اینکه پلیمراکریلیکی کاربردها و ویژگی‌های بسیاری دارد، همواره راهکارهایی به‌منظور بهبود خواص و اصلاح آن انجام شده است که از این موارد می‌توان به تهیه نانوکامپوزیت پلیمری با استفاده از نانو ذرات مختلف اشاره کرد [۱۵]. در سال‌های اخیر مواد معدنی طبیعی به دلیل داشتن سطح مخصوص زیاد، ظرفیت بالای تعویض یونی و قیمت نسبتاً پایین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تا میزان توانایی این مواد در رابطه با حذف آلاینده‌ها در بستر فیلتر بررسی شود. در این بین نانو مواد در ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر اهمیت ویژه‌ای دارند. علت این عملکرد مناسب، داشتن نسبت سطح به واحد جرمی بالا است. یوم و همکاران [۱۶] با استفاده از نانو ذرات معدنی بوهمیت به‌کاربرده شده در الکتروریسی نایلون ۶ توانستند به‌وسیله ایجاد فیلتراسیون الکترواستاتیک بهره‌وری فیلتراسیون را افزایش دهند. بروشکا و همکاران [۱۷] با استفاده از ذرات معدنی آمبر و پرلیت توانستند بهره‌وری فیلتراسیون لایه‌ی ذوب ریسی را افزایش دهند. در بین جاذب‌های معدنی، نانولوله‌های هالوزیت به دلیل قیمت ارزان، فرآیند پذیری بالا، بازیابی آسان و مقاومت مکانیکی مناسب در شرایط مختلف دمایی از پتانسیل بالایی، جهت کاربرد در غشاهای جداساز برخوردار است [۱۸]. نانولوله هالوزیت از دولایه آلومینا سیلیکات تشکیل شده است و ساختار شیمیایی آن شبیه

۵-۲- ارزیابی غشای الکتروریسی

به منظور بررسی گروه‌های عاملی مواد مصرفی و برهم‌کنش میان هالوزیت و بسترن نانو لیفی از آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) برای سه نمونه‌ی هالوزیت، غشای نانو لیفی پلیمر اکریلیکی خام و غشای نانو کامپوزیتی استفاده شد. نتایج آزمون توسط نرم‌افزار Omnic بررسی شد. برای بررسی عناصر موجود در نمونه‌ی پلیمر اکریلیکی و غشای کامپوزیتی از آزمون EDX استفاده شد. از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی یکنواختی، توزیع میانگین قطری، اندازه منافذ و تخلخل سطحی نانوالیاف با استفاده از نرم افزار ImageJ استفاده شد. برای بررسی خواص مکانیکی وب‌های الکتروریسی شده از آزمون کشش تک‌محور استفاده شد. نمونه‌ها با قاب‌های کاغذی و با اندازه $5 \text{ mm}^2 \times 3$ در دستگاه کشش تک‌محور با سلول بارگذاری 50 N و نرخ کرنش 5 mm/min تا نقطه شکست تحت بارگذاری قرار گرفتند. پیش از آزمون کشش ضخامت نمونه‌ها با ضخامت‌سنج تعیین شد و پس از رسم منحنی تنش-کرنش، استحکام کششی، کار تا حد پارگی و ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه‌ها تعیین شد. اندازه‌گیری‌ها برای هر نمونه ۳ بار تکرار و میانگین آن‌ها گزارش شد. در آخر، غشای نانو لیفی پلیمر اکریلیکی خام و غشای نانو کامپوزیتی برای آزمون بهره‌وری فیلتراسیون توسط دستگاه فوتومتر ATI مجتمع صنعتی بعثت قم با استاندارد MIL-STD-282 و در شرایط استاندارد مورد استفاده قرار گرفتند. طرز کار دستگاه مطابق شکل ۱ بخش (الف) و رابطه (۱) بدین صورت است که اتومایزر، ذرات روغن دی‌اکتیل فتالات را به صورت دیسپرس یا پلی‌دیسپرس در هوا پخش می‌کند، سپس جریان حاصله را با دبی مشخصی از محفظه‌ای که در آن غشای الکتروریسی قرار می‌گیرد عبور می‌دهد، برای کالیبراسیون یک‌بار این عمل بدون قرار گرفتن فیلتر صورت می‌گیرد تا میزان جریان عبوری در این حالت مقایسه شود، مطابق فرمول (۱) N_{out} میزان ذرات خروجی از فیلتر و N_{in} میزان ذرات ورودی به فیلتر است. زمانی که فیلتر بر سر راه جریان قرار دارد به منظور اندازه‌گیری اختلاف فشار طبق رابطه (۲) و شکل ۱ بخش (ب) در دو سمت فیلتر جریان هوایی (بدون حضور ذرات روغن) با دبی مشخص بر فیلتر اعمال می‌شود تا افت فشار حاصل از فیلتر اندازه‌گیری شود. مطابق فرمول (۲) P_{in} فشار ورودی و P_{out} فشار خروجی است.

$$E = N_{out}/N_{in} \quad (1)$$

طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس VEGA\TESCAN، پمپ سرنگ دیجیتال ساخت شرکت Daiwha مدل MS-2200 ساخت کشور کره جنوبی به همراه منبع ولتاژ بالا و صفحه جمع کننده، دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز (Thermo-Nicolet Nexus 870) ساخت کشور آمریکا، دستگاه سنجش بهره‌وری فیلتراسیون شرکت ATI آمریکا استفاده شد. اندازه‌گیری آزمون کشش با دستگاه مدل INSTRON 5566 UTM ساخت آمریکا انجام شد. به منظور اندازه‌گیری آبدوستی و آبگریزی نمونه‌ها، زاویه تماس استاتیک قطره با سطح نمونه با استفاده از دوربین مدل SSCDC318P, Sony, Japan بررسی شد. برای این منظور، با استفاده از میکرو سرنگ، قطره آب دیونیزه شده با حجم ۴ میکرو لیتر بر سطح نمونه ریخته شد و این آزمایش برای هر نمونه ۳ بار تکرار شد. نتایج از ۵ ثانیه بعد از افتادن قطره بر روی سطح ثبت شد. زاویه تماس قطره با سطح با استفاده از نرم افزار ImageJ (1.634r, USA) اندازه‌گیری شد.

۳-۲- تهیه محلول پلیمری

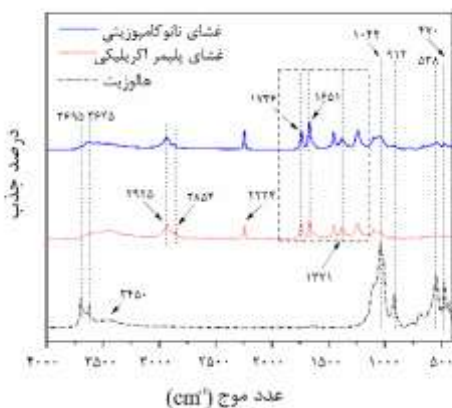
برای تهیه‌ی محلول الکتروریسی نمونه خام، حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید به همراه پودر پلیمر اکریلیکی با غلظت ۱۸٪ به مدت ۱۰ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با دور ۲۵۰ rpm قرار گرفت. برای تهیه محلول غشای نانو کامپوزیتی، حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید به همراه پودر پلیمر اکریلیکی با غلظت ۱۸٪ به مدت ۲ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با دور ۲۵۰ rpm قرار گرفت تا محلول همگنی به دست آید. سپس پودر نانولوله‌های هالوزیت به آن اضافه شد. برای رسیدن به یکنواختی در پراکندگی نانو ذرات، محلول پلیمری غشای نانو کامپوزیتی به مدت یک ساعت درون حمام فراصوت قرار گرفت.

۴-۲- الکتروریسی

برای الکتروریسی از سرنگ، منبع ولتاژ بالا، صفحه جمع کننده استوانه‌ای و پمپ سرنگ که دارای تراورس در جهت موازی با صفحه جمع کننده است استفاده شد. بدین منظور فاصله بین نوک سوزن تا صفحه جمع کننده ۱۰ سانتی‌متر، ولتاژ ۱۵-۱۶ کیلوولت و نرخ تغذیه ۰/۲ میلی‌لیتر در ساعت بهینه‌سازی شد. برای رسیدن به ضخامت مناسب جهت انجام آزمون بهره‌وری فیلتراسیون نمونه‌ها به مدت ۱۱ ساعت الکتروریسی شدند.

تهیه و مشخصه‌یابی غشای نانوکامپوزیت الکترورئسی پلی‌اکریلونیتریل/ نانولوله هالوزیت در بستر فیلتر لیفی

الکترورئسی پلیمر اکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) و غشای الکترورئسی پلیمر اکریلیکی ۱۸٪ و هالوزیت ۱۰٪ (وزنی/وزنی) از آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز استفاده شد. نتایج آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. حضور آلومینیوم و سیلیسیم موجود در هالوزیت به‌عنوان نوعی آلومینیوسیلیکات در محدوده 538 cm^{-1} و 470 cm^{-1} ملاحظه می‌شود که به دلیل ارتعاشات خمشی اتصالات Al-O-Si و Si-O-Si در ساختار هالوزیت است. پیک‌های ناحیه 3625 cm^{-1} و 3695 cm^{-1} ارتعاشات کششی O-H مربوط به پیوندهای سطح داخلی می‌باشند و پیک مربوط به 3625 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی سطح خارجی است. پیک‌های ناحیه 3450 cm^{-1} مربوط به گروه O-H کششی آب بین لایه‌ای هالوزیت است [۲۲]. پیک‌های عاملی موجود در پلیمر اکریلیکی مربوط به گروه کششی CH، C=O کششی، ارتعاش خمشی (قیچی‌وار)، C-O کششی استری و گروه C-N در 2925 cm^{-1} ، 1736 cm^{-1} ، 1371 cm^{-1} ، پیک ناحیه $1000-1300 \text{ cm}^{-1}$ و 2224 cm^{-1} به ترتیب نمایش داده می‌شود. حضور پیک‌های هالوزیت در نمونه نانوکامپوزیتی، حضور نانولوله‌های هالوزیت را در نمونه نهایی تأیید می‌کند [۲۳].



شکل (۲) طیف مادون قرمز غشای نانوکامپوزیتی، غشای اکریلیکی و هالوزیت خام

۳-۲- بررسی شکل‌شناسی غشاهای الکترورئسی

خواص شکل‌شناسی و توزیع میانگین قطر نانو الیاف تولیدشده به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ به ترتیب غشای پلیمر اکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) و غشای پلیمر اکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) به همراه هالوزیت ۱۰٪ (وزنی/وزنی) را نشان می‌دهد. در شکل ۳ قسمت (الف) ساختار نانو الیاف غشای پلیمر اکریلیکی دارای الیاف صاف، استوانه‌ای و عاری از هرگونه

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (2)$$

بهره‌وری فیلتر را می‌توان از طریق غلظت ذرات در جریان ورودی و خروجی از رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$\eta = 1 - \frac{C_{downstream}}{C_{upstream}} \quad (3)$$

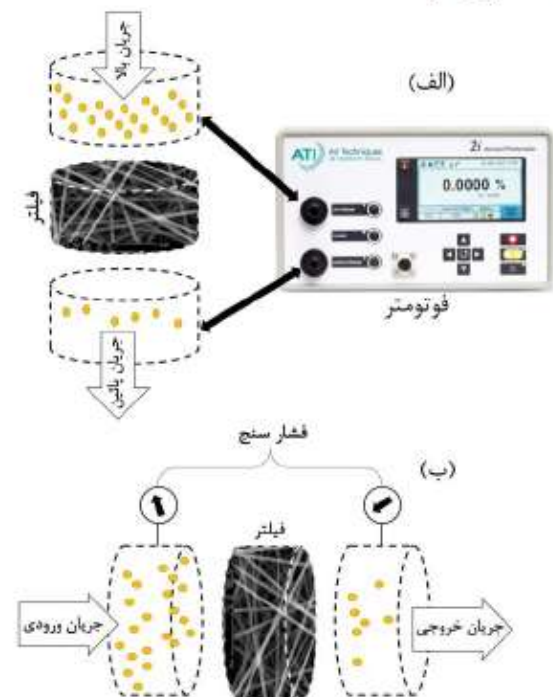
در رابطه فوق η کارایی فیلتر، $C_{downstream}$ غلظت ذرات در جریان ورودی و $C_{upstream}$ غلظت ذرات در جریان خروجی است.

فاکتور کیفیت را می‌توان به‌عنوان نسبت بین بهره‌وری فیلتراسیون و افت فشار در نظر گرفت. فاکتور کیفیت بر اساس بهره‌وری فیلتراسیون و افت فشار مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$QF = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P} \quad (4)$$

در رابطه فوق QF فاکتور کیفیت، η کارایی فیلتر و ΔP افت فشار فیلتر است.

افت فشار فیلتر است.



شکل (۱) (الف) طرح کلی دستگاه بهره‌وری فیلتراسیون.

(ب) طرح کلی دستگاه محاسبه اختلاف فشار

۳- نتایج و بحث

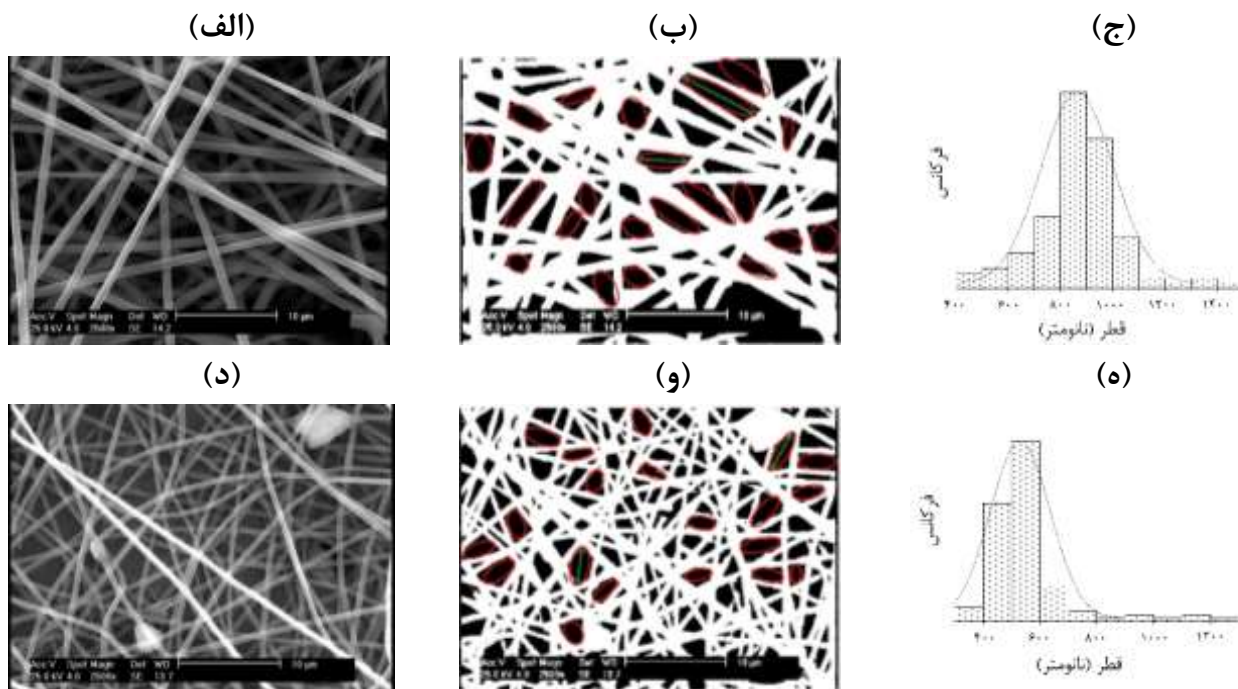
۳-۱- بررسی برهم‌کنش و ساختار شیمیایی غشاهای

الکترورئسی

به‌منظور بررسی برهم‌کنش بین هالوزیت و پلیمر اکریلیکی و گروه‌های عاملی موجود در سه نمونه‌ی هالوزیت خام، غشای

جدول (۱) نتایج حاصل از قطر نانوالیاف، تخلخل سطحی، اندازه منافذ و زاویه تماس

نمونه	قطر نانوالیاف (nm)	تخلخل سطحی (%)	اندازه منافذ (µm)	زاویه تماس (°)
غشای پلیمراکریلیکی	۸۳۴±۱۳۶	۵۸/۹±۲/۷	۲/۹±۰/۶	۱۲۲±۲
غشای نانوکامپوزیتی	۵۳۱±۱۰۴	۴۲/۸±۳/۳	۲/۵±۰/۳	۱۱۰±۱



شکل (۳) (الف) تصویر SEM غشای پلیمراکریلیکی خام (۱۸٪ وزنی/وزنی)، (ب) تصویر سیاه و سفید اندازه‌گیری اندازه منافذ سطح غشای پلیمراکریلیکی، (ج) توزیع قطر الیاف غشای پلیمراکریلیکی، (د) غشای پلیمراکریلیکی (۱۸٪ وزنی/وزنی) به همراه هالوزیت ۱۰٪ (وزنی/وزنی)، (و) تصویر سیاه و سفید اندازه‌گیری اندازه منافذ سطح غشای نانوکامپوزیتی و (ه) توزیع قطر الیاف غشای نانوکامپوزیتی

نشان داده شده است. هر دو عامل تخلخل سطحی و اندازه منافذ نقش قابل توجهی در عملکرد فیلترها در فرآیند فیلتراسیون دارند. با توجه به نتایج، افزایش قطر نانوالیاف منجر به افزایش اندازه منافذ و تخلخل سطحی شده است.

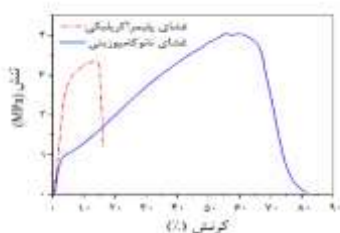
۳-۳- بررسی اندازه زاویه تماس آب

آزمون زاویه تماس برای بررسی تأثیر حضور هالوزیت بر میزان آب‌دوستی نمونه نانوالیاف کامپوزیتی در مقایسه با غشای نانولیفی پلیمراکریلیکی انجام گرفت (جدول ۱). نتایج نشان می‌دهد با افزودن ۱۰٪ وزنی نانولوله‌های هالوزیت بر بستر وب نانوالیافی زاویه تماس از ۱۲۲±۲ درجه به ۱۱۰±۱ درجه کاهش یافت. نکته حائز اهمیت این است که بعد از گذشت ۲۰ ثانیه قطره بر روی نمونه نانوالیاف کامپوزیتی حاوی ۱۰٪ وزنی هالوزیت به‌طور کامل جذب شد، این درحالی است که برای نمونه نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل تغییر چندانی در زاویه تماس

پیدا است، بنابراین محلول الکتروریسی به‌خوبی تهیه‌شده و پارامترهای مؤثر بر فرآیند الکتروریسی مقادیر مناسبی دارند. همان‌طور که در تصویر مشخص است نانو الیاف با قطر ۸۳۴±۱۳۶ نانومتر بیشتر در محدوده‌ی نزدیک به میکرو قرار دارند. غلظت اولیه الیاف پلیمراکریلیکی برای تهیه محلول ریسندگی بیشتر از غلظت‌های رایج است [۱]. پس از اضافه کردن نانولوله‌های هالوزیت به علت کاهش گرانیوی محلول قطر الیاف به‌دست‌آمده تا حدود ۵۳۱±۱۰۴ نانومتر کاهش یافت (شکل ۳ قسمت (د)). نانولوله‌های هالوزیت با فاصله انداختن بین زنجیره‌های پلیمری و کاهش درهم تنیدگی زنجیرها افت گرانیوی را سبب می‌شوند [۲۶]. تخلخل سطحی و اندازه منافذ نمونه‌های الکتروریسی شده با استفاده از تجزیه و تحلیل میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی محاسبه و در جدول ۱ گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۳ (ب) و (و)

تهیه و مشخصه‌یابی غشای نانوکامپوزیت الکتروریسی پلی‌اکریلونیتریل / نانولوله هالوزیت در بستر فیلتر لیفی

محاسبه کار تا حد پارگی به منظور بررسی رفتار مکانیکی این دو سامانه با توجه به سطح زیر نمودار منحنی تنش-کرنش محاسبه شد. مطابق جدول ۳ کار تا حد پارگی برای غشای نانو لیفی پلیمراکریلیکی برابر $J \pm 0.3/3.6$ است که با افزایش هالوزیت این مقدار تا $J \pm 0.4/7.4$ افزایش پیدا می‌کند. عملکرد مکانیکی بر مبنای تقویت‌کنندگی جزء تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، متکی به انتقال بار مؤثر ماتریس به جزء تقویت‌کننده است. زمانی می‌توان به این عملکرد دست پیدا نمود که پرکننده‌ها به‌طور یکنواخت در ماتریس پراکنده شوند. در این پژوهش برهمکنش مؤثر بین دیواره‌های هالوزیت و پلیمراکریلیکی ناشی از پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل سطحی هالوزیت و گروه سیانید پلیمراکریلیکی است. مطابق جدول ۳ حضور نانولوله‌های هالوزیت منجر به افزایش ازدیاد طول تا حد پارگی شده است؛ که می‌توان به دلیل افزایش چگالی اتصال به ماتریس پلیمری از طریق پیوندهای هیدروژنی میان دیواره‌های هالوزیت و پلیمراکریلیکی مرتبط باشد.



شکل (۴) نمودار تغییرات تنش کرنش نمونه غشای پلیمراکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی

۳-۶- افت فشار و آزمون DOP

در عملیات فیلتراسیون و جداسازی آلاینده‌ها، افزایش کارایی به همراه کاهش افت فشار مدنظر و مطلوب است، لذا در صورتی که بتوان با داشتن کارایی بالا افت فشار پایین را نیز به‌همراه داشت، یک پیشرفت چشم‌گیر در جداسازی ذرات معلق موجود در هوا اتفاق خواهد افتاد. به منظور بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های هالوزیت به محلول الکتروریسی پلیمراکریلیکی بر عملکرد فیلتراسیون هوا، بهره‌وری فیلتر برای نمونه‌های غشای پلیمراکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی کار حاضر، بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون بهره‌وری فیلتر برای نمونه‌ها نشان از بهبود بهره‌وری فیلتر نانوکامپوزیت اکریلیکی دارد. نتایج نشان می‌دهد غشای نانوکامپوزیتی با میزان فیلتراسیون ۹۵/۵٪ ذرات دیسپرس روغن، در مقایسه با غشای پلیمراکریلیکی دارای بهره‌وری بالاتری است. بهره‌وری فیلتر مطابق فرمول (۵) محاسبه می‌شود:

مشاهده نشد. افزایش ۱۰ درصد هالوزیت به بستر نانولیفی به دلیل قرارگیری گروه‌های آب‌دوست هیدروکسیل بر روی سطح هالوزیت، کاهش زاویه تماس را برای نمونه نانوکامپوزیتی به همراه داشته است.

۳-۴- آنالیز عنصری به‌وسیله‌ی آزمون EDX

برای بررسی عناصر تشکیل‌دهنده غشای نانوکامپوزیتی و حصول اطمینان از وجود نانولوله‌های هالوزیت درون ماتریس، از آزمون EDX استفاده شد. درصد ترکیب عنصری غشای نانوکامپوزیتی و غشای پلیمراکریلیکی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که غشای پلیمراکریلیکی شامل عناصر کربن، اکسیژن و نیتروژن بوده و فاقد عناصر آلومینیوم و سیلیسیم است و با توجه به ساختار شیمیایی هالوزیت و با افزودن هالوزیت به محلول ریسندگی عناصر آلومینیوم و سیلیسیم در لایه نهایی مشاهده شد.

جدول (۲) آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس غشای پلیمراکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی

عنصر					نمونه
Si	Al	O	N	C	
۰	۰	۵/۰۷	۱۸/۴۱	۷۶/۵۲	غشای پلیمر اکریلیکی
۳/۸۵	۵/۳۸	۲۱/۷۴	۱۱/۸۷	۵۷/۱۶	غشای نانوکامپوزیتی

۳-۵- بررسی استحکام مکانیکی غشا

خواص مکانیکی غشای نانوکامپوزیتی توسط آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفت. منحنی تنش-کرنش غشای نانو لیفی پلیمراکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) و غشای الکتروریسی پلیمراکریلیکی ۱۸٪ و هالوزیت ۱۰٪ (وزنی/وزنی) در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین نتایج استحکام مکانیکی، ازدیاد طول تا حد پارگی، و کار تا حد پارگی در جدول ۳ خلاصه شده است. با افزودن مقادیر کم نانو ذرات در داخل بستر ایاف و نانوکامپوزیت پلیمری، در هنگام اعمال تنش انتقال بار صورت گرفته و سبب بهبود خواص لایه نهایی خواهد شد [۱۹ و ۲۳]. با بررسی شکل ۴ و جدول ۳ می‌توان افزایش استحکام مکانیکی غشا نانوکامپوزیتی در مقایسه با غشا پلیمری را به‌خوبی مشاهده کرد. از طرف دیگر، با افزودن هالوزیت در ماتریس پلیمراکریلیکی و انتقال بار، سُرخوردگی لایه‌ها نیز بهبود یافته و ازدیاد طول نیز افزایش می‌یابد [۲۴]. از این رو

جدول (۳) مشخصات مکانیکی غشای پلیمراکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی

نمونه	استحکام مکانیکی (MPa)	ازدیاد طول تا حد پارگی (%)	کار تا حد پارگی (J)
غشای پلیمراکریلیکی	۳/۰±۹/۳۳	۱۵/۱±۳۴/۹	۳/۰±۶/۳
غشای نانوکامپوزیتی	۴/۰±۸/۴۶	۶۵/۴±۶۷/۱	۴/۰±۷/۴

دانسیتته فشردگی فیلتر لیفی با ثابت بودن قطر الیاف کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تفاوت در اندازه منافذ (یا عملکرد فیلتراسیون)، در بین فیلترهای صنعتی با تغییر قطر الیاف حاصل می‌شود و جریان سیال هنگام عبور آروسول از یک فیلتر به طور مستقیم تحت تأثیر ساختار منافذ قرار می‌گیرد، بنابراین اثر اندازه منافذ از طریق قطر نانوالیاف بر عملکرد فیلتراسیون در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند فیلتراسیون اندازه منافذ تأثیر قابل توجهی بر مقاومت جریان در هنگام عبور جریان گاز و مایع از منافذ بین فیلتر دارد [۲۷]. همانطور که قبلاً ذکر شد، افزایش قطر نانوالیاف منجر به افزایش اندازه منافذ و تخلخل سطحی فیلتر می‌شود. از طرفی، پارامتر افت فشار در جداسازی ذرات دیسپرس روغن در نرخ جریان یکسان 32 Lit min^{-1} ، در غشای نانوکامپوزیتی با میانگین قطر 531 ± 104 نانومتر نسبت به غشای پلیمراکریلیکی با میانگین قطر الیاف 834 ± 136 نانومتر به ترتیب از ۷۱۸ پاسکال به ۴۱۶ پاسکال کاهش داشته است. روند مشابهی در نرخ جریان 87 Lit min^{-1} مشاهده می‌شود، به طوری که افت فشار برای غشای پلیمراکریلیکی از ۱۴۷۷ پاسکال به ۲۲۶۰ پاسکال برای غشای نانوکامپوزیتی تغییر می‌کند. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت برای غشای نانوکامپوزیتی افت فشار اولیه فیلتر با کاهش متوسط اندازه منافذ، افزایش یافته است. همچنین برای غشای پلیمراکریلیکی با توجه به متوسط اندازه منافذ و تخلخل سطحی بیشتر، افت فشار کمتری نسبت به نمونه نانوکامپوزیتی مشاهده شد، که تمامی نتایج در توافق با قانون داریسی است.

$$\Delta P = \frac{64\mu U_0 W \alpha^{0.5} (1+56\alpha^3)}{d_f^2 \rho_f} \quad (6)$$

در رابطه (۶) μ ویسکوزیته دینامیک برای هوا، U_0 نرخ جریان هوا، W وزن اولیه فیلتر و ρ_f دانسیته فشردگی فیلتر لیفی است. بر اساس معادله فوق، افت فشار با نرخ جریان رابطه

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-4\alpha EL}{\pi d_f (1-\alpha)}\right] \quad (5)$$

مطابق فرمول (۵) دانسیته فشردگی فیلتر لیفی (بدون واحد)، d_f قطر لیف برحسب متر، E کارایی کلی تک لیف (بدون واحد) و L ضخامت فیلتر برحسب متر است. با توجه به فرمول (۵) کاهش قطر الیاف منجر به افزایش بهره‌وری فیلتر خواهد شد. بر اساس رابطه فوق بهره‌وری جداسازی یک فیلتر با دانسیته فشردگی فیلتر لیفی و کارایی تک لیف همبستگی منفی دارد. علاوه بر این، وب نانو الیافی با قطر کمتر بهره‌وری جداسازی تک لیف را از طریق بهبود نفوذ و مسدودسازی افزایش می‌دهد. بنابراین برای فیلترهای با ضخامت و دانسیته فشردگی فیلتر لیفی یکسان، کاهش قطر نانو الیاف می‌تواند بهره‌وری جداسازی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد [۱۴ و ۲۵]. در این مطالعه با کاهش $36/4\%$ درصد قطر نانو الیاف میزان بهره‌وری در حدود ۶ درصد افزایش داشت. در این قسمت نتیجه‌گیری کلی به این شکل است که عملکرد فیلتراسیون هوا با افزودن ۱۰ درصد نانولوله‌های هالوزیت به غشای پلیمراکریلیکی به علت افزایش زبری سطح و کاهش قطر نانو الیاف افزایش می‌یابد. به منظور بررسی پایداری غشاهای نانو لیفی و تعیین بهترین شرایط عملکردی فیلتر، تأثیر نرخ جریان، افت فشار و فاکتور کیفیت مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نرخ جریان هوا بهره‌وری جداسازی برای ذرات معلق جامد و روغنی موجود در هوا کاهش می‌یابد. در نرخ‌های جریان بیشتر از محبوس‌سازی کافی ذرات معلق در فیلتر لیفی ممانعت می‌شود چراکه زمان لازم برای برهمکنش ذرات معلق با فیلتر لیفی از طریق نفوذ براونی کاهش می‌یابد [۲۶]. به‌طور کلی، بهره‌وری جداسازی با افزایش نرخ جریان هوا کاهش می‌یابد. با این وجود، نانو الیاف با قطر کمتر نه تنها منجر به افزایش بهره‌وری جداسازی ذرات دیسپرس روغن و ذرات معلق در هوا می‌شود، بلکه با مقاومت بیشتر در مقابل جریان هوا، افت فشار بیشتری را به دنبال دارد. اندازه منافذ فیلتر با قطر الیاف و دانسیته فشردگی فیلتر لیفی مرتبط است، به طوری که اندازه منافذ با افزایش قطر الیاف با دانسیته فشردگی ثابت، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، اندازه منافذ با کاهش

جدول (۴) جدول بهره‌وری فیلتراسیون و افت فشار

افت فشار با دبی Q=87 (lit/min)	افت فشار با دبی Q=32 (lit/min)	فاکتور کیفیت (Pa ⁻¹)	بهره‌وری فیلتر (%)	نمونه
اختلاف فشار ۱۴۷۷ پاسکال	اختلاف فشار ۴۶۰ پاسکال	۰/۰۰۴۳	۸۹	غشای پلیمراکریلیکی
اختلاف فشار ۲۲۶۰ پاسکال	اختلاف فشار ۷۱۸ پاسکال	۰/۰۰۴۷	۹۵/۵	غشای نانوکامپوزیتی

را از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که به علت درصد بهره‌وری کمتر غشای پلیمراکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) نسبت به غشای اکریلیکی، با وجود افت فشار کمتر غشای اکریلیکی از مقدار فاکتور کیفیت کمتری نسبت به غشای نانوکامپوزیتی برخوردار است.

۷-۳- سازوکار جذب ذرات معلق

در فیلترهای نانولیفی سازوکار جذب ذرات معلق هوا توسط تک لیف از طریق برخورد، نفوذ، مسدودسازی، اثر گرانش و جذب الکترواستاتیک بررسی می‌شود. همان‌طور که بیان شد ذرات دیسپرس روغن به‌طور مؤثری بر روی سطح نانو لیف به دام افتاده است. اثر نفوذ و مسدودسازی نقش مؤثرتری در سازوکار جذب ذرات دیسپرس روغن با متوسط قطر ۵۰۰ نانومتر ایفا می‌کنند، با کاهش قطر نانوالیاف سازوکار جذب ذرات روغن دیسپرس شده در اثر مسدودسازی افزایش می‌یابد. ذکر این نکته الزامی است که ذرات با متوسط قطر بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر از طریق سازوکار اثر گرانشی و برخورد جذب خواهند شد [۳۰]. جذب ذرات معلق هوا توسط نانو الیاف به عدد پکلت، عدد نادسن و دانسیته فشردگی فیلتر لیفی بستگی دارد. دانسیته فشردگی فیلتر لیفی وزن نانو الیاف در واحد طول است که به چگالی و ضخامت فیلتر بستگی دارد. عدد پکلت بیانگر قدرت نسبی بین سازوکار مسدودسازی و نفوذ است. عدد نادسن نیز بیانگر نسبت متوسط مسیر آزاد مولکول‌های هوا به اندازه ذرات است، بنابراین هر چه عدد پکلت کوچک‌تر و عدد نادسن بزرگ‌تر باشد سازوکار جذب ذرات معلق از طریق نفوذ قوی‌تر است [۳۱-۳۲]. با این وجود در اثر افزایش نرخ جریان، جذب ذرات دیسپرس روغن از طریق مکانیزم نفوذ کاهش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که غشای نانوکامپوزیتی پلی‌اکریلونیتریل/نانولوله هالوزیت، با توجه به مورفولوژی و شیمی سطح نانوالیاف، همچنین برهمکنش‌های مؤثر با ذرات روغن دیسپرس شده، منجر به افزایش جذب این ذرات و بهره‌وری فیلتر می‌شود که برای کارهای تجاری توصیه گردد. با توجه به قرارگیری نانولوله‌های هالوزیت در سطح وب حذف آلاینده‌ها به روش جذب سطحی

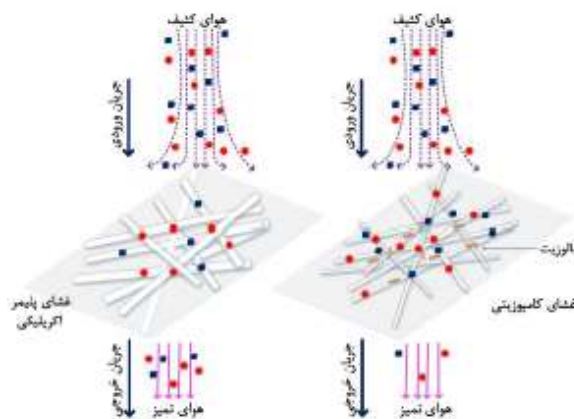
مستقیم دارد. علاوه بر این از معادله تجربی دیویس می‌توان دریافت پارامتر افت فشار رابطه‌ی معکوس با مربع قطر نانو الیاف دارد، این نتایج در توافق با نتایج تجربی است [۱۴]. شماتیک فیلترهای نانو الیافی غشای پلیمراکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجاکه بستر و ساختار فیلتر از عوامل مهم و تأثیرگذار بر بهره‌وری جداسازی فیلتر است، با توجه به نتایج آزمون و شکل‌شناسی سطح می‌توان گفت با کاهش قطر الیاف و افزایش سطح تماس، میزان تخلخل کاهش و در نتیجه میزان بهره‌وری جداسازی ذرات دیسپرس روغن افزایش یافته است [۲۸]. علاوه بر این، استفاده از نانولوله‌های هالوزیت در بستر غشای علاوه بر افزایش چگالی سطح، مقاومت فیلتر در برابر جریان هوا را نیز افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است نانو الیاف با میانگین قطر کمتر به‌طور مؤثرتری ذرات معلق در هوا را حذف می‌کند. کاهش قطر الیاف به کمتر از میکرون و به عبارتی قرار گرفتن در محدوده نانو، منجر به پدیده سُرش هوا (سرعت غیر صفر جریان هوا در سطح نانو لیف) خواهد شد که خود منجر به کارایی بالاتر فیلتر نسبت به حالتی که سُرش وجود ندارد، می‌شود. از طرفی نسبت به روش‌های متداول جداسازی ذرات معلق زمانی که جداسازی به‌وسیله نانو الیاف انجام می‌شود، عمل جداسازی از عمق به سطح تغییر کرده، در واقع این عمل باعث می‌شود که مجاری هوا در بستر، توسط ذرات معلق موجود در هوا مسدود نگردد و کارایی و افت فشار را تحت تأثیر قرار ندهد، همچنین با توجه به کاهش اندازه حفره‌ها دبی جریان هوا دارای افت فشار بیشتری در دو سمت فیلتر می‌شود [۲۹]. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اگرچه میزان بهره‌وری فیلتراسیون افزایش یافته است اما به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، افت فشار بیشتر شده است. به منظور بررسی عملکرد کمی غشاهای در این تحقیق، فاکتور کیفیت به‌عنوان پارامتر استاندارد مرتبط با میزان بهره‌وری فیلتر و افت فشار در نرخ جریان 32 Lit min^{-1} محاسبه و در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود غشای پلیمراکریلیکی ۱۸٪ (وزنی/وزنی) با افت فشار کمتر نسبت به غشای نانوکامپوزیتی عملکرد بهتری

گفت استفاده از نانولوله‌های معدنی هالوزیت راهی سریع، آسان و کم‌هزینه برای افزایش بهره‌وری فیلتراسیون است.

مراجع

- [1] C. W. Lou, Y. H. Shih, C. H. Huang, S. A. Lee, Y. S. Chen, and J. H. Lin (2020) "Filtration Efficiency of Electret Air Filters Reinforced by Titanium Dioxide", *Applied Sciences*, 10(8), 2686.
- [2] K. Yoon, B. S. Hsiao, and B. Chu (2008) "Functional nanofibers for environmental applications", *Journal of Materials Chemistry*, 18, 5326-5334.
- [3] L. Nikasinovic, J. Just, F. Sahraoui, N. Seta, A. Grimfeld, and I. Momas (2006) "Nasal inflammation and personal exposure to fine particles PM_{2.5} in asthmatic children", *Journal of allergy and clinical immunology*, 117, 1382-1388.
- [4] A. Wei, and Z. Meng (2006) "Evaluation of micronucleus induction of sand dust storm fine particles (PM_{2.5}) in human blood lymphocytes", *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 22, 292-297.
- [5] F. Liu, M. Li, F. Li, K. Weng, K. Qi, C. Liu, and J. He, (2020) "Preparation, and Properties of PVDF/Fe₃O₄ Nanofibers with Magnetic and Electret Effects and their Application in Air Filtration", *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(4), 1900856.
- [6] R. Gopal, S. Kaur, C. Y. Feng, C. Chan, S. Ramakrishna, S. Tabe, and T. Matsuura (2007) "Electrospun nanofibrous polysulfone membranes as pre-filters: Particulate removal", *Journal of membrane science*, 289, 210-219.
- [7] J. J. De Hartog, T. Lanki, K. L. Timonen, G. Hoek, N. A. Janssen, A. Ibal-Mulli, A. Peters, J. Heinrich, T. H. Tarkiainen, and R. Van Grieken (2008) "Associations between PM_{2.5} and heart rate variability are modified by particle composition and beta-blocker use in patients with coronary heart disease", *Environmental health perspectives*, 117, 105-111.
- [8] D. Lv, M. Zhu, Z. Jiang, S. Jiang, Q. Zhang, R. Xiong, and C. Huang (2018) "Green electrospun nanofibers and their application in air filtration", *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(12), 1800336.
- [9] M. Zhu, J. Han, F. Wang, W. Shao, R. Xiong, Q. Zhang, H. Pan, Y. Yang, S. K. Samal, F. Zhang, and C. Huang (2017) "Electrospun nanofibers membranes for effective air filtration", *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(1), p.1600353.
- [10] G. Q. Gu, C. B. Han, C. X. Lu, C. He, T. Jiang, Z. L. Gao, and Z. L. Wang (2017) "Triboelectric nanogenerator enhanced nanofiber air filters for efficient particulate matter removal", *ACS nano*, 11(6), 6211-6217.
- [11] N. Wang, X. Wang, B. Ding, J. Yu, and G. Sun (2012) "Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration", *Journal of Materials Chemistry*, 22, 1445-1452.

و جداسازی، به‌طور هم‌زمان ممکن می‌شود. از این خاصیت می‌توان در فیلترهای تصفیه پساب متکی بر برهمکنش یون‌های فلزی با گروه‌های عاملی موجود بر روی سطح جاذب قرار گرفته بر بستر نانولیفی استفاده کرد که امکان دو مرحله فیلتراسیون به صورت هم‌زمان را فراهم می‌آورد و کارایی سیستم را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله می‌توان پتانسیل‌های کاربردی محصول را در استفاده از ماسک‌های تنفسی، فیلتر هوا با کارایی بالا و همچنین فیلترهای تصفیه پساب طبقه‌بندی کرد. ذکر این نکته الزامی است که ضخامت و درصد نانوذره در بستر وب الکترونیسی نانو کامپوزیتی با توجه به ماژول غشایی و نوع جداسازی تعیین می‌شود.



شکل (۵) شماتیک فیلتراسیون هوا به‌وسیله‌ی غشای پلیمری‌اکریلیکی و غشای نانوکامپوزیتی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر نانولوله‌های هالوزیت بر ساختار و عملکرد غشای نانوکامپوزیتی به‌منظور استفاده در فیلترهای هوا بررسی شد. نتایج نشان داد، افزودن نانولوله‌های هالوزیت به محلول منجر به توزیع یکنواخت‌تر و کاهش اندازه متوسط الیاف می‌شود، به‌طوری‌که میانگین قطر الیاف از 834 ± 136 نانومتر برای غشای پلیمری‌اکریلیکی به 531 ± 104 نانومتر برای غشای نانوکامپوزیتی رسیده است. حضور نانو ذرات هالوزیت با آزمون‌های طیف‌سنجی مادون قرمز، میکروسکوپ الکترونی پویشی و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس به اثبات رسید. آزمون DOP به‌منظور بررسی بهره‌وری فیلتراسیون و بهره‌وری جداسازی نشان داد غشای نانوکامپوزیتی با بهره‌وری جداسازی ۹۵/۵٪ ذرات روغن دی‌سپرس شده به نسبت غشای پلیمری‌اکریلیکی ۸۹٪ بهره‌وری بهتری دارد. در نهایت می‌توان

- membranes for antimicrobial breath mask applications", *Current Research in Biotechnology*, 1, pp.1-10.
- [25] J. L. Gras (1994) "Air filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters [Book Review] ", *Clean Air: Journal of the Clean Air Society of Australia and New Zealand*, 28, no. 4: 42.
- [26] Y. Wang, W. Li, Y. Xia, X. Jiao, and D. Chen (2014) "Electrospun flexible self-standing γ -alumina fibrous membranes and their potential as high-efficiency fine particulate filtration media", *Journal of Materials Chemistry A*, 2(36), 15124-15131.
- [27] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi (2018) "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities", *Separation and Purification Technology*, 201, 71-78.
- [28] H. Ma, B. S. Hsiao and B. Chu (2011) "Thin-film nanofibrous composite membranes containing cellulose or chitin barrier layers fabricated by ionic liquids", *Polymer*, 52, 2594-2599.
- [29] S. Thomas, R. Muller and J. Abraham (2016) "Rheology and Processing of Polymer Nanocomposites", *John Wiley & Sons*.
- [30] V. Kirichenko, Y. Filatov, and A. Budyka (2010) "Electrospinning of micro-and nanofibers: fundamentals in separation and filtration processes", *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 8, no. 4.
- [31] C. H. Hung, and W. W. F. Leung (2011). "Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime", *Separation and purification technology*, 79(1), 34-42.
- [32] V. V. Kadam, L. Wang, and R. Padhye, (2018). "Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants—A review". *Journal of Industrial Textiles*, 47(8), 2253-2280.
- [12] I. H. Chen, C. C. Wang, and C. Y. Chen (2010) "Fabrication and structural characterization of polyacrylonitrile and carbon nanofibers containing plasma-modified carbon nanotubes by electrospinning", *The Journal of Physical Chemistry C*, 114, 13532-13539.
- [13] R. Al-Attabi, Y. Morsi, W. Kujawski, L. Kong, J. A. Schütz, and L. F. Dumée (2019) "Wrinkled silica doped electrospun nano-fiber membranes with engineered roughness for advanced aerosol air filtration", *Separation and Purification Technology*, 215, 500-507.
- [14] J. J. Huang, Y. Tian, R. Wang, M. Tian, and Y. Liao (2020) "Fabrication of bead-on-string polyacrylonitrile nanofibrous air filters with superior filtration efficiency and ultralow pressure drop", *Separation and Purification Technology*, 237, 116377.
- [15] S. Nataraj, K. Yang and T. Aminabhavi (2012) "Polyacrylonitrile-based nanofibers-A state-of-the-art review", *Progress in polymer science*, 37, 487-513.
- [16] B. Y. Yeom, E. Shim, and B. Pourdeyhimi (2010) "Boehmite nanoparticles incorporated electrospun nylon-6 nanofiber web for new electret filter media", *Macromolecular research*, 18, 884-890.
- [17] A. Brochocka, K. Majchrzycka, and K. Makowski (2013) "Modified melt-blown nonwovens for respiratory protective devices against nanoparticles", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.
- [18] L. Deng, P. Yuan, D. Liu, F. Annabi-Bergaya, J. Zhou, F. Chen, and Z. Liu (2017) "Effects of microstructure of clay minerals, montmorillonite, kaolinite and halloysite, on their benzene adsorption behaviors", *Applied Clay Science*, 143, 184-191.
- [19] M. Liu, Z. Jia, D. Jia, and C. Zhou (2014) "Recent advance in research on halloysite nanotubes-polymer nanocomposite", *Progress in polymer science*, 39, 1498-1525.
- [20] L. Yu, H. Wang, Y. Zhang, B. Zhang, and J. Liu (2016) "Recent advances in halloysite nanotube derived composites for water treatment", *Environmental Science: Nano*, 3, 28-44
- [21] M. Kotal and A. K. Bhowmick (2015) "Polymer nanocomposites from modified clays: Recent advances and challenges", *Progress in polymer science*, 51, 127-187.
- [22] F. Shahamati Fard, S. Akbari, E. Pajootan, and M. Arami (2016) "Enhanced acidic dye adsorption onto the dendrimer-based modified halloysite nanotubes", *Desalination and Water Treatment*, 57(54), pp.26222-26239.
- [23] Zan, Liu, Qin Xixi, Qin Dunzhong, and Cheng Zhilin (2017). "Preparation and mechanical properties of PAN/HNTs composite nanofibers", *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology* 19, no. 1, 92-98.
- [24] M. Hashmi, S. Ullah, and I. S. Kim (2019) "Copper oxide (CuO) loaded polyacrylonitrile (PAN) nanofiber

Fabrication and Characterization of electrospun nanocomposite based on Acrylic /Halloysite nanotubes for fibrous filter media

Erfan Sedighi Moshtaghin, Mohammad Hassan Kanani-Jazi, and Somaye Akbari*

Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Separation of airborne pollutants such as dust, bacteria, and viruses play an important role in humanitarian health. In this field, acrylic polymer with many properties such as electrospinning capability, thermal resistance, and high chemical resistance is attracting scientific and commercial interests as an active layer for fibrous filter media. The aim of this paper is to utilize low cost, natural resource, biocompatible, and high mechanical strength Halloysite nanotubes (HNTs) for improving filtration efficiency. In this regard, acrylic polymer nanofibers were fabricated by solution electrospinning method on nonwoven support with and without HNTs to fabricate nanocomposite and acrylic membrane. The structure and morphology of membranes were examined by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), electron scanning electron microscopy (SEM), and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Furthermore, the mechanical properties of the samples were analyzed using a single-axis tensile test. Finally, in order to evaluate the filtration efficiency measurement, DOP (dispersed oil particle) were utilized. The results reveal that the nanocomposite membrane has a better performance comparing to the acrylic membrane due to the separation of 95.5% of DOP particles.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: February 3, 2020

Received in revised form: July 30, 2020

Accepted: November 14, 2020

Key words:

Fibrous filter media

Filtration efficiency

Halloysite nanotubes

Composite nanofibers

Separation

DOP (dispersed oil particle)

* Corresponding author

akbari_s@aut.ac.ir