



دانشگاه گیلان
۱۳۵۲-۱۹۷۴

چاپ اول

بستر تصفیه توسط الکتروریسی

نسل بعدی غشاها برای کاربردهای جداسازی

تألیف:

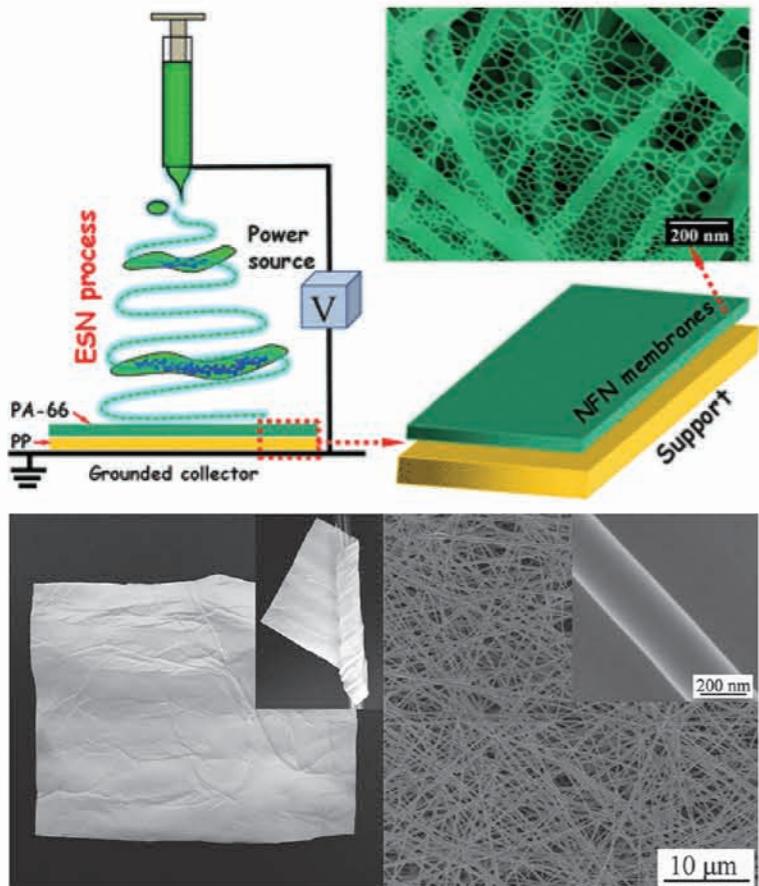
ماریا لیزیزا فوکارت چیارا گوالندی سیرام راماکریشنا

ترجمه:

مجید سهرابی
کارشناس ارشد مهندسی نساجی دانشگاه گیلان

دکتر مرجان عباسی
استادیار دانشکده فنی دانشگاه گیلان

مرکز نشر دانشگاه گیلان



بستر تصفیه توسط الکتروریسی

Filtering Media by Electrospinning

Next Generation Membranes for Separation Applications

By:

Maria Letizia Focarete Chiara Gualandi Seeram Ramakrishna

Translated By:

Marjan Abbasi, Ph.D Majid Sohrabi, M.Sc

University of Guilan Press

تألیف: ماریا لیزیزا فوکارت، چیارا گوالندی، سیرام راماکریشنا
ترجمه: مرجان عباسی، مجید سهرابی

در این کتاب سعی شده است جدیدترین موارد موجود در مواد الکتروریسی شده برای استفاده در فیلترهای تصفیه آب، غشاها تبادل یونی و غشاها با تمایل ذاتی جذب گونه‌های شیمیایی و زیست‌شیمیایی و همچنین کاربردهای شامل تصفیه هوای کاربردهای دفاعی و محافظه و جداسازی روغن از آب در برگرفته شود؛ این کتاب همچنین مروری بر چشم‌انداز فیلترهای الکتروریسی شده در بازار دارد و رویکردهای فنی برای تولید در مقیاس انبوه بستر فیلتری بی بافت نanolیفی را ارائه می‌دهد.

با توجه به اهمیت، جامعیت و فراگیری مباحث نانوفناوری، تصفیه و جداسازی و کمیود منابع علمی ارزشمند و جدید در این حوزه خاص بر آن شدیدم این کتاب را ترجمه نماییم که می‌تواند منبعی مناسب برای دانشجویان کارشناسی و تحصیلات تکمیلی و اساتید رشته‌های مهندسی نساجی، مهندسی مواد و نانوفناوری، مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و محققان زیست مواد در دروس مرتبط به رشته خود باشد.



ISBN: 978-600-153-253-5



بستر تصفیه توسط الکتروریسی

نسل بعدی غشاها برای کاربرد جداسازی

تألیف:

ماریا لئیزیا فوکارت چیارا گووالندی سیرام راماکریشنا

ترجمه:

دکتر مرجان عباسی
استادیار دانشکده فنی دانشگاه گیلان

مجید شهرابی
کارشناس ارشد مهندسی نساجی دانشگاه گیلان

مرکز نشر دانشگاه گیلان

۱۴۰۰



شابک: ۵-۲۵۳-۱۵۳-۶۰۰-۹۷۸

۱۳۵۳-۱۹۷۴

عنوان و نام پدیدآور	: بستر تصفیه توسط الکتروریسی؛ نسل بعدی غشاها برای کاربردهای جداسازی/تألیف ماریا لیزیا فوکارت، کیارا گولاندی، سیرام راماکریشنا؛ ترجمه مرجان عباسی، مجید سهرابی؛ ویراستار علمی: جواد مختاری؛ ویراستار ادبی: فرشته گلچین‌راد.
مشخصات نشر	: رشت: دانشگاه گیلان، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	: ۳۰۹ ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۵۳-۲۵۳-۵
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Filtering Media by Electrospinning : Next Generation Membranes for Separation Applications , 2018.
یادداشت	: کتابخانه.
موضوع	: زیست‌شیمی
	Biochemistry
شناسه افزوده	: فوکارت، ماریا لیزیسیا
شناسه افزوده	: Focarete, Maria Letizia
شناسه افزوده	: گونالاندی، کیارا
شناسه افزوده	: Gualandi, Chiara
شناسه افزوده	: راماکریشنا، سیرام
شناسه افزوده	: Ramakrishna, Seeram
شناسه افزوده	: عباسی، مرجان، -۱۳۵۱، مترجم
شناسه افزوده	: سهرابی، مجید، -۱۳۷۰، مترجم
شناسه افزوده	: مختاری، جواد، -۱۳۴۷ -، ویراستار
شناسه افزوده	: دانشگاه گیلان
رده بندی کنگره	: QD۴۱۵
رده بندی دیوبی	: ۵۷۴/۱۹۲
شاره کتابشناسی ملی	: ۸۴۸۴۴۶۲

مرکز نشر دانشگاه گیلان

نام کتاب	:	بستر تصفیه توسط الکتروریسی؛ نسل بعدی غشاها برای کاربردهای جداسازی
مؤلفان	:	ماریا لیزیا فوکارت، کیارا گولاندی، سیرام راماکریشنا
مترجمان	:	دکتر مرجان عباسی، مجید سهرابی
ویراستار علمی	:	دکتر جواد مختاری
ویراستار ادبی	:	فرشته گلچین‌راد
نوبت چاپ	:	اول، ۱۴۰۰
ناشر	:	مرکز نشر دانشگاه گیلان
شمارگان	:	۱۰۰۰ جلد

* هر گونه چاپ و تکثیر صرفاً در اختیار مرکز نشر دانشگاه گیلان است.*

پیشگفتار مترجم

تصفیه یک روش ساده، متنوع و اقتصادی برای جذب و محصور کردن ذرات و یون‌های زیر میکرومتری یا نانومتری می‌باشد که آب، آلاینده‌های هوا، مواد آلی و زیستی را در برمی‌گیرد و هدف از آن ایجاد یک فرایند مؤثر برای خالص‌سازی هوا و آب است. رشد شهرنشینی و افزایش بی‌رویه فعالیت‌های صنعتی باعث افزایش افسارگسیخته ذرات سمی با مساحت سطح مخصوص زیاد شده است که به دلیل سهولت عبور از موانع بدن انسان از طریق جذب و استنشاق، باعث کاهش کیفیت زندگی مردم می‌شود. در دو دهه گذشته، پیشرفت‌های سریع در فناوری نانو، چشم‌انداز‌چشم‌اندازهای جدیدی را برای توسعه فیلترهای نوآورانه با خاصیت نفوذپذیری باز می‌کند که می‌توانند به طور مؤثرتری از انتشار نانوذرات در اتمسفر، خاک یا محیط‌های آبی جلوگیری کنند.

در میان روش‌های نانوفناوری، الکتروریسی یک روش آسان، مؤثر، کم‌هزینه و بسیار متنوع برای تولید الیاف مداوم یک‌بعدی با قطر تا حد نانومتر تحت تأثیر یک میدان الکتریکی قوی است. نخستین توصیف از یک دستگاه برای روش الکتروریسی توسط فرمهالز در سال ۱۹۳۴ ثبت اختراع شد. با این حال تا اوایل دهه ۱۹۹۰، این روش مورد توجه زیادی قرار نگرفت. پس از آن، رنکی و همکاران سهم به سزایی در توسعه این روش داشتند. اجزای دستگاه الکتروریسی معمولی دارای سه مؤلفه اصلی شامل منبع تغذیه با ولتاژ بالا، رشتہ ساز و جمع کننده است. در طی فرایند الکتروریسی، یک میدان الکتریکی بالا به قطره تشکیل شده در یک سیال (محلول یا مذاب پلیمری) که از رشتہ ساز و جمع کننده خارج می‌شود، اعمال می‌شود. هنگامی که قدرت میدان الکتریکی بهاندازه کافی از کشش سطحی قطرات پلیمری بیشتر شود، یک جت مایع باردار شده تشکیل می‌شود و درنهایت برای تشکیل یک مخروط تیلور کشیده می‌شود. تحت تأثیر میدان الکتریکی، جت به سمت جمع کننده شتاب می‌گیرد و منجر به تشکیل الیاف مداوم می‌شود.

الیاف الکتروریسی شده با توجه به ابعاد کم و سطح مخصوص بزرگی که دارد محدوده وسیعی از کاربردها مانند، قالب‌هایی برای ساخت سایر نانوساختارها، فیلترها، منسوجات، کاتالیزگرهای حسگرها، داربست‌های پزشکی، مواد انرژی‌زا و غیره را شامل می‌شوند. یکی از مزایای روش الکتروریسی، طراحی انعطاف‌پذیر این مجموعه برای تهیه محصول با ترکیب و ساختار خاص است؛ علاوه بر این، الیاف الکتروریسی شده دارای تخلخل بالا، نسبت سطح به حجم وسیع، آماده‌سازی آسان، تشکیل غشا و انعطاف‌پذیری مناسب را نشان می‌دهند و آن‌ها را در زمینه‌های جذب و تصفیه مناسب می‌کند.

در این کتاب سعی شده است جدیدترین موارد موجود در مواد الکتروریسی شده برای استفاده در فیلترهای تصفیه آب، غشاهای تبادل یونی و غشاهای با تمایل ذاتی برای جذب گونه‌های شیمیایی و زیست‌شیمیایی و همچنین کاربردهای شامل تصفیه هوا، کاربردهای دفاعی و محافظه و

جداسازی روغن از آب در برگرفته شود؛ این کتاب همچنین مروری بر چشم‌انداز فیلترهای الکتروریسی شده در بازار دارد و رویکردهای فنی برای تولید در مقیاس انبوه بستر فیلتری بی‌بافت نانولیفی را ارائه می‌دهد.

با توجه به اهمیت، جامعیت و فراگیری مباحث نانو فناوری، تصفیه و جداسازی و کمبود منابع علمی ارزشمند و جدید در این حوزه خاص بر آن شدیدم این کتاب را ترجمه نماییم که می‌تواند منبعی مناسب برای دانشجویان کارشناسی و تحصیلات تکمیلی و اساتید رشته‌های مهندسی نساجی، مهندسی مواد و نانو فناوری، مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و محققان زیست مواد در دروس مرتبط به رشته خود باشد.

در پایان ضمن تشکر از انتشارات دانشگاه گیلان بابت حمایت از این اثر، امیدواریم این تلاش علمی بتواند گامی مؤثر در جهت پویایی و بالندگی علمی در سطح جامعه بر دارد.

مرجان عباسی (m.abbasi@guilan.ac.ir)
مجید سهرابی (majidsohrabi@PhD.guilan.ac.ir)

اردیبهشت ۱۳۹۹

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: فناوری الکتروریسی برای تولید غشاها فیلتری وینچنزو گوارینو و آلیسیو وارزانو
۲۵	فصل دوم: پیشرفتهای جاری در غشاها نanolیفی برای کاربردهای تصفیه آب هنگ یانگ ما و بنجامین اس. سیانو
۶۵	فصل سوم: فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه هوا: مقایسه با فناوری های تصفیه هوا موجود یان وانگ، زو ژائو، شیولینگ جیانو و دیرونگ چن
۹۳	فصل چهارم: فیلترهای الکتروریسی شده برای کاربردهای دفاعی و حفاظتی راهول ساهای
۱۱۷	فصل پنجم: فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین روی ژائو، ژیانگ لی و سی وانگ
۱۶۱	فصل ششم: فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف آلایندههای آلی آنیتا سنتا میزان، برابو بالوسامی و تامر اویار
۲۰۹	فصل هفتم: فیلترهای الکتروریسی شده برای جداسازی روغن - آب محمدمهری شیرازی و مرتضی اصغری
۲۴۱	فصل هشتم: غشاها با تمایل ذاتی برای جذب سلولها و مواد زیستی رامشکومار سارانیا، راجندیران موروگان، مانا سا هگد، جیمز دوبیل و رامش بابو
۲۷۱	فصل نهم: بستر فیلتر نanolیفی الکتروریسی شده: فناوری های نوظهور و چشم انداز بازار آنکیتا پودیال، گرت بکرمن، ناوین آشوک چاند، آین هوئی، آدام بلیک و بووانسوری کنان

فصل اول

فناوری الکتروریسی برای تولید غشاھای فیلتری

وینچنزو گوارینو^۱ و آلیسیو وارزانو^۲

^۱. Vincenzo Guarino e-mail: vguarino@unina.it; vincenzo.guarino@cnr.it
^۲. Alessio Varesano

چکیده

تصفیه یک روش ساده، متنوع و اقتصادی برای جذب و محدود کردن ذرات و یون‌های زیرمیکرومتر یا نانومتری، مانند هوا پخش^۱، آلاینده‌های آب و هوای به منظور ایجاد یک فرایند بسیار کارآمد برای تمیز کردن هوا و آب است. در واقع، مقدار رو به رشد ذرات سمی با سطح مخصوص بزرگ که عمدتاً مرتبط با افزایش انتشار احتراق در محیط خارجی می‌باشد، به شدت منجر به کاهش کیفیت زندگی مردم، به علت سهولت عبور از موانع بدن انسان از طریق استنشاق و جذب، شده است. در دو دهه گذشته، پیشرفت‌های سریع در فناوری نانو، افق‌های جدیدی را برای توسعه فیلترهای نوآورانه با کنترل نفوذپذیری که می‌تواند به طور مؤثری از انتشار نانو ذرات در جو، محیط خاک و یا آب جلوگیری کند باز کرده است. به طور خاص، الکتروریسی به عنوان یکی از فناوری‌های متنوع و مقرون به صرفه برای طراحی لوازم تصفیه‌ای الیافی با قابلیت حذف آلاینده‌های در محدوده زیر میکرومتر و نانومتر از جریان گاز ظهرور کرده است و به طور چشم‌گیری بازده جاری فیلترهای تجاری را بهبود می‌دهد (تا ۹۰-۹۹٪).

در اینجا، یک مرور کلی از راهبردهای فناورانه فعلی مبتنی بر الکتروریسی به منظور بررسی چالش‌های آینده و روند استفاده از غشاها الکتروریسی شده به عنوان غشاها نوآورانه نانو متخلخل برای کاربردهای تصفیه ارائه می‌شود.

۱-۱- مقدمه

تاكنون انواع مختلفی از فلزات سنگین در فرایندهای تولید صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر انتشار بیش از حد و کنترل نشده یون‌ها در فاضلاب‌ها یا نانوذرات فرار در اتمسفر، دلیل اصلی آسیب شدید به سلامتی انسان است [۱]. آلودگی هوا با توجه به مواد ذره‌ای و آلاینده‌های گازی ممکن است موجب بیماری‌هایی مانند آسم، تهوع، سوزش پوست، فشارخون بالا، سرطان، نقایص مادرزادی [۲]، بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی [۳] با خطراتی برای سلامتی، با توجه به سطح ارائه و ماهیت آلاینده شود [۴]. به همین ترتیب، یون‌های فلزات سنگین به راحتی می‌توانند با منابع آب به عنوان یک حامل مخلوط شوند که یون‌های فلزی را به محیط‌های اطراف توزیع می‌کنند، اما راه‌های مؤثر برای جدا کردن یون‌های فلزی از آب مخازن هنوز تا حدی ناشناخته مانده است [۵].

^۱. Aerosol

فیلترهای الیافی می‌توانند وسایل ساده و اقتصادی‌ای را ارائه دهند که قادر است ذرات را در مقیاس میکرو یا نانو از جریان‌های سیال مختلف (به عنوان مثال، هوا و آب) حذف کنند. به طور کلی، ذرات را می‌توان با استفاده از شبکه الیاف در هنگام برخورد آن‌ها و متصل شدن به سطح الیاف به وسیله مکانیسم‌های مکانیکی (به عنوان مثال، برخورد ضربه‌ای، جداسازی، انتشار براونی، تنهشین شدن جاذبه‌ای) و یا مکانیسم‌های تنهشین شدن الکترواستاتیکی نگه داشت؛ در نتیجه، فیلترها باید یک بستر پیچیده‌ای از الیاف ظریف آرایش یافته در یک مسیر را که به طور عمود بر جهت جریان هوا دارد، با تخلخل ۷۰٪ تا ۹۶٪ و محدوده اندازه الیاف از ۱۰ نانومتر تا ۱۰۰ میکرومتر را ارائه دهد. معمولاً قطر کم الیاف، بازده فیلتراسیون را افزایش می‌دهد، اما با افزایش افت فشار، بدون توجه به اندازه ذره، به طور منفی بر ضریب کیفیت تأثیر می‌گذارد؛ در واقع، نانو الیاف با قطر ۱۸۵ نانومتر، ضریب کیفیت بالاتری نسبت به الیاف با قطر ۹۴ نانومتر را نشان می‌دهد [۷] که به علت توانایی شبکه‌های الیاف نسبتاً بزرگتر آن‌ها برای بالابردن نفوذ ذرات با اندازه ۵۰-۹۰ نانومتر می‌باشد. در مورد ذرات بزرگتر (۱۰۰-۳۸۰ نانومتر)، مکانیسم‌های جداسازی بر مکانیسم انتشار براونی غالب هستند، به طوری که الیاف با قطر کوچک‌تر موجب کاهش مؤثر منافذ می‌شود؛ بنابراین اثر جداسازی مستقیم برای جذب ذرات را افزایش می‌دهد [۸]. از این‌رو، با توجه به اندازه ذرات هدف، باید به صورت جداگانه با توجه به اندازه منافذ، ضخیم (۱۰-۲/۵ میلی‌متر)، ظریف (۲/۵-۰/۱ میلی‌متر) و فوق العاده ظریف (کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) [۹، ۱۰]، به عنوان تابعی از نوع کاربرد، طراحی شوند (به عنوان مثال، ماسک‌های یکبار مصرف، تجهیزات تمیز کردن گاز صنعتی، سیستم‌های تصفیه هوا داخل اتاق، فیلترهای هوای داخل خودرو و تصفیه‌کننده هوا داخلی) [۱۱].

با افزایش دانش در زمینه نانو فناوری، روش‌های بسیاری برای سنتز و پردازش مواد الیافی در سطح زیر میکرومتر یا نانومتر معرفی شده است؛ در میان آن‌ها، الکتروریسی به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای ساخت سیستم‌های میکرو / نانوساختاری برای کاربردهای بالقوه مختلف در زمینه زیست پزشکی، فیلتراسیون آب / گاز، نمک‌زدایی و حسگرها / زیست حسگرها به شمار می‌رود. مزایای اصلی غشاها لیفی الکتروریسی شده برای فیلتراسیون، عمدتاً به اندازه کوچک منافذ و سطح مخصوص بزرگ آن‌ها مربوط است. اندازه متوسط حفره می‌تواند ۴ تا ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از غشاها میکرولیفی باشد [۱۲] که می‌تواند ذرات گرد و خاک را روی سطح خود جذب کند و در نهایت بازدهی تصفیه را افزایش دهد [۸]. سطح مخصوص آن می‌تواند چندین برابر بیشتر از سطح مخصوص میکرو الیاف معمول باشد که علت آن وجود میکرو حفرات در اندازه‌های حدود ۲ میکرومتر و مزو حفرات^۱ در محدوده ۲ تا ۵۰ نانومتر در شبکه الیاف می‌باشد [۱۳]، به این ترتیب

^۱. Mesopores

اجازه می‌دهد تا به‌طور قابل‌توجهی بازدهی تصفیه، فقط با استفاده از لایه‌های نازک الیاف الکتروریسی شده بهبود یابد [۱۴]. جالب‌توجه است، نانو الیاف الکتروریسی شده ممکن است با مشارکت ترکیبات شیمیایی فعال سطحی به‌منظور بهبود عملکردهای الیاف در مقیاس نانو بدون سختی تنفس یا انتشار رطوبت با مزایای مربوط به راحتی لباس‌های محافظ شخصی استفاده شود [۱۵]. امکان پردازش طیف گستردگی از سازه‌های لایه‌ای ساخته شده از مواد مختلف از جمله شیشه‌ها، پلاستیک‌ها، سرامیک، فلزات و همچنین مواد زیستی مانند پلی ساکاریدها (به‌عنوان مثال مشتقات سلولز، کیتوسان [۱۶]، پروتئین‌ها (به‌عنوان مثال کراتین پشم [۱۷])، پلی‌استرهای زیست‌تخریب‌پذیر (به‌عنوان مثال پلی لاکتیک اسید [۱۸])، امکان ساخت فیلترهای هوشمند را فراهم می‌کند که قادر به حل مشکلات مرتبط با فیلترهای تنفسی حجیم مانند عرق کردن، تنفس حرارتی و سختی تنفس می‌باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که محصولات الکتروریسی شده نه تنها قادر است به شکل نانو الیاف پلیمری خالص ساخته شوند بلکه می‌توانند از طریق پلیمرهای مصنوعی و طبیعی (به‌عنوان مثال کراتین/پلی آمید، [۱۸، ۱۷])، برای به دست آوردن ترکیبات یا کامپوزیت‌های پلیمری با قطر نانومتری یکنواخت، ایجاد شوند؛ همچنین آن‌ها می‌توانند با موفقیت در فیلتراسیون فعال برای حذف مواد سمی پراکنده در هوا (به‌عنوان مثال فرمالدئید [۲۰]) یا حفظ یون‌های فلزات سنگین از آب آلوده، به دلیل خواص ساختاری منحصر به‌فرد آن‌ها (به‌عنوان مثال نسبت سطح به طول، تخلخل به‌هم‌پیوسته و تخلخل سطحی) که به‌طور قابل‌توجهی عملکرد آن‌ها را نسبت به مواد معمول بهبود می‌بخشند، استفاده شوند.

در این بخش، یک توصیف کلی از استفاده رایج از شیوه‌های الکتروریسی برای ساخت غشاها فیلتری، به‌طوری‌که اولاً، اصول کاری پایه‌ای و ثانیاً، روش‌های فناورانه مختلف و تنظیمات بهینه‌سازی شده برای طراحی محصولات لیفی به‌منظور کاربردهای فیلتری مختلف، پیشنهاد شده است. درنهایت، چالش‌های تحقیقاتی مختلف و روند آینده غشاها الکتروریسی شده در فیلتراسیون سیالات و ذرات مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱-۲-۱- الیاف الکتروریسی شده برای تولید فیلتر

۱-۲-۱-۱- الکتروریسی توسط محلول پلیمری

الکتروریسی محلول بر اساس کاربرد یک میدان پتانسیل الکتریکی قوی به یک محلول پلیمری برای تولید الیاف با قطر کوچک در مقیاس میکرو یا زیر میکرومتر است. خواص ریخت‌شناسی خاص محصولات الکتروریسی سبب شده است درزمینه‌های مختلف علمی، از جمله، در الکترونیک، برای اجزای آند در باتری‌های یون لیتیوم [۲۱]، در دستگاه‌های میکرو/نانو [۲۲] و در فیلترهای هوا با کارایی بالا و مقاومت کم هوا و... از آن‌ها استفاده شود [۲۳، ۲۴].

راهاندازی تجربی و آزمایشگاهی آن‌ها به طور کلی ساده است. از طریق یک سوزن فلزی، محلول پلیمری داخل پمپ سرنگی قطره معلقی را در نوک موبینه ایجاد می‌کند. اختلاف ولتاژ بالا به محلول پلیمری اعمال می‌شود و از این طریق بارهای آزاد را به محلول پلیمری القا می‌کند که این بارهای آزاد قادر است باعث انتقال نیروهای کششی به محلول پلیمری ای شود که در پاسخ به میدان الکتریکی اعمال شده، باردار شده است [۲۵].

وقتی که پتانسیل اعمال شده به مقدار بحرانی موردنیاز برای غلبه بر کشش سطحی مایع برسد، قطره پلیمری یک طرح مخروطی مانند که به نام مخروط تیلور شناخته شده است تشکیل می‌دهد و یک جت مایع از نوک مخروطی خارج می‌شود [۲۶]. سپس نیروهای الکتریکی شتاب می‌گیرند و جت پلیمری را کشش می‌دهند که موجب کاهش قطر و افزایش طول آن‌ها می‌شود. پس از شروع مخروط، جت تحت تأثیر یک حرکت بی‌نظم یا ناپایداری خمی قرار می‌گیرد و از طریق اتمسفر به سمت جمع کننده با بار مخالف جریان می‌یابد، سپس حلال تبخیر می‌شود و الیاف خشک بر روی دستگاه جمع کننده قرار می‌گیرد [۲۷]. در ضمن، پدیده ناپایداری افزایشی ممکن است به وسیله اتصال رشته‌های مایع با میدان الکتریکی (به عنوان مثال، ناپایداری محوری) باعث ایجاد واریانس آماری شعاع جت شود که موجب نوسان چگالی بار سطحی می‌شود. این تنوع به نوبه خود باعث ایجاد نیروهای مماسی می‌شود که به نوسان شعاع منجر می‌شود و آن را تقویت می‌کند و درنتیجه موجب ایجاد نفایص شبکه کروی یا دانه‌تسبیحی^۱ در طول رشته می‌شود [۲۸].

فارغ از تنش سطحی و نیروهای محلول پلیمری که در الکتروریسی است، متغیرهای فرایند دیگری نیز وجود دارد که عوامل کلیدی برای دستیابی به عملکرد نهایی نانوالیاف هستند. در ۲۰ سال گذشته، بسیاری از محققان اثرات متغیرهای فرایند مختلف را بر روی ریخت‌شناسی ساختاری و خواص الیاف الکتروریسی شده بررسی کرده‌اند تا بتوانند رابطه‌ی نسبی بین عوامل فرایند مختلف و تأثیر آن‌ها بر روی ریخت‌شناسی الیاف و خواص سطحی و توده‌ای را بیابند. مطالعات اولیه به طور عمده به شناسایی یک مقدار ولتاژ بحرانی برای رها کردن الیاف پلیمری اشاره دارد. این مقدار بحرانی با نوع محلول پلیمری به عنوان تابعی از وزن مولکولی پلیمر، گذردهی حلال و غلظت محلول متفاوت است [۳۰، ۲۹].

وقتی که میدان الکتریکی ضعیفتر یا قوی‌تر از این مقدار بحرانی است، دانه‌تسبیحی و نفایص ممکن است در طول الیاف، به علت وجود پدیده ناپایداری رخ دهد. مطالعات کنونی نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ به کشیدگی طول لیف و کاهش اندازه لیف منجر می‌شود [۳۱]. به طور خاص، وقتی که ولتاژ افزایش می‌یابد، ممکن است پدیده‌ی جت‌های چندگانه^۲ رخ دهد، بنابراین الیاف با

¹. Bead

². Multijet

قطرهای مختلف تولید می‌شود [۳۲]. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر خواص فیزیکی و شیمیایی الیاف تولیدشده، نرخ جریان پلیمر است. تغییر در نرخ جریان پلیمری موجب تغییر در ریختشناسی لیف می‌شود به طوری که افزایش نرخ جریان منجر به افزایش قطر الیاف و ایجاد دانه‌تسیبی می‌شود [۳۳].

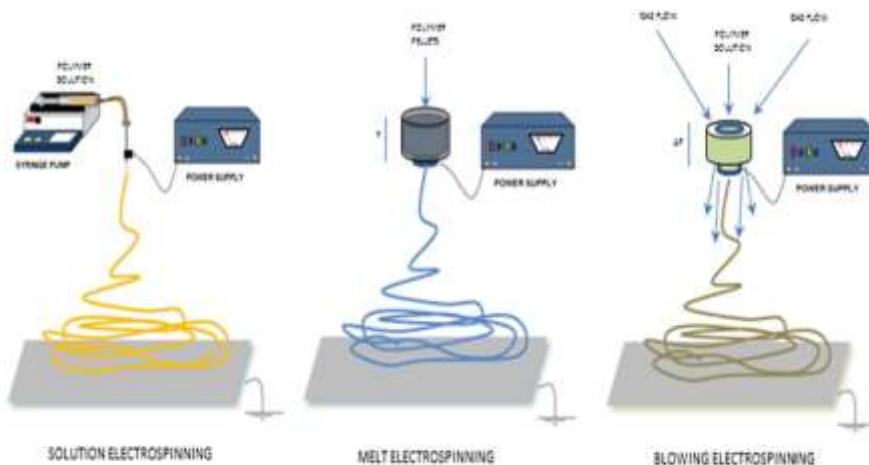
ریختشناسی، ساختار، خواص فیزیکی و شیمیایی الیاف الکتروریسی شده نیز ممکن است تحت تأثیر فاصله نازل تا جمع کننده قرار بگیرد. درواقع، فاصله نازل تا جمع کننده مستقیماً بر نرخ تبخیر و زمان لایه نشانی تأثیر می‌گذارد و بنابراین اندازه لیف و ریختشناسی سطح را ویژه می‌کند. وقتی که فاصله بین نازل و جمع کننده کاهش می‌یابد، الیاف الکتروریسی شده به علت وجود حلال باقی‌مانده مرتبط می‌ماند که درنتیجه باعث کاهش اندازه شبکه لیفی و مسطح کردن الیاف می‌شود [۳۴].

در مورد الکتروریسی محلول، یک جنبه کلیدی قطعاً مربوط به بهینه‌سازی شرایط محیطی فرایند بهوسیله‌ی حضور بیش از حد حلال در بدنه الیاف است. این جنبه بسیار مهم است، نه تنها به دلایل ایمنی، بلکه همچنین برای کیفیت محصولات نهایی که به شدت وابسته به بقایای حلال درون نانو الیاف می‌باشد، باید مورد توجه قرار گیرد [۳۵]. درحالی که آثار حلال در مورد کاربردهای غیرنساجی (به عنوان مثال، نانو الکترونیک) بر روی ریختشناسی و عملکرد الیاف کاملاً مخرب نیستند، در عوض، مشارکت حلال می‌تواند در مورد برنامه‌های کاربردی پیشکشی و یا تصفیه که در آن کنترل دقیق بر بقایای حلال بهشت موردنیاز برای حفظ ایمنی زیستی غشای نهایی است، ضروری باشد. بهمنظور حذف تا حد امکان ترکیبات حلال آلی فرار، استفاده از فرایندهای زیستی بر اساس استفاده از مواد سبز، یعنی تجزیه پلیمر در محلول‌های آبی یا محلول‌های کمتر تهاجمی، به عنوان یک راه حل جذاب برای تولید نسل جدید از غشاهای تصفیه ظهرور کرده است [۳۶].

۱-۲-۱- سایر راههای عملیاتی

در سال‌های گذشته، روش‌های مختلف عملیاتی مبتنی بر استفاده از نیروهای الکترواستاتیک بر روی مواد پلیمری بررسی شده است تا غشاهای لیفی با ساختار میکرو و یا نانومقیاس را تشکیل دهند. نیروهای پیشران مختلف، یعنی دما، فشار، می‌توانند به تنها یا در ترکیب با میدان الکترواستاتیک برای تأثیر بر مکانیسم‌های پارگی که توانایی تشکیل الیاف پلیمری دارند (شکل ۱-۱) اعمال شوند. در میان آن‌ها، الکتروریسی مذاب یک فرایند وابسته به دما است که بر اساس تولید الیاف در مقیاس میکرومتر از مذاب پلیمری تشکیل شده است. با توجه به تنظیمات متداول ذوب ریسی، ولتاژ بالا اعمال می‌شود و پلیمر مذاب و الیاف بهوسیله برهمکنش نیروهای الکتریکی و زنجیرهای پلیمری بعد از یک ولتاژ آستانه‌ای بحرانی شکل می‌گیرد. بهطور مشابه مکانیسم

الکتروریسی بنیادی از محلول پلیمری، بر اساس رقابت بین نیروهای الکترواستاتیک، کشش سطحی و خواص ویسکوالاستیک جریان مذاب و ویژگی‌های الیاف است که اساساً توسط عوامل شناخته شده فرایند (مثل ولتاژ الکتروریسی، فاصله نازل تا جمع کننده و نرخ جریان) کنترل می‌شود [۳۷]. به علت تأثیر ویسکوزیته بالاتر پلیمرهای مذاب، نرخ‌های جریان معمولاً در الکتروریسی مذاب کمتر از محلول پلیمری در الکتروریسی محلول است؛ بنابراین منجر به محدودیت قوی برای کشش الیاف می‌شود. در مقایسه با الکتروریسی محلول که نیازمند حللاهای آلی برای حل کردن پلیمر برای رسیدن به یک محلول همگن و تشکیل الیاف ظریف با تبخیر حلال می‌باشد [۳۸-۴۰]، در الکتروریسی مذاب، الیاف، بدون حلال و بهوسیله یک روش مبتنی بر خنک کردن طبیعی جت مذاب که از جریان باردار بعد از نقطه ذوب پلیمر تحت استفاده از میدان الکتریکی خارج می‌شود، تشکیل می‌شود [۴۱]. ازین‌رو، این فرایند برای کپسوله کردن / رهایش مولکول‌های زیست ناپایدار / زیست‌تخربی پذیر (به عنوان مثال پروتئین‌ها، پلی‌ساقاریدها و اسید نوکلئیک) پیشنهاد نمی‌شود، در حالی که هیچ محدودیت خاصی در مورد الکتروریسی محلول وجود ندارد [۴۲]، با وجود این برخی از مشکلات ممکن است هنوز به عنوان یک نتیجه از برهmekنش‌های مولکولی با حللاهای تهاجمی، ثبت شود؛ علاوه براین، الکتروریسی مذاب یک رویکرد امن‌تر و "سبزتر" از الکتروریسی محلول است، انتشار حلال باقی‌مانده را ایجاد نمی‌کند، در نتیجه به‌وفور برای کاربردهای تصفیه استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱- طرحواره انواع عملیات‌های الکتروریسی

جالب توجه این است که تنظیم فرایند الکتروریسی مذاب می‌تواند برای کار با نرخ عملیاتی بالاتر (حدود 1000 m/min) با توجه به موارد متعارف بهبود یابد، یعنی با استفاده از یک پمپ فرا صوت جدید که قادر به کار بیش از 3000 m/min (ریسندگی مذاب با سرعت بالا) باشد، تولید بیشتر الیاف را تضمین کند [۴۳].

همچنین؛ قرارگیری الیاف ذوب ریسی شده در ترکیب با جمع کننده‌های متحرک، یعنی نوشتن الکتروریسی مذاب^۱، می‌تواند با موفقیت برای استفاده از غشاها لایه به لایه تولید شده با ویژگی‌های خاص [۴۴] و انواع مختلف تنظیم الیاف [۴۵] توانایی تصفیه غشا را بهبود بخشد [۴۶]. این موضوع توسط هومایگوهر^۲ و همکاران اثبات شده است که مزایای عده استفاده از روش‌های اسپان باند^۳ و الکتروریسی مذاب را مطالعه کرده است تا غشاها الکتروریسی شده چندلایه پلی اتر سولفون (PES) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) برای فیلتراسیون آب تولید کند. آن‌ها نتیجه گرفتند که غشاها نanolيفی الکتروریسی شده پلی اتر سولفون دارای نفوذپذیری بالا برای آب خالص با ذرات بیش از ۱ میکرومتر می‌باشد که با کاهش آرام نفوذپذیری وقتی فشار ورودی افزایش می‌یابد همراه است [۴۷].

الکترو دمش^۴ محلول یکی از روش‌های امکان‌پذیر برای ساخت غشاها نانو متخلخل است که از هوای فشرده ترکیب شده با میدان الکتریکی به عنوان نیروی حرکه برای تشکیل الیاف استفاده می‌شود. به طور گستره‌های استفاده می‌شود و پیکربندی ساده آن مشکل از یک سیستم نازل متحدم‌المرکز می‌باشد، محلول پلیمری به داخل نازل پمپ می‌شود و گاز با فشار بالا از طریق نازل خارجی به طور همزمان خارج می‌شود [۴۸]. در این حالت، محلول پلیمری به صورت رشته‌های چندگانه تحت نیروهای کششی از گاز با سرعت بالا اطراف شکسته شده و با اثر نیروهای الکترواستاتیکی اعمال شده ترکیب می‌شود. در این مورد، نیروهای برشی بالا در پهنه‌ی مرزی گاز/ محلول با تبخیر حلال همراه می‌شود و قطر الیاف را با تأثیر روی مکانیسم جت دمیده شده کنترل می‌کند [۴۹]. برای جزئیات بیشتر، ریخت‌شناسی لیف را می‌توان به وسیله تغییر نرخ تزریق محلول، فشار جریان گاز، فاصله نازل تا جمع کننده و طول پیشروی نازل داخلی کنترل کرد [۵۰]. با مقایسه نانوالیاف به دست آمده از روش‌های الکترو دمش و الکتروریسی محلول، واضح است که نانو-میکروالیاف‌های مشابه را می‌توان با محلول‌های مشابه پلیمری به دست آورد [۴۹]. با این حال، بهره‌وری تولید از فرایند دمش، با توجه به استفاده از نرخ تغذیه محلول که بزرگی آن ده برابر بالاتر

¹. Melt electrospinning writing (MEW)

². Homaeigohar

³. Spun-bound

⁴. Electro-blowing

از آنچه در الکتروریسی محلول به کار می‌رود، به طور قابل توجهی بالاتر است. عامل مهم دیگر مربوط به شرایط محیطی است. ژانگ^۱ و همکاران اخیراً نشان دادند که دمای هوا در خط ریسندگی به شدت بر تبخیر حلال و درنهایت، تشکیل الیاف سلولزی از طریق دمش محلول تأثیر می‌گذارد. در حقیقت، با افزایش سرعت تبخیر حلال، افزایش دما باعث کاهش تعداد الیاف نازک‌تر نیز می‌شود؛ بنابراین میرایی جریان‌های دمیده شده را خنثی می‌کند [۵۱].

به عنوان یک نتیجه، الکترو دمش محلول یک روش واقعاً مناسب برای تولید غشاهای نanolيفی برای کاربردهای تصفیه و جداسازی است. با کنترل دقیق اندازه لیف و سطح در معرض، می‌توان تعییرات تبادلی را که شدیداً برای کاربردهای فیلتراسیون گاز مهم هستند را بهبود بخشید. بیشتر مطالعات، در حال حاضر بر روی تولید الیاف کامپوزیتی فعال شده توسط نانولله‌های کربن تمرکز می‌کنند [۵۲، ۵۳]. به عنوان مثال پلی آکریلونیتریل (PAN) برای تهیه کردن نانوالیاف کامپوزیتی با استفاده از پیش سازهای خاص، قادر به فعال سازی سنتز درجا نانو الیاف کربنی با قطر ۲۰۰ نانومتر و سطح مخصوص ۲۹۲۱/۲ مترمربع بر گرم می‌باشد. به عنوان نتیجه از ویژگی‌های این الیاف خاص، جذب CO₂ به طور قابل توجهی بالاتر از جذب کربن فعال تجاری می‌باشد ($2/70 \text{ mmol g}^{-1}$ به نسبت $0/734 \text{ mmol g}^{-1}$ برای محصولات تجاری (NORIT R2030)), به طوری که استفاده بالقوه آن‌ها را برای مصارف منسوجات هوشمند و فیلتر کردن تأیید می‌کند.

۱-۲-۳- بهینه‌سازی رشته سازها و جمع کننده‌ها برای تولید مقیاس بزرگ
در حوزه محافظت از محیط‌زیست، فیلتراسیون و تصفیه، مواد مبتنی بر زمینه‌های نanolيفی، بدون شک در حال حاضر دارای محصولات صنعتی پیشرفته، با توزیع جهانی از شرکت‌های تأمین کننده هستند. برای مثال، منسوجات به طور کلی می‌توانند با بهره‌مندی از ویژگی‌های نانوالیاف با فناوری بالا برای کنترل خواص سطحی استفاده شوند. در این زمینه، توانایی رسیدن به میزان تولید بالا همچنان مهمنترین نیاز برای استفاده صنعتی است. مهم‌ترین پیشرفت‌های فناورانه که تا به امروز برای افزایش حجم تولید مورد بررسی قرار گرفته است، عمدها بر مبنای اصلاح سیستم تزریق پلیمر است و شامل معرفی اجزای چند رشته ساز است که چندین عملیات موازی به منظور توسعه سطح آزاد نهایی غشاهای را مقدور می‌سازد. به طور خاص، الکتروریسی چند جته بر اساس اجزای رشته سازهای چندگانه می‌تواند توسط تنظیمات مختلف راهاندازی شود که قابلیت این را دارد در یک پیکربندی تک‌محوری یا در یک هندسه دایره‌ای، برای تولید زمینه‌های لیفی ساخته شده از مواد

^۱. Zhuang

یک یا چندگانه ترکیب شده به لیف مشابه یا جداگانه در موارد مختلف، با کنترل بالای ضخامت غشا و بهمود کارایی فرایند به کاربرده شود [۵۴].

به منظور غلبه بر نقاط ضعف رشته سازهای چندگانه در ارتباط با تغییر شکل میدان الکتریکی ناشی از حضور دیگر جت‌های الکترورسی نزدیک به هم الکترودهای کمکی اضافی با بار قطبش مشابه یا مخالف به جت الکترورسی ممکن است استفاده شود [۵۵]. در همین راستا، استفاده از الکترودهای ثانویه نیز برای بهبود نرخ تولید الیاف در مورد سیستم‌های ریسندگی چند نازله قابل تعریف می‌باشد [۵۶]. در این مورد، تعداد جت می‌تواند از ۲ تا ۱۶ متغیر باشد که با استفاده از کاربرد هر دو جریان متمایل شده مثبت و منفی به صورت عالی مکانیسم‌های دافعه پایه‌ای درون جت را که در طی جمع‌آوری الیاف اتفاق می‌افتد را کنترل می‌کند تا یک منطقه قرارگیری گسترده‌تر را فراهم کند. مطالعات اخیر نشان داده است که سیستم‌های توزیع کننده متشكل از حفرات متعدد با قطرهای کنترل شده که در امتداد دیواره لوله‌های پلاستیکی چرخشی سوراخ دار شده باشد، با شرایطی که نرخ تولید با تغییر طول لوله و تعداد واحد حفرات ریسندگی کنترل شود، توانایی تولید تا ۰/۵ گرم در ساعت از الیاف الکترورسی شده را دارا می‌باشد [۵۷].

اخیراً شرکت‌های صنعتی یک دستگاه توزیع تجاری قابل دسترس را در اختیار کاربران قرار داده‌اند که قادر به تولید الیاف با قطر کمتر از ۵۰ نانومتر با توان عملیاتی تولید تا روزانه هزار مترمربع و نرخ تولید چند صد گرم در ساعت تا کیلوگرم در ساعت می‌باشد که عمدتاً برای تولید پوشش‌های نanolify مناسب می‌باشد.

درواقع تنظیمات راهاندازی معمول بر اساس استفاده از سیستم‌های توزیع بدون سوزن می‌باشد که معمولاً به دلیل گرفتگی محلول پلیمری در نازل رشته ساز، با محدودیت‌هایی برای دستیابی به توان عملیاتی بالا در فرایندهای تولید مدام، نقص مهمی محسوب می‌شود [۵۸]. همان‌طور که انتظار می‌رود، این اثر وقتی قطر سوزن کاهش می‌یابد بیشتر خود را نشان می‌دهد و ممکن است با استفاده از غلظت‌های پلیمری بالا یا محلول‌های چند جزئی (به عنوان مثال، مخلوط‌های پلیمری، مخلوط‌های پلیمر و نانوذره) بیشتر تقویت شود؛ بنابراین، سیستم‌های توزیع بدون سوزن در حال حاضر به عنوان یک روش عملیاتی از تنظیمات فرایند صنعتی با توان تولید بالاتر ظاهر می‌شود. در این مورد، جت الکترورسی که از سطح آزاد یک مایع تشکیل شده است بدون استفاده از سوزن‌ها یا نازل‌ها، از قطرات در اندازه میکرو، به سرعت به شکل الیاف بر روی جمع کننده هدف، قرار می‌گیرد [۵۹]. به تازگی استفاده از جمع کننده‌های چرخشی با طراحی نوآورانه، یعنی سیلندرهای چرخشی که به صورت مارپیچی موردنیزی قرار می‌گیرند، ممکن است چندین مزیت نسبت به الکترورسی مبتنی بر سرنگ و بدون سوزن از نظر بهره‌وری (شش برابر بیشتر) و فرایند پذیری پیشنهاد کنند که نه تنها روش‌های فرایند متعارف را پوشش می‌دهند، بلکه همچنین مزایای

جدیدی برای رویکردهای نوآورانه را معرفی می‌کنند (به عنوان مثال، الکتروریسی کلودی) [۶۰]. با وجود دستگاه‌های الکتروریسی جایگزین که به طور مداوم بهینه‌سازی شده است (به عنوان مثال، الکتروریسی گریز از مرکز، الکتروریسی چرخشی) برای تولید نانوالیاف با قطرهای حتی نازک‌تر از ۸۰ نانومتر و افزایش توان عملیاتی هزار برابر بیشتر از نازل‌های توزیع‌کننده بدون سوزن مرسوم، محدودیت‌های اصلی هنوز در مورد کنترل قطر الیاف و امکان اجرای یک راهکار پیشرفته برای تولید تشکیلات ساختاری پیچیده (به عنوان مثال، پوسته هسته‌ای) و جمع‌آوری الیاف خاص (به عنوان مثال، تراز بندی تک محوری و طراحی کنترل شده) وجود دارد [۶۱]. برای کنترل صحیح جمع‌آوری الیاف، تغییرات متعددی نیز برای هندسه جمع کننده دینامیک (شکل ۲-۱)، بهویژه برای رسیدن به نانوالیاف با جهت‌گیری تک محوره، تعیین شده است. اولین نوع از جمع کننده‌ها اشاره به استفاده از دو یا چند الکترود موازی دارد که می‌توانند یک ترتیب عالی در کنار فضاهای خالی که بین الکترودهای مجاور به‌وسیله یک مکانیسم اصلی دفع الکترواستاتیک بین الیاف ایجاد شده‌اند را بهبود بخشد [۶۲].

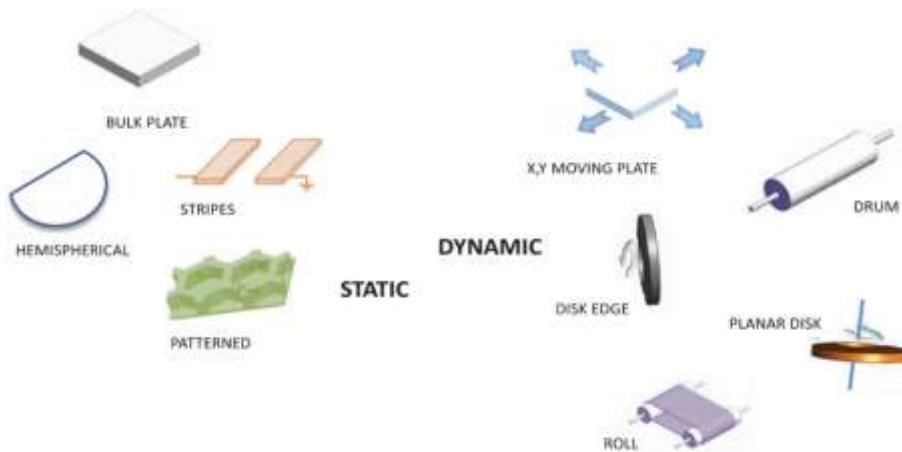
در ساده‌ترین حالت، ترتیب الیاف ممکن است توسط دو باریکه فلزی جداسده توسط یک شکاف هوا باشد که تسريع کشش نانوالیاف در سراسر شکاف را ارتقا می‌دهد تا یک آرایش موازی تحت تأثیر برهمنکش‌های الکترواستاتیک تشکیل دهد [۵۵].

به تازگی چندین مطالعه نیز نشان داد که ویزگی‌های فیزیکی الیاف الکتروریسی شده، یعنی ریخت‌شناسی کریستالی، جهت‌گیری مولکولی و غیره، ممکن است توسط ماهیت جمع کننده‌ها به عنوان تابعی از مکانیسم کارکرد مخصوص آن‌ها تحت تأثیر قرار گیرد [۶۳]. برای این منظور، جمع کننده استوانه چرخشی^۱، اغلب به عنوان جمع کننده استفاده می‌شود که اجازه می‌دهد نه تنها جهت‌گیری الیاف کنترل شود بلکه همچنین قطر الیاف به عنوان تابعی از سرعت چرخش، کنترل شود [۶۴].

به عنوان تابعی از سطح جمع‌آوری استوانه‌ای شکل و کارکرد نیروهای اینرسی در طول چرخش، توانایی جمع کننده‌ها برای جهت آرایش ترجیح یافته برای نانوالیاف می‌تواند تغییر کند. به عنوان مثال، دیسک چرخان، یعنی یک استوانه با سطح کاهش یافته در دسترس برای جایگیری الیاف، ترجیحاً برای ایجاد الیاف جهت‌گیری شده تک محوری در یک مقیاس اندازه نانومتر با محدود کردن الیاف جمع‌آوری شده بر روی لبه دیسک، مورداستفاده قرار می‌گیرد [۶۵]. در عین حال، سرعت جمع کننده می‌تواند جهت‌گیری کریستال الیاف را به دلیل جهت‌گیری زنجیره‌های مولکولی پلیمر

^۱. Rotating drum

در جهت محور الیاف که به دلیل تأثیر مکانیسم‌های تبخیر به دست می‌آید را بهبود دهد [۶۶] و بنابراین در خواص مکانیکی نهایی الیاف تأثیر می‌گذارد [۶۷].



شکل ۱-۲ طرحواره طبقه‌بندی جمع کننده‌های استاتیک و دینامیک برای فرایند الکتروریسمی

به تازگی، الگوهای در مقیاس میکرو و یا ماکرو از نانوالیاف ممکن است همچنین با استفاده از شبکه‌های رسانا یا یک سری از سوزن‌های باردار برای هدایت مجموعه الیاف در حول مناطق باردارشده [۶۸] به دست آید. به عنوان مثال، لی^۱ و همکاران، انواع مختلفی از الگوهای در جهت عرضی آرایش یافته را با استفاده از روش لایه به لایه با مجموعه‌ای از شبکه‌های رسانای با شکاف‌های خالی، توسعه دادند [۶۹].

زسمان^۲ و همکاران، یک میز آلومینیومی را به یک جمع کننده دیسک چرخان متصل کرده تا الگوهای خط عرضی در یک فرایند یک مرحله‌ای ایجاد کنند [۷۰].

از سوی دیگر، استفاده از جمع کننده عایق شده با مناطق رسانا انتخابی ممکن است با افزایش تجمع بار در جمع کننده برای ساختن الگوهای پیچیده مفید باشد [۷۱]. در این زمینه، دینگ^۳ و همکاران، قرارگیری انتخابی نانوالیاف بر روی یک بستر الاستومری که حاوی لبه‌های هرمی از طلا پوشش داده شده می‌باشد را پیشنهاد کرده است [۷۲]. الگوهای الیاف ستاره‌ای و شعاعی نیز با استفاده از جمع کننده‌های ورق‌های فولادی به شکل مینایی طراحی شده، تهیه گردید [۷۳].

¹. Li

². Zussman

³. Ding

درنهایت، از پلی استایرن آگشته شدن با کلر و پلی پروپیلن با مایع یونی که قادر به افزایش تجمع بار از الیاف جمع‌آوری شده است، برای ایجاد الگوی لانه پرنده‌ای از الیاف با استفاده از یک جمع کننده صفحه‌ای بدون الگو استفاده شده است [۷۱].

۱-۳- راهبردهایی برای طراحی غشاها میکرو و نانو متخلخل پیچیده

ساختار مبتنی بر نانو الیاف الکتروریسی شده معمولی، ویژگی‌های خاصی از قبیل نسبت سطح به حجم زیاد، اندازه منافذ کوچک و آرایش الیاف خیلی متصل بهم را عرضه می‌کند که از ویژگی‌های مهم غشاها و فرایندهای جداسازی فیزیکی یا فرایند جداسازی شیمیایی برای جریان‌های گازی یا مایع می‌باشد. نانو الیاف الکتروریسی شده به‌طور گسترشده‌ای برای تولید غشاها با عملیات نیروی پیشران فشار، مانند فرایندهای میکرو، الترا و نانو فیلتراسیون و اسمز معکوس، عملیات گرادیان دما مانند تقطیر غشایی و عملیات گرادیان پتانسیل الکتریکی مانند الکترودیالیز والکترو فیلتراسیون پیشنهاد می‌شود.

جداسازی غشایی نیاز به معماری غشایی پیچیده‌ای دارد که می‌تواند با استفاده از لایه‌های با تراکم‌ها و تخلخل مختلف (به عنوان مثال، نانوالیاف فشرده، فیلم‌ها و نانوذرات)، اصلاح سطحی شیمیایی (به عنوان مثال، لایه‌های فوق العاده آب‌گریز)، ساختارهای نانوکامپوزیت داخلی (مانند ترکیبات پلیمری، ساختارهای هیبریدی آلی - معدنی) به دست آید.

شكل غشای موردنیاز توسط برخی از فرایندها (معمولأً متفاوت از ساختار ریسندری نانولیفی است) می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلف شیوه‌های الکتروریسی غیرمتداول (الکتروریسی هم محور^۱، الکتروریسی دو نازله^۲) یا عملیات‌های بعدی (فیزیکی، شیمیایی و یا هر دو) به دست بیاید.

الکتروریسی هم محور برای تولید غشاها لیفی به منظور جداسازی مؤثر نفت و آب استفاده شده است [۷۴]. استات سلوزل و پلی آمید اسید به صورت الکتروریسی هم محور، نانو الیاف شامل هسته پلی آمید اسید و پوسته سلوزل استات را به وجود آوردن. سپس هسته پلی آمید اسید در دمای بالا برای تولید پلی ایمید، ایمیدیزه^۳ شد. سلوزل استات روی سطح الیاف با پلی بنزوکسانزین با فلور ترکیب شده^۴ و نانوذرات سیلیکا اصلاح شد. در این مورد، الکتروریسی هم محور برای تولید غشا با کرنش کششی بالاتر در مقایسه با غشاها لیفی متشکل از استات سلوزل خالص، با پایداری بالا و

¹.Coaxial electrospinning

². Dual electrospinning

³. Imidized

⁴.Fluorinated Polybenzoxazine

آب‌گریزی در طیف وسیعی از pH مفید است. در این کار، دستگاه شامل یکسوزن (قطر داخلی ۰/۵۱ میلی‌متر) به صورت هم‌محور داخل یکسوزن بیرونی (قطر ۱/۲ میلی‌متر) قرار گرفته است. این محلول‌ها شامل پلی‌آمید اسید در دی‌متیل استامید برای تغذیه هسته و سلول‌استات حل شده در حلal مخلوط دی‌کلرو متان/استون (نسبت حجمی ۱/۳) برای تغذیه پوسته می‌باشد. نرخ تغذیه در ۰/۵ و ۱ mL/h (۰/۵ و ۱) برای سوزن‌های داخلی و خارجی تعیین شد. فاصله کاری ۱۳ سانتی‌متر و ولتاژ ۲۵ کیلوولت بود.

در مطالعه دیگری [۷۵]، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید آب‌گریز که توسط فلوروسیلان عامل‌دار شده بودند، در غشاها الکتروریسی شده با استفاده از الکتروریسی تک نازله، هم‌محور و دوگانه برای توسعه پیکربندی غشایی پیچیده به منظور تقطیر غشایی گنجانده شدند. شرایط عملیاتی الکتروریسی بسته به نوع فرایند متفاوت بود. به طور خاص، الکتروریسی تک نازل در ولتاژ ۱۸ کیلوولت، نرخ جریان ۱ mL/h و فاصله کاری ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. در الکتروریسی هم‌محور، ولتاژ به ۱۴ کیلوولت کاهش یافت و نرخ جریان به ترتیب برای هسته و پوسته (محلول مشابه هسته با نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید آب‌گریز) ۰/۵ و ۰/۴ mL/h بود. در الکتروریسی دوگانه، ولتاژ اعمال‌شده به محلول‌ها (با و بدون تیتانیوم دی‌اکسید آب‌گریز) برای هر دو برابر ۱۸ کیلوولت بود، در حالی که نرخ جریان ۰/۸ mL/h برای محلول با نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید آب‌گریز و ۱ mL/h برای محلول بدون نانوذرات بود.

غشاها تولیدشده با الکتروریسی تک نازل و هم‌محور زاویه تماس نزدیک به ۱۵۰ درجه را نشان می‌دهد، در حالی که آن‌ها بی که از طریق الکتروریسی دوگانه تولیدشده بودند متشکل از الیاف دانه‌تسبیحی بر روی رشته^۱ و با زاویه تماس ۱۵۳/۴ درجه و خواص فوق العاده آب‌گریز می‌باشند؛ علاوه بر این، الکتروریسی دوگانه الیاف با اندازه‌های مختلف تولید می‌کند که تخلخل غشا را کاهش می‌دهند، زیرا الیاف نازک فضای بین الیاف ضخیم را پر می‌کنند. مزیت دیگر در استفاده از الکتروریسی دوگانه، افزایش مؤثر مقدار ذرات در معرض غشا بود. به نوبه خود، غشاها تولیدشده توسط الکتروریسی دوگانه عملکرد تقطیر غشایی بهتری را نشان داد.

غشاها لیفی نانو کامپوزیتی فوق العاده آب‌گریز توسط الکتروریسی، با استفاده از پلی وینیلیدین فلوراید و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده تولید شدند [۷۶]. نانوذرات به وسیله روش سل-ژل با استفاده از مواد متصل‌کننده سیلان^۲ مختلف (به عنوان مثال، اکتیل تری اتوکسی سیلان^۳،

^۱. Bead-on-string

^۲. Silane

^۳. n-octyltriethoxysilane

وینیل تری متوكسی سیلان^۱ و وینیل تری اتوکسی سیلان^۲) تهیه شد. ذرات سیلیکا زبری سطح الیاف را نسبت به غشاها بدون نانوذرات افزایش داد. به طور خاص، یک ساختار در دو مقیاس میکرو/ نانو تشکیل شد که عهدهدار آب‌گریزی فوق العاده غشاها لیفی نانو کامپوزیتی بود. زاویه تماس از طریق هر دو عامل مواد اتصال دهنده و مقدار نانوذرات سیلیکا تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بالاترین زاویه تماس (۱۶۰ درجه) با عامل اتصال اکتیل تری اتوکسی سیلان و مقدار ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به دست آمد.

غشاها نانو لیفی آب‌گریز پایدار حرارتی توسط الکتروریسی الیاف هیبریدی پلی دی متیل سیلوکسان / سیلیکا تولید شدند [۷۷]. سیلیکا و پلی دی متیل سیلوکسان غوطه‌ور شده در دی کلرو متان، یک محلول مناسب برای تبدیل به الیاف فوق العاده ظرفی بهوسیله الکتروریسی تولید می‌کنند. هیچ تغییری در آب‌گریزی در غشاها تحت تأثیر شعله مشاهده نشد. نتایج به روشنی تأیید می‌کنند که مشخصه آب‌گریزی از نظر حرارتی پایدار است. با این حال، آب‌گریزی به نظر می‌رسد مربوط به چگالی غشا می‌باشد. آب‌گریزی عالی در بخش‌های متراکم غشا یافت شد، در حالی که آب‌گریزی ممکن است در بخش‌های غیر متراکم ناپدید شوند.

گرافن در ترکیب با کوپلیمر (پلی وینیلیدن فلوئورید- هگزا فلوئوروپروپیلن) به منظور تولید غشاها نانو کامپوزیت الکتروریسی شده فوق العاده آب‌گریز استفاده شد [۷۸]. این مقاله نشان می‌دهد که گرافن٪۵ وزنی به طور قابل توجهی ساختار و خواص غشا را افزایش می‌دهد. الکتروریسی در ولتاژ ۱۰ کیلوولت، فاصله کاری ۱۰ سانتی‌متر و نرخ جریان ۱ mL/h انجام شد.

زوایای تماس غشاها نانولیفی را می‌توان با مخلوط کردن پلیمرهای مختلف در محلول الکتروریسی، به جای پرکننده‌های معروفی شده مانند نانوذرات، تنظیم کرد. یک مثال، کار رن^۳ و همکاران است [۷۹]، جایی که نانوالیاف فوق العاده آب‌گریز پلی دی متیل سیلوکسان / پلی متیل متاکریلات با موقعيت الکتروریسی شده و یک غشا با زاویه تماس ۱۶۳ درجه، تولید کردند.

غشاها لیفی کامپوزیتی نانو ساختار $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PS}$ توسط الکتروریسی تولید شد که به عنوان یک جاذب مغناطیسی برای حذف روغن از آب استفاده می‌شود [۸۰]. محتوای $\text{NiFe}_2\text{O}_4/۳۰\%$ پلیمر بود و شرایط الکتروریسی، ولتاژ اعمال شده ۲۵ کیلوولت، فاصله کاری ۱۵ سانتی‌متر و نرخ جریان $۰/۷۵ \text{ mL/h}$ بود. عملکرد جذب غشاها نانولیفی کامپوزیت $9/۲۰ \text{ g/g}$ برای دودکان^۴ و $11/۱۵ \text{ g/g}$ برای روغن‌موتور بود. ظرفیت جذب، پایین‌تر از عملکرد جذب غشاها لیفی پلی

^۱. Vinyltrimethoxysilane

^۲. Vinyltriethoxysilane

^۳. Ren

^۴. Dodecane

سولفون خالص الکتروریسی شده در شرایط مشابه بود. کاهش ظرفیت جذب با در نظر گرفتن محتوای قابل توجه (۳۰٪) مواد معدنی توضیح داده می‌شود. مزیت استفاده از کامپوزیت‌های الکتروریسی شده در جداسازی مغناطیسی آسان جاذب از سیستم روغن / آب، می‌باشد.

غشاهای چندلایه که خواص مختلف چندین پلیمر را ترکیب می‌کنند، عملکرد بهتری در کاربردهای خاص نسبت به غشاهای تشکیل شده توسعه تنها یک پلیمر را نشان می‌دهد.

برای تولید غشاهای فوق العاده آب‌گریز با شار آب بالا به منظور استفاده در تقطیر غشایی، از یک دستگاه الکتروریسی غیرمتداول استفاده شد [۸۱]. دستگاه شامل سه سوزن در یک ترتیب خطی بود. سوزن در وسط با یک محلول پلی اکریلو نیتریل در دی متیل فرمامید و دو سوزن دیگر با امولسیون پلی وینیل الکل و پلی (تترا فلوفور اتیلن) در آب تغذیه شد. این دستگاه به منظور افزایش خواص مکانیکی غشاهای حاصل شده انتخاب شد زیرا نانوالیاف پلی وینیل الکل / پلی تترا فلوفور اتیلن استحکام مکانیکی ضعیفی را نشان می‌دهد و نانوالیاف پلی اکریلو نیتریل با موفقیت به عنوان تقویت‌کننده عمل کردند.

یک روش متفاوت برای تولید غشاهای دوقطبی استفاده شده است که شامل لایه‌های مبادله کاتیونی و مبادله آنیونی است که از طریق یک لایه میانی خنثی جدا می‌شوند. غشاهای دوقطبی معمولاً با استفاده از میدان الکتریکی برای تجزیه آب به پروتون‌ها و یون‌های هیدروکسید استفاده می‌شود.

در این کار [۸۲] پلی فنیلن اکسید سولفونه شده، پلی اتیلن گلیکول و پلی فنیلن اکسید چهار عاملی به طور پیوسته بر روی یک استوانه چرخشی الکتروریسی می‌شود، به طوری که غشاهای حاصل از لایه‌های متفاوت از مواد مختلف تشکیل شدند. پس از الکتروریسی، غشاها به منظور تشکیل ساختار متراکم فشرده‌سازی داغ^۱ شدند. ضخامت هر لایه را می‌توان به راحتی با کنترل عوامل الکتروریسی برای هر محلول تنظیم کرد.

یک ساختار چندلایه الکتروریسی شده با نایلون ۶ و پلی تری متیلن ترفتالات نیز برای تصفیه هوا کم‌فشار پیشنهاد شده است [۸۳]. اندازه متوسط نانوالیاف الکتروریسی شده برای دو پلیمر متفاوت بود. به طور خاص، نانوالیاف نایلون ۶ اندازه متوسط ۱۰۶ نانومتر داشتند، در حالی که اندازه نانوالیاف پلی تری متیلن ترفتالات ۹۰۷ نانومتر بوده است. بنابراین، اندازه حفره لایه نانوالیاف نایلون ۶ حاصل شده کوچک‌تر از پلی تری متیلن ترفتالات است. منافعی از لحاظ کارایی تصفیه در استفاده از غشاهای چندلایه به جای غشاهای تک لایه به دست می‌آید.

^۱. Hot press

به منظور افزایش بهم پیوستگی نانوالیاف، در یک مقاله [۸۴] نانوالیاف پلی اتیلن ترفتالات بر روی یک استوانه چرخشی با الکتروریسی همزمان دو محلول با غلظت‌های مختلف پلیمری٪ (۲۰ و ۲۲) در دی متیل فرمامید / تری فلوئورو استیک اسید (۸۰:۲۰) از دو سوزن (به اصطلاح الکتروریسی دو نازله) جمع‌آوری شدند. عوامل الکتروریسی شامل نرخ جریان mL/h ۱/۲، ولتاژ ۲۵ کیلوولت و فاصله کاری ۱۲ سانتیمتر برای هر دو سوزن بود. غشاها حاصل شده متعاقباً تحت عملیات تکمیلی^۱ قرار گرفتند و برای فرایند اسمز پیشنهاد شدند.

مقاله دیگر [۸۵] استفاده از یک جمع کننده الگو دار شده برای تولید یک ساختار نانولیفی متراکم - پراکنده^۲ برای فیلتراسیون گاز را گزارش کرد. غشا توسط الکتروریسی نانوالیاف پلی آکریلونیتریل بر روی یک کاغذ بر جسته و یک پوشش حباب هوا به دست می‌آید و با یک فویل آلومینیومی رایج به عنوان جمع‌آوری کننده مقایسه شده است. در فویل آلومینیومی، توزیع نانوالیاف از لحاظ ضخامت یکنواخت است، در حالی که تغییرات در چگالی الیاف ممکن است به ویژگی‌های جمع کننده‌های الگو دار شده نسبت داده شود. به طور خاص، نانوالیاف بر لبه قالب قرار گرفته‌اند که چگالی‌های مختلف غشا را موجب می‌شود. جالب است، جمع کننده‌های الگودار شده اندازه نانوالیاف را تغییر نمی‌دهد؛ بنابراین، تغییرات در اندازه منفذ و تخلخل تنها به جمع کننده‌های الگودار نسبت داده شده است. کارایی غشاها نانولیفی با ساختارهای الگو دار شده‌اند کی کاهش یافته، اما افت فشار نیز به طور چشمگیری کاهش یافته است. به عنوان یک نتیجه، عملکرد کلی غشا به طور قابل توجهی بهبود یافته است.

ژانگ^۳ و همکاران [۸۶] امکان تولید نانو-شبکه‌ها^۴ دو بعدی با قطر فوق العاده باریک (قریباً ۲۰ نانومتر) را در تهیه یک مرحله‌ای توسط الکتروریسی گزارش داد. قطر نانومقیاس این الیاف می‌تواند اثر لنزش مولکول‌های هوا را تسهیل کند و اندازه منافذ کوچک به دست آمده می‌تواند ذرات فوق العاده ریز از هوا و گازها را غربال کند. غشاها الکتروریسی شده پلی فنیلن ایزو فتالامید^۵ با قطرهای الیاف دو حالت^۶ به صورت خود به خود تولید می‌شوند. چندین نانوسیم‌های به طور تصادفی توزیع شده با قطر ۳۰-۵۰ نانومتر، به نانوالیاف با اندازه منظم (۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر) متصل می‌شود. این پدیده به قابلیت هدایت بالای محلول نسبت داده شد که منجر به شارژ بالا در جت قابل پرواز^۷

^۱. Post-treatment

^۲. dense-sparse

^۳. Zhang

^۴. Nano- nets

^۵. Poly(m-phenylene isophthalamide)

^۶. Bimodal

^۷. Flying jet

حاصل شده و انشعاب آن‌ها به دلیل دافعه الکتریکی بالا در داخل خود جت می‌باشد. به نظر می‌رسد مهم‌ترین عامل رطوبت است چراکه رطوبت با تبخیر حلال و اتلاف بار ارتباط دارد. نانو الیاف بر روی یک طناب پلی‌استر توالی بافته‌شده به عنوان یک لایه پشتیبان برای تولید غشاهای لوله‌ای بهمنظور تصفیه آب و پساب قرار گرفت [۸۷]. این غشا توسط الکتروریسی محلول پلی‌آکریلونیتریل در دی متیل فرمامید تولید می‌شود. اندازه متوسط منفذ بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر است. این غشا دو تا سه برابر، شار بالاتری از غشا تجاری با اندازه منفذ مشابه را نشان داده است. ذرات با قطر ۱-۳ میلی‌متر رد نشدنند. با این حال، غشا تجاری بازده بیشتری برای ذرات ریز نشان می‌دهد (۱۰۰ نانومتر و ۵۰۰ نانومتر). به نظر می‌رسد که اندازه منفذ غشا تجاری الکتروریسی در لایه اول بزرگتر از غشا تجاری است.

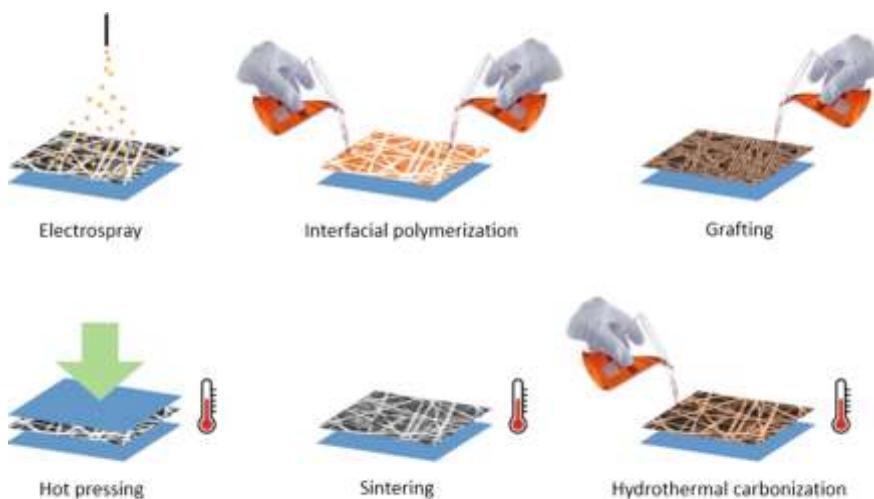
۱-۴-۱- عملیات تکمیلی غشا ایافی

عملیات بعدی معمولاً شامل اعمال یک مرحله درجه حرارت بالا (پخت^۱، تف جوشی^۲، فشار داغ، پیوند گرمایی) پس از الکتروریسی، بهمنظور تغییر ساختار شیمیایی و یا ریخت‌شناسی نانوالیاف می‌باشد. سایر عملیات تکمیلی مربوط به قرارگیری مواد چندگانه هستند (شکل ۳-۱). در این مورد، نانوالیاف به عنوان یک پشتیبان برای لایه‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توانند شامل نانوالیاف چندلایه، لایه نشانی فیلم (به عنوان مثال، پلیمریزاسیون میان سطحی^۳) یا لایه نشانی نانوذرات (نظیر الکترواسپری) باشند. تغییرات شیمیایی سطح نانو الیاف اغلب به وسیله پیوند انجام می‌شود، همچنین عملیات حرارتی مانند تف جوشی و پخت می‌تواند گروه‌های شیمیایی سطوح نانوالیاف را تغییر دهد.

^۱. Curing

^۲. Sintering

^۳. Interfacial polymerization



شکل ۳-۱ طرحواره‌ای از عملیات بعدی مختلف برای غشاها الکتروریسی شده

۱-۴-۱- اصلاحات فیزیکی

از ترکیب الکتروریسی و الکترو اسپری برای تغییر ریخت‌شناسی سطحی نانو الیاف به منظور افزایش رفتار آب‌گردی غشاها برای کاربردهای مختلف می‌تواند استفاده قرار گیرد. ریو^۱ و همکاران [۸۸] با استفاده از الکتروریسی و الکترو اسپری همزمان، لایه‌هایی را علیه عوامل مهاجم شیمیایی تولید کردند. الکتروریسی توسط تغذیه محلول نومکس آرامید^۲ حل شده در دی متیل استامید و لیتیم کلرید (نسبت وزنی پ ۱:۵ Cl/Nomex) با نرخ جریان ۰/۱۵ mL/h و ولتاژ مشبت ۲۰ تا ۲۵ کیلوولت انجام شد. الکترو اسپری با استفاده از اکسید منیزیم یا پلی اکسومتالات^۳ در متانول با ولتاژ ۱۲ کیلوولت، فاصله کاری ۱۰ سانتیمتر و نرخ جریان ۱/۵ mL/h انجام شد. جمع‌کننده (یک استوانه چرخشی) با ولتاژ ۵- کیلوولت بود. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا خواص شیمیایی و مکانیکی آن‌ها بهبود یابد. سپس نمونه‌ها به‌وسیله یک ترکیب با فلور ترکیب شده (Unidyne) برای به دست آوردن سطوح همزمان آمفی فوبیک^۴، تحت عملیات قرار گرفتند. این مجموعه‌ها به‌طور همزمان آب‌گردی فوق العاده (با زاویه

¹. Ryu

². m-aramid Nomex

³. Polyoxometalate

⁴. Amphiphobic

تماس آب بیش از ۱۵۰ درجه) و روغن گریزی بالا (زاویه تماس روغن بالاتر از ۱۲۰ درجه) را نشان دادند. به نظر می‌رسد زبری سطح موجب افزایش خواص دفع شدگی می‌شود.

در کار دیگری [۸۹]، غشاء الکتروریسی شده کوپلیمر پلی وینیلیدین فلوراید- هگزا فلوئوروپروپیلن با الکترو اسپری بهمنظور لایه نشانی ریزکرهای^۱ پلی دی متیل سیلوکسان با خواص ابر آب گریزی انجام می‌شود. کوپلیمر پلی وینیلیدین فلوراید - هگزا فلوئورو پروپیلن از محلول لیتیوم کلرید، دی متیل فرمامید و استون در ولتاژ ۱۸ کیلوولت، فاصله کاری ۱۵ سانتی‌متر و نرخ جریان 7 mL/h الکتروریسی گردید، درحالی که ریزکرهای بر روی نانوالیاف بهوسیله الکترو اسپری با محلول پلی دی متیل سیلوکسان در محلول دی متیل فرمامید و تترا هیدرو فوران در ولتاژ ۳۰ کیلوولت، فاصله کاری ۱۱ سانتی‌متر و نرخ جریان 2 mL/h قرار گرفتند. غشهای هیبریدی حاصل، افزایش قابل توجهی در زبری و ابر آب گریزی با زاویه تماس $155/4$ درجه داشتند. این غشهای خواص ضد گرفتگی در تصفیه پساب رنگرزی دارند.

روش مشابه [۹۰] برای پوشش نانوالیاف الکتروریسی شده پلی آکریلونیتریل با نانوذرات سیلیکا با هدف تولید غشهای نانولیفی فوق العاده آبدوست و در برابر آب فوق العاده روغن گریز برای جداسازی با شار بالا آب از روغن استفاده شد.

مزایای استفاده از الکترو اسپری و الکترو اسپری ترکیبی در تولید غشهای برای جذب کربن دی اکسید مشاهده شد [۹۱]. این مقاله گزارش داد که غشا نانولیفی بهوسیله الکتروریسی نانوذرات اکسید فلزی معلق شده در محلول پلی آکریلونیتریل تولید می‌شود. الکتروریسی توسط لایه نشانی نانوذرات اکسید فلزی توسط الکترو اسپری با ولتاژ بالا $40-45$ کیلوولت با فاصله کاری ۱۵ سانتی‌متر و نرخ جریان بالا ($4-3/5\text{ mL/h}$) دنبال شد. لایه نشانی نانوذرات اکسید فلزی بر روی نانوالیاف الکتروریسی شده، به جهت جذب الکترواستاتیک، یکتواخت بود. مقدار اکسید فلزی بهطور قابل توجهی افزایش یافته و جذب دی اکسید کربن به میزان زیادی تقویت شده و همچنین طول عمر غشا افزایش می‌یابد.

در نمکزدایی^۲، یکی از پرکاربردترین اصلاحات نانوالیاف استفاده از پلیمریزاسیون میان سطحی است که هر لایه انتخابی می‌تواند بهطور مستقل بهمنظور تحقق یک هدف خاص تنظیم شود [۹۲]. یکی از بیشترین تغییرات نانوالیاف توسط پلیمریزاسیون میان سطحی است زیرا هر لایه انتخابی می‌تواند مستقل از یک هدف خاص تنظیم شود [۹۲].

در مقاله‌ای [۹۳]، نانوالیاف پلی اکریلو نیتریل (با قطر متوسط 500 نانومتر) توسط الکتروریسی یک محلول در حل دی متیل استامید/ دی متیل فرمامید (۱:۱) در ولتاژ ۱۵ کیلوولت و نرخ

¹. Microspheres

². Desalination

جريان $1/2 \text{ mL/h}$ و فاصله کاری ۱۵ سانتی‌متر تولید شد. سپس یک لایه پلی آمید نازک بر روی نانو الیاف بهوسیله پلیمریزاسیون میان سطحی بین متا فنیلن دی آمین^۱ و تری مسویل کلرید^۲ لایه نشانی شد.

غشای الکتروریسی شده ابتدا با محلول آب - فنیلین دی آمین و سپس با یک محلول هگزان تری مزویل کلرید آغشته شد. واضح است که آب و هگزان مخلوط نشده و پلیمریزاسیون در بین سطح اتفاق می‌افتد. درنهایت، غشای تازه آماده شده در دمای 80°C درجه سانتی‌گراد تحت خلاً قرار گرفت. غشاها نanolیفی حاصل شده بسیار آبدوست هستند و به سرعت قطره آب را جذب می‌کنند. این غشا در جداسازی اسمزی تتراسیکلین هیدروکلرید^۳ برای شبیه‌سازی بازیابی آنتی‌بیوتیک از آب آزمایش شدند. غشاها افزایش قابل توجهی در شار عبوری آب در مقایسه با غشاها تجاری با عدم پذیرش تقریباً کامل ($99/8\%$ درصد) تتراسیکلین هیدروکلرید نشان داد که نشان‌دهنده پتانسیل بسیار بالایی برای تصفیه پساب‌های آنتی‌بیوتیکی است.

در کار دیگری [۹۴] مخلوط نانوذرات سیلیکا و پلی اتر ایمید برای نانوالیاف (با قطر متوسط 250 نانومتر) با حلal دی متیل فرمامید، متیل پیرولیدون و لیتیم کلرید، ولتاژ 30 کیلوولت ، نرخ جريان $9/0 \text{ mL/h}$ و فاصله کاری 12 سانتی‌متر الکتروریسی شد. یک لایه پلی آمید نازک بر روی نانوالیاف توسط پلیمریزاسیون بین سطحی متا فنیلن دی آمین و تری مسویل کلرید تولید شد. نانوالیاف ابتدا در ایزوپروپیل الكل غوطه‌ور شده و در آب شسته شدند. روش پلیمریزاسیون بین سطحی، شبیه به مورد قبلی است. نانوالیاف با محلول متا فنیلن دی آمین در آب و محلول تری مسویل کلرید در هگزان آغشته شد. درنهایت غشا در دمای 90°C درجه سانتی‌گراد در آب قرار گرفت. زاویه تماس نزدیک به 130° درجه به دست آمد. غشاها برای جداسازی اسمزی سدیم کلرید از محلول آب مورد آزمایش قرار گرفتند. غشاها با بیشترین مقدار سیلیکا، حداکثر تخلخل بستر و بالاترین نفوذپذیری آب را به دست آوردند. علاوه براین، مقاله نشان می‌دهد که غشاها نanolیفی نانوکامپوزیتی در یک ساختار بسیار متخلخل حاصل شده است که انتقال جرم را از طریق لایه تسهیل می‌کند و به همین دلیل عملکرد اسمزی را بهطور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

نانوالیاف پلی‌اتیلن ترفتالات، توسط الکتروریسی دوگانه از دو محلول با غلظت‌های پلیمری مختلف، تولید شد که به عنوان پشتیبان برای تولید غشاها اسمزی استفاده شد [۸۴]. نانوالیاف در دمای 160°C درجه سانتی‌گراد به منظور حذف اثرات حلال‌ها حرارت داده شدند. سپس پلیمریزاسیون بین سطحی با استفاده از پارا فنیلن دی آمین و تری اتیل آمین در آب و تری مسویل کلرید در

¹. m-Phenylenediamine

². 1,3,5-Trimesoyl chloride

³. Tetracycline hydrochloride

هگزان انجام شد. با توجه به ماهیت آبگریز نانوالیاف پلی اتیلن ترفتالات، فاز آلی استفاده شده ابتدا توسط فاز آبی دنبال شد. غشاها در برابر نمکهای مختلف آزمایش شده و عملکردی بهبود یافته را نسبت به یک فیلم بدون نانوالیاف نشان دادند.

یکی دیگر از فنون برای کاهش اندازه منفذ^۱ و تخلخل غشاها الکتروریسمی شده بهمنظور ساخت مناسب آن‌ها برای فرایندهای نمک‌زدایی (آب‌شیرین‌کن) فشار داغ است.

این کار بر روی نانو الیاف الکتروریسمی شده استفاده شده است تا اثر آن بر خواص مکانیکی و فیزیکی غشاها نanolیفی دولایه متشكل از کوپلیمر پلی وینیلیدن فلورا بد- هگزا فلوئورو پروپیلن در لایه بالا که توسط لایه‌های نanolیفی مختلف ساخته شده از پلی وینیل الكل، نایلون ۶ یا پلی آکریلونیتریل پشتیبانی می‌شود، بررسی شود [۹۵]. هدف این مطالعه، درک بهتر از نقش غشاها نanolیفی دولایه برای عملکرد آن‌ها در آب‌شیرین‌کن است. لایه آبگریز دارای زاویه تماس آب ۱۴۰ درجه بود، درحالی‌که طرف دیگر یک رفتار آب‌دوستی با زاویه تماس آب کمتر از ۹۰ درجه داشت. غشاها الکتروریسمی شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ روز خشک می‌شوند تا بقایای حلال را حذف کنند. سپس فشار داغ برای فشردن غشاها ننانوالیافی بین دو صفحه مسطح در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱/۵ ساعت مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های نمک‌زدایی برای ۱۰ ساعت با محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید در دمای ۶۰°C انجام شد. بهترین عملکرد عدم پذیرش بیشتر از ۹۹٪، به ضخامت کوچک لایه آبگریز نسبت داده شده است.

تف جوشی یک روش معمول برای تغییر ویژگی‌های فیزیکی نانو الیاف مبتنی بر پلی تترا فلوئوراتیلن است. هوانگ^۲ و همکاران [۸۱] غشاها نanolیفی فوق العاده آبگریز متشكل از پلی تترا فلوئور اتیلن/پلی وینیل الكل و تقویت شده با ننانوالیاف پلی اکریلو نیتریل تولید کردند. تف جوشی در دماهای مختلف انجام شد تا اثر آن‌ها بر عملکرد غشا مطالعه شود. فرایند تف جوشی، پلی وینیل الكل را به طور کامل حذف و پلی تترا فلوئورو اتیلن را ذوب کرد. غشاها به دست آمده در دماهای تف جوشی مختلف، شبکه‌های لیفی به هم پیوسته شده را نشان می‌دهند، اما افزایش دمای تف جوشی، فشرده کردن غشاها و کاهش اندازه منفذ را ایجاد می‌کند. در طی آزمون‌های تقطیر غشا، عدم پذیرش نمک بیشتر از ۹۹/۸٪ بود. علاوه بر این، آبگریزی بالا و چربی دوستی قوی برای جداسازی روغن و آب مفید خواهد بود.

^۱. Pore size

^۲. Huang

۱-۴-۲-۱- اصلاحات شیمیایی

چندین روش برای تقویت آبگریزی نانوالیاف هنگام استفاده از این عملیات استفاده شد. به عنوان مثال، در غشا برای جداسازی آب/روغن، استات سلولز روی سطح الیاف هسته/پوسته سلولز استات/پلی ایمید که به صورت هم محور الکتروریسی شده است با پلی بنزوکسانزین با فلوئور ترکیب شده^۱ (به وسیله پلیمریزاسیون درجا^۲) و نانوذرات سیلیکا اصلاح شد [۷۴].

سطح فلوئوری شده با نانوذرات سیلیکا رفتار آبگریزی بالای را نشان داد. آبگریزی توسط زاویه تماس دینامیک و زاویه لغزش^۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. زوایای تماس پیش رفته و دور شده^۴ ۱۶۲/۱ درجه و ۱۵۵/۷ درجه بود، در حالی که یک قطره آب با یک زاویه لغزش حدود ۷/۵ درجه سقوط می‌کند؛ از سوی دیگر، یک مایع روغنی (دی کلرو متان) توسط غشا در کمتر از ۱۵۰ ثانیه جذب می‌شود. کارایی جداسازی روغن و آب در آزمایش جداسازی با نیروی پیشران جاذبه با استفاده از ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط دی کلرو متان و آب (۵۰ درصد حجمی) موردنظری قرار گرفت. دی کلرو متان به سرعت از طریق غشاها نفوذ می‌کند، در حالی که آب به دلیل ابر آبگریزی غشا قادر به عبور نیست.

پیوند زدن همچنین می‌تواند برای عامل‌دار کردن نانوالیاف برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گیرد. چیت پونگ^۵ و هاسون^۶ [۹۶, ۹۷] نانوالیاف سلولز بازیافتی الکتروریسی شده را به شکل شیمیایی (به عنوان مثال، دی استیله کردن سلولز استات) با پلی گلیسیدیل متاکریلات^۷ اصلاح کردند. سپس، پیوند با پلی اکریلیک اسید یا پلی ایتاکونیک اسید^۸ به منظور تولید غشاها برای حذف یون‌های سنتگین فلزی از آب توسط فرایندهای مبادله یونی انجام شد. غشاها به طور خاص بر روی کادمیم آزمایش شده است.

پیوند زدن می‌تواند منجر به تغییرات ریخت‌شناسی بر سطوح نانولیفی و همچنین اصلاح شیمیایی شود. یک مثال از وانگ^۹ و همکاران گزارش شده است. [۹۸] در این مقاله، نانوالیاف سلولز بازیافتی الکتروریسی شده (دی استیله کردن سلولز استات) از لحاظ شیمیایی با پلیمریزاسیون رادیکال انتقال اتم هیدروکسی اتیل متاکریلات یا سدیم آکریلات اصلاح شده است. زنجیرهای

¹. Fluorinated polybenzoxazine

². In situ polymerization

³. Sliding angle

⁴. Advancing and receding contact angles

⁵. Chitpong

⁶. Husson

⁷. Poly(glycidyl methacrylate)

⁸. Poly(itaconic acid)

⁹. Wang

پلیمری به ترتیب از پلی هیدروکسی اتیل متاکریلات و پلی سدیم اکریلات تشکیل شده است که بر روی سطح سلولز بهمنظور تغییر اندازه منفذ غشاها نانولیفی سلولز الکتروریسی شده، رشد کردند. بهطور خاص، پلی هیدروکسی اتیل متاکریلات سطوح الیاف را پوشش می‌دهد که الیاف را در طول زمان ضخیم‌تر می‌کند و منافذ غشا را بهطور جزئی پر می‌کند. پلی سدیم اکریلات، اندازه الیاف را تغییر نداد، اما منافذ آن با ساختار پلیمری سست شده، بهطور جزئی پر شده بود. برای آزمایش غشاها برای الترا فیلتراسیون، نانو ذرات با اندازه تقریبی ۴۰ نانومتر استفاده شده است. پس از پیوند پلی سدیم اکریلات بیش از ۹۵ درصد نانوذرات را رد کردند، درحالی که پس از اصلاح شده بهطور قابل توجهی بهبود یافته است.

کربونیزاسیون گرمابی^۱ بر روی نانوالیاف الکتروریسی شده پلی اکریلو نیتریل برای جذب آلاینده‌های آئیونی از آب استفاده شده است [۹۹]. پلی آکریلو نیتریل در دی متیل فرمامید حل شده است و نانوالیاف در ولتاژ ۱۸ کیلوولت و در فاصله ۱۵ سانتی‌متری الکتروریسی شد. کربونیزاسیون گرمابی نانو الیاف الکتروریسی شده بر روی محلول گلوكز و دی اتیلن تری آمین در آب در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۸ ساعت انجام شد. در نتیجه عملیات حرارتی، نانوالیاف با یک لایه از گروه‌های کربن و آمین پوشش داده شدند. غشاها به عنوان جاذب‌های یون‌های کروم IV و دی کلرو فنوکسی اسیدی (یک علف‌کش) از آب آزمایش شده است. ظرفیت جذب mg/g ۲۹۰/۷۰ و mg/g ۱۶۴/۴۷ برابر کروم و دی کلرو فنوکسی اسیدی است که به ترتیب اندازه‌گیری شد. خواص جذب توسط یک عملیات ساده بازیابی شد و بازده حذف هر دو آلاینده‌ها حتی پس از پنج دوره بیشتر از ۹۰٪ باقی ماند.

۱-۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده در کاربردهای تصفیه

ریسنگی الکترواستاتیک یا الکتروریسی قطعاً یکی از فناوری‌های امیدوارکننده برای توسعه محصولات منسوجی متنوع است که به طور گستردگی به عنوان غشاها هوشمند با ضریب کیفیت بهبود یافته با توجه به فیلترهای تجاری شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. درواقع، این یک فناوری نویدبخش نه تنها به دلیل تنوع عملیاتی بی‌حدود حصر آن، بلکه همچنین برای ایجاد فرصت بی‌نظیری است که منجر به این شود که به طور مؤثری ترقی یابد و چشم‌اندازهای واقعی را برای تولید صنعتی باز کند. در مقیاس آزمایشگاهی، الکتروریسی اجازه فرایند پذیری تا چند لیتر از محلول پلیمری را به طور مداوم می‌دهد، به طوری که غشاها با چند میلی‌متر ضخامت تولید شود؛ علاوه بر این،

^۱. Hydrothermal carbonization

ویژگی‌های جذاب نانوالیاف الکتروریسی شده از جمله مساحت سطحی بالا و تخلخل قابل تنظیم [۹۹]، تپوپوگرافی ذاتاً سه‌بعدی و ویژگی‌های عملکردی [۱۰۰].

به غشاها الکتروریسی شده کمک زیادی می‌کنند تا فیلترهای نوآورانه برای کاربردهای صنعتی را توسعه دهند. علی‌رغم مساحت سطحی الیاف پلیمری الکتروریسی شده ($30\text{-}8\text{m}^2/\text{g}$) که نسبتاً پایین‌تر از گرانول‌های کربن فعال است، عامل‌دار کردن آن‌ها توسط نانوذرات‌های مختلف و یا افزودنی‌های خاص می‌تواند به طور مؤثر برای افزایش مساحت سطحی برای جذب استفاده شود، بنابراین بر تنها عامل محدود کننده ظاهری آن‌ها، فائق می‌آیند [۱۰۱].

ساخترهای نوآورانه؛ مانند، هیبریدی [۱۰۲]، دانه‌تسیبیحی بر روی رشته [۱۸] و چندلایه [۱۰۳] به طور مشخص نشان می‌دهد که امکان بهبود خواص جذب فیلترهای الکتروریسی شده به‌وسیله روش‌های مختلف وجود دارد. به عنوان مثال، در مورد ساختارهای هیبریدی، الیاف ظریف به کارایی تصفیه کمک می‌کنند، در حالی که الیاف ضخیم‌تر به سفتی و محکم شدن کمک می‌کنند و آن‌ها می‌توانند به طور مؤثر برای توسعه فیلترهای یکپارچه با الیاف هیبریدی مبتنی بر الگوهای ساندویچی برای کاربردهای چندمنظوره مورد استفاده قرار گیرند. در مورد دانه‌تسیبیحی بر روی رشته که توسط فرایند الکترورسی محلول پلیمری با غلظت کم در یک ماتریس پیوسته از نانوالیاف پلیمری به دست می‌آید، دانه‌تسیبیحی‌ها برای تشکیل خلل و فرج در شبکه لیفی، علاوه بر بهبود کارایی تصفیه بالا و افت فشار نسبتاً کم، مؤثر می‌باشد. در مورد ساختارهای کامپوزیتی چندلایه که توسط لایه نشانی پی‌درپی جت دوگانه حاصل می‌شود، ماهیت ناهمگون غشا به علت پردازش محلول‌های مختلف، تشکیل یک ساختار نیمه در هم نفوذ کرده (به عنوان مثال پیوندی و غیر پیوندی)، با کارایی تصفیه متغیر را ترویج می‌کند که به شدت وابسته به آرایش لایه الیاف می‌باشد [۱۰۴، ۱۰۵].

علیرغم مطالعات متعددی که در مورد اثربخشی غشاها نانولیفی الکتروریسی شده برای فیلتراسیون هوا و گاز گزارش شده است، محدودیت‌های اصلی به دلیل تغییرات زیاد در پارامترهای طراحی فیلتر به عنوان تابعی از خواص آلاینده‌های هوا در زمینه‌های محیطی خاص می‌باشد که اثرات مختلف در سلامت انسان را نشان می‌دهد. چالش اصلی برای غشا نانوالیاف الکتروریسی شده، طراحی یک بستر فیلتر برای جذب واحدهای اندازه‌ای مختلف مثل نانوذرات و آلاینده‌های گازی به طور همزمان خواهد بود. اگرچه غشاها نانولیفی الکتروریسی شده در جذب ذرات با اندازه کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر مؤثر هستند، اما پتانسیل آن‌ها برای جذب ذرات ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هنوز ایجاد نشده است.

در آینده، علاقه زیادی به اجرای فناوری‌های جدید در بهبود تصفیه از طریق جذب الکترواستاتیک اختصاص داده می‌شود؛ علاوه بر این، نیاز خواهد بود تا مدل‌های پیش‌بینی کننده

به وسیله اجرای روش‌های محاسباتی پیش‌رفته که می‌تواند عوامل فرایند (مثل قطر الیاف، اندازه منفذ و ضخامت غشای نانو لیفی) را از نظر ریاضی بهینه‌سازی کنند به شکل عمیق بررسی کنند تا بتوانند حداکثر ضریب کیفیت را به شکل تجربی به دست بیاورند، به این ترتیب، یافتن ارتباط‌های خواص ساختاری فرایند صحیح، آغازی دوباره برای طراحی بستر فیلتر خواهد بود.

مراجع

- [1]. Daniel MK, Donald RC, Wenhua HZ, Kenneth CW, Nelms RM, Bruce JT (2007) Fuel cell cathode air filters: methodologies for design and optimization. *J Power Sources* 168:391–399.
- [2]. Kampa M, Castanas E (2008) Human health effects of air pollution. *Environ Pollut* 151:362–367.
- [3]. Dai J, Chen R, Meng X et al (2015) Ambient air pollution, temperature and out-of-hospital coronary deaths in Shanghai, China. *Environ Pollut* 203:116–121.
- [4]. Wang Y, Ying Q, Hu J et al (2014) Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013–2014. *Environ Int* 73:413–422.
- [5]. Nasreen SAAN, Sundarraj S, Nizar SAS, Balamurugan R, Ramakrishna S (2013) Advancement in electrospun nanofibrous membranes modification and their application in water treatment. *Membranes* 3(4):266–284.
- [6]. Sanchez JR, Rodriguez JM, Alvaro A et al (1997) Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. *Filtr Sep* 34:593–598.
- [7]. Hung CH, Leung WWF (2011) Filtration of nano-aerosol using nanofibre filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Sep Purif Technol* 79:34–42.
- [8]. Wang H, Zheng G, Wang X et al (eds) (2010) Study on the air filtration performance of nanofibrous membranes compared with conventional fibrous filters. In: 5th IEEE international conference on nano/micro engineered and molecular systems (NEMS). IEEE, London, UK, pp 387–390.
- [9]. US-EPA (1996) Air quality criteria for particulate matter. US Environmental Protection Agency, EPA/600/P-95/001F, Washington, DC.
- [10]. Brown RC (2001) Filtration in industrial hygiene. *Am Ind Hyg Assoc J* 62:633–643.
- [11]. Qiu H, Tian L, Ho K et al (2015) Air pollution and mortality: effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a case-only study. *Environ Pollut* 199:192–197.

- [12].Thavasi V, Singh G, Ramakrishna S (2008) Electrospun nanofibres in energy and environmental applications. *Energy Environ Sci* 1:205–221.
- [13].Wang N, Raza A, Si Y et al (2013) Tortuously structured polyvinyl chloride/polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration. *J Colloid Interface Sci* 398:240–246.
- [14].Gorji M, Jедди A, Gharehaghaji A (2012) Fabrication and characterization of polyurethane electrospun nanofibre membranes for protective clothing applications. *J Appl Polym Sci* 125:4135–4141.
- [15].Schreuder-Gibson H, Gibson P et al (2002) Protective textile materials based on electrospun nanofibres. *J Adv Mater* 34:44–55.
- [16].Desai K, Kit K, Li J et al (2009) Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications. *Polymer* 50:3661–3669.
- [17].Aluigi A, Vineis C, Tonin C et al (2009) Wool keratin-based nanofibres for active filtration of air and water. *J Biobased Mater Bioenergy* 3:311–319.
- [18].Wang Z, Zhao C, Pan Z (2015) Porous bead-on-string poly(lactic acid) fibrous membranes for air filtration. *J Colloid Interface Sci* 441:121–129.
- [19].Han DH, Kang MS (2009) A survey of respirators usage for airborne chemicals in Korea. *Ind Health* 47:569–577.
- [20].Huang X, Wang YJ, Di YH (2007) Experimental study of wool fibre on purification of indoor air. *Text Res J* 77:946–950.
- [21].Yao WL, Wang JL, Yang J, Du GD (2008) Novel carbon nanofibre-cobalt oxide composites for lithium storage with large capacity and high reversibility. *J Power Sources* 176(1):369–372.
- [22].Ju YW, Park JH, Jung HR, Cho SJ, Lee WJ (2008) Electrospun MnFe₂O₄ nanofibres: preparation and morphology. *Compos Sci Technol* 68(7–8):1704–1709.
- [23].Park SH, Kim C, Choi YO, Yang KS (2003) Preparations of pitch-based CF/ACF webs by electrospinning. *Carbon* 41(13):2655–2657.
- [24].Ahn C, Park SK, Kim GT et al (2006) Development of high efficiency nanofilters made of nanofibres. *Curr Appl Phys* 6(6):1030–1035.
- [25].Reneker DH, Chun I (1996) Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. *Nanotechnology* 7:216.
- [26].Deitzel JM, Kleinmeyer J, Harris D, Beck Tan NC (2001) The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer* 42:261.
- [27].Yarin AL, Koombhongse S, Reneker DH (2001) Bending instability in electrospinning of nanofibers. *J Appl Phys* 89(5):3018.
- [28].Greiner A, Wendorff JH (2007) Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angew Chem Int Ed* 46:5670.
- [29].Sill TJ, von Recum HA (2008) Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials* 29(13):1989–2006.

- [30]. Guarino V, Cirillo V, Taddei P, Alvarez-Perez MA, Ambrosio L (2011) Tuning size scale and crystallinity of PCL electrospun membranes via solvent permittivity to address hMSC response. *Macromol Biosci* 11:1694–1705.
- [31]. Megelski S, Stephens JS, Chase DB, Rabolt JF (2002) Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibres. *Macromolecules* 35(22):8456–8466.
- [32]. Kumar A, Wei M, Barry C, Chen J, Mead J (2010) Controlling fibre repulsion in multijet electrospinning for higher throughput. *Macromol Mater Eng* 295:701–708. [org/10.1002/mame.200900425](https://doi.org/10.1002/mame.200900425).
- [33]. Eda G, Shivkumar S (2006) Bead structure variations during electrospinning of polystyrene. *J Mater Sci* 41(17):5704–5708.
- [34]. Buchko CJ, Chen LC, Shen Y, Martin DC (1999) Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films. *Polymer* 40(26):7397–7407.
- [35]. Guarino V, Albore MD, Altobelli R, Ambrosio L (2016) Polymer bioprocessing to fabricate 3D scaffolds for tissue engineering. *Int Polym Process* 31:587. [org/10.3139/217.3239](https://doi.org/10.3139/217.3239).
- [36]. Jiang S, Hou H, Agarwal S, Greiner A (2016) Polyimide nanofibres by green electrospinning via aqueous solution for filtration applications. *ACS Sustain Chem Eng* 4(9):4797–4804.
- [37]. Ko J, Mohtaram NK, Ahmed F, Montgomery A, Carlson M, Lee PC, Willerth SM, Jun MB (2014) Fabrication of Poly(ecaprolactone) microfibre scaffolds with varying topography and mechanical properties for stem cell-based tissue engineering applications. *J Biomater Sci Polym* 25:1–17.
- [38]. Guarino V, Ambrosio L (2016) Electrofluidynamics: exploring new toolbox to design biomaterials for tissue regeneration and degeneration. *Nanomedicine* 11(12):1515–1518.
- [39]. Cirillo V, Guarino V, Alvarez-Perez MA, Marrese M, Ambrosio L (2014) Optimization of fully aligned bioactive electrospun fibres for *in vitro* nerve guidance. *J Mater Sci Mater Med* 25(10):2323–2332.
- [40]. Guarino V, Cirillo V, Ambrosio L (2016) Bicomponent electrospun scaffolds to design ECM tissue analogues. *Exp Rev Med Dev* 13(1):83–10241. Detta N, Brown TD, Edin FK, Albrecht K, Chiellini F, Chiellini E, Dalton PD, Hutmacher DW (2010) Melt electrospinning of polycaprolactone and its blends with poly (ethylene glycol). *Polym Int* 59:1558–1562.
- [41]. Patil H, Tiwari RV, Repka MA (2016) Hot-melt extrusion: from theory to application in pharmaceutical formulation. *AAPS PharmSciTech* 17:20–42.

- [42].Schmack G, Tündler B, Vogel R, Beyreuther R, Jacobens S, Fritz HG (1999) Biodegradable fibres of Poly(l-lactide) produced by high-speed melt spinning and spin drawing. *J Appl Polym Sci* 73:2785–2797.
- [43].Muerza-Cascante ML, Haylock D, Hutmacher DW, Dalton PD (2015) Melt electrospinning and its technologization in tissue engineering. *Tissue Eng Part B* 21:187–202.
- [44].Farrugia BL, Brown TD, Upton Z, Hutmacher DW, Dalton PD, Dargaville TR (2013) Dermal fibroblast infiltration of Poly(ϵ -caprolactone) scaffolds fabricated by melt electrospinning in a direct writing mode. *Biofabrication* 5:025001.
- [45].Qin X-H, Wang S-Y (2008) Electrospun nanofibers from cross-linked poly(vinyl alcohol) and its filtration efficiency. *J Appl Polym Sci* 109(2):951–956.
- [46].Homaeigohar SS, Buhr K, Ebert K (2010) Polyethersulfone electrospun nanofibrous composite membrane for liquid filtration. *J Membr Sci* 365(1–2):68–77.
- [47].Polat Y, Pampal ES, Stojanovska E, Simsek R, Hassanin A, Kilic A et al (2016) Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: a facile method to produce flexible porous materials. *J Appl Polym Sci* 133(9):43025–43034.
- [48].Medeiros ES, Glenn GM, Klamczynski AP, Orts WJ, Mattoso LHC (2009) Solution blow spinning: a new method to produce micro- and nanofibres from polymer solutions. *J Appl Polym Sci* 113(4):2322–2330
- [49].Sinha-Ray S, Sinha-Ray S, Yarin AL, Pourdeyhimi B (2015) Theoretical and experimental investigation of physical mechanisms responsible for polymer nanofibre formation in solution blowing. *Polymer* 56:452–463
- [50].Zhuang X, Yang X, Shi L, Cheng B, Guan K, Kang W (2012) Solution blowing of submicron-scale cellulose fibres. *Carbohydr Polym* 90(2):982–987.
- [51].Tao X, Zhou G, Zhuang X, Cheng B, Li X, Li H (2015) Solution blowing of activated carbon nanofibres for phenol adsorption. *RSC Adv* 5(8):5801–5808.
- [52].Hsiao H-Y, Huang C-M, Hsu M-Y, Chen H (2011) Preparation of high-surface-area PAN-based activated carbon by solution-blowing process for CO₂ adsorption. *Sep Purif Technol* 82:19–27.
- [53].Ding B, Kimura E, Sato T, Fujita S, Shiratori S (2004) Fabrication of blend biodegradable nanofibrous nonwoven mats via multi-jet electrospinning. *Polymer* 45:1895.
- [54].Teo WE, Ramakrishna S (2005) Electrospun fibre bundle made of aligned nanofibres over two fixed points. *Nanotechnology* 16:1878.

- [55].Kim G, Cho YS, Kim WD (2006) Stability analysis for multi-jets electrospinning process modified with a cylindrical electrode. *Eur Polym J* 42:2031.
- [56].Varabhas JS, Chase GG, Reneker DH (2008) Electrospun nanofibers from a porous hollow tube. *Polymer* 49:4226.
- [57].Zhou F-L, Gong R-H, Porat I (2010) Needle and needleless electrospinning for nanofibres. *J Appl Polym Sci* 115:2591–2598. <https://doi.org/10.1002/app.31282>.
- [58].Niu H, Lin T (2012) Fibre generators in needleless electrospinning. *J Nanomater* 2012:725950.
- [59].Moon S, Gil M, Lee KJ (2017) Syringeless electrospinning toward versatile fabrication of nanofibre web. *Sci Rep* 7:41424.
- [60].Niu H, Wang X, Lin T (2011) Needleless electrospinning: developments and performances, nanofibres – production, properties and functional applications, Dr. Lin T (ed). ISBN: 978-953-307-420-7.
- [61].Teo WE, Ramakrishna S (2006) A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology* 17(14):R89.
- [62].Kongklang T, Tashiro K, Kotaki M, Chirachanchai S (2008) Electrospinning as a new technique to control the crystal morphology and molecular orientation of polyoxymethylene nanofibers. *J Am Chem Soc* 130(46):15460–1546.
- [63].Katta P, Alessandro M, Ramsier RD, Chase GG (2004) Continuous electrospinning of aligned polymer nanofibers onto a wire drum collector. *Nano Lett* 4(11):2215–2218.
- [64].Huang ZM, Zhang YZ, Kotaki M, Ramakrishna S (2003) A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos Sci Technol* 63(15):2223–2253. 26–30.
- [65].Yee WA, Nguyen AC, Lee PS, Kotaki M, Liu Y, Tan BT, Mhaisalkar S, Lu X (2008) Stress-induced structural changes in electrospun polyvinylidene difluoride nanofibers collected using a modified rotating disk. *Polymer* 49(19):4196–4203.
- [66].Kim K, Lee K, Khil M, Ho Y, Kim H (2004) The effect of molecular weight and the linear velocity of drum surface on the properties of electrospun poly(ethylene terephthalate) nonwovens. *Fibres Polym* 5(2):122–127.
- [67].Wang Y, Wang G, Chen L, Li H, Yin T, Wang B, Lee JCM, Yu Q (2009) Electrospun nanofiber meshes with tailored architectures and patterns as potential tissue-engineering scaffolds. *Biofabrication* 1:015001:1–015001:9.
- [68].Li D, Wang YL, Xia YN (2004) Electrospinning nanofibres as uniaxially aligned arrays and layer-by-layer stacked films. *Adv Mater* 16:361–366.

- [69].Zussman E, Theron A, Yarin AL (2003) Formation of nanofibre crossbars in electrospinning. *Appl Phys Lett* 82:973-975.
- [70].Ye XY, Huang XJ, Xu ZK (2012) Nanofibrous mats with bird's nest patterns by electrospinning. *Chin J Polym Sci* 30:130-137.
- [71].Ding Z, Salim A, Ziae B (2009) Selective nanofibre deposition through field-enhanced electrospinning. *Langmuir* 25:9648-9652.
- [72].Zucchelli A, Fabiani D, Gualandi C, Focarete ML (2009) An innovative and versatile approach to design highly porous, patterned, nanofibrous polymeric materials. *J Mater Sci* 44:4969-4975.
- [73].Ma W, Guo Z, Zhao J, Yu Q, Wang F, Han J, Pan H, Yao J, Zhang Q, Samal SK, De Smedt SC, Huang C (2017) Polyimide/cellulose acetate core/shell electrospun fibrous membranes for oil-water separation. *Sep Purif Technol* 177:71-85.
- [74].Lee E-J, An AK, Hadi P, Lee S, Wood YC, Shon HK (2017) Advanced multi-nozzle electrospun functionalized titanium dioxide/polyvinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene (TiO₂/ PVDF-HFP) composite membranes for direct contact membrane distillation. *J Membr Sci* 524: 712-720.
- [75].Sun H, Xu Y, Zhou Y, Gao W, Zhao H, Wang W (2017) Preparation of superhydrophobic nanocomposite fibre membranes by electrospinning poly(vinylidene fluoride)/silane coupling agent modified SiO₂ nanoparticles. *J Appl Polym Sci* 134:44501.
- [76].Wei Z, Li J, Wang C, Cao J, Yao Y, Lu H, Li Y, He X (2017) Thermally stable hydrophobicity in electrospun silica/polydimethylsiloxane hybrid fibres. *Appl Surf Sci* 392:260-267.
- [77].Woo YC, Tijing LD, Shim W-G, Choi J-S, Kim S-H, He T, Drioli E, Shon HK (2016) Water desalination using graphene-enhanced electrospun nanofibre membrane via air gap membrane distillation. *J Membr Sci* 520:99-110.
- [78].Ren L-F, Xia F, Shao J, Zhang X, Li J (2017) Experimental investigation of the effect of electrospinning parameters on properties of superhydrophobic PDMS/PMMA membrane and its application in membrane distillation. *Desalination* 404:155-166.
- [79].Cojocaru C, Dorneanu PP, Airinei A, Olaru N, Samoila P, Rotaru A (2017) Design and evaluation of electrospun polysulfone fibres and polysulfone/NiFe₂O₄ nanostructured composite as sorbents for oil spill cleanup. *J Taiwan Inst Chem Eng* 70:267-281.
- [80].Huang Y, Huang Q-L, Liu H, Zhang C-X, You Y-W, Li N-N, Xiao C-F (2017) Preparation, characterization, and applications of electrospun ultrafine fibrous PTFE porous membranes. *J Membr Sci* 523:317-326.

- [81].Pan J, Hou L, Wang Q, He Y, Wu L, Mondal AN, Xu T (2017) Preparation of bipolar membranes by electrospinning. *Mater Chem Phys* 186:484–491.
- [82].Wang J, Zhao W, Wang B, Pei G, Li C (2017) Multilevel-layer-structured polyamide/ poly(trimethylene terephthalate) nanofibrous membranes for low-pressure air filtration. *J Appl Polym Sci* 134:44716.
- [83].Mahdavi H, Moslehi M (2016) A new thin film composite nanofiltration membrane based on PET nanofibre support and polyamide top layer: preparation and characterization. *J Polym Res* 23:257.
- [84].Lou L-H, Qin X-H, Zhang H (2017) Preparation and study of low-resistance polyacrylonitrile nano membranes for gas filtration. *Text Res J* 87:208–215.
- [85].Zhang S, Liu H, Yin X, Li Z, Yu J, Ding B (2017) Tailoring mechanically robust Poly(m-phenylene isophthalamide) nanofibre/nets for ultrathin high-efficiency air filter. *Sci Rep* 7:40550.
- [86].Aslan T, Arslan S, Eyvaz M, Gürsel E, Koyuncu İ (2016) A novel nanofibre microfiltration membrane: Fabrication and characterization of tubular electrospun nanofibre (TuEN) membrane. *J Membr Sci* 520:616–629.
- [87].Ryu S-Y, Chung JW, Kwak S-Y (2017) Tunable multilayer assemblies of nanofibrous composite mats as permeable protective materials against chemical warfare agents. *RSC Adv* 7:9964–9974.
- [88].An AK, Guo J, Lee E-J, Jeong S, Zhao Y, Wang Z, Leiknes T (2017) PDMS/PVDF hybrid electrospun membrane with superhydrophobic property and drop impact dynamics for dyeing wastewater treatment using membrane distillation. *J Membr Sci* 525:57–67.
- [89].Ge J, Zhang J, Wang F, Li Z, Yu J, Ding B (2017) Superhydrophilic and underwater superoleophobic nanofibrous membrane with hierarchical structured skin for effective oil-in-water emulsion separation. *J Mater Chem A* 5:497–502.
- [90].Wahiduzzaman, Allmond K, Stone J, Harp S, Mujibur K (2017) Synthesis and electrospraying of nanoscale MOF (metal organic framework) for high-performance CO₂ adsorption membrane. *Nanoscale Res Lett* 12:6.
- [91].Chowdhury MR, Huang L, McCutcheon JR (2017) Thin film composite membranes for forward osmosis supported by commercial nanofibre nonwovens. *Ind Eng Chem Res* 56:1057–1063.
- [92].Pana S-F, Dong Y, Zhenga Y-M, Zhong L-B, Yuan Z-H (2017) Self-sustained hydrophilic nanofibre thin film composite forward osmosis membranes: preparation, characterization and application for simulated antibiotic wastewater treatment. *J Membr Sci* 523:205–215.

- [93]. Tian M, Wang Y-N, Wang R, Fane AG (2017) Synthesis and characterization of thin film nanocomposite forward osmosis membranes supported by silica nanoparticle incorporated nanofibrous substrate. *Desalination* 401:142-150.
- [94]. Woo YC, Tijing LD, Park MJ, Yao M, Choi J-S, Lee S, Kim S-H, An K-J, Shon HK (2017) Electrospun dual-layer nonwoven membrane for desalination by air gap membrane distillation. *Desalination* 403:187-198.
- [95]. Chitpong N, Husson SM (2016) Nanofibre ion-exchange membranes for the rapid uptake and recovery of heavy metals from water. *Membranes* 6:59.
- [96]. Chitpong N, Husson SM (2017) Polyacid functionalized cellulose nanofibre membranes for removal of heavy metals from impaired waters. *J Membr Sci* 523:418-429.
- [97]. Wang Z, Crandall C, Prautzsch VL, Sahadevan R, Menkhaus TJ, Fong H (2017) Electrospun regenerated cellulose nanofibre membranes surface-grafted with water-insoluble poly(HEMA) or water-soluble poly(AAS) chains via the ATRP method for ultrafiltration of water. *ACS Appl Mater Interfaces* 9:4272-4278.
- [98]. Welle A, Krämer M, Döring M, Niederer K, Pindel E, Chronakis IS (2007) Electrospun aliphatic polycarbonates as tailored tissue scaffold materials. *Biomaterials* 28:2211.
- [99]. Dhandayuthapani B, Poulose AC, Nagaoka Y, Hasumura T, Yoshida Y, Maekawa T, Kumar DS (2012) Biomimetic smart nanocomposite: in vitro biological evaluation of zein electrospun fluorescent nanofiber encapsulated CdS quantum dots. *Biofabrication* 4:025008.
- [100]. Kim HJ, Pant HR, Choi NJ et al (2013) Composite electrospun fly ash/polyurethane fibres for absorption of volatile organic compounds from air. *Chem Eng J* 230:244-250.
- [101]. Yarin AL, Pourdeyhimi B, Ramakrishna S (2014) Fundamentals and applications of micro and nanofibres. Cambridge University Press, Cambridge.
- [102]. Wang N, Si Y, Wang N et al (2014) Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration. *Sep Purif Technol* 126:44-51.
- [103]. Sutherland K (2013) Air filtration: keeping the air that we breathe clean. *Filtr Sep* 50:18-22.
- [104]. Wang N, Yang Y, Al-Deyab SS et al (2015) Ultra-light 3D nanofibre-nets binary structured nylon 6-polyacrylonitrile membranes for efficient filtration of fine particulate matter. *J Mater Chem A* 3:23946-23954.
- [105]. Shen J, Chen R, He J (2014) Bio-mimic design of PM2.5 anti-smog masks. *Therm Sci* 18:1689-1690.

فصل دوم

پیشرفت‌های جاری در غشاها نانولیفی

برای کاربردهای تصفیه آب

هنگ یانگ ما^۱ و بنجامین اس. سیاوش^۲

^۱. Hongyang Ma e-mail: mahy@mail.buct.edu.cn

^۲. Benjamin S. Hsiao e-mail: Benjamin.Hsiao@stonybrook.edu

چکیده

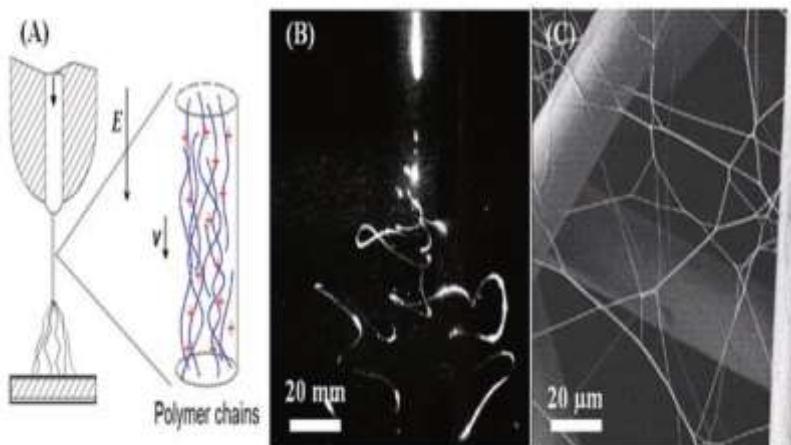
غشاهاي نانوليفي الکتروریسي شده، پتانسیلهاي کاربردي زيادي دارند، از جمله تصفیه هوا و آب، ذخیره گاز، حسگرهای، الکترونيک، مراقبت‌های بهداشتی و لوازم آرایشی. پیشرفت‌های اخیر این غشاها برای کاربردهای تصفیه آب، از جمله میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، اسمز مستقیم و تقطری غشاهاي، در اینجا برسی می‌شوند. تخلخل بالا، توزیع اندازه منافذ و اندازه منافذ تنظیم‌پذیر، محدوده وسیعی از انتخاب مواد و عملکرد سطح در دسترس، انعطاف‌پذیری در طراحی متناسب غشاها را برای بسیاری از کاربردهای موجود و در حال ظهور فراهم کرده است. پیشرفت‌های اخیر در فناوري الکتروریسي علاوه بر ارائه راههای مختلف برای افزایش تولید غشاهاي الکتروریسي شده، پتانسیل آن برای تصفیه آب را محقق کرده است.

۱-۲- مقدمه

داربست‌های شبیه سه بعدی نانولیفی با قطرهای زیر میکرون یا نانومقیاس می‌توانند با استفاده از فناوري الکتروریسي تولید شوند. الکتروریسي فرایند اتمیزه کردن^۱ یک سیال رسانا تحت میدان الکترواستاتیک بالا است. سیال معمولاً یک محلول پلیمری باردار شده است که جت محلول را تحت میدان الکتریکی پس از غلبه بر کشش سطحی محلول پلیمری به سمت جمع کننده هدف دفع کند، همان‌طور که در شکل ۲-۱ a نشان داده شده است [۵]. جت مایع ابتدا در یک خط مستقیم حرکت می‌کند و به دنبال آن خمش و چرخش به علت تبخیر حلال رخ می‌دهد که منجر به افزایش قابل توجهی در دافعه الکترواستاتیک می‌شود، همان‌طور که در شکل b ۲-۱ نشان داده شده است [۶]. ناپایداری جت منجر به کشش قابل توجهی از زنجیرهای پلیمری می‌شود و در هنگام قرارگیری بر روی جمع کننده، یک فیلامنت نانومقیاس شکل می‌گیرد. با کنترل مناسب تبخیر حلال، فیلامنت نهایی می‌تواند شامل مقدار کمی از حلال باشد و یک زمینه بهم پیوسته شبیه سه بعدی را با تمام اتصالات ترکیب شده تشکیل دهد. قطر الیاف الکتروریسي شده اغلب حدود ۱۰۰ برابر کوچکتر از الیاف مصنوعی است، همان‌طور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است [۷]. داربست‌های نانولیفی الکتروریسي شده با قطرهای الیاف نانومقیاس، نسبت مساحت سطحی به حجم خیلی بزرگ و تخلخل بسیار بالا دارند [۸، ۹]. بیش از آن، ریخت‌شناسی و خواص نانوالياف الکتروریسي شده می‌تواند با استفاده از انواع مختلف مواد (به عنوان مثال پلیمرهای آلی و معدنی شامل مواد طبیعی و مصنوعی و هیبریدی) و با تنظیم عوامل محلول پلیمری (به عنوان مثال، غلظت،

^۱. Atomization

ویسکوزیته، رسانایی، نوع پلیمر و حلال، فرایند الکتروریسی (به عنوان مثال ولتاژ اعمال شده، نرخ جریان، فاصله حرکت جت و جمع کننده) و متغیرهای محیطی (مانند دما، رطوبت و فشار محفظه) طراحی و تولید شوند [۲]. لازم به ذکر است که بیشتر عوامل در فرایند الکتروریسی با یکدیگر در ارتباط هستند؛ درنتیجه، الکتروریسی هم پیچیده و هم متنوع است. با ترکیب ویژگی‌های فیزیکی نانوالیاف با قابلیت‌های شیمیایی، داربست‌های لیفی الکتروریسی شده می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله تصفیه هوا و آب [۱۰، ۱۱]، رهایش دارو (ژن) [۱۲]، زخم پوش [۱۳-۱۵]، انسداد آنژیم [۱۶]، مهندسی بافت [۱۷-۱۹]، ذخیره‌سازی گاز [۲۰]، حسگرهای الکترونیک استفاده شود [۲۱، ۲۲].



شکل ۱-۲ (a) قطره مایع پلیمری تحت میدان الکتریکی اعمال شده [۵]. (b) تصویر فرایند الکتروریسی با سرعت بالا [۶] و (c) تصویر SEM از PET با نانو الیاف الکتروریسی شده [۷].

در مورد تصفیه آب، داربست‌های نانولیفی الکتروریسی شده می‌تواند به‌طور مستقیم به عنوان یک لایه مانع برای حذف آلاینده‌های بزرگ در میکرو فیلتراسیون یا به‌طور غیرمستقیم به عنوان یک لایه زمینه برای پشتیبانی از لایه مانع برای اولترا فیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس بهمنظور نمک‌زدایی (آب‌شیرین کن) استفاده شود [۱۱].

تعدادی از بررسی جامع در مورد موضوع غشاهای نانولیفی الکتروریسی شده برای تصفیه آب وجود دارد که هر مطالعه، مرکز بر جنبه‌های مختلف موضوع است [۱۱، ۶، ۲۳-۲۶]. به عنوان مثال، یک مطالعه تأکید بر استفاده از انواع مواد پلیمری طبیعی و مصنوعی در تولید زمینه‌های نانو لیفی الکتروریسی شده دارد [۱۱]، در حالی که دیگران بر طرح‌های اصلاح سطحی تمرکز داشتند [۶، ۲۷].

واضح است که فناوری الکتروریسی می‌تواند مزایای منحصر به فردی را از طریق تنظیم الکتروریسی یا انتخاب مواد انعطاف‌پذیرتر نسبت به روش‌های معمول برای طراحی و تولید غشاها با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب برای پاسخگویی به برخی از الزامات ویژه برای تصفیه آب هدفمند ارائه دهد؛ بنابراین، در این فصل، ما بر پیشرفت‌های اخیر در فناوری الکتروریسی که به ویژه برای تولید داربست‌های نanolیفی یکنواخت مناسب برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای تصفیه آب مناسب است تمرکز می‌کنیم.

۲-۲-۱-۲-۲- فناوری الکتروریسی

۲-۲-۱- تاریخچه مختصر

پدیده الکتروریسی ابتدا توسط ریلی^۱ در سال ۱۸۷۹ مورد بررسی قرار گرفت [۲۸] که منجر به نمایش اولیه الکترو اسپری توسط زلنی^۲ در سال ۱۹۱۴ شد [۲۹]. زلنی به دقت رفتار قطرات مایع در نوک مویینه‌های فلزی تحت میدان الکتریکی را با استفاده از یک مدل ریاضی برای توصیف رفتار مایع باردارشده توسط نیروی الکترواستاتیک را بررسی کرد. راهاندازی و روش الکتروریسی به طور جداگانه توسط کولی^۳ و مورتون^۴ در سال ۱۹۰۲ ثبت اختراع شد [۳۰، ۳۱].

تحولات بیشتر در زمینه تجاری سازی توسط فرمهالز^۵ انجام گرفت که در سال ۱۹۳۴ یک بخش از ثبت اختراع (از جمله تولید نخ‌های نساجی) [۳۲] را ارائه داد. قبل از الکتروریسی محلول، ابتدا الکتروریسی مذاب توسط نورتون^۶ در سال ۱۹۳۶ با استفاده از یک انفجار هوا برای کمک به تشکیل الیاف ثبت شد [۳۳]. پس از آن، تحقیقات زیادی روی پژوهش بنیادی‌تر، به خصوص تشکیل جت از رشته ساز به عنوان تابعی از قدرت میدان الکترواستاتیک، ویسکوزیته مایع و وزن مولکولی پلیمر در محلول، متمرکز شد. در بین این مطالعات، کارهای تیلور^۷ در سال ۱۹۶۹ بر روی جت‌های الکتریکی که به طور خاص قابل توجه بود، به عنوان پایه‌ای برای فناوری جاری در نظر گرفته شده است [۳۴، ۳۵].

تاکنون، بیش از ۱۰۰۰ ثبت اختراع و ۱۰۰۰۰ انتشارات پژوهشی در زمینه الکتروریسی مذاب‌ها و محلول‌های پلیمری وجود دارد. رشد سریع این فناوری را می‌توان با این واقعیت درک کرد که در

¹. Rayleigh

². Zeleny

³. Cooley

⁴. Morton

⁵. Formhals

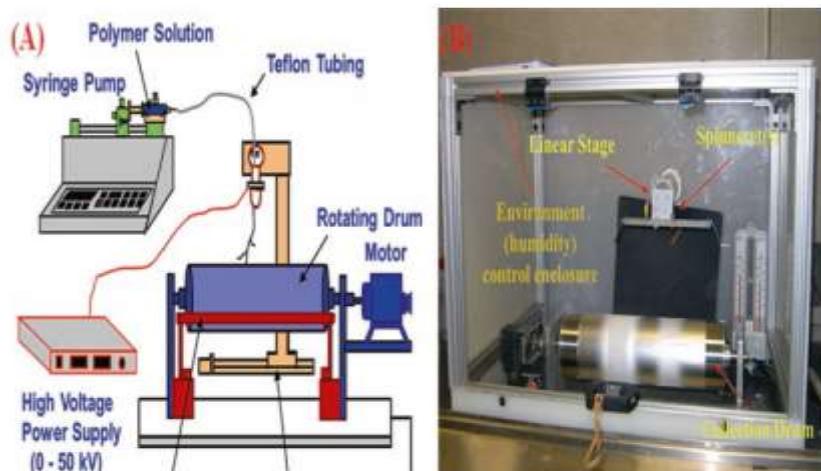
⁶. Norton

⁷. Taylor

سال ۲۰۱۳، بررسی نشان می‌دهد که تنها حدود ۲۰۰۰ انتشارات مرتبط با فناوری الکتروریسی وجود داشت که در حدود ۱۰٪ مربوط به کاربردهای زیست‌پزشکی بود [۳۶].

۲-۲-۲- الکتروریسی تک نازله

یکی از دلایل گسترش سریع فناوری الکتروریسی، سادگی راهاندازی است. یک دستگاه الکتروریسی تک نازله را می‌توان به راحتی برای تحقیقات آزمایشگاهی آماده کرد. در یک راهاندازی معمول الکتروریسی (همان‌طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است)، اجزای اصلی شامل یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا، یک پمپ سرنگ برای تحویل محلول پلیمری، یک رشتہ ساز و یک استوانه جمع کننده و یک محوطه کنترل محیطی است که می‌تواند عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، گردش گاز (هوای) و نرخ تبخیر حلال را تنظیم کند [۲]. بیشتر مواد طبیعی مانند پلی‌ساقاریدها و ابریشم و پلیمرهای مصنوعی مانند پلی‌اکریلونیتریل (PAN)، پلی‌اتری‌ولوفون (PES) و پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF) که اغلب در تصفیه آب استفاده می‌شوند می‌توانند به طور مستقیم با استفاده از تنظیمات بالا بدون محفظه کنترل محیطی تولید شوند. [۳۸]. با این حال، یک محفظه با رطوبت و درجه حرارت کنترل شده اغلب برای اطمینان از تولید داریست نانولیفی با کیفیت بالا استفاده می‌شود. همچنین لازم است اشاره شود که فراهم کردن محفظه مناسب می‌تواند حفاظت لازم را برای خطرات بالقوه الکتریکی ارائه دهد [۳۹].



شکل ۲-۲-۲(A) طرح رایج یک دستگاه الکتروریسی آزمایشگاهی، (B) یک عکس از محفظه دستگاه برای کنترل شرایط محیطی [۳۷]

برای کاربردهای تصفیه آب، پلیمرهای PVA، PAN، PVDF و بینیل الكل (PVA)، استات سلولز (CA) و مشتقات آن به صورت داربست‌های لیفی در اندازه زیر میکرومتر الکتروریسی شدند که به عنوان یک لایه مانع یا به عنوان یک لایه حمایت‌کننده در غشاها تصفیه استفاده می‌شوند [۴۰].

قطر نانوالیاف الکتروریسی شده به طور معمول از ۱/۰ تا ۱ میکرومتر متغیر است، در حالی که تخلخل بالای داربست‌ها از ۷۰٪ تا ۹۵٪ متغیر است [۳۶]. اندازه متوسط منفذ داربست نانوالیفی می‌تواند برای حذف نانو ذرات یا باکتری‌های آب (۰/۲ میکرومتر) از آب آلووده به وسیله جداسازی اندازه‌ای، تنظیم شود. یک رابطه تجربی بین اندازه منفذ متوسط و قطر متوسط الیاف از یک غشای نانوالیفی الکتروریسی شده بهینه شده برای تصفیه آب به دست می‌آید؛ اندازه متوسط منفذ وقتی که تخلخل آن در ۸۰٪ تثبیت می‌شود حدوداً سه برابر قطر متوسط الیاف است [۲۳]؛ بنابراین اندازه منفذ غشای تصفیه را می‌توان با کنترل قطر الیاف طراحی کرد. واضح است که ساختار متخلخل به هم پیوسته یک داربست الکتروریسی شده که توسط قرارگیری تصادفی نانوالیاف تعریف شده است، قطعاً می‌تواند مقاومت هیدرولیکی انتقال آب را در مقایسه با غشاها متخلخل متداول کاهش دهد که منجر به شار نفوذ زیاد می‌شود که برای هر دولایه مانع و پشتیبان از غشا مفید می‌باشد [۲۵].

در مطالعات اخیر ما، غشاها الکتروریسی شده PAN برای حذف باکتری‌ها، از جمله اشتریشیا کلی^۱ و بریوندیموناس دیمینیوتا^۲ تولید شده‌اند که مقدار کاهش ۹۹/۹۹۹٪ را نشان می‌دهد که مطابق با الزامات برای تصفیه آب آشامیدنی می‌باشد [۴۱، ۴۲]. شار نفوذ این غشاها الکتروریسی شده PAN، حدود ۲ تا ۵ برابر بیشتر از همتایان تجاری موجود خود است که به علت تخلخل بالای غشاها نانوalیفی و منفذ کاملاً متصل به هم می‌باشد. عملکرد با شار بالا، کاربرد مؤثرتر در فرایندهای با نیروی پیشران کم‌فشار، مانند فیلتراسیون نیروی جاذبه را ممکن می‌سازد. به عنوان مثال، افت فشار در یک فرایند تصفیه با نیروی پیشران جاذبه با استفاده از غشاها نانوalیفی الکتروریسی شده می‌تواند به اندازه کم حدود ۰/۲psi باقی بماند که با استفاده از یک محلول خوراک حاوی آلانینده‌های مدل ایجاد شود. [۴۳].

^۱. E. coli

^۲. B. diminuta

با تزریق نانوالیاف سلولزی فوق العاده ظریف (CN) به داربست الکتروریسی شده PAN، غشای کامپوزیتی برای حذف ویروس‌های آبی که با LRV^۱ برابر با ۲-۴ در برابر باکتری خوار MS2^۲ می‌تواند بیشتر مورد استفاده قرار گیرد [۴۴].

نانو الیاف سلولزی تزریقی که دارای گروه‌های عاملی مانند کربوکسیلات، هیدروکسیل و آلدھید بر روی سطح سلولز هستند، می‌توانند یک بافت نانومقیاس در شبکه نانولیفی با اندازه الیاف بزرگ‌تر تشکیل دهند و به عنوان یک بستر جذب‌کننده عمل کنند [۴۵].

این ساختار غشایی کامپوزیتی، مزایای متعددی نسبت به غشاهای میکروفیلتر معمولی دارد:

(۱) افزایش قابل توجه در نسبت سطح به حجم؛ (۲) کاهش اندازه منافذ با توزیع اندازه منافذ کاهش‌یافته به وسیله تشکیل یک ساختار نانو بافت سه‌بعدی در میان داربست نانولیفی الکتروریسی شده؛ (۳) افزایش خواص مکانیکی کلی شبکه کامپوزیتی؛ و (۴) عاملیت‌های فراوان بر روی سطح نانولیفی سلولزی می‌تواند به عنوان مکان‌های جذب برای حذف آلاینده‌ها، مانند ویروس‌ها، رنگ‌ها، یون‌های فلزی سنگین و سموم استفاده شود [۲۳]. در عین حال، با توجه به تخلخل بالاتر، در مقایسه با غشاهای در دسترس تجاری در همان فشار عملیاتی، شار نفوذ بالا حفظ می‌شود. واضح است که مسیر عامل دار کردن سطح می‌تواند فرصت‌های جدیدی را برای بهبود کارایی جداسازی غشای نانولیفی الکتروریسی شده، نه فقط به عنوان یک فیلتر میکرو فیلتراسیون، بلکه همچنین به عنوان یک جاذب برای تصفیه آب فراهم کند. به عنوان مثال، با استفاده از یک روش پوشش، سطح الیاف در غشای الکتروریسی شده PAN می‌تواند شارژ مثبت شود، در حالی که غشای حاصل می‌تواند نانوذره را از طریق فیلتراسیون و پروتئین BSA را از طریق جذب در آب آلوده شیوه‌سازی شده، حذف کند [۴۱].

در خصوص غشای الکتروریسی شده PAN با مونومرهای وینیل دوتایی، با روش غوطه‌ورسازی، پوشش دهی شده بود که در آن پلیمریزاسیون رادیکال آزاد را می‌توان با استفاده از یک عملیات حرارتی بر روی سطح نانوالیاف آغاز کرد [۴۱]. لایه پوشش پلیمری اتصال عرضی شده، حاوی کاتیون‌های ایمیدازولیوم^۳، نه تنها ویژگی‌های مکانیکی (با پیوند نقاط اتصال بین نانوالیاف) را افزایش می‌دهد بلکه همچنین قادر به جذب پروتئین‌های BSA با بار منفی شارژ شده توسط برهمکنش الکترواستاتیک است. در بالا اشاره شده که نانوالیاف الکتروریسی شده به طور مستقیم به عنوان یک لایه مانع برای میکرو فیلتراسیون یا یک جاذب استفاده می‌شود؛ از سوی دیگر، داربست نانولیفی الکتروریسی شده همچنین می‌تواند به عنوان یک زمینه با تخلخل بالا به منظور حمایت از یک لایه

¹. Log Reduction Value

². MS2, a bacteriophage

³. Imidazolium

مانع برای اولترا فیلتراسیون [۵۴-۴۶]، نانو فیلتراسیون [۵۵-۵۷] و کاربردهای اسمز معکوس و مستقیم [۵۸، ۵۹] استفاده شود.

ساختار جدید، کامپوزیت نانولیفی لایه نازک^۱ نامیده می‌شود که اغلب شامل سه لایه که لایه‌ی پایینی یک زمینه بی بافت معمول است (به عنوان مثال پلی‌اتیلن ترفتالات، زمینه بی بافت PET)، لایه میانی یک داربست نانولیفی الکترورسی شده است و لایه مانع بالا می‌تواند یک لایه پوشش پلیمری آب‌دوسن یا لایه نانولیفی ظرفیت‌تر باشد [۴۸]، همان‌طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

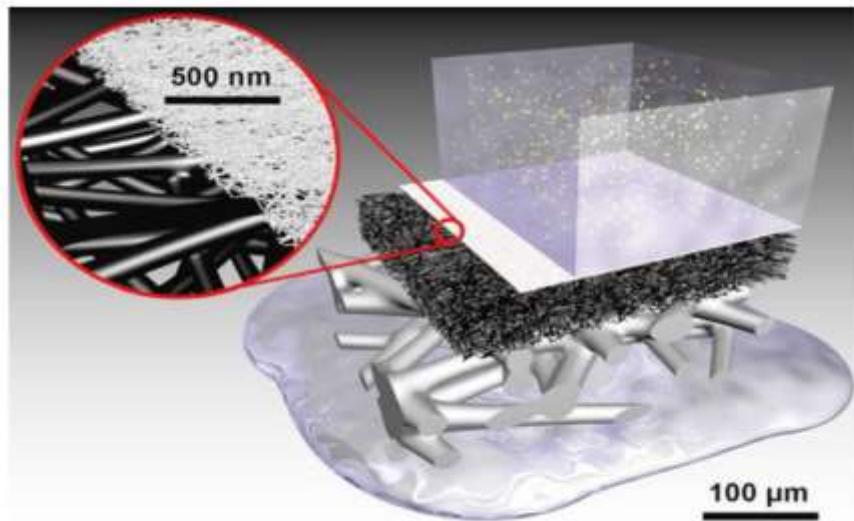
با استفاده از روش الکترورسی تک نازله، چندین سیستم غشای TFNC نشان داده شده است. در یک سیستم، داربست الکترورسی شده PAN برای پشتیبانی از لایه مانع PVA اتصال عرضی شده (با استفاده از گلوتار آلدید (GA)، به عنوان اتصال عرضی دهنده) مورداً استفاده قرار گرفت ۸۰٪ [۴۹-۴۶]. از آنجایی که تخلخل‌های حجمی و سطحی داربست الکترورسی شده PAN حدود ۸۰٪ می‌باشد که به طور چشمگیری از لایه پشتیبان متخلخل (تخلخل توده تقریباً ۵۰٪ و تخلخل سطحی تقریباً ۲۵٪) آمده شده به وسیله روش جدایی فاز بیشتر است، شار نفوذ غشای TFNC حدود ۱۰-۲ برابر بیشتر از غشاهای معمولی برای کاربردهای اولترا فیلتراسیون می‌باشد که به علت مقاومت هیدرولیکی کمتر داربست پشتیبان می‌باشد [۲۵]؛ علاوه بر PVA اتصال عرضی شده [۴۶، ۴۷، ۵۳]، دیگر لایه مانع آب‌دوسن با استفاده از کیتوسان [۶۰، سلولز ۴۹، ۵۱] و نانوالیاف سلولز [۴۸، ۵۲، ۵۴] نیز در غشاهای TFNC برای کاربردهای اولترا فیلتراسیون نشان داده شده است که بعداً موردبث قرار خواهد گرفت. ماهیت آب‌دوسن این غشاهای خواص ضد گرفتگی و همچنین نفوذپذیری بالاتر را نشان داده است [۱۱].

برای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، پلیمریزاسیون میان سطحی اغلب برای ایجاد یک لایه مانع متراکم در بالای غشای الکترورسی شده PAN با استفاده از قالب TFNC استفاده می‌شود [۵۹-۵۵]. علاوه بر نفوذپذیری بالاتر، داربست‌های نانولیفی الکترورسی شده همچنین می‌توانند پلاریزه شدن سطحی محلول را به علت ساختار متخلخل بهم‌پیوسته کاهش دهند [۵۹]. در یک مطالعه، شار نفوذ تا دو برابر بیشتر با استفاده از غشای نانولیفی الکترورسی شده به عنوان لایه میانی برای پشتیبانی از یک لایه مانع پلیمریزاسیون بین سطحی شده حاوی افزودنی‌های مولکولی، در مقایسه با غشاهای NF تجاری در دسترس (به عنوان مثال NF270) به دست آمد.

با استفاده از فناوری الکترورسی تک نازله، غشاهای الکترورسی برای کاربرد تقطیر غشایی تولید شد. تقطیر غشایی یک رویکرد جایگزین است که می‌تواند آب دریا را با مزایای صرفه‌جویی

^۱. Thin-Film Nanofibrous Composite (TFNC)

قابل توجه اتری، نمکزدایی کند. فرایند تقطیر غشای یک فرایند با نیروی محرکه گردابیان حرارتی است که در آن غشای نانولیپی الکترورسی شده نقش حیاتی را برای جداسازی آب خالص و آلاینده‌هایی مانند یون‌های نمکی ایفا می‌کند [۶۱-۶۳]. غشاها ایده آل برای کاربرد تقطیر غشای باید دارای اندازه منفذ کوچک ($\mu\text{m} < 20$) و ماهیت آب گریز باشد که در این ساختار و مشخصات می‌تواند اجازه دهد که بخار آب به طور مؤثر عبور کند اما عبور از فاز مایع را جلوگیری کند. با میزان تخلخل بالا (اما اندازه منفذ کوچک)، یک غشای پلی استایرن آب گریز، نرخ انتقال جرمی نسبتاً بالایی برای نمکزدایی آب دریا و نگهداری $99/99\%$ را در برابر سدیم کلرید نشان داد [۶۳].



شکل ۳-۲- ساختار غشای نانولیپی سه لایه دارای لایه مانع نانولیپی سلولز (قطر الیاف حدود ۵ نانومتر)، زمینه نانولیپی الکترورسی شده (قطر الیاف حدود ۱۰۰ نانومتر) و لایه پشتیبان با الیاف بی بافت (قطر الیاف حدود ۲۰ میکرون) است [۴۹].

۳-۲-۲- فناوری الکترودمش

یک عملیات الکترورسی منحصر به فرد، الکترودمش نامیده می‌شود که برای تولید برخی از مواد با فرایند پذیری سختتر، مانند اسید هیالورونیک، در غشای نانولیپی دارای الیاف با قطر دهها نانومتری نشان داده است [۶۴، ۶۵]. ما تصور می‌کنیم این فناوری همچنین می‌تواند برای تولید نانوالیاف به عنوان فیلتر یا بستر جاذب برای تصفیه آب استفاده شود. نمودار شکل کلی از دستگاه الکترودمش برای ساخت غشاها نانولیپی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

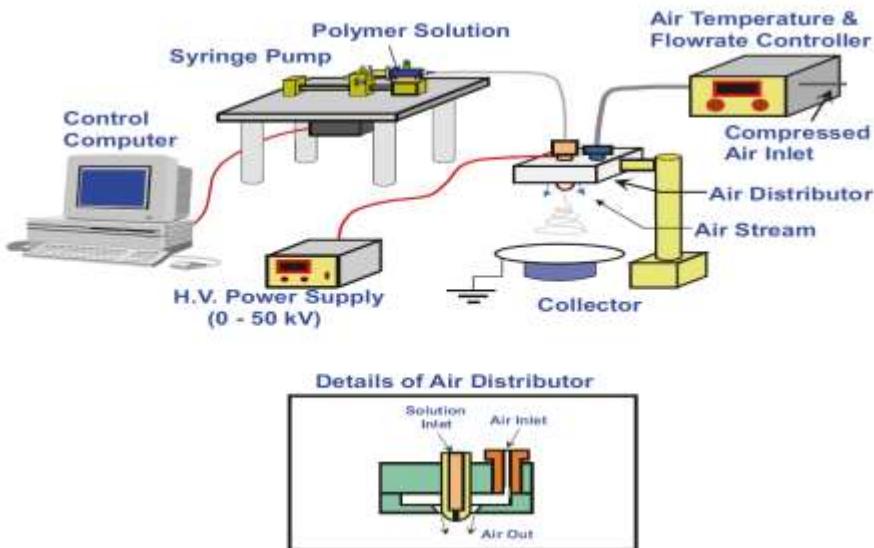
اختلاف بین الکتروریسی و الکتروددمش، برقراری جریان هوا در اطراف رشتہ ساز در الکتروددمش است، در حالی که استفاده از هوا می‌تواند سرعت تولید را افزایش دهد و نرخ حذف حلال را کنترل کند. در شکل ۴-۲، سیستم دمش هوای اضافی شامل دو جزء است:

تجهیزات دمش هوای تجهیزات گرمایشی جریان گاز به‌طور مستقیم توسط یک دمنده کنترل کننده سرعت تنظیم می‌شود، در حالی که دمای هوا توسط عنصر گرمایش کنترل می‌شود. دماهای هوای مکان‌های مختلف سیستم دمش هوای بسته به نرخ جریان هوای می‌تواند برای تنظیم دمای هوای اطراف رشتہ ساز نشان داده شود. با این دستگاه، ما با موفقیت فرایند الکتروددمش برخی از سیستم‌های خیلی ویسکوز، مانند محلول‌های هیالورونان^۱ از ترکیبات وزن‌های مولکولی مختلف که برای الکتروریسی در شرایط معمولی الکتروریسی مشکل است را انجام دادیم. تولید پایدار نانوالیاف الکتروریسی شده HA با قطر الیاف حدود ۱۰۰ نانومتر با استفاده از محلول آبی (W/V)٪ ۲/۵ HA با وزن مولکولی بالغ بر ۳/۵ میلیون دالتون تولید شده است. نانوالیاف آماده شده به روش الکتروریسی HA می‌تواند با استفاده از روش انجماد خشک/بخار^۲ هیدروکلریک اسید (HCl) و یا غوطه‌وری مخلوط اتانول، هیدروکلریک اسید و آب برای تولید نانوالیاف HA مقاوم در برابر آب، اتصال عرضی شود [۶۶].

ویژگی‌های منحصر به فرد فرایند الکتروددمش برای تولید غشاها نانولیفی، به تحقیقات بیشتری بهویژه برای عملیات پیشرفت‌تر مانند شکل‌گیری الگو و پردازش لایه به لایه حکم می‌دهد. در الکتروددمش، حجم زیادی از مخلوط هوای حلال تولید می‌شود. اگر حلال آب نباشد، نیاز به مرحله بازیابی حلال را خواهیم داشت. بدون چنین احتیاطی، فرایند الکتروددمش دوستار محیط‌زیست نخواهد بود. برای این منظور یک سیستم به دام انداختن حلال، مناسب برای بازیافت اکثر حلال‌های معمول، بر اساس مفهوم تقطیر برای بازیابی حلال می‌تواند در فرایند الکتروددمش نصب شود.

¹. Hyaluronan (HA)

². Vapor/freezing dry



شکل ۴-۲- طرح‌واره‌ای از دستگاه الکترودمش و جزئیات ساختاری از توزیع‌کننده هوا [۶۴].

۴-۲-۲- الکتروریسی دو نازله

استحکام مکانیکی غشای نانولیفی الکتروریسی شده یکی از نگرانی‌های عمده در کاربردهای عملی این مواد است، بهویژه هنگامی که نیاز است که تخلخل بالای غشا در فرایند تصفیه حفظ شود [۴۹، ۶۷، ۶۸]. برای رفع این نگرانی، یک فرایند الکتروریسی دونازله توسعه داده شده است و یک پیکربندی طرح‌واره‌ای از این دستگاه برای تولید نانو الیاف کامپوزیتی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است [۶۹]. در یک عملیات الکتروریسی دونازله، دو محلول پلیمری مختلف بر روی جمع کننده یکسان قرار می‌گیرند (شکل ۲-۵a)، جایی که غشای حاصل شامل یک جزئی است که می‌تواند به عنوان اسکلت در نظر گرفته شود و جزء دیگر یک ساختار لیفی ظریفتر سه‌بعدی در داخل داریست اسکلت می‌باشد، همان‌طور که در شکل (۲-۵b) نشان داده شده است. نانوالیاف ضخیم‌تر، خواص مکانیکی برای غشا را فراهم می‌کنند و نانوالیاف نازک‌تر، کیفیت عملکرد غشا را ارائه می‌کنند. درنتیجه، خواص مکانیکی غشا می‌تواند اساساً افزایش یابد و به عنوان یک غشای مستقل برای تصفیه آب استفاده شود.

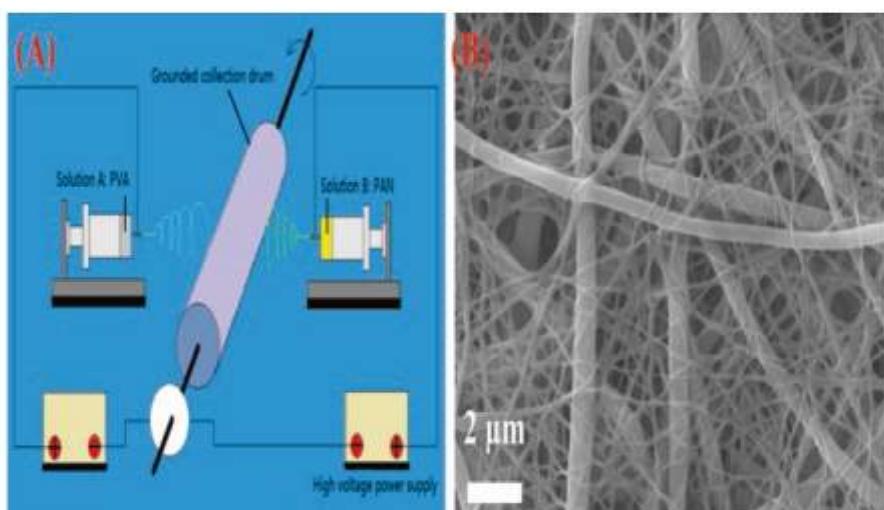
به عنوان مثال، غشای لیفی نانو کامپوزیتی PVA-PAN توسط الکتروریسی دونازله تولید شد که نانو الیاف PVA با قطر متوسط 800 ± 90 نانومتر و نانوالیاف PAN با قطر متوسط 150 ± 40 نانومتر به دست آمد [۶۹]. توزیع قطر الیاف دووجهی غشای نانو کامپوزیتی توسط SEM در شکل ۲-۵b مشاهده شده است. این سیستم غشایی بهوسیله GA برای اتصال عرضی جزء PVA

عملیات بعدی شد و جزء PAN نیز همچنین با پلی وینیلامین^۱ برای ایجاد گروههای عاملی به منظور جذب یون فلزی سنگین، اصلاح شد [۷۰]. داربست نانولیفی اتصال عرضی شده PVA دارای خواص مکانیکی برجسته است که می‌تواند فشار عملیاتی میکرو فیلتراسیون معمول (به عنوان مثال، ۰/۲-۲Psi) را بدون تغییر تخلخل غشای مقاومت کند [۷۱]، در ضمن، داربست نانولیفی ظرفیت PAN نسبت سطح به حجم بالایی را ارائه داد که برای بهبود ظرفیت جذب غشا مؤثر بود.

اگرچه عملیات الکتروریسی تک نازله و دو نازله برای عملیات آزمایشگاهی ایده‌آل است، بازده کلی تولید نسبتاً کم است. تجاری کردن عملی محصولات الکتروریسی نیازمند افزایش تولید فرایند الکتروریسی نشان داده شده است؛ بنابراین، توسعه فناوری الکتروریسی چند نازله تبدیل به یک گام ضروری برای کاربردهای غشاهای نانولیفی شده است [۵].

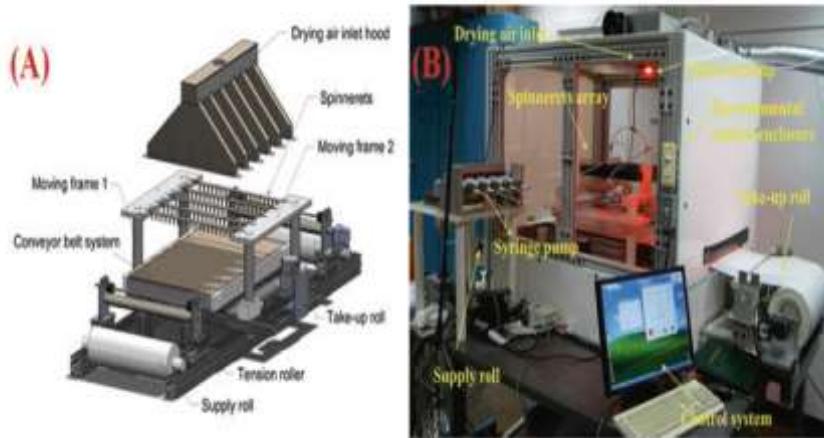
۲-۵-۲- الکتروریسی چند نازله

جهت‌های چندگانه با الگوهای آرایه‌ای طراحی شده برای اطمینان از تولید غشای با ضخامت یکنواخت مورداستفاده قرار گرفته است، در حالی که نرخ تولید آن می‌تواند هزاران برابر بیشتر از تک نازل افزایش یابد که بستگی به میزان رشته سازهای استفاده شده دارد [۷۲، ۷۳].



شکل ۲-۵ (a) پیکربندی دستگاه الکتروریسی دونازله و (b) نانو الیاف کامپوزیتی تولیدشده به وسیله الکتروریسی دونازله

^۱. Polyvinylamine (PVAm)



شکل ۲-۶ (a) نمودار شماتیک از دستگاه الکتروریسی چند نازله و (b) یک عکس از دستگاه الکتروریسی ۱۰۰ نازله در مقیاس آزمایشگاهی [۷۴-۷۶].

عملکرد جت چندگانه، همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، برای دستیابی به پیکربندی میدان الکتریکی موردنظر و مجزا کردن برهمنکنش‌های ناخواسته میدان الکترواستاتیک، نیازمند طراحی خاص نوک رشتہ ساز می‌باشد. در عین حال، امکانات اضافی مانند هود ورود هوای خشک، کنترل گرما و محفظه برای کنترل نرخ تبخیر حلال و برای اطمینان از کیفیت تولید در مقیاس بزرگ ضروری است.

به عنوان مثال، در یک دستگاه الکتروریسی چند نازله، یک الکترود ثانویه الکتریکی، به شکل یک حلقه فلزی حول هر رشتہ ساز، برای به حداقل رساندن برهمنکنش‌های بین الکتروودهای مجاور و محافظت از الکتروودهای اولیه به منظور ایجاد توزیع میدان الکتریکی یکنواخت‌تر، استفاده شده است [۷۶-۷۴]. با استفاده از دستگاه الکتروریسی چند نازله، یک غشای نانولیفی الکتروریسی شده می‌تواند به‌طور مداوم در یک دوره زمانی طولانی منطقی تولید شود؛ علاوه براین، دستگاه الکتروریسی چند نازله نیز می‌تواند برای فراهم کردن انعطاف‌پذیری اصلاح شود تا داربست‌های نانولیفی کامپوزیتی چند جزئی تولید شود؛ به عنوان مثال ترکیبی از فناوری الکتروریسی چند نازله و فرایند ذوب ریسی برای تهیه داربست‌های میکرو-نانولیفی پیشنهاد شده است که در آن الیاف با قطر بزرگ از ذوب ریسی می‌تواند یک اسکلت تشکیل دهنده و الیاف با قطر کوچک‌تر از الکتروریسی می‌توانند شبکه نانولیفی را تشکیل دهند. غشای کامپوزیتی برای کاربردهای جذب و میکروفیلتراسیون ایده آل خواهد بود. در عملیات الکتروریسی چند نازله، کنترل کیفیت تولید غشای الکتروریسی به مهم‌ترین موضوع تبدیل شده است. وظایف ارزیابی به‌طور معمول عبارت‌اند از:

(۱) یکنواختی و ثبات الیاف تولید شده (۲) قطر و توزیع مطلوب الیاف (۳) عوامل مؤثر عملی و (۴) توسعه روش استاندارد برای نظارت بر کیفیت.

در عملیات الکترورسی چند نازله، جت‌های باردار شده نسبت به هم دافعه دارند؛ بنابراین، وسیله‌ای باید طراحی شود تا داخل میدان الکتریکی بین هر جت را به حداقل برساند؛ علاوه بر روش الکترود ثانویه [۷۶-۷۴]، براین چالش می‌توان با استفاده از یک رویکرد دیگر که شامل اتخاذ روش‌های الکترورسی بدون سوزن^۱ است، غلبه کرد که الکترود برای تشکیل جت باردار شده می‌تواند به شکل سیم، سیلندر، دیسک، توب یا سیم پیچ مارپیچی که جت‌های متعدد به طور خودبه‌خود روی الکترودها شکل گرفته است باشد. بازده معمول تولید نانوالیاف با استفاده از این روش‌ها می‌تواند وزنی بیش از ۲۶۰ برابر در مقایسه با الکترورسی تک نازله داشته باشد [۷۷، ۷۲]. متأسفانه ماهیت تشکیل الیاف به‌خودی خود یکنواختی قطر الیاف و توزیع الیاف را تضمین نمی‌کند، درنتیجه غشاها حاصل اغلب توزیع منافذ همگن را که برای تصفیه آب لازم است، ندارند. این غشاها، اگرچه، برای کاربرد تصفیه هوا ایده آل هستند که در آن مکانیزم جداسازی توسط جذب نانوالیاف / ذره حکم فرما است.

در عملیات الکترورسی چند نازله، حجم زیادی از حلال می‌باشد بازیافت شود و یا به‌طور مناسبی دفع گردد، به‌خصوص برای سیستم‌های شامل حلال‌های آلی مانند دی‌متیل فرمامید، دی‌متیل سولفوکسید، کلروفرم و تتراهیدروفوران. پیش‌ازاین، ما درباره یک سیستم به دام انداختن برای حلال آلی بازیافتی مانند دی‌متیل فرمامید از مخلوط‌های هوا / حلال بحث کردیم. اگر فرایند بازیافت حلال از لحاظ اقتصادی مؤثر نباشد، یک رویکرد عملی این است که مخلوط هوا / حلال خروجی می‌تواند به صورت مستقیم توسط یک سوزاننده قبل از تخلیه به اتمسفر سوزانده شود.

۲-۶-۲- فناوری الکترورسی: وضعیت فعلی تجاری

در حال حاضر بیش از ۲۰۰ دانشگاه و مؤسسات تحقیقاتی وجود دارد که بر روی جنبه‌های مختلف تحولات و کاربردهای مواد مربوط به استفاده از فناوری‌های الکترورسی کار می‌کنند که بیش از ۱۰۰۰ مقاله علمی و ثبت اختراع که در هر سال منتشر می‌شود وجود دارد [۷۹، ۷۸]؛ علاوه براین، شرکت‌های صنعتی متعددی فناوری‌های الکترورسی خود را برای تولید نانوالیاف در مقیاس بزرگ در سراسر جهان مانند ایالات متحده آمریکا، ژاپن، کره، آلمان، جمهوری چک، کانادا و فنلاند توسعه داده‌اند. برخی از نام‌های انتخاب شده‌این شرکت‌ها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. این شرکت‌ها امکانات الکترورسی خود را توسعه دادند و توانستند بر اساس نیازهای بازار خود برای

^۱. Needleless Electrospinning

کاربردهای خاص، محصولات نانوالیاف در مقیاس بزرگ را تولید کنند. انعطاف‌پذیری فناوری الکتروریسی، برخی از تحقیقات و توسعه خیلی نوآورانه از مواد جدید و کاربردهای در حال ظهور توسط محققان در دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی را تسهیل کرده است. کاربردهای معمول از نانوالیاف الکتروریسی شده در صنعت عبارت‌اند از: تصفیه هوا و آب، مواد کامپوزیتی، صنعت هوافضا، مراقبت‌های بهداشتی، انرژی و لوازم آرایشی، هرچند استفاده از فیلتر تصفیه هوا و گاز همچنان بزرگ‌ترین بخش است [۷۹-۸۴].

جدول ۱-۲- شرکت‌های فعلی با محصولات الکتروریسی در مقیاس بزرگ [۸۰]

شرکت‌های ایالات متحده آمریکا	شرکت‌های خارجی (غیر آمریکایی)
Donaldson Company Inc	Toyobo (Japan)
Argonide Corporation	Toray Industries, Inc (Japan)
E-Spin Technologies Inc	Teijin Fibers, Ltd (Japan)
Nanostatics Corporation	Kato Tech Co., Ltd (Japan)
Foster Miller Inc	Espinex Inc (Japan)
KX industries	NanoNC (Korea)
EHS Technologies	Samshin Creation Co., Ltd (Korea)
SNS Nanofiber Technology, LLC	Elmarco (Czech Republic)
Hollingsworth & Vose	Nanoval GmbH & Co. (German)
Finetex Technology Inc	Nanofiber Future Tech. Corp (Canada)
Hitco Carbon Composites, Inc	Nicast Ltd (Israel)
US Global Nanospace, Inc	Ahlstrom (Finland)

به عنوان مثال، دونالدسون^۱ دارای شعبه‌های تجاری در بیش از ۳۰ کشور است که در آن‌ها فیلترهای پیشرفته نانولیپی الکتروریسی شده به‌طور گستردگی برای جداسازی مایع / گاز و تصفیه هوا استفاده می‌شود (به عنوان مثال فیلترهای جمع‌آوری گرد و غبار، فیلتر هوای موتور سنجین / توربین گاز) [۸۵].

^۱. Donaldson

در مثال دیگری، المارکو^۱ فناوری الکتروریسی بدون سوزن منحصر به فردی را ارائه می‌دهد که اجازه تولید منسوجات نانولیفی در مقیاس صنعتی با سرعت تولید بالا را می‌دهد. آن‌ها محصولات الکتروریسی شده را با ویژگی‌های جذب صوت و حذف ناخالصی‌های بیولوژیکی / مکانیکی در هوای آلوده را نشان داده‌اند [۸۶]. از آنجایی که غشاها الکتروریسی شده می‌توانند برخی از خواص برتر را (مثلًاً تخلخل بالاتر، نسبت سطح به حجم بالا و عاملیت بیشتر) نسبت به غشاها تجاری ارائه دهند، ما انتظار تجاری‌سازی در مقیاس بزرگ غشاها الکتروریسی شده برای تصفیه آب در هر نقطه از جهان را داریم. ما اعتقاد داریم استفاده از غشاها الکتروریسی شده برای تصفیه انواع آب، به احتمال زیاد، نکته برجسته بعدی در صنایع غشاوی خواهد بود.

۳-۲- ویژگی‌های منحصر به فرد غشاها نانولیفی الکتروریسی شده

۳-۱- خواص ساختاری قابل تنظیم

عوامل اصلی ساختاری غشاها نانولیفی الکتروریسی شده مربوط به کاربردهای تصفیه آب، مساحت سطحی، تخلخل و اندازه منافذ هستند. به طور معمول، غشاها الکتروریسی شده دارای مساحت سطحی بسیار زیاد، تخلخل بالا و اندازه منافذ و توزیع اندازه منافذ قابل تنظیم است که می‌تواند الزامات تصفیه آب را برآورده سازد [۱۱]. درباره این عوامل بعداً بحث خواهد شد که چه طور آن‌ها می‌توانند به وسیله فناوری الکتروریسی کنترل شوند.

اول از همه، نسبت سطح به حجم نانوالیاف الکتروریسی شده معمولاً بالاتر از غشاها معمولی ساخته شده توسط روش‌های جدایی فازی یا ریخته‌گری محلول است [۲۴]. به عنوان مثال، قطر معمول الیاف از نانوالیاف الکتروریسی شده حدود چند صد نانومتر است، در حالی که این محدوده می‌تواند از چند ده نانومتر به میکرون رسیده باشد؛ بنابراین، مساحت سطحی غشای نانولیفی الکتروریسی شده می‌تواند از $40 \text{ m}^2/\text{g}$ باشد [۷۷]. از آنجایی که نسبت سطح به حجم عکس شعاع الیاف است، الیاف با قطر ظرفیت، مساحت سطحی بیشتری دارد. نسبت سطح به حجم بالای داربست‌های نانولیفی برای جذب سموم از قبیل ویروس‌ها، رنگ‌ها و یون‌های فلزی سنگین، اگر به درستی اصلاح شود بسیار مفید است. قابلیت دوگانه تصفیه و جذب اجازه می‌دهد غشاها الکتروریسی شده جایگاه منحصر به فردی را در کاربردهای مختلف تصفیه داشته باشد [۸۷]. قطر نانوالیاف الکتروریسی شده می‌تواند با تغییر شرایط الکتروریسی کنترل شود، بدین معنا که با تغییر قطر الیاف، نسبت سطح به حجم می‌تواند تعدیل شود. شاید ساده‌ترین راه برای تنظیم قطر الیاف، تغییر غلظت پلیمر در طی الکتروریسی باشد. به طور معمول، با استفاده از غلظت پایین محلول، قطر

^۱. Elmarco

الیاف نازک‌تر می‌شود در صورتی که ویسکوزیته محلول پلیمری به اندازه کافی باشد تا بتواند ریسیده شود. قطر الیاف همچنین می‌تواند با استفاده از دیگر عوامل مانند میدان الکترومغناطیسی بالاتر، قدرت یونی بزرگ‌تر و فاصله ریسندگی طولانی‌تر تغییر یابد.

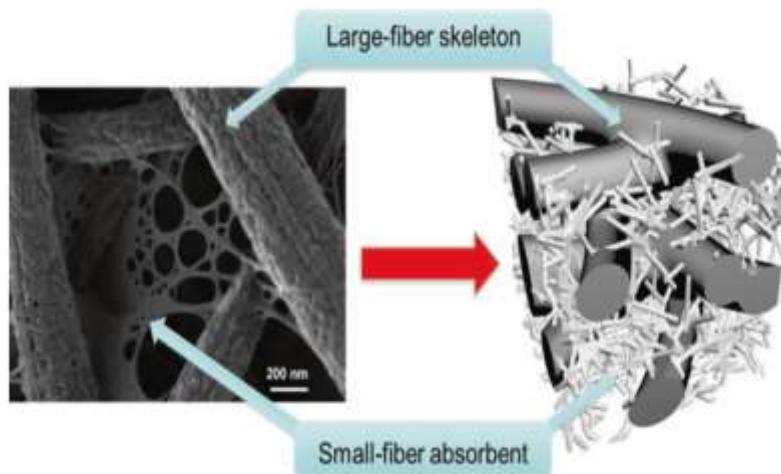
برای کاربردهای جذب، یک مسئله حیاتی، تراکم و توزیع گروه‌های عاملی بر روی سطح داربست حامل است [۲۳]. معمولاً، داربست نانولیپی کلتروریسی شده که دارای قطر الیاف کوچک‌تر است دارای مساحت سطحی بالاتری می‌باشد که اگر سطح الیاف بدستی با مکان‌های جذب‌کننده مؤثر اصلاح شود می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت جذب شود. قطر کوچک‌تر الیاف همچنین می‌تواند منجر به میانگین اندازه منفذ و توزیع اندازه منفذ کوچک‌تر غشا شود؛ اگرچه، این ممکن است اغلب استحکام غشا را تضعیف کند. یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، استفاده از یک ساختار غشایی کامپوزیت است که حاوی دو شبکه درهم نفوذ کرده لیفی، با قطرهای مختلف الیاف می‌باشد. در یک مطالعه نمونه، نانو الیاف کیتین / سلولز بسیار ظریف (قطر حدود ۵ نانومتر) به داربست‌های نانولیپی کلتروریسی شده (قطر حدود ۲۰۰ نانومتر) تزریق شد که غشای کامپوزیتی نشان داده شده، دارای شار دو برابر بالاتر از غشای میکرو فیلتراسیون تجاری GS0.22 می‌باشد و همچنین ظرفیت جذب (در برابر بنفس کریستال، یک رنگزای کاتیونی) ۱۶ برابر بیشتر از GS0.22 را نشان می‌دهد [۸۹، ۴۴، ۸۸].

شکل ۷-۲ تصویر SEM و طرح‌واره‌ی این ساختار غشایی نانولیپی کامپوزیتی را نشان می‌دهد که در آن نانوالیاف سلولزی خیلی ظریف، با ایجاد یک شبکه نانولیپی سه‌بعدی در داربست نانولیپی کلتروریسی شده، به میزان قابل توجهی نسبت سطح به حجم را افزایش می‌دهد [۴۵]. مشخص شد که ایزوترم‌های جذب این غشای نانولیپی کامپوزیتی از مدل لانگمیور پیروی می‌کند که به این معنی است که جذب مولکول‌های رنگزای احتمالاً در پوشش یک تک لایه^۱ قرار دارد. در عین حال، جذب به علت ساختار خیلی متخلخل غشا به سرعت به سمت تعادل نزدیک می‌شود.

تخلخل بالای غشای نانولیپی کلتروریسی شده برای بهبود شار نفوذ مفید است، زیرا مولکول‌های آب می‌توانند از طریق غشا با مقاومت کم هیدرولیکی عور کنند. این سیستم غشایی دارای یک مزیت دیگر است، تمام منفذ که به شکل تصادفی بر روی نانو الیاف قرار گرفته‌اند با ساختار کانال به هم پیوسته شده‌اند [۲۵] که می‌تواند مقاومت هیدرولیکی آب را کاهش داده و تمایل به گرفتگی را کم کند. به طور معمول، تخلخل داربست نانو الیاف کلتروریسی شده٪ ۹۵-۷۰ می‌باشد که بستگی به شرایط کلتروریسی دارد [۴۱]؛ از طرف دیگر، غشاها رایج ساخته شده توسط روش

^۱. Monolayer

جدایی فاز اغلب دارای تخلخل حجمی٪ ۵۰-۷۰ با تخلخل سطحی بسیار کم٪ ۲۰-۴۰ می‌باشد که به علت ساختار نامتقاضان آن است.

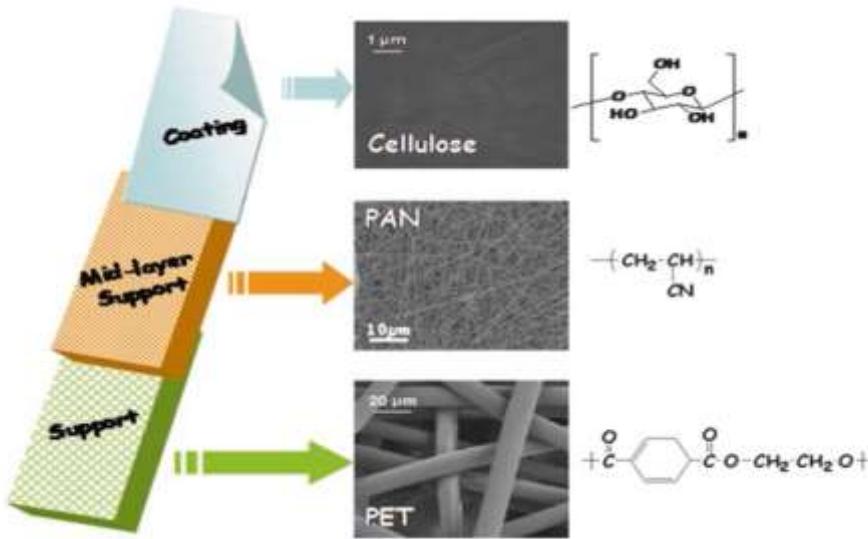


شکل ۲-۷- نمایهای از نانو ساختار داربست الکتروریسی شده PAN با نانولیاف سلولزی خیلی ظرفی تزریق شده

غشای نانولیفی الکتروریسی شده با ماهیت تخلخل بالا، آن را به عنوان یک داربست پشتیبان برای نگهداری یک لایه مانع برای اولترا فیلتراسیون، نانو فیلتراسیون و اسمز معکوس و اسمز مستقیم آمده می‌سازد [۱۱]. برای فرایند اسمز مستقیم جالب است که توجه داشته باشیم که قطبش غلظت در نزدیکی ساختار مانع می‌تواند به دلیل انتشار آزاد یون‌های نمکی در داربست نانولیفی کاهش یابد.

برای کاربرد الترا فیلتراسیون، یک غشای TFNC سه لایه، شامل یک زمینه بی بافت PET به عنوان لایه‌ی پایین، داربست نانولیفی الکتروریسی شده PAN به عنوان پشتیبان میانی و سلولز بازیافتی از محلول مایع یونی به عنوان مانع همان‌طور که در شکل ۸-۲ نشان داده شده است، استفاده می‌شود [۴۹]. این غشای TFNC، ده برابر شار نفوذی بالاتری در برابر آب متعفن روغنی نسبت به غشای تجاری الترا فیلتراسیون PAN10 را نشان می‌دهد، درحالی که نسبت عدم پذیرش پس از ۱۰۰ ساعت عملکرد تصفیه تقریباً یکسان باقی می‌ماند [۵۱]. یکی از تفاوت‌های عمده بین غشای TFNC و PAN10، لایه پشتیبان بود که در آن غشای TFNC داربست نانولیفی الکتروریسی شده را به عنوان پشتیبان لایه میانی استفاده می‌کند و غشای PAN10 حاوی لایه متخلخل ساخته شده توسط روش تبدیل فاز بود. تخلخل بالای داربست نانولیفی الکتروریسی شده در غشای TFNC بهوضوح قادر است عملکرد غشای با شار بالا در الترا فیلتراسیون داشته باشد که

mekanisim جداسازی اصلی از طریق جداسازی اندازه‌ای است، همچنین متوجه شدیم که یافته‌یم روند گرفتگی غشای TFNC نسبتاً کمتر از PAN10 است که عمدتاً به دلیل ماهیت آبدوست لایه مانع سلولزی آن‌ها می‌باشد [۴۹].



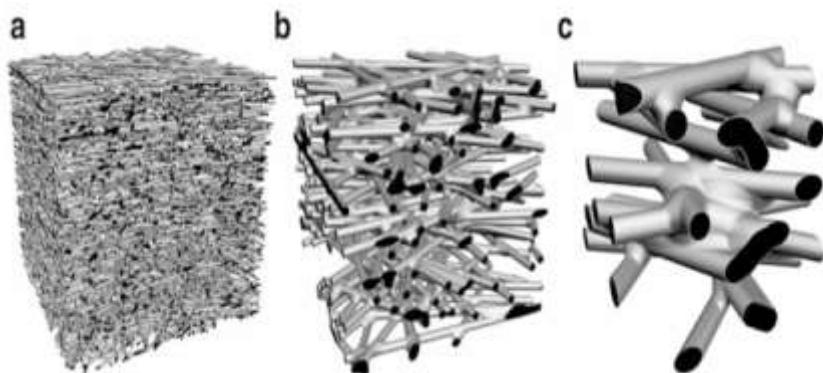
شکل ۲-۸- ساختار سلسله مرتبه‌ای غشای اولترا فیلتراسیون TFNC بر پایه سلولز

علاوه بر مزیت تخلخل بالاتر، اندازه حفره‌ها و توزیع اندازه حفره‌های غشای نانولیپی الکتروریسی شده را می‌توان تحت شرایط الکتروریسی کنترل کرد. اندازه منفذ و توزیع اندازه منفذ، دو پارامتر اساسی دیگر مرتبط با کارایی تصفیه می‌باشند [۴۱، ۴۴]. از نتایج آزمایشی ما، برای داربست‌های نانولیپی الکتروریسی شده بی‌بافت معمول، وقتی که الیاف به صورت تصادفی بدون جهت‌گیری ترجیحی قرار داده می‌شوند و تخلخل زمینه الیاف، در حدود 80 ± 3 درصد حجمی ثابت باقی می‌ماند، اندازه منفذ می‌تواند با قطر الیاف برای غشاهایی که کارایی تصفیه مطلوب دارند (یعنی بالاترین شار و بالاترین نسبت عدم پذیرش) همبستگی داشته باشد.

ارتباط بین اندازه متوسط منفذ غشا و قطر متوسط الیاف در شکل ۹-۲ نشان داده شده است [۲۳]. در این شکل، مشخص شد که اندازه متوسط منفذ حدود 3 ± 1 برابر قطر متوسط الیاف است و حداقل اندازه حفره‌ها حدود 2 ± 10 برابر قطر متوسط الیاف است. این شکل می‌تواند به عنوان یک طرح برای طراحی ساختار غشای نانولیپی استفاده شود که در آن اندازه‌های منفذ را می‌توان با کنترل قطر الیاف از نانو الیاف الکتروریسی شده تنظیم کرد.

برای میکروفیلتراسیون، داربست‌های نانولیفی الکتروریسی شده با اندازه منافذ و توزیع اندازه منافذ مطلوب به عنوان مانع طراحی شده‌اند [۹۰]. برای مثال برای تمیز کردن آب آلوده از باکتری، اندازه متوسط منافذ غشا حدود $20\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر طراحی شده است.

که می‌تواند باکتری‌های معمول آب مانند اشريشیا کلی و برویوندیموناس دیمینیوتا را که دارای ابعاد بزرگتر از $20\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر است حذف کند [۹۱]. بر اساس رابطه تجربی بین اندازه متوسط منافذ غشا و متوسط قطر الیاف، یک غشای نانولیفی الکتروریسی شده PAN با قطر الیاف حدود $10\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر اما با ضخامت غشای کمی بزرگ تولید شده است. غشای حاصل LRV را در مقابل اشريشیا کلی نشان داد که معیارهای آب آشامیدنی تصفیه شده را در برداشت، اما هنوز بهره‌مند از شار دو برابر بیشتر از میکروفیلتر معمولی بود [۴۱، ۴۲].

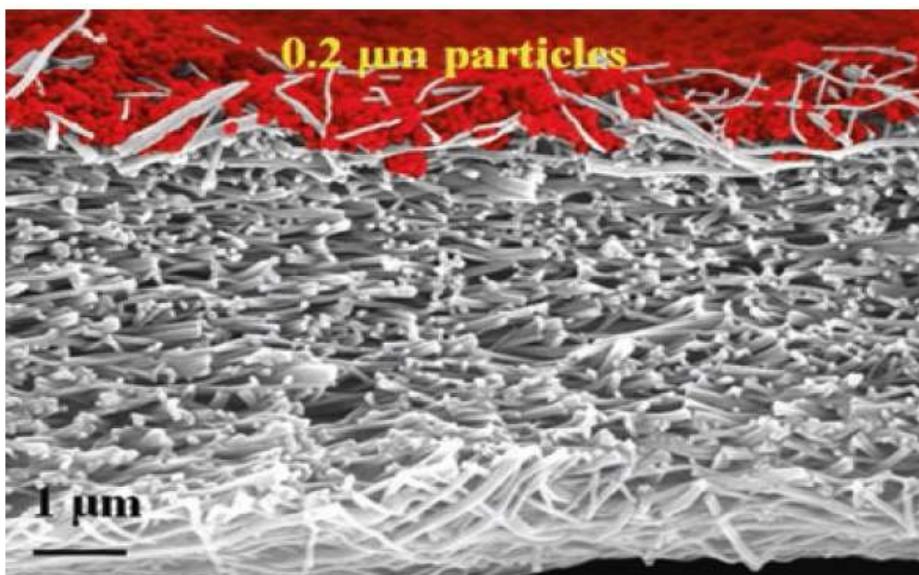


شکل ۲-۹- تصویری از همبستگی بین اندازه منافذ و قطر الیاف در تخلخل ثابت 80% حجمی در یک حجم ثابت. نسبت قطر الیاف نسبی (a)، (b) و (c) $1:3:10$ است.

در یکی دیگر از مطالعات [۷۱]، در یک طرحی که حاوی نانو ذرات پلی استایرن معلق^۱ با قطر حدود $20\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر (به عنوان یک مدل آب آلوده به باکتری در نظر گرفته شده است) برای بررسی عملکرد تصفیه از غشای نانولیفی الکتروریسی شده اتصال عرضی شده PVA استفاده شد. تأیید شد که همه‌ی نانو ذرات را می‌توان پس از تصفیه بدون از بین بردن هر کدام به انتهای غشا، بر روی سطح غشا طرد و جمع کرد (همان‌طور که در تصویر SEM در شکل ۲-۱۰ دیده می‌شود). این نشان می‌دهد که غشای نانولیفی الکتروریسی شده با اندازه منافذ مناسب و توزیع اندازه منافذ مناسب، بستر میکروفیلتراسیون ایده آل برای حذف ذرات باکتری یا آلاینده‌های با ابعاد مشابه است [۹۰، ۹۲، ۹۴].

^۱. Suspension

کاربرد دیگری از غشاهای میکرو فیلتراسیون در فرایند تقطیر غشایی است [۹۵]. تقطیر غشایی یک فرایند جداسازی غیر هم‌دما است که در آن فقط مولکول‌های بخار می‌توانند از طریق یک غشای میکرو متخلخل بسیار آب‌گریز عبور کنند. نیروی پیشران در فرایند تقطیر غشایی، اختلاف فشار بخار ناشی از اختلاف دما بین جریان‌های ورودی و نفوذ است. برای عملیات تقطیر غشایی، سطح غشا باید آب‌گریز باشد، درحالی که اندازه منافذ غشا باید به‌دقت کنترل شود تا بتواند فشار بالای ورودی مایع را تحمل کند و نرخ بالای انتقال جرم (بخار) را نگه دارد. به‌طور معمول، اندازه منافذ به‌طور مستقیم با نرخ انتقال جرم متناسب است، اما به‌طور معکوس متناسب با فشار ورودی مایع است. در یک مطالعه اخیر، غشاهای نانولیپی کتروریسی شده پلی استایرن برای نمک‌زدایی آب دریا و آب‌شور با استفاده از تقطیر غشایی طراحی و اعمال شده‌اند [۹۶].



شکل ۲- غشای میکرو فیلتراسیون نانولیپی کتروریسی شده پس از تصفیه تعیق نانو ذرات [۷۱].

نتایج نشان داد که شار نفوذ بالاتری با استفاده از غشای کتروریسی شده PS در مقایسه با غشاهای PVDF تجاری در دسترس به دست می‌آید که نشان‌دهنده پتانسیل تجاری‌سازی استفاده از غشاهای کتروریسی شده برای کاربردهای نمک‌زدایی (آب شیرین سازی) است. به‌طور کلی، به‌عنوان یک لایه پشتیبان، داربست نانولیپی کتروریسی شده با اندازه منافذ متناسب برای بهبود ادغام بین لایه مانع و داربست نانولیپی به دلیل تخلخل بالای داربست نانولیپی، می‌تواند بسیار مفید باشد؛ بنابراین به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی لایه مانع تحت عملیات با فشار بالا

مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس افزایش می‌یابد [۹۷، ۵۸]؛ این به این دلیل است که بخشی از داربست نانولیفی را می‌توان در لایه مانع غوطه‌ور شود و یک نانوکامپوزیت تشکیل دهد؛ به عنوان مثال، یک سیستم غشایی TFNC، شامل استفاده از داربست نانولیفی الکتروریسی شده PAN به عنوان لایه پشتیبان، عملکرد عالی در عملیات اسمز معکوس طولانی‌مدت را در فشار psi ۸۰۰ برای نمک‌زدایی آب دریا نشان داد [۹۸].

۲-۳-۲- انتخاب مواد برای غشاهای نانولیفی در تصفیه آب

تعداد زیادی از مواد پلیمری وجود دارد که می‌تواند برای تولید غشاهای نانولیفی به منظور کاربردهای متنوع الکتروریسی شود. با این حال، فقط چند خانواده از مواد پلیمری واقعاً می‌تواند برای عملیات تصفیه آب استفاده شود [۱۱]. به طور کلی، این مواد را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

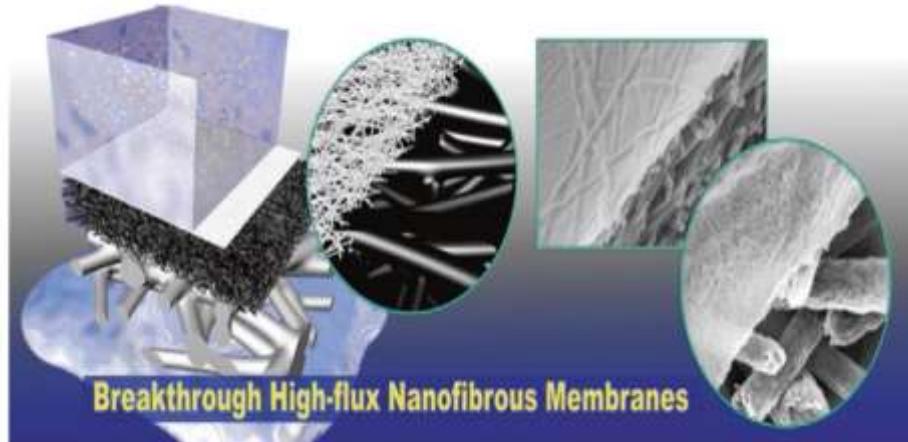
مواد آب‌دوست، مواد آب‌گریز و مواد عامل دار شده سطحی.

پلیمرهای آب‌دوست معمول که برای غشاهای نانولیفی به منظور تصفیه آب، الکتروریسی می‌شوند شامل [۴۱] PAN، PVA اتصال عرضی شده [۷۱] و استات سلوزل [۹۹] می‌باشد. در میان این مواد، PAN محبوب‌ترین است [۱۰۰] که غشای نانولیفی الکتروریسی شده PAN به عنوان بستر میکرو فیلتراسیون برای غربال کردن باکتری / نانوذرات یا به عنوان داربست پشتیبان برای ساخت غشای الترا فیلتراسیون، نانو فیلتراسیون و غشای اسمز معکوس / مستقیم به کاربرده می‌شود [۱۰۱]. ماهیت آب‌دوست این مواد می‌تواند مزایای شگرفی را در خاصیت ضد گرفتگی به غشاهای حاصل نسبت به همتایان رایج، ارائه کند. اخیراً چندین نوع جدید از غشاهای TFNC (شکل ۱۱-۲) برای میکرو فیلتراسیون و اولترا فیلتراسیون توسط آزمایشگاه ما در دانشگاه استونی بروک^۱ توسعه داده شده است [۴۳، ۴۹ و ۱۰۲] و همچنین توسط شرکت‌ها تجاری‌سازی شده‌اند. این غشاهای مبتنی بر استفاده از داربست نانولیفی الکتروریسی شده PAN به عنوان لایه پشتیبان هستند که مزایای آن قبلاً مورد بحث قرار گرفته است.

مواد آب‌گریز که اغلب برای غشاهای نانولیفی به منظور تصفیه آب الکتروریسی می‌شوند شامل PVDF [۱۰۳-۱۰۵]، PS [۹۴، ۶۲] و PES [۱۰۶، ۱۰۷] می‌باشند. این غشاهای نانولیفی می‌توانند برای کاربردهای میکرو فیلتراسیون متداول استفاده شود و همچنین آن‌ها مناسب هستند تا برای تقطیر غشایی استفاده شوند. غشاهای متخلخل آب‌گریز رایج برای عملیات تقطیر غشایی شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌تترافلورو‌اتیلن (PTFE) می‌باشد [۶۲] که زوایای تماس آب در این غشاهای معمولاً بیشتر از ۱۲۰ درجه است. اگرچه، PP و PTFE به

^۱. Stony Brook University

علت مقاومت شیمیایی زیاد و حلالیت بسیار کم در حلال‌های رایج به سختی الکتروریسی می‌شوند. تنها ماده‌ای که می‌تواند الکتروریسی شود PVDF است، در حالی که غشاهای الکتروریسی شده PVDF برای نمک‌زدایی آب‌شور و آب دریا با استفاده از تقطیر غشایی بسیار مناسب هستند. بالین وجود، حلال‌های موجود برای الکتروریسی PVDF هنوز محدود هستند (استون/دی متیل استامید یا استون/دی متیل فرمامید) [۱۰۵-۱۰۳]. اخیراً استفاده موفقیت‌آمیز از غشاهای الکتروریسی شده پلی استایرن برای انجام عملیات تقطیر غشایی برای تمیز کردن آب‌شور و آب دریا، گویا یک مسیر تجاری‌سازی عملی‌تر را ارائه می‌دهد، چون پلی استایرن می‌تواند در حلال‌های رایج مانند دی متیل فرمامید، تترا هیدرو فوران و تولوئن حل کرد [۶۳]. خواص سطحی غشاهای نانولیپی الکتروریسی شده تنها به صورت جزئی به خواص ماده بستگی دارد. عملکرد سطحی غشا می‌تواند در خانواده انتخاب شده از نانو الیاف برای تصفیه آب به میزان قابل توجهی گسترش یابد [۱۱، ۲۷، ۱۰۸]. اصلاح می‌تواند با پوشش فیزیکی یا روش‌های پیوند شیمیایی همراه باشد تا انواع مختلفی از گروه‌های عاملی را معرفی کند و به شرایط خاصی برسد.



شکل ۱۱-۲- غشای کامپوزیتی نانولیپی لایه نازک (TFCN) شامل داربست نانولیپی بسیار متخلخل به عنوان یک لایه میانی [۴۹].

به عنوان مثال، به ما اجازه دهد تغییرات غشاهای میکروفیلتراسیون الکتروریسی شده PAN که می‌تواند باکتری و ویروس را حذف کند را در نظر بگیریم (اندازه معمول در دهها نانومتر). ویروس‌ها معمولاً به علت نقطه ایزوالکتریک کمتر از ۷، در مقدار pH خنثی به صورت منفی باردار می‌شوند (با استفاده از باکتری خوار MS2 به عنوان یک مدل ویروس، نقطه‌ی ایزوالکتریک آن‌ها تنها ۳/۹ است).

پیش‌تر، ما نشان دادیم که باکتری‌ها را می‌توان از طریق تنظیم اندازه منافذ غشا حذف کرد. برای حذف ویروس (باکتری‌خوار MS2)، سطح الیاف PAN به مکان مثبت باردار شده تغییر داده می‌شود که می‌تواند ویروس با بار منفی را در شرایط خنثی جذب کند. برای انجام این کار، نانوالیاف PAN می‌تواند با کوپلیمر پلی‌اتیلن ایمین (PEI) دی‌اپوکسی (EGdGE) پوشش سطحی داده شود که گروه‌های آمین با بار مثبت را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم غشایی می‌تواند MS2 را به‌طور کامل با pH بین ۸/۵ تا ۶/۵ جذب کند [۴۳].

در مثال دیگری، پلی‌وینیل آمین هیدروکلراید (PVAm) با گروه‌های مثبت باردار شده بر روی سطح PAN هیدرولیز شده (با گروه‌های کربوکسیل) توسط واکنش آمیدی پیوند داده است. غشای نانو لیفی پیوند داده شده با گروه‌های آمینی، نه تنها می‌توانند ذرات ویروس را حذف کنند، بلکه می‌توانند یون‌های فلزی سنگین مانند یون‌های کرومی را با مقادیر مختلف pH با کی لیت شدن^۱ یا برهmekتیش بار حذف کنند [۸۵].

غشاهای اصلاح شده (بهروش‌های فیزیکی یا شیمیایی) دارای ظرفیت جذب بسیار بالا می‌باشند که قابل مقایسه یا بهتر از هر محصول تجاری فعلی هستند؛ علاوه بر آن، این غشاهای را می‌توان چندین بار بازیافت و استفاده مجدد برای کاربردهای عملی کرد. ما معتقدیم که تقریباً همه‌ی غشاهای الکتروریسی شده می‌توانند برای بهره‌مند شدن از کارایی اضافی مانند قابلیت جذب شیمیایی اصلاح شوند، بنابراین عملکردهای غشاهای نانولیفی به عنوان یک بستر تصفیه مؤثر گسترش می‌یابد.

۴-۲- خلاصه و چشم‌انداز

فناوری الکتروریسی فرصت‌هایی برای ایجاد نانومواد جدید برای انواع روش‌های تصفیه آب مانند میکرو‌فیلتراسیون، اولترا‌فیلتراسیون، نانو‌فیلتراسیون، اسمز معکوس، اسمز مستقیم و تقطری غشایی فراهم می‌کند. بسیاری از نوآوری‌ها بر روی تجهیزات و فرایندهای الکتروریسی در دو دهه گذشته از جمله الکترودمش، الکتروریسی چند جته تا نانو الیاف عامل‌دار صورت گرفته است و بسیاری دیگر برای کاربردهای عملی بیشتر توسعه خواهد یافت. انعطاف‌پذیری در انتخاب مواد و تغییرات ساختار توسط الکتروریسی، ما را قادر به طراحی و ساخت غشاهای نانو ساختاری با ویژگی‌هایی می‌کند که می‌تواند نیازمندی‌های لازم برای مقابله با چالش خاص آب را برآورده سازد. در این فصل، مثال‌های انتخاب شده بهمنظور نشان دادن رویکردهای فعلی برای تنظیم نسبت سطح به حجم، تخلخل غشا، توزیع و اندازه منافذ، انتخاب مواد و عملکرد سطحی است به این

^۱. Chelation

منظور که طیف گسترهای از بستر تصفیه را تولید و آب آشامیدنی تولید کند و فاضلاب شهری، آب متعفن، آب تولیدشده، آب شور و آب دریا را تصفیه کند.

مراجع

- [1]. Ramakrishna S (2005) An introduction to electrospinning and nanofibers. World Scientific, Singapore, pp 1-38.
- [2]. Huang ZM, Zhang YZ, Kotaki M, Ramakrishna S (2003) Compos Sci Technol 63:2223-2225.
- [3]. Lendlein A, Sisson A (2011) Handbook of biodegradable polymers: isolation, synthesis, characterization and applications. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, pp 1-426.
- [4]. Thavasi V, Singh G, Ramakrishna S (2008) Energy Environ Sci 1:205-221.
- [5]. Fang D, Chang C, Hsiao BS, Chu B (2006) Development of multiple-jet electrospinning technology. In: Reneker DH, Fong H (eds) ACS symposium series, no. 918, Polymeric nanofibers Chap. 7, pp 91-103.
- [6]. Burger C, Hsiao BS, Chu B (2006) Annu Rev Mater Res 36:333-368.
- [7]. <http://www.polynanotec.com/news.html>. Accepted 22 Sep 2011.
- [8]. Chu B, Hsiao BS, Yoon K (2008) AATCC Rev 8:31-33
- [9]. Jayaraman K, Kotaki M, Zhang YZ, Mo XM, Ramakrishna S (2004) J Nanosci Nanotechnol 4:52-65.
- [10].Chase GG, Varabhas JS, Reneker DH (2011) J Eng Fiber Fabr 6:32-38.
- [11].Ma HY, Chu B, Hsiao BS (2012) In: Wei Q (ed) (Chap. 15) Functional nanofibers and applications. Wood Publishing, London, pp 331-370.
- [12].Sill TJ, von Recum HA (2008) Biomaterials 29:1989-2006.
- [13].Khil MS, Cha DI, Kim HY, Kim IS, Bhattacharai N (2003) J Biomed Mater Res B Appl Biomater 67:675-679.
- [14].Kumbar SG, Nair LS, Bhattacharyya S, Laurencin CT (2006) J Nanosci Nanotechnol 6: 2591-2607.
- [15].Rieger KA, Birch NP, Schiffman JD (2013) J Mater Chem B 1:4531-4541.
- [16].Wang Z, Wan L, Liu Z, Huang X, Xu Z (2009) J Mol Catal B Enzym 56:189-195.
- [17].Ma ZW, Kotaki M, Inai R, Ramakrishna S (2005) Tissue Eng 11:101-109.
- [18].Prabhakaran MP, Venugopal J, Chan CK, Ramakrishna S (2008) Nanotechnology 19:455102.
- [19].Yang X, Wang H (2010) Electrospun functional nanofibrous scaffolds for tissue engineering. In: Eberli D (ed) Tissue engineering. InTech, Rijeka, pp 159-177.
- [20].Jo SM (2012) In: Liu J (ed) Hydrogen storage. InTech, Shanghai, pp 181-210. Chap. 8.

- [21].Miao J, Miyauchi M, Simmons TJ, Dordick JS, Linhardt RJ (2010) *J Nanosci Nanotechnol* 10:5507-5519.
- [22].Ding B, Wang M, Yu J, Sun G (2009) *Sensors* 9:1609-1624.
- [23].Ma HY, Burger C, Hsiao BS, Chu B (2011) *J Mater Chem* 21:7507-7510.
- [24].Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2013) *Curr Org Chem* 17:1361-1370.
- [25].Chu B, Hsiao BS (2009) *J Polym Sci B Polym Phys* 47:2431-2435.
- [26].Yoon K, Hsiao BS, Chu B (2008) *J Mater Chem* 18:5326-5334.
- [27].Agarwal S, Wendorff JH, Greiner A (2010) *Macromol Rapid Commun* 31:1317-1331.
- [28].Strutt JW (Lord Rayleigh) (1879) *Proc R Soc Lond* 28:404-409.
- [29].Zeleny J (1914) *Phys Rev* 3:69-91.
- [30].Cooley JF (1902) Apparatus for electrically dispersing fluids. U.S. Patent 692,631.
- [31].. Morton WJ (1902) Method of dispersing fluids. U.S. Patent 705,691.
- [32].Formhals A (1934) Process and apparatus for preparing artificial threads. U.S. Patent 1,975,504.
- [33].Norton CL (1936) Method and apparatus for producing fibrous or filamentary material. U.S. Patent 2,048,651.
- [34].Taylor G (1969) *Proc R Soc Lond A* 280:383-397.
- [35].Taylor G (1969) *Proc R Soc Lond A* 313:453-475.
- [36].Kumbar SG, Nukavarapu SP, James R, Hogan MV, Laurencin CT (2008) *Recent Pat Biomed Eng* 1:68-78.
- [37].Zong X, Kim K, Fang D, Ran S, Hsiao BS, Chu B (2002) *Polymer* 43:4403-4412.
- [38].Liu Y, Ma HY, Hsiao BS, Chu B, Tsou AH (2016) *Polymer* 107:163-169.
- [39].Liang D, Hsiao BS, Chu B (2007) *Adv Drug Deliv Rev* 59:1392-1412.
- [40].Homaeigohar S, Elbahri M (2014) *Materials* 7:1017-1045.
- [41].Wang X, Hsiao BS (2016) *Curr Opin Chem Eng* 12:62-81.
- [42].Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2014) *J Membr Sci* 452:446-452.
- [43].Wang R, Liu Y, Li B, Hsiao BS, Chu B (2012) *J Membr Sci* 392-393:167-174.
- [44].US Patent, 13/018 0917, 2013; WO Patent, 12/094 407, 2012.
- [45].Ma HY, Burger C, Hsiao BS, Chu B (2012) *Biomacromolecules* 13:180-186.
- [46].Sato A, Wang R, Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2011) *J Electron Microsc* 60:201-209.
- [47].Wang X, Chen X, Yoon K, Fang D, Hsiao BS, Chu B (2005) *Environ Sci Technol* 39: 7684-7691.
- [48].Yoon K, Kim K, Wang X, Fang D, Hsiao BS, Chu B (2006) *Polymer* 47:2434-2441.
- [49].Ma HY, Burger C, Hsiao BS, Chu B (2011) *Biomacromolecules* 12:970-976.

- [50].Ma HY, Yoon K, Rong L, Mao Y, Mo Z, Fang D, Hollander Z, Gaiteri J, Hsiao BS, Chu B (2010) *J Mater Chem* 20:4692-4704.
- [51].Yoon K, Hsiao BS, Chu B (2009) *J Membr Sci* 338:145-152.
- [52].Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2011) *Polymer* 52:2594-2599.
- [53].Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2014) *J Membr Sci* 454:272-282.
- [54].Ma HY, Yoon K, Rong L, Shokralla M, Kopot A, Wang X, Fang D, Hsiao BS, Chu B (2010) *Ind Eng Chem Res* 49:11978-11984.
- [55].Wang Z, Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2014) *Polymer* 55:366-372.
- [56].Yoon K, Hsiao BS, Chu B (2009) *J Membr Sci* 326:484-492.
- [57].Yung L, Ma HY, Wang X, Yoon K, Wang R, Hsiao BS, Chu B (2010) *J Membr Sci* 365:52- 58.
- [58].Wang X, Yeh TM, Wang Z, Yang R, Wang R, Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2014) *Polymer* 55:1358-1366.
- [59].Wang X, Ma HY, Chu B, Hsiao BS (2017) *Desalination* 420:91-98.
- [60].Bui N, Lind ML, Hoek EMV, McCutcheon JR (2011) *J Membr Sci* 385:386:10-19.
- [61].Lawson KW, Lloyd DR (1997) *J Membr Sci* 124:1-25.
- [62].Alkhudhiri A, Darwish N, Hilal N (2012) *Desalination* 287:2-18.
- [63].Li X, Wang C, Yang Y, Wang X, Zhu M, Hsiao BS (2014) *ACS Appl Mater Interfaces* 6: 2423-2430.
- [64].Um IC, Fang D, Hsiao BS, Okamoto A, Chu B (2004) *Biomacromolecules* 5:1428-1436.
- [65].Chu B, Hsiao B.S, Fang D, Okamoto A (2008) Crosslinking of hyaluronan solutions and nanofibrous membranes made therefrom. U.S. Patent 7,323,425.
- [66].Wang X, Um IC, Fang D, Okamoto A, Hsiao BS, Chu B (2005) *Polymer* 46:4853-4867.
- [67].Kallioinen M, Pekkarinen M, Manttari M, Nuortila-Jokinen J, Nystrom M (2007) *J Membr Sci* 294:93-102.
- [68].Bohonak DM, Zydny AL (2005) *J Membr Sci* 254:71-79
- [69].Liu X, Ma HY, Hsiao BS (2018) unpublished results.
- [70].Kidoaki S, Kwon IK, Matsuda T (2005) *Biomaterials* 26:37-46.
- [71].Liu Y, Wang R, Ma HY, Hsiao BS, Chu B (2013) *Polymer* 54:548-556.
- [72].Niu H, Wang X, Lin T (2011) Needleless electrospinning: developments and performances. In: Lin T (ed) *Nanofibers-production, properties and functional applications*. InTech, Rijeka, pp 17-36.
- [73].Agarwal S, Greiner A, Wendorff JH (2008) *Polymer* 49:5603-5621.
- [74].Chu B, Hsiao BS, Fang D, Brathwaite C (2004) Biodegradable and/or bioabsorbable fibrous articles and methods for using the articles for medical applications. U.S. Patent 6685956.
- [75].Chu B, Hsiao BS, Fang D (2004) Apparatus and methods for electrospinning polymeric fiber and membranes. U.S. Patent 6713011.

- [76].Chu B, Hsiao BS, Hadjiargyrou M, Fang D, Zong S, Kim K (2004) Cell delivery system comprising a fibrous matrix and cells. U.S. Patent 6790455.
- [77].Teo WE, Ramakrishna S (2006) Nanotechnology 17:R89–R106. Web of Science database, keywords: *electrospinning or electrospun*
- [78].Persano L, Camposeo A, Tekmen C, Pisignano D (2013) Macromol Mater Eng 298:504–520.
- [79].Kaur S, Gopal R, Ng WJ, Ramakrishna S, Matsuura T (2008) MRS Bull 33:21–26.
- [80].Kriegel C, Arechi A, Kit K, McClements DJ, Weiss J (2008) Crit Rev Food Sci Nutr 48:775–797.
- [81].Petrik S (2011) Industrial production technology for nanofibers. In: Lin T (ed) *Nanofibers – production, properties and functional applications*. InTech, Rijeka, pp 1–16.
- [82].Fang J, Wang X, Lin T (2011) Functional applications of electrospun nanofibers. In: Lin T (ed) *Nanofibers – production, properties and functional applications*. InTech, Rijeka, pp 287–326.
- [83].Ramakrishna S, Fujihara K, Teo WE, Yong T, Ma Z, Ramaseshan R (2006) Mater Today 9: 40–50.
- [84].<http://www.donaldson.com>.
- [85].<http://www.elmarco.com>.
- [86].Liu Y, Ma HY, Liu B, Hsiao BS, Chu B (2015) J Plast Film Sheeting 31:379–400.
- [87].Yang R, Aubrecht KB, Ma HY, Grubbs RB, Hsiao BS, Chu B (2014) Polymer 55:1167–1176.
- [88].Yang R, Su Y, Burger C, Aubrecht KB, Wang X, Ma H, Grubbs RB, Hsiao BS, Chu B (2015) Polymer 60:9–17.
- [89].Barhate RS, Ramakrishna S (2007) J Membr Sci 296:1–8. <http://www.britannica.com/facts/5/463522/E.coli> was discussed in *E. coli*: dimensions, as discussed in *Escherichia coli*: diversity of structure of bacteria in Britannica Online Encyclopedia. Accepted 22 Sept 2013
- [90].Kaur S, Barhate R, Sundarajan S, Matruura T, Ramakrishna S (2011) Desalination 279: 201–209.
- [91].Gopal R, Kaur S, Ma Z, Chan C, Ramakrishna S, Matsuura T (2006) J Membr Sci 281:581–586.
- [92].Barhate RS, Loong CK, Ramakrishna S (2006) J Membr Sci 283:209–218.
- [93].Woods J, Pellegrino J, Burch J (2011) J Membr Sci 368:124–133.
- [94].Ke H, Feldman E, Guzman P, Cole J, Wei Q, Chu B, Alkhudhiri A, Alrushed R, Hsiao BS (2016) J Membr Sci 515:86–97.
- [95].Wang X, Fang D, Hsiao BS, Chu B (2014) J Membr Sci 469:188–197.

- [96].Ma HY, Hsiao BS (2018) High-flux thin-film nanocomposite reverse osmosis membrane for desalination. U.S. patent. 2018/0508903.
- [97].Ma Z, Kotaki M, Ramakrishna S (2005) *J Membr Sci* 265:115-123.
- [98].Nataraj SK, Yang KS, Aminabhavi TM (2012) *Prog Polym Sci* 37:487-513.
- [99].Ahmad FE, Lalia BS, Hashaikeh R (2015) *Desalination* 356:15-30.
- [100].Chu B, Hsiao BS, Ma HY (2016) High flux high efficiency nanofiber membranes and methods of production thereof. U.S. Patent 9511329.
- [101].Dong ZQ, Ma XH, Xu ZL, You WT, Li FB (2014) *Desalination* 347:175-183
- [102].Prince JA, Singh G, Rana D, Matsuura T, Anbharasi V, Shanmugasundaram TS (2012) *J Membr Sci* 397:80-86.
- [103].Essalhi M, Khayet M (2013) *J Membr Sci* 433:167-179.
- [104].Yoon K, Hsiao BS, Chu B (2009) *Polymer* 50:2893-2899.
- [105].Tang Z, Qiu C, McCutcheon JR, Yoon K, Ma HY, Fang D, Lee E, Kopp C, Hsiao BS, Chu (2009) *J Polym Sci B Polym Phys* 47:2288-2300.
- [106].Agarwal S, Greiner A, Wendorff JH (2013) *Prog Polym Sci* 38:963-991.

فصل سوم

فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه هوای مقایسه

با فناوری‌های تصفیه هوای موجود

یان وانگ^۱، زو ژاؤ^۲، شیولینگ جیائو^۳ و دیرونگ چن^۴

¹. Yan Wang e-mail: yanwang@rcees.ac.cn

². Xu Zhao e-mail: zhaoxu@rcees.ac.cn

³. Xiuling Jiao e-mail: jiaoxl@sdu.edu.cn

⁴. Dairong Chen e-mail: cdr@sdu.edu.cn

چکیده

ذرات جامد در هوا یک تهدید جدی برای سلامتی بشر است. فناوری‌های تصفیه هوای موجود که عمدتاً شامل فیلتر فیلم متخخلخ و فیلتر الیافی معمول تهیه شده توسط فرایند ذوب ریسی یا اسپان باند می‌باشد، نمی‌توانند به طور همزمان دارای کارایی تصفیه بالا و افت فشار کم نسبت به ذرات ریز باشند. توسعه فیلترهای هوا جدید با عملکرد تصفیه عالی از اهمیت زیادی برخوردار است. غشاها نانولیفی الکتروریسی شده با توجه به ویژگی‌های بسیار جذاب خود، مانند قطر الیاف کم، تخلخل بالا و منابع مواد خام گسترش آن‌ها، توجه زیادی را جلب می‌کند. با توجه به خواص فوق الذکر، فیلترهای الکتروریسی شده با غشاها نانولیفی الکتروریسی شده به عنوان هسته بستر تصفیه به وفور موردمطالعه قرار گرفته است. مقدار زیادی از مواد خام شامل پلیمرها و سرامیک‌ها برای غشاها نانولیفی توسط الکتروریسی تولید می‌شوند و به عنوان فیلترهای هوا استفاده می‌شوند. این فیلترهای الکتروریسی شده ویژگی‌های جذاب مانند عملکرد تصفیه بالا، افت فشار پایین و توانایی جذب خوب در برابر ذرات ریز را نشان می‌دهند. علاوه بر این، فیلترهای الکتروریسی شده در بسیاری از کاربردها مانند تصفیه گردوغبار صنعتی، تصفیه هوای لوكوموتیو و تصفیه هوای داخل ساختمان، توان بالقوه زیادی را نشان می‌دهند. در این فصل، تاریخچه و مکانیسم تصفیه، مواد اصلی و کاربردهای فیلترهای الکتروریسی شده معرفی شده است و مقایسه فیلترهای الکتروریسی شده با فناوری‌های تصفیه هوای موجود، بحث شده است. این فصل ممکن است باعث جرقه‌ای بر توسعه فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف آلودگی ذرات جامد از هوا شود.

۱-۳- مقدمه

آلودگی هوا در نتیجه شهرکسازی سریع و صنعتی شدن، در سال‌های اخیر تهدید بزرگی برای بشر بوده است [۱، ۲]. ذرات جامد^۱ معلق در هوا یکی از مهم‌ترین عوامل در آلودگی هوا است و به نظر می‌رسد با بروز بیماری‌هایی مانند تغییرات مویرگ شبکیه، تصلب شریان^۲، سرطان ریه و بیماری‌های قلبی عروقی همراه است [۳-۶]. تصفیه هوا در حال تبدیل شدن به یک نیاز فوری برای بهبود کیفیت هوا و کاهش بروز بیماری‌های ناشی از ذرات جامد است [۷، ۸].

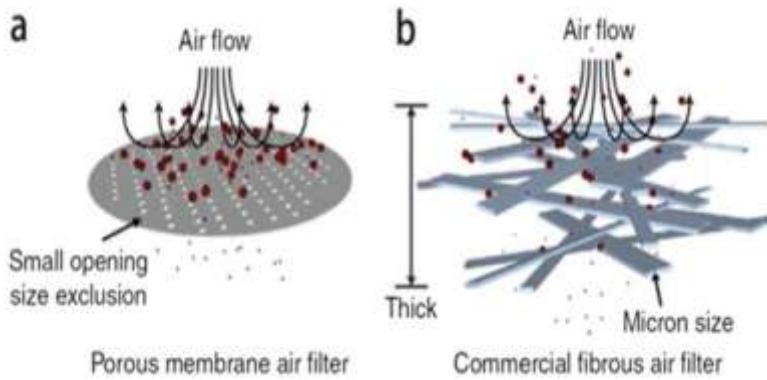
فیلترهای هوا می‌توانند ذرات جامد معلق در هوا را حذف کرده و عملکرد تصفیه‌ی فیلترها با بستر تصفیه هوا ارتباط نزدیکی دارد. در میان فناوری‌های تصفیه هوای موجود، دو نوع بستر تصفیه

¹. Particulate Matter (PM)

². atherosclerosis

هوا وجود دارد که شامل فیلتر فیلم متخلخل^۱ و فیلتر الیافی^۲ است [۹]. همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، فیلتر فیلم متخلخل مشابه فیلتر تصفیه آب است که به‌وسیله‌ی ایجاد منافذ بر روی زمینه جامد ساخته شده است. اندازه منافذ فیلتر فیلم متخلخل معمولاً بسیار کوچک است و تخلخل آن پایین است ($\%30$ <)، ازین‌رو، این نوع فیلتر دارای کارایی تصفیه نسبتاً بالا اما با یک افت فشار بسیار شدید است. شکل ۳-۱b طرح‌واره‌ی فیلتر هوا الیافی را نشان می‌دهد که ذرات جامد را از طریق موانع فیزیکی ضخیم و نیز چسبندگی جذب می‌کند (برهمکنش شیمیایی بین ذرات جامد و الیاف). این نوع فیلتر از الیاف ضخیم متنوع شامل الیاف ذوب شده، الیاف شیشه و الیاف اسپان باند ساخته شده است. قطر الیاف از چند میکرون تا ده‌ها میکرون متغیر است. تخلخل این فیلتر بیش از 70% است که نفوذپذیری نسبتاً بالایی را از فیلترها را به ارمغان می‌آورد؛ با این حال، برخی از معایب فیلتر الیافی، مانند کارایی تصفیه نسبتاً کم است که قادر به گرفتن ذرات ریز با توجه به قطر الیاف در اندازه میکرون نیست [۱۰]. به‌طور کلی، عملکرد تصفیه فیلترهای الیاف را می‌توان با کاهش قطر الیاف بهبود داد [۱۳-۱۶].

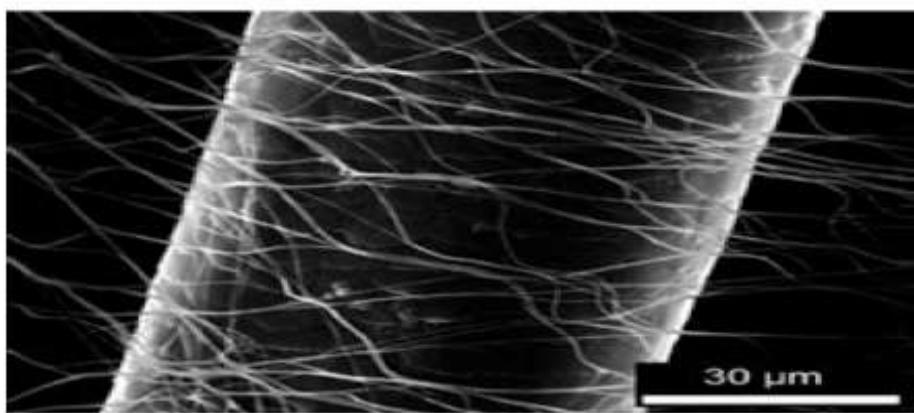
الکتروریسی یک روش ساده و آسان برای تولید نانوالیاف با مقیاس بالا است [۱۷-۱۹]. شکل ۲-۳ موی انسان را که توسط الیاف الکتروریسی شده احاطه شده است نشان می‌دهد که نمایش دهنده قطر کوچک الیاف الکتروریسی شده می‌باشد. شکل ۳-۳ یک تصویر SEM از نانوالیاف الکتروریسی شده سلولز استات بر روی زمینه شبکه‌ای نایلون 140 میکرون را نشان می‌دهد [۱۲].



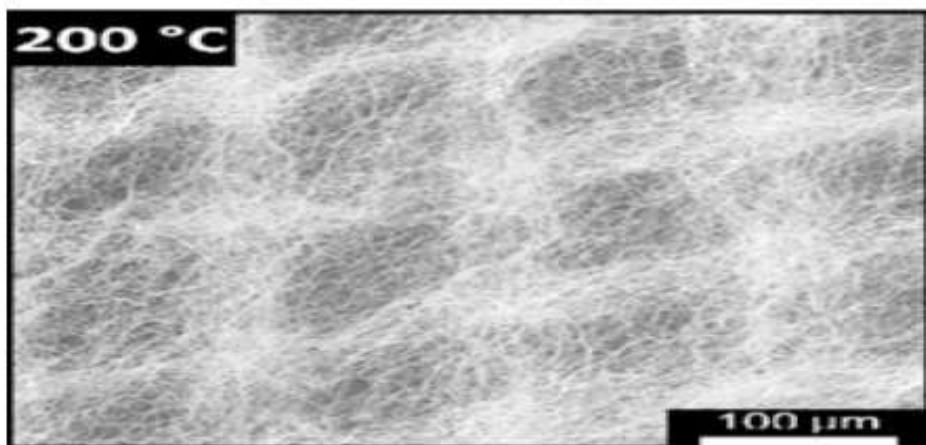
شکل ۱-۳ (a) شماتیکی از فیلتر هوا متخلخل برای جذب ذرات جامد به‌وسیله‌ی حذف اندازه‌ای (b) شماتیکی از فیلتر هوا لیفی بزرگ برای جذب ذرات جامد به‌وسیله‌ی مانع فیزیکی ضخیم و چسبندگی [۱۰].

¹. Porous Film Filter

². Fibrous Filter



شکل ۲-۳- تصویر SEM از یک موی انسان که با نانو الیاف PVA احاطه شده است [۱۱].



شکل ۳-۳- تصویر SEM از نانو الیاف سلولز استات بر روی لایه زمینه شبکه‌ای ۱۴۰ میکرونی نایلون که در دمای ۲۰۰°C خارج شده است [۱۲].

نانو الیاف عملکرد تصفیه را تحت تأثیر قرار می‌دهند در حالی که لایه زمینه، خواص مکانیکی را فراهم می‌کند. قطر الیاف و همچنین اندازه منافذ غشای نانولیفی، بسیار کوچکتر از لایه زمینه است. غشاهای لیفی تولیدشده با روش الکتروریسی دارای نسبت سطح به حجم زیاد، قطر الیاف کم، تخلخل بالا و ساختار منافذ باز به هم پیوسته هستند؛ ازین‌رو، فیلترهای الکتروریسی شده عملکرد تصفیه عالی را نشان می‌دهد [۲۰-۲۴]. در اینجا، ما یک مروری جامع بر روی مکانیسم تصفیه، مواد اصلی و کاربردهای فیلترهای الکتروریسی شده را ارائه می‌دهیم.

۳-۲- تاریخچه و مکانیسم تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده

۳-۱- تاریخچه فیلترهای الکتروریسی شده

امروزه روش الکتروریسی برای تولید فیلترهای نانولیفی مختلف بهوفور مورداستفاده قرار می‌گیرد. الیاف توسط میدان الکتریکی از سال ۱۹۰۲ در ایالات متحده با موفقیت تولید شده است [۲۵]. در سال ۱۹۳۴ فرم هالز، تشکیل جریان جت محلول پلیمری بین الکتروودها را مطالعه کرد و دستگاه الکتروریسی را برای تولید الیافها به طور دقیق توصیف کرد [۲۶]. کاربرد الیاف الکتروریسی شده در حوزه تصفیه اولین بار توسط پتریانوف- سوکولوف^۱ در بخش آئروسل موسسه شیمی‌فیزیک کارپف^۲ گزارش شد.

این مواد به عنوان FP (فیلترهای پتریانوف^۳) در روسیه شناخته می‌شوند و در حال حاضر به عنوان بستر فیلتر نانولیفی نامیده می‌شوند [۲۷]. فعالیت‌های علمی مربوط به تولید FP در آن زمان به عنوان فوق محترمانه در روسیه اعلام شد و FP در فناوری‌های انرژی هسته‌ای برای حفاظت محیط از انتشار آئروسل فعال هسته‌ای پس از جنگ جهانی دوم استفاده شده است [۲۸]. در روسیه، پنج شرکت تولید مواد مرتبط با FP با ظرفیت سالانه ۲۰ میلیون مترمربع تا پایان سال ۱۹۶۰ وجود داشت. در ایالات متحده آمریکا، مواد نانولیفی توجه زیادی را به خود جلب کرده و تولید آن در سال ۱۹۸۰ با تلاش‌های "دونالدسون"^۴ به دست آمد. در اروپا، الیاف فرآوری شده از راه قالب‌گیری برقی^۵ در دهه ۱۹۹۰ توسط "فرودنبرگ"^۶ تولید شدند. پس از سال‌ها تلاش، الیاف تولید شده به عنوان مواد تصفیه هوا در سراسر جهان مورداستفاده قرار گرفته است و بیش از ۲۰ نوع مواد فیلتر لیفی، تولید صنعتی شده‌اند [۲۹].

بسیاری از خواص مرتبط با آن از جمله اثرات سرعت سطحی و دانسیته فشردگی نانولیاف بر عملکرد تصفیه [۳۰]، مدل‌سازی تصفیه [۳۱] و خواص مکانیکی غشاها [۳۲] به طور گستردۀ مورد مطالعه قرار گرفته است. ابزار الکتروریسی نیز به سرعت توسعه پیدا کرده است که از الکتروریسی تک سوزن، الکتروریسی چند جته تا الکتروریسی بدون نازل است. شکل ۳-۴ وسایل الکتروریسی بدون نازل برای تولید صنعتی را نشان می‌دهد [۳۳]. عملکرد عالی تصفیه غشاها لیفی الکتروریسی شده در مقایسه با بستر تصفیه رایج و همچنین توسعه وسایل الکتروریسی، به تولید تجاری و کاربرد الیاف الکتروریسی شده کمک می‌کند.

¹. Petryanov-Sokolov

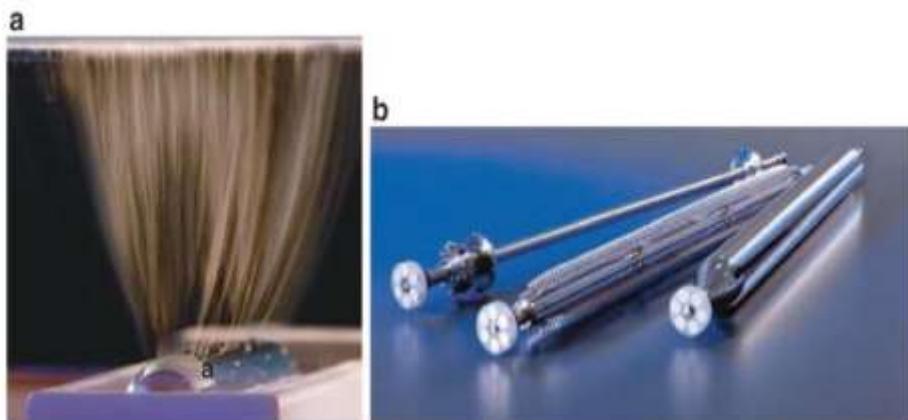
². Karpov

³. Filters of Petryanov

⁴. Donaldson

⁵. Electroforming fibers

⁶. Freudenberg



شکل ۴-۳- فرایند الکتروریسی بدون نازل (الف) با الکترودهای چرخشی، (ب) با الکترودهای ریسندرگی مختلف

۳-۲-۲- مکانیسم تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده

مطالعه مکانیسم تصفیه از سال ۱۸۲۷ توسط رابت براون^۱ آغاز شده است که یک گیاهشناس در اسکاتلندر است. او کشف کرد که گردها و دیگر ذرات ریز معلق در آب، حرکت منحنی نامنظم که حرکت براونی نامیده شد، دارند [۳۴]. در سال ۱۹۳۱، آلبرشت^۲ از مکانیک سیال برای مطالعه قانون حرکت جریان هوا که از یک تک لیف استوانه‌ای عبور می‌کند استفاده کرد و نظریه آلبرشت را بنا نهاد و سپس توسط شل^۳ به طور قابل توجهی بهبود یافت [۳۵]. بهزودی پس از آن، حرکت براونی و تهنشینی اینرسی در مکانیسم تصفیه الیاف ترکیب شد و رابطه ریاضی توسط کافمن^۴ استنتاج شد [۳۶، ۳۷].

در عین حال، لانگمیور^۵ مکانیسم تصفیه را بیشتر مطالعه کرد و رهگیری و انتشار را به عنوان اثرات اصلی تصفیه در نظر گرفت [۳۸]. حائل شدن، انتشار و تهنشینی اینرسی ترکیب شدند و نظریه الیاف مجزا شده توسط دیویس^۶ در سال ۱۹۵۲ بنا نهاده شد [۳۹]. پس از آن، دانشمندان مطالعه مکانیسم تصفیه را مشتقانه ادامه دادند. بعضی از نظریه‌های جدید پیشنهاد شده‌اند که نظریه‌های موجود را بهینه‌سازی کرده‌اند و مدل‌سازی برای کارایی تصفیه و افت فشار را بنا نهاده‌اند [۴۰، ۴۶].

¹. Robert Brown

². Albrecht

³. Shell

⁴. Kaufmann

⁵. Langmuir

⁶. Davies

امروزه مکانیسم تصفیه به خوبی شناخته شده است و مکانیسم برای تصفیه و جداسازی ذرات به عنوان اثرات جامع از برخورد ضربه‌ای، رهگیری، انتشار و جذب الکترواستاتیک در نظر گرفته شده است [۴۷]. شکل ۳-۵ یک تصویر کلاسیک از مکانیسم را نشان می‌دهد. وقتی که اینرسی ذره به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند از خطوط جریان دور شود و الیاف را تحت تأثیر قرار دهد، تصفیه از نوع برخورد ضربه‌ای رخ می‌دهد. هنگامی که اینرسی به اندازه کافی زیاد نباشد تا از خط جریان دور شود اما ذره به اندازه کافی نزدیک به الیاف قرار گیرد، سپس نیروهای چسبندگی ذره را به الیاف متصل می‌کنند که جداسازی نامیده می‌شود. اثر انتشار بر اساس حرکت تصادفی و احتمالی براونی ذرات با قطر کوچکتر از $0.5\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر است که موجب می‌شود ذره از خط جریان حرکت کند و احتمالاً جذب سطح الیاف می‌شود. جذب الکترواستاتیک همچنین می‌تواند ذره را از جریان مستقیم منحرف کند و به علت اثر الکترواستاتیک بین ذره و الیاف، توسط الیاف جذب شود.

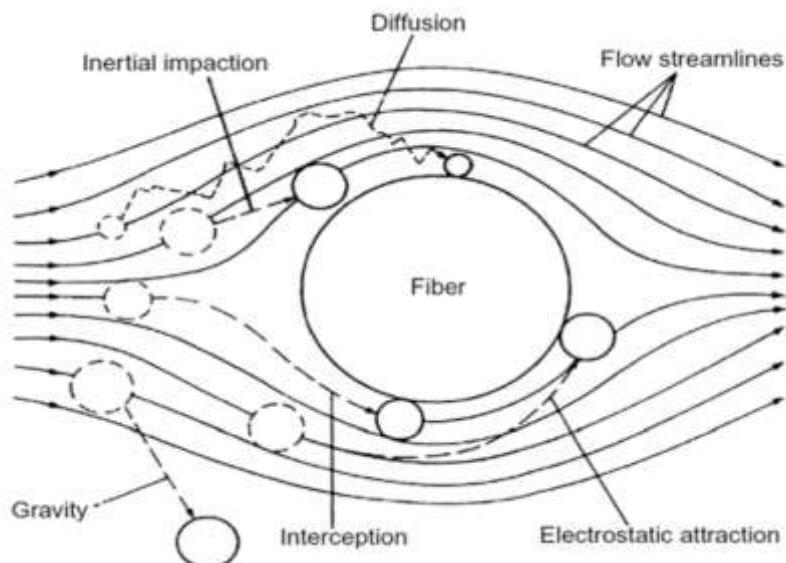
عوامل اصلی برای ارزیابی عملکرد تصفیه عبارت‌اند از: کارایی تصفیه و افت فشار. کارایی تصفیه، درصد آلودگی حذف شده توسط فیلترها است و افت فشار، اختلاف فشار بین جریان بالا و جریان پایین بستر فیلتر است [۴۷]. بر اساس کارایی تصفیه و افت فشار، شاخص کیفیت (QF)، یک عامل جامع برای مقایسه عملکرد تصفیه فیلترهای مختلف است که به صورت زیر تعریف شده است [۴۸]:

$$QF = [-\ln(1 - \eta)]/\Delta p$$

که η و Δp ه ترتیب، کارایی تصفیه و افت فشار را نشان می‌دهند. یک فیلتر بهتر، آن است که دارای کارایی تصفیه بالاتر و یا افت فشار کمتر باشد، ه مطابق با یک مقدار QF بالاتر است [۱۴، ۴۹].

فیلتر الکتروریسی شده عملکرد تصفیه عالی را نسبت به ذرات ریز با توجه به قطر کوچک الیاف، مساحت سطحی بالا، تخلخل بالا، ساختارهای منافذ باز بهم پیوسته و نفوذپذیری بالای آن‌ها را نشان می‌دهد [۱۳، ۲۰، ۲۴، ۵۰]. به طور خاص، فیلترهای الکتروریسی شده می‌توانند کارایی تصفیه بالا را افت فشار نسبتاً کم به دست آورند.

در مقایسه با فناوری‌های تصفیه موجود، الیاف تشکیل‌دهنده فیلترهای الکتروریسی شده، قطرهای خیلی کمتر از $500\text{ }\text{nm}$ دارند. تحت افت فشار مشابه، فرکانس انتشار، جداسازی و برخورد ضربه‌ای همگی وقتی که خطوط جریان هوا حول الیاف با قطر کوچکتر است بهبودیافته است. از این‌رو، غشاهای با قطر الیاف کوچک‌تر دارای توانایی بالایی برای جذب ذرات ریز هستند [۵۱].



شکل ۳-۵- مکانیسم‌های جذب ذره - جریان عبوری از تک الیاف (جریان عمود بر محور الیاف) [۴۷]

۳-۳- مواد برای فیلترهای الکتروریسی شده

۳-۳-۱- پلیمرها

پلیمرهای خطی با توجه به خواص رئولوژیکی مناسب آن‌ها در روش الکتروریسی ترجیح داده می‌شوند [۵۲]. غشاهای پلیمری الکتروریسی شده بهشت به عنوان بستر تصفیه برای فیلترهای کابین خودرو، فیلترهای ساختمانی و تنفس شخصی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و برای مدت زمان طولانی در دمای کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۳]. در سال‌های گذشته تعداد زیادی از غشاها لیفی توسط الکتروریسی تولید شدند که به عنوان تصفیه گاز به کار می‌روند.

این غشاها لیفی شامل انواع متنوعی از مواد مانند نایلون ۶ [۲۱، ۱۴]، الیاف الاستومری [۱۳]، پلی اکریلونیتریل (PAN) [۲۳، ۵۴]، پلی‌اتیلن اکسید (PEO) [۳۰]، پلی یورتان [۳۱]، پلی وینیل کلرید / پلی یورتان [۳۲] و نایلون ۶۶ [۵۵] می‌باشد. جدول ۱-۳ فهرستی از ساختارهای پلیمرهای رایج استفاده شده برای مواد فیلتر الکتروریسی شده را ارائه می‌دهد.

جدول ۳-۱- فهرستی از پلیمرها برای فیلترهای الکتروریسی شده

نام اختصاری / نام تجاری پلیمر (نام شیمیایی)	نماد ساختمار
Polyamide (Poly(hexa-methyleneadipamide))	Nylon 6,6/PA-66
Polyamide (Polycaprolactam)	Nylon 6/PA-6
Polyvinylidene difluoride	PVDF
Polyacrylonitrile	PAN
Polyurethane	Spandex
Polyethyleneoxide	PEO
Polylactic acid (Polylactide)	PLA
Polyvinyl chloride	PVC
Polyimide	P84

نایلون نام عمومی برای پلی آمید است. دو شکل عمدۀ تجاری از نایلون وجود دارد: نایلون ۶ و نایلون ۶. نایلون ۶،۶ توسط پلیمریزاسیون هگزا متیلن دی آمین^۱ و آدیپویل کلراید^۲ تولید می‌شود، در حالی که نایلون ۶ توسط پلیمریزاسیون کاپرولاکتم^۳ تولید می‌شود و دارای خواص مشابهی می‌باشد به جز آن که نقطه ذوب نایلون ۶،۶ بالاتر از نایلون ۶ است. هر دو الیاف نایلون ۶ و نایلون ۶ دارای انعطاف‌پذیری بالا، جهندگی خوب، فرایند پذیری آسان و استحکام کششی قوی می‌باشند [۴۷، ۵۶]. لی^۴ و همکاران غشای لیفی نایلون ۶ با قطر الیاف ۲۰۰-۸۰ نانومتر را با استفاده از روش الکتروریسی تولید کردند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کارایی تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده نایلون ۶ برتر از فیلتر تجاری ذرات هوا با کارایی بالا^۵ (HEPA) در سرعت سطحی بین ۳ تا ۱۰ cm/s است. حداقل کارایی حذف فیلترهای راندمان PA-66 برای ذرات ریز با قطر ۰/۳ میکرون٪ ۹۹/۹۷ است و کارایی تصفیه نایلون ۶ الکتروریسی شده٪ ۹۹/۹۹۳ است [۲۱]. دینگ^۶ و همکاران یک غشای لیفی PA-66 جدید شامل ساختار کامپوزیتی دوجداره برای تصفیه هوا تولید کردند. همان‌طور که در شکل ۷-۳ نشان داده شده است، فیلتر از پلی‌پروپیلن بی بافت متداول و نانو شبکه‌های دوبعدی شبیه تارعنکبوت PA-66 که برخی از ویژگی‌های جذاب مانند کارایی تصفیه بالا (تا ۹۹٪) و افت فشار کم برخوردار است که برای کاربردهای عملی آن‌ها مطلوب می‌باشد [۵۵].

^۱. hexamethylene diamine

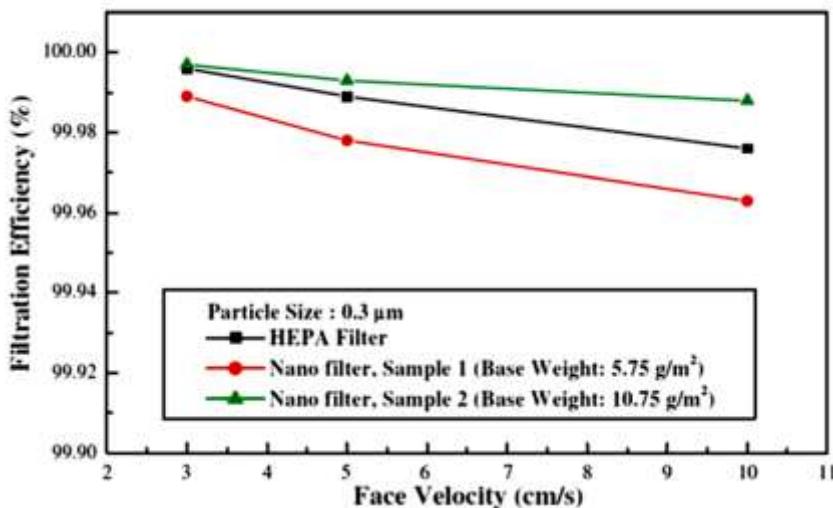
^۲. adipoyl chloride

^۳. Caprolactam

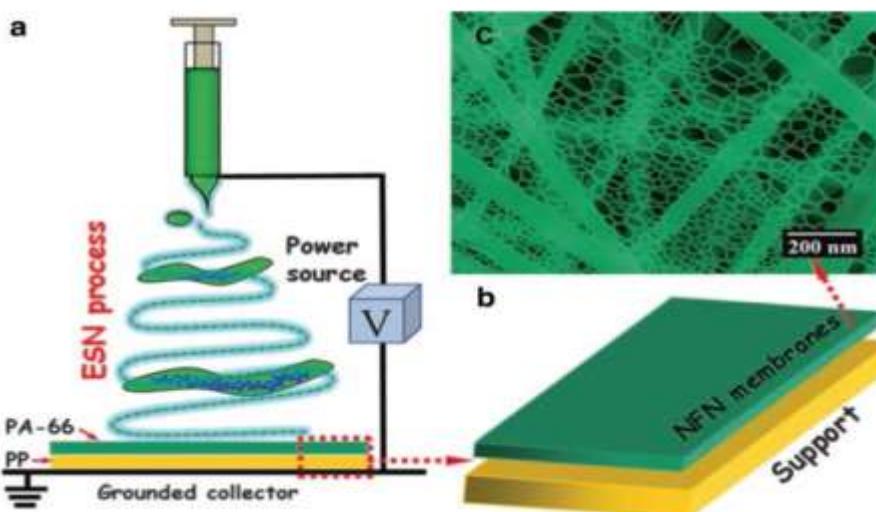
^۴. Lee

^۵. High-efficiency particulate air

^۶. Ding

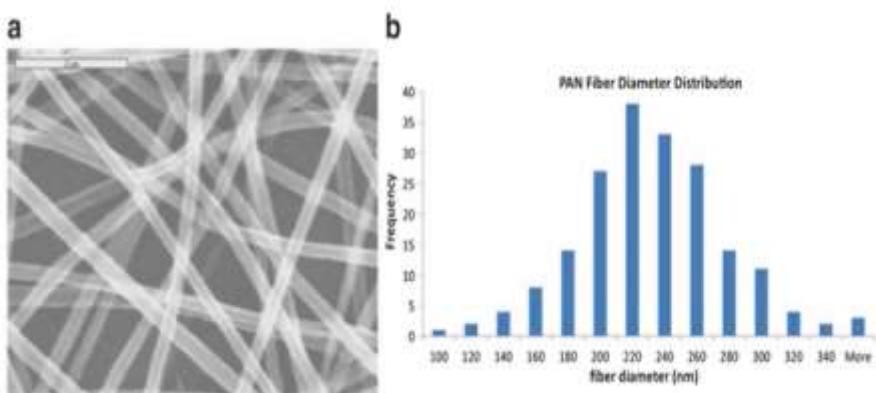


شکل ۳-۶- کارایی تصفیه فیلتر HEPA و نانو فیلترهای نایلون ۶ به عنوان تابع سرعت سطحی [۲۱].



شکل ۳-۷- (a) نمودار شماتیک از تولید غشاها NFN نایلون ۶، بر روی داربست بی بافت PP. (b) تصویری از مفهوم یک غشای تصفیه بسیار کارآمد بر اساس غشاها NFN. (c) نمونه تصویر FE-SEM از غشاها NFN [۵۵].

PAN یک پلیمر آب‌گریز است و در تعداد زیادی از حلول نامحلول است. یک ماده متنوع است و به طور گستردگی به عنوان غشاهای تجاری مورد استفاده قرار گرفته است [۵۷]. شکل ۸-۳ یک تصویر SEM از الیاف الکتروریسی شده PAN را نشان می‌دهد که قطر الیاف حدوداً ۲۲۰ نانومتر است [۵۴]. اکایاما^۱ و همکاران الیاف PAN با قطر در محدوده ۲۷۰-۴۰۰ نانومتر را با استفاده از الکتروریسی تولید کردند و الیاف PAN به عنوان بستر فیلتر با استفاده از نانوذرات مونو دیسپرس NaCl با قطر کمتر از ۸۰ نانومتر ارزیابی شدند. مشخص شد که فیلترهای الکتروریسی شده PAN جرم فیلتر کمتری را نیاز دارند و دارای کارایی تصفیه مشابهی نسبت به فیلترهای تجاری هستند [۲۳]. وو^۲ و همکاران زمینه‌های چندلایه نازک نanolيفی PAN را تهیه کردند و یافتند که عملکرد تصفیه نسبت به فیلترهای HEPA به طور قابل توجهی بهبود یافته است [۵۴]. الیاف پلی ایمید دارای مقاومت حرارت منحصر به فرد و خواص مقاوم در برابر اشتعال است. آن‌ها می‌توانند به طور مداوم در دمای تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شوند. از این‌رو، الیاف پلی ایمید به خوبی برای کاربردهای بخار و هوای با دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۹-۳ نشان داده شده است، کوی^۳ و همکاران یک فیلتر هوای نanolيفی پلی ایمید با کارایی بالا را با استفاده از روش الکتروریسی توسعه دادند. فیلتر پلی ایمید الکتروریسی شده می‌تواند برای جذب ذرات جامد زیر ۲/۵ میکرون در دماهای بالا (تا دمای $^{\circ}\text{C}$ ۳۷۰) با زمان کاری بیش از ۱۲۰ ساعت استفاده شود.



شکل ۸-۳ (a) تصویر SEM از نانو الیاف PAN و (b) توزیع قطر الیاف الکتروریسی شده PAN [۵۴].

^۱. Okuyama

^۲. Wu

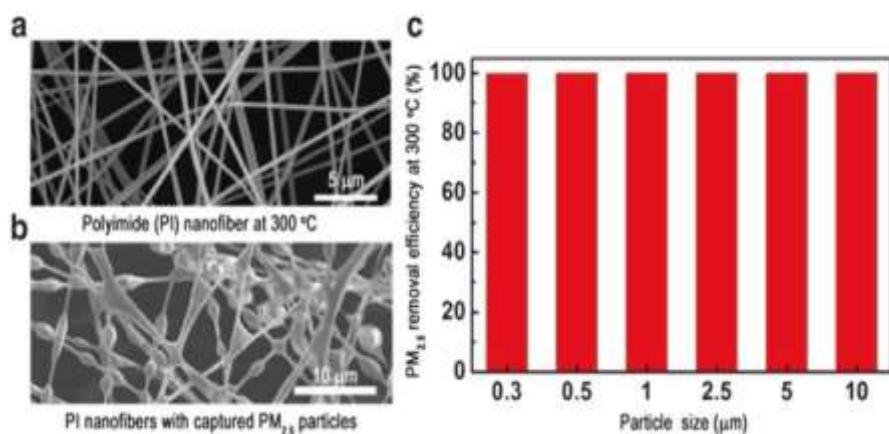
^۳. Cui

کارایی حذف ذرات PM از اگروز خودرو در دمای بالا بیش از ۹۹/۵٪ است [۵۸]. پلی لاکتیک اسید زیست تخریب پذیر است و از منابع تجدید پذیر مانند نشاسته ذرت حاصل می‌شود؛ بنابراین، آن را به عنوان مواد پایدار در نظر می‌گیرند. از این‌رو، پلی لاکتیک اسید توجه زیادی را جلب کرده است و به عنوان یک جایگزین برای پلی‌استر و پلی‌پروپیلن در نظر گرفته می‌شود. وانگ و همکاران غشاها لیفی TiO_2 /پلی لاکتیک اسید را با استفاده از روش الکتروریسی آماده کردند و غشاها عملکرد تصفیه‌ی هوا عالی و فعالیت ضد میکروبی خوبی را نشان دادند. کارایی تصفیه غشا ۹۹/۹۹۶٪ با افت فشار نسبتی کم (۱۲۸/۷ Pa) و فعالیت ضد باکتریایی ۹۹/۵٪ است [۵۹]. این عملکرد خوب غشاها پلی لاکتیک اسید پتانسیل عالی آن‌ها را به عنوان فیلترهای چندمنظوره در حوزه تصفیه نشان می‌دهد.

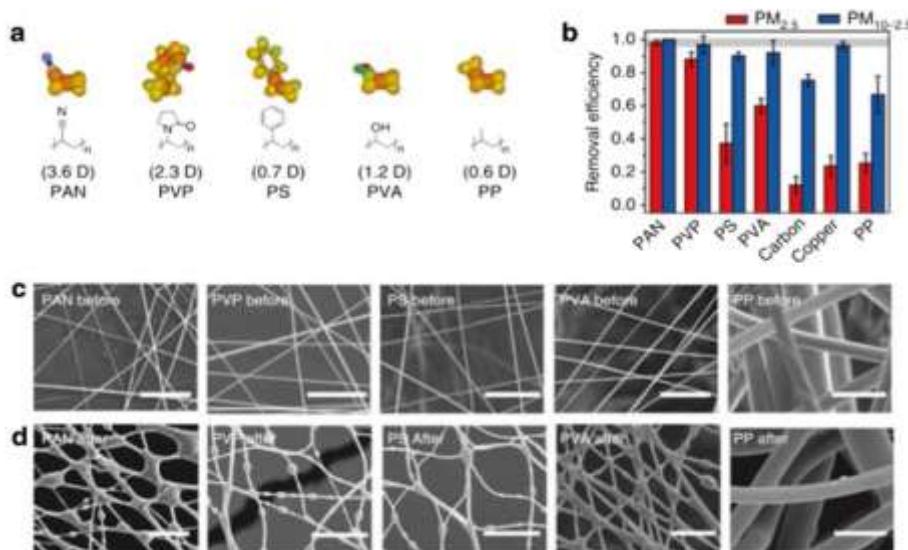
علاوه بر پلیمرهایی که در بالا توضیح داده شد، بسیاری از پلیمرهای دیگر مانند پلی وینیل پروپیلن (PVP)، پلی استایرن (PS)، پلی وینیل الكل (PVA)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی فیلیپ ایزووفتalamید (PMIA) و پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) به عنوان فیلترهای الکتروریسی شده مطالعه شده است [۶۰].

اخیراً دینگ^۱ و همکاران یک فیلتر هوای جدید شبکه‌های (PMIA NF/N)/نانو الیاف پلی فنیلن ایزووفتalamید را با استفاده از روش شبکه‌ای/الکتروریسی با تنظیم دقیق ترکیب محلول، رطوبت و افزودنی‌ها تولید کردند [۶۱]. فیلتر الکتروریسی شده PMIA از یک داربست نانو لیفی و برخی از نانو شبکه‌های دوبعدی فراوان (حدود ۲۰ نانومتر) تشکیل شده است و دارای کارایی تصفیه بالا (۹۹٪/۹۹۹٪) و افت فشار کم (۹۲ Pa) برای ذرات ۳۰۰-۵۰۰ نانومتر است. شکل ۱۰-۳ عملکرد جذب ۲/۵ PM را با فیلترهای هوای شفاف الکتروریسی شده با پلیمرهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰-۳ نشان داده است، فیلترهای PAN دارای بهترین عملکرد تصفیه در میان این پلیمرها هستند. کارایی تصفیه فیلتر PAN شفاف برای ۲/۵ PM ۱۰۰٪ می‌تواند در ۹۵٪ برای ۱۰۰ ساعت حفظ شود [۱۰]. این فیلترهای پلیمری الکتروریسی شده عملکرد تصفیه عالی را نشان می‌دهند و می‌توانند برای بهبود هوای محیط زندگی ما مورد استفاده قرار گیرند.

^۱. Ding



شکل ۳-۹- تصاویر SEM از (الف) نانو الیاف الکتروریسی شده پلی ایمید در ۳۰۰ °C (ب) با ذرات ۲/۵ PM جذب شده (ج) کارایی حذف ۲/۵ PM در ۳۰۰ °C [۵۸].

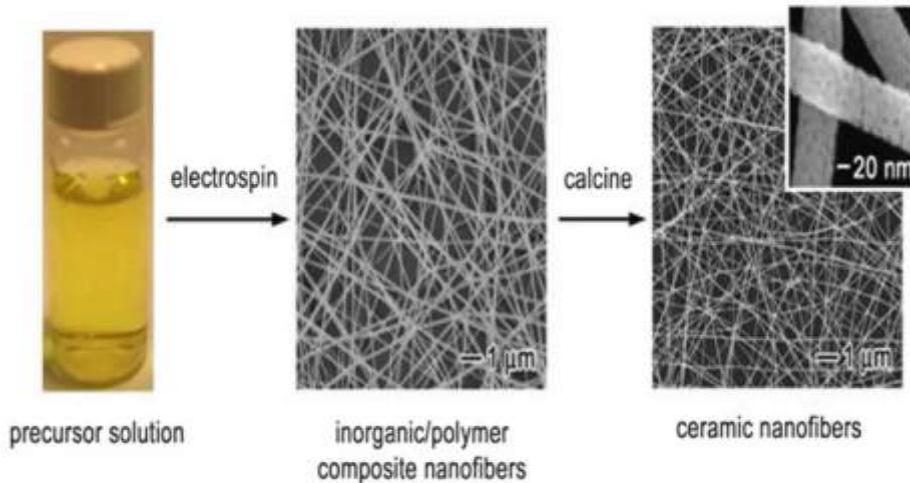


شکل ۴-۳- عملکرد جذب شده توسط فیلترهای هوا شفاف با سطوح مختلف. (a) مدل مولکولی و فرمول پلیمرهای مختلف از جمله PAN, PVP, PS, PVA, PP با احتساب ممان دوقطبی از واحدهای تکراری هر پلیمر. (b) مقایسه کارایی حذف بین PAN, PVP, PS, PVA, PP, PVA, PS, PVP, PAN, PVP فیلترهای شفاف کربن و مس با قطر الیاف یکسان ۲۰۰ نانومتر و انتقال یکسان ۷۰٪. نوار خط‌نشان دهنده انحراف استاندارد سه اندازه‌گیری تکراری است. (c) تصاویر SEM از فیلترهای شفاف PAN, PVP, PS, PVA, PP قبل از تصفیه. (d) تصاویر SEM از فیلترهای شفاف PAN, PVP, PS, PVA, PP پس از تصفیه نشان دهنده اتصال PM_{2.5} در (c) و (d) [۱۰].

۳-۲-۳- سرامیک‌ها

در شرایط صنعتی، گازهای خروجی از فعالیتهایی مانند فرآوری فلزات و تولید نیروی برق در دماهای بالا و حاوی ذرات مضر هستند که به طور قابل توجهی سبب آلودگی هوا می‌شوند. بنابراین، ارزشمند است مواد تصفیه‌کننده با درجه حرارت بالا، با دقت بیشتری بررسی شوند.

غشاها لیفی سرامیکی دارای پایداری شیمیایی و حرارتی بالا هستند و می‌توانند در شرایط سخت استفاده شوند. شکل ۳-۱۱ یک روش معمول آماده‌سازی نانوالیاف سرامیکی برای الکتروریسی را نشان می‌دهد. روش آماده‌سازی شامل سه مرحله اصلی می‌باشد [۵۲]: ۱) آماده‌سازی پیش ماده که معمولاً حاوی نمک معدنی یا آلکوکسید به عنوان مواد اولیه و پلیمرها به عنوان افزودنی برای افزایش قابلیت رسنندگی است. ۲) الکتروریسی برای به دست آوردن غشاها لیفی زیروژل که در آن پیش ماده معمولاً با عوامل مناسب در دمای اتانک الکتروریسی می‌شود. ۳) غشاها لیفی زیروژل مشکل از مواد معدنی و مواد افزودنی پلیمری است؛ و (۳) تبدیل از الیاف زیروژل به الیاف سرامیکی که در آن غشاها لیفی زیروژل معمولاً در دماهای بالا برای حذف مواد افزودنی پلیمری کلسینه می‌شود و گاهی اوقات غشای معدنی آمورف در طی کلسینه شدن به غشای سرامیکی متبلور منتقل خواهد شد.



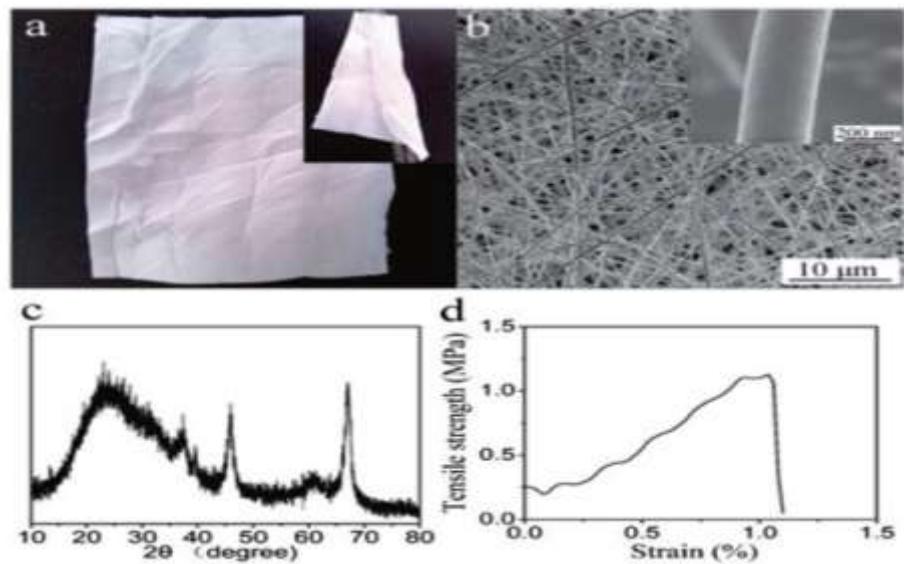
شکل ۳-۱۱-۳- تصویر شماتیک از یک روش معمول برای نانو الیاف سرامیکی به وسیله‌ی الکتروریسی، مثال نانوالیاف TiO_2 است [۵۲].

به طور کلی، غشاها لیفی معدنی شکننده هستند و نمی‌توانند به عنوان فیلتر هوای خود ایستاده استفاده شوند. به این دلیل است که در طی فرایند کلسینه کردن، حلال، مواد افزودنی‌های آلی و آنیون‌های معدنی در الیاف زیروژل حذف می‌شوند و در اغلب موارد نیز تبلور و رشد دانه نیز رخ می‌دهد. این فرایندها معمولاً منجر به تولید منافذ در الیاف می‌شود و درنتیجه خواص مکانیکی الیاف را کاهش می‌دهد. از این‌رو، غشاها سرامیکی معمولاً شکننده هستند.

تاکنون، گزارش‌های مربوط به الکتروریسی غشاها سرامیکی به عنوان فیلترها بسیار محدود است. فقط چند نوع از غشاها سرامیکی انعطاف‌پذیر، مانند غشاها نanolیفی Al_2O_3 , SiO_2 و CeO_2 - TiO_2 تولید شده و به عنوان فیلترهای هوا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است، غشاها لیفی خود ایستاده Al_2O_3 - γ با استفاده از روش الکتروریسی با موفقیت تولید شده‌اند. غشاها Al_2O_3 - γ دارای انعطاف‌پذیری خوب، استحکام کششی بالا ($2/98 \text{ MPa}$) و پایداری حرارتی خوب (تا 900 درجه سانتی‌گراد) دارند. کارایی تصفیه آن‌ها نسبت به ذرات ریز دیوکتیل فتالات^۱ $99/848\%$ 300 nm با افت فشار $239/12 \text{ Pa}$ است که می‌تواند استانداردهای فیلتر HEPA را تأمین کند [۶۲]. چن^۲ و همکاران با استفاده از الکتروریسی، غشاها لیفی $\text{Pd} / \text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ را تولید کردند. افزودن CeO_2 می‌تواند مرزهای دانه را افزایش داده و اندازه ذرات را در لیف کاهش دهد؛ بنابراین، مقاومت مکانیکی تا $1/28 \text{ MPa}$ افزایش می‌یابد. Pd بارگذاری شده در الیاف می‌تواند غشاها را قادر به اکسیداسیون خوب CO کند. غشاها می‌توانند در دمای 400°C به مدت 20 ساعت حفظ شوند که کارایی تصفیه $99/86\%$ و افت فشار آن 178 Pa می‌باشد [۶۳]. غشاها نanolیفی SiO_2 نیز به عنوان فیلترهای هوا تولید شده‌اند [۶۴].

^۱. Dioctyl phthalate

^۲. Chen



شکل ۱۲-۳ - (a) تصاویر نوری، (b) تصاویر SEM، (c) الگوهای XRD و (d) منحنی های تنش- کرنش غشاهای به دست آمده در 900°C و کلسینه کردن بیشتر در دمای 900°C به مدت ۲۴ ساعت [۶۲].

غشاهای SiO_2 دارای انعطاف پذیری بالا ($156\text{ gf cm}/5/5\text{ MPa}$)، استحکام کششی خوب و پایداری حرارتی خوب (1000°C) و عملکرد عالی تصفیه نسبت به آثروسل های 500 nm - 300 nm سدیم کلرید می باشد. این نتایج نشان می دهد که غشاهای سرامیکی خود پایدار را می توان با انتخاب پیش ماده مناسب، تنظیم عوامل الکتروریسی و کنترل دقیق روش کلسینه کردن به دست آورد. غشاهای سرامیکی پتانسیل گسترهای برای کاربردهای تصفیه هوا در دمای بالا دارد.

۴-۳- کاربردهای فیلترهای الکتروریسی شده

۴-۳-۱- تصفیه گردوغبار صنعتی

گردوغبار صنعتی به طور معمول با تولید صنعتی، مانند خرد شدن هسته، غربال کردن و پیمانه بندی کردن مواد پودری، فرایند پذیر کردن مواد اولیه سیمان و سرامیک، به وجود می آید. گردوغبار صنعتی به طور جدی بر سلامت انسان تأثیر می گذارد که ممکن است باعث بیماری های ریوی مانند سرطان ریه شود؛ بنابراین، فیلترهای هوا برای کاهش میزان گردوغبار در محیط تولید صنعتی ضروری است تا به تأثیر مضر آن ها بر انسان حداقل شود.

در بستر تصفیه هوا معمولی، گردوغبارهای صنعتی به آسانی بستر تصفیه را مسدود می کنند و بستر مسدود شده به سختی تمیز می شود؛ درنتیجه، افت فشار به طور جدی افزایش می یابد و جریان

هوا به مقدار محدودی از سیستم تصفیه، کاهش می‌یابد؛ ازین‌رو طول عمر بستر تصفیه به‌شدت کاهش می‌یابد. برای فیلترهای هوا الکتروریسی شده، هسته‌ی بستر تصفیه، غشاها نانولیفی الکتروریسی شده هستند که دارای توانایی جمع‌آوری زیاد گردوغبار هستند و گردوغبارهایی که روی سطح غشا جمع‌آوری می‌شوند، به‌آسانی تمیز می‌شوند. افت فشار می‌تواند به حالت اولیه بازگردد و ازین‌رو طول عمر بستر تصفیه الکتروریسی شده بیشتر از بستر تصفیه معمول است.

غشاها نانولیفی الکتروریسی شده در حال حاضر با موقیت در سیستم تصفیه صنعتی گردوغبار مورداستفاده قرار گرفته‌اند. مواد تصفیه نانولیفی، بافت فوق العاده^۱ نامیده شدنده که توسط شرکت دونالدسون در ایالات متحده آمریکا از طریق الکتروریسی تولید شده [۶۵]. بافت فوق العاده در یک استوانه مخصوص از سیستم تصفیه گردوغبار استفاده می‌شود که نشان می‌دهد کارایی تصفیه برای گردوغبار صنعتی $0.5 \mu\text{m}$ تا 99.99% است. این استوانه ویژه بافت فوق العاده دارای کارایی تصفیه بالا، افت فشار پایین و طول عمر طولانی است. به تازگی یک فیلتر هوای شبکه‌ای / نانولیفی نایلون^۲ شبیه به موج با اندازه منفذ بسیار کوچک، ساختار خیلی متخلخل و سطح فوق العاده از جلو منبسط شده ساخته شده است و از طریق روش الکتروریسی تولید شده است [۶۶]. این فیلتر هوا NF/N PA-6 عملکرد تصفیه خوبی را نسبت به ذرات خیلی ریز نشان می‌دهد که کارایی حذف آن 99.99% ، مقاومت هوای 95 Pa^1 و ضریب کیفیت آن بالاتر از 11 Pa^1 است. عملکرد عالی تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده باعث می‌شود آن‌ها به‌طور گسترشده در کاربردهای تصفیه گردوغبار صنعتی استفاده شود.

۳-۴-۲- تصفیه هوا لوکوموتیو

تصفیه هوای لوکوموتیو برای تضمین کیفیت هوای موتور و کابین لازم است. برای سیستم ورودی موتور، باید از ورود گردوغبار و سایر ذرات مضر توسط فیلتر هوا جلوگیری شود؛ از سوی دیگر، هوا در کابین لوکوموتیوها مانند ماشین، هواپیما و همچنین قطار برای به دست آوردن یک محیط هوا با کیفیت بالا، نیاز به تصفیه دارد.

مواد هسته فیلتراسیون معمول برای موتور در فیلترهای هوا، کاغذ فیلتر میکرو متخلخل است که از رزین مشتق شده است. این کاغذ فیلتر میکرو متخلخل به‌آسانی مسدود شده و اغلب نیاز به نگهداری و جایگزینی زیاد دارد. به‌خصوص، تسلیحات سنگین مانند تانک، معمولاً در محیط‌های سخت کار می‌کنند. تانک زمانی که گردوغبار در هوا زیاد است به‌آسانی از بین می‌رود و آسیب

^۱. Ultra-Web

^۲. PA-6 NF/N

می‌بیند [۶۷]. غشاهای نانولیفی الکتروریسی شده دارای کارایی تصفیه بالا و افت فشار کم هستند و از این‌رو پتانسیل بزرگی در سیستم تصفیه هوا وارد موتور دارند.

عملکرد تصفیه بافت فوق‌العاده الکتروریسی شده در برابری چرخ G ۹۹۲ تراکتور زنجیری توسط گراف^۱ و همکاران موردمطالعه قرار گرفت [۶۸]. برای فیلتر استاندارد سلوزل، میزان گردوغبار کاهش یافته ذرات زیر میکرون و ذرات قابل تنفس (> 1 میکرون) به ترتیب ۶۸٪ و ۸۶٪ است، در حالی که برای فیلتر کامپوزیتی نانو الیاف / سلوزل (بافت فوق‌العاده)، کاهش گردوغبار ذرات زیر میکرون و ذرات قابل تنفس (> 1 میکرون) به ترتیب ۹۲٪ و ۹۳٪ هستند. مشاهده می‌شود که در مقایسه با فیلتر استاندارد سلوزل، کارایی تصفیه ذرات زیر میکرون و ذرات قابل تنفس برای فیلتر بافت فوق‌العاده به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. عملکرد تصفیه بالا نشان می‌دهد غشاها نانولیفی الکتروریسی شده گزینه خوبی به عنوان فیلترهای هوا موتور هستند.

غشاها نانولیفی الکتروریسی شده در حال حاضر با موفقیت به عنوان فیلترهای هوای موتور استفاده شده‌اند. محصولات فیلتر هوا بر اساس غشاها الکتروریسی شده فوق‌العاده نازک توسط شرکت دونالدسون توسعه یافته است. این فیلتر هوای موتور الکتروریسی شده دارای عملکرد تصفیه خوب و عمر طولانی است؛ علاوه بر این، برای فضاها تأسیسات تنگ و فشرده مناسب است و می‌تواند به خوبی از موتور محافظت کند. غشاها الکتروریسی شده همچنین با موفقیت در عنصر اصلی تصفیه مخزن M1 Abrams^۲ برای محافظت از کار آن‌ها در شرایط سخت استفاده شده است. فیلترهای هوای موتور الکتروریسی شده می‌تواند کیفیت هوا را با یک نرخ جریان هوا ایده آل بهبود بخشد و حفاظت خوبی برای موتور ارائه دهد.

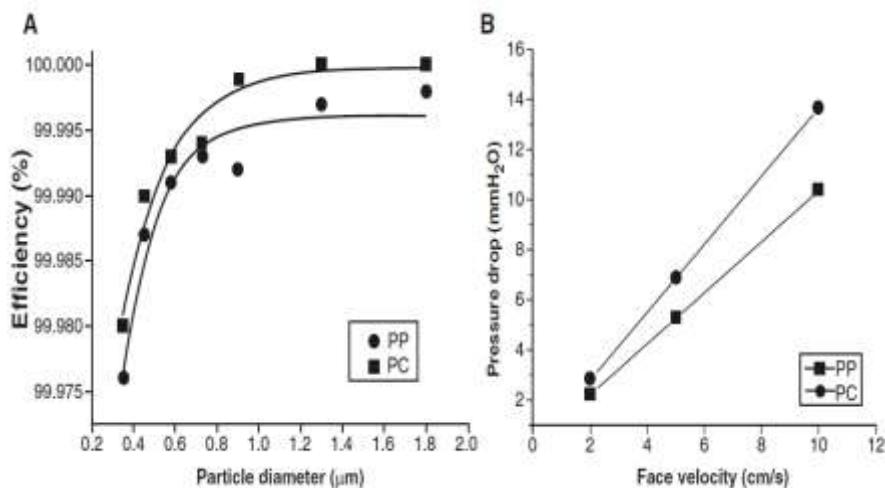
فیلتر هوا کابین برای بهبود کیفیت هوا در کابین وسایل نقلیه مانند اتومبیل، قطار و هواپیما طراحی شده است. برای فیلترهای هوای کابین موجود، با ذراتی که در بستر فیلتر در طی فرایند تصفیه قرار می‌گیرند، کارایی تصفیه بهبود می‌یابد، در حالی که افت فشار به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و از این‌رو جریان هوا نمی‌تواند نیازمندی وسایل نقلیه را برآورده کند؛ بنابراین، افزایش سریع افت فشار بر عملکرد تصفیه و طول عمر فیلترها تأثیر می‌گذارد. برای حل مشکلات فوق، غشاها الکتروریسی شده مطالعه شدند تا به عنوان فیلترهای هوای کابین مورداستفاده قرار گیرند. یک غشای لیفی پلی کربنات (PC) الکتروریسی شده تولید شده است و به عنوان فیلتر هوا مورداستفاده قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است [۶۸]، از یکسو کارایی تصفیه غشای الکتروریسی شده PC برای ذرات ۳۰۰ نانومتر بالاتر از ۹۹/۹۸٪ است، بالاتر از غشا پلی پروپیلن

¹. Gраф

². M1 Abrams

(PP) در فیلتر HEPA موجود، از سوی دیگر، افت فشار فیلترهای الکتروریسی شده PC تحت سرعت سطحی مختلف کمی بالاتر از فیلتر PP HEPA هستند، اما آن‌ها هنوز در محدوده معیار طبیعی از بستر فیلتر HEPA (کمتر از ۴۰ میلی‌متر H_2O در 5cm/s سرعت سطحی) هستند. علاوه براین، روش الکتروریسی به آسانی می‌تواند با روش‌های دیگر برای تهییه فیلترهای هوای کابین چندمنظوره ترکیب شوند.



شکل ۳-۱۳-۳ (a) کارایی تصفیه فیلتر PP HEPA و نانو بافت PC با توجه به قطر ذرات، (b) افت فشار فیلتر PP HEPA و نانو بافت PC با توجه به سرعت سطحی [۶۸].

برای مثال، عوامل ضد باکتری مانند نانوذرات نقره می‌توانند در نانوالیاف معلق شوند و الیاف نه تنها دارای قابلیت تصفیه خوب نسبت به ذرات هستند بلکه می‌توانند از حمله باکتری جلوگیری کنند؛ بنابراین، فیلترهای هوای الکتروریسی شده می‌توانند به طور مؤثر هوای داخل کابین را تصفیه کنند.

۳-۴-۳- تصفیه هوای داخلی

ذرات قابل استنشاق، عمده‌ترین آلاینده‌های ذرات جامد برای انسان هستند که شامل شوره، گردوبغار، ذرات افسانه و غیره هستند. علاوه براین، بعضی از باکتری‌های بیماری‌زا، ویروس‌ها و آلاینده‌های آلی معمولاً بر روی ذرات قابل استنشاق قرار می‌گیرند که برای سلامت انسان خطرناک است. از این‌رو، تصفیه هوای داخل ساختمان توجه زیادی را به خود جلب می‌کند. غشاهای نانولیفی الکتروریسی شده به عنوان بستر فیلتر هوای داخلی به دلیل کارایی تصفیه بالا، ظرفیت بارگذاری بزرگ

و افت فشار پایین همراه با تخلخل بالا و قطر الیاف کوچک آن‌ها محبوبیت زیادی به دست آورده‌اند [۷۰، ۶۹].

پستر تصفیه الکتروریسی شده الیاف نایلون ۶ با قطر الیاف ۱۲۰-۷۰۰ نانومتر توسط لی^۱ و همکاران تولیدشده است. در دانشگاه کرنل [۷۱] کارایی تصفیه غشای الکتروریسی شده نایلون ۶ نسبت به ذرات $\mu\text{m}/۵$ بالاتر از ۸۰٪ است درحالی که کارایی تصفیه مواد تصفیه هوا معمول ۱۳٪ است؛ در ضمن، در طول فرایند تصفیه، افت فشار در مقدار کم نگهداری می‌شود. مطالعه بیشتر نشان می‌دهد که ضخامت غشا به طور عمده بر عملکرد فیلتر تأثیر می‌گذارد. هنگامی که دانسیته فشردگی از $۰/۰۳\text{ g/m}^2$ به $۰/۵\text{ g/m}^2$ افزایش یافت؛ کارایی تصفیه از ۴۲٪ به بیش از ۸۰٪ افزایش یافت و افت فشار در $۷۱/۵۹\text{ Pa}$ و $۱۰/۷/۸۷\text{ nm}$ نگه داشته شد. برای بهبود بیشتر عملکرد تصفیه غشا نanolیفی نایلون ۶، آهن^۲ و همکاران غشای نanolیفی نایلون ۶ با قطر متوسط ۸۰ nm قدر منفذی $۰/۲۴\text{ }\mu\text{m}$ و دانسیته فشردگی $۱۰/۷۵\text{ g/m}^2$ تولید کرده است [۲۱]. عملکرد تصفیه نسبت به فیلترهای HEPA موجود، برتر است؛ علاوه براین، یک کیسه تصفیه گردوغبار حاوی غشاهای نanolیفی الکتروریسی شده توسعه یافته است و کیسه گردوغبار دارای کارایی تصفیه بالا و نفوذپذیری خوب است [۷۲]. به تازگی یک فیلتر هوای شفاف الکتروریسی شده با توانایی بهره‌وری بالا جذب $۲/۵\text{ PM}$ توسط لیو^۳ و همکاران گزارش شده است. [۱۰]. این فیلتر شفاف هوا را می‌توان بر روی پنجره‌ها نصب کرد و به طور مؤثر از وارد شدن PM به محیط داخلی جلوگیری کرد. درمجموع، این غشاهای نanolیفی الکتروریسی شده می‌تواند به عنوان فیلترهای هوای داخل ساختمان مورد استفاده قرار گیرد و به طور مؤثر کیفیت هوا داخلی را بهبود بخشد.

۳-۵-نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

تحقیقات ارزشمندی در زمینه فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه هوا، با توجه به ویژگی‌های جذاب و عملکرد عالی تصفیه‌ای که دارند، صورت گرفته است. با تشکر از تلاش‌های خستگی‌ناپذیر دانشمندان در مورد تحقیق فیلترهای الکتروریسی شده، سازوکار اصلی تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده روشن شده است. انواع مواد برای فیلترهای الکتروریسی شده از پلیمرها تا سرامیک متغیر می‌باشند و تعداد زیادی از مواد خام به طور موفقیت‌آمیزی برای فیلترهای الکتروریسی شده آزمایش شده‌اند. غشاهای نanolیفی الکتروریسی شده به عنوان فیلتر هوا در بسیاری از حوزه‌های کاربردی مانند تصفیه گردوغبار صنعتی، تصفیه هوای لوکوموتیو و تصفیه هوای داخل ساختمان

^۱. Li

^۲. Ahn

^۳. Liu

مطالعه شده است. این مطالعات، تشخیص اساسی و حمایت نظری از فیلترهای الکتروریسی شده را ارائه می‌دهد.

در این فصل، تاریخچه و مکانیسم تصفیه، مواد اصلی و کاربردهای فیلترهای الکتروریسی خلاصه شده است. شایان ذکر است که کارایی تصفیه فیلترهای الکتروریسی شده از فناوری‌های تصفیه موجود مانند فیلتر فیلم مخلخل و فیلتر الیافی معمول که توسط فرایندهای ذوب ریسی یا اسپان باند ساخته شده است، برتر است. این عملکرد برجسته نشان می‌دهد که فیلترهای الکتروریسی شده پتانسیل کاربرد گسترده‌ای در حوزه تصفیه هوا دارد.

علیرغم پیشرفت‌های در حال توسعه فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه هوا، هنوز هم برای بهینه‌سازی بیشتر و کاربردهای عملی آن، چالش‌هایی وجود دارد. بهطور خاص، سه جنبه وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرد. اولاً، تولید در مقیاس بزرگ فیلترهای الکتروریسی شده برای کاربردهای عملی حیاتی است. مطالعات بر روی فیلترهای الکتروریسی شده هوا اغلب در مقیاس آزمایشگاهی محدود می‌شود. برای افزایش تولید آن، تجهیزات صنعتی موردنیاز است. در طول تولید در مقیاس بزرگ، عوامل بسیاری مانند غلظت محلول‌های الکتروریسی، عوامل الکتروریسی و همچنین درجه حرارت و رطوبت در طول فرایند الکتروریسی باید با دقت تنظیم شود. ثانیاً، خواص مکانیکی غشاهای نانولیفی الکتروریسی شده باید برای رسیدن به نیازهای عملیاتی افزایش باید. در کاربردهای عملی، خواص مکانیکی بالا غشاهای ترجیح داده می‌شود. غشاهای نانولیفی الکتروریسی شده در اکثر موارد نمی‌توانند بهطور مستقل استفاده شوند و معمولاً در طی استفاده از آن‌ها باید بر روی یک زمینه‌ی بی‌بافت پوشانده شوند. توسعه غشاهای الکتروریسی شده با خواص مکانیکی بالا می‌تواند کاربرد عملی آن‌ها را تسهیل کند. ثالثاً، کنترل دقیق خواص شیمی‌فیزیکی و ریزساختار (مانند ساختار بلوری) مواد، بسیار مورد انتظار است. خواص شیمی‌فیزیکی و ریزساختار غشاهای الکتروریسی شده بهطور قابل توجهی بر عملکرد تصفیه آن‌ها تأثیر می‌گذارد. درنتیجه، نتایج نظری و تجربی بیشتری موردنیاز است، حتی اگر تعدادی مطالعات بنیادین تاکنون وجود داشته باشد. درنتیجه، فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه هوا، گزینه خوبی برای حذف آلاینده‌های ذره‌ای از هوا می‌باشند و از تلاش‌های مداوم انتظار می‌رود که کاربردهای عملی گسترده‌ای را به سمت جلو سوق دهد.

مراجع

- [1]. Oberdörster G, Utell MJ (2002) Ultrafine particles in the urban air: to the respiratory tract and beyond? *Environ Health Perspect* 110:A440–A441. <https://doi.org/10.1289/ehp.110-a440>.
- [2]. Yoon K, Hsiao BS, Chu B (2008) Functional nanofibers for environmental applications. *J Mater Chem* 18(44):5326–5334. <https://doi.org/10.1039/B804128H>.
- [3]. Barrett JR (2013) Particulate matter and cardiovascular disease: researchers turn an eye toward microvascular changes. *Environ Health Perspect* 121:A282–A282. <https://doi.org/10.1289/ehp.121-A282>
- [4]. Dadvand P, Figueras F, Basagana X, Beelen R, Martinez D, Cirach M, Schembri A, Hoek, G, Brunekreef B, Nieuwenhuijsen MJ (2013) Ambient air pollution and preeclampsia: a spatiotemporal analysis. *Environ Health Perspect* 121:1365–1371. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206430>.
- [5]. Louwies T, Panis LI, Kicinski M, De Boever P, Nawrot TS (2013) Retinal microvascular responses to short-term changes in particulate air pollution in healthy adults. *Environ Health Perspect* 121(9):1011–1016. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205721>.
- [6]. Wilker EH, Mittleman MA, Coull BA, Gryparis A, Bots ML, Schwartz J, Sparrow D (2013) Long-term exposure to black carbon and carotid intima-media thickness: the normative aging study. *Environ Health Perspect* 121(9):1061–1067. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104845>.
- [7]. Zhang S, Liu H, Yin X, Yu J, Ding B (2016) Anti-deformed polyacrylonitrile/polysulfone composite membrane with binary structures for effective air filtration. *ACS Appl Mater Interfaces* 8(12):8086–8095. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00359>.
- [8]. Eckmanns T, Rüden H, Gastmeier P (2006) The Influence of high-efficiency particulate air filtration on mortality and fungal infection among highly immunosuppressed patients: A systematic review. *J Infect Dis* 193(10):1408–1418. <https://doi.org/10.1086/503435>.
- [9]. Hinds WC (1998) Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. Wiley, New York.
- [10]. Liu C, Hsu PC, Lee HW, Ye M, Zheng G, Liu N, Li W, Cui Y (2015) Transparent air filter for high-efficiency PM2.5 capture. *Nat Commun* 6:6205. <https://doi.org/10.1038/ncomms7205>.
- [11]. Greiner AW, J. H. (2007) Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angew Chem Int Ed* 46(30):5670–5703. <https://doi.org/10.1002/anie.200604646>.
- [12]. Nicosia A, Keppler T, Müller FA, Vazquez B, Ravagnani F, Monticelli P, Belosi F (2016) Cellulose acetate nanofiber electrospun on nylon substrate

- as novel composite matrix for efficient, heat-resistant, air filters. *Chem Eng Sci* 153:284–294. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.017>.
- [13]. Gibson P, Schreuder-Gibson H, Rivin D (2001) Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers. *Colloid Surf A* 187–188(0):469–481. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00616-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00616-1).
- [14]. Hung C-H, Leung WW-F (2011) Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Sep Purif Technol* 79(1):34–42. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.008>
- [15]. Ma H, Hsiao BS, Chu B (2011) Thin-film nanofibrous composite membranes containing cellulose or chitin barrier layers fabricated by ionic liquids. *Polymer* 52(12):2594–2599. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.03.051>.
- [16]. Li B, Cao H (2011) ZnO@graphene composite with enhanced performance for the removal of dye from water. *J Mater Chem* 21(10):3346–3349. <https://doi.org/10.1039/C0JM03253K>.
- [17]. Sridhar R, Lakshminarayanan R, Madhaiyan K, Amutha Barathi V, Lim KH, Ramakrishna S (2015) Electrosprayed nanoparticles and electrospun nanofibers based on natural materials: applications in tissue regeneration, drug delivery and pharmaceuticals. *Chem Soc Rev* 44(3):790–814. <https://doi.org/10.1039/c4cs00226a>.
- [18]. Zhang CL, Yu SH (2014) Nanoparticles meet electrospinning: recent advances and future prospects. *Chem Soc Rev* 43(13):4423–4448. <https://doi.org/10.1039/c3cs60426h>.
- [19]. Kumar PS, Sundaramurthy J, Sundarrajan S, Babu VJ, Singh G, Allakhverdiev SI, Ramakrishna S (2014) Hierarchical electrospun nanofibers for energy harvesting, production and environmental remediation. *Energy Environ Sci* 7(10):3192–3222. <https://doi.org/10.1039/c4ee00612g>.
- [20]. Gopal R, Kaur S, Ma Z, Chan C, Ramakrishna S, Matsuura T (2006) Electrospun nanofibrous filtration membrane. *J Membr Sci* 281(1–2):581–586. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.026>
- [21]. Ahn YC, Park SK, Kim GT, Hwang YJ, Lee CG, Shin HS, Lee JK (2006) Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Curr Appl Phys* 6(6):1030–1035. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2005.07.013>
- [22]. Gopal R, Kaur S, Feng CY, Chan C, Ramakrishna S, Tabe S, Matsuura T (2007) Electrospun nanofibrous polysulfone membranes as pre-filters: Particulate removal. *J Membr Sci* 289(1–2):210–219. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.11.056>
- [23]. Yun KM, Hogan CJ Jr, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K (2007) Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chem Eng Sci* 62(17):4751–4759. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.06.007>

- [24].Ma H, Yoon K, Rong L, Mao Y, Mo Z, Fang D, Hollander Z, Gaiteri J, Hsiao BS, Chu B (2010) High-flux thin-film nanofibrous composite ultrafiltration membranes containing cellulose barrier layer. *J Mater Chem* 20(22):4692–4704. <https://doi.org/10.1039/B922536F>.
- [25].Kanaoka C, Kishima T (1999) Observation of the process of dust accumulation on a rigid ceramic filter surface and the mechanism of cleaning dust from the filter surface. *Adv Powder Technol* 10(4):417–426. <https://doi.org/10.1163/156855299X00253>.
- [26].Payet S, Boulaud D, Madelaine G, Renoux A (1992) Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. *J Aerosol Sci* 23(7):723–735. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(92\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0021-8502(92)90039-X).
- [27].Lushnikov A (1997) Igor vasilievich petryanov-sokolov (1907–1996). *J Aerosol Sci* 28(4): 545–546. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(96\)00473-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(96)00473-9).
- [28].Barhate RS, Ramakrishna S (2007) Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *J Membr Sci* 296(1–2):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.03.038>.
- [29].Shepelev AD, Rykunov VA (1995) Polymeric fiber materials for fine cleaning of gases. *J Aerosol Sci* 26:S919–S920. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)97367-N](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)97367-N).
- [30].Leung WW-F, Hung C-H, Yuen P-T (2010) Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Sep Purif Technol* 71(1):30–37. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.10.017>.
- [31].Sambaer W, Zatloukal M, Kimmer D (2012) 3D air filtration modeling for nanofiber based filters in the ultrafine particle size range. *Chem Eng Sci* 82(0):299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.07.031>.
- [32].Wang N, Raza A, Si Y, Yu J, Sun G, Ding B (2013) Tortuously structured polyvinyl chloride/ polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration. *J Colloid Interface Sci* 398(0):240–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.02.019>.
- [33].Petrik S, Maly M (2009) Production nozzle-less electrospinning nanofiber technology. *Mater Res Soc* 1240:WW03–WW07. <https://doi.org/10.1557/PROC-1240-WW03-07>.
- [34].Brown RC (1993) Theory of airflow through filters modelled as arrays of parallel fibres. *Chem Eng Sci* 48(20):3535–3543. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)85009-E](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)85009-E).
- [35].Davies CN (1966) *Aerosol science* [M]. Academic, London
- [36].Davies CN (1973) *Air filtration* [M]. Academic, London
- [37].McIntyre JE (2003) *Synthetic fibers* [M]. Woodhead, New York

- [38].Langmuir I (1942) Report on smokes and filters. Filtration of aerosols and the development of filter materials. Office of Scientific Research and Development No 865, SerNo 353.
- [39].Davies CN (1979) Particle-fluid interaction. *J Aerosol Sci* 10(5):477-513. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(79\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0021-8502(79)90006-5).
- [40].Friedlander SK, Litt M (1958) Diffusion controlled reaction in a laminar boundary layer. *Chem Eng Sci* 7(4):229-234. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(58\)85018-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(58)85018-6).
- [41].Bode HR, David CN (1979) Regulation of a multipotent stem cell, the interstitial cell of hydra. *Prog Biophys Mol Biol* 33:189-206. [https://doi.org/10.1016/0079-6107\(79\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0079-6107(79)90028-2)
- [42].Piekaar HW, Clarenburg LA (1967) Aerosol filters: the tortuosity factor in fibrous filters. *Chem Eng Sci* 22(12):1817-1827. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(67\)80212-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(67)80212-4).
- [43].Clarenburg LA, Schiereck FC (1968) Aerosol filters-II theory of the pressure drop across multi-component glass fibre filters. *Chem Eng Sci* 23(7):773-781. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(68\)85012-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(68)85012-2).
- [44].Brown RC, Wake D (1991) Air filtration by interception - theory and experiment. *J Aerosol Sci* 22(2):181-186. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(91\)90026-E](https://doi.org/10.1016/0021-8502(91)90026-E).
- [45].Rosner DE, Tandon P (1995) Rational prediction of inertially induced particle deposition rates for a cylindrical target in a dust-laden stream. *Chem Eng Sci* 50(21):3409-3431. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00161-W](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00161-W).
- [46].Koeylue U, Xing Y, Rosner DE (1995) Fractal morphology analysis of combustion-generated aggregates using angular light scattering and electron microscope images. *Langmuir* 11(12):4848-4854. <https://doi.org/10.1021/la00012a043>.
- [47].Hutten IM (2015) Handbook of nonwoven filter media, 2nd edn. Elsevier, eBook ISBN: 9780080983028, <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-nonwoven-filter-media/hutten/978-0-08-098301-1>.
- [48].Viswanathan G, Kane DB, Lipowicz PJ (2004) High efficiency fine particulate filtration using carbon nanotube coatings. *Adv Mater* 16(22):2045-2049. <https://doi.org/10.1002/adma.200400463>.
- [49].Chen CY (1955) Filtration of aerosols by fibrous media. *Chem Rev* 55(3):595-623. <https://doi.org/10.1021/cr50003a004>.
- [50].Yoon K, Kim K, Wang X, Fang D, Hsiao BS, Chu B (2006) High flux ultrafiltration membranes based on electrospun nanofibrous PAN scaffolds and chitosan coating. *Polymer* 47(7):2434-2441. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.01.042>.

- [51].Kosmider K, Scott J (2002) Polymeric nanofibres exhibit an enhanced air filtration performance. *Filtr Sep* 39(6):20–22. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(02\)80187-2](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(02)80187-2).
- [52].Li D, McCann JT, Xia Y, Marquez M (2006) Electrospinning: a simple and versatile technique for producing ceramic nanofibers and nanotubes. *J Am Ceram Soc* 89(6):1861–1869. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.00989.x>.
- [53].Wang N, Mao X, Zhang S, Yu J, Ding B (2014) Electrospun nanofibers for air filtration. In: Ding B, Yu J (eds) *Electrospun nanofibers for energy and environmental applications*. Springer, Berlin, pp 299–323. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54160-5_12.
- [54].Zhang Q, Welch J, Park H, Wu C-Y, Sigmund W, Marijnissen JCM (2010) Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *J Aerosol Sci* 41(2):230–236. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2009.10.001>.
- [55].Wang N, Wang X, Ding B, Yu J, Sun G (2012) Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration. *J Mater Chem* 22(4):1445–1452. <https://doi.org/10.1039/C1JM14299B>.
- [56].Zhang S, Shim WS, Kim J (2009) Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. *Mater Des* 30(9):3659–3666. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.017>.
- [57].Musale DA, Kumar A (2000) Solvent and pH resistance of surface crosslinked chitosan/poly(acrylonitrile) composite nanofiltration membranes. *J Appl Polym Sci* 77(8):1782–1793. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000822\)77:8<1782:AID-APP15>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000822)77:8<1782:AID-APP15>3.0.CO;2-5).
- [58].Zhang R, Liu C, Hsu PC, Zhang C, Liu N, Zhang J, Lee HR, Lu Y, Qiu Y, Chu S, Cui Y (2016) Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM2.5 removal from the pollution sources. *Nano Lett* 16(6):3642–3649. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00771>.
- [59].Wang Z, Pan Z, Wang J, Zhao R (2016) A novel hierarchical structured poly(lactic acid)/titania fibrous membrane with excellent antibacterial activity and air filtration performance. *J Nanomater* 2016:1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/6272983>.
- [60].Zhao X, Li Y, Hua T, Jiang P, Yin X, Yu J, Ding B (2017) Cleanable air filter transferring moisture and effectively capturing PM2.5. *Small* 13(11):1603306-n/a. <https://doi.org/10.1002/smll.201603306>.
- [61].Zhang S, Liu H, Yin X, Li Z, Yu J, Ding B (2017) Tailoring mechanically robust poly(m-phenylene isophthalamide) nanofiber/nets for ultrathin high-efficiency air filter. *Sci Rep* 7:40550. <https://doi.org/10.1038/srep40550>.

- [62].Wang Y, Li W, Xia Y, Jiao X, Chen D (2014) Electrospun flexible self-standing γ -alumina fibrous membranes and their potential as high-efficiency fine particulate filtration media. *J Mater Chem A* 2(36):15124. <https://doi.org/10.1039/c4ta01770f>.
- [63].Li W, Wang Y, Ji B, Jiao X, Chen D (2015) Flexible Pd/CeO₂-TiO₂nanofibrous membrane with high efficiency ultrafine particulate filtration and improved CO catalytic oxidation performance. *RSC Adv* 5(72):58120-58127. <https://doi.org/10.1039/c5ra09198e>.
- [64].Mao X, Si Y, Chen Y, Yang L, Zhao F, Ding B, Yu J (2012) Silica nanofibrous membranes with robust flexibility and thermal stability for high-efficiency fine particulate filtration. *RSC Adv* 2(32):12216. <https://doi.org/10.1039/c2ra22086e>.
- [65].Timothy H, Grafe KMG (2003) Nanofiber webs from electrospinning. the nonwovens in filtration. In: Fifth International Conference, Stuttgart, Germany, March.
- [66].Zhang S, Liu H, Zuo F, Yin X, Yu J, Ding B (2017) A controlled design of ripple-like polyamide-6 nanofiber/nets membrane for high-efficiency air filter. *Small* 13(10):1603151-n/a. <https://doi.org/10.1002/smll.201603151>.
- [67].Timothy Grafe MG, Barris M, Schaefer J, Ric Canepa Donaldson Company Inc (2001) Nanofibers in filtration applications in transportation filtration 2001 International Conference and Exposition of the INDA (Association of the Nonwovens Fabric Industry), Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.
- [68].Kim SJ, Nam YS, Rhee DM, Park H-S, Park WH (2007) Preparation and characterization of antimicrobial polycarbonate nanofibrous membrane. *Eur Polym J* 43(8):3146-3152. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.046>.
- [69].Marsano E, Francis L, Giunco F (2010) Polyamide 6 nanofibrous nonwovens via electrospinning. *J Appl Polym Sci* 117(3):1754-1765. <https://doi.org/10.1002/app.32118>.
- [70].Supaphol P, Mit-Uppatham C, Nithitanakul M (2005) Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: effect of emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *J Polym Sci Pol Phys* 43(24):3699-3712. <https://doi.org/10.1002/polb.20671>.
- [71].Lei Li MWF, Green TB (2006) Modification of air filter media with Nylon-6 nanofibers. *J Eng Fibers Fabr* 1(1):1-22.
- [72].Emig D, Klimmek A, Raabe E (2002) Dust filter bag containing nano non-woven tissu. United States Patent 6395046B1.

فصل چهارم

فیلترهای الکتروریسی شده برای کاربردهای دفاعی و حفاظتی

راهول ساهای^۱

^۱. Rahul Sahay e-mail: rahul.g0501308@u.nus.edu

چکیده

از جنگ جهانی دوم به بعد، تحقیقات زیادی در زمینه منسوجات محافظه^۱ برای نیروهای نظامی به منظور محافظت در برابر عوامل جنگی بیولوژیکی و شیمیایی (CBWAs)^۲ انجام گرفته است. هدف این است که منسوجاتی محافظتی تولید شود که به وسیله تخریب یا ایجاد مواد برای CBWAs، محافظت کامل انجام دهد. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده (EFMs)^۳ با توجه به نسبت مساحت مخصوص بر واحد حجم بالای آنها، تخلخل زیاد و توانایی متصل کردن گروههای عملگر برای کاربردهای در نظر گرفته شده، پتانسیل گستردگی را برای منسوجات محافظه از خود نشان داده‌اند. نسل جدید منسوجات محافظه تنها برای جذب، بلکه همچنین برای تخریب CBWAs در نظر گرفته شده‌اند. هدف از این فصل بررسی استفاده از غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده برای طراحی نسل جدید منسوجات محافظه است که نه تنها در برابر CBWAs محافظت می‌کند بلکه همچنین راحتی حرارتی را برای استفاده کننده فراهم می‌کند. این فصل با انگیزه استفاده از غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده برای منسوجات محافظه شروع می‌شود. تولید و عملکرد این منسوجات محافظه به‌طور منظم با تجزیه و تحلیل مقالات تحقیقاتی متمرکز بر استفاده از غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده در منسوجات محافظه موردمطالعه قرار می‌گیرد. ویژگی‌های این منسوجات محافظه با توجه به (الف) راحتی حرارتی و (ب) توانایی سمزدایی در برابر CBWAs موردمطالعه قرار گرفته است. در پایان این فصل، بخشی به پیشرفت منسوجات محافظه هوشمند اختصاص یافته است. پیش‌بینی شده است که این منسوجات محافظه هوشمند، دارای قابلیت‌هایی مانند سنجش، خود تمیزشوندگی، برداشت یا ذخیره‌سازی انرژی و مخابره باشند.

۱-۴- مقدمه

به‌طور معمول، محققان به منظور محافظت از پوست، یک منسوج محافظ طبیعی عالی که یکپارچگی بدن انسان را در برابر تهدیداتی مانند سرما، گرما، نیروهای شیمیایی و مکانیکی حفظ می‌کند مد نظر قرار داده‌اند [۱]. با وجود این، پوست نسبت به CBWAs مانند ارگانوفسفاتها^۴ (OPs) که برای نیروی نظامی و جمعیت غیرنظامی یک خطر بالقوه محسوب می‌شود، بسیار حساس است [۲، ۳].

¹. Protective Textiles (PTs)

². Chemical and Biological Warfare Agents (CBWAs)

³. Electrospun fibrous membranes (EFMs)

⁴. Organophosphates (OPs)

به طور معمول، عملکرد منسوجات محافظ در برابر CBWAs مبتنی بر محافظت کامل با جذب آنها بر روی سطح منسوجات است. با این وجود، این منسوجات محافظ حجیم می‌باشند و راحتی حرارتی کمی برای مصرف کننده ایجاد می‌کنند؛ علاوه بر این، اگرچه منسوجات محافظ در جذب CBWAs مؤثر هستند، اما قادر به تخریب آنها نیستند که می‌تواند پس از ضدغونی منجر به این شود که منسوج محافظ به خودی خود به عنوان یک خطر تلقی شود. این مسائل محققان را برانگیخت تا نسل جدیدی از منسوجات محافظ را تولید کنند که سبک وزن هستند، آسایش حرارتی را برای مصرف کننده فراهم می‌کند و قادر به تخریب انتخابی CBWAs هستند.

بنابراین، نسل جدیدی از منسوجات محافظ موردنیاز است که نه تنها CBWAs را کاهش دهند بلکه از ظرفت و راحتی حرارتی نیز برخوردار باشند [۶-۱-۴]. در اینجا، نانو فناوری با تولید غشاهاي الیافی الکتروریسی شده سبک وزن و تنفس پذیر با کارایی مطلوب به عنوان نسل جدید منسوجات محافظ عرضه شده است. در این فصل، منسوجات محافظ مبتنی بر غشاهاي الیافی الکتروریسی شده به طور کامل تجزیه و تحلیل می‌شوند. پس از یک معرفی مختصر، انواع مختلف منسوجات محافظ مبتنی بر غشاهاي الیافی الکتروریسی شده بحث شده است. یک بخش نیز هم‌چنین به کارکردهای هوشمند مختلف که می‌توانند در منسوجات محافظ گنجانده شوند اختصاص داده شده است که برخی از چالش‌های پیش روی صنعت منسوجات محافظ را نشان می‌دهد.

۴-۱-۱-۴- انگیزه

از زمان جنگ جهانی اول، CBWAs به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و برای مصارف نظامی نگهداری و انباسته شده است [۷]؛ بنابراین، انواع منسوجات محافظ برای محافظت مؤثر در برابر CBWAs تولید شده است. اگرچه نوآوری در CBWAs سریع بوده اما توسعه‌ی منسوجات محافظ برای محافظت از آنها تدریجی بوده است.

محافظت از CBWAs، با استفاده از روغن رزین که بر روی بدن اعمال می‌شود، آغاز شد. روغن رزین بی‌اثر مانع از نفوذ و همچنین هرگونه واکنش احتمالی با CBWA می‌شود اما در برابر آئروسل‌ها مؤثر نبود. با توجه به استفاده گسترده از CBWAs در جنگ جهانی دوم، بر تولید منسوجات محافظ تأکید شد. منسوجات محافظ مبتنی بر ذغال فعال معرفی شدند که قادر به جذب گازها و ذرات معلق در هوا بودند و آنها را در منافذ خود نگه می‌دارند. با این وجود، منسوجات محافظ مبتنی بر ذغال فعال نفوذپذیر ابعاد بزرگی داشتند و به خودی خود می‌توانستند به عنوان یک خطر تلقی شوند زیرا منسوجات محافظ نمی‌توانند CBWAs را تجزیه کنند؛ بنابراین، منسوجات محافظ مبتنی بر پلیمر غیرقابل نفوذ، برخلاف منسوجات محافظ مبتنی بر کربن فعال، در برابر

ذرات معلق و مایع، مقاوم بودند. با این وجود، این منسوجات محافظه مبتنی بر پلیمرهای غیرقابل نفوذ، انتقال رطوبت ضعیفی دارند و منجر به راحتی حرارتی ضعیف برای مصرف کننده می‌شوند. کمبودهای منسوجات محافظه مبتنی بر زغال فعال و پلیمر غیرقابل نفوذ منجر به توسعه انواع منسوجات محافظه سبک وزن، انعطاف‌پذیر و تنفس پذیر شده است. این پیشرفت با استفاده از مواد بی‌بافت در منسوجات محافظه شروع شده است. این منسوجات محافظه به دلیل جذب استثنایی، دفع مایع، بازگشت‌پذیری و استحکام مکانیکی ترجیح داده می‌شوند. فناوری ارائه خدمات پیشرفته سبک وزن^۱ (JSLIST) منسوج محافظه دولایه متشكل از یک لایه داخلی کربن فعال که با یک لایه بیرونی از غشاء نایلون بی‌بافت پوشیده شده است را تولید کرد. لایه نایلون بی‌بافت در برابر تخریب مکانیکی لایه شامل زغال محافظه می‌کند [۸]. انواع مختلفی از روش‌ها برای ساخت غشاهای بی‌بافت مانند طراحی، جداسازی فازی، سنتز قالب و الکتروریسی استفاده شده است. با این وجود، الکتروریسی با توجه به تطبیق و تنوع پذیری، کنترل خواص غشایی و قابلیت عامل‌دار شدن، ترجیح داده می‌شود [۹-۱۱]. غشاهای الیافی الکتروریسی شده چندین مزیت نسبت به منسوجات محافظه معمول، به وسیله جذب و همچنین از طریق تخریب CBWAs ارائه می‌دهد؛ علاوه بر این، غشاهای الیافی الکتروریسی شده می‌توانند برای انجام دو یا چند عملکرد همزمان عامل‌دار شوند؛ بنابراین به کار بردن کاهش وزن باعث حذف نیاز به دو یا چند غشاء مجزا مورداستفاده در منسوجات محافظه معمولی می‌شود؛ علاوه بر این، تخلخل بالا باعث می‌شود که غشاهای الیافی الکتروریسی شده، گزینه احتمالی برای تولید منسوجات محافظه تنفس پذیر باشد. گیسون و همکاران^۲ [۱۲] مذکور شدند که غشاهای الیافی الکتروریسی شده سبک وزن، تنفس پذیری قابل ملاحظه، مقاومت در برابر جریان هوا و نگهداری ذرات معلق بهبود یافته را در مقایسه با منسوجات محافظه تجاری موجود از خود نشان می‌دهند.

اویندورف و همکاران^۳ [۱۳]، همچنین نشان دادند منسوجات چندلایه پلی‌پروپیلن از غشاهای الیافی الکتروریسی شده، ضمن حفظ راحتی حرارتی، نفوذ سوموم دفع آفات را بهشت کاهش می‌دهد. ترکیبی از راحتی حرارتی بالا و محافظت مؤثر مانع از غشاهای الیافی الکتروریسی شده، پتانسیل آن‌ها را برای نسل بعدی منسوجات محافظه نشان می‌دهد.

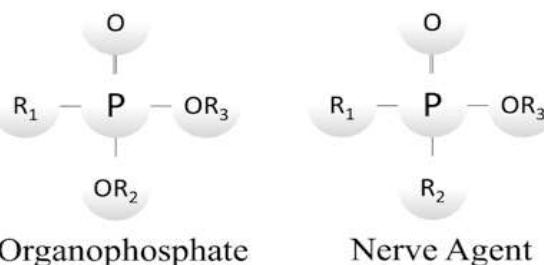
¹. Joint Service Lightweight Integrated Suit Technology (JSLIST)

². Gibson et al

³. Obendorf et al

۴-۱-۲- عوامل جنگی شیمیایی و زیستی (CBWAs)

قرار گرفتن در معرض CBWAs یک خطر بالقوه برای نیروهای مسلح و جمعیت غیرنظمی است. این شرایط مخصوصاً به گروه CBWAs معروف به ارگان و فسفات‌ها مربوط است (شکل ۴-۱ دیده شود) که برای استفاده‌های صنعتی و نظامی تولید و نظامی تولید و ذخیره‌سازی می‌شوند. ارگان و فسفات‌ها از طریق استنشاق یا از طریق پوست جذب می‌شوند تا آنزیم استیل کولین استراز^۱ را مهار کنند تا مقدار زیادی استیل کولین انتقال دهنده عصبی^۲ تولید کنند که می‌تواند منجر به فلجه شدن یا مرگ شود. ارگان و فسفات‌ها با فراریت و پایداری آن‌ها مشخص می‌شود [۱۵-۱۸].



شکل ۴-۱- ساختار معمول ترکیبات ارگانوفسفری: پیوند فسفری ($\text{P} = \text{O}$) از ارگان و فسفات‌ها را می‌توان با پیوند تیوففسفریک $\text{S} = \text{P}$ جایگزین کرد. "R" نمایانگر انواع گروههایی است که به ساختار پایه وصل می‌شوند. "R1" از ارگان و فسفات‌هایی می‌باشد که ممکن است از طریق "O" به "P" وصل شود [۱۴].

ارگان و فسفات‌ها می‌توانند به عنوان گازها، مایعات یا مواد جامد استفاده شوند. نزدیک به یک میلیون و سیصد هزار کارگر کشاورزی در سراسر جهان تحت تأثیر سوموم دفع آفات قرار دارند. مسمومیت با ارگان و فسفات‌ها منجر به مرگ سالانه بیش از ۳۰۰۰۰ نفر در سراسر جهان می‌شود [۲۲]؛ بنابراین، منسوجات محافظه‌به‌طور مداوم در حال توسعه هستند تا به‌طور مؤثر باعث جذب و سمزدایی ارگان و فسفات‌ها از سطوح آلوده شوند.

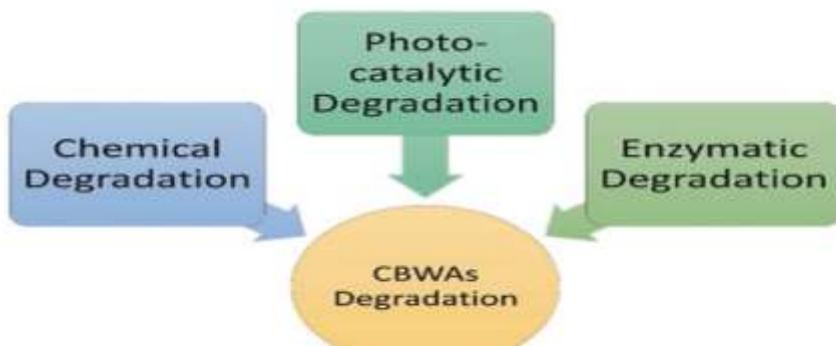
۴-۲- تخریب عوامل جنگی شیمیایی و زیستی

در منسوجات محافظه‌ی رایج، از مواد تنفس پذیر به همراه کربن فعال استفاده می‌کنند. اگرچه این منسوجات محافظه‌مانع فیزیکی در برابر CBWAs می‌شوند، اما باعث کاهش نفوذ پذیری، تنفس حرارتی بالا و افزایش وزن می‌شوند. همچنین، این منسوجات محافظه قادر به تخریب CBWAs نیستند [۲۳]؛ بنابراین، انواع منسوجات محافظه از طریق الکتروریسی برای تخریب این CBWAs

^۱. acetylcholinesterase

^۲. Neurotransmitter acetylcholine

طراحی شده است. در این منسوجات محافظت از روش‌هایی مانند تخریب آنژیمی^۱، تخریب فتوکاتالیستی^۲ و تخریب شیمیایی^۳ برای تخریب CBWAs استفاده می‌کنند (شکل ۴-۲ را ببینید).



شکل ۴-۲-روش‌هایی برای تخریب CBWAs

۴-۲-۱-تخریب CBWAs برای غشای الیافی الکتروریسی شده

غشاهای الیافی الکتروریسی شده از سال ۱۹۸۱ در فیلتر بافت فوق العاده^۴ استفاده شده‌اند [۲۴]. مشارکت غشاهای الیافی الکتروریسی شده در منسوجات محافظت می‌تواند به دو هدف عمدی کمک کند: (الف) محافظت در برابر CBWAs و (ب) عملکردیابی نظیر خود تمیز شوندگی، تنفس پذیری و ضد آب بودن [۲۵-۲۷]. عمدتاً دو روش برای ساختن غشاهای الیافی الکتروریسی شده برای محافظت در برابر CBWAs وجود دارد: (الف) ساختار کامپوزیت چندلایه غشاهای الیافی الکتروریسی شده که در آن هر لایه از غشاهای الیافی الکتروریسی شده عملکردی خاص را برای جلوگیری از تداخل بین عملکرد موردنظر آن‌ها فراهم می‌کند و (ب) عامل‌دار کردن غشاهای الیافی الکتروریسی شده شامل ویژگی‌های موردنیاز به‌غیراز تخریب CBWAs (شکل ۳-۴ و ۴-۴ را ببینید).

¹. Enzymatic Degradation

². Photocatalytic Degradation

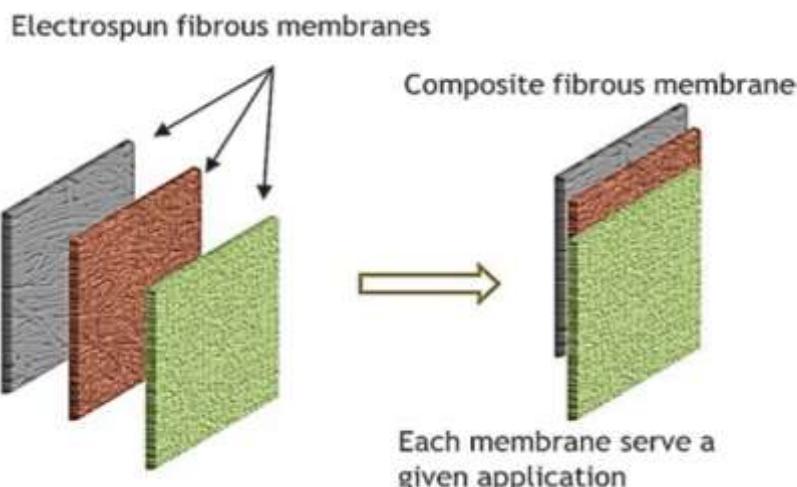
³. Chemical Degradation

⁴. Ultra-Web filter

۴-۲-۱- تخریب شیمیایی

تخربی شیمیایی، ارجح‌ترین رویکرد نسبت به همه روش‌ها برای تخریب ارگان و فسفات‌ها می‌باشد. بازها می‌توانند به عنوان هسته‌هایی برای شکست پیوند P-X در ارگان و فسفات‌ها عمل کنند و منجر به محصولات نهایی غیر سمی شوند. اکسیم‌ها^۱ همچنین می‌توانند به عنوان هسته‌هایی با گزینش پذیری بالا برای ارگان و فسفات‌ها استفاده شوند [۲۸-۳۰]. علاوه بر این، نانو مواد اکسیدهای فلزی مانند TiO_2 , ZnO , MgO , Fe_2O_3 ، برای هیدرولیز ارگان و فسفات‌ها انتخاب پذیری بالایی نشان داده‌اند [۳۱-۳۳].

این نانومواد اکسید فلزی در مقایسه با کربن فعال در برابر ارگان و فسفات‌ها مؤثرتر بودند. علاوه بر این، هیدرولیز ارگان و فسفات‌ها در محیط اسیدی یا قلیایی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، اسید ارتو یدو بنزوئیک^۲ به طور گسترده‌ای به عنوان یک کاتالیزور برای سمزدایی از ارگان و فسفات‌ها استفاده می‌شود. در حین هیدرولیز ارگان و فسفات‌ها، اسید ارتو یدو بنزوئیک به یون ارتو یدو بنزووات^۳ تبدیل می‌شود که می‌تواند به راحتی با اکسیدان‌هایی مانند منیزیم پروکسی فتالات^۴ یا سدیم پریدات^۵ مجدد به اسید ارتو یدو بنزوئیک، تبدیل شود [۳۴].



شکل ۴-۳- طرح‌واره‌ای از سیستم منسوجات محافظ مبتنی بر غشاها ایافی الکتروریسی شده چندلایه. هر غشای ایافی الکتروریسی شده عملکردی خاص برای جلوگیری از تداخل بین عملکرد موردنظر آن‌ها ارائه می‌دهد.

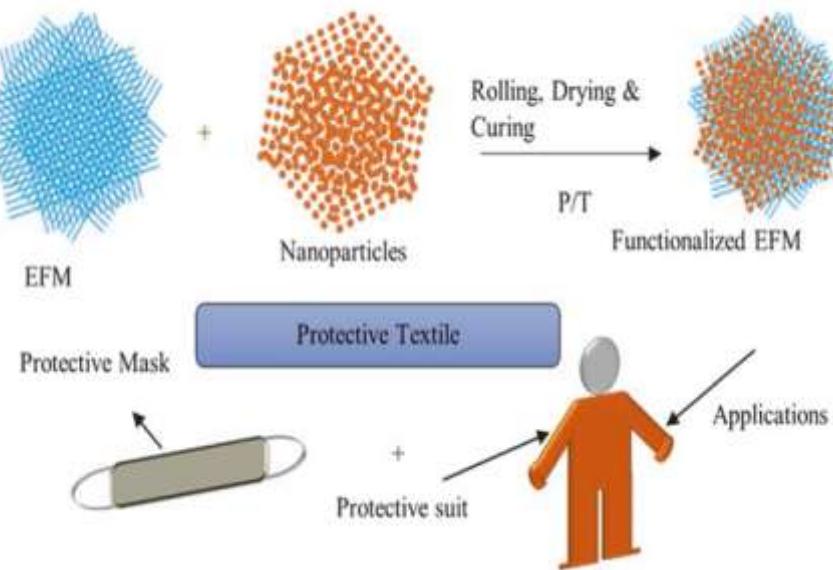
¹. Oximes

². ortho-iodobenzoic acid

³. o-iodobenzoate ion

⁴. magnesium peroxyphthalate

⁵. NaIO₄



شکل ۴-۴- طرح‌واره‌ای برای غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده عامل‌دار. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده می‌تواند عامل‌دار شود تا از خواصی نظیر خود تمیزشوندگی، تنفس پذیری و ضد آب بودن به‌غیراز توانایی برای سهم‌زدایی ارگان و فسفات‌ها برخوردار باشد.

اولین گزارش در مورد استفاده غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده در منسوجات محافظه از طرف شرکت دونالدسون و توسط گیبسون و همکاران^۱ در ناتیک^۲ بود [۳۵]. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده از پلی یورتان ساخته شد. الاستومر سنتز شده با پلی اکسومتالات^۳ ترکیب شد. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده قادر به تخریب ۶۵٪ از ۲-کلرو اتیل سولفید بوده است که جانشینی برای ماده خردل در مدت ۲۴ ساعت می‌باشد. چن و همکاران^۴ [۳۶] غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده چندلایه پلی وینیل گوانیدین^۵ و پلی هیدروکسی اسید^۶ را در حال حاضر بر روی غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده پلی اکریلونیتریل به عنوان منسوج محافظه تولید کردند. منسوج محافظه در برابر

^۱. Gibson et al

^۲. Natick

^۳. Poly(oxometalate)

^۴. Chen et al

^۵. Poly(N-vinylguanidine)

^۶. Poly(hydroxamic acid)

دیزو پروپیل فلورو فسفات‌ها^۱ که یک جانشین برای سارین^۲ می‌باشد مؤثر بود. غشاهاي الیافی الکتروریسی شده که با کلروآمین‌ها^۳، سیکلودکسترن‌ها^۴ و اکسیم‌ها عامل دار شده‌اند نیز در برابر ارگان و فسفات‌ها بسیار مؤثر بودند [۳۷]. راماسان و همکاران^۵ [۳۸] اکسی بتا سیکلودکسترن^۶ را از یدوزو بنزوییک اسید^۷ و بتا سیکلودکسترن^۸ برای ترکیب در غشاهاي الیافی الکتروریسی شده پلی وینیل کلراید تولید کردند. غشاهاي الیافی الکتروریسی شده کامپوزیتی قادر است هیدرولیز جانشین ارگان و فسفات‌ها را ۱۱/۵ برابر سریع‌تر از کربن فعال، انجام دهد. راماسان و همکاران [۳۹] همچنین غشاهاي الیافی الکتروریسی شده پلی سولفون را با نانو ذرات بتا سیکلودکسترن پوشش دادند و به نظر می‌رسد که در مقابل پارا اکسون^۹ که جانشینی برای ارگان و فسفات است مؤثر می‌باشد. چن و همکاران [۴۰] غشاهاي الیافی الکتروریسی شده را از ترکیبی از پلی اکریلامیدوکسیم^{۱۰} و پلی اکریلونیتریل تولید کردند. غشاهاي الیافی الکتروریسی شده در هیدرولیز کردن نیتروفنیل استات^{۱۱} مؤثر بود. چن و همکاران [۴۱] غشاهاي الیافی الکتروریسی شده پلی کریلونیتریل با هیدرولیکسیلامین^{۱۲} برای تولید آمیدوکسیم^{۱۳} و اکنشی حاوی غشاهاي الیافی الکتروریسی شده عامل دار کردند. غشاهاي الیافی الکتروریسی شده حاصله قادر به تخریب دیزو پروپیل فلورو فسفات^{۱۴} در حضور آب بود.

منسوجات محافظه بر پایه غشاهاي الیافی الکتروریسی شده پلیمری در برابر ارگان و فسفات‌ها و گاز خردل مؤثر هستند اما قادر به ایجاد راحتی حرارتی برای مصرف‌کننده نیستند؛ بنابراین، ساختارهای کامپوزیتی چندلایه نیز ارائه شده است که شامل یک لایه تنفس پذیر است که بین لایه‌های محافظه ارگان و فسفات‌ها ساندویچ شده است [۴۲]. با وجود این، تورم قابل توجه می‌تواند عملکرد محافظتی این غشاهاي الیافی الکتروریسی شده کامپوزیتی را در برابر ارگان و فسفات‌ها از بین ببرد.

^۱. Diisopropyl Fluorophosphates

^۲. Sarin

^۳. Chloramines

^۴. Cyclodextrins

^۵. Ramaseshan et al

^۶. oxy-β-cyclodextrin

^۷. o-iodosobenzoic

^۸. β-cyclodextrin

^۹. paraoxon

^{۱۰}. Poly(acrylamidoxime)

^{۱۱}. p-nitrophenyl acetate

^{۱۲}. Hydroxylamine

^{۱۳}. Amidoxime

^{۱۴}. Diisopropyl Fluorophosphate

به‌طورمعمول، اکسیدهای فلزی می‌توانند از طریق اکسایش و احیا واکنش‌های ناشی از آنیون‌های سوپراکسید^۱ و رادیکال‌های هیدروکسیل، ارگان و فسفات‌ها را سم زدایی کنند. آنیون‌های سوپراکسید، با برهم‌کنش بین الکترون‌های آزاد باند انتقال و اکسیژن جذب شده تشکیل می‌شوند. رادیکال‌های هیدروکسیل، با واکنش آب با حفراتی در نوار ظرفیت تشکیل می‌شوند که منجر به تجزیه ارگان و فسفات‌ها به محصولات غیر سمتی می‌شود [۴۳، ۴۴]. اکسیدهای فلزی مورداستفاده در منسوجات محافظ شامل اکسیدهای روی، مس، تیتانیوم، آهن، روی، منگنز، آلومینیوم، و انادیم و نیکل می‌باشد [۴۵-۴۷]؛ علاوه براین، فلزات نجیب مانند طلا یا نقره‌ی با سیترات^۲ یا ایمیدازول^۳ پوشش داده شده، گزارش شده است که ارگان و فسفات‌ها را تخریب می‌کند [۴۸، ۴۹].

با وجوداین، این اکسیدهای فلزی باید از سطح مخصوص بالایی برخوردار باشند تا در مقابل ارگان و فسفات‌ها مؤثر باشند. سطح مخصوص بالای اکسید فلزی یا با قرار دادن نانو ذرات اکسید فلزی بر روی غشاهای الیافی الکترورسی شده یا با تولید غشاهای الیافی الکترورسی شده اکسید فلزی حاصل می‌شود؛ به عنوان مثال، راماسشان و همکاران [۵۰] غشاهای الیافی الکترورسی شده $ZnTiO_3$ را تولید کردند و اثربخشی آن را در برابر پاراکسون که جانشینی برای ارگان و فسفات است نشان دادند. غشاهای الیافی الکترورسی شده $ZnTiO_3$ در ۵۰ دقیقه اول برهم‌کنش با آن، % ۹۱ از پاراکسون را تجزیه کرد. راماسشان و همکاران [۳۹] همچنین غشاهای الیافی الکترورسی شده کربن به همراه نانوذرات $FeTiO_3$ برای جذب و تجزیه ارگان و فسفات‌ها را تولید کردند. غشاهای الیافی الکترورسی شده کامپوزیتی، عملکرد عالی در برابر جانشین ارگان و فسفات‌ها نشان می‌دهد. سوندرراجان و همکاران^۴ [۵۱] غشاهای الیافی الکترورسی شده با نانوذرات MgO برای تجزیه پاراکسون تولید کردند. غشاهای الیافی الکترورسی شده به کاررفته کوپلیمر پلی وینیلیدن فلوراید-هگزا فلوروپروپیلن، پلی وینیل کلراید و پلی سولفون بودند. غشاهای الیافی الکترورسی شده پلی سولفون همراه با نانوذرات MgO در برابر پاراکسون بسیار مؤثر است.

۴-۲-۱-۲- تخریب آنزیمی

تخریب آنزیمی انتخابی‌ترین و سریع‌ترین روش برای تخریب ارگان و فسفات‌ها است. آنزیم‌ها منجر به هیدرولیز مؤثر ارگان و فسفات‌ها می‌شوند [۵۲]. هان و همکاران [۵۳] برای تولید غشاهای الیافی الکترورسی شده کامپوزیتی با یک هسته پلیمری و پوسته دییزوپروپیل فلئورو فسفاتاز^۵

^۱. Superoxide

^۲. Citrate

^۳. Imidazole

^۴. Sundarajan

^۵. Diisopropylfluorophosphatase

(DFPase)، از الکتروریسمی هم محور استفاده کردند. DFPase آنزیمی است که قادر است به طور مؤثری ارگان و فسفات‌ها را هیدرولیز کند؛ با این وجود، پایداری پایین و هزینه بالای تولید آنزیم‌ها به طرز چشم‌گیری استفاده از آن را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، انواع جانشین برای آنزیم‌ها برای تکرار کارایی آن‌ها در برابر ارگان و فسفات‌ها استفاده شده است. به عنوان مثال، سیکلودکسترین و مشتقات آن برای تقلید از اثربخشی آنزیم‌ها در برابر ارگان و فسفات‌ها استفاده شده است [۵۴-۵۷].

۴-۲-۳- تخریب فتوکاتالیستی

فوتوکاتالیست‌های ناهمگن نشان داده شده است که ارگان و فسفات‌ها را به صورت محصولات نهایی بی‌ضرر، تخریب می‌کند [۵۸]. به طور معمول، هنگامی که یک فتوکاتالیست مانند TiO_2 با نور خورشید تابانده می‌شود، فوتون‌ها جذب می‌شوند و جفت حفره الکترونی ایجاد می‌شوند. این جفت‌های الکترون-حفره در چندین واکنش اکسایش-کاهش برای ایجاد گونه‌های واکنشی مسئول برای تخریب ارگان و فسفات‌ها شرکت می‌کنند. پرکاربردترین فتوکاتالیستی که استفاده می‌شود TiO_2 می‌باشد که دارای پهنه‌ای باند $3/2$ الکترون‌ولت است که به آن اجازه می‌دهد نور ماوراء بنفسن را عمدتاً جذب کند؛ بنابراین، ساختار و ترکیب TiO_2 در حال اصلاح است تا پهنه‌ای باند آن کاهش یابد به این منظور که فعالیت فتوکاتالیستی نور مرئی بهبود یابد؛ علاوه براین، کار در این فرایند برای کاهش میزان باز ترکیب بالای آن در جفت‌های حفره الکترونی کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های بسیار کاربردی شامل تغليظ TiO_2 با یون‌های خارجی است تا به آن اجازه دهد در نور مرئی حساس شود و همچنین تله‌های بار را برای جفت‌های الکترون-حفره ایجاد کند تا آن‌ها را به عنوان هویت جدآگانه حفظ کند [۵۹].

TiO_2 برای بهبود حساسیت نور مرئی آن، با فلزاتی مانند منگنز، وانادیم، آهن و مس تغليظ می‌شود. با این وجود، مقادیر زیادی از این ناخالصی‌ها ممکن است باز ترکیب جفت‌های الکترون-حفره را افزایش دهد. با این حال، غلظت کم ناخالصی‌ها منجر به تغییر کوچکی در پهنه‌ای باند TiO_2 به سمت حساس شدن نور مرئی می‌شود. غیر فلزاتی مانند نیتروژن، گوگرد و کربن نیز برای کاهش پهنه‌ای باند TiO_2 استفاده می‌شود؛ بنابراین، غلظت کم کاتیون و آنیون ناخالصی‌ها با انتخاب منطقی باید حساسیت به نور مرئی را افزایش داده و باز ترکیب جفت‌های الکترون-حفره را کاهش دهند [۵۹]. جدا از TiO_2 ، فتوکاتالیست‌های دیگری که می‌توانند برای تخریب ارگان و فسفات‌ها استفاده شوند شامل ZnO ، CuO و SiO_2 هستند.

۴-۲-۴- تخریب عوامل جنگی زیستی

عوامل جنگی زیستی^۱ (BWA) مانند آنتراس^۲ به عنوان تهدیدی برای نیروهای ارتش و جمعیت غیرنظامی عمل کرده‌اند؛ بنابراین، تلاش‌های تحقیقاتی زیادی برای توسعه منسوج محافظه برای جلوگیری از حمله و رشد BWAs وجود دارد. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده با مواد ضد باکتری جلوگیری از تواند تا به عنوان منسوج محافظه مورد استفاده قرار گیرند. به طور معمول، مواد ضد باکتری مورداستفاده عبارت‌اند از نقره، ترکیبات بیگوانید^۳، کمپلکس یدید^۴ و ترکیبات فسفونیوم^۵ که می‌تواند در درون یا بر روی غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده قرار گیرد تا در برابر مؤثر باشند [۶۰].

مطالعات نشان داده‌اند غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده که حاوی مواد ضد باکتریایی مانند Ag، CuO و MgO هستند در برابر تهدیدات باکتریایی بسیار مؤثر هستند [۶۳-۶۱]. این مواد می‌توانند با محلول الکتروریسی مخلوط شوند یا می‌توانند روی سطح غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده قرار گیرند [۶۳]. کلرید بنزیل تری اتیل آمونیوم^۶ با محلول پلی کربنات مخلوط شد تا غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده ضد باکتریایی تولید کند [۶۴]. غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده کیتوسان / پلی وینیل الکل در برابر باکتری‌های E. coli و S. aureus مؤثر بودند [۶۵]؛ علاوه بر این، غشاهاهای الیافی الکتروریسی شده حاوی کلر هگزیدین^۷ همچنین عملکرد ضد باکتریایی خوبی را نشان داده بودند [۶۶].

۴-۳- منسوجات محافظه هوشمند

آینده منسوجات محافظه هوشمند را می‌توان با ترکیب کارایی‌هایی مانند حسگر بودن^۸، برداشت و ذخیره‌سازی انرژی^۹، ارتباطات^{۱۰} و خود تمیزشوندگی^{۱۱} تحقق بخشید (شکل ۴-۵ را ببینید). این منسوجات محافظه هوشمند نه تنها محافظت در برابر CBWAs، بلکه راحتی حرارتی، واسطه انسان و ماشین، برقراری ارتباط بین پرسنل و مرکز فرمان از راه دور، قابلیت خود تمیز شوندگی، پایداری

¹. Biological warfare agents (BWAs)

². Anthrax

³. Biguanide compounds

⁴. Iodide complex

⁵. Phosphonium compounds

⁶. Benzyl triethylammonium chloride

⁷. Chlorhexidine

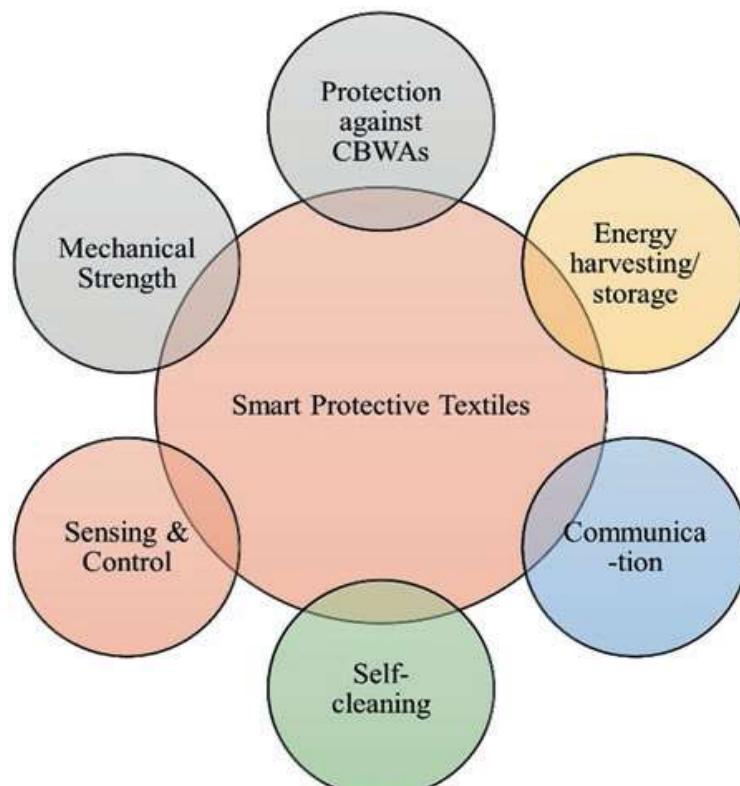
⁸. Sensing

⁹. Energy harvesting/storage

¹⁰. Communication

¹¹. Self-cleaning

mekanikی و ماندگاری را نیز فراهم می‌کنند. به خصوص، این منسوجات محافظه‌کار هوشمند با قابلیت ادراک و ارتباطات می‌توانند اثربخشی آن‌ها در برابر CBWAs، از راه دور کنترل شوند؛ با این وجود، منسوجات محافظه‌کار فقط زمانی قابل دستیابی هستند که همکاری بین صنعت و دانشگاه به موفقیت برای پر کردن شکاف بین تحقیق و تولید آبوه منجر شود.



شکل ۴-۵- طرح‌واره‌ای از منسوجات محافظه‌کار هوشمند

۱-۳-۴- ادراک و کنترل^۱

حسگرهای اکسید فلزی مانند In_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 به طور گستردگی در منسوجات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶۷]. آن‌ها را می‌توان به‌آسانی برای تشخیص CBWA‌ها به منسوجات محافظه‌کار ضمیمه کرد [۶۸]. CBWAs را می‌توان با اندازه‌گیری تغییر در جریان الکتریکی یا مقاومت در هنگام تماس با حسگرها، به راحتی تشخیص داد؛ با وجود این، حسگرهای اکسید فلزی در دمای بالا

^۱. Sensing and Control

معمولًاً بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد با گزینش پذیری ضعیف کار می‌کنند؛ بنابراین، پلیمرهای رسانا نظیر پلی آنیلین و پلی اتیلن دی اکسکسی تیوفن^۱ به دلیل کاربردی در دمای اتاق و امکان مشتقات چندمنظوره آن‌ها، برای کاربردهای حسگرانه در نظر گرفته می‌شوند [۶۹]؛ با این وجود، این حسگرهای از کاهش حساسیت رنج می‌برند. [۶۹]؛ بنابراین، حسگرهای جدید باید از ساختارهای ترکیبی آلی / معدنی در مقیاس نانو تشکیل شده باشند تا با زمان پاسخ کم، گزینش پذیری بالای داشته باشند. این حسگرهای نسل جدید CBWAs را به صورت انتخابی و سریع تشخیص می‌دهند.

علاوه براین، برای دست‌یابی به کنترل دما و نفوذپذیری منسوجات هوشمند می‌توان از ژلهای هوشمند استفاده کرد؛ به عنوان مثال، هیدروژل پلی ایزو پروپیلن اکریلامید^۲ که بر روی غشاهاي الیافی الکتروریسی شده پلی اتیلن ترفتالات و پلی پروپیلن پیوند زده شده است می‌تواند حجم آن‌ها را بسته به دمای کار کرد تغییر دهد [۷۰]. این غشاهاي الیافی الکتروریسی شده‌ای که به هیدروژل پیوند خورده‌اند، می‌توانند برای کنترل دمای منسوجات محافظ استفاده شوند؛ علاوه براین، میکروژلهای کوپلیمر پلی ایزو پروپیلن اکریلامید- اکریلامید^۳ به همراه کیتوسان می‌توانند در غشاهاي الیافی الکتروریسی شده برای عملکرد دارای دمای پاسخگویی دوگانه منسوجات محافظ به منظور دستیابی به راحتی حرارتی برای مصرف کننده استفاده شوند [۷۱]؛ علاوه براین، پلی اتیلن گلایکول^۴ برای کنترل دما می‌تواند در منسوجات محافظ قرار گیرد. در پلی اتیلن گلایکول، پیوند هیدروژنی به ترتیب با افزایش و کاهش دما، شکسته و تشکیل می‌شود، خاصیتی که می‌تواند برای ادراک و کنترل دمای منسوجات محافظ به کاربرده شود [۷۲].

۲-۳-۴- برداشت، ذخیره‌سازی انرژی و ارتباطات

منسوجات محافظ نسل جدید شامل دستگاههای برداشت، ذخیره‌سازی انرژی و ارتباطات برای اندازه‌گیری و ارتباط کارکردهای حیاتی انسان بین پرسنل و مرکز فرمان برای تشخیص زودهنگام و جلوگیری از CBWAs می‌باشند؛ بنابراین، منسوجات محافظ به طور بالقوه حاوی مواد الکترو فعال هستند که می‌توانند در کاربردهای فعل سازی، ذخیره انرژی و برداشت انرژی استفاده شوند [۷۳].

مواد الکترو فعال اکتیو شامل: نانوللهای کربنی، پلیمرهای رسانا، الاستومرهای دی الکتریک و پلیمرهای فرو الکترونیکی^۵ هستند. نانوللهای کربنی و مشتقات آن‌ها به عنوان محرك آزمایش شده‌اند که به طور بالقوه می‌تواند به عنوان یک وسیله تبدیل انرژی استفاده شود [۷۴].

^۱. poly(ethylenedioxothiophene)

^۲. Poly(N-isopropylacrylamide)

^۳. Poly(N-isopropylacrylamide-co- acrylamide)

^۴. Poly(ethylene glycol)

^۵. Ferro-electronic polymers

پلیمرهای رسانا؛ مانند، پلی پیرول^۱، پلی آنیلین و پلی تیوفن^۲ نیز می‌توانند به عنوان محرک عمل کنند. این پلیمرها در طول واکنش‌های اکسایش-احیا روی جذب و حذف برگشت‌پذیر یون مخالف، کار می‌کنند؛ علاوه براین، غشاها ایونی حاوی فلزات، مانند Pt، Au و Ag، به عنوان محرک، آزمایش شده‌اند که نتایج مثبتی داشته است [۷۶].

۴-۳-۳- خود تمیز شوندگی

گردوخاک و گرفتگی به دلیل انسداد منافذی که از عملکرد طبیعی جلوگیری می‌کند، می‌تواند عملکرد منسوجات محافظ را تخریب کند؛ بنابراین، منسوجات محافظ خود تمیزشونده برای عملکرد مؤثر آن‌ها در مدت زمان طولانی ضروری هستند. به طور معمول، با اصلاح سطح یا تخریب فوتوكاتالیستی ذرات گردوخاک آلی، خود تمیز شوندگی را می‌توان انجام داد.

اصلاح سطح باعث ایجاد سطح آب‌گریز می‌شود که اجزاء می‌دهد قدرات آب جمع شود و گردوغبار، آلودگی‌های معدنی و آلی را در طول مسیر خود بردارد. لیو و همکاران^۳ [۷۷] از نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده PBA-g-CNT برای تولید ساختارهای آب‌گریز شبیه برگ نیلوفر آبی بر روی سطح پارچه پنبه برای تولید منسوجات فوق آب‌گریز استفاده کردند؛ از طرف دیگر، آلاینده‌های آلی از طریق آنیون‌های سوپراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل شده در طی یک واکنش فوتوكاتالیستی در حضور فوتوكاتالیست‌هایی مانند TiO₂ یا ZnO و CuO می‌توانند تجزیه شوند [۷۸، ۷۹]؛ به عنوان مثال، منسوجات پنبه‌ای با نانوذرات TiO₂ برای تولید منسوجات خود تمیز شونده اصلاح سطحی شدند [۸۰]؛ علاوه براین، TiO₂ برای بهبود فعالیت فوتوكاتالیستی و تولید منسوج خود تمیز شونده با Au و SiO₂ ترکیب شده است. عنصر طلا، باز ترکیب را بین جفت‌های حفره-الکترون ایجاد شده توسط نور^۴ کاهش می‌دهد، در حالی که SiO₂ با ساختار آمورف باعث افزایش فعالیت فوتوكاتالیستی TiO₂ می‌شود [۸۱].

۴-۳-۴- استحکام مکانیکی

استحکام مکانیکی غشاها الیافی الکتروریسی شده معمول برای تحمل ضربات در طی جریان مایع یا هوا از طریق آن‌ها، کافی نیست؛ بنابراین، غشاها الیافی الکتروریسی شده معمولاً بر روی یک بستر به عنوان پشتیبان قرار می‌گیرند یا با سایر بسترهای الیافی متصل می‌شوند تا استحکام

¹. Poly(pyrrole)

². Poly(thiophene)

³. Liu et al

⁴. Photo-generated electron-hole pairs

مکانیکی آن‌ها تقویت شود. رویکردهای نوین شامل استفاده از پلیمرهای حافظه شکل^۱ در غشاهای الیافی الکتروریسی شده برای منسوجات محافظ است. پلیمرهای حافظه شکل معمولی شامل پلی اترها، پلی آمید، پلی آکریلات، پلی سیلیکسان‌ها و پلی‌یورتان‌ها می‌باشند. این پلیمرهای حافظه شکل می‌توانند تحت تأثیر نیروهای خارجی مانند دما، H_۲O، نور، محرك مکانیکی یا شیمیایی به صورت برگشت‌پذیر تغییر شکل دهند [۷۴، ۸۲]. این پلیمرهای حافظه شکل باعث می‌شوند تا غشاهای الیافی الکتروریسی شده تحت عمل مایعات یا گازهایی که از طریق آن جریان می‌یابند به صورت برگشت‌پذیر تغییر شکل دهند. این کار به نوبه خود باعث بهبود پایداری مکانیکی غشاهای الیافی الکتروریسی شده خواهد شد [۸۳، ۸۴].

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل به استفاده از غشاهای الیافی الکتروریسی شده در منسوجات محافظ پرداخته شده است. انواع پلیمرها، سرامیک‌ها و غشاهای الیافی الکتروریسی شده کامپوزیتی تک لایه و چندلایه بر پایه منسوجات محافظ برای اثربخشی آن‌ها در برابر CBWAs تولیدشده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این منسوجات محافظ سیک وزن مبتنی بر غشاهای الیافی الکتروریسی شده به دلیل سطح مخصوص بالا، قابلیت تنفس پذیری زیاد و تخلخل بالا ترجیح می‌یابند، در حالی که همزمان انعطاف‌پذیری را برای مشارکت در عاملیت‌های موردنیاز فراهم می‌کنند؛ علاوه براین، فارغ از جذب CBWAs، منسوجات محافظ قادر به تجزیه آن‌ها به محصولات غیر سمی هستند و این نشان از امکان‌پذیری آن‌ها برای نسل جدید منسوجات محافظ است. با این وجود، فارغ از محافظت در برابر CBWAs، نسل جدید منسوجات محافظ همچنین باید راحتی حرارتی، برقراری ارتباط بین پرسنل و مرکز فرمان از راه دور، قابلیت خود تمیز شوندگی، قابلیت ادراک و حسگر بودن و همچنین پایداری را فراهم کنند؛ بنابراین، برای دستیابی به نسل جدید منسوجات محافظ قوی، حساس، انتخاب پذیر و تعاملی، رویکردهای تحقیقاتی میان‌رشته‌ای لازم است.

^۱. Shape memory polymers

مراجع

- [1]. Scott RA (2005) Textiles for protection. Woodhead Pub, Sawston.
- [2]. Bromberg L, Schreuder-Gibson H, Creasy WR et al (2009) Degradation of chemical warfare agents by reactive polymers. *Ind Eng Chem Res* 48:1650–1659. <https://doi.org/10.1021/ie801150y>.
- [3]. Gugliuzza A, Drioli E (2013) A review on membrane engineering for innovation in wearable fabrics and protective textiles. *J Membr Sci* 446:350–375. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.07.014>.
- [4]. Dolez PI (2013) Smart barrier membranes for protective clothing. In: Smart textiles for protection. Elsevier, Amsterdam, pp 148–189.
- [5]. Raza A, Li Y, Sheng J et al (2014) Protective clothing based on electrospun nanofibrous membranes. In: Electrospun nanofibers for energy and environmental applications. Springer, Berlin, pp 355–369.
- [6]. Yoon B, Lee S (2011) Designing waterproof breathable materials based on electrospun nanofibers and assessing the performance characteristics. *Fiber Polym* 12:57–64. <https://doi.org/10.1007/s12221-011-0057-9>.
- [7]. Deitzel JM, Beck Tan NC, Kleinmeyer JD, et al (1999) Generation of polymer nanofibers through electrospinning. *Army Res Rep ARL-TR-198:1*–41.
- [8]. Online Army Study Guide - Chemical, Biological, Radiological, Nuclear ArmyStudyGuide. com. http://www.armystudyguide.com/content/army_board_study_guide_topics/cbrn/cbrnstudy-guide.shtml. Accessed 19 Jul 2017/
- [9]. Sahay R, Teo CJ, Chew YT (2013) New correlation formulae for the straight section of the electrospun jet from a polymer drop. *J Fluid Mech* 735:150–175. <https://doi.org/10.1017/Jfm.2013.497>.
- [10]. Sahay R, Thavasi V, Ramakrishna S (2011) Design modifications in electrospinning setup for advanced applications. *J Nanomater* 2011:1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/317673>.
- [11]. Sahay R, Kumar PS, Sridhar R et al (2012) Electrospun composite nanofibers and their multifaceted applications. *J Mater Chem* 22:12953. <https://doi.org/10.1039/c2jm30966a>.
- [12]. Gibson P, Schreuder-Gibson H, Rivin D (2001) Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 187–188:469–481. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00616-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00616-1).
- [13]. Lee S, Obendorf SK (2007) Use of electrospun nanofiber web for protective textile materials as barriers to liquid penetration. *Text Res J* 77:696–702. <https://doi.org/10.1177/0040517507080284>.
- [14]. Ecobichon DJ (1999) Occupational hazards of pesticide exposure: sampling, monitoring, and measuring. Taylor & Francis, Abingdon.

- [15].Davies HG, Richter RJ, Keifer M et al (1996) The effect of the human serum paraoxonase polymorphism is reversed with diazoxon, soman and sarin. *Nat Genet* 14:334-336. <https://doi.org/10.1038/ng1196-334>.
- [16].Taylor P (2010) The degradation of organophosphorus pesticides in natural waters: a the degradation of organophosphorus pesticides in natural waters: a critical review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 32:17-72. <https://doi.org/10.1080/10643380290813444>.
- [17].Singh BK (2009) Organophosphorus-degrading bacteria: ecology and industrial applications. *Nat Rev Microbiol* 7:156-164. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2050>.
- [18].Voss G, Matsumura F (1964) Resistance to organophosphorus compounds in the two-spotted spider mite: two different mechanisms of resistance. *Nature* 202:319-320.
- [19].Yang Y, Baker J, Ward J (1992) Decontamination of chemical warfare agents. *Chem Rev* 92:1729-1743.
- [20].Mondloch JE, Katz MJ, Isley WC III et al (2015) Destruction of chemical warfare agents using metal-organic frameworks. *Nat Mater* 14:512-516. <https://doi.org/10.1038/nmat4238>.
- [21].Borak J, Sidell FR (1992) Agents of chemical warfare: sulfur mustard. *Ann Emerg Med* 21:303-308. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(05\)80892-3](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)80892-3)
- [22].Eddleston M, Buckley NA, Eyer P, Dawson AH (2008) Management of acute organophosphorus pesticide poisoning. *Lancet* 371:597-607. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61202-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61202-1).
- [23].Senić Ž, Bauk S, Vitorović-Todorović M et al (2011) Application of TiO₂ nanoparticles for obtaining self-decontaminating smart textiles. *Sci Tech Rev* 61:63-72
- [24].Ultra-Web Media Technology - Dust Collector Filters - Donaldson Torit. <http://www2.donaldson.com/torit/en-us/pages/products/ultra-webmedia.aspx>. Accessed 23 Jul 2017.
- [25].Brock R, Meitner G (1977) Nonwoven thermoplastic fabric. US Pat. 4,041,203.
- [26].Groitzsch D, Fahrbach E (1986) Microporous multilayer nonwoven material for medical applications. US Pat. 4,618,524.
- [27].Huber O, Magidson M (1983) Disposable face mask. US Pat. 4,384,577.
- [28].Saint-André G, Kliachyna M, Kodepelly S et al (2011) Design, synthesis and evaluation of new α-nucleophiles for the hydrolysis of organophosphorus nerve agents: application to the reactivation of phosphorylated acetylcholinesterase. *Tetrahedron* 67:6352-6361. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2011.05.130>.
- [29].Faust SD, Gomaa HM (1972) Chemical hydrolysis of some organic phosphorus and carbamate pesticides in aquatic environments. *Environ Lett* 3:171-201. <https://doi.org/10.1080/00139307209435465>.

- [30].Fukuto TR (1990) Mechanism of action of organophosphorus and carbamate insecticides. *Environ Health Perspect* 87:245-254.
- [31].Mutin PH, Guerrero G, Vioux A (2005) Hybrid materials from organophosphorus coupling molecules. *J Mater Chem* 15:3761-3768. <https://doi.org/10.1039/b505422b>.
- [32].Stark JV, Park DG, Lagadic I, Klabunde KJ (1996) Nanoscale metal oxide particles/clusters as chemical reagents. Unique surface chemistry on magnesium oxide as shown by enhanced adsorption of acid gases (sulfur dioxide and carbon dioxide) and pressure dependence. *Chem Mater* 8:1904-1912. <https://doi.org/10.1021/cm950583p>.
- [33].Li YX, Koper O, Atteya M, Klabunde KJ (1992) Adsorption and decomposition of organophosphorus compounds on nanoscale metal oxide particles. In situ GC-MS studies of pulsed microreactions over magnesium oxide. *Chem Mater* 4:323-330. <https://doi.org/10.1021/cm00020a019>.
- [34].Bunton C, Foroudian HJ, Gillitt ND (1999) Reduction of o-iodosobenzoate ion by sulfides and its oxidative regeneration. *J Phys Org Chem* 12:758-764. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1395\(199910\)12:10<758::AID-POC200>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1395(199910)12:10<758::AID-POC200>3.0.CO;2-A).
- [35].Graham K, Schreuder-Gibson H, Gogins M (2003) Incorporation of electrospun nanofibers into functional structures. *Construction* 15:1-8
- [36].Chen L, Bromberg L, Lee JA et al (2010) Multifunctional electrospun fabrics via layer-by layer electrostatic assembly for chemical and biological protection. *Chem Mater* 22:1429-1436. <https://doi.org/10.1021/cm902834a>.
- [37].Ramakrishna S, Fujihara K, Teo WE et al (2006) Electrospun nanofibers: solving global issues. *Mater Today* 9:40-50. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71389-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71389-X).
- [38].Ramaseshan R, Sundarrajan S, Liu Y et al (2006) Functionalized polymer nanofiber membranes for protection from chemical warfare stimulants. *Nanotechnology* 17:2947-2953. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/12/021>.
- [39].Ramaseshan R (2011) Decontamination of chemical warfare simulants using electrospun media. PhD Thesis, National University Singapore, pp 1-167.
- [40].Chen L, Bromberg L, Hatton TA, Rutledge GC (2007) Catalytic hydrolysis of p-nitrophenyl acetate by electrospun polyacrylamidoxime nanofibers. *Polymer* 48:4675-4682. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.05.084>.
- [41].Chen L, Bromberg L, Schreuder-Gibson H et al (2009) Chemical protection fabrics via surface oximation of electrospun polyacrylonitrile fiber mats. *J Mater Chem* 19:2432-2438. <https://doi.org/10.1039/B818639a>.

- [42].Becke GS, Carmody DJ, Dobosy MJ (2008) Microporous breathable film with internal barrier layer or layers. US20080131676 A1.
- [43].Nooney MG, Campbell A, Murrell TS et al (1998) Nucleation and growth of phosphate on metal oxide thin films. *Langmuir* 14:2750–2755. <https://doi.org/10.1021/la9702695>.
- [44].Li M, Liu J, Xu Y, Qian G (2016) Phosphate adsorption on metal oxides and metal hydroxides: a comparative review. *Environ Rev* 24:319–332. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0080>.
- [45].Wagner GW, Bartram PW, Koper O, Klabunde KJ (1999) Reactions of VX, GD, and HD with Nanosize MgO. *J Phys Chem B* 103:3225–3228. <https://doi.org/10.1021/jp984689u>.
- [46].Kleinhammes A, Wagner GW, Kulkarni H et al (2005) Decontamination of 2-chloroethyl ethylsulfide using titanate nanoscrolls. *Chem Phys Lett* 411:81–85. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2005.05.100>.
- [47].Šťastn M, te ngl V, Henych J et al (2016) Mesoporous manganese oxide for the degradation of organophosphates pesticides. *J Mater Sci* 51:2634–2642. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9577-9>.
- [48].Bootharaju MS, Pradeep T (2012) Understanding the degradation pathway of the pesticide, chlorpyrifos by noble metal nanoparticles. *Langmuir* 28:2671–2679. <https://doi.org/10.1021/la2050515>.
- [49].Silva VB, Rodrigues TS, Camargo PHC, Orth ES (2017) Detoxification of organophosphates using imidazole-coated Ag, Au and AgAu nanoparticles. *RSC Adv* 7:40711–40719. <https://doi.org/10.1039/c7ra07059d>.
- [50].Ramaseshan R, Ramakrishna S (2007) Zinc titanate nanofibers for the detoxification of chemical warfare simulants. *J Am Ceram Soc* 90:1836–1842. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01633.x>.
- [51].Sundarrajan S, Ramakrishna S (2007) Fabrication of nanocomposite membranes from nanofibers and nanoparticles for protection against chemical warfare stimulants. *J Mater Sci*. 42:8400–8407. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1786-4>.
- [52].Aubert SD, Li Y, Raushel FM (2004) Mechanism for the hydrolysis of organophosphates by the bacterial phosphotriesterase. *Biochemistry* 43:5707–5715. <https://doi.org/10.1021/bi0497805>.
- [53].Han D, Filocamo S, Kirby R, Steckl AJ (2011) Deactivating chemical agents using enzyme-coated nanofibers formed by electrospinning. *ACS Appl Mater Interfaces* 3:4633–4639. <https://doi.org/10.1021/am201064b>.
- [54].Moss RA, Alwis KW, Bizzigotti GO (1983) o-Iodosobenzoate: catalyst for the micellar cleavage of activated esters and phosphates. *J Am Chem Soc* 105:681–682. <https://doi.org/10.1021/ja00341a092>.

- [55].Moss RA, Alwis KW, Shin JS (1984) Catalytic cleavage of active phosphate and ester substrates by iodoso- and iodoxybenzoates. *J Am Chem Soc* 106:2651–2655. <https://doi.org/10.1021/ja00321a027>.
- [56].Menger FM, Rourk MJ (1999) Deactivation of mustard and nerve agent models via low temperature microemulsions. *Langmuir* 15:309–313. <https://doi.org/10.1021/la980910i>.
- [57].Li Y-F, Ha Y-M, Guo Q, Li Q-P (2015) Synthesis of two β -cyclodextrin derivatives containing a vinyl group. *Carbohydr Res* 404:55–62. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2014.11.012>.
- [58].Echavia GRM, Matzusawa F, Negishi N (2009) Photocatalytic degradation of organophosphate and phosphonoglycine pesticides using TiO₂ immobilized on silica gel. *Chemosphere* 76:595–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.055>.
- [59].Di Valentin C, Pacchioni G, Selloni A (2009) Reduced and n-type doped TiO₂: nature of Ti³⁺ species. *J Phys Chem C* 113:20543–20552. <https://doi.org/10.1021/jp9061797>.
- [60].Hong KH, Park JL, Hwan Sul IN et al (2006) Preparation of antimicrobial poly(vinyl alcohol) nanofibers containing silver nanoparticles. *J Polym Sci B Polym Phys* 44:2468–2474. <https://doi.org/10.1002/polb.20913>.
- [61].Duan YY, Jia J, Wang SH et al (2007) Preparation of antimicrobial poly(ϵ -caprolactone) electrospun nanofibers containing silver-loaded zirconium phosphate nanoparticles. *J Appl Polym Sci* 106:1208–1214. <https://doi.org/10.1002/app.26786>.
- [62].Haider A, Kwak S, Gupta KC, Kang IK (2015) Antibacterial activity and cytocompatibility of PLGA/CuO hybrid nanofiber scaffolds prepared by electrospinning. *J Nanomater* 2015:1–10. <https://doi.org/10.1155/2015/832762>.
- [63].Yuan J, Geng J, Xing Z et al (2010) Electrospinning of antibacterial poly(vinylidene fluoride) nanofibers containing silver nanoparticles. *J Appl Polym Sci* 116:668–672. <https://doi.org/10.1002/app.31632>.
- [64].Kim SJ, Nam YS, Rhee DM et al (2007) Preparation and characterization of antimicrobial polycarbonate nanofibrous membrane. *Eur Polym J* 43:3146–3152. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.046>.
- [65].Ignatova M, Starbova K, Markova N et al (2006) Electrospun nano-fibre mats with antibacterial properties from quaternised chitosan and poly(vinyl alcohol). *Carbohydr Res* 341:2098–2107. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.05.006>.
- [66].Chen L (2009) Next generation of electrospun textiles for chemical and biological protection and air filtration. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp 1–165.
- [67].Kent JA (2012) Handbook of industrial chemistry and biotechnology. Springer, Berlin, pp 1–562.

- [68].Kiekens P, Jayaraman S (2012) Intelligent textiles and clothing for ballistic and NBC protection: technology at the cutting edge. Springer, Berlin, pp 1–220.
- [69].69. Rothschild A, Komem Y (2003) Numerical computation of chemisorption isotherms for device modeling of semiconductor gas sensors. *Sensors Actuators B Chem* 93:362–369. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00212-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00212-0).
- [70].Wang J, Zhong Q, Wu J, Chen T (2014) Thermo-responsive textiles. In: *Handbook of smart textiles*. Springer, Singapore, pp 1–27.
- [71].Križman Lavrič P, Warmoeskerken MMCG, Jocic D (2012) Functionalization of cotton with poly-NiPAAm/chitosan microgel. Part I. Stimuli-responsive moisture management properties. *Cellulose* 19:257–271. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9632-x>.
- [72].Meldrum FC (2005) Biomineralisation processes. In: *Surfaces interfaces biomater*, pp 666–692. <https://doi.org/10.1533/9781845690809.4.666>.
- [73].Safadi B, Andrews R, Grulke EA (2002) Multiwalled carbon nanotube polymer composites: synthesis and characterization of thin films. *J Appl Polym Sci* 84:2660–2669. <https://doi.org/10.1002/app.10436>.
- [74].Hu J, Zhu Y, Huang H, Lu J (2012) Recent advances in shape-memory polymers: structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Prog Polym Sci* 37:1720–1763. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.06.001>.
- [75].Uchino K (2010) Advanced piezoelectric materials science and technology. Woodhead Publ, Sawston, pp 1–678.
- [76].Fink JK (2012) Polymeric sensors and actuators. Wiley, Hoboken, pp 1–512.
- [77].Liu YY, Wang RH, Lu HF et al (2007) Artificial lotus leaf structures from assembling carbon nanotubes and their applications in hydrophobic textiles. *J Mater Chem* 17:1071–1078. <https://doi.org/10.1039/B613914k>.
- [78].Banerjee S, Dionysiou D, Pillai S (2015) Self-cleaning applications of TiO₂ by photoinduced hydrophilicity and photocatalysis. *Appl Catal B Environ* 176:396–428. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.058>.
- [79].Momeni MM, Ghayeb Y, Ghonchegi Z (2015) Fabrication and characterization of copper doped TiO₂ nanotube arrays by in situ electrochemical method as efficient visible-light photocatalyst. *Ceram Int* 41:8735–8741. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.094>.
- [80].Wu D, Long M, Zhou J et al (2009) Synthesis and characterization of self-cleaning cotton fabrics modified by TiO₂ through a facile approach. *Surf Coat Technol* 203:3728–3733. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.06.008>.

- [81].Kaihong Qi K, Xiaowen Wang X, Xin JH (2011) Photocatalytic self-cleaning textiles based on nanocrystalline titanium dioxide. *Text Res J* 81:101-110. <https://doi.org/10.1177/0040517510383618>.
- [82].Liu C, Qin H, Mather PT et al (2007) Review of progress in shape-memory polymers. *J Mater Chem* 17:1543. <https://doi.org/10.1039/b615954k>.
- [83].Han HR, Chung SE, Park CH (2013) Shape memory and breathable waterproof properties of polyurethane nanowebs. *Text Res J* 83:76-82. <https://doi.org/10.1177/0040517512450757>.
- [84].Pretzsch T (2010) Review on the functional determinants and durability of shape memory polymers. *Polymers* 2:120-158. <https://doi.org/10.3390/polym2030120>.

فصل پنجم

فیلترهای الکتروریسی شده

برای حذف فلزات سنگین

روی زانو^۱، زیانگ لی^۲ و سی وانگ^۳

¹. Rui Zhao

². Xiang Li

³. Ce Wang e-mail: cwang@jlu.edu.cn

چکیده

به دلیل تخلخل بالا، نسبت سطح به حجم زیاد، ویژگی‌های فیلمی و اتصال درون شبکه‌ای الیاف الکتروریسی شده، پتانسیل بسیار خوبی در تصفیه پساب بهویشه در زمینه حذف فلزات سنگین نشان داده‌اند. جذب و فیلتراسیون متداول‌ترین روش برای تصفیه پساب آلوده به فلزات سنگین است. در اختیار داشتن ویژگی‌های فوق باعث می‌شود که الیاف الکتروریسی شده جاذب یا فیلتر مناسبی باشند. جذب فرآیندی نسبتاً استاتیک است که در آن جاذب‌ها از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی در محلول آلوده توسط جاذب، جذب می‌شوند. تصفیه یک فرایند پویا است که پساب آلوده را که با وزن خود یا سایر نیروها از طریق فیلترها عبور می‌کند، شامل می‌شود تا آلاینده‌ها را از پساب جدا کنند؛ با این حال، فیلتر یون‌های فلزی سنگین توسط فیلترهای الکتروریسی شده، عمدهاً به دلیل فرایندهای جذب بین فیلترها و یون‌های فلزی است و جاذب‌های الکتروریسی شده برای ترمیم فلزات سنگین به‌طور گسترشده قرار می‌گیرند؛ بنابراین، دامنه این فصل بر دو محدوده (جادب‌های الکتروریسی شده و فیلترهای حذف فلزات سنگین) متمرکز شده است و نمونه‌هایی از جاذب‌های الکتروریسی شده یا فیلترهایی که برای حذف فلزات سنگین استفاده می‌شوند را نشان می‌دهد.

۱-۵- مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و صنعتی شدن، مانند تأسیسات آب‌کاری فلز، صنایع کود، معدن، دباغی، باتری، ماشین‌سازی، سmom دفع آفات و غیره باعث شده است که پساب آلوده به فلزات سنگین در سراسر دنیا افزایش یابد [۳-۱] بر اساس یک گزارش تحقیقاتی اخیر، به دلیل فشار زیاد به منابع آب شیرین در دسترس، کمبود منابع آب چالش بزرگتری برای سال ۲۰۳۰ خواهد بود [۴، ۵]، به عنوان نوعی آلاینده مهم، فلزات سنگین قابل تجزیه نیستند و تمایل دارند که در موجودات زنده جمع شوند [۶].

فلزات سنگین موجود رایج در آب‌ها مانند: سرب، جیوه، کادمیم، کروم، مس، نیکل، روی و غیره است. اگرچه مقادیر کمی از فلزات سنگین مختلف برای انسان‌ها ضروری است، اما فلزات سنگین بیش از حد خطرناک در آب یک خطر و یک مشکل زیست‌محیطی قابل توجه در سراسر جهان است. علاوه براین، بیشتر فلزات سنگین بسیار سمی یا سرطان‌زا هستند. در این موضوع از روش‌های متداول و مدرن مختلفی مانند ته‌نشینی شیمیایی، تبادل یونی، جذب، تصفیه غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی، انعقاد و لخته سازی، شناورسازی و غیره استفاده شده است تا در چند دهه گذشته برای تصفیه آب آلوده به فلزات سنگین استفاده شود [۱۰-۷].

جذب و تصفیه یکی از روش‌های برتر برای از بین بردن یون‌های فلزات سنگین از پساب به دلیل مزایای بهره‌برداری آسان، هزینه کم و بازدهی بالا است. جذب فرایندی است که در آن جاذب‌ها از طریق فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی در محلول آلوده توسط جاذب، جذب می‌شوند. فرایند جذب آسان است؛ علاوه براین، این فرایند عمدهاً برگشت‌پذیر است و جاذب‌ها می‌توانند از طریق یک فرایند دفع مناسب احیا شوند. فرایند تصفیه شامل پساب آلوده شده است که از طریق وزن خود یا سایر نیروها از فیلترها عبور می‌کند تا آلاینده‌ها را از پساب جدا کند. در مقایسه با فرایند تصفیه که دینامیک می‌باشد، جذب فرایندی نسبتاً استاتیک است. برای فرایندهای جذب یا تصفیه، ظرفیت و انتخاب پذیری حذف، مهم‌ترین ویژگی جاذب یا فیلترها هستند که به مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. برای از بین بردن یون‌های فلزات سنگین، مواد زیادی برای این دو فرایند استفاده شده است. در بین این مواد، مواد یافی الکتروریسی شده تک‌بعدی در سال‌های اخیر در این دو زمینه، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۶-۱۴].

الکتروریسی یک روش آسان، مؤثر، کم‌هزینه و بسیار متنوع برای تولید الیاف مداوم یک‌بعدی با قطر تا حد نانومتر تحت تأثیر یک میدان الکتریکی قوی است. نخستین توصیف از یک دستگاه برای روش الکتروریسی توسط فرمهالز در سال ۱۹۳۴ به عنوان ثبت اختراع نشان داده شد. با این حال تا اوایل دهه ۱۹۹۰، این روش مورد توجه زیادی قرار نگرفت [۱۷]. سپس، رنکی^۱ و همکاران سهم به سزاوی در توسعه این روش داشتند [۲۲-۱۸].

اجزای دستگاه الکتروریسی معمولی شامل سه مؤلفه اصلی منبع تغذیه با ولتاژ بالا، رشته‌ساز و جمع کننده است. در طی فرایند الکتروریسی، یک میدان الکتریکی بالا به قطره تشکیل شده در یک سیال (محلول یا مذاب پلیمری) که از رشته ساز و جمع کننده خارج می‌شود، اعمال می‌شود. هنگامی که قدرت میدان الکتریکی به اندازه کافی از کشش سطحی قطرات پلیمری بیشتر شود، یک جت مایع باردار شده تشکیل می‌شود و درنهایت برای تشکیل یک محروم‌تیلور کشیده می‌شود. تحت تأثیر میدان الکتریکی، جت به سمت جمع کننده شتاب می‌گیرد و منجر به تشکیل الیاف مداوم می‌شود [۲۴، ۲۳].

الیاف الکتروریسی شده با توجه به ابعاد کم و سطح مخصوص بزرگی که دارد محدوده وسیعی از کاربردها مانند قالب‌هایی برای ساخت سایر نانوساختارها، فیلترها، منسوجات، کاتالیزگرهای حسگرها، داربست‌های پزشکی، مواد انرژی و غیره را شامل می‌شوند [۲۵-۲۸]. یکی از مزایای روش الکتروریسی، طراحی انعطاف‌پذیر این مجموعه برای تهیه محصول با ترکیب و ساختار خاص است [۲۳، ۲۵]؛ علاوه براین، الیاف الکتروریسی شده دارای تخلخل بالا، نسبت سطح به حجم وسیع،

^۱. Reneker

آماده‌سازی آسان، تشكیل غشا و انعطاف‌پذیری مناسب را نشان می‌دهند و آن‌ها را در زمینه‌های جذب و تصفیه مناسب می‌کند [۱۵، ۱۶]. در چند سال گذشته، برای از بین بردن فلزات سنگین، الیاف الکتروریسی شده موردنظر قرار گرفته است [۲۹]. برای مواد الیافی الکتروریسی شده، مکانیسم حذف بین الیاف و فلزات سنگین عمدتاً برهمنکنش شیمیایی (مانند برهمنکنش کی لیت ساز^۱ و الکترواستاتیک) است.

علاوه براین، برهمنکنش فیزیکی نیز یک عامل تعیین‌کننده است [۱۴، ۲۹]. بهمنظور حذف فلزات سنگین، محققان انواع مختلفی از الیاف الکتروریسی شده از جمله نانوالیاف معدنی، نانوالیاف آلی و نانوالیاف کامپوزیتی آلی / معدنی را با ساختارهای مختلف طراحی کردند. جذب و تصفیه رایج‌ترین روش‌ها برای تصفیه پساب فلزات سنگین است. شاعر یونی یون‌های فلزات سنگین بسیار کوچک است و تصفیه فلزات سنگین توسط غشای الیافی الکتروریسی شده به‌طور عمده به فرایند جذب شیمیایی بستگی دارد؛ بنابراین، هدف اکثر تحقیقات جذب استاتیک است که پایه و اساس فیلتراسیون فلزات سنگین است و تحقیقات فیلتراسیون دینامیک محدود است. این فصل شامل دو بخش اصلی است: جاذبه‌ای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین استاتیک و فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین دینامیک. به‌طور خاص، جاذب الکتروریسی شده فلزات سنگین در جزئیات ارائه شده است.

۵-۲- جاذبه‌ای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین

با توجه به ویژگی‌های ذکر شده در بالا (نسبت سطح به حجم زیاد، آماده‌سازی آسان، تشكیل غشای مناسب و طراحی انعطاف‌پذیر) انواع مختلفی از الیاف الکتروریسی شده از جمله نانوالیاف معدنی، نانوالیاف آلی و نانو الیاف کامپوزیتی آلی / معدنی با ساختارهای مختلف برای جذب یون‌های فلزات سنگین در پساب آماده شده‌اند.

۵-۲-۱- نانو الیاف الکتروریسی شده معدنی

متداول‌ترین روش برای تهییه نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی ترکیب روش‌های الکتروریسی و سل-ژل^۲ است. نانوالیاف معدنی با روش زیر به دست می‌آیند: (۱) تهییه محلول رسنندگی حاوی یک پیش‌ساز سل-ژل (۲) الکتروریسی محلول سل-ژل و (۳) کلسینه کردن^۳ نانو الیاف الکتروریسی شده در قالب‌های آلی حذف هوا برای به دست آوردن نانوالیاف معدنی. نانوالیاف معدنی دارای سطح

¹. Chelating

². Sol-gel

³. Calcination

مخصوص بالا و تمایل خاصی برای جذب هستند؛ علاوه بر این، فناوری الکتروریسی کم‌هزینه می‌باشد و در عین حال بازده بالایی را نشان می‌دهد [۳۰، ۲۷].

انواع مختلفی از نانو الیاف الکتروریسی شده معدنی مانند نانو الیاف معدنی تک جزئی و چند جزئی برای جذب یون‌های فلزات سنگین استفاده می‌شوند. این اکسید فلزی در مقیاس نانو به دلیل داشتن خواص فیزیکی و شیمیایی خوبی که دارد، حاوی جذب بالای کاتیون‌ها و آنیون‌ها در محیط‌های طبیعی است. آب در نظر گرفته می‌شود. در کار گروه میونگ^۱، الکتروریسی یک مسیر سنتز ساده برای ایجاد نانوالیاف $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ با قطر متوسط مختلف از ۲۳ تا ۶۳ نانومتر فراهم می‌کند [۳۱].

با توجه به افزایش نسبت سطح به حجم با کاهش اندازه نانوالیاف، مساحت سطح مخصوص نانوالیاف $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ با کاهش قطر متوسط، از $۵۹/۲$ به $۷/۲$ مترمربع در گرم افزایش یافته است. از نانوالیاف $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ به دست آمده برای جذب CrO_4^{2-} مطابق با ایزووترمهای مناسب لانگمیور استفاده شده بود، کوچک‌ترین نانوالیاف Fe_2O_3 با قطر ۲۳ نانومتر دارای ظرفیت جذب $۹۰/۹ \text{ mg/g}$ می‌باشد که دو برابر بزرگتر از نانوذرات تجاری Fe_2O_3 بوده است. بهمنظور بهبود ظرفیت جذب در برابر یون‌های فلزات سنگین، نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی نیز توسط یک فرایند کاربردی اصلاح شدند. ما^۲ و همکاران تولید در مقیاس بزرگ مزو تخلخل SiO_2 با مساحت سطح مخصوص زیاد، انعطاف‌پذیری بالا و ریخت‌شناسی الیاف بلند را گزارش کردند [۳۲]. همان‌طور که در شکل b و ۱-۵a نشان داده شده است، الیاف SiO_2 از یک هسته

غیر متخلخل از نانوالیاف SiO_2 و یک پوسته مزو تخلخل ($n\text{SiO}_2 @ m\text{SiO}_2$) تشکیل شده است. نانوالیاف SiO_2 غیرمتخلخل انعطاف‌پذیر با استفاده از الکتروریسی تهیه شد که به دنبال آن توسط یک پوسته SiO_2 مزو تخلخل بر اساس روش استوبر^۳ اصلاح شده پوشش داده می‌شود. برای بهبود عملکرد جذب، (۳-مرکاپتوپروپیل) تری متوكسی سیلان^۴ به عنوان عامل اتصال به گروه‌های تیول^۵ معین شده بر روی سطح $n\text{SiO}_2 @ m\text{SiO}_2$ پیوند زده شد. پس از پیوند گروه‌های تیول، میزان جذب و ظرفیت برای یون‌های Cd^{2+} به طور قابل توجهی افزایش یافته بود. زمان تعادل از ۳۰ دقیقه به ۱۰ دقیقه کاهش یافته و ظرفیت جذب اشتعاب از $۱۸/۰/۹$ میلی‌گرم در گرم به $۳۰/۲/۲$ میلی‌گرم در گرم افزایش یافته است (شکل ۱-۵c). نویسنده‌گان همچنین $n\text{SiO}_2 @ m\text{SiO}_2$ را به فیلم‌های تصفیه پیوند زدند. برای Cd^{2+} ، پس از عبور از چهار

^۱. Myung group

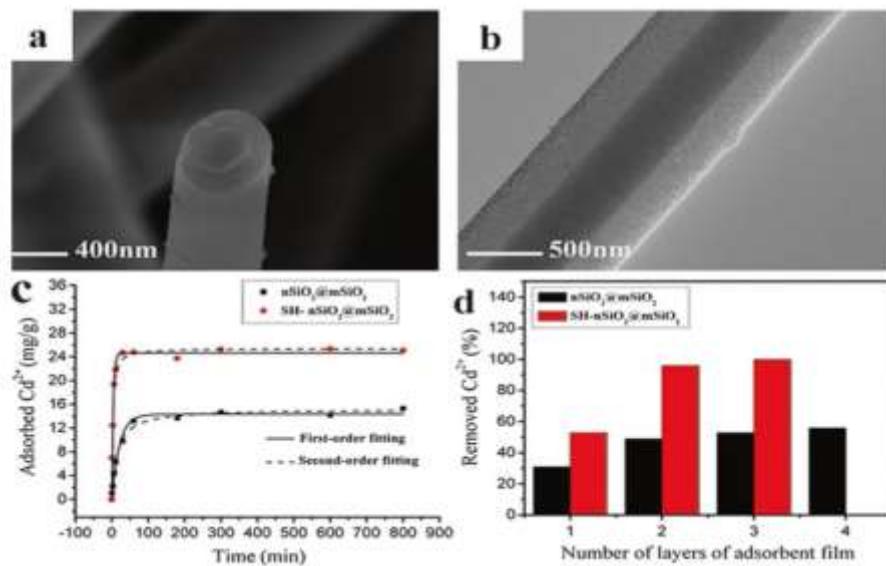
^۲. Ma

^۳. Stober

^۴. (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane

^۵. Thiol

لایه از فیلم‌های Cd^{2+} یون‌های $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ در تصفیه باقی‌مانده، در حالی که ۹۶٪ لایه از فیلم‌های $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ عامل‌دار شده با تیول حذف شده است (شکل ۱ d).



شکل ۱-۵ (a) تصویر SEM با بزرگنمایی بالا و (b) تصویر TEM از یک نک الیاف $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ سینتیک جذب Cd^{2+} توسط $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ و تیول پیوند خورده به (d) $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ عامل‌دار جذب فیلم‌های الگودار شده از $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$ و تیول پیوند خورده به [۳۲] Cd^{2+} برای $\text{nSiO}_2 @ \text{mSiO}_2$.

علاوه بر نانوالیاف الکتروریسی شده اکسید فلزی، انواع دیگری از نانوالیاف معدنی با ساختارهای ویژه نیز تهیه شده است. جین^۱ و همکاران از روش الکتروریسی و روش گرمابی^۲ برای سنتز نانوالیاف توخالی دوجداره سیلیکات منیزیم^۳ (MSHNFs) با یک نانو ساختار سلسله مرتبه‌ای استفاده کردند [۳۳]. مواد سیلیکات منیزیم به دلیل کم‌هزینه بودن، دوست دار محیط‌زیست بودن و ساختارهای جالب به عنوان جاذب قابل توجه هستند. MSHNFs با استفاده از یک روش ساده گرمابی با استفاده از نانوالیاف توخالی الکتروریسی شده SiO_2 (SHNFs)^۴ به عنوان یک قالب فداکارانه سنتز می‌شود. SHNFs برای تشكیل آنیون‌های سیلیکات در شرایط قلیایی در طی فرایند گرمابی حل شدند و سپس با یون‌های منیزیم برای تشكیل سیلیکات منیزیم واکنش نشان دادند و پس از آن در هر دو

¹. Jin

². Hydrothermal

³. magnesium silicate double-walled hollow nanofibers (MSHNFs)

⁴. SiO₂ hollow nanofibers (SHNFs)

طرف دیواره SHNFs قرار می‌گیرد. با ادامه روند گرمایی، دیوار SHNFs می‌تواند کاملاً حل شود تا حفره ثانویه تشکیل شود. MSHNFs تهیه شده دارای سطح مخصوص بالا (۶۳۲/۲ مترمربع در گرم) و حجم منافذ بزرگ (۹۲/۰ سانتی‌متر مکعب در گرم) بودند. MSHNFs ظرفیت جذب بالا (۱۵۸ میلی‌گرم در گرم) در برابر Pb^{2+} را از طریق تبادل یونی نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه این است که MSHNFs از پیش آماده شده می‌تواند به راحتی توسط تهشیینی گرانشی از هم جدا شوند. نتایج فوق نشان داد که MSHNFs مواد امیدوارکننده‌ای برای کاربرد تصفیه آب بودند. در کار دیگری از گروه دو^۱، نانولوله‌های متخلخل سیلیکا^۲ (SNTs) با ساختار نانولوله‌ای کنترل شده از طریق فرایند الکتروریسی و کلسینه شدن با تغییر محتاب TEOS^۳ در پیش ساز و کنترل مناسب نرخ کلسینه شدن سنتز می‌شوند (شکل ۲-۵) [۳۴]. نانولوله‌های سیلیکا به دست آمده جاذبهای ایده آل برای حذف بودند. علاوه بر این، سطح SNTs توسط دی‌فنیل کربازید^۴ برای توانایی جذب بیشتر اصلاح شدند. عملکرد جذب SNTs و اصلاح شده در برابر Pb^{2+} به طور مفصل مورد بحث قرار گرفت، از جمله اثرات مقدار pH، مطالعات سینتیکی، ایزووترم‌های جذب و مکانیسم جذب. SNTs از پیش آماده شده و SNTs اصلاح شده همچنین توانایی جذب بالایی را برای Cd^{2+} و Co^{2+} نشان داده‌اند که نشان‌دهنده توانایی عالی آن‌ها در تصفیه پساب آلووده به یون‌های فلزی سنگین است.

در مقایسه با نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی تنها، علاقه زیادی به سنتز نانوالیاف اکسید فلزی مخلوط و نانوالیاف کامپوزیتی مواد معدنی / کربن وجود دارد. با توجه به اثرات هم‌افزایی دو یا چند جزئی، ظرفیت جذب توسط نانوالیاف مخلوط یا کامپوزیتی بهبود می‌یابد.

مالوال^۵ و همکاران نانوالیاف کامپوزیتی CuO-ZnO با یک روش الکتروریسی ساده و پس از آن کلسینه کردن، سنتز نمودند. نانوالیاف کامپوزیتی از پیش آماده شده برای جذب از آب استفاده می‌شود. مشخص شد که نانوالیاف کامپوزیتی CuO-ZnO دارای سرعت جذب سریع و ظرفیت جذب بالایی نسبت به نانوالیاف ZnO خالص می‌باشد؛ همچنین مشاهده شد که داده‌های جذب به عنوان نانوالیاف کامپوزیت CuO-ZnO با مدل‌های ایزووترم لانگمیور و فرننلیچ به خوبی مطابقت دارند. بر اساس مدل ایزووترم جذب لانگمیور، حداکثر ظرفیت جذب ۲۷/۷ میلی‌گرم در گرم بود. این مخلوط یک روش ساده برای تهیه نانوالیاف اکسید فلز مخلوط است

¹. Du^g group

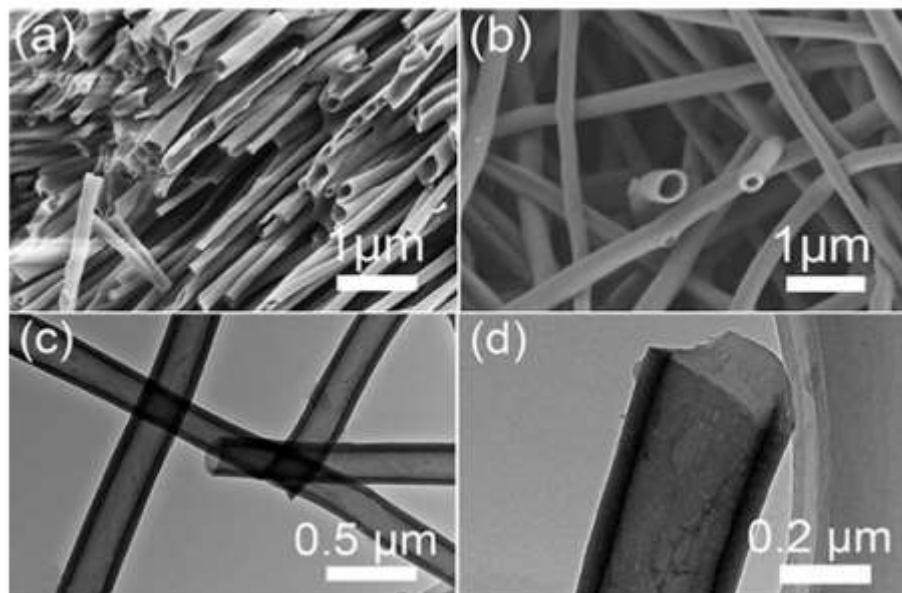
². porous silica nanotubes (SNTs)

³. Tetraethyl orthosilicate (TEOS)

⁴. sym-diphenylcarbazide

⁵. Malwal

و نانوالیاف اکسید فلزی با معماری خاص نیز ساخته می‌شوند. لی^۱ و همکاران گزارش کردند که نانوالیاف پوسته-مغزی $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ - $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ توسط فرایند الکتروریسی و ترکیب با رسوب بخار و روش‌های عملیات حرارتی سنتر می‌شوند [۳۶]. نانوالیاف کامپوزیتی خواص فرومغناطیسی را نشان داد و برای حذف یون‌های Cr(VI) استفاده شد. روند جذب از معادله شبه مرتبه دوم و مدل ایزوترم فرندیچ پیروی می‌کند. مکانیسم جذب کروم (VI) بر روی $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ به جذب Cr (VI) و جفت الکترون-حفره ارائه شده توسط Fe_2O_3 که باعث احیا Cr (III) به Cr (VI) می‌شود، نسبت داده شده است.



شکل ۲-۵ (a) و (b) تصاویر SEM و (c) و (d) تصاویر TEM از نانولوله‌های سیلیکا [۳۴]

کربن به عنوان یک ماده ارزان و متداول برای کاربردهای جذب در نظر گرفته می‌شود. در همین راستا، نانوالیاف کامپوزیتی مواد معدنی / کربن نیز برای از بین بردن فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوالیاف خالص معدنی به وسیله کلسینه کردن الیاف کامپوزیت نمک / پلیمر معدنی در اتمسفر هوا برای حذف الگوهای آلی بدست آمده است. نانوالیاف کربن از الیاف الکتروریسی شده به وسیله کلسینه کردن الیاف پلیمری در جو گاز بی اثر از طریق فرایند کربونیزه کردن تهیه شد.

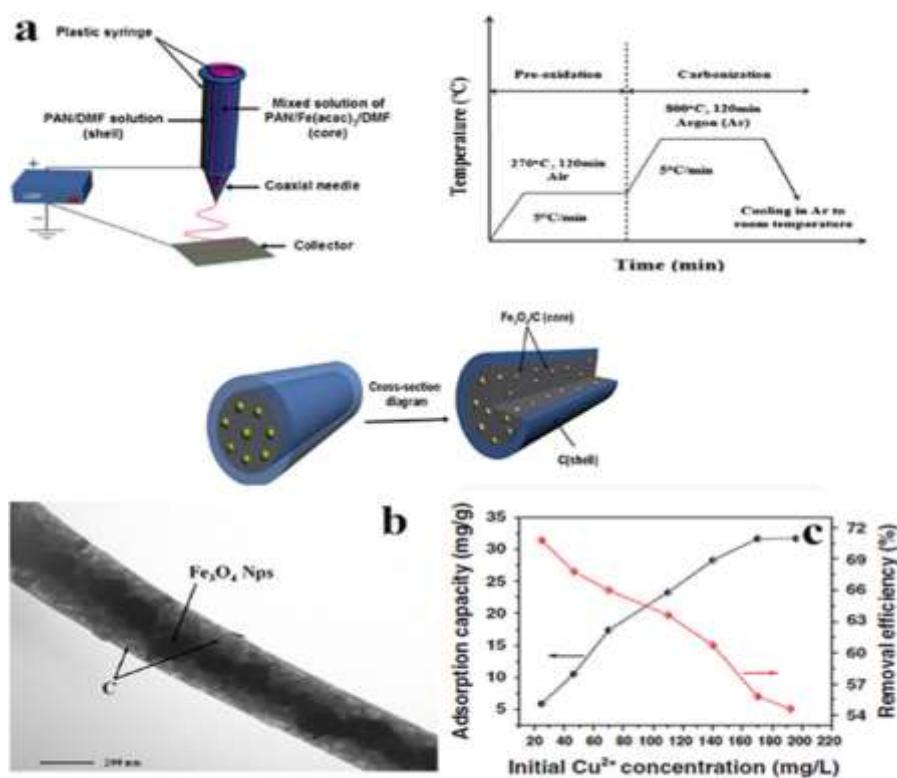
¹. Li

هان^۱ و همکاران یک روش آسان برای تهیه نانوکابل‌های^۲ هم محور C/[Fe₃O₄]@C با روش الکتروریسی و کربونیزه کردن گزارش دادند [۳۷].

طرح‌واره‌ی روند آماده‌سازی در شکل ۵-۳a نشان داده شده است. نانوکابل‌های هم محور با تغییر محتوای Fe₃O₄, هدایت الکتریکی و عملکرد مغناطیسی مطلوبی را نشان داد. نانوکابل‌های هم محور C/[Fe₃O₄]@C به دلیل Fe₃O₄, اجزای C و ساختارهای متخلخل آن‌ها، جذب خوبی را در برابر Cu²⁺ نشان داده‌اند. حداکثر ظرفیت جذب ۶۴/۰۶ mg/g در گرم بود (شکل ۵-۳c). با توجه به عملکرد مغناطیسی، جاذب می‌تواند به راحتی بازیافت شود. در یک تحقیق دیگر، ZrO₂ تعبیه‌شده در نانوسیم‌های کربنی (ZCNs) به‌وسیله کلسینه کردن نانوسیم‌های کامپوزیتی / PVP تحت نیتروژن (N₂) ساخته شده است [۳۸]. از نانوسیم‌های کربن به‌عنوان پشتیبان برای بهبود خواص فیزیکی و کاهش هزینه کلی آن‌ها استفاده می‌شود. عملکرد جذب آرسنیک (As) بر روی ZCNs موردنبررسی قرار گرفت. طیف وسیعی از pH برای جذب (III) As مقدار ۵ تا ۱۱ و برای جذب (V) As مقدار ۹ تا ۵ به دست آمد. حداکثر مقدار جذب برای (III) As و (V) As در ZCNs به ترتیب مقدار ۱۰۶/۵۷ mg/g و ۲۸/۶۱ mg/g بوده که بالاتر از مقدار جذب برای نانوالیاف ZrO₂ خالص می‌باشد که اثرات هم‌افزایی این دو جزء را نشان می‌دهد. ترمودینامیک جذب و ایزوترم جذب نشان داد که فرایندهای جذب گرمایش بوده و از مدل ایزوترم فرننلیچ پیروی می‌کنند؛ علاوه بر مثال‌هایی که در بالا ذکر شد، چندین نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی دیگر برای جذب فلزات سنگین وجود دارد. در جدول ۱-۵ ۱۱ انواع جاذب‌های فلزات سنگین بر اساس نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی نشان داده شده است.

¹. Han

². Nanocables



شکل ۳-۵- (a) طرح وارهای از سنتز نانوکابل‌های هم محور [C/Fe₃O₄]@C] از نانوکابل‌های TEM (b) C/Fe₃O₄]@C] (c) اثر غلظت اولیه Cu²⁺ بر روی ظرفیت جذب و درصد حذف [۳۷].

۲-۵- نانو الیاف الکتروریسی شده آلی

اگرچه نانو الیاف الکتروریسی شده معدنی ظرفیت جذب خوبی نسبت به فلزات سنگین را نشان می‌دهند، اما استحکام مکانیکی نانو الیاف معدنی محدود است و بیشتر نانو الیاف‌های الکتروریسی شده معدنی به صورت پودر هستند و باعث محدود شدن کاربردهای عملی آن‌ها می‌شوند. نانو الیاف پلیمری الکتروریسی شده دارای خواص شکل‌گیری فیلم خوب و خواص مکانیکی رضایت‌بخش هستند. علاوه بر این، بیشتر پلیمرها دارای گروه‌های عاملی ای هستند که می‌توانند با یون‌های فلزی به هم متصل شوند. بسیاری از پلیمرهای مصنوعی و پلیمرهای طبیعی به عنوان جاذب‌های الیافی فلزات سنگین الکتروریسی شده‌اند. جاذب‌های الیافی الکتروریسی شده پلیمری با ظرفیت جذب بالا، می‌توانند با استفاده از الکتروریسی ترکیبی، اصلاح پیوند، پوشش سطحی، ترکیب مواد کاربردی، منقوش کردن و غیره حاصل شوند.

به عنوان یک پلیمر مصنوعی رایج، الیاف پلی آکریلونیتریل (PAN) یک ماتریس پلیمری در دسترس و کم‌هزینه با گروههای سیانو^۱ ($\text{C}\equiv\text{N}$) فراوان است. پلیمر PAN خام ظرفیت جذب کمی نسبت به فلزات سنگین نشان می‌دهد و ظرفیت جذب آن به تعدادی از گروههای عاملی متصل به گروههای سیانو وابسته است [۴۴، ۴۵]. تلاش‌های زیادی بر روی الیاف الکتروریسی شده پیوند خورده PAN برای حذف فلزات سنگین متمرکز شده است. نقلانی^۲ و همکاران نانو الیاف پلی آکریلونیتریل آمین دار شده^۳ (APAN) را از طریق اصلاح الیاف الکتروریسی شده PAN توسط دی اتیلن تری آمین^۴ تهیه کردند [۴۶]. رفتارهای جذب آن‌ها نسبت به Cu^{2+} مورد بررسی قرار گرفت و نانوالیاف PAN آمین دار شده ظرفیت جذب پنج برابر بیشتر از میکروالیاف PAN آمین دار شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهندهی مزیت نانوالیاف الکتروریسی شده است. حداقل ظرفیت جذب مبتنی بر مدل لانگمیور برای یون‌های Cu(II) برابر $116/52 \text{ mg/g}$ بود. عوامل ترمودینامیکی نشان داد که روند جذب گرمایزا بوده و می‌تواند به عنوان یک فرایند جذب شیمیایی در نظر گرفته شود؛ علاوه بر گروههای آمین، برخی گروههای عاملی دیگر نیز بر روی سطح الیاف PAN پیوند زده می‌شوند.

¹. Cyano groups

². Neghlani

³. aminated polyacrylonitrile (APAN)

⁴. diethylenetriamine

جدول ۵-۱- نانو الیاف الکترورسی شده معدنی به عنوان جاذب فیلترات سنجین

جاذب	فلز سنجین	بهینه pH	(mg/g)	ظرفیت جذب	مراجع
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanofibers	CrO_4^{2-}	۶	۹۰/۹		[۳۱]
Anatase mesoporous TiO_2 nanofibers	Cu^{2+}	۶	۱۲/۸		[۳۹]
Electrospun meso-hydroxylapatite nanofibers	Co^{2+}	۶/۵	۸/۱۴		[۴۰]
MgSi double-walled hollow nanofibers	Pb^{2+}	-	۱۵۸		[۳۳]
Thiol-modified nonporous SiO_2 @mesoporous SiO_2 fibers	Cd^{2+}	-	۳۰/۲۲		[۳۲]
Sym-diphenylcarbazide-modified silica nanotubes	Pb^{2+}	-	۱۵۴/۷		[۳۴]
Zonal thiol-functionalized silica nanofibers	Pb^{2+}	۷	۱۱۲/۳۶		[۳۴]
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ core-shell nanofibers	Hg^{2+}	-	۵۷/۴۹		[۴۱]
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanocomposite fibers	CrO_4^{2-}	۲	۵۷/۳۴		[۳۹]
Electrospun $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanocomposite fibers	CrO_4^{2-}	۶	۴/۹۸		
Pb^{2+}	۶	۲۳۷/۷			[۴۲]
Ni^{2+}	۶	۳۲/۳۶			
Hg^{2+}	۶	۹۳/۶۹			
CuO-ZnO composite nanofibers	AsO_2^-	۱۰-۴	۲۷/۷		[۲۵]
ZrO_2 embedded in carbon nanowires	AsO_2^-	۱۱-۵	۲۸/۹۱		[۳۸]
Mesoporous hydroxylapatite/activated carbon bead-on-string nanofibers	HAsO_4^{2-}	۹-۵	۱۰/۶۷		
$[\text{C/Fe}_3\text{O}_4]@C$ coaxial nanocables	Co^{2+}	۶/۵	۸/۲۴		[۴۳]
	Cu^{2+}	۶	۶۴۰/۶		[۳۷]

لی^۱ و همکاران یک غشای نانولیفی کی لیت ساز حاوی گروه تیو آمید برای جذب کارآمد یون‌های طلا را گزارش دادند [۴۷]. غشای نانولیفی کی لیت ساز توسط اتصال عرضی و تیو آمید دار کردن الیاف الکتروریسی شده PAN تهیه شد. فرایند تهیه و تصاویر SEM مربوطه در شکل a- d- ۵ نشان داده شده است. فرایندهای جذب در برابر یون‌های (III) Au با معادله شبه مرتبه دوم و ایزوترم جذب لانگمیور مطابقت دارد. حداکثر ظرفیت جذب در برابر یون‌های (III) Au با ۳۴۸، ۲۹۸، ۳۲۳ و ۲۳۰ میلی مول در گرم بود در صورتی که دما به ترتیب ۳۴۸/۸۶، ۲۹۸/۵۰ و ۳۲۳/۶۰ میلی مول در گرم بود. در سایر شرایطی که دما به ترتیب ۳۴۸، ۲۹۸ و ۲۳۰ می باشد (شکل ۴e-۵)؛ علاوه براین، نویسندهای مکانیسم احتمالی برای جذب (III) Au توسط غشاهای نانولیافی کی لیت ساز گروه تیو آمید را پیشنهاد کردند. این فرایند جذب ممکن است با فرایند احیا توسط احیا عناصر (I) Au و (۰) Au، سپس نانوذرات طلا، (III) Au و (I) Au توسط نانولیاف کی لیت ساز گروه تیو آمید جذب شوند (شکل ۴f-۵). در یک کار پیوند زدن دیگر، ژائو^۲ و همکارانش با استفاده از روش الکتروریسی، پوشش نانولیفی بر اساس PAN فسفریله شده که به دنبال آن اتصال عرضی، آمین دار کردن و اصلاحات پیوندی فسفریله شده^۳ می باشد را با محتوای فسفر ۵/۴۵mg/g تهیه کردند [۴۸]. الیاف پیوند دار شده، ظرفیت جذب خوبی نسبت به یون‌های Pb²⁺، Cu²⁺ و Ag⁺ نشان دادند. تمامی معادلات سینتیک جذب از معادله شبه مرتبه دوم پیروی می کند. در مقایسه با الیاف اتصال عرضی شده و آمین دار شده، نانولیاف PAN فسفریله شده دارای مقادیر تعادل جذب بالاتر نسبت به یون‌های Pb²⁺، Cu²⁺ و Ag⁺ هستند که نشان‌دهنده بهبود ظرفیت جذب پس از فسفریله شدن است؛ علاوه براین، آزمایش‌های بازیابی نشان داد که پوشش‌های نانولیفی فسفریله شده PAN، همچنین دارای بازدهی خوبی در بازیابی هستند.

پوشش سطحی یکی دیگر از روش‌ها برای عامل دار کردن الیاف الکتروریسی شده PAN است. گروه پان^۴، رسانا کردن الیاف الکتروریسی شده PAN با پوشش پلیمری را گزارش دادند. آن‌ها پوشش‌های نانولیفی پوسته/مغزی PAN که به ترتیب با پلی پیرول (PPy) و پلی آنیلین (PANI) پوشش سطحی داده شده را تهیه کردند [۴۹، ۵۰]. از این دو الیاف کامپوزیتی به عنوان جاذب یون‌های Cr(VI) از محلول آبی استفاده شد. فرایندهای جذب هر دو جاذب از یک مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم پیروی می کنند و به خوبی با مدل ایزوترم لانگمیور مطابقت دارند. الیاف / PAN حداکثر ظرفیت جذب ۷۱/۲۸ mg/g در ۶۱/۸۰ °C و مقدار جذب ۲۵ mg/g برای الیاف PPy

¹. Li². Zhao³. Phosphorylated⁴. Pan group

PAN / PANi را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت ΔH برای هر دو جاذب تأیید کرد که فرایندهای جذب گرمایی هستند. به تازگی، گروه ما، تولید جاذب‌های الیاف پلی اکریلو نیتریل الکتروریسی شده با پوشش کربن گرمایی غنی از آمین^۱ (PAN @ NC) را با استفاده از روش یک مرحله‌ای کربونیزه کردن گرمایی با ارزیابی توسط دی اتیلن اتر آمین^۲ و با استفاده از الیاف الکتروریسی شده PAN به عنوان الگو را نشان داد (شکل a-۵) [۵]. مواد کربن دار گرمایی رایج به صورت پودر بودند که کاربردهای عملی را محدود می‌کند. الیاف پلی اکریلو نیتریل الکتروریسی شده با کربن گرمایی غنی از آمین پوشش داده شده انعطاف‌پذیری و خواص مکانیکی خوبی دارد.

تصویر SEM در شکل b-۵ نشان داده شده است. رفتار جذب در برابر Cr (VI) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مدل ایزوترم لانگمیور، حداکثر ظرفیت جذب نسبت به Cr (VI) برابر با $290/70 \text{ mg/g}$ بود (شکل c-۵). نکته‌ی مهم این است که جاذب می‌تواند از طریق یک عمل ساده بازیابی شود و در حالی که بازدهی حذف هنوز هم بعد از پنج دوره بالاتر از ۹۰٪ است؛ علاوه بر PAN، بسیاری از پلیمرهای مصنوعی دیگر، از جمله پلی استایرن، پلی ایندول، پلی وینیل الکل، پلی وینیل کلراید و... نیز همچنین برای تهیی نانوالیاف الکتروریسی شده آلی که در جدول ۲-۵ خلاصه شده‌اند، الکتروریسی می‌شوند. پلیمرهای طبیعی کم‌هزینه و تجدیدپذیر هستند؛ علاوه بر این، پلیمر طبیعی به طور طبیعی دارای تعداد زیادی گروه‌های عاملی، از جمله گروه آمین، گروه کربوکسیل، گروه‌های هیدروکسیل و غیره است. سلولز فراوان ترین پلیمر طبیعی است که دارای خواص شیمیایی و مکانیکی مطلوب است؛ با این حال، عدم حلایت سلولز در اکثر حلایل، الکتروریسی آن را محدود می‌کند؛ بنابراین مشتقات سلولز که به راحتی در حلایل فرار محلول هستند، به عنوان جایگزین سلولز استفاده می‌شود. سلولز استات^۳ (CA) ماده‌ای مفید در صنعت است و از مدول بالا، انعطاف‌پذیری کافی و استحکام کششی برخوردار است؛ علاوه بر این، CA همچنین می‌تواند با استفاده از حلایل مناسب توسط الکتروریسی به مواد نانوالیاف تبدیل شود [۷۸، ۷۹]. جاذب‌های فلزات سنگین بر اساس الیاف الکتروریسی شده استات سلولز، مورد توجه گستردگی محققان قرار گرفته است. برای به دست آوردن توانایی جذب بالا، عامل دار کردن الیاف CA اغلب انجام می‌شود. تیان^۴ و همکارانش غشای بی بافت استات سلولز اصلاح شده با پلی متا کریلیک اسید^۵ (PMAA) برای جذب یون فلزات سنگین را با استفاده از الکتروریسی و اصلاح سطح آماده کردند [۸۰].

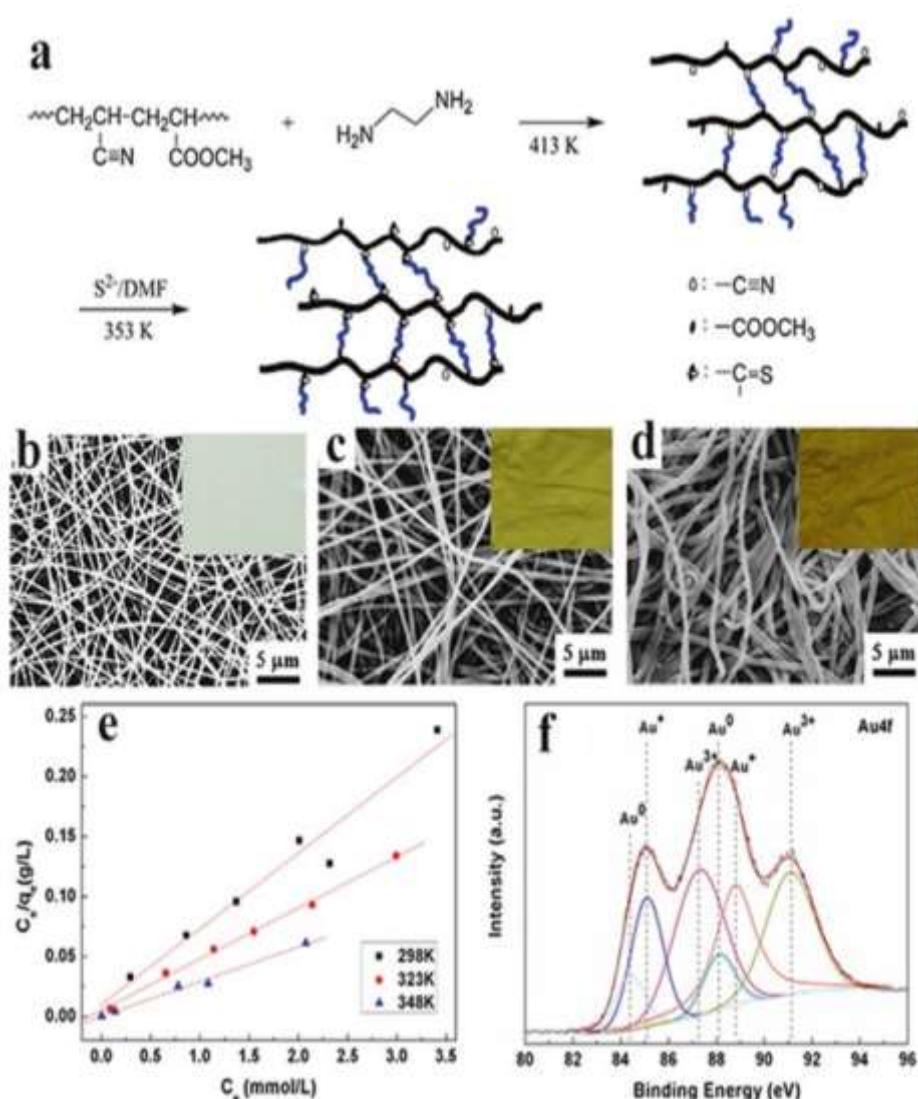
^۱. Amino rich

^۲. Diethylenetriamine

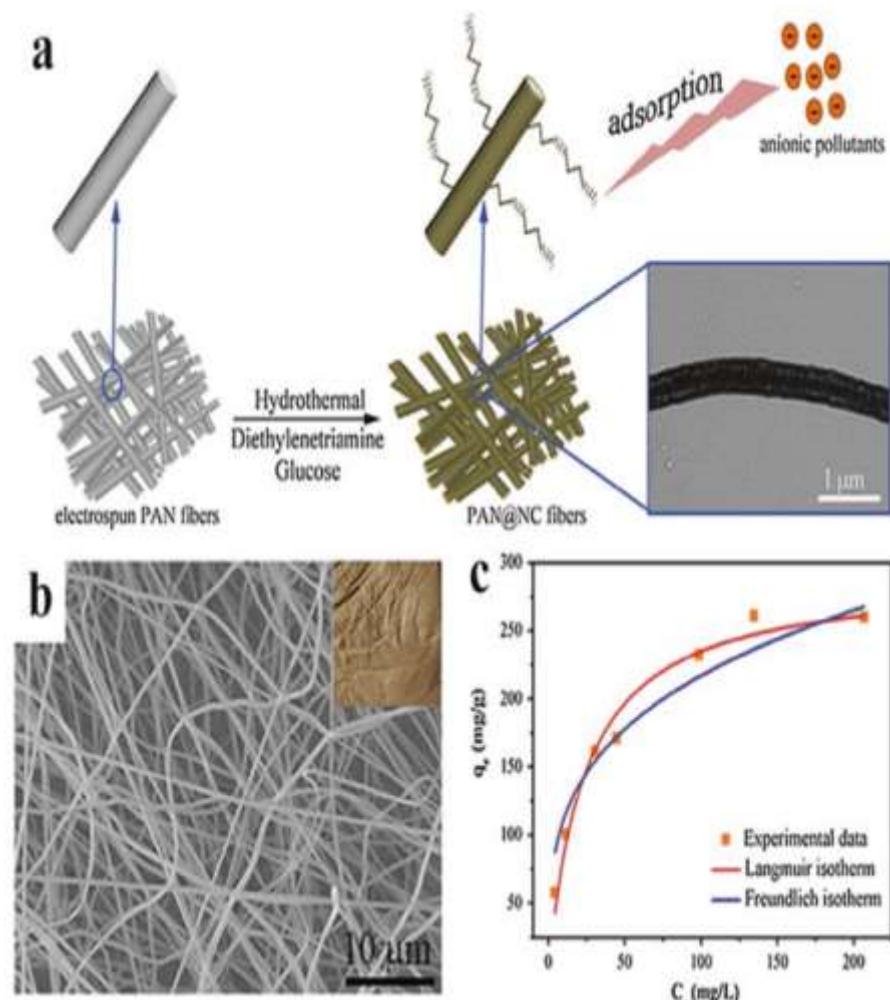
^۳. Cellulose acetate (CA)

^۴. Tian

^۵. Poly(methacrylic acid) (PMAA)



شکل ۴-۵(a) طرحواره ساختگی از نانوالياف کی لیت ساز گروه تیوآمید بر اساس نانوالياف PAN (b) تصاویر معمولی و SEM از غشاهاي نانوليفي (c) غشاهاي نانوليفي اتصال عرضي شده (d) غشاهاي نانوليفي کی لیت ساز گروه تیوآمید (e) نمودار لانگمیور از جذب یون های Au(III) بر روی نانوالياف کی لیت ساز گروه تیوآمید در دمای ۲۹۸، ۳۲۳ و ۳۴۸ کلوین. [۴۷] (f) طيف XPS Au 4f از Au (III) بعد از جذب یون های Au⁺.



شکل ۵-۵- (a) مراحل ساخت جاذب‌های الیاف پلی اکریلو نیتریل الکتروریسی شده با پوشش کربن گرمابی غنی از آمین (PAN @ NC) از الیاف (b) SEM تصویر (c) ایزوترم‌های جذب برای Cr (VI) [۵۱].

جدول ۵-۱: نانو الیاف الکتروریسی شده آلى به عنوان جاذب‌های فلزات سنگین

جاذب	آماده‌سازی	pH بینه	ظرفیت جذب (mg/g)	مراجع
3-amino propyltriethoxysilane-modified PAN nanofibers	الکتروریسی و اصلاح	Th ⁴⁺	۴ ۲۴۹/۳	[۵۲]
		U ⁶⁺	۵ ۱۹۳/۱	
		Cd ²⁺	۶ ۶۹/۵	
		Ni ²⁺	۶ ۱۳۸/۷	
Aminated electrospun PAN Nanofiber	الکتروریسی و پیوند	Cu ²⁺	۴ ۱۵۰/۶	
		Ag ⁺	۴ ۱۵۵/۷	[۵۳]
		Fe ²⁺	۴ ۱۱۶/۶	
		Pb ²⁺	۴ ۲۰/۹	
Polyethylenediaminetetraacetic acid-modified PAN nanofibers	الکتروریسی و اصلاح	Cd ²⁺	۷ ۶۶/۲	[۵۴]
		CrO ₄ ²⁻	۳ ۳۷/۷	
		Pb ²⁺	۵/۵ ۱۵۳.	[۵۵]
		AuCl ₄ ⁻	۳ ۳۱۲۴/۴	[۴۷]
Thioamide-group chelating nanofiber membranes	الکتروریسی و پیوند	Pb ²⁺	۶ ۱۷۷	
		Cu ²⁺	۶ ۱۳۱/۴	
		Ag ⁺	۶ ۲۳۷/۶	[۴۸]
		Cd ²⁺	۶ ۳۷/۳	
Phosphorylated PAN-based nanofiber	الکتروریسی و پیوند	Pb ²⁺	۶	
		Cu ²⁺	۶	
		Ag ⁺	۶	
		Cd ²⁺	۶	

ادامه جدول ۵-۲- نانو الیاف الکترورسی شده آلی به عنوان جاذب‌های فلزات سسکین

جاذب	آماده‌سازی	فلز سسکین	pH بهینه	ظرفیت جذب (mg/g)	مراجع
Acyl thioacetamide-group chelated nanofiber	الکترورسی و پیوند	Ag ⁺	-	۱۱/۰۲	[۵]
Polyacrylonitrile/polyaniline core/shell nanofiber	الکترورسی و پلیمریزاسیون در جا	CrO ₄ ²⁻	۲	۷/۱۳	[۴]
Polyacrylonitrile/polyppyrrole core/shell nanofiber	الکترورسی و پلیمریزاسیون در جا	CrO ₄ ²⁻	۲	۱۹/۸	[۵]
Thiol functionalized cellulose-based electrospun nanofiber	الکترورسی و اصلاح	Cu ²⁺	۶	۱۹/۶	[۶]
Cellulose-camphor soot nanofibers	الکترورسی ترکیبی	Cd ²⁺	۶	۳۴/۷	[۷]
Oxolane-2,5-dione modified electrospun cellulose nanofibers	الکترورسی و اصلاح	Pb ²⁺	۶	۳۱	
Acrylamide-plasma treated electrospun polystyrene nanofiber	الکترورسی و عملیات پلاسما	UO ₂ ²⁺	۶	۴۱۰	[۸]
Amidoxime functionalized polyindole nanofibers	الکترورسی و اصلاح سطحی	Cd ²⁺	۵/۸	۳۲/۵/۹	[۹]
Electrospun polyarylene ether nitrile nanofibrous mats	الکترورسی و فعال سازی شیمیابی	Pb ²⁺	۵/۸	۲۰/۷/۲	[۱۰]
		Cd ²⁺	۵	۴۹/۵	[۱۱]
		Ni ²⁺	۵	۱۵/۱	
		Pb ²⁺	۵	۳۰/۷/۴	[۱۲]
		Cd ²⁺	۵	۱۰/۸/۷	[۱۳]
		Cu ²⁺	-	۵۲/۸	[۱۴]

جاذب	آماده‌سازی	فلز سنگین	pH بهینه	ظرفیت جذب (mg/g)	مرجع
Electrospun chitosan/baker's yeast nanofibers	الکتروریسی ترکیبی	UO_2^{2+}	۶	۲۱۹	[۲۳]
		Th^{4+}	۶	۱۳۱	
		Cu^{2+}	-	۱۲۰	
		Zn^{2+}	-	۱۱۷	[۲۴]
Mesoporous chitosan/poly(ethylene oxide) nanofiber	الکتروریسی ترکیبی	Pb^{2+}	-	۱۰.۸	
Keratin/polyamide6 blend nanofibers	الکتروریسی ترکیبی	Cu^{2+}	۵/۸	۱۰.۷/۵	[۲۵]
Electrospun nanofibrous polyethylenimine mat	متاکرباته شدن و الکتروریسی	CrO_4^{2-}	۳	۱۰.۸/۹	
		HAsO_4^{2-}	۳	۲۳۳/۸	[۲۶]
Nafion/polyvinyl alcohol nanofiber membrane	الکتروریسی ترکیبی	Cu^{2+}	۶	۵۹/۱	
		Cr^{3+}	۶	۴۲/۵	
		Co^{2+}	۶	۲۴/۷	[۲۷]
		AsO_2^{+}	۶	۲۲/۷	
Poly(ethyleneimine) nanofibrous affinity membrane	الکتروریسی مخلوط	Cu^{2+}	۵	۴۷/۲	
		Cd^{2+}	۵	۱۱۴/۹	[۲۸]
		Pb^{2+}	۵	۹۰	
Wool keratose/silk fibroin blend nanofibers	الکتروریسی و عملیات تکمیلی	Cu^{2+}	۷	۲/۹	[۲۹]

ادامه جدول ۵- ناپارهای الیاف الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین

ادامه جدول ۵-۵ - نانو الیاف الکتروریسمی شده آلی به عنوان جاذب‌های فلزات سنگین

جاذب	آماده‌سازی	فلز سنگین	pH پهلوئی	ظرفیت جذب (mg/g)	مرجع
Electrospun zein nanoribbons	الکتروریسمی هم محور	Pb ²⁺	۷	۸۹/۴	[۷۰]
Capsular polyppyrrole hollow nanofibers	الکتروریسمی، کلسینیه شدن و پلیمریزاسیون فاز بخار	CrO ₄ ²⁻	۲	۸۳۹/۳	[۷۱]
Polydopamine-mediated surface functionalization of electrospun nanofibrous membranes	الکتروریسمی و اصلاح سطحی	Cu ²⁺	-	۳۳/۶	[۷۲]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> Loaded nanofibrous mats	الکتروریسمی و الکترو اسپری	Pb ²⁺	۵/۶	۲۳۸	[۷۳]
Photo-cross-linked electrospun poly(vinyl alcohol)-based nanofiber	الکتروریسمی و اتصال عرضی	Pd ²⁺	۱/۱	۱۱۲/۴	[۷۴]
Bacteria-immobilized electrospun fibrous polymeric webs	الکتروریسمی و ایموبولیزه شدن (عدم تحرک)	PtCl ₆ ²⁻	۱/۱	۶۹/۹	[۷۵]
Pb(II) ion-imprinting electrospun cross-linked chitosan nanofiber mats	الکتروریسمی و نقش پنیری	CrO ₄ ²⁻	۷	۱۱۵/۷	[۷۶]
Thermally cross-linkable chitosan-based nanofibrous mats	الکتروریسمی و اتصال عرضی	Cu ²⁺	۷	۷۹	[۷۷]

سطح الیاف الکتروریسی شده CA بهوسیله پیوند با PMAA با استفاده از پلیمریزاسیون آغاز کننده Ce^{4+} اصلاح شد که گروههای جاذب COOH را فراهم می‌کند. جذب و دفع Cu^{2+} , Hg^{2+} و Cd^{2+} بر روی الیاف CA اصلاح شده با PMAA موردنرسی قرار گرفت. اثر مقادیر pH غلظت یون اولیه و استفاده مجدد، موردهبحث قرار گرفت. مقدار pH اولیه بالاتر با ظرفیت جذب بالاتر مطابقت داشت و الیاف CA اصلاح شده دارای انتخاب پذیری جذب بالا نسبت به Hg^{2+} بودند.

این مطالعه برخی از اطلاعات را برای تولید جاذب‌های کم‌هزینه و بسیار کارآمد برای حذف یون فلزات سنگین در اختیار شما قرار می‌دهد. استfan¹ و همکاران نانوالیاف سلولز اصلاح شده با دیون اکسالان² را گزارش دادند [۵۹]. ابتدا، نانوالیاف سلولزی با دی استیله شدن الیاف الکتروریسی شده استات سلولز با استفاده از محلول (0.3 M) NaOH به دست آمد. سپس نانوالیاف سلولزی توسط دیون اکسالان (شکل b و a-۶) عامل دار شدند. Pb^{2+} برای بررسی خاصیت جذب نانوالیاف سلولز اصلاح شده با دیون اکسالان انتخاب شدند. با توجه به افزایش سطح مخصوص و حجم منفذ نانوالیاف سلولزی، نانوالیاف سلولزی عامل دار شده، خاصیت جذب بهبود یافته‌ای را نسبت به الیاف حجیم سلولزی عامل دار شده نشان می‌دهد. ایزووترم جذب در برابر Cd^{2+} و Pb^{2+} توسط نانوالیاف سلولز اصلاح شده با دیون اکسالان در شکل c-۶ نشان داده شده است. جذب بهتر Cd^{2+} و Pb^{2+} توسط مدل ایزووترم فرندیلیچ، گزارش شده است. آزمایش‌های قابلیت بازیابی و احیا نشان داد که ظرفیت جذب بعد از سه بار، تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

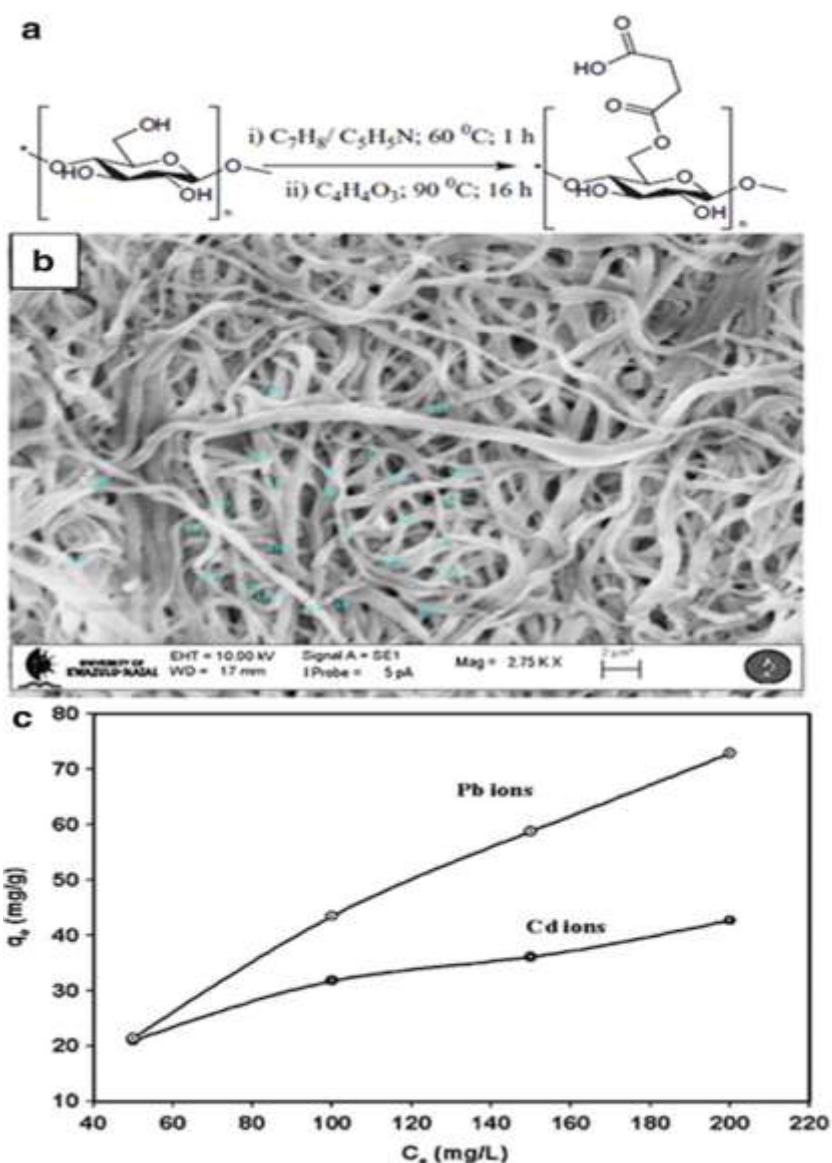
کیتوسان یکی دیگر از پلیمرهای طبیعی است که از کیتین به دست می‌آید و به دلیل تعداد زیاد گروههای عاملی آمین و هیدروکسیل بر روی کیتوسان، اغلب در حذف یون فلزی استفاده می‌شود. با توجه به قابلیت الکتروریسی و خواص مکانیکی، پلیمرهای مصنوعی مانند پلی‌اتیلن اکسید (PEO)، پلی‌وینیل‌الکل، پلی‌لاتکتیک اسید، پلی‌کاپرولاکتون و نایلوون ۶ اغلب با کیتوسان ترکیب می‌شوند تا خواص نانوالیاف کیتوسان بهبود یابد. شری فول³ و همکاران، غشای نانولیفی کامپوزیتی پلی‌اتیلن اکسید/کیتوسان را با استفاده از روش الکتروریسی برای جذب نیکل، کادمیم، سرب و مس از محلول آبی تهیه کردند [۶۴]. قطر متوسط و سطح مخصوص غشای نانولیفی کامپوزیتی به ترتیب ۹۸ نانومتر و $312/2 \text{ m}^2/\text{g}$ بود. جذب سرب، مس، کادمیم و نیکل بر روی غشا در بررسی انتخابی جذب بهاین ترتیب بود: $\text{Pb}^{2+} < \text{Cd}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Ni}^{2+}$. هر دو مدل سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم می‌توانند فرایندهای جذب را توصیف کنند. داده‌های تعادلی نیکل،

¹. Stephen

². oxolane-2,5-dione

³. Shariful

کادمیم، مس و سرب با مدل لانگمیور تناسب بهتری دارند. عوامل ترمودینامیکی به دست آمده نشان داد که فرایندهای جذب امکان پذیر، خوب به خودی و گرماگیر بوده است.



شکل ۵-۶-۵) طرح واره واکنش تبدیل سلولز به سلولز اصلاح شده با دیون اکسالان (b) تصویر SEM از نانو الیاف سلولز اصلاح شده با دیون اکسالان (c) ایزوترم جذب برای Pb و Cd [۵۹]

تانگ^۱ و همکاران، برای بهبود انتخاب پذیری و ظرفیت جذب، شبکه نانو لیفی کیتوسان اتصال عرضی شده همراه با منقوش شدن یون Pb^{2+} را با روش الکتروریسی تکمیرلهای و منقوش کردن یونی^۲ سنتز نمودند [۸۱]. روش منقوش کردن یونی در مکان می‌تواند از اتصال بیش از حد گروه آمینه در طول فرایند اتصال عرضی جلوگیری کند و ظرفیت جذب را بهبود بخشد. انتخاب پذیری جاذب به دلیل مکان‌های شناسایی تشکیل شده در ماتریس پلیمر اتصال عرضی شده توسط مولکول‌ها یا یون‌های منقوش شده می‌باشد. نانوالیاف الکتروریسی شده کیتوسان همراه با منقوش شدن یون Pb^{2+} انتخاب پذیری عالی برای یون هدف Pb^{2+} را با ظرفیت جذب تعادلی به ترتیب مقابله نشان می‌دهد: $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > Ni^{2+}$. جذب یون‌های Pb^{2+} از مدل شبکه مرتبه دوم و مدل لانگمیور پیروی می‌کند؛ علاوه براین، زمینه نانو لیفی کیتوسان منقوش شده، می‌توانند مجدداً بازیابی و استفاده شوند. این نتایج مربوطه نشان‌دهنده‌ی پتانسیل مواد برای کاربرد در زمینه تصفیه پساب می‌باشد. انواع دیگر پلیمرهای طبیعی نیز با موفقیت برای حذف یون‌های فلزات سنگین تبدیل به نانوالیاف از طریق فرایند الکتروریسی شده‌اند؛ به عنوان مثال، نانو نوارهای^۳ زئین توسط یک فرآیند الکتروریسی هم محور اصلاح شده گزارش شد [۷۰]. برای بهره‌برداری از فعل و افعال مطلوب بین فلز و پروتئین، از نانو نوارهای زئین جهت استفاده در حذف Pb^{2+} از آب آلوده استفاده شد. تعادل جذب را می‌توان در ۶۰ دقیقه برای محلول Pb^{2+} با غلظت اولیه ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آورد. فرایندهای جذب از مدل شبکه مرتبه دوم و مدل ایزوترم لانگمیور پیروی می‌کنند. بر اساس عوامل ایزوترم از مدل لانگمیور، حداکثر جذب mg/g برابر ۸۹/۳۷ بود. پس از پنج چرخه جذب و اجازه، ظرفیت جذب تا ۸۲/۳٪ درصد باقی‌مانده است. تمامی نتایج کاربردهای بالقوه این نانو نوارهای زئین را در تصفیه آب آلوده نشان داد؛ علاوه براین، پلیمرهای طبیعی الکتروریسی شده مانند کراتین و فیبروئین ابریشم نیز به عنوان جاذب فلزی مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های معمول در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

سایر ترکیبات و معماری‌های خاص نیز گزارش شده است که می‌توانند جاذب‌ها را غنی سازند. ژائو^۴ و همکاران نانوالیاف توخالی پلی پیروول کپسولی (PPy-HNFs) را از طریق روش پلیمریزاسیون فاز بخار در مکان با استفاده از قالب الیافی الکتروریسی شده V_2O_5 تولید کردند [۷۱]. ریخت‌شناسی توسط تصاویر SEM و TEM مشخص شد. جذب کروم (VI) بر روی HNFs مورد بررسی قرار گرفت. فرایند جذب را می‌توان با استفاده از مدل شبکه مرتبه دوم توصیف

¹. Tang². Ion-imprinting³. Nanoribbons⁴. Zhao

کرد و ظرفیت جذب حداکثر $\text{mg/g} = 200 \text{ ppm}$ برای $\text{pH} = 2$ بود. پس از پنج چرخه جذب و وا جذب، ظرفیت جذب همچنان 75% است. نتایج نشان داد که امکان استفاده از این غشای PPy-HNF کپسولی برای حذف فلزات سنگین از محلول آبی وجود دارد.

یک مطالعه جالب دیگر توسط گروه اویار^۱ گزارش شده است [۷۵]. آن‌ها یک نژاد منزوی شده مورگانلا مورگانی^۲ STB5 را در تارهای لیفی الکتروریسی شده PS و PSU قرار دادند. مورگانلا مورگانی STB5 نوعی باکتری است که قبلًا منزوی شده و می‌تواند برای از بین بردن مؤثر Cr(VI) در شرایط خنثی مورداستفاده قرار گیرد.

رونده عدم تحرک می‌تواند باعث زنده ماندن سلول و فعالیت بیوشیمیایی شود. الیاف الکتروریسی شده PS و PSU که شامل باکتری‌های بی‌حرکت می‌باشد، بازده حذف $93/60\%$ و $93/79\%$ را برای 10 mg/L و $10/41\%$ و $90/78\%$ و $99/47\%$ برای 15 mg/L و $68/27\%$ و $70/41\%$ برای 25 mg/L کروم شش ظرفیتی اولیه در ۷۲ ساعت نشان می‌دهد. دو شبکه لیفی می‌توانند در چندین چرخه باز استفاده شوند و می‌توانند به مدت ۱۵ روز بدون نمایش تلفات در تعداد سلول ضمیمه شده یا قابلیت‌های ترمیم Cr(VI) ذخیره شوند. در جدول ۵-۲ تعدادی از انواع نانوالیاف الکتروریسی شده معدنی به عنوان جاذب‌های فلزات سنگین نشان داده شده است.

۵-۲-۳- نانو الیاف کامپوزیتی آلی / معدنی

هر نوع از جاذب‌هایی که تاکنون توضیح داده شد دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است. نانو الیاف الکتروریسی شده معدنی از سطح مخصوص بالا و اندازه کوچکی برخوردار هستند. با این وجود، حالت پودری، جداسازی و استفاده در کاربردهای عملی آن‌ها را دشوار می‌کند. نانوالیاف کامپوزیتی آلی دارای ریخت‌شناسی غشایی خوب با خواص مکانیکی رضایت‌بخش هستند. با این حال، اکثر نانوالیاف آلی قابلیت اتصال و پیوند کمی نسبت به فلزات سنگین را نشان می‌دهند که باید اصلاح شوند؛ به همین دلایل، نانوالیاف کامپوزیتی آلی / معدنی به عنوان جاذب بالقوه فلزات سنگین موردن توجه بسیاری قرار گرفته است. نانوالیاف کامپوزیت آلی / معدنی می‌تواند مزایای هر دو جزء را با هم ترکیب کنند و اثر هم‌افزایی برای فرایند جذب داشته باشد. روش‌های اصلی برای تهیه نانو الیاف کامپوزیتی آلی / معدنی، الکتروریسی ترکیبی در مکان و عملیات بعدی هستند. انواع و ترکیبات مختلفی از جمله پلیمر مصنوعی / ماده معدنی و نانوالیاف کامپوزیتی پلیمر طبیعی / ماده معدنی گزارش شده است.

¹. Uyar

². Morganella morganii

به عنوان مواد معدنی رایج، نانوزئولیت‌ها به دلیل خاصیت منحصر به فرد خود، مانند سطح مخصوص زیاد و مکان‌های فعال در دسترس تر، از بازدهی بالایی در تصفیه فلزات سنگین برخوردار هستند. راد و همکاران نانوالیاف نانو کامپوزیتی نانو زئولیت پلی وینیل الکل / NaX / PVA را از محلول زئولیت/PVA تولید کردند [۸۲]. سطح مخصوص نانوالیاف سنتز شده NaX / PVA با $212\text{m}^2/\text{g}$ بود. نانوالیاف کامپوزیتی برای حذف یون‌های Ni^{2+} و Cd^{2+} از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت جذب نسبت به یون‌های Cd^{2+} از یون‌های Ni^{2+} بیشتر بود. هر دو فرایند جذب از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم پیروی می‌کنند و به خوبی با مدل ایزوترم لانگمیور مطابقت دارند. عوامل ترمودینامیکی نشان داد که فرایندهای جذب در شرایط موردمطالعه گرماییر و خودبه‌خودی بودند؛ علاوه بر این، می‌توان از نانوالیاف به طور مکرر استفاده کرد.

برای عملکرد بیشتر جاذب‌ها، گروه آنگ^۱ یک جاذب الکتروریسی شده سه‌جهتی از غشای الیاف کامپوزیت کیتوسان / PVA / زئولیت را تهیه کردند [۸۳]. غشای حاصله به مدت ۲۰ روز در آب مقطر، محیط اسیدی و محیط قلیایی پایدار بود. عملکرد جذب در برابر یون‌های Fe, Cr (VI) و Ni (II) مورد بررسی قرار گرفت. ایزوترم لانگمیور و مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه دوم به خوبی می‌توانند فرایندهای جذب را توصیف کنند؛ علاوه بر این، ظرفیت جذب نانوالیاف پس از پنج بار اجرا، کمی تغییر کرده است. اکسید گرافن (GO)، به عنوان یک نانو مواد جدید مبتنی بر کربن، به عنوان مواد جاذب توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. تان^۲ و همکاران با استفاده از الکتروریسی محلول GO / PVA، نانوالیاف GO / PVA را تولید کردند [۸۴]. Cd^{2+} و Cu^{2+} به عنوان یون‌های هدف برای بررسی عملکرد جذب نانوالیاف کامپوزیتی GO / PVA جذب شدند. فرایند جذب از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و مدل لانگمیور پیروی می‌کند. قابل توجه است که جذب می‌تواند ظرف ۲۵ دقیقه به تعادل برسد. همان‌طور که نتایج FTIR و XPS نشان می‌دهد، گروه‌های کربوکسیل و کربونیل بر روی سطح جاذب در جذب Cd^{2+} و Cu^{2+} نقش داشته‌اند. این نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نانوالیاف کامپوزیتی GO / PVA می‌تواند در کاربردهای حذف فلزات سنگین، کارآمد، غیر سمی، قابل بازیافت و اقتصادی باشد. PVA تقریباً هیچ توانایی اتصال به فلزات سنگین را نشان نداد و به عنوان حامل انعطاف‌پذیر عمل می‌کند. نجف‌آبادی^۳ و همکاران یک جاذب نانولیفی الکتروریسی شده GO / کیتوسان جدید را برای ترکیب قابلیت جذب کیتوسان و GO ارائه داده است [۸۵]. رفتارهای جذب یون‌های فلزی Pb^{2+} , Cu^{2+} و Cr (VI) از محلول‌های

¹. Ang group

². Tan

³. Najafabadi

آبی مورد بررسی قرار گرفت. فرایندهای جذب از مکانیسم نمایی دوگانه^۱ و مدل ایزووترمی ردیچ - پترسون^۲ پیروی می‌کنند. حداکثر ظرفیت جذب Cu^{2+} ، Pb^{2+} و $\text{Cr}^{(VI)}$ بر روی نانوالیاف کامپوزیتی GO / کیتوسان بر اساس ایزووترم لانگمیور $461/3$ ، $423/8$ و $310/4$ میلی گرم در گرم در دمای 45°C بود و عوامل ترمودینامیکی به دست آمده ماهیت گرمایش و خودبه‌خودی آن‌ها را نشان می‌دهد؛ علاوه بر این، نانوالیاف GO / کیتوسان می‌تواند بارها و بارها مورد استفاده مجدد قرار گیرد و تقریباً هیچ‌گونه کاهش قابل توجهی در ظرفیت جذب ایجاد نشود. سایر مواد معدنی مانند هیدروکسی آپاتیت، بوهمیت، اکسید فلز و غیره نیز برای تهیه جاذب‌های نانولیفی الکتروریسی شده کامپوزیتی آلی / معدنی نیز استفاده می‌شود (جدول ۵-۳).

علاوه بر الکتروریسی ترکیبی، عملیات بعدی روش دیگری برای به دست آوردن این نانوالیاف کامپوزیتی است. نانوالیاف الکتروریسی شده کامپوزیتی آلی / معدنی به دست آمده از این روش اغلب دارای ساختارهای سلسله مرتبه‌ای هستند که می‌توانند سطح مخصوص را افزایش داده و درنتیجه ظرفیت جذب را افزایش دهند. زو^۳ و همکاران یاف کامپوزیت گل مانند^۴ الیاف کامپوزیتی پلی آمید $6(\text{OH})_2$ @Mg(PA6) را با استفاده از الکتروریسی همراه با روش گرمابی تولید کردند (شکل ۵-۷a و ۵-۷b) [۱۰۷]. این ریخت‌شناسی جدید همچنین می‌تواند سطح مخصوص الیاف الکتروریسی شده را افزایش دهد. جذب کروم (VI) بر روی الیاف کامپوزیتی $2(\text{OH})_2$ @Mg(PA6) نشان داد و مورد بررسی قرار گرفت. الیاف کامپوزیتی عملکرد خوبی برای از بین بردن کروم (VI) نشان داد و ظرفیت جذب می‌تواند به $296/4 \text{ mg/g}$ برسد در صورتی که غلظت کروم (VI) 110 mg/g بود (شکل ۵-۷c). در همین حال، غشای یافی می‌تواند به راحتی از محلول‌های Cr(VI) جدا شود و عملکرد بازگشت‌پذیر خوبی را به نمایش بگذارد (شکل ۵d-۷). سان^۵ و همکارانش نانوالیاف کامپوزیتی الکتروریسی شده پلی اکریلو نیتریل آمین دار شده سلسله مرتبه‌ای $-/\gamma$ / AIOOH را با ترکیبی از فرایند الکتروریسی، اصلاح شیمیایی و واکنش گرمابی تهیه کردند [۹۶]. رفتارهای جذب در برابر یون‌های Cu^{2+} ، Pb^{2+} و Cd^{2+} در محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت. تمام مراحل جذب از معادله شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند و با مدل ایزووترم لانگمیور مطابقت دارد. حداکثر ظرفیت جذب یک لایه برای Cu^{2+} ، Pb^{2+} و Cd^{2+} به ترتیب $180/83 \text{ mg/g}$ ، $48/68 \text{ mg/g}$ و $14/94 \text{ mg/g}$ بود. تجزیه و تحلیل مکانیسم جذب ثابت کرد که گروه‌های آمین و بلورهای $-/\gamma$ AIOOH به صورت همازایی به عملکرد جذب بالا نانو یاف کامپوزیتی آمین دار شده سلسله

¹. double-exponential

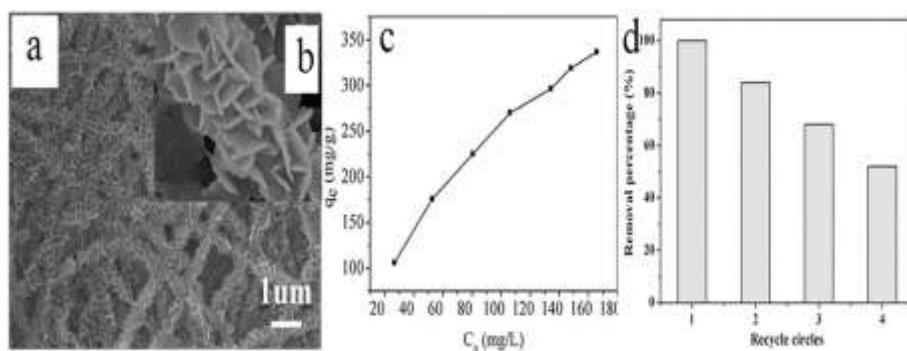
². Redlich-Peterson

³. Xu

⁴. flower-Like

⁵. Sun

مرتبهای PAN / γ -AlOOH کمک می‌کنند. نتایج به دست آمده کاربرد بالقوه آن‌ها در حذف یون‌های فلزات سنگین از خروجی فاضلاب را نشان می‌دهد. گروه جی^۱ همچنین الیاف کامپوزیتی قلم مو مانند^۲ (Hap / PAN) هیدروکسی آپاتیت را با استفاده از روش‌های الکتروریسی و گرمابی سنتز کردند [۹۹]. آزمایش‌های جذب برای حذف Pb^{2+} توسط الیاف کامپوزیتی PAN / Hap انجام شد. بر اساس مدل ایزوترم لانگمیور، حداقل ظرفیت جذب برای Pb^{2+} برابر با ۴۳۳ mg/g بود.



شکل ۵-۷-۵ (a) و (b) تصاویر SEM از الیاف کامپوزیتی c (@Mg(OH)₂) ایزوترم جذب از مشخصات بازگشت‌پذیری غشای نانولیفی کامپوزیتی برای حذف Cr(VI) [۱۰۷].

^۱. Ji_s group
^۲. brush-like

جدول ۵-۳- نانوایاف الکترورسی شده کامپوزیتی آلی / معدنی به عنوان جاذبهای فلزات سنگین

جاذب	آماده‌سازی	فلز سنگین	pH بهینه	mg/g جذب	مراجع
Poly(vinyl alcohol)/grapheme oxide nanofibers	الکترورسی ترکیبی	Cu ²⁺ Cd ²⁺	۵/۸ ۵/۸	۲۵/۸ ۳۲/۴	[۸۴]
Electrospun PVA/zeolite nanofibers	الکترورسی ترکیبی	Cd ²⁺ Ni ²⁺	- -	۸۳۸/۷ ۳۴۲/۸	[۸۲]
PVA/tetraethylorthosilicate/aminopropyl triethoxysilane composite/nanofiber	دوش الکترورسی سل-زل	Cd ²⁺	۶	۳۲۷/۳	[۸۶]
A boehmite nanoparticle impregnated electrospun fiber membrane	الکترورسی ترکیبی	Cd ²⁺	۷	۰	[۸۷]
Chitosan/graphene oxide composite nanofibers	الکترورسی ترکیبی	Pb ²⁺ Cu ²⁺ CrO ₄ ²⁻	۶ ۶ ۳	۴۶/۳ ۴۲۳/۸ ۳۱۰/۴	[۸۵]
Chitosan/hydroxyapatite composite nanofiber	الکترورسی ترکیبی	Pb ²⁺ Ni ²⁺ Co ²⁺	- - -	۲۹۶/۷ ۲۱۳/۸ ۱۸۰/۲	[۸۸]
Chitosan/cobalt ferrite nanofibrous adsorbent	الکترورسی ترکیبی	Pb ²⁺ CrO ₄ ²⁻	۶ ۳	۲۸۳/۳ ۱۷۹/۱	[۸۹]

ادامه جدول ۳-۵- ناوالیاف الکتروریسی شده کامپوزیتی آلو / معدنی به عنوان جاذبهای فلزات سنگین

مراجع	mg/g	pH	فلز سنگین	آماده‌سازی	جاذب
[۹۰]	۷۱۰/۳	۶	Cu ²⁺	Pb ²⁺	الکتروریسی ترکیبی
[۹۳]	۵۷۹/۱	۶			Chitosan/TiO ₂ composite nanofibrous adsorbents
[۸۳]	۱۹/۵	۱	CrO ₄ ²⁻		NH ₂ -functionalized cellulose acetate (CA)/silica composite nanofibrous membranes
[۸۳]	۸/۸۴	-	CrO ₄ ²⁻		Chitosan/(polyvinyl alcohol)/zeolite electrospun composite nanofibrous membrane
[۹۱]	۶/۱۴	-	Fe ³⁺		الکتروریسی ترکیبی
۱/۷۷	-		Ni ²⁺		
۳۷۰/۸	۵		UO ₂ ²⁺		Electrospun PVA/ZnO nanofiber adsorbent
۱۵۷/۴	۵		Cu ²⁺		الکتروریسی ترکیبی
۹۷/۴	۵		Ni ²⁺		
[۹۲]	۶۷	۷	AsO ₃ ⁻		Fe ³⁺ ion immobilized poly(vinyl alcohol) nanofibers
[۹۴]	۳۶	۷	HAsO ₄ ²⁻		
[۹۵]	-	۳	CrO ₄ ²⁻		Electrospun cellulose nanofibers modified by montmorillonite
[۹۵]	۱۰/۷/۸	۴/۵-۵	Cu ²⁺		Zero-valent iron nanoparticle-immobilized electrospun nanofibers

ادامه جدول ۵-۳- ناولیاف الکترورسی شده کامپوزیتی آلی / معدنی به عنوان جاذب‌های فرات سسکین

جاذب	آماده‌سازی	فلز سنجن	pH بینه	ظرفیت جذب mg/g	مرجع
Hierarchical aminated PAN/ γ -AlOOH electrospun composite nanofibers	فریند الکترورسی، اصلاح شیمیایی و واکنش گرمایی	Pb ²⁺ Cu ²⁺ Cd ²⁺	۵ ۶ ۶	۲۳۳/۱ ۴۳/۹ ۱۴۴/۳	[۹۶]
Hierarchically nanofibrous membrane containing of thermal plastic elastomer ester nanofibers cor and iron oxides shell	الکترورسی و روش گرمایی	CrO ₄ ²⁻	۲	-	[۹۷]
Thermal plastic elastomer ester@AlOOH nanofibers	الکترورسی و روش گرمایی	CrO ₄ ²⁻	۲	۱۶/۶۶	[۹۸]
Brush-like polyacrylonitrile hydroxyapatite composite fibers	الکترورسی و روش گرمایی	Pb ²⁺	۵/۲	۴۳۳	[۹۹]
Hierarchical nanofiber mat (polyacrylonitrile/polypyrole/manganese dioxide)	الکترورسی و عملیات بعدی	Pb ²⁺	۶	۱۷۲/۴۱	[۱۰۰]
Aminated Fe3O4@SiO2/PVA nanofiber adsorbent	الکترورسی و اصلاح	UO ₂ ²⁺	۴/۵	۶/۸/۹	[۱۰۱]
Amino functionalized mesoporous polyvinyl pyrrolidone/SiO ₂ composite nanofiber	الکترورسی و هیدرولیز	Cr ³⁺	۷	۹۷	[۱۰۲]
A novel PVP/CeO ₂ /TMPTMS nanofiber adsorbent	الکترورسی ترکیبی	Pb ²⁺ Cu ²⁺	۶ ۶	۲۷۲/۳ ۲۹۳/۴	[۱۰۳]

ادامه جدول ۵-۳- ناوالیاف الکترورسی شده کامپوزیتی آلی / معدنی به عنوان جاذبهای فلزات سنگین

مراجع	ظرفیت جذب/g	pH	فلز سنجین	آماده‌سازی	جاذب
[۱۰۴]	۲۵۰	۸	Th ⁴⁺	الکترورسی ترکیبی modified with aminopropyltriethoxysilane	
۱۴۷	۶	۶	Ni ²⁺		
۸۰	۵	۵	Fe ²⁺		
[۱۰۵]	۲۲۸/۹	۶	Mn ²⁺	الکترورسی و عملیات شیمیابی poly(vinyl alcohol)/ silicananofibers	
۲۲۴/۹	۶	۶	Ni ²⁺		
[۱۰۶]	۴۸۹/۱۲	۶-۵	Cu ²⁺	فریبند-سل-رل و الکترورسی	PVA/SiO ₂ composite nanofiber

فرایند جذب را می‌توان با یک مکانیسم دومرحله‌ای توضیح داد: کمپلکس سطحی سریع و به دنبال آن انحلال جزئی هیدروکسی آپاتیت و رسوب پیرومورفیت^۱. نتایج آزمایش نشان داد که زمینه الیافی کامپوزیتی PAN/Hap می‌تواند یک جاذب امیدوارکننده برای یون‌های فلزات سنگین از پساب صنعتی باشد. نانوذرات آهن صفر ظرفیتی^۲ (ZVI NPs) نیز بهره زیادی برای کاربردهای زیستمحیطی داشته‌اند. شیائو^۳ و همکاران ZVI NPs زمینه‌های نanolیفی پلیمری الکترورسی شده هیبریدی پایدار شده را تولید کردند [۹۵]. زمینه‌های نanolیفی هیبریدی با استفاده از محلول پلیمری مخلوط پلی آکریلیک اسید (PAA) / پلی وینیل الكل (PVA) / نانولله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) به دست آمده است. سپس، ZVI NPs بر روی زمینه‌های نanolیفی ثبتیت مضاعف می‌شوند. زمینه‌های نanolیفی هیبریدی پایدار شده ZVI NPs برای حذف یون‌های Cu(II) استفاده شد. تأثیر عواملی مانند pH، زمان تماس، غلظت محلول و قدرت یونی محلول مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مدل لانگمیور، حداکثر ظرفیت جذب بعد از ثبتیت ZVI NPs از ۶/۸ mg/g به ۱۰/۷ mg/g افزایش یافته است. جذب Cu²⁺ از طریق احیا شیمیایی و قرارگیری روی سطوح ZVI NPs برای تشکیل آلیاژ Fe / Cu / Fe رخ داده است. این مطالعه نشان می‌دهد که زمینه نanolیفی هیبریدی پایدار شده ZVI NPs می‌تواند یک ماده مفید برای حذف یون‌های Cu²⁺ باشد.

کار جالب دیگر توسط گروه لی و ژانگ^۴ گزارش شده است. آن‌ها مجموعه‌ای از غشاها نanolیفی کامپوزیتی مزو تخلخل بر پایه SiO₂ را تولید کردند [۱۰۲، ۱۰۸، ۱۰۶، ۱۰۹]. ابتدا ژل‌های PVA / SiO₂ را تهیه و سپس الکترورسی کردند. غشاها نanolیفی کامپوزیتی مزو ساختار بر پایه SiO₂ بدون کلسینه شدن به دست آمد. PVA به عنوان عامل انعطاف‌پذیر عمل کرده و نانوالیاف کامپوزیتی با خواص تشکیل فیلم خوب تهیه شده است. غشاها نanolیفی کامپوزیتی مزو تخلخل بر پایه SiO₂ برای جذب یون‌های فلزات سنگین از محلول آبی استفاده شد. برای بهبود بیشتر ظرفیت جذب، گروه‌های تیول، تیواتر^۵، آمین و فسفین^۶ نیز همچنین به این نانوالیاف کامپوزیتی مزو تخلخل بر پایه SiO₂ افزوده شدند. نمونه‌های حاصله در جدول ۵-۳ نشان داده شده است. نانوالیاف کامپوزیتی آلی / معدنی اثر هم‌افزایی بین جزء آلی و جزء معدنی برای جذب را دارد و باعث می‌شود آن‌ها به کانون تحقیق و توجه تبدیل شوند.

^۱. Pyromorphite

^۲. Zero-valent iron nanoparticles (ZVI NPs)

^۳. Xiao

^۴. Li and Zhangs group

^۵. Thioether

^۶. Phosphine

۳-۵- فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین

فرایندهای تصفیه برای تصفیه آب به دلیل مصرف پول و زمان، صرفه‌جویی در فضا و مقرون به صرفه بودن از نظر کاربردهای عملی مورد توجه بسیاری است. فناوری‌های تصفیه غشایی با انواع مختلف غشاها پتانسیل بسیار خوبی برای حذف فلزات سنگین نشان داده است [۱۰-۱۲]. غشاها نانوالیافی الکتروریسی شده دارای تخلخل قابل تنظیم بالا، ساختار منافذ به هم پیوسته و استحکام مکانیکی نسبتاً بالا می‌باشند و باعث می‌شود آن‌ها به عنوان فیلتر مناسب باشند. با این حال، اندازه منافذ در بین الیاف الکتروریسی شده بسیار بزرگ‌تر از شعاع یونی یون‌های فلزات سنگین است. فرایندهای تصفیه برای حذف یون‌های فلزات سنگین توسط فیلترهای الکتروریسی شده عمدتاً به برهمنش پیوند بین فیلترها و یون‌های فلزی بستگی دارد. بیشتر تحقیقات بر عملکرد جذب استاتیک که پایه و اساس فرایند تصفیه است، تمرکز دارد؛ بنابراین، توسعه فیلترهای الکتروریسی شده برای فلزات سنگین محدود است. در ادامه تعدادی مطالعات وجود دارد که از غشاهای الیاف الکتروریسی شده برای فیلتراسیون دینامیک فلزات سنگین استفاده شده است.

استحکام مکانیکی عامل مهمی برای کاربردهای تصفیه است. در بیشتر موارد، فیلترهای الکتروریسی شده از نانوالیاف الکتروشیمی آلی عامل دار شده ساخته شده‌اند. از پلیمرهای طبیعی اغلب برای تهیه فیلترهای الکتروریسی شده کم‌هزینه استفاده می‌شود؛ به عنوان مثال، Denkbaş^۱ و همکاران، ماتریس‌های نانولیافی فیبروئین ابریشم / نایلون^۲ را با استفاده از الکتروریسی تهیه کردند [۱۳]. سطح الیاف با بلورهای کلسیم فسفات برای افزایش میل ترکیبی از فلزات سنگین دو ظرفیتی عامل دار شد. حذف بهینه Cu^{2+} در شرایط $pH: 5$ به دست آمد، هفت لایه از نانوالیاف، $30\text{ }\mu\text{m}$ میلی‌گرم در لیتر غلظت اولیه Cu^{2+} و 1 mL/min $0\text{--}10\text{ ppm}$ نرخ جریان به دست آمد که ۳۲٪ از یون‌های Cu^{2+} را می‌توان با سیستم جریان مداوم حذف کرد. یکی دیگر از فیلترهای الکتروریسی شده بر پایه فیبروئین ابریشم توسط گروه کوی^۳ گزارش شد [۱۴]. غشاها نانولیافی کامپوزیت فیبروئین ابریشم / سلولز استات با استفاده از الکتروریسی و بعد از آن به کارگیری اتانول تهیه شد. برای فرایند تصفیه، محلول حاوی 100 ppm با استفاده از پمپ پریستالتیک^۳ با نرخ جریان حجمی 2 mL/min از طریق غشاها نانولیافی پمپ شد. غشاهای الیافی کامپوزیتی با محتوی سلولز استات ۲۰٪ عملکرد خوبی برای از بین بردن مس نشان داد و حداقل میزان حذف مس برابر با $22/8\text{ mg/g}$ بود؛ علاوه بر این، غشای نانولیافی ترکیبی فیبروئین ابریشم / استات سلولز ظرفیت حذف بالاتر Cu^{2+} نسبت به فیبروئین ابریشم خالص یا غشای نانولیافی استات سلولز به نمایش

¹. Denkbaş

². Cuiç group

³. Peristaltic pump

گذاشته است. این مطالعات داده‌های نسبتاً جامعی برای فیلترهای الکتروریسی شده بر پایه فیبروئین ابریشم برای حذف یون فلزات سنگین در پساب ارائه می‌دهند.

برخی دیگر از پلیمرهای طبیعی نیز برای کاربرد به عنوان فیلترها از الکتروریسی استفاده شده‌اند. نانوالیاف کراتین مشتق شده از پشم که با آرایش تصادفی تشکیل شده است با قطر متوسط ۲۴۰ نانومتر توسط فرایند الکتروریسی تهیه شدند [۱۱۵]. حذف یون فلزی Cu^{2+} از محلول‌های آبی با پمپ کردن محلول یونی از طریق غشاهای الیافی با پمپ پریستالتیک انجام شد. داده‌های تجربی با هر دو مدل ایزووترم لانگمیور و فرندلیچ مطابقت خوبی داشتند. حداکثر ظرفیت حذف به دست آمده از مدل لانگمیور حدود ۱۱ mg/g بود. با استفاده از مدل دوبینین- رادوشکویچ^۱، فرایند حذف یون‌های Cu^{2+} بر روی غشاهای نانولیفی کراتین از طریق واکنش‌های تبادل یونی انجام شد. آزمایشات رقابتی نشان داد که ترتیب انتخابی توسط غشاهای نانولیفی کراتین در برابر یون‌های فلزی در نظر گرفته شده به ترتیب مقابل می‌باشد: $Cu^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$. کیتوسان یک ماده جاذب است که به شکل گستردۀ استفاده می‌شود و برای تهیه فیلترها مناسب است. لی و همکاران غشاهای نانو لیفی زیست‌تخریب‌پذیر تجزیه شده کیتوسان/ پلی لاکتید را برای تصفیه یون‌های نقره استفاده کردند [۱۱۶]. هر دو ماده پلی لاکتید و کیتوسان جزء مواد مشهور دوست دار محیط‌زیست "سبز" می‌باشند. غشاهای الیافی کیتوسان/ پلی لاکتید برای آزمایش تصفیه، دارای قطر ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۰ میلی‌متر می‌باشند. ظرفیت حذف نقره توسط فیلتر نانولیفی کیتوسان/ پلی لاکتید با غلظت اولیه یون نقره و مقدار pH مشخص، افزایش یافته است، در حالی که با دما و نرخ فیلتراسیون محلول کاهش می‌یابد؛ علاوه بر این، این فیلتر الکتروریسی شده می‌تواند پس از فرایند بازیابی مورد استفاده مجدد قرار گیرد. گروه کیت^۲ همچنین فیلتر بی بافت نانوالیاف کیتوسان را تولید کرده است [۱۱۷]. فیلتر جدید با استفاده از الکتروریسی محلول‌های ترکیبی کیتوسان / PEO بر روی بستر پلی‌پروپیلن بی بافت اسپان باند آمده شد. تصفیه یون‌های Cr (VI) انجام شد. ظرفیت اتصال دینامیک Cr (VI) Cr تا ۳۵ میلی‌گرم Cr (VI) بر گرم کیتوسان بود که امیدواری برای استفاده تجاری را نشان می‌دهد؛ از طرفی، این فیلتر نانولیفی بر پایه کیتوسان دارای خواص ضد میکروبی خوبی به همراه کاهش ۲-۳ واحد نمایی در توده‌های باکتری اشرشیا کولی^۳ همراه بوده است. بسترهای فیلتری نانولیفی بر پایه کیتوسان پتانسیل عظیمی به منظور اهداف تصفیه ارائه می‌دهد. در مقایسه با پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای مصنوعی به دلیل استحکام خوب، به عنوان فیلتر کاربرد بیشتری دارند. همان‌طور که قبلًا گفته شد، ظرفیت اتصال در برابر یون‌های فلزی توسط

¹. Dubinin-Radushkevich

². Kit^s group

³. Escherichia coli

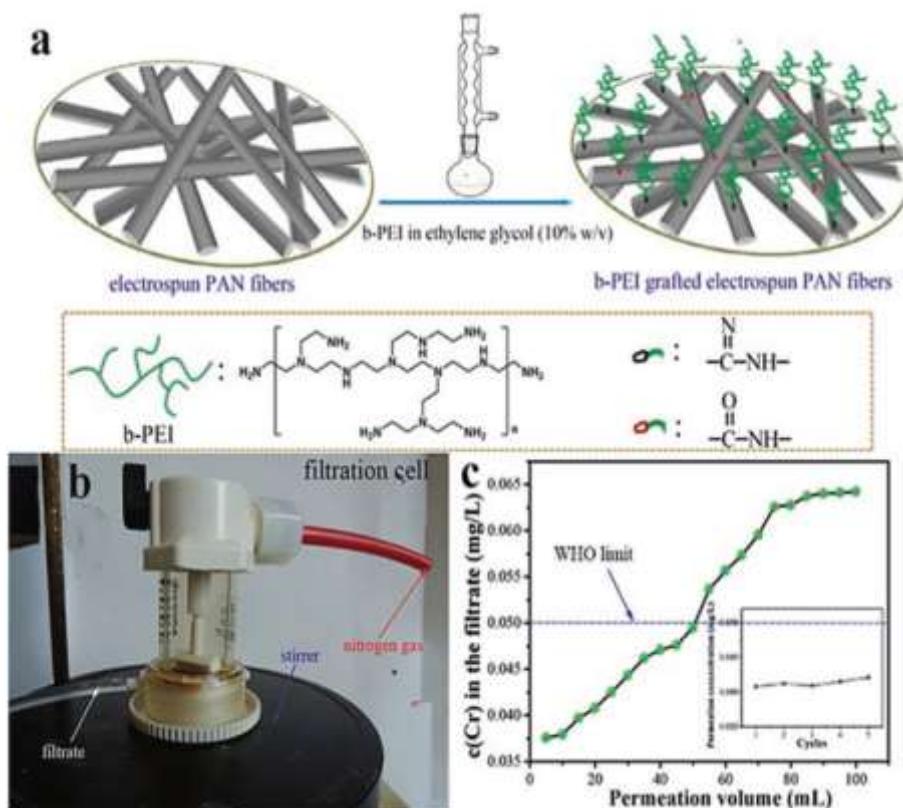
الیاف الکتروریسی شده از پلیمرهای مصنوعی مرسوم، محدود است. در بیشتر موارد، نانوالیاف الکتروریسی شده برای بهبود عملکرد تصفیه باید عامل دار شوند. لیو^۱ و همکاران گزارش کردند که یک غشای پلی وینیل آمین^۲ که به غشای میکروفیلتراسیون نانو لیفی الکتروریسی شده پلی اکریلونیتریل پیوند زده شده است، قادر به حذف (VI)Cr از آب آلوده است. این غشای فیلتری اندازه منفذ متوسط 0.01 ± 0.04 میکرومتر با شار آب خالص $37 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{psi}$ ± 645 با نرخ جریان $70 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ ، توانایی حذف $2/6 \pm 2/3$ میلی گرم (VI)Cr در هر گرم از غشا را دارد می‌باشد؛ علاوه بر این، غشای فیلتری می‌تواند با استفاده از 0.1 mol/L از محلول آبی NaOH با نسبت واجذب $> 98\%$ بازیابی شود. وو^۳ و همکاران غشاهای نانولیفی پلی اترسولفون که پلی پیرول (PPy) در آن تعبیه شده است را برای از بین بردن یون‌های نفره تهیه کردند [۱۱۹]. متوسط قطر نانوالیاف به دست آمده از 410 nm تا 540 nm است. غشای فیلتری الکتروریسی شده دارای قطر $43 \text{ }\mu\text{m}$ و ضخامت $1/3$ میلی‌متر برای آزمایشات بود. حداکثر ظرفیت حذف یون‌های Ag⁺ بر روی غشای نانوالیافی پلی پیرول / پلی اترسولفون (mg/g) (Ag / PPy) $35/7$ بود. ظرفیت حذف، با غلظت یون فلزی اولیه و مقدار pH افزایش می‌یابد اما با دما و نرخ فیلتراسیون محلول‌ها کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که غشای نانولیفی الکتروریسی شده پلی پیرول / پلی اترسولفون می‌تواند به عنوان یک فیلتر بالقوه برای حذف یون فلزی عمل کند. اخیراً، گروه ما یک پلی‌اتیلن ایمین شاخه‌ای^۴ (b-PEI) جدید که با غشای الیافی پلی اکریلونیتریل (PAN) الکتروریسی شده، پیوند خورده است را برای اصلاح و ترمیم Cr(VI) گزارش داده است [۱۲۰].

غشای الیافی الکتروریسی شده b-PEI PAN که با b -PEI پیوند زده شده است با استفاده از روش الکتروریسی و یک روش جریان بازگشتی آسان سنتز می‌شود (شکل ۵-۸a). الیاف الکتروریسی شده خاصیت تشکیل غشای خوبی را نشان می‌دهد و کاربرد آن‌ها در فرایند پالایش فیلتراسیون را تضمین می‌کند. الیاف الکتروریسی شده PAN که با b -PEI پیوند خورده است از ظرفیت جذب عالی در برابر 637.4 mg/g Cr(VI) $= 637.4 \text{ mg/g}$ qm برابر است که بالاتر از بسیاری از جاذبهای دیگر بود؛ علاوه بر این، الیاف الکتروریسی شده PAN که با b -PEI پیوند خورده است می‌تواند باعث کاهش غلظت Cr(VI) از 5 mg/L یا 10 mg/L به زیر 0.5 mg/L شود که به عنوان استاندارد آب آشامیدنی توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) تعیین شده است. بر اساس عملکرد جذب عالی، آزمایش‌های تصفیه دینامیک انجام شد (شکل ۵-۸b). برای آزمایشات فیلتراسیون، غلظت اولیه

¹. Liu². Polyvinylamine³. Wu⁴. branched polyethylenimine (b-PEI)

محلول Cr (VI) برابر با mg/L ۵ و فشار اعمال شده ۱/۰ bar می‌باشد. نتایج نشان داد که فیلتر الیافی الکتروریسی شده PAN که با b-PEI پیوند خورده است می‌تواند مقدار باقیمانده Cr (VI) را در شرایط تصفیه به زیر mg/L ۰/۰۵ کاهش دهد در صورتی که بیش از ۵۰ میلی‌لیتر محلول در شار بالای L⁻¹·h⁻² ۷۳۱/۷ باشد (شکل ۸c). داده‌ها نشان می‌دهد که غشای الیافی الکتروریسی شده PAN که با b-PEI پیوند زده شده است یک کاندیدای امیدوارکننده برای تصفیه و اصلاح Cr (VI) از پساب می‌باشد. برخی دیگر از روش‌ها و ساختارهای فیلتری نیز برای غنی کردن آماده‌سازی فیلترهای الکتروریسی موردمطالعه قرار گرفته است. گروه لی غشاهای کامپوزیتی نanolیفی فیلم نازک^۱ جدید را از طریق قرار دادن لایه به لایه آلجينات / کیتوسان بر روی سطح بسترهای نanolیفی الکتروریسی شده برای حذف Cr (VI) آماده کردند [۱۲۱]. بازدهی حذف بالاتر Cr (VI)، با افزایش چرخه لایه به لایه به دست می‌آید؛ اما با افزایش چرخه‌های لایه به لایه، میزان نفوذ آب کاهش می‌یابد. هنگامی که چرخه لایه به لایه به ۲۰/۵ می‌رسد، بازده کلی حذف Cr (VI) تقریباً ۷۰٪ در غلظت 40 ppm Cr (VI) می‌باشد. در مقایسه با غشاهای رایج برای حذف فلزات سنگین، این غشاهای کامپوزیتی نanolیفی فیلم نازک جدید، روند تولید ساده و مصرف انرژی کمی را نشان می‌دهد. این روش به عنوان یک راهبرد جدید از تولید غشاهای کامپوزیتی نanolیفی مشابه برای حذف سایر یون‌های فلزی به کاربرده شده است.

^۱. Thin film



شکل ۸-۵(a) طرح نمادین از سنتز الیاف الکتروریسی شده b-PEI PAN که با b-PEI پیوند خورده است (b) سل فیلتراسیون

(c) منحنی های دست یابی به موفقیت برای محلول های Cr(VI) از طریق غشای bPEI-EPAN (ضخامت

۱۵۰ میکرومتر) در فشار ۰/۱ bar (در حاشیه نمودار چرخه بازیابی فیلتراسیون) [۱۲۰].

کامپوزیت غشایی چندلایه نیز مسیری مؤثر برای تهیه غشای فیلتری است. وانگ و همکاران، طبقه جدیدی از غشای میکروفیلتراسیون را بر اساس الیاف دولایه نانومقیاس پلی اکریلونیتریل (PAN) همراه با زمینه الیافی در مقیاس میکرو پلی اتیلن ترفتالات (PET) که با نانوالیاف سلولزی عامل دار فوق العاده ظریف آمیخته شده است (قطر تقریباً ۵ نانومتر) تولید کردند [۱۲۲]. ضخامت کلی غشای میکروفیلتراسیون 10 ± 140 میکرومتر و نرخ نفوذ آب خالص $1300 \text{ L/m}^2 \text{ h/psi}$ می باشد. قابلیت حذف برای Cr (VI) و Pb^{2+} به ترتیب 100 mg/g و 260 mg/g بود.

۴-۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

در این فصل، جاذب‌ها و فیلترهای الکترورسی شده برای حذف فلزات سنگین را شرح داده‌ایم. مطالعات فزاینده‌ای به دلیل ویژگی‌های جالب توجه الیاف الکترورسی شده از قبیل تخلخل زیاد، نسبت سطح به حجم بالا، آماده‌سازی آسان، تشکیل غشای خوب و انعطاف‌پذیری، در این زمینه انجام شده است. تصفیه فلزات سنگین توسط فیلترهای الکترورسی شده عمدتاً به دلیل فرایند جذب بین الیاف الکترورسی شده و فلزات سنگین است. مقالات بی‌شماری بر فرایندهای جذب به عنوان پایه و اساس تصفیه تمرکز کردند. سه نوع عمدۀ از جاذب‌های الکترورسی شده وجود دارد که در تصفیه فلزات سنگین نقش دارند: نانوالیاف معدنی، نانوالیاف آلی و نانوالیاف کامپوزیتی آلی / معدنی. انواع مختلف از جاذب‌های الیافی مزایای منحصر به فرد خود را دارند. نانوالیاف معدنی دارای قطر الیاف کوچک و نسبت سطح به حجم زیاد هستند، اما شکننده می‌باشند. نانوالیاف آلی از استحکام مطلوبی برخوردار هستند، اما نانوالیاف آلی الکترورسی شده خام ظرفیت پیوند کم به فلزات سنگین را نشان می‌دهند و الیاف آلی برای بهمود ظرفیت جذب باید اصلاح شوند. نانوالیاف کامپوزیتی آلی و معدنی می‌تواند مزایای هر دو جزء را با هم ترکیب کند و اثر هم‌افزایی برای فرایند جذب داشته باشد. ثابت شده است که همه این نوع الیاف الکترورسی شده قادر به حذف فلزات سنگین بر اساس فرایندهای جذب هستند. غشاهای الیافی الکترورسی شده به عنوان فیلترها برای حذف فلزات سنگین به دلیل قابلیت تشکیل غشای مناسب و ظرفیت پیوند مؤثر مورداستفاده قرار گرفته است. با توجه به استحکام، نانوالیاف آلی یا نانوالیاف کامپوزیتی آلی / معدنی اغلب برای تصفیه یون‌های فلزی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. تمامی نتایج نشان می‌دهد که الیاف الکترورسی شده از پتانسیل خوبی در تصفیه پساب فلزات سنگین برخوردار هستند.

اگرچه مواد الکترورسی شده به عنوان جاذب فلزات سنگین یا فیلترهای تصفیه پساب از پتانسیل بالایی برخوردار هستند، اما هنوز بسیاری از مسائل و چالش‌های فنی باقی‌مانده است که باید حل شود یا پاسخ داده شود:

(۱) استحکام مکانیکی

نیاز به تولید فیلترهای نانولیفی با استحکام مکانیکی بالا با مقاومت در برابر جریان آب در کاربردهای عملی وجود دارد. به دلیل ویژگی شکننده بودن، الیاف الکترورسی شده در زمینه تصفیه محدود هستند؛ بنابراین، تولید نانوالیاف الکترورسی شده با استحکام مکانیکی بالا هنوز یک چالش می‌باشد.

(۲) مکانیسم حذف

بیشتر مطالعات بر طراحی و تهیه مواد فیلتری یا جاذب الکترورسی شده بدیع مختلف، تمرکز دارند. توجه کمتری به تحقیقات عمیق در فرایند حذف فلزات سنگین و درک

مکانیسم‌ها و نظریه‌های اساسی در طی این فرایند شده است. مکانیسم شامل برهم‌کنش فیزیکی و برهم‌کنش شیمیایی برای حذف فلزات سنگین توسط جاذب‌ها یا فیلترهای الکتروریسی شده، یک راهنمای علمی برای طراحی و تهیه مواد الکتروریسی شده است. ضروری است که بینش مکانیسم محور در مورد حذف فلزات سنگین را داشته باشیم.

(۳) هزینه کم و قابلیت استفاده مجدد

برای کاربردهای صنعتی، هزینه فیلترها یک نکته مهم است. توسعه جاذب‌ها یا فیلترهای الکتروریسی شده با آماده‌سازی آسان و هزینه کم برای تجاری‌سازی ضروری است. طول عمر یکی دیگر از موارد مهم در کاربردهای صنعتی است. جاذب‌ها یا فیلترهایی که بارها قابل بازیابی هستند، مواد ایده آل برای طولانی کردن عمر کاری هستند.

(۴) اثر هم‌افزایی

الیاف الکتروریسی شده چند جزئی، مانند آلی / معدنی، تمایل تحقیق برای تهیه جاذب‌ها یا فیلترهای رضایت‌بخش به‌وسیله هم‌افزایی چند جزء را دارا می‌باشند. محققان باید از طریق اثر هم‌افزایی، جاذب‌ها یا فیلترهایی را ایجاد کنند که می‌توانند انواع یون‌های فلزات سنگین را همزمان حذف کنند و همچنین از استحکام مکانیکی بالایی برخوردار باشند.

(۵) چندمنظوره بودن

بیشتر محققان در مورد حذف یک فلز سنگین تحقیق می‌کنند. با این حال، بیش از یک فلز سنگین یا آلاینده در پساب وجود دارد؛ بنابراین، توسعه جاذب‌ها یا فیلترهایی که می‌توانند چندین فلز سنگین یا آلاینده را به‌طور هم‌زمان حذف کنند معنی دار است. علاوه بر این، جاذب‌ها یا فیلترهایی با کارکردهای دیگر، مانند خاصیت ضد باکتری، خاصیت کاتالیزوری و غیره، برای توسعه مواد چندمنظوره، نیاز به بررسی دارند.

درنتیجه، مواد الکتروریسی شده نقش مهمی در زمینه جذب فلزات سنگین یا فیلتر دارند. اکثر محققان بر تولید مواد بدیع به عنوان جاذب یا فیلتر مرکز می‌کنند و به ندرت ملاحظات کاربردهای عملی را هدف قرار می‌دهد. جاذب‌ها یا فیلترهای الکتروریسی شده باید با ملاحظات کاربردی تر از جمله بازدهی حذف، قابلیت استفاده (خواص مکانیکی، توانایی در برابر تداخل، عدم آلوگی ثانویه و پایداری) و قابلیت استفاده مجدد یا بازیابی (طول عمر و احیا آسان) مورد مطالعه قرار گیرند. اگرچه پیش از استفاده از آن‌ها در کاربردهای صنعتی در مقیاس بزرگ، مسیر طولانی وجود دارد، اما ما معتقدیم که ممکن است چالش‌های فوق حل شوند و جاذب‌ها یا فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف فلزات سنگین، در آینده نزدیک، راه خود را به سمت کاربردهای عملی بیابند. این وضعیت می‌تواند فرصت‌های بیشتری را برای همکاران انجمن‌های تحقیقاتی الکتروریسی در سراسر جهان فراهم کند.

مراجع

- [1]. Mahmud HNME, Huq AKO, binti Yahya R (2016) RSC Adv 6:14778 ت 14791.
- [2]. Lin Y, Gritsenko D, Feng S, Teh YC, Lu X, Xu J (2016) Biosens Bioelectron 83:256 ت 266.
- [3]. Rezania S, Taib SM, Din MFM, Dahalan FA, Kamyab H (2016) J Hazard Mater 318:587 ت 599
- [4]. Wang J, Shen H, Hu X, Li Y, Li Z, Xu J, Song X, Zeng H, Yuan Q (2015) Adv Sci 3:1500289.
- [5]. Alcamo J, Henrichs T, Rosch T (2000) Kassel world water series report no. 2, Centre for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
- [6]. Zou Y, Wang X, Khan A, Wang P, Liu Y, Alsaedi A, Hayat T, Wang X (2016) Environ Sci Technol 50:7290 ت 7304.
- [7]. Fu F, Wang Q (2011) J Environ Manag 92:407 ت 418.
- [8]. Kurniawan TA, Lo WH, Chan GY (2006) J Hazard Mater 129:80 ت 100.
- [9]. Khin MM, Nair AS, Babu VJ, Murugan R, Ramakrishna S (2012) Energy Environ Sci 5:8075 ت 8109.
- [10]. Srivastava NK, Majumder CB (2008) J Hazard Mater 151:1 ت 8.
- [11]. Ngah WW, Hanafiah MAKM (2008) Bioresour Technol 99:3935 ت 3948.
- [12]. Barakat MA (2010) Arab J Chem 4:361 ت 377.
- [13]. Mayer-Gall T, Opwis K, Gutmann JS (2015) J Mater Chem A 3:386 ت 394.
- [14]. Kumar PS, Sundaramurthy J, Sundarraj S, Babu VJ, Singh G, Allakhverdiev SI, Ramakrishna S (2014) Energy Environ Sci 7:3192 ت 3222.
- [15]. Pereao OK, Bode-Aluko C, Ndayambaje G, Fatoba O, Petrik LF (2016) J Polym Environ 2016:1 ت 5.
- [16]. Peng S, Jin G, Li L, Li K, Srinivasan M, Ramakrishna S, Chen J (2016) Chem Soc Rev 45:1225 ت 1241.
- [17]. Formhals A (1934) US patent 1,975,504.
- [18]. Doshi J, Srinivasan G, Reneker D (1995) Polym News 20:206 ت 213.
- [19]. Fong H, Reneker DH (1999) J Polym Sci Part B Polym Phys 37:3488 ت 3493.
- [20]. Reneker DH, Chun I (1996) Nanotechnology 7:216.
- [21]. Srinivasan G, Reneker DH (1995) Polym Int 36:195 ت 201.
- [22]. Fong H, Chun I, Reneker DH (1999) Polymer 40:4585 ت 4592.
- [23]. Lu X, Wang C, Wei Y (2009) Small 21:2349 ت 2370.
- [24]. Lu X, Wang C, Favier F, Pinna N (2016) Adv Energy Mater 2016:1601301
- [25]. Sill TJ, von Recum HA (2008) Biomaterials 29:1989 ت 2006
- [26]. Kim FS, Ren G, Jenekhe SA (2010) Chem Mater 23:682 ت 732.
- [27]. Dai Y, Liu W, Formo E, Sun Y, Xia Y (2011) Polym Adv Technol 22:326 ت 338.

- [28].Wu J, Wang N, Zhao Y, Jiang L (2013) *J Mater Chem A* 1:7290–7305.
- [29].Ray SS, Chen SS, Li CW, Nguyen NC, Nguyen HT (2016) *RSC Adv* 6:85495–85514.
- [30].Ramaseshan R, Sundarajan S, Jose R, Ramakrishna S (2007) *J Appl Phys* 102:7.
- [31].Nalbandian MJ, Zhang M, Sanchez J, Choa YH, Nam J, Cwiertny DM, Myung NV (2016) *Chemosphere* 144:975–981.
- [32].Ma Z, Ji H, Teng Y, Dong G, Zhou J, Tan D, Qiu J (2011) *J Colloid Interf Sci* 358:547–553.
- [33].Jin R, Yang Y, Li Y, Yu X, Xing Y, Song S, Shi Z (2015) *ChemPlusChem* 80:544–548.
- [34].Wang P, Du M, Zhu H, Bao S, Yang T, Zou M (2015) *J Hazard Mater* 286:33–544.
- [35].Malwal D, Gopinath P (2016) *RSC Adv* 6:15021–15028.
- [36].Li X, Zhao R, Sun B, Lu X, Zhang C, Wang Z, Wang C (2014) *RSC Adv* 4:42376–42382.
- [37].Han C, Ma Q, Yang Y, Yang M, Yu W, Dong X, Wang J, Liu G (2015) *J Mater Sci Mater Electron* 26:8054–8064.
- [38].Luo J, Luo X, Hu C, Crittenden JC, Qu J (2016) *ACS Appl Mater Interfaces* 8:18912–18921.
- [39].Vu D, Li Z, Zhang H, Wang W, Wang Z, Xu X, Dong B, Wang C (2012) *J Colloid Interf Sci* 367:429–435.
- [40].Wang H, Zhang P, Ma X, Jiang S, Huang Y, Zhai L, Jiang S (2014) *J Hazard Mater* 265:158–165.
- [41].Li S, Yue X, Jing Y, Bai S, Dai Z (2011) *Colloid Surf A* 380:229–233.
- [42].Mahapatra A, Mishra BG, Hota G (2013) *J Hazard Mater* 258:116–123.
- [43].Hao L, Wang H, Cai R, Cheng J, Sun M, Li X, Jiang S (2016) *RSC Adv* 6:69947–69955.
- [44].Deng S, Wang P, Zhang G, Dou Y (2016) *J Hazard Mater* 307:64–72.
- [45].Xiong C, Li Y, Wang G, Fang L, Zhou S, Yao C, Chen Q, Zheng X, Qi D, Fu Y, Zhu Y (2015) *Chem Eng J* 259:257–265.
- [46].Neghlani PK, Rafizadeh M, Taromi FA (2011) *J Hazard Mater* 186:182–189.
- [47].Li X, Zhang C, Zhao R, Lu X, Xu X, Jia X, Wang C, Li L (2013) *Chem Eng J* 229:420–428.
- [48].Zhao R, Li X, Sun B, Shen M, Tan X, Ding Y, Jiang Z, Wang C (2015) *Chem Eng J* 268: 290–299.
- [49].Wang J, Pan K, Giannelis EP, Cao B (2013) *RSC Adv* 3:8978–8987.
- [50].Wang J, Pan K, He Q, Cao B (2013) *J Hazard Mater* 244:121–129.
- [51].Zhao R, Li X, Sun B, Ji H, Wang C (2017) *J Colloid Interf Sci* 487:297–309.
- [52].Dastbaz A, Keshtkar AR (2014) *Appl Surf Sci* 293:336–344.

- [53].Kampalanonwat P, Supaphol P (2010) ACS Appl Mater Interfaces 2:3619–3627.
- [54].Chalque EF, Dlamini LN, Adelodun AA, Greyling CJ, Ngila JC (2016) Appl Surf Sci 369:19–28.
- [55].Hong G, Li X, Shen L, Wang M, Wang C, Yu X, Wang X (2015) J Hazard Mater 295:161–169.
- [56].Zhang C, Li X, Zheng T, Zhao R, Wang C (2014) Chem Res Chin Univ 30:685–689.
- [57].Xiang T, Zhang Z, Liu H, Yin Z, Li L, Liu X (2013) Sci China Chem 56:567–575.
- [58].Singh N, Balasubramanian K (2014) RSC Adv 4:27691–27701.
- [59].Stephen M, Catherine N, Brenda M, Andrew K, Leslie P, Corrine G (2011) J Hazard Mater, 192:922–927.
- [60].Bahramzadeh A, Zahedi P, Abdouss M (2016) J Appl Polym Sci 133:42944.
- [61].Zhijiang C, Jianru J, Qing Z, Haizheng Y (2015) RSC Adv 5:82310–82323.
- [62].Zheng P, Shen S, Pu Z, Jia K, Liu X (2015) Fiber Polym 16:2215–2222.
- [63].Hosseini M, Keshtkar AR, Moosavian MA (2016) Bull Mater Sci 39:1091–1100.
- [64].Shariful MI, Sharif SB, Lee JJL, Habiba U, Ang BC, Amalina MA (2017) Carbohydr Polym, 157:57–64.
- [65].Aluigi A, Tonetti C, Vineis C, Tonin C, Mazzuchetti G (2011) Eur Polym J 47:1756–1764.
- [66].Ma Y, Zhang B, Ma H, Yu M, Li L, Li J (2016) RSC Adv 6:30739–30746.
- [67].Sharma DK, Li F, Wu YN (2014) Colloid Surf A 457:236–243.
- [68].Wang X, Min M, Liu Z, Yang Y, Zhou Z, Zhu M, Chen Y, Hsiao BS (2011) J Membr Sci 379:191–199.
- [69].Ki CS, Gang EH, Um IC, Park YH (2007) J Membr Sci 302:20–26.
- [70].Wen HF, Yang C, Yu DG, Li XY, Zhang DF (2016) Chem Eng J 290:263–272.
- [71].Zhao J, Li Z, Wang J, Li Q, Wang X (2015) J Mater Chem A 3:15124–15132.
- [72].Wu C, Wang H, Wei Z, Li C, Luo Z (2015) Appl Surf Sci 346:207–215.
- [73].Xin S, Zeng Z, Zhou X, Luo W, Shi X, Wang Q, Deng H, Du Y (2017) J Hazard Mater 324:365–372.
- [74].Zeytuncu B, Akman S, Yucel O, Kahraman MV (2015) Water Air Soil Pollut 226:173.
- [75].Sarioglu OF, Celebioglu A, Tekinay T, Uyar T (2016) Int J Environ Sci Tech 13:2057–2066.
- [76].Li Y, Zhang J, Xu C, Zhou Y (2016) Sci China Chem 59:95–105.
- [77].Huang CH, Hsieh TH, Chiu WY (2015) Carbohydr Polym 116:249–254.

- [78].Liu H, Hsieh YL (2002) *J Polym Sci Poly Phys* 40:2119-2129.
- [79].Celebioglu A, Uyar T (2011) *Mater Lett* 65:2291-2294.
- [80].Tian Y, Wu M, Liu R, Li Y, Wang D, Tan J, Wu R, Huang Y (2011) *Carbohydr Polym* 83:743-748.
- [81].Tong L, Chen J, Yuan Y, Cui Z, Ran M, Zhang Q, Bu J, Yang F, Su X, Xu H (2015) *J Appl Polym Sci* 132:41507.
- [82].Rad LR, Momeni A, Ghazani BF, Irani M, Mahmoudi M, Noghreh B (2014) *Chem Eng J*, 256:119-127.
- [83].Habiba U, Afifi AM, Salleh A, Ang BC (2017) *J Hazard Mater* 322:182-194.
- [84].Tan P, Wen J, Hu Y, Tan X (2016) *RSC Adv* 6:79641-79650 R. Zhao et al.
- [85].Najafabadi HH, Irani M, Rad LR, Haratameh AH, Haririan I (2015) *RSC Adv* 5:16532-16539.
- [86].Irani M, Keshtkar AR, Moosavian MA (2012) *Chem Eng J* 200:192-201
- [87].Hota G, Kumar BR, Ng WJ, Ramakrishna S (2008) *J Mater Sci* 43:212-217
- [88].Aliabadi M, Irani M, Ismaeli J, Najafzadeh S (2014) *J Taiwan Inst Chem E*, 45:518-526.
- [89].Aliabadi M (2016) *Fiber Polym* 17:1162-1170.
- [90].Razzaz A, Ghorban S, Hosayni L, Irani M, Aliabadi M (2016) *J Taiwan Inst Chem E* 58: 333-343.
- [91].Hallaji H, Keshtkar AR, Moosavian MA (2015) *J Taiwan Inst Chem E* 46:109-118.
- [92].Mahanta N, Valiyaveettil S (2013) *RSC Adv* 3:2776-2783.
- [93].Taha AA, Wu YN, Wang H, Li F (2012) *J Environ Manag* 112:10-16.
- [94].Cai J, Lei M, Zhang Q, He JR, Chen T, Liu S, Fu SH, Li TT, Liu G, Fei P (2017) *Compos Part A* 92:10-16.
- [95].Xiao S, Ma H, Shen M, Wang S, Huang Q, Shi X (2011) *Colloid Surf A* 381:48-54.
- [96].Sun B, Li X, Zhao R, Yin M, Wang Z, Jiang Z, Wang C (2016) *J Taiwan Inst Chem E* 62: 219-227.
- [97].Xu GR, Wang JN, Li CJ (2012) *Chem Eng J* 198:310-317.
- [98].Wang JN, Jia BB, Li CJ (2015) *Nano* 10:1550029.
- [99].Guo H, Zhou H, Jin P, Li W, Ma Y, Koji I, Ji S (2016) *RSC Adv* 6:5965-5972.
- [100].Luo C, Wang J, Jia P, Liu Y, An J, Cao B, Pan K (2015) *Chem Eng J* 262:775-784.
- [101].Mirzabe GH, Keshtkar AR (2015) *J Radioanal Nucl Chem* 303:561-576.
- [102].Taha AA, Qiao J, Li F, Zhang B (2012) *J Environ Sci* 24:610-616.
- [103].Yari S, Abbasizadeh S, Mousavi SE, Moghaddam MS, Moghaddam AZ (2015) *Process Saf Environ* 94:159-171.

- [104]. Mokhtari M, Keshtkar AR (2016) *Res Chem Intermed* 42:4055–4076.
- [105]. Islam MS, Rahaman MS, Yeum JH (2015) *Colloid Surf A* 484:9–18.
- [106]. Wu S, Li F, Wang H, Fu L, Zhang B, Li G (2010) *Polymer* 51:6203–6211.
- [107]. Jia BB, Wang JN, Wu J, Li CJ (2014) *Chem Eng J* 254:98–105.
- [108]. Wu S, Li F, Xu R, Wei S, Wang H (2010) *Mater Lett* 64:1295–1298.
- [109]. Teng M, Wang H, Li F, Zhang B (2011) *J Colloid Interf Sci* 355:23–28.
- [110]. Sivakumar M, Mohan DR, Rangarajan R (2006) *J Membr Sci* 268:208–219.
- [111]. Bessbousse H, Rhlalou T, Verchère JF, Lebrun L (2008) *J Membr Sci* 307:249–259.
- [112]. Barakat MA, Schmidt E (2010) *Desalination* 256:90–93.
- [113]. Yalçın E, Gedikli S, İabuk A, Karahaliloglu Z, Demirkilek M, Bayram C, Sam M, Saglam N, Denkbaş EB (2015) *Clean Techn Environ Policy* 17:921–934.
- [114]. Zhou W, He J, Cui S, Gao W (2011) *Fiber Polym* 12:431–437.
- [115]. Aluigi A, Corbellini A, Rombaldoni F, Mazzuchetti G (2013) *Text Res J* 83:1574–1586.
- [116]. Lee D, Chen DWC, Chiu SF, Liu SJ (2015) *Text Res J* 85:346–355.
- [117]. Desai K, Kit K, Li J, Davidson PM, Zivanovic S, Meyer H (2009) *Polymer* 50:3661–3669.
- [118]. Liu Y, Ma H, Liu B, Hsiao BS, Chu B (2015) *J Plast Film Sheet* 31:379–400.
- [119]. Wu JJ, Lee HW, You JH, Kau YC, Liu SJ (2014) *J Colloid Interf Sci* 420:145–151.
- [120]. Zhao R, Li X, Sun B, Li Y, Li Y, Yang R, Wang C (2017) *J Mater Chem A* 5:1133–1144.
- [121]. Zhang M, Wang J, Li C (2015) *Polym Eng Sci* 55:421–428.
- [122]. Wang R, Guan S, Sato A, Wang X, Wang Z, Yang R, Hsiao BS, Chu B (2013) *J Membr Sci*. 446:376–382.

فصل ششم

فیلترهای الکتروریسی شده برای حذف آلاینده‌های آلی

آنیتا سنتا میزان^۱، برابو بالوسامی^۲ و تامر اویار^۳

^۱. Anitha Senthamiczhan e-mail: senthamizhan@unam.bilkent.edu.tr

^۲. Brabu Balusamy e-mail: Brabu.Balusamy@iit.it

^۳. Tamer Uyar e-mail: uyar@unam.bilkent.edu.tr

چکیده

افزایش تقاضا برای دسترسی به آب سالم و تمیز در جهان، پیشرفت فناوری‌های جدید را برای حذف آلاینده‌های محیط‌زیستی ترغیب می‌کند؛ به خصوص برای آلاینده‌های آلی شامل: رنگ‌ها، ترکیبات آلی فرار^۱، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۲، آفتکش‌ها، علفکش‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل خاصیت تخریب پذیری‌شان، سلامت محیط‌زیست را به خطر می‌اندازند. در سال‌های اخیر، دسترسی به الیاف غشایی الکترورسی به عنوان فیلتر مناسب برای حذف انواع آلودگی‌ها از آب، خاک و هوا به کاربرده شده است. نانو الیاف الکترورسی، فیلترهای مناسبی به دلیل وجود گروه‌های عاملی مختلف در ساختارشان می‌باشند. انتخاب ماده و اثر شرایط تجربی شامل pH، زمان تماس و مقدار جاذب بر بازده حذف آلاینده‌ها به صورت گستردۀ بررسی شده است. فصل حاضر به فرایندهای اخیر که به پیشرفت نانو الیاف عامل‌دار الکترورسی شده کامپوزیتی غشایی که برای حذف انواع مختلف ترکیبات آلی منجر شده است، می‌پردازد.

۱-۶- مقدمه

صنعتی شدن و مدرن شدن، تأثیرات منفی در جامعه به وجود آورده است؛ به عنوان مثال آلودگی آب، خطری جدی است که سلامت محیط‌زیست را تهدید می‌کند [۲، ۱]. در سال‌های اخیر نگرانی‌ها برای آلاینده‌های آلی مانند رنگ‌ها، هیدروکربن‌ها، فنول‌ها، آبسان سازها^۳، گریس‌ها، روغن‌ها، آفتکش‌ها، علفکش‌ها، بای‌فیلی ها^۴، دترجنت‌ها و مواد دارویی به دلیل طبیعت سلطان‌زایی آن‌ها و اثرات مخرب و سمی آن‌ها بر اکوسیستم آبی افزایش پیدا کرده است [۱، ۳، ۴].
نیاز به آب سالم در آینده‌ای نزدیک به یک مشکل همگانی تبدیل خواهد شد؛ بنابراین، حذف مؤثر آلاینده‌ها از آب به شدت موردنیاز است. تاکنون، روش‌های متفاوتی (تصفیه بیولوژیکی، شیمیایی و شیمی‌فیزیکی) برای حذف آلودگی‌های آلی از پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اگرچه، فرایند جذب هم به دلیل سادگی فرایند، طراحی ساده و ظرفیت جذب بالا به عنوان روش مناسبی تعریف شده است [۶، ۵].

به‌هرحال انواع مختلفی از مواد نانوساختار به صورت موفق به عنوان جاذب برای حذف انواع آلودگی‌های زیست‌محیطی استفاده شده‌اند [۹، ۷]. در این کار، الکترورسی به عنوان روشی ساده با بازده بالا برای تولید الیاف غشایی نانوساختار برای عملیات تصفیه مورد توجه قرار گرفته شده است

^۱. VOC (Volatile Organic Compounds)

^۲. PAH (Polycyclic aromatic hydrocarbons)

^۳. Plasticizers

^۴. Biphenyls

[۱۱، ۱۰]. این الیاف دارای خواص منحصر به فرد مانند نسبت مساحت سطحی به حجم بالا و خواص قابل تنظیم که آن‌ها را گزینه‌های مناسبی برای حسگرهای کاتالیست‌ها و تصفیه می‌کند [۱۲-۱۶]. اگرچه این ساختار الیاف مانند که می‌تواند دارای گروه‌های عاملی باشد، خواص ویژه‌ای برای حذف انواع آلودگی‌ها از خود نشان داده است [۱۷-۱۹]. در اولین نگاه، توضیح کامل این گونه ترکیبات کامپوزیتی دشوار به نظر می‌رسد؛ اما در این فصل انواع روش‌های مختلف برای عامل‌دار کردن غشاهای الکتروریسی شده و توانایی آن‌ها در حذف مواد مختلف آلی مانند رنگ‌ها، مواد آلی فرار، هیدروکربن‌های آروماتیک پلی سیکلی و غیره در طبیعت مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۶-۲- فیلترهای نانوالیاف الکتروریسی شده برای حذف آلاینده‌های آلی

۶-۲-۱- حذف آلودگی‌های رنگزا

مطمئناً برای همگان، رنگزاها به دلیل طبیعت مضری که دارند شناخته‌ترین آلودگی محیط‌زیستی به شمار می‌روند؛ بنابراین، روش‌های گوناگونی مانند جذب، انعقاد و تهشیینی، اکسیداسیون پیشرفت‌ه و همین‌طور جداسازی توسط غشا تاکنون برای حذف این مواد استفاده شده‌اند [۲۱، ۲۰]. به‌طور کلی، کمترین مقدار از رنگزاها در آب می‌تواند توسط روش‌هایی که در جدول ۱-۶ آمده است، شناسایی شود که به ساختار، کروموفرها^۱ و طبیعت پیوند آن‌ها ربط پیدا می‌کند [۲۲]. آلودگی رنگ در آب سبب خطراتی مانند سرطان‌های مختلف، جهش‌زایی، شکستگی‌های کروموزومی و مشکلات تنفسی حتی در مقادیر خیلی کم می‌شود.

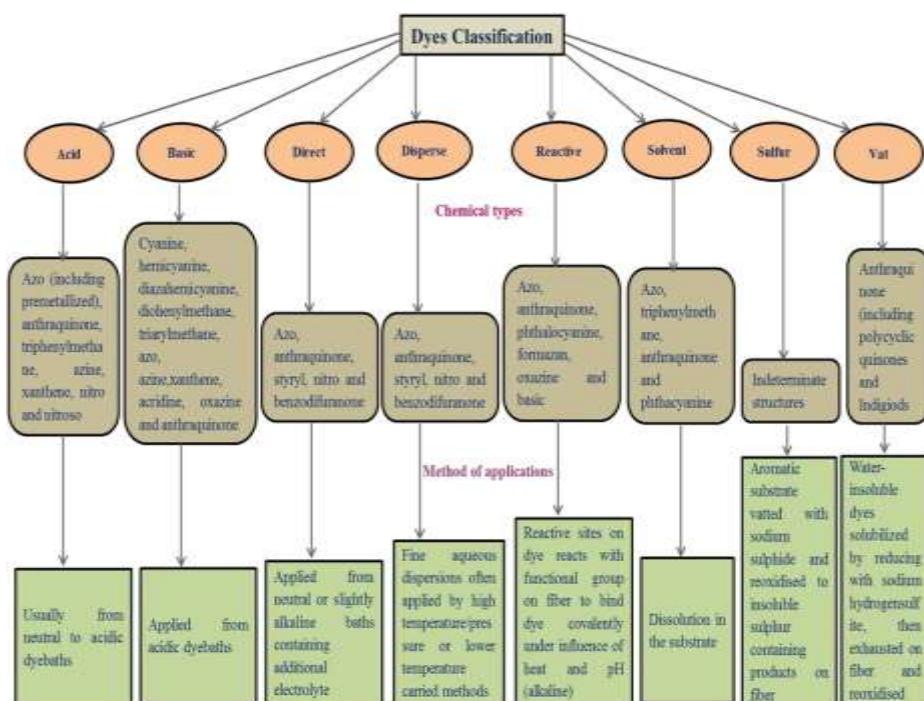
فرایند جذب به‌طور وسیع، به عنوان روشی مطمئن به دلیل سادگی، بازدهی بالا و دوست‌دار محیط‌زیست بودن برای حذف انواع آلودگی‌های در آب پذیرفته شده است [۲۳-۲۸]. شکل ۲-۶ شمایی از حذف رنگ توسط جاذب‌ها را نشان می‌دهد. کلمه جذب اشاره دارد به تجمع موادی که توسط یک رابطی بین دو فاز قرار می‌گیرند؛ بنابراین، تاکنون موفقیت‌های بی‌شماری برای طراحی جاذب‌های مناسب مانند کربن، سیلیکا ژل، زئولیت‌ها، کلی و آلومینا به دست آمده است؛ اگرچه تلاش‌های بسیاری برای ارتقای جاذب‌های نامبرده در تصفیه آب در حال انجام است. به‌طور کلی، بازیابی نانوذرات استفاده شده به عنوان جاذب سخت است؛ زیرا فعالیت آن پس از عملیات جذب کم شده و می‌تواند خود به عنوان یکی از عوامل آلودگی به حساب آید؛ به علاوه، ارتقای جاذب‌های جدید که شامل ظرفیت جذب بالا، مساحت سطح بالا و همین‌طور ویژگی بازیابی و استفاده مجدد داشته باشند، در حال پیشرفت هستند؛ به عنوان یک مثال، γ -AlOOH (بوهمیت)^۲ که یک ترکیب آلومینیوم اکسی هیدروکسید است و به دلیل وجود گروه‌های OH متعدد روی سطح آن، برهم‌کنش

¹. Chromophores

². Boehmite

آن با مولکول‌های خارجی افزایش پیدا می‌کند، از همین رو برای تصفیه آب و جذب مواد زائد آن به کار می‌رود. میائو^۱ و همکاران طبق شکل ۳-۶ یک جاذب جدید با ساختار الیافی- $\text{SiO}_2@/\gamma\text{-AlOOH}$ به دست آورده‌اند [۲۹].

در ابتدا توسط روش سل ژل^۲ و الکترورسی و در ادامه با حذف پلی وینیل کلراید^۳ توسط کلسینه کردن آن الیاف SiO_2 تهیه گردید. انعطاف زیاد و مقاومت گرمایی بالای الیاف، SiO_2 ، ساختار شبکه‌ای در آن را تسهیل می‌کند. ساختار باز الیاف به دست آمده، مساحت سطح جاذب و آلودگی را در آب بیشتر می‌کند که به عنوان فاکتوری مهم، بازده عملیات جذب را بالا می‌برد. تصویر ۳-۶ الیاف غشایی را قبل و بعد از عملیات جذب کنگو قرمز^۴ نشان می‌دهد.



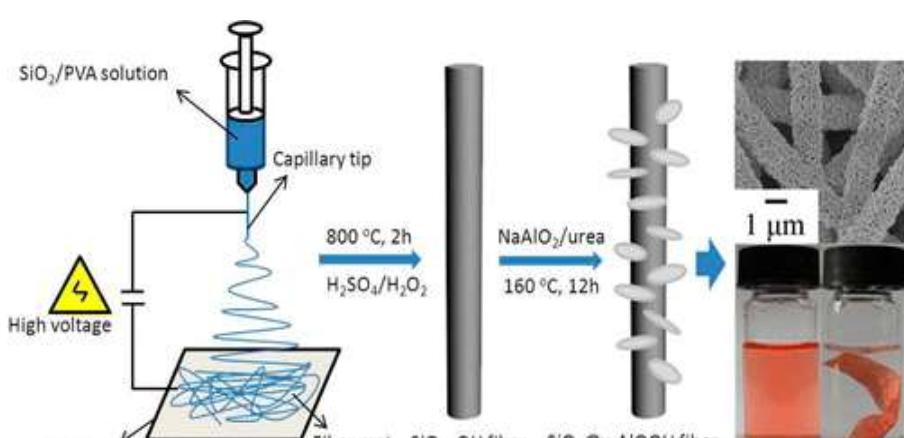
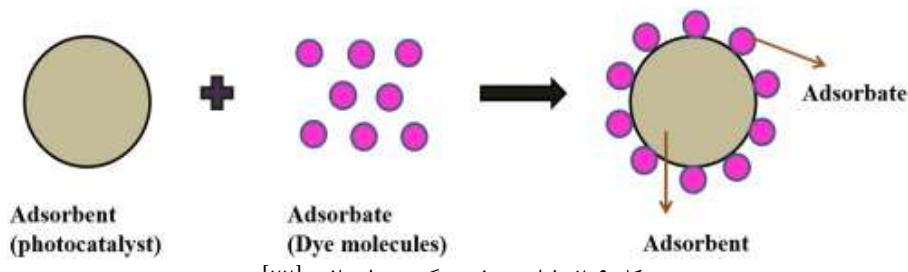
شکل ۱-۶- طبقه‌بندی، کاربردها و روش‌های مختلف استفاده از رنگ‌ها [۲۲]

¹. Miao

² Sol-gel method

³ PVA

⁴ Congo red



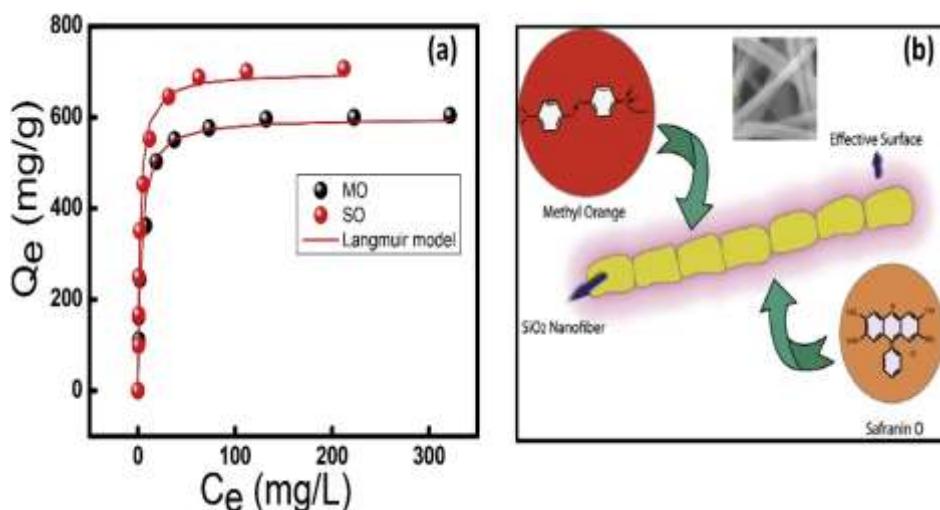
شکل ۳-۶- سنتز ایاف $\text{SiO}_2@\text{AlOOH}$ و کارایی آن در حذف رنگ کنگو قرمز [۲۹]

مواد با ساختار حفره‌دار به منظور استفاده در فرایند جذب، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند؛ زیرا به دلیل حفره‌های بسیار و مساحت سطح بالای آن‌ها، ظرفیت جذب افزایش پیدا می‌کند [۳۱، ۳۰].

معمولًاً، فرایند جذب در سه مرحله اتفاق می‌افتد: (۱) جذب اجزایی که قابل جذب شدن هستند به سطح جاذب مورداً استفاده، طی نیروهای برهمنش متفاوت مانند پیوندهای هیدروژنی؛ برهمنش‌های الکترواستاتیک، نیروهای واندروالس؛ برهمنش‌های آب‌گریز و غیره هستند. (۲) آلاینده‌ها بر سطح خارجی جاذب نفوذ می‌کند و در صورت وجود، بیشتر وارد جاذب می‌شوند (۳) در مرحله آخر فرایند جذب، آلاینده‌ها جذب مکان‌های فعال داخلی و خارجی سطوح جاذب می‌شوند.

شکل ۴-۶(a) ایزوترم‌های جذب متیل نارنجی^۱ و سفرانینو^۲ بر الیاف SiO_2 را نشان می‌دهد. شکل ۴-۶(b) طرح‌واره‌ی جذب رنگ توسط این الیاف را نشان می‌دهد. نویسنده‌گان و محققان گزارش داده‌اند که مقدار رنگرا جذب شده روی سطح نانوالیاف، سینتیک جذب را محاسبه می‌کند. می‌توان دلیل این امر را اشتراک و یا تبادل الکترون‌ها بین مولکول‌های رنگرا و نانو الیاف SiO_2 به شمار آورد.[۳۲]

مدل‌های لانگمیور و فرندلیچ، نیروهای واندروالس بین نانوالیاف SiO_2 و رنگرا را تأیید می‌کنند. مقدار محاسبه‌شده برای رنگ متیل نارنجی mg/g ۷۱۴ و برای رنگ سفرانینو mg/g ۹۵۸ گزارش شده است. سطح باردار منفی نانوالیاف SiO_2 مناسب برای نشستن و تعویض کاتیونی رنگزاهای نامبرده شده می‌باشد. جذب کمتر متیل نارنجی می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های آزو در ساختار آن باشد؛ زیرا وجود پیوندهای دوگانه و پل‌های آزو سبب انتقال درون‌مولکولی الکترون‌ها می‌شود و خود به عنوان یک حفاظ برای جذب تعریف شده است. ایم^۳ و همکاران نانو الیاف گرافن هیدروژل را برای شناسایی و حذف رنگزاهای محلول گزارش کرده‌اند [۳۳].



شکل ۴-۶(a) ایزوترم‌های جذب برای جذب رنگرا روی الیاف SiO_2 (b) شمای جذب رنگرا روی الیاف [۳۲]

¹. Methyl orange (MO)

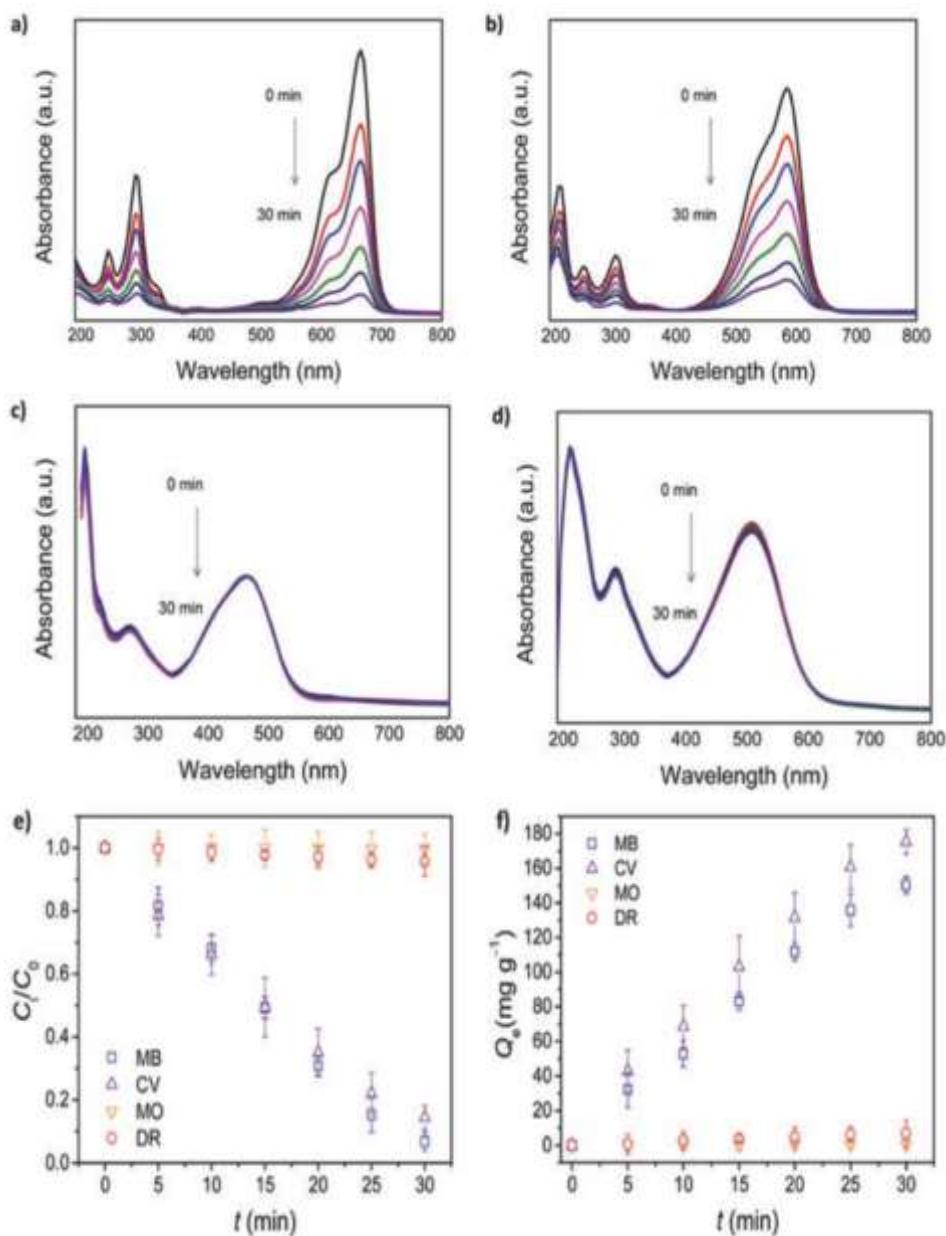
². Safranino (SO)

³. Im

تا به امروز، خواص گرافن به طور وسیعی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. اگرچه، تجمع لایه‌های گرافن، توسط پیوندهای (II) و برهمنکنش‌های واندروالس، استفاده از آن در محلول‌های آبی را محدود کرده است. با توجه به تمامی این گفته‌ها و محدودیت‌ها، نویسنندگان و محققان بسیاری گرافن در الیاف هیدروژل را به دلیل مساحت سطحی بالا و ساختار حفره‌دار و آب‌دوستی آن معرفی کرده‌اند. با مخلوط کردن هیدروژل، برهمنکنش گرافن با محلول آبی حاوی رنگ افزایش پیدا می‌کند. الیاف آماده‌شده هیدروژل، مقاومت مکانیکی مناسبی از خود نشان داده که برای استفاده در محلول آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شرایط ایجادشده، گرافن می‌تواند با اجزای آب‌دوست برهم‌کنش نشان دهد. مقدار جذب این جاذب برای متیلن آبی^۱ و بنفسن کریستالی^۲ به ترتیب ($\text{mmol.g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) ۰/۴۳ و ۰/۳۳ می‌باشد در صورتی که جریان سیستم ۱/۵ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد، ظرفیت جذب گرافن هیدروژل برای چهار نوع رنگزا، متیلن آبی، بنفسن کریستالی، متیلن نارنجی و دیسپرس قرمز به صورت تابعی از زمان موربدرسی قرار گرفت. به منظور این کار، بخشی از نانوالیاف غشایی گرافن هیدروژل در محلول آبی رنگزا قرار گرفت و جذب UV-Vis برای شناسایی هر پنج دقیقه تکرار شد (شکل ۵-a-d). نتایج عکس فرایند جذب را برای رنگزاها، توسط گرافن هیدروژل در طول زمان نشان داد. این تغییرات برای متیلن آبی و بنفسن کریستالی بیشتر از متیلن نارنجی و دیسپرس قرمز مشاهده شد (شکل ۵-e و ۵-f). مقدار حذف این رنگزاها به ترتیب ۹۳٪ برای متیلن آبی، ۸۶٪ برای بنفسن کریستالی و هیچ اثر واضحی در حذف متیلن نارنجی٪ و دیسپرس قرمز٪ دیده نشد. نتیجه جالب این که این الیاف جذب گزینش پذیر نسبت به متیلن آبی و بنفسن کریستالی دارند.

¹ Methylene blue (MB)

² Crystal Violet (CV)



شکل ۵-۶- جذب رنگراها توسط الیاف گرافن هیدروژل در محلول آبی (pH=6) در سل بسته (a-d) تغییرات هر پنج دقیقه توسط UV-Vis از محلول‌های رنگرا ۰/۱ گرم از جاذب در ۵۰ میلی‌لیتر محلول یک میلی مولار رنگرا (a) متیلن آبی (b) بنفش کریستالی (c) متیل نارنجی (d) دیسپرس قرمز (حل شده با نسبت یک به یک در محلول اتین گلیکول و آب) (e) تغییرات غلظت نسبی رنگرا (f) مقدار رنگرا جذب شده در زمان t [۳۳]

آلومینا به عنوان یک گزینه عالی برای تصفیه آب به طور وسیعی پذیرفته شده است؛ اگرچه، ظرفیت‌های جذب نسبتاً بالای دارند اما مقیاس پذیری آن‌ها در اشکال پراکنده مانند پودر محدود است. ساختار متخلخل جاذب به عنوان یک روش نوین برای هر چه بهتر انجام شدن عملکرد جذب تعریف شده است. وانگ^۱ و همکاران یک جاذب آلومینا - سیلیکا را به عنوان جاذب الیاف غشایی معرفی کرده‌اند؛ از این‌رو سیلیکا به عنوان فاز هسته و آلومینا به عنوان فاز پوسته این جاذب می‌باشند [۳۴].

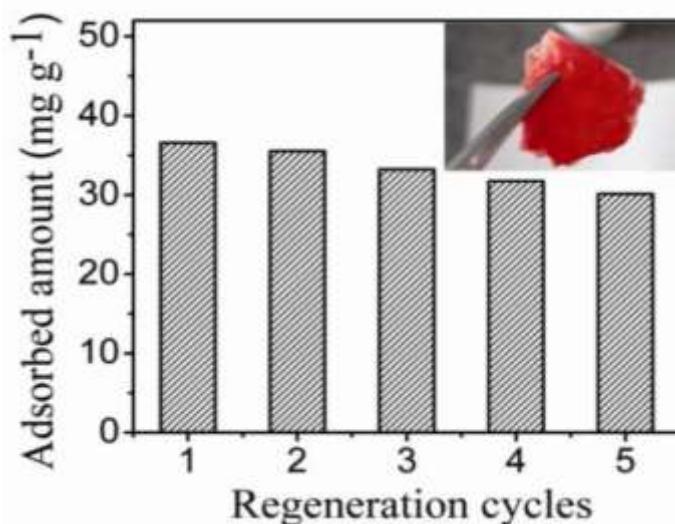
تاکنون نویسنده‌گان اشاره‌ای به استفاده از آلومینا برای سنتز الیاف غشایی نکرده بودند؛ زیرا اگرچه آلومینا مساحت سطحی بالا و مقاومت گرمایی و شیمیایی مناسبی دارد اما ساختار شکننده الیاف آلومینیوم نمی‌تواند حالت غشا را حفظ کند؛ اما در این کار، الیاف غشایی سنتز شده از مخلوط سیلیکا و آلومینا مساحت سطحی بالایی از خود نشان دادند که مربوط به فاز متراکم هسته الیاف سیلیکا و فاز پوسته مزو حفره آلومینا می‌باشد. مقاومت مکانیکی بالا در حدود ۴MPa، همچنین عملیات جذب با ظرفیت 115mg.g^{-1} نسبت به رنگزا کنگو قرمز^۲ در طول ۴۸ ساعت تأییدی محکم بر مناسب بودن این جاذب می‌باشد؛ همچنین ساختار و انعطاف الیاف پس از جذب رنگزا به خوبی حفظ شد.

شکل ۶-۶ بازیابی جاذب استفاده شده را نشان می‌دهد. پس از چند بار استفاده از این جاذب، ظرفیت جذب تنها از $36/56\text{ mg.g}^{-1}$ به $30/14\text{ mg.g}^{-1}$ کاهش پیدا کرد. نتایج حاصل از تست‌های متعدد نشان داد که غشای آماده شده به دلیل مقاومت بالا و خواص بازیابی و استفاده مجدد در چرخه بسیار مناسب در تصفیه رنگزا از آب می‌باشد.

به طور مکرر گزارش شده است که استفاده از نانوذرات در ماتریس پلیمری استفاده شده برای سنتز غشاهای تصفیه در زمینه‌های مختلف، خواص ویژه‌ای به الیاف غشایی می‌دهد. روش الکتروریسی به عنوان روشی ساده و پذیرفته شده برای سنتز الیاف غشایی استفاده می‌شود و می‌توان نانوذرات مختلفی را در این روش با پلیمر پایه مخلوط کرد و هدف از مخلوط کردن نانوذرات، بالابردن ظرفیت جذب می‌باشد.

¹. Wang

² Congo red

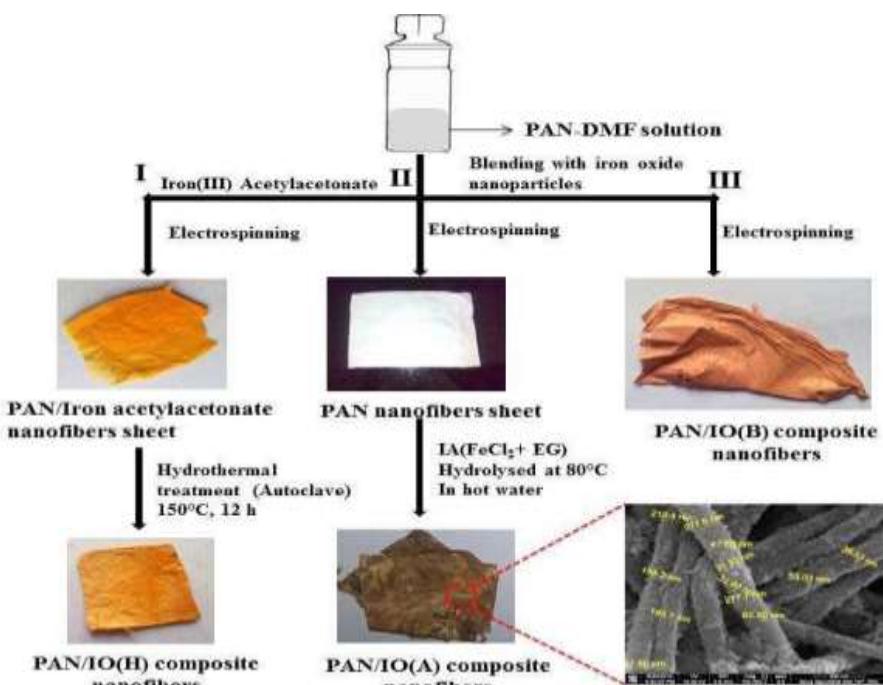


شکل ۶-۶ ارتباط بین ظرفیت جذب و چرخه‌های بازیابی برای الیاف غشایی کلسینه شده در دمای 700°C پس از پنج چرخه از جذب در مقابل کنگو رد [۳۴]

پتال و هوتا^۱ [۳۵] اثر اکسید آهن بر الیاف پلی اکریلونیتریل در حذف رنگ‌زا کنگو قرمز را بررسی کردند و سه روش را برای سنتز الیاف به کار برداشتند. در اولین روش ترکیب الیاف PAN، آهن (III) استیل استون توسط روش الکتروریسی تولید و در ادامه با روش گرمابی به سبب رشد نانوذرات اکسید آهن روی سطح PAN انجام شد. در روش دوم، الیاف الکتروریسی PAN در محلول آلکوکسید آهن غوطه‌ور شد و در ادامه در دمای 80°C هیدرولیز گردید. در روش سوم، الیاف کامپوزیتی اکسید آهن و PAN با مخلوط کردن نانوذرات اکسید آهن و محلول PAN و در ادامه با روش الکتروریسی سنتز گردید. شکل ۷-۶ سنتز الیاف غشایی اکسید آهن، پلی اکریلونیتریل را نشان می‌دهد.

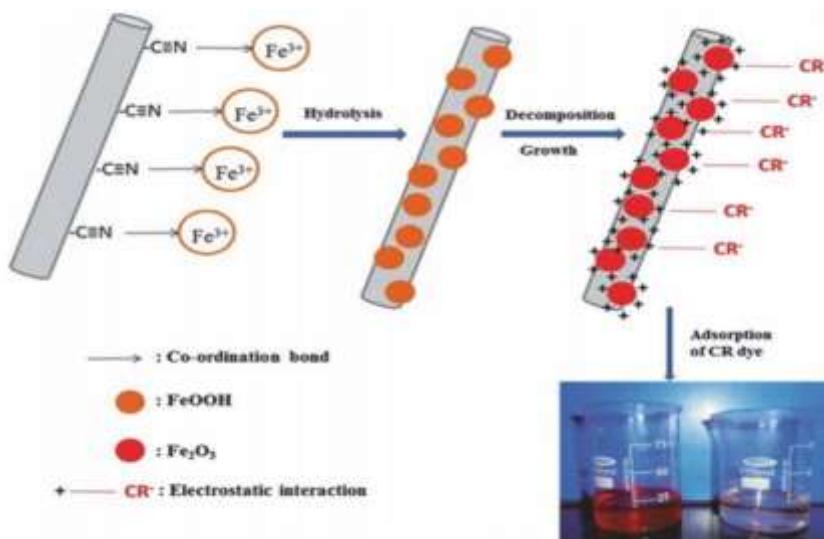
مکانیسم پیشنهادی تشکیل نانوذرات اکسید آهن روی سطح نانو الیاف پلی اکریلونیتریل در شکل ۸-۶ نشان داده شده است. ظرفیت جذب به شرح زیر می‌باشد. سطح نانو ذرات در pH معمولی بار مثبت دارد، بنابراین جاذبه الکترواستاتیک بین مولکول‌های با بار منفی کنگو قرمز و نانوذرات اکسید آهن مطلوب فرایند جذب می‌باشد؛ از نتایج به دست آمده ظرفیت جذب روش اول و سوم بالاتر از روش دوم است، بنابراین این روش هم خیلی می‌تواند در ظرفیت جذب جاذب تأثیر بگذارد؛ به دلیل ظرفیت جذب بالا به کنگو قرمز، روش سنتز ساده و مقاومت بالای نانوذرات در الیاف و جدا نشدن آن در محلول آبی، نسلی جدید از جاذب‌ها معرفی گردیدند.

^۱ Petal and Hota



شکل ۷-۶- روش‌های سنتز مختلف کامپوزیت الیاف غشایی پلی اکریلونیتریل، اکسید آهن [۳۵]

یکی دیگر از الیاف غشایی، مخلوط کردن بتا-سیکلو دکسترین در الیاف پلی استایرن توسط فرایند الکتروریسی می‌باشد که توانایی بالایی در حذف ترکیبات آلی، مانند فنول فتالئین دارد. الیاف الکتروریسی با مخلوط مختلفی از پلیمر (۱۰ تا ۲۵ درصد وزنی حجمی) و بتا-سیکلو دکسترین (۱۰ تا ۵۰ درصد) به دست آمد. فرایند تصفیه با غوطه‌ور کردن الیاف سنتز شده در محلول فنول فتالئین انجام شد و توسط UV-Vis مقدار جذب فنول اندازه‌گیری شد. در شکل ۹-۶ تأثیر پراکندگی سیکلو دکسترین در پلیمر و تأثیر به سزای آن در حذف فنول نشان داده شده است. جذب فنول با گذشت زمان توسط الیاف سنتز شده کاهش پیدا کرد. در حقیقت بازده حذف، بستگی به پراکندگی بتا-سیکلو دکسترین در نانوالياف دارد. با تشکیل کمپلکس در حفره‌های نانوالياف و تأیید این موضوع توسط اسپکتروسکوپی جرمی، تأثیر توضیح یکنواخت این افروزنی در نانوالياف بهمنظور حذف تأیید می‌شود، بنابراین این مطالعه نشان داد که الیاف غشایی پلی استایرن، بتا-سیکلودکسترین بهعنوان یک فیلتر کارآمد می‌تواند در فرایندهای خالص‌سازی و جداسازی مورداستفاده قرار گیرد [۳۶].

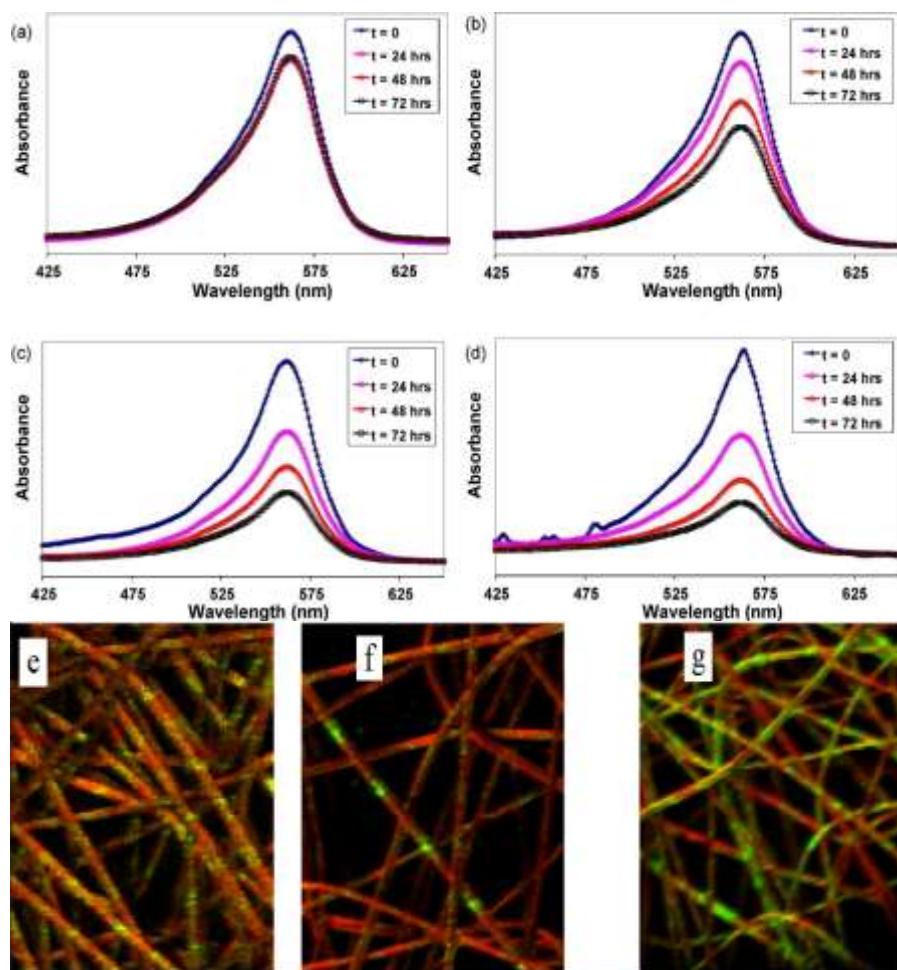


شکل ۶-۸- شمایی از رشد نانوذرات اکسید آهن در الیاف پلی اکریلونیتریل و مکانیسم حذف رنگزا کنگو قرمز [۳۵]

لاتر، اویار و همکاران^۱ [۳۷] آزمایش‌هایی را انجام دادند تا تأثیر اندازه و تفاوت در تمایل برای تشکیل گزینشی کمپلکس با مولکول را در این مورد بررسی کنند. سه مورد مختلف از سیکلودکسترین (γ, β, α) در نانوالیاف پلی استایرن الکترورسی مخلوط گردیدند. اسپکتروسکوپی جرمی یون ثانویه^۲ حضور انواع مختلف سیکلودکسترین را در نانوالیاف پلی استایرن نشان داد، به این ترتیب که با شناسایی، هر دو مورد ترکیب مولکولی یونی سدیم سیکلودکسترین و یون‌های اکسیژن مشتق شده با جرم مولکولی کمتر نشان داده شدند. در ادامه، مقایسه بازده نانو الیاف/نانو شبکه پلی استایرن، سیکلودکسترین در حذف فنول فتالئین توسط اسپکتروسکوپی UV-Vis محاسبه شد و سینتیک حذف را به این صورت نشان داد: $\text{PS}/\alpha\text{-CD} > \text{PS}/\beta\text{-CD} > \text{PS}/\gamma\text{-CD} > \text{PS}/\text{α-CD}$. طرف دیگر، قدرت پیوند فنول فتالئین برای حفره‌های سیکلودکسترین به صورت روبرو می‌باشد: $\gamma\text{-CD} > \beta\text{-CD} > \alpha\text{-CD}$; نتیجه این تحقیق نشان داد که سیکلودکسترین با اندازه‌های حفره مختلف توانایی تصفیه مولکول‌های آلی را دارد و پتانسیل استفاده در فرایندهای تصفیه، خالص‌سازی و جداسازی را دارد [۳۷].

¹. Later, Uyar et al.

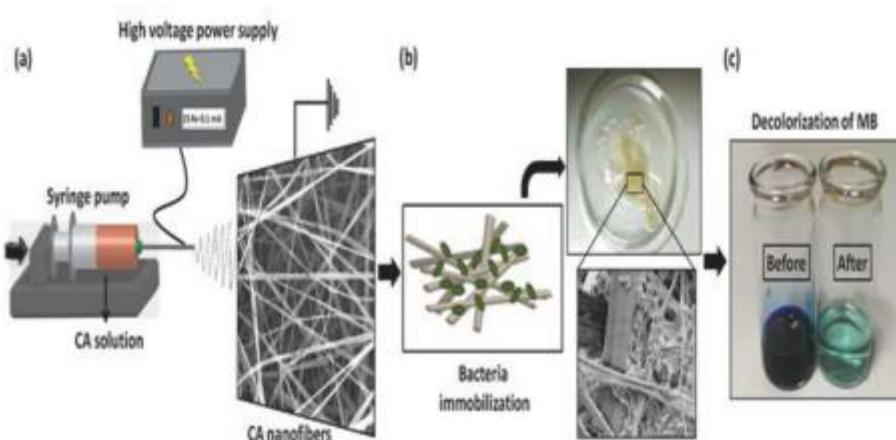
². Static time-of-flight secondary ion mass spectrometry (static-ToF-SIMS)



شکل ۶-۹- جذب UV-Vis محلول فنول فتالئین با زمان بعد از غوطه‌وری الیاف (a) PS20/CD10 (b) PS25 (c) PS10/CD50 (d) PS15/CD10. تصاویر شیمیابی TOF-SIMS از الیاف گرفته شده. پراکندگی سیکلودکسترین در سطح از نسبت‌های مختلف پلیمر، لایه‌های سیکلودکسترین سبز و پلی استایرن قرمز می‌باشند. [۳۶] (e) PS10/CD50 (f) PS20/CD10 (g) PS15/CD25

به هر حال، انواع مختلفی از مواد برای این کار پیشنهاد شده و به طور موفقی ظرفیت جذب بالای نشان داده‌اند؛ اما هر کدام از آن‌ها محدودیت‌های خاص خود را دارند؛ به عنوان مثال آلودگی به وجود آمده، به صرفه نبودن اقتصادی و این‌که برخی از جاذب‌ها قابلیت استفاده مجدد را ندارند و زیست تخریب‌پذیر هم نیستند را می‌توان ذکر کرد. تخریب زیستی توسط میکروارگانیسم‌های

ویژهای مانند باکتری، جلبک و قارچ یک روش جایگزین برای سیستم‌های آبی بهمنظور تصفیه آن از مواد زائد پذیرفته شده است.



شکل ۱۰-۶- نمایش فرایند الکترورسی برای نانوالياف استات سلولز، قرار گرفتن سل باکتری‌ها روی نانوالياف و تصویری از تجزیه رنگزا توسط این جاذب [۴۳]

معمولاً، استفاده از این میکروارگانیسم‌ها در روش تخریب زیستی می‌تواند توسط دو راه مخلوط شدن یا قرار گرفتن در سطح مایع اجرا شود [۳۸].
بی‌حرکت قرار گرفتن میکروارگانیسم‌ها روی سطح مایع این مزایا را دارد که دوباره بتوان از این مواد استفاده کرد، همچنین نیازهای حداقلی رشد و فضای کمتر و مقاومت بالا در برابر تغییرات محیط‌زیستی را از خود نشان می‌دهد. بهخوبی اثبات شده است که الیاف الکترورسی بسترها مناسبی برای قرار گرفتن میکروارگانیسم‌های ویژه روزی آن‌ها می‌باشند [۳۹-۴۲].

سان^۱ و همکاران سه نمونه از باکتری را نشان دادند که در شبکه نانوالياف استات سلولز قرار گرفته شدند و برای تجزیه رنگزا متیلن آبی در محلول آبی به کار رفت [۴۳]. شکل ۱۰-۶ نحوه ایجاد کردن سل‌های باکتری در نانوالياف و توانایی آن‌ها در حذف رنگ در محیط آبی را نشان داده است. حداقل ظرفیت جذب در مدت زمان صفر تا ۴۸ ساعت و مقدار غلظت متفاوت رنگزا متیلن آبی (۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) انجام شدند؛ درنتیجه، مدت زمان ۲۴ ساعت به عنوان بهترین

^۱ San

زمان برای ۹۵٪ حذف رنگزا متیلن آبی گزارش گردید؛ بنابراین، این کار نشان داد که نانوالیاف غشایی متخالخل مکان‌های مناسبی برای قرارگیری باکتری‌ها در آن است.

میکرو جلبک به عنوان یک جاذب زیستی مناسب برای تصفیه پساب به دلیل رشد ساده آن در ظرف نمونه، ارزان بودن، در دسترس بودن و قدرت پیوندی مناسب، شناخته شده است. هنوز جاذب‌های زیستی محدودیت‌های خاصی را مانند مقاومت پایین در برابر مواد شیمیایی و حرارت از خود نشان می‌دهند. برای غلبه بر این مسئله، استفاده از میکرووارگانیسم‌ها، برای تجزیه و حذف رنگزا به عنوان یک پیشنهاد ارائه گردیده است.

سان کشین^۱ و همکاران قرارگیری میکرو جلبک در نانوالیاف پلی سولفون را برای حذف رنگزا های رمازول سیاه^۲ و راکتیو آبی^۳ از پساب پیشنهاد داده‌اند [۴۴]. در ابتدا نانوالیاف پلی سولفون از طریق روش الکترورسی سنتز گردید و یک مدل از این میکرو جلبک تحت عنوان کلامیدوموناس رینهارتی^۴ روی سطح آن‌ها قرار گرفت.

شکل ۱۱-۶ تصاویر SEM الیاف پلی سولفون را قبل از قرارگیری میکرو جلبک نشان می‌دهد؛ همچنین تصاویر میکرو جلبک پس از ۳ روز و ۱۰ روز رشد روی نانو الیاف نشان داده شده است. رنگ سبز غشا با گذشت زمان، پس از زیادشدن غلظت افزایش پیدا کرد؛ نتایج حاصل نشان داد که میکرو جلبک با قدرت مناسبی به الیاف پلی سولفون متصل شده است. سرعت تجزیه رنگزا رمازول با استفاده از الیاف پلی سولفون با میکرو جلبک $72/97 \pm 0/3\%$ و بدون استفاده از آن $30/23 \pm 0/2\%$ با استفاده از ۱۲/۳۶ گزارش شده است؛ همچنین برای حذف راکتیو آبی، سرعت حذف $5/51 \pm 0/4\%$ بدون استفاده از جلبک گزارش شده است.

۶-۲-۲- حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs)

حفظ از محیط‌زیست به عنوان یک نگرانی بزرگ برای جلوگیری از رسیک‌های احتمالی در سال‌های اخیر در نظر گرفته شده است. ترکیبان آلی فرار، منابعی از حضور مولکول‌های کربنی می‌باشد که به سادگی در دمای اتاق تبخیر می‌شوند و به عنوان یک خطر بزرگ برای محیط‌زیست به شمار می‌آیند که توسط منابع مختلفی مانند صنایع شیمیایی و پتروشیمی، ماشین‌ها، وسایل هوایی و غیره منتشر می‌شوند [۴۵-۴۹] که مسلماً اثرات جبران‌ناپذیری بر سلامت انسان و محیط‌زیست می‌گذارند. گزارش شده است که ترکیبات آلی فرار باعث انواع سرطان، سردرد و حالت

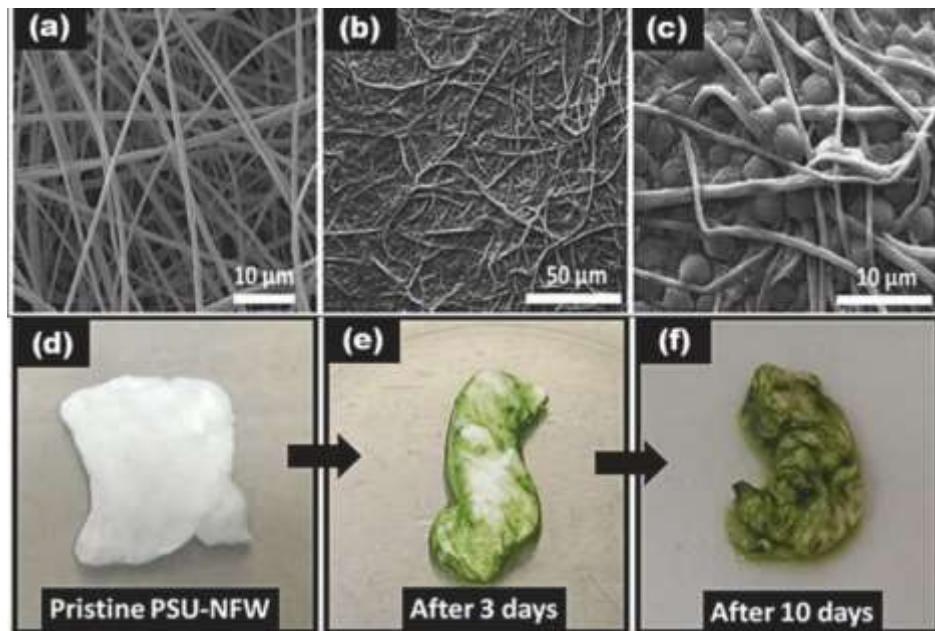
¹. San Keskin.

². Remazol Black 5

³. Reactive Blue 221

⁴. Chlamydomonas reinhardtii

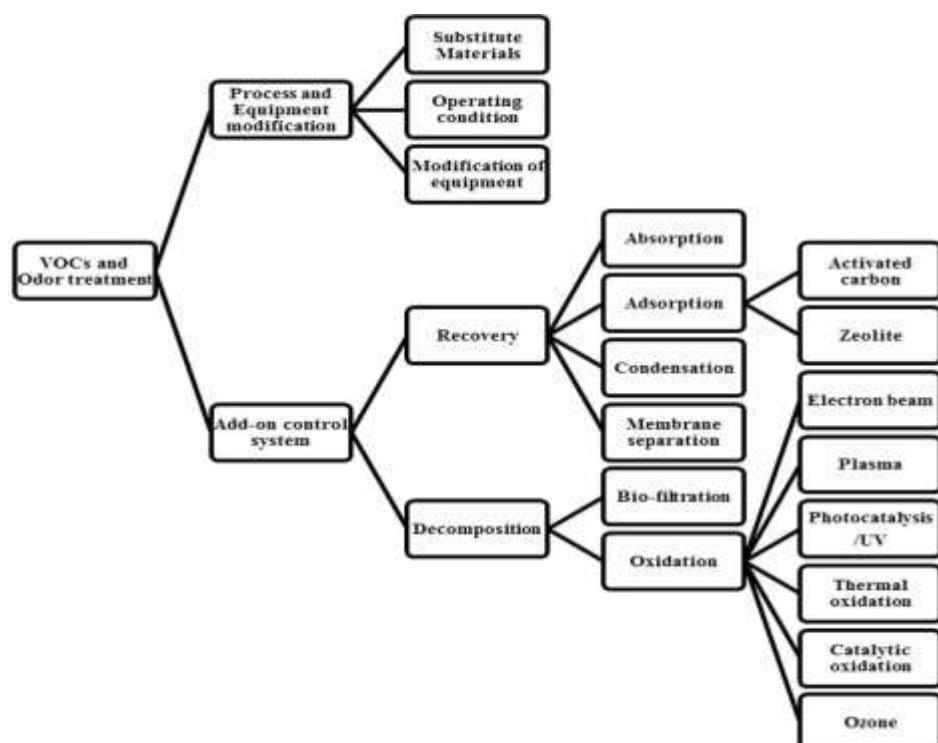
تهوع می‌شوند [۵۰-۵۲]، اگرچه مشکلات تنفسی و ریوی در پی دارند؛ بنابراین، تلاش‌های بسیاری در جهت جلوگیری از گسترش ترکیبات آلی فرار انجام شده است. در این قسمت جهت حذف این مواد از آب و هوا روش‌های مختلفی مانند جذب، اکسیداسیون، روش‌های زیستی، نقطیر و غیره توسعه یافته‌اند [۵۴-۴۹].



شکل ۱۱-۶- (a) تصاویر SEM از نانوالیاف پلی سولفون، (b) و (c) نانوالیاف و میکرو جلبک در بزرگنمایی‌های مختلف، (d) سل‌های میکرو جلبک بر الیاف پلی سولفون پس از ۳ و ۱۰ روز [۴۴]

شکل ۱۲-۶ درباره روش‌های مختلف برای کنترل VOC بحث می‌کند. اگرچه، خیلی از مشکلات برای استفاده از هر کدام از آن‌ها وجود دارد، بنابراین روش‌های جدید و در حال توسعه برای بالا بردن بازده همچنان پیشنهاد می‌شوند. همان‌طور که قبلاً بحث شد، فناوری نانو با کنترل مواد در سطح نانو و تولید موادی با ویژگی‌ها و عملکردهای خاص که کاربردهای بالقوه را در بخش‌های مختلف نشان داده است، سروکار دارد. در میان روش‌های متفاوت برای تشکیل الیاف، الکتروریسی به عنوان یک روش ساده، با هزینه مناسب تعریف شده است. استفاده از مواد پلیمری متعدد، همین‌طور نانوذرات و ترکیبات معدنی، تنوع استفاده در این روش را افزایش می‌دهد. نانوالیاف سنتز شده در طول سال‌های اخیر توجهات بسیاری را به دلیل سطح بالا نسبت به حجم، ساختار متخلخل و گزندگی مناسب به خود جلب کرده است [۶۰-۶۴]؛ همچنین الیاف الکتروریسی شده به طور

وسیعی برای حفاظت از محیط‌زیست استفاده شده‌اند و دستاوردهای مختلفی را به همراه داشته‌اند. در این قسمت از این فصل، درباره روش‌های متفاوت سنتز نانو الیاف برای حذف ترکیبات آلی فرار بحث شده است.

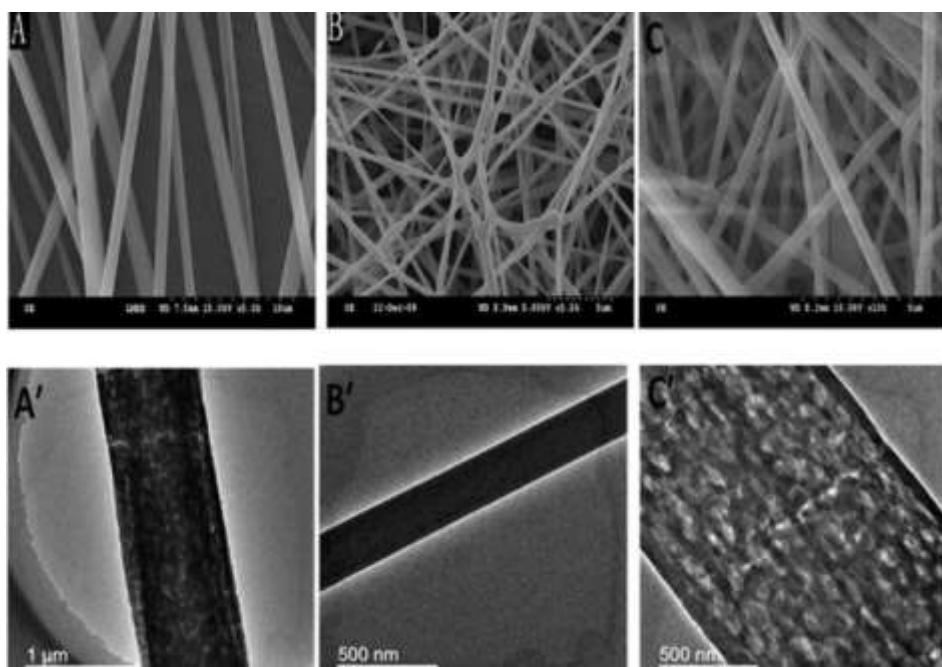


شکل ۱۲-۶-روش‌های حذف ترکیبات آلی فرار [۴۹]

یک مطالعه‌ای به تازگی توسط چو^۱ و همکاران [۶۷] انجام‌شده است که جذب و واجذب جهت حذف ترکیبات آلی فرار توسط نانوالیاف پلی استایرن، نانو الیاف اکریلیک رزین و ترکیب پلی استایرن، اکریلیک رزین با کربن فعال، کربن نانوتیوب و الیاف کربن فعال بررسی می‌شود. به این منظور حذف نورمال بوتانول، تولوئن، کلروبنزن، آنیسول، نیتروبنزن، دی کلرومتان، اتیل استات، بنزن، استونو نورمال هگزان مقایسه شده‌اند [۶۷]. خواص سطح الیاف توسط SEM و TEM مورد سنجش قرار گرفت. شکل ۱۳-۶ به خوبی سطح این الیاف را نشان می‌دهد. قطر برای الیاف پلی استایرن ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر، برای الیاف اکریلیک رزین ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر، برای مخلوط پلی

¹. Chu

استایرن و اکریلیک رزین ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر محاسبه شده است. سیستم آزمایشگاهی ساده‌ای برای تست جذب مورداستفاده قرار گرفت، پنج میلی‌گرم از نمونه و به دنبال آن از کروماتوگرافی گازی استفاده گردید.



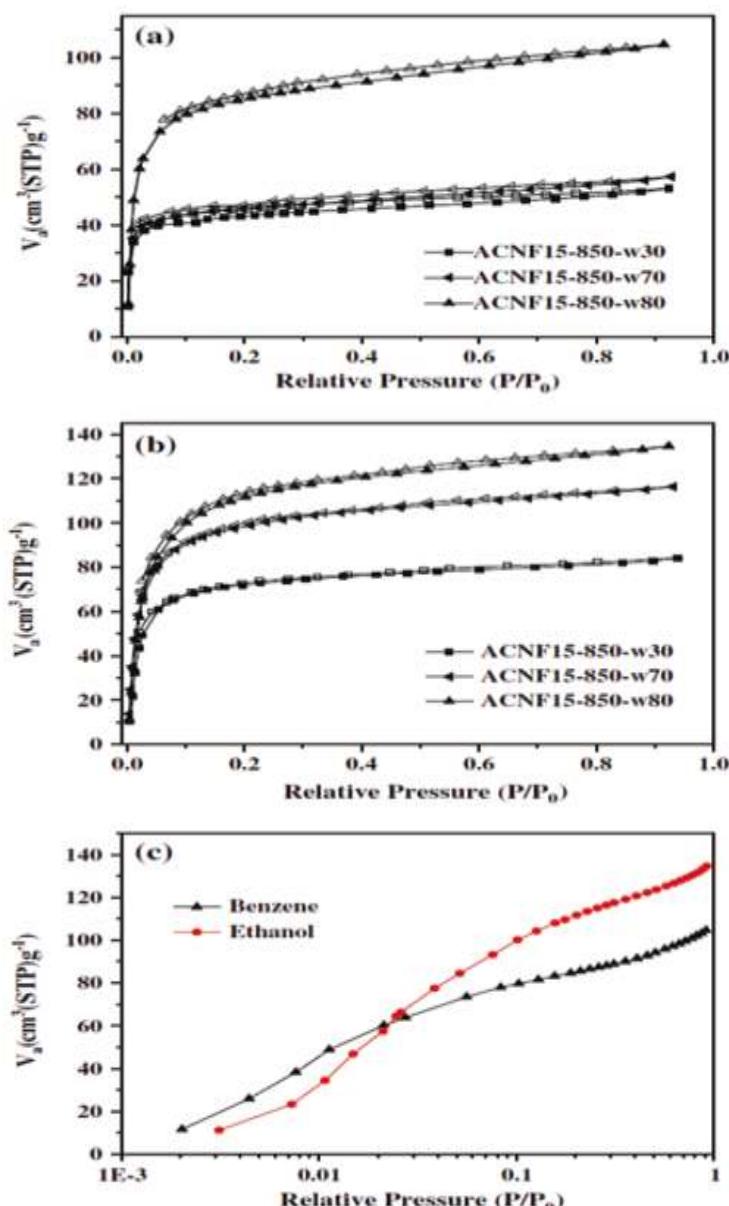
شکل ۱۳-۶- تصاویر SEM و TEM (A,A') الیاف پلی استایرن، (B,B') الیاف اکریلیک رزین، (C,C') الیاف پلی استایرن و اکریلیک رزین [۶۷]

همین‌طور، واجذب و استفاده مجدد نمونه‌ها تحت شرایط حرارتی موردبحث قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که نانوالیاف خواص جذب گرینشی با توجه به ترکیب آن‌ها نسبت به ترکیبات آلی فرار از خود نشان داد. بازده جذب قابل مقایسه با نانو الیاف کربن و کربن نانوتیوب مطابق با وزن می‌باشد. نانوالیاف الکتروریسی خاصیت واجذب حرارتی بهتری از کربن فعال، کربن نانوتیوب و الیاف کربن فعال از خود نشان داد که تأییدی بر برتری نانوالیاف بر سایر جاذب‌ها به دلیل جذب و واجذب گاز که در سطح نانوالیاف اتفاق می‌افتد، دارد. نتایج این تحقیق براین اصول استوار شد که نانوالیاف الکتروریسی شده پتانسیل خوبی برای حذف ترکیبات آلی فرار دارند. به دلیل گرینش پذیری مطمئن، زمان به تعادل رسیدن کوتاه، بازده جذب و واجذب مناسب، استفاده مجدد از آن و همین‌طور اثر دما نسبت به سایر جاذب‌ها برای حذف ترکیبات آلی فرار ارجح می‌باشند.

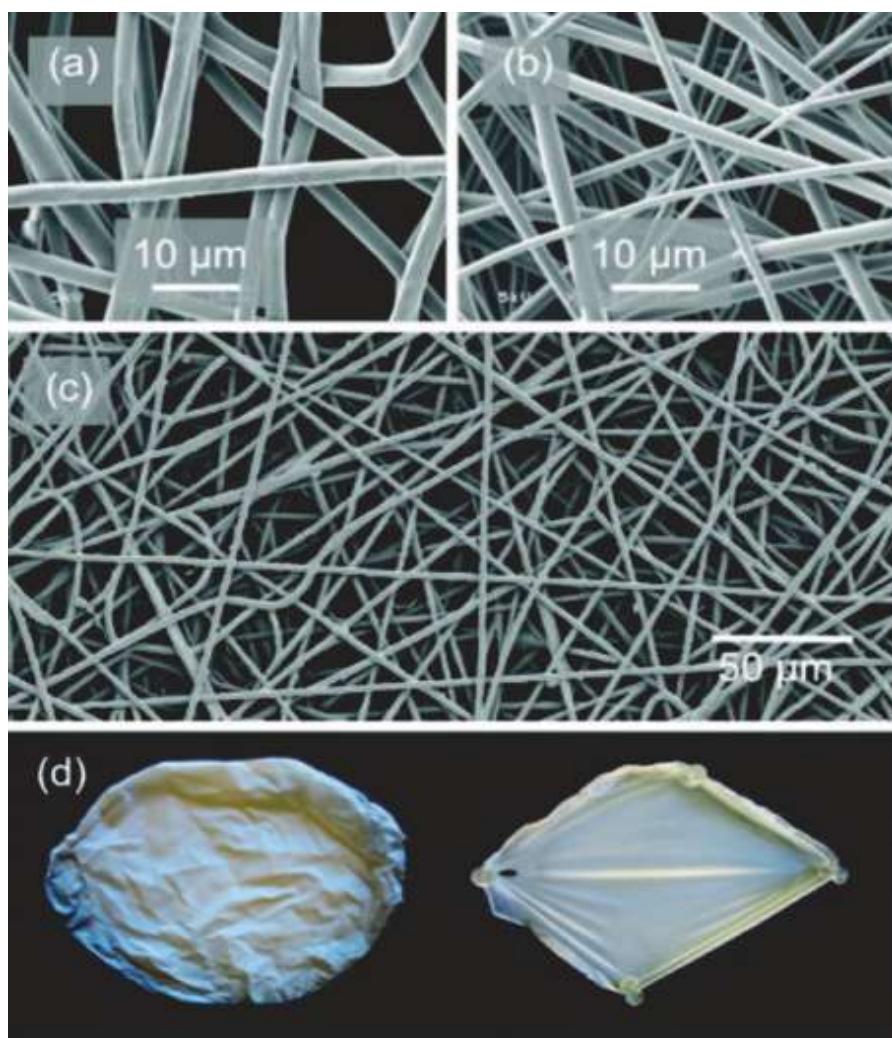
نانو الیاف الکتروریسی کربنی پلی اکریلونیتریل به عنوان یک جایگزین مناسب برای الیاف کربن فعال به منظور حذف ترکیبات آلبی فرار گزارش شد. نتایج آنتالپی و تست‌های توزیع انرژی جذب و واجذب، ظرفیت‌های جذب بالاتر الیاف کربنی پلی اکریلونیتریل را نسبت به الیاف تجاری کربن فعال برای حذف بنزن نشان داد [۶۸]. در کاری مشابه، نانوالیاف کربن فعال^۱ تولید شده از محلول الکتروریسی پلی اکریلو نیتریل، بازده حذف بالاتری نسبت به بنزن و اتانول نسبت به الیاف کربن فعال^۲ در یک سیستم جذب بخار ایستا از خود نشان داد. نانوالیاف کربن فعال به این صورت سنتز شدند که محلول ۱۰ درصد و ۱۵ درصد پلی اکریلونیتریل (ACNF10-800, ACNF 15-800) تحت فرایند الکتروریسی قرار گرفتند، سپس برای پایداری این نانو الیاف، با سرعت یک درجه سانتی‌گراد بر دقیقه (°C/min) دما تا ۲۸۰°C بالابرده شد و در این دما به مدت ۲ ساعت قرار گرفت. در ادامه الیاف، حرارت داده شدند و در دمای ۸۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰-۸۵۰°C) به مدت ۳۰ دقیقه در اتمسفر نیتروژن با سرعت ۲۱۲ ml/min که توسط جریان سنج چرخان^۳ کنترل می‌شود کربونیزه شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها با دمیدن بخار ۳۰ دقیقه درصد حجمی (۳۰ vol.%) گاز نیتروژن در دمای یکسان به مدت ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دقیقه فعال شدند. مقدار هدر رفت به این صورت محاسبه شد که وزن الیاف پایدار شده با نمونه‌های نتیجه شده، مقایسه شدند. در طرف مقابل، الیاف کربن فعال توسط اکسید کردن الیاف پلی اکریلونیتریل و به‌وسیله کربونیزه کردن در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و در ادامه تحت بخار ۵۰ درصد گاز نیتروژن به مدت ۳۰ دقیقه فعال شدند. نتایج مطالعه، ظرفیت جذب بالاتر نانوالیاف کربن فعال به دست‌آمده از روش الکتروریسی نسبت به الیاف کربن فعال برای حذف ترکیبات آلبی فرار در فشارهای کم را نشان می‌دهد. ایزوترمهای جذب بنزن و اتانول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد توسط سیستم جذب حجمی اندازه‌گیری شد. نانوالیاف کربن فعال ظرفیت جذب بالاتری را نسبت به الیاف کربن فعال در فشارهای نسبی کم از خود نشان داد. خواص فیزیکی و شیمیایی نانوالیاف کربن فعال با توجه به مرحله فعال شدن با گاز نیتروژن به‌خوبی افزایش پیدا کرد. شکل ۱۴-۶ اثر میکروحفرهای ایجاد شده در حین سنتز را بر عملکرد جذب نانوالیاف نشان می‌دهد، با بالا رفتن این اثر ظرفیت جذب افزایش پیدا کرد. همین‌طور شیمی سطح، اثر مهمی بر جذب ترکیبات قطبی دارد؛ به عنوان مثال نانوالیاف کربن فعال با مقدار اکسیژن بیشتر ظرفیت جذب بالاتر اتانول را نتیجه می‌دهد [۶۹].

^۱. ACNFs^۲. ACFs^۳. Rotameter

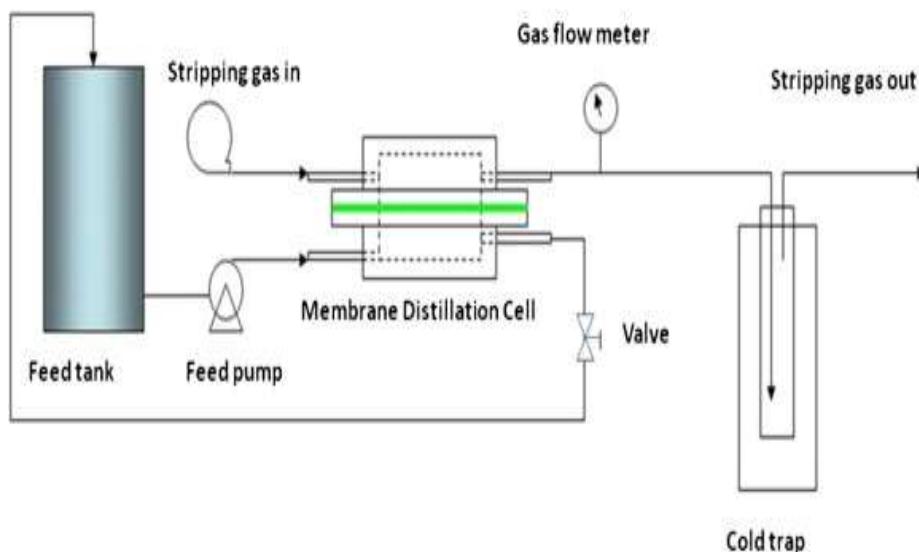
الیاف الکتروریسی پلی یورتان ایجاد شده توسط روش الکتروریسی با استفاده از پلی یورتان تشکیل شده بر اساس ۴،۴-متیلن بیس (فنیل ایزو سیانات) (MDI) و ایزو فورن دی ایزو سیانات به عنوان اجزای سخت و بوتان دی ال و تترا اتیلن گلیکول به عنوان اجزاء نرم که در حلال دی متیل فرم آمید الکتروریسی شدند. الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان میانگین قطر ۲ میکرومتر داشتند و به عنوان الیافی نرم و ماهیت بدون تخلخل در شکل ۶-۱۵ نشان داده شده اند. الیاف همچنین برای اندازه گیری ظرفیت جذب شان نسبت به ترکیبات آلی فرار (VOCs) مانند تولوئن، هگزان و کلروفرم مورد مطالعه قرار گرفتند. البته ظرفیت جذب کربن فعال هم برای مقایسه مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت جذب الیاف پلی یورتان برای جذب بخار تقریباً همانند کربن فعال گزارش گردید، اگرچه کربن فعال مساحت سطحی چندین مرتبه بیشتر از پلی یورتان ارائه می دهد؛ در ادامه، الیاف پلی یورتان برگشت پذیری کامل جذب و واجذب را توسط دمیدن ساده گاز نیتروژن در دمای اتاق نشان دادند که این موضوع برای کربن فعال به عنوان جاذب، اتفاق نیفتاد. این الیاف سنتز شده برهم کنش و جذب قوی نسبت به تولوئن و کلروفرم از خود نشان دادند، اما به دلیل پیوند ضعیف با هگزان آلیفاتیک، قدرت جذب پایینی برای هگزان گزارش گردید [۷۰].



شکل ۱۴-۶ - ایزوترم‌های جذب و واجدب (a) بنزن، (b) اتانول روی سه نمونه و (c) ایزوترم‌های جذب بنزن و اتانول بر نانوالیاف کربن فعال ACNF15-850-w80 در دمای ۲۰°C [۶۹].



شکل ۱۵-۶- تصاویر SEM (a) بر اساس MDI (b) الیاف بر اساس ایزوفورن و نرم بودن آن و سطحی کم حفره (c) تصاویر SEM نشان‌دهنده قطر الیاف پلی یورتان بر اساس MDI و دانسیته کم آن (d) قدرت و انعطاف الیاف نشان داده شده با کمترین تغییر پس از کشیدن آن [۷۰]



[۷۱] - شکل ۶-۱۶- سیستم تصفیه توسط دمیدن گاز بر غشاء (Gas-stripping membrane system)

در یک مطالعه دیگر که توسط فنگ^۱ و همکاران [۷۱] انجام شد، حذف کلروفرم توسط نانو الیاف غشایی الکتروریسی شده پلی وینیلیدن فلورايد (PVDF) در یک سیستم دمیدن گاز^۲ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶-۱۶ سیستم دمیدن گاز بر الیاف غشایی الکتروریسی شده را نشان می‌دهد؛ به طور خلاصه، نتایج حاصل از این مطالعه به این شکل گزارش گردید که الیاف حاضر با توجه به خاصیت آب‌گریزی بالای سطح و اندازه مناسب حفره‌های نانوالیاف الکتروریسی شده، توانایی حذف ترکیبات آلی فرار را به خوبی از خود نشان دادند. ضریب انتقال جرم کلی کلروفرم در میان نانوالیاف غشایی به اندازه $2.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ گزارش گردید و این مقدار بالاتر از عشاهای دیگر در کار مشابه بود. با توجه به این که انرژی فعال‌سازی از ضریب انتقال جرم کلی، نزدیک و مساوی با ثابت هنری^۳ برای جذب کلروفرم در آب بود، از این‌رو در این مطالعه نتیجه شد که نانوالیاف الکتروریسی شده به دلیل خواص ویژه آن‌ها، توانایی بالایی در حذف با بازده مناسب ترکیبات آلی فرار (VOC) را از خود نشان می‌دهند [۷۱].

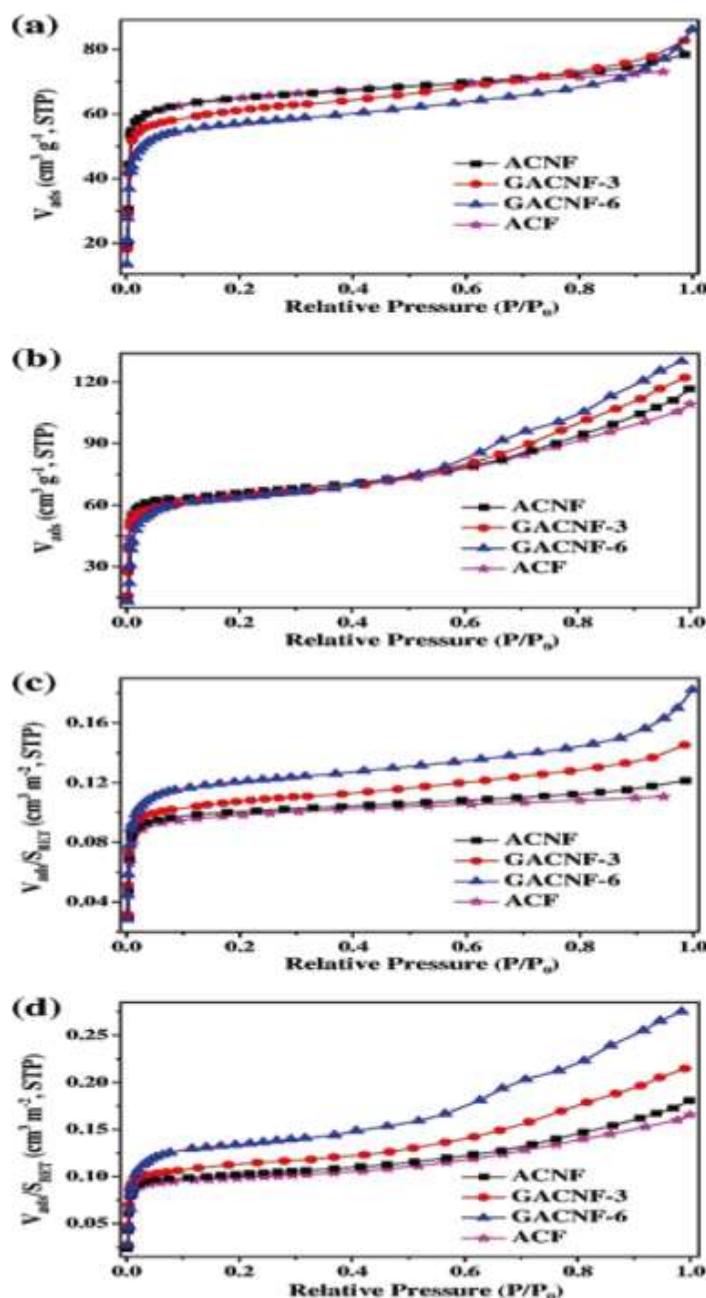
¹ Feng et al.

² Air-stripping system

³ Henry Constant

همین‌طور عامل‌دار کردن نانوالیاف الکترورسی توسط ترکیبات مختلف، می‌تواند بازده این مواد را افزایش دهد. براین اساس مطالعاتی در این زمینه انجام شد تا خواص نانوالیاف سنتز شده بررسی گردد. در مطالعات اخیر برای افزایش اکسیژن‌های روی سطح نانوالیاف، گائو^۱ و همکاران [۷۲] صفحات گرافن اکسید (GO) با نسبت‌های وزنی ۳٪ و ۶٪ در الیاف پلی اکریلونیتریل نشاندند و الیاف کامپوزیتی توسط روش الکترورسی سنتز شدند؛ همچنین نانوالیاف کربن فعال بدون افزودن گرافن اکسید (ACNF) و الیاف کربن فعال بر اساس پلی اکریلونیتریل (ACF) با یکدیگر از نظر عملکرد مقایسه شدند؛ همین‌طور عملکرد نانوالیاف سنتز شده برای جذب بنزن و بوتانون بر اساس ایزوترم‌های جذب بخار این گازها موردنبررسی قرار گرفتند. به طرز قابل توجهی، افزودن گرافن اکسید مقدار اکسیژن در مزوحفره‌ها و سطح نانوالیاف را افزایش داد و درنتیجه ظرفیت جذب این نانوالیاف برای هر دو مورد بنزن و بوتانون بیشتر از سایر نانوالیاف گزارش گردید و در شکل ۶-۱۷ جزئیات استفاده از این نانوالیاف نشان داده شده است. همین‌طور مقدار اکسیژن سطح بسیار روی رفتار جذب این دو گونه ترکیب آلی تأثیر گذاشت، به این صورت که ترکیب قطبی بوتانون سرعت جذب بالاتری نسبت به بنزن غیر قطبی از خود نشان داد. حداکثر ظرفیت جذب نانوالیاف سنتز شده در دمای C خ ۲۰ و فشار نسبی ۰/۹۸ به ترتیب برای بنزن و بوتانون $83/2\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ و $\text{Cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ۱۳۰/۵ گزارش گردید. سپس ایزوترم‌های جذب بوتانون در ۳ جاذب مورداستفاده، موردنبررسی قرار گرفت که نتیجه حاصل ظرفیت جذب بالاتر بوتانون نسبت به بنزن را نشان داد. به طور خلاصه، اثر افزودن گرافن اکسید در افزایش بازده نانوالیاف متفاوت در حذف ترکیبات آلی فرار (VOC) نشان داده شده است. بهبود خواص و همین‌طور افزایش سینتیک جذب از جمله مواردی است که پس از افزودن گرافن اکسید در نانوالیاف دیده شده است [۷۲].

^۱ Guo et al.



شکل ۶-۱۷- ایزوترم‌های تعادلی جذب (a) بنزن و (b) بوتانون توسط نمونه‌های مختلف در ۲۰ درجه سانتی‌گراد.

ایزوترم‌های جذب هنجار شده با توجه به مساحت سطح ویژه در ۲۰ درجه سانتی‌گراد (C) بنزن و (d) بوتانون [۷۲].

در کاری دیگر برای بهبود خواص نانوالیاف برای حذف مواد زائد، استفاده از سیکلو دکستربن ها (CDs) به عنوان یک ایده قابل توجه ارائه گردید. سیکلو دکستربن ها، الیگوساکاریدهای حلقوی هستند که از واحدهای ۱،۴-گلوکوپیرانوزید^۱ با ۷،۶ یا ۸ واحد گلوکوز در یک ساختار حلقوی دیده می‌شوند که به ترتیب سیکلو دکستربن های α , β , γ نامیده می‌شوند. یک گروه از دانشمندان به طور وسیعی اثر این مواد بر نانوالیاف را در ظرفیت و سرعت جذب آن‌ها برای ترکیبات آلی فرار (VOC) مورد بررسی قرار دادند.

به عنوان مثال اویار و همکاران^۲ از روش الکتروریسی برای سنتز نانوالیاف پلی متیل متاکریلات (PMMA) و استفاده β -سیکلو دکسیرین در آن به منظور افزایش عملکرد آن برای حذف ترکیبات آلی فرار (VOC) استفاده کردند. مطالعه سیستماتیک، پخش شدن مولکول‌های سیکلو دکستربن در سطح نانوالیاف را نشان دادند. بر اساس حذف و جذب آنلین، استایرن و تولوئن به وسیله نانوالیاف پلی متیلن متاکریلات، ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ از سیکلو دکستربن به عنوان افزودنی استفاده گردید. نمای تکاملی از پیروگرام^۳ تک یون از نانوالیاف سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت. طیفسنج جرمی به سادگی نشان داد که با افزایش β -سیکلو دکستربن توانایی نانوالیاف در جذب و نگهداری مواد زائد بیشتر می‌شود [۷۳].

کایاکی و اویار^۳ از فرایند الکتروریسی برای سنتز نانوالیاف پلی استر (PET) مخلوط شده با α , β و γ -سیکلو دکستربن استفاده کردند. به طرز شگفت‌آوری، نانو الیاف بدون دانه تسبیحی PET/CD از غلظت کم محلول پلیمری به این دلیل که مشارکت سیکلو دکستربن قابلیت ریسنندگی محلول الکتروریسی را افزایش می‌دهد حاصل شده است. شکل ۱۸-۶ نحوه سنتز و تشکیل کمپلکس توسط نانوالیاف با آنلین نشان داده شده است.

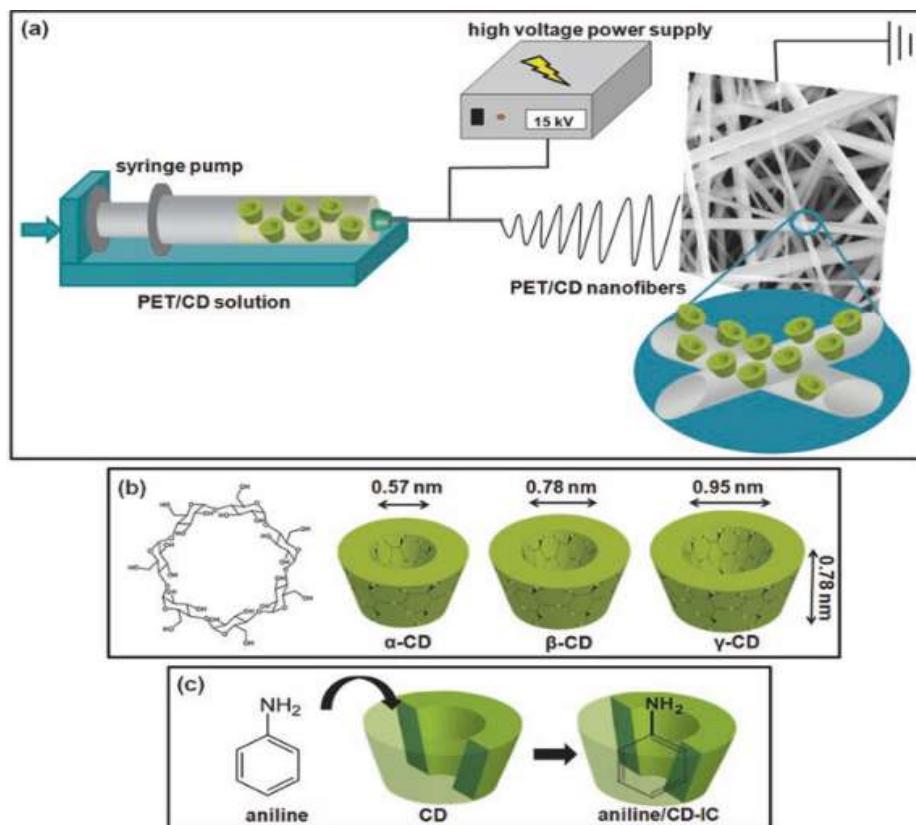
عملکرد محبوس سازی الیاف سنتز شده نسبت به بخار آنلین به عنوان یک ترکیب آلی فرار مورد بررسی قرار گرفت. مقدار این محبوس شدن آنلین توسط شبکه‌های نانو لیفی به وسیله روش HPLC اندازه‌گیری شد. پس از اتمام هر آزمون محبوس سازی، نانوالیاف پلی استر خالص تقریباً ۱۳۰۰ ppm، پلی استر و α -سیکلو دکستربن و همین‌طور پلی استر و β -سیکلو دکستربن تقریباً ۲۶۰۰ ppm و مخلوط پلی استر و γ -سیکلو دکستربن بالاترین مقدار جذب به اندازه تقریبی ۳۴۰۰ ppm را نسبت به آنلین از خود نشان دادند؛ این طور نتیجه شد که نانوالیاف پلی استر مخلوط با

^۱ 1,4-linked glucopyranoside

^۲. Pyrograms

^۳. Kayaci and Uyar

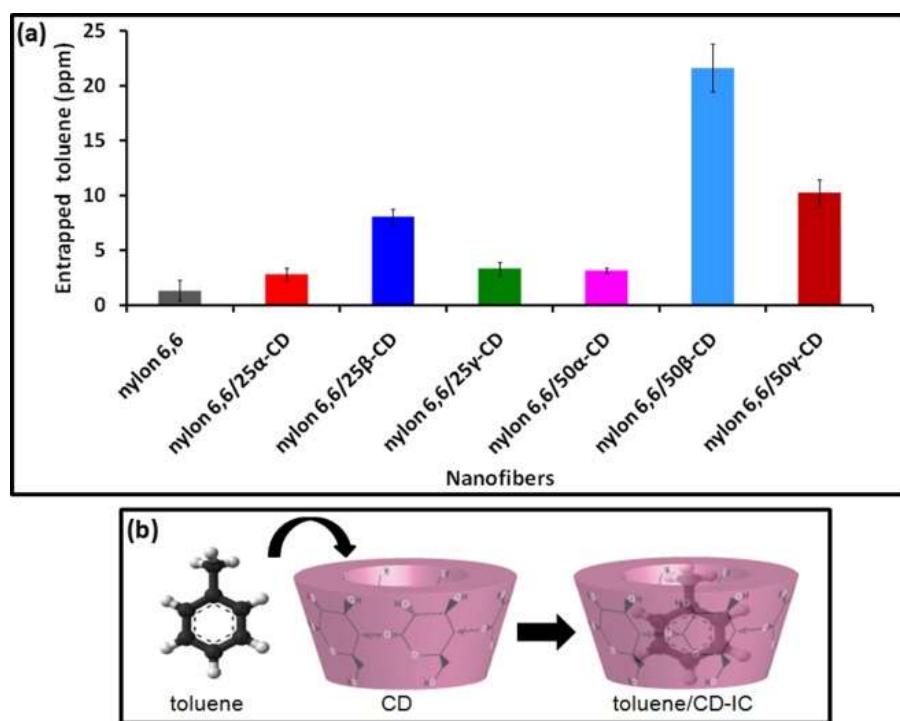
۷- سیکلودکسترین بالاترین تمایل به حذف مواد زائد، در مقایسه با سایر غشاهای الیافی را دارد؛ بنابراین مواد فیلتری مناسبی برای تصفیه هوا و حذف ترکیبات آلی فرار (VOC) می‌باشند [۷۴].



شکل ۱۸-۶- شمای (a) محلول الکتروریسی پلی استر و سیکلودکسترین (b) ساختار شیمیابی β -سیکلودکسترین و ابعاد نسبی α و γ (c) قرارگیری آنیلین در سیکلودکسترین [۷۴]

در مطالعه‌ای دیگر، تهیه نانوالیاف نایلون ۶،۶ مخلوط شده با سیکلودکسترین جهت افزایش مقاومت گرمایی آن انجام شد. نانوالیاف با مخلوط شدن هر ۳ مورد از سیکلودکسترین‌ها (γ, β, α) با نسبت‌های مختلف ۲۵٪ و ۵۰٪ نسبت به نایلون ۶،۶ تهیه گردیدند. نانوالیاف بدون استفاده از سیکلودکسترین‌ها مناسب برای محبوس‌سازی بخار تولوئن از محیط نبودند، اگرچه، افزایش سیکلودکسترین‌ها که افزایش سطح تماس نسبت به حجم مورداستفاده نانو الیاف را سبب می‌شوند و احتمال تشکیل کمپلکس با تولوئن را بالا می‌برند، بهخوبی و با بازده بالا توانستند تولوئن را از محیط حذف کنند. شکل ۱۹a نشان می‌دهد که استفاده از β -سیکلودکسترین اثر بالاتری

نسبت به α و γ برای حذف تولوئن از خود نشان می‌دهد. به طور خلاصه، افزودن سیکلودکسترین به نانوالیاف، برای حذف ترکیبات آلی فرار از محیط‌زیست بسیار مؤثر می‌باشد و به دلیل مساحت سطحی خیلی بالای آن‌ها و ظرفیت تشکیل کمپلکس با نانوالیاف و محبوس سازی ترکیبات آلی فرار می‌توانند مناسب‌ترین افزودنی نانوالیاف برای تصفیه هوا گزارش گردند. شکل ۱۹-۶ نشان می‌دهد که انرژی کمپلکس شدن تولوئن و β -سیکلودکسترین بالاتر از α و γ سیکلودکسترین می‌باشد [۷۵].



شکل ۱۹-۶ - (a) مقدار تولوئن محبوس شده (ppm) توسط نانوالیاف الکتروریسی (b) طرح‌واره‌ای از تشکیل کمپلکس سیکلودکسترین و تولوئن

سلیبیوگلو و اویار^۱ [۷۶] نانوالیاف γ -سیکلودکسترین را از یک سیستم آب و دی‌متیل سولفوکسید بدون استفاده از پلیمر حامل مورداستفاده قرار دادند و توانایی آن در محبوس سازی مولکولی آنیلین و تولوئن را نشان دادند. نانوالیاف γ -سیکلودکسترین در دسیکاتور که از بخار

^۱ Celebioglu and Uyar

آنیلین و تولوئن اشباع شده بودند، قرار گرفتند و از^۱ HNMR (رزوناس مغناطیس هسته هیدروژن) برای اندازه‌گیری این بخارات مورد استفاده قرار گرفته شد. همین‌طور پودر ۷-سیکلودکسترين برای مقایسه در شرایط مشابه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از محبوس سازی مولکولی نشان داد که نانوالیاف ۷-سیکلودکسترين بازده خیلی بالاي نسبت به حذف ترکيبات آلي فرار (تولوئن و آنيلين) از خود نشان مي دهند و از طرف ديگر حالت پودري ۷-سیکلودکسترين هيج ظرفيت محبوس سازی از خود نشان نداد؛ درنتيجه نانوالیاف الکتروریسي شده سیکلو دکسترين مي توانند به عنوان فیلترها يا نانو فیلترهای مولکولی برای حذف ترکيبات آلي فرار (VOC) از محیط زیست مورداستفاده قرار گيرند [۷۶].

اخیراً عملکرد محبوس سازی مولکولی توسط نانوالیاف بدون پلیمر هیدروکسی پروپیل-بنا-سیکلودکسترين^۲ و هیدروکسی پروپیل-گاما-سیکلودکسترين^۳ در برابر دو ترکيب آلي فرار رایج (بنزن و آنيلين) مورد بررسی قرار گرفت. توانايي کيسول دار شدن اين سیکلو دکسترين ها با عوامل متفاوت متغير شامل استفاده از پودر يا نانوالیاف، حلال فرایند الکتروریسي (آب يا DMF) و نوع ترکيب آلي فرار (بنزن يا تولوئن) به صورت بهينه شده گزارش گردید.

نتایج نشان داد که نانوالیاف سیکلودکسترين توانايي جذب و محبوس سازی بيشتری نسبت به تولوئن و بنزن در مقایسه با پودر سیکلودکسترين دارند؛ همین‌طور بازده محبوس سازی مولکولی نانوالیاف سیکلودکسترين به نوع سیکلو دکسترين، حلال و نوع ترکيب آلي بستگي دارد و توانايي کمپلکس شدن نانوالیاف سیکلودکسترين بر اساس مساحت سطح بالاي آن و خواص منحصر به فرد آن مي باشد. تمامی اين نتایج به اين نکته اشاره دارد که استفاده از سیکلودکسترين ها در نانوالیاف الکتروریسي، آن ها را به مواد پيشيرفت های برای حذف ترکيبات آلي فرار (VOC) تبدیل می کند [۷۷].

از طرف ديگر، تلاش های بسياري انجام شد تا بازده نانوالیاف را توسط مواد ديگری برای حذف ترکيبات آلي فرار (VOC) بهبود ببخشند؛ به عنوان مثال، ذرات خاکستر بادي تجاری در دسترس^۴، در غلظت های متفاوت (۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد وزنی) با پلی يورتان مخلوط شدند و پس از فرایند الکتروریسي به صورت فیلترهای غشایی ترکیبی در آمدند. الیاف سنتر شده نسبت به حذف ترکيبات آلي فرار مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که شامل بنزن، كلروفرم، تولوئن، اورتو زايلن^۵ و

¹ Hydrogen Nuclear Magnetic Resonance

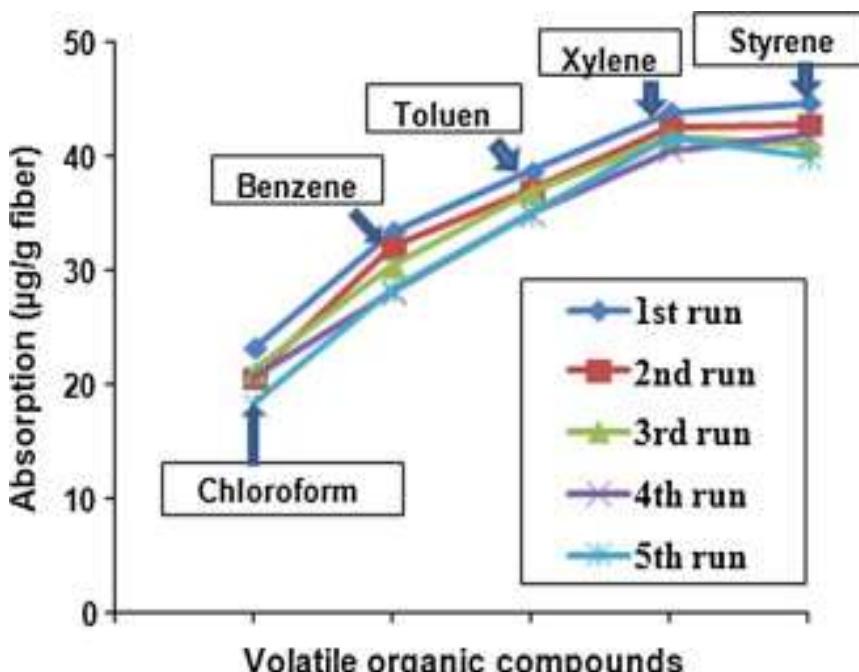
² HP β CD

³ HP γ CD

⁴ commercially available fly ash particles (FAPs)

⁵ O-xylene

استایرن می‌باشند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که در میان همهٔ ترکیبات آلی فرار، استایرن بالاترین مقدار جذب را با این الیاف، بدون توجه به ترکیب الیاف پلی یورتان نشان داد. الیاف پلی یورتان با ۳۰٪ جرمی ذرات خاکستر بادی، ظرفیت جذب بالای نسبت به ترکیبات آلی فرار از خود نشان دادند. برای اطمینان از توانایی الیاف کامپوزیتی به سبب استفاده مجدد آن‌ها، الیاف پلی یورتان شامل ۳۰٪ ذرات خاکستر بادی چندین بار برای جذب مورد استفاده مجدد قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایشات متعدد نشان داد که مطابق با شکل ۲۰-۶ الیاف سنتزشده ۵ ظرفیت جذب متوالی تقریباً یکسان از خود نشان داد [۷۸].



شکل ۲۰-۶- رفتار جذب چرخه‌ای از ترکیبات آلی فرار متفاوت بر یک ترکیب پلی یورتان با ۳۰٪ جرمی ذرات خاکستر بادی (FAPs) [۷۸]

همانند این روش، پودر لوئیس^۱ (LP) که معمولاً برای جذب مواد زائد از آب به عنوان یک نانوذره شناخته شده است، با نسبت‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی به نانوالیاف پلی یورتان اضافه گردید. نتایج حاصل از جذب به شرح زیر می‌باشد که نانوالیاف پلی یورتان شامل ۳۰٪ پودر لوئیس بالاترین ظرفیت جذب را به ترتیب نسبت به تولوئن > بنزن > کلروفرم از خود نشان می‌دهد [۷۹].

^۱.Loess powder (LP)

در یک مطالعه اخیر که توسط جی و چوی^۱ [۸۰] مورد بررسی قرار گرفت، الیاف پلی یورتان مخلوط با عناصر خاکی کم یاب^۲ (RE) تولید شده توسط روش الکترورسی، برای حذف ترکیبات آلی فرار از هوا مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه جذب استایرن، زایلن، تولوئن، بنزن و کلروفرم توسط نانوالیاف پلی یورتان مخلوط با ۵۰٪ عناصر خاکی کم یاب (RE)، نشان داد که استایرن بالاترین ظرفیت جذب را نسبت به سایر بخارات دارد [۸۰].

۶-۳-۲- حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۳ (PAHs)

یکی دیگر از آلاینده‌های مهم محیط‌زیستی، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای شامل دو یا بیشتر حلقه‌های به هم چسبیده بنزن است که در شکل‌های مختلفی موجود می‌باشند و از منابع طبیعی و مصنوعی وارد محیط‌زیست می‌شوند. شکل ۶-۲۱ برخی از این ترکیبات پلی سیکلی را که رایج‌تر هستند نسبت به سایر ترکیبات، نشان می‌دهد [۸۱].

ترکیبات PAHs شامل حلقه‌های کمتر از ^۴ به عنوان ترکیبات با جرم مولکولی کم طبقه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین ترکیبات با بیش از ^۴ حلقه به عنوان ترکیبات با جرم مولکولی زیاد هستند که معمولاً ترکیباتی رنگی می‌باشند و همین‌طور ترکیباتی کریستالی در دمای محیط، حلایت کم در آب و پرتحرک در محیط به دلیل خواص شیمی‌فیزیکی آن‌ها و پخش شده در هوا، آب و خاک می‌باشند [۸۱-۸۳]؛ به دلیل حضور در محیط‌های فراوان، اثرات منفی آن برای مدت زیادی به خوبی شناخته شده است، این ترکیبات خطری جدی برای پوست، مثانه، شش و عامل مهم سرطان‌های سیستم گوارش معرفی شده‌اند؛ همین‌طور، مولکول‌های فعال ترکیبات آروماتیک پلی سیکلی تمایل به پیوند با پروتئین‌های سلولی و مولکول‌های DNA را دارند که درنتیجه به تخریب سل، جهش، توسعه ناهنجاری‌ها و سرانجام سبب انواع سرطان می‌شوند. اثرهای زیان‌بار این ترکیبات بر محیط‌زیست و سلامت انسان با جزئیات مرور و گزارش گردید [۸۴-۸۶].

از این‌رو، روش‌های متفاوتی شامل، تخریب زیستی^۴، پیشنهاد شده‌اند تا مقدار این آلودگی در محیط‌زیست کنترل شود، همین‌طور روش‌های دیگری هم در حال استفاده و توسعه می‌باشند [۸۱، ۸۷، ۸۸]. استفاده انواع مختلفی از نانو مواد، شامل نانولوله‌های کربن، گرافن و نانوذرات آهن به دلیل بازده بالا و اثر مهم آن‌ها در حذف ترکیبات پلی سیکلی آروماتیک گزارش شده‌اند [۹۱-۸۱].

¹. Ge and Choi

². Rare earth (RE)

³ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHS)

⁴. Bioremediation

در ادامه، نانوالیاف الکتروریسی به دلیل توانایی بالای آن در حذف این مواد مورد بحث قرار خواهد گرفت.

نانوالیاف الکتروریسی پلی (استایرن، متاکریلیک اسید^۱، پلی (استایرن، استایرن سولفونات^۲) و پلی استایرن به عنوان جاذب‌های استخراج فاز جامد^۳ برای استخراج شش ترکیب هیدروکربنی آروماتیکی، شامل نیتروبنزن، ۲-نفتانول، بنزن، نورمال-بوتیل پارا هیدروکسی بنزووات، نفتالن و پارا دی کلروبنزن در نمونه‌های آبی مورد استفاده قرار گرفته شدند. نسبت سطح به حجم بالای نانوالیاف پلی استایرن منجر به پیوندهای قوی بین نانو الیاف جاذب و هیدروکربن‌های آروماتیک می‌شود که سبب حساسیت بالا، استفاده مجدد این نانوالیاف، محدودیت شناسایی و کاهش زمان می‌شوند، معرفی می‌کند. البته توانایی جاذب‌ها برای مدت زمان معلومی نسبت به مواد نامبرده شده، مورد کنکاش قرار گرفتند [۹۲]. مطالعه‌ای که توسط دای^۴ و همکاران [۹۳] انجام شد، ۵ نوع از نانوالیاف غشایی آماده شده از فرایند الکتروریسی، شامل پلی (۴-کاپرولاتان) (PCL)، پلی (L,D)

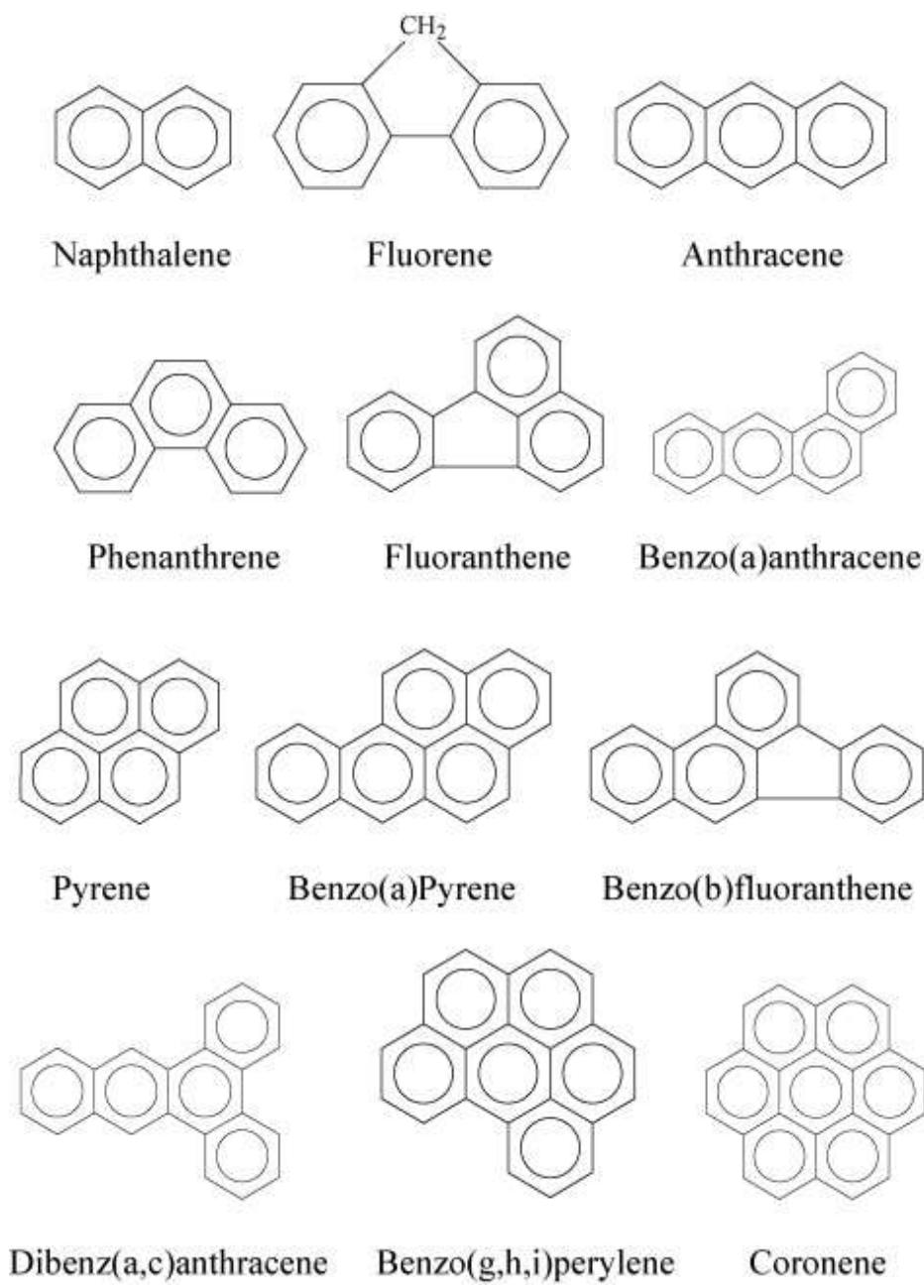
(PDDLA)، پلی (لاکتید-co-کاپرولاتون) (P(LA/CL))، پلی (L,D) لاکتید-co-گلیکولید (MPEG-PLGA) (PDLGA) و متوكسی پلی اتیلن گلیکول-پلی (لاکتید-CO-گلیکولید) (MPEG-PLGA) برای حذف آنتراسن (ANT)، بنزو(a)آنتراسن (BaA) و بنزو(a)پیرن (BaP) از محیط آبی مورد استفاده قرار گرفته شدند. همه فرایندهای جذب اکثرًا در ۳۰ دقیقه اول واکنش اتفاق می‌افتد و پس از ۳ ساعت به تعادل می‌رسد. سرعت‌های جذب برای نانوالیاف پلی کاپرولاتان نسبت به هیدروکربن‌های پلی سیکلی آروماتیک در مقایسه با سایر نانوالیاف بیشتر بود و ظرفیت جذب آن‌ها برای آنتراسن، BaA و BaP به ترتیب ۷۵/۶، ۷۸/۳ و ۷۳/۵ میکروگرم بر گرم در ۶۰ دقیقه گزارش گردید. تفاوت در جذب این سه آلودگی در برابر نانو الیاف الکتروریسی شده بر اساس پیوندهای آب‌گریز تشکیل شده، برهم‌کنش‌های هیدروژنی، پیوندهای Π - Π و فاکتورهای پرکننده حفره می‌باشد. شکل ۲۲-۶ شمای جزئیات مکانیسم جذب را نشان می‌دهد [۹۳].

^۱. Poly(styrene-co-methacrylic acid)

^۲. Poly(styrene-co-p- styrene sulfonate)

^۳. Solid-phase extraction (SPE) sorbents

^۴. Dai et al.



شکل ۲۱-۶- ساختار شیمیابی از برخی اروماتیک‌های چند حلقه‌ای [۸۱]

برای بالابردن ظرفیت جذب و تخریب ترکیبات آромاتیک پلی سیکلی، سه نمونه از الیاف الکتروریسی شده (PDLGA)، (MPEG-PLGA)، (LCEFM_S) مخلوط شده با لاکاز (α-Fluoranthene¹، بنز(a)Anthracene² و بنزو(a)Pyrene³) از نمونه های آماده گردیدند و برای حذف فناتنرن، فلورانثین، بنز(a)Anthracene و بنزو(a)Pyrene از نمونه های خاک در محلول آبی استفاده گردیدند. مطالعه حذف این مواد توسط نانوالیاف به کار رفته نشان داد که ترتیب و تمایل آن ها برای حذف به این صورت است: فناتنرن > فلورانثین > بنزو(a)Anthracene > بنزو(a)Pyrene؛ به خصوص، بازده تخریب نانو الیاف استفاده شده با لاکاز برای همه آن ها از نانوالیاف بدون لاکاز بیشتر بود؛ به عنوان مثال، بازدهی تخریب بنزو(a)Pyrene بدون استفاده از لاکاز در سه نانوالیاف موردنظر کمتر از ۳۰٪، اما با سه نانوالیاف استفاده شده با لاکاز بیش از ۷۰٪ گزارش گردید، در ادامه، هیدروکربن های آромاتیک پلی سیکلی در محلول آبی بر روی سطح نانوالیاف جذب شدند و در حوالی مکان های فعال لاکاز پراکنده زیادی پیدا کردند؛ بنابراین، شکل ۲۳-۶ سرعت تخریب هیدروکربن های پلی سیکلی آروماتیک (PAHs) را توسط این نانوالیاف که افزایش پیدا کرده است، نشان می دهد و همچنین فرایند را به تصویر کشیده است [۹۴]. در ادامه، دستیابی به حذف این مواد در محیط آبی توضیح داده شده است [۹۵].

با توجه به خواص منحصر به فرد سیکلودکسترین ها در برطرف کردن آلودگی های محیط زیستی، نانوالیاف پلی استر (PET) مخلوط شده با پلیمر سیکلودکسترین (CDP)، با توجه به نوع آن ها یعنی، α ، β ، γ سیکلو دکسترین، برای حذف پلی سیکلی های آروماتیک مانند فناتنرن مورد استفاده قرار گرفتند و عملکرد آن ها با پلی استرهای خالص مقایسه گردیدند. شکل ۲۴-۶ تهیه این نانوالیاف و مکانیسم عملکرد آن ها برای حذف فناتنرن را نشان می دهد. در این مطالعه، نانوالیاف پلی استر از طریق روش الکتروریسی و استفاده از محلول (w/v) ۵/۵۰ (50/50) TFA/DCM تهیه گردیدند. واکنش شیمیایی بین سیکلودکسترین و نانوالیاف پلی استر به صورت مستقیم اتفاق نمی افتد، چون الیاف پلی استر، یک پلیمر بر اساس ترفتالیک اسید و اتیلن گلیکول می باشد و شامل گروه های فعال آزاد در ساختارشان نیستند.

بنابراین ما سطح نانو الیاف الکتروریسی شده PET را از طریق واکنش پلیمریزاسیون بین CTR و سیکلودکسترین اصلاح کردیم. شکل ۲۴-۶ a و b ۲۴-۶ c و d مکانیسم تشکیل پلیمر حاضر را نشان می دهد. فیلتراسیون مولکولی از الیاف غشایی حاضر این نتیجه را داد که غلظت فناتنرن در محلول آبی با گذر زمان کاهش پیدا کرد همان طور که در شکل c و d ۲۴-۶ نشان داده شده است.

¹phenanthrene

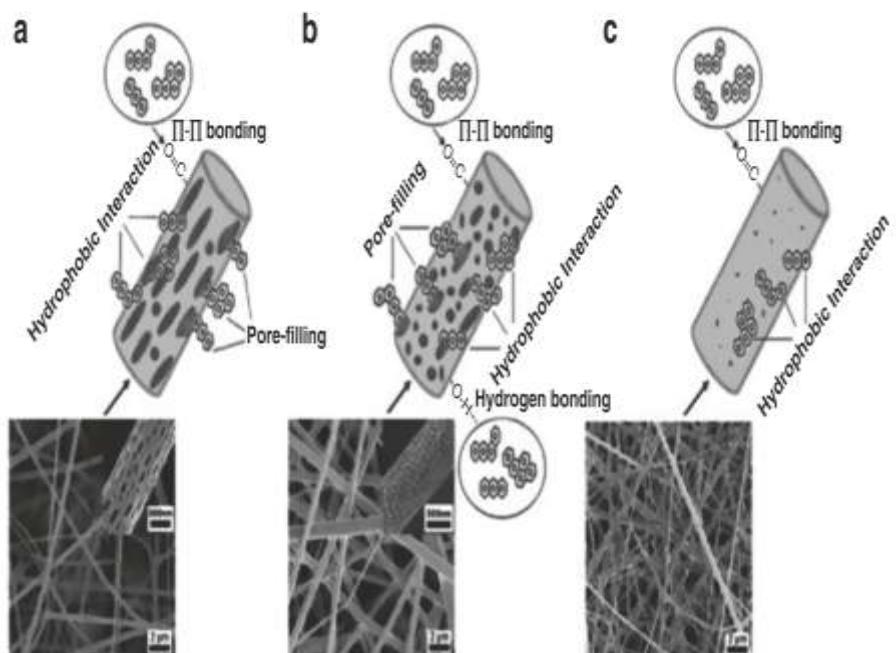
²fluoranthene

³benz[a]anthracene

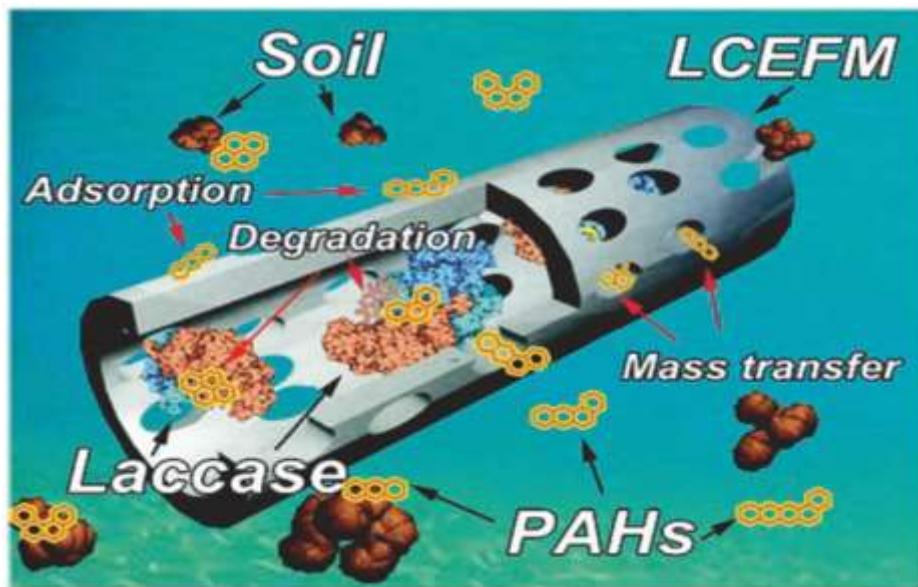
⁴benzo[a]pyrene

در ۲ ساعت اول جذب فناتنرن توسط نانوالياف پلیاستر دیده شد و سپس غلظت فناتنرن پس از آن به آرامی کاهش یافت. از طرف دیگر، کاهش غلظت فناتنرن با استفاده از نانوالياف پلیاستر و سیکلودکسترين کاهش قابل توجه تری داشت؛ اگرچه مقدار کمتری هم از نانوالياف پلیاستر آماده شده با سیکلودکسترين در مقایسه با نانوالياف پلیاستر خالص برای آزمون استفاده گردید، درنتیجه بازدهی حذف فناتنرن از محلول آبی بهتر بود زیرا ساختار پلیمر سیکلودکسترين نقش و عامل اساسی در جذب فناتنرن را ایفا می‌کند.

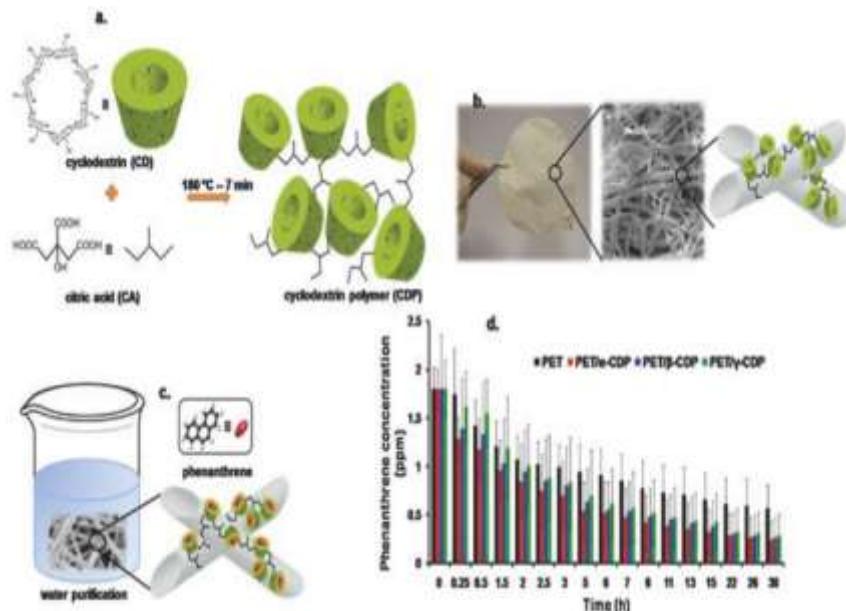
بنابراین، روش عملکرد روی نانوالياف الکتروریسی شده به اثبات رسیده است که به عنوان یک فیلتر مولکولی برای تصفیه آب از طریق کمپلکس فناتنرن با پلیمر سیکلودکسترين بر روی مخلوط پلیاستر و پلیمر سیکلودکسترين تغییر می‌کند [۹۶].



شکل ۲۲-۶- دیاگرام جذب سه نوع از ترکیبات پلی سیکلی آروماتیک (PAHs) بر روی نانوالياف [۹۳] P(LA/CL), PCL, and PDLGA ENFM_S. (a). (b) PDLA ENFM_S. (c). PLGA ENFM_S.



شکل ۲۳-۶- فرایند انتقال فاز و تخریب ترکیبات بلی سیکلی آروماتیک (PAHs) به وسیله غشای بیافی الکترورسی شده همراه با لاکاز [۹۴]



شکل ۲۴-۶- (a) مکانیسم تشکیل CDP (b) تصویر نانوالیاف PET/CDP و تصاویر SEM آن (c, d) کاهش غلظت وابسته به زمان فناوری در محلول آبی شامل شبکه‌های نانوالیاف و کمپلکس شدن فناوری [۹۶]

نانوالیاف استات سلولز (CA) مخلوط شده با بتا سیکلو دکستربن تهیه شده از روش الکتروریسی و به دنبال آن واکنش کلیک^۱ برای حذف فناورن به عنوان یک ماده هیدروکربنی پلی سیکلی آروماتیک (PAHs) استفاده شده است؛ به طور خلاصه، در اول بتا-سیکلو دکستربن و نانوالیاف استات سلولز به یکدیگر توسط واکنش‌های جانبی متصل گردیدند، شکل ۶-۲۵ تشكیل و مراحل انجام این کار را نشان می‌دهد. شکل ۶-۲۵ سطح نانوالیاف استفاده شده قبل و بعد از اصلاح با سیکلو دکستربن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر SEM مشخص است، برخی تغییرات در ریخت‌شناسی نانوالیاف استات سلولز پس از اصلاح اتفاق افتاده است. نانوالیاف عامل‌دار شده توسط سیکلو دکستربن توانایی بیشتری نسبت به نانوالیاف تنها برای حذف ترکیبات پلی سیکلی آروماتیک از محیط آبی از خود نشان دادند؛ درواقع به دلیل نیروهای دافعه بین قسمت آب‌گریز و محیط آبی و همچنین برهم‌کنش‌های مطلوب آب‌گریز توسط سیکلو دکستربن‌ها، همان‌طور که در شکل ۶-۲۵ نشان داده شده است فرایند جداسازی اتفاق می‌افتد [۹۷].

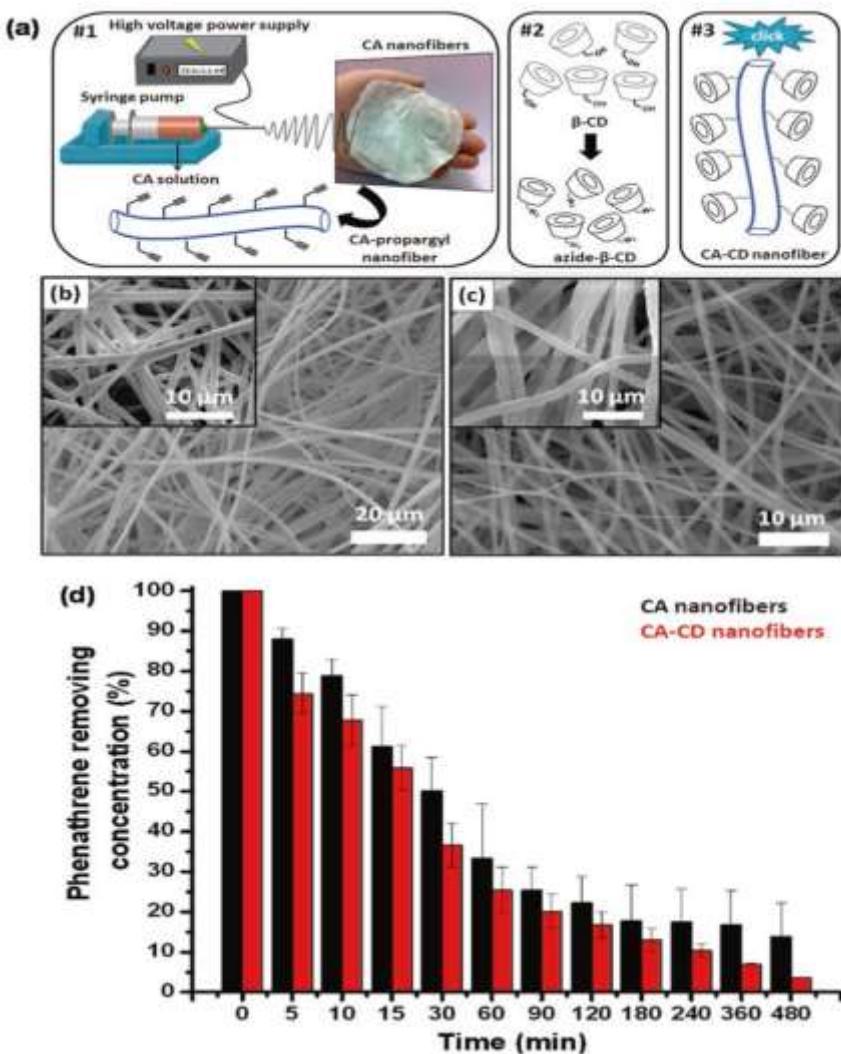
۶-۲-۴- حذف آلاینده‌های آلی دیگر (مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و حشره‌کش‌ها)

در کنار آلودگی‌های نامبرده شده، آلودگی‌های مربوط به آنتی‌بیوتیک‌ها حتی در مقدارهای کم هم به عنوان یک نگرانی بزرگ دیگر به شمار می‌رود. تاکنون، روش‌های متفاوتی مانند تبادل یونی، تصفیه غشایی، جذب و تخریب‌های فوتوكاتالیستی برای حذف این آلودگی، مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند [۹۸-۱۰۰]؛ اما مطالعه‌های کمی تاکنون روی حذف آنتی‌بیوتیک‌ها توسط نانوالیاف غشایی گزارش گردیده است؛ به عنوان یک مثال، نانوالیاف پلی اکریلونیتریل (PAN) به همراه اکسید آهن (Fe₃O₄) توسط یک روش دومرحله‌ای الکتروریسی و روش‌های گرمایی حلal^۲ آماده گردیدند؛ توسط روش آزمایشگاهی حذف تتراسیکلین (TC^۳) با فرایند جذب مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که نانوالیاف ترکیبی حاضر بسیار مناسب برای حذف تتراسیکلین می‌باشد، همین‌طور در pH حاضر (۵-۸) مقدار هدر رفت آهن از نانو الیاف هم خیلی کم گزارش گردید سپس ظرفیت جذب توسط ایزووترم مدل لانگمیور بداندازه mg.g^{-۱} در pH ۲۵۷/۰/۷ با ۶ محاسبه گردید. از نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد گردید که جذب ترا سیکلین بر غشاها ترکیبی بر اساس تبادل کاتیونی و تشكیل کمپلکس بین آهن و اجزای مولکول سیکلو دکستربن مطابق با شکل ۶-۲۶ اتفاق افتاده است [۱۰۱].

¹. Click Reaction

². solvothermal methods

³. Tetracycline



شکل ۲۵-۶- (a) آماده سازی نانو الیاف استات سلولز و استفاده از واکنش کلیک (b, c) تصاویر SEM به ترتیب مربوط به قبل از اصلاح توسط سیکلودکسترین و بعد از اصلاح توسط سیکلودکسترین (d) کاهش غلظت فناهنرن توسط نانو الیاف استات و استات سلولز - سیکلودکسترین [۹۷]

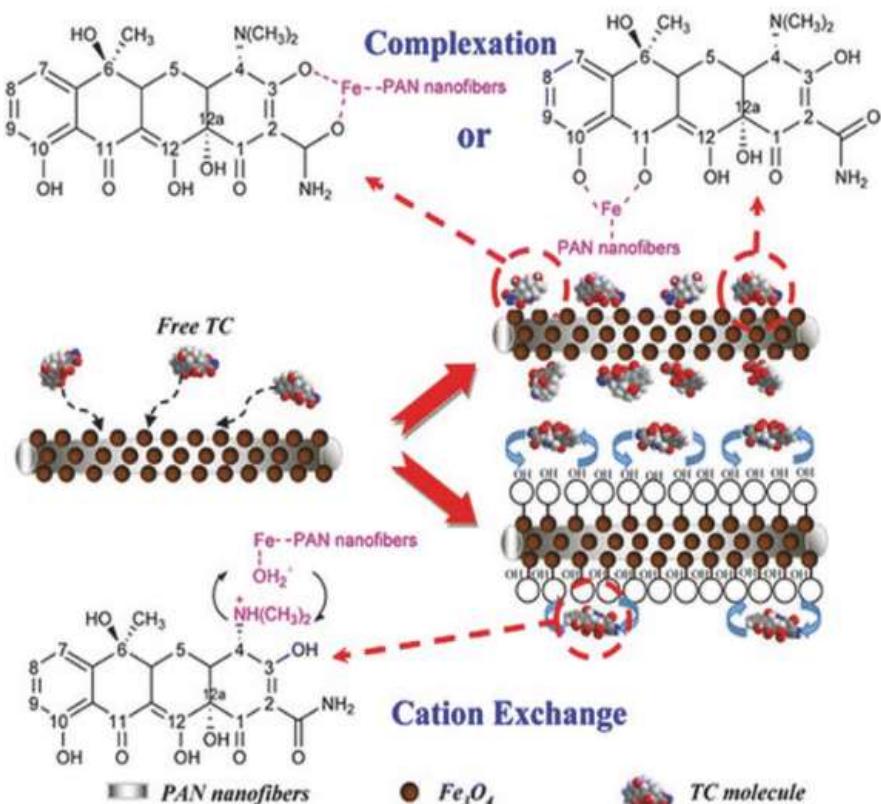
ارگانوفسفات‌ها^۱ (OP_S) به عنوان ترکیبات آلی فسفرداری هستند که اکثرًا در حشره‌کش‌ها و مواد سمی به کار می‌روند؛ به دلیل پتانسیل برهم‌کنش با استیل کولین استراز^۲ که در معرض پوست انسان قرار دارد، به اعصاب آسیب می‌رساند و جلوی عملکرد سلول عصبی را می‌گیرد [۱۰۲]. روش‌های متفاوتی تاکنون برای حذف این مواد ارائه شده‌اند که شامل روش‌های الکتروشیمیایی، تخریب زیستی، فتوشیمیایی، اکسیداسیون کاتالیستی و جذب می‌باشند. محققان الکتروریسی البته توجه بسیاری به حذف حشره‌کش‌ها داشته‌اند. لانجه^۳ و همکاران [۱۰۳] استفاده از شبکه‌های فلزی-آلی (Cu-BTC) را در نانوالیاف پلی اکریلونیتریل توسط فرایند الکتروریسی برای حذف متیل پاراشن^۴ گزارش داده‌اند. بیشتر از ۸۸٪ این مواد توسط نانوالیاف حاضر در مدت‌زمان ۲ ساعت حذف گردید. بر اساس نتایج این مطالعه، نانوالیاف غشایی عامل‌دار شده به عنوان یک پیشنهاد کارآمد در عملیات تصفیه ارائه گردید [۱۰۳].

¹ Organophosphates

² acetylcholinesterase

³ Lange et al.

⁴ methyl parathion



شکل ۶-۲۶- مکانیسم جذب سیکلو دکستربن روی نانوالیاف پلی اکریلونیتریل، آهن اکسید ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PAN}$) [۱۰۳]

۶-۳- جمع‌بندی و چشم‌اندازها

استفاده از غشاء کامپوزیتی نانولیفی الکتروریسی شده به عنوان یک روش مناسب با بازده بالا برای حذف آلودگی‌ها از محیط زیست استفاده می‌شوند. این فصل پیشرفت‌های اخیر در توسعه غشاهای کامپوزیتی نانولیفی الکتروریسی شده به عنوان یک فیلتر جهت مقابله با انواع آلودگی‌های آلی را به صورت خلاصه موردنبررسی قرار داد. حذف مؤثر مواد آلی از رنگزهای تا ترکیبات آروماتیک پلی سیکلی به طور کامل بحث شدند. به هر حال، سمیت مواد عامل و تأثیر زیست‌محیطی آن‌ها، قبل و بعد از مخلوط شدن با نانوالیاف به صورت ناشناخته است و باید با جدیت بیشتری موردن تحقیق قرار گیرد. اگرچه، مطالعاتی در مورد اثر تصفیه توسط شستشو نانوموادهای عامل از نانوالیاف به بسته تصفیه وجود دارد، اما نگرانی زیادی وجود دارد که در رهاسازی مولکول‌های عامل از فیلترهای نانولیفی توجه زیادی شود تا تأثیر آن‌ها بر سلامت محیط‌زیست محدود شود.

مراجع

- [1]. Wen Y, Schoups G, van de Giesen N (2017) Organic pollution of rivers: combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Sci Rep* 7:43289.
- [2]. Petrie B, Barden R, Kasprzyk-Hordern B (2015) A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Res* 72:3-27.
- [3]. Li QQ, Loganath A, Chong YS (2006) Persistent organic pollutants and adverse health effects in humans. *J Toxicol Environ Health A* 69:1987-2005.
- [4]. Aksu Z (2005) Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process Biochem* 40:997-1026.
- [5]. Ali I, Asim M, Khan TA (2012) Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *J Environ Manag* 113:170-183.
- [6]. Qu X, Alvarez PJJ, Li Q (2013) Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Res* 47:3931-3946.
- [7]. Zhang Y, Wu B, Xu H et al (2016) Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment. *NanoImpact* 3:22-39.
- [8]. Bethi B, Sonawane SH, Bhanvase BA et al (2016) Nanomaterials-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: a review. *Chem Eng Process* 109:178-189.
- [9]. Adeleye AS, Conway JR, Garner K et al (2016) Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: costs, benefits, and applicability. *Chem Eng J* 286:640-662.
- [10]. Yoon K, Hsiao B, Chu B (2008) Functional nanofibers for environmental applications. *J Mater Chem* 18:5326-5334.
- [11]. Ramakrishna S, Fujihara K, Teo WE et al (2006) Electrospun nanofibers: solving global issue. *Mater Today* 9:40-50.
- [12]. Senthamizhan A, Balusamy B, Aytac Z et al (2016) Grain boundary engineering in electrospun ZnO nanostructures as promising photocatalyst. *CrystEngComm* 18:6341-6351.
- [13]. Kayaci F, Vempati S, Ozgit-Akgun C et al (2014) Enhanced photocatalytic activity of homoassembled zno nanostructures on electrospun polymeric nanofibres: a combination of atomic layer deposition and hydrothermal growth. *Appl Catal B* 156-157:173-183.
- [14]. Senthamizhan A, Balusamy B, Uyar T (2016) Glucose sensors based on electrospun nanofibers: a review. *Anal Bioanal Chem* 408:285-306.
- [15]. Huang ZM, Zhang YZ, Kotaki M et al (2003) A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos Sci Technol* 63:2223-2253.

- [16].Anitha S, Brabu B, Thiruvadigal DJ et al (2012) Preparation of free-standing electrospun composite ZnO membrane for antibacterial applications. *Adv Sci Lett* 5:468-474.
- [17].Demirci S, Celebioglu A, Uyar T (2014) Surface modification of electrospun cellulose acetate nanofibers via RAFT polymerization for DNA adsorption. *Carbohydr Polym* 113:200-207.
- [18].Senthamilan A, Balusamy B, Celebioglu A et al (2016) Nanot raps in porous electrospun fibers for effective removal of lead (II) in water. *J Mater Chem A* 4:2484-2493.
- [19].Wang P, Wang Y, Tong L (2013) Functionalized polymer nanofibers: a versatile platform for manipulating light at the nanoscale. *Light Sci Appl* 2:e102.
- [20].Leung WH, Lo WH, Chan PH (2015) Amyloid fibrils as rapid and efficient nano-biosorbents for removal of dye pollutants. *RSC Adv* 5:90022-90030.
- [21].Ahmad A, Mohd-Setapar SH, Chuong CS et al (2015) Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater. *RSC Adv* 5:30801-30818.
- [22].Natarajan S, Bajaj HC, Tayade RJ (2017) Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. *J Environ Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>.
- [23].Dabrowski A (2001) Adsorption: from theory to practice. *Adv Colloid Interf Sci* 93:135-224. Chaque EFC, Dlamini LN, Adelodun AA et al (2016) Electrospun polyacrylonitrile nano-fibers functionalized with EDTA for adsorption of ionic dyes. *Phys Chem Earth.* <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.008>.
- [24].Zarrini K, Rahimi AA, Alihosseini F et al (2017) Highly efficient dye adsorbent based on polyaniline-coated nylon-6 nanofibers. *J Clean Prod* 142:3645-3654.
- [25].Bhaumik M, McCrindle R, Maity A (2013) Efficient removal of Congo red from aqueous solutions by adsorption onto interconnected polypyrrole-polyaniline nanofibers. *Chem Eng J* 228:506-515.
- [26].Qureshi UA, Khatri Z, Ahmed F et al (2017) Electrospun zein nanofiber as green and recyclable adsorbent for the removal of reactive black 5 from aqueous phase. *ACS Sustain Chem Eng.* <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00402>.
- [27].Patel S, Hota G (2014) Adsorptive removal of malachite green dye by functionalized electro-spun PAN nanofibers membrane. *Fibers Polym* 15:2272-2282.

- [28].Miao YE, Wang R, Chen D et al (2012) Electrospun self-standing membrane of hierarchi- cal SiO₂ @γ-AlOOH(Boehmite) core/sheath fibers for water remediation. *ACS Appl Mater Interfaces* 4:5353–5359.
- [29].Chen D, Liu C, Chen S et al (2016) Controlled synthesis of recyclable, porous FMO/C@ TiO₂ core-shell nanofibers with high adsorption and photocatalysis properties for the effi- cient treatment of dye waste water. *ChemPlusChem* 81:282–291.
- [30].Li S, Jia Z, Li Z (2016) Synthesis and characterization of mesoporous carbon nanofibers and its adsorption for dye in wastewater. *Adv Powder Technol* 27:591–598.
- [31].Batool SS, Imran Z, Hassan S (2016) Enhanced adsorptive removal of toxic dyes using SiO₂ nanofibers. *Solid State Sci* 55:13–20.
- [32].Im K, Nguyen DN, Kim S (2017) Graphene-embedded hydrogel nanofibers for detection and removal of aqueous-phase dyes. *ACS Appl Mater Interfaces* 9:10768–10776.
- [33].Wang Y, Ding W, Jiao X et al (2014) Electrospun flexible self-standing silica/mesopo- rous alumina core-shell fibrous membranes as adsorbents toward Congo red. *RSC Adv* 4:30790–30797.
- [34].Patel S, Hota G (2016) Iron oxide nanoparticle-immobilized PAN nanofibers: synthesis and adsorption studies. *RSC Adv* 6:15402–15414.
- [35].Uyar T, Havelund R, Nur Y et al (2009) Molecular filters based on cyclodextrin functional- ized electrospun fibers. *J Membrane Sci* 332:129–137.
- [36].Uyar T, Havelund R, Hacaloglu J et al (2010) Functional electrospun polystyrene nanofibers incorporating alpha, beta and gamma cyclodextrins: comparison of molecular filter perfor- mance. *ACS Nano* 4:5121–5130.
- [37].Egede EJ, Jones H, Cook B et al (2016) Application of microalgae and fungal-microalgal associations for wastewater treatment. In: Purchase D (ed) *Fungal applications in sustainable environmental biotechnology*, Springer international publishing, Switzerland, pp 143–181.
- [38].Sarioglu OF, San Keskin NO, Celebioglu A et al (2017) Bacteria encapsulated electro- spun nanofibrous webs for remediation of methylene blue dye in water. *Colloids Surf B Biointerfaces* 152:245–251.
- [39].Salalha W, Kuhn J, Dror Y et al (2006) Encapsulation of bacteria and viruses in electrospun nanofibers. *Nanotechnology* 17:4675–468.
- [40].Maurya NS, Mittal AK, Cornel P et al (2006) Biosorption of dyes using dead macro fungi: effect of dye structure: ionic strength and pH. *Bioresour Technol* 97:512–521.
- [41].Sarioglu OF, Celebioglu A, Tekinay T et al (2015) Evaluation of contact time and fiber mor- phology on bacterial immobilization for development

- of novel surfactant degrading nanofi- brous webs. RSC Adv 5:102750-102758.
- [42].San NO, Celebioglu A, Tumtas Y et al (2014) Reusable bacteria immobilized electrospun nanofibrous webs for decolorization of methylene blue dye in wastewater treatment. RSC Adv 4:32249-32255.
- [43].San Keskin NO, Celebioglu A, Uyar T et al (2015) Microalgae immobilized by nanofibrous web for removal of reactive dyes from wastewater. Ind Eng Chem Res 54:5802-5809.
- [44].Kim KH, Jahan SA, Kabir E (2013) A review on human health perspective of air pollution with respect to allergies and asthma. Environ Int 59:41-52.
- [45].De Crom J, Claeys S, Godayol A et al (2010) Sorbent-packed needle microextraction trap for benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes determination in aqueous samples. J Sep Sci 33:2833-2840.
- [46].Atkinson R (2000) Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. Atmos Environ 34:2063-2101 48. Konieczny K, Bodzek M, Panek D (2008) Removal of volatile compounds from the wastewater by use of pervaporation. Desalination 223:344-348.
- [47].Son YS (2017) Decomposition of VOCs and odorous compounds by radiolysis: a critical review. Chem Eng J 316:609-622.
- [48].Hirota K, Sakai H, Washio M et al (2004) Application of electron beams for the treatment of VOC streams. Ind Eng Chem Res 43:1185-1191.
- [49].Hakim M, Broza YY, Barash O et al (2012) Volatile organic compounds of lung cancer and possible biochemical pathways. Chem Rev 112:5949-5966.
- [50].Delfino RJ, Gong H, Linn WS et al (2003) Respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with asthma in relation to volatile organic compounds in exhaled breath and ambient air. J Expo Anal Environ Epidemiol 13:348-363.
- [51].Gałęzowska G, Chraniuk M, Wolska L (2016) In vitro assays as a tool for determination of VOCs toxic effect on respiratory system: a critical review. TrAC Trends Anal Chem 77:14-22.
- [52].Al-Dawery S (2013) Methanol removal from methanol-water mixture using municipal activated sludge. J Eng Sci Technol 8:578-587.
- [53].Aliabadi M, Aroujalian A, Raisi A (2012) Removal of styrene from petrochemical wastewater using pervaporation process. Desalination 284:116-121.
- [54].Kujawa J, Cerneaux S, Kujawski W (2015) Highly hydrophobic ceramic membranes applied to the removal of volatile organic compounds in pervaporation. Chem Eng J 260:43-54.
- [55].Son YS, Kim P, Park JH et al (2013) Decomposition of trimethylamine by an electron beam. Plasma Chem Plasma Process 33:1099-1109.

- [56].Vane LM, Alvarez FR (2002) Full-scale vibrating pervaporation membrane unit: VOC removal from water and surfactant solutions. *J Membr Sci* 202:177–193.
- [57].Delimaris D, Ioannides T (2008) VOC oxidation over MnO_x-CeO₂ catalysts prepared by a combustion method. *Appl Catal B Environ* 84:303–312
- [58].Balamurugan R, Sundarajan S, Ramakrishna S (2011) Recent trends in nanofibrous membranes and their suitability for air and water filtrations. *Membranes* 1:232–248.
- [59].Thavasi V, Singh G, Ramakrishna S (2008) Electrospun nanofibers in energy and environmental applications. *Energy Environ Sci* 1:205–221
- [60].Mirjalili M, Zohoori S (2016) Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. *J Nanostruct Chem* 6:207–213.
- [61].Zhu M, Han J, Wang F et al (2017) Electrospun nanofibers membranes for effective air filtration. *Macromol Mater Eng* 302:1600353.
- [62].Haider A, Haider S, Kang IK (2015) A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arab J Chem*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015>.
- [63].Sundarajan S, Tan KL, Lim SH et al (2014) Electrospun nanofibers for air filtration applications. *Procedia Eng* 75:159–166. Sahay R, Kumar PS, Sridhar R et al (2012) Electrospun composite nanofibers and their multifaceted applications. *J Mater Chem* 22:12953–12971.
- [64].Chu L, Deng S, Zhao R et al (2015) Adsorption/desorption performance of volatile organic compounds on electrospun nanofibers. *RSC Adv* 5:102625–102632.
- [65].Shim WG, Kim C, Lee JW et al (2006) Adsorption characteristics of benzene on electrospun-derived porous carbon nanofibers. *J Appl Polym Sci* 102:2454–2462.
- [66].Bai Y, Huang ZH, Wang MX et al (2013) Adsorption of benzene and ethanol on activated carbon nanofibers prepared by electrospinning. *Adsorption* 19:1035–1043.
- [67].fibers for absorption of volatile organic compounds from air. *ACS Appl Mater Interfaces* 3:3902–3909.
- [68].Feng C, Khulbe KC, Tabe S (2012) Volatile organic compound removal by membrane gas stripping using electro-spun nanofiber membrane. *Desalination* 287:98–102.
- [69].Guo Z, Huang J, Xue Z et al (2016) Electrospun graphene oxide/carbon composite nanofibers with well-developed mesoporous structure and their adsorption performance for benzene and butanone. *Chem Eng J* 306:99–106.

- [70].Uyar T, Havelund R, Nur Y et al (2010) Cyclodextrin functionalized poly(methyl methacrylate) (PMMA) electrospun nanofibers for organic vapors waste treatment. *J Membr Sci* 365:409–417.
- [71].Kayaci F, Uyar T (2014) Electrospun polyester/cyclodextrin nanofibers for entrapment of volatile organic compounds. *Polym Eng Sci* 54:2970–2978.
- [72].Kayaci F, Sen HS, Durgun E et al (2015) Electrospun nylon 6,6 nanofibers functionalized with cyclodextrins for removal of toluene vapor. *J Appl Polym Sci* 132:41941.
- [73].Celebioglu A, Uyar T (2013) Electrospun gamma-cyclodextrin (γ -CD) nanofibers for the entrapment of volatile organic compounds. *RSC Adv* 3:22891–22895.
- [74].Celebioglu A, Sen HS, Durgun E et al (2016) Molecular entrapment of volatile organic compounds (VOCs) by electrospun cyclodextrin nanofibers. *Chemosphere* 144:736–744.
- [75].Kim HJ, Pant HR, Choi NJ et al (2013) Composite electrospun fly ash/polyurethane fibers for absorption of volatile organic compounds from air. *Chem Eng J* 230:244–250.
- [76].Ge JC, Kim JH, Choi NJ (2016) Electrospun polyurethane/loess powder hybrids and their absorption of volatile organic compounds. *Adv Mater Sci Eng* 2016:8521259.
- [77].Ge JC, Choi N (2017) Fabrication of functional polyurethane/rare earth nanocomposite membranes by electrospinning and its VOCs absorption capacity from air. *Nano* 7:60.
- [78].Haritash AK, Kaushik CP (2009) Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *J Hazard Mater* 169:1–15.
- [79].Kaushik CP, Haritash AK (2006) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and environmental health. *Our Earth* 3:1–7.
- [80].Samanta SK, Singh OV, Jain RK (2002) Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation. *Trends Biotechnol* 20:243–248.
- [81].Kim KH, Jahan SA, Kabir E et al (2013) A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environ Int* 60:71–80.
- [82].Bansal V, Kim KH (2015) Review of PAH contamination in food products and their health hazards. *Environ Int* 84:26–38.
- [83].Jarvis IW, Dreij K, Mattsson Å et al (2014) Interactions between polycyclic aromatic hydrocarbons in complex mixtures and implications for cancer risk assessment. *Toxicology* 321:27–39.
- [84].Rubio-Clemente A, Torres-Palma RA, Peñuela GA (2014) Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous environment by chemical treatments: a review. *Sci Total Environ* 478:201–225.

- [85].Abdel-Shafy HI, Mansour MSM (2016) A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt J Pet* 25:107–123.
- [86].Paszkiewicz M, Caban M, Bielicka-Giełdoń A et al (2017) Optimization of a procedure for the simultaneous extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons and metal ions by functionalized and non-functionalized carbon nanotubes as effective sorbents. *Talanta* 165:405–411.
- [87].Li J, Zhou QX, Liu YL et al (2017) Recyclable nanoscale zero-valent iron-based magnetic polydopamine coated nanomaterials for the adsorption and removal of phenanthrene and anthracene. *Sci Technol Adv Mater* 18:3–16.
- [88].Perreault F, Fonseca de Faria A, Elimelech M (2015) Environmental applications of graphene-based nanomaterials. *Chem Soc Rev* 44:5861–5896.
- [89].Qi D, Kang X, Chen L et al (2008) Electrospun polymer nanofibers as a solid-phase extraction sorbent for the determination of trace pollutants in environmental water. *Anal Bioanal Chem* 390:929–938.
- [90].Dai Y, Niu J, Yin L et al (2011) Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on electrospun nanofibrous membranes: sorption kinetics and mechanism. *J Hazard Mater* 192:1409–1417.
- [91].Dai Y, Yin L, Niu J (2011) Laccase-carrying electrospun fibrous membranes for adsorption and degradation of PAHs in shale soils. *Environ Sci Technol* 45:10611–10618.
- [92].Dai Y, Niu J, Yin L et al (2013) Laccase-carrying electrospun fibrous membrane for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated water. *Sep Purif Technol* 104:1–8.
- [93].Kayaci F, Aytac Z, Uyar T (2013) Surface modification of electrospun polyester nanofibers with cyclodextrin polymer for the removal of phenanthrene from aqueous solution. *J Hazard Mater* 261:286–294.
- [94].Celebioglu A, Demirci S, Uyar T (2014) Cyclodextrin-grafted electrospun cellulose acetate nanofibers via click reaction for removal of phenanthrene. *Appl Surf Sci* 305:581–588.
- [95].Sui Q, Cao X, Lu S et al (2015) Occurrence, sources and fate of pharmaceuticals and personal care products in the groundwater: a review. *Emerg Contam* 1:14–24.
- [96].Hao R, Xiao X, Zuo X et al (2012) Efficient adsorption and visible-light photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride using mesoporous BiOI microspheres. *J Hazard Mater* 209–210:137–145.
- [97].Le-Minh N, Khan SJ, Drewes JE et al (2010) Fate of antibiotics during municipal water recycling treatment processes. *Water Res* 44:4295–4323.

- [98].Liu Q, Zhong LB, Zhao QB et al (2015) Synthesis of Fe₃ O₄ /Polyacrylonitrile composite electrospun nanofiber mat for effective adsorption of tetracycline. *ACS Appl Mater Interfaces* 7:14573-14583.
- [99].Banks KE, Hunter DH, Wachal DJ (2005) Chlorpyrifos in surface waters before and after a federally mandated ban. *Environ Int* 31:351-356.
- [100].Lange LE, Ochanda FO, Obendorf SK et al (2014) CuBTC metal-organic frameworks enmeshed in polyacrylonitrile fibrous membrane remove methyl parathion from solutions. *Fibers Polym* 15:200-207.

فصل هفتم

فیلترهای الکتروریسی شده برای جداسازی روغن – آب

محمد Mehdi شیرازی^۱ و مرتضی اصغری^۲

^۱. Mohammad Mahdi A. Shirazi
^۲. Morteza Asghari e-mail: asghari@kashanu.ac.ir

چکیده

جadasازی روغن از آب به عنوان یک مسئله مهم در خیلی از صنایع مورد توجه قرار گرفته است. جadasازی به وسیله فیلترهای الکترورسی شده نسبتاً یک روش جدید و اما با امیدواری بالا است. سطح مخصوص بالا، ساختار با حفرات به هم پیوسته و پتانسیل مشارکت شیمی فعال بر سطح در مقیاس نانو این امکان را به وجود آورده است که نانوالیاف الکترورسی شده به عنوان مواد مناسب برای جadasازی پساب‌های روغنی شناخته شوند. در این فصل، ما خلاصه‌ای از استفاده‌ها و پیشرفت‌های اخیر این نانوالیاف را در تصفیه پساب‌های روغنی مورد بحث قرار دادیم. در ابتدا، مواد و فرایندهای متداول برای تصفیه پساب‌های روغنی خلاصه شده است. سپس روش الکترورسی، عوامل مهم مورد استفاده، خواص فیلترهای الکترورسی برای جadasازی روغن از آب و همین‌طور مکانیسم تصفیه توضیح داده شده است. در ادامه، کاربردهای الیاف الکترورسی شده برای جadasازی روغن از آب، شامل عملیات تصفیه و جadasازی غشایی به طور کامل توضیح داده شده است. در آخر این فصل، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده این موضوع مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱-۷- مقدمه

به تازگی، افزایش جمعیت جهان، شهرنشینی و صنعتی شدن سبب نیاز همگانی به استفاده از انرژی شده است؛ درنتیجه، سبب تولید مقدار زیادی از پساب خیلی آلینده در سراسر دنیا شده است [۱]. پساب‌های روغنی در میان خطروناک‌ترین این پساب‌ها می‌باشد، معمولاً در صنایع مختلفی شامل تولید و فرایندهایی که روغن در آن‌ها حضور دارد [۲،۳]، واحدهای پتروشیمی [۴،۵]، صنایع زیست‌فناوری و صنایع غذایی [۶،۷] و غیره وجود دارند؛ همین‌طور هدر رفت روغن در انتقال آن و ذخیره‌سازی آن یک نگرانی زیست‌محیطی بزرگ به شمار می‌رود [۸،۹]؛ از طرف دیگر سالم نگهدارشتن منابع آبی و همین‌طور روغن از مسائل مهم دیگر به شمار می‌رود؛ همه نگرانی‌های نامبرده شده باید توسط قوانین مستحکمی مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. مقدار روغن مجاز در پساب استرالیا و آمریکا به ترتیب 1 mg/l و 30 mg/l می‌باشد. برخی کشورهای دیگر مقدار مجاز سخت‌تری را گزارش داده‌اند؛ به عنوان مثال، جمهوری خلق چین مقدار متوسط ماهانه 10 mg/l را گزارش کرده است [۲].

بنابراین به دلیل تولید بیش از حد پساب‌های روغنی در دنیا، خیلی از کشورهای دارای معادن نفت و گاز (مانند کشورهای در حال توسعه) و همین‌طور کشورهای توسعه‌یافته در حال یافتن روشنی مناسب برای مقابله با این آلودگی زیست‌محیطی می‌باشند. این نکته هم می‌تواند خیلی مهم باشد

که روش انتخاب شده خود به عنوان یک روش مخرب محیط‌زیست نباشد و بازده بالایی در جداسازی داشته باشد [۴،۲].

تمام نگرانی‌های فوق بیانگر این واقعیت است که توسعه مواد پیشرفته برای جداسازی مؤثر و سازگار با محیط‌زیست مخلوط‌های روغن و آب (تصفیه فاضلاب روغنی) ضروری به نظر می‌رسد و به اقدامات تحقیقاتی چشم‌گیری نیاز دارد.

۲-۷- فرایندهای جداسازی روغن - آب و مواد استفاده شده

۲-۷-۱- فرایندهای متداول برای جداسازی روغن - آب

تصفیه پساب‌های روغنی توسط روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد که تعدادی از آن‌ها شامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و روش‌های زیستی شامل جذب [۱۲]، تصفیه زیستی [۱۳] و انعقاد سازی الکتریکی^۱ [۱۴] می‌باشند. جدول ۱-۷ به طور خلاصه روش‌های مورد استفاده در تصفیه پساب‌های روغنی را به رشته تحریر درآورده است. اگرچه، روش‌های متداول پیشنهاد شده به طور کلی قادر به حل مشکل نمی‌باشند. از یک طرف، روش‌های شیمیایی سریع، مناسب و کامل می‌باشند، اما استفاده از مواد شیمیایی سمی و مخرب محیط‌زیست و پساب ثانویه ناشی از آن اشکالات عمده‌ی آن‌هاست. زیان‌های مشابهی در روش‌های زیستی مشاهده شده است که علاوه بر آن سرعت عملیات نیز پایین می‌باشد؛ از طرف دیگر، در روش‌های فیزیکی شامل جذب نیاز به مواد جاذب بیرونی می‌باشد که معاویت مانند سرعت عملیات پایین، ظرفیت جذب کم و محدودیت استفاده مجدد دارند. اطلاعات بیشتر درباره مزایا و زیان‌های روش‌های متداول تصفیه در ادبیات مختلف آمده‌اند [۱۵،۴،۲-۱۸].

^۱ electro-/coagulation

جدول ۱-۷- بررسی اجمالی نسبت به روش‌های متدال برای تصفیه پساب‌های روغنی

فرایند جداسازی	روش‌ها	مزایا	معایب
تصفیه شیمیابی	<ul style="list-style-type: none"> - رسوب شیمیابی - اکسیداسیون شیمیابی - تصفیه الکتروشیمیابی - تصفیه فوتوکاتالیستی - فرایند فنتون - تصفیه اوزون - دمولسیفاپر - مایعات یونی دمای اتاق 	<ul style="list-style-type: none"> - توسعه یافتنگی مناسب - تصفیه سریع - قابل کاربرد برای محدوده‌ی وسیعی از تصفیه 	<ul style="list-style-type: none"> - استفاده از مواد افزودنی شیمیابی - سبب آلودگی ثانویه - گران بودن وسایل - مسائل خوردنگی
تصفیه فیزیکی	<ul style="list-style-type: none"> - فیلترهای شنی - جذب - سیکلون‌ها - تبخیر - شناورسازی و تهشیینی هوای حل شده - تور $^{\circ}\text{C}$ - انجماد-ذوب/تبخیر - الکترودیالیز 	<ul style="list-style-type: none"> - توسعه یافتنگی مناسب - قابل کاربرد برای محدوده‌ی وسیعی از تصفیه 	<ul style="list-style-type: none"> - بازدهی پایین - هزینه نگهداری بالا - خورندگی
تصفیه زیستی	<ul style="list-style-type: none"> - لجن فعال - نشت کردن فیلتر - راکتور دسته‌ای ترتیب گذاری شده - راکتور کموستات - اکسیداسیون زیستی - فیلترهای هواده‌ی زیستی - تالاب‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> - قابل کاربرد برای محدوده‌ی وسیعی از تصفیه 	<ul style="list-style-type: none"> - فرایند تصفیه آرام - سبب آلودگی ثانویه - ایجاد محدودیت‌ها بر اساس نوع میکروارگانیسم‌های مورداستفاده - غیر توسعه یافته

^۱. C-tour

۲-۷-تصفیه متداول و فرایندهای غشایی برای جداسازی روغن - آب

تصفیه و فرایندهای جداسازی غشایی به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های تصفیه پساب‌های روغنی شناخته شده‌اند [۱۹]. در مقایسه با سایر روش‌های متداول (طبق جدول ۱-۷)، فیلترها و غشاها بازده حذف بالا، کیفیت مناسب و مصرف انرژی و هزینه کرد پایین را پیشنهاد می‌دهند [۲۰].

فیلترها و غشاها پلیمری می‌توانند توسط روش‌های متفاوتی شامل تغییر فاز^۱، پلیمریزاسیون بین سطحی^۲، کشش، حک اثر^۳ [۲۱] و اخیراً روش الکتروریسی تهیه شوند [۲۲]. انتخاب استفاده از روش مناسب به چند عامل بستگی دارد که شامل نوع حلal-پلیمر و ترکیب آن‌ها، ساختار موردنیاز و هدف مورداستفاده از غشاها می‌باشند. همان‌طور که در جدول ۲-۷ نشان داده شده است، هر روشی مزايا و معایب خاص خود را دارد. اطلاعات جزئی‌تر درباره اين فیلترهای متداول و غشاهاي جداسازی روغن از آب در منابع دیگر قابل مشاهده می‌باشد [۲۴، ۲۲، ۱۷-۲۸].

جدول ۲-۷- بررسی اجمالی از روش‌های تهیه غشا

روش	توصیف	جدا سازی	اندازه حفره	مشکلات
وارونگی فاز	این یک روش جدایش است که در آن محلول پلیمر در ابتدا همگن، به صورت کنترل شده از فاز مایع به حالت جامد انتقال می‌یابد.	RO, UF	RO: 2.5 Å UF: 0.01 0.1 μm	- محدودیت اندازه حفره و توزیع حفره‌ها - مقدار حلal باقیمانده
پلیمریزاسیون میان سطحی	یکی از مهم‌ترین روش‌های تهیه غشاهاي تجاری TFC که اکثراً برای غشاها NF توسعه یافته‌اند.	NF	0/001-0/01 μm	- کنترل کردن ضخامت لایه گزینش پذیر - مقدار حلal باقیمانده

¹. Phase Inversion

². Interfacial Polymerization

³. Track-etching

ادامه جدول ۲-۷- بررسی اجمالی از روش‌های تهیه غشا

-کنترل کردن اندازه حفره - پایین بودن مقاومت مکانیکی غشا	0/1-1 μm	تصفیه، و MF MD	پلیمر در دمای بالای نقطه ذوب خود حرارت داده می‌شود و تبدیل به یک فیلم نازک می‌شود، سپس توسط کشیدن، متخلخل می‌شود که این روش یک روش بدون حلال می‌باشد.	کشش
-کنترل کردن اندازه حفره - پایین بودن استحکام مکانیکی برای غشاهای با تخلخل بالا - پرهزینه	0/1-10 μm	تصفیه، و MF MD	تابش یون‌های سنگین پرانرژی فیلم پلیمری بدون تخلخل	حک اثر

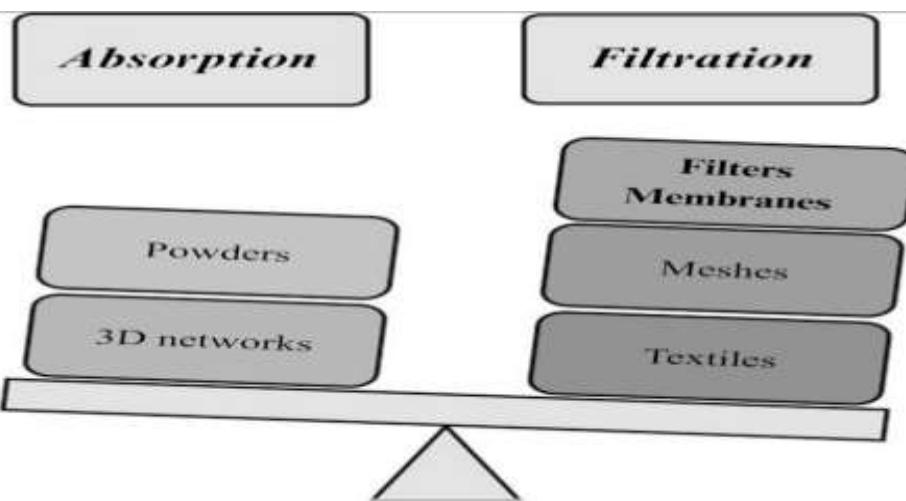
اسمز معکوس (RO)، الترافیلتراسیون (UF)، نانوفیلتراسیون (NF)، میکروفیلتراسیون (MF)، تقطیر غشایی (MD)

باین حال، یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای جداسازی روغن و آب، تولید مواد با خصوصیات مرطوب‌کنندگی ویژه است که دارای تمایل‌های متضادی نسبت به روغن و آب هستند. براین اساس، دو نوع عمده از مواد مرطوب‌کننده مخصوص توسعه داده شده‌اند که شامل مواد آب‌گریز و روغن دوست و مواد آب‌دوست و روغن گریز می‌باشند [۲۹، ۲۲]. رفتار خیس شوندگی این مواد توسط خواصی که سطح آن‌ها نشان می‌دهد، از یکدیگر متمایز می‌شوند [۳۰، ۳۱]. رفتار خیس شوندگی مواد تابعی از شیمی سطح آن‌ها است و می‌تواند با معماری سطح مواد تقویت شود [۳۰، ۳۱]؛ به عبارت دیگر، هنگامی که کشش سطحی یک ماده بین آب و روغن قرار داشته باشد، آن را به عنوان یک آب‌گریز (روغن دوست) به جا می‌آورد [۳۲]. در بخش بعدی، مواد مرطوب‌کننده مخصوص جداسازی روغن و آب بهطور خلاصه معرفی و موردنبحث قرار گرفته می‌شود.

۷-۲-۳- مواد مرطوب شونده متداول برای جداسازی روغن - آب

مواد خیس شونده ویژه توسعه یافته برای تصفیه پساب روغنی (جداسازی روغن - آب) بر اساس روشی که برای جداسازی استفاده می‌شود، به دو نوع عمدۀ طبقه‌بندی می‌شوند، از جمله مواد تصفیه (شبکه‌ها، منسوجات، فیلترها و غشاها) و مواد جاذب (پودرها و شبکه‌های سه‌بعدی) (شکل ۱-۱ را ببینید).

یک غشا یا فیلتر اجازه عبور آب یا روغن را می‌دهد در حالی که اجازه عبور دیگری را نمی‌دهد [۳۲]. ماده جاذب به طور انتخابی آب یا روغن را روی سطح آن‌ها و در حفرات خالی داخلی آن‌ها جذب می‌کند اما فازهای دیگر را وقتی در معرض جریان پساب روغنی (امولسیون روغن و آب) قرار می‌گیرد دفع می‌کند [۳۴]. هر یک از این روش‌های تصفیه مزایا و معایب خاص خود را دارد. با این حال، در این فصل، فقط فیلترها و غشاهای جداسازی روغن و آب بحث شده و اطلاعات بیشتر در مورد مواد جاذب برای جداسازی روغن از آب را می‌توان در جاهای دیگر یافت [۲۹، ۳۵].



شکل ۱-۱- بررسی اجمالی از مواد مورداستفاده برای جداسازی روغن از آب

برخی از فیلترهایی که به شکل گسترده برای تصفیه پساب روغنی مطالعه شده‌اند شبکه‌های فلزی هستند. این موضوع به دلیل استحکام مکانیکی عالی آن‌ها، تولید مقیاس صنعتی و شارهای تصفیه بالا آن‌ها است؛ علاوه بر این، سطح فلز واکنش‌پذیر طیف گسترده‌ای از تغییرات سطحی ممکن را فراهم می‌کند. تاکنون، مس و فولاد ضدزنگ شبکه‌هایی هستند که بیشترین بررسی‌ها بر روی آن‌ها برای جداسازی روغن و آب انجام شده است. شبکه‌های جداسازی روغن و آب را می‌توان به چهار نوع اصلی، یعنی شبکه‌های آب‌گریز-روغن دوست [۲۰]، شبکه‌های آبدوست-روغن گریز

[۳۶]، فوق العاده آبدوست و فوق العاده روغن گریز [۳۷] و شبکه‌های مرطوب‌کننده واکنش‌پذیر / قابل تغییر طبقه‌بندی کرد [۳۸]. در جدول ۳-۷ برخی از شبکه‌های فلزی برای جداسازی روغن و آب ذکر شده است.

اگرچه شبکه‌های فلزی با مشخصات خیس شوندگی ویژه، عملکرد امیدوارکننده‌ای برای جداسازی انتخابی روغن و آب نشان داده‌اند، اما برخی از نقاط ضعف از جمله: هزینه‌های زیاد برای بستر مورد استفاده، نایابی‌داری خورده‌گی، جرم سنگین و نگرانی‌های دفع و استفاده مجدد وجود دارد. برای حل این نگرانی‌ها، منسوجات و پارچه‌هایی که ارزان‌تر، سبک‌تر، انعطاف‌پذیرتر و دارای مقاومت بیشتری در برابر خوردگی نسبت به مشاهی فلزی دارند، موردنبررسی قرار گرفته است [۴۶، ۴۷]؛ بالاین حال، برخی از اشکالات، از جمله ظرفیت جداسازی کم از یک طرف و افزایش آکاهی از محیط‌زیست و مقررات سخت‌گیرانه‌تر از سوی دیگر، باعث شده است تا راهکارهای پیشرفته‌های برای تصفیه پساب روغنی ارائه شود. اطلاعات بیشتر در مورد مواد متداول، به عنوان مثال، شبکه‌ها و منسوجات را می‌توان در مقالات یافت [۲۰، ۲۹، ۴۸].

۳-۷- غشاها و فیلترهای الکتروریسی شده

به تازگی، روش الکتروریسی برای تهیه غشاها و فیلترهای میکرو متخلخل مورد توجه بسیاری قرار گرفته شده است [۴۹]. توجه جهانی به روش الکتروریسی برای تولید فیلترهای پلیمری به دلیل ماهیت ساده و متنوع آن است که برای تولید الیاف در محدوده میکرو تا نانو از طریق جت باردار شده الکتریکی با استفاده از محلول یا مذاب پلیمری انجام می‌شود [۵۰]؛ بنابراین، توسعه فیلترها و غشاهای الکتروریسی شده با ساختار حفرات به هم‌پیوسته سه‌بعدی (3D) نانوالیافی، یک پنجره جدید برای تصفیه روغن و آب در طی سال‌های اخیر گشوده است [۲۲، ۵۰].

جدول ۳-۷-۳- بررسی اجمالی از شبکه‌های جداسازی روغن و آب

مرجع	زاویه تماس سطح با آب / روغن	زمینه و روکش گذاری	توصیف	شبکه فلزی
[۳۹]	۰۱۵۶	فلاد ضدریزگ PTFE و شبکه مس و پلی بورتان	- روغن انرژی سطحی پالپین تری از آب دارد - پالپین شبکه‌های جداسازی روکشدار شده با مواد آب گریز، ساده‌ترین رویکرد می‌باشد.	آب گریز و روغن دوست
[۴۰]	۱۶۵/۰۱	شبکه مس و آبکسی / آبیوپلزیت	- آین مواد به شکل گرینس پذیر می‌تواند اجازه عبور آب را دهد - به شکل تیواری ساخت است چنین موادی را تهیه کنیم که دلیل آن کشش سطحی بالاتر آب از روغن است.	آب‌دوست و روغن گریز
[۴۱]	۰۱۶۰	فلاد ضدریزگ CNT و CNT و PDDA-PFO	- آین مواد به شکل گرینس پذیر می‌تواند اجازه عبور آب را دهد - به شکل تیواری ساخت است چنین موادی را تهیه کنیم که دلیل آن کشش سطحی بالاتر آب از روغن است.	آب‌دوست و روغن گریز
[۴۲]	۰۱۴۵-۰۱۴۵	فلاد ضدریزگ و PDDA-PFO	- آین مواد به شکل گرینس پذیر می‌تواند اجازه عبور آب را دهد - به شکل تیواری ساخت است چنین موادی را تهیه کنیم که دلیل آن کشش سطحی بالاتر آب از روغن است.	آب‌دوست و روغن گریز
[۴۳]	> ۰۱۵۰	شبکه مس و Cu(OH) ₂ ⁻ (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	- به شکل تیواری یک سطح با مشخصات فوق العاده آب‌دوستی در هوا، مشخصه فوق العاده آب گریزی را در زیر آب نشان می‌دهد	فوق العاده آب‌دوست و تحت آب فوق العاده
[۴۴]	۱۶۶/۹۲	شبکه مس و Cu(OH) ₂ ۰.۰۵ m K ₂ S ₂ O ₈ / ۱.۰ m NaOH	- آین مواد می‌توانند با استفاده از یک محرك خارجي یا تصفیه با مواد شبکه‌ای خاص، میزان مطروب بودن آنها تعییر داده شود - مواد با قابلیت مطروب شوندنگی، پاسخگو به تیول از مرطوب شوندنگی به ضد مطروب شوندنگی یا برکس تعییر کنند	فوق العاده آب‌دوست و تحت آب فوق العاده
[۴۵]	-	pH سطح اصلاح شده با محلول تیول از HS(CH ₂) _۹ CH _۳ HS(CH ₂) _{۱۰} COOH	- درنتیجه، بسته به شرایط، آنها می‌توانند برای از بین بودن آب یا ز بین بودن روغن استفاده شوند.	پاسخگو / قابل تعویض

(PFO)، کربن ناوتیوب (CNT)، پلی دی ایل دی متیل آمونیوم کلرید (PDPA)، سدیم پرفلورورورکربنات

۷-۳-۱-روش الکتروریسی

الکتروریسی روشی است که می‌تواند الیافی با قطر حداقل ۱۰ نانومتر [۵۱] از هر مایع ویسکوالاستیک رسانا که می‌تواند جامد شود تولید کند [۵۲]؛ علاوه بر تنوع پذیری در انتخاب ماده اولیه، الکتروریسی یک روش ساده است که دارای چندین گزینه برای کنترل قطر الیاف، ریخت‌شناسی، موضع شناسی سطحی و همچنین آرایش الیاف است. الکتروریسی یک روش منتنوع برای تولید غشاها نانوالیافی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله: نمک‌زدایی، تصفیه آب و پساب و جداسازی روغن و آب است [۵۳، ۵۰، ۳۵]؛ این به دلیل مزایای مختلف این روش نسبت به سایر روش‌های متداول در تولید غشاها پلیمری می‌باشد (جدول ۷-۲ را ببینید) از جمله:

- نسبت سطح به حجم بالا: نانوالیاف در مقیاس میکرو یا نانو ریسیده شده، نسبت سطح به حجم بالایی را ایجاد می‌کند. این یک ویژگی جذاب، بهویژه برای کاربردهای غشایی است.

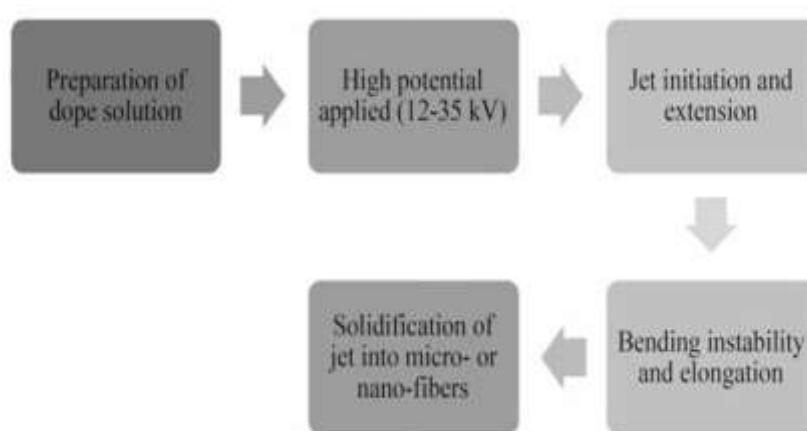
- تنوع پلیمرها و حللهای مورداستفاده: این روش برای سنتز نانوالیاف می‌تواند همراه با استفاده از حللهای پلیمری مختلف باشد.

- هزینه تهیه سیستم پایین: این روش معمولاً نسبت به سایر روش‌ها ارزان‌تر می‌باشد.

- تنوع بسترهای مورداستفاده: الیاف الکتروریسی شده می‌تواند بر روی سطح بسترهای مختلف قرار گیرد.

- عامل‌دار شدن: نانوالیاف الکتروریسی شده می‌تواند به‌آسانی برای بهبود عملکرد جداسازی عامل‌دار شود.

- کاربردهای تجاری: فیلترهای تصفیه هوا (ماسک‌ها) و غشاها تصفیه آب مثال‌هایی از جمله کاربردهای تجاری این الیاف و کاربرد این روش در تهیه آن‌ها می‌باشد.



شکل ۷-۲- پنج مرحله اصلی برای تهیه الیاف الکتروریسی شده

۷-۳-۲-۳-عوامل فرایند

شکل ۷-۲ پنج مرحله اصلی در فرایند الکتروریسی را نشان می‌دهد که از آماده‌سازی محلول (مخلوط حلال و پلیمر) شروع می‌شود، همین‌طور در ادامه با استفاده از ولتاژ بالا (بین سوزن و یک جمع کننده فلزی) و در آخر هم جامد شدن جت به الیاف با اندازه‌های میکرو و نانو پایان می‌یابد. این نکته خیلی حائز اهمیت می‌باشد که عوامل فرایند روی عملکرد غشاها الکتروریسی شده تأثیر زیادی می‌گذارند. این عوامل می‌توانند به سه گروه عمده دسته‌بندی شوند که شامل: عوامل محلول (مانند نسبت پلیمر به حلال، گرانزوی، کشش سطحی، هدایت، ثابت دیالکتریک و فراریت حلال)، عوامل فرایند (مانند پتانسیل الکترواستاتیک، قدرت میدان الکتریکی، شکل میدان الکترواستاتیک، فاصله بین سوزن و جمع کننده، نرخ جريان محلول و قطر سوزن) و عوامل محیطی (مانند دما، رطوبت، فشار و ترکیب اتمسفری) می‌باشند [۵۳].

تعدادی از ویژگی‌ها مانند مکان‌شناسی سطح، ریخت‌شناسی الیاف و همین‌طور آرایش یافته‌گی بسیار وابسته به خواص محلول و شرایط عملیات می‌باشند [۵۴]. از آنجایی که رئولوژی محلول پلیمری برای تشکیل الیاف الکتروریسی بسیار مهم است، وزن مولکولی پلیمر و غلظت آن مستقیماً در خواص الیاف تأثیرگذار است [۵۵]؛ هدایت محلول پلیمری نیز به عنوان یک عامل در تغییر خواص الیاف حاصله شناخته شده است [۵۶].

در ادامه، همان‌طور که اشاره شد، خواص الیاف الکتروریسی شده به‌طور مستقیم به عوامل فرایند و شرایط عملیات وابسته است. اطلاعات بیشتر و جزئی‌تر درباره الیاف الکتروریسی و عوامل تأثیرگذار در فرایند الکتروریسی در منابع دیگر موجود می‌باشند [۲۲].

۷-۳-۳-خواص الیاف الکتروریسی شده برای تصفیه روغن از آب

مانند شبکه‌های جداسازی روغن و آب، الیاف الکتروریسی شده را می‌توان بر اساس ویژگی‌های آب‌گریز بودن آن‌ها طبقه‌بندی کرد. آب‌گریزی یکی از مهم‌ترین مشخصات فیلترهای الکتروریسی شده برای جداسازی روغن از آب است.

شایان ذکر است که اصطلاح آب‌گریز بر اساس خاصیت فیزیکی سطحی است که آب را دفع می‌کند [۵۲]. وقتی که زاویه تماس آب سطح یک ماده از 90° درجه بیشتر باشد، این ماده آب‌گریز تلقی می‌شود؛ با این حال، سطح فوق العاده آب‌گریز زاویه تماس با آب $> 150^{\circ}$ درجه را نشان می‌دهد [۵۷]؛ لازم به ذکر است که فیلتر آب‌گریز می‌تواند از طریق الکتروریسی مواد با سطح انرژی پایین یا از طریق اصلاح سطحی فیلترهای ریسیده شده ایجاد شود؛ با این حال، برای تهیه یک فیلتر فوق العاده آب‌گریز، نه تنها ماده با سطح پایین انرژی بلکه ساختار سطحی سلسله مراتبی نیز لازم

است [۵۲]. ذکر این نکته مهم می‌باشد که آب‌گریزی بر اساس خواص فیزیکی سطح عمل می‌کند و آب را از خود دفع می‌گرداند [۵۲].

ریخت‌شناشی سطح (صف، زبر، یا ترکیبی از این بافت‌ها) یکی دیگر از ویژگی‌های مهم فیلترها یا غشاهای الکتروریسی شده است [۵۸]. سطح زبر و ناهماور می‌تواند چسبندگی روغن به سطح الیاف را تقویت کند [۵۹]؛ علاوه براین، زبری سطحی بالاتر می‌تواند آب‌گریز بودن فیلتر را افزایش دهد [۶۰]. در کارهای پژوهشی گزارش شده است که تخلخل بالا عامل اصلی دیگری برای به دست آوردن شار تصفیه بالا است [۲۳].

یکی از مهم‌ترین مزایای فیلترها و غشاهای الکتروریسی شده، تخلخل بالاتر در مقایسه با سایر غشاها متدالو ا است؛ این به دلیل ساختار بهمپیوسته غشاهای الکتروریسی شده است؛ به عنوان مثال، میرطالبی^۱ و همکاران [۶۱] عملکرد مقایسه‌ای غشاها نایلون تجاری و الکتروریسی شده را برای میکرو فیلتراسیون پساب‌های پتروشیمی حاوی ذرات زغال کوک^۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تمام غشاها مورد استفاده، دارای درصد عدم پذیرش یکسان ۹۹٪ زغال کوک می‌باشند؛ اگرچه، شار نفوذ بالاتری برای غشاهای الکتروریسی شده، به دلیل تخلخل بالاتر آن به دست آمد.

علاوه بر ویژگی‌های فوق الذکر، قطر الیاف، استحکام مکانیکی و پایداری شیمیایی سایر عوامل مهم تأثیرگذار بر عملکرد فیلترهای الکتروریسی شده هستند [۶۲].

۴-۳-۷- مکانیسم تصفیه

شایان ذکر است که فیلترها یا غشاها پلیمری تجاری، مانند آن‌هایی که از PTFE، پلی اترسولفون CA، PVDF، (PES)، استر سلولز مخلوط^۳ (MCE) و غیره ساخته شده‌اند دارای ساختار کامپوزیتی دو بعدی هستند که از یک میکرو متخلخل فعال (انتخابی) که بر روی یک لایه پشتیبان متخلخل ریخته‌گری شده یا پوشیده شده باشند تشکیل شده است. مکانیسم اصلی جداسازی غشاها با این ساختار دو بعدی غربالگری است [۶۳، ۶۴].

برخلاف ساختار دو بعدی غشاها تجاری، مکانیسم جداسازی غشاهای الکتروریسی شده با ساختار بهمپیوسته سه بعدی ترکیبی از غربالگری و تصفیه عمیقی است؛ در حقیقت، الیاف میکرو مقیاس و نانومقیاس به شکل تصادفی آرایش یافته، منجر به تولید غشا بسیار متخلخل با ظرفیت جداسازی انتخابی بالا می‌شوند. مکانیسم جداسازی چندمنظوره فیلترها یا غشاهای الکتروریسی

¹. Mirtalebi

². coke

³. mixed cellulose ester

شده (غربالگری، تصفیه عمقی و جذب) می‌تواند دلیل عملکرد برتر جداسازی آن‌ها باشد. این ویژگی‌ها به‌طور واضح برای تصفیه جریان‌های پساب روغنی جالب‌توجه است [۳۳، ۶۵].

۷-۴- کاربردهای فیلترهای الکتروریسی شده در جداسازی روغن و آب

مواد مرطوب‌کننده ویژه؛ به عنوان مثال، شبکه‌های فلزی و پارچه‌ها (منسوجات)، همان‌طور که پیش‌تر معرفی شد، عملکردهای جذاب خود را در جداسازی روغن و آب نشان داده‌اند؛ با این حال، لازم به ذکر است که این مواد بیشتر در جداسازی مخلوط‌های آب و روغن لایه دار استفاده می‌شوند و آن‌ها نمی‌توانند امولسیون‌های روغن و آب را به‌طور مؤثری از هم جدا کنند؛ این به دلیل بزرگ بودن اندازه منافذ آن‌ها می‌باشد که معمولاً بزرگ‌تر از قطرات روغن و آب امولسیون شده است. اخیراً توجه زیادی به نانوالیاف الکتروریسی شده برای جداسازی روغن از آب شده است که دلیل آن کوچک‌تر شدن منافذ آن‌ها، مساحت سطحی بالاتر، ساختار بسیار متخلخل و بازدهی جداسازی قابل توجه آن‌ها می‌باشد؛ با این حال، برای اطمینان از یک فرایند جداسازی کارآمد روغن و آب، انتخاب یک حامل جداسازی مناسب (فیلتر یا غشا) ضروری است. در این راستا، فیلترهای الکتروریسی شده برای تصفیه پیشنهادی، یعنی جداسازی روغن و آب را می‌توان به دو گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: فیلترهای یکپارچه^۱ و غشاها. برای فیلترها و غشاها، تعدادی عوامل کلیدی مربوط به عملکرد آن‌ها وجود دارد. این عوامل در برگیرنده اندازه و توزیع منافذ، تخلخل، انرژی سطح، سازگاری شیمیایی و ریخت‌شناسی سطحی و مشخصات مکان‌شناسی می‌باشد اما محدود به آن‌ها نیست.

۷-۴-۱- فیلترهای الکتروریسی شده، تصفیه یکپارچه

وقتی که دو مایع غیرقابل امتزاج هستند، مانند روغن و آب، می‌توانند امولسیون تشکیل دهند [۶۶]. در مخلوط حاصل، مایع پراکنده، قطراتی را در فاز مداوم، یعنی روغن در آب یا بر عکس شکل می‌دهد [۶۷]. امولسیون‌ها را می‌توان به امولسیون‌های اولیه و ثانویه طبقه‌بندی کرد. قطرات پراکنده اولیه به‌طور معمول قطره‌ای بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرومتر دارند، در حالی که در امولسیون ثانویه، قطر قطره معمولاً کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است [۶۸]. هر دو نوع امولسیون مخصوصاً نوع دوم، به دلیل پایداری و دشواری جداسازی از طریق روش‌های متداول برای صنایع مختلف به‌خصوص در صنعت پتروشیمی دارای چالش‌های جدی هستند (به جدول ۱-۷ مراجعه کنید).

^۱. coalescing filters

انعقاد مایع - مایع برای شتاب بخشیدن به ادغام قطرات ریز روغن و آب به تشکیل تعداد کمتری از قطرات اما با قطر بزرگتر استفاده می‌شود. ساکن کردن قطرات بزرگتر در پایین دست از سیستم ادغام به زمان اقامت بسیار کمتری نیاز دارد؛ درنتیجه، می‌تواند منجر به نیاز کمتر به فولاد، اندازه تجهیزات کوچکتر و فرایند تصفیه سریع‌تر و مقوون به صرفه تر تبدیل شود. انعقاد یک روش کار سه مرحله‌ای را نشان می‌شود: (۱) تجمعیع قطرات مجزا، (۲) ترکیب چند قطره کوچک به قطرات بزرگتر و (۳) بالا آمدن قطرات بزرگ‌شده توسط نیروی جاذبه برای ساختن یک لایه روغن [۶۹]. [۷۰]

بنابراین، عملکرد تصفیه یکپارچه بستگی به عوامل مختلف از قبیل نرخ جریان خوراک، اندازه و توزیع قطرات روغن، عمق بستر فیلتر و خصوصیات سطحی مواد فیلتری دارد [۷۱]. فیلترهای متخلخل الیافی، مزیت بهره‌وری تصفیه بالا را در مصرف و هزینه انرژی منطقی، ایجاد می‌کند. به‌طور معمول، الیاف میکرو شیشه بیشتر برای تصفیه یکپارچه آب و روغن استفاده می‌شوند [۷۲]. با این حال، به دلیل اندازه زیر میکرون الیاف شیشه، این فیلترها نمی‌توانند قطرات روغن با اندازه زیر ۵۰ میکرومتر را ادغام کنند [۷۳].

به تازگی^۱، نانو الیاف الکتروریسی شده برای تقویت جداسازی روغن و آب از سیستم‌های تصفیه جمع شده استفاده شده است. جدول ۷-۴ برخی از کارهای پژوهشی از فیلترهای نانولیفی الکتروریسی شده برای تصفیه یکپارچه روغن و آب را گزارش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در مورد فیلترهای یکپارچه از نانوالیاف پلی استایرن الکتروریسی شده برای بهبود بازدهی جداسازی روغن و آب استفاده شده است؛ این به دلیل ویژگی‌های عالی آن، مانند آب‌گریزی قابل توجه و عملکرد مناسب برای کاربرد پیشنهادی است [۷۴]. فیلترهای پلی استایرن به راحتی مایعات با کشش سطح پایین مانند روغن معدنی، روغن خوراکی، بنزین و دیزل را از آب جدا می‌کنند؛ این فیلترها توانایی جداسازی روغن و آب را حتی در یک مرحله از تصفیه فقط چند دقیقه‌ای، نشان داده‌اند؛ علاوه بر این، آب‌گریزی عالی حتی پس از چندین چرخه تصفیه روغن و آب، یکی دیگر از ویژگی‌های جالب پلی استایرن است. این حقایق می‌توانند کاربرد فیلترهای پلی استایرن را برای حذف بسیاری از انواع حللهای آلی و روغن در مقیاس صنعتی تأیید کنند.

آزمایشات نشان داده است که افزودن مقدار کمی از نانوالیاف پلی استایرن، بازده ادغامی فیلترها را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد [۷۵]. به‌هرحال، ذکر این نکته ضروری است که این عمل سبب افت فشار فیلتر می‌شود؛ بنابراین، مقدار بهینه‌ای از نانوالیاف باید به زمینه تصفیه یکپارچه به‌منظور جداسازی روغن و آب اضافه شود [۷۶]. این تعادل باید بین بهبود مطلوب در بازدهی یکپارچه و افزایش نامطلوب افت فشار به وجود آید [۷۷].

۴-۷-۲- غشاهاي الکتروریسي شده

در تصفیه یکپارچه، همان‌طور که اشاره شد، هر دو جزء آب-روغن از فیلتر عبور می‌کنند؛ همین‌طور، نقش فیلتر این است که ضمن جمع کردن و بزرگتر کردن قطره‌ها، جداسازی مناسب را فراهم کند [۸۱]، از طرف دیگر، در تصفیه غشایی، فقط یک فاز بسته به آب‌گریزی یا خواص روغن دوستی غشا می‌توانند از غشا عبور کنند [۱۷].

اکثر غشاهاي متداول مورداستفاده با ساختار دوبعدی برای جداسازی آب و روغن، توسط تفاوت فشار هیدرو استاتیک به منظور ایجاد نیروی محرکه مانند فرایندهای غشایی با نیروی پیشران فشار به کار گرفته می‌شوند (جدول ۵-۷ را ببینید). به طریق مشابه، غشاهاي جداسازی الکتروریسي شده آب و روغن می‌توانند به عنوان غشاهاي با نیروی پیشران فشار طبقه‌بندی شوند اگرچه فشار عملیاتی کمتری دارند ($0.1\text{-}0.3 \text{ bar}$). ذکر این نکته مهم می‌باشد که این نانو الیاف غشایی، بر اساس اندازه حفره آن‌ها ($0.1\text{-}5 \mu\text{m}$) در محدوده فرایند میکرو فیلتراسیون استفاده می‌شوند [۸۵]؛ به عبارت دیگر، اندازه بزرگ حفره‌هاي غشاهاي الکتروریسي شده آن را برای اهداف تصفیه زیر محدوده میکرو فیلتراسیون مانند الترا فیلتراسیون نامناسب می‌کند. اگرچه، در فرایندهای الترا فیلتراسیون و نانو فیلتراسیون که اکثراً برای تصفیه آب و پساب استفاده می‌شوند، غشاهاي الکتروریسي شده معمولاً به عنوان لایه پشتیبان برای حائل گزینش پذیر استفاده می‌شوند [۸۶].

همانند شبکه‌های جداسازی آب و روغن، غشاهاي الکتروریسي شده می‌توانند بر اساس انرژی سطحی غشا به عنوان غشاهاي آب‌گریز، روغن دوست و برعکس طبقه‌بندی شود. جدول ۶-۷ کارهای اخیراً منتشرشده درباره تولید غشاهاي الکتروریسي شده برای جداسازی روغن و آب را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. پلیمرهای مختلفی برای تولید غشاهاي میکرو فیلتراسیون به خصوص برای جداسازی آب و روغن استفاده شده‌اند. اگرچه، اکثر این کارها روی پلیمرهای آب دوست تمرکز کرده‌اند [۹۲]؛ این امر به دلیل تمايل بسیار شدید گرفتگی برای غشاهاي آب‌گریز و روغن دوست می‌باشد که ناشی از گرانیروی بالای روغن و منافذ کوچک در ساختار غشا است؛ درنتیجه، برای غشاهاي پلیمری الکتروریسي شده، پلیمرهایی موردنیازند که از نوع حذف کننده آب باشند. غشاهاي نانولیفی آب‌گریز و روغن دوست معمولاً توسط الکتروریسي یک پلیمر آب‌گریز مانند PVDF و همین‌طور پوشش اضافی لایه دومی که یک پلیمر یا گروه شیمیایی آب دوست است، تشکیل می‌شود [۹۳]؛ به هر حال، اخیراً، استفاده از غشاهاي آب‌گریز و روغن دوست در حال تحقیق و مطالعه می‌باشد [۹۴]. همین‌طور، غشاهاي الکتروریسي شده واکنشی و یا قابل تغییر نیز هم‌چنین برای تصفیه پساب‌های روغنی استفاده شده‌اند [۹۵، ۹۶].

جدول ۷-۴- خلاصه‌ای از کارهای انجام شده بر روی تصفیه یکپارچه از جریان‌های آب و روغن با استفاده از فیلترهای الکتروریسی شده

مرجع	هدف جداسازی	ویژگی‌های الیاف	فرایند الکتروریسی	زوج پلیمر-حلال
[۷۴]	تصفیه پساب روغنی	- قبل از فرایند حرارتی: میانگین قطر الیاف: $0.412\mu\text{m}$ زیری: 290 nm زاویه تماس: خ 135° - پس از فرایند حرارتی: میانگین قطر الیاف: $0.456\mu\text{m}$ زیری: 230 nm زاویه تماس: خ 156°	- قدرت اختلاف پتانسیل: 18 kV - قطر نوک نازل: ۱۸ واحد - فاصله جمع کننده تا سوزن: 17 cm - نرخ جریان: 1 ml/min - زمان الکتروریسی: 30 دقیقه - دما: 25°C - رطوبت: 20% تا 25% عملیات تکمیلی: فرایند حرارتی با گرمادادن تماسی	پلیمر: پلی استایرن وزن مولکولی 190000 DMA _C : حلال
[۷۵]	جداسازی روغن از آب، بازده جداسازی از 71% به 84% . ارتقا پیدا کرد.	- میانگین قطر الیاف: $25\mu\text{m}$ و 150 nm تخلل فیلترها: $91/6\%$ تا $92/3\%$.	- قدرت اختلاف پتانسیل: 15 kV - قطر نوک نازل: 1 mm - فاصله جمع کننده تا سوزن: 20 cm - نرخ جریان: $3/6\text{ }\mu\text{L/min}$	پلیمر: پلی مت-فنیلن (ایزووفتال آمید) DMA _C : حلال
[۷۶]	جداسازی روغن از آب	جرم فیلتر: $0.92\text{ g} - 0.81\text{ g}$ بازدهی جداسازی: $64-91\%$	- قدرت اختلاف پتانسیل: 20 kV - سوزن: یک پیپت شیشه‌ای - قطر نوک نازل: 1 mm فاصله جمع کننده تا سوزن: 20 cm	پلیمر: پلی استایرن منبسط شده DMA _C : حلال

ادامه جدول ۴-۷ - خلاصه‌ای از کارهای انجام شده بر روی تصفیه یکپارچه از جریان‌های آب و روغن با استفاده از فیلترهای الکتروریسی شده

مرجع	هدف جداسازی	ویژگی‌های الیاف	فرایند الکتروریسی	زوج پلیمر-حلال
[۷۷]	- جداسازی آب - روغن با زده جداسازی از٪ ۶۸ به٪ ۸۸ ارتقا می‌یابد	قطر الیاف: ۶۰۰ nm	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۱۵ kV فاصله جمع کننده تا سوزن: ۲۰ cm	پلیمر: پلی استایرن منبسط شده بازیابی شده حلal: DMAc
[۷۸]	- جداسازی آب - روغن	- قطر متوسط الیاف: ۲۵۰ nm - جرم نانو الیاف: ۰/۰۳۹ g - جرم کلی فیلتر: ۰/۰۰۷ g - ۰/۸۲۵ - ۰/۹۱۳ g	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۲۵-۲۰ kV فاصله جمع کننده تا سوزن: ۲۰ cm نرخ جریان: ۴/۱ μ L/min	پلیمر: نایلون-۶ حلال: اسید فرمیک
[۷۹]	-	قطر الیاف: ۹۰۰-۳۰۰ nm ریخت‌شناسی الیاف: ساختر الیاف دانه‌تسبیحی	قدرت اختلاف پتانسیل: ۲۰ kV فاصله جمع کننده و سوزن: ۲۰ cm	پلیمر: استایروفوم حلال: لیمونن

ادامه جدول ۴-۷- خلاصه‌ای از کارهای انجام شده بر روی تصفیه یکپارچه از جریان‌های آب و روغن با استفاده از فیلترهای الکتروریسی شده

مرجع	هدف جداسازی	ویژگی‌های الیاف	فرایند الکتروریسی	زوج پلیمر-حلال
[۸۰]	جداسازی آب از روغن	قطر میانگین الیاف: PAN: ۵۰ nm نایلون: ۲۵۰ nm پلی آمید: ۱۵۰ nm سطح مخصوص ($m^2.g^{-1}$): ۱/۲۱ PAN نایلون: ۱۴/۳ پلی آمید: ۲۲/۶ زاویه تماس (آب) PAN: ۳۸/۶ خ نایلون: ۴۶/۴ خ پلی آمید: خ ۵۲/۱	قدرت اختلاف پتانسیل: ۲۰ kV سوزن: هیپودرمیک (مخصوص تزریق) جمع کننده: صفحه صاف	پلیمرها: پلی آمید، PAN، نایلون، حلال‌ها: DMF، فرمیک اسید، DMA _C

دی متیل استامید (DMA_C)، دی متیل فرمالدهید (DMF)، پلی اکریلونیتریل (PAN)

۵-۷- بحث و چشم‌انداز آینده

۱-۵-۷- بحث عمومی

ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که برای جداسازی آب و روغن توسط فیلتر، هرکدام از عناصر تصفیه مانند مش فلزی، پارچه، فیلتر یکپارچه و غشای الکتروریسی شده، چندین مزیت منحصر به فرد را پیشنهاد می‌کنند؛ بنابراین، عامل فیلتر مناسب باید شامل نیازهای اساسی فرایند تصفیه باشد؛ از این‌رو، طبق جدول ۷-۷ معیارهایی باید برای جداسازی مؤثر و انتخابی آب و روغن مورد توجه قرار گیرد. اکثر تلاش‌ها برای آماده‌سازی فیلترهای الکتروریسی شده، متمرکز بر روی فیلترهای فوق العاده آب‌دوست می‌باشد؛ درواقع این توجه به دلیل تمايل پایین این نوع از فیلترها به گرفتگی می‌باشد. اگرچه، فشار عملیاتی کمتر، اکثر آن‌زدیک به فشار اتمسفر، به دلیل نیروی پیشران جاذبه دیگر مزیت این نوع از فیلترها می‌باشد؛ از طرف دیگر، تشکیل نانو ساختار بر روی یک شبکه آب‌گریز و یا اصلاح سطح برای ساختن غشاها الکتروریسی شده فوق العاده آب‌گریز و یا فوق العاده آب‌دوست اخیراً مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه خیلی از محققان استفاده از این راهبرد را برای جداسازی روغن و آب تأیید کردند، اما هنوز چندین عیب عمدی استفاده از آن‌ها را محدود کرده

است؛ به عنوان مثال، فیلترهای الکتروریسی شده فوق العاده آب گریز نمی‌توانند تحت نیروی پیشran جاذبه مورداستفاده قرار گیرند [۹۷]؛ به این معنی که از پمپ برای سیستم استفاده شود یعنی هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر. اگرچه به دلیل چگالی کمتر روغن تمایل به گرفتگی در این مورد بیشتر است.

جدول ۷-۵- بررسی اجمالی از فرایندهای غشایی توسط نیروی پیشran فشار

مرجع	فشار عملیاتی (bar)	محدوده جداسازی	هنده غشا	مواد غشا	فرایند
[۸۲]	۰/۵ - ۵	- امولسیون‌ها - ذرات معلق	- صفحه صاف - جریان موبینه (یک یا چند کanalی) - الیاف توخالی	PTFE MCE CA PP PE PES PS PVDF	میکروفیلتراسیون
[۸۳]	۸-۳	مولکول‌های خیلی بزرگ	- صفحه صاف - جریان موبینه (یک یا چند کanalی) - الیاف توخالی	CA PES PSf PVDF	الترافیلتراسیون
[۶۴]	۱۵-۱۰	نمک‌های دوظرفیتی	- صفحه صاف - جریان موبینه (یک یا چند کanalی) - الیاف توخالی - مارپیچی	CA PES PSf PVDF	نانوفیلتراسیون
[۸۴]	۲۵-۱۵	نمک‌های تک‌ظرفیتی	- صفحه صاف - مارپیچی	CA PES PSf	اسمز معکوس

۷-۵-۲- اصلاح فیلترهای الکتروریسی شده

اگرچه فیلترهای الکتروریسی شده در کاربردهای مختلف مانند تصفیه آب و تصفیه پساب‌های روغنی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند، چندین عیب عمده مانند گرفتگی غشایی در آن‌ها وجود دارد [۹۸، ۹۹]. در نتیجه، تلاش‌های اخیر بر پایه استفاده از مواد فیلتری جدید با رفتار مرتبط شوندگی خاص و ساختار اصلاح شده است که گرفتگی غشا را به حداقل برسانند و همین‌طور سبب افزایش شارعبوری از آن‌ها شوند. یکی از روش‌های رایج، اصلاح پلیمرهای رایج برای فیلترهای الکتروریسی شده است.

به‌طور کلی سه روش اصلاح فیلترهای الکتروریسی شده وجود دارند که شامل اصلاح توده‌ای پلیمرها، اصلاح سطحی فیلترهای الکتروریسی شده و مخلوط کردن می‌باشند، البته مخلوط کردن یکی از شاخه‌های اصلاح سطح است (جدول ۷-۳ را ببینید). روش‌های اصلاح، فرصت یافتن یک مصالحه بین فوق‌العاده آب‌گریز بودن (فوق‌العاده روغن دوستی) و فوق‌العاده آب‌دوستی (فوق‌العاده روغن گریزی) را می‌دهد. اگرچه، می‌توان گروههای آب‌گریز و آب‌دوست را روی سطح الیاف مستقر کرد که در نتیجه سبب کاهش گرفتگی و افزایش شارعبوری از الیاف می‌شوند؛ بنابراین، اصلاح الیاف غشایی می‌تواند خواص آن را بهبود دهد. این اصلاحات که موجب افزایش خاصیت فوق‌العاده آب‌گریزی و یا فوق‌العاده آب‌دوستی می‌شود توسط روش‌های مختلفی مانند عملیات پلاسمای (شامل اتصال گروههای عاملی به سطح الیاف)، پلیمریزاسیون پیوندی (اتصال مونومرهای آب‌دوست و آب‌گریز به سطح الیاف) و جذب فیزیکی ترکیبات آب‌گریز و آب‌دوست به سطح الیاف غشایی شامل پیوندهای ناشی از نور، اشعه گاما، پیوند ناشی از پرتو الکترونی که مثال‌هایی از اصلاحات شیمیایی سطحی می‌باشند، انجام می‌گیرد؛ علاوه بر روش‌های شیمیایی گفته شده، مخلوط کردن، پوشش دادن سطح و فرایندهای گرمایی شامل روش‌های حرارتی تماسی و غیر تماسی مثال‌هایی از اصلاحات سطحی فیزیکی می‌باشند [۱۰۴-۱۰۰]. با توسعه علم پلیمر و فناوری، چندین روش پلیمریزاسیون از جمله روش پلیمریزاسیون انتقال زنجیره تکه‌تکه شدن اضافی برگشت‌پذیر^۱ [۱۰۵، ۱۰۶]، به عنوان اصلاح فیلترهای الکتروریسی شده، در دست بررسی می‌باشد.

^۱. reversible addition fragmentation chain transfer polymerization

جدول ۶-۷- مثال‌هایی از کارهای اخیر منتشر شده بر روی غشاها میکرو فیلتراسیون جهت جداسازی آب و روغن

مرجع	عملکرد	مشخصات	فرایند الکتروریسی	مواد مورد استفاده
[۶۵]	شار: ۴۸۱۴ LMH/bar عدم پذیرش روغن: >/۹۸ بازیابی شار:٪.۸۵	FE-SEM TEM XRD FTIR AFM DLS (تحلیل اندازه ذرات) آب گریزی زاویه تماس: خ ۷۱-۱۵ تخلخل: ۷۸٪. اندازه حفره: ۱۷۰ nm استحکام: ۲۳/۳ MPa	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۳۰ kV - نرخ جریان: ۰/۱۸ ml/h فاصله سوزن تا جمع: کننده: ۸/۸ cm - رطوبت نسبی: ٪.۲۵	- نایلون ۶ - تتراءتیل ارتوسیلیکات - اتیل الکل (C_2H_5OH) - پلی وینیل استات (جرم مولکولی: ۱۴۰۰۰) - آمونیوم هیدروکسید (NH_4OH) - استون - سدیم دودسیل سولفات - روغن ماشین (٪.۹۰ پایه روغن با ۱۰٪ افزودنی و ۸۸۱/۴ kg/m ³ دانسیته در دمای ۲۰°C - فرمیک اسید - استیک اسید
[۸۷]	شار: ۹۶۰۰ L/m ² .h عدم پذیرش: </۹۹	NMR FTIR TGA FE-SEM آب گریزی فوق العاده آب دوست قطر الیاف: ۷۰۱ nm زاویه تماس: خ ۱۲۱	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۳۰ kV سوزن: واحد (قطر درونی: ۰/۴۱ mm فاصله سوزن تا جمع: کننده: ۱۶ cm نرخ جریان: ۰/۵ ml/h زمان فرایند: الکتروریسی: یک ساعت	- ۲،۶-دی آمینو تربیپتیسن - ۴،۴-(هگزا فلوئورو ایزوپروپیلیدن) دی فتالیک انیدرید - پیریدین - استیک انیدرید - متانول - هگزان - N-متیل پیرولیدون

ادامه جدول ۶-۷- مثال‌هایی از کارهای اخیر منتشر شده بر روی غشاها میکرو فیلتراسیون جهت جداسازی آب و روغن

مراجع	عملکرد	مشخصات	فرایند الکترورسی	مواد مورد استفاده
[۸۸]	شار: ۹۶۰۰ L/m ² .h عدم پذیرش روغن: ۹۹٪/۵۸	هدایت سنجی FE-SEM FTIR BET XPS آب گریزی استحکام فوق العاده آب گریز قطر الیاف: ۵nm ۵۰۰ اندازه حفره: ۰/۳۲µm ضخامت: ۳۰µm	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۳۰kV سوزن: پیپت فاصله سوزن تا جمع ۱۵cm کننده: نرخ جریان: ۱/۰ ml/h زمان فرایند الکترورسی: ۸ ساعت رطوبت نسبی: ۳۵٪	PVDF (جرم مولکولی: ۵۲۰۰۰) - ترا بوتیل آمونیوم کلراید - پلی اتیلن پلی آمید - اکریلیک اسید - پتانسیم پروکسودی سولفات ۲،۱-دی کلرواتان دی یدو متان هگزان
[۸۹]	شار: ۳۵۰۰ LMH عدم پذیرش روغن:٪ ۹۹	AFM FTIR XPS SEM TEM آب گریزی فوق العاده آبدوست	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۱۵kV نرخ جریان: ۱ml/h	- پلی اکریلونیتریل (جرم مولکولی: ۱۵۰۰۰) - گرافن اکسید DMF NaOH HCl
[۹۰]	شار: ۱۰۰۰۰ LMH عدم پذیرش روغن:٪ ۹۸	ATR-FTIR SEM AFM آب گریزی فوق العاده آبدوست قطر الیاف: ۰/۵ - ۰/۹µm	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۱۵kV پتانسیل پایین: -۱/۵kV فاصله سوزن تا جمع کننده: ۱۵ cm نرخ جریان: ۱mL/h رطوبت: ۳۵٪	- پلی اکریلونیتریل (جرم مولکولی: ۱۵۰۰۰) DMF - گرافیت - فسفر پنتا اکسید (P ₂ O ₅) پتانسیم پر سولفات (K ₂ S ₂ O ₈) سولفوریک اسید (H ₂ SO ₄) دی اتیلن تری آمین (DETA)

ادامه جدول ۶-۷- مثال‌هایی از کارهای اخیر منتشر شده بر روی غشاها میکرو فیلتراسیون جهت جداسازی آب و روغن

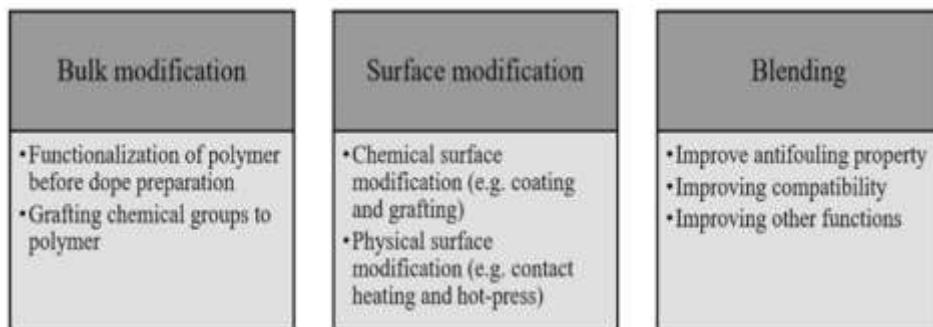
مرجع	عملکرد	مشخصات	فرایند الکتروریسی	مواد مورد استفاده
[۹۱]	شار: ۹۰۰ LMH عدم پذیرش روغن:٪۹۹	SEM اندازه ذرات آب گریزی اندازه حفره: ۰.۳µm استحکام: MPa ۷/۲	- قدرت اختلاف پتانسیل: ۱۰kV	PVDF - پلی آمید ۶ DMF - فرمیک اسید - روغن سیلیکون - تویین ۸۰ (نام تجاری پلی سوربات)

جدول ۷-۷ - بررسی اجمالی از شاخص‌های مهم فیلترهای گزینشی برای جداسازی آب-روغن

نیازها	توضیح	مزایا و معایب
رفتار فوق العاده مرطوب شوندگی	- فیلتر فوق العاده روغن گریز و فوق العاده آبدوست - فیلترهای فوق العاده آب گریز و فوق العاده روغن دوست - فیلترهای قابل تعویض / پاسخگو	- فیلترهای الکتروریسی شده فوق العاده آبدوست به دلیل عملکرد عالی آنها، بیشترین استفاده از آنها در این زمینه شده است. - فیلترهای الکتروریسی شده قابل تعویض/پاسخگو افق جدیدی را برای جداسازی آب-روغن باز کرده‌اند.
اندازه حفره و توزیع آن	- اندازه حفره باید متناسب با نوع امولسیون آب و روغن باشد. - به عبارت بهتر، باید با اندازه قطره‌های روغن متناسب باشد. - توزیع اندازه حفره باریک برای عملکرد بهینه ضروری می‌باشد.	- شبکه‌های فلزی و پارچه‌ها به دلیل اندازه حفره بزرگ آنها و توزیع اندازه حفره وسیع آنها، به اندازه فیلترهای الکتروریسی مناسب نمی‌باشند.
خاصیت ضد گرفتگی	- این ویژگی به خصوص برای فیلترهای حذف روغن موردنیاز است.	

ادامه جدول ۷-۷ - بررسی اجمالی از شاخص‌های مهم فیلترهای گرینشی برای جداسازی آب-روغن

نیازها	توضیح	مزایا و معایب
استحکام مکانیکی	- این خاصیت برای فیلترهای با عملکرد طولانی مدت موردنیاز است.	- متأسفانه، یکی از مشکلات عمدۀ و مهم فیلترهای الکتروریسی شده، خواص مکانیکی نامناسب آن‌ها می‌باشد.
مشکلات زیست محیطی	- به عنوان یک محصول دوست دار محیط‌زیست، خاصیت بازیابی فیلتر مهم می‌باشد. - از طرف دیگر، آن‌ها می‌توانند در فرایندهای طولانی مدت مورد استفاده قرار گیرند بهشرط این که تحت عملیات تمیز سازی منظم قرار گیرند.	- خوشبختانه، اکثر فیلترهای جداسازی آب-روغن می‌توانند توسط مواد قابل بازیابی سنتز شوند.
هزینه‌های تهییه	- در مقایسه با شبکه‌های فلزی و پارچه‌ها، با مطالعه عملکرد کلی، فیلترهای الکتروریسی شده ارزان‌تر هستند.	



شکل ۷-۳-۷- سه رویکرد عمدۀ از اصلاح فیلترهای الکتروریسی شده

۷-۵-۳- راهبردهای آینده

الیاف الکتروریسی شده مشخصات امیدوارکننده‌ای را نه تنها برای جداسازی آب و روغن بلکه برای فرایندهایی مانند تصفیه آب و نمک‌زدایی آب‌شور از خود نشان داده‌اند. اگرچه، اکثر کارهای انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشند که دلیل آن محدودیت روش الکتروریسی برای تولید در

مقیاس بزرگ از الیاف الکتروریسی شده در مدت زمان کوتاه می‌باشد. یک روش امیدوارکننده که می‌تواند در آینده‌ای نزدیک این محدودیت را به پایان ببرد، روش الکتروریسی به کمک گاز^۱ می‌باشد که به روش الکترودمش نیز شناخته می‌شود.

مراجع

- [1]. Shirazi MMA, Kargari A (2015) A review on applications of membrane distillation (MD) process for wastewater treatment. *J Membr Sci Res* 1:101-112.
- [2]. Fakhru-Razi A, Pendashteh A, Abdullah LC, Awang Biak DR, Madaeni SS, Abidin ZZ (2009) Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *J Hazard Mater* 170:530-551.
- [3]. Kargari A, Shirazi MMA (2014) Applications of membrane separation technology for oil and gas produced water treatment. In: *Advances in petroleum engineering* (vol. 1: Refining). Studium Press LLC, Houston.
- [4]. Diyauddeen BH, Daud WMAW, Aziz ARA (2011) Treatment technologies for petroleum refinery effluents: a review. *Process Saf Environ Prot* 89:95-105.
- [5]. Lin H, Gao W, Meng F, Liao BQ, Leung KT, Zhao L, Chen J, Hong H (2012) Membrane bioreactors for industrial wastewater treatment: a critical review. *Critical Rev Environ Sci Technol* 42:677-740.
- [6]. Gadielli C, Perez-Gonzalez A, Yadav GD, Ortiz I, Ibanez R, Rathod VK, Marathe KV (2014) Pharmaceutical industry wastewater: review of the technologies for water treatment and reuse. *Ind Eng Chem Res* 53:11571-11592.
- [7]. Hassan AN, Nelson BK (2012) Invited review: anaerobic fermentation of dairy food waste-water. *J Dairy Sci* 95:6188-6203.
- [8]. Beyer J, Trannum HC, Bakke T, Hodson PV, Collier TK (2016) Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. *Mar Pollut Bull* 110:28-51.
- [9]. Pezeshki SR, Hester MW, Lin Q, Nyman JA (2000) The effects of oil spill and clean-up on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: a review. *Environ Pollut* 108:129-139.
- [10]. Spaulding ML (2017) State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Mar Pollut Bull* 115:7-19.
- [11]. Yu L, Han M, He F (2013) A review of treating oily wastewater. *Arab J Chem* 10:S1913-S1922. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>.

^۱. Gas-assisted electrospinning

- [12].Zhou YB, Tang XY, Hu XM, Fritschi S, Lu J (2008) Emulsified oily wastewater treatment using a hybrid-modified resin and activated carbon system. *Sep Purif Technol* 63:400–406.
- [13].Jamaly S, Giwa A, Hasan SW (2015) Recent improvements in oily wastewater treatment: progress, challenges, and future opportunities. *J Environ Sci* 37:15–30.
- [14].Emamjomeh MM, Sivakumar M (2009) Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/floatation processes. *J Environ Manag* 90:1663–1679.
- [15].Golestanbagh M, Parvini M, Pendashteh A (2016) Integrated systems for oilfield produced water treatment: the state of the art. *Energy Sources A* 38:3404–3411.
- [16].Moussa DT, El-Naas MH, Nasser M, Al-Marri MJ (2017) A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. *J Environ Manag* 186:24–41.
- [17].Padaki M, Murali RS, Abdullah MS, Misdam N, Moslehyan A, Kassim MA, Hilal N, Ismail AF (2015) Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. *Desalination* 357:197–207.
- [18].Pintor AMA, Vilar VJP, Botelho CMS, Boaventura RAR (2016) Oil and grease removal from wastewaters: sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review. *Chem Eng J* 297:229–255.
- [19].Munirasu S, Haija MA, Banat F (2016) Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment-a review. *Process Saf Environ Prot* 100:183–202.
- [20].Xue Z, Cao Y, Liu N, Feng L, Jiang L (2014) Special wettable materials for oil/water separation. *J Mater Chem A* 2:2445–2460.
- [21].Shirazi MMA, Kargari A, Tabatabaei M (2014a) Evaluation of commercial PTFE membranes in desalination by direct contact membrane distillation. *Chem Eng Process* 76:16–25.
- [22].Ray SS, Chen SS, Li CW, Nguyen NC, Nguyen HT (2016) A comprehensive review: electrospinning technique for fabrication and surface modification of membranes for water treatment application. *RSC Adv* 6:85495–85514.
- [23].Lalia BS, Kochkodan V, Hashaikeh R, Hilal N (2013) A review on membrane fabrication: structure, properties and performance relationship. *Desalination* 326:77–95.
- [24].Ahmed F, Lalia BS, Kochkodan V, Hilal N, Hashaikeh R (2016) Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: a review. *Desalination* 391:1–25.
- [25].Bet-moushoul E, Mansourpanah Y, Farhadi K, Tabatabaei M (2016) TiO₂ nanocomposite based polymeric membranes: a review on performance

- improvement for various applications in chemical engineering processes. *Chem Eng J* 283:29–46.
- [26]. Bet-moushoul E, Mansourpanah Y, Farhadi K, Tabatabaei M (2016) TiO₂ nanocompositebased polymeric membranes: a review on performance improvement for various applications in chemical engineering processes. *Chem Eng J* 283:29–46.
- [27]. Otitoju TA, Amad AL, Ooi BS (2016) Polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for oil rejection from oily wastewater: a performance review. *J Water Process Eng* 14:41–59.
- [28]. Paul M, Jons SD (2016) Chemistry and fabrication of polymeric nanofiltration membranes: a review. *Polymer* 103:417–456.
- [29]. Zheng X, Zhang Z, Yu D, Chen X, Cheng R, Min S, Wang J, Xiao Q, Wang J (2015) Overview of membrane technology applications for industrial wastewater treatment in China to increase water supply. *Resour Conserv Recycl* 105:1–10.
- [30]. Ma Q, Cheng H, Fane AG, Wang R, Zhang H (2016) Recent development of advanced materials with special wettability for selective oil/water separation. *Small* 12:2186–2202.
- [31]. Onda T, Shibuichi S, Satoh N, Tsujii K (1996) Super-water-repellent fractal surfaces. *Langmuir* 12:2125–2127.
- [32]. Öner D, McCarthy TJ (2000) Ultrahydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability. *Langmuir* 16:7777–7782.
- [33]. Ma M, Hill RM (2006) Superhydrophobic surfaces. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 11:193–202.
- [34]. Shirazi MMA, Kargari A, Bazgir S, Tabatabaei M, Shirazi MJA, Abdullah MS, Matsuura T, Ismail AF (2013) Characterization of electrospun polystyrene membrane for treatment of biodiesel water-washing effluent using atomic force microscopy. *Desalination* 329:1–8.
- [35]. Wu J, Wang N, Wang L, Dong H, Zhao Y, Jiang L (2012) Electrospun porous structure fibrous film with high oil adsorption capacity. *Appl Mater Interfaces* 4:3207–3212.
- [36]. Sarbatly R, Krishnaiah D, Kamin Z (2016) A review of polymer nanofibers by electrospinning and their application in oil-water separation for cleaning up marine oil spills. *Mar Pollut Bull* 106:8–18.
- [37]. Rohrbach K, Li Y, Zhu H, Liu Z, Dai J, Andreasen J, Hu L (2014) A cellulose based hydrophilic, oleophobic hydrated filter for water/oil separation. *Chem Commun* 50:13296–13299.
- [38]. Yang J, Zhang Z, Xu X, Zhu X, Men X, Zhou X (2012) Superhydrophilic-superhydrophobic coatings. *J Mater Chem* 22:2834–2837.
- [39]. Liu K, Jiang L (2011) Metallic surfaces with special wettability. *Nanoscale* 3:825–838. Feng L, Zhang Z, Mai Z, Ma Y, Liu B, Jiang L, Zhu D

- (2004) A super-hydrophobic and super-oleophilic coating mesh film for the separation of oil and water. *Angew Chem Int Ed* 43:2012–2014.
- [40]. Wang F, Lei S, Li C, Ou J, Xue M, Li W (2014) Superhydrophobic Cu mesh combined with a superoleophilic polyurethane sponge for oil spill adsorption and collection. *Ind Eng Chem Res* 53:7141–7148.
- [41]. Yang J, Tang Y, Xu J, Chen B, Tang H, Li C (2015) Durable superhydrophobic/superoleophilic epoxy/attapulgite nanocomposite coatings for oil/water separation. *Surf Coat Technol* 272:285–290.
- [42]. Lee CH, Johnson N, Drelich J, Yap YK (2011) The performance of superhydrophobic and superoleophilic carbon nanotube meshes in water-oil filtration. *Carbon* 49:669–676.
- [43]. Zhang F, Zhang WB, Shi Z, Wang D, Jin J, Jiang L (2013) Nanowire-haired inorganic membranes with superhydrophilicity and underwater ultralow adhesive superoleophobicity for high-efficiency oil/water separation. *Adv Mater* 25:4192–4198.
- [44]. Liu N, Chen Y, Lu F, Cao Y, Xue Z, Li K, Feng L, Wei Y (2013) Straightforward oxidation of a copper substrate produces an underwater superoleophobic mesh for oil/water separation. *ChemPhysChem* 14:3489–3494.
- [45]. Wang B, Guo Z (2013) pH-responsive bidirectional oil-water separation material. *Chem Commun* 49:9416–9418.
- [46]. Wang B, Li J, Wang G, Liang W, Zhang Y, Shi L, Guo Z, Liu W (2013) Methodology for robust superhydrophobic fabrics and sponges from in situ growth of transition metal/metal oxide nanocrystals with thiol modification and their applications in oil/water separation. *ACS Appl Mater Interfaces* 5:1823–1839.
- [47]. Zhou X, Zhang Z, Xu X, Guo F, Zhu X, Men X, Ge B (2013) Robust and durable superhydrophobic cotton fabrics for oil/water separation. *ACS Appl Mater Interfaces* 5:7208–7214.
- [48]. Gupta RK, Dunderdale GJ, England MW, Hozumi A (2017) Oil/water separation techniques: a review of recent progresses and future directions. *J Mater Chem A* 5:16025–16058. <https://doi.org/10.1039/C7TA02070H>.
- [49]. Ramakrishna S, Shirazi MMA (2015) Electrospun membranes: next generation membranes for desalination and water/wastewater treatment. *J Membr Sci Res* 1:46–47.
- [50]. Shirazi MMA, Kargari A, Ramakrishna S, Doyle J, Rajendarian M, Babu PR (2017) Electrospun membranes for desalination and water/wastewater treatment: a comprehensive review. *J Membr Sci* 3:209–227.
- [51]. Kulkarni A, Bambole VA, Mahanwar PA (2010) Electrospraying of polymers, their modeling and applications. *Polym Plast Technol Eng* 49:427–441.

- [52].Sas I, Gorga R, Joines J, Thoney KA (2012) Literature review on superhydrophobic self- cleaning surfaces produced by electrospinning. *J Polymer Sci B* 50:824–845.
- [53].Tijing LD, Choi JS, Lee S, Kim SH, Shon HK (2014) Recent progress of membrane distillation using electrospun nanofibrous membrane. *J Membr Sci* 453:435–462.
- [54].Konwarch R, Karak N, Misra M (2013) Electrospun cellulose acetate nanofibers: the present status and gamut of biotechnological applications. *Biotechnol Adv* 31:421–437.
- [55].McKee MG, Wilkes GL, Colby RH, Long TE (2004) Correlations of solution rheology with electrospun fiber formation of linear and branched polyesters. *Macromolecules* 37:1760–1767.
- [56].Frenot A, Chronakis IS (2003) Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 8:64–75.
- [57].Kang G, Cao Y (2014) Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes-a review. *J Membr Sci* 463:145–165.
- [58].Su CI, Shih JH, Huang MS, Wang CM, Shih WC, Liu YS (2012) A study of hydrophobic electrospun membrane applied in seawater desalination by membrane distillation. *Fibers Polym* 13:698–702.
- [59].Chen B, Qiu J, Sakai E, Kanazawa N, Liang R, Feng H (2016) Robust and superhydrophobic surface modification by a Li^+ -based + adhesive method: applications in self-cleaning after oil contamination and oil-water separation. *ACS Appl Mater Interfaces* 8:17659–17667.
- [60].Ahmed FE, Lalia BS, Hashaikeh R (2017) Membrane-based detection of wetting phenomenon in direct contact membrane distillation. *J Membr Sci* 535:89–93.
- [61].Mirtalebi E, Shirazi MMA, Kargari A, Tabatabaei M, Ramakrishna S (2014) Assessment of atomic force and scanning electron microscopes for characterization of commercial and electrospun nylon membranes for coke removal from wastewater. *Desalin Water Treat* 52:6611–6619.
- [62].Ahmed FE, Lalia BS, Hashaikeh R (2015) A review on electrospinning for membrane fabrication: challenges and applications. *Desalination* 356:15–30.
- [63].Eykens L, De Sitter K, Dotremond C, Pinoy L, Van der Bruggen B (2017) Membrane synthesis for membrane distillation: a review. *Sep Purif Technol* 182:36–51AAQ.
- [64].Mohammad AW, Teow YH, Ang WL, Chung YT, Oatley-Radcliffe DL, Hilal N (2015) Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects. *Desalination* 356:226–254.
- [65].Islam MS, McCutcheon JR, Rahaman MS (2017) A high flux polyvinyl acetate-coated electrospun nylon 6/SiO₂ composite microfiltration

- membrane for the separation of oil-in-water emulsion with improved antifouling performance. *J Membr Sci* 537:297–309.
- [66].Ashrafizadeh SN, Motaei E, Hoshaygar V (2012) Emulsification of heavy crude oil in water by natural surfactants. *J Pet Sci Eng* 86:137–143.
- [67].Eow JS, Ghadiri M (2002) Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chem Eng J* 85:357–368
- [68].Hakansson A (2016) Experimental methods for measuring coalescence during emulsification-a critical review. *J Food Eng* 178:47–59.
- [69].ACS Report, Liquid-liquid coalescence design manual, ACS Industries LP, USA (Report code: 800-231-007) (<http://people.clarkson.edu/~wwilcox/Design/coalesc.pdf>).
- [70].Li J, Gu Y (2005) Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. *Sep Purif Technol* 42:1–13.
- [71].Sokolovic RMS, Govendarica DD, Sokolovic DS (2010) Separation of oil-in-water emulsion using two coalescers of different geometry. *J Hazard Mater* 175:1001–1006.
- [72].Sokolovic RMS, Vulic TJ, Sokolovic SM (2007) Effect of length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion. *Sep Purif Technol* 56:79–84.
- [73].Hong A, Fane AG, Burford R (2003) Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions. *J Membr Sci* 222:19–39.
- [74].Shirazi MJA, Bazgir S, Shirazi MMA, Ramakrishna S (2013b) Coalescing filtration of oily wastewaters: characterization and application of thermal treated, electrospun polystyrene filters. *Desalin Water Treat* 51:5974–5986.
- [75].Shin C, Chase GG (2006) Separation of water-in-oil emulsions using glass fiber media augmented with polymer nanofibers. *J Dispers Sci Technol* 27:517–522.
- [76].Shin C (2006) Filtration application from recycled expanded polystyrene. *J Colloid Interface Sci* 302:267–271.
- [77].Shin C, Chase GG, Reneker DH (2005a) Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 262:211–215.
- [78].Shin C, Chase GG, Reneker DH (2005b) The effect of nanofibers on liquid-liquid coalescence filter performance. *AICHE J* 51:3109–3113.
- [79].Shin C, Chase GG (2005) Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. *Polym Bull* 55:209–215.
- [80].Shin C, Chase GG (2004) Water-in-oil coalescence in micro-nanofiber composite filters. *AICHE J* 50:343–350.
- [81].Shirazi MJA, Bazgir S, Shirazi MMA (2014b) Edible oil mill effluent; a low-cost source for economizing biodiesel production: electrospun nanofibrous coalescing filtration approach. *Biofuel Res J* 1:39–42.

- [82].Rad SN, Shirazi MMA, Kargari A, Marzban R (2016) Application of membrane separation technology in downstream processing of *Bacillus thuringiensis* biopesticide: a review. *J Membr Sci Res* 2:66–77.
- [83].Shi X, Tal G, Hankins NP, Gitis V (2014) Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: a review. *J Water Process Eng* 1:121–138.
- [84].Khulbe KC, Matsuura T (2017) Recent progresses in preparation and characterization of RO membranes. *J Membr Sci Res* 3:174–186. <https://doi.org/10.22079/jmsr.2016.22147>.
- [85].Barhate RS, Ramakrishna S (2007) Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials. *J Membr Sci* 296:1–8.
- [86].Sundarraj S, Ramakrishna S (2013) New directions in nanofiltration applications—are nano-fibers the right materials as membranes in desalination? *Desalination* 308:198–208.
- [87].Zhai TL, Du Q, Xu S, Wang Y, Zhang C (2017) Electrospun nanofibrous membrane of porous fluorine-containing triptycene-based polyimides for oil/water separation. *RCS Adv* 7:22548–22552.
- [88].Cheng B, Li Z, Li Q, Ju J, Kang W, Naebe M (2017) Development of smart poly(vinylidene fluoride)-graft-poly(acrylic acid) tree-like nanofiber membrane for pH-responsive oil/water separation. *J Membr Sci* 534:1–8.
- [89].Zhang J, Pan X, Xue Q, He D, Zhu L, Guo Q (2017a) Antifouling hydrolyzed polyacrylonitrile/graphene oxide membrane with spindle-knotted structure for highly effective separation of oil-water emulsion. *J Membr Sci* 532:38–46.
- [90].Zhang J, Xue Q, Pan X, Jin Y, Lu W, Ding D (2017b) Graphene oxide/polyacrylonitrile fiber hierarchical-structured membrane for ultrafast microfiltration of oil-water emulsion. *Chem Eng J* 307:643–649.
- [91].Lv R, Yin M, Zheng W, Na B, Wang B (2017) Poly(vinylidene fluoride) fibrous membranes doped with polyamide 6 for highly efficient separation of a stable oil/water emulsion. *J Appl Polym Sci* 134:44980–44985.
- [92].Obaid M, Barakat NAMAA, Khalil KA (2015) Effective and reusable oil/water separation membranes based on modified polysulfone electrospun nanofiber mats. *Chem Eng J* 259:449–456.
- [93].Yuan T, Meng J, Hao T, Wang Z, Zhang Y (2015) A scalable method toward superhydrophilic and underwater superoleophobic PVDF membranes for effective oil/water emulsion separation. *ACS Appl Mater Interfaces* 7:14896–14904.
- [94].Zhou Z, Wu XF (2015) Electrospinning superhydrophobic-superoleophilic fibrous PVDF membranes for high-efficiency water-oil separation. *Mater Lett* 160:423–427.
- [95].Che H, Huo M, Peng L, Fang T, Liu N, Feng L, Wei Y, Yuan J (2015) CO₂-responsive nano-fibrous membranes with switchable oil/water wettability. *Angew Chem* 127:9062–9066.

- [96].Li JJ, Zhu LT, Luo ZH (2016) Electrospun fibrous membrane with enhanced switchable oil/ water wettability for oily water separation. *Chem Eng J* 287:474-481.
- [97].Viswanadam G, Chase GG (2013) Water-diesel secondary dispersion separation using super- hydrophobic tubes of nanofibers. *Sep Purif Technol* 104:81-88.
- [98].Gao W, Liang H, Ma J, Han M, Chen ZL, Han ZS, Li GB (2011) Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review. *Desalination* 272:1-8.
- [99].Guo W, Ngo HH, Li J (2012) A mini-review on membrane fouling. *Bioresour Technol* 122:27-34.
- [100].Carlmark A, Larsson E, Malmstrom E (2012) Grafting of cellulose by ring-opening polymerization—a review. *Eur Polym J* 48:1646-1659.
- [101].Hokkanen S, Bhatnagar A, Sillanpaa M (2016) A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water Res* 91:156-173.
- [102].Kang H, Liu R, Huang Y (2015) Graft modification of cellulose: methods, properties and applications. *Polymer* 70:A1-A16.
- [103].Kochkodan V, Hilal N (2015) A comprehensive review on surface modified polymer membranes for biofouling mitigation. *Desalination* 356:187-207.
- [104].Zhao C, Xue J, Ran F, Sun S (2013) Modification of polyethersulfone membranes—a review of methods. *Prog Mater Sci* 58:76-150.
- [105].Khulbe KC, Feng C, Matsuura T (2010) The art of surface modification of synthetic polymeric membranes. *J Appl Polym Sci* 115:855-895.
- [106].Rana D, Matsuura T (2010) Surface modifications for antifouling membranes. *Chem Rev* 110:2448-2471.

فصل هشتم

غشاھای با تمایل ذاتی

برای جذب سلول‌ها و مواد زیستی

رامشکومار سارانیا^۱، راجندیران موروگان^۲، ماناسا هگد^۳، جیمز دویل^۴ و رامش بابو^۵

^۱. Rameshkumar Saranya

^۲. Rajendiran Murugan

^۳. Manasa Hegde

^۴. James Doyle

^۵. Ramesh Babu e-mail: babup@tcd.ie

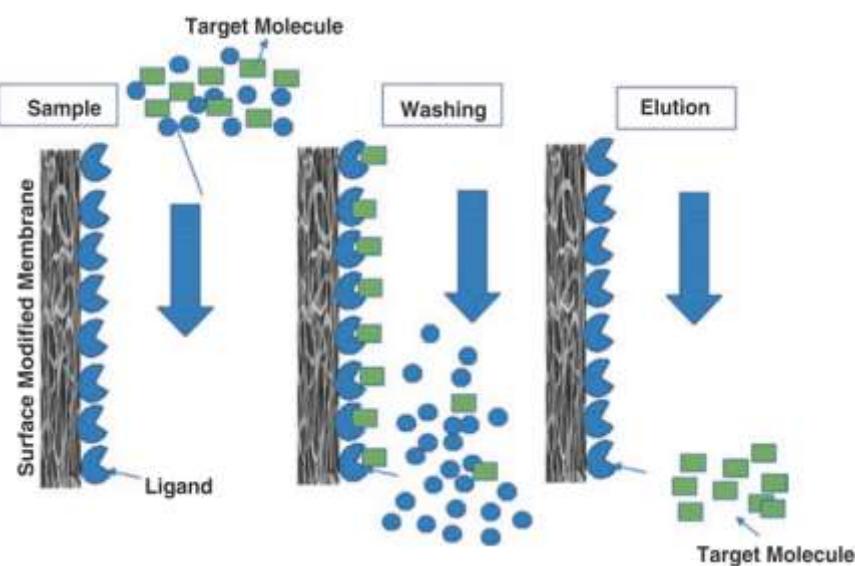
چکیده

رویکردهای اساسی توسعه‌ی غشاهای الکترورسی شده با تمایل ذاتی و کاربرد آن‌ها در جذب سلول‌ها و جداسازی مواد فعال زیستی بحث می‌شوند. اصول پایه‌ای فرایند جداسازی مبتنی بر غشاها با تمایل ذاتی و انواع اصلاحات سطحی مختلف، برای تولید نانوالیاف الکترورسی شده برای تصفیه یا تفکیک مواد زیستی مورد نظر توصیف شده است. پیشرفت‌های مربوط به الکترورسی برای اصلاحات سطحی جدید با تمرکز ویژه در لیگاندهای جفت شده و پلیمرهای نشانده شده بر مولکول موردبخت قرار گرفته است. کاربردهای مربوط به جذب سلول و تصفیه زیست مولکول‌ها با مراجعه به گزارش‌های اخیر در مورد غشاها نانوالیافی الکترورسی شده با تمایل ذاتی برای تصفیه پروتئین و پادتن مختلف، به تفصیل موردنبررسی قرار گرفته است.

۱-۸- مقدمه

غشاء‌های با تمایل ذاتی^۱ به عنوان دسته وسیعی از غشاها شناخته شده‌اند که به صورت گزینشی مولکول‌های هدف را که برای پیشرفت‌های فناوری مانند کروماتوگرافی مایع با بستر ثابت و تصفیه غشایی استفاده می‌شوند، جذب می‌کند. این امر در درجه اول با بی‌حرکت کردن یک مولکول یا لیگاند خاص بر روی سطح غشا حاصل می‌شود [۱، ۲] و به این ترتیب اجازه می‌دهد خالص‌سازی مولکول‌ها بر اساس تفاوت در خصوصیات فیزیکی یا شیمیایی یا عملکردهای زیستی به جای اندازه یا وزن مولکولی خالص شده آن‌ها، انجام شود. لیگاندهای رایج مورد استفاده در غشاها جداسازی با تمایل ذاتی، بسته به نیاز، شامل لیگاندهای رنگزا، لیگاندهای پادتن-پادگن، لیگاندهای تبادل یونی و دیگر لیگاندهای زیستی مانند کتابخانه‌های پروتئین و آنزیم‌ها را شامل شوند. ترکیب بهره‌وری بالا همراه با غشاها و گزینش پذیری برجسته از رزین‌های کروماتوگرافی، باعث شده است که کروماتوگرافی غشاها با تمایل ذاتی امروزه روشی جذاب و رقابتی برای تصفیه پروتئین‌ها یا سایر مولکول‌های زیستی از سیالات زیستی، به حساب آید. [۳-۸]. شکل ۱-۸ طرح‌واره‌ی فرایند جداسازی با تمایل ذاتی برای غشاها معمول را نشان می‌دهد.

^۱. Affinity membranes



شکل ۸-۱- نمایشی از فرایند جداسازی غشاهای با تمایل ذاتی

غشاهای با تمایل ذاتی در درجه اول برای تصفیه پروتئین‌ها و دیگر صورت‌های زیست مولکول از سیالات زیستی پیچیده توسعه داده شده‌اند. این غشاهای ضمن گزینش پذیری برجسته رزین‌های کروماتوگرافی، بر افت فشارهای کاهش‌یافته مرتبط با غشاهای تصفیه، غله می‌کنند [۹، ۱۰].

۲-۸- بررسی اجمالی جداسازی غشای با تمایل ذاتی

روش‌های جداسازی بر پایه غشای با تمایل ذاتی و استفاده از غشاهای الکتروریسی شده به دلیل تطبیق‌پذیری و مزایای هیدرودینامیکی نسبت به مواد و روش‌های مرسوم، در زیست‌فناوری، مواد غذایی و صنایع دارویی به طور فرایندهای متداول شده‌اند. کاربردهای بسیاری برای غشاهای نanolیفی الکتروریسی شده در زمینه تصفیه و بازیابی مواد زیستی وجود دارد. از سال ۲۰۱۰، تعداد گسترده‌ای از نشریات در حال بررسی غشاهای الکتروریسی شده برای کاربردهای تصفیه، همان‌طور که در شکل ۸-۲ نشان داده شده است، می‌باشند. روند مشابهی برای غشاهای الکتروریسی شده با تمایل ذاتی برای جذب سلول و مواد زیستی مشاهده شد، همان‌طور که در حاشیه شکل ۸-۲ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود. بیشتر فعالیت فناوری در زمینه غشای با تمایل ذاتی در چین، جنوب شرقی آسیا، استرالیا، نیوزلند و ایالات متحده آمریکا انجام می‌شود و تقریباً ۸۵٪ از انتشارات از این مناطق جمع‌آوری می‌شوند.

طریقه‌ی عملکرد غشاهای و جذب مبتنی بر تمایل که در اصل برای ویژگی‌های غربالگری انتخابی و جذب مکان خاص کار می‌کنند، مشابه روش‌های استاندارد کروماتوگرافی است: جذب، شستشو و پاکیزه سازی اما با یک مرحله تمیز کردن اضافی. شستشو به‌طورکلی توسط فشار آب معکوس از طریق غشا انجام می‌شود، در حالی که پاکیزه سازی بستگی به نحوه عملکرد دارد:

- ۱- فشار آب از پشت برای گرفتن تعليق‌های بدون ذره استفاده می‌شود
- ۲- تصفیه به‌طرف جلو برای تعليق‌های غنی از ذرات استفاده می‌شود.

منزوی کردن و بازیابی تعداد زیادی از مواد فعال زیستی در غلظت کم اغلب پیچیده است. از آنجاکه خصوصیات عملکردی مواد زیستی به‌طور جدی به ساختار آن‌ها بستگی دارد، تغییرات مجاز با دما، pH، قدرت یونی و حلال مورداستفاده برای فرایند تصفیه بسیار محدود شده است؛ بنابراین حتی روش‌های اساسی مانند تبلور، تبخیر و تهشیینی نیز نمی‌توانند به کار روند زیرا در نهایت ممکن است به دلیل اثر متقابل فیزیکی و شیمیایی در طی فرایند، فعالیت زیستی محصولات را کاهش دهند. برای پاسخگویی به نیاز دقیق برای بازیابی محصولات زیستی با سطح خلوص بالا، فناوری‌های مبتنی بر غشای با تمایل ذاتی در حال تحول هستند.

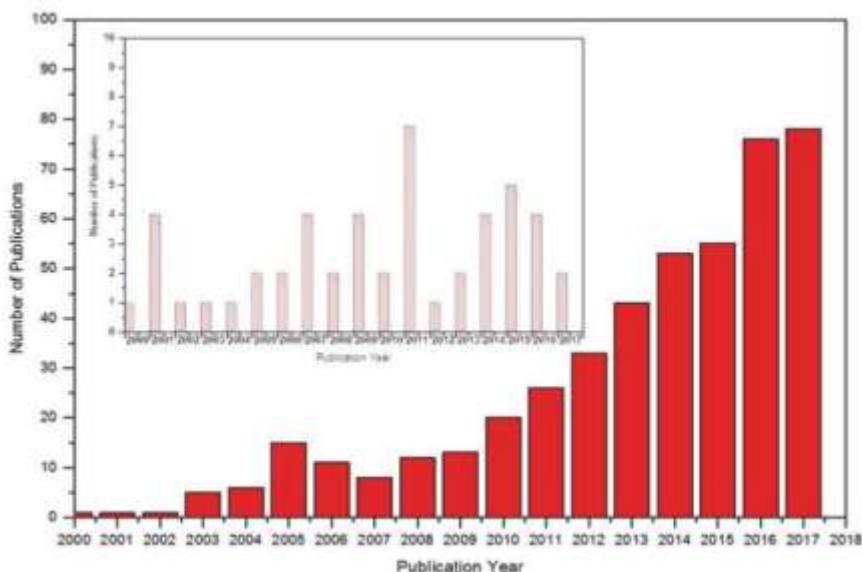
طی چند سال گذشته، پیشرفت‌ها در طراحی غشاهای و در مواد پلیمری جدید برای غشاهای و همچنین تکامل نسل جدید غشاهای الکتروریسی شده مبتنی بر نانوالیاف، باعث شده است تا فناوری‌های غشای با تمایل ذاتی برای جداسازی و تصفیه مواد زیستی جذاب‌تر شود. در جداسازی محصولات با ارزش بالا، جداسازی غشایی غالباً فاقد ویژگی خاص می‌باشد و از این‌رو روش کروماتوگرافی به عنوان روش جایگزین استفاده می‌شود. با استفاده از اصول فعل و انفعالات زیستی، روشی که به آن "کروماتوگرافی با تمایل ذاتی" گفته می‌شود، توسعه‌یافته است که معمولاً مبتنی بر جاذب‌های بستر بسته‌بندی شده است. با این وجود محدودیت‌هایی در رابطه با بسترهای بسته شده وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نرخ جریان کم و انتقال جرم انتشاریافته اشاره کرد که می‌تواند با استفاده از غشاهای پلیمری بر طرف شود. ضرورت شفافیت بالا و بهبود سرعت جریان و انتقال جرم برای جداسازی‌های با دقت بالا، نیاز به ترکیب اصل کروماتوگرافی با تصفیه غشایی را ایجاد کرده است و مفهوم فناوری غشای با تمایل ذاتی را به دنبال داشته است.

۳-۸- الکتروریسی: فناوری تطبیق‌پذیر برای تهیه غشای با تمایل ذاتی

در مقایسه با روش‌های تولید غشا مرسوم، الکتروریسی یکی از متنوع‌ترین روش‌های به وجود آمده در سال‌های اخیر برای تولید غشاهای الیافی ظریف پلیمری برای کاربردهای مختلف از جمله جذب و بازیابی سلول‌ها و ترکیبات زیست فعال به حساب می‌آید [۱۲ و ۱۳].

الکتروریسی یک روش شناخته شده است که یک میدان الکتریکی خارجی بر روی محلول پلیمری یا مذاب پلیمری اعمال می‌شود و منجر به تشکیل الیاف پلیمری می‌شود. روش الکتروریسی امکان تولید حجم بالایی از سازه‌های سبک و بسیار کاربردی مش مانند را فراهم می‌کند. این روش الکتروهیدرودینامیک تطبیق‌پذیر و متنوع محصولاتی با یک ساختار متخلخل کنترل شده را تولید می‌کند که می‌تواند به صورت فیلم، به عنوان یک پوشش یا با ساختار شبکه‌ای چندبعدی (از اندازه میکرو تا نانو) تهیه شود. در ابتدایی ترین شکل خود، فرایند الکتروریسی شامل قرار دادن یک محلول پلیمری در نازل بین دو الکترود است که می‌تواند اختلاف بالقوه بزرگی را ایجاد کند (در محدوده کیلوولت). این ولتاژ بزرگ به صورت الکترواستاتیک محلول پلیمر را به سمت یک هدف متصل شده به زمین در یک جت نازک و مداوم هدایت می‌کند و منجر به تشکیل یک شبکه الیافی می‌شود. با شروع از محلول پلیمری خاص، اندازه منافذ حاصل از آن و توزیع منافذ وب به دست آمده را می‌توان با تغییر دادن عوامل ابزاری مختلف مانند فاصله بین رشته ساز و جمع کننده، ولتاژ، نوع جمع کننده (استاتیک یا چرخش دینامیکی) و نرخ تغذیه جت کنترل کرد؛ علاوه بر بهینه‌سازی عوامل سیستم، پیشرفت در طراحی سیستم الکتروریسی با توان عملیاتی بالاتر همچنان در حال توسعه می‌باشد [۱۹-۲۱].

غشاها الکتروریسی شده به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل زیاد در مقیاس نانو و میکرو و بهم پیوستگی مداوم آن، پتانسیل گستردگی برای مشارکت لیگاندهای مختلف برای ایجاد غشاها با تمایل ذاتی دارند. بسیاری از طراحی‌های نانوالیاف الکتروریسی شده امکان عامل دار کردن آسان سطوح غشا نانولیفی را فراهم می‌کند [۲۰، ۲۱].



شکل ۸-۲- تعداد کارهای انجام شده در سال‌ها اخیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷) مربوط به غشاها الکترونیکی برای تصفیه و قسمت بالای نمودار کارهای صورت گرفته در سال‌های اخیر توسط غشاها با تمایل ذاتی برای تصفیه زیستی

۴-۸- مزایای غشاها الکترونیکی شده با تمایل ذاتی نسبت به روش‌های مرسوم

ظهور فناوری نانو منجر به پیشرفت غیرمنتظره در کاربردهای مختلف بهویژه در زمینه‌های پزشکی و دارویی می‌شود. با الهام از فناوری نانو، ساختارهای غشای با تمایل ذاتی به تازگی در قالب نانوالیاف الکترونیکی شده ارائه شده‌اند که پتانسیل تجاری عظیمی را در بخش زیستی نشان می‌دهند؛ علاوه براین، تولید الیاف دارای نانومواد یا نانوساختارهای وظیفه‌مند شده نیز با پذیرفتن روش الکترونیکی به عنوان روش تهیه امکان‌پذیر است [۲۲، ۲۳].

از مزایای الکترونیکی می‌توان به سنتز الیاف با ریخت‌شناصی کنترل شده، مساحت سطحی افزایش یافته، بازده کپسولی شدن، قابلیت استفاده و قابلیت تولید مجدد محصول نهایی در مقیاس وسیع اشاره کرد [۲۴]. استفاده از الکترونیکی برای دستگاه‌ها و حسگرهای پزشکی مبتنی بر فناوری نانو یک مورد ارجح است و در مقایسه با روش‌های موجود فناوری مبتنی بر حسگر و سیستم‌های پزشکی درمانی، می‌تواند از نظر تجاری، قابل رقابت تلقی شود.

بیشتر فعالیت‌های تحقیقاتی با هدف تولید داربست‌های زیستی و تصفیه بستر / سلول با کمک کاربردهای گستردۀ فناوری الکترونیکی محقق می‌شود [۲۵-۲۷]. ویژگی‌های امیدوارکننده نانوالیاف الکترونیکی شده می‌تواند زمینه رهایش دارو و سایر کاربردهای مهم پزشکی را متحول سازد، بنابراین اصلاحات مطلوب محصولات در خواص فیزیکی، هم‌افزایی مکانیسم رهایش، سازگاری

و موارد دیگر را ممکن سازد [۲۸]. غشاهای نانوالیافی الکتروریسی شده نسبت به سایر غشاهای متداول ارجحیت دارند زیرا به طور هم‌زمان استحکام کافی و پایداری زیست‌مکانیکی برای مقاومت در برابر سایش و پارگی در لبه‌های غشاهای با تمایل ذاتی نانولیفی پیشرفته را نشان می‌دهند. از آنجاکه فرایندهای جداسازی با تمایل ذاتی، شامل زمینه تصفیه می‌شود که می‌تواند دمای شدید، شوک مکانیکی، لرزش، تنش و برش و واکنش‌های مربوط به جریان سیال [۲۹]، پایداری‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی قابل قبول را نمایش دهد که همگی در تعیین بازدهی تصفیه نقش بسزایی دارند.

روش الکتروریسی یک رویکرد مؤثر برای تحقق معیارهای یکپارچگی و پایداری ذکر شده در غشاهای نانوالیافی با تمایل ذاتی است؛ باین حال، شرایط فرایند با توجه به پلیمر، فرایند و عملکرد و شرایط محیط وجود دارد که بر توانایی الکتروریسی در تولید نانوالیاف با عملکرد، پایداری و کارایی لازم تأثیر می‌گذارد. تجاری‌سازی آینده غشاهای با تمایل ذاتی به بهبود مداوم مواد نیاز دارد و تحقیقات بر روی هندسه‌های جدید نانوالیاف الکتروریسی شده (مانند نانوالیاف توخالی، نانو الیاف شبکه‌ای / ورقه‌ای) متمرکز است تا سیستم‌های نسل بعدی را برای زمینه‌هایی مانند ژن درمانی، شیمی درمانی و ایمن درمانی فراهم کند.

۵-۸- الکتروریسی برای تهیه غشای با تمایل ذاتی

با تغییر آگاهانه عوامل الکتروریسی، می‌توان الیاف با ریخت‌شناسی مختلف از سیستم‌های مختلف مانند فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرها تولید کرد؛ همچنین اصلاح مواد اولیه با مشارکت نانومواد جدید، مولکول‌های زیست فعال، لیگاند‌ها و حتی سلول‌های زنده برای تشخیص خاص و نقطه مراقبت‌های درمانی امکان‌پذیر است [۳۰]. آماده‌سازی غشای با تمایل ذاتی مبتنی بر نانوالیاف الکتروریسی شده دارای این مزیت است که الکتروریسی می‌تواند نسبت بالاتری از مساحت سطحی به حجم را ایجاد کند که مطلوب‌ترین ویژگی غشای با تمایل ذاتی ایده آل است.

با توجه به مراحل مختلف تعیین کننده در آماده‌سازی غشای با تمایل ذاتی، بخش‌های زیر در مورد توسعه غشای نانوالیاف پایه توسط الکتروریسی بحث می‌شود. سایر روش‌های فعال‌سازی و غیر فعال‌سازی با روش‌های متداول تهیه غشای با تمایل ذاتی قابل مقایسه هستند.

۵-۱- الکتروریسی نانوالیاف پلیمری

جمع‌آوری شبکه نانوالیاف پلیمری با استفاده از روش الکتروریسی به طور معمول قطر منفذ میکرو و نانومقیاس با تخلخل بالا و بهم‌پیوستگی فضای روزنه‌ای را نشان می‌دهد درنتیجه درنهایت مساحت سطح بزرگتری نسبت به زمینه فیلتری متداول یا الیاف حاصل می‌شود. توسعه نانوالیاف الکتروریسی

شده برای جداسازی مبتنی بر تمایل را می‌توان در پیشینه پژوهش یافت؛ علاوه بر این، مطالعات مربوط به استفاده از غشاها که مولکول‌های لیگاندهای خودآرایی زیستی را بر جسته ماتریس پلیمر، وجود دارد که عملکرد چندگانه و مناسب برای تصفیه زمینه زیستی را کند [۳۱، ۳۷]. غشاها الهام گرفته از طبیعت داروی درمانی را برای نقطه رهایش حمل می‌کند و توانایی پاسخگویی به محرك در نانوالیاف زیستی را فراهم می‌کند که این نیز یکی دیگر از حوزه‌های مورد علاقه تحقیقات نانوالیاف الکتروریسی شده است [۳۲-۳۴]. با این حال، چنین مباحث فراتر از حد و حدود فصل حاضر است.

به طور کلی پلیمرهای توده‌ای شامل پلی‌اتیلن تر فتالات (PET) [۳۵]، پلی‌سولفون (PSF) [۳۶، ۳۹-۳۸]، سلولز [۳۷]، سلولزاستات [۳۸]، پلی‌اکریلونیتریل (PAN) [۳۹، ۴۰] و پلی‌آمید [۴۱، ۴۰] برای تولید مواد غشایی نانولیفی الکتروریسی شده برای ایجاد تمایل به کار می‌روند؛ با این حال، ترکیبات پلیمری به منظور دستیابی به یک اثر هم‌افزایی و تنظیم مؤثر ساختار حفره و مکان‌های اتصال، ترجیح بیشتری داده می‌شوند [۴۲، ۴۳]. در مورد مخلوط کردن یکی یا تعداد بیشتری پلیمر، ماتریس پلیمر توده مسئول ریخت‌شناسی منافذ غشایی است در حالی که برهمنش‌های غیر کووالانسی با استفاده از یک پلیمر عامل شبیه به الگو انجام می‌شود. از این‌رو، آماده‌سازی غشاها با تمایل ذاتی توسط الکتروریسی از دو رویکرد گسترده مبتنی بر: (الف) معروفی لایه‌های وظیفه‌مند اضافی و (ب) معروفی پاسخگویی (توسط خود یا القاشه) استفاده می‌کند. این رویکردها نه تنها در عملکرد سطح بلکه در حفظ ساختار پلیمر توده (نانوالیاف غشایی پایه) به دلیل تعامل غیر کووالانسی با پلیمرهای توده، مؤثر واقع می‌شود [۴۴].

۲-۵-۸- فعال‌سازی و تثبیت

فعال‌سازی الیاف الکتروریسی شده به کمک لیگاندهای مولکولی ویژه و گروه‌های عاملی مناسب انجام می‌گیرد. فعال‌سازی معمولاً به طور کلی اصلاح سطح نانوالیاف می‌باشد که برهمنش‌های با تمایل ذاتی را معرفی می‌کند و همین‌طور خمن فراهم کردن جداسازی موردنیاز، از واکنش‌های مزاحم جلوگیری می‌کند (جذب یا چسبیدن گروه‌های ثانویه) [۴۴].

واکنش یا برهمنش کنترل شده مولکول‌های زیستی یا سل‌ها که می‌توانند از غشا عبور کنند به عنوان عامل کلیدی در جداسازی با تمایل ذاتی عمل می‌کند. اکثر غشاها با تمایل ذاتی بر اساس جداسازی گزینشی سطحی عمل می‌کنند که فعال‌سازی در آن به عنوان یک مرحله مهم تعریف می‌شود. به منظور ارتباط لیگاندهای با تمایل ذاتی در مکان خاص خواه به صورت مستقیم و یا غیرمستقیم به ماتریس غشایی، یک مرحله فعال‌سازی به منظور ثابت نگهداشت خواص عمومی غشا (پایداری و مقاومت مکانیکی) ضروری می‌باشد. چندین واکنش اصلاحی برای دستیابی به

غشاء پلیمری شامل گروههای عاملی متفاوت بررسی شده است [۴۵، ۴۶]. واضح است که واکنشهای فعال سازی برای هر کدام از گروههای عاملی متفاوت می‌باشند؛ به عنوان مثال واکنشهای کاربامیلاسیون و تیوکاربامیلاسیون^۱ برای پلیمرهای شامل گروههای عاملی آمین می‌باشند [۴۷]. اثر مرحله فعال سازی نباید مانع برای تمایل پیوند خاص لیگاندها شود و می‌تواند در حقیقت اصلاح سطح را به منظور تأمین اتصال لیگاند به نانو الیاف پلیمری پشتیبان ممکن سازد.

عملاً، روش فعال سازی از انتقال اجباری در مورد زمینه پلیمری آب دوست پیروی می‌کند که در آن واکنشهای فعال سازی حلالهای غیر قطبی به منظور ارتقای مرتبط شوندگی غشا برای تأمین سازگاری زیستی نانو الیاف پلیمری به کار می‌رود؛ بنابراین این عملیات، سازگاری زیستی نانو الیاف پلیمری را موجب می‌شود. توانایی و دسترسی لیگاند به مواد پلیمری البته می‌تواند به وسیله مولکولهای فاصله گذار ۳ افزایش یابد، به خصوص در مواقعی که جفت شدن مستقیم لیگاند به مواد پلیمری بی‌اثر است. مثلاً هایی از مولکولهای فاصله گذار شامل دی‌آمین‌ها و دی‌هیدرازین‌ها می‌باشند که برهمنشنهای مولکولی بین لیگاندهای ثبت‌شده و مولکولهای هدف را فراهم می‌کنند. این مولکولهای فاصله گذار اکثرًا شامل دو گروه عاملی می‌باشند، از یک طرف با بستر پلیمر و از طرف دیگر با مولکولهای لیگاند برهمنش پیدا می‌کنند [۴۸].

ثبتیت یکی از مراحل مهم مقدماتی می‌باشد که اشاره به اصلاح سطح و یا عامل‌دار کردن می‌کند که محدوده‌ای از جذب منفعل تا پیوندهای کوالانسی پیچیده یا روش‌های اتصال عرضی با استفاده از پلیمرهای فعال شده شیمیایی را شامل می‌شوند. ثبتیت یک روش پیوندی برگشت‌پذیر لیگاندها به یک مولکول یا گروهی از مولکول‌ها، به منظور جداسازی و خالص‌سازی به وسیله واکنشهای با تمایل ذاتی می‌باشد [۴۹]. گزینش لیگاندها نقش اساسی در پایداری و شفافیت غشاهای با تمایل ذاتی و عملکرد جداسازی دارد [۵۰]. چندین گروه از لیگاندها شامل: رنگزاها، آمینواسیدها، پپتیدها، پروتئین‌ها (گیرنده یا پیوندی)، آنزیم‌ها، پادتن‌ها و آنتی‌زن‌ها، کوآنزیم‌ها، رشته‌های RNA و DNA، ویتامین‌ها، نوکلئوتیدها، کی‌لیت‌های فلزی و غیره می‌باشند [۵۱]؛ به طور واضح‌تر، لیگاندها بر اساس جداسازی غشاء با تمایل ذاتی به دو گروه زیستی و سنتزی تقسیم می‌شوند. تفاوت بین این دو دسته از لحاظ مشتق شدن، مزایا و معایب آن‌ها و همین‌طور ویژگی آن‌ها در جدول ۱-۸ آورده شده است.

اگرچه انتخاب لیگاند بر اساس کاربرد و همین‌طور زمینه پلیمری می‌باشد، چندین عامل مانند سمیت، پایداری، هزینه کرد و غیره باید در نظر گرفته شود. انتخاب لیگاند باید بر اساس ظرفیت آن به گزینش پذیری و برگشت‌پذیری پیوندی به ماده زیستی موردنظر صورت پذیرد؛ علاوه بر این،

^۱. Carbamylation and thiocarbamylation

^۲ Spacer molecules

لیگاندهایی که گروههای عاملی اضافی دارند از اهمیت قابل توجهی برخوردار هستند زیرا روش‌های فعال‌سازی را قادر می‌سازد به مواد پشتیبان که نانوالیاف پلیمری گفته می‌شود متصل شوند. همچنین طبقه‌بندی مختلف لیگاندهای سنتزی و زیستی نیز در زیر توضیح داده شده است.

جدول ۱-۸- انواع لیگاندهای تثبیت‌شده بر روی غشاها الکتروریسی شده با تمایل ذاتی

نوع لیگاند	مثال‌ها	روش / منبع	مزایا	معایب
سنتزی	- رنگ‌های ویژه مولکولی پپتیدهای غیرطبیعی	- سنتز دی نوو (De novo) - گزینش منطقی از گروه لیگاندها - اصلاح ساختارهای مولکولی	- ظرفیت بالا - هزینه پایین - پایداری بالا	- سمیت - گزینش پذیری جزئی
زیستی	- پادگن و پادتن‌ها و قطعات RNA و DNA - پروتئین‌های پذیرنده یا پیوندی	- استنتاج طبیعی - تولید خیلی بالا	- هزینه بالا - پایداری پایین	- سمیت کم - گزینش پذیری

۱-۲-۵-۸- نشاندن گروههای عاملی با وضوح پایین

ثبت گروههای عاملی مربوطه بر روی سطوح نانوالیاف از این جهت جالب به نظر می‌رسد که غشای حاصله قابل استفاده در پیوند با تمایل ذاتی می‌باشد. ثبت گروههای عاملی مانند کربوکسیل، آمین، آلکیل، هیدروکسیل، آمیدها، کتون‌ها و یورتان‌ها بر اساس شیمی سطح و همین‌طور تمایل ذاتی شیمیابی در برابر مولکول‌های ویژه می‌باشد؛ به عنوان مثال، اکثر پلی ساکاریدها مانند آلجينات، کیتوسان، آکاروس و سلولز مشخص شده است که توانایی پلیمریزاسیون یونی ذاتی را دارا می‌باشند و می‌توانند توسط روش‌های فراهم‌شده سیانوژن برومید، تری آزین و کربونیل دار شدن اصلاح شوند [۴۶]. اثر پلیمریزاسیون یونی (انقباض)، آلجينات و کیتوسان اساساً برای ثبت و خالص‌سازی آنزیمهای متفاوت استفاده شده است [۵۲]؛ همچنین، چندین پلیمر سنتز شده شامل گروههای سولفون و کربوکسیل برای جذب غیر قطبی معرفی شده‌اند.

نانوالیاف الکتروریسی شده متشکل از پلی استایرن برای محلول‌های بازی و خنثی به عنوان یک گزینه جدی معرفی شده است، همین طور پلی اتر اتر کتون سولفونه شده^۱ (SPEEK) ظرفیت جداسازی ذاتی بالایی برای محلول‌های کاتیونی به دلیل تمایلی که به کاتیون‌های یک ظرفیتی دارد، از خود نشان می‌دهد [۵۳]. به غیراز گروههای عاملی سطحی، شیمی کوئردیناسیون یک رویکرد دیگر برای توسعه غشاها با تمایل ذاتی است؛ این موضوع به دلیل حضور لیگاندها می‌باشد که حتی اگر در فاصله‌های نزدیک از سطح نانوالیاف قرار گیرند، می‌توانند به دلیل برهم‌کنش‌های ویژه‌ای که دارند، منجر به پیوند شوند؛ برای مثال، نانوالیاف الکتروریسی شده کوپلیمر پورفیرین^۲ به طور طبیعی برهم‌کنش‌های کوالانسی ذاتی را تشکیل می‌دهد. [۵۴]. این گونه از نانوالیاف می‌توانند به بازیابی فنولیک‌ها و آروماتیک‌های مطلوب به وسیله برهم‌کنش‌های آتپ کمک کنند. کاربردهای مربوط به جداسازی بر اساس تمایل یون فلزی، استفاده از این چنین برهم‌کنش‌های کوالانسی را برای جداسازی گزینش پذیر پروتئین‌ها آماده کرده است. علاوه بر این، الیاف الکتروریسی شده با فرستندهای تثبیت‌شده نادر بر پایه‌ی زمین نیز می‌توانند برای تشخیص مولکول‌های گازی استفاده شوند. با این حال، این موضوع فراتر از تصفیه سلولی مبتنی بر تمایل و جداسازی زیست مولکول است که بیشتر در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

-۲-۵-۸- تثبیت لیگاندهای با وضوح بالا

- لیگاندهای مصنوعی و شبه زیستی خاص

جداسازی مبتنی بر تمایل با وضوح بالا با استفاده از دو طبقه‌بندی گسترده لیگاندها که در جدول ۱ ذکر شده است انجام می‌شود. بیشتر حسگرهای بر پایه‌ی تمایل، از لیگاندهای مصنوعی به دلیل فواید پایداری بالا و سهولت تثبیت با هزینه‌ی کمتر استفاده می‌کنند. اگرچه، محدودیت‌های مربوط به استفاده از لیگاندهای مصنوعی وجود دارد که می‌توان به سمتی و انتخاب پذیری ضعیف آن‌ها برای اینمنی و سایر کاربردهای تشخیصی اشاره کرد. لیگاندهای زیستی با داشتن توانایی اتصال بسیار خاص به مولکول‌های زیستی مناسب، هنوز اشکالاتی در رابطه با کاربردهای در مقیاس بزرگ و پیچیدگی در تثبیت دارند. لیگاندهای مصنوعی طبقه‌بندی شده تحت عنوان شبه زیستی خاص بر اساس رویکرد الهام از طبیعت ساخته شده‌اند که با استفاده از آن می‌توان زیست مولکول‌های ساده‌تر (مانند اسیدهای آمینه) یا مولکول‌های غیر زیستی (مانند رنگ‌های برچسب زده شده و زنجیره‌های جانبی آب‌گریز) را با استفاده از پایداری شیمیایی و فیزیکی بالاتر برای غشای

¹. sulfonated polyetheretherketone (SPEEK)

². Porphyrin

با تمایل ذاتی با وضوح بالا بر پایه‌ی جداسازی‌های ماده‌ی مورد تجزیه بالا بکار ببرد. رویکرد استفاده از لیگاندهای مصنوعی مبتنی بر ارتباط بین ویژگی‌های ساختاری لیگاند و ماده مورد تجزیه است در حالی که لیگاندهای شبه زیستی خاص گرایش به شbahت‌های خاصی دارند و درنتیجه خاصیت الهام از طبیعت برای کاربردهای زیستی سطح بالا وجود دارد؛ به عنوان مثال، نانوالیاف الکترورسی شده با استفاده از رنگ متداول نساجی سیباکرون آبی و برای جداسازی مبتنی بر تمایل آلومینیم از نمونه‌های خون و همچنین برای تصفیه آنزیم‌های دهیدروژناز به سبب توانایی اتصال خاص آن به مکان مورداستفاده قرار گرفتند [۳۸]؛ این نشان می‌دهد که انتخاب درست رنگ‌های مناسب، جداسازی‌های بسیار کارآمد را امکان‌پذیر می‌کند. رنگ‌های مولکولی خاص معمولاً بهره‌مند از ثبات بهبودیافته با هزینه کم و ضریب اتصال دقیق آن‌ها را به یک راه حل جذاب برای جداسازی تجاری تبدیل می‌کند.

لیگاندهای مصنوعی همچنین شامل کی لیت‌های فلزی ثبت‌شده^۱ (IMC) و آمینواسیدها می‌شوند. جداسازی‌های با تمایل ذاتی بر اساس IMC معمولاً برای شکستن پروتئین استفاده می‌شود. لیگاندهای IMC برای پروتئین‌ها و آنزیم‌ها مناسب می‌باشند به‌این ترتیب که پیوندهای با تمایل ذاتی به‌طور کلی بر اساس سطح در معرض آن‌ها شامل بقایای آمینواسید می‌شوند؛ به عنوان مثال، کمپلکس مس (II) ایمینو دی استات-IDA-NTANi-(II) و لیگاند نیکل نیتریلو تری استات ((Cu(II)) باز ترکیب شده که با باقیمانده هسیتیدین اجرا شدن مورداستفاده قرار گرفتند. همچنین چندین گزارش مروری در دسترس برای جداسازی مناسب مخلوط کمپلکس پروتئین برای این گونه از لیگاندها در دسترس می‌باشد [۵۷-۵۵]. پپتیدهای مصنوعی که از گروه پروتئین‌ها مشتق می‌شوند، برای جداسازی با تمایل ذاتی مواد مورد تجزیه پرکاربرد مانند انسولین انسانی و ایمونوگلوبولین استفاده می‌شوند. لیگاندهای مصنوعی پپتیدی البته برای ثبت روی مونولیتها یا پلیمرهای حاوی مولکولی هم شناخته شده هستند؛ به عنوان مثال، پپتیدهای پنتا دکا و پپتیدهای هگزا دکا برای خالص‌سازی پادتن‌های پلی کلونال استفاده شده‌اند [۵۸]. آمینواسیدهایی مانند تریپتوфон، فنیل آلانین و هیستیدین به عنوان سیستم ایمنی بر روی زمینه پلی وینیل الکل به کاررفته‌اند و نسل بعدی آمینواسیدها بر اساس نانوالیاف الکترورسی شده را معرفی می‌کنند که برای خالص‌سازی‌های آنزیم و پروتئین استفاده می‌شوند.

^۱. immobilized metal chelates (IMC)

- لیگاندهای زیستی -

غشاهای با تمایل ذاتی بر اساس لیگاندهای زیستی ثبیت شده بر روی آن‌ها، جداسازی را با استفاده از ظرفیت شناسایی ویژه زیستی انجام می‌دهند. بهطور کلی، انواع متفاوتی از مولکول‌های زیستی به عنوان لیگاندهای با تمایل ذاتی استفاده شده‌اند، به‌هر حال اختلاف آن‌ها بر اساس روش ثبیت بر روی انواع مولکول‌ها می‌باشد. گاهی اوقات، مولکول‌های زیستی یکسان توسط روش‌های متفاوتی بر روی پلیمرها قرار می‌گیرند و همین‌طور کاربردهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. لیگاندهایی که به‌طور گسترده استفاده شده‌اند شامل پروتئین کوالانسی جفت شده A/G هستند که برای خالص‌سازی ایمونوگلوبولین‌ها، پلاسمما، سرم و یا هرگونه کشت سلولی استفاده می‌شوند [۴۵]. اگرچه لیگاندهای زیستی برای خواص جداسازی ویژه‌ای که دارند، شناخته شده‌اند اما محدودیت‌هایی مانند پایداری گرمایی و شیمیایی پایین و همین‌طور فرایندهای تشییت سخت آن‌ها نیز وجود دارد. یک مسئله مهم دیگر امکان استخراج لیگاند وابسته می‌باشد که می‌تواند سبب آسودگی محصول نهایی شود. لیگاندهای زیستی می‌توانند یا مولکول‌های زیستی ویژه یا گروه‌های ویژه باشند به این معنی که معیارهای شناسایی زیستی به گروهی از مولکول‌ها نسبت داده می‌شود تا این‌که به ترکیبی خاص مربوط باشد. اکثر پادتن‌ها تحت لیگاندهای زیستی ویژه‌ای می‌باشند که این لیگاندها پروتئین‌های بزرگتر، کوآنزیم‌ها و مولکول‌های گیرنده هستند؛ برای مثال، چندین اسید چرب، سموم متابولیک و داروها ترجیحاً با بخش‌های آلبومین انسان پیوند می‌خورند. حتی آمینواسیدها مانند لیسین به‌طور وسیعی برای خالص‌سازی پروتئین و آنزیم [۵۹، ۶۰] همان‌طور که در جدول ۲-۸ خلاصه آن آورده شده است استفاده شده‌اند.

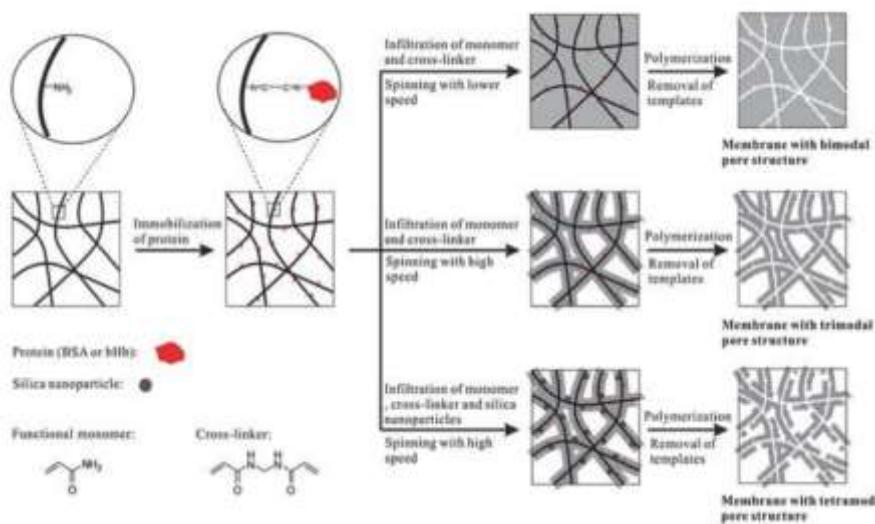
جدول ۲-۸-روش‌های مختلف فعال‌سازی و تثبیت لیگاندها برای توسعه غشاها با تمایل ذاتی به منظور کاربردهای تصفیه

کاربرد	غشا	فعال‌سازی / تثبیت	مرجع
حذف بیلی روین	نانوالیاف کوپلیمر پلی (وینیل الکل- اتیلن)	سدیم هیدروکسید و سیانوریک کلرید/دی آمین	[۵۶]
	پلی آمید	اپیبروموهیدرین / پلی لیسین	[۳۶]
	پلی آمید روش دار شده با کیتوسان	بیسوکسیران / لیسین	[۵۵]
	غشاء کامپوزیتی آلومینیوم اکسید- سیلیکا	گلوتار آلدئید/ لیسین	[۳۶]
تصفیه پروتئین نو ترکیب شده	دی استات سلولز	سورفتانت مانند لیگاندها	[۵۷]
تصفیه لیزوژیم	پلی آمید	فرمالدهید و بیسوکسیران / سلولز هیدروکسی اتیل	[۵۸]
IgG تصفیه	پلی سولفون	دی آمین / سلولز هیدروکسی اتیل	[۵۹]
تصفیه پروتئین	الیاف فوق العاده طریف پلی سولفون	گروههای کربوکسیل / رنگ تولوئیدین آبی	[۳،۴]
جداسازی گلوبولین گاوی	پلی اتیلن	ثبت آمینواسید	[۶۰]
حذف برومیلین	پلی اکریلو نیتریل	گلوتار آلدئید / رنگ آبی سیباکرون	[۳۳،۳۴]
جذب آلبومین	پلی سولفون	دی آمینو- دی پروپیلامین / رنگ آبی سیباکرون	[۴]
تصفیه پلاسمینوژن	سلولز بازیافتی	اپوکسی / لیسین	[۵۴]
IgG جdasازی	پلی آمید روش دار شده با دکستران و پلی وینیل الکل	فرمالدهید و بیسوکسیران / پروتئین A	[۶۶]

- پلیمرهای حاوی مولکولی

پلیمرهای حاوی مولکولی^۱ (MIPs) به دلیل وجود لیگاندهای محل خاص که در ماتریس پلیمر با استفاده از فناوری نشاندن مولکولی گنجانده شده‌اند، فرصتی واقعی برای تحويل اندازه و شناسایی محل‌های موردنیاز ارائه می‌دهند. در این فناوری کاملاً متفاوت، مونومرهای عامل‌دار شده و اتصال عرضی شده برای تشکیل قالب مولکولی به همراه مولکول‌های هدف در نظر گرفته شده برای جداسازی پلیمریزه می‌شوند که اجزای هدف در طی کاربرد جداسازی می‌شوند. از آنجاکه اتصال لیگاند تابع شکل و عملکرد پلیمراست (شکل ۳-۸)، محل‌های تعامل ویژه شبیه به پادتن‌های هدف‌گیری شده می‌شوند [۶۸, ۶۷]. این روش اتصال باعث افزایش کارایی جداسازی می‌شود و کاربردها را از نظر سیستم‌های درمانی گسترش می‌دهد. یک مزیت جانبی نیز به این دلیل ایجاد می‌شود که پلیمرهای حاوی مولکولی اتصال عرضی شده از نظر شیمیایی و فیزیکی نسبت به پلیمرهای توده‌ای پایدار هستند. جداسازی با تمایل ذاتی بر MIPs باعث می‌شود محل خاص اتصال و کارایی تصفیه و جداسازی افزایش یابد؛ از این‌رو، الکتروریسی همراه با این فناوری نشاندن مولکولی، تولید غشاها نانوالیافی حاوی مولکولی را قادر می‌سازد که علاقه خود را در زمینه جداسازی، روش‌های ایمنی، زیست‌حسگرها و واکنش‌های خوددرمانی ابراز کند. برخی از MIPs نانوساختار همچنین می‌توانند برای تصفیه کایرال و صنعتی استفاده شوند و از هندسه منافذ کنترل شده و محل‌های شناسایی هدف ناشی از MIPs بهره‌مند شوند. از زمان تحقیقات اولیه در مورد MIPs، تلاش‌ها بر روی ترکیب هندسه‌های مختلف فیزیکی MIPs برای کاربردهای نهایی موردنظر، متوجه شده است. کاربردهای حاضر بیشتر بر روی حذف مولکول‌های پروتئینی خاص به ویژه زنجیره‌های پپتید و اسیدهای آمینه متوجه شده‌اند.

^۱. Molecularly imprinting polymers (MIPs)



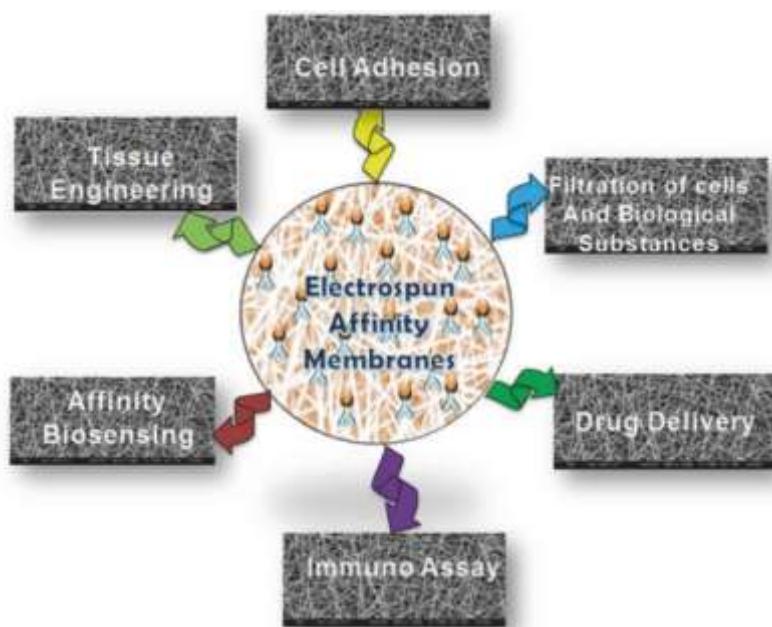
شکل ۳-۸- طرحواره‌ی تهیه غشاها با تمایل ذاتی حاوی مولکولی [۱۶]

۴-۶- کاربردهای غشاها که با تمایل ذاتی شده‌اند

اکثر کاربردهای رایج غشاها با تمایل ذاتی که در آن پادتن‌های مونوکلونال به عنوان لیگاندهای زیستی استفاده می‌شوند، برای جداسازی سیستم ایمنی بدن به کار می‌روند. از آنجاکه پادتن‌ها از نظر مولکولی بسیار خاص هستند، پتانسیل غشاها با تمایل ذاتی در طیف گسترده‌ای از کاربردهای زیست‌فناوری قرار دارد و همچنین راه را برای چالش‌های جدید در درمان‌های بالینی و تشخیص هموار می‌کند. با ظهور الکتروریسی برای سنتز نانوالیاف با تمایل ذاتی، کاربردهای جدید مربوط به روش‌های ایمنی و آنژیمی نیز با استفاده از غشاها با تمایل ذاتی بر جسته شد و اهمیت این برنامه‌ها را در کاربردهای زیست تجزیه‌ای مشخص کرد [۶۹-۷۱]. غشاها که با تمایل ذاتی شده با تمایل ذاتی که با استفاده از پروتئین خاص و پادتن‌ها به عنوان لیگاندها ثبت شده‌اند به ترتیب برای روش‌های ایمنی و کشت سلول میکروبی به کار گرفته شده است. [۷۲] جعبه کوچک با دیسک‌های غشاوی، روشی را برای تحول در زمینه تهیه و استخراج نمونه، به عنوان مثال در سیستم ایمنی بدن ارائه می‌دهند [۷۳، ۵۲]. کاربردهای مختلف زیستی غشاها که با تمایل ذاتی شده با تمایل ذاتی به صورت طرحواره در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.

کاربردهای سنجش زیستی مبتنی بر تمایل نیز به دلیل بهره‌مندی از یکپارچه‌سازی سیستم ایمنی سنجی مبتنی بر غشاها که با تراشه میکروسیالی و سیستم‌های سنجش سیگنال در حال گسترش هستند. مطابق با پیشرفت‌های دیگر در دستگاه‌های پزشکی، غشاها با تمایل ذاتی در مدارهای خارج از بدن، برای از بین بدن متابولیت‌های سمی، پادتن‌ها و موادی مانند

همودیالیز و دیالیز صفاقی کاربردهایی پیدا می‌کنند. حذف اجزای آمیلوئید سرم انسانی از سیستم خارج از خون که در جریان خون موش صحرایی قرار دارد، در دو دهه گذشته گزارش شده بود [۷۴] و کاربردهای مربوط به غشاها با تمایل ذاتی اینمی نیز در حال ظهر است [۷۵]. به طور مشابه، پادتن‌ها از پلاسمای انسان با استفاده از غشاء ای با تمایل ذاتی به لیگاند در مدارهای خارج از بدن جدا می‌شوند [۷۶]. کاربردهای مربوط به تصفیه و صیقل دادن به محصولنهایی، حسگرهای زیستی، خود بهبودی و سیستم‌های پاسخگوی محرک نیز با توجه به ادامه پیشرفت در روش الکتروریسی که شامل عوامل متغیر طراحی و کارکردها است، به شکل عملی نیز قابل استفاده خواهند بود. پیشرفت‌های اخیر هم در روش‌های جدید و هم در بسترها ای از جمله نانوسیم‌ها، میکروپیلار^۱، مهره مغناطیسی^۲، زمینه‌ها، داربست‌ها و کانال‌های میکروسیالی^۳ برای انتقال به سمت کاربرد نهایی ظاهر می‌شوند. با وجود چندین کاربرد آتی از غشاها با تمایل ذاتی الکتروریسی شده، این فصل کاربردهای مربوط به تصفیه سلولی و زیست مولکول‌ها را مدنظر قرار داده است.



شکل ۴-۸- کاربردهای متفاوت بر اساس غشاها با تمایل ذاتی الکتروریسی شده

^۱. micropillar

^۲. magnetic bead

^۳. microfluidic channels

۱-۶-۸- غشاهاي با تمایل ذاتي الکتروریسي شده برای جذب سلول

با الهام‌گيری از ابعاد بین حفره‌های غشاهاي الکتروریسي شده و اجزای سطحی سلولی و همین‌طور ماتریس خارجی سلولی، تلاش‌های بسیاری صورت گرفت تا غشاهاي با تمایل ذاتي الکتروریسي شده برای جذب سلول‌ها به منظور شناسایي انواع مختلف بیماری‌ها استفاده شود [۲۱]. غشاهاي با تمایل ذاتي الکتروریسي شده با گزینش پذيری بالا، با استفاده از اصلاح سطح توسيط ليگاندهای وبيژه تهيه شده‌اند. ليگاندها می‌توانند توسيط روش‌های شيميايی متفاوت مانند برهمنش‌هاي کوالانسي، غيرکوالانسي و کوئورديناسيون بر روی الیاف الکتروریسي ثبیت شوند. انتخاب فرایند ثبیت ليگاندها به ارتقاي برهمنش سلول‌ها با سطح غشا کمک می‌کند؛ بنابراین گزینش پذيری مولکولي می‌تواند در فرایندهای جداسازی متفاوت حاصل شود. بهطورکلی، رنگ‌های فعال، پروتئين‌ها، لكتين‌ها^۱، ليگاندهای تبادل یونی، ليگاندهای پادتن-پاد زا و آنزيم‌ها برای ايجاد غشاهاي بر پایه تمایل استفاده می‌شوند. غشاهاي با تمایل ذاتي بهصورت ورق‌های تخت مجزا يا ضميمه شده، پيچشي، تخت و الیاف توخالي می‌باشند که فعال سطحی شده‌اند و با ليگاندهای مناسب جفت شده‌اند.

غشاهاي الکتروریسي شده با تمایل ذاتي پتانسیل بالايی برای جذب و شناسایي سلول‌های مختلف غده‌ای در مرحله‌های نخستین دارند [۶۱، ۷۷]. غشاهاي الکتروریسي شده با تمایل ذاتي می‌توانند بهطور گزینش پذير تعداد خيلي کمي از سلول‌های غده‌ای در جريان خون را جذب و شناسايي کنند و اين به دليل مساحت سطحی بالاي آن‌ها و تعداد محل‌های جذب سلول متفاوتی که دارند، می‌باشد. اخيراً، نانوالیاف کوپلیمر پلی لاكتيك اسید - پلی گلیکولیک اسید اصلاح شده توسيط پلی‌اتيلن ايمين و هيالورونيك اسیدها بر روی يك صفحه ميكروجريان قرار گرفت تا گرداش سلول‌های غده‌ای^۲ از جريان خون محيطی را جذب و شناسايي کند [۷۷]. در مقاييسه با روش‌های شناسايي CTC متداول، غشاهاي الکتروریسي شده با تمایل ذاتي بهطور گزینش پذير سلول‌های سرطاني در دانسيته‌های کم را جذب کردند که اين عمل با يك كاهش در مراحل فرایند شناسايي صورت گرفت. وانگ^۳ و همكاران [۶۱] الیاف پلی استايرن را که توسيط پادتن‌ها اصلاح شده بودند، برای شناسايي نشانگر سرطان استفاده کردند، آلفا‌فتوپروتئين^۴ (AFP)، کارسينوميريونيك آنتي‌زن^۵ (CEA) و فاكتورهای رشد عروقی اندوتيلیال^۶ (VEGF) از جمله اين نشانگرها هستند. زمينه

¹ Lectins

². circulating tumor cells (CTCs)

³. Wang

⁴. alpha fetoprotein (AFP)

⁵. carcinoembryonic antigen (CEA)

⁶. vascular endothelial growth factors (VEGF)

الکتروریسی شده مورداستفاده برای شناسایی نشانگرهای سلطان نسبت به روش متداول استفاده از زمینه‌های پلی استایرن مسطح، مؤثرتر و حساس‌تر نشان داده شدند. عملکرد بهبودیافته به مساحت سطحی خیلی بالاتر نانوالياف در زمینه الکتروریسی شده نسبت داده شد.

در سال‌های اخیر، توجهات نسبت به استفاده از هیدروژل برای تهیه غشاهای با تمایل ذاتی برای جذب انواع پروتئین‌ها، به دلیل توانایی آن‌ها در تشکیل شبکه سه‌بعدی، انعطاف‌پذیری زنجیرها و خواص آب‌دوستی آن افزایش یافته است [۷۸، ۷۹]. غشاهای با تمایل ذاتی هیدروژل بر پایه‌ی نایلون ۶-کیتوسان/ پلی وینیل الکل ثبیت شده توسط سیباکرون آبی برای جداسازی سرم آلبومین بروین^۱ (BSA) استفاده شده‌اند [۴]. با استفاده از غشاهای الکتروریسی شده با تمایل ذاتی بر پایه‌ی هیدروژل، جذب BSA به‌طور وسیعی در مقایسه با روش‌های قدیمی بهبود پیدا کرد [۴، ۳۰، ۸۱]. اصلاحات پیش از ریسندگی و پس از ریسندگی از الیاف الکتروریسی شده، پتانسیل بالای برای غشاهای با تمایل ذاتی نسل بعدی از خود نشان می‌دهد. الیاف الکتروریسی شده کوپلیمر پلی استایرن-پلی مال ایمید، به شکل سطحی و توده‌ای با موفقیت اصلاح شدند و برای جذب سلول‌های^۲ BCG استفاده شدند [۸۲]. نویسنده‌گان به این نکته اشاره کردند که عامل‌های استفاده شده برای اصلاح غشا، نقش اساسی در جذب سلول‌های BCG دارد. اخیراً لان^۳ و همکاران غشاهای با تمایل ذاتی الکتروریسی شده سلولز دی استات^۴ (CDA) عامل‌دار شده توسط گروه‌های عاملی متفاوت مانند CH_2COCH_3 و ONO_2 را برای جداسازی و بازیابی BSA استفاده کردند. غشاهایی که توسط سلولز دی استات اصلاح شده، تهیه شده‌اند، بالاترین ظرفیت جذب را برای BSA (۱۸/۶۳ mg/g) در مقایسه با سلولز دی استات اصلاح نشده (۱۱/۳۰۰ mg/g)^۵ از خود نشان دادند. تاکنون مطالعات بسیاری بر روی برهم‌کنش‌های نانومقیاس بین سلول‌های زنده و مواد زمینه‌ای مختلف انجام شده است. اگرچه ذکر این نکته مهم می‌باشد که فهمیدن مزایای برهم‌کنش نانومقیاس بین نانوالياف و اجزای سطح سلولی (مانند میکروویلی^۶ و فیلوبودیا^۷) و داربست‌های ماتریس خارج سلولی ضروری است.

^۱. bovine serum albumin (BSA)

^۲. Mycobacterium bovis bacillus calmette-guerin (BCG)

^۳. Lan

^۴. cellulose diacetate (CDA)

^۵. microvilli

^۶. filopodia

۸-۶-۲- غشاهاي با تمايل ذاتي در کاربردهاي زيستي

در جداسازی با تمايل ذاتي معمول، پیکربندی صفحه تحت، دیسکهای نانوالیاف توخالی به طور وسیعی برای جداسازی پروتئین‌ها، پادتن‌ها، ایمونوگلوبین‌ها و آمینواسیدهای طبیعی استفاده شده است. یک گزینش از چندین کار بر روی غشاهاي با تمايل ذاتي برای خالص‌سازی و جدا کردن مولکول‌های زیستی در جدول ۸-۳ آورده شده است.

غشاهاي الکترورسی شده بر اساس پلی اکریلونیتریل شامل قندهای حلقوی آماده شدند تا مخلوطی از پروتئین‌ها را بازیابی و خالص‌سازی کنند [۹۵]. این جدا کردن بر اساس شناسایی گزینش پذیر بین ساکاریدها و پروتئین‌ها است که اولین مرحله در برهم‌کنش‌های سلولی-سلولی تکمیلی از جمله انعقاد خون، پاسخ ایمنی، عفونت ویروسی، التهاب، جنین زایی و انتقال سیگنال سلولی می‌باشد [۴، ۳]؛ به عنوان نتیجه، یک سری از نانوالیاف غشاهاي الکترورسی شده توسعه داده شدند تا مولکول‌های هدف ویژه‌ای را جذب کنند؛ از طرف دیگر، متاکریلیک اسید (MMA) به سطح نانوالیاف پیوند زده شده تا^۱ TBO مولکولی را به صورت یونی و BSA را به صورت شیمیایی جذب کند [۳]. تجزیه و تحلیل توسط میکروسکوپ روبشی لیزری کانفوکال نشان داد که BSA علامت‌گذاری شده که سطح غشاهاي الکترورسی شده را به صورت پیوسته پوشش دادند و در الیاف غشاهاي به صورت یکنواخت پخش شدند. این غشاهاي الکترورسی شده، عبور جریان آب بالا، قابلیت استفاده مجدد مناسب و ظرفیت برای جذب مولکول‌های هدف را از خود نشان دادند.

اخیراً غشاهاي کامپوزیتی نانولیفی سلولز، ساخته شده توسط نانوالیاف الکترورسی شده که دفع دانه‌های پلیمری (به کوچکی ۵۰ نانومتر) را نتیجه می‌دهند، نشان می‌دهد که پتانسیل بالایی برای حذف ویروس‌ها دارند [۹۶]. با عامل‌دار کردن سطحی میکرو الیاف پلی کاپرولاکتان (PCL) با پادتن‌های سطحی تثبیت شده برای توسعه‌ی غشاهاي نانو لیفی الکترورسی شده برای داربست‌های بافت ایمنی تقویت شده گزارش شده‌اند [۲۵].

^۱. Toluidine Blue O (TBO)

جدول ۳-۸- غشاهای با تمایل ذاتی پلیمری الکتروریسی شده در کاربردهای زیستی

مرجع	کاربرد	پلیمر / عملیات
[۷۷]	خالص سازی IgG	ایزووسیانات عامل دار شده با نانوالیاف پلی اتر یورتان- اوره الکتروریسی شده
[۷۸]	جذب دینامیک آلبومین سرم (BSA) گاوی	پلی اتر سولفون عامل دار شده با سیباکرون آبی F3GA (CB)
[۷۹]	خالص سازی IgG	نانوالیاف سلولز بازیافتی عامل دار شده با پروتئین
[۳۳]	جداسازی زیست مولکولها	سلولز عامل سطحی شده با سیباکرون آبی F3GA (CB)
[۳۳، ۳۴]	خالص سازی پاپائین	هیبرید کیتوسان/نایلون ۶
[۷۵]	میکروارگانیسمهای BCG	کوپلیمر پلی (استایرن- مالئیک انیدرید)
[۳۳، ۳۴]	جذب برومیلن	گلوتارآلدئید عامل دار شده با نانوالیاف پلی اکریلو نیتریل
[۴]	جذب آلبومین	پلی سولفون با الیاف خیلی ظرفی عامل سطحی شده با سیباکرون آبی F3GA
[۸۰]	تمایل رنگ	کیتوسان عامل دار شده با نایلون ۶
[۸۱]	اثر ضد توموری	پلی دوپامین عامل دار شده با دوکسوروبیسین بارگذاری شده توسط پلی لاکتید
[۸۲]	مهندسی بافت	هیبرید کولاژن و کوپلیمر پلی (لاکتید- کاپرولاکتون
[۸۳]	جداسازی پروتئین	نایلون ۶/زینک غنی شده با غشاء هیدروکسی آپاتیت
[۸۴]	حذف باکتری‌ها و ویروس‌ها	پلی اکریلو نیتریل عامل دار شده با مونومر دو وینیلی و سه وینیلی
[۸۵]	جذب پروتئین	زینک غنی شده با هیدروکسی آپاتیت حاوی نایلون ۶
[۸۶]	جذب لکتین	گلیکوزیله شدن سطحی کوپلیمر پلی (اکریلونیتریل- هیدروکسی اتیل متاکریلات
[۳۱]	زیست مولکولها	سلولز گرما دیده و قلیایی شده عامل دار شده با سیباکرون آبی F3GA
[۸۷]	پاپائین	پلی وینیل الکل

۷-۸- چشم انداز آینده و چالش‌ها

غشاهای با تمایل ذاتی برای جذب سلول و از بین بردن مواد زیستی به زیست پذیری عملی رسیده است، در حالی که کاربردهای درمانی و پزشکی از غشاهای با تمایل ذاتی در مراحل ابتدایی خود باقی‌مانده است. در دهه‌ی گذشته نانوالیاف الکتروریسی شده که میزان حامل‌های نانومواد هستند، مورد توجه گستردۀ قرار گرفته‌اند. تلاش برای اطمینان از عملکرد بهتر نانوالیاف برای کاربردهای زیستی مورد توجه عمده قرار گرفته و نیاز به پاسخ ماده مناسب برای برهم‌کنش‌های در محل خاص یا بارگذاری دارو برای کاربردهای تحويل هدفمند و کنترل شده دارد [۹۷].

روش الکتروریسی برای توسعه‌ی الیاف پلیمری معمولی یا نانوالیاف با تمایل ذاتی در مقیاس آزمایشگاهی از نظر تجاری مناسب است؛ با این حال، انتقال از آزمایشگاه به تجارت در مقیاس بزرگ نیاز به پیشرفت شگرف در فناوری فعلی الکتروریسی و روش‌های اتصال لیگاند دارد؛ علاوه بر این، تقاضاها را رو به رشد برای مواد تصفیه یا جداسازی در این دوران مدرن می‌تواند با کاوش در فناوری‌های غیرمعارف برآورده شود تا فناوری غشاپی با تمایل ذاتی متنوع و چندمنظوره مبتنی بر الکتروریسی را به سمت کاربردهای نهایی صنعتی که محدود به جداسازی زیست مولکولی یا جذب سلولی تنها نباشد سوق دهد.

۸-۸- جمع‌بندی

رونده‌ی رشد ادامه‌دار در زمینه زیست‌فناوری، داروسازی و زیست پزشکی نیاز به روش‌های اقتصادی اما کارآمد برای جداسازی طیف گسترده‌ای از مولکول‌های زیستی دارد. یکی از مسیرهای تجاری مناسب برای هدایت جداسازی غشاپی با تمایل ذاتی به تولید در مقیاس بزرگ، با ترکیب طراحی و عملکردهای پیشرفتۀ از طریق فناوری تولید غشاپی الکتروریسی شده است؛ در عین حال، افزایش نانوموادهای چندمنظوره و راهبردهای اصلاح باعث ایجاد چالش‌های اساسی در تهییه غشاهای با تمایل ذاتی است که باید مطابق با بهترین معیارهای عملکرد باشند. گزارش‌های پژوهشی مربوط به تجزیه و تحلیل عوامل در بهبود فرایند الکتروریسی و همچنین تأثیر روش‌های اصلاح پلیمر صرف شده، یک روش مقیاس‌پذیر و اقتصادی برای تولید نانو الیاف عامل‌دار با تمایل ذاتی ارائه می‌دهد. بسیاری از غشاهای کامپوزیتی و چندمنظوره طی سال‌های اخیر توسعه‌یافته‌اند، اما هنوز هم نیاز به ایجاد زمینه زیست سازگار با استفاده از مواد از منابع تجدید پذیر برای بازیابی سلول‌ها و مواد فعال زیستی وجود دارد. استفاده از ضد میکروب‌های طبیعی و پلیمرهای تخریب‌پذیر باید نسبت به رویکردهایی که متعارف‌تر هستند ارزیابی شوند.

مراجع

- [1]. Klein E (2000) Affinity membranes: a 10-year review. *J Membr Sci* 179:1 ت 27.
- [2]. Thommes J, Kula MR (1995) Membrane chromatography-an integrative concept in the downstream processing of proteins. *Biotechnol Prog* 11:357 ت 367.
- [3]. Ma Z, Kotaki M, Ramakrishna S (2006) Surface modified nonwoven polysulphone (PSU) fiber mesh by electrospinning: a novel affinity membrane. *J Membr Sci* 272:179 ت 187.
- [4]. Ma Z, Masaya K, Ramakrishna S (2006) Immobilization of Cibacron blue F3GA on electrospun polysulphone ultra-fine fiber surfaces towards developing an affinity membrane for albumin adsorption. *J Membr Sci* 282:237 ت 244.
- [5]. Gao H, Sun X, Gao C (2017) Antifouling polysulfone ultrafiltration membranes with sulfobetaine polyimides as novel additive for the enhancement of both water flux and protein rejection. *J Membr Sci* 542:81 ت 90.
- [6]. Haider S, Park SY (2009) Preparation of the electrospun chitosan nanofibers and their applications to the adsorption of Cu (II) and Pb (II) ions from an aqueous solution. *J Membr Sci* 328:90 ت 96.
- [7]. Zhang H, Nie H, Li S et al (2008) Electrospun nylon nanofiber as affinity membrane for papain adsorption. *J Biotech* 136:S416.
- [8]. Ma Z, Mao Z, Gao C (2007) Surface modification and property analysis of biomedical polymers used for tissue engineering. *Colloids Surf B* 60:137 ت 157.
- [9]. Karim Z, Mathew AP, Kokol V et al (2016) High-flux affinity membranes based on cellulose nanocomposites for removal of heavy metal ions from industrial effluents. *RSC Adv* 6:20644 ت 20653.
- [10].Zhang H, Jia X, Han F et al (2013) Dual-delivery of VEGF and PDGF by double-layered electrospun membranes for blood vessel regeneration. *Biomaterials* 34:2202 ت 2212.
- [11].Ramakrishna S, Fujihara K, Teo WE et al (2005) An introduction to electrospinning and nanofibers chapter 2. World Scientific Publishing, Singapore.
- [12].Nasreen SAAN, Sundarraj S, Nizar SAA et al (2013) Advancement in electrospun nanofibrous membranes modification and their application in water treatment. *Membranes* 3(4):266 ت 284.
- [13].Alam H, Ramakrishna S (2012) A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials. *Nano Energy* 2:190 ت 212.
- [14].Raghavan P et al (2012) Electrospun polymer nanofibers: the booming cutting edge technology. *React Funct Polym* 72(12):915 ت 930.

- [15].Shin SH, Purevdorj O, Planell JA et al (2012) A short review: recent advances in electrospinning for bone tissue regeneration. *J Tissue Eng* 3(1):2041731412443530. <https://doi.org/10.1177/2041731412443530>.
- [16].Teo WE, Inai R, Ramakrishna S (2011) Technological advances in electrospinning of nanofibers. *Sci Technol Adv Mater* 12(1):013002.
- [17].Wang X, Hsiao BS (2016) Electrospun nanofiber membranes. *Curr Opin Chem Eng* 12:62–81.
- [18].Zhu T, Xu D, Wu Y et al (2013) Surface molecularly imprinted electrospun affinity membranes with multimodal pore structures for efficient separation of proteins. *J Mater Chem B* 1:6449–6458.
- [19].Nada AA, James R, Shelke NB et al (2014) A smart methodology to fabricate electrospun chitosan nanofiber matrices for regenerative engineering applications. *Polym Adv Technol* 25:507–515.
- [20].Son YJ, Kang J, Kim HS et al (2016) Electrospun nanofibrous sheets for selective cell capturing in continuous flow in microchannels. *Biomacromolecules* 17:1067–1074.
- [21].Wang X, Um IC, Fang D et al (2005) Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments. *Polymer* 46:4853–4867.
- [22].Hu X, Liu S, Zhou G (2014) Electrospinning of polymeric nanofibers for drug delivery applications. *J Control Release* 185:12–21.
- [23].Chakraborty S, Liao IC, Adler A et al (2009) Electrohydrodynamics: a facile technique to fabricate drug delivery systems. *Adv Drug Deliv Rev* 61:1043–1054.
- [24].Guex AG, Hegemann D, Giraud MN et al (2014) Covalent immobilisation of VEGF on plasmacoated electrospun scaffolds for tissue engineering applications. *Colloids Surf B Biointerfaces* 123:724–733.
- [25].Tonglairoum P, Ngawhirunpat T, Rojanarata T et al (2015) Fabrication of a novel scaffold of clotrimazole-microemulsion-containing nanofibers using an electrospinning process for oral candidiasis applications. *Colloids Surf B Biointerfaces* 126:18–25.
- [26].Zhang M, Wang Z, Wang Z et al (2011) Immobilization of anti-CD31 antibody on electrospun poly(ϵ -caprolactone) scaffolds through hydrophobins for specific adhesion of endothelial cells. *Colloids Surf B Biointerfaces* 85:32–39.
- [27].Chen Z, Chen Z, Zhang A et al (2016) Electrospun nanofibers for cancer diagnosis and therapy. *Biomater Sci* 4:922–932.
- [28].Chung HY, John RB, Gogins MA et al (2008) Use of crosslinked polyvinyl alcohol in polymers with improved environmental stability. EP1925352A1, 3–15.
- [29].Ebara M, Kotsuchibashi Y, Uto K et al (2014) Smart hydrogels In: Smart biomaterials, pp 1–373.

- [30].Shabafrooz V, Mozafari M, Vashaee D et al (2014) Electrospun nanofibers: from filtration membranes to highly specialized tissue engineering scaffolds. *J Nanosci Nanotechnol* 14:522-534.
- [31].Li H, Li C, Zhang C et al (2014) Well dispersed copper nanorods grown on the surface functionalized PAN fibers and its antibacterial activity. *J Appl Polym Sci* 131:41011.
- [32].Li X, Wang C, Yang Y (2014) Dual-biomimetic superhydrophobic electrospun polystyrene nanofibrous membranes for membrane distillation. *ACS Appl Mater Interfaces* 6:2423-24301. Web of Sciences (2017) <https://apps.webofknowledge.com/>. Accessed 06 Dec 2017.
- [33].Yang Z, Si J, Cui Z et al (2017) Biomimetic composite scaffolds based on surface modification of polydopamine on electrospun poly(lactic acid)/cellulose nanofibrils. *Carbohydr Polym* 174(15):750-759.
- [34].Ma Z, Kotaki M, Yong T, He W, Ramakrishna S (2005a) Surface engineering of electrospun polyethylene terephthalate (PET) nanofibers towards development of a new material for blood vessel engineering. *Biomaterials* 26(15):2527-2536.
- [35].Ma Z, Kotaki M, Ramakrishna S (2005b) Electrospun cellulose nanofiber as affinity membrane. *J Membr Sci* 265:115-123.
- [36].Yoshikawa M, Ooi T, Izumi J (1999) Alternative molecularly imprinted membranes from a derivative of natural polymer, cellulose acetate. *J Appl Polym Sci* 72:493-499.
- [37].Zhang H, Nie H, Yu D et al (2010) Surface modification of electrospun polyacrylonitrile nanofiber towards developing an affinity membrane for bromelain adsorption. *Desalination* 256:141-147.
- [38].Zhang H, Wu C, Zhang Y et al (2010) Elaboration, characterization and study of a novel affinity membrane made from electrospun hybrid chitosan/nylon-6 nanofibers for papain purification. *J Mater Sci* 45:2296-2304.
- [39].Reddy PS, Kobayashi T, Fujii N (2002) Recognition characteristics of dibenzofuran by molecularly imprinted polymers made of common polymers. *Eur Polym J* 38:779-785.
- [40].Shi W, Zhang F, Zhang G et al (2010) Polylysine-immobilized affinity nylon membrane used for bilirubin adsorption. *Mol Simul* 29:787-790.
- [41].Trotta F, Drioli E, Baggiani C, Lacopo D (2002) Molecularly imprinted polymeric membrane for naringin recognition. *J Membr Sci* 201:77-84.
- [42].Ulbricht M, Malaisamy R (2005) Insights into the mechanism of molecular imprinting by immersion precipitation phase inversion of polymer blends via a detailed morphology analysis of porous membranes. *J Mater Chem* 15:1487-1497.
- [43].Ulbricht M (2006) Advanced functional polymer membranes. *Polymer* 47:2217-2262.

- [44].Avramescu MME, Wessling M, Borneman Z (2015) In: Pabby AK, Rizvi SSH, Requena AMS (eds) Membrane and monolithic convective chromatographic supports, 2nd edn. Taylor & Francis Group, Burlington, p 42.
- [45].Hage DS, Cazes J (eds) (2006) Handbook of affinity chromatography, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton Fleschin S, Bunaci AA, Scripcariu M (2004) Preferable methods for immobilized biocatalysts in enzyme electrode construction. Rom Biotechnol Lett 9:1947–1958.
- [46].Suen SY, Lin SY, Chiu HS (2000) Effects of spacer arms on Cibacron blue 3GA immobilization and lysozyme adsorption using regenerated cellulose membrane discs. Ind Eng Chem Res 39:478–487.
- [47].Acikara OB, Citoglu GS, Ozbilgin S, Ergene B (2013) Affinity chromatography and importance in drug discovery. In Tech open access. doi: <https://doi.org/10.5772/55781>.
- [48].Ayyar BV, Arora S, Murphy C, O'Kennedy R (2012) Affinity chromatography as a tool for antibody purification. Methods 56:116–129.
- [49].Zou H, Luo Q, Zhou D (2001) Affinity membrane chromatography for the analysis and purification of proteins. J Biochem Biophys Methods 49:199–240.
- [50].Quiros J, Boltes K, Rosal R (2016) Bioactive applications for electrospun fibers. Polym Rev 56(4):631–667.
- [51].Chakrabarty T, Kumar M, Rajesh KP et al (2010) Nanofibrous sulfonated poly (ether ether ketone) membrane for selective electro-transport of ions. Sep Purif Technol 75:174–182.
- [52].Wang J, Kang Q, Lv X et al (2013) Simple patterned Nanofiber scaffolds and its enhanced performance in immunoassay. PLoS One 8(12):e82–88.
- [53].Block H, Maertens B, Spietersbach A, Brinker N, Kubicek J, Fabis R, Labahn J, Schafer F (2009) Immobilized-metal affinity chromatogram.
- [54].De Aquino LC, De Sousa HR, Miranda EA, Vilela L, Bueno SM (2006) Evaluation of IDA-PEVA hollow fiber membrane metal ion affinity chromatography for purification of a histidine-tagged human proinsulin. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci 834(1–2):68–76.
- [55].Serpa G, Augusto EFP, Tamashiro WMSC, Ribeiro MB, Miranda EA, Bueno SMA (2005) Evaluation of immobilized metal membrane affinity chromatography for purification of an immunoglobulin G1 monoclonal antibody. J Chromatogr B 816:259–268.
- [56].Taguchi H, Sunayama H, Takano E, Kitayama Y, Takeuchi T (2015) Preparation of molecularly imprinted polymers for the recognition of proteins via the generation of peptide-fragment binding sites by semicovalent imprinting and enzymatic digestion. Analyst 140:1448–1452.

- [57].Boi C, Castro C, Sarti GC (2015) Plasminogen purification from serum through affinity membranes. *J Membr Sci* 475:71–79.
- [58].Shi W, Zhang F, Zhang G (2005) Adsorption of bilirubin with polylysine carrying chitosan-coated nylon affinity membranes. *J Chromatogr B* 819:301–306.
- [59].Wang W, Zhang H, Zhang Z et al (2017) Amine-functionalized PVA-co-PE nanofibrous membrane as affinity membrane with high adsorption capacity for bilirubin. *Colloids Surf B* 150:271–278.
- [60].Honjo T, Hoe K, Tabayashi S et al (2013) Preparation of affinity membranes using thermally induced phase separation for one-step purification of recombinant proteins. *Anal Biochem* 434:269–274.
- [61].Beeskow TC, Kusharyoto W, Anspach FB et al (1995) Surface modification of microporous polyamide membranes with hydroxyethyl cellulose and their application as affinity membranes. *J Chromatogr A* 715:49–65.
- [62].Klein E, Eichholz E, Yeager DH (1994) Affinity membranes prepared from hydrophilic coatings on microporous polysulfone hollow fibers. *J Membr Sci* 90:69–80.
- [63].Kim M, Saito K, Furusaki S et al (1991) Adsorption and elution of bovine γ -globulin using an affinity membrane containing hydrophobic amino acids as ligands. *J Chromatogr A* 585:45–51.
- [64].Castilho LR, Deckwer WD, Anspach FB (2000) Influence of matrix activation and polymer coating on the purification of human IgG with protein A affinity membranes. *J Membr Sci* 172:269–277.
- [65].Tokonami S, Shiigi H, Nagaoka T (2009) Review: micro- and nanosized molecularly imprinted polymers for high-throughput analytical applications. *Anal Chim Acta* 641:7–13.
- [66].Bompart M, Haupt K, Ayela C (2012) Micro and nanofabrication of molecularly imprinted polymers. *Top Curr Chem* 325:83–110.
- [67].Lee Y, Lee JH, Son KJ, Koh WG (2011) Fabrication of hydrogel-micropatterned nanofibers for highly sensitive microarray-based immunosensors having additional enzyme-based sensing capability. *J Mater Chem* 21:4476–4483.
- [68].Liu Y, Yang D, Yu T, Jiang X (2009) Incorporation of electrospun nanofibrous PVDF membranes into a microfluidic chip assembled by PDMS and scotch tape for immunoassays. *Electrophoresis* 30:3269–3275.
- [69].Yang D, Niu X, Liu Y, Wang Y, Gu X, Song L, Zhao R, Ma L, Shao Y, Jiang X (2008) Electrospun nanofibrous membranes: a novel solidsubstrate for microfluidic immunoassays for HIV. *Adv Mater* 20:4770–4775.
- [70].Senecal KJ, Senecal AG, Pivarnik PE, Mello CM, Soares JW, Schreuder-Gibson HL (2010) Electrospun nanofibrous membrane assembly for use in

- capturing chemical and/or biological analytes, US Patent, US20100240121 A1, 1-7.
- [71].Zha Z, Cohn C, Dai Z et al (2011) Nanofibrous lipid membranes capable of functionally immobilizing antibodies and capturing specific cells. *Adv Mater* 23:3435-3440.
- [72].Adachi T, Mogi M, Harada M, Kojima K (1996) Selective removal of human serum amyloid P component from rat blood by use of an immunoaffinity membrane in an extracorporeal circulation system. *J Chromatogr B Biomed Appl* 682(1):47-54.
- [73].Bereli N, Yavuz H, Denizli A (2015) Immunoaffinity membranes. In: Drioli E, Giorno L (eds) *Living reference work entry encyclopedia of membranes*. Springer, Berlin, pp 1-2.
- [74].Haupt K, Bueno SMA (2009) In: Wilson ID, Adlard ER, Cooke M, Poole CF (eds) *Affinity membranes, handbook of methods and instrumentation in separation science*. Academic Press, San Diego.
- [75].Xu G, Tan Y, Xu T et al (2017) Hyaluronic acid-functionalized electrospun PLGA nanofibers embedded in a microfluidic chip for cancer cell capture and culture. *Biomater Sci* 5:752-761.
- [76].Bell CL, Peppas NA (1995) Biomedical membranes from hydrogels and interpolymer complexes. *Adv Polym Sci* 22:125-176.
- [77].Mondal S, Li C, Wang K (2015) Bovine serum albumin adsorption on Glutaraldehyde cross-linked chitosan hydrogels. *J Chem Eng Data* 60:2356-2362.
- [78].Luong JHT, Nguyen AL (1992) In: Tsao GT (ed) *Bioseparation*, vol 47. Springer, Berlin, pp 137-158.
- [79].Tong U, Xu X, Wang H et al (2015) Solution-blown core-shell hydrogel nano fibers for bovine serum albumin affinity adsorption. *RSC Adv* 5:83232.
- [80].Cronje L, Klumperman B (2013) Modified electrospun polymer nanofibers as affinity membranes: the effect of pre-spinning modification versus post-spinning modification. *Eur Polym J* 49:3814-3824.
- [81].Lan T, Shao Z, Gu M et al (2015) Electrospun nanofibrous cellulose diacetate nitrate membrane for protein separation. *J Membr Sci* 489:204-211.
- [82].Bamford CH, Al-Lamee KG, Purbrick MD, Wear TJ (1992) Studies of a novel membrane for affinity separations: functionalisation and protein coupling. *J Chromatogr A* 606:19-31.
- [83].Ma Z, Lan Z, Matsuura T et al (2009) Electrospun polyethersulfone affinity membrane: membrane preparation and performance evaluation. *J Chromatogr B* 877:3686-3694.

- [84].Ma K, Chan CK, Liao S et al (2008) Electrospun nanofiber scaffolds for rapid and rich capture of bone marrow-derived hematopoietic stem cells. *Biomaterials* 29:2096-2103.
- [85].Zhang HT, Han J, Xue Y et al (2009) Surface modification of electrospun nylon nanofiber based dye affinity membrane and its application to papain adsorption. *Bioinform Biomed Eng.* In: 3rd International conference on bioinformatics and Biomedical engineering, 11-13 June 2009.
- [86].Yuan Z, Zhao X, Wang X et al (2014) Promotion of initial anti-tumor effect via polydopamine modified doxorubicin-loaded electrospun fibrous membranes. *Int J Clin Exp Pathol* 7(9):5436-5449.
- [87].Xiaomin H, Wei F, Bei F et al (2013) Electrospun collagen/Poly(L-lactic acid-co-ε-caprolactone) hybrid Nanofibrous membranes combining with sandwich construction model for cartilage tissue engineering. *J Nanosci Nanotechnol* 13:3818-3825.
- [88].Esfahani H, Prabhakaran MP, Salahi E et al (2016) Electrospun nylon 6/zinc doped hydroxyapatite membrane for protein separation: mechanism of fouling and blocking model. *Mater Sci Eng C* 59:420-428.
- [89].Ma H, Hsiao BS, Chu B (2014) Functionalized electrospun nanofibrous microfiltration membranes for removal of bacteria and viruses. *J Membr Sci* 452:446-452.
- [90].Esfahani H, Prabhakaran MP, Salahi E et al (2015) Protein adsorption on electrospun zinc doped hydroxyapatite containing nylon 6 membrane: kinetics and isotherm. *J Colloid Interface Sci* 443:143-152.
- [91].Che AF, Huang XJ, Xu ZK (2011) Polyacrylonitrile-based nanofibrous membrane with glycosylated surface for lectin affinity adsorption. *J Membr Sci* 366:272-277.
- [92].Moreno-Cortez IE, Romero-García J, González-González V et al (2015) Encapsulation and immobilization of papain in electrospun nanofibrous membranes of PVA cross-linked with glutaraldehyde vapor. *Mater Sci Eng C* 52:306-314.
- [93].Yang Q, Li JJ, Hu MX et al (2006) Nanofibrous sugar sticks via electrospinning. *Macromol Rapid Comm* 42:1942-1948.
- [94].Huang W, Wang Y et al (2016) Fabrication of flexible self-standing all-cellulose nanofibrous composite membranes for virus removal. *Carbohydr Polym* 143:9-17.

فصل نهم

بستر فیلتر نانولیفی الکتروریسی شده:

فناوری‌های نوظهور و چشم‌انداز بازار

آنکیتا پودیال^۱، گرت بکرمن^۲، ناوین آشوك چاند^۳، آین هوئی^۴، آدام بلیک^۵ و
بووانسواری کنان^۶

^۱. Ankita Poudyal

^۲. Gareth W. Beckermann

^۳. Naveen Ashok Chand

^۴. Iain C. Hosie

^۵. Adam Blake

^۶. Bhuvaneswari Kannan e-mail: bhuvana@revolutionfibres.com

چکیده

با افزایش مداوم سطح آلودگی شهری و صنعتی، تقاضا برای فیلترهای نانولیفی الکتروریسی شده با بازدهی بالا هرگز بیشتر نشده است. بسیاری از تولیدکنندگان شناخته شده فیلتر در جهان، پیش از این به مشارکت مواد نانولیفی الکتروریسی شده در فیلترهای خود هدایت شده‌اند. اکنون مرحله بعدی رشد در این بازار در تولید فیلترهای عامل‌دار است که به صورت انتخابی اهداف مورد علاقه مانند VOCs، ذرات PM2.5، یون‌های فلزات سنگین، رنگزاها، ویروس‌ها و بسیاری از آلاینده‌های دیگر را جذب می‌کنند. این فصل خلاصه‌ای از فناوری‌های نوظهور است که می‌تواند به همراه نانوالیاف الکتروریسی شده برای تصفیه با عملکرد بالا ذرات ریز مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۹ - مقدمه

با افزایش میزان وضعیت قرمز مربوط به میزان بالای آلودگی‌های هوای آب منجر به این شد که مردم و دولتها به دنبال مکانیسمی سالم و امن برای غلبه بر این مسئله مهم جهانی باشند. در سال‌های اخیر یکی از عامل‌های مهم بسیاری از بیماری‌ها مانند آسم، سرطان، فشارخون بالا، مشکلات تنفسی [۱، ۲] و خیلی از مشکلات قلبی عروقی [۳] مربوط به آلودگی‌های آب و هوای در سراسر جهان می‌باشد. آب و هوای بستر انتقال توده‌ای برای انتقال آلودگی‌ها می‌باشد [۴]. این آلودگی‌ها که موردنبررسی قرار گرفته شده‌اند، می‌توانند مخلوط پیچیده‌های از گازها و ذرات جامد با ماهیت زیستی یا غیر زیستی باشند. ذرات آلوده به طور معمول صدها ماده شیمیایی را روی سطح خود جذب می‌کنند که این عمل می‌تواند اثرات جهش‌زاوی و سرطان‌زاوی در انسان به وجود آورد [۵، ۳].

اکثر این ذرات آلوده ترکیباتی با قطر کمتر از یک میکرومتر (μm) می‌باشند. فیلترهای الیافی مکانیکی معمول، ذرات با اندازه میکرومتر را با بازده بالا حذف می‌کنند؛ به‌حال، برای ذرات با اندازه کمتر از میکرون، بستر الکتروریسی شده با نانوالیاف طریف به دلیل مساحت سطحی بالا و ابعاد حفره کوچک عملکرد تصفیه افزایش‌یافته‌ای را انجام می‌دهند. فرایند الکتروریسی به‌طور وسیعی بحث شده است و توسط محققان موربدیث و بررسی بیشتر قرار گرفته شده است [۶-۱۰]. اخیراً، پیشرفت زیادی برای اصلاح نانوالیاف الکتروریسی شده با کاربردهای اضافی که بازدهی تصفیه آن‌ها را تقویت می‌کند فراهم شده است. برخی از مطالعات اخیر هم به این موضوع اشاره کرده‌اند که نانوالیاف می‌توانند در کاربردهای تجاری استفاده گردند [۶] و جنبه‌های بازار این فناوری‌ها برای کاربردهای تصفیه در قسمت‌های پیش رو موربدیث قرار خواهند گرفت.

۲-۹- نانوفناوری در فیلتر هوای

توسخه بستر فیلتر نانولیفی برای تصفیه هوا به سال ۱۹۳۹ میلادی بر می گردد، وقتی که دانشمندان فیلتر پتریانوف^۱ (PF) را در روسیه توسعه دادند. در ابتدا، فیلترها به عنوان اجزای تصفیه دود برای ماسک های گازی استفاده شدند، اما بعد از جنگ جهانی دوم، روس ها پنج شرکت را راه اندازی کردند تا این فیلترها را به منظور جذب ذرات معلق رادیواکتیو در بخش های هسته ای مورد استفاده قرار دهند. اگرچه، این فیلترها خواص تصفیه فوق العاده ای نشان دادند، این مخصوصات به دلیل پنهان کاری با غرب صرفاً به اتحاد جماهیر شوروی محدود می شدند و توسعه پیدا نکردند؛ اما از طرف دیگر، نخستین بستر تصفیه الیافی با ابعاد زیر میکرون توسط شرکت دونالدسون آمریکا در سال ۱۹۸۰ میلادی به صورت تجاری عرضه گردید. از آن زمان به بعد، این روش توسط صنایع متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت تا با بهبود این فیلترها، بازده جداسازی آن ها افزایش پیدا کند.

با افزایش هشدارها توسط سازمان ها و آژانس های سلامت و ترکیب شدن آن ها با سخت گیری های دولت ها و همین طور نگرانی مردم از این هشدارهای محیط زیستی، تهیه نسل جدیدی از فیلترهای تصفیه با ظرفیت بازدهی بالا حذف آلودگی ها مورد توجه و نظر همگان قرار گرفت؛ بنابراین فناوری ها و صنایع جدید در تصفیه هوا مورد استفاده قرار گرفتند.

نانو الیاف به عنوان یکی از این فناوری ها برای صنایع فیلتری موجود که از بی بافت میکرو گلاس یا پارچه های متخلخل ماکرو استفاده می کنند، شناخته شده اند. مواد حاوی نانو الیاف به دلیل سطح مخصوص بالای آن در کاربردهای تصفیه هوا بسیار مورد توجه قرار گرفته است که به آن ها امکان می دهد تا به صورت الکترواستاتیکی گردوغبار و ذرات گرده را جذب کنند و به دلیل اندازه منافذ کوچک خود به طور مؤثری ذرات خطرناک ریز را غربال می کنند؛ علاوه بر این، فرایندهای تولید نانو الیاف اغلب امکان ترکیب مولکول های عامل در الیاف را فراهم می کنند تا بتوانند ذرات هدف، ویروس ها و گاز های خطرناک را با بازدهی بیشتر جذب کنند.

پیش بینی می شد بازار کل مخصوصات نانو الیاف با رشد سالانه ترکیبی ۳۰/۳٪ از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ رشد کند و تا سال ۲۰۱۷ به درآمد جهانی ۵۷۰/۲ میلیون دلار برسد. از این میزان، ۷۴/۷٪ کل درآمدها یا ۴۲۵ میلیون دلار، در ابتدا با استفاده از نانو الیاف در تولید بستر تصفیه همراه بود، [۱۱]. بازارهای تصفیه نانو الیاف عموماً در فروش مخصوصات داخلی و خارجی مانند HEPA، HVAC و فیلترهای جمع آوری گردوغبار و همچنین ماسک های صورت شخصی که شامل طبقه بندی ساده، جراحی، طبقه بندی حفاظت تنفسی N95 و PM2.5 و ماسک های صورت با عملکرد بالا برای استفاده نظامی می باشد انجام گرفت (شکل ۱-۹).

^۱. Petryanov



شکل ۱-۹- کاربرد نانولایاف در صنایع تصفیه هوا

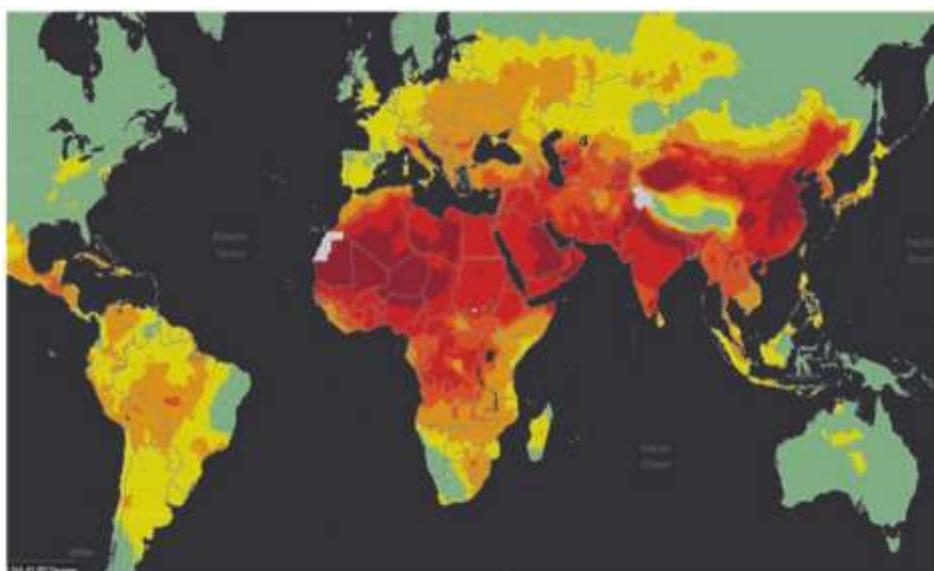
۳-۹- محرك‌های بازار برای بستر تصفیه هوا نانولیفی

بزرگترین محرك بازار برای فیلترهای هوا نانولیفی، افزایش آگاهی و نگرانی در مورد آلودگی هوا است (شکل ۳-۹). در سطح جهان، دولت‌ها متعهد هستند که کیفیت هوا موجود را از طریق فناوری‌های جدید بهبود بخشنند. در سال ۲۰۱۲، ۶۷٪ از انرژی مصرفی چین توسط نیروگاه‌های زغال‌سنگ سوخته شده بود [۱۲] و آلودگی ناشی از این نیروگاه‌ها باعث مرگ زودرس ۲۵۷ هزار نفر، ۱۴۱ میلیون روزهای بیماری و ۳۴۰ هزار نفر ویزیت بیمارستانی در سال ۲۰۱۱ است [۱۳]. در مناطقی که از آلودگی هوا رنج می‌برند غلظت PM 2.5 در آن زیاد است (که شامل ذرات گردوبغار، گازهای فرار، ویروس و باکتری‌هایی که قطر آن بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرومتر نیست)، عموم مردم اغلب به اقدامات احتیاطی شخصی و پوشش ماسک صورت در حین رفت‌وآمد تشویق می‌شوند. درنتیجه بازار چین یکی از اهداف اصلی برای تولیدات ماسک صورت و سیستم تصفیه هوا مسکونی است. چین حدود ۲۷۷ میلیارد دلار برای مقابله با آلودگی هوا سرمایه‌گذاری کرده است، در درجه اول در مناطقی که تحت تأثیر میزان بالای آلاینده‌های PM 2.5 قرار دارد [۱۴]. چین بزرگترین بازار مصرف‌کننده برای کیفیت هوای داخلی^۱ (IAQ) است، بعد از آن آمریکا، انگلیس و سایر کشورهای آسیایی و جذب سریع در سایر مناطق طی ۵ سال آینده پیش‌بینی

^۱. indoor air quality (IAQ)

می‌شود. از طرف دیگر، سرویس‌های متصل آمریکا تلاش می‌کنند تا فرایندهای آزمون کیفیت هوای استانداردسازی کنند و توسعه و تجاری‌سازی نسل بعدی فیلتراسیون با بازدهی تصفیه بالا و افت فشار پایین را مورداستفاده قرار دهند. بازار IAQ در کشور آمریکا بیش از ۷/۷ میلیارد دلار در سال ۱۳۰۲ سرمایه‌گذاری کرد و تخمین زده شده بود تا به رشد ۸/۱ میلیارد دلار در سال ۱۴۰۲ میلیارد دلار در سال ۱۹۰۲ با رشد سالانه ۷٪ بعد از ۵ سال برسد [۱۵]. بر طبق اطلاعات آژانس محافظت محیط‌زیست^۱ (EPA)، اکثر شهروندان آمریکا نزدیک به ۹۰٪ وقتی‌شان را در محیط‌های بسته درونی مانند خانه، محل کار، کلاس‌های درس و دیگر محیط‌های مدارس می‌گذرانند. این آژانس تخمین زده است که سطح آلودگی‌های هوایی در محیط‌های بسته درونی ۲ تا ۳ برابر بیشتر و گاهی اوقات هم تا ۱۰۰ برابر بیشتر از سطح آلودگی‌های بیرون است [۱۵].

اگرچه بازارهای IAQ توسط آگاهی عمومی هدایت می‌شوند، وخیم‌تر شدن آلودگی هوای تأثیرات ضرر آن بر سلامتی و رفاه باعث شده تا رشد جدی در بازار ماسک صورت مصرف کننده که شامل PM 2.5 و ماسک‌های جراحی است ایجاد شود.



شکل ۲-۹- نقشه جهانی شامل سطوح آلودگی هوایی. نسبت بالایی از نقشه حاضر توسط رنگ‌های زرد، نارنجی، قرمز و سبز برای نمایش بزرگی محدوده‌های سازمان بهداشت جهانی در این خصوص، مشخص شده است. رنگ‌های زرد و سبز نشان‌دهنده سطح پایین آلودگی هوایی و همین‌طور رنگ قرمز نشان‌دهنده سطح بالای آلودگی هوای مناطق می‌باشند. (گزارش شده توسط سازمان بهداشت جهانی WHO^۲)

^۱. Environmental Protection Agency (EPA)

^۲. World Health Organization (WHO)

۴-۹- بستر تصفیه هوا

مواد آلوده‌کننده هوا شامل ترکیبی از ذرات و گازهای مانند ترکیبات آلی فرار (VOCs)، گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید، ازن، ویروس‌ها، گردوغبار، دوده و غیره می‌باشند. هیدروکربن‌های آروماتیک پلی سیکلی (PAHs) موردي دیگر از آلوده‌کننده هوايی سمی می‌باشند و توسط سوخت ناقص مواد آلی تولید می‌شوند [۱۶، ۱۷].

ذرات گردوغبار یا پاتوژن‌ها معمولاً به صورت مایعات یا مواد جامد یا ترکیبات آن‌ها اتفاق می‌افتد؛ به عنوان مثال، ذرات گردوغبار و پاتوژن‌ها هنگامی که به سطح بستر تصفیه که توسط رطوبت اتمسفر یا از رطوبت ناشی از تنفس انسان مروط شده است اصابت می‌کند، یک فاز خارجی مایع ایجاد می‌کند؛ بنابراین یک تنفس بین سطحی بین ذره و بستر فیلتر ایجاد می‌شود.

این پیچیدگی‌های ترکیبات آلینده‌های هوایی سبب شده است تا تقاضا برای یک بستر تصفیه با بازدهی بالا، شامل لایه‌های متفاوت برای جذب ذرات با اندازه، فرم و ترکیب متفاوت افزایش یابد. متأسفانه، بستر چندلایه‌ای فیلتر معمولاً توسط تنفس پذیری ضعیف و افت فشار زیاد که برای فیلترها نامطلوب است محدود می‌شود؛ بنابراین محققان در پی ارتقای بستر تصفیه نanolify تک لایه چندعاملی هستند تا تنفس ضعیف از فیلترهای چندلایه‌ای را کاهش داده و همین‌طور بازدهی تصفیه را افزایش دهنند. این امکان وجود دارد که نانوالیاف با مساحت سطحی ذاتی بالا که به شکل شیمیایی اصلاح شده است و توسط گروه‌های متفاوت عامل‌دار شده است را به منظور جذب مقدار بیشتر و محدوده‌ی وسیع‌تر از آلودگی‌ها مورداستفاده قرار داد. استفاده از نانوالیاف برای تصفیه انواع مختلف آلودگی‌ها در زیر بحث شده است.

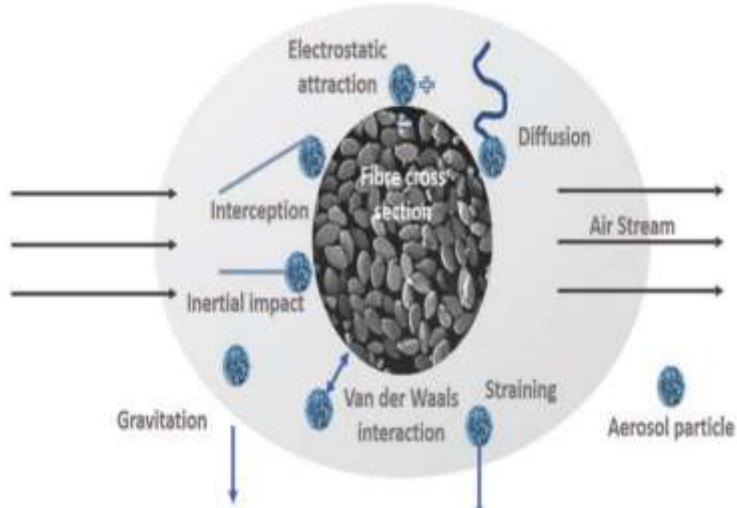
۴-۹-۱- ذرات معلق موجود در آلودگی هوا

ذرات معلق (PM) مجموعی از ذرات جامد و مایع معلق می‌باشند که خیلی از آن‌ها خطربناک هستند. ذرات معلق کوچکتر، به طور خاص PM2.5 شامل ذرات کوچکتر از $2/5$ میکرون هستند و به اندازه‌ای کوچک هستند که به درون ریه نفوذ کنند و در عملکرد کلی ریه آسیب جدی برسانند. عموماً، تصفیه ذرات معلق به دو طریق تصفیه سطحی و تصفیه عمقی صورت می‌گیرد. به طور ساده، تصفیه سطحی وقتی اتفاق می‌افتد که ذرات بسیار بزرگ هستند و نمی‌توانند از حفره‌های فیلتر عبور کنند و بر روی سطح بستر تصفیه قرار می‌گیرند. مکانیسم عمومی تصفیه سطحی شامل انتشار، رهگیری، برهم‌کنش درون‌مولکولی، فشار، برخورد ضربه‌ای، جاذبه و برهم‌کنش الکترواستاتیک ذرات بر روی سطح فیلتر می‌باشد (شکل ۳-۹). [۱۸]

انتشار و رهگیری می‌تواند مهم‌ترین مکانیسم‌های جذب ذرات نانوالیاف باشد. انتشار منجر به جذب ذرات ظریف زیر ۰,۵ میلی‌متر بر روی سطح الیاف به دلیل حرکت براونی می‌شود [۱۹، ۲۰]. در حالی که رهگیری ذرات زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله بین سطح الیاف و مرکز ذره برابر یا کمتر از شعاع ذره باشد [۱۹، ۲۰].

در صورت عدم کارایی از طریق این مکانیسم‌ها، آلودگی‌های ذرات تمایل به مسدود کردن بستر تصفیه و کاهش قابل‌توجه جریان هوا دارند. علاوه بر این ویژگی‌ها، غشاها نانولیفی دارای نیروهای وان در والس قوی هستند که آن‌ها را قادر می‌سازد ذرات با اندازه زیر میکرون را جذب کنند. اتصال خوب منافذ همچنین منجر به بهبود اثر برخورد ضربه‌ای و رهگیری ذرات می‌شود؛ علاوه بر این، پتانسیل بسیار خوبی برای اصلاح بستر تصفیه نانولیفی با استفاده از قابلیت‌های اضافی بر روی سطوح نانوالیاف وجود دارد که می‌تواند برهم‌کنش شیمیایی و جذب الکترواستاتیک با ذرات آلاینده داشته باشد.

از طرف دیگر، تصفیه عمقی زمانی رخ می‌دهد که ذرات به اندازه کافی کوچک باشند تا در منافذ بستر تصفیه قرار گیرند اما در طی جابه‌جایی آن‌ها از طریق مواد به دام می‌افتدند؛ درنتیجه، توزیع اندازه ذره و اندازه منفذ بستر تصفیه مشخص می‌کند که آیا تصفیه سطحی یا تصفیه عمقی رخ داده است؛ بنابراین، در هر دو حالت تصفیه سطحی و تصفیه عمقی، ذراتی که به اندازه کافی برای ورود به ساختار فیلتر کوچک هستند توسط برهم‌کنش‌های احتمالی با الیاف فیلتر جمع‌آوری می‌شوند. انتخاب مواد فیلتری ایده آل برای تصفیه سطح و عمق نیاز به دانش انرژی‌های بین سطحی در سطح بین الیاف و ذرات و همچنین مکانیسم‌های برهم‌کنش سطحی دارد.



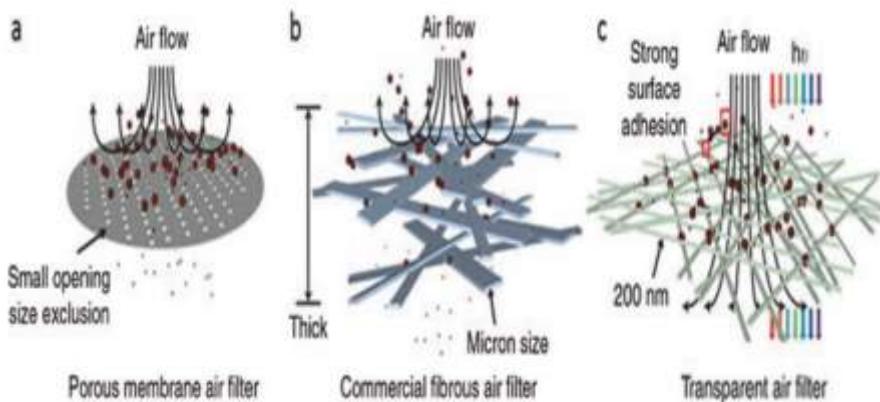
شکل ۳-۹- مکانیسم‌های تصفیه ذرات معلق

متغیرهای دیگری هم در بازدهی بستر فیلتر در جذب ذرات مؤثر هستند، از جمله‌ی این متغیرها می‌توانیم به اندازه ذرات گرد و غبار، قدرت وزش، سرعت جریان هوا و شرایط محیط‌زیستی مانند رطوبت اشاره کنیم.

در مورد فیلترهای نانولیفی هوا همان‌طور که ذکر گردید، ذرات گرد و غبار و یا بیماری‌زاهای هوا وقتی که در مقایسه با مواد نانوالیاف خشک قرار می‌گیرند، می‌توانند سطوح نسبتاً مرطوبی داشته باشند؛ بنابراین، وقتی آلودگی‌های هوایی سطح نانوالیاف را لمس می‌کنند، یک تنش بین سطحی بین مرزهای مایع-جامد یا جامد-جامد از اختلاف قطبیت فاز جامد الیاف و رطوبت ناشی از ذرات آلاینده به وجود می‌آید؛ به دلیل این تنش بین سطحی، چسبندگی بین نانوالیاف جامد و ذرات نسبتاً مرطوب افزایش می‌یابد.

این امکان وجود دارد که این برهم‌کنش‌ها و چسبندگی‌ها بین نانوالیاف و ذرات با معرفی مولکول‌های قطبی، افزایش یابد. یک نانوالیاف قطبی شامل توزیع غیریکنواخت بار بر روی ساختار مولکولی آن، تنش بین سطحی بالایی از خود در تماس با یک سطح قطبی یا غیرقطبی از یک فاز دیگر نشان می‌دهد (وقتی که با الیاف غیرقطبی مقایسه می‌شود). این پدیده نانوالیاف قطبی را برای تصفیه سطحی یا تصفیه عمیق مناسب‌تر می‌کند [۱۸].

محاسبه تنش سطحی در مرز یک نانوالیاف قطبی جامد و یک ذره نسبتاً مرطوب با استفاده از معادله یانگ برای انرژی آزاد سطح (γd)، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود. معادله یانگ، تعادل را در تماس سه فاز تماس جامد، مایع و گاز توصیف می‌کند. با این حال، این معادله به‌طور کلی برای رابطه‌ای جامد - جامد یا مایع-مایع استفاده نمی‌شود.



شکل ۴-۹- مقایسه فیلترهای هوا متفاوت. (a) نمایی از فیلتر متخلف برای جذب ذرات معلق توسط حذف اندازه‌ای آن‌ها. (b) نمایی از فیلتر هوا الیاف توده‌ای برای جذب ذرات معلق با محدودیت و چسبندگی. (c) نمایی از فیلتر هوا شفاف برای جذب ذرات معلق توسط چسبندگی قوی سطحی که اجزه عبور هوا و نور زیاد را هم می‌دهد.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta_Y$$

در این رابطه، γ_{SL} ، γ_{LV} و γ_{SV} ، تنش های بین سطحی بین فازهای مختلف است که تشکیل زاویه تماس تعادل مربوط شدن که اغلب اشاره به زاویه تماس یانگ^۱ θ_Y داد می دهد.

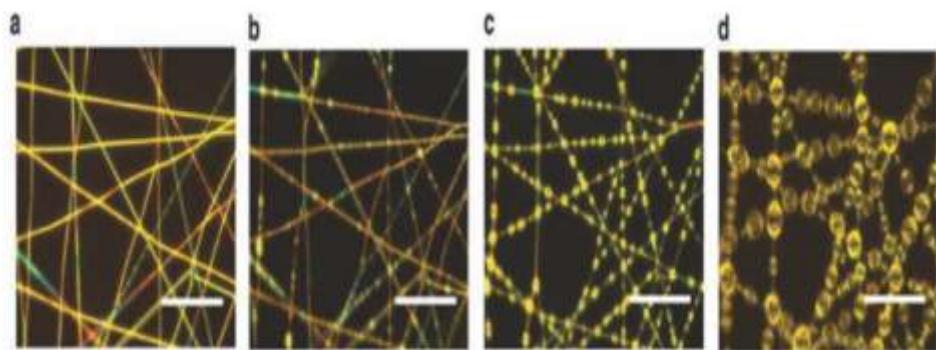
پلی اکریلونیتریل یک پلیمر قطبی است که به طور رایج در نانوالیاف فیلتری هوا استفاده می شود. ماهیت قطبی و قطر کم الیاف، پلی اکریلونیتریل را مناسب برای استفاده در ماسک های صورت برای حذف ذرات PM2.5 می کند. نانوالیاف الکتروریسی شده که از پلی اکریلونیتریل تهیی می شود همچنین قوی هستند و می توانند در برابر تبدیل به فیلترها مقاومت کنند [۲۱]. ذرات PM2.5 معمولاً باردار هستند، بنابراین می توانند توسط برهم کنش های قطبی بین نانوالیاف و ذرات PM2.5 معمولاً جاذب شوند، پیوند برقرار کنند. ذرات PM2.5 معمولاً ساختار چسبنده آمورف شبیه به کربن با هسته های شامل ماده جامد فشرده و سطح بیرونی شامل ماده آلی سبک با گروه های عاملی قطبی (C-O, C=O, C-N) دارند. در این شرایط، مواد تصفیه کننده که دارای ممان دوقطبی بالایی هستند برای جذب ذرات آلاینده مؤثرتر می باشند (شکل ۴-۹ و ۹-۵) [۲۲، ۲۳].

جینگ^۲ و همکاران اخیراً نشان دادند که ممان دوقطبی های بالا می توانند بر روی سطح نانوالیاف پلی اکریلونیتریل با افزودن مایع یونی در حالت دی اتیل آمونیوم دی هیدروژن فسفات^۳ (DEAP) تشکیل شوند [۲۳]. نانوالیاف پلی اکریلونیتریل حاصل شده، با بازدهی جذب ذرات افزایش یافته به دلیل زبری سطحی بالاتر و افزایش مرتبط با تعداد محل های جذب، آب دوست تر هستند. همچنین، این فیلترها در صد عبور هوای بالایی از خود نشان داده اند. از آنجایی که نانوالیاف پلی اکریلونیتریل تهیی شده توسط فرایند الکتروریسی اخیراً برای کاربردهای تصفیه هوا فیلتراسیون هوا در مقیاس تجاری استفاده شده اند، این روش ساده اصلاح پتانسیل بالایی برای کاربردهای تجاری می تواند داشته باشد [۲۲].

^۱. Young's contact angle

^۲. Jing

^۳. diethyl ammonium dihydrogen phosphate (DEAP)



شکل ۹-۵- در این مطالعه ذرات PM2.5 با گذشت زمان توسط نانوالیاف PAN جذب شده‌اند. این بازه‌های زمانی برای (a-d) به ترتیب ۰، ۵، ۱۲۰ و ۶۰۰ ثانیه می‌باشد [۲۲].

عموماً غشاهای فیلتری عامل دار شده بر اساس ایجاد یک تمایل برای مولکول بر پایه خواص فیزیکی، شیمیایی و یا زیستی آن‌ها می‌باشد. بر اساس لیگاندهای ویژه تشییت شده یا فاز ثانویه قرار گرفته شده در سطح، نانوالیاف قادر خواهد بود تا به صورت گزینش پذیر مولکول‌های متفاوت را جذب و جداسازی کند [۲۴].

علاوه بر بازدهی تصفیه بالا، یک فیلتر ایده آل باید توانایی تنفسی بالایی برای شخص فراهم کند. دانسیته فشرده‌گی نانوالیاف اثر زیادی بر روی توانایی تنفسی بستر تصفیه دارد. دانسیته فشرده‌گی معمولاً به سفتی اشاره دارد و حجم مواد جامد در بستر بر واحد حجم می‌باشد. استحکام متناسب تخلل می‌باشد. سفتی مواد نانوالیاف (a) توسط رابطه تجربی زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = W / (\rho Z)$$

W وزن پایه فیلتر نانوالیاف (جرم نانوالیاف بر واحد سطح فیلتر)، ρ دانسیته مواد الیاف و Z ضخامت شبکه فیلتر نانوالیاف می‌باشند.

یک نانو الیاف با دانسیته فشرده‌گی بالا، اندازه حفره‌های کوچک‌تر و توانایی تنفسی پایین‌تری را نتیجه می‌دهد، اما بازدهی تصفیه بالاتری را از خود نشان می‌دهد؛ از طرف دیگر، دانسیته فشرده‌گی پایین نانوالیاف اندازه حفره‌های بزرگ‌تر و توانایی تنفسی بالاتر را نتیجه می‌دهد، اما بازده تصفیه آن پایین‌تر می‌باشد؛ از این‌رو این امکان وجود دارد که با اجزای نانوالیاف را طوری مهندسی کنیم که متناسب با نیازهای عملکرد فیلتر باشد.

یکی دیگر از نکات مهم مربوط به طراحی نانوالیاف فیلتری تصفیه هوای پایداری حرارتی آن می‌باشد. برخی از کاربردهای فیلتر شامل تصفیه گازها و هوای داغ (مانند گاز اگزوز و سایل نقلیه) یا حتی بخارات می‌باشد. ژانگ و همکاران اخیراً نانوالیاف پلی ایمید را توسعه داده‌اند و این فیلترها

توانایی آن را دارند که تا دمای C_ع 370 از خود مقاومت نشان دهند. این فیلترها نشان داده شدند که ۹۹/۹۸٪ بازدهی حذف نسبت به ذرات با اندازه ۰/۳ میکرون دارند و نیازهای استاندارد فیلترهای با بازدهی بالا تصفیه هوا (HEPA) را برطرف می‌کنند [۲۵]. وانگ و همکاران اخیراً استفاده از ذرات SiO₂ را در نانوالیاف غشایی پلی ایمید مورد بررسی قرار داده‌اند و درنتیجه بستر تصفیه با تخلخل بالا، مرتبط شوندگی الکتروولیت عالی، هدایت یونی فوق العاده و مقاومت گرمایی مناسبی از خود نشان داد [۲۶]. البته پتانسیل بالایی برای عامل‌دار کردن سطوح نانوالیاف وجود دارد که بازدهی تصفیه و گزینش پذیری جذب این فیلترها را افزایش می‌دهد. اخیراً، کد بایوتیک^۱، یک شرکت نوآور بر اساس کاربردهای زیستی در کشور نیوزلند، در حال توسعه یک فناوری پوشش سطح منحصر به فرد می‌باشد که عامل‌دار کردن را به سطوح با یک روش ساده بدون استفاده از حللهای پیچیده انتقال می‌دهد [۲۷-۲۹]. پوشش‌های سطحی منحصر به فرد آن‌ها بر اساس سنتز مولکول‌های بر پایه لیپید که FSL^۲ نامیده می‌شوند، می‌باشد. کار حاضر شامل ارتقای این لیپیدها با انواع مختلف گروههای عاملی برای کاربردهای متفاوت می‌باشد. درنتیجه نانوالیاف اصلاح شده FSLs برای کاربردهای تصفیه هوا مورد استفاده قرار گرفتند. اسپرمن- FSL^۳ یکی از مولکول‌هایی است که برای جذب ذرات PM2.5 مورد استفاده قرار گرفت.

این یک مولکول پلی کاتیونی است که می‌تواند برهم‌کنش‌های مختلفی (اکثراً برهم‌کنش‌های دوقطبی) بین ذرات آلوده و سطح پوشش را نتیجه دهد. تابع (F) جزئی از مولکول است که دلیل چسبندگی ذرات و فاصله‌انداز^۴ و لیپید (L,S) اجزایی از مولکول هستند که حضور و فعالیت تابع جزء (F) را همانند آب‌دوستی سطح پوشش افزایش می‌دهند. ساختار اسپرمن- FSL در شکل ۶-۹ به نمایش درآمده است.

فرصت‌های زیادی برای تجاری‌سازی این روش‌های جدید برای جذب ذرات PM2.5 موجود می‌باشند. نیاز به تصفیه این ذرات در کشور چین بیشتر می‌باشد (به خصوص ماسک‌های تنفسی N95 و جراحی) و این بازار در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد. بر طبق اطلاعات تاوباو^۵ که یک پایگاه اینترنتی بر خط مشهور چینی می‌باشد، کشور چین رشد قابل توجه و افزایشی را در فروش تصفیه‌کننده‌های هوا از سال ۲۰۱۲ میلادی تجربه کرده است (شکل ۹-۷). همچنین گزارش شده است که فروش ماسک‌های صورت در چین با نرخ ۱۷۳٪ در هر هفته در حال افزایش

¹ Kode Biotech

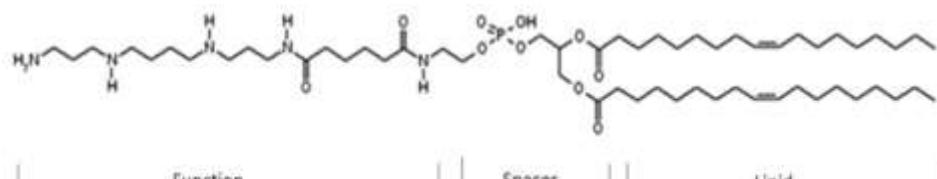
² Function-Spacer-Lipid

³ Spacer

⁴ Taobao

است. فروش محصولات تصفیه هوا البته در کشورهای دیگر مانند هندوستان، ژاپن، آمریکا، کره جنوبی و انگلستان نیز در حال افزایش می‌باشد.

نقش اساسی در بازار چین برای ماسکهای تنفسی نanolیفی جراحی، PM2.5 و N95 را ۳M دارد که بازار اشتراک ۷۰ تا ۸۰ درصدی را در بر می‌گیرد. ۲۰-۳۰ درصد باقیمانده بین بازارهای مختلف دیگر در چین تقسیم می‌شود. بازار ماسکهای صورت بدون گواهی، متعلق به تعداد زیادی از تولیدکننده‌های ماسک صورت محلی و کوچک می‌باشد.



شکل ۶-۹- ساختار مولکول اسپرمین کد^۱

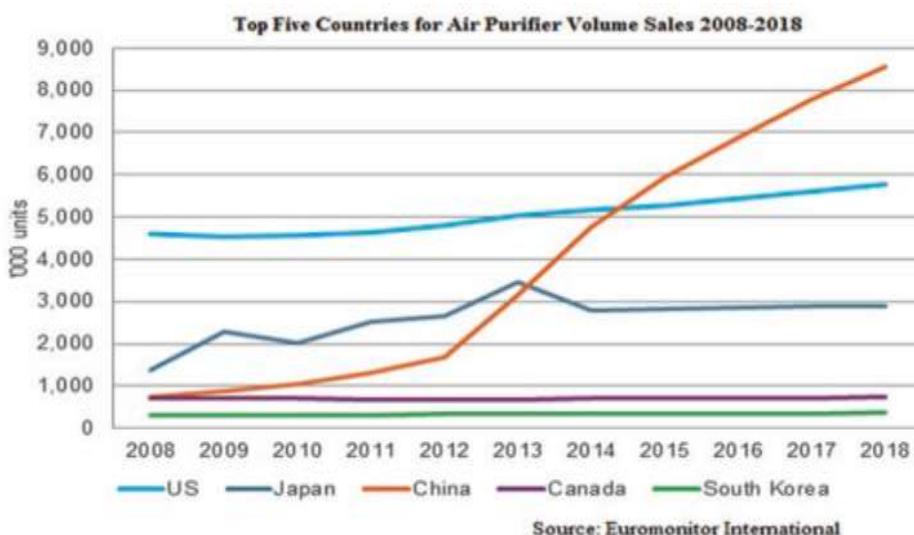
ذکر این نکته می‌تواند ضروری به نظر برسد که میزان جذب فناوری نوظهور نانوالیاف و استفاده از آن در ماسکهای صورت و کاربردهای تصفیه هوا کمتر می‌باشد و احتمالاً این به دلیل قیمت نسبی بالای مواد مورداستفاده و همچنین عدم آگاهی در بین تولیدکنندگان و مصرفکنندگان می‌باشد. به هر حال، برخی از محصولات فیلتر هوا نanolیفی توسط شرکت‌های مطرح مانند دونالدسون، کلارکور، انسیتیو مواد پیشرفته و نانو و ... تجاری‌سازی شده‌اند.

۶-۴-۹- ترکیبات آلی فرار و گازهای سمی

ترکیبات آلی فرار (VOCs) یک محدوده‌ی وسیعی از مولکول‌های آلی هستند که به عنوان یکی از عامل‌های مهم آلودگی هوا به شمار می‌روند. منابعی مانند واحدهای صنعتی، وسائل نقلیه و هوایپماها این نوع از آلودگی‌ها را به اتمسفر نشر می‌دهند که به عنوان خطری جدی برای سلامتی انسان‌ها و اکوسیستم می‌باشد [۳۱، ۳۰]. نگرانی‌های بین‌المللی به دلیل بیشتر شدن ترکیبات آلی فرار و طبیعت سمی آن‌ها، توانایی آن‌ها در جایه‌جایی زیاد و تجمع و توزیع آن‌ها در طبیعت روزبه‌روز افزایش می‌یابد [۳۲]. متان به عنوان یکی از این ترکیبات، خطر کمتری دارد، اما می‌تواند سبب گرمتر شدن کره زمین شود [۳۳] در حالی که ترکیبات خطرناک‌تر مانند بنزن وقتی که با نیتروژن اکسیدها مخلوط گردند، می‌توانند سبب تهیه دودهای فوتوشیمیایی شوند. دوده

^۱ FSL-Spermine Kode

فوتوشیمیایی یک واکنش شیمیایی از نور خورشید، نیتروژن اکسیدها و ترکیبات آلی فرار (VOCs) در اتمسفر است که تشکیل ذرات هوا (ذرات معلق) را منجر می‌شوند و به ازن آسیب جدی می‌رسانند [۳۴].



شکل ۹-۷- تخمین فروش برای مصرف‌کننده تصفیه هوا توسط تاوبالو. منبع: Euromonitor International

کربن فعال از قدیم به عنوان ماده مؤثر برای جذب ترکیبات آلی فرار و دودهای فوتوشیمیایی استفاده شده است. اکثر مواد تصفیه VOCs تجاری در دسترس شامل کربن فعال می‌باشند. در زمان‌های اخیر، سیکلودکسترنین‌ها توسط محققان برای اصلاح مواد نانوالیاف الکتروریسی شده بهمنظور جذب ترکیبات آلی فرار استفاده شده‌اند. سیکلودکسترنین‌ها از نشاسته می‌باشند و طبیعی می‌باشند و جزء الیگوساکاریدهای حلقوی به شمار می‌روند. سیکلودکسترنین‌ها شامل سه گونه α -سیکلودکسترنین، β -سیکلودکسترنین و γ -سیکلودکسترنین می‌باشند. هر کدام از سیکلودکسترنین‌ها به صورت مواد بلوری، همگن و رطوبت‌گیر می‌باشند که شامل ماکرو حلقه‌های چنبره مانند، تشکیل شده از واحدهای گلوکوپیانوز می‌باشد: α -سیکلودکسترنین تشکیل شده از ۶ واحد گلوکوپیانوز، β -سیکلودکسترنین تشکیل شده از ۷ واحد گلوکوپیانوز و γ -سیکلودکسترنین هم شامل ۸ واحد گلوکوپیانوز می‌باشند؛ به دلیل ساختار پیچیده آن‌ها، توانایی این را دارند که میزبان‌هایی برای برهمنش‌های درون‌مولکولی باشند و بنابراین کمپلکس‌های غیرکووالانسی با مولکول‌های دیگر را تشکیل می‌دهند؛ آن‌ها برای ظرفیت‌های کمپلکس شدن با مولکول‌های آلی و شیمیایی خطرناک، شناخته شده‌اند و در خیلی از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند [۳۵، ۳۶].

کایاکی^۱ و همکاران هر سه گونه اصلی سیکلو دکستربن ها را در نانوالیاف پلی استر (PET) برای جذب بخار آنیلین به کار گرفتند [۳۷]. آنها نشان دادند که الکترورسی پلی استر (PET) شامل سیکلو دکستربن خواص مکانیکی نانوالیاف را بهبود می دهد و می تواند نانو الیاف بدون دانه تسبیحی تشکیل دهد. نانوالیاف پلی استر (PET) عامل دار شده توسط γ -سیکلو دکستربن بالاترین بازدهی جذب آنیلین را در مقایسه با گونه های عامل دار شده با α -سیکلو دکستربن و β -سیکلو دکستربن از خود نشان داد. قبل از آن، محققان به طور موفقیت آمیزی نانوالیاف پلی متیل متاکریلات (PMMA) عامل دار شده توسط غلاظت های متفاوت β -سیکلو دکستربن را برای جذب بخار آنیلین، استایرن و تولوئن استفاده کردند [۳۸].

سلبیو گلو^۲ و همکاران برای اولین بار کمپلکس های شامل سیکلو دکستربن را بدون استفاده از ماتریس پلیمری حامل الکترورسی کردند و الکترورسی هیدرو کسی پروپیل- β -سیکلو دکستربن (HP β CD) و کمپلکس آن با تری کلوسان (HP β CD/triclosan-IC) موفقیت آمیز بود [۳۹]. آزمون های بیشتر برای مقایسه جذب مولکولی آنیلین و بنزن توسط HP β CD و HP γ CD صورت گرفت [۳۱]. مشخص گردید که HP β CD موفق تر در جذب ترکیبات آلی فرار می باشد و هر دو ترکیب تمایل بیشتری برای جذب آنیلین نسبت به بنزن دارند. یک خلاصه ای از تحقیقات انجام شده درباره عامل دار کردن سیکلو دکستربن برای جذب VOCs در جدول ۹-۱ آورده شده است.

دیگر فناوری نوظهور و در مقیاس تجاری برای حذف ترکیبات آلی فرار شامل استفاده از ذرات چارجوب آلی فلزی^۳ یا MOFs می باشد. این ترکیبات آلی فلزی دارای مساحت سطح فوق العاده بالا می باشند و خواص آنها می توانند برای جذب ترکیبات آلی مختلف مانند زایلن، بنزن، کلروفرم و استایرن، گازهای سمی مانند کربن مونو اکسید، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و عوامل جنگی شیمیایی مانند سومون^۴ (GD)، گاز خردل^۵ (HD)، سارین^۶ (GB) و لوئیزیت^۷ (L) اصلاح گردد.

در حالی که کربن های فعال به طور رایج دارای سابقه اثبات شده ای در جذب ترکیبات آلی فرار هستند، یکی از مشکلات موجود در اتصال مولکول های عامل به کربن برای فعال کردن محافظت از طیف مدنظر است. از آنجاکه MOFs امکان لنگر انداختن کووالانسی گروه های عاملی را فراهم می کند، می توان از آنها در جذب طبقات مختلف مواد شیمیایی استفاده کرد. فناوری MOFs در

¹. Kayaci.

². Celebioglu

³. Metal Organic Framework (MOFs)

⁴. Soman (GD)

⁵. mustard gas (HD)

⁶. Sarin (GB)

⁷. Lewisite (L)

حال دستیابی به حضور تجاری است و فناوری‌های نیو مت^۱ و گروه لیند^۲ همکاری مشترکی را برای توسعه فناوری‌های جداسازی و ذخیره‌سازی نسل بعدی مبتنی بر MOFs برای بخش صنایع گاز ایجاد کرده‌اند.

ترکیب شدن فناوری نانوالیاف و ترکیبات آلی فلزی می‌توانند منجر به نسل جدیدی از مواد تصفیه هوا عامل‌دار شده شود و مواد معلق و همچنین ترکیبات آلی فرار را حذف کنند. نشان داده شده است که مساحت سطحی نانوالیاف می‌تواند پس از استفاده از ترکیبات آلی فلزی دو برابر شود، بنابراین در صورت استفاده این مواد بازدهی تصفیه و مساحت سطح فعال نانوالیاف افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران عملکرد نانوالیاف PAN مخلوط با ZIF-8 MOFs را تحلیل کردند. مساحت سطحی BET نانوالیاف PAN با استفاده از نسبت وزنی ۶۰ درصد از نانو ذرات ZIF-8 از ۱۱۵ به ۱۰۲۴ مترمربع در گرم افزایش پیدا کرد [۴۱]. نویسنده‌گان تخمین زده‌اند که نقص‌ها و حضور غیرمتعادل یون‌های فلزی بر روی سطوح MOFs بار مثبتی را ارائه می‌دهد که می‌تواند ذرات هوا را پلاریزه کند. درنتیجه افزایش برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک افزایش می‌یابد که جذب مواد معلق و گاز گوگرد دی‌اکسید را بالا می‌برد.

^۱. NuMat Technologies

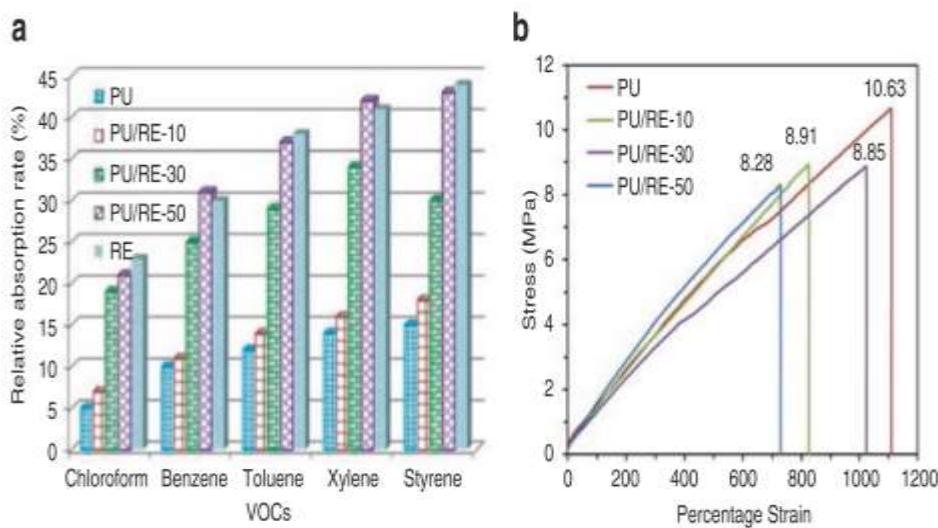
^۲. Linde group

جدول ۱-۹ - خلاصه‌ای از مطالعات شامل عامل‌دار کردن سیکلودکسٹرین‌ها برای جذب ترکیبات آلی فرار

نحوه	حلال	% سیکلودکسٹرین	میانگین قطر نانولیاف (nm)	مولکول هدف	مراجع
HP β CD/water-NF	آب	۱۶۰.	۷۴۵ \pm ۳۷.	آینیین و بنزن	[۳۹]
HP β CD/DMF-NF	DMF	۱۲۰.	۱۱۲۵ \pm ۳۶.	آینیین و بنزن	[۳۹]
HP γ CD/water-NF	آب	۱۶۰.	۴۵۵ \pm ۱۱۶۵	آینیین و بنزن	[۳۹]
HP γ CD/DMF-NF	DMF	۱۲۵	۷۲۵ \pm ۲۷۴.	آینیین و بنزن	[۳۹]
PMMA/ β -CD	DMF	۱۰	۸۹ \pm ۷۵	آینیین استایرون و تولوئن	[۴۰، ۴۱]
PMMA/ β -CD	DMF	۲۵	۷۰ \pm ۶۲۵	آینیین استایرون و تولوئن	[۴۰، ۴۱]
PMMA/ β -CD	DMF	۵۰	۷۷ \pm ۸۱۶	آینیین استایرون و تولوئن	[۴۰، ۴۱]
PET/ α -CD	TFA/DCM	۲۵	۵۶ \pm ۹۰.	آینیین	[۳۷]
PET/ β -CD	TFA/DCM	۲۵	۵۱ \pm ۸۳.	آینیین	[۳۷]
PET/ γ -CD	TFA/DCM	۲۵	۴۹ \pm ۷۹.	آینیین	[۳۷]

وقتی که در شهر پکن در محیط‌های خطرناک بررسی شد (PM_{2.5}=350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀=720 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, RH=58/6%, T=23/5°C) ZIF-8/PAN کامپوزیت نانولیفی آلی‌فلزی برای حذف ذرات PM_{2.5} و PM₁₀ مورد استفاده قرار گرفت. لایه فیلتری کامپوزیتی ZIF-8/PAN نشان داد که به صورت گزینش پذیر گازهای سمی مانند گوگرد دی‌اکسید را وقتی که در تماس با مخلوط گاز نیتروژن و گوگرد دی‌اکسید قرار می‌گیرد، با افت فشار ۲۰ پاسکال و جريان گاز ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه جذب می‌کند. پس از جذب گوگرد دی‌اکسید، فیلتر اصلاح شده چارچوب آلی‌فلزی عبور جريان گاز نیتروژن بازیابی شد که نشان می‌دهد فیلترهای اصلاح شده چارچوب آلی‌فلزی می‌توانند مورد بازیابی و استفاده مجدد قرار گیرند.

فناوری نانوالیاف مخلوط شده با چارچوب آلی‌فلزی برای جذب گاز و ترکیبات آلی فرار، می‌توانند به سادگی توسط روش‌های الکتروریسی گسترش یابند و می‌توانند بازارهای تصفیه و ماسک صورت با مواد کنترل کننده و محافظ در برابر آلودگی هوا ویژه‌ای را فراهم کنند. انواع دیگر از ذرات چارچوب آلی‌فلزی برای جذب ترکیبات آلی فرار و سایر گازهای سمی نمونه‌های زیر می‌باشند: [۴۲]UIO-66-NH, Mg-MOF-74, MOF-199.



شکل ۸-۹- (a) ظرفیت جذب ترکیبات آلی فرار متفاوت توسط نانوالیاف پلی یورتان اصلاح شده؛ (b) استحکام کششی نانوالیاف پلی یورتان با مقدار متفاوت از RE [۳۰]

کیان^۱ و همکاران اخیراً گزارش کردند که سنتز MOFs بر اساس ایندینیوم توانایی بالایی برای جذب گاز کربن دی اکسید دارد. این MOFs به صورت ساختاری مستحکم و پایدار با شبکه‌های فلزی باز هستند و پتانسیل بالایی برای فراهم کردن محلهای جذب گاز فعال در مواد نانوالیاف الکترورسی شده دارند [۴۲]؛ علاوه بر آن، ولینگیری^۲ و همکاران سه نمونه از MOFs (Eu-MOF, MOF-199) را موردبررسی قرار دادند تا ظرفیت جذب مخلوطی از ۱۴ نوع از گازهای آلی فرار و نیمه فرار را تعیین کنند. نتایج نشان داد که MOF-199 بالاترین ظرفیت جذب تعادلی در میان سه نمونه MOF-199 را دارد و حضور برهمکنش‌های قوی $\pi-\pi$ را نشان داد. اشاره شده است که قطبیت مولکول مهمنان به‌طور مؤثری رفتار جذب MOFs را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴۳]. اکسیدهای فلزات خاکی کمیاب^۳ (RE) نیز همچنین به‌عنوان مواد فعال که مناسب برای حذف ترکیبات آلی فرار هستند، معرفی شده‌اند. برخی از این اکسیدها شامل Ge_2O_3 , CeO_2 , La_2O_3 , Pr_2O_3 , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 , Er_2O_3 برای اصلاح نانوالیاف استفاده کردند [۳۰]. نویسندهان نشان دادند که افزودن پودر RE استحکام کششی نانوالیاف را افزایش داده‌اند و مهم‌تر این که ظرفیت جذب نسبت به چندین ترکیب آلی فرار را افزایش داده‌اند. شکل ۸-۹ نشان می‌دهد که افزایش غلظت RE، نرخ جذب بالاتر ترکیب آلی فرار را نتیجه می‌دهد اما نویسندهان نشان دادند که افزایش غلظت فلزات خاکی کمیاب در نانوالیاف سبب گرفتگی نازل در هنگام فرایند الکترورسی می‌شود. این اصلاح موفقیت‌آمیز نانوالیاف توسط افزودن RE، پتانسیل بالای توسعه در این زمینه و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه را پیشنهاد می‌کند.

زیست درمانی^۵ یکی دیگر از روش‌های مؤثر در حذف ترکیبات آلی فرار می‌باشد. زیست درمانی شامل تخریب زیستی آلاینده‌های آلی و تبدیل آن‌ها به کربن دی اکسید، آب، ترکیبات معدنی و پروتئین‌های سلولی و همچنین شامل تبدیل آلودگی‌های آلی پیچیده به ترکیبات آلی ساده‌تر توسط فعالیت‌های میکروبی می‌باشد [۴۴]. بلاسی^۶ و همکاران در سال ۱۶۳، ۲۰۱۶ نمونه قارچ را که عمدتاً از گروه قارچ‌های دیماتیاسئوس^۷ می‌باشند را برای حذف ترکیبات آلی فرار مانند تولوئن و هگزا دکان و ۱۲۶ PCB به‌عنوان کربن تنها و منبع انرژی برای رشد، موردبررسی قرار دادند. نتایج قابل قبول بودند، اما این تحقیق هنوز در مراحل ابتدایی است و هنوز به‌طور کامل موردبررسی قرار

¹. Qian

². Vellingiri.

³. Rare earth metal oxides

⁴. Ge and Choi

⁵. Bioremediation

⁶. Blasi

⁷. Dematiaceous

نگرفته است [۴۵]. تاکنون گونه‌های باکتری مختلفی مورداستفاده قرار گرفته شده‌اند و به طور موفقیت‌آمیزی هیدروکربن‌های آروماتیک پلی سیکلی و ترکیبات آلی فرار مانند نفتالن، فنانترن، پیرن، آنترسن و بنزوپیرن را تخریب کرده‌اند [۴۶]. اگرچه، فرایندهای زیست درمانی هنوز با نانوالیاف برای کاربردهای تصفیه فعال ترکیب نشده‌اند ولی به نظر می‌رسد که وسعت عالی برای کار بیشتر در این زمینه وجود دارد.

۵-۹- پیشرفت‌های اخیر در بستر فیلتری نانولیفی برای تصفیه آب

آلودگی‌های موجود در آب می‌توانند از چندین منبع مختلف مانند صنعت، واحدهای تصفیه پساب، حشره‌کش‌ها و زائد آب باران به وجود آیند. این آلودگی‌ها می‌توانند منشأً آلی، معدنی، رادیواکتیو یا اسیدی/بازی بازی داشته باشند [۴۷] که می‌توانند اثرات مخربی در سلامت انسان داشته باشند و سبب ایجاد بیماری‌هایی مانند اسهال، استفراغ و گاهی هم باعث برخی از سرطان‌ها شوند. سازمان بهداشت جهانی گزارش کرده است که تا سال ۲۰۱۲ هر سال ۸۴۲۰۰۰ مرگ در به دلیل اسهال اتفاق افتاده است [۴۸].

آلودگی آب را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل تحقق این آمار ترسناک قلمداد کرد. از سال ۱۹۹۰ میلادی، میزان آلودگی آب حداقل در رودخانه‌های آمریکای لاتین، آفریقا و آسیا شدیدتر شده است. از ۱/۱ میلیارد انسان بدون دسترسی به منابع آبی تصفیه شده در جهان، حدود ۸۴٪ در مناطق روستایی زندگی می‌کند [۴۹]. در این مناطق که منابع دسترسی به آب سالم کم می‌باشد، فناوری‌های تصفیه آب که هزینه و انرژی بسیاری را مصرف می‌کنند، مناسب نمی‌باشند. در چنین شرایطی، فناوری نانو می‌تواند در توسعه سیستم‌های تصفیه آب مقرر به صرفه و با مصرف انرژی کم استفاده شود. بستر تصفیه نانولیفی الکتروریسی شده به طور فزاینده‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرند و بهروش‌های مختلفی متناسب با خواسته‌های کاربردهای تصفیه آب برای حذف رنگ‌ها، فلزات سنگین، ذرات، ترکیبات آلی و میکروب‌ها اصلاح می‌شوند [۵۰].

بازار جهانی برای تصفیه کننده‌های آب در سال ۲۰۱۶ میلادی ۵۳/۳۵ میلیارد دلار آمریکا بوده و تخمین زده شده است که تا سال ۲۰۲۵ بر طبق تحقیقات اخیر بازار این مبلغ دو برابر شود [۵۱]. صنعت تصفیه آب چندین تولیدکننده مهم در تهییه محصولات نانولیفی شامل غشا پیشنهاد می‌کند. این محصولات اکثراً برای تصفیه آب از منابع غیرقابل شرب مانند آب دریا یا آب‌های ساکن استفاده می‌کنند و شامل فناوری غشایی هیبریدی دوپونت^۱ و نانوغشاهای نیتو دنکو^۲ برای

¹. DuPont[®] Hybrid Membrane Technology

². Nitto Denko[®] nanomembranes

نمک‌زدایی از آب، هالینگر ورث و وزن^۱، نانو وب^۲ برای تصفیه مایع، غشاهای تصفیه مایع HiFyber و Finetex Filtrepro Series از فیلترهای مایع می‌باشند. اگرچه فیلترهای مایع شامل غشاهای نانولیفی برای جذب آلاینده‌های مشخص مانند فلزات سنگین، رنگ‌ها، عوامل بیماری‌زا و آلاینده‌های رادیواکتیو هنوز تجاری‌سازی نشده‌اند. تحقیقات بیشتر و توسعه مواد نانولیفی می‌توانند آلودگی‌های صنعتی و فلزات سنگین را از آب آلوده رودخانه جذب و حذف کنند که به‌طور مؤثری برای دولتها سود ده خواهد بود و میلیون‌ها انسان را از بیماری‌ها نجات می‌دهد. چندین رویکرد جدید برای حذف آلاینده‌ها از آب آشامیدنی در زیر آورده شده‌اند [۴۴].

۱-۵-۹- حذف رنگ

تخمین زده می‌شود که به دلیل افزایش صنعتی شدن، سالانه ۵۰۰۰ تن رنگ در سال دفع می‌شود. صنایعی که در تولید رنگ مو، کاغذ، چرم، مواد آرایشی و منسوجات دخیل هستند، به‌طور کلی نقش عمده در تخلیه رنگ‌های مضر آلی و معدنی به سیستم‌های آب سالم را دارا می‌باشند. این آلاینده‌ها معمولاً دارای کدورت بالایی هستند، حاوی ترکیبات سمی معلق و اکسیدان‌ها هستند و در صورت عدم تصفیه، تهدیدهای جدی برای آبیزیان و زندگی انسان‌ها ایجاد می‌کنند [۵۲، ۵۳]. روش‌های تصفیه برای حذف رنگ از آب شامل جذب، انعقاد و روش‌های زیستی می‌باشد [۵۴]. حذف رنگ به دلیل ساختارهای مولکولی پیچیده و نرخ تخریب پایین آن‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد [۵۵]. غشاهای نانولیفی الکترورسی شده پتانسیل این را دارد که به‌عنوان روش‌های جایگزین حذف رنگ، مورد استفاده قرار گیرد؛ علی‌رغم داشتن حفره‌های با سایز بسیار بزرگ برای حذف بر اساس اندازه ذرات رنگ، مساحت سطح بالای نانوالیاف و توانایی عامل‌دار کردن سطوح نانوالیاف می‌تواند آن‌ها را برای حذف رنگ یک گزینه مناسب به شمار آورد [۵۶، ۵۷].

نانوالیاف سنتز شده از پلیمرهای زیستی به‌طور مؤثری به‌عنوان جاذب در حذف رنگ به دلیل مزایای زیست‌محیطی و پایداری آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵۸-۶۱]. نانوالیاف سلولز به‌طور موفقیت‌آمیزی در حذف ذرات رنگ از آب مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند و این به دلیل این است که آن‌ها شامل گروه عاملی هیدروکسیل (OH) و اکنشی در سطح خود می‌باشند و همین سبب چسبیدن مولکول‌های رنگ به آن می‌شود [۶۲].

¹. Hollingsworth and Vose

². NanoWeb

یک روش رایج برای اصلاح غشاهای سلولز شامل فرایند اکسید کردن سطح توسط (TEMPO^۱) می‌باشد [۶۲-۶۴].

اگرچه TEMPO یک ماده سمی است و استفاده از آن در مقیاس‌های بزرگ محدودیت دارد. اخیراً، یک روش بدون حلال دوست دار محیط‌زیست گزارش شده است که از اسید ملدروم^۲ برای اصلاح غشاهای پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) بر پایه سلولز، استفاده می‌شود. این روش افزایش جذب کریستال بنفس که یک رنگ با بار مثبت (کاتیونی) می‌باشد را از آب آلوده نتیجه می‌دهد [۶۵]؛ همچنین عزیز^۳ و همکاران حذف رنگ‌های با بار منفی را گزارش کرده‌اند؛ درواقع از نانوفیلترهای دولایه پلی اکریلونیتریل/ابریشم فیروئین و اصلاح‌کننده پلی آنیلین/اکسید تیتانیوم استفاده کرده‌اند [۶۶]. نانوذرات البته نشان داده‌اند که استحکام و الاستیسیته الیاف را در نانوفیلترها افزایش می‌دهند.

عامل دار کردن توسط آمین البته به عنوان یک اصلاح مؤثر برای نانوالیاف به شمار می‌رود و این به دلیل ظرفیت کی لیت شدن با آلودگی‌ها توسط گروه عاملی آمین می‌باشد [۶۷]؛ به عنوان مثال، نانوالیاف کبالت-فریت اخیراً توسط آرگینین^۴ برای تشکیل کمپلکس با رنگ‌های کاتیونی و آنیونی گزارش شده است. نشان داده شده است که جذب رنگ‌های آنیونی با افزایش pH، کاهش پیدا می‌کند و این به دلیل کاهش نیروهای جاذبه الکترواستاتیک می‌باشد. شرایط قلیایی نیز شرایط را به سمت جذب رنگ‌های کاتیونی سوق می‌دهد که دلیل آن باز منفی سطح جاذب می‌باشد. سیکلودکسترین‌ها نیز برای حذف رنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶۸، ۶۹]، چن^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی یک روش تصفیه ساده را برای عامل دار کردن نانوالیاف کربن دار توسط β-سیکلودکسترین به منظور حذف اسید فوکسین^۶ استفاده کردند (شکل ۹-۹) [۳۶].

^۱. (2,2,6,6-tetramethyl-piperidin-1-yl) oxyl

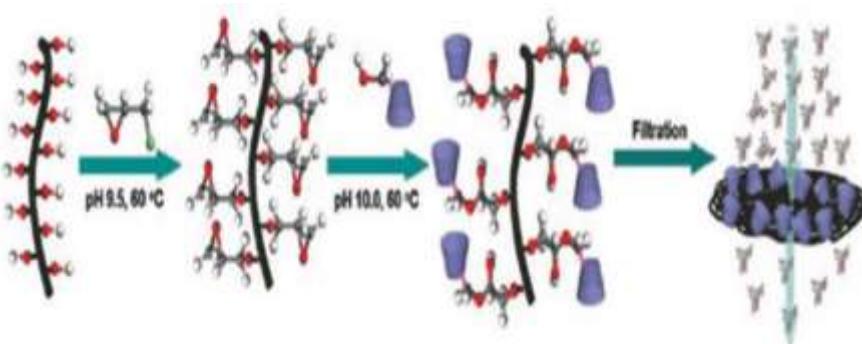
^۲. Meldrum acid

^۳. Aziz

^۴. L-arginine

^۵. Chen et al.

^۶. Fuchsine acid



شکل ۹-۹- نمایی از عامل دار کردن غشای نانولیفی کربن دار توسط β -سیکلودکسترین [۳۶]

۵-۲- حذف فلزات سنگین

فلزات سنگین عناصری هستند که وزن اتمی و دانسیته بالایی دارند. آنها ترکیبات مهم از چندین آنزیم کلیدی هستند و نقش مهمی در واکنش‌های مختلف اکسایش-احیا ایفا می‌کنند؛ با این حال، در صورت وجود بیش از حد، آنها خطرات زیادی برای سلامتی دارند. برخی از فلزات سنگین سمی شامل آرسنیک، سرب، جیوه، کادمیوم، کروم، آلومینیوم و آهن می‌باشد [۷۰، ۶۹].

روش‌های جاری برای خالص‌سازی یون‌های فلزات سنگین بر اساس مکانیسم‌های جذب یون می‌باشد. این روش‌ها معمولاً گران قیمت هستند و برای دستیابی به روش‌های مقرن به صرفه باید موردنبررسی دقیق قرار گیرد. محققان دانشگاه زوریخ یک غشای هیبریدی کربن-آمیلوئید^۱ کم‌هزینه را از ترکیب یک پروتئین دفن شده و کربن فعال به منظور تصفیه فلزات سنگین و پساب‌های صنعتی از آب ایجاد نمودند [۷۱]. این فناوری پتانسیل بالایی برای تجارتی شدن دارد؛ به‌هرحال، اکثر فیلترهای تجارتی برای تصفیه پساب بازدهی تصفیه پایینی دارند که می‌توانند توسط افزودن الیاف با قطر کمتر مانند نانوالياف الکتروریسی شده بهبود یابند.

پلیمرهای حاوی مولکولی (MIPs) ذرات پلیمری هستند که برای داشتن "حافظه" از شکل و گروه‌های عاملی یک مولکول قالب ایجاد می‌شوند؛ آنها می‌توانند به شکلی طراحی شوند که گزینش پذیری و تمایل به مولکول هدف بالایی را از خود نشان دهند و بنابراین می‌توانند در کاربردهای تصفیه هوا یا مایع برای جذب گونه‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرند. MIPs توسط تشکیل کمپلکس بین مولکول‌های قالب و مونومرهای عامل توسط برهمنکنن‌های کووالانسی و یا غیر کووالانسی سنتز می‌شوند [۷۲]؛ بنابراین گزینش پذیری بالایی نسبت به ماده مورد تجزیه دارد [۷۳]. به‌هرحال، حضور برهمنکنن‌های آب‌گریز قابل توجه بین MIPs و مولکول‌های قالب، منجر به

^۱. amyloid-carbon

آب گریزی ناشی از اتصالات غیر مشخص در محیط آبی خالص می‌شود. برای حل این مسئله، پان^۱ و همکاران MIPs را با پوسته‌های آب‌دوست خیلی نازک، سنتر کردند که نشان می‌دهد که سازگاری بالایی با آب دارد [۷۴]. لئو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تهیه پلیمرهای حاوی یون Pb(II) را با زمینه پلیمری دوجزئی آب‌دوست، گزارش کردند. این پلیمر خاصیت ضدگرفتگی بالا و اختصاصی بودن نسبت به Pb(II) را نشان داد [۴۴]. حذف آرسنیک و سلنیوم نیز توسط MIPs گزارش شده است [۷۵]؛ از این‌رو نیاز است تا مطالعات زیادی انجام شود تا عامل‌دار کردن نانولایاف الکتروریسی شده با MIPs را به‌خصوص برای حذف فلزات سنگین از پساب مورد بررسی قرار دهد. شرکت پلیمرهای لیگار^۳ یکی از اولین شرکت‌هایی در جهان است که شرایط استفاده از MIPs تجاری در مقیاس بزرگ را فراهم کردند. اخیراً استفاده از این مواد با تمایل نسبت به استرانسیوم در حال توسعه می‌باشد که هدف از آن تولید روشی مناسب برای از بین بردن ماده‌ی رادیواکتیو استرانسیوم از بندر فوکوشیما در پی فاجعه هسته‌ای ۲۰۱۱ فوکوشیما می‌باشد؛ علاوه بر این، شرکت لیگار، گزینش پذیر نسبت به کروم را برای تصفیه پساب سنتز کرد.

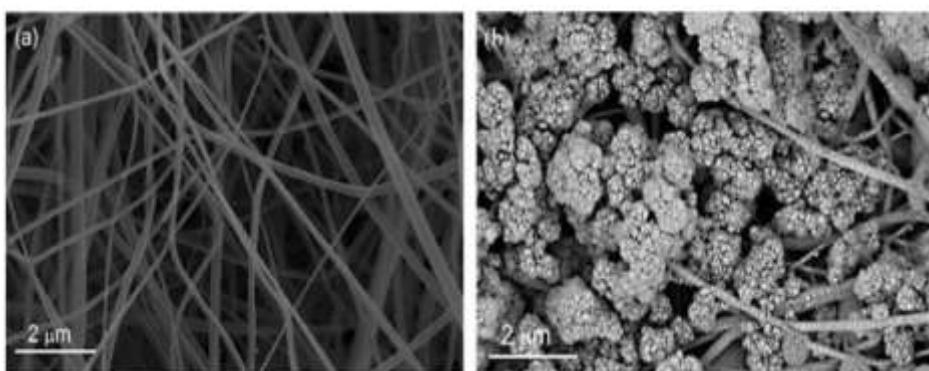
اصلاح بار یک روش رایج برای جلوگیری از ایجاد پیوند فلزات سنگین به غشاها می‌باشد؛ به عنوان مثال، محمد^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ آمین‌ها را برای اصلاح نانوذرات TiO₂ استفاده کردند تا حامل بار مثبت باشد [۷۶]؛ آن‌ها همچنین این نانوذرات اصلاح شده را برای عامل‌دار کردن PAN/CNT به منظور حذف کروم از پساب مورد استفاده قرار دادند (شکل ۹-۱۰)؛ کروم با دو حالت اکسایش مختلف Cr(III) و Cr(VI) موجود می‌باشد؛ کروم (VI) در مقایسه با کروم (III) سمی‌تر، سرطان‌زا و با جهش‌زایی بیشتر برای ارگانیسم‌های زنده می‌باشد [۷۷، ۷۸]. اصلاح بار شده، کارایی حذف قابل توجهی نسبت به کروم (VI) از خود نشان داده است. اگرچه، حذف هم به صورت دو مکانیسم جذب و احیا پیش‌بینی می‌شود و احیای کروم (VI) به کروم (III) مقدار زیادی از سمتیت این ماده را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، محمد و همکاران البته نشان دادند که ظرفیت جذب پس از ۵ دوره استفاده، در محدوده ۸۰٪ باقیمانده است که پتانسیل استفاده مجدد مناسب را نشان می‌دهد. محققان همچنین از همین غشا برای حذف موفق آرسنیک (III) و آرسنیک (V) استفاده کردند [۷۹]. اگرچه، تصاویر SEM نشان می‌دهد که حفرات غشا به شکل گستردگی پس از اصلاح مسدود شده‌اند که نشان‌دهنده این موضوع است که آن‌ها علی‌رغم تمایل خوب نسبت به فلزات سنگین، در صورت استفاده به عنوان غشاها تصفیه، عبوردهی پایینی دارد.

¹. G. Pan.

². Luo

³. Ligar Polymers Ltd

⁴. Mohamed



[۷۶] شکل ۹-۱۰- تصاویر SEM مربوط به: (a) نانوالیاف PAN-CNT/TiO₂-NH₂ و (b) PAN

در ادامه، کومار^۱ و همکاران به تازگی یک روش اصلاح اکسیداسیون ساده برای نانوالیاف پلی آنیلین/C₃N₄-g با استفاده از یک مخلوط سه‌جزئی H₂SO₄, HNO₃, H₂O₂ را به کار برند. نانوالیاف تولیدشده، یک بار مثبت بر روی سطوح آن‌ها فراهم شد که در کامپوزیت نانولیفی حاصله، ظرفیت اتصال گزینش پذیری برای کروم (VI) ایجاد کرد. اکسیداسیون با TEMPO البته می‌تواند تمایل جذب نسبت به مس (II) را افزایش دهد، همان‌طور که گروه کربوکسیلات، تمایل به یون‌های مس (II) را ایجاد می‌کند. کومار و همکاران در ادامه نشان دادند که این غشاها اکسیدشده می‌توانند برای سایر فلزات مانند نیکل (II)، کروم (III) و روی (II) مورداستفاده قرار گیرند [۸۰]. به‌حال، همان‌گونه که قبلًا بحث شد، سمیت TEMPO باید موردنظر قرار گیرد. یک خلاصه‌ای از روش‌های منتشر شده اخیر برای حذف رنگ‌ها و فلزات سنگین از آب در جدول ۹-۲ نشان داده شده است.

۳-۵-۹- حذف ضد میکروبی و اثرات ضد گرفتگی

عوامل بیماری‌زا میکروبی، دلیل به وجود آمدن بسیاری از بیماری‌ها در کشورهای توسعه‌یافته یا در حال توسعه در جهان می‌باشند. بر طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت، درصد بالایی از کودکان زیر ۵ سال که در کشورهای آسیایی و آفریقایی زندگی می‌کنند، از بیماری‌های میکروبی انتقال یافته از آب رنج می‌برند [۸۶]. در آمریکا تخمین زده شده است که حدود ۵۶۰ هزار نفر از بیماری‌های شدید ناشی از آب رنج می‌برند و ۷,۱ میلیون نفر هر سال از عفونت‌های خفیف تا متوسط رنج می‌برند و درنتیجه آن حدود ۱۲۰۰۰ مرگ در سال تخمین زده می‌شود [۸۷].

¹. Kumar

آژانس محافظت زیست محیطی آمریکا^۱، بالای ۵۰۰ عامل بیماری‌زا آب که سلامتی انسان را به خطر می‌اندازد، شناسایی کرد [۸۸].

جدول ۲-۹- خلاصه‌ای از روش‌های اخیراً منتشر شده برای حذف رنگ‌ها و فلزات سنگین از آب

سطح	عامل اصلاح‌کننده	هدف	مرجع
PAN/ فیبروئین ابریشم	پلی آنیلین / TiO_2	HFGR رنگ	[۶۶]
PVA	دی اتیلن تری آمین (DETA) اتیلن دی آمین (EDA)	قرمز مستقیم (DR23)۲۳ آبی مستقیم (DB78)	[۶۰]
PAN	دی اتیل آمین، دی اتیلن تری آمین، تری اتیلن تترآ آمین	قرمز مستقیم (DR23)۲۳ قرمز مستقیم (DR80) ۸۰	[۸۱]
نانوالیاف کبلت- فریت	(L-arginine)	DR80, BR46	[۸۲]
PVDF سلولز بر پایه	گروه‌های کربوکسیل و اسید ملدروم	بنفش کریستالی	[۶۵]
PAN/CNT	$\text{TiO}_2\text{-NH}_2$	آرسنیک	[۷۹]
PAN/CNT	$\text{TiO}_2\text{-NH}_2$	کروم (VI)	[۷۶]
پلی آنیلین/g- C_3N_4	H_2SO_4 , HNO_3 , H_2O_2	کروم (VI)	[۸۰]
PAN	آمیدینو دی اتیلن دی آمین	مس (II)، نقره (I)، آهن (II)، سرب (II)	[۸۳]
نانوالیاف سلولز	پلی اکریلیک اسید (PAA)، پلی کاتیونیک اسید (PIA)	کادمیم (II)	[۸۴]
نانوالیاف کیتین و سلولز	TEMPO	مس (II)، نیکل (II)، کروم (III)، روی (II)	[۸۵]

غشاها ای از قبل عامل‌دار شده مختلف، برای شناسایی و حذف عوامل بیماری‌زا استفاده شده‌اند که عامل‌های اصلاح‌کننده یا به‌سادگی ثبیت‌شده‌اند و یا بر اساس پیوندهای کووالانسی به غشاها متصل شده‌اند [۸۹]. انواع مختلفی از نانوالیاف الکتروریسی شده برای حذف عوامل بیماری‌زا

^۱. United States Environmental Protection Agency

موردمطالعه قرار گرفته‌اند. برخی از عامل‌های فعال که برای اصلاح سطوح نانوالیاف استفاده شده‌اند شامل نانوذرات فلزی، آنتی‌بیوتیک‌ها، تریکلوسان^۱، کلروهگریدین^۲ و بیگوانیدهای^۳ می‌باشند [۹۰]. قرار گیری نانوذرات نقره در غشاهاي تصفيه می‌تواند سبب ایجاد خواص ضد باکتری مناسب شود. استفاده از این نانوذرات نقره توجهات بسیاری را در سال‌های اخیر به دلیل خواص ضد میکروبی خیلی مؤثر آن‌ها حتی در غلظت‌های پایین به خود جلب کرده است. نانوذرات نقره همچنین غیر سمی می‌باشند، دارای تأیید FDA هستند، در محصولات تصفیه به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده‌اند و از طرفی روش سنتز آن‌ها هم ساده و ارزان می‌باشد [۹۰]. بسترهای کیتوسان-PLGA که توسط نانوکامپوزیت‌های گرافن اکسید-نقره اصلاح شده‌اند، خواص ضد باکتریایی در برابر سه نمونه از میکروارگانیسم‌ها شامل اشرشیا کلی^۴، پسئودومانوس آیروجینوس^۵ و استافیلکوک اورئوس^۶ از خود نشان داده‌اند [۹۱]. مخلوط کیتوسان با PLGA منجر به سطح پلیمری همگن‌تر می‌شود، اما مهم‌تر این است که گروه‌های عاملی سطحی آمین را فراهم می‌کند که توانایی پیوند برقرار کردن با گروه‌های کربوکسیل گرافن اکسید را دارا می‌باشند؛ علاوه بر این، مخلوط کیتوسان با PLGA نانوالیافی را تولید می‌کند که خواص مکانیکی خوبی دارد و همچنین می‌تواند در طبیعت تخریب پذیر باشد.

دوبی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۹۲] همچنین نانوذرات نقره را درون یک ترکیب پلیمری آب‌دوست-آب‌گریز شامل پلی‌اتیلن اکسید و پلی‌کاپرو‌لاکتون (PCL) قرار دادند؛ علاوه بر مقاومت ضد باکتریایی در برابر اشرشیا کولی، نانوذرات نقره همچنین قطر الیاف را از متوسط ۳۰۰-۱۵۰ نانومتر به متوسط ۱۵۰-۷۰ نانومتر کاهش داده و ناهمواری سطح را افزایش می‌دهد. یک مطالعه اخیراً توسط ناتونیا^۸ و همکاران [۹۳]، استفاده از پودر آهن کم‌هزینه را برای تکمیل استفاده از ذرات گران‌قیمت‌تر نقره، ذکر کرده است. آن‌ها برای دستیابی به نانوالیاف بدون دانه‌تسبیحی که به آن‌ها ذرات آهن و نقره اضافه می‌کردند، از نانوالیاف β -سیکلودکسترن و سلولز در نسبت غلظت پلیمری ۱:۱ استفاده کردند. غشاء نانولیفی اصلاح شده با ذرات، فعالیت ضد باکتریایی را در برابر ۱۲ نژاد باکتری بیماری‌زا نشان دادند و بیشترین فعالیت ضد باکتری را در برابر انتروكوک فکالیس^۹ و

^۱. Triclosan

^۲. Chlorhexidine

^۳. BiguanideS

^۴. Escherichia coli

^۵. Pseudomonas aeruginosa

^۶. Staphylococcus aureus

^۷. Dubey

^۸. Nthunya

^۹. E.faecalis

پروتئوس میرابیلیس^۱ نشان می‌دهد. از آنجایی که نانوالیاف با استفاده از یک فرایند احیا فتوشیمیایی UV سبزتر (دوست دار محیط‌زیست) در حضور N₂ تحت بخار آب یونیزه شده، فعال شده‌اند، می‌تواند به عنوان نمونه خوبی از یک روش سازگار با محیط‌زیست که قابلیت تجارت‌سازی دارد، مطرح شود.

گرفتگی غشا می‌تواند باعث کاهش شدید شار و کیفیت آب تصفیه‌شده شود. سیکلولد کسترنین ها غالباً به عنوان ماده ضد گرفتگی در غشاها مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا این توانایی را دارند که آب دوست بودن را تأمین کنند [۳۹، ۹۴]. آب دوستی یک خاصیت مطلوب از غشای تصفیه است که باعث افزایش نفوذ می‌شود و یک اثر ضد گرفتگی را ایجاد می‌کند؛ با این حال، روش‌هایی که غشای آب دوست تر را ایجاد می‌کند، می‌تواند پیچیده باشد. یو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک روش ساده از پوشش دهی غرقابی PVDF در یک محلول بور-کادمیوم^۳ را برای ایجاد آب دوستی بیشتر، گزارش کرده‌اند [۹۵]. غشاهای حاصله، افزایش شار آب و همچنین خواص ضد گرفتگی قابل توجه را نشان دادند. روش‌های مشابهی را می‌توان برای بستر تصفیه نانولیفی الکتروریسی شده عامل دار، اتخاذ کرد.

۶-۹- دیدگاه و جمع‌بندی نویسنده

افزایش جمعیت انسانی، رشد صنعتی و نابودی محیط‌زیست باعث آلودگی هوا و آب در سراسر جهان شده است. در سال‌های اخیر، بشر از تهدیدات فزاینده‌ی سلامتی که مرتبط با این آلودگی می‌باشد و می‌تواند بروزندگی در محل کار، خانه و کل زندگی روزمره ما تأثیر بگذارد آگاه شده است. نقش تصفیه، یک اقدام پیش‌گیرانه مهم برای کمک به پاک‌سازی و مبرا از آلودگی دو مورد از ضروریات زندگی، یعنی هوا و آب می‌باشد. این یک صنعت فوق العاده مهم است که تقریباً در تمام جنبه‌های زندگی و صنعت تأثیر دارد. فیلترهای هوا نانولیفی چندین سال است که به بازار عرضه شده و قدمت آن به دهه ۱۹۳۰ برمی‌گردد.

این یک موضوع جالب از فناوری "فراموش شده" است که بر موج "فناوری نانو" سوار شده است و در حوزه‌های تحقیق دوباره کشف شده است. اکنون، نانوالیاف یکی از پیشروترین و گستره‌ترین حالت از فناوری نانو می‌باشد. در حالی که این مفهوم چیز جدیدی نیست، صنعت تصفیه با افزایش تقاضای آب و هوای تمیز، روند صعود ناگهانی در رشد نانوالیاف را شاهد می‌باشد. وقتی که آگاهی درباره عواقب آلودگی در سلامت انسان بیشتر می‌شود، به همان نسبت تقاضا برای محافظت نیز

^۱. P. mirabilis

^۲. Yu

^۳. boroncadmium solution

بیشتر خواهد شد. نانوالیاف اکنون به شکل گسترهای به عنوان روش مؤثر در متوقف کردن آلاینده‌های زیر میکرومتر با یک اثر حداقلی در انرژی افت فشار پذیرفته شده است.

صنعت نانوالیاف بدون چالش نمی‌باشد. الکترورسی احتمالاً موفق‌ترین روش برای تولید نانوالیاف در مقیاس آزمایشگاه و تولید انبوه می‌باشد. فرایند الکترورسی برای اینکه از نظر تجاری مناسب باشد، باید بتواند نانوالیاف را با حجم به اندازه کافی زیاد و با هزینه به اندازه کافی کم تولید کند تا بتواند در مقایسه با محصولات یا فناوری‌های جایگزین موجود قابلیت تجاری‌سازی داشته باشد. به منظور رقابت با منسوجات موجود (و فیلم‌های خاص)، نانوالیاف باید عملکرد متمایز یا مزایای تولیدی نظیر:

- بهبود در مساحت سطحی، تخلخل و ضخامت یا وزن کاهش یافته
- استفاده از مواد و افزودنی‌های عامل که در برابر روش‌های تهیه الیاف متداول مقاومت نمی‌کند (به عنوان مثال روش دمتش مذاب یا اکستروژن)
- منسوجات یا غشاها به اندازه کافی کوچک باشند که در دستگاه‌های مینیاتوری مورد استفاده قرار گیرند (به عنوان مثال فیلترهای شخصی، الکترونیک، وسایل پزشکی و غیره).

فیلترهای هوا نanolيفی چند سالی است که وارد بازار شده است. تولیدکنندگان اصلی عبارت‌اند از: Ultraweb، Exceed، Donaldson، eSpin Technologies، Hollingsworth & Voses، Nanoweb و HVAC نیازهای صنعتی اختصاص یافته‌اند. در بازارهای ماسک صورت PM 2.5، چشم‌انداز تهیه‌کنندگان بسترها نanolيفی به طور فزاینده‌ای رقابتی‌تر می‌شود. نانوالیاف پلیمری استاندارد معمولاً در دستیابی به بازدهی تصفیه ۹۹٪ برای اندازه ذرات در محدوده ۱ میکرون تا ۱۰ میکرون متتمرکز شده‌اند، اما برای حذف ذرات کوچک‌تر که به ریه آسیب می‌رسانند، به لایه‌های اضافی نیاز است. اگرچه اضافه کردن لایه‌های اضافی به طور معمول منجر به کاهش تنفس پذیری و راحتی می‌شود.

نانوالیاف می‌توانند با مقاومت کمتر در برابر جریان هوا، محافظت بیشتری را ارائه دهند. ماسک‌های نanolيفی شامل Respilon mask، NASK from NAMI، Finetex و Technoweb masks می‌باشد.

محصولات موجود مانند VOG Mask و Metamasks نیز در حال معرفی نانوالیاف به محدوده‌ی آن‌ها می‌باشند. فیلترهای مایع با استفاده از نانوالیاف نیز که با شرکت‌های Dupont و Esfil Tehno (استونی) که انواع مختلفی از فیلترها و غشاها را ارائه می‌دهند، محصول جدیدی نمی‌باشند. به تارگی، شرکت تازه تأسیس Liquidity Nanotech سرمایه قابل توجهی را از طریق

پیشنهاد فیلتر "Naked" به بازار جمع‌آوری کرده است که درواقع یک نی نوشیدنی است که با استفاده از یک غشای نانولیفی آلودگی‌ها را از آب تصفیه می‌کند.

فهرستی از پلیمرهای مورداستفاده در تصفیه در جدول ۹-۳ آورده شده است.

به نظر نویسنده، مرحله بعدی رشد در کاربرد، تهیه‌ی فیلترهای "هوشمند" می‌باشد که با استفاده از مواد فعال، آلاینده‌های مربوطه (VOC، میکروب‌ها و ویروس، فلزات سنگین و غیره) را به صورت انتخابی جذب می‌کنند. نمونه‌هایی از مواد افزودنی کاربردی شامل، نانوذرات (نقره، پلاتین)، چارچوب‌های آلی فلزی، پلیمرهای حاوی مولکول و زیست فعال‌ها می‌باشند. این مواد فعال بسیار مؤثر هستند اما به طور گستردگی در تصفیه مورداستفاده قرار نمی‌گیرند زیرا آن‌ها هنوز به صورت منسوج (بی‌بافت) وجود ندارند. این امر باعث می‌شود تا تبدیل آن‌ها به فیلترها و بهره‌برداری از مساحت سطحی بالا آن‌ها که طبیعتاً وجود دارد، دشوار باشد. آن‌ها همچنین با افزایش طول عمر فیلتر و بهبود بازدهی انرژی، بارگذاری اضافی و گرفتگی زیستی فیلترها را حل می‌کنند. هر جا که تصفیه موردنیاز باشد، نانوالیاف نقش قابل توجهی را ایفا می‌کنند. استفاده از الیاف ظریفتر برای ایجاد تنفس پذیری بیشتر یا استفاده از انرژی کمتر، یک عامل جذاب می‌باشد. زمانی که مقیاس تولید افزایش و هزینه‌ها کاهش یابد، نانوالیاف خواهد توانست به شکل گستردگی استفاده شود. الکتروریسی از طرف دیگر فرایندها مانند اکستروژن و دمش مذاب در حالتی که پیشرفت‌هایی برای تولید الیاف با قطر کوچک‌تر داشته باشند، با چالش‌هایی روبرو خواهد شد. هر روش که باشد، نانوالیاف یک فناوری برجسته برای تصفیه با وسعت زیادی برای توسعه آینده است - همه به نفع و امنیت بشر است.

جدول ۹-۳- فهرست پلیمرهای رایج تجاری استفاده شده در تصفیه هوا و آب

نحوه نویسنده	دماهی بیشینه	خاص	مواد استفاده	پلیمر
هزینت اصلی که تخریب پذیری و عدم حلالیت آنها می‌باشد باعث می‌شود از PCL برای تصفیه هوا و آب استفاده شود. بالیک حال، به دلیل پایین بودن نقطه ذوب، نسی توان از PCL در شرایط دمای بالا استفاده کرد.	۶۰°C	نانوالیاف چسبنده	تصفیه در دمای پایین [۹۸]	PCL پلی کاربو لائتون
PEO با داشتن نقطه ذوب کم و حلایت در آب، موارد مصرف / میله‌سازی پذیری محدودی دارد، اما می‌توان از آن در تصفیه هوا استفاده کرد. PEO بیشتر در ترکیب با سایر پلیمرها برای ایجاد یک بستر نانوفیلی کامپوزیت استفاده می‌شود.	۵۵°C	نانوالیاف کمی بلند	تصفیه هوا در دمای پایین [۹۹]	PEO پلی اتیلن اکسید
PVDF به دلیل غیر محلول بودن، عدم تحرک (خنکی بودن) و تخلخل آنها در بسیاری از فیلترهای آب مقیاس پذیر است و در حال حاضر مواد استفاده قرار می‌گیرد. PVDF را می‌توان با محلول‌های خورنده و در دماهای نسبتاً زیاد استفاده کرد که آن را برای تصفیه بسیار مفید می‌کند. علاوه بر این، PVDF به راحتی بخار آب را بدون از دست دادن بازدهی تصفیه، پخش می‌کند.	۱۷۷°C	نانوالیاف چیلی چسبنده پوشش (پایس) [۵۰]	تصفیه هوا و تصفیه آب. تصفیه از طریق پلی ونیلیدن فلوراید	PVDF

ادمه جدول ۹-۳- فهرست پلیمرهای رایج تجاری استفاده شده در تصفیه هو و آب

نطرات نویسنده	دماي ييشينه	مواد استفاده	خواص	پلimer
TPU در حال حاضر در برخی از ماسکهای صورت تجاری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. باین حال، به دلیل استفاده از حلال‌های سسمی برای الکتروریسی، تولید پلیمر در مقیاس صنعتی کار سختی است. به طورکلی، روش الکتروشیمیایی مذاب برای نانوایاف TPU استفاده می‌شود. TPU دارای افت فشار متوجه و بسیار الاستیک است. شبکه نانولیفی حاصله از آن درجه در $^{\circ}\text{C}$ محدوده $220\text{ تا} 255$ دارد. محظوظ است که در کاربردهای فشار بالا شناخته می‌شود که دلیل آن غلبه این است که در کاربردهای فشار بالا شناخته می‌شود که دلیل آن غلبه نیروهای الاستیک بر هو/ماخ می‌باشد که باعث بارشدن و افزایش اندازه مخالف می‌شوند.	براساس نوع و درجه در $^{\circ}\text{C}$ محدوده $220\text{ تا} 255$	نانوایاف خیلی تصوفیه هو و آب [۱۰۰، ۵۰]	TPU الاستیک پلی یورتان ترموملاستیک	پلیمر
PVAc می‌تواند برای تصفیه هو موثر باشد [۱۰۱]. باین حال، به دلیل پایین بودن نقطه ذوب باید از به کار بردن در دمای بالا جلوگیری شود. با توجه به محدودیتهایی که دارد، کاربرد گستردگی ندارد.	تصوفیه هو در دمای پایین [۱۰۱]	نانوایاف بند	تصوفیه هو در پلی وینیل استات	PVAc
PES به دلیل وجود نکله ذوب بالا برای تصفیه در دمای بالا مؤثر است. PES نسبت به بسیاری از حلال‌ها بسیار مقاوم است و همچنین بازدهی تصفیه بالا و افت فشار پایین را راهی می‌کند.	تصوفیه هو در بلند مایع [۱۰۲]	نانوایاف کمی	تصوفیه هو در بلند مایع	PES پلی اتر سولفون

ادامه جدول ۹-۲- فهرست پلیمرهای رایج تجاری استفاده شده در تصفیه هوا و آب

پلیمر	مواد استفاده	خواص	دماع پیشینه	نظارات نویسنده
PAN پلی اکریلو نیتریل	تصفیه هوا و مالیع در دمای بالا [۱۰۳،۹۷]	نانولاف چسبنده	> ۳۰۰	PAN در حال حاضر در صنعت موراد استفاده قرار می‌گیرد و مقیاس پذیر است. بسیار متخلخل است و در فیلترهای غشایی استفاده می‌شود. همچنین در دمای بالا پایدار است و این ویژگی آنها را برای بسیاری از کاربردها مطلوب می‌کند. مقیاس پذیر است و عموماً برای فیلترهای غشایی برای خالص ساری زیست پر شکی می‌سیالات استفاده می‌شود.
استات سلولز	تصفیه هوا و مالیع [۱۰۴]	نانولاف کمی بلند	۲۴۰ تا ۲۶۰ °C	استات سلولز با توجه به طیف وسیعی از وزن‌های مولکولی و درجه‌های مختلف که موجب تغییر شبکه نانولیپی حاصله می‌شوند، مقیاس پذیری آن چالش برانگیز است. این پلیمر می‌تواند برای تصفیه آب با شار بالا مناسب باشد [۱۰۴]. اگرچه برای کاربردهای که شامل اسیدها یا قلیاهای غلیظ می‌باشد، مناسب نیست.

تشکر و قدردانی

نویسنده‌گان تمایل دارند از پروفسور استیو هنری، مدیرعامل شرکت کد بیوتک^۱ در دانشگاه صنعتی اوکلند به خاطر نظرات و پیشنهادهای وی تشکر کنند. ما همچنین می‌خواهیم از مؤسسه نوآوری کالاچان^۲ در نیوزلند نیز برای پشتیبانی گستردۀ و حمایت مالی آن‌ها تشکر کنیم.

مراجع

- [1]. Dai J et al (2015) Ambient air pollution, temperature and out-of-hospital coronary deaths in Shanghai, China. Environ Pollut 203:116-121.
- [2]. Qiu H et al (2015) Air pollution and mortality: effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a case-only study. Environ Pollut 199:192-197.
- [3]. Kampa M, Castanas E (2008) Human health effects of air pollution. Environ Pollut 151:362-367.
- [4]. Barhate R, Ramakrishna S (2007) Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials. J Membr Sci 296:1-8.
- [5]. Pulliero A et al (2015) Genetic and epigenetic effects of environmental mutagens and carcinogens. Biomed Res Int 2015.
- [6]. Kannan B, Cha H, Hosie IC (2016) Electrospinning: commercial applications, challenges and opportunities. In: Fakirov S (ed) Nano-size polymers: preparation, properties, applications. Springer International, Cham, pp 309-342.
- [7]. Doshi J, Reneker DH (1995) Electrospinning process and applications of electrospun fibers. J Electrost 35:151-160.
- [8]. Bhattacharjee P et al (2014) Electrospinning: how to produce nanofibers using most inexpensive technique? An insight into the real challenges of electrospinning such nanofibers and its application areas. Int J Biomed Adv Res Online J 5:2229-3809.
- [9]. Hayes TR, Hosie IC (2015) Turning Nanofibres into products: electrospinning from a manufacturer's perspective. In: Electrospinning for high performance sensors. Springer, Cham, pp 305-329. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11111-1_12.
- [10]. Teo WE, Ramakrishna S (2006) A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. Nanotechnology 17:R89-R106.
- [11]. Margaretha G (2013) Global market and technologies for nanofibres. BCC Research.
- [12]. Chen Z et al (2013) China tackles the health effects of air pollution. Lancet 382(9909):1959-1960.

¹. Kode Biotech

². Callaghan Innovation

- [13].Christine O (2013) Unearthed, in Unearthed: Greenpeace <http://energydesk.greenpeace.org/2013/12/12/map-health-impact-chinas-coal-plants/>. Greenpeace, UK.
- [14].Quigley JT (2013) Chinese government will spend \$277 billion to combat air pollution. In: The Dipolmat. The Dipolmat.
- [15].Andrew M (2014) U.S. Indoor Air Quality Market, B. Reaserch, Editor. United Kingdom.
- [16].Ravindra K, Sokhi R, Van Grieken R (2008) Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. *Atmos Environ* 42:2895–2921.
- [17].Wania F, Mackay D (1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ Sci Technol* 30:390A–396A.
- [18].Young Chung H (2007) Donalson Co., I., Book review: *Electrospinning of micro and nanofibers: fundamentals in separation and filtration processes*, in 2008 special bulletin. *Journal of engineered fibres and fabrics*: Minneapolis, p 2.
- [19].Mukhopadhyay A (2010) Pulse-jet filtration: an effective way to control industrial pollution Part II: process characterization and evaluation of filter media. *Text Prog* 42:1–97.
- [20].Spurný KT (1998) Advances in aerosol filtration, p 533.
- [21].Yao J, Bastiaansen C, Peijs T (2014) High strength and high modulus electrospun nanofibers. *Fibers* 2:158–186.
- [22].Liu C et al (2015) Transparent air filter for high-efficiency PM2.5 capture. *Nat Commun* 6:6205.
- [23].Jing L et al (2016) Electrospun polyacrylonitrile–ionic liquid nanofibers for superior PM 2.5 capture capacity. *ACS Appl Mater Interfaces* 8:7030–7036.
- [24].Homaeigohar S, Zillohu AU, Abdelaziz R, Hedayati MK, Elbahri M (2016) A novel nanohybrid nanofibrous adsorbent for water purification from dye pollutants, p 16.
- [25].Li L et al (2017) Three-layer composite filter media containing electrospun polyimide nanofibers for the removal of fine particles. *Fibers Polym* 18:749–757.
- [26].Wang Y et al (2017) A nano-silica modified polyimide nanofiber separator with enhanced thermal and wetting properties for high safety lithium-ion batteries. *J Membr Sci* 537:248–254.
- [27].Barr K et al (2016) Biofunctionalizing nanofibers with carbohydrate blood group antigens. *Biopolymers* 105(11):787–794.
- [28].Blake D, Bovin N, Bess D, Henry SM (2011) FSL constructs: a simple method for modifying cell/virion surfaces with a range of biological markers without affecting their viability. *J Vis Exp* (54):1–9.

- [29].Williams E et al (2016) Ultra-fast glyco-coating of non-biological surfaces. *Int J Mol Sci* 17(1):E118.
- [30].Ge J, Choi N (2017) Fabrication of functional polyurethane/rare earth nanocomposite membranes by electrospinning and its VOCs absorption capacity from air. *Nanomaterials* 7:60.
- [31].Celebioglu A et al (2016) Molecular entrapment of volatile organic compounds (VOCs) by electrospun cyclodextrin nanofibers. *Chemosphere* 144:736–744.
- [32].Srivastava A, Mazumdar D (2011) Monitoring and reporting VOCs in ambient air. In: Mazzeo NA (ed) Air quality monitoring, assessment and management.
- [33].Boucher O et al (2009) The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation. *Environ Res Lett* 4:044007.
- [34].Rani B et al (2011) Photochemical smog pollution and its mitigation measures. *J Adv Sci Res* 2:28–33.
- [35].Szejtli J (1998) Introduction and general overview of cyclodextrin chemistry. *Chem Rev* 98:1743–1754.
- [36].Chen P et al (2011) Carbonaceous nanofiber membrane functionalized by beta-cyclodextrins for molecular filtration. *ACS Nano* 5:5928–5935.
- [37].Kayaci F, Uyar T (2014) Electrospun polyester/cyclodextrin nanofibers for entrapment of volatile organic compounds. *Polym Eng Sci* 54:2970–2978.
- [38].Uyar T et al (2010) Cyclodextrin functionalized poly(methyl methacrylate) (PMMA) electrospun nanofibers for organic vapors waste treatment. *J Membr Sci* 365:409–417.
- [39].Celebioglu A, Uyar T (2011) Electrospinning of polymer-free nanofibers from cyclodextrin inclusion complexes. *Langmuir* 27:6218–6226.
- [40].Uyar T et al (2010) Cyclodextrins: comparison of molecular filter performance. *ACS Nano* 4:5121–5130.
- [41].Zhang Y et al (2016) Preparation of nanofibrous metal-organic framework filters for efficient air pollution control. *J Am Chem Soc* 138(18):5785–5788.
- [42].Qian J et al (2017) A microporous MOF with open metal sites and Lewis basic sites for selective CO₂ capture. *Dalton Trans* 46(41):14102–14106.
- [43].Vellingiri K et al (2016) Metal organic frameworks as sorption media for volatile and semi-volatile organic compounds at ambient conditions. *Sci Rep* 6:27813.
- [44].Luo X et al (2017) Selective removal Pb(ii) ions form wastewater using Pb(ii) ion-imprinted polymers with bi-component polymer brushes. *RSC Adv* 7(42):25811–25820.

- [45].Blasi B et al (2016) Pathogenic yet environmentally friendly? Black fungal candidates for bioremediation of pollutants. *Geomicrobiol J* 33(3-4):308-317.
- [46].Biswas B et al (2015) Bioremediation of PAHs and VOCs: advances in clay mineral-microbial interaction. *Environ Int* 85(Supplement C):168-181.
- [47].Modesti M, Boaretti C (2016) Encyclopedia of membranes, p 1-3
- [48].World Health Organization (2012) Global Health Observatory Data. Retrieved March 22, 2018, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/en/>.
- [49].World Health Organization (2006) Meeting the MDG drinking water and sanitation target: the urban and rural challenge of the decade. Geneva.
- [50].Nasreen SAAN et al (2013) Advancement in electrospun nanofibrous membranes modification and their application in water treatment. *Membranes* 3:266-284.
- [51].Water Purifier Market (Technology - Gravity Purifiers, RO Purifiers, UV Purifiers, Sediment Filters, and Water Softener; End-User - Industrial, Commercial, and Household; Accessories - Pitcher Filter, Under Sink Filter, Shower Filter, Faucet Mount, Water Dispenser, Replacement Filter, Countertop Filters, and Whole House Filters) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2017-2025 (2017) In: Technology & Media, USA.
- [52].Doğan M, zdemir Y, Alkan M (2007) Adsorption kinetics and mechanism of cationic methyl violet and methylene blue dyes onto sepiolite. *Dyes Pigments* 75:701-713.
- [53].Pan Y et al (2016) Fabrication of highly hydrophobic organic-inorganic hybrid magnetic polysulfone microcapsules: a lab-scale feasibility study for removal of oil and organic dyes from environmental aqueous samples. *J Hazard Mater* 309:65-76.
- [54].Kandisa RV, Narayana Saibaba KV (2016) Dye removal by adsorption: a review. *J Bioremed Biodegr* 07:317.
- [55].Gürses A et al (2016) Dyes and pigments. In: Dyes and pigments.
- [56].Gopal R et al (2007) Electrospun nanofibrous polysulfone membranes as pre-filters: particulate removal. *J Membr Sci* 289:210-219.
- [57].Ma Z, Masaya K, Ramakrishna S (2006) Immobilization of Cibacron blue F3GA on electrospun polysulphone ultra-fine fiber surfaces towards developing an affinity membrane for albumin adsorption. *J Membr Sci* 282:237-244.
- [58].Hou C et al (2015) Preparation of PAN/PAMAM blend nanofiber mats as efficient adsorbent for dye removal. *Fibers Polym* 16:1917-1924.
- [59].Qureshi UA et al (2017) Highly efficient and robust electrospun nanofibers for selective removal of acid dye. *J Mol Liq* 244:478-488.

- [60].Mahmoodi NM, Mokhtari-Shourijeh Z, Ghane-Karade A (2017) Synthesis of the modified nanofiber as a nanoadsorbent and its dye removal ability from water: Isotherm, kinetic and thermodynamic. *Water Sci Technol* 75:2475-2487.
- [61].Qureshi UA et al (2017) Electrospun zein nanofiber as a green and recyclable adsorbent for the removal of reactive black 5 from the aqueous phase. *ACS Sustain Chem Eng* 5:4340-4351.
- [62].Stenstad P et al (2008) Chemical surface modifications of microfibrillated cellulose. *Cellulose* 15:35-45.
- [63].Johnson R (2010) TEMPO-oxidized nanocelluloses: Surface modification and use as additives in cellulosic nanocomposites. *Esf Edu.*
- [64].Missoum K, Belgacem MN, Bras J (2013) Nanofibrillated cellulose surface modification: A review. *Materials* 6:1745-1766.
- [65].Gopakumar DA et al (2017) Meldrum's acid modified cellulose nanofiber-based polyvinylidene fluoride microfiltration membrane for dye water treatment and nanoparticle removal. *ACS Sustain Chem Eng* 5:2026-2033.
- [66].Aziz S et al (2017) Electrospun silk fibroin/PAN double-layer nanofibrous membranes containing polyaniline/TiO₂ nanoparticles for anionic dye removal. *J Polym Res* 24:140.
- [67].Tahaei P et al (2008) Preparation of chelating fibrous polymer by different diamines and study on their physical and chemical properties. *Mater Werkst* 39:839-844.
- [68].Liu Z-G et al (2017) Efficient removal of organic dyes from water by β-cyclodextrin functionalized graphite carbon nitride composite. *ChemistrySelect* 2(5):1753-1758.
- [69].Jaishankar M et al (2014) Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol* 7:60-72.
- [70].Tchounwou PB et al (2012) Heavy metals toxicity and the environment. *EXS* 101:1-30.
- [71].Bolisetty S, Mezzenga R (2016) Amyloid-carbon hybrid membranes for universal water purification. *Nat Nano* 11(4):365-371.
- [72].Shen X, Xu C, Ye L (2013) Molecularly imprinted polymers for clean water: analysis and purification. *Ind Eng Chem Res* 52(39):13890-13899.
- [73].Vasapollo G et al (2011) Molecularly imprinted polymers: present and future prospective. *Int J Mol Sci* 12(9):5908-5945.
- [74].Pan G et al (2011) Controlled synthesis of water-compatible molecularly imprinted polymer microspheres with ultrathin hydrophilic polymer shells via surface-initiated reversible addition-fragmentation chain transfer polymerization. *Soft Matter* 7(18):8428-8439.
- [75].Mafu LD, Mamba BB, Msagati TAM (2016) Synthesis and characterization of ion imprinted polymeric adsorbents for the selective

- recognition and removal of arsenic and selenium in wastewater samples. *J Saudi Chem Soc* 20(5):594-605.
- [76].Mohamed A et al (2017) Removal of chromium (VI) from aqueous solutions using surface modified composite nanofibers. *J Colloid Interface Sci* 505:682-691.
- [77].Guo X et al (2011) High-performance and reproducible polyaniline nanowire/tubes for removal of Cr(VI) in aqueous solution. *J Phys Chem C* 115:1608-1613
- [78].Ku Y, Jung IL (2001) Photocatalytic reduction of Cr(VI) in aqueous solutions by UV irradiation with the presence of titanium dioxide. *Water Res* 35:135-142.
- [79].Mohamed A et al (2017) Surface functionalized composite nanofibers for efficient removal of arsenic from aqueous solutions. *Chemosphere* 180:108-116.
- [80].Kumar R, Barakat MA, Alseroury FA (2017) Oxidized g-C₃N₄/polyaniline nanofiber composite for the selective removal of hexavalent chromium. *Sci Rep* 7:12850.
- [81].Almasian A et al (2016) Surface modification of electrospun PAN nanofibers by amine compounds for adsorption of anionic dyes. *Desalin Water Treat* 57:10333-10348.
- [82].Almasian A et al (2016) Zwitter ionic modification of cobalt-ferrite nanofiber for the removal of anionic and cationic dyes. *J Taiwan Inst Chem Eng* 67:306-317.
- [83].Kampalanonwat P, Supaphol P (2010) Preparation and adsorption behavior of aminated electrospun polyacrylonitrile nanofiber mats for heavy metal ion removal. *ACS Appl Mater Interfaces* 2:3619-3627.
- [84].Chitpong N, Husson SM (2016) Nanofiber ion-exchange membranes for the rapid uptake and recovery of heavy metals from water. *Membranes* 6:59.
- [85].Sehaqui H et al (2014) Enhancing adsorption of heavy metal ions onto biobased nanofibers from waste pulp residues for application in wastewater treatment. *Cellulose* 21:2831-2844.
- [86].Vilasrao TD (2017) Bacterial contamination in drinking water: assessing the potability of water. *Int Edu Appl Sci Res J (IEASRJ)* 2.
- [87].Cabral JPS (2010) Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *Int J Environ Res Public Health* 7:3657-3703.
- [88].EPA (2017) Drinking water contaminant candidate list (CCL) and regulatory determination.
- [89].van den Hurk R, Evoy S (2015) A review of membrane-based biosensors for pathogen detection. *Sensors (Switzerland)* 15:14045-14078.
- [90].Gao Y et al (2014) Electrospun antibacterial nanofibers: production, activity, and in vivo applications. *J Appl Polym Sci* 131:9041-9053.

- [91].De Faria AF et al (2015) Antimicrobial electrospun biopolymer nanofiber mats functionalized with graphene oxide-silver nanocomposites. *ACS Appl Mater Interfaces* 7:12751-12759.
- [92].Dubey P et al (2015) Silver-nanoparticle-Incorporated composite nanofibers for potential wound-dressing applications. *J Appl Polym Sci* 132:1-12.
- [93].Nthunya LN et al (2017) Greener approach to prepare electrospun antibacterial β -cyclodextrin/ cellulose acetate nanofibers for removal of bacteria from water. *ACS Sustain Chem Eng* 5:153-160.
- [94].Cheirsilp B, Rakmai J (2017) Inclusion complex formation of cyclodextrin with its guest and their applications. *Biol Eng Med* 2:1-6.
- [95].Yu Z et al (2015) Preparation of a novel anti-fouling β -cyclodextrin-PVDF membrane. *RSC Adv* 5:51364-51370.
- [96].Qin X-H, Wang S-Y (2008) Electrospun nanofibers from crosslinked poly(vinyl alcohol) and its filtration efficiency. *J Appl Polym Sci* 109(2):951-956.
- [97].Yun KM et al (2010) Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration. *Sep Purif Technol* 75(3):340-345.
- [98].Cooper A et al (2013) Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications. *Carbohydr Polym* 92(1):254-259.
- [99].Han W, Gaofeng Z, DaoHeng S (2007) Electrospun nanofibrous membrane for air filtration. In: 2007 7th IEEE conference on nanotechnology (IEEE NANO).
- [100].Gibson HS (2007) Patterned electrospray fiber structures. In: Busnaina A (ed) Nanomanufacturing handbook. CRC Press, Boca Raton.
- [101].Matulevicius J et al (2016) The comparative study of aerosol filtration by electrospun polyamide, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media. *J Aerosol Sci* 92(Supplement C):27-37.
- [102].Homaeigohar SS, Buhr K, Ebert K (2010) Polyethersulfone electrospun nanofibrous composite membrane for liquid filtration. *J Membr Sci* 365(1):68-77.
- [103].Saeed K et al (2008) Preparation of amidoxime-modified polyacrylonitrile (PAN-oxime) nanofibers and their applications to metal ions adsorption. *J Membr Sci* 322(2):400-405.
- [104].Zhou Z (2016) Electrospinning ultrathin continuous cellulose acetate fibers for high-flux water filtration. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 494:21-29.

University of Guilan Press

Filtering Media by Electrospinning

Next Generation Membranes for Separation Applications

By:

Maria Letizia Focarete

Chiara Gualandi

Seeram Ramakrishna

Translated By:

Marjan Abbasi, Ph.D

Majid Sohrabi, M.Sc