

سنتز غشای نانوالیاف پلی بوتیلن ترفتالات / نانولوله کربنی چند جداره و بررسی کاربرد در گیراندازی ۲-کلرواتیل اتیل سولفید

Synthesis of nanocomposite membranes based on polybutylene terephthalate / carbon nanotube for adsorption of 2-chloroethyl ethyl sulfide

حمید عابدی^{۱*}، علی روستایی^۱

۱- پژوهشگاه علوم انتظامی و مطالعات اجتماعی ناجا، پژوهشکده تجهیزات و فناوری های انتظامی، کد پستی ۶۵۱۶-۱۹۳۹۵

چکیده

در مطالعه حاضر غشایی از پلی بوتیلن ترفتالات که با نانولوله کربنی چند جداره دوپ شده است، توسط فرآیند الکتروریسی نانوالیاف تهیه شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانو کامپوزیت سنتز شده، ساختار همگن و سطح متخلخل فیلم را ثابت کرد. قابلیت و کارایی الیاف تهیه شده با بررسی جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید به عنوان یک ترکیب شبه گاز خردل، مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای تأثیرگذار بر مورفولوژی نانوالیاف از جمله غلظت پلیمر و مقدار نانولوله کربن چند جداره بررسی و بهینه سازی شد. متغیرهای مهم در فرآیند جذب عامل شبه خردل، شامل: قدرت یونی، زمان جذب و دما بودند. برای این منظور، از مدل سازی چند متغیره بر اساس طراحی آزمایش با استفاده از طرح مرکب مرکزی و روش سطح-پاسخ، برای بهینه سازی عوامل تأثیرگذار در فرآیند استفاده شد. راندمان حذف ۹۶ درصد در زمان جذب ۱۲ دقیقه و دمای جذب ۳۰°C و غلظت اولیه عامل شبه خردل ۲۰ mg L⁻¹، حاصل شد. نتایج بررسی ایزوترمهای جذب نشان داد که فرآیند جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید توسط نانوالیاف توسعه داده شده، از مدل لانگمویر (R² = ۰/۹۹۱) و فرندلج (R² = ۰/۹۸۶) تبعیت می کند. نتایج این پژوهش نشان داد که غشای نانو کامپوزیتی PBT/MWCNTs کارایی مناسبی در جذب و گیراندازی عامل شبه خردل ۲-کلرواتیل اتیل سولفید دارند و می توانند در جهت توسعه پوشش های مقاوم در برابر این ترکیبات استفاده شوند.

۱- مقدمه

پوست حیوانات مورد بررسی قرار گرفت [۲]. در سال ۱۹۱۷ برای اولین بار در جنگ جهانی اول توسط آلمان به عنوان سلاح شیمیایی در شهر پیر بلژیک به کار رفت و تعداد زیادی کشته و مجروح به جای گذاشت و در سال های بعد نیز توسط کشورهای دیگری از جمله عراق در جنگ استفاده شد. این یک ترکیب شیمیایی تاول زا است که هنوز هیچ روش درمانی موثری برای مقابله با اثرات آن وجود ندارد. سولفور موستارد در دوز بالا کشنده بوده و باعث آسیب های شدید به نواحی خارجی بدن مانند پوست، چشم و مجاری تنفسی می شود [۲]. بیشترین اثرات سمی سولفور موستارد بر روی

عوامل جنگ شیمیایی به دلیل مسمومیت بالای این ترکیبات و سهولت نسبی استفاده از آنها، تهدید جدی برای نیروهای نظامی و غیرنظامی است. یکی از پرکاربردترین عوامل جنگ شیمیایی، بیس (۲-کلرو اتیل) سولفید است که بیشتر به عنوان عامل خردل شناخته می شود [۱]. این ترکیب که به نام های مختلفی از جمله سولفور موستارد، خردل گوگردی، گاز خردل یا دی کلرو دی اتیل سولفید نامیده می شود، اولین بار در سال ۱۸۲۲ توسط دسپرتز تهیه شد و خاصیت تاول زایی آن در سال ۱۸۸۶ توسط میسر در

کلمات کلیدی

گاز شبه خردل، پلی بوتیلن ترفتالات، لباس محافظ، غشای نانو کامپوزیتی، نانوالیاف

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: h.abedi64@gmail.com

الکتریکی در کاربردهای متنوعی از جمله ساخت نانو مواد، بیوشیمی و مواد پیشرفته مورد توجه فوق العاده ای قرار گرفته اند [۱۴]. کای و همکاران [۱۵] از نانولوله های کربنی چند جداره، به عنوان جاذب برای جذب بیس فنول A، ۴-نرمال نونیل فنول و ۴-ترشری-کتیل فنول استفاده کرد که عملکرد فوق العاده ای را نشان داد. اخیراً Du و همکاران [۱۶] غشای پلی آنیلین دوپ شده با نانولوله های کربنی چند جداره، تهیه کردند که بازده جذب بالاتری نسبت به پلی آنیلین خام به نمایش گذاشت.

یک روش موفقیت آمیز برای تهیه چنین نانوکامپوزیت‌هایی، رسوب الکتریکی اکسیدهای غیرآلی در فیلم‌های آلی از طریق پالایش الکتریکی است. روند الکتروسیسی قبلاً شرح داده شده است [۱۷، ۱۸]. به دام افتادن آنالیت‌های هدف در فیلم‌های نانوساختار به دلیل افزایش سطح افزایش یافته که استفاده از حداقل مقدار نانوالیاف برای جذب را توجیه می‌کند [۱۹].

پلیمر پلی بوتیل ترفتالات (PBT)، ترکیبی نیمه بلوری بوده که عضوی از گروه ترموپلاستیک‌های مهندسی است. این پلیمر با ویژگی‌های اصلی زیر مشخص می‌شود: الف) سختی و استحکام بالا؛ ب) مقاومت بالا در دمای پایین؛ ج) مقاومت دمایی بالا؛ د) مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی؛ ذ) مقاومت بالا در برابر سوخت‌ها، روغن‌ها، چربی‌ها و بسیاری از حلال‌ها، ر) ضریب انبساط کم، و ز) جذب آب کم.

این خصوصیات عالی PBT را قادر ساخته است تا به یکی از پرکاربردترین پلیمرها در چندین زمینه کاربردی تبدیل شود [۲۰]. علاوه بر این، PBT حاوی ساختار مزدوج π است و انتظار می‌رود که به راحتی از طریق برهمکنش π - π و آبگریز، ترکیبات آلی را به راحتی جذب کند. بنابراین، نانوکامپوزیت مبتنی بر PBT می‌تواند به عنوان یک پوشش ییافی برای جذب انواع ترکیبات آلی ارزیابی شود.

در مطالعه حاضر، سه غشای الیاف الکتروسیسی شده پلی بوتیلن ترفتالات/MWCNT به عنوان پوشش‌های جدید به صورت جداگانه سنتر شدند. نانوالیاف توسعه یافته جهت جذب عامل شبه گاز خردل استفاده شد. به دلیل خطرات بالقوه سلامتی و مسائل قانونی مرتبط با استفاده از عوامل جنگی شیمیایی واقعی، ۲-کلرو اتیل اتیل سولفید، که از نظر ساختاری مشابه عامل خردل است اما سمیت پایینی دارد و نسبت به خردل کمتر خطرناک است، معمولاً به عنوان جایگزین خردل در کارهای مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نانوالیاف با استفاده از محلول پلیمری پلی بوتیلن ترفتالات حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره به صورت محلول کلوئیدی، الکتروسیسی شد. برای یافتن

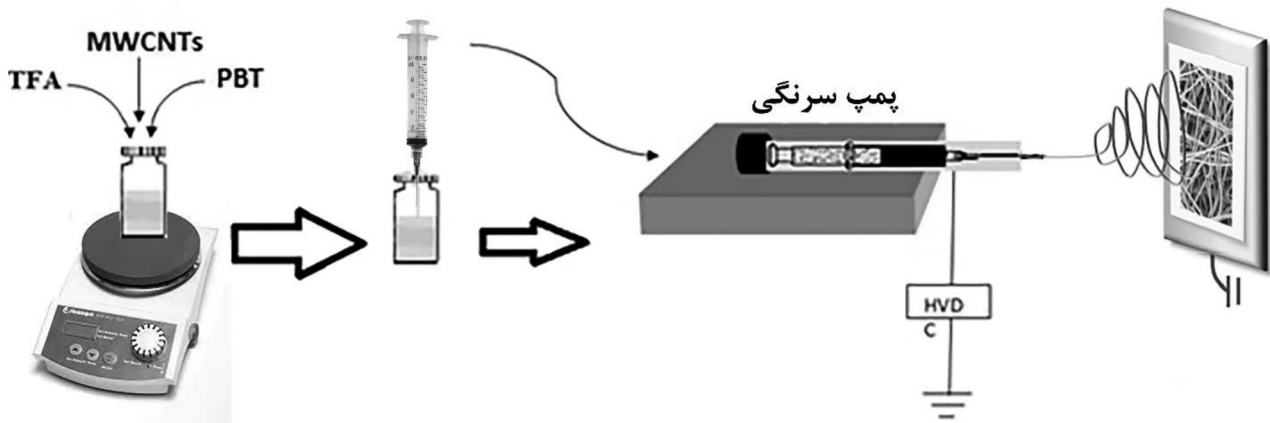
پوست است و به علت خاصیت چربی دوستی آن، به آسانی به درون اجزای لیپیدی بافت‌های در معرض تماس، نفوذ یافته و تجمع پیدا می‌کند. علاوه بر تجمع در پوست، از طریق پوست به بافت‌های دیگر بدن نیز انتشار می‌یابد. بخش کمی (حدود ۱۰٪) از سولفور موستارد جذب شده، در پوست باقی مانده و به ماکرومولکول‌های پوست متصل می‌شود و ۹۰٪ مابقی وارد جریان خون شده و منجر به بروز علائم سیستمیک می‌گردد [۳]. سولفور موستارد یک ترکیب الکیله کننده‌ی قوی با خاصیت سیتوتوکسیک و موتاژنیک و تاول‌زا می‌باشد که با تمام ترکیبات پوست مانند پروتئین، DNA و RNA برهمکنش می‌نماید [۴].

منسوجات محافظ بخشی از منسوجات تخصصی است که مطابق تعریف، شامل همه آن دسته از محصولات نساجی است که عمدتاً به جای خصوصیات زیبایی و تزئینی آنها، به دلیل ویژگی‌های عملکردی یا کارایی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. به بیان دیگر، به لباس یا پارچه‌هایی گفته می‌شود که برای محافظت از فرد در برابر اثرات محیطی که ممکن است منجر به جراحت یا مرگ شود، طراحی شده است. تحقیقات گسترده ای به صورت منظم و تخصصی در زمینه تولید لباس محافظ در برابر حملات شیمیایی و یا بیولوژیکی برای مشاغل مختلف نظامی و غیرنظامی در حال انجام است [۶].

ساختار پوشش الیاف، نقش فوق العاده ای در بهره‌وری جذب عوامل شیمیایی دارد. نانوالیاف پلیمری با استفاده از روش‌های مختلف از جمله کشش، ساخت با قالب، جدایی فاز، خوداتصال و الکتروسیسی تهیه می‌شوند [۷]. از این میان نانوالیاف تولید شده با فرایند الکتروسیسی به دلیل مشخصاتی مانند قطر کم، سطح ویژه و تخلخل زیاد و نیز ایجاد جریان لغزشی در برابر هوای عبوری گزینه مناسبی برای ساخت بسترهای فیلترکننده هستند [۸، ۹].

تحولات پوشش‌های الیاف بیشتر در بهبود ثبات مکانیکی، شیمیایی و حرارتی، گروه‌های عاملی و ویژگی‌های متنوع و افزایش ظرفیت استخراج الیاف متمرکز شده است [۱۰]. استفاده از نانوذرات، یک روش قابل توجه برای بهبود قابلیت فیلترکنندگی می‌باشد که براساس افزایش برهمکنش بین آنالیت‌های مورد نظر و الیاف، استوار است [۹، ۱۱]. اخیراً، از انواع مواد نانو به عنوان افزودنی الیاف استفاده شده است، از جمله هیبریدهای آلی، رزین‌ها، سیلیس، کربن‌ها و رس‌های طبیعی است [۱۲].

نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) به دلیل خواص منحصر به فرد از جمله پایداری شیمیایی و حرارتی، سطح فعال زیاد، بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۳]. نانولوله‌های کربنی چند جداره، به دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی بالا، مساحت سطح وسیع، خصوصیات فیزیکی و



شکل ۱- شمای فرآیند الکتروریسی نانوالیاف

براساس انتخاب پیک جرمی با بیشترین شدت، مورد بهره برداری قرار گرفت.

۲-۳- تهیه نانوکامپوزیت PBT / MWCNTs توسط الکتروریسی

دستیابی به شرایط بهینه فرآیند از جمله محلول پلیمری، پارامترهای الکتروریسی و شرایط محیطی یکی از گلوگاه‌های مهم می‌باشد، که هر یک از این عوامل سهم ویژه‌ای در تعیین ساختار نانوالیاف و همچنین در عملکرد و بازدهی غشاء حاصل دارند. فرآیند الکتروریسی، براساس کار قبلی [۲۲، ۲۱] و البته با تغییراتی انجام شد. محلول‌های الکتروریسی با حل مقدار مناسب پلی بوتیلن ترفتالات (۱۶ درصد وزنی بر درصد) در حلال تری‌فلئورواستیک اسید تهیه شد. سپس، مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره، به محلول پلیمر اضافه شده و به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شد تا یک محلول همگن بدست آید.

محلول پلیمری پس از حل شدن و پایداری کامل، در یک سرنگ پلاستیکی ۱ میلی لیتری مخصوص دستگاه الکتروریسی با سرسوزنی از جنس فولاد ضد زنگ با قطر خارجی ۱۸ گیج (معادل ۰/۵۶۵۲ میلی‌متر) منتقل گردید که به یک منبع ولتاژ بالا متصل شده بود. شرایط بهینه شده دستگاه شامل ولتاژ ۱۶ کیلو ولت، نرخ تغذیه محلول ریسندهگی ۰/۱ میلی لیتر بر ساعت، فاصله نازل تا جمع کننده (جمع کننده) ۱۵ سانتی‌متر و سرعت حرکت جمع کننده ۶۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. در ضمن، یک ورقه آلومینیومی جهت تمیز بودن فرآیند و جمع کردن نانوالیاف تولید شده، روی جمع کننده پوشانده شد. جت های پلیمری از سوزن تولید شده و نانوالیاف روی فلز جمع کننده تشکیل می‌شود (شکل ۱). آزمایش های الکتروریسی در دمای اتاق انجام شد. چند نمونه از لایه‌های نانوالیاف ایجاد شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

شرایط مطلوب برای افزایش کارایی جذب، پارامترهایی که بر ساختار نانوالیاف تأثیر می‌گذارند مورد بررسی قرار گرفت. پس از دستیابی به شرایط بهینه سنتز نانوالیاف، اثرات پارامترهای موثر بر جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید، نیز از طریق روش سطح پاسخ بهینه شد. در نهایت، برای بررسی تعادل جذب ۲-کلرو اتیل سولفید بر روی جاذب از مدل های لانگمویر و فرندلیچ استفاده گردید.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و محلول‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه با درجه خلوص بالا بوده و از شرکت مرک (دارمشتات، آلمان) خریداری شد. محلول کاری آنالیت در متانول با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر ساخته شد. محلول‌های کاری روزانه با رقیق کردن محلول موجود به صورت تازه آماده سازی گردید. بوتیلن ترفتالات از شرکت کولون (سئول، کره جنوبی) و تری فلئورواستیک اسید از رایدل د-هین (هانوفر، آلمان) تهیه شد. نانولوله‌های کربنی چند جداره (با خلوص ۹۵٪، طول ۱۰-۱۰ میکرومتر و تعداد دیواره ها در محدوده ۱۵-۱۵) از پلاسما کم (آلمان) فراهم شد.

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

جداسازی و آنالیز توسط دستگاه کروماتوگراف گازی/طیف سنج جرمی (اجیلنت ۶۸۲۰) انجام گردید. برای جداسازی از ستون موئینه سیلیس ذوب شده HP-5 MS (۳۰ متر) با ۰/۲۵ میکرومتر فاز ثابت، و از گاز هلیوم (۹۹/۹۹٪) به عنوان گاز حامل با سرعت جریان ۱ میلی لیتر در دقیقه، استفاده شد. برای به دست آوردن بالاترین حساسیت، آشکارساز جرمی با استفاده از پایش یونی با برنامه‌ریزی زمانی

مشخص از عامل شبه خردل غوطه ور کرده و از محلول مورد نظر در بازه‌های زمانی مختلف از ۵ الی ۳۰ دقیقه نمونه گیری و سپس جهت آنالیز به دستگاه کروماتوگرافی گازی، تزریق شد تا میزان کارایی و مقدار جذب عامل شبه خردل توسط نانوالیاف مشخص گردد. در انتها نمونه نانوالیاف از محلول خارج شده و جهت انجام سیکل بعدی با اتیل استات شسته می‌شود.

برای یافتن شرایط مطلوب برای افزایش کارایی جذب، اثرات غلظت MWCNTs و همچنین سایر پارامترهایی که بر ساختار نانوالیاف تأثیر می‌گذارند با مقایسه کارایی جذب آنالیت مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آزمایشات اولیه، دو پارامتر غلظت PBT و دوپانت (MWCNT) ممکن است بر کیفیت جاذب سنتز شده در کار حاضر تأثیر بگذارد. پس از دستیابی به مناسب ترین نانوالیاف، اثرات پارامترهای جذب نیز بهینه شد. به هر حال، تأثیر غلظت نمک (قدرت یونی)، زمان و دما بر روی بازده جذب توسط بهینه سازی چند متغیره از طریق روش سطح پاسخ بررسی شد. سطوح انتخاب شده فاکتورهای دما، زمان و قدرت یونی، در جدول ۱، و ماتریس آزمایش ایجاد شده توسط طراحی مکعب مرکزی در جدول ۲، نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات نانوالیاف PBT/MWCNTs

جهت اطمینان از سنتز نانوالیاف کامپوزیتی، از طیف‌سنجی FT-IR استفاده شد. این روش طیف سنجی، عموماً برای تحلیل و شناسایی پلیمرها و برخی مواد افزودنی به آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور طیف FT-IR نانوالیاف در محدوده 4000 تا 600 cm^{-1} بررسی شد. نتایج حاصل در شکل (۳) نشان داده شده است. نوارهای جذب در 833 و 905 cm^{-1} به ترتیب مربوط به حرکت خمشی حلقه فنیل و ارتعاش جفت شده کربونیل از تغییر شکل صفحه گروه فنیل است [۲۱]. همچنین، نوارهای جذب در 1318



شکل ۲- چند نمونه از غشاهای نانوالیاف سنتز شده

۴-۲- بررسی خواص و مشخصه یابی نانوالیاف

در این مطالعه ساختار نانوالیاف کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA II TESCAN مورد سنجش قرار گرفت (برنو، جمهوری چک). همچنین از طیف سنج تبدیل فوریه زیر قرمز بروکر مدل (S/IFS۶۶)، برای بررسی خواص نانوالیاف تهیه شده استفاده شد.

۵-۲- بررسی کارایی جذب عامل شبه خردل توسط غشای نانوالیاف

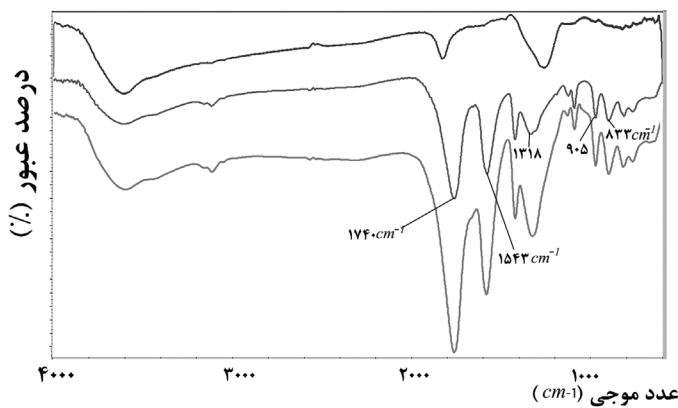
بعد از سنتز و مشخصه‌یابی نانوغشا، جهت بررسی قابلیت جذب عوامل شبه خردل، از ترکیب ۲-کلرو اتیل اتیل سولفید استفاده شد. برای بررسی کارایی جذب عامل شبه خردل، نانوالیاف توسعه داده شده، در تماس با محلول ۲-کلرواتیل اتیل سولفید قرار داده شده و تفاضل غلظت آنالیت در محلول نمونه معیاری از کارایی فرایند حذف در نظر گرفته می‌شود [۲۳] نانوغشای تهیه شده (ابعاد ۳ در ۳ سانتی متر) را در داخل محلول از قبل تهیه شده با غلظت

جدول ۱- سطوح انتخاب شده فاکتورها

متغیر	واحد	نماد	سطوح		
			$+\alpha$	$+1$	صفر
دما	$^{\circ}\text{C}$	A	۳۹/۴	۳۵	۲۸/۵
زمان جذب	min	B	۱۸/۴	۱۵	۱۰
قدرت یونی	%w/v	C	۲۳/۸	۱۹	۱۲

جدول ۲- ماتریس آزمایش طراحی شده براساس روش مکعب مختلط مرکزی (CCD)

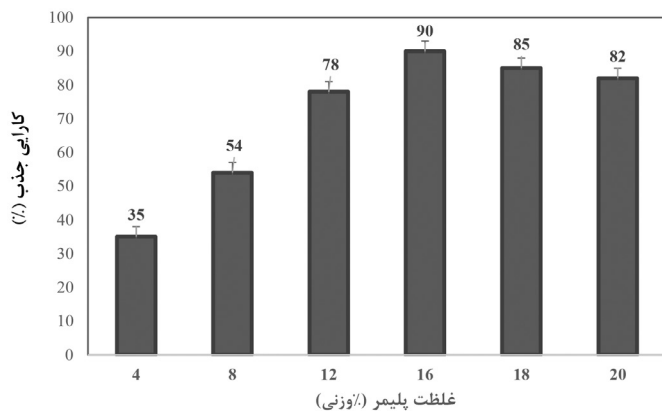
ردیف	دما	زمان جذب	قدرت یونی	پاسخ
۱	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۸
۲	۳۹/۴	۱۲	۱۰	۷۸
۳	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۶
۴	۲۸/۵	۱۲	۱۸/۴	۸۳/۱
۵	۲۲	۵	۵	۳۵
۶	۲۸/۵	۲۳/۸	۱۰	۷۶
۷	۲۲	۱۹	۱۵	۴۴
۸	۲۲	۵	۱۵	۳۹
۹	۲۸/۵	۱۲	۱/۶	۷۴
۱۰	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۸/۱
۱۱	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۷
۱۲	۱۷/۶	۱۲	۱۰	۱۴
۱۳	۲۸/۵	۰/۲۳	۱۰	۵۶/۲
۱۴	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۶/۴
۱۵	۲۲	۱۹	۵	۴۱/۲
۱۶	۳۵	۵	۵	۶۹/۱
۱۷	۳۵	۵	۱۵	۷۵
۱۸	۲۸/۵	۱۲	۱۰	۸۸
۱۹	۳۵	۱۹	۵	۸۹
۲۰	۳۵	۱۹	۱۵	۹۵



شکل ۳- طیف زیرقرمز مربوط به نمونه‌های نانولوله‌های کربنی چند جداره (بنفش)، طیف نانوالیاف PBT (سبز) و نمونه نانوالیاف کامپوزیتی (قرمز)

منجر به ضخیم‌تر شدن الیاف می‌شود و اثر معکوس نشان می‌دهد که در نتیجه سبب کاهش بازده استخراج می‌شود [۱۲، ۲۰]. بنابراین غلظت پلیمر ۱۶٪، به عنوان مقدار بهینه PBT انتخاب شد.

مقدار MWCNTs به عنوان افزودنی پلیمر، در محدوده غلظت ۰-۱۴ (w/v) بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بازده استخراج تا غلظت ۸٪ دوپانت، افزایش یافته و در غلظت بالاتر دوپانت به سطح ثابتی رسیده است (شکل ۵). حضور MWCNT به دلیل وجود برهمکنش‌های واندروالسی و فعل و انفعالات π - π می‌تواند در مکانیسم جذب نقش داشته باشد و سبب افزایش راندمان جذب شود. همچنین حضور دوپانت سبب بهبود تخلخل پلیمر و افزایش مساحت سطح آن شده و راندمان جذب را افزایش می‌دهد [۲۱] در نتیجه افزایش درصد دوپانت تا ۸٪، موجب بهبود راندمان جذب خواهد شد و با افزایش میزان دوپانت (بیش از ۸٪)، راندمان جذب کاهش می‌یابد. غلظت دوپانت بیش از ۸٪، موجب ایجاد گره در ساختار نانو الیاف شده و راندمان الکترورسی را کاهش می‌دهد. بنابراین، PBT حاوی ۸٪ MWCNT به عنوان



شکل ۴- اثر غلظت پلیمر PBT بر کارایی جذب عامل شبه خردل

و 1543 cm^{-1} به ترتیب مربوط به تغییر شکل درون حلقه صفحه C-O-C و ارتعاش حلقه آروماتیک گروه C-C است. نوارهای جذب در 1740 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی C=O هستند [۲۲].

اثر غلظت پلی بوتیلن ترفتالات بر مورفولوژی نانوالیاف سنتز شده در محدوده غلظت ۴-۲۰٪ (وزنی) بررسی شد. نتایج نشان داده شده در شکل ۴ نشان داد که بازده جذب با افزایش غلظت پلیمر تا ۱۶٪ افزایش یافته و سپس با مقادیر بالاتر، کارایی جذب شروع به کاهش می‌کند. که این موضوع نشان می‌دهد ظرفیت جاذب با افزایش غلظت پلیمر افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش ضخامت فیلم پلیمری باشد که موجب افزایش کارایی جذب می‌شود؛ با این وجود غلظت بالاتر PBT،

کشش سطحی محلول پلیمر می شود. کاهش کشش سطحی محلول موجب می شود تا جت محلول به راحتی کشیده شود و قطرهای فیبر کوچکتری بدست می آید [۲۵]. حضور MWCNT ها در محلول های پلیمری موجب تهیه نانوالیافی می شود که در آن تخلخل بیشتری و قطر نازک تری دارند [۲۶]. همچنین، نانولوله ها می توانند مستقیماً با آنالیت های هدف برهمکنش نموده و بازده جذب را افزایش دهند.

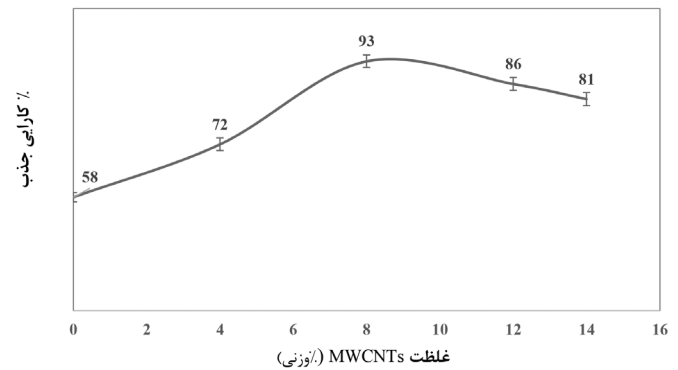
۲-۳- بهینه سازی شرایط جذب

به منظور دستیابی به شرایط مطلوب جذب و گیراندازی عوامل شبه خردل، تأثیر متغیرهای انتخاب شده مانند زمان و دما و قدرت یونی بررسی و چگونگی برهمکنش متقابل بین متغیرها با انجام بهینه سازی چند متغیره ارزیابی شد. بر این اساس از روش طرح مکعب مرکزی (CCD) و استراتژی سطح-پاسخ استفاده شد [۲۷، ۲۸]. ماتریس طراحی آزمایشی و تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار StatGraphics Plus، نسخه ۵.۱، انجام شد. براساس روش طرح مکعب مرکزی و با شش تکرار، بیست آزمایش تصادفی انجام شد. بهینه سازی برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای موثر بر استخراج ۲-کلرو اتیل اتیل سولفید، به طور همزمان انجام شد. داده های بدست آمده با استفاده از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) ارزیابی شد [۲۹].

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۳)، هفت اثر دارای مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ هستند، که نشان می دهد تفاوت معناداری با صفر در سطح اطمینان ۹۵٪ دارند. اثرات اصلی، یعنی دمای استخراج (A)، زمان استخراج (B) و اثر مرتبه دوم، B^2 از لحاظ آماری بیشترین تأثیر در جذب عامل شبه خردل را نشان دادند. از روش رگرسیون گام به گام برای تطبیق معادله چند جمله ای مرتبه دوم بر روی داده های تجربی استفاده شد که در آن عوامل موثر بر جذب توسط معادله ریاضی برای ساخت نمودار سطح-پاسخ استفاده می شود [۳۰]. معادله حاصل به شرح زیر می باشد:

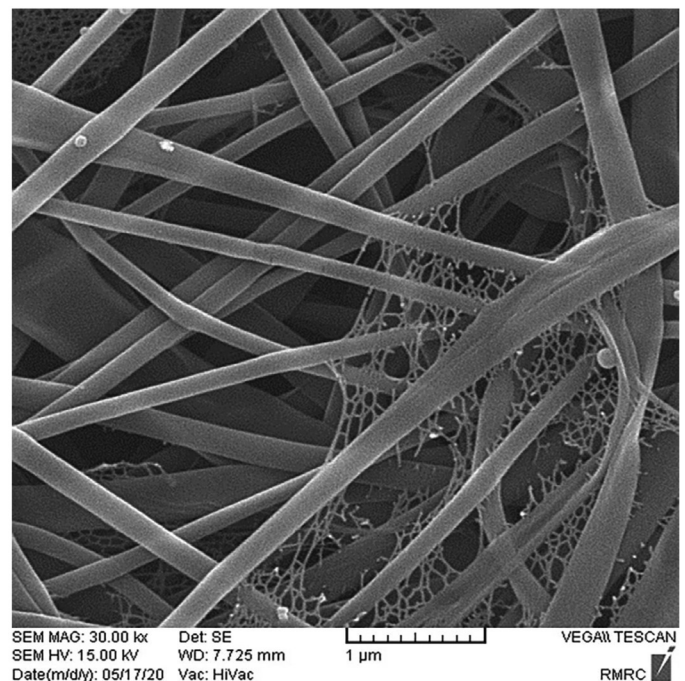
$$R = -190.912 + 9.098 * T + 2.775 * time + 2.966 * Salt + 0.010 * T * time + 0.041 * T * Salt - 0.003 * time * Salt - 0.095 * T^2 - 0.133 * time^2 - 0.158 * Salt^2 \quad (1)$$

ضرایب اثر اصلی دما (A)، زمان استخراج (B) و غلظت نمک (C)، مثبت بودند، این بدان معنی است که با افزایش آنها جذب ۲-کلرو اتیل اتیل سولفید افزایش می یابد. از طرف دیگر، اثرات مرتبه دوم A^2 ، B^2 و C^2 دارای ضرایب منفی است که نشان می دهد اثر تقویت کننده این متغیرها بر



شکل ۵- اثر غلظت نانولوله های کربنی چند جداره دوپ شده در ساختار نانوالیاف، بر کارایی جذب عامل شبه خردل

دوپانت، برای سنتر نانوالیاف انتخاب شد. سطح نانوالیاف جدید ساخته شده PBT / MWCNT توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. تصاویر SEM از نانوالیاف (شکل ۶) تایید می کند که قطر نانوالیاف کمتر از ۲۵۰ نانومتر است. همچنین، جالب توجه است که در مقایسه با نانوالیاف PBT (بدون دوپانت) رشته هایی از الیاف باریک تر در نانوکامپوزیت PBT / MWCNTs تولید شده است. مطمئناً، این ویژگی ها نانوالیاف PBT / MWCNTs را بسیار متخلخل می کند که باعث افزایش سطح موثر جذب و انتقال جرم بیشتر برای آنالیت در مراحل جذب می شود [۲۳، ۲۴]. افزودن MWCNT در محلول پلیمری منجر به کاهش قطر نانوالیاف و افزایش سطح نانوالیاف شد. استفاده از MWCNT، رسانایی یونی محلول را تغییر داده و باعث کاهش



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوالیاف

جدول ۳- نتایج آزمون تحلیل واریانس (ANOVA)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p- Prob > F
مدل	۱۰۰۷۹/۰۶	۹	۱۱۱۹/۹	۴۵۳/۵۴	<۰/۰۰۰۱
دما-A	۵۵۹۹/۴۹	۱	۵۵۹۹/۴۹	۲۲۶۷/۷۳	<۰/۰۰۰۱
زمان-B	۸۴/۶۷	۱	۸۴/۶۷	۳۴/۲۹	۰/۰۰۰۲
قدرت یونی-C	۵۲۱/۵۹	۱	۵۲۱/۵۹	۲۱۱/۲۴	<۰/۰۰۰۱
AB	۳/۲۵	۱	۳/۲۵	۱/۳۲	۰/۲۷۷۹
AC	۱۰۲/۹۶	۱	۱۰۲/۹۶	۴۱/۷	<۰/۰۰۰۱
BC	۰/۱۵	۱	۰/۱۵	۰/۰۶۱	۰/۸۰۹۵
A ²	۳۱۷۲/۵۷	۱	۳۱۷۲/۵۷	۱۲۸۴/۸۵	<۰/۰۰۰۱
B ²	۱۵۹/۷۲	۱	۱۵۹/۷۲	۶۴/۶۸	<۰/۰۰۰۱
C ²	۸۶۱/۳	۱	۸۶۱/۳	۳۴۸/۸۲	<۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۲۴/۶۹	۱۰	۲/۴۷		
عدم برازش مدل	۲۰/۵	۵	۴/۱	۴/۸۹	۰/۰۵۳۳
خطای ذاتی	۴/۱۹	۵	۰/۸۴		
مجموع	۱۰۱۰۳/۷۵	۱۹			

بازده جذب آنالیت با افزایش غلظت NaCl افزایش یافته و سپس در غلظت بالاتر نمک کاهش می یابد. افزایش قدرت یونی می تواند حلالیت ۲-کلرواتیل اتیل سولفید را کاهش دهد و بازده استخراج را بهبود بخشد [۳۲].

با این حال، اثر درجه دوم غلظت نمک، تأثیر معکوس بر راندمان استخراج نشان می دهد. یعنی افزایش بیشتر غلظت نمک می تواند گرانشی محلول را افزایش دهد و سرعت انتقال جرم مولکولی را کاهش دهد، و در نتیجه بازده جذب کمتری داشته باشد. با توجه به نتایج کلی مطالعه بهینه سازی، و با مشتق گیری از معادله سطح-پاسخ، و حل آن، شرایط بهینه آزمایش به دست آمد: زمان جذب، ۱۲ دقیقه و دمای جذب، ۳۰°C و غلظت نمک ۱۵ w/v٪.

۳-۳- بررسی پایداری نانوالیاف

بعد از انجام فرایند جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید، جاذب نانوالیاف از محلول خارج شده و چندین بار توسط اتیل استات جهت انجام آزمایش بعدی شسته می شود. با توجه به شکل ۷، بعد از پنج دوره تناوب جذب-واجذب نانوالیاف کارایی حدود ۹۲٪ از خود نشان می دهد، که در مقایسه با نمونه الیاف اولیه (اولین استفاده) قابلیت بازیابی خوبی از خود نشان داده و بعد از ۵ مرتبه جذب، کاهش ۵ درصد

جذب آنالیت به حداکثر رسیده و سپس در مقادیر بالاتر این پارامترها، تأثیر معکوس بر راندمان جذب دارند. کارایی جذب تا حد زیادی به انتقال جرم آنالیت از محلول نمونه به سطح نانوالیاف بستگی دارد [۳۱]. بنابراین هر متغیری که بتواند انتقال جرم از محلول به سطح نانوالیاف را تسریع کند، موجب بهبود کارایی جذب می شود. معمولا، دمای جذب (A) می تواند بر روی انتقال جرم آنالیت از نمونه آبی به ساختار الیاف تأثیر بگذارد. در دمای بالاتر، سرعت انتقال جرم سریعتر و بیشتر انجام می شود و زمان تعادل کوتاه شده و بازده جذب افزایش یابد. با افزایش دمای جذب تا ۳۰ درجه سانتیگراد، بازده جذب آنالیت ها به طور پیوسته افزایش می یابد. اما، در دمای بالاتر، به واسطه افزایش تحرک مولکولی، برخوردها در محلول افزایش می یابد و مولکول های جذب شده از آنالیت از سطح نانوالیاف جدا شده و وارد محلول می شوند، که در نتیجه کاهش کارایی جذب آنالیت در دمای بالاتر مشاهده شد. همانطور که از معادله سطح-پاسخ، مشخص است، زمان نیز اثر مثبت بر کارایی جذب دارد و با گذشت زمان بازده جذب افزایش می یابد. در مدت زمان ۱۲ دقیقه، حداکثر کارایی جذب به دست می آید.

بررسی اثر غلظت نمک بر روی کارایی جذب، نشان داد که

ثابت جذب لانگمویر است ($L \text{ mg}^{-1}$)، که تابعی از انرژی آزاد جذب است. در مدل لانگمویر فرض می‌شود که فرآیند جذب سطحی شیمیایی، در نهایت به تشکیل یک لایه تک مولکولی بر روی سطح جاذب منجر شود و منحنی هم‌دمای جذب سطحی از بررسی تعادلی به دست می‌آید که میان آنالیت و تک لایه‌ای که به شکل ناتمام تشکیل یافته، برقرار شده است. براساس معادله فوق، اگر تغییرات C_e/q_e برحسب C_e رسم شود، نمودار حاصل به شکل یک خط خواهد بود که از عرض از مبدأ آن K_L و از شیب آن q_m محاسبه می‌شوند. مطابق ایزوترم جذب به دست آمده (جدول ۴) وضعیت خطی نمودار ($R^2=0/986$) توصیف کننده تبعیت فرآیند جذب سطحی از الگوی لانگمویر است. با توجه به مقدار q_m که بیانگر ظرفیت جذب می‌باشد، مشخص می‌گردد که این جاذب ظرفیت نسبتاً مناسبی برای جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید دارد.

براساس مدل فرندلیچ، مقدار ماده جذب شده، تابعی از مشخصات ماده جذب شونده، غلظت آن در محلول و همچنین دما می‌باشد. این مدل با فرض جذب روی سطوح غیریکنواخت همراه با برهمکنش بین مولکولهای حل شونده و توزیع غیریکنواخت گرمای جذب برسطح مشتق شده است. ایزوترم فرندلیچ در حالت لگاریتمی به صورت خطی [۳۴] به شرح زیر است:

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (3)$$

در این معادله K_F ($L \text{ mg}^{-1}$) و n مقادیر ثابت هستند (یعنی K_F ظرفیت جاذب است و n منعکس کننده روند کار است). مقادیر n در دامنه های ۲/۰ تا ۱۰/۰، ۱۰/۰ تا ۲/۰ و زیر ۱/۰ به ترتیب نشان دهنده رفتار جذبی خوب، دشوار و ضعیف است. مقدار تجربی n ، ۲/۶ بود (جدول ۴)، که نشان دهنده کارایی مناسب جذب است.

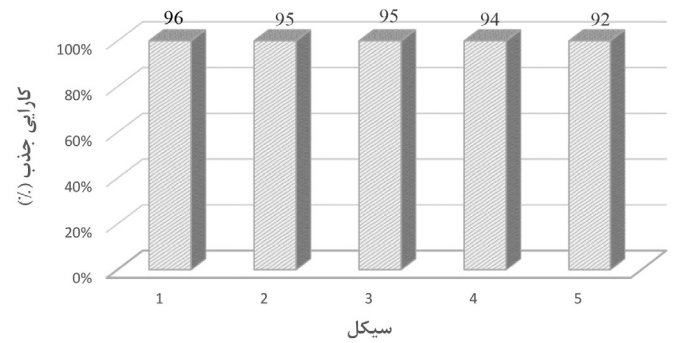
مناسب بودن جاذب برای جذب عامل شبه خردل، با استفاده از ثابت فاکتور جداسازی (R_L) بررسی می‌شود:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

که در آن K_L ثابت لانگمویر ($L \text{ mg}^{-1}$) و C_0 غلظت اولیه (ppm)

جدول ۴- پارامترهای لانگمویر و فرندلیچ برای جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید روی نانوالیاف PBT/MWCNT

مقادیر ایزوترم لانگمویر				مقادیر ایزوترم فرندلیچ			دما (کلوین)
q_m	K_L	R_L	R^2	n	K_f	R^2	
۳۸/۷	۰/۰۵۸	۰/۴۶	۰/۹۹۱	۳/۶	۵/۶	۰/۹۸۶	۲۹۷



شکل ۷- بررسی کارایی جذب نانوغشاء PBT/MWCNTs بعد از ۵ سیکل جذب و واجذب

در کارایی جذب مشاهده می‌شود.

۳-۴- بررسی ایزوترم جذب

برای بررسی تعادل جذب ۲-کلرواتیل اتیل سولفید بر روی جاذب از مدل های لانگمویر و فرندلیچ استفاده شد. ایزوترمهای جذب، داده‌های تعادلی مربوط به خواص جذبی جاذب هستند که به توصیف چگونگی واکنش آنالیت‌ها با مواد جاذب می‌پردازند و در بهینه سازی میزان جاذب نقش اساسی دارند. توسعه توصیف ریاضی دقیق از ظرفیت تعادلی جذب، برای پیشبینی قابل اعتماد از عوامل موثر در جذب و یک مقایسه کمی از رفتار جذبی جاذب‌های متفاوت برای هر بستری ضروری است. معادلات مختلفی برای بیان ارتباط جذب آنالیت‌ها بر روی جاذب‌های مختلف وجود دارد. برای هر بستر مشخص، با انجام آزمایشاتی میتوان تعیین نمود که کدام معادله میتواند به عنوان ایزوترم جذب مورد استفاده قرار گیرد. دو معادله که بیش از سایر معادلات در توصیف ایزوترمهای جذب بسترهای جامد-مایع کاربرد دارند، معادلات لانگمویر و فرندلیچ می‌باشند. ارزیابی های ایزوترم جذب، با تغییر غلظت اولیه ۲-کلرواتیل اتیل سولفید در گستره ۵/۰ تا ۵۰/۰ ppm انجام شد، در حالی که بقیه پارامترها در مقادیر بهینه آنها ثابت نگه داشته می‌شود. در مدل لانگمویر فرض بر این است که فرآیند جذب سطحی شیمیایی، در نهایت به تشکیل یک لایه تک مولکولی بر روی سطح جاذب منجر می‌شود و منحنی هم‌دمای جذب سطحی از بررسی تعادلی به دست می‌آید که میان آنالیت و تک لایه‌ای که به شکل ناتمام تشکیل یافته، برقرار شده است [۳۳]. داده‌های تجربی سیستم‌های جذب را می‌توان توسط فرم خطی ایزوترم لانگمویر تشریح کرد:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

که q_m بالاترین ظرفیت تک لایه جاذب است (mg g^{-1}) و K_L

پوشش نانوکامپوزیت به سرعت و در یک مرحله و با فرآیند الکتروروسی انجام می‌شود. پوشش نانوالیاف الکتروروسی شده PBT/MWCNTs سطح ویژه بالا را با افزایش سطح جذب فعال، به دلیل ساختار غیر صاف و متخلخل فراهم می‌کند. همچنین حذف ۲-کلرواتیل اتیل سولفید، توسط نانوالیاف توسعه داده شده، از مدل لانگمویر ($R^2=0/991$) و فرنللیچ ($R^2=0/986$) تبعیت می‌کند. روش توسعه یافته مبتنی بر استفاده از پوشش نانوالیاف PBT/MWCNTs، ساده، آسان، ارزان و سریع است که می‌تواند در پوشش‌های محافظتی برای جذب عوامل خردل با حساسیت و تکرارپذیری کافی استفاده شود؛ به طوری که راندمان حذف ۹۶ درصد در زمان جذب ۱۲ دقیقه و دمای جذب 30°C و غلظت اولیه عامل شبه خردل 20 mg L^{-1} ، حاصل شد.

هستند. جذب آنالیت روی جاذب، براساس معادله فوق، برای $R_L > 1$ مطلوب نیست، برای $R_L = 1$ خطی است، برای $R_L < 1$ مطلوب و برای $R_L = 0$ برگشت ناپذیر است [۳۵]. مقدار R_L تجربی در روش حاضر برابر ۰/۴۶ بود (جدول ۴) که نشان دهنده مطلوبیت فرآیند جذب با استفاده از نانوالیاف PBT/MWCNT است.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، نانوالیاف جاذبی با دوپ نمودن نانولوله‌های چند جداره در ساختار الیاف پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) به عنوان پوشش جدید ساخته شد که نویدبخش تهیه پوشش جاذب گاز خردل می‌باشد. آماده‌سازی ساده

۵- منابع

- Robert, B., Nallathambi, G., A concise review on electrospun nanofibres/nanonets for filtration of gaseous and solid constituents (PM2.5) from polluted air. *Colloid Int. Sci. Comm.*, 37, 100275, 2020.
- Dadvar, S., Tavanai, H., Morshed, M., Ghiaci, M., The removal of 2-chloroethyl ethyl sulfide using activated carbon nanofibers embedded with MgO and Al₂O₃ nanoparticles. *J. Chem. Eng. Data*, 57, 1456-1462, 2012.
- Sundarrajan, S., Tan, K. L., Lim, S. H., Ramakrishna, S., Electrospun nanofibers for air filtration applications. *Procedia Eng.* 75, 159-163, 2014.
- Li Q., Wang X., Yuan D., Preparation of solid-phase microextraction coated with single-walled carbon nanotubes by electrophoretic deposition and its application in extracting phenols from aqueous samples. *J. Chromatogr. A*, 1216, 1305-1311, 2009.
- Bagheri H., Aghakhani A., Polyaniline-nylon-6 electrospun nanofibers for headspace adsorptive microextraction. *Anal. Chim. Acta*, 713, 63-69, 2012.
- Peterson, G. W., Lu, A. X., Epps III, T. H., Tuning the morphology and activity of electrospun polystyrene/UiO-66-NH₂ metal-organic framework composites to enhance chemical warfare agent removal. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 32248-32254, 2017.
- Zhang Y., Wei S., Liu F., Du Y., Liu S., Ji Y., Superhydropho-
- Saladi, R., Smith, E., Persaud, A., Mustard: a potential agent of chemical warfare and terrorism. *Clinical and Experimental Dermatology, Clin. Exp. Dermatol.*, 31, 1-5, 2006.
- Etemad, L., Moshiri, M., & Balali-Mood, M. History of use and epidemiology of mustard compounds. In *Basic and Clinical Toxicology of Mustard Compounds*: Springer, 29-47, 2015.
- Thiermann, H., Worek, F., Kehe, K., Limitations and challenges in treatment of acute chemical warfare agent poisoning. *Chem. Biol. Interact.*, 206, 435-443, 2013.
- Liang, H., Yao, A., Jiao, X., Li, C., Chen, D., Fast and sustained degradation of chemical warfare agent simulants using flexible self-supported metal-organic framework filters. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10, 20396-20403, 2018.
- Maddah, B., Azimi, M., Preparation of N, N-dichloropolystyrene sulfonamide nanofiber as a regenerable self-decontaminating material for protection against chemical warfare agents. *Int. J. Nano Dimens.*, 2, 253-259, 2012.
- Krueger, G. P. 4 - Psychological issues in military uniform design. In E. Sparks (Ed.), *Advances in Military Textiles and Personal Equipment*: Woodhead Publishing, 64-82, 2012.
- Roy Choudhury, A. K., Majumdar, P. K., & Datta, C. 1 - Factors affecting comfort: human physiology and the role of clothing. In G. Song (Ed.), *Improving Comfort in Clothing*: Woodhead Publishing, 3-60, 2011.

- E. Poly(Butylene Terephthalate)/Single Wall Carbon Nanotubes Composite Nanofibers by Electrospinning. *J. Macromol. Sci., Part B*, 50(6), 1031-1041, 2011.
27. Naebe, M., Lin, T., Tian, W., Dai, L.M., Wang, X.G., Effects of MWNT nanofillers on structures and properties of PVA electrospun nanofibres. *Nanotechnology*, 18, 225605, 2007.
28. Palasota, J. A., & Deming, S. N. Central composite experimental designs: Applied to chemical systems. *J. Chem. Educ.*, 69, 560, 1992.
29. Abedi, H., Ebrahimzadeh, H., Electromembrane-surrounded solid-phase microextraction coupled to ion mobility spectrometry for the determination of nonsteroidal anti-inflammatory drugs: A rapid screening method in complicated matrices. *J. Sep. Sci.*, 38, 1358-1364, 2015.
30. Nazari, A. Statistical Optimization of Durable Multifunctional Properties of Cellulose Cotton Using Nano-TiO₂ Sonoloading. *J. Text. Polym.*, 8, 3-16, 2020.
31. Nazari, A. Modeling and Optimization of Colloidal Nanosilver Pretreatment on Acid-Free Dyeing, Antibacterial, and Hydrophilicity of Polyamide-6,6 Using Response Surface Methodology. *J. Text. Polym.*, 9, 27-40, 2021.
32. Sarafraz-Yazdi, A., Amiri, A.H., Ronagi, G., Hosseini, H.E., A novel solid-phase microextraction using coated fiber-based sol-gel technique using poly (ethylene glycol) grafted multi-walled carbon nanotubes for determination of benzene toluene, ethylbenzene and o-xylene in water samples with gas chromatography-flame ionization detector, *J. Chromatogr. A*, 1218, 5757-5764, 2011.
33. Kang, X. j., Chen, L. q., Zhang, Y. y., Liu, Y. w., & Gu, Z. z., Performance of electrospun nanofibers for SPE of drugs from aqueous solutions. *J. Sep. Sci.*, 31, 3272-3278, 2008.
34. Moghaddam, A. Z., Bojdi, M.K., Nakhaei, A., Ganjali, M.R., Alizadeh, T., Faridbod, F. Ytterbium tungstate nanoparticles as a novel sorbent for basic dyes from aqueous solutions. *Res. Chem. Intermed.*, 44, 6945-6965, 2018.
35. Li, Y., Sui, K., Liu, R., Zhao, X., Zhang, Y., Liang, H., Removal of methyl orange from aqueous solution by calcium alginate/multi-walled carbon nanotubes composite fibers. *Energy Procedia*. 863-868, 2012.
36. Ren, Y., Abbood, H.A., He, F., Peng, H., Huang, K., Magnetic EDTA-modified chitosan/SiO₂/Fe₃O₄ adsorbent: Preparation, characterization, and application in heavy metal adsorption. *Chem. Eng. J.* 226, 300-311, 2013.
- bic nano porous polymers as efficient adsorbents for organic compounds. *Nano Today*, 4, 135-142, 2009.
15. Arash, Q. Wang, A review on the application of nonlocal elastic models in modeling of carbon nanotubes and graphenes, *Comp. Mater. Sci.* 51, 303-313, 2012.
16. Y.Q. Cai, G.B. Jiang, J.F. Liu, Q.X. Zhou, Multiwalled carbon nanotubes as a solid-phase extraction adsorbent for the determination of bisphenol A, 4-n-nonylphenol, and 4-tert-octylphenol, *Anal. Chem.* 75, 2517-2521, 2003.
17. W. Du, F.Q. Zhao, B.Z. Zeng, Novel multiwalled carbon nanotubes-polyaniline composite film coated platinum wire for headspace solid-phase microextraction and gas chromatographic determination of phenolic compounds, *J. Chromatogr. A*, 1216, 3751-3757, 2009.
18. Bagheri H., Aghakhani A., Akbari M., Ayazi Z., Electrospun composite of polypyrrole-polyamide as a micro-solid phase extraction sorbent. *Anal. Bioanal. Chem.*, 400, 3607-3611, 2011.
19. Kang X.J., Pan C., Xu Q., Yao Y.F., Wang Y., Qi D.J., Gu Z.Z., The investigation of electrospun polymer nanofibers as a solid-phase extraction sorbent for the determination of trazodone in human plasma. *Anal. Chim. Acta*, 587, 75-81, 2007.
20. Rutledge G.C., Fridrikh S.V., Formation of fibers by electrospinning, *Adv. Drug. Deliv. Rev.*, 59, 1384-1391, 2007.
21. Forouharshad, M., Saligheh, O., Arasteh, R., & Farsani, R. E., Manufacture and characterization of poly (butylene terephthalate) nanofibers by electrospinning. *J. Macromol. Sci., Part B*, 49, 833-842, 2010.
22. Bagheri, H., & Roostaie, A. Polybutylene terephthalate-nickel oxide nanocomposite as a fiber coating. *Anal. Chim. Acta*, 863, 20-28, 2015.
23. Bagheri, H., Najafi Mobara, M., Roostaie, A., & Baktash, M. Y. Electrospun magnetic polybutylene terephthalate nanofibers for thin film microextraction. *J. Sep. Sci.*, 40, 3857-3865, 2017.
24. Ra, E.J., An, K.H.; Kim, K.K.; Jeong, S.Y.; Lee, Y.H. Anisotropic electrical conductivity of MWCNT/PAN nanofiber paper. *Chem. Phys. Lett.*, 413, 188-193. 2005.
25. Chen, H.; Liu, Z.; Cebe, P. Chain confinement in electrospun nanofibers of PET with carbon nanotubes. *Polymer*, 50, 872-880, 2009.
26. Saligheh, O., Arasteh, R., Forouharshad, M., & Farsani, R.

Synthesis of nanocomposite membranes based on polybutylene terephthalate /carbon nanotube for adsorption of 2-chloroethyl ethyl sulfide

Hamid Abedi^{1*}, Ali Roostaie¹

1- Department of Police Equipment and Technologies, Police Sciences and Social Studies Institute, postal code: 19395-6516

Abstract

In the present study, a membrane of polybutylene terephthalate doped with multi-walled carbon nanotubes was prepared by the electrospinning process of nanofibers. Electron microscopy images of the synthesized nanocomposite proved the homogeneous structure and porous surface of the film. The capability and efficiency of the prepared fibers were tested by studying the adsorption of 2-chloroethyl ethyl sulfide as a mustard gas-like compound. Parameters affecting the morphology of nanofibers such as polymer concentration and the amount of multi-walled carbon nanotubes were investigated and optimized. Important variables in the mustard gas adsorption process included: ion strength, adsorption time and temperature. For this purpose, multivariate modeling based on experimental design using central composite design and response -surface methodology was used to optimize the factors affecting the process. The removal efficiency was 96% at the time of absorption of 12 minutes and the adsorption temperature was 30 ° C and the initial concentration of mustard-like agent was 20 mg L-1. The results of adsorption isotherms showed that the adsorption process of 2-chloroethyl ethyl sulfide by developed nanofibers follows the model of Langmuir ($R_2 = 0.991$) and Freundlich ($R_2 = 0.986$). The results of this study showed that PBT / MWCNTs nanocomposite membrane have good efficiency in adsorption and entrapment of mustard-like agent 2-chloroethyl ethyl sulfide and can be used to develop coatings against these compounds.

Keywords

Half mustard gas,
Polybutylene terephthalate,
Protective clothing,
Nanocomposite membrane,
Nanofibers

(*) Address Correspondence to H. Abedi, E-mail: h.abedi64@gmail.com