

مطالعه و بررسی انواع غشاهای نانولیفی به عنوان جاذب در حذف مواد آلاینده از پساب

مهدی حسن زاده^{۱*}، بنت الهدی هادوی مقدم^۲، اکبر خداپرست حقی^۳، کمیل نصوری^۴

گروه مهندسی نساجی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

M_hasanzadeh@aut.ac.ir

چکیده

امروزه تصفیه پساب‌های صنایع نساجی و رنگرزی بدلیل دارا بودن مواد رنگزای آلی و آلودگی زیاد به معضل بزرگی برای کارشناسان محیط زیست تبدیل شده است. تلاش‌های گسترده‌ای برای حذف مواد رنگزای آلی از پساب صورت گرفته است. یکی از روش‌های ایده‌آل و موثر در کاهش آلودگی پساب‌های حاوی مواد آلی، استفاده از فرایند غشایی می‌باشد. غشاهای تهیه شده از نانوالیاف الکتروریسی شده با برخورداری از خواص بی‌نظیری همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، درصد تخلخل مناسب، انعطاف‌پذیری و فعالیت شیمیایی در ابعاد نانو، یکی از گزینه‌های مناسب در فرایند تصفیه پساب بشمار می‌آید. در این تحقیق ابتدا به بررسی کلی غشاهای نانولیفی مورد استفاده در حذف مواد آلاینده از پساب پرداخته شده و انواع، کاربردها و همچنین فرایند الکتروریسی آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. سپس روش‌های تولید انواع مختلف غشاهای نانولیفی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت نیز روش‌های کلی اندازه‌گیری و بررسی خواص و کارایی غشاهای مورد استفاده در حذف مواد آلاینده از پساب نظیر دبی جریان خروجی از غشاء، نفوذپذیری، درصد احتباس، وزن مولکولی قابل جداسازی و همچنین میزان جذب مواد رنگزا توسط غشاء مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: غشاء نانولیفی، پساب، نانوالیاف، الکتروریسی، مواد رنگزای آلی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی نساجی، دانشگاه گیلان (نویسنده مسئول)*

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی نساجی، دانشگاه گیلان

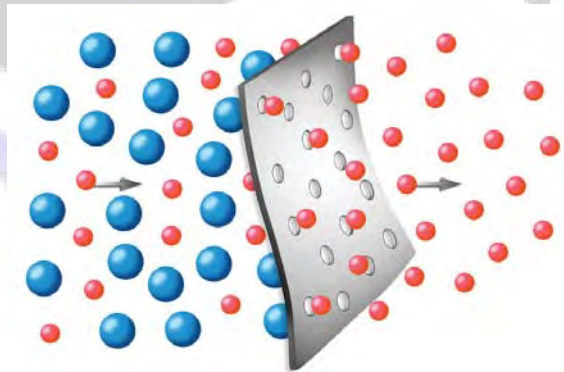
۳- استاد گروه مهندسی نساجی، دانشگاه گیلان

۴- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱- مقدمه

پساب و پسماندهای صنعت نساجی، به عنوان یکی از منابع مهم آلاینده محیط‌زیست به شمار می‌روند. در بین تمامی مراحل مختلف فرایندهای تولید الیاف خام طبیعی و مصنوعی، پساب‌هایی حاصل از فرایند رنگرزی و چاپ به دلیل وجود مواد رنگزای آلی اهمیت ویژه‌ای دارند. از اینرو از بین بردن و یا به حداقل رساندن پساب‌های حاوی مواد رنگزا و جداسازی آن‌ها از محیط‌زیست مورد توجه بسیاری از محققان و کارشناسان محیط‌زیست قرار گرفته است. تخلیه پساب‌های حاوی مواد رنگزا در بستر رودخانه‌ها و دریاچه‌ها از طریق کاهش انتقال نور و کاهش اکسیژن محلول (DO) و نیز افزایش اکسیژن شیمیایی مورد نیاز (COD)، زندگی آبزیان را مختل می‌نماید. مواد رنگزای آلی بدلیل ساختار شیمیایی مقاوم در برابر روش‌های متداول تصفیه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از خود مقاومت نشان می‌دهند. رنگزاهای مورد استفاده در صنعت نساجی با توجه به حلالیت و بار یونی در محلول به سه گروه عمده رنگزاهای خنثی، رنگزاهای کاتیونیک و رنگزاهای آنیونیک تقسیم می‌شوند [۶-۱].

تاکنون روش‌های گسترده‌ای برای حذف مواد رنگزای آلی از پساب ارائه شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به جذب، انعقاد-لخته‌سازی، تجزیه شیمیایی، تعویض یون، نانوفیلتراسیون، اوزوناسیون و اکسیداسیون اشاره نمود [۷]. تمامی این روش‌ها دارای معایب و مزایایی هستند و هیچ‌یک از آن‌ها به تنهایی برای تمامی گروه‌های رنگزا مناسب نیستند. استفاده از فرایند غشایی یکی از روش‌های ایده‌آل و موثر در کاهش آلودگی پساب‌های حاوی مواد آلی می‌باشد (شکل ۱). کاربرد غشاها در حوزه پساب و محیط‌زیست به دلیل کاربرد آسان‌تر و راندمان تصفیه بالاتر نسبت به سایر روش‌ها مورد استقبال پژوهشگران است. متداول‌ترین فرایندهای غشایی به منظور تصفیه پساب‌های نساجی شامل میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF)، نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO) می‌گردد که در این میان نانوفیلتراسیون بدلیل داشتن اندازه حفره‌های بین ۱۰-۲ نانومتر کارایی بالاتری در حذف رنگزاهای یونی و محلول از پساب دارند. میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون در حذف رنگزاهای نامحلول (دیسپرس، خمی و گوگردی)، و اسمز معکوس به منظور حذف یون‌های فلزی یک ظرفیتی از پساب مناسب هستند [۸].

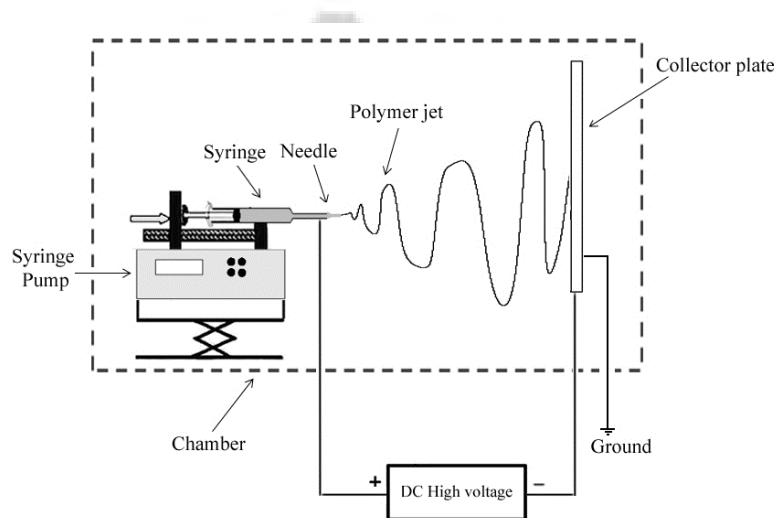


شکل ۱. شمای ساده‌ای از فرایند جداسازی دو فاز همگن توسط غشاء

۲- غشاهای نانولیفی

تاکنون روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تولید نانوالیاف پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های کشش [۹]، تولید در قالب [۱۰]، جداسازی فازی [۱۱]، خودنصبی [۱۲] و الکتروریسی [۱۳] اشاره نمود. در این میان فرایند الکتروریسی بدلیل ساده بودن و استفاده از سازوکاری متفاوت برای تولید نانوالیاف، در سال‌های اخیر مورد استقبال بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این فرایند بر خلاف تمام روش‌های متداول تولید الیاف، که از نیروهای مکانیکی برای عمل اکستروژن استفاده می‌گردد، از محلول و یا مذاب پلیمری بواسطه نیروهای الکترواستاتیک برای تولید مستقیم نانوالیاف کمک

گرفته می‌شود. در فرایند الکترورسی در اثر اعمال ولتاژ بالا به سیال پلیمری، بارهای الکتریکی به درون سیال نفوذ می‌کنند. با افزایش ولتاژ، میدان الکتریکی نیز افزایش یافته و در نتیجه نیروهای الکترواستاتیک وارد بر جت الکترورسی افزایش می‌یابد. این افزایش میدان الکتریکی در تمام مسیر جت الکترورسی بر آن اثر گذاشته و موجب تغییر در قطر نانوالیاف نهایی می‌شود. جت در فاصله کم نوک نازل تا جمع کننده، بر اثر دافعه متقابل بارهای الکتریکی روی سطح سیال، دچار خمش شده و مسیری طولانی را به طور مارپیچ و حلقوی ادامه می‌دهد. در نتیجه جت الکترورسی نازک شده و در نهایت لایه بسیار نازک نانوالیاف پلیمری روی جمع کننده حاصل می‌شود [۱۶-۱۴]. شکل ۲ شمای ساده‌ای از فرایند الکترورسی را نشان می‌دهد. در این فرایند، تولید ییافی با قطر ۵۰-۹۰۰ نانومتر و با طول چند سانتیمتر تا چندین متر به راحتی امکان پذیر می‌باشد. همچنین تولید ییافی با قطر ۳-۵ نانومتر از محلول‌های رقیق پلیمری تحت شرایط کنترل شده در سال‌های اخیر گزارش شده است.



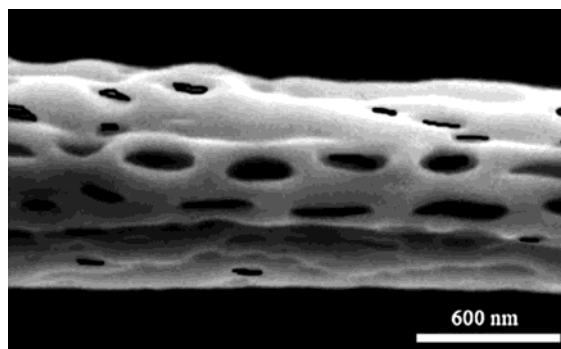
شکل ۲. شمای ساده‌ای از فرایند الکترورسی

۳- انواع غشاهای نانولیافی

به منظور افزایش قابلیت‌های کاربردی نانوالیاف، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تغییر ساختار نانوالیاف از طریق اصلاح و تغییر در فرایند الکترورسی اشاره نمود. با انتخاب پلیمر و حلال‌های مناسب و انجام اصلاحات در فرایند الکترورسی می‌توان نانوالیاف دوجزئی، توخالی، متخلخل و همچنین نانوالیاف کامپوزیتی تولید نمود.

۳-۱- نانوالیاف متخلخل

یکی از ساختارهای قابل دستیابی در فرایند الکترورسی، وجود حفره‌هایی بر روی سطح نانوالیاف تولید شده می‌باشد. شکل ۳ نمایی از ساختارهای متخلخل در مقیاس نانو برای الیاف پلی‌کربنات (PC)، الکترورسی شده در حلال کلروفرم را نشان می‌دهد. اندازه حفره‌ها در سطح الیاف در دامنه چند ده نانومتر تا یک میکرون می‌باشند، که اندازه آن‌ها وابسته به نوع پلیمر، حلال مورد استفاده و شرایط الکترورسی است. باید توجه داشت که طبق تعریف حفراتی با ابعاد کمتر از ۲۰۰ نانومتر بعنوان مناطق متخلخل شناخته و حفراتی با ابعاد بزرگتر از ۲۰۰ نانومتر روزنه (capillary) نامیده می‌شوند. مناطق متخلخل خود نیز به زیر بخش‌های نظیر مناطق میکروتخلخل (ابعاد تخلخل: ۲-۰/۴ نانومتر)، مناطق مزوتخلخل (ابعاد تخلخل: ۵۰-۲ نانومتر) و مناطق ماکروتخلخل (ابعاد تخلخل: ۲۰۰-۵۰ نانومتر) تقسیم می‌شوند.



شکل ۳. نمایی از نانوالیاف متخلخل پلی کربنات الکتروریسی شده [۱۷]

روش‌های متفاوتی برای شکل‌گیری حفره‌ها بر روی نانوالیاف حاصل از فرایند الکتروریسی وجود دارد، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۷]:

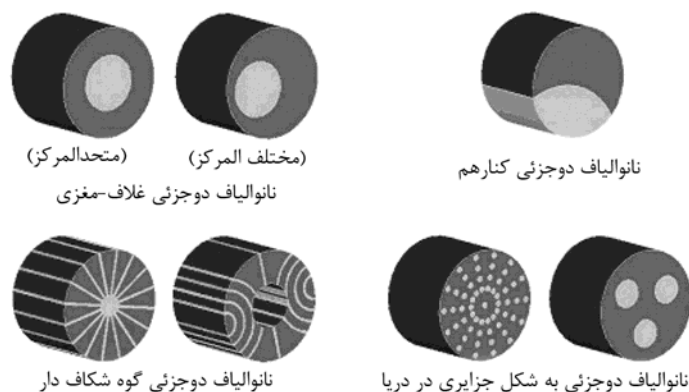
- انجام فرایند الکتروریسی در محیطی با رطوبت بالا،
- استفاده از مخلوط یک حلال فرار و یک حلال غیرفرار بصورت همزمان در فرایند الکتروریسی،
- انجام فرایند جدایی فازی،
- افزایش فشار بخار حلال مورد استفاده،
- افزایش دمای جمع‌کننده.

۳-۲- نانوالیاف دوجزئی

در این نوع الیاف دو نوع پلیمر یا بیش از آن در ساختار یک فیلامنت وجود دارد. تولید الیاف دوجزئی الهام گرفته شده از الیاف پشم می‌باشد، زیرا الیاف پشم نیز دارای دو بخش ارتوکورتکس و پاراکورتکس است، که بدلیل تفاوت شیمیایی و ساختاری دو بخش سبب افزایش قدرت عایق‌بندی و نیز تشکیل فرم مارپیچی برای آن می‌گردد. از این روی محققان نیز برای تولید الیاف با چنین خواصی به سمت استفاده از چندین پلیمر در ساختار یک لیف شده‌اند. بطور کلی الیاف دوجزئی را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم نمود:

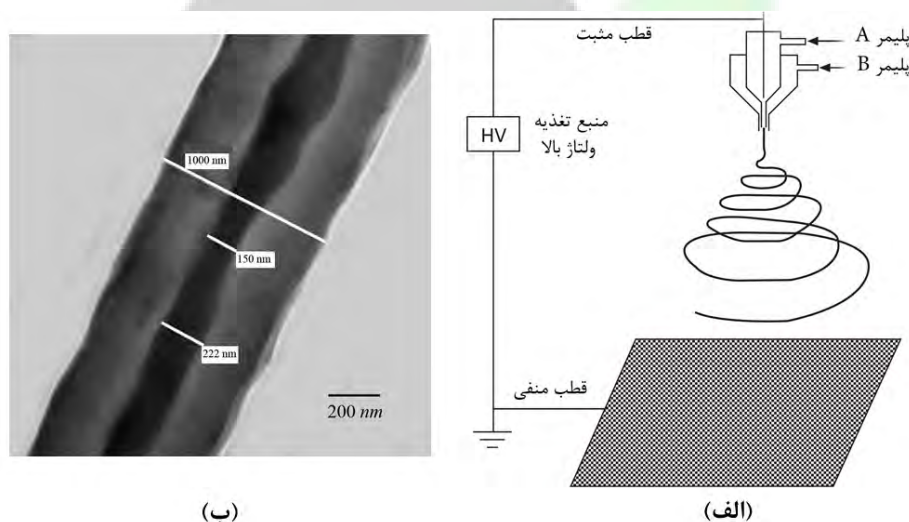
- الیاف دوجزئی غلاف- مغزی (core-sheath fibers or core-shell fibers)
- الیاف دو جزئی کنارهم (side-by-side fibers)
- الیاف دوجزئی گوه شکاف دار (pie-wedge fibers)
- الیاف دوجزئی به شکل جزایری در دریا (island in the sea fibers)

در شکل ۴ این چهار نوع از الیاف دوجزئی نمایش داده شده است. الیاف دوجزئی نوع اول و دوم دارای درصد مشخصی از دو نوع پلیمر در ساختار خود می‌باشند، ولی نوع سوم و چهارم حاوی درصد مشخص از دو پلیمر نبوده و از این روی به آن‌ها الیاف ماتریسی نیز گفته می‌شود. الیاف غلاف- مغزی به دودسته متحدالمرکز و مختلف‌المرکز تقسیم می‌شوند که هر کدام دارای خواص مختلفی هستند. اگر چه در روش‌های تولید الیاف امکان تولید الیاف دوجزئی مختلفی وجود دارد، اما با این وجود بطور عمده تولید الیاف دوجزئی محدود به دو دسته غلاف- مغزی و کنارهم می‌باشد [۱۷].



شکل ۴. انواع الیاف دوجزئی متداول [۱۸]

برای تولید نانوالیاف دوجزئی از دستگاه الکتروریسی هم محور (coaxial spinning) استفاده می‌شود. شکل نانوالیاف دوجزئی تولیدی بستگی به شرایط جت تولیدی در نوک لوله موئین دارد. شکل ۵ شمای ساده‌ای از دستگاه الکتروریسی هم‌محور برای تولید الیاف دو جزئی غلاف-مغزی و تصویر TEM نانوالیاف دوجزئی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. (الف) دستگاه الکتروریسی هم محور برای تولید الیاف دو جزئی غلاف-مغزی، (ب) تصویر TEM نانوالیاف دو جزئی [۱۹]-

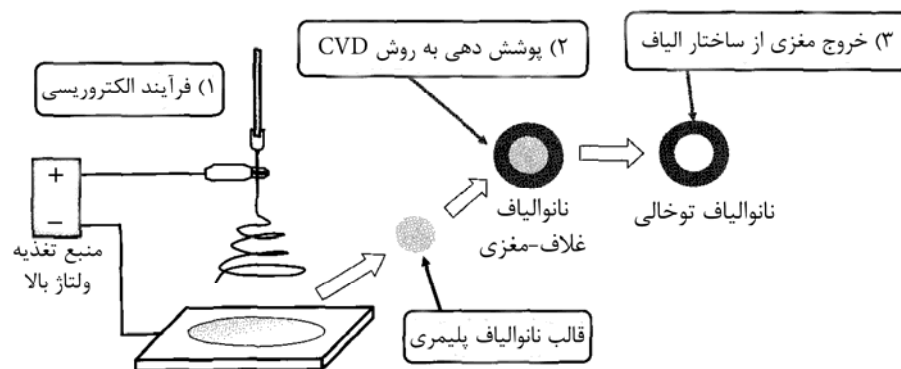
[۱۸]

۳-۳- نانوالیاف توخالی

تاکنون نانوالیاف توخالی که نانولوله نیز نامیده می‌شوند، به دو روش ترسیب بخار شیمیایی (CVD)، و ریسندهی هم‌محور تولید شده‌اند. روش CVD را می‌توان شامل سه مرحله اصلی دانست (شکل ۶) [۲۰]:

- تولید قالب نانوالیاف توسط فرآیند الکتروریسی،
- پوشش‌دهی قالب نانوالیاف تولید شده بوسیله روش CVD،
- جدا نمودن قالب از پوسته بوسیله حرارت دادن، که پس از آن پوسته به عنوان نانوالیاف توخالی قابلیت کاربرد را می‌یابد.

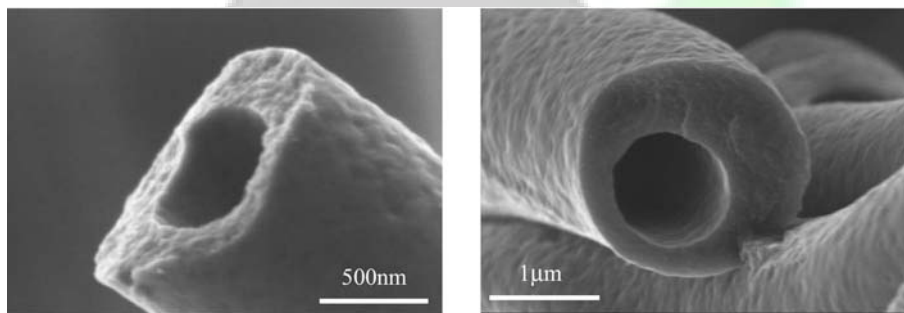
در روش CVD باید قالب نانوالیاف در طی مرحله پوشش‌دهی، دارای ثبات کافی بوده و بدون تخریب به لایه پوشش دهنده، قابل تخریب و استخراج باشد.



شکل ۶. مراحل تولید نانوالیاف توخالی بوسیله روش CVD [۲۰]

تولید نانوالیاف توخالی به روش ریسندهی هم‌محور نیز شامل دو مرحله می‌باشد که عبارتند از:

- تولید الیاف دوجزئی غلاف-مغزی متحدالمرکز بوسیله روش الکتروریسی هم‌محور،
- استخراج قسمت مغزی الیاف بدون آسیب زدن به قسمت غلاف.



شکل ۷. تصاویر SEM از سطح نانوالیاف توخالی کربنیزه شده [۲۱]

۳-۴- نانوالیاف کامپوزیتی

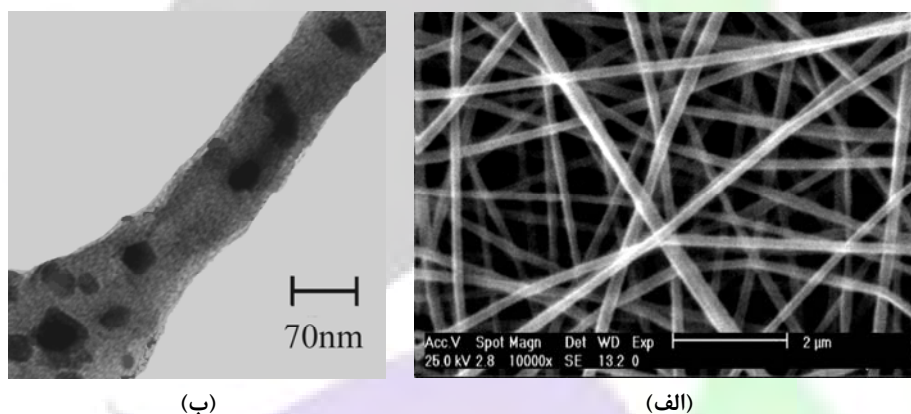
نانوالیاف کامپوزیتی یکی از ساختارهای نانولیفی است که پیشرفت‌های زیادی داشته است. تقویت نانوالیاف کامپوزیتی با استفاده از تقویت‌کننده‌های نانومتری نظیر نانو ذرات (اکسیدهای فلزی و دوده)، صفحات نانومتری (خاک رس)، نانوالیاف گرافیتی و نانولوله‌های کربنی (CNT) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اساسی‌ترین عملکرد تقویت‌کننده‌های نانومتری، افزایش استحکام مکانیکی و خواص فیزیکی مانند هدایت الکتریکی می‌باشد. در مقایسه با تقویت‌کننده‌های متداول، تقویت‌کننده‌های نانومتری با توجه به سطح تماس فوق‌العاده زیاد، اثر بهتری روی ماتریس دارند. پخش شدن مناسب این نانوذرات در ماتریس پلیمری سبب تحمل بار و افزایش مقاومت مکانیکی و دوام محصول می‌شود. نانوذرات می‌توانند تنش را از ماتریس پلیمری عبور داده و استحکام کششی نانوالیاف را بهبود بخشند. باید توجه داشت که خواص مکانیکی و فیزیکی نانوالیاف کامپوزیتی، به نوع تقویت‌کننده مصرفی بستگی دارد [۱۷].

عمده‌ترین روش‌هایی که برای تولید نانوالیاف کامپوزیتی استفاده می‌شوند عبارتند از:

- مخلوط کردن نانوذرات در محلول پلیمری و پلیمریزاسیون تشکیل رسوب به وسیله تبخیر حلال،
- مخلوط کردن نانوذرات در پلیمر و ترریسی آن به شکل الیاف،
- جذب نانولوله‌های کربنی تک دیواره روی الیاف پلیمری نظیر PET،
- الکتروریسی مخلوط نانولوله‌های کربنی در محلول یا مذاب پلیمری.

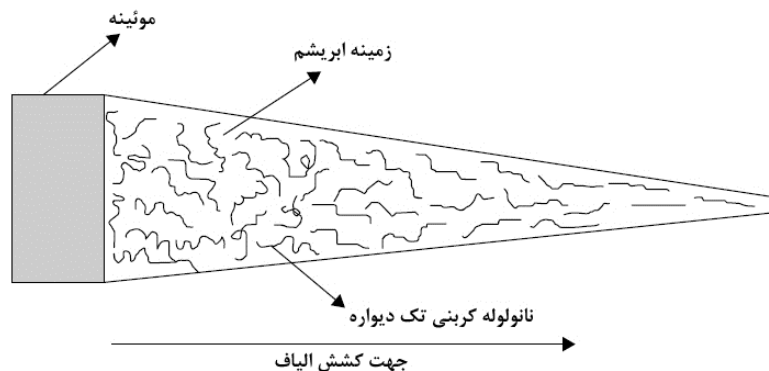
نانولوله‌های کربنی به علت خواص جالب توجه مانند طول به عرض بالا، خواص گرمایی، الکتریکی و مکانیکی بالا ترکیباتی شناخته شده و مورد علاقه محققان هستند. مساحت سطح بالا و تخلخل زیاد مکان‌های مناسبی برای جذب کاتیون‌ها، آنیون‌ها و سایر ناخالصی‌های آلی و غیرآلی موجود در پساب فراهم می‌سازد. همچنین این نانوساختارها علی‌رغم برخورداری از قطر بسیار کم، استحکام کششی بالایی در حدود صد گیگاپاسکال دارند. دلیل استحکام و مقاومت بالا را می‌توان در استحکام پیوند کربن-کربن در ساختار نانولوله کربنی و همچنین شکل شش ضلعی این نانو ساختار دانست که منجر به توزیع مناسب بار در میان پیوندها می‌شود. استحکام کششی بالای نانولوله‌های کربنی، مزیت بسیار خوبی برای ساخت سازهایی با مقاومت بالا در جهات خاص به شمار می‌آید.

با توجه به توانایی تقویت‌کنندگی بالای نانولوله‌های کربنی تک دیواره (SWNT) در نانوالیاف کامپوزیتی، دیسپرسیون همگن آن‌ها در پلیمر بسیار مورد توجه است. مشکل اساسی استفاده از نانولوله‌های کربنی در نانوالیاف کامپوزیتی، حلالیت و قابلیت دیسپرس شدن پایین آن‌ها در حلال‌های آبی و آلی می‌باشد. نانولوله‌های کربنی تک دیواره به آسانی در کنار یکدیگر تجمع می‌کنند و منجر به ایجاد نواقص ساختاری در نانوکامپوزیت‌ها می‌شود [۱۷]. روش‌های مختلفی جهت دیسپرسیون مناسب و ساختار ورقه‌ورقه (Exfoliation) دسته‌های SWNT شامل مخلوط‌سازی فیزیکی، پلیمریزاسیون درجا (In-Situ polymerization)، جذب سطح فعال، پوشش‌دهی با پلیمر و غیره وجود دارد. تاکنون تلاش‌های زیادی به منظور توسعه روش‌های دیسپرس کردن غیر کوالانت که عموماً بر پایه جذب فیزیکی پلیمرها می‌باشد، صورت گرفته است.



شکل ۸. (الف) تصویر SEM (ب) تصویر TEM نانوالیاف کامپوزیتی PAN/SWNT [۲۲]

عامل اساسی در استحکام فصل مشترک زمینه و تقویت کننده، تشکیل ساختار مارپیچی پلیمر، در اطراف نانولوله می‌باشد. توزیع نانولوله‌ها در زمینه پلیمری به صورت تصادفی است. بنابراین تلاش‌های زیادی برای آراستن نانولوله‌ها در زمینه پلیمری به منظور تقویت بهتر پلیمر انجام شده است. نانولوله‌ها را می‌توان در طول فرایند ساخت و یا پس از ساخت، بوسیله کشش مکانیکی، تریسی، خشک‌ریسی و ذوب‌ریسی هم راستا نمود. مرتب کردن نانولوله‌های کربنی هنگامی که به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشکل می‌باشد. در نتیجه نانوکامپوزیت‌های تهیه شده نمی‌توانند خواص مکانیکی که انتظار می‌رود را برآورده سازند. در فرایند الکتروریسی چنین انتظار می‌رود که آرایش‌یافتگی نانولوله‌های کربنی یا دسته‌ای از آن‌ها در امتداد طول الیاف به دلیل نیروی دی‌الکتریک ناشی از خاصیت دی‌الکتریک یا جورشدن هدایت الکتریکی نانولوله‌های کربنی و محلول پلیمر و همچنین نیروی برشی بالای ایجاد شده در ریسندگی رخ دهد. شکل ۹ شمای ساده‌ای از آرایش نانولوله‌های کربنی را در حین فرایند الکتروریسی نشان می‌دهد.



شکل ۹. شمای ساده‌ای از آرایش نانولوله‌های کربنی حین فرایند الکترورسی [۱۷]

۴- غشاهای نانولیفی برای کاربرد در حذف مواد آلاینده از پساب

نانوالیاف پلیمری می‌توانند برای تشکیل غشاهایی با تخلخل نانومتری و دارای قابلیت جداسازی مواد آلاینده بکار روند. هنگامی که قطر الیاف پلیمری از مقیاس میکرون به مقیاس نانومتری کاهش می‌یابد، خواص شگفت‌آوری از جمله نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، انعطاف‌پذیری و خواص مکانیکی مناسب در مقایسه با سایر مواد شناخته شده مشاهده می‌شود. این امر موجب شده است تا نانوالیاف پلیمری برای بسیاری از کاربردهای مهم از جمله فرایندهای غشایی بکار رود. غشاهای تهیه شده از نانوالیاف خواص بی‌نظیری همچون فراهم نمودن امکان جداسازی از طریق جذب-فیلتراسیون، نسبت سطح به حجم بسیار بالا، درصد تخلخل مناسب، انعطاف‌پذیری و فعالیت شیمیایی در ابعاد نانو را ایجاد می‌کنند [۲۳]. غشاهای نانولیفی می‌تواند به تنهایی یا به همراه لایه‌های دیگر (فیلترهایی از نوع دیگر یا شبکه فلزی) بکار رود. ضخامت و ساختار لایه فعال در عملکرد غشای نانولیفی بسیار موثر است. در سال‌های اخیر این غشاها بدلیل کاربردهای ویژه در تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است.

۵- روش‌های اندازه‌گیری و بررسی خواص غشاهای نانولیفی

۵-۱- بررسی مورفولوژی غشاء

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) روش مناسبی برای بررسی مورفولوژی، شکل ظاهری و تخلخل غشاء می‌باشد. برای این منظور ابتدا نمونه‌های نانوالیاف با طلا پوشش داده شده و سپس تصاویر سطح مقطع عرضی و یا طولی غشاء نانولیفی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه می‌شود. بررسی عیوب الکترورسی نظیر وجود آمدن دانه تسبیحی در نانوالیاف، بررسی میزان آسیب‌دیدگی الیاف در طی فرایندهای مختلف، بررسی شکل سطح مقطع الیاف، بررسی آرایش‌یافتگی و ساختار نانوالیاف مختلف از جمله مواردی است که می‌توان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه نمود.

۵-۲- بررسی کارایی غشاء

به منظور بررسی کارایی غشاء از آزمون‌های دبی جریان خروجی از غشاء (Permeation Flux)، نفوذپذیری (Permeability) و درصد احتباس (Rejection) استفاده می‌شود. دبی جریان خروجی از غشاء (J) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$J(l/m^2.h) = \frac{Q}{At} \quad (1)$$

که در آن Q ، A و t به ترتیب حجم محلول عبوری (l)، سطح موثر غشاء (m^2) و زمان عبور محلول (h) می‌باشد. میزان نفوذپذیری (L_p) نیز از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد که ΔP فشار موثر (bar) می‌باشد.

$$L_p(l/m^2.h.bar) = \frac{J}{\Delta P} \quad (2)$$

$$R(\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (3)$$

همچنین درصد احتباس حل شونده (R) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد که C_f و C_p به ترتیب غلظت‌های نمونه خروجی از غشاء و محلول تغذیه شده می‌باشد [۲۴].

۵-۳- اندازه‌گیری وزن مولکولی قابل جداسازی

اندازه‌گیری مستقیم میانگین قطر روزنه‌های غشاء مشکل است و معمولاً اندازه قطر آن‌ها بوسیله قطر مولکول‌های حل‌شونده‌ای که توسط غشاء پس‌زده می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. برای این منظور از وزن مولکولی قابل جداسازی (MWCO) استفاده می‌شود. MWCO از طریق رسم نمودار مشخصه احتباس ماده‌ای حل‌شونده (مانند رنگزا، پلی‌اتیلن‌گلیکول) در برابر وزن مولکولی آن ماده بدست می‌آید. با برونیابی این داده‌ها، وزن مولکولی که در آن میزان احتباس ۹۰٪ است، بعنوان وزن مولکولی قابل جداسازی تعیین می‌گردد.

۵-۴- اندازه‌گیری غلظت مواد رنگزا در پساب

غلظت مواد رنگزا در پساب قبل و بعد از عمل فیلتراسیون در محدوده مرئی و در طول موج بیشینه ماده رنگزا (λ_{max}) بر اساس قانون بیر- لامبرت بدست می‌آید. طبق این قانون که بصورت رابطه ۴ ارائه می‌شود، مقدار نور جذب شده به هنگام عبور نور از داخل ضخامت‌های برابری از جسم در یک طول موج مشخص مساوی بوده و متناسب با تعداد مولکول‌های جاذب (غلظت محلول جاذب کننده) در مسیر عبور نور می‌باشد. مقدار نور جذب شده توسط مولکول رنگزا با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری می‌شود.

$$A = \text{Log}\left(\frac{1}{T}\right) = \text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon \times b \times c \quad (4)$$

که در این رابطه I شدت نور منتقل شده، I_0 شدت نور تابیده شده، ε ضریب جذب مولار یا ضریب خاموشی، c غلظت محلول جاذب، T مقدار نور منتقل شده و A مقدار نور جذب شده می‌باشند [۲۵].

۶- نتیجه‌گیری

- با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، نتایج کلی زیر از جمع‌بندی مطالب بدست آمده است:
- ۱- یک غشاء نانولیفی به منظور کاربرد در حذف مواد رنگزای آلی از پساب باید دارای تخلخل بالا، انعطاف‌پذیری قابل قبول، قابلیت جداسازی مناسب و پایداری شیمیایی و مکانیکی خوبی باشد.
 - ۲- انواع مختلف نانوالیاف نظیر نانوالیاف متخلخل، نانوالیاف دوجزئی، نانوالیاف توخالی و نانوالیاف کامپوزیتی را می‌توان با انجام اصلاحاتی در فرایند الکتروریسی تولید کرد.
 - ۳- استفاده از نانوساختارهای متخلخل و مواد جاذب نظیر نانولوله‌های کربنی در ساختار نانوالیاف کامپوزیتی می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقدار جذب مواد رنگزا گردد.
 - ۴- به منظور بررسی کارایی غشاهای نانولیفی از آزمون‌های مهمی نظیر دبی جریان خروجی از غشاء، نفوذپذیری، درصد احتباس، وزن مولکولی قابل جداسازی و همچنین میزان جذب رنگزا استفاده می‌گردد.

- [1] P.C. Vandevivere, R. Bianchi, W. Verstraete, "Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies", *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72 (1998), 289-302.
- [2] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, "Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative", *Biores. Technol.* 77 (2001), 247-255.
- [3] I.M. Banat, P. Nigam, D. Singh, R. Marchant, "Microbial decolorization of textile-dye containing effluents: a review", *Bioresour. Technol.* 58 (1996), 217-27.
- [4] Y.M. Slokar, A. M. Le Marechal, "Methods of decoloration of textile wastewaters", *Dyes. Pigments.* 37(1998), 335-356.
- [5] W. Dele'e, C. O'Neill, F.R. Hawkes, H.M. Pinheiro. "Anaerobic treatment of textile effluents: a review", *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 73 (1998), 323-335.
- [6] P. Cooper. "Removing color from dyehouse waste waters: a critical review of technology available", *J. Soc. Dyers. Colorists.* 109(1993), 97-100.
- [7] B. Marrot, N. Roche, "Wastewater treatment and reuse in textile industries, a review", *Res. Adv. In Water Research*, 3 (2002), 41-53.
- [8] P. Aptel, C.A. Buckley, "Categories of membrane operations. In water treatment: membrane process", J. Mallevalle, P.E. Odendaal and M.R. Winsner (Ed), New York, McGraw-Hill, 1996.
- [9] T. Ondarçuhu, C. Joachim, "Drawing a single nanofibre over hundreds of microns", *Europhysics Letters.* 42 (1998), 215-220.
- [10] L. Feng, S. Li, Y. Li, H. Li, L. Zhang, J. Zhai, Y. Song, B. Liu, L. Jiang, D. Zhu, "Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial", *Advanced Materials.* 14 (2002), 1221-1223.
- [11] P.X. Ma, R. Zhang, "Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix", *J. Biomed. Mater. Res.* 46 (1999), 60-72.
- [12] G. Liu, J. Ding, L. Qiao, A. Guo, B.P. Dymov, J.T. Gleeson, T.K. Hashimoto, K. Saijo, "Polystyrene-block-poly(2-cinnamoyl ethyl methacrylate) nanofibers preparation, characterization, and liquid crystalline properties", *Chemistry-A European Journal.* 5 (1999), 2740-2749.
- [13] J. Doshi, D.H. Reneker, "Electrospinning process and applications of electrospun fibers", *J. Electrostat.* 35 (1995), 151-160.
- [14] A. Shams Nateri, and M. Hasanzadeh, "Using fuzzy-logic and neural network techniques to evaluating polyacrylonitrile nanofiber diameter", *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 6 (2009), 1542-1545.
- [15] A.K. Haghi, and M. Akbari, "Trends in electrospinning of natural nanofibers", *Phys. Status. Solidi. A.*, 204 (2007), 1830-1834.
- [16] M. Ziabari, V. Mottaghtalab, and A.K. Haghi, "Nanofibers: fabrication, performance, and applications", W.N. Chang (Ed), Nova Science Publishers, New York, 2009.
- [17] A.L. Andrad, "Science and technology of polymer nanofibers", Wiley, USA, 2008.
- [18] P.J. Brown, K. Stevens, "Nanofibers and nanotechnology in textiles", The textile institute and woodhead, England, 2007.
- [19] Z. Sun, E. Zussman, A.L. Yarin, J.H. Wendorff, A. Greiner, "Compound core-shell polymer nanofibers by co-electrospinning", *Advanced materials*, 15 (2003), 1929-1932.
- [20] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W-E. Teo, T-C. Lim, Z. Ma, "An introduction to electrospinning and nanofibers", World scientific, Singapore, 2005.
- [21] E. Zussman, A.L. Yarin, A.V. Bazilevsky, R. Avrahami, M. Feldman, "Electrospun polyacrylonitrile/poly(methyl methacrylate)-derived turbostratic carbon micro-/nanotubes", *Advanced materials*, 18 (2006), 348-353.
- [22] K. Nasouri, A.M. Shoushtari, A. Kafrou, H. Bahrambeygi, A. Rabbi, "Single-wall carbon nanotubes dispersion behavior and its effects on the morphological and mechanical properties of the electrospun nanofibers", *Polymer Composites*, 33 (2012), 1951-1959.
- [23] R.S. Barhate, S. Ramakrishna, "Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials", *J. Membrane Sci.* 296 (2007), 1-8.
- [24] R.W. Baker, "Membrane technology and application", 1st ed., Wiley Pub, Chichester, 2004.
- [25] R. McDonald, "Colour physics for industry", 2nd ed., Society of Dyers and Colourists, London, 1997.