شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

فصلنامه

دانش آزمایشگاهی ایران

ISSN 2538-3450

سال دوازدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۵

تولید نانوالیاف با روش‌های نوین الکتروریسی

- یک دهه در مسیر رشد و رونق خدمات آزمایشگاهی کشور
- بهره‌مندی ۱۲هزار نفر از تسهیلات اعتباری بهارانه شبکه آزمایشگاهی

ارزش گوهرشناسی و دیرینه‌شناسی کهربا و روش‌های آزمایشگاهی تشخیص آن

تصویربرداری فراطیفی رامان و پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، راهکاری نوین در استخراج نقشه توزیع مولکولی مواد

بررسی نرمال بودن توزیع نتایج آزمون با استفاده از نرم‌افزار MiniTab

بهینه‌سازی واحدهای گاز سوز با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری آموزش - یادگیری

بررسی میزان گلوتن در مواد غذایی با استفاده از روش الایزا

www.IJLK.ir
info@ijlk.ir

نویسنده
اسماعیل رنجبری[۱]
۱. مدیر و رابط شبکه آزمایشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
esmaeil.ranjbari@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

تولید نانوالیاف با روش‌های نوین الکتروریسی

چکیده

رویکردهای زیادی در مقالات برای افزایش بهره‌وری و رفع نواقص ساختاری نانوالیاف پیشنهاد شده‌است. آنها بیشتر بر افزایش تعداد جت‌ها از طریق اصلاح سوزن، استفاده از سوزن‌های متعدد و الکتروریسی بدون سوزن تمرکز کرده‌اند که هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند. درست است که در الکتروریسی بدون سوزن مشکل گرفتگی سوزن و سرعت پایین تولید حل شده‌است، اما مشکل تبخیر سریع حلال‌های فرار که منجر به کاهش دقت و عدم تکرارپذیری در مراحل ساخت می‌شود هنوز به‌طور کامل مرتفع نشده‌است. امروزه تولید در مقایس صنعتی نانوالیاف به دلیل کاربرد فراوان آنها در حوزه‌های مختلف در جهان اهمیت فراوانی یافته است. گرچه تولید نانوالیاف در آزمایشگاه آسان است، اما وقتی صحبت از تولید در مقیاس صنعتی به میان می‌آید، به دلیل شرایط سخت کنترل عوامل محیطی و دستگاهی که تاثیر مستقیم بر ساختار و خواص نانوالیاف دارند،کمی سخت به نظر می‌آید.

واژه‌های کلیدی
نانوالیاف، الکتروریسی، عوامل موثر.

مقدمه

با کاهش قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به نانومتر خواص منحصر بفردی همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انعطاف‌پذیری و خواص مکانیکی عالی به الیاف بخشیده شده که گستره کاربرد آنها را بسیار وسیع می‌کند. تاکنون روش‌های متعددی برای تولید الیاف نانومتری از جمله روش کشش[۱]، سنتز قالبی[۲]، جداسازی فازی[۳] و روش خودبه‌خودی[۴] پیشنهاد شده‌است. از بین روش‌های مطرح شده برای تولید نانوالیاف، روش الکتروریسی[۵] علاوه‌بر سادگی از بازدهی بالاتری نیز برخوردار است و می‌توان گفت این روش تنها روشی است که در آینده می‌توان از آن برای تولید نانوالیاف به‌صورت هم‌جهت و پیوسته استفاده نمود. الکتروریسی به دو روش سوزنی و بدون نازل انجام می‌گیرد. از معایب روش الکتروریسی سوزنی می‌توان به میزان تولید پایین و گرفتن سوزن در حین ریسندگی اشاره کرد، اخیرا روش جدیدی برای ساخت نانوالیاف استفاده می‌شود که به آن الکتروریسی بدون نازل می‌گویند که توجه زیادی را به خود جلب کرده و تبدیل به یک راهبرد امیدوارکننده برای بهبود بهره‌وری در تولید نانوالیاف شده‌است. تولید نانوالیاف از نقطه نظر تحقیقاتی و گستره کاربرد و ساخت محصول بسیار جالب است و در حال حاضر تولید این الیاف با روش الکتروریسی یک موضوع جهانی بوده و میلیون‌ها دلار در مورد آن هزینه شده‌است. از جمله کاربردهای مهم این الیاف می‌توان به استفاده از آن در ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری، کاربردهای پزشکی، نظامی و فیلتراسیون‌های مختلف اشاره کرد [۱ تا ۳].

فصلنامه
دانش آزمایشگاهی ایران
سال دوازدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۵

روش‌های تولید نانوالیاف

در سال‌های اخیر برای تهیه نانوالیاف از روش‌های متعددی مانند جداسازی فازی، روش خودبه‌خودی، اعمال کشش، سنتز قالبی و الکتروریسی کمک گرفته شده‌است. از بین روش‌های ذکر شده تنها روش الکتروریسی از بازدهی بالا برخوردار بوده و بیشتر از این روش برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شود [۴ تا ۶].

• روش اعمال کشش

این روش، فرایندی مشابه با فرایند خشک‌ریسی در صنعت نساجی است که در این روش از یک میکروپیپت با قطری در حدود چند میکرومتر برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شود؛ به طوری که این میکروپیپت در نزدیکی خط تماسی در داخل قطره فرو رفته و سپس با سرعت ثابتی کشیده می‌شود که در این نتیجه عمل، نانوالیاف شکل می‌گیرد. اما تنها مواد ویسکو الاستیکی می‌توانند از طریق این روش ساخته شوند که قادر باشند در شرایط تغییر شکل‌های شدید از خود مقاومت نشان دهند و یا در طول عمل کشیده شدن به قدر کافی منسجم باشند [۴ و ۵].

• روش سنتز قالبی (قالب‌گیری)

در این روش از یک قالب با سوراخ‌هایی در مقیاس نانو به‌عنوان قالب به‌منظور ساختن نانوالیاف به حالت جامد (فیبریل) یا به شکل توخالی (لوله‌ای) استفاده می‌شود. بیشترین توجه در این روش در آینده ممکن است به سمت ساخت نانولوله، مواد خام متنوع نظیر پلیمرهایی با هدایت الکتریکی بالا، فلزات نیمه هادی و غیره جلب شود. از طرف دیگر، این روش قادر به تولید نانوالیاف پیوسته و جدا از هم نیست [۴ و ۵].

• جداسازی فازی

مراحل این روش شامل فرایند حل کردن، ژلاسیون، استخراج با به کار بردن یک حلال متفاوت، منجمد کردن و خشک کردن است که در نتیجه این عمل یک فوم با منافذی در مقیاس نانو پدیدار می‌شود. در این فرایند به دلیل اینکه قطر ذرات در حد نانو است به زمان طولانی‌تری برای انتقال پلیمر جامد به داخل فوم نیاز خواهد داشت. در فرایند جداسازی فازی در ابتدا پلیمر به‌گونه‌ای حل می‌شود تا محلولی همگن با غلظت مطلوب تشکیل شود سپس محلول در داخل یخچال با درجه حرارت ژلی شدن قرار داده می‌شود که این درجه حرارت بستگی به غلظت پلیمر دارد. بعد از شکل‌گیری، ژل، درون آب مقطر معلق می‌ماند تا بدین طریق انتقال فاز بین حلال صورت گیرد. پس از این که ژل از آب مقطر خارج شد ابتدا منجمد و سپس خشک شده و بدین طریق ماتریس نانوالیاف پدیدار می‌شود [۴ و ۵].

• روش خودبه‌خودی

از آنجایی که این روش به‌صورت خودبه‌خودی بوده، بسیار وقت‌گیر و زمان‌بر است؛ بنابراین، نمی‌توان از آن به‌منظور تولید انبوه نانوالیاف استفاده کرد.

• روش الکتروریسی

در روش‌های معمول ریسندگی به‌عنوان مثال، ذوب‌ریسی، خشک‌ریسی و یا تر‌ریسی از نیروهای مکانیکی برای تولید الیاف استفاده می‌شود. این کار از طریق اکسترود کردن مذاب و یا محلول پلیمری از میان نازل و در مرحله بعدی اعمال کشش صورت می‌گیرد و در نهایت به تولید فیلامنت‌هایی به‌صورت جامد و یا منعقد شده می‌انجامد. اما روش الکتروریسی به‌طور کلی متفاوت از روش‌های دیگر است. در این روش از نیروهای الکترواستاتیکی استفاده می‌شود [۴ تا ۶]. در این روش نانوالیاف از طریق اعمال بارهای الکترواستاتیک بر محلول و یا مذاب پلیمری به‌دست می‌آیند.

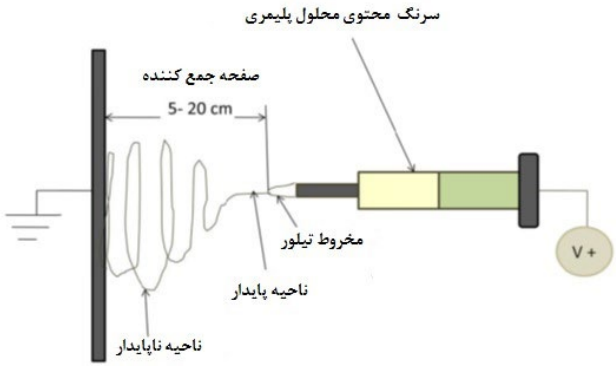
عوامل مهم و تاثیرگذار در فرایند الکتروریسی عبارتند از:

- انتخاب حلال مناسب به‌منظور حل کردن پلیمر؛
- فشار بخار حلال انتخابی باید مناسب باشد تا از این طریق میزان سرعت تبخیر حلال نیز تحت شعاع قرار نگیرد یعنی نه خیلی سریع که موجب سخت شدن لیف قبل از رسیدن آن به محدوده نانو شود و نه خیلی آهسته که موجب چسبندگی الیاف روی هم شود. در حقیقت باید به اندازه‌ای باشد که لیف انسجام خود را تا قبل از رسیدن به جمع کننده حفظ کند؛
- ویسکوزیته و کشش سطحی حلال نیز باید بهینه باشد؛ چنانچه خیلی زیاد باشد از حرکت و شکل‌گیری جت جلوگیری به عمل می‌آورد و اگر خیلی کم باشد، محلول پلیمری به‌صورت آزادانه از سطح رشته‌ساز خارج می‌شود؛
- ولتاژ اعمالی نیز باید به اندازه کافی باشد تا بدین طریق بتواند بر نیروی کشش سطحی و یسکوزیته محلول پلیمری فائق آید و در نهایت، جت، کار خود را آغاز کند؛
- فاصله بین رشته‌ساز و صفحه جمع کننده نیز باید به اندازه کافی باشد تا بدین طریق حلال زمان کافی را برای تبخیر شدن داشته باشد [۴ تا ۶].

• سازوکار الکتروریسی

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، جت الکتروریسی از ۴ ناحیه مجزا تشکیل شده‌است؛ این نواحی عبارتند از:

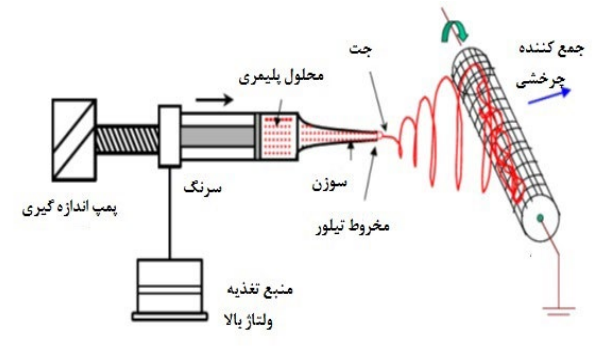
- بخش پایه[۶] ناحیه که جت از محلول پلیمری خارج می‌شود و به مخروط تیلور[۷] معروف است.
- ناحیه بعد از مخروط تیلور که به ناحیه پایدار[۸] معروف است.
- ناحیه شکاف[۹] و انشعابی شدن[۱۰] که منظور از شکاف، تبدیل شدن جت به دو قسمت مساوی و منظور از منشعب شدن، تقسیم جت اولیه به چندین جت باردار، با قطرهای یکسان و توزیع بار برابر در واحد طول است. این ناحیه به ناحیه ناپایدار[۱۱] معروف است و دقیقا در این ناحیه است که امکان بروز مهره‌ها[۱۲] روی لیف وجود دارد.
- منطقه تجمع که در این ناحیه، الیاف الکتروریسی شده روی جمع کننده جمع‌آوری می‌شوند [۷ و ۸].



شکل (۱): نواحی مختلف در جت الکتروریسی [۸].

● **الکتروریسی سوزنی**

در فرایند الکتروریسندگی سوزنی یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا بین منبع محلول پلیمری و جمع کننده فلزی ایجاد می‌شود. یک جت از محلول پلیمری با استفاده از نیروی الکترواستاتیک به شکل نانوالیاف تولید و روی جمع کننده جمع می‌شود. مجموعه فرایند در ساده‌ترین شکل خود از یک پیپت برای نگهداری محلول پلیمری، دو الکترود و یک منبع تغذیه ولتاژ بالا تشکیل می‌شود. در این حالت قطره پلیمری شکل گرفته در سر پیپت به دلیل اعمال ولتاژ، کشیده شده و در نهایت، به لیف تبدیل می‌شود. جت نیز به‌صورت الکتریکی باردار می‌شود و همین امر باعث بروز خمیدگی در لیف و کاهش قطر آن شده و سپس الیاف روی سطح جمع کننده، جمع‌آوری می‌شود. نمایی از فرایندهای فوق در شکل (۲) نشان داده شده‌است. [۵ تا ۱۰].

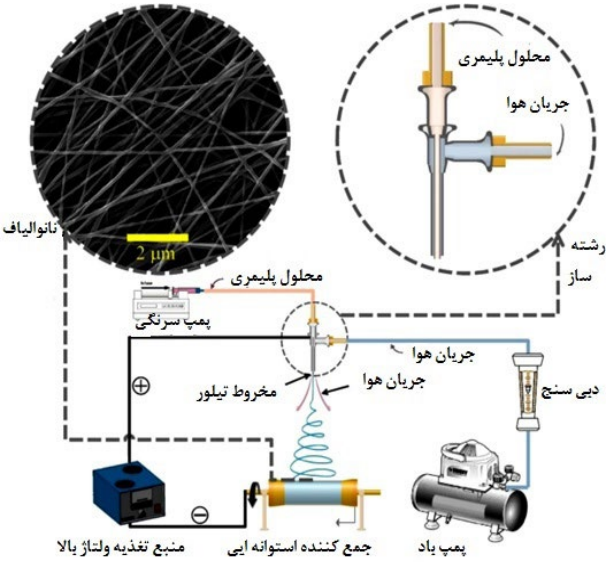


شکل (۲): نمایی از فرایند الکتروریسی سوزنی با جمع کننده چرخشی [۱۰].

● **الکتروریسی دمشی**

الکتروریسی سوزنی دمشی یکی از روش‌های تولید نانوالیاف با سرعت بالا به کمک جریان هوا و با سرعت زیاد است. در این روش از نازل هم محور با طراحی منحصر به فرد و مختص الکتروریسی دمشی استفاده می‌شود. در این نوع نازل الکتروریسی دمشی، نازل محلول در هسته و نازل هوا در قسمت پوسته، حول یک محور قرار دارند. به عبارت دیگر، محلول پلیمری از نازل داخلی و جریان هوا از نازل بیرونی می‌گذرند؛ در نتیجه، محلول پلیمری همراه با هوا از نوک نازل خارج شده و در اثر میدان الکتریکی حاصل از منبع ولتاژ بالای منفی متصل به جمع کننده، باردار شده و جت تشکیل شده به سمت جمع کننده کشیده می‌شود. نمایی از روش الکتروریسی دمشی در شکل (۳) نشان داده شده‌است [۱۱].

با استفاده از این روش می‌توان مشخصات نانوالیاف تولیدی از جمله تخلخل، شکل و قطر را کنترل کرد. همچنین مزیت دیگر این روش، سادگی فرایند آن است که امکان تولید نانوالیاف با سرعت تولید بالا را فراهم می‌کند.



شکل (۳): نمایی از فرایند الکتروریسی سوزنی دمشی [۱۱].

○ پیشرفت در سیستم الکتروریسی برای تولید نانوالیاف در مقیاس بالا

الکتروریسی سوزنی به‌طور گسترده در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی برای تولید مقدار کمی از نمونه‌های نانوالیاف و یا به‌عنوان یک مدل در تجزیه تحلیل نظری و درک اساس الکتروریسی استفاده می‌شود.

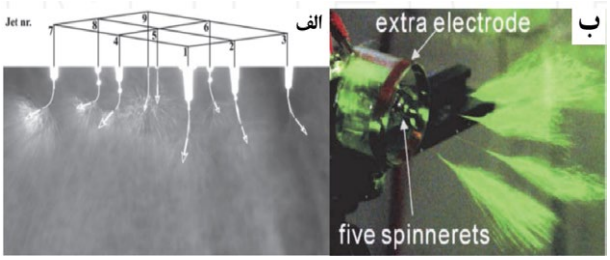
در سال‌های اخیر سیستم‌های الکتروریسی با توانایی تولید در مقیاس بالا مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج امیدوارکننده‌ای به‌دست آمده است. در این قسمت به‌طور خلاصه، پیشرفت تحقیقات اخیر در فناوری‌های الکتروریسی در مقیاس بالا مورد بررسی قرار خواهد گرفت [۹ تا ۱۵].

○ الکتروریسی چند جتی رو به پایین

یک راه ساده برای افزایش توان الکتروریسی، استفاده از رشته‌ساز چند جتی بوده که در شکل (۴) آورده شده‌است.

بهره‌وری الیاف را می‌توان به سادگی با افزایش تعداد جت‌ها افزایش داد، با این حال الکتروریسی چند جته نشان داده شده در شکل، دارای دافعه قوی در میان جت‌ها بوده که این امر ممکن است باعث کاهش تولید الیاف و همچنین افت کیفیت الیاف شود؛ این امر یک مانع اصلی برای کاربرد عملی این جت است. برای کاهش دافعه باید جت‌ها در یک فاصله مناسب از یکدیگر جدا شوند و همچنین برای تولید انبوه نانوالیاف، فضای زیادی برای سوزن‌ها لازم است.

برای تثبیت و بهینه‌سازی فرایند الکتروریسی یک الکترود استوانه‌ای خارجی به‌عنوان الکترود مکمل برای پوشش رشته‌ساز چند جتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۲].

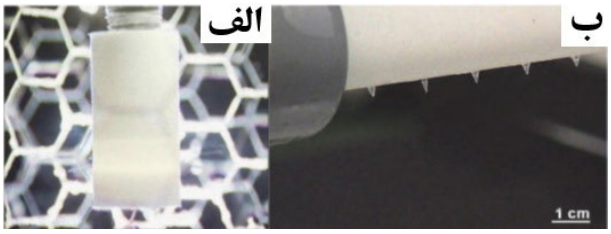


شکل (۴): (الف): سیستم الکتروریسی چند جته، (ب): الکتروریسی چند جته با یک الکترود استوانه‌ای مرکزی [۹ و ۱۲].

همان‌طور که در شکل (۴-ب)، نشان داده شده‌است، حضور الکترود خارجی به‌طور چشمگیری باعث کاهش منطقه تجمع الیاف و در نتیجه بهبود میزان تولید الیاف شده‌است. با این وجود، به دلیل حرکت کوچک و بی‌نظم الکترود ممکن است در الکتروریسی چند جتی، الیاف درشت مشاهده شود. در این نوع الکتروریسی، محلول خروجی از جت حامل مقدار زیادی بار الکتریکی است که حرکت جت باعث کشش آمدن می‌شود و لیف روی جمع کننده می‌نشیند. می‌توان استنباط کرد که در الکتروریسی چند جتی با روش‌های ذکر شده، تداخل به‌طور کامل از بین نمی‌رود، که این امر مانع بزرگی برای صنعتی کردن الکتروریسی چند جتی است.

علاوه‌بر این، یک عملیات ریسندگی چند جتی موفقیت‌آمیز مستلزم یک سیستم با کیفیت منظم به‌منظور عدم انسداد نازل‌های سوزنی است. همچنین تنظیم یک دستگاه با کیفیت برای تولید انبوه نانوالیاف با استفاده از دستگاه الکتروریسی چند جتی به‌طور تقریبی غیرممکن است. علاوه‌بر الکتروریسی چند جتی، می‌توان از لوله متخلخل به‌عنوان رشته‌ساز برای بهبود بهره‌وری الیاف استفاده کرد. این سیستم به دلیل تولید الیاف متعدد (پیوسته) به‌طور همزمان از کانال‌های محلول پلیمری درون لوله جزء الکتروریسی چند جتی طبقه‌بندی می‌شود.

در مثال دیگری (شکل (۵)) از یک لوله پلی اتیلن متخلخل با یک محور افقی به‌منظور الکتروریسی نانوالیاف استفاده شده‌است. در الکتروریسی لوله‌ای با محور افقی، محلول پلیمری با اختلاف فشار ۲-۱ KPa در طی دیواره لوله حرکت می‌کند. به دلیل محدود بودن تعداد منافذ لوله، این مجموعه می‌تواند در ۰/۵-۰/۳ g/hr نانوالیاف تولید کند. سرعت تولید تا ۲۵۰ بار بیشتر از الکتروریسی تک سوزن است. اگرچه نتایج به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۱۳]، نایکنواختی زیادی در ضخامت نانوالیاف نشان می‌دهد. سرعت تولید به راحتی می‌تواند با افزایش طول لوله و تعداد منافذ مقیاس‌پذیر باشد اما فاصله بین منافذ به دلیل ایجاد دافعه میدان الکتریکی بین جت‌ها خیلی نمی‌تواند کاسته شود. دافعه قوی در این مجموعه می‌تواند باعث تداخل شدید میدان در درون وب الیاف و حتی میان جت و جمع کننده شود [۹، ۱۲، ۱۶ و ۱۷].



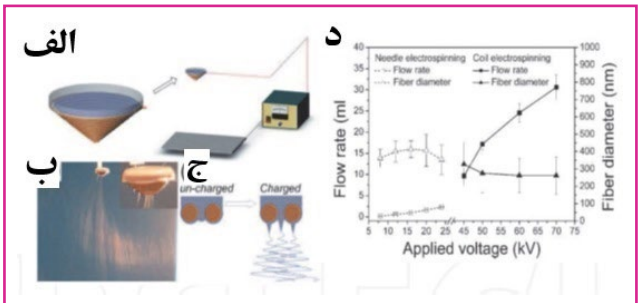
شکل (۵): (الف): الکتروریسی با استفاده از یک لوله عمودی به‌عنوان رشته‌ساز، (ب):الکتروریسی با لوله افقی [۹ و ۱۲].

وانگ[۱۴] [۱۶] استفاده از رشته‌ساز مخروطی سیم‌پیچی شده که می‌تواند تا ۷۰ KV بدونه تخلیه شارژ کار کند را گزارش داد. همان‌طور که در شکل (۶-الف) و (۶-ج)، نشان داده شده‌است، ریسندگی محلول در مخروط سیمی بدون استفاده از هیچ کانالی انجام می‌شود. هنگامی که یک ولتاژ بالا به سیم‌پیچ وارد می‌شود با توجه به کشش سطحی بالا و ویسکوالاستیسیته، محلول پلیمری می‌تواند درون مخروط سیمی باقی بماند. بنابراین، دیگر محدودیت تعداد جت و منافذ در الکتروریسندگی چند جتی و لوله‌ای را نداریم. در مقایسه با الکتروریسی سوزنی معمولی، الکتروریسی سیم‌پیچ مخروطی باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در بهره‌وری ریسندگی و تولید نانوالیاف با قطر کوچکتر شد (شکل (۶-ج)). همچنین نتایج نشان داد که الیاف تهیه شده با الکتروریسی سیم‌پیچ مخروطی، توزیع قطر گسترده‌تری نسبت به الکتروریسی سوزنی دارد. برای افزایش میزان تولید الیاف توسط تاپی[۱۴] و همکارانش [۹ و ۱۲] دستگاه الکتروریسی لبه و صفحه پیشنهاد شد. برای این کار، یک صفحه با زاویه ۴۰ درجه با سطح، برای نگهداشتن محلول ، به‌عنوان رشته‌ساز در نظر گرفته می‌شود. در این روش، مخزن عایق الکتریکی شده با یک یا چند پیپت پلاستیکی به هم متصل و صفحه شارژ می‌شود، هر پیپت تامین کننده شروع یک جت است. گزارش شد که میزان تولید الیاف درشت با توزیع قطر گسترده (پهن) حتی با استفاده از یک پیپت ریسندگی، بدون انسداد تا ۵ برابر افزایش یافت.

در این روش، کشش سطحی محلول پلیمر نقشی حیاتی را

ایفا می‌کند و زاویه صفحه باید طوری انتخاب شود که با توجه به خواص محلول باعث چکیدن آن نشود.

در طرحی دیگر برای الکتروریسی، از یک حمام محلول و یک غلطک فلزی به‌عنوان رشته‌ساز استفاده شد. قطرات محلول پلیمری با استفاده از یک توزیع کننده روی غلطک فلزی پخش و هنگامی که ولتاژ اعمال می‌شود قطرات محلول روی سطح فلز رشته‌ساز غلتکی که در معرض نیروی الکتریکی قرار دارد، به بیرون کشیده شده و به شکل نانوالیاف تبدیل می‌شوند. این دستگاه برای افزایش میزان تولید الیاف در فرایند الکتروریسی پیشنهاد شده‌است.



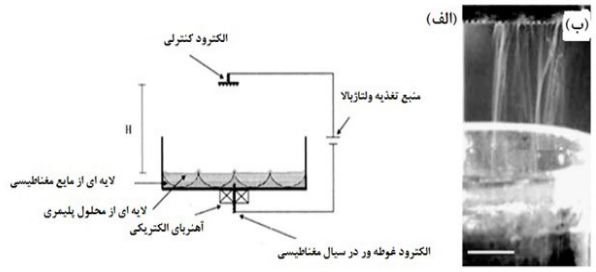
شکل (۶): (الف): نمایی از الکتروریسی مخروطی، (ب): تصویر فرایند الکتروریسی، (ج): تصویر تشکیل جت، (د): مقایسه بین الکتروریسی سوزنی و مخروطی برای پلی وینیل الکل [۱۶].

الکتروریسی بدون نازل (بدون سوزن) به سمت بالا

روش الکتروریسی خوب و مناسب برای تولید و میزان بهره‌وری بالای نانوالیاف باید کمترین وابستگی به تعداد کانال و سیال داشته باشد. این شرایط باید شامل همه پلیمرها با خواص متفاوت باشد. دستگاه الکتروریسی بدون نازل دارای پتانسیل خوبی است [۱۳، ۱۸ و ۱۹].

یارین[۱۶] و سوزمان[۱۷] [۹،۱۲] استفاده از دستگاه الکتروریسی سیال دو لایه را گزارش کردند که می‌تواند مشکلات الکتروریسی چند جتی را نداشته باشد (شکل (۷-الف)). در این دستگاه، لایه پایینی سیال سوسپانسیون فرو مغناطیسی است و در لایه فوقانی، محلول ریسیده می‌شود. در طول الکتروریسی، زمانی که یک میدان مغناطیسی طبیعی به سیستم اعمال می‌شود، جت عمودی ثابت از آشفتگی بین سطح مشترک دو لایه تشکیل می‌شود؛ در نتیجه، در اثر اعمال ولتاژ بالا به سیال در همان زمان، هزاران جت به سمت بالا پرتاب می‌شوند (شکل (۷-ب)). سیستم ذکر شده نیاز به شرایط نصب پیچیده دارد و نانوالیاف حاصل شده دارای قطر درشت و توزیع قطر پهن است.

جریسکا[۱۸] و همکاران [۹، ۱۲ و ۲۰] یک دستگاه الکتروریسی بدون سوزن با استفاده از یک غلتک دوار به‌عنوان رشته‌ساز الیاف اختراع کردند. هنگامی که غلتک به آرامی در حمام محلول پلیمری می‌چرخد باعث خیس شدن سطح می‌شود.



شکل (۷): (الف): فرایند الکتروریسی دو لایه سیال، (ب): جت‌های خروجی به سمت جمع کننده [۹ و ۱۲].

در اثر اعمال ولتاژ بالا به سیستم الکتروریسی تعداد جت فراوانی می‌توانند از سطح غلتک به سمت بالا تشکیل شود (شکل (۸)). فرایند الکتروریسی بدون سوزن با رشته‌ساز دوار را می‌توان بدین صورت خلاصه کرد: چرخش رشته‌ساز بارگذاری شده با یک لایه نازک محلول پلیمری و تشکیل الیاف روی سطح رشته‌ساز.

چرخش و گرانش باعث ایجاد جت مخروطی روی سطح لایه محلول می‌شود. هنگامی که یک ولتاژ بالا به رشته‌ساز اعمال می‌شود، خوشه‌ها تمایل به تمرکز بار و تقویت آشفتگی دارند و مایع در اطراف خوشه‌ها تحت تاثیر نیروی الکتریکی، بالا کشیده می‌شود و در نتیجه، مخروط تیلور شکل می‌گیرد. در جت‌های محلولی ایده‌ال، زمانی که نیروی الکتریکی به اندازه کافی باشد از نوک آنها مخروط تیلور خارج می‌شود.

شکل (۸): فرایند الکتروریسی چرخشی [۱۲].

نیو[۱۹] و همکاران [۱۲ و ۱۵]، از طرحی مشابه، شامل یک سیستم الکتروریسی بدون نازل ولی با رشته‌سازهای متفاوت الیاف (دیسک، استوانه، گوی) استفاده کردند (شکل (۹)). هنگامی که محلول پلی وینیل الکل[۲۰] از طریق یک سیم مسی که داخل حمام محلول بود با یک ولتاژ الکتریکی بالا شارژ شد، جت‌ها / رشته‌های متعددی از رشته‌ساز تشکیل شده که روی جمع کننده، جمع می‌شوند. با چرخش رشته‌ساز، به‌طور مداوم محلول پلی وینیل الکل روی سطح رشته‌ساز بارگذاری شده و منجر به تولید پیوسته جت / رشته پلیمری می‌شود.آنها همچنین با استفاده از روش المان‌های محدود به تجزیه و تحلیل میدان الکتریکی و بررسی شکل رشته‌ساز در شدت مشخصات

فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران
سال دوازدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۵

میدان الکتریکی پرداختند. آنها دریافتند که رشته‌ساز به مقدار خیلی زیادی با میدان الکتریکی در منطقه تشکیل نانوالیاف همپوشانی شده‌است که این امر، یک نقطه کلیدی موثر برای تشکیل نانوالیاف یکنواخت در الکتروریسی بدون سوزن است.

شکل (۹): تصاویر الکتروریسی بدون نازل با استفاده از رشته‌سازهای متفاوت استوانه‌ای، دیسکی و توپی [۱۲].

یک اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین فرایندهای الکتروریسی بدون سوزن به سمت بالا و با سوزن وجود دارد. در الکتروریسی بدون سوزن به سمت بالا، مخروط تیلور روی سطح محلول پلیمر تشکیل می‌شود، مخروط تیلور به همراه سطح جمع کننده در حال چرخش حرکت خواهد کرد و یک جت محلولی در شرایط میدان الکتریکی قوی تولید می‌شود؛ بنابراین، باید یک تداخل (همپوشانی) بین مولکولی قوی بین مولکول‌های پلیمر در محلول به‌منظور تثبیت مخروط تیلور تشکیل شده باشد که مخروط تیلور به سمت جت ظریف‌تر (نازکتر) کشیده شده و روی جمع کننده به‌عنوان الیاف جامد ته‌نشین می‌شود. تفاوت مخروط تیلور تشکیل شده در الکتروریسی با سوزن مرسوم در این است که مخروط تیلور با استفاده از محلول پلیمری به‌صورت مداوم تغذیه و تشکیل می‌شود اما در الکتروریسی بدون سوزن، مخروط تیلور با استفاده از محلول پلیمری که در اطراف رشته‌ساز محاط شده و به سمت بالا کشیده شده، تشکیل می‌شود. مشاهده شده‌است که قطر اصلی مخروط تیلور در الکتروریسی با رشته‌ساز استوانه‌ایی از ۱/۲ ابتدایی در انتها به ۰/۳ میلی‌متر کاهش یافته است (ضخامت فیلم اولیه پلیمری ۱ میلی‌متر). اگر ضخامت اولیه فیلم پلیمری بیشتر کاهش یابد، مخروط تیلور یا نانوالیاف نمی‌توانند تشکیل شوند؛ بنابراین، محلول باید یک خواص رئولوژیکی مناسب داشته باشد. علاوه‌بر این، به دلیل شکل‌گیری مخروط تیلور از نوسانات موجی برای شروع فرایند الکتروریسی بدون سوزن نیاز به یک ولتاژ بالا است [۷ و ۲۱ تا ۲۳].

در فرایند تولید صنعتی نانوالیاف، محلول پلیمری در حوضچه‌ای ریخته می‌شود. در چرخش رشته‌ساز استوانه‌ای، که به یکی از قطب‌های دستگاه مولد ولتاژ بالا وصل شده، در درون حوضچه، لایه‌ای از محلول پلیمر بر سطح رشته‌ساز قرار می‌گیرد. این لایه پلیمری از سطح، تحت تاثیر میدان الکتریکی جت شده و نانوالیاف روی سطح جمع کننده که می‌تواند یک بستر فیلتر باشد، قرار می‌گیرد. در شکل (۱۰) چگونگی تشکیل نانوالیاف در فرایند بدون سوزن، فناوری بدون سوزن نانواسپایدر که توسط شرکت الماركو[۲۱] [۲۴] ارائه شده، نشان داده شده‌است.

شکل (۱۰): دستگاه الکتروریسی بدون سوزن ساخت شرکت الماركو کشور چک [۱۲ و ۲۴].

در کشور ایران نیز با توجه به اهمیت بحث نانو و تحقیقات فراوان در زمینه نانوالیاف و همچنین کاربرد نانوالیاف در تولیدات صنعتی به‌منظور افزایش خواص شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی آنها، نیاز به تولید نانوالیاف در مقیاس صنعتی به نیازی مبرم تبدیل شده‌است و بر همین اساس، شرکت‌های دانش‌بنیان به سمت ساخت دستگاه‌هایی که بتوانند بهره‌وری در این زمینه را افزایش دهند، رفته‌اند. یکی از این شرکت‌ها، شرکت فناوران نانومقیاس است که کشور را در زمینه دستگاه‌های مورد نیاز برای تولید نانوالیاف در مقیاس آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی به‌طور کامل خودکفا کرده است. دستگاه الکتروریسی آزمایشگاهی دو پمپ این شرکت برای تولید نانوالیاف پلیمری/کربنی/ سرامیکی با قطر ۵۰ نانومتر تا چند میکرون است. نمایی از این دستگاه که در شکل (۱۱) آمده است، شامل بدنه فلزی، پمپ سرنگی، سیستم ریسنده، سیستم کالکتور و منبع تامین ولتاژ بالاست. در این دستگاه‌ها دو ماده مختلف می‌توانند به‌طور همزمان الکتروریسی شوند.

علاوه‌بر این، الکتروریسی ماده پلیمری در یک سمت دستگاه و مواد افزودنی مانند داروها در طرف مقابل، امکان تولید نانوالیاف کامپوزیتی حاوی اجزای مورد نظر را فراهم می‌کند. بنابراین، این دستگاه برای کاربردهای دارویی، پزشکی و زیستی مناسب است. در شکل (۱۱) تصویر یک دستگاه صنعتی بدون سوزن ساخت شرکت ایرانی فناوران نانومقیاس نشان داده شده‌است [۲۵].

شکل (۱۱): دستگاه الکتروریسی آزمایشگاهی دو پمپ ساخت شرکت فناوران نانومقیاس [۲۵].

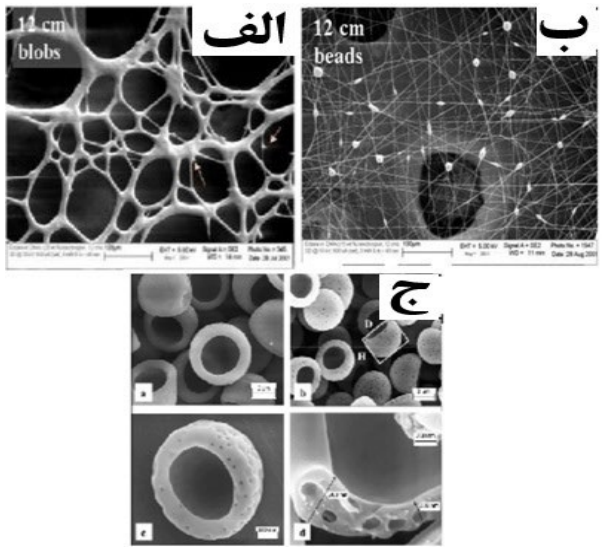
در مقیاس خط تولید صنعتی نانوالیاف شرکت فناوران نانو مقیاس[۲۲]، دو دستگاه با مدل‌های INFL160 و INFL6100 را که قابلیت تولید نانوالیاف پلیمری/ سرامیکی در مقیاس صنعتی برای کاربردهای مختلف را دارد ساخته و به بازار ارائه کرده است. INFL براساس نیاز مصرف کننده دارای (۱) تا (۸) واحد الکتروریسی است. عوامل و شرایط الکتروریسی مانند تنظیمات ریسنده و کالکتور، فاصله الکتروریسی، سرعت خطی بستر مورد استفاده، دما و زمان فعالیت دستگاه در خط تولید صنعتی نانوالیاف، می‌تواند با استفاده از یک سیستم کنترل پیشرفته یکپارچه، کنترل و تنظیم شود. این دستگاه ایمنی بسیار خوبی برای کاربران در ارتباط با منابع تامین ولتاژ بالا و حلال‌های شیمیایی فراهم می‌کند. با استفاده از این دستگاه، نانوالیاف می‌تواند روی بسترهای مختلف در مقیاس صنعتی پوشش داده شود. تصاویر دستگاه‌های ذکر شده در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است [۲۵].

شکل (۱۲): دستگاه‌های الکتروریسی صنعتی شرکت فناوران نانومقیاس [۲۵].

نقایص احتمالی در فرایند الکتروریسی

در طی فرایند الکتروریسی با اعمال تغییر در عوامل فرایندی، احتمال بروز تغییر در مورفولوژی نانوالیاف حاصل شده و شکل‌گیری نواقصی همچون مهره، حباب و نیمکره‌های توخالی وجود دارد. در شکل (۱۳) نواقص موجود در فرایند الکتروریسی نشان داده شده‌است.

عوامل متعددی در شکل‌گیری الیاف مهره مانند موثرند که از کلیدی‌ترین آنها می‌توان به کشش سطحی محلول پلیمری، مقدار دانسیته بار موجود در جریان و خاصیت ویسکوالاستیک به همراه ویسکوزیته محلول اشاره کرد. عوامل دیگری که در شکل‌گیری مهره‌ها تاثیر کمتری دارند عبارتند از: فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز، غلظت محلول پلیمری و وزن مولکولی.



شکل (۱۳): نواقص موجود در فرایند الکتروریسی، (الف): حباب‌ها، (ب): مهره‌ها،(ج): نیم‌کره‌های توخالی [۲۶ و ۲۷].

در فرایند الکتروریسی چنانچه فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز به حد کافی نباشد، محلول پلیمری فرصت کافی را برای خشک شدن کامل پیدا نمی‌کند. دراین حالت، الیاف خیس روی یکدیگر انباشته و در نهایت به هم می‌چسبند و پس از گذشت مدتی، توده بزرگی از الیاف خیس بوجود می‌آید که به آنها حباب می‌گویند. عوامل متعددی بر شکل‌گیری حباب‌ها موثرند؛ به‌عنوان مثال، فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز، غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتریکی و غیره. همچنین شکل‌گیری نیمکره‌های توخالی به میدان الکتریکی، نوع حلال و نوع پلیمر بستگی دارد [۲۸ و ۲۹، ۳۲].

عوامل موثر بر فرایند الکتروریسی بدون نازل

در این فرایند، عوامل متعددی در شکل‌گیری نانوالیاف پلیمری موثرند که از این جمله می‌توان به عوامل محلول، عوامل فرایندی و عوامل محیطی اشاره کرد.

• عوامل محلول

خواص محلول پلیمری بیشترین تاثیر را در فرایند الکتروریسی و مورفولوژی لیف حاصل شده ایجاد می‌کند؛ به‌عنوان مثال، کشش سطحی در شکل‌گیری نواقص مهره مانند در طول لیف تاثیرگذار است. ویسکوزیته محلول پلیمری و خواص الکتریکی آن، تعیین کننده میزان کشش اعمالی بر محلول پلیمری است. در نهایت، همین کشش اعمالی است که بر قطر نهایی تاثیرگذار است. عوامل محلول عبارتند از: غلظت محلول پلیمری، نوع حلال مصرفی، وزن مولکولی پلیمر، ویسکوزیته و کشش سطحی.

فصلنامه
دانش آزمایشگاهی ایران
سال دوازدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۵

• عوامل فرایندی (شرایط فرایندی)

عامل تاثیرگذار دیگر در فرایند الکتروریسی، مجموعه‌ای از چندین عامل خارجی است که بر جت اعمال می‌شود. این عوامل عبارتند از: ولتاژ مصرفی، سرعت چرخش رشته‌ساز، درجه حرارت محلول، نوع جمع کننده و فاصله بین جمع کننده تا رشته‌ساز. اگر چه این عوامل که از اهمیت کمتری نسبت به عوامل محلول برخوردارند اما بر مورفولوژی لیف حاصل شده تاثیر به‌سزایی دارند.

• عوامل محیطی

وجود هر گونه ارتباط بین محیط اطراف و محلول پلیمری بر مورفولوژی لیف حاصل شده تاثیرگذار است؛ به‌عنوان مثال، رطوبت بالا باعث شکل‌گیری سوراخ‌هایی روی سطح الیاف می‌شود. از آنجایی که فرایند الکتروریسی تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرد بنابراین، باید هر گونه تغییری در محیط اطراف نیز بر فرایند موثر باشد. این عوامل عبارتند از: دما، رطوبت، نوع اتمسفر و فشار [۹، ۱۲، ۱۵ ۲۰ و ۲۸ تا ۳۰].

تاثیر عوامل کلیدی بر مورفولوژی نانوالیاف تولید شده به روش الکتروریسی بدون نازل

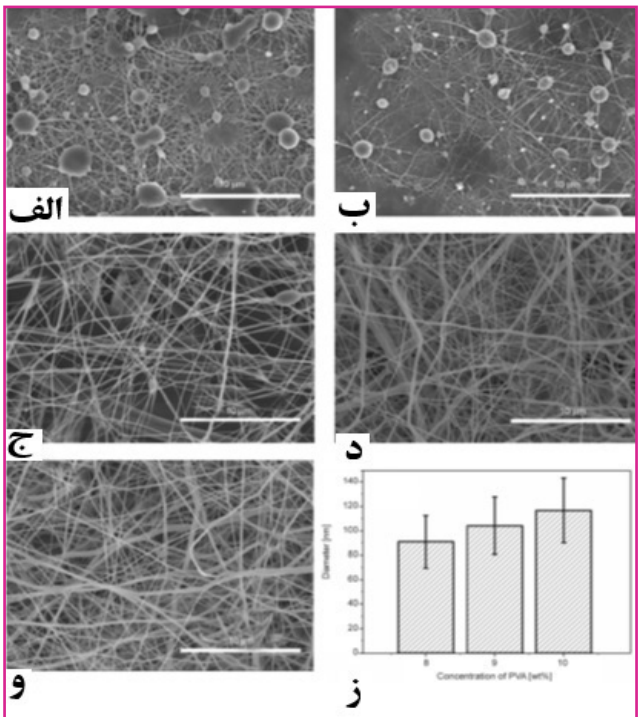
• غلظت محلول

به دلیل غیر نیوتنی بودن سیال‌های پلیمری، جریان کششی از پاره شدن جت ویسکوالاستیک جلوگیری به عمل می‌آورد و در نهایت، منجر به شکل‌گیری چندین جت طویل می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مورفولوژی نانوالیاف به غلظت محلول پلیمری بستگی دارد [۳۰]. با افزایش غلظت، ویسکوزیته محلول پلیمری نیز افزایش می‌یابد. در واقع، غلظت محلول پلیمری، تعیین کننده ویسکوزیته و کشش سطحی قطره شکل گرفته در سر رشته‌ساز است. ویسکوزیته محلول پلیمری نیز بر قطر لیف حاصل شده، شکل قطره و مسیر حرکت جت تاثیرگذار است [۲۶].

همچنین در اثر افزایش غلظت محلول پلیمری، درگیری‌های فیزیکی بین زنجیره پلیمری افزایش و از میزان تحرک زنجیره کاسته می‌شود. در این حالت، در طول فرایند الکتروریسی جت پلیمری کمتر در معرض فرایند کشش قرار می‌گیرد و در نهایت، الیافی با ضخامت و قطر بیشتر را حاصل می‌شود [۲۸ تا ۳۰].

در غلظت‌های پایین‌تر از یک حد بحرانی، نواقص مهره مانند شکل می‌گیرند که بسیار برجسته‌اند، تعداد آنها بسیار زیاد است و کروی شکل هستند. با افزایش غلظت، از میزان مهره‌ها کاسته شده و از حالت کروی به دوکی شکل تبدیل می‌شوند [۲۶].

شکل (۱۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[۲۳] پلی وینیل الکل الکتروریسی شده در غلظت‌های مختلف روی زیرلایه پلی پروپیلن[۲۴] را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهد نمود که مورفولوژی و میانگین ضخامت نانوالیاف ریسیده شده وابسته به غلظت محلول پلیمری است. الیاف منقطع و مقدار زیادی قطره، زمانی که غلظت ۶ درصد وزنی است مشاهده می‌شود؛ در غلظت ۷ درصد می‌توان حضور مهره‌ها را مشاهد نمود. اگرچه الیاف یکنواخت را می‌توان در غلظت‌های بیشتر از ۷ درصد وزنی مشاهده نمود. میانگین ضخامت الیاف با افزایش غلظت پلیمری افزایش می‌یابد که محدوده آن ۹۱ nm در ۸ درصد وزنی تا ۱۱۸ nm برای ۱۰ درصد وزنی است که به دلیل گره خوردگی بیشتر زنجیرها و عدم تحرک در غلظت‌های بالا، الیاف ظریف‌تر در غلظت‌های بالا مشاهده شده‌است [۲۰].



شکل (۱۴): اثر غلظت بر مرفولوژی الیاف پلی وینیل الکل، (الف): ۶ درصد وزنی، (ب): ۷ درصد وزنی، (ج): ۸ درصد وزنی، (د): ۹ درصد وزنی، (و): ۱۰ درصد وزنی، (ز): اثر غلظت پلی وینیل الکل روی قطر الیاف [۲۰].

• تاثیر فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز

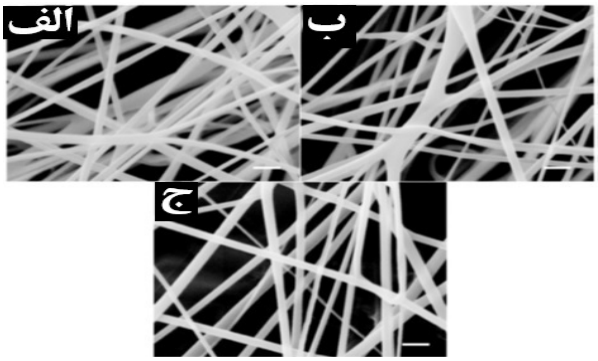
با ایجاد تغییر در فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز، هم مدت زمان پرواز و هم شدت میدان الکتریکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بنابراین، در اثر افزایش فاصله، به دلیل طولانی بودن مدت زمان پرواز متوسط، قطر الیاف کاهش می‌یابد، چرا که در این حالت میزان کشش وارده بر الیاف افزایش پیدا می‌کند. اما در مواردی دیگر، با افزایش فاصله به دلیل کاهش شدت میدان الکترواستاتیک، میزان کشیدگی کمتر و در نتیجه، قطر لیف افزایش می‌یابد. بنابراین، چنانچه فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز بسیار زیاد باشد، به دلیل ضعیف شدن میدان و کاهش شدید در میزان بارها، میزان کشیدگی الیاف به شدت کاهش یافته و در نتیجه آن، هیچ‌گونه لیفی شکل نمی‌گیرد، و اگر این فاصله بسیار کم باشد به دلیل افزایش شدید در شدت میدان الکترواستاتیک، جت ناپایدارتر شده که در اثر آن، میزان مهره‌ها افزایش می‌یابد.

به‌منظور جلوگیری از چسبندگی الیاف باید زمان لازم برای

تبخیر حلال به فرایند داده شود. زمانی که این فاصله کاهش می‌یابد، جت، مسافت کمتری را تا قبل از رسیدن به جمع کننده می‌پیماید. از طرفی دیگر، هم‌زمان با آن، شدت میدان الکتریکی نیز افزایش و متعاقباً، سرعت جت به سمت جمع کننده بیشتر و تندتر می‌شود. بنابراین، الیاف فرصت کافی را به‌منظور تبخیر حلال تا قبل از رسیدن به جمع کننده پیدا نمی‌کند. زمانی که فاصله خیلی کم باشد، حلال اضافی باعث در هم فرو رفتن الیاف و چسبندگی بین آنها می‌شود که در نهایت، منجر به شکل‌گیری الیاف متقاطعی می‌شوند که به حباب معروفند [۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۶].

فاصله جمع کننده را نمی‌توان تا بی‌نهایت (خیلی زیاد) کاهش داد. برای جمع کردن الیاف جامد، فاصله جمع کننده باید به قدری زیاد باشد تا از کفایت تبخیر محلول از جت، قبل از تغییر حالت اطمینان حاصل شود. حداقل فاصله جمع کننده، به مشخصات محلول و تولید کننده الیاف بستگی دارد. البته فاصله جمع کننده نباید خیلی زیاد شود، زیرا اگر خیلی زیاد باشد ولتاژ اعمالی بالاتری را نیز برای شروع الکتروریسی احتیاج دارد که ممکن است منتهی به تخلیه بار الکتریکی شود؛ باید یک توازن مناسب بین ولتاژ اعمالی و فاصله جمع کننده برای انجام الکتروریسی بدون سوزن بالای موفق، برقرار شود [۹ و ۲۶].

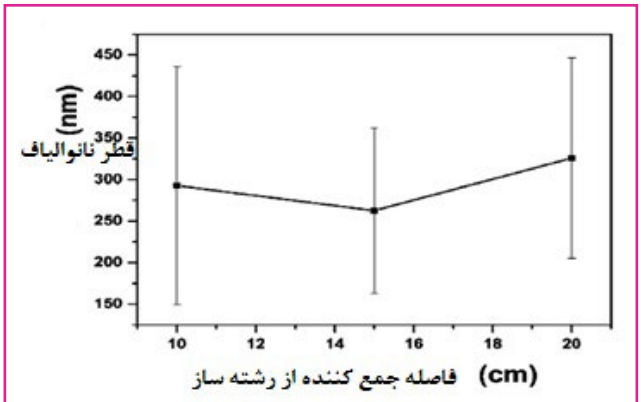
شکل (۱۵) نشان‌دهنده تصاویر SEM نانوالیاف PVA الکتروریسی شده در فاصله متفاوت جمع کننده از رشته‌ساز است. همه الیاف نازک بودند و اختلاف زیادی به جز شکل (۱۵-الف)، مشاهده نشد. هنگامی که فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متر است، به دلیل فاصله زیاد بین رشته‌ساز و جمع کننده حلال به خوبی تبخیر می‌شود؛ در نتیجه، الیاف به خوبی از هم جدا می‌شوند. با این حال در فاصله‌های کم بین جمع کننده و رشته‌ساز الیاف به یکدیگر گیر کرده و ساختار به هم پیوسته الیافی را نشان می‌دهد (شکل (۱۵-ب)).



شکل (۱۵): تصاویر SEM از نانوالیاف الکتروریسی شده محلول PVA ۹ درصد وزنی با فاصله جمع کننده متفاوت با ولتاژ اعمالی KV ۶۰، (الف): cm ۱۰، (ب) cm ۱۵ و (ج) cm ۲۰ [۹].

توزیع قطر در شکل (۱۶) آمده است. بیشترین قطر نانوالیاف برای فاصله ۲۰ سانتی‌متری جمع کننده حدود ۳۰۰ نانومتر است که بیشتر از دیگر فواصل جمع کننده با رشته‌ساز است.

هنگامی که فاصله جمع کننده کمتر از ۱۰ سانتی‌متر باشد، جت‌های پلیمری ناقص کشیده می‌شوند و قطر و توزیع قطر الیاف افزایش می‌یابد. افزایش فاصله جمع کننده می‌تواند اثرات تضعیفی نانوالیاف را بهبود بخشد؛ با این حال با افزایش فاصله جمع کننده، قدرت کششی میدان الکتریکی به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، جت پلیمری در مقایسه با فواصل کمتر مشاهده شده و در محلول‌های انباشته شده بین فاصله سیم و رشته‌ساز، قطرات بزرگ محلول به بیرون کشیده شده و الیاف درشت‌تری تولید می‌شود. بنابراین، الیاف تولید شده در فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متری، درشت‌تر و با توزیع قطر پهن‌تر است [۹و ۳۱].



شکل (۱۶): توزیع قطر نانوالیاف الکتروریسی شده با فاصله جمع کننده متفاوت [۹].

• ولتاژ اعمالی

یکی از عوامل بسیار موثر در فرایند الکتروریسی، اعمال ولتاژ بالا بر محلول پلیمری است. در حقیقت، ولتاژ الکتریکی به اختلاف پتانسیل بین دو نقطه گفته می‌شود. بر طبق مشاهدات صورت گرفته، ولتاژ اعمالی اثرات متفاوتی را بر قطر الیاف ایجاد می‌کند؛ اما به‌طور کلی، در اثر افزایش ولتاژ به تعداد بارها افزوده شده و در نتیجه، نیروی کلمبیک حاصل شده از رانش بارهای همنام افزایش و میدان الکتریکی قوی‌تری ایجاد می‌شود؛ بنابراین، جت در این حالت بیشتر دچار کشیدگی می‌شود و در نتیجه، قطر لیف حاصل شده کاهش می‌یابد. همچنین چنانچه از محلول‌هایی با ویسکوزیته پایین استفاده شود، تعدادی جت‌های ثانویه در طول فرایند بوجود می‌آیند که این خود دلیلی بر کاهش شدید در قطر الیاف است [۵]. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر قطر الیاف حاصل شده، مدت پرواز جت است؛ هرچه زمان پرواز طولانی‌تر باشد به الیاف مدت زمان بیشتری برای کشیده شدن و ازدیاد طول قبل از قرار گرفتن بر صفحه جمع کننده می‌دهد [۱۴].

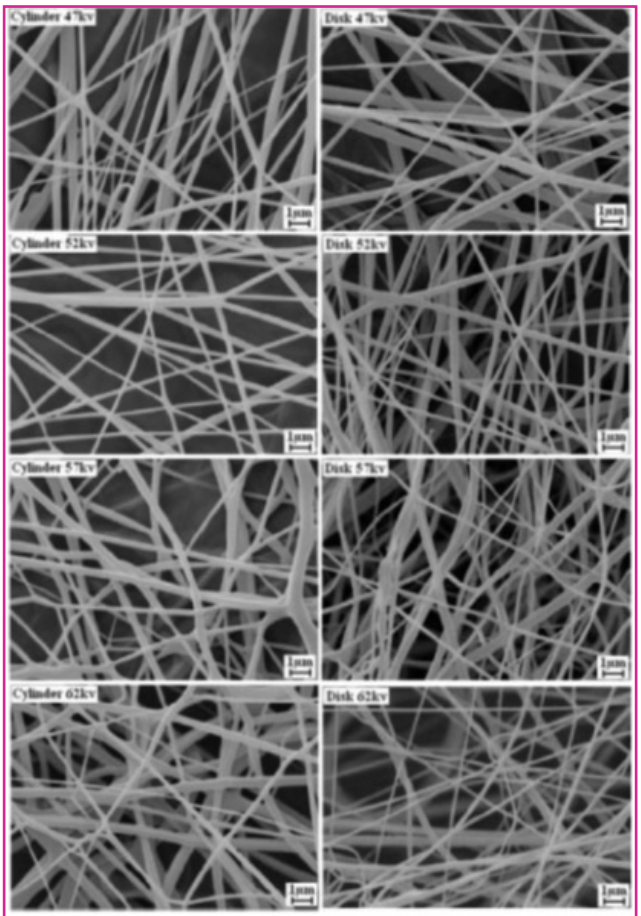
بر طبق مشاهدات گزارش شده، با افزایش بیش از اندازه ولتاژ، دانسیته مهره‌ها افزایش می‌یابد به طوری که این مهره‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و در نتیجه، الیافی را با قطر بزرگتر ایجاد می‌کنند. در ولتاژهای بالا، امکان شکل‌گیری مهره‌ها بیشتر است؛ زیرا در این حالت، بار افزایش می‌یابد و همچنین در اثر افزایش ولتاژ، اندازه مهره‌ها کوچکتر ولی در تعداد بیشتر ظاهر می‌شوند و این مهره‌ها از حالت دوکی

به‌صورت دایره‌ای تغییر شکل پیدا می‌کنند [۷، ۲۱ و ۳۲].

ولتاژ اعمالی عاملی بسیار مهم و موثر بر فرایند الکتروریسی بدون نازل و مشخصات الیاف است. ولتاژ اعمالی بالا (به‌طور معمول بالای ۴۰ KV) به‌منظور آغاز کردن یک الکتروریسی بدون نازل رو به بالا لازم است. ولتاژ مورد نیاز برای شروع الکتروریسی، شدیدا مربوط به مشخصات مواد، محیط (رطوبت، درجه حرارت و غیره) و نیز فاصله رشته‌ساز تا جمع کننده است [۱۲ و ۱۵].

شکل (۱۷)، مورفولوژی نانوالیاف الکتروریسی شده از محلول ۹ درصد وزنی PVA با ولتاژ اعمالی متفاوت از رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی را نشان می‌دهد.در رشته‌ساز دیسکی تمامی الیاف بدون مهره بودند. در نازل دیسکی با ولتاژهای کمتر از KV ۴۲ جتی تشکیل نمی‌شود. همچنین با افزایش مقدار ولتاژ، تعداد جتی که روی رشته‌ساز تشکیل می‌شود، افزایش پیدا می‌کند.

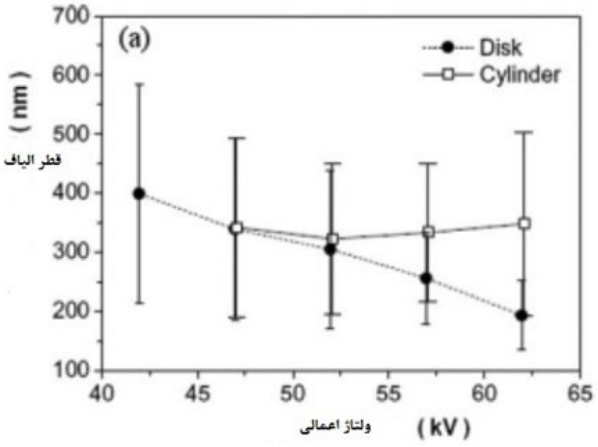
فرایند الکتروریسی با استفاده از رشته‌ساز استوانه‌ایی، وابستگی زیادی به ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد. یک ولتاژ اعمالی بحرانی به‌منظور تولید جت از رشته‌ساز استوانه‌ایی در حدود ۴۷ KV است.



شکل (۱۷): اثر ولتاژ اعمالی بر مورفولوژی نانوالیاف PVA ریسیده شده با رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی با کمک SEM [۹ و ۱۵].

با وجود اعمال ولتاژ بالا، جت‌ها به‌طور عمده در دو منطقه انتهایی (حدود ۲ سانتی‌متر عرضی) از سطح استوانه تشکیل می‌شوند. همچنین مشاهده شده‌است که چند جت هم در دو طرف استوانه تولید شده‌است. هیچ جت/فیلامنتی روی سطح استوانه تا هنگامی که مقدار ولتاژ به ۴۷ KV نرسد، تشکیل نمی‌شود. افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی، منجر به تولید جت از تمام سطح بالای رشته‌ساز استوانه‌ایی می‌شود، اگر چه پوشش‌دهی رشته‌ساز (توسط محلول پلیمری) ناهموار و نامتوازن می‌شود.

مقایسه بین قطر الیاف در میان رشته‌سازهای استوانه‌ایی و دیسکی با ولتاژ اعمالی مختلف در شکل (۱۸) آورده شده‌است که مشخص می‌کند رشته‌ساز دیسکی بهترین عملکرد را داشته است. رشته‌ساز دیسکی نانوالیاف PVA را با قطر کوچک و توزیع قطر باریک تولید می‌کند. نازل استوانه‌ای وابستگی بسیار کم قطر الیاف و همچنین توزیع آنها به ولتاژ اعمالی را نشان می‌دهد [۹، ۱۲ و ۱۵].



شکل (۱۸): اثر ولتاژ اعمالی بر قطر نانوالیاف PVA با رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی [۹ و ۱۵].

• نرخ تغذیه (سرعت چرخش رشته‌ساز)

نرخ تغذیه (دبی) نشان‌دهنده میزان محلول موجود به‌منظور انجام فرایند الکتروریسی است. برای اینکه مخروط تیلور حفظ شود، باید میزان نرخ تغذیه متناسب با ولتاژ تنظیم شود. با افزایش دبی، قطر لیف و یا اندازه مهره‌ها افزایش می‌یابد. چنانچه میزان دبی جریان با سرعت ریسندگی یکسان باشد، متناسب با افزایش نرخ تغذیه به تعداد بارها نیز اضافه می‌شود و به طریق مشابه، میزان کشش وارده به محلول به همان نسبت افزایش یافته و در نتیجه این کشش، قطر لیف کاهش می‌یابد هر چند که میزان دبی افزایش یافته است. به دلیل افزایش حجم محلول خروجی از رشته‌ساز، جت به زمان بیشتری برای خشک شدن نیاز دارد. بنابراین، چنانچه مدت زمان پرواز کوتاه باشد، حلال موجود در لیف حاصل شده فرصت کافی را برای تبخیر شدن پیدا نمی‌کند که در این صورت، حلال‌های باقی مانده باعث چسبیدن الیاف به هم می‌شوند که در اثر این اتصالات بافته‌هایی (تارهایی) شکل می‌گیرند [۲۶ و ۳۲].

در الکتروریسی بدون نازل، سرعت چرخش رشته‌ساز بر میزان محلولی که روی سطح رشته‌ساز قرار می‌گیرد، تاثیرگذار است. در سرعت‌های چرخش پایین، پوشش نامتوازن

محلول مشهود است، بنابراین جت‌ها به‌طور پیوسته نمی‌توانند تشکیل شوند. در سرعت‌های چرخش بالا، سطح رشته‌ساز به‌طور مساوی از یک لایه نازک محلول پلیمری پوشش داده شده‌است در نتیجه، جت‌ها / فیلامنت‌ها به‌طور پیوسته تشکیل می‌شوند. با این حال، افزایش بیش از حد سرعت چرخش به دلیل نیروی گریز از مرکز باعث پرتاب محلول به بیرون می‌شود [۹، ۲۲ و ۳۱].

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد روز افزون نانوالیاف در تولیدات صنعتی برای بهبود خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آنها، استفاده از روش‌های قدیمی و آزمایشگاهی برای تولید نانوالیاف به دلیل پایین بودن بهره‌وری مقرون به صرفه نیست. با تحقیقات انجام گرفته در زمینه رفع مشکلات الکتروریسی در مقیاس آزمایشگاهی، پیشرفت‌های خوبی در این زمینه حاصل شد و روش تولید به سمت روش‌های بدون نازل سوق داده شد. در روش‌های بدون نازل، مشکلات گرفتگی سوزن، سرعت پایین تولید و نواقص ساختاری نانوالیاف به‌طور تقریبی حل شده‌است. هم اکنون در سرتاسر دنیا، بیشتر نانوالیاف به روش صنعتی تولید می‌شوند. درکشور ایران نیز شرکت فناوران نانومقیاس در این زمینه پیش قدم بوده و دستگاه‌هایی را در همین زمینه طراحی، تولید و به بازار ارائه کرده است.

پی‌نوشت

1. Drawing
2. emplate Synthesis
3. Phase Separation
4. Self-Assembly
5. Electrospinning
6. Base Region
7. Taylor Cone
8. Stable Zone
9. Splaying
10. Instable Zon
11. Beads Fiber
12. Collection Region
13. Scanning Electron Microscopy (SEM)
14. Wang
15. Thoppey
16. Yarin
17. Zussman
18. Jriska
19. Niu
20. Polyvinyl alcohol (PVA)
21. Elmarco
22. Fanavaran nano-meghyas (FNM)
23. Scanning Electron Microscopy (SEM)
24. Polypropylene (PP)

مراجع

[1] E. Ranjbari,S. Bazgir,MMA. Shirazi, Polym. Test. 2020, 84, 106403 Needleless electrospinning of poly (acrylic acid) superabsorbent: Fabrication, characterization and swelling behavior.

[2] S Omer, L Forgách, R Zelkó, I Sebe, Pharmaceutics 2021, 13(2), 286, Scale-up of electrospinning: Market overview of products and devices for pharmaceutical and biomedical purposes.

[3] E Tören, A Mazari, preprints.org, Preprints 2024, 2024010272, Needless Electrospun Collagen/Hyaluronic Acid Nanofibers for Skincare Applications: Research.

[4] Wee , TongTeo, Teik, ChengLim, Zuwei, Ma.(2005). An Introduction to Electrospinning and Nanofibers.World Scientific Publishing CO. Pte. Ltd. S Toh. Tuck Link, Singapore 96224.

[5] Jon , Staiger, Nick, Tucker, Mark, Staiger. (2005). Electrospinning .Volume16. Smithers Rapra Technology, Shawbury, Shrewsbury, United Kingdom. Shropshire SY44NR.

[6] Zheng-Ming , Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna.(2003).A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.

[7] Anthony , L.Andrady.(2008).Science and Technology of Polymer Nanofibers. Hoboken, New Jersey. Published by John Wiley & Sons, Inc.2007027362.

[8] Monkika , Ragput.(2012). Optimization of Electrospinning Parameters to Fabricate Aligned Nanofibers for

Neural Tissue Engineering. Master of Technology In Biotechnology & Medical Engineering.

[9] Tong , Lin, Xungai, Wang. (2013). Needleless Electrospinning of Nanofibers. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300. Version Data: 20131021.

[10] P. Gupta, G. Wilkes, R. Davis, Th. Ward, T. long, Erd. Kiran.(2004). Processing-structure-property studies. Virginia polytechnic Institute and state University.

[11] M. Sazegar, S. Bazgir, AA. Katbab, Preparation and characterization of water-absorbing gas-assisted electrospun nanofibers based on poly (vinyl alcohol)/chitosan Materials Today Communications, Volume 25, December 2020, 101489.

[12] Tong, Lin.(2011). Nanofibers - Production, Properties and Functional Applications. No.65, Yan An Road (West), Shanghai, 200040, China. Publisher InTech.ch 1-2.

[13] Yong, Liu, Ji-Huan, He, Jian-Yong, YU.(2008).Bubble- Electrospinning A Novel Method for Making Nanofibers. Journal of Physics, Conference Series 96,012001.

[14] Feng-Lei, Zhou, Rong-Hua, Gong, Isaac Porat.(2009). Needle and Needleless Electrospinning for Nanofibers. Journal of Applied Polymer Science,Vol. 115, 2591–2598 .

[15] Haitao, Niu, Tong, Lin, Xungai Wang.(2009). Needleless Electrospinning. I. A Comparison of Cylinder and Disk Nozzles. Journal ofAppliedPolymer Science,Vol. 114, 3524–3530.

[16] Xin, Wang, Haitao, Niu, Tong, Lin, Xungai, Wang.(2009). Needleless Electrospinning of Nanofibers With a Conical Wire Coil. Published online in Wiley InterScience, Society of Plastics Engineers, DOI 10.1002/pen.21377.

[17] Zheng-Ming, Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna.(2003).A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.

[18] Eva, Kostakova, Laszlo, Meszaros, Jan Gregr.(2009). Composite nanofibers produced by modified needleless electrospinning. Journal of Materials Letters 63 2419–2422.

[19] P.Pokorny, E.Kostakakova, F.Sanetrnik.(2014).Effective AC needleless and collectorless Electrospinning for yaran production. Phys. Chem. Chem. Phys., 2014, 16, 26816-26822.

[20] Feng-Lei, Zhou, Rong-Hua, Gong, Isaac Porat.(2009). Needle and Needleless Electrospinning for Nanofibers. Journal of Applied Polymer Science,Vol. 115, 2591–2598 .

[21] Haitao, Niu, Xungai, Wang and Tong, Lin.(2011). Needleless electrospinning: influences of fibre generator geometry. The Journal of The Textile Institute, Vol. 103, No. 7, July 2012, 787–794.

[22] Xin, Wang, Tong, Lin, Xungai, Wang.(2013). Scaling up the Production Rate of Nanofibers by Needleless Electrospinning from Multiple Ring. Fibers and Polymers 2014, Vol.15, No.5, 961-965.

[23] Wanjun, Liu1, Haifeng, Zhang1, Dawei, Li1, Chen, Huang, Xiangyu, Jin.(2013). Study on needle and needleless electrospinning for nanofibers. Advanced Materials Research Vols. 750-752 (2013) pp 276-279.

[24] http://www.elmarco.com, (Accessed in September and October 2012).

[25] http://www.fnm.ir/. Needleless Electrospinning.

[26] Zheng-Ming, Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna.(2003).A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.

[27] P. Gupta, G. Wilkes, R. Davis, Th. Ward, T. long, Erd. Kiran.(2004). Processing-structure-property studies. Virginia polytechnic Institute and state University.

[28] O. S. Yo¨rdem, M. Papila, Y. Z. Mencelog˘lu.(2008). Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology, Materials and Design. 29, 34–44.

[29] A. Baji, Y.-W. Mai, Sh.-Ch. Wong, M. Abtahi, P. Chen.(2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. Composites Science and Technology, 70, 703-718.

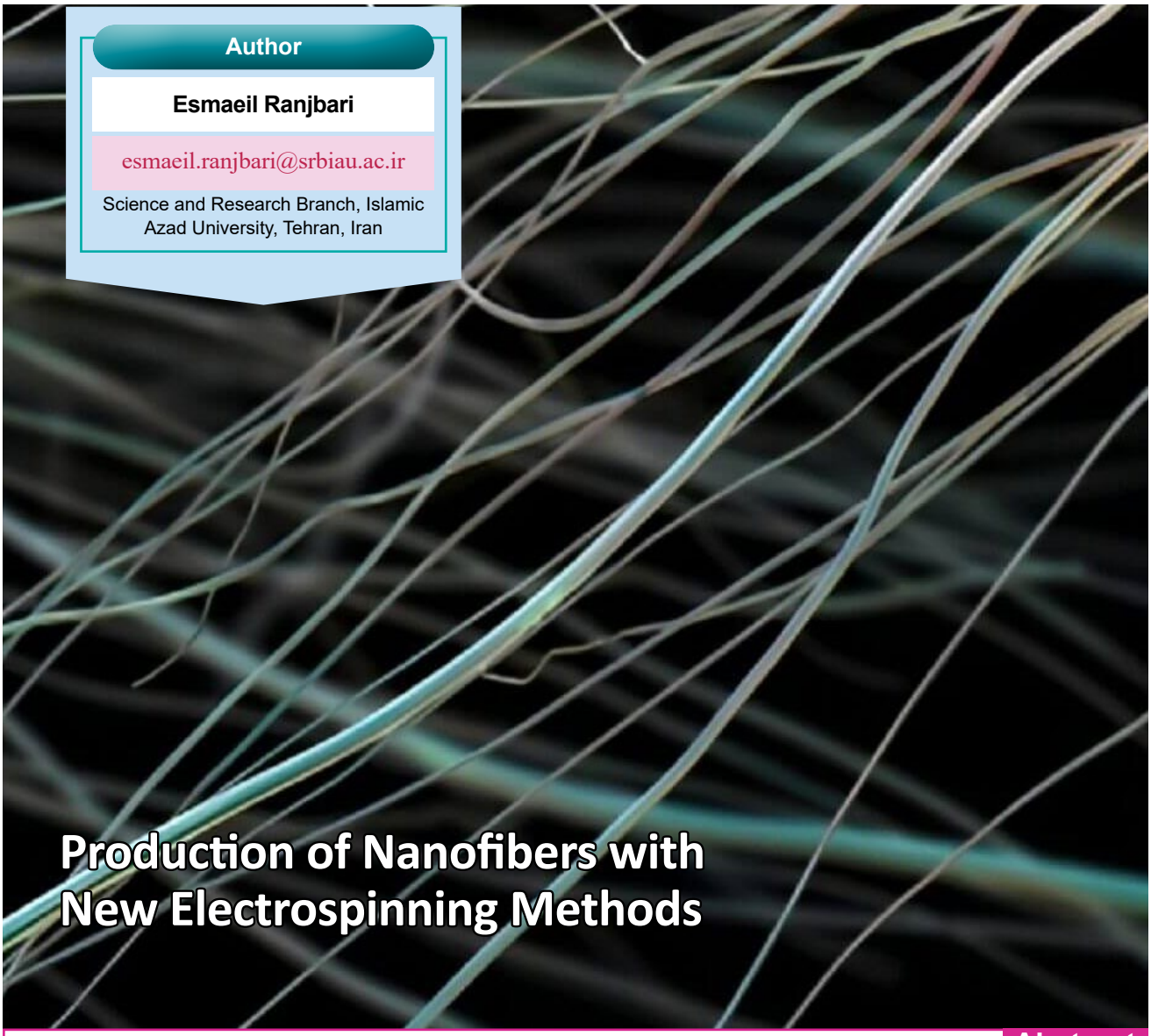
[30] Sh. Zhang, W. S. Shim, J. Kim.(2009). Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. Materials and Design. 30, 3659-3666.

[31] Guojun, Jiang, Sai, Zhang, Xiaohong Qin.(2013). High throughput of quality nanofibers via on stepped pyramid- shaped spinneret. Journal of Materials Letters. 106 (2013)56–58.

[32] Shamim.Zargham, Saeed.Bazgir, Amir.Tavakoli.(2012).The Effect of Flow Rate on Morpholgy and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber.Journal of Engineered Fibers and Fabrics.Volume 7, Issue 4.

No.45 ■ Spring 2024 ■ Issue 1 ■ Volume 12
Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Author
Esmaeil Ranjbari
esmaeil.ranjbari@srbiau.ac.ir
Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran



Production of Nanofibers with New Electrospinning Methods

Abstract

Many approaches have been proposed in the literature to increase productivity and eliminate structural defects of nanofibers. They have focused more on increasing the number of jets through needle modification, using multiple needles, and needleless electrospinning, each of which has advantages and disadvantages. It is true that needleless electrospinning has solved the problem of needle clogging and low production speed; But the problem of rapid evaporation of volatile solvents, which leads to a decrease in accuracy and lack of reproducibility in the manufacturing process, has not yet been completely solved. Today, the production of nanofibers has become very important due to their many applications in various fields in the world. Although the production of nanofibers in the laboratory is easy, but when it comes to production on an industrial scale, it seems a bit difficult due to the difficult conditions of controlling environmental and machine factors that have a direct effect on the structure and properties of nanofibers.

Keywords

Nanofibers; Needleless Electrospinning; Affecting Parameters.

Iran Nanotechnology Laboratory Network

Iranian Journal of laboratory Knowledge

ISSN 2538-3450

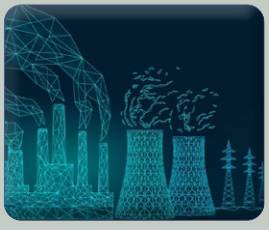
Volume 12 ▪ Issue 1 ▪ Spring 2024 ▪ No.45

Production of Nanofibers with New Electrospinning Methods

Gemological and paleontological value of amber and laboratory methods of its detection

Raman hyperspectral imaging and the implementation of machine learning algorithms: an innovative approach for molecular mapping of materials

Checking the normality of distribution of test results using minitab software



Optimization of gas-fired units using teaching-learning meta-heuristic algorithm

Study on gluten amounts of foodstuffs by ELISA method

www.IJLK.ir
info@ijlk.ir