

# الکتروریسی نانوالیاف پلی آکریلونیتریل تک محوری موازی و آرایش یافته به وسیله جمع کننده های فاصله دار

## Electrospinning of Uniaxially Aligned and Molecularly Oriented Polyacrylonitrile Nanofibers with Divided Collectors

روح اله جلیلی، سید عبدالکریم حسینی\*، محمد مرشد

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، هسته تحقیقاتی علوم و تکنولوژی الیاف

کد پستی ۸۴۱۵۶

دریافت: ۸۳/۱۷۲۵، پذیرش: ۸۴/۳/۱

### چکیده

الکتروریسی، ریسیدن مستقیم نانوالیاف از محلولهای پلیمری با تکیه بر نیروهای الکتروستاتیکی است. در این پژوهش، ابتدا دستگاه الکتروریسی طراحی و ساخته شد. سپس، با اعمال تغییراتی در روش استفاده از صفحات فلزی فاصله دار نانوالیاف تک محوری موازی شده پلی آکریلونیتریل در محلولهای ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ درصدوزنی در دی متیل فرمامید، در شرایط بهینه تولید و ریسیده شدند. در این روش برخلاف شیوه متداول جمع آوری نانوالیاف که به وسیله جمع کننده ای ایستا انجام می گیرد، اجازه استراحت کامل به زنجیرهای مولکولی داده نشد، در نتیجه آرایش مولکولی اولیه نانوالیاف که در حین الکتروریسی بدست آمده بود، حفظ شد. ساختار دسته این الیاف به وسیله میکروسکوپیهای نوری و الکترون پویشی بررسی و وجود آرایش یافتگی و ضریب شکست مضاعف به کمک میکروسکوپ نور قطبیده تأیید شده است.

### واژه های کلیدی

نانوتکنولوژی، الکتروریسی،  
نانوالیاف، موازی،  
آرایش یافته مولکولی

### مقدمه

در مقایسه با مواد شناخته شده بدست آورند. این خواص سبب می شوند نانوالیاف پلیمری برای بسیاری از کاربردهای مهم بکار روند [۱]. در سالهای اخیر تعدادی از روشها، مثل کشش [۲]، تولید در قالب [۳]، جداسازی فازی [۴]، خودنصبی [۵]، الکتروریسی [۶،۷] برای تهیه

هنگامی که قطر الیاف پلیمری از میکرون به چند صد نانومتر کاهش یابد، می توانند خواص شگفت انگیزی مثل نسبت سطح به حجم بسیار زیاد (این نسبت برای الیاف نانونسبت به الیاف میکرو می تواند بیش از هزار برابر باشد)، انعطاف پذیری مناسب و کارایی زیاد مکانیکی

### Key Words

nanotechnology, electrospinning,  
nanofibers, align,  
molecularly oriented

الکتروریسی شده پلی آکریلونیتریل (PAN) نیاز به انجام عملیات بعدی است. بدین ترتیب که ابتدا الیاف PAN در معرض تنش اکسید شده، پس از آن در مجاورت گازی خنثی تثبیت و زغالی (کربونیزه) می‌شوند. دسته نانو الیاف الکتروریسی شده به دلیل ظرافت زیاد و عدم داشتن نظم، برای بدست آوردن خواص خوب مکانیکی نمی‌توانند به همین شکل در معرض کشش قرار گرفته و تثبیت شوند. همچنین، نانوالیاف الکتروریسی شده PAN که به وسیله صفحه‌ای فلزی ایستا جمع‌آوری شده‌اند، حالت استراحت به خود گرفته، زنجیرهای مولکولی آرایش اولیه خود را از دست خواهند داد. بدین ترتیب نانوالیاف PAN الکتروریسی شده، نمی‌توانند به همین شکل برای تولید نانوالیاف کربن بکار روند [۲۶].

در صورت غلبه بر این مشکلات و با توجه به تولید زیاد و به دلیل کم بودن قطر این الیاف که زمان تثبیت را بسیار کم خواهد کرد، هزینه فرایند بسیار ارزان بوده، می‌توان به این شیوه نانوالیاف کربن بسیار بلندتر از روش رشد در بخار (vapor grown) که متداولترین و ارزانترین شیوه تولید نانوالیاف کربن با قطر بین ۲۰۰-۵۰ nm و طول ۱۰۰-۵۰ μm است [۲۷] بدست آورد.

بدین منظور فئسی و همکارانش، تهیه نخ از نانوالیاف الکتروریسی شده PAN را پیشنهاد کردند [۲۶]. آنها ابتدا با استفاده از جمع کننده‌ای چرخنده با سرعت زیاد، دسته‌های نانو الیاف PAN نسبتاً موازی و دارای ضریب شکست مضاعف، با قطری بین ۳۰۰-۲۷۰ nm را تهیه، به کمک تجهیزات پیشرفته از آنها، نخ ریسیده‌اند. به دلیل قطر بسیار کم این الیاف، به نظر نمی‌رسد رسیدن نخ از دسته نسبتاً منظم آنها، روش ساده و کارایی باشد.

لی و همکارانش [۲۸] روشی بسیار ساده و با کارایی زیاد را پیشنهاد کردند که به کمک آن می‌توان با اعمال اندکی تغییرات در قسمت جمع کننده، نانوالیاف تک محوری و موازی شده تا طول چند سانتیمتر تهیه کرد. بدین ترتیب که به جای استفاده از صفحه فلزی متصل شده به زمین به عنوان جمع کننده، از دو صفحه فلزی متصل شده به زمین که بین لبه عرضی آنها فاصله وجود دارد استفاده کرد. خطوط میدان الکتریکی در نزدیکی این دو صفحه به سمت آنها منحرف شده، در نتیجه هنگامی که لیف با بار الکتریکی، خم شده و به بالای این ناحیه می‌رسد، نیروهای الکتریکی آن را از دو سمت کشیده، عمود بر لبه‌های دو صفحه فلزی قرار خواهند داد. این عمل برای نانو الیاف بعدی تکرار شده، تا در نهایت دسته‌ای از نانو الیاف تک محوری موازی شده در محیطی وسیع جمع‌آوری می‌شوند. طول نانو الیاف موازی شده و معلق در فاصله بین دو صفحه فلزی جمع کننده به اندازه عرض این فاصله خواهد بود. دو انتهای لیف و یا الیافی که کاملاً با یکی از صفحه‌های فلزی برخورد

نانوالیاف پلیمری بکار گرفته شده‌اند. اما به نظر می‌رسد الکتروریسی تنها روشی است که می‌توان به وسیله آن نانوالیاف منفرد و ممتد را به مقدار زیاد تولید کرد. به همین دلیل اخیراً توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده است.

برای درک بهتر فرایند الکتروریسی می‌توان از فرایند افشاندن الکتریکی (electrospraying) شروع کرد. در ابتدای قرن اخیر مشخص شده است که می‌توان از میدان الکتروستاتیکی برای سرعت دادن به جریان مایع از نوک افشانک موئین استفاده کرد [۸]. سطح کروی مایع معلق شده، در حالت تعادل در انتهای افشانک موئین، می‌تواند در مجاورت میدان الکتریکی باردار شده، از موازنه بین نیروهای دافعه به وجود آمده و پخش شده در سطح قطره به شکل مخروط، کش آید. با افزایش ولتاژ و رسیدن آن به حدی بحرانی، این نیرو بر کشش سطحی قطره غلبه کرده، جریان مایع سریع و پایداری از نوک مخروط خارج می‌شود. جریان سریع مایعات با وزن مولکولی و گرانیوی کم، به کمک کشش سطحی به قطرات ریز شکسته خواهد شد. این عملیات به عنوان افشاندن الکتریکی شناخته شده، در بسیاری از صنایع برای تهیه قطراتی با توزیع قطری باریک و کمتر از میکرون بکاررفته است [۹]. حالت دوم که برای محلولها و یا مذابهای پلیمری در نظر گرفته می‌شود، جریان سریع سیال است که به سمت فلز جمع کننده که حالت ایستا دارد، حرکت می‌کند [۶، ۷]. پس از طی مسیر کوتاهی، دافعه متقابل بارهای حمل شده در سطح جریان، آن را خم کرده و سیال مسیر خود را به شکل مارپیچ و حلقه‌ای ادامه خواهد داد [۱۰، ۱۱]. بدین ترتیب جریان سریع سیال در فاصله کم افشانک تا جمع کننده (فاصله ریسندگی)، می‌تواند مسیر بسیار زیادی را طی کرده تا نیروهای الکتریکی آن را هزاران بار کشیده و نازک کنند. سرانجام حلال تبخیر و یا مذاب سرد شده، نانوالیاف ممتد و بی‌بافت روی فلز جمع کننده بدست خواهند آمد [۶، ۷]. ساختار الیاف به وسیله طراحی آزمایش، کنترل می‌شود که وابسته به هدایت محلول [۱۲، ۱۳]، قطبیت حلال [۱۳]، غلظت محلول [۱۲]، وزن مولکولی پلیمر [۱۴]، گرانیوی [۱۲] و ولتاژ اعمالی [۱۵] خواهد بود. در سالهای اخیر از این شیوه برای ساخت نانو الیاف در محدوده وسیعی از پلیمرها و در کاربردهای مختلف مثل تقویت در کامپوزیتها [۱۶]، ساخت صافیها [۱۷]، الیاف هادی [۱۸، ۱۹]، حسگرها [۲۰، ۲۱]، الیاف سرمایی [۲۲]، قالب بافت [۲۳]، حمل دارو [۲۴] و پوشش زخم [۲۵] به شکل بی‌بافت استفاده شده است.

با کنترل بیشتر در جمع‌آوری این الیاف و نظم دادن به آنها، قابلیت استفاده در زمینه‌های دیگر و ایجاد خواص مطلوبتر فراهم خواهد شد. کنترل الیاف و آماده‌سازی آنها برای استفاده و انجام عملیات تکمیلی بسیار مهم است. به عنوان مثال در تهیه نانوالیاف کربن از نانوالیاف

بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف استفاده شد. نانوالیاف الکتروریسی شده به وسیله میکروسکوپ نور قطب‌بنده برای تأیید وجود آرایش یافتگی آزمایش شدند.

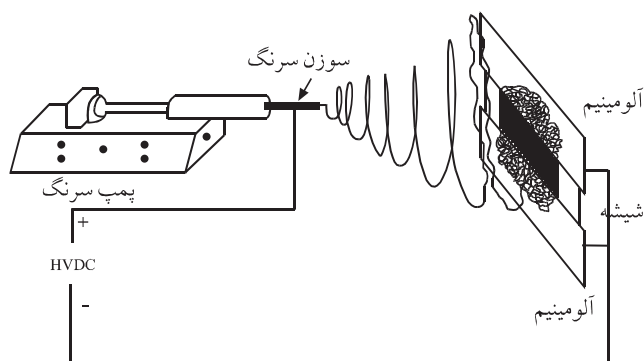
### روشها

محلول پلیمری درون سرنگ با سوزن دارای قطر داخلی ۰/۷ mm ریخته شد. سرنگ به قطب مثبت و صفحات فلزی جمع‌کننده به جای اتصال به زمین به قطب منفی متصل شدند. اتصال صفحات فلزی به قطب منفی افزایش مداوم میدان نیرو، نیروهای جلوبرنده و الکترواستاتیکی موازی کننده و ادامه کشش الیاف موازی شده را امکان‌پذیر می‌کند. سرنگ دارای محلول پلیمری روی پمپ قرار گرفته تا جریان محلول به گونه‌ای کنترل شود که همواره قطره‌ای پایدار از محلول در نوک سوزن سرنگ وجود داشته باشد. الکتروریسی در حالت افقی انجام و با افزایش غلظت، فاصله ریسندگی افزایش داده شد سپس، تمامی الیاف تولید شده به مدت ۲ h در گرمخانه  $70^{\circ}\text{C}$  خشک شدند.

### نتایج و بحث

#### محدوده دارای قابلیت ریسندگی

یکی از مهمترین مشخصات مربوط به نانو الیاف الکتروریسی شده قطر آنهاست که نسبت مستقیم باغلظت محلول پلیمری دارد. تغییر غلظت نیز در محدوده‌ای خاص امکان‌پذیر است که به حلال و پلیمر مربوط می‌شود. در غلظتهای کم، کشش سطحی تعیین‌کننده ساختار است و به جای نانوالیاف یکدست، ساختاری دانه‌دار تشکیل می‌شود و در غلظتهای کمتر، قطره‌ها به جای نانو الیاف تشکیل خواهند شد. این مسأله



شکل ۱ نمایی از تجهیزات الکتروریسی به کار گرفته شده در این پژوهش.

کرده‌اند، همچنان به شکل نامنظم و بی‌بافت باقی خواهند ماند. الیاف موازی شده به شکل باردار باقی می‌مانند و دافعه بین این الیاف و الیافی که در حال تولیدند، بازده موازی شدن را افزایش داده، سبب ایجاد الیاف منفرد و جدا از هم خواهند شد [۲۸].

در این پژوهش، ابتدا دستگاه الکتروریسی با اعمال تغییراتی نسبت به شیوه پیشنهاد شده توسط لی و همکاران، طراحی و ساخته شد. سپس محدوده دارای قابلیت ریسندگی بدست آمد. پس از آن، شرایط مناسب برای تولید نانو الیاف تک محوری موازی شده PAN، در محدوده دارای قابلیت ریسندگی بدست آمده، شرایط بهینه ریسندگی معین شد. ساختار دسته این الیاف به وسیله میکروسکوپ الکترون پویشی بررسی و برای آشکار شدن وجود آرایش یافتگی، میکروسکوپ نورقطب‌بنده استفاده شد.

### تجربی

#### مواد

PAN تجاری، تهیه شده از شرکت پلی آکریل ایران و DMF با دمای جوش  $150^{\circ}\text{C}$  از شرکت مرک، به عنوان پلیمر و حلال استفاده شد. وزن مولکولی متوسط وزنی ( $\bar{M}_w$ ) پلیمر تهیه شده،  $105 \text{ g/mol}$  و وزن مولکولی متوسط عددی ( $\bar{M}_n$ )،  $7 \times 10^4 \text{ g/mol}$  است. حلال و پلیمر کاملاً خشک بوده، محلولهای ۱۰ تا ۱۵ درصدوزنی PAN/DMF در دمای اتاق و با همزدن در سرعت ثابت تهیه شدند.

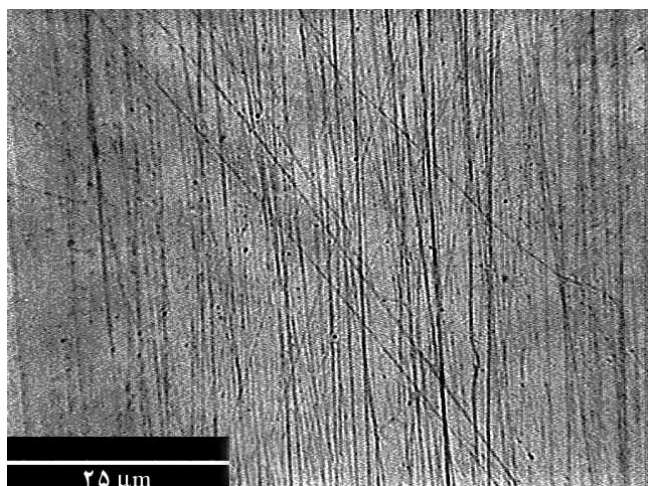
#### دستگاهها

##### تجهیزات الکتروریسی

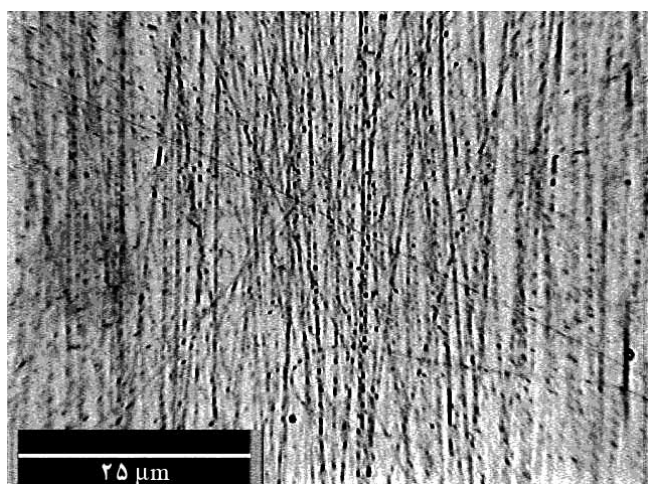
تجهیزات الکتروریسی شامل پمپ سرنگ برای کنترل جریان محلول پلیمری، منبع تغذیه مستقیم با توان ایجاد اختلاف پتانسیل تا ۲۰ kV و جمع‌کننده شامل دو ورقه آلومینیمی است که لبه عرضی آنها به وسیله صفحه شیشه‌ای به جای فاصله خالی از هم جدا شده است. بکارگیری شیشه در این پژوهش، اثری در تعداد الیاف موازی جمع‌آوری شده و قطر آنها ندارد، بلکه باعث حفاظت از الیاف موازی، جلوگیری از پاره شدن به وسیله وزن الیاف، در هم رفتن در اثر دافعه متقابل الیاف باردار در حال تولید و محافظت در برابر جریان هوا در حین تولید و انتقال می‌شود. شکل ۱، نمای این تجهیزات را نمایش می‌دهد.

##### تجهیزات میکروسکوپی

در این پژوهش، از میکروسکوپ نوری موتیک، نورقطبیده زایس و میکروسکوپ الکترون پویشی SEM (XL-۳۰) فیلیپس ساخت هلند با



(الف)



(ب)

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری نانوالیاف الکترورسی شده: (الف) ۹ درصد و (ب) ۱۰ درصد.

آغاز و جریان سریع محلول پلیمری خارج می شود. با افزایش بیشتر ولتاژ، سرعت تولید نانو الیاف بیشتر می شود اما، تولید نانوالیاف موازی شده به دلیل افزایش نیروهای الکتریکی و پراکنده شدن نانوالیاف در حال تولید، سخت تر خواهد شد. ولتاژهای بحرانی و بهینه بدست آمده در

برای نانوالیاف پلی اتیلن اکسید، مشاهده و بررسی شده است [۱۲]. در غلظتهای زیاد نیز به دلیل افزایش شدید نیروهای ویسکوالاستیک، جریان محلول پلیمری پایدار و ممتد نخواهد بود.

در این پژوهش، محدوده مناسب برای ریسندگی، غلظتهای ۱۰ تا ۱۵ درصدوزنی PAN/DMF بدست آمده است. در غلظتهای کمتر از ۱۰ درصد، نانوالیاف دانه دار تشکیل شد که در شکل ۲، نانوالیاف الکترورسی شده در غلظت ۹ درصد در مقایسه با ۱۰ درصد مشاهده می شود. در غلظت ۹ درصد تعداد زیادی دانه در امتداد نانوالیاف ایجاد شده، ولی با افزایش غلظت به ۱۰ درصد، نانو الیافی یکدست بدست آمده است. با افزایش غلظت تا ۱۵ درصد قطر افزایش می یابد و نانوالیاف یکدستی بدست می آید. به تدریج با بیشتر شدن غلظت، ایجاد جریان پایدار ریسندگی مشکل شده، به دلیل افزایش شدید نیروهای ویسکوالاستیک، جریان سریع سیال به دفعات قطع می شود.

#### تولید نانو الیاف موازی شده تک محوری

برای تولید نانو الیاف موازی شده تک محوری PAN با قطرهای مختلف، سه غلظت ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ درصد وزنی PAN/DMF انتخاب و الکترورسی انجام شد.

با تغییر شرایط ریسندگی مثل فاصله ریسندگی، عرض شیشه و اختلاف پتانسیل اعمال شده، شرایط بهینه برای تولید نانوالیاف موازی و بلندتر در هر غلظت بدست آمد. نتایج بدست آمده در جدول ۱ و تصاویر SEM دسته نانوالیاف موازی شده تک محوری در غلظتهای مختلف، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در این تصاویر مشاهده می شود با افزایش غلظت، قطر نانوالیاف افزایش یافته، تک محوری بودن و توازی نانوالیاف نیز به خوبی مشخص است.

طبق جدول ۱، نتایج آزمایشها بهترین فاصله را برای غلظت ۱۰ درصدوزنی، ۱۵ cm و برای غلظتهای ۱۲/۵ و ۱۵ درصد وزنی، ۲۰ cm نشان می دهد. با افزایش غلظت محلول ریسندگی، فاصله ریسندگی افزایش داده شد. این افزایش به این دلیل است که حلال فرصت کافی را برای تبخیر بدست آورد. با افزایش ولتاژ و رسیدن آن به حدی بحرانی، فرایند الکترورسی

جدول ۱ شرایط بهینه بدست آمده در هر غلظت برای تولید نانوالیاف موازی و بلندتر.

نسبت طول به قطر الیاف	قطر الیاف (nm)	طول الیاف (cm)	ولتاژ اعمالی (kV)	ولتاژ بحرانی (kV)	فاصله ریسندگی (cm)	غلظت (%wt)
۵۵۰۰	۱۵۰	۰/۸	۸	۶	۱۵	۱۰
۵۰۰۰	۵۰۰	۲/۵	۹/۵	۷/۵	۲۰	۱۲/۵
۵۰۰۰	۸۰۰	۴	۱۱	۸/۵	۲۰	۱۵

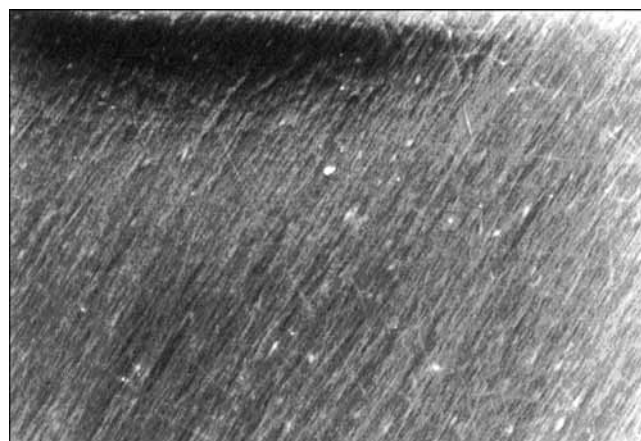
جدول ۱ مشخص شده است.

طول نانوالیاف موازی شده بسیار مهم است و سعی شده تا نانوالیاف بلندتر تولید شود. این طول به اندازه فاصله ایجاد شده میان دو صفحه فلزی است و برای هر غلظت با تغییر آرام فاصله، بلندترین طول که منجر به تولید نانو الیاف موازی شود، بدست آمد. با کاهش قطر نانوالیاف حداکثر طول بدست آمده کم شد ولی نسبت قطر به طول نانوالیاف تغییر چندانی نکرد (جدول ۱).

### آرایش یافتگی درون مولکولی

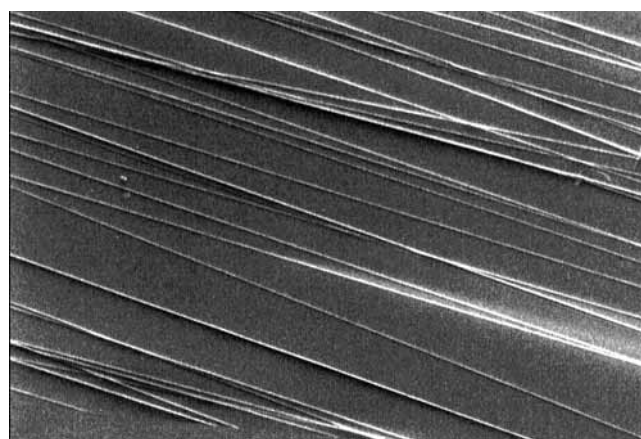
اگر زنجیرهای مولکولی در نانوالیاف در یک جهت آرایش یافته باشند، در دو جهت محور و عرض لیف ضریب شکست نوری برابر نیست و لیف دارای ضریب شکست مضاعف است [۲۹]. در این حالت اگر لیف به وسیله میکروسکوپ نورقطبیده با قطبنده‌های عمود بر هم مشاهده شود، هنگامی که محور لیف در امتداد یکی از قطبنده‌ها قرار گیرد، لیف تاریک شده، با چرخاندن آن زیر میکروسکوپ روشن می‌شود. روشن شدن هنگامی که محور لیف با قطبنده‌ها زاویه  $45^\circ$  بسازد به حداکثر می‌رسد. روشن و خاموش شدن که حاکی از وجود ضریب شکست مضاعف و آرایش یافتگی درون مولکولی است، برای الیاف متداول PAN مشاهده شده است [۳۰]. برخلاف انتظار، نانوالیاف PAN الکتروریسی شده، هنگام جمع‌آوری به وسیله صفحه فلزی ایستا دارای ضریب شکست مضاعف نبودند اما، هنگامی که به کمک صفحه‌های فلزی فاصله‌دار به شکل موازی شده تک محوری جمع‌آوری شدند، ضریب شکست مضاعف داشتند. شکل ۴، نمونه‌هایی از نانوالیاف موازی شده تک محوری PAN را که به وسیله محلولهای ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ درصد وزنی الکتروریسی شده‌اند نشان می‌دهد. این تصاویر زیر میکروسکوپ نور قطبیده با قطبنده‌های عمود برهم، زمانی که محور دسته نانوالیاف با قطبنده‌ها زاویه  $45^\circ$  ساخته‌اند بدست آمده‌اند. با چرخاندن نانوالیاف زیر این میکروسکوپ در حالتی که دسته نانو الیاف در امتداد یکی از قطبنده‌ها باشند، نانوالیاف تاریک شده، زمانی که زاویه به  $45^\circ$  می‌رسد کاملاً روشن می‌شوند. تاریک و روشن شدن نانوالیاف نشانگر تفاوت ضریب شکست در دو جهت محور و عرض الیاف است که حاکی از وجود آرایش یافتگی در زنجیرهای مولکولی آنهاست. وجود ضریب شکست مضاعف و آرایش درون مولکولی قبلاً نیز برای نانوالیاف پلیمری (استیرن - بوتادی ان - استیرن) الکتروریسی شده مشاهده و گزارش شده است [۲۹].

هنگام الکتروریسی، جریان محلول پلیمری کشش بسیار زیادی را تحمل می‌کند تا به نانو الیاف تبدیل شود. بنابراین، آرایش یافتگی بسیار



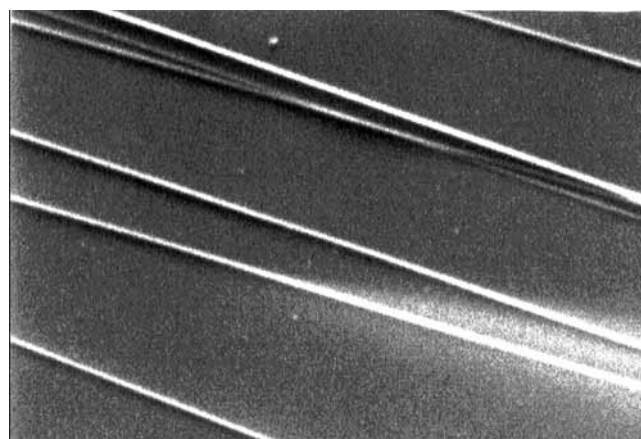
10 μm

(الف)



10 μm

(ب)



10 μm

(ج)

شکل ۳ تصاویر SEM دسته الیاف موازی شده در غلظتهای مختلف با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر: (الف) ۱۰ درصد وزنی، (ب) ۱۲/۵ درصد وزنی و (ج) ۱۵ درصد وزنی.

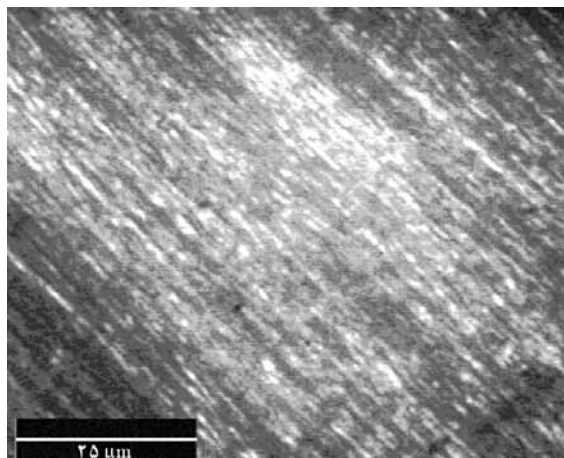
زیادی برای زنجیرهای مولکولی این الیاف انتظار می رود. به دلیل بالا بودن دمای جوش، حلال DMF در حین الکتروریسی، کاملاً تبخیر نمی شود. سطح لیف، به علت مجاورت با رطوبت موجود در هوا منعقد شده ولی حلال در قسمت مغزی لیف باقی می ماند. بنابراین، هنگامی که نانوالیاف الکتروریسی شده به وسیله صفحه ای فلزی ایستا جمع آوری شده اند، حالت استراحت به خود گرفته، زنجیرهای مولکولی آرایش یافتگی اولیه خود را از دست خواهند داد. هنگام استفاده از صفحه های فلزی فاصله دار به عنوان جمع کننده، نانوالیاف موازی شده پس از جمع آوری همچنان دارای بار الکتریکی مخالف با صفحه های فلزی خواهند بود. این امر باعث ایجاد نیروی کششی در امتداد نانوالیاف موازی می شود و از استراحت زنجیرهای مولکولی جلوگیری می کند. این کشش می تواند تا تبخیر کامل حلال ادامه یافته، منجر به حفظ آرایش یافتگی اولیه زنجیرهای مولکولی (بدست آمده در الکتروریسی) شود.

### نتیجه گیری

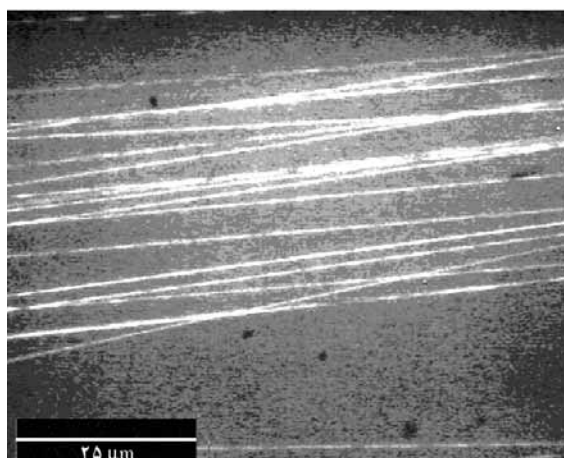
در این پژوهش، ابتدا در شیوه جمع آوری الیاف به وسیله صفحه های فلزی جمع کننده، تغییراتی مثل استفاده از صفحه ای شیشه ای به عنوان عایق برای جمع آوری نانو الیاف و اعمال پتانسیل الکتریکی مخالف میان سوزن سرنگ و صفحه های فلزی داده شد. سپس با تغییر شرایط ریسندگی مثل عرض شیشه و اختلاف پتانسیل اعمال شده، شرایط بهینه برای تولید نانوالیاف موازی و بلندتر، در غلظت های مختلف به دست آمد. محدوده مناسب ریسندگی، غلظت های بین ۱۰ تا ۱۵ درصد در نظر گرفته شد و با افزایش غلظت، قطر نانو الیاف افزایش یافت. نتایج نشان می دهد که در غلظت ۹ درصد، نانو الیاف دانه دار تشکیل شده، در غلظت های بیشتر از ۱۵ درصد، جریان ریسندگی پایدار نیست. با کاهش قطر نانوالیاف، حداکثر طول بدست آمده کم شد ولی، نسبت قطر به طول نانوالیاف تغییر چندانی نکرد. نانوالیاف تولید شده در این پژوهش، آرایش مولکولی اولیه خود در حین الکتروریسی را حفظ نموده، دارای ضریب شکست مضاعف بودند.

### قدردانی

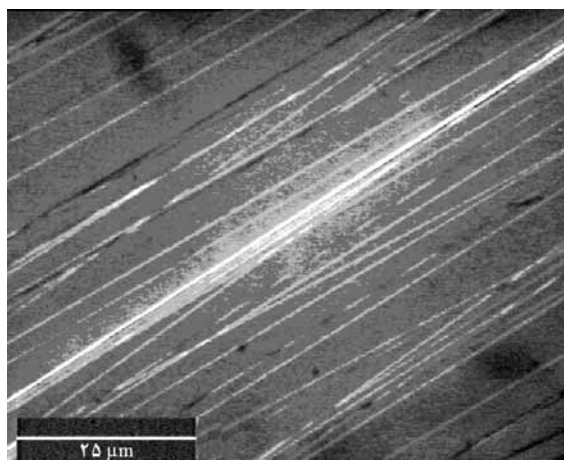
بدین وسیله از آقای مهندس محمود آذرنسب به دلیل کمک در تهیه محلول های پلیمری تشکر و قدردانی می شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ نانوالیاف موازی شده و دارای ضریب شکست مضاعف، زیر میکروسکوپ نور قطبیده با قطبنده های عمود بر هم زمانی که محور دسته الیاف با قطبنده ها زاویه  $45^\circ$  ساخته اند: (الف) ۱۰ درصد، (ب) ۱۲/۵ درصد و (ج) ۱۵ درصد.

## مراجع

- Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotaki M. and Ramakrishna S., A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and their Applications in Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **6**, 2223-2253, 2003.
- Ondarcuhu T. and Joachim C., Drawing a Single Nanofibre over Hundreds of Microns, *Eur. Phys. Lett.*, **42**, 215-220, 1998.
- Feng L., Li S., Li H., Zhai J., Song Y., Jiang L. and Zhu D., Super-Hydrophobic Surface of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **41**, 1221-1223, 2002.
- Ma P.X. and Zhang R., Synthetic Nano-scale Fibrous Extracellular Matrix, *J. Biomed. Mater. Res.*, **46**, 60-72, 1999.
- Liu G.J., Ding J.F., Qiao L.J., Guo A., Dymov B.P. and Gleeson J.T., Polystyrene-block-poly (2-cinnamoyl ethyl methacrylate) Nanofibers-Preparation, Characterization, and Liquid Crystalline Properties, *Chem. Eur. J.*, **5**, 2740-2749, 1999.
- Doshi J. and Reneker D.H., Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, *J. Electrostat.*, **35**, 151-160, 1995.
- Srinivasan G. and Reneker D.H., Structure and Morphology of Small Diameter Electrospun Aramid Fiber, *Polym. Int.*, **36**, 195-201, 1995.
- Zeleny J., Instability of Electrified Liquid Surfaces. *Phys. Rev.*, **3**, 69-91, 1914.
- Taylor G.I., Disintegration of Water Drops in an Electric Field, *Royal. Soc. London., A.*, **280**, 383-397, 1964.
- Reneker D.H., Yarin A.L., Fong H. and Koombhongse S., Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning, *J. Appl. Phys.*, **87**, 4531-4547, 2000.
- Yarin A.L., Koombhongse S. and Reneker D.H., Bending Instability in Electrospinning of Nanofibers, *J. Appl. Phys.*, **89**, 3018-3026, 2001.
- Fong H., Chun I. and Reneker D.H., Beaded Nanofibers Formed during Electrospinning, *Polymer*, **40**, 4585-4592, 1999.
- Won K.S., Youk J.H., Taek S.L. and Won H.P., The Effects of Solution Properties and Polyelectrolyte on Electrospinning of Ultrafine Poly(ethylene oxide)Fibers, *Polymer*, **45**, 2959-2966, 2004.
- Koski A., Yim K. and Shivkumar S., Effect of Molecular Weight on Fibrous PVA Produced by Electrospinning, *Mater. Lett.*, **58**, 493-497, 2004.
- Deitzel J.M., Kleinmeyer J., Harris D. and Tan N.C.B., The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles, *Polymer*, **42**, 261-272, 2001.
- Kim J.S. and Reneker D.H., Mechanical Properties of Composites Using Ultrafine Electrospun Fibers, *Polym. Comps.*, **20**, 124-131, 1999.
- Tsaia P.P., Gibson S.H. and Gibson P., Different Electrostatic Methods for Making Electret Filters, *J. Electrostat.*, **54**, 333-341, 2002.
- Norris D.I., Shaker M.M., Frank K.K. and Mac Diarmid A.G., Electrostatic Fabrication of Ultrafine Conducting Fibers: Polyaniline/polyethylene Oxide Blends, *Synth. Met.*, **114**, 109-114, 2000.
- Mac Diarmid A.G. Ones W.E., Norris I.D., Gao J., Johnson A.T. and Pinto N.J., Electrostatically-generated Nanofibers of Electronic Polymers, *Synth. Met.*, **119**, 27-30, 2001.
- Lee S.H., Ku B.C., Wang X., Samuelson L.A. and Kumar J., Design, Synthesis and Electrospinning of a Novel Fluorescent Polymer for Optical Sensor Applications, *Mat. Res. Soc. Symp. Pro.*, **708**, 403-408, 2002.
- Wang X.Y., Lee S.H., Drew C., Senecal K.J., Kumar J. and Samuelson L.A., Highly Sensitive Optical Sensors Using Electrospun Polymeric Nanofibrous Membranes, *Mat. Res. Soc. Symp. Pro.*, **708**, 397-402, 2002.
- Changlu S., Kim H.Y., Gong J., Ding B., Lee D.R. and Park S.J., Fiber Mats of Poly(vinyl alcohol)/Silica Composite via Electrospinning, *Mater. Lett.*, **57**, 1579-1584, 2003.
- Buchko C.J., Chen L.C., Shen Y. and Martin D.C., Processing and Microstructural Characterization of Porous Biocompatible Protein Polymer Thin Films, *Polymer*, **40**, 7397-7407, 1999.
- Kenawy E.R., Bowlin G.L., Mansfield K., Layman D.G. and Simpson E.H., Release of Tetracycline Hydrochloride from Electrospun Poly(ethylene-co-vinylacetate), Poly(lactic acid) and a Blend, *J. Controlled Release*, **81**, 57-64, 2002.
- Jin H.J., Fridrikh S., Rutledge G.C. and Kaplan D., Electrospinning Bombyx Mori Silk with Poly(ethylene oxide), *Biomacromolecules*, **3**, 1233-1239, 2002.
- Fennessey S.F. and Richard J.F., Fabrication of Aligned and

- Molecularly Oriented Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers and the Mechanical Behavior of their Twisted Yarns, *Polymer*, **45**, 4217-4225, 2004.
27. Yue Y.F., Fan Y.Y., Li F., Cheng H.M., Su G., Yu Y.D. and Shen Z.H., Preparation, Morphology and Microstructure of Diameter Controllable Vapor-grown Carbon Nanofibers, *J. Mater. Res.*, **13**, 2342-2346, 1998.
28. Li D., Wang Y. and Y. Xia., Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays, *Nano. Lett.*, **3**, 1167-1171, 2003.
29. Fong H. and Reneker D.H., Elastomeric Nanofibers of Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. Ed.*, **37**, 3488-3493, 1999.
30. Davidson J.A., Jung H.T., Hudson S.D. and Percec S., Investigation of Molecular Orientation in Melt-spun High Acrylonitrile Fibers, *Polymer*, **41**, 3357-3364. 2000.