

مطالعه ای تطبیقی بر فرآیند ریسندگی الکتروسانتریفیوژ و الکتروریسی پلی اکریلونیتریل به عنوان دو روش مختلف ایجاد نانوفیلترهای جدید در پاکسازی محیط زیست

سعیده رفیعی^{۱*}، پیمان ولی پور^۲

^۱استادیار، گروه فرش، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، پوشاک و مد، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران

s_rafieei@shirazartu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

چکیده

استفاده از نانوالیاف در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. این الیاف مزایای بسیاری نسبت به میکروالیاف دارند که مهمترین آن مساحت سطح مخصوص آنها است. الکتروریسی فرآیند مرسوم است که برای تهیه نانوالیاف پلیمری ظریف و یکنواخت استفاده می‌شود. استفاده از این روش به علت نیاز به اختلاف پتانسیل بالا، لزوم وجود جمع‌کننده رسانای الکتریکی و سرعت تولید نسبتاً کم محدود شده است. تکنولوژی ریسندگی سانتریفیوژ به جای استفاده از ولتاژ بالا برای تولید نانوالیاف، از نیروی گریز از مرکز استفاده کرده و گزینه‌ای ایمن‌تر و مقرون به صرفه‌تر نسبت به الکتروریسی است. در این مطالعه، نیروهای گریز از مرکز و الکتریکی به طور همزمان برای تولید نانوالیاف پلی اکریلونیتریل به کار گرفته شده و تاثیر افزودن نیروی گریز از مرکز به نیروهای الکتریکی بر قطر نانوالیاف، میزان تولید، درصد تخلخل سطحی و جذب رنگ نانوالیاف پلی اکریلونیتریل تولید شده با هر دو روش مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش الکتروسانتریفیوژ به جای الکتروریسی می‌تواند تا ۴۰٪ قطر نانوالیاف را کاهش دهد و منجر به افزایش نرخ تولید تا ۶۸٪ شود. از سویی دیگر، افزایش سرعت چرخش در این روش منجر به کاهش قطر نانوالیاف و افزایش مساحت سطح ویژه می‌گردد. علاوه بر این، نانوالیاف تولید شده با این روش ۳۳٪ بیشتر از نانوالیاف الکتروریسی شده در جذب آلاینده رنگی موفق عمل کرد. لذا استفاده از این الیاف به عنوان جاذبی موثر برای پساب‌های رنگی پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: نانوالیاف، الکتروسانتریفیوژ، الکتروریسی، پلی اکریلونیتریل، تصفیه پساب رنگی

Comparative study on electrocentrifuge and electrospinning of Polyacrylonitrile as two different methods of creating new nanofilters in environmental refinement

Saeedeh Rafiee^{1*}, Peiman Valipour²

¹Department of Carpet, Art University of Shiraz, Shiraz, Iran

²Department of textile, Apparel and fashion, Qaemshahr branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

s_rafieei@shirazartu.ac.ir

Abstract

The use of nano fibers has grown significantly in recent years. These fibers have many advantages over micro fibers, the most important of which is their specific surface area and greater strength. Electrospinning is a conventional process used to prepare fine and uniform polymer nanofibers. The use of this method is limited due to the need for a high potential difference, the need for an electrically conductive collector, and relatively low production speed. Centrifugal spinning technology uses centrifugal force instead of using high voltage to produce nanofiber polymer and is a safer and more affordable option than electrospinning. In this study, centrifugal and electric forces were used simultaneously to produce polyacrylonitrile nanofibers and the effects of adding centrifugal force to electric forces on the diameter of nanofibers, production rate, percentage of surface porosity, and dye absorption of polyacrylonitrile nanofibers were compared for both methods. The results showed that the use of electrocentrifuge instead of electrospinning can reduce the diameter of nanofibers by 40% and increase the production rate by 68%. On the other hand, increasing the rotation speed in this method leads to a decrease in the diameter of nanofibers and an increase in the specific surface area. Moreover, nanofibers produced by this method were 33% more successful than electrospun nanofibers in absorbing colored pollutants. Therefore, the use of these fibers as an effective absorbent for colored wastes is suggested.

Keywords: nanofibers, electrocentrifuge, electrospinning, polyacrylonitrile, colored wastewater treatment

۱- مقدمه

هنگامی که قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به زیرمیکرو یا نانومتر کاهش می‌یابد، چندین ویژگی جدید از جمله نسبت بسیار بالای مساحت سطح به حجم، انعطاف‌پذیری در عملکرد سطح، و عملکرد مکانیکی برتر (به عنوان مثال، سختی و استحکام کششی) پدیدار می‌شود. این ویژگی‌های منحصر به فرد این الیاف پلیمری را به نامزدهای ایده آل برای بسیاری از کاربردهای مهم تبدیل می‌کند. مساحت سطح الیاف به ظرافت آن‌ها بستگی دارد و الیاف نانو بیش از ۱۰۳ برابر مساحت سطح بیشتری نسبت به الیاف میکرو دارند [۳-۱].

اگرچه تاکنون روش‌های متعددی برای تولید نانوالیاف پیشنهاد شده است، اما انتخاب روشی کارآمد و مقرون به صرفه هنوز یک چالش است که توسط بسیاری از کارشناسان مورد بحث قرار گرفته است. الکتروریسی تاکنون موفق‌ترین روش برای تولید نانوالیاف بوده است. این یک روش شناخته شده و برجسته است که مبتنی بر نیروی الکترواستاتیک است که امکان ریسندگی نانوالیاف از انواع پلیمرها را با استفاده از محلول یا مذاب پلیمری فراهم می‌کند [۴-۶].

استفاده از روش‌های مکانیکی برای اعمال نرخ بالای کشش به محلول یا مذاب پلیمری تنها برای پلیمرهایی با قابلیت کشسانی بالا، برای جلوگیری از انتقال نامتوازن تنش امکان‌پذیر است. به منظور اعمال نرخ‌های بالای کشش به محلول یا مذاب پلیمری، روش‌هایی مورد نیاز است که بتواند توزیع

تنش را در طول فرآیند کشش اعمال کند. هنگامی که نیروی گریز از مرکز بر روی یک ماده اعمال می‌شود، ذرات آن ماده نیرویی متناسب با فاصله خود از مرکز چرخش را تجربه خواهند کرد. بنابراین، می‌توان از این نیرو برای اعمال نرخ‌های بالای کشش بر روی یک محلول پلیمری استفاده کرد. در طول فرآیند کشش، اگر محلول پلیمری ویسکوزیته کافی داشته باشد، به صورت یک رشته کشیده شده و پس از خشک شدن به یک لیف پلیمری تبدیل می‌شود. روش الکتروسانتریفوژ چرخشی به عنوان روشی کارآمد برای تولید نانوالیاف معرفی شده است. مطالعات صورت گرفته با موضوع شناسایی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر تولید و قطر نانوالیاف تولید شده با این روش محدود است و از سویی دیگر مقایسه تأثیرات این پارامترها بر قطر نانوالیاف تولید شده با این روش و روش الکتروریسی ساده بسیار اندک است [۷-۱۰].

رشد فزاینده جمعیت و گسترش صنعت مختلف از جمله صنعت نساجی سبب کمبود آب سالم در جهان شده است. چرا که این صنعت حدود ده هزار رنگ مختلف با تولید جهانی سالانه بیش از ۷۰۰ هزار تن رنگ تولید می‌کنند. از این مقدار حدود ۱۰-۵٪ از طریق پساب صنایع نساجی و رنگرزی وارد محیط زیست می‌گردد. این پساب‌های رنگی علاوه بر آلوده کردن آب آشامیدنی انسان، تعادل زیست‌آبزیان را مختل کرده و صدمات جبران‌ناپذیری به محیط زیست وارد می‌کنند. لذا ضرورت تصفیه و بازیابی مجدد آبهای مصرفی اهمیت خاصی پیدا کرده است [۱۱-۱۳].

رنگزاهای راکتیو با ساختار آزو که دارای عامل رنگی پیوند دوگانه نیتروژن هستند، از جمله رنگزاهای پر کاربرد در صنایع نساجی بوده که به علت سمیت و تجزیه پذیری کمی که این رنگزاهای دارند، در گروه مواد خطرناک برای محیط زیست قرار می‌گیرند از این رو تصفیه آنها ضروریست. رنگزاهای آزو به تجزیه بیولوژیکی در شرایط هوازی مقاوم هستند و تصفیه آنها در شرایط بی‌هوازی منجر به تولید ترکیبات حلقوی می‌شود که ممکن است سمیت آنها از خود مولکول رنگزا بیشتر باشد. همچنین روش‌های تصفیه فیزیکی- شیمیایی از قبیل انعقاد و لخته سازی، جذب و فیلتراسیون غشایی دارای معایبی از جمله تولید لجن، نیاز به باز تولید جاذب و گرفتگی غشاها هستند [۱۴].

این تحقیق در ابتدا، به بررسی و مقایسه تولید نانو الیاف به روش‌های الکتروساتریفیوژ و الکترووریسی معمولی پرداخته و پارامترهای موثر بر فرآیند و تاثیر هر پارامتر بر قطر نانوالیاف نهایی را ارزیابی کرده است. سپس، رفتار جذبی نانوالیاف تولید شده با هر دو روش الکترووریسی و الکتروساتریفیوژ مورد مطالعه قرار گرفته و قابلیت جذب رنگزای راکتیو آبی ۱۳، که یکی از رنگزاهای پر کاربرد در صنایع نساجی از جمله فرش ماشینی است، بوسیله نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل الکترووریسی شده به دو روش الکترووریسی و الکتروساتریفیوژ ارزیابی می‌گردد.

نانوالیاف به عنوان الیافی با قطر کم تر از ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند که می‌توانند با روش‌های مختلفی مانند ریسندگی مذاب، پلیمریزاسیون بین سطحی، الکترووریسی،

الکتروساتریفیوژ چرخشی و رسوب پلیمری توسط ضدحلال تولید شوند [۱۵، ۱۶]. الیافی که با این روش‌ها تولید می‌شوند دارای سطح ویژه بسیار بالا، مقاومت غیرمعمول، انرژی سطحی بالا، واکنش پذیری سطحی و رسانایی گرمایی و الکتریکی بالایی هستند که می‌توانند در محصولات با کاربرد خاص مورد استفاده قرار گیرند. این ویژگی‌های منحصر به فرد، نانوالیاف پلیمری را برای بسیاری از کاربردهای مهم، مانند، نانوفیلتراسیون [۱۷]، نانوکاتالیست [۱۸]، داربست های بافتی [۱۹]، لباس محافظ [۲۰]، نانوالکترونیک، نانوالیاف با عملکرد بالا، سیستم تحویل دارو [۲۱]، پانسمان زخم و کامپوزیت ها [۲۲]، گزینه های ایده آلی می سازد. اگرچه تاکنون روش های متعددی برای تولید نانوالیاف پیشنهاد شده است، اما روش کارآمد و مقرون به صرفه تولید هنوز یک چالش مورد بحث بسیاری از کارشناسان است.

الکترووریسی یک روش ساده و کارآمد برای تولید نانوالیاف بوده که مبتنی بر نیروهای الکترواستاتیک است و امکان ریسندگی نانوالیاف از انواع پلیمرها را در حالت مذاب یا محلول فراهم می‌کند [۵، ۲۳]. در طی فرایند الکترووریسی، با تغذیه محلول یا مذاب پلیمری، به دلیل نیروهای کشش سطحی، قطره ای در نوک نازل تشکیل می‌شود. در اثر اعمال ولتاژ، بار القایی به طور مساوی روی سطح قطره توزیع شده و در معرض دو نیروی الکترواستاتیکی دافعه الکترواستاتیکی بین بار سطحی و نیروی کولمبی از میدان الکتریکی اعمال شده قرار می‌گیرد. این موضوع سبب کشش محلول یا مذاب پلیمری شده و نانوالیاف شکل

می‌گیرد [۵، ۲۴]. مورفولوژی الیاف توسط طراحی تجربی کنترل شده و به خواص محلول و شرایط سیستم مانند رسانایی، قطبیت حلال، غلظت محلول، وزن مولکولی پلیمر، ویسکوزیته و ولتاژ اعمالی وابسته است [۶].

نانوالیاف که توسط الکتروریسی سنتی تولید می‌شوند معمولاً دارای توزیع قطری گسترده‌ای هستند، در حالی که قطر الیاف تاثیر مهمی بر عملکرد نانوالیاف در بسیاری از کاربردهای مهم دارد. چندین متغیر می‌توانند بر قطر نانوالیاف الکتروریسی شده، یکنواختی قطر و کیفیت نانوالیاف مانند چگالی بار حجمی، فاصله از نازل تا کلکتور، شعاع جت پلیمری اولیه، زمان استراحت، ویسکوزیته، غلظت، چگالی محلول، پتانسیل الکتریکی، فرکانس اغتشاش و فشار بخار حلال تاثیر بگذارند. علاوه بر این، قطر نانوالیاف با افزایش کشش سطحی و نرخ جریان افزایش یافته اما با افزایش جریان الکتریکی کاهش می‌یابد. برهمکنش‌های حلال - پلیمر به شدت بر قطر و مورفولوژی نانوالیاف الکتروریسی شده تاثیر می‌گذارند. یک روش برای به دست آوردن نانوالیاف ظریف‌تر، کاهش غلظت محلول پلیمری است. همچنین، مشخص شده است که با افزایش رسانایی الکتریکی محلول پلیمری، کاهش قابل توجهی در قطر نانوالیاف الکتروریسی شده ایجاد می‌شود. از سویی دیگر، کنترل پارامترهای فرآیند مانند ولتاژ و دما می‌تواند بر قطر نانوالیاف الکتروریسی شده تاثیر بگذارد. قطر نانوالیاف با افزایش ولتاژ الکتروریسی افزایش می‌یابد [۲۵-۲۷].

اگرچه تمام این روش‌ها می‌توانند بر قطر نانوالیاف تاثیر بگذارند، اما برخی محدودیت‌ها به دلیل افزودن تاثیرات ناخواسته، کنترل ناکافی و دشوار مانع از کنترل قطر و مورفولوژی نانوالیاف می‌شود. بنابراین ارائه روشی که بتواند نانوالیاف با یکنواختی و ظرافت بالا را بدون تغییرات عمده بسازد، ضروری است.

ساخت نانوالیاف توسط یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا در روش الکتروریسی معمولی مشکلاتی دارد که کاربرد گسترده آن را محدود می‌کند. برخی از مهمترین این مشکلات شرح زیر است:

۱- میدان الکتریکی بالا در فرآیند ساخت نانوالیاف، به ویژه در ریسندگی الکترواستاتیک چند سوزنی مورد نیاز است. در عین حال، قطره ایجاد شده (مخروط تیلور) در نوک نازل ناپایدار است و امکان انسداد نازل یا چکیدن قطرات بسیار محتمل است.

۲- راندمان تولید در روش الکتروریسی معمولی پایین است. زیرا تولید نانوالیاف هر نازل تنها ۰/۱ گرم در ساعت در مقیاس آزمایشگاهی است. راندمان تولید پایین، بزرگترین چالش استفاده از روش الکتروریسی تک نازلی است که در مقیاس بزرگ را محدود می‌کند.

۳- الکتروریسی به رسانایی مواد حساس است و تنها محلول پلیمری با رسانایی مشخص می‌تواند برای الکتروریسی استفاده شود. زمانی که محلول پلیمری رسانایی کمتری دارد، اختلاف پتانسیل الکتریکی باید افزایش یابد. بنابراین، نوع محلول ریزی مورد استفاده برای الکتروریسی به دلیل

الزامات قطبیت محلول های پلیمری محدود است. در عین حال، اگر ویسکوزیته مواد مذاب در فرآیند الکتروریسی مذاب بالا باشد، جت های ریسندگی نمی توانند تولید شوند. محققان برای غلبه بر محدودیت های مختلف روش معمول الکتروریسی، تغییراتی را در چیدمان اصلی دستگاه اعمال کرده اند. برخی از این تکنیک های اصلاح شده که تا به حال انجام شده اند عبارتند از: الکتروریسی با استفاده از جمع کننده ای متشکل از دو قطعه صفحه رسانای الکتریکی جدا شده توسط یک شکاف، جمع آوری نانوالیاف پراکنده شده بر روی یک چرخ نازک چرخان رسانا، تولید الیاف موازی نانوالیاف نایلون ۶ با نوسان سریع قابی داخل جت، استفاده از استوانه ای چرخان برای جمع آوری نانوالیاف موازی با سرعت بسیار بالا تا هزاران دور در دقیقه، به کارگیری روش میدان الکتریکی چندگانه و در نهایت استفاده از یک قاب فلزی به عنوان جمع کننده ای برای تولید مجموعه ای از نانوالیاف موازی [۵، ۲۸، ۲۹]. از سویی دیگر، افزایش سرعت و نرخ تولید نانوالیاف همیشه یکی از مهم ترین چالش های محققان بوده است. به منظور غلبه بر محدودیت نرخ تغذیه و بهبود راندمان تولید و سرعت ریسندگی، بسیاری از دستگاه های الکتروریسی جدید از حالت تک نازل معمولی به چند نازل یا با نازلی متفاوت توسعه یافته اند [۱۴، ۳۰، ۳۱]. یارین و همکارانش مفهوم "الکتروریسی بدون سوزن" را در راستای افزایش نرخ تولید معرفی کردند [۳۲]. ایده مشابهی توسط لیبو و یان با نام روش "الکتروریسی حبابی" مورد بحث قرار گرفت [۳۳، ۳۴].

الکتروریسی حبابی و الکتروریسی با نازل چندگانه و ریسندگی الکتریکی بدون نازل اگرچه پتانسیل تولید انبوه را دارند، دارای محدودیت هایی نیز هستند. هنگامی که چندین سوزن یا نازل به صورت متراکم چیده شوند، جت های چرخان دچار دافعه متقابل شده و از مسیر اصلی منحرف می شوند. بنابراین، نانوالیاف را نمی توان توسط دستگاه جمع آوری دریافت کرد. لی و همکاران برای کاهش میدان الکتریکی ولتاژ بالا در تولید نانوالیاف، نیروی گریز از مرکز را با نیروی الکترواستاتیک مورد استفاده در الکتروریسی معمولی ترکیب کردند. این روش الکتروریسی گریز از مرکز است یا الکتروریسی مضاعف نامیده شده و با چرخاندن سوزن های الکتروریسی انجام می شود. این روش تولید قادر است نانوالیافی با کیفیت الکتروریسی تولید کند با این تفاوت که راندمان تولید را بالا برده و ولتاژ را از ۳۰ به حدود ۳ کیلو ولت کاهش دهد. با این حال، این روش هنوز به یک میدان الکتریکی با ولتاژ نسبتا بالا نیاز دارد و قطب مثبت میدان الکتریکی ولتاژ بالا که با سوزن ها در حال چرخش است، خطرناک است [۳۵، ۳۶].

در سال ۱۹۲۴، پتنت ایالات متحده پیشنهاد کرد که الیاف را می توان به روش گریز از مرکز ساخت. در سال ۱۹۸۶، حق ثبت اختراع اروپایی ارائه شد که قادر بود مواد خاصی را از طریق روزه های موجود در رشته ساز اکستروود کرده و با نیروی گریز از مرکز الیاف تولید کند. این مطالعات تجربه ساخت الیاف را مورد بررسی قرار داده اند، اما قادر به تولید نانوالیاف نبودند [۲۳، ۳۷].

حق ثبت اختراع "دستگاه ریسندگی گریز از مرکز مذاب و محلول برای تهیه منسوجات" توسط موسسه شیمی کاربردی چانگچون اعمال شد. در این روش نیروی گریز از مرکز از طریق چرخش دیسکی دارای منافذ ایجاد می شود که قادر است مواد ترموپلاستیک مانند فلز مذاب یا شیشه را در مقیاس نانو کشیده و نانوالیاف تولید کند. پس از آن، تحقیقات زیادی در راستای بهبود کیفیت نانوالیاف و ارتقای طراحی دستگاه صورت گرفته است.

به منظور ساخت نانوالیاف با کیفیت بالا با نیروی گریز از مرکز، محققان عوامل موثر بر کیفیت نانوالیاف را مورد مطالعه قرار دادند. بادروسامای و همکاران روشی برای ساخت نانوالیاف با چرخش جت دوار طراحی کرد. آنها خاطرنشان کردند که اگر سرعت چرخش افزایش یابد، قطر نانوالیاف کاهش می یابد و یکنواختی توزیع قطر زمانی که غلظت محلول پلیمر ثابت باشد بهتر است. علاوه بر این، تحقیقات نشان داد که در یک سرعت چرخش ثابت، غلظت محلول پلیمر باید بیشتر از مقدار مشخصی باشد تا بتوان الیاف را تولید کرد [۳۸].

سنتیلرام و همکاران یک نازل چرخان برای بدست آوردن نانوالیاف منظم طراحی کردند. آنها به طور کیفی تأثیر سرعت چرخش و غلظت محلول را بر قطر الیاف تجزیه و تحلیل کردند [۳۹]. سرکار و همکاران روش جدیدی را برای ساخت الیاف ریز با استفاده از نیروی گریز از مرکز طراحی کرد که به آن فورس اسپینگ می گویند. علاوه بر این، آنها پیشنهاد کردند که فرآیند گسترش نانوالیاف را می توان به

پنج فرآیند تقسیم کرد. اصل ساخت نانوالیاف با چرخش گریز از مرکز، استفاده از نیروی گریز از مرکز به جای نیروی الکتریکی است. محلول ریسندگی به داخل ظرف ریسندگی تزریق شده و قطره ای با شکل مخروطی در نازل تحت تأثیر کشش سطحی، نیروی چسبناک و نیروی گریز از مرکز تشکیل می شود که به شکل نانوالیافی ممتد از نازل خارج می شود [۴۰].

در فرآیند ریسندگی گریز از مرکز، میتوان از مواد رسانا و غیر رسانا برای ساخت نانوالیاف استفاده کرد. علاوه بر این، در این روش تولید نانوالیاف فرایندی دوستدار محیط زیست است زیرا پلیمر در حال چرخش نیازی به افزودن حلال رسانا ندارد. از سویی دیگر، به دلیل وجود سرعت بالای در روش ریسندگی گریز از مرکز، نانو الیاف تولید شده معمولا سطوح صاف و توزیع قطر یکنواختی دارند. لذا روش ساخت نانوالیاف با میدان نیروی گریز از مرکز از ارزش نظری و چشم انداز کاربردی بسیار مهمی برخوردار است.

در حال حاضر، تحقیقات در مورد ریسندگی گریز از مرکز پیشرفت هایی داشته است. استوجان وسکا و همکاران، مناسب ترین پارامترهای پردازش را برای ساخت نانوالیاف بر پایه لیگنین از طریق چرخش گریز از مرکز یافتند [۴۱]. ناتاراجان و همکاران اثرات پارامترهای مختلف مانند ویسکوزیته، دمای محفظه، دور در دقیقه و رطوبت را بر کیفیت الیاف در حال ریسندگی مورد مطالعه قرار دادند [۴۲]. ریاحی یک مدل ویسکوزیته برای سیال پلیمری به منظور بررسی خواص جت های پلیمری در فرآیند

چرخش گریز از مرکز ایجاد کرد [۴۳]. مواد ریسندگی موجود برای ریسندگی گریز از مرکز برای ساخت نانوالیاف عمدتاً پلیمرهای با وزن مولکولی بالا مانند پلی اکسی اتیلن، پلی اکریلونیتریل، پلی لاکتیک اسید و پلی اورتان هستند. علاوه بر این، با استفاده گسترده از نانوالیاف کامپوزیت، ساخت کامپوزیت نانوالیاف با ریسندگی گریز از مرکز نیز توجه محققان را به خود جلب کرده است. علاوه بر پیشنهاد کردند که این نانوالیاف توخالی ترکیبی به عنوان مواد آند جایگزین برای باتری‌های لیتیوم یونی امیدوارکننده هستند. در همین حال، نانوالیاف ساخته شده توسط ریسندگی گریز از مرکز، کاربردهای بالقوه‌ای در پزشکی از جمله ماده اصلی پانسمان زخم دارند [۴۴].

در مطالعات موجود در مورد روش‌ها و تئوری‌های ساخت نانوالیاف، معمولاً نانوالیاف با قطرهای مختلف با تنظیم پارامترهای فنی و پارامترهای هندسی بر اساس تجربه تولید می‌شوند. این مطالعات به ساخت نانوالیاف غیر منظم محدود می‌شود و هیچ مطالعه‌ای در مورد ساخت نانوالیاف با قابلیت جمع‌آوری نانوالیاف منظم وجود ندارد. به طور خاص، هیچ تحقیق سیستماتیک در مورد مشکل دینامیکی جت پلیمری، نانوالیاف و تجهیزات ریسندگی تحت عمل نیروی گریز از مرکز و میدان دما با سرعت بالا وجود ندارد. در مکانیک نیوتنی، اصطلاح نیروی گریز از مرکز برای اشاره به نیروی اینرسی^۱ (که نیروی "ساختگی" نیز نامیده می‌شود) به دور محور اشیا عمل می‌کند. مفهوم نیروی گریز

از مرکز را می‌توان در دستگاه‌های چرخشی مانند سانتریفیوژها، پمپ‌های گریز از مرکز، کلاچ‌های گریز از مرکز و غیره و همچنین در راه آهن‌های گریز از مرکز، مدارهای سیاره‌ای و غیره، هنگامی که در یک سیستم مختصات چرخشی تحلیل می‌شوند، به کار برد [۲۷، ۲۸].

نیروی گریز از مرکز نیروی خارجی است که در یک چارچوب مرجع چرخان ظاهر می‌شود و وقتی اندازه‌گیری‌ها در چارچوب مرجع اینرسی انجام می‌شوند، وجود ندارد. تمام اندازه‌گیری‌های موقعیت و سرعت باید نسبت به یک چارچوب مرجع انجام شود. به عنوان مثال، اگر در حال مطالعه حرکت یک شی در یک هواپیمای مسافربری باشیم که با سرعت زیاد حرکت می‌کند، می‌توانیم حرکت آن شی را با توجه به داخل هواپیما یا سطح زمین محاسبه کنیم. یک چارچوب مرجع اینرسی، چارچوبی است که شتاب نمی‌گیرد (از جمله چرخش). استفاده از یک چارچوب مرجع اینرسی، که برای تمام محاسبات ابتدایی صادق است که اغلب به طور کلی فرض می‌شود مگر اینکه خلاف آن بیان شود [۴۵].

طبق نظریه اینرسی، نیروی گریز از مرکز وجود ندارد و تمام محاسبات را می‌توان تنها با استفاده از قوانین حرکت نیوتن و نیروهای واقعی انجام داد. براساس قانون اول نیوتن، در یک چهارچوب اینرسی، شیئی که هیچ نیرویی بر روی آن وارد نشود، در یک خط مستقیم حرکت می‌کند. با این حال، هنگامی که اندازه‌گیری‌ها با توجه به یک چارچوب

¹Inertia force

مرجع در حال چرخش انجام می شوند، همان شی یک مسیر منحنی خواهد داشت، زیرا چارچوب مرجع در حال چرخش است. اگر بخواهیم قوانین نیوتن را در چارچوب چرخشی اعمال کنیم، لازم است که نیروهای جدید و ساختگی برای توجیه این حرکت خمیده معرفی کنیم. در چارچوب مرجع در حال چرخش، همه اشیا، صرف نظر از حالت حرکتشان، تحت تاثیر یک نیروی خارجی شعاعی (از محور چرخش) قرار می گیرند که متناسب با جرم آن‌ها، فاصله از محور چرخش چارچوب، و به مربع سرعت زاویه ای چارچوب است که با آن نیروی گریز از مرکز گفته می شود [۴۶].

به منظور اعمال نرخ‌های بالای کشش به یک محلول یا مذاب پلیمری، به روش‌هایی نیاز است که بتواند توزیع تنش را در طول فرآیند کشش اعمال کند. هنگامی که نیروی گریز از مرکز بر روی یک ماده اعمال می شود، ذرات آن ماده نیرویی متناسب با فاصله خود از مرکز چرخش را تجربه خواهند کرد. بنابراین، می توان از این نیرو برای اعمال نرخ های بالای کشش بر روی محلول پلیمری استفاده کرد. در طول فرآیند کشش، اگر محلول پلیمری ویسکوزیته کافی داشته باشد، به صورت رشته کشیده شده و پس از خشک شدن به الیافی پلیمری تبدیل می شود.

دستگاه ریسندگی گریز از مرکز شامل یک قطعه چرخان^۲ است که می تواند محلول پلیمری را در خود جای داده و توسط موتور بچرخد. یک نازل به اسپینر متصل است و

محلول پلیمری می تواند با نیروی گریز از مرکز از این نازل خارج شود. زمانی که سرعت زاویه ای بیشتر از سرعت بحرانی باشد (در تقابل میان کشش سطحی و نیروی گریز از مرکز) جت سیال تشکیل می شود.

نمودار شماتیک فناوری ریسندگی گریز از مرکز در شکل ۲ نشان داده شده است. اگر کشش سطحی محلول پلیمری خیلی زیاد باشد، جت پاره شده و قطرات پراکنده ایجاد می کند^۳. حلال ماده تبخیر می شود و پس از بیرون ریختن محلول پلیمری از نازل، جت در امتداد یک مسیر منحنی حرکت می کند. سپس جت با نیروی اینرسی به حرکت خود ادامه داده و در نهایت به دستگاه جمع کننده می رسد. به طور کلی، این فرآیند را می توان تقریباً به سه مرحله تقسیم کرد.

اولین مرحله از روش ریسندگی گریز از مرکز، تزریق مواد پلیمری محلول یا مذاب به داخل ظرف است. همانطور که قبلاً ذکر شد، نازل توسط یک موتور می چرخد. در طی این چرخش، محلول یا مذاب پلیمری در معرض نیرو های ویسکوز، گرانش، کشش سطحی و گریز از مرکز قرار می گیرد که از بین آنها چسبندگی سطحی و نیروی گریز از مرکز نقش اصلی را ایفا می کنند. با افزایش سرعت زاویه ای اسپینر، در صورتی که نیروی گریز از مرکز سیال برابر با نیروی ویسکوزیته آن باشد، مخروط تیلور را در نوک نازل تشکیل می شود.

^۲ spinner^۳ spraying

ترازی^۵ مولکولی و بلوری شدن نانوالیاف تولیدی جهت بهبود مقاومت کششی است [۸].

در سال ۲۰۰۶، الکتروریسی گریز از مرکز برای نخستین بار، با استفاده از یک اسپینر چرخشی توسط دوسونمو و همکارانش با استفاده از یک قطعه چرخان لوله ای سرامیکی متخلخل [۴۸] و توسط آندرادی و همکارانش با استفاده از یک سر اسپری قابل چرخش با چهار عنصر اکستروژن منفرد گزارش شد، که به نوبه خود می تواند از دسته های چندین نازل ساخته شود [۴۹].

نانوالیاف پیوسته ای که توسط این روش که جمع آوری می شوند، منظم و موازی تر از نانو الیاف تولید شده به روش الکتروریسی میباشند. با این حال، نانوالیاف نامنظم نیز به صورت بی بافت در بین آنها پیدا میشود چرا که نانو الیاف پس از خارج شدن جت از نازل، تحت تأثیر گرانش، مقاومت هوا و نیروی گریز از مرکز قرار می گیرد. بنابراین، مسیر حرکت جت سیال مستقیم نبوده بلکه پیچیده است. برخی از محققان رابطه بین فاصله ریسندگی و زمان تبخیر حلال را در این روش تولید مطالعه کردند، نتایج اثبات کرد که زمانی که با در نظر گرفتن غلظت محلول و سرعت موتور ثابت، برای جت های محلول پلیمری مختلف، ویژگی پارامترهای تاثیر گذار در فرایند کاملاً متفاوت هستند [۵۰].

[۵۱].

نانوریسی سانتریفوژ قادر است بسیاری از محدودیت های کنترل مورفولوژی نانو الیاف را برطرف کند. این فرآیند

در مرحله دوم، جت سیال چرخان ایجاد شده در معرض کشش سطحی، نیروی اینرسی و مقاومت هوا قرار می گیرد. سپس، جت یک مسیر منحنی را دنبال کرده و تحت تأثیر نیروی حاصله به کشش ادامه می دهد. همزمان با این فرایند، حلال مواد پلیمری به تدریج تبخیر شده و الیاف جامد تشکیل می شوند. عوامل خارجی زیادی بر قطر نهایی و ساختار^۴ الیاف نهایی تأثیر گذار است.

مرحله سوم چرخش گریز از مرکز، تشکیل و جمع آوری نانوالیاف است. در این مرحله قطر جت با اثرات کشش نیروی کششی و تبخیر حلال در مرحله دوم کاهش می یابد. در نهایت نانوالیاف به دستگاه جمع کننده رسیده و جمع آوری می گردد. [۴۷]

هوپر در سال ۱۹۲۴ ریسندگی با استفاده از نیروی گریز از مرکز را به ثبت رساند. ریسندگی گریز از مرکز کلاسیک شامل تامین نیروی گریز از مرکز با استفاده از یک دیسک توزیع چرخشی با سوراخ های نازل جانبی است که قادر است مواد ترموپلاستیک کلاسیک، مواد معدنی و شیشه مذاب را به الیاف مبدل کند. پیشرفت های اخیر در نانوریسی گریز از مرکز، پتانسیل این روش را برای تولید نانوالیاف اثبات نموده است. تحقیقات انجام گرفته در زمینه ادغام الکتروریسی با مفاهیم گریز از مرکز نشان دهنده پیشرو بودن این روش در مقایسه با الکتروریسی ساده در تولید نانوالیاف همگن با قطر کم تر از ۱۰۰ نانومتر و امکان کشش همزمان با ریسندگی می باشد که منجر به هم

⁴ Morphology

⁵ Alignment

وزن مولکولی g/mol ۱۰۰۰۰۰ از شرکت پلی اکریل اصفهان خریداری شد. حلال مناسب برای تهیه محلول ریسندگی پلی اکریلونیتریل، دی متیل فرمالید^۷ یا DMF انتخاب شد. DMF با وزن مولکولی g/mol ۷۳۱۰۰ و چگالی kg/lit ۰/۹۵ از شرکت مرک^۸ خریداری شد.

محلول‌های پلیمری PAN در DMF با غلظت ۱۶ - ۱۳ wt % با استفاده از ترازو دیجیتالی (Libror AEU - ۲۱۰، Shimadzu) با دقت g ۰/۰۰۱ تهیه شدند. هم زدن مخلوط با سرعت ثابت در دمای اتاق انجام شد و پس از آن، محلول به مدت ۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد تا انحلال کامل به هم زده شد.

تغذیه کننده مواد در دستگاه الکترورسی، ATOM syringe pump مدل 1235N ساخت ژاپن بوده است. از مخزن تأمین کننده ولتاژ Gamma highvoltage برای ایجاد میدان الکتریکی در الکترورسی استفاده شده است. از کوره الکتریکی ساخت شرکت Nabertherm controller که در محدوده دمایی ۳۰ - ۳۰۰°C کار می کند، برای پایدار سازی اکسیداسیونی نمونه های استفاده شد. کوره الکتریکی با ورودی گاز نیتروژن ۱۰۰٪ خالص برای کربنیزه و فعال سازی فیزیکی نمونه ها در محیط خنثی تا دمای بالای ۱۰۰۰°C استفاده شد. از میکروسکوپ نوری پلاریزه Nikon Microphot

علاوه بر سادگی قابلیت بهره وری بالاتری را در تولید نانو الیاف بدون نیاز به صرف ولتاژ بالا دارا می باشد. علاوه بر این دامنه مواد اولیه مورد استفاده در تولید نانو الیاف را وسعت بخشیده است چرا که در این روش رسانا بودن پلیمر اولیه ضروری نیست. از سویی دیگر با تغییرات دلخواه روزنه ها در اکسترودر مورد استفاده قطر و طرح نانوالیاف اولیه و همین طور توازی و یکنواختی آنها قابل کنترل می باشد [۴۹، ۵۲].

تحقیقات و پیشرفت‌های زیادی در اصلاح و بهبود فرآیند الکترورسی در طول قرن گذشته صورت گرفته است اما نواقص این روش به طور کامل برطرف نشده است. برای مثال، اگرچه تحقیقات زیادی برای دستیابی به هم ترازوی الیاف طراحی شده است، اما هنوز رسیدن به نانوالیاف کاملا یکنواخت و موازی در این روش یک چالش است [۴۷].

در بخش تجربی این مطالعه، علاوه بر بررسی اثرات نیروی گریز از مرکز بر قطر نانوالیاف، نرخ تولید، مساحت سطح ویژه و خواص جذبی نانوالیاف تولیدی در روش الکتروسانتریفیوژ با روش الکترورسی معمولی مقایسه شده است.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد و دستگاهها

پلی اکریلو نیتریل^۶ یا PAN (اکریلونیتریل - متااکریلات) که از ۹۴/۶٪ وزنی مونومر اکریلونیتریل تشکیل شده است با

⁸ Merck

⁶ Polyacrylonitrile

⁷ N,N - dimethyl formamide

FXA ساخت کشور ژاپن برای بررسی اولیه تغییرات نمون های PAN در طی فرایند های حرارتی استفاده شد.

میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده از نوع SEM و مدل XL30 ساخت شرکت Philips از کشور هلند می باشد و همچنین دستگاه لایه نشانی طلائی مورد استفاده ساخت شرکت Bal - tec از کشور سوئیس میباشد. حداقل ۱۰۰ لیف برای مقایسه هر لایه نمونه و قطر آن با مقیاس تصویر انتخاب شد. میانگین نتایج به عنوان قطر الیاف تولید شده در این فرآیند به کار گرفته شد.

۲-۲- روش کار

در مرحله نخست، محلول های ۱۶ - ۱۳ درصد وزنی PAN در DMF تهیه و هر محلول به وسیله هم زن مغناطیسی در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن ظاهر کاملا همگن و عسلی شکل، به هم زده شد. برای تعیین شرایط بهینه الکترورسی از نظر قطر و یکنواختی، هر یک از محلول های تهیه شده با غلظت های گفته شده، در فواصل ریسندگی (فاصله سر سوزن تا جمع کننده) ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر، ولتاژ های 7 - 10KV و نرخ پمپاژ 1 - 2ml/min الکترورسی شد.

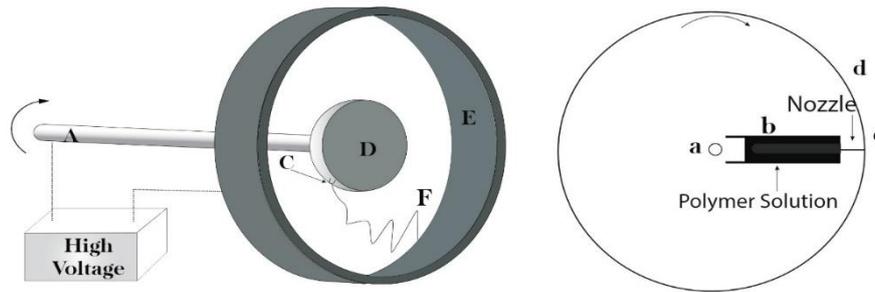
الکترورسی با استفاده از تنظیمات یکسانی برای همه نمونه ها انجام شد. محلول پلیمری در سرنگ بارگذاری و توسط یک پمپ سرنگ برای ارائه سرعت جریان قابل کنترل ۰/۴۵ میلی لیتر در ساعت خارج شد. منبع تغذیه با ولتاژ بالا (Fukuoka, Ltd., MECC Co., Nanon-01A، ژاپن) با حداکثر ۳۰ کیلو ولت بین صفحه سوزن و جمع کننده

اعمال شد. در مرحله بعد، تغییرات قطر و یکنواختی نانو الیاف بی بافت الکترورسی شده حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی پویشی بررسی شد.

شکل ۱ تصویر شماتیک دستگاه الکتروسانتریفیوژ را نشان می دهد. به منظور اعمال نیروی گریز از مرکز، از یک دیسک چرخان با قابلیت کنترل سرعت در محدوده ۰ تا ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است. یک لوله با قطر داخلی حدود ۴ میلی متر به صورت غیر متمرکز درون سیلندر به عنوان ظرف پلیمری قرار گرفته که به یک سوزن با قطر داخلی ۰/۱۶۵ میلی متر، قطر خارجی ۰/۳ میلی متر و طول ۱۷ میلی متر به عنوان نازل متصل می شود. مونتاژ محفظه محلول پلیمری و نازل داخل دیسک اثرات جریان هوا بر روی نوک نازل را در طول چرخش کاهش می دهد. در این روش سانتریفیوژ برای محلول PAN با غلظت ۱۲ - ۱۶ wt % در سرعت چرخشی در محدوده ۹۵۴۰ - ۰ rpm جهت تولید نانو الیاف استفاده شد.

منبع تغذیه برای اعمال نیروی الکترواستاتیک با قابلیت تولید ولتاژهای DC تا ۲۲ کیلو ولت است، استفاده شد. همانطور که در شکل ۱ مشخص شده است، استوانه ی فلزی به قطر ۲۶،۶ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر که به الکتروود منفی منبع ولتاژ بالا متصل است به عنوان جمع کننده نانوالیاف استفاده شده و نازل به الکتروود مثبت متصل شده است. فاصله بین مرکز دیسک و نوک سوزن و سطح داخلی استوانه جمع کننده و نوک سوزن به ترتیب ۵/۳ و

نیروهای الکتریکی و گریز از مرکز کشش بسیار زیادی به آن وارد کرده سبب نازک شدن لیف و رسیدن به ابعاد نانو می‌شوند. در نهایت، با تبخیر حلال، نانوالیاف بسیار بلند در سطح داخلی جمع کننده جمع آوری می‌شوند.



شکل ۱: طرح کلی دستگاه ریسندگی سانتریفیوژ: (الف) محور چرخش، (ب) ظرف محلول پلیمری، (ج) نوک نازل و (د) سیلندر.

متناسب با اختلاف فشار یکسان است، می‌توان با تغییر X_0 و ω سرعت جریان را کنترل نمود [۸].

نرخ تولید در فرآیند الکتروریسی و الکترو سانتریفیوژ با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$S(\text{cm}/\text{min}) = N \left(\frac{D}{S_0} \right) \times \left(\frac{D}{T} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

در این معادله که N تعداد لایه های نانوالیاف است، D فاصله نازل از جمع کننده بر حسب سانتی متر است و T زمان بر حسب دقیقه می‌باشد. برای محاسبه درصد نرخ تولید از رابطه زیر استفاده شد [۵۳].

$$S\% = \left(\frac{S}{S_1} \right) \times 100$$

در این معادله S_1 نرخ تولید دستگاه در یک دقیقه می‌باشد.

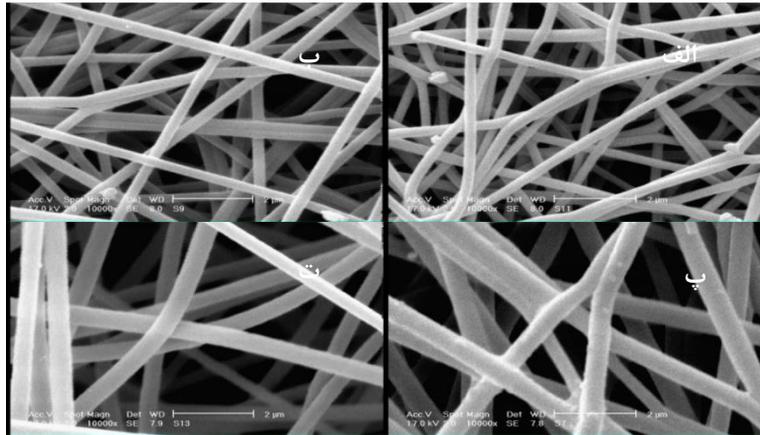
۸ سانتی متر است. تنها ۰/۳ میلی لیتر از حجم ظرف توسط محلول در تمام آزمایش ها پر می‌شود.

اعمال نیروی گریز از مرکز باعث می‌شود که محلول پلیمری از نازل خارج شود. اگر ویسکوزیته محلول به اندازه کافی بالا باشد، جت سیال در خروجی نازل شکل می‌گیرد؛ سپس

لازم به ذکر است که نرخ جریان تنها توسط نیروی گریز از مرکز در تنظیمات تجربی فعلی کنترل می‌شود. هنگامی که سطح آزاد محلول پلیمری در ظرف و نوک نازل در فشار اتمسفر یکسان باشد، فشار درون ظرف افزایش می‌یابد. زیرا نیروی گریز از مرکز دقیقاً برابر با افت فشار در سراسر نازل به دلیل اثر ویسکوزیته است، یعنی $\Delta P_{1,2} = \Delta P_{2,3}$. از سوی دیگر، افزایش فشار در ظرف را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$\Delta P_{1,2} = \int_{x_0}^{L_0} \rho l e \omega^2 dl \text{ or } \Delta P_{1,2} = \frac{1}{2} \rho (L_0^2 - x_0^2) \approx \omega^2 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن ρ چگالی مایع، L_0 فاصله بین مرکز چرخش و ورودی نازل، X_0 فاصله بین مرکز چرخش و سطح آزاد مایع و ω سرعت زاویه ای است. معادله ۱ نشان می‌دهد که افت فشار در سراسر نازل به طول ستون مایع $(L_0 - X_0)$ در داخل ظرف بستگی دارد. از آنجا که سرعت جریان نیز



شکل ۲: تصاویر SEM نانوالیاف پلی اکریلونیتریل الکترورسی شده در غلظت های (الف: ۸٪، ب: ۱۰٪، پ: ۱۱٪، ت: ۱۳٪)

الکترورسی در نرخ جریان ثابت مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که قطر نانوالیاف، با افزایش سرعت چرخش در نرخ جریان تغذیه ثابت کاهش می یابد [۵۴، ۵۵].

این موضوع را می توان به این شکل تفسیر کرد که با افزایش سرعت دورانی، اثرات آیرودینامیکی^{۱۱} جریان هوا که در بین سیلندره های چرخان شکل می گیرد، در اطراف الیاف برجسته تر می شود [۵۴]. با افزایش سرعت جریان هوا، جت پلیمری قبل از اینکه توسط نیروی گریز از مرکز کشیده شود، خشک شده لذا در هر سرعت جریان یک سرعت دورانی وجود دارد که در آن نانوالیاف با حداقل قطر تولید می شود. این موضوع با نتایج تحقیقات گذشته مطابقت دارد [۷، ۱۰].

به گفته چن و همکاران، افزایش سرعت دورانی، نیروهای گریز از مرکز و نیروهای اصطکاک هوا را افزایش می دهد که منجر به کاهش قطر لیف می شود. اما زمانی که سرعت

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می گردد، در روش الکترورسی معمولی، قطر نانوالیاف الکترورسی شده را در فاصله ریسندگی و ولتاژ یکسان، با افزایش غلظت افزایش قابل توجهی یافته است.

۳.۱. تاثیر سرعت دورانی در نرخ جریان ثابت بر قطر نانوالیاف

به منظور بررسی اثر سرعت دورانی در نرخ جریان تغذیه ثابت بر قطر نانوالیاف تولید شده، الیاف از محلول ۱۵ wt % در سرعت های چرخش متفاوت تولید شدند. در هر بار انجام فرایند، سرعت دورانی با آزمون و خطا به گونه ای تنظیم شد که سرعت جریان در تمام سرعت های دورانی بدون تغییر باقی بماند (۱/۲ mL/h). علاوه بر این، نانوالیاف پلی اکریلونیتریل به روش الکترورسی معمولی، تحت شرایط یکسان ریسندگی جهت مقایسه تولید شد. در جدول ۱ میانگین قطر ۱۰ نقطه متفاوت از نانوالیاف مذکور در سرعت چرخش متفاوت به دو روش الکتروسانتریفیوژ و

¹¹ Aerodynamic

محدوده سرعت چرخشی استفاده شده در این پژوهش، با افزایش سرعت چرخشی در نرخ جریان ثابت، کاهش قطر نانو الیاف مشاهده می‌گردد که با داده های مقاله هماهنگی دارد [۵۶].

چرخش به یک مقدار بحرانی می‌رسد، کل زمان حرکت جت پلیمری کاهش می‌یابد و قطر متوسط الیاف با افزایش سرعت بیشتر افزایش می‌ابد که این سرعت چرخشی بحرانی در حدود ۱۳۰۰۰ rpm گزارش شده است. لذا در

جدول ۱: قطر نانوالیاف تولید شده با استفاده از سرعت های چرخشی مختلف در نرخ جریان ثابت ۱/۲ mL/h

انحراف معیار	میانگین قطر نانوالیاف (nm)	سرعت چرخش (rpm)	روش تولید نانوالیاف
0.0502	410	6360	الکتروسانتریفیوژ
0.0462	312	7950	الکتروسانتریفیوژ
0.0487	274	9540	الکتروسانتریفیوژ
0.0505	470	-	الکتروریسی

نتایج نشان می‌دهد که موثرترین ولتاژی که می‌توان در فاصله ریسندگی ۸ سانتی متری اعمال کرد، برابر با ۱۵ کیلو ولت است. چنانچه ولتاژ بالاتر رود، هوای اطراف جت سیال یونیزه خواهد شد که منجر به تولید جریان الکتریکی بین قطب های مثبت و منفی می‌شود.

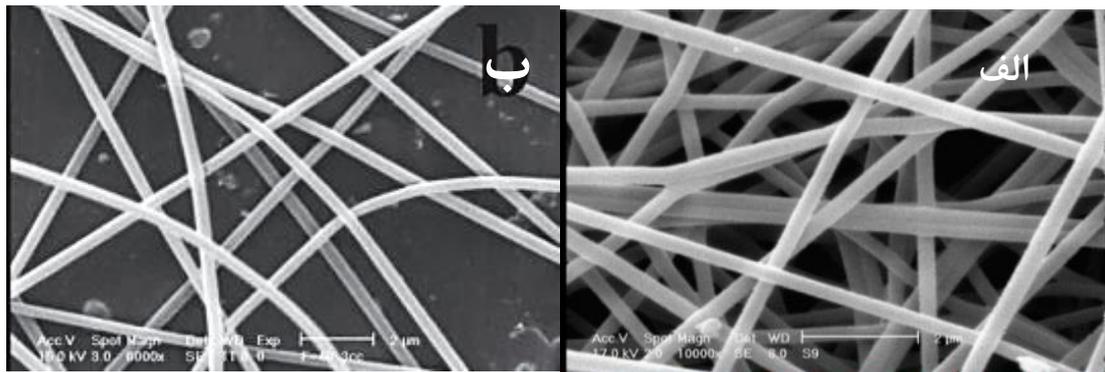
در سیستم الکتروریسی، پمپ سرنگ نرخ جریان لازم را فراهم می‌کند، در حالی که در سیستم الکتروسانتریفیوژ نرخ جریان توسط نیروی گریز از مرکز تنظیم می‌شود. برای پارامترهای مشخص شده، قطر متوسط نانوالیاف به دست آمده از دو سیستم در محدوده ۲۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر بود. شکل ۳ تصاویر SEM معمولی از نانوالیاف تولید شده از محلول پلیمری ۱۵ wt % با سرعت چرخش ۶۳۶۰ rpm و قطر متوسط ۴۱۰ nm را نشان می‌دهد.

۳.۲. مقایسه بین میزان تولید نانوالیاف در سیستم

های الکتروریسی و الکتروسانتریفیوژ

برای ارزیابی و مقایسه صحیح دو روش تولید الکتروسانتریفیوژ و الکتروریسی ضروری است که تمام متغیرهای موثر (به استثنای نیروی گریز از مرکز) بایستی برای این دو سیستم یکسان در نظر گرفته شوند. لذا بر اساس شرایط بهینه تولید، غلظت محلول پلیمری و اختلاف پتانسیل اعمالی برای هر دو سیستم برابر و به ترتیب ۱۵٪ wt % و ۱۵ کیلو ولت در نظر گرفته شده است.

تغییر کشش سطحی زمانی که غلظت پلیمر در محدوده ۱۳ - ۱۶٪ باشد قابل توجه نیست، بنابراین فرض می‌کنیم که این پارامتر برای تمام آزمایش ها ثابت است. مقایسه بین دو سیستم در دو ولتاژ اعمالی متفاوت ۱۰ و ۱۵ کیلو ولت و برای محلول های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ درصد وزنی PAN در شرایط یکسان انجام شد.



شکل ۳: تصاویر SEM از نانوالیاف تولید شده با شرایط یکسان به روش: (الف) الکتروریسی و (ب) الکتروسانتریفیوژ با ۶۳۶۰ دور در دقیقه

همان طور که مشاهده می شود، روش الکتروسانتریفیوژ می تواند سرعت تولید الیاف را تا حد زیادی افزایش دهد. برای غلظت ۱۶ wt.% ۹۵۴۰ rpm حداکثر سرعت دورانی ممکن نیست و تولید الیاف با این غلظت در سرعت های بالاتر امکان پذیر است. این مورد به دلیل محدودیت های دستگاه در اینجا مورد بررسی قرار نگرفت.

جدول ۲ تغییرات نرخ تولید را برای غلظت های مختلف نشان می دهد. مشاهدات نشان می دهد که در یک سرعت چرخشی و ولتاژ اعمال شده ثابت، با افزایش غلظت، سرعت جریان کاهش می یابد و سرعت تولید سیستم الکتروسانتریفیوژ به به سرعت تولید در روش الکتروریسی نزدیک می شود. از سویی دیگر، افزایش ولتاژ اعمال شده، زمانی که پارامترهای موثر دیگر ثابت هستند، سرعت تولید را کاهش می دهد [۵۳، ۵۷]. تاثیر نیروی گریز از مرکز بر افزایش در نرخ تولید برای ولتاژهای پایین تر به دلیل نرخ تولید الکتروریسی کم تر در آن محدوده برجسته تر است [۵۸] (جدول ۲).

با افزایش سرعت جریان ریسندگی، ضمن ثابت نگه داشتن سایر پارامترها دخیل در فرایند، تشکیل دانه و پاشش قطره در طی الکتروریسی رخ می دهد که مطلوب نمی باشد. نرخ جریان محلول در ابتدای تشکیل قطره به عنوان حداکثر نرخ پمپاژ محلول برای الکتروریسی تعریف می شود. با این حال، در مورد الکتروسانتریفیوژ، با افزایش سرعت دورانی، هنگامی که پارامترهای دیگر ثابت باشند، سرعت جریان محلول افزایش خواهد یافت. بنابراین، نرخ تولید الیاف در سیستم الکتروسانتریفیوژ با اندازه گیری نرخ جریان محلول در حداکثر سرعت چرخش ممکن محاسبه می شود که منجر به تولید الیافی می شود که عاری از عیوب و دانه ها هستند. افزایش نرخ تولید الیاف به روش الکتروسانتریفیوژ به عنوان نسبت نرخ جریان دو سیستم زمانی تعریف می شود که الیاف تولید شده قطر یکسانی داشته باشند. این موضوع با سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه تطابق دارد [۵۳].

جدول ۲: تاثیر غلظت محلول پلیمر بر نرخ تولید در ولتاژ ثابت ۱۵ کیلو ولت.

درصد نرخ تولید	غلظت محلول پلیمری (wt%)	سرعت چرخش (rpm)	روش تولید نانوالیاف
1200	13	6360	الکتروسانتریفیوژ
723	14	7950	الکتروسانتریفیوژ
450	15	9540	الکتروسانتریفیوژ
117	13	-	الکتروریسی
102	14	-	الکتروریسی
87	15	-	الکتروریسی

کرد که افزایش سرعت چرخش سبب کاهش قطر و افزایش نرخ تولید می‌گردد که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۵۵]. نتایج پژوهش‌های دبیریان و همکاران نیز افزایش قابل توجهی در نرخ تولید روش الکتروسانتریفیوژ در مقایسه با الکتروریسی گزارش کرد. این تحقیقات نشان داد که این افزایش نرخ تولید به طور مستقیمی با غلظت محلول پلیمری و ولتاژ اعمال شده بستگی دارد [۷, ۸].

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در مورد نانوالیاف تولید شده در روش الکتروسانتریفیوژ، در غلظت‌های پایین تر پلیمر، نیروهای گریز از مرکز موثرتر هستند. لذا درصد نرخ تولید با افزایش غلظت محلول پلیمری کاهش می‌یابد که با مطالعات گذشته مطابقت دارد [۷, ۸]. هافمن و همکاران نیز نتایج مشابهی را در تولید نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل با روش الکتروسانتریفیوژ بدست آوردند. نتایج تحقیقات آنها اثبات

جدول ۳: تاثیر اختلاف پتانسیل اعمال شده بر نرخ تولید در غلظت ثابت ۱۳٪ محلول پلیمری

درصد نرخ تولید	ولتاژ اعمالی (kv)	سرعت چرخش (rpm)	روش تولید نانوالیاف
128	10	6360	الکتروسانتریفیوژ
175	12	7950	الکتروسانتریفیوژ
187	14	9540	الکتروسانتریفیوژ
75	10	-	الکتروریسی
67	12	-	الکتروریسی
58	14	-	الکتروریسی

تحقیقات تراوینو در سال ۲۰۲۲ نیز نشان داد نه تنها افزایش سرعت دورانی دستگاه در ولتاژ ثابت، سبب افزایش نرخ تولید می‌گردد، بلکه سرعت چرخش بالاتر منجر به رسوب الیاف در یک ناحیه‌ای بزرگتر شده، تا جایی که هیچ الیافی مستقیماً در زیر نازل چرخان قرار نمی‌گیرد که منجر به رسوب دونات شکل می‌شود که نظم و هم‌ترازی بیشتری

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، چنانچه غلظت محلول پلیمری ثابت نگه داشته شود، با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی در هر دو روش الکتروسانتریفیوژ و الکتروریسی ساده، نرخ تولید افزایش پیدا می‌کند اما این افزایش نرخ تولید در روش الکتروسانتریفیوژ به علت درگیر بودن همزمان نیروی گریز از مرکز چشمگیرتر می‌باشد.

نقش پر رنگتر جریانات هوا در سرعت چرخش بالاتر است [۶۰-۶۱]. این یافته ها با نتایج این پژوهش تطابق دارد.

۳,۳. مقایسه نتایج آزمایش BET نانوالیاف تولید

شده با روش الکتروریسی و الکتروسانتریفیوژ

مساحت سطح ویژه، حجم نهایی حفره ها، شعاع تقریبی منافذ و درصد تخلخل نانوالیاف تولید شده به هر دو روش الکتروریسی و الکتروسانتریفیوژ، به وسیله دستگاه BET با روش تک نقطه ای^{۱۲} محاسبه شد. داده های محاسبه شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: نتایج BET برای نانوالیاف تولید شده به دو روش الکتروریسی و الکتروسانتریفیوژ با غلظت ثابت محلول پلیمری (۰.۱۵)

روش تولید نانوالیاف	سرعت چرخش (rpm)	ولتاژ اعمالی (kv)	مساحت سطح ویژه (m ² /g)	قطر حفره (nm)	درصد تخلخل
الکتروسانتریفیوژ	6360	12	1020	1.78	36%
الکتروسانتریفیوژ	7950	12	1630	1.03	25%
الکتروسانتریفیوژ	9540	12	1219	0.98	19%
الکتروریسی	-	12	840	0.80	16%

افزایش می باشد. دلیل این امر، رابطه معکوس بین قطر نانو الیاف و مساحت سطح ویژه آنهاست و بنا بر نتایج جدول ۱، با افزایش سرعت چرخش، قطر نانوالیاف کاهش می یابد و الیاف ظریفتری تولید می شود، بنابراین مساحت سطح ویژه افزایش می یابد [۶۲-۶۳].

از سویی دیگر نتایج محاسبات نشان داده است که در روش الکتروریسی تخلخل هایی کوچکتر بر روی سطح نانوالیاف ایجاد می گردد. بر طبق طبقه بندی IUPAC

به الیاف می بخشد [۵۹]. دبیریان و همکاران نیز ارتباط مستقیمی بین افزایش ولتاژ اعمالی، سرعت دورانی و نرخ تولید نانوالیاف را گزارش کردند [۷، ۸]. مولر و همکاران نیز در تحقیقات خود به نقش مستقیم سرعت چرخشی در نرخ جریان ثابت در افزایش نرخ تولید این روش اشاره کردند. علاوه بر این در این تحقیقات، مزیت دیگر این روش تولید نسبت به روش الکتروریسی ساده، اتصال و پیوستگی بیشتر نانوالیاف تولید شده است که سبب نظم و هم ترازی بیشتر الیاف بر روی سطح جمع کننده می گردد. در این پژوهش نقش تغییرات اختلاف پتانسیل در افزایش نرخ تولید در سرعت های چرخش بالاتر کم تاثیر گزارش شده که به علت

همانطور که مشاهده می شود، نانوالیاف تولید شده به هر دو روش الکتروریسی و الکترو سانتریفیوژ از درصد تخلخل قابل قبولی جهت استفاده به عنوان نانوفیلتر برخوردارند. نتایج جدول ۴ نشان می دهد که نانوالیاف تهیه شده به روش سانتریفیوژ از مساحت سطح ویژه و درصد تخلخل بالاتری نسبت به نانوالیاف الکتروریسی شده برخوردارند. با افزایش سرعت چرخش در غلظت ثابت محلول پلیمری مساحت سطح ویژه به میزان کمی

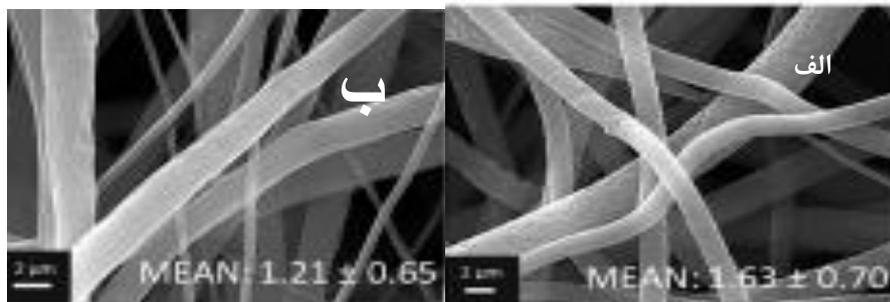
¹² Single point

الکتروسانتزیفیوژ را در شرایط یکسان غلظت ۱۵٪، فاصله ریسندگی ۱۵ سانتی متر و اختلاف پتانسیل ۱۵ کیلوولت در شکل ۴، تخلخل های سطحی، مساحت سطح مخصوص بالا و خاصیت جذبی این نانوالیاف را اثبات کرده و با نتایج BET بدست آمده تطبیق دارد.

هر دو نوع نانوالیاف تولید شده جز مواد میکرو متخلخل بوده و حفره ها از نوع میکرو هستند.

۳،۴. بررسی رفتار جذبی نانوالیاف تولید شده با روش الکترورسی و الکتروسانتزیفیوژ

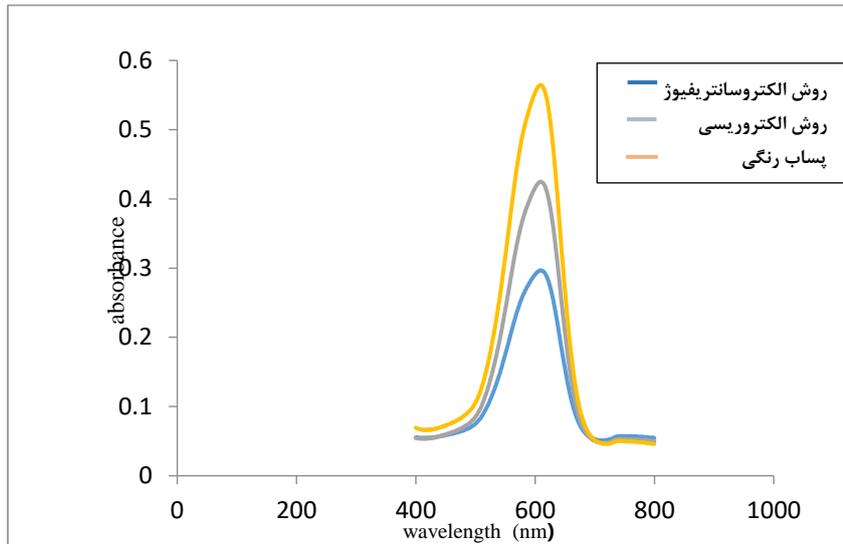
مشاهده تصاویر SEM نمونه های پلی اکریلونیتریل تولید شده با دو روش ریسندگی الکترورسی و



شکل ۴: میکروگرافهای میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف پلی اکریلونیتریل تولید شده با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰، با دو روش ریسندگی: الف) الکتروسانتزیفیوژ، و ب) الکترورسی (با غلظت ۱۵٪، فاصله ریسندگی ۱۵ سانتی متر، اختلاف پتانسیل ۱۵ کیلوولت).

شکل ۵ گزارش شده است. همانطور که مشاهده می شود، جذب رنگ نانوالیاف تولید شده به روش الکتروسانتزیفیوژ بسیار بیشتر از سایر جاذب های معمول است که این امر به علت مساحت سطح ویژه و درصد تخلخل بسیار بالای ماده جاذب تولیدی می باشد.

برای مطالعه رفتار نانو الیاف تولیدی به روشهای ذکر شده به عنوان یک ماده جاذب در حذف آلاینده ها بخصوص آلاینده های رنگی، مقادیر یکسانی از هر دو نوع لیف در محلول ۲۰۰ mg/L از رنگزای راکتیو آبی ۱۳ قرار داده شدند. پس از جذب رنگ توسط جاذب ها میزان رنگ باقیمانده در پساب رنگی به وسیله روش اسپکتروفوتومتری عبوری اندازه گیری و نتایج آن در



شکل ۵: مقایسه جذب رنگ محلول پساب حاوی نانوالیاف تولید شده به روشهای الکترورسی و الکتروسانتریفیوژ و محلول رنگ بدون جاذب

۴. نتیجه گیری

منجر به افزایش شدت ضربه هوای اطراف نازل و جت سیال خروجی شده و تاثیر نیروی حاصل از چرخش هوای اطراف جت سیال بر نیروی کششی حاصل از چرخش و میدان الکتریکی اعمال شده اضافه می گردد که تاثیری مستقیم بر تولید الیاف طویل تر و ظریف تر دارد.

علاوه بر این، قابلیت تولید نانوالیاف در روش جدید بررسی و با الکترورسی معمولی مقایسه شد. نتایج نشان دهنده افزایش قابل توجه در نرخ تولید روش الکتروسانتریفیوژ در مقایسه با الکترورسی است که به غلظت محلول پلیمری، سرعت چرخشی و ولتاژ اعمال شده بستگی دارد. در سرعت های چرخشی بالاتر دستگاه، تاثیرات ولتاژ، کمتر می باشد. لذا در شرایط بهینه ریسندگی، استفاده از تکنیک الکتروسانتریفیوژ می تواند بر نرخ تولید پایین روش الکترورسی غلبه کند. بنابراین، این روش می تواند جایگزین رضایت بخشی برای الکترورسی باشد.

در این تحقیق از نیروهای گریز از مرکز و الکتریکی به طور همزمان برای تولید نانوالیاف استفاده شده است و تاثیر افزودن نیروی گریز از مرکز به نیروهای الکتریکی بر قطر و نرخ تولید نانوالیاف (که مهم ترین عوامل تولید نانوالیاف هستند) مورد بررسی قرار گرفته است، علاوه بر این، کاربرد نانوالیاف پلی اکریلو نیتریل تولید شده به هر دو روش الکترورسی و الکتروسانتریفیوژ به عنوان ماده ای جاذب با مساحت سطح مخصوص زیاد جهت تصفیه پساب رنگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج ارزیابی تاثیر افزایش سرعت چرخش در نرخ جریان ثابت بر قطر الیاف نشان داد که افزایش سرعت چرخش در روش الکتروسانتریفیوژ باعث کاهش قابل توجه قطر نانوالیاف تولیدی می شود زیرا این افزایش سرعت چرخشی

۵. تقدیر و تشکر

از همکاری دانشگاه هنر شیراز که امکان انجام این پژوهش را فراهم کردند قدردانی می‌نماید. همچنین از راهنمایی‌های سخاوتمندانه آقای دکتر اکبر خداپرست حقی و آقای دکتر بابک نوروزی، اعضای هیئت علمی دانشکده نساجی دانشگاه گیلان در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد.

۶. منابع

1. Filatov, Y., A. Budyka, and V. Kirichenko, Electrospinning of micro-and nanofibers. 2007: Begell House, Inc. Publishers New York.
2. Dos Santos, D.M., et al., Advances in functional polymer nanofibers: From spinning fabrication techniques to recent biomedical applications. ACS applied materials & interfaces, 2020. 12(41): p. 45673-45701.
3. Yoon, K., B.S. Hsiao, and B. Chu, Functional nanofibers for environmental applications. Journal of Materials Chemistry, 2008. 18(44): p. 5326-5334.
4. Teo, W.E. and S. Ramakrishna, A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. Nanotechnology, 2006. 17(14): p. R89.
5. Li, Y., et al., Developments of advanced electrospinning techniques: A critical review. Advanced Materials Technologies, 2021. 6(11): p. ۲۱۰۰۴۱۰.
6. Bhardwaj, N. and S.C. Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. Biotechnology advances, 2010. 28(3): p. 325-347.
7. Dabirian, F., et al., A comparative study of jet formation and nanofiber alignment in electrospinning and electrocentrifugal spinning

از سویی دیگر اندازه گیری مساحت سطح ویژه و درصد تخلخل نانوالیاف تولید شده به دو روش الکتروریسی و الکتروسانتریفیوژ نشان داد که اگرچه نانوالیاف تهیه شده به روش الکتروسانتریفیوژ از مساحت سطح ویژه و درصد تخلخل بالاتری نسبت به نانوالیاف الکتروریسی شده برخوردارند، اما هر دو نوع نانوالیاف می‌توانند به طور موفقیت آمیزی به عنوان جاذب در تصفیه پساب رنگی مورد استفاده قرار گیرند.

systems. Journal of Electrostatics, 2011. 69(6): p. 540-546.

8. Dabirian, F., S. Hosseini Ravandi, and A. Pishevar, The effects of operating parameters on the fabrication of polyacrylonitrile nanofibers in electro-centrifuge spinning. Fibers and Polymers, 2013. 14: p. 1497-1504.
9. Hosseini Ravandi, S.A., et al., Recently developed electrospinning methods: a review. Textile Research Journal, 2022. 92(23-24): p. 5130-5145.
10. Rafiei, S., A comparative study on electrocentrifuge spinning and electrospinning process as two different nanofiber creation techniques, in Applied Chemistry and Chemical Engineering, Volume 4. 2017, Apple Academic Press. p. 325-341.
11. Akduman, C., E.A. Kumbasar, and S. Morsunbul. Electrospun nanofiber membranes for adsorption of dye molecules from textile wastewater. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. IOP Publishing.
12. Rafiei, S., B. Noroozi, and A. Haghi, Carbon nanofibers for environmental remediation—a comprehensive review. Engineering Materials, 2015: p. 187.

13. Rafiei, S., B. Noroozi, and A. Haghi, A Very Detailed Review on Application of Nanofibers in Energy and Environmental. In book: *Nanomaterials and Nanotechnology for Composites*. 2015, 36.
14. Rafiei, S., Nanofiber Production Capability of Electro-Centrifuge Technique, in *Engineering Technology and Industrial Chemistry with Applications*. 2018, Apple Academic Press. p. 125-142.
15. Alghoraibi, I. and S. Alomari, Different methods for nanofiber design and fabrication. *Handbook of nanofibers*, 2018: p. 1-46.
16. Kiyak, Y.E. and E. Cakmak, Nanofiber Production Methods. *Electronic Journal of Vehicle Technologies/Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2014. 8(3).
17. Nayl, A.A., et al., Review of the recent advances in electrospun nanofibers applications in water purification. *Polymers*, 2022. 14(8): p. 1594.
18. Akhila, R., et al., A Brief Review on Electrospun Lignin Nanofibres. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 2021. 14(4): p. 465-474.
19. Vasita, R. and D.S. Katti, Nanofibers and their applications in tissue engineering. *International Journal of nanomedicine*, 2006. 1(1): p. 15-30.
20. Gorji, M., R. Bagherzadeh, and H. Fashandi, Electrospun nanofibers in protective clothing, in *Electrospun nanofibers*. 2017, Elsevier. p. 571-598.
21. Contreras-Cáceres, R., et al., Electrospun nanofibers: Recent applications in drug delivery and cancer therapy. *Nanomaterials*, 2019. 9(4): p. 656.
22. Jiang, S., et al., Electrospun nanofiber reinforced composites: A review. *Polymer Chemistry*, 2018. 9(20): p. 2685-2720.
23. Rafiei, S., *Foundations of Nanotechnology, Volume Three: Mechanics of Carbon Nanotubes*. 2015.
24. Ahmed, F.E., B.S. Lalia, and R. Hashaikeh, A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications. *Desalination*, 2015. 356: p. 15-30.
25. Rafiei, S., Optimization and Production of Polyacrylonitrile Based Activated Carbon Nanofibers for Dye Wastewater Treatment. *Journal of Color Science and Technology*, 2020. 14(4): p. 281-294.
26. S. Rafiei, e.a., Characteristic assessment of stabilized polyacrylonitrile nanowebs for the production of activated carbon nano-sorbents. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2014. 32: p. 449-457.
27. Rafiei, S., Electrospinning process: A comprehensive review and update. *Appl Method Polym Res Technol*, 2014. :1 p. 1-100.
28. Migliaresi, C., et al., Advanced electrospinning setups and special fibre and mesh morphologies. *Electrospinning for advanced biomedical applications and therapies*. Smithersrapra, United Kingdom, 2012: p. 23-68.
29. Keirouz, A., et al., The History of Electrospinning: Past, Present, and Future Developments. *Advanced Materials Technologies*, 2023: p. 2201723.
30. Rafiei, S. and A. Haghi, Nanopolymer Fibers: A very Comprehensive Review in Axial and Coaxial Electrospinning Process. 2015, 16.
31. He, J. and Y. Zhou, Multineedle electrospinning, in *Electrospinning: Nanofabrication and Applications*. 2019, Elsevier. p. 201-218.
32. Yarin, A. and E. Zussman, Upward needleless electrospinning of multiple nanofibers. *Polymer*, 2004. 45(9): p. 2977-2980.
33. Yu, L., et al., High throughput preparation of aligned nanofibers using an improved bubble-electrospinning. *Polymers*, 2017. 9(12): p. 658.

34. Yan, G., H. Niu, and T. Lin, Needle-less electrospinning, in *Electrospinning: Nanofabrication and applications*. 2019, Elsevier. p. 219-247.
35. Rafiei, S., Updates on Two Different Nanofiber Production Techniques. *Polymers Research Journal*, 2016. 10(2).
36. Ziaei, M. and S. Rafiei, A Note on Preparation of Nanofilter from Carbon Nanotubes, in *Applied Chemistry and Chemical Engineering*, Volume 1. 2017, Apple Academic Press. p. 253-262.
37. Thomas, S., et al., Foundations of nanotechnology, volume two: nanoelements formation and interaction. 2014: CRC Press.
38. Badrossamay, M.R., et al., Nanofiber assembly by rotary jet-spinning. *Nano letters*, 2010. 10(6): p. 2257-2261.
39. Senthilram, T., et al., Self crimped and aligned fibers. *Materials Today*, 2011. 14(5): p. 226-229.
40. Sarkar, K., et al., Electrospinning to forcespinning™. *Materials today*, 2010. 13(11): p. 12-14.
41. Stojanovska, E., et al., Developing lignin-based bio-nanofibers by centrifugal spinning technique. *International journal of biological macromolecules*, 2018. 113: p. 98-105.
42. Natarajan, T.S. and P. Bhargava, Influence of spinning parameters on synthesis of alumina fibres by centrifugal spinning. *Ceramics International*, 2018. 44(10): p. 11644-11649.
43. Riahi, D., On forcespinning of nonlinear rotating jets of viscoelastic Boger fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2021. 287: p. 10444.
44. Ahmed, J., M. Gultekinoglu, and M. Edirisinghe, Recent developments in the use of centrifugal spinning and pressurized gyration for biomedical applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 2023: p. e1916.
45. Watanabe, Y. and H. Sato, Review fabrication of functionally graded materials under a centrifugal force. *Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry*, 2011. 133: p. 150.
46. Regel, L.L. and W.R. Wilcox, Centrifugal materials processing, in *Centrifugal Materials Processing*. 1997, Springer. p. 1-15.
47. Chen, J., et al., Review of the principles, devices, parameters, and applications for centrifugal electrospinning. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022. 307(8): p. 220057.
48. Dosunmu, O., et al., Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface. *Nanotechnology*, 2006. 17(4): p. 1123.
49. Andrady, A.L., *Science and technology of polymer nanofibers*. 2008: John Wiley & Sons.
50. Zhang, Z.-M., et al., A review on nanofiber fabrication with the effect of high-speed centrifugal force field. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019. 14: p. 1558925019867517.
51. Cengiz, F., et al., Comparative analysis of various electrospinning methods of nanofibre formation. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2009(1 (72)): p. 13--19.
52. Chase, G.G., J.S. Varabhas, and D.H. Reneker, New methods to electrospin nanofibers. *Journal of engineered fibers and fabrics*, 2011. 6(3): p. 15589250110060030.
53. Nasouri, K., A.M. Shoushtari, and M. Khamforoush, Comparison between artificial neural network and response surface methodology in the prediction of the production rate of polyacrylonitrile electrospun nanofibers. *Fibers and Polymers*, 2013. 14: p. 1856-1849.

54. Robinson, A.J., et al., Comparative analysis of fiber alignment methods in electrospinning. *Matter*, 2021. 4(3): p. 821-844.
55. Hoffmann, A. and A.J. Kuehne, High throughput centrifugal electrospinning of polyacrylonitrile nanofibers for carbon fiber nonwovens. *Polymers*, 2021. 13(8): p. 1313.
56. Chen, C., M. Dirican, and X. Zhang, Centrifugal spinning—high rate production of nanofibers, in *Electrospinning: Nanofabrication and applications*. 2019, Elsevier. p. 321-338.
57. Huttunen, M. and M. Kellomäki, A simple and high production rate manufacturing method for submicron polymer fibres. *Journal of tissue engineering and regenerative medicine*, 2011. 5(8): p. e239-e243.
58. Suresh, S., A. Becker, and B. Glasmacher, Impact of apparatus orientation and gravity in electrospinning—A review of empirical evidence. *Polymers*, 2020. 12(11): p. 2448.
59. Treviño, D.A., Development of an Electro-Centrifugal Spinning Setup for Nanofiber Production Research. 2022, The University of Texas Rio Grande Valley.
60. Müller, F., et al., Centrifugal electrospinning enables the production of meshes of ultrathin polymer fibers. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020. 2(11): p. 4360-4367.
61. Fallahzade, M. R., Payvandy, P., & Tavanaie, M. A. Investigating and modeling the effect of magnetic field shape on electrospinning process. *Journal of Textile Science and Technology*, 8(2), 37-47. 2019.
62. Khajavi, R., & Najaf Abadi, S. (2015). Measurements of Specific Surface Area of Materials Specially Fibers: A Review. *Journal of Textile Science and Technology*, 5(2), 3-10.
63. Tajary Sarab, E., Mottaghitalab, V. Development and Characterization of Hollow Nanofibers: A Review. *Journal of Textile Science and Technology*, 2013; 3(3): 39-60.