تولید و کاربرد نانوالیاف کامپوزیتی با روش ریسندگی گریز از مرکز

پروانه فهیمی [۱]، مسعود مفرحی [۱،۲]، حسین اسکندری [۲]

۱ . گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

۲ . گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

چکیده

امروزه پژوهش درباره فناوری‌های جدید برای تولید نانو الیاف و به کارگیری آن‌ها در کاربردهای متنوع با هدف افزایش نرخ تولید، کاهش هزینه‌ها، بالا بردن ایمنی فرایند، بهبود خواص نانو الیاف و غیره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته است. با کاهش قطر الیاف از طریق تبدیل مقیاس میکرومتر به نانومتر بسیاری از خواص الیاف مانند سطح مقطع ویژه، انعطاف پذیری، ویژگی های مکانیکی، نوری و الکتریکی افزایش می‌یابد. به منظور بهبود خواص و بالا بردن کاربرد نانوالیاف مطالعات بسیار زیادی صورت گرفته است. باتوسعه نانوفناوری در زمینه الیاف، استفاده از نانوذرات مختلف و تولید نانوالیاف کامپوزیتی موجب بهبود خواص نانوالیاف می‌گردد. تاکنون روش‌های متعددی *مانند:* کشش، تولید از قالب، جداسازی فازی، خودآرایی برای تولید نانوالیاف وجود دارد. اما عواملی همچون: پیچیدگی فرایند، محدودیت در انتخاب مواد اولیه، نرخ تولید کم و غیره موجب شده است که این روش ها با محدودیت مواجه شوند. روش الکتروریسی به عنوان رایج ترین روش تولید نانو الیاف شناخته شده اما به دلیل نرخ تولید کم در این روش، تمایل به استفاده از این روش برای کاربردهای صنعتی محدود است. در سال‌های اخیر، روش ریسندگی گریز از مرکز به عنوان روشی جدید در ساخت نانو الیاف معرفی شده است. این روش دارای مزیت-هایی از جمله نرخ تولید بالا، هزینه عملیاتی پایین، تجهیزات ساده، توانایی تولید الیاف سه بعدی و ایمنی بالا است. در این مقاله مروری بر روش نوین ریسندگی گریز از مرکز، بهبود نانوالیاف توسط نانوذرات و کاربرد نانو الیاف کامپوزیتی انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *ریسندگی گریز از مرکز، نانوالیاف کامپوزیتی، نانوذرات.*

ایمیل نویسنده مسئول: mofarahi@pgu.ac.ir

۱-مقدمه

نانوالیاف با توجه به دارا بودن خواص ویژه همچون بالا بودن نسبت سطح به حجم، انعطاف پذیري و کارايي مکانيکي مناسب توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. نانوالیاف در زمینه‌های مختلفی همچون کاتالیست، فیلتراسیون، پزشکی، نساجی، ذخیره سازی انرژی و محیط زیست کاربرد دارند. در جهت افزایش استفاده از نانوالیاف راهکارهاي متفاوتی وجود دارد. خوشبختانه با ظهور فناوری نانو در قرن بیستم، مطالعات بسیار زیادی به منظور دستیابی به ویژگی‌های ممتاز و افزایش کارایی نانوالیاف صورت گرفته و امکان تولید انواع الیاف کامپوزیتی با خواص بهبودیافته به وجود آمده است. باتوسعه نانوفناوری در زمینه الیاف، استفاده از نانوذرات مختلف نظیر Ag, SiO TiO_2, SnO_2, Fe_2O_3 , NiO و غیره موجب بهبود خواص آنتی باکتریال، خواص فتوکاتالیستی ،عملکرد الکتروشیمیایی مانند هدایت یونی، پایداری سطحی، تخلخل، ظرفیت جذب الکترولیت و غیره شده است. با کاهش قطر الیاف از طریق تبدیل مقیاس میکرومتر به نانومتر بسیاری از خواص الیاف مانند سطح مقطع ویژه، انعطاف پذیری، ویژگی های مکانیکی، نوری و الکتریکی افزایش می‌یابد [۱]. تاکنون روش‌های متعددي براي سنتز نانوالیاف مورد استفاده قرار گرفته است. که از آن جمله مي توان به موارد زير اشاره نمود: اسمیت وهمکارانش [۲] از روش جداسازي فازی، مرلو و همکارانش [۳] از روش خودآرایی، کوبایاشی و همکارانش [۴] از روش تولید در قالب، هارفنیست و همکارانش از روش کشش [۵]. روش الکتروریسی به عنوان رایجترین روش در تولید نانو الیاف شناخته می‌شود وو و هانگ [۶] از روش الکتروریسی، استفاده نمودند اما عواملی همچون پیچیدگی فرایند، محدودیت در انتخاب مواد اولیه، نرخ تولید کم موجب محدودیت این روش شده است. فرآیند ریسندگي گریز از مرکز به عنوان روشی نوین در تولید نانوالیاف، معرفی می‌شود. هدف اصلي اين روش تولید نانوالیاف در مقیاس بیشتر و هزینه کمتر با نرخ تولید بالاحدود ۵۰۰ برابر سریعتر نسبت به روش الکتروریسی سنتی، مي‌باشد [۷]. اخیرا برای اولین بار در ایران، در دانشگاه خلیج فارس بوشهر، تاجیک از فرآیند ریسندگی گریز از مرکز به منظور تولید الیاف در

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷ تاریخ چاپ: ۹۶/۰۸/۳۰

مقیاس نانومتر استفاده نمود. در این پژوهش از محلول پلیمری، پلی اکریلونیتریل[1] در حلال دی متیل فرمامید[2] به عنوان خوراک اولیه فرآیند استفاده شده است. در طی این پژوهش تاثیر پارامترهای مختلف بر تشکیل وساختار نانوالیاف بررسی و شرایط بهینه جهت تولید نانوالیافPAN تعیین شده است [۸]. در این مقاله مروری بر روش نوین ریسندگی گریز از مرکز، بهبود خواص نانوالیاف توسط نانوذرات و کاربرد نانوالیاف کامپوزیتی انجام گرفته است.

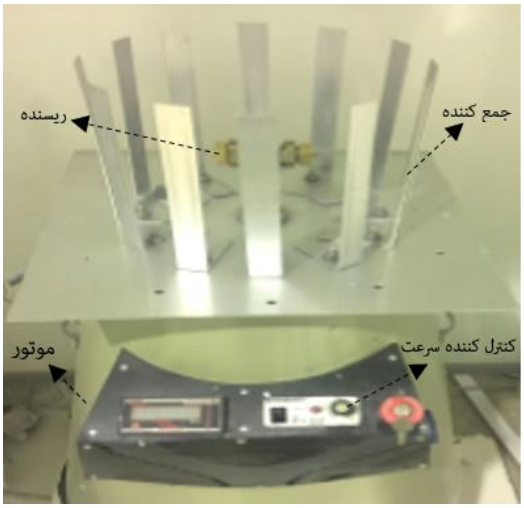
۲- فناوری نانوالیاف

برای قابل استفاده بودن نانو مواد در دنیای ماکرو، مواد باید به میکرو مواد و ماکرو مواد تبدیل شوند. فناوری نانو الیاف، تکنیکی شامل، سنتز، فرآیند ساخت وکاربرد الیاف در مقیاس نانو است. این فناوری یک تکنیک امیدوار کننده بوده که به شکل گستردهای میتواند نانو مواد را به صورت دو بعدی ترکیب و کمک به ساخت ساختارهای میکرو و ماکرو مقیاس کند. به‌طورکلی الیاف به سه دسته الیاف معمولی، الیاف میکرونی و نانو الیاف طبقه‌بندی میشوند. اصطلاح نانو الیاف به رشته‌های نسبتاً کوتاهی با قطر کمتر از ۱۰۰ nm اطلاق شده، اما معمولاً الیاف با قطر کمتر از ۱۰۰۰nm به عنوان نانو الیاف معرفی می‌شود.نانو الیاف، یکی از نانو مواد یک بعدی بسیار مهمی هست که به دلیل خواص منحصر به فرد و کاربردهای بسیار، توجه زیادی را به خود جلب کرده است[۹].

۳- تولید نانوالیاف

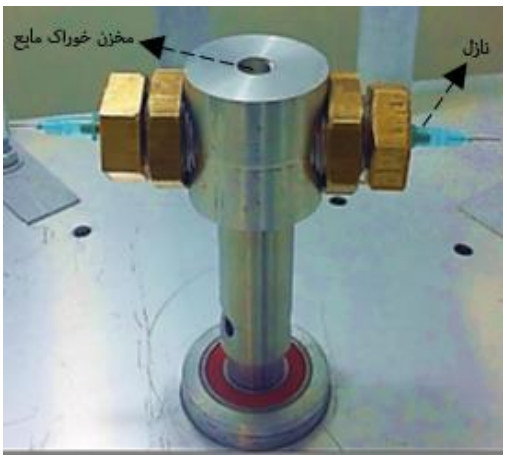
۳-۱- ریسندگی گریز از مرکز

روش ریسندگی گریز از مرکز به نام‌های دیگری مانند Forcespinning، جت چرخشی ریسنده[3] و ریسندگی نیروی گریز از مرکز[4] نیز معرفی شده استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از نیروی گریز از مرکز به جای نیروی الکترواستاتیک، نانوالیاف با نرخ بالا تولید می‌کند. در این روش با استفاده از محلول پلیمری یا مذاب پلیمری بدون محدودیت ثابت دی الکتریک و بدون نیاز به میدان الکتریکی با ولتاژ بالا، نانوالیاف تولید می شود. روش ریسندگی گریز از مرکز از مزیت‌های دیگری مانند: هزینه تولید کم، تجهیزات ساده، توانایی تولید نانوالیاف سه بعدی و ایمنی بالا برخوردار است. شکل ۱ تصویر دستگاه ریسندگي گریز از مرکز ازمایشگاهی دانشگاه خلیج فارس را نشان می دهد. این دستگاه از یک نخ ریس شامل نازل، یک موتور با سرعت بالاجهت چرخش نخ ریس، یک کنترل کننده سرعت جهت تنظیم سرعت چرخش نخ ریس، و یک جمع کننده الیاف تشکیل شده است [۸].



شکل ۱. تصویر دستگاه ریسندگی گریز از مرکز شامل ریسنده، جمع کننده، کنترل کننده سرعت و موتور [۸].

ریسنده به عنوان قسمت مهمی در دستگاه ریسندگی گریز از مرکز، در مرکز دستگاه قرار گرفته است و توسط یک محور به موتور متصل میشود .وظیفه آن انتقال نیروی چرخش موتور به محلول پلیمری و تولید جت پلیمری است. ریسنده معمولاً شامل دو نازل کوچک و یک مخزن است اما میتواند شامل تعداد بیشتری نازل برای افزایش سرعت تولید در مصارف صنعتی باشد. شکل ۲ تصویر ریسنده‌ی مورد استفاده در دستگاه ریسندگی گریز از مرکز ازمایشگاهی دانشگاه خلیج فارس را نشان می‌دهد [۸].



شکل ۲. تصویر نمونه‌ای از ریسنده‌های مورد استفاده در دستگاه ریسندگی گریز از مرکز شامل یک مخزن و دو نازل [۸].

روش ریسندگي گریز از مرکز بر اساس غلبه نیروي گریز از مرکز بر کشش سطحي محلول استوار است. به منظور تولید نانو الیاف، در ابتدا محلول مایع یا مذاب پلیمري در ریسنده بارگذاري شده و با دور مناسب توسط موتور به چرخش در مي‌آید. زماني که نیروي گریز از مرکز بر کشش سطحي مایع غلبه مي‌کند، محلول پلیمري به صورت یک جت مایع، از نازل هاي ریسنده خارج شده و در یک

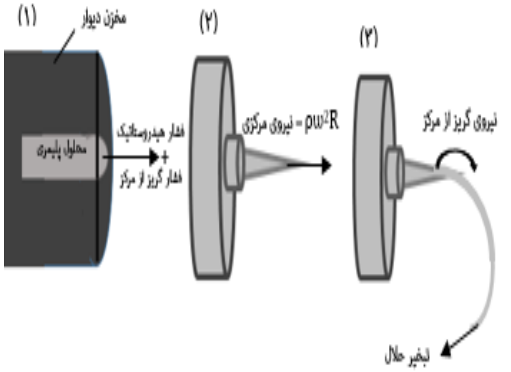
[1] PAN
[2] DMF
[3] Rotary jet spinning
[4] Centrifugal force spinning

مسیر دوار شروع به چرخش می‌کند. چرخش جت مایع باعث کشیده شدن آن و تبخیر همزمان حلال می‌شود. نهایتاً پس از تبخیر حلال و کاهش قطر جت، الیاف تشکیل شده و بر روی جمع کننده قرار می‌گیرند. محمد رضا بدروسامی و همکاران در سال ۲۰۱۰ فرآیند ریسندگی گریز از مرکز را به منظور تولید نانو الیاف پیشنهاد کردند. آنها روند تولید نانو الیاف و تأثیر پارامترهای غلظت محلول و سرعت چرخش بر ساختار نانو الیاف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تشکیل نانو الیاف در روش ریسندگی گریز از مرکز شامل سه مرحله می‌باشد. این سه مرحله در شکل ۳ نشان داده شده است.با توجه به این شکل، مراحل اصلی تشکیل نانو الیاف به شرح زیر است:

۱-شروع جت پلیمری: در این مرحله ترکیب فشار هیدرواستاتیک و فشار گریز از مرکز از نیروهای مقاوم مویینگی بیشتر می‌شود. در نتیجه محلول پلیمری به صورت جت از نازل خارج خواهد شد.

۲-گسترش جت پلیمری :با خروج جت پلیمری به سمت دیواره‌های جمع کننده، نیروی گریز از مرکز شعاعی برون سو باعث کشیده شدن جت پلیمری می‌شود و به دلیل اینرسی وابسته به چرخش، جت در یک مسیر منحنی شروع به حرکت می‌کند.

۳-تبخیر حلال :هم زمان با کشیده شدن جت پلیمری، حلال موجود در محلول پلیمری تبخیر شده و جت شروع به جامد شدن و انقباض می‌کند.



شکل ۳. شماتیک مراحل تشکیل الیاف

نتایج تأثیر پارامترهای غلظت محلول و سرعت چرخش بر قطر نانو الیاف پلی لاکتیک اسید نشان داد که افزایش غلظت محلول پلیمری باعث افزایش قطر نانو الیاف پلی لاکتیک اسید می‌شود؛اما افزایش سرعت چرخش باعث کاهش قطر این نانو الیاف می‌گردد همچنین غلظت محلول به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر گرانروی محلول، تأثیر بسیار زیادی بر تشکیل الیاف با روش ریسندگی گریز از مرکز دارد [۱۰]. در جدول ۱، تحقیقات انجام شده در زمینه تولید نانوالیاف با روش ریسندگی گریز از مرکز آورده شده است.

جدول ۱ : غربالگری تحقیقات انجام شده در زمینه تولید نانوالیاف با روش ریسندگی گریز از مرکز

پلیمر	موضوع	نتایج	منابع
پلی وینیلیدن فلوراید[1]	بررسی پارامترهای موثر برساختار و قطر نانوالیاف	افزایش غلظت ← افزایش قطر افزایش سرعت چرخشی ← کاهش قطر	[۱۱]
پلی اکریلونیتریل[2]	بررسی تأثیر پارامترهای سرعت چرخش، غلظت محلول، قطر نازل و فاصله جمع کننده تا نازل بر تشکیل و ساختار نانو الیاف	افزایش غلظت ← افزایش قطر افزایش ابعاد نازل ← افزایش قطر افزایش سرعت چرخشی ← کاهش قطر افزایش فاصله جمع کننده ← کاهش قطر	[۹]
پلی اتیلن اکسید[3]	بررسی پارامترهای غلظت محلول، سرعت چرخش، زاویه نازل، نسبت ابعاد نازل و مقدارخوراک اولیه بر قطر نانو الیاف	افزایش غلظت ← افزایش قطر افزایش ابعاد نازل ← افزایش قطر افزایش سرعت چرخشی ← کاهش قطر افزایش مقدار خوراک اولیه ← کاهش قطر	[۱۲]
پلی لاکتیک اسید[4]	اثر سرعت تبخیر حلال بر نانو الیاف پلی لاکتیک اسید	افزایش ظرافیت حلال ← افزایش غلظت پلیمر← افزایش قطر	[۱۳]
پلی آمید[5]	پارامترهای تأثیرگذار بر تولید و ساختار نانوالیاف پلی آمید	افزایش غلظت ← افزایش قطر افزایش سرعت چرخشی ← کاهش قطر	[۱۴]
پلی اکریلونیتریل	تولید نانو الیاف جهت استفاده در باتریهای یون لیتیوم	نانو الیاف PAN خواص الکتروشیمیایی مطلوبی برای باتری‌های یون لیتیوم نشان دادند	[۱۵]

۴-تولید و بهبود نانوالیاف توسط نانوذرات اکسیدی

در سال‌های اخیر تولید نانوالیاف حاوي نانوذرات به یکی از جالب توجه ترین موضوعات تحقیقاتی در زمینه نانوالیاف تبدیل شده است. نانوالیاف کامپوزیتی به دلیل دارا بودن ترکیبی از ویژگی‌هاي منحصر به فرد نانوذرات و خصوصیات ممتاز نانو الیاف پلیمري بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوالیاف کامپوزیتی موجب می‌شود که لایه یا الیاف به دلیل حضور نانوذره کارایی بهتری داشته باشند و از جهتی الیاف از خوردگی یا اکسید شدن نانوذرات جلوگیری می‌کنند [۱۶]. یکی از مهمترین ویژگی‌هاي ساختاري نانوالیاف، قطر آنها می‌باشد که خواص نانوالیاف مانند سطح مخصوص، خلل وفرج، ویژگی‌هاي مکانیکی، نوري و الکتریکی را تعیین می‌کند .این خواص در تولید لایه‌هایی با ویژگی‌ها و کاربردهاي مطلوب اهمیت دارند. علاوه بر پارامترهاي محیط و پارامترهاي فرآیند، پارامترهاي محلول مانند هدایت، گرانروي و کشش سطحی محلول پلیمري، قطر نانوالیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مورد نانوالیاف کامپوزیتی، نانوذرات افزوده شده به محلول پلیمري به دلیل تغییر برخی از عامل‌هاي مؤثر ذکر شده، عامل دیگري است که قطر نانوالیاف تولیدي را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تا کنون از نانو ذرات فلزی و اکسید فلزی بسیاری نظیر SiO، ZnS، Si، SnO_2، Fe_3O_4 ، $CoFe_2O_4$، TiO_2، Agi، Sn، NiO و $SnCl_2$ به منظور پوشش دادن الیاف استفاده شده است. پژوهشگران از طریق روش‌های مختلف توانسته اند الیاف را با نانوذرات پوشش دهند. ژانگ و همکاران [۱۷]، از روشی استفاده کردند که از همان ابتدا نانوذرات را در محلول پلیمری پراکنده شود و با ریسندگی محلول

شامل پلیمر و نانوذره الیاف کامپوزیتی تولید شود. در پژوهش آن‌ها پلی اکریلونیتریل در دی متیل فرمامید ترکیب شده، سپس مقادیر متفاوت از نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از امواج آلتراسونیک در محلول پلیمری پراکنده شد و از طریق دستگاه الکتروریسی الیاف کامپوزیتی تولید شد. این روش، مرسوم ترین روش در تولید نانوالیاف کامپوزیتی به حساب می‌آید. ژنگ و همکاران [۱۸]، از روشی استفاده کردند که در آن پس از ریسندگی محلول پلیمری، نانوالیاف برحسب نیاز در راکتور یا کوره حاوی گاز مخصوص قرار داده می‌شود، تا واکنش‌های لازم انجام شود و نانوذرات بر روی نانوالیاف بارگذاری شوند. در این پژوهش به محلول پلیمری PAN-DMF، ابتدا $AgNO_3$ افزوده، و با استفاده از دستگاه الکتروریسی الیاف کامپوزیتی تولید شد، سپس برای کاهش نیترات و تبدیل $AgNO_3$ به Ag، از $NaBH_4$ استفاده کردند. مو و همکاران [۱۹]، با استفاده از روش دیگربرای تولید الیاف کامپوزیتی استفاده کردند. در این روش ابتدا نانوالیاف تولید و سپس نانوالیاف در محلولی که حاوی نانوذرات است قرار داده می‌شود تا جذب اتفاق بیوفتد و از طریق سنتز حرارتی نانوذرات بر روی نانوالیاف تولید شود. همچنین در پژوهشی به منظور مقایسه روش‌های ذکر شده پتال و هوتا از هر سه روش جهت تولید الیاف پلی اکریلونیتریل پوشیده شده با اهن اکسید استفاده کردند [۲۰]. در جدول ۲، تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از نانوذرات جهت بهبود الیاف آورده شده است.

جدول ۲ : غربالگری تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از نانوذرات جهت بهبود الیاف آورده

نانوذره	روش	موضوع	نتایج	منابع
Ag	الکتروریسی	تأثیر نانوذره برخاصیت فتوکاتالیست	مطلوب بودن خاصیت فتوکاتالیستی الیاف	[۲۱]
TiO_2	الکتروریسی	تأثیر نانوذره بر عملکرد ضد باکتری	مطلوب بودن خاصیت ضد میکروبی	[۲۲]
SiO_2	الکتروریسی	تاثیر نانوذره در عملکرد الیاف به عنوان غشا	مطلوب بودن عملکرد الیاف برای جداسازی	[۲۳]
SiO_2	گریز از مرکز	اثیر نانوذره در کاربرد الیاف برای باتری‌های یون-لیتیوم	مطلوب بودن عملکرد الیاف در باتری‌های یون-لیتیوم	[۲۴]
SnO_2	گریز از مرکز	تاثیر نانوذره در کاربرد الیاف برای باتری‌های یون-لیتیوم	مطلوب بودن عملکرد الیاف در باتری‌های یون-لیتیوم	[۲۵]
Mgo و Al_2o_3	الکتروریسی	تاثیر نانوذره بر میزان محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش	نانوذره موجب افزایش محافظت در برابراشعه ماورا بنفش	[۲۶]

۵-کاربرد الیاف کامپوزیتی

الیاف کامپوزیتی به دلیل داشتن خواص چندگانه ناشی از ترکیب الیاف و نانومواد مختلف، نسبت به الیاف معمولی از نظر خواص مکانیکی، الکتریکی، گرمایی، شیمیایی و مقاومتی مناسب‌تر می‌باشند. این دسته از الیاف در حوزه‌های مختلفی از جمله فتوکاتالیست، انرژی، فیلتراسیون، نساجی، پزشکی و محیط زیست دارای کاربردهای بسیار مهمی می‌باشند [۲۲].

۵-۱- فتوکاتالیست

ساخت نانو الیاف‌های کامپوزیتی پلیمری و نانو ذرات مختلف مانند Ag_3PO_4، Ag_2CO_3، TiO_2 و ZnS به عنوان فتوکاتالیست بسیار مورد توجه هستند. پنتی و همکاران نانوالیاف $PAN\text{-}Ag_2CO_3$ را با استفاده از روش الکتروریسی تولید کرده و خاصیت فتوکاتالیستی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد نانو الیاف کامپوزیتی $PAN\text{-}Ag_2CO_3$ فعالیت فتوکاتالیستی بسیار خوبی برای تخریب محلول قرمز رنگ متیل و فعالیتهای ضد باکتری تحت تابش نور مرئی دارند [۲۱]. در پژوهشی دیگر ، هی و همکارانش ذرات ZnS را روی سطح نانوالیاف کوپلیمر پلی وینیلیدن دی فلورید-متاکریلیک اسید-تری فلوروواتیل اکریلات پراکنده کرده و تخریب متیلن بلو تحت نور فرابنفش توسط نانوالیاف کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد بازده تخریب آلاینده توسط الیاف کامپوزیتی نسبت به نانو پودر سولفید روی، به طور قابل توجهی بالاتر است. بنابراین نانوالیاف به دلیل جلوگیری از انباشتگی ذرات ، موجب بهبود بازده تخریب فتوکاتالیستی می‌شوند [۲۷]. سو و همکاران از طریق ترکیب روش الکتروریسی و فرایند هیدروترمال نانوذرات تیتانیم دی اکسید را برروی الیاف پلی اکریلونیتریل تولید کردند . واز آن جهت حذف فنل از پساب سنتزی استفاده کردند. نتایج نشان داد نانوالیاف کامپوزیتی دارای سطح مقطع بزرگ و ساختار انعطاف پذیر است. الیاف کامپوزیتی TiO_2/PAN فعالیت فتوکاتالیستی مطلوب و پایداری بالایی، در آزمایشات مربوط به حذف فنل از پساب سنتزی تحت پرتو فرابنفش از خود نشان داد [۲۸]. جی و همکاران با روش الکتروریسی نانوالیاف پلی اکریلونیتریل حاوی مقادیر متفاوت نانوذره تیتانیم دی اکسید تهیه کردند. فعالیت فتوکاتالیستی الیاف PAN/TiO_2 و تاثیر میزان تیتانیم دی اکسید بر روی مورفلوژی و خاصیت فتوکاتالیستی الیاف کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد با افزودن مقادیر TiO_2، قطر الیاف افزایش می‌یابد و الیاف از نظر شکل نامنظم و دارای سطحی زبر می‌شوند. بازده فتوکاتالیستی الیاف کامپوزیتی الکتروریسی شده از طریق تخریب رنگهای آلی نتایج نشان داد الیاف کامپوزیتی در مقایسه با نانوذرات تیتانیم دی اکسید از خاصیت فتوکاتالیستی بیشتری برخوردار هستند زیرا هنگامی که نانوذرات در ماتریس پلیمری توزیع می‌شوند از حداکثر سطح مقطع برخوردار هستند. بنابراین نتایج حاصل نشان می‌دهد که

الیاف کامپوزیتی می‌تواند به عنوان یک فتوکاتالیست موثر در تخریب آلاینده از محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد [۲۹].

۲-۵- فیلتراسیون

استفاده از نانوذرات همچون SiO_2 در ساخت غشاهای نانو الیاف به عنوان یکی از روشهای امیدوارکننده در فیلتراسیون هوا معرفی شده است. این نوع غشاها به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و تخلخل بسیار زیاد علاوه بر کاربرد در تصفیه ریز گردهای هوا، عملکرد بسیار خوبی در فرآیندهای تصفیه مایعات نیز نشان داده اند. فیلترهای مبتنی بر نانو الیاف، با توجه به ساختار منحصر به فرد خود، راندمان فیلتراسیون بسیار بالا و افت فشار کمی برای ذرات ریز دارند. همچنین افزایش منافذ غشاء با کاهش قطر نانو الیاف، تأثیر بسیار زیادی بر فرآیند فیلتراسیون دارد. وانگ و همکاران غشاء چند لایه ای از نانو الیاف های $PAN-SiO_2$ و نانو الیاف PAN تولید کردند. غشاء به منظور کاربرد در تصفیه هوا ساخته شد. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده بر روی آن نشان دهنده راندمان۹۹/۹% و افت فشار۱۱۷ kPa برای فیلتراسیون نانوذرات با اندازه۳۰۰-۵۰۰ nm است [۲۳]. در پژوهشی دیگر پن و همکاران نانوالیاف کامپوزیتی نایلون-تیتانیم دی اکسید تولید کردند. حضور مقدار کمی از نانوذرات TiO_2 موجب بهبود خواص انتی باکتریال، آبدوستی، استحکام مکانیکی شده است. همچنین نانوذرات TiO_2 توانایی حفاظت در برابر اشعه فرابنفش را افزایش دادند. نانوالیاف کامپوزیتی نسبت به الیاف خالص خاصیت انتی باکتریال مطلوب تری دارند و یک گزینه ی مناسب جهت استفاده در فیلتر آب محسوب می‌شوند [۳۰]. پارک و همکاران نانوالیاف کامپوزیتی نایلون-۶ حاوی نانو ذرات Ag تولید کرده و خواص انتی باکتریال آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، به دلیل حضور نانوذرات Ag، نانوالیاف کامپوزیتی نسبت به الیاف خالص نایلون، خواص انتی باکتریال مطلوب تری دارند. در نتیجه این نانوکامپوزیت ها مواد مناسبی برای تصفیه آب محسوب می شوند [31].در پژوهشی دیگر توسط تایی و همکاران از غشاء نانو الیاف $CNFs-SiO_2$ برای جداسازی مخلوط آب و روغن استفاده شده است. در این غشا PAN به منظور تولید CNFs مورد استفاده قرار گرفته است. غشای ساخته شده به دلیل انعطاف پذیری بالا و خاصیت آب گریزی، عملکرد بسیار خوبی برای جداسازی آب از روغن نشان داده است [۳۲].

۳-۵- محیط زیست

تصفیه‌ی آب و پساب‌ها، حذف فلزات سنگین و آلودگی‌های نفتی از جمله کاربردهای نانو الیاف در زمینه‌ی محیط زیست است. شجایی و همکاران با افزودن TiO_2با سایز ۷۰ نانومتر به محلول پلیمری و به کارگیری روش الکتروریسی الیاف کامپوزیتی PAN-TiO_2 تولید کردند و از آن به عنوان جاذب استفاده کردند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد میانگین قطر الیاف کامپوزیتی در مقایسه با الیاف خالص کمی کاهش یافته است. که میتوان به کلوخه شدن ذرات و در نتیجه کاهش میزان خروج محلول پلیمری از سر نازل الکتروریسی گشته و منجر به کاهش میانگین قطری الیاف کامپوزیتی گردد.همچنین با افزایش میزان TiO_2، در الیاف ساختارهای مهره ای تشکیل می‌شود که میتوان به تجمع نانوذرات نسبت داد. نتایج حاصل از ازمایشات جذب نشان داد، با افزودن مقادیر کمی از نانوذرات TiO_2، ظرفیت جذب به طور قابل توجه ای افزایش می‌یابد. در واقع افزودن نانوذره موجب کاهش قطر الیاف ،افزایش سطح مقطع و در نتیجه افزایش نرخ جذب می‌شود [۳۳].

۴-۵- ذخیره سازی انرژی

ابر خازن‌ها، دستگاه‌هایی برای ذخیره‌ی انرژی هستند که در مقایسه با باتری‌ها عملکرد بهتری در آزاد سازی و ذخیره انرژی دارند. استفاده از نانو الیاف به دلیل افزایش سطح تماس و هدایت الکتریکی بسیار خوب باعث بهبود عملکرد خازن‌ها خواهد شد. در پژوهشی یانیلماز و همکاران از فرآیند ریسندگی گریز از مرکز برای تولید نانو الیاف کامپوزیتی $PAN-SiO_2$ استفاده کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که افزایش غلظت نانو ذرات SiO_2 در محلول 17 wt% از PAN باعث کاهش قطر الیاف به دلیل کاهش همپوشانی زنجیره پلیمری محلول می‌شود. همچنین نتایج ازمایشگاهي نشان داد که غشاهاي $PAN-SiO_2$ محدوده‌ی اکسیداسیون الکتروشیمیایی بالاتر، مقاومت سطحي پایین تر و عملکرد بهتري نسبت به غشاهای تجاری میکرومتخلخل پلی اولفین دارند [۲۴]. مو و همکاران با به کارگیری روش الکتروریسی نانوالیاف کربنی تهیه کردند وتاثیر نانوذرات SnO_2 را بر روی نانوالیاف بررسی کردند. نتایج XRD و تصاویر SEM نشان دادند که پوشش نانو ذرات SnO_2 برروی سطح نانوالیاف کربنی به راحتی قابل کنترل است. همچنین بررسی الکتروشیمیایی SnO_2/CNFs نشان داد که این مواد دارای عملکرد عالی خازنی هستند [۱۹]. جی و ژنگ نانوالیاف چند جزئی PAN/PLLA/Si با استفاده از روش الکتروریسی تهیه کردند. در این پژوهش نشان داده شد که نانوالیاف های چندجزئی PAN/PLLA/Si می‌توانند به عنوان مواد اند در باتری های قابل شارژ لیتیم-یون مورد استفاده قرار گیرند. همچنین پیش بینی کردند که با بهینه سازی برخی پارامترها مانند سایز ذرات Si, ظرفیت این مواد را به طور قابل توجه ای افزایش دهند [۳۴]. همچنین می‌توان به پژوهش جیانگ و همکاران اشاره کرد که با استفاده از روش نخ ریسی گریز از مرکز و عملیات حرارتی، تاثیر نانو ذره $SnCl_2$ بر نانوالیاف‌های کربنی PAN بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذره $SnCl_2$، ویسکوزیته ویژه محلول درحال چرخش و میانگین قطر نانوالیاف های ریسیده شده افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که ریسندگی گریز از مرکز یک جایگزین نوید بخش به جای الکتروریسی برای ساخت نانوالیاف با کارایی ذخیره سازی انرژی می باشد [۳۵].

۵-۵- نساجی

لباس‌های محافظ به منظور حفاظت از افرادی که در معرض تهدیدهای شیمیایی و بیولوژیکی مانند مواد شیمیایی صنعتی، مواد سمی و یا عوامل جنگ‌های بیولوژیکی و شیمیایی قرار دارند، مورد

استفاده قرار می‌گیرند. غشاهای نانو الیاف به عنوان یک پتانسیل بسیار خوب برای لباس‌های محافظ هوشمند به شمار می‌آیند. سعید دادور و همکاران به بررسی خواص نانو الیاف کامپوزیتی PAN و نانو ذرات آلومینیوم اکسید و منیزیم اکسید در برابر اشعه ماوراء بنفش پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، کاهش قطر الیاف میزان محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش را افزایش می‌دهد. همچنین لایه های نانو الیاف نسبت به الیاف معمولی بافته شده عملکرد بسیار بهتری دارند. اضافه کردن نانو ذرات MgO و Al_2O_3 باعث محافظت بیشتر در برابر اشعه ماوراء بنفش شده است [۲۶]. لی و همکارانش با استفاده از روش الکتروریسی از طریق ترکیب غلظت های متفاوت نانوذرات تیتانیم دی اکسید به محلول پلیمری پلی وینیل الکل[۱]، نانوالیاف کامپوزیتی PVA/TiO_2 تهیه کردند. الیاف کامپوزیتی از نظر محافظت در برابر پرتوهای فرابنفش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد الیاف کامپوزیتی حاوی ۲ درصد وزنی TiO_2، از خاصیت محافظت پرتوفرابنفش بسیار عالی برخوردار است [۲۲].

۶. نتیجه گیری

باوجود اینکه روش الکتروریسی به عنوان رایج‌ترین روش در تولید نانو الیاف شناخته می‌شود، اما به دلیل نرخ تولید کم، استفاده از اختلاف پتانسیل بالا و ایمنی فرآیند پایین، تمایل به استفاده از این روش برای کاربردهای صنعتی محدود است و زمینه برای استفاده از ریسندگی گریز از مرکز به عنوان روشی نوین فراهم می‌شود. روش ریسندگی گریز از مرکز، روشی مناسب برای تولید نانو الیاف کامپوزیتی می‌باشد. از جمله مزیت‌های روش ریسندگی گریز از مرکز نسبت به سایر روش‌های تولید نانوالیاف عبارت است از : تجهیزات ساده، عدم نیاز به میدان الکتریکی، سرعت تولید بالا،هزینه عملیاتی پایین و تولید نانو الیاف مستقل از هدایت الکتریکی محلول. به منظور بهبود خواص و بالا بردن کارایی نانوالیاف استفاده از نانوذرات مختلف کاربرد گسترده‌ای دارد. نانوذرات با بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی، گرمایی ، شیمیایی و مقاومتی نانوالیاف موجب افزایش کاربرد نانوالیاف در زمینه های فتوکاتالیست، انرژی، فیلتراسیون، نساجی، پزشکی و محیط زیست می‌شوند.

۵. منابع

[1] S. Zhong, Y. Zhang, and C. T. Lim, Tissue Engineering Part B: Reviews,18,77-87, (2011).

[2] I. Smith, X. Liu, L. Smith, and P. Ma, Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicineand Nanobiotechnology, 1, 226-236, (2009).

[3] J. A. Merlo and C. D. Frisbie, The Journal of Physical Chemistry B, 108, 19169-19179, (2004).

[4] S. Kobayashi and H. Higashimura, Progress in Polymer Science, 28, 1015-1048, (2003).

[5] S. A. Harfenist, S. D. Cambron, E. W. Nelson, S. M. Berry, A. W. Isham, M. M. Crain, et al., Nano Letters, 4, 1931-1937, (2004).

[6] S.-H. Wu and X.-H. Qin, Materials Letters, 106, 204-207, (2013).

[7] L. Ren, R. Ozisik, and S. P. Kotha, Journal of colloid and interface science, 425, 136-142, (2014).

[8] ع. تاجیک, "مطالعه پارامتری تولید و خصوصیات نانو الیاف پلي اکریلونیتریل ساخته شده با روش ریسندگي گریز از مرکز," دانشکده مهندسي نفت، گاز و پتروشیمي, دانشگاه خلیج فارس بوشهر, (۱۳۹٤).

[9] Y. Lu, Y. Li, S. Zhang, G. Xu, K. Fu, H. Lee, et al., European Polymer Journal, 49, 3834-3845, (2013).

[10] M. R. Badrossamay, H. A. McIlwee, J. A. Goss, and K. K. Parker, Nano letters, 10, 2257-2261, (2010).

[11] B. Vazquez, H. Vasquez, and K. Lozano, *Polymer Engineering & Science*, 52, 2260-2265, (2012).

[12] S. Padron, A. Fuentes, D. Caruntu, and K. Lozano, *Journal of applied physics*, 113, 024318, (2013).

[13] H. M. Golecki, H. Yuan, C. Glavin, B. Potter, M. R. Badrossamay, J. A. Goss, et al., Langmuir, 30, 13369-13374, (2014).

[14] M. A. Hammami, M. Krifa, and O. Harzallah, the Journal of the Textile Institute, 105, 637-647, (2014).

[15] V. A. Agubra, L. Zuniga, D. De la Garza, L. Gallegos, M. Pokhrel, and M. Alcoutlabi, Solid State Ionics, 286, 72-82, (2016).

[16] K. M. Sawicka and P. Gouma, *Journal of Nanoparticle Research*, 8,769-781, (2006).

[17] D. Zhang, A. B. Karki, D. Rutman, D. P. Young, A. Wang, D. Cocke, *et al.*, *Polymer*, 50, 4189-4198, (2009).

[18] C. Zhang, Q. Yang, N. Zhan, L. Sun, H. Wang, Y. Song, *et al.*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 362, 58-64, (2010).

[19] J. Mu, B. Chen, Z. Guo, M. Zhang, Z. Zhang, C. Shao, *et al.*, *Journal of colloid and interface science*, 356, 706-712, (2011).

[20] S. Patel and G. Hota, *RSC Advances*, 6, 15402-15414, (2016).

[21] G. Panthi, *et al.*, *Journal of Materials Science*, *50*, *4477-4485*, (*2015*).

[22] K. Lee and S. Lee, Journal of Applied Polymer Science, 124, 4038-4046, (2012).

[23] N. Wang, Y. Si, N. Wang, G. Sun, M. El-Newehy, S. S. Al-Deyab, et al., SeparaTiOn and PurificaTiOn Technology, 126, 44-51, (2014).
[24] M. Yanilmaz, Y. Lu, Y. Li, and X. Zhang, Journal of Power Sources, 273, 1114-1119, (2015).
[25] H. Jiang, Centrifugally-Spun Nanofibers and Their Energy Storage ApplicaTiOns, 2014.
[26] S. Dadvar, H. Tavanai, and M. Morshed, Journal of Nanoparticle Research,13, 5163, (2011).
[27] T. He, H. Ma, Z. Zhou, W. Xu, F. Ren, Z. Shi, *et al.*, *Polymer DegradaTiOn and Stability*, 94, 2251-2256, (2009).
[28] C. Su, Y. Tong, M. Zhang, Y. Zhang, and C. Shao, *RSC Advances*,. 3, 7503-7512, (2013).
[29] B. C. Ji, S. S. Bae, M. M. Rabbani, and J. H. Yeum, 25, 94-101, (2013).
[30] H. R. Pant, M. P. Bajgai, K. T. Nam, Y. A. Seo, D. R. Pandeya, S. T. Hong, et al., Journal of hazardous materials, 185, 124-130, (2011).
[31] S. W. Park, H. S. Bae, Z. C. Xing, O. H. Kwon, M. W. Huh, and I. K. Kang, Journal of applied polymer science, 112, 2320-2326, (2009).
[32] M. H. Tai, J. Juay, D. D. Sun, and J. O. Leckie, *SeparaTiOn and PurificaTiOn Technology*, 156, 952-960, (2015).
[33] M. Shojaei, S. Sadjadi, M. Rajabi-Hamane, and S. J. Ahmadi, *DesalinaTiOn and Water Treatment*, 56, 1403-1412, (2015).
[34] L. Ji and X. Zhang, *Electrochemistry CommunicaTiOns*, 11, 1146-1149, (2009).
[35] H. Jiang, Y. Ge, K. Fu, Y. Lu, C. Chen, J. Zhu, *et al.*, carbon *Journal of materials science*, 50, 1094-1102, (2015).