

Controlling the Orientation of Electrospun Nanofibers by Conductive-Insulating Hybrid Collectors

Mohammad Hossein Ghanian, Jalal Barzin*, Mojgan Zandi, Morteza Ehsani, Mohammad Kazemi-Ashtiani

Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 7 October 2013, Accepted: 2 June 2014

Abstract

Fiber orientation is one of the important morphological characteristics of electrospun mats. Electric field between the nozzle and collector which is extremely influenced by electrical conductivity of the collector can be controlled to tailor the orientation of electrospun fibers. We have presented the conductive-insulating collectors as novel means to localize conductive area on the collector surface and subsequently reorganize the electric field. It is demonstrated that the electrospun nanofibers deposit with specific geometries on the hybrid collectors compared to the conventional conductive collectors. In addition, insulating area with different geometries results in different fiber orientations. The square geometry leads to wavy nanofibers with preferentially unidirectional alignment whereas straight nanofibers with completely random orientation are obtained by a collector of circular geometry. These observed morphological changes may be attributed to probable changes in the electrical field. It is also shown that the gap size between the insulating area and the conducting surface influences the fiber orientation in determining bigger gap, lower fiber density and more aligned orientation. Furthermore, the nanofibers deposited on the non-contacting insulating area show no wavy morphology. Our simple strategy can be used for precise tailoring of fiber orientation of the electrospun scaffolds in a desired tissue.

Key Words

electrospinning,
nanofibers,
fiber orientation,
collector,
insulator

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: j.barzin@ippi.ac.ir

کنترل آرایش نانوالیاف الکتروریسی شده با استفاده از جمع‌کننده‌های ترکیبی رسانا-عایق

محمدحسین قانیا، جلال برزین*، مژگان زندی، مرتضی احسانی، محمد کاظمی آشتیانی
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۲/۷/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۱۲

آرایش الیاف از جمله ویژگی‌های هندسی مهم در نمدهای الکتروریسی شده است که با تنظیم میدان الکتریکی قابل کنترل است. در این پژوهش، استفاده از جمع‌کننده‌های فلز-شیشه به عنوان روشی نوین برای تغییر موضعی رسانندگی الکتریکی در محل جمع‌کننده و به تبع آن تغییر میدان الکتریکی معرفی شده است. بررسی آرایش الیاف الکتروریسی شده روی قسمت شیشه‌ای (عایق) با دو هندسه مربع و دایره روی سطح جمع‌کننده فلزی (رسانا) صفحه‌ای نشان داد، هندسه بخش عایق، اثر قابل توجهی روی آرایش الیاف دارد. به طوری که در حالت مربع، الیاف با جهت‌گیری ترجیحی به یک سمت و انحناى موجی شکل به دست آمدند. در حالی که در هندسه دایره‌ای، الیاف جهت‌گیری خاصی نداشته و کاملاً مستقیم و بدون انحنا بودند. همچنین، بررسی آرایش الیاف در نقاط مختلف از ورق شیشه‌ای متصل شده به جمع‌کننده استوانه‌ای نشان داد، هر چه فاصله ورق از سطح فلزی بیشتر باشد، چگالی الیاف کمتر و جهت‌گیری آنها به یک سمت خاص بیشتر است، ضمن آن که الیاف در قسمت‌هایی از ورق که تماس مستقیم با سطح فلزی ندارد، انحنا و پیچ خوردگی خود را از دست می‌دهند. روش ارائه شده می‌تواند راهکاری برای تنظیم آرایش الیاف در داربست‌های الکتروریسی شده، مطابق با هندسه بافت مورد نظر باشد.

بسیار ش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال چهارم، شماره ۲،

صفحه ۵۸-۵۱، ۱۳۹۳

ISSN: 2252-0449

چکیده



محمدحسین قانیا



جلال برزین



مژگان زندی



مرتضی احسانی



محمد کاظمی آشتیانی

واژگان کلیدی

الکتروریسی،
نانوالیاف،
آرایش الیاف،
جمع‌کننده،
عایق

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

j.barzin@ippi.ac.ir

استوانه‌ای چسبانده شدند و اثر هندسه ورق عایق (مربع و دایره) و فاصله ورق عایق مربع‌شکل از سطح جمع‌کننده بر آرایش الیاف مطالعه شد.

تجربی

مواد

پلیمر مورد استفاده در این پژوهش، پلی‌کاپرولاکتون (PCL) با وزن مولکولی ۹۰-۷۰ کیلو دالتون است که به شکل گرانول از شرکت سیگما-آلدریچ آمریکا تهیه شده است. کلروفورم و متانول از شرکت مرک آلمان تهیه شده و بدون تغییر استفاده شدند.

روش‌ها و دستگاه‌ها

الکتروریسی با دستگاه مدل CO881007NYI (ساخت شرکت نانوساختار آسیا، ایران) انجام شد. بدین ترتیب که محلول ۱۲٪(w/v) پلی‌کاپرولاکتون در کلروفورم:متانول (۱:۳) در یک سرنگ ۱۰ mL ریخته شده و محتویات سرنگ به نوک سوزن تزریق ۲۱G که نوک آن قبلاً صاف شده است، پمپ می‌شود. سوزن از راه یک الکتروود فلزی به منبع تأمین ولتاژ متصل می‌شود. با اعمال ولتاژ زیاد مثبت، یک میدان الکتریکی میان نوک سوزن و سطح جمع‌کننده فلزی متصل به زمین برقرار می‌شود که در حالت غلبه نیروهای کولمب ناشی از بارهای هم‌نام تشکیل شده روی سطح قطره محلول پلیمری بر نیروی کشش سطحی قطره، یک جریان شتابدار (جت) از محلول پلیمری تشکیل شده و به سمت جمع‌کننده پرتاب می‌شود. با عبور جت از هوا، حلال تبخیر شده و الیاف خشک به سطح جمع‌کننده می‌رسند و جمع‌آوری می‌شوند. پس از بررسی شرایط دستگاهی مختلف، شرایط بهینه برای تولید الیاف بدون عیوب مهره به دست آمد (جدول ۱).

به منظور بررسی اثر عایق کردن ناحیه کوچکی از جمع‌کننده با هندسه‌های مختلف در شرایط کاملاً یکسان، دو ورق شیشه‌ای مربع و دایره‌شکل (با ضخامت $170 \mu\text{m}$ و به قطر یا ضلع ۲ mm) روی

آرایش الیاف یکی از ویژگی‌های هندسی مهم نانوالیاف الکتروریسی شده است که می‌تواند شامل جهت‌گیری کلی الیاف یا پیچ خوردگی‌ها و انحنای در طول الیاف باشد. کنترل آرایش الیاف معمولاً از راه تنظیم میدان الکتریکی در فاصله بین سوزن و جمع‌کننده یا در محل جمع‌کننده انجام می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به استفاده از حلقه‌های هدایت‌کننده حول مسیر حرکت جت محلول [۱] و اعمال میدان الکتریکی کمکی در فاصله میان سوزن و جمع‌کننده [۲] یا طراحی جمع‌کننده‌های رسانا (فلزی) با اشکال و آرایش‌های مختلف [۳،۴] اشاره کرد. نوع خاصی از جمع‌کننده‌ها که می‌توان آنها را جمع‌کننده‌های رسانا-عایق نام‌گذاری کرد، به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که با ایجاد فضای خالی در میان آرایش‌های فلزی، میدان الکتریکی اعمال شده به جت را در محل جمع‌کننده تغییر می‌دهند و باعث ایجاد آرایش‌های مختلفی از الیاف می‌شوند. از جمله این جمع‌کننده‌ها می‌توان به جمع‌کننده‌های توری‌شکل [۵]، جمع‌کننده‌های استوانه‌ای سیمی [۶] و جمع‌کننده‌های جفت الکتروود موازی [۷] اشاره کرد. نخستین بار Dan Li و همکاران استفاده از جمع‌کننده‌های الکتروودهای موازی را به منظور جهت‌دادن به آرایش الیاف به شکل موازی تک‌جهتی یا ضرب‌دوری با زوایای کنترل شده نسبت به یکدیگر گزارش کردند [۷]. این گروه با طراحی جمع‌کننده به شکل دو صفحه فلزی مستطیل‌شکل که موازی با یکدیگر قرار گرفته و فضای میانی آنها را هوا به عنوان یک ماده عایق پر می‌کند، به سادگی میدان الکتریکی را در محل جمع‌کننده به گونه‌ای تغییر دادند که الیاف با آرایش کاملاً موازی و تک‌جهتی فضای میان دو جمع‌کننده را پر کردند. جالب آن است که آرایش الیاف نشسته شده روی قسمت فلزی، کاملاً تصادفی و پیچ‌خورده بود.

در این پژوهش، با الهام از جمع‌کننده‌های جفت الکتروود موازی، جمع‌کننده‌های ساده رایج در الکتروریسی به روشی ساده و کم‌هزینه تغییر داده شدند. به این منظور، ورق‌های شیشه‌ای نازک که می‌توانند به عنوان عایق موضعی جریان الکتریسیته عمل کنند، روی قسمت کوچکی از سطح جمع‌کننده‌های صفحه‌ای و

جدول ۱- شرایط دستگاهی بهینه برای تولید الیاف یکنواخت و بدون عیوب مهره.

ولتاژ (kV)	فاصله (cm)	سرعت جریان (mL/h)	سرعت دوران جمع‌کننده استوانه‌ای (rpm)
۱۴	۱۷	۱	۲۵۰

سطح جمع کننده فلزی جسیبانه شدند.

آزمون

شکل‌شناسی الیاف با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل VEGA ساخت شرکت TESCAN کشور چک با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ kV بررسی شد. دستگاه پوشش‌دهی طلا Sputter Coating مدل K450X ساخت شرکت EMATCH کشور انگلستان به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شد. با انجام فرایند پوشش‌دهی به مدت ۲ min، لایه‌ای از طلا به ضخامت حدود ۱۵ nm روی سطح نمونه تشکیل می‌شود.

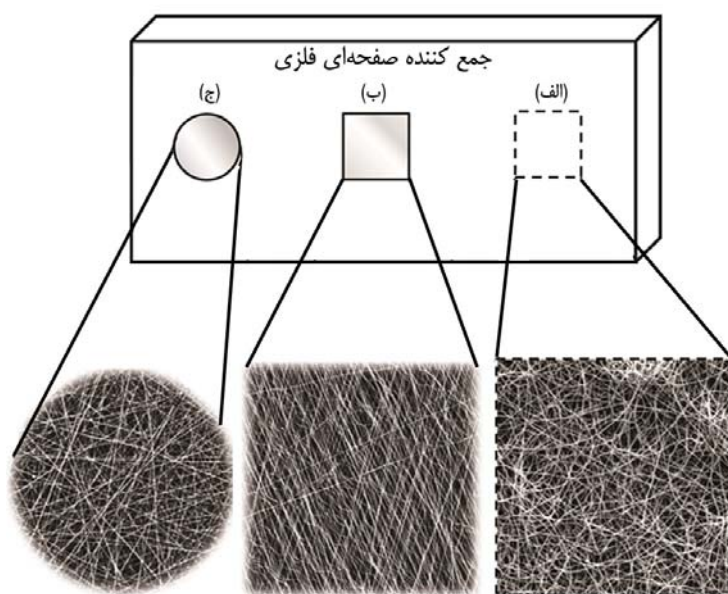
نتایج و بحث

اثر هندسه ناحیه عایق بر آرایش الیاف

با الکتروریسی محلول ۱۲٪ پلی‌کاپرولاکتون در کلروفورم:متانول (۱:۳) در شرایط دستگاهی مناسب، الیاف کاملاً بدون مهره روی جمع کننده صفحه‌ای جمع‌آوری شدند. شکل ۱ آرایش الیاف حاصل از الکتروریسی روی نقاط مختلف از جمع کننده صفحه‌ای را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود، الیاف روی قسمتی از جمع کننده که کاملاً رساناست و با شیشه پوشانده نشده

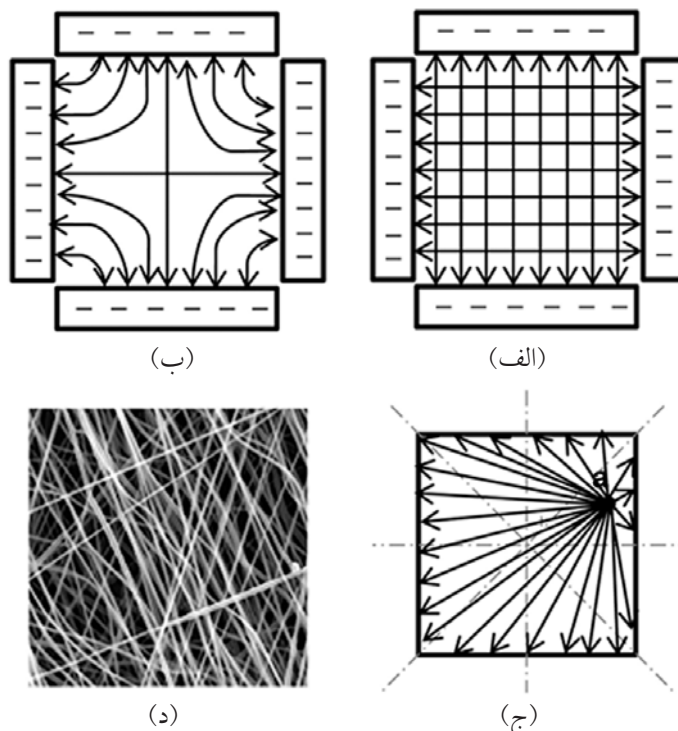
است، آرایش تصادفی همراه با پیچ خوردگی زیاد به خود گرفته‌اند. این آرایش تصادفی و پیچ‌خوردگی در مسیر الیاف را به وقوع ناپایداری خمشی و حرکت شلاقی در طول مسیر جت محلول نسبت می‌دهند. این مسئله باعث می‌شود تا جت تحت تأثیر میدان الکتریکی در فاصله سوزن تا جمع کننده به یک خط مستقیم سیر نکرده، بلکه یک حرکت مارپیچی تصادفی و بی‌نظم داشته باشد. آرایش و پیچ خوردگی در طول الیاف را می‌توان با تغییر میدان الکتریکی در سطح جمع کننده و نیز ایجاد اختلال در تخلیه بار الکتریکی تجمع یافته روی سطح الیاف در محل جمع کننده تغییر داد [۸]. راهکاری که در این پژوهش ارائه شده است، پوشاندن سطح کوچکی، حدود 4 cm^2 ، از جمع کننده فلزی با ورق نازکی از شیشه است. بدین ترتیب، با نزدیک شدن لیف الکتروریسی شده باردار به سطح جمع کننده، بار الکتریکی مخالف بار سطح الیاف به فلز اطراف ورق شیشه‌ای القا می‌شود. در واقع فلز اطراف در این حالت، نقش الکترودهای موازی در مطالعه Dan Li و همکاران را بازی می‌کند و با اعمال نیرو در جهت عمود بر مرز ورق، الیاف را به سمت خود می‌کشد [۷]. از سوی دیگر، شیشه عایق بوده و تا حد زیادی از تخلیه بار قسمتی از الیاف که روی شیشه جمع می‌شوند، جلوگیری می‌کند. بنابراین، تجمع بارهای همنام روی سطح الیاف باعث دافعه الیاف از یکدیگر شده و به کاهش پیچ‌خوردگی‌ها و موازی شدن الیاف برای کاهش سطح انرژی و پایداری بیشتر کمک می‌کند. مجموع این دو نیروی الکتروستاتیکی، یعنی جاذبه ناشی



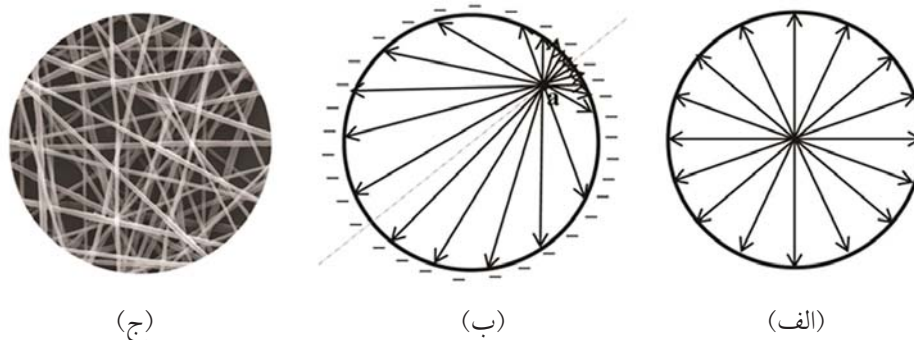
شکل ۱- آرایش الیاف الکتروریسی شده پلی‌کاپرولاکتون در شرایط مختلف از جمع کننده: (الف) صفحه فلزی، (ب) ورق شیشه‌ای مربع روی صفحه فلزی و (ج) ورق شیشه‌ای دایره روی صفحه فلزی (بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر).

حال اگر جمع کننده حاصل از قرارگرفتن ورق مربع روی صفحه فلزی معادل با چهار الکتروود فلزی در نظر گرفته شود که به طور همزمان به زمین وصل هستند، توزیع میدان به شکل ۲-ب خواهد بود. در چنین حالتی، اگر یک نقطه فرضی از لیف (یک بار مثبت) در نظر گرفته شود (نقطه a)، دو حالت ممکن است رخ دهد (شکل ۲-ج). اگر a روی یکی از محورهای تقارن (قطرهای مربع) قرار گیرد، نیروی جاذبه یکسانی از دو سمت خط تقارن به آن اعمال می شود. بنابراین، در آن نقطه پیچ خوردگی لیف وجود نخواهد داشت. اما با توجه به آن که نقطه a به کدام ضلع مربع نزدیکتر است، جهت گیری لیف به سمت آن ضلع متمایل خواهد بود. مسلماً احتمال آن که نقطه a روی محورهای تقارن واقع نشود، بسیار بیشتر است. در چنین حالتی، نیروهای جاذبه وارد بر نقطه a یکدیگر را خنثی نمی کنند (شکل ۲-د). از این رو در اثر رقابت میان نیروها، یک پیچ خوردگی و انحنای جزئی در طول لیف حاصل می شود که البته در مقایسه با حالت رایج که الیاف روی یک سطح فلزی جمع آوری می شوند، بسیار کمتر است. اگر ورق عایق به شکل دایره باشد، خطوط میدان حاصل از

از بارهای ناهمنام القا شده در ناحیه فلزی حول مرز ورق و دافعه بارهای همنام روی سطح الیاف، باعث کاهش پیچ خوردگی ها و تغییر در جهت گیری الیاف می شود [۹]. اما همان طور که در شکل های ۱-ب و ج مشاهده می شود، تغییر جهت گیری و پیچ خوردگی الیاف با استفاده از ورق مربع و دایره ای شکل کاملاً متفاوت است. به طوری که در مربع، الیاف دارای انحنای ملایم متناوب هستند و به یک سمت جهت گیری ترجیحی دارند (شکل ۱-ب)، در حالی که در دایره، الیاف کاملاً مستقیم و بدون انحنای هستند و به هیچ سمت مشخصی جهت گیری نداشته، به طور تصادفی در تمام جهات آرایش یافته اند (شکل ۱-ج). علت این تفاوت را باید در توزیع میدان الکتریکی در هر یک از این دو هندسه جست و جو کرد. چهار الکتروود فلزی را مطابق شکل ۲-الف در نظر بگیرید که فضای میان آنها به علت وجود هوا عایق است. با قطع و وصل کردن متناوب هر جفت الکتروود موازی به زمین، در هر لحظه فقط دو الکتروود موازی رسانای جریان خواهند بود. بنابراین، در مجموع خطوط میدان (نیرو در واحد بار) به شکل ۲-الف خواهد بود و الیاف با آرایش ضربدری (عمود بر هم) به دست می آیند [۱۰].



شکل ۲- توزیع میدان الکتریکی در حالات مختلف از جمع کننده رسانا-عایق، چهار الکتروود فلزی موازی با اتصال: (الف) متناوب هر جفت الکتروود موازی به زمین، (ب) همزمان هر چهار الکتروود به زمین، (ج) نقطه ای از یک مربع شیشه ای روی صفحه فلزی در محلی غیر از قطرهای مربع و (د) الیاف در هر قسمت از شیشه، به سمت اضلاع نزدیکتر جهت گیری کرده و تحت تأثیر رقابت نیروهای جاذبه نامتقارن، حالت موجی شکل به خود می گیرند (بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر).



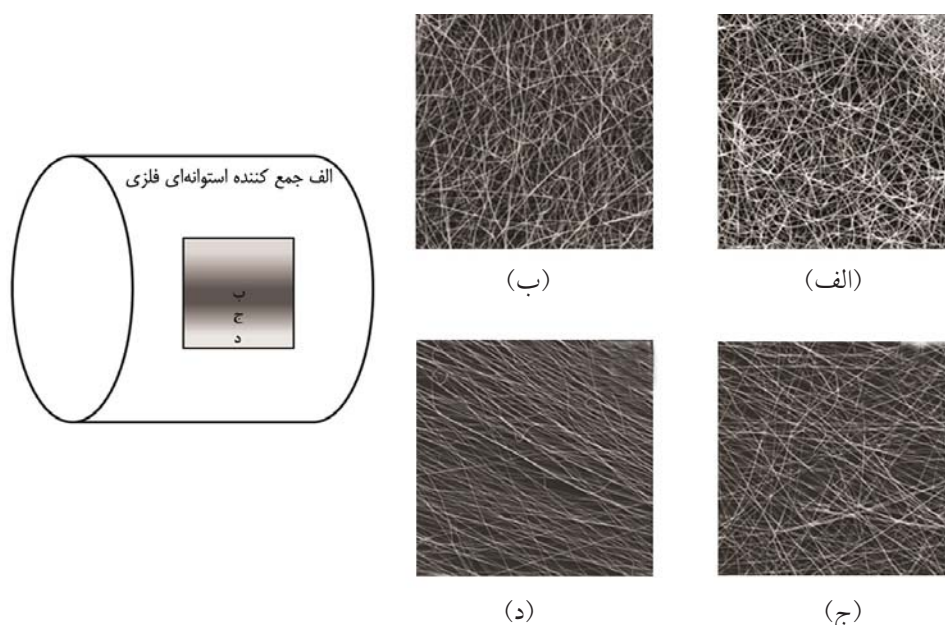
شکل ۳- تفسیر شکل گیری آرایش نانوالیاف: (الف) توزیع میدان الکتریکی، (ب) نیروهای جاذبه وارد بر نقطه فرضی a و (ج) نانوالیاف الکتروریسی شده پلی کاپرولاکتون روی ورق عایق دایره شکل (بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر).

می‌توانند با توجه به مکان نقطه a لیف را به سمت خود بکشند. بنابراین، هیچ‌گونه ترجیحی در جهت‌گیری الیاف به یک سمت خاص مشاهده نمی‌شود و الیاف به طور تصادفی در تمام جهات آرایش یافته‌اند (شکل ۳-ج).

اثر فاصله صفحه عایق از سطح فلز بر آرایش الیاف

اگر ورق شیشه‌ای مربع روی سطح یک جمع‌کننده استوانه‌ای کوچک (قطر ۴/۵ cm) چسبانده شود، تنها مرکز ورق در تماس مستقیم با سطح فلز خواهد بود. هر چه به سمت ضلع ورق در جهت مماس بر استوانه پیش برویم، فاصله ورق از سطح فلز

جاذبه بارهای منفی القا شده در مرز فلزی به شکل ۳-الف خواهد بود. تفاوت اساسی دایره با مربع در تقارن آن است، چرا که دایره بی‌نهایت قطر (محور تقارن) دارد. به عبارت دیگر، هر نقطه a از دایره را که در نظر گرفته شود، حتماً روی محور تقارن واقع شده است. بنابراین، نیروهای جاذبه‌ای که از دو سمت محور تقارن به a وارد می‌شوند، کاملاً یکسان بوده و یکدیگر را خنثی می‌کنند (شکل ۳-ب). از این رو، هیچ‌گونه پیچ خوردگی و انحنایی در طول الیاف ایجاد نمی‌شود (شکل ۳-ج). از سوی دیگر، با رسم مماس‌های دایره مشخص می‌شود، برخلاف دو الکتروود فلزی موازی، در این هندسه بی‌نهایت جفت الکتروود فلزی موازی وجود دارد که



شکل ۴- آرایش الیاف الکتروریسی شده پلی کاپرولاکتون در نقاط مختلف از جمع‌کننده رسانا- عایق: (الف) روی استوانه فلزی، (ب) در مرکز ورق عایق، (ج) در فاصله نیم سانتی از مرکز ورق عایق و (د) در نزدیکی لبه ورق عایق (بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر).

در نزدیکی لبه ورق است. اما الیاف، افزون بر آن که کاملاً مستقیم و بدون انحنا هستند، به سمت لبه ورق در یک جهت آرایش یافته‌اند این موضوع می‌تواند ناشی از اثر همزمان گردش مکانیکی جمع‌کننده و توزیع خاص میدان در نزدیکی لبه باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی نوین برای کنترل آرایش الیاف الکتروریسی شده توسط جمع‌کننده‌های ترکیبی فلز-شیشه ارائه شد. مشخص شد، وجود یک ناحیه عایق (شیشه نازک) در قسمتی از یک جمع‌کننده رسانا (فلز)، توزیع نیروهای الکتریکی وارد بر الیاف باردار را تغییر داده و به طور قابل توجهی آرایش الیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد، هندسه ورق شیشه‌ای روی یک صفحه فلزی می‌تواند در آرایش الیاف مؤثر باشد. به طوری که درحالتی که صفحه عایق دایره‌ای است، الیاف مستقیماً در جهات مختلف آرایش می‌یابند. هنگام به کارگیری صفحه عایق مربعی، اگر الیاف روی قطره‌های مربع باشند، روی قطره‌های مربع آرایش یافته و صاف می‌شوند. چنانچه الیاف خارج از قطر باشند، به سمت یکی از اضلاع کشیده و انحنا دار می‌شوند. افزون بر این، بررسی نقاط مختلف از یک ورق شیشه‌ای مربع روی سطح استوانه فلزی نشان داد، هر چه فاصله ورق از سطح فلز بیشتر باشد، چگالی و پیچ خوردگی الیاف کمتر است. همچنین، در نزدیکی لبه ورق شیشه‌ای منفصل از فلز، الیاف آرایش تک‌جهتی دارند.

مراجع

1. Deitzel J.M., Kleinmeyer J., Hirvonen J.K., and Beck T.N.C., Controlled Deposition of Electrospun Poly(ethylene oxide) Fibers, *Polymer*, **42**, 8163-8170, 2001.
2. Arras M.M.L., Grasl C., Bergmeister H., and Schima H., Electrospinning of Aligned Fibers with Adjustable Orientation Using Auxiliary Electrodes, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **13**, 8-16, 2012.
3. Theron A., Zussman E., and Yarin A.L., Electrostatic Field-assisted Alignment of Electrom Spun Nanofibres, *Nanotechnology*, **12**, 384-390, 2001.
4. Sahay R., Thavasi V., and Ramakrishna S., Design Modifications in Electrospinning Setup for Advanced Applications, *J. Nanomaterials*, 317673ID, 2011.
5. Vaquette C., and Cooper-White J.J., Increasing Electrospun Scaffold Pore Size with Tailored Collectors for Improved Cell Penetration, *Acta Biomater.*, **7**, 2544-2557, 2011.
6. Yuan Y., Zhao Y., Li H., Li Y., Gao X., Zheng C., and Zhang J., Electrospun Metal Oxide-TiO₂ Nanofibers for Elemental Mercury Removal from Flue Gas, *J. Hazard. Material.*, **227**, 427-435, 2012.

افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، در مرکز ورق بیشترین قابلیت تخلیه بار الکتریکی از سطح الیاف الکتروریسی شده وجود دارد. این قابلیت با نزدیک شدن به ضلع منفصل از سطح فلز کاهش می‌یابد (شکل ۴-الف). بنابراین انتظار می‌رود، آرایش الیاف در نقاط مختلف از شیشه متفاوت و یک گرادیان آرایش وجود داشته باشد. با الکتروریسی محلول پلی‌کاپرولاکتون به مدت ۳۰ min، الیاف بدون دانه با آرایش‌های مختلف در طول ورق شیشه‌ای به دست می‌آیند (شکل ۴-ب).

همان طور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، آرایش الیاف در مرکز ورق (نقطه ب)، دقیقاً مشابه با آرایش الیاف الکتروریسی شده روی جمع‌کننده فلزی استوانه‌ای (شکل ۴-الف) است. پیچ خوردگی زیاد الیاف در این قسمت از ورق شیشه‌ای (عایق) می‌تواند ناشی از آن باشد که در سایر نواحی ورق شیشه‌ای که در تماس با سطح فلزی قرار ندارند، الیاف تمایل چندانی برای نشست نداشته و بخش قابل توجهی از الیاف به سمت مرکز شیشه، که در تماس مستقیم با فلز است، هدایت می‌شوند. بنابراین، نقش عایق بودن شیشه در این بخش (به نسبت دیگر بخش‌های شیشه) کاهش یافته و الیاف با آرایشی شبیه سطح رسانا جمع‌آوری می‌شوند. در حالی که در نقطه ج، پیچ خوردگی الیاف حذف شده و الیاف کاملاً مستقیم به دست آمده‌اند که می‌تواند ناشی از دافعه بیشتر میان الیاف در اثر تجمع بار سطحی باشد. اما چگالی الیاف در مقایسه با نقطه ب کمتر است، زیرا سطح در اثر فاصله بیشتر از سطح فلز، عایق تر است و الیاف ترجیح کمتری برای نشست روی آن دارند. در نقطه د، چگالی الیاف از نقطه ج نیز کمتر است که ناشی از رسانندگی الکتریکی ضعیف‌تر

7. Li D., Wang Y., and Xia Y., Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays, *Nano Lett.*, **3**, 1167-1171, 2003.
8. Zhao S., Zhou Q., Long Y., Sun G., and Zhang Y., Nanofibrous Patterns by Directelectrospinning of Nanofibers onto Topographically Structured Substrates of the Non-conductive, *Nanoscale*, **5**, 4993-5000, 2013.
9. Li D., Ouyang G., McCann J.T., and Xia Y., Collecting Electrospun Nanofibers with Patterned Electrodes, *NanoLett.*, **5**, 913-916, 2005.
10. Li D., Wang Y., and Xia Y., Electrospinning Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays and Layer-by-Layer Stacked Films, *Adv. Mat.*, **16**, 361-366, 2004.