

# Fabrication of Aligned Nanofibers by Manipulated Rotating Drum Method and Studying the Effective Parameters on Fibers Alignment by Image Processing

Zohreh Hadi<sup>1</sup>, Farzad Dabirian<sup>2\*</sup>, Somayeh Safi<sup>3</sup>, Afshin Zojajian<sup>1</sup>, and  
Mahtab Firoozi<sup>1</sup>

1. Polymer Engineering Group, Faculty of Engineering, Islamic Azad University,  
P.O. Box: 86145-311, Shahreza, Iran

2. Department of Mechanical, Engineering Faculty, Razi University, Postal Code: 67149-67346,  
Kermanshah, Iran

3. Young Research Club, Shahreza Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 86145-311,  
Shahreza, Iran

Received 27 September 2011, accepted 12 December 2012

## ABSTRACT

Electrospinning is a known process to produce nanofibers through electrostatic forces. In a typical process, an electrical potential is applied between droplets of polymer solution or melt, held through a syringe needle and a grounded target. In general electrospinning fibers are collected on the grounded target as a random oriented web of nanofiber. Various research projects are attempted to obtain aligned electrospun fibers. This modified electrospinning method can be developed and used in a variety of nanofiber-based applications such as making of nanofibrous scaffolds for tissue engineering. In this study, an effective method has been developed to fabricate aligned nanofibers by manipulation of electrospinning system using two nozzles with opposite charges. Moreover, the effect of some parameters including take-up velocity, applied voltage and polymer solution concentration on alignment of produced nanofibers is investigated. The comparison of fibers alignment was carried out by programming and image processing in MATLAB. It is shown that take-up velocity and polymer solution concentration have significant effect on increasing the fibers alignment. Also, the alignment is increased with applied voltage at first and then, it is decreased. The analytical results and optical microscopic images are clear evidence of showing the maximum alignment of nanofibers obtained at 15% polymer solution concentration with take-up velocity of 600 rpm and 11 kV voltage.

### Keywords:

aligned nanofibers,  
PAN,  
electrospinning,  
two nozzles method,  
rotating drum

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [f.dabirian@razi.ac.ir](mailto:f.dabirian@razi.ac.ir)

# تولید نانوالیاف موازی به روش تغییر یافته غلتک چرخان و

## بررسی عوامل مؤثر بر مقدار موازی بودن الیاف

### با پردازش تصویر

زهره هادی<sup>۱</sup>، فرزاد دبیریان<sup>۲\*</sup>، سمیه صفی<sup>۲</sup>، افشین زجاجیان<sup>۱</sup>، مهتاب فیروزی<sup>۱</sup>

۱- شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۳۱۱-۸۶۱۴۵

۲- کرمانشاه، دانشگاه رازی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک، کدپستی ۶۷۱۴۹-۶۷۳۴۶

۳- شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، باشگاه پژوهشگران جوان، صندوق پستی ۳۱۱-۸۶۱۴۵

دریافت: ۹۰/۷/۵، پذیرش: ۹۱/۹/۲۲

#### چکیده

الکتروریسی، روشی متداول برای تولید نانوالیاف است که مبنی بر استفاده از نیروهای الکتروستاتیک در اعمال کشش بر یک قطره محلول یا مذاب پلیمری است. در الکتروریسی متداول نانوالیاف تولید شده به شکل بی‌نظم روی صفحه جمع‌کننده جمع‌آوری می‌شوند. اعمال کنترل بر جمع‌آوری نانوالیاف و گردآوری آنها به‌طور موازی باعث پیدایش کاربردهای جدیدی برای نانوالیاف می‌شود. نانوالیاف موازی کاربردهای بسیاری در مهندسی بافت دارند. در این پژوهش، با اعمال تغییراتی در سامانه الکتروریسی و استفاده از دو نازل (سوزن) با بارهای مخالف، روشی کارآمد برای تولید نانوالیاف موازی ارائه شده است. همچنین، اثر برخی از عوامل مؤثر بر مقدار موازی بودن الیاف نظیر سرعت برداشت، ولتاژ اعمال شده و غلظت محلول بررسی شده است. برای مقایسه مقدار موازی بودن الیاف از برنامه‌نویسی و پردازش تصویر در محیط MATLAB استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، غلظت محلول و سرعت برداشت، اثر قابل توجهی بر افزایش موازی بودن نانوالیاف دارند. افزایش غلظت از ۱۲ به ۱۵ wt% سبب افزایش معنی‌داری در مقدار موازی بودن نانوالیاف می‌شود. در شرایطی که تمام پارامترها ثابت باشد، افزایش سرعت برداشت باعث افزایش مقدار موازی بودن الیاف می‌شود. با افزایش ولتاژ، ابتدا موازی بودن افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. نمودارها و تصاویر میکروسکوپ نوری نانوالیاف مؤید این مطلب‌اند که بیشترین موازی بودن نانوالیاف در غلظت ۱۵ wt%، ولتاژ ۱۱ kV و سرعت برداشت ۶۰۰ rpm حاصل شده است.

#### واژه‌های کلیدی

نانوالیاف موازی،  
پلی‌آکریلونیتریل،  
الکتروریسی،  
روش دو نازلی،  
غلتک چرخان

## مقدمه

الکتروریسی از ساده‌ترین و مؤثرترین روش‌های تولید نانوالیاف پلیمری بر پایه نیروهای الکتروستاتیکی است. نانوالیاف به دلیل داشتن خواص ویژه نظیر سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل و کارایی مکانیکی زیاد در بسیاری از حوزه‌های کاربردی از قبیل داربست‌های مهندسی بافت [۴-۱]، تقویت کامپوزیت‌ها [۵،۶]، ساخت فیلترها [۷-۹]، الیاف رسانا [۱۰]، حسگرها [۱۱]، غشای پیل‌های سوختی [۱۲،۱۳]، سامانه‌های ره‌ایش دارو [۱۴] و زخم‌پوش‌ها [۱۵-۱۷] استفاده می‌شوند.

در فرایند الکتروریسی، مسیر نامنظم و نوسانی جریان پلیمری خروجی (جت) و عدم کنترل کامل نیروهای وارد شده بر جت حین ریسندگی سبب تولید نانوالیافی نامنظم و فاقد آرایش می‌شود که این مسئله، کاربرد آنها را محدود می‌سازد. در سال‌های اخیر، برای کنترل نحوه جمع‌آوری نانوالیاف و آرایش فضایی دسته‌های الیاف تولید شده برای بهینه‌سازی الیاف و استفاده از آنها در حوزه‌های کاربردی بیشتر و جدیدتر، تلاش‌های فراوانی انجام شده است. از آن جمله می‌توان به تغییر ساختار جمع‌کننده (استفاده از جمع‌کننده چرخان یا صفحات موازی) یا اصلاح و کنترل میدان الکتروستاتیکی اشاره کرد. مطالعات انجام شده درباره نانوالیاف تولید شده به شکل موازی نشان می‌دهد، این الیاف از آرایش‌یافتگی مناسب‌تری نسبت به نانوالیاف بی‌بافت برخوردارند [۱۸،۱۹]. این موضوع ممکن است، ناشی از افزایش کشش مؤثر روی نانوالیاف تولید شده در این روش‌ها باشد. موازی بودن نانوالیاف می‌تواند سبب بهبود عملکرد آنها در استحکام‌بخشی به قطعات کامپوزیتی مختلف شود [۱۸].

روش‌هایی که تاکنون برای تولید نانوالیاف موازی به‌کار برده شده‌اند، ضعف‌ها و محدودیت‌هایی نیز دارند. از مهم‌ترین ضعف‌های موجود، درصد کم موازی بودن نانوالیاف تولیدی است که تقریباً می‌توان گفت، وجه مشترک تمام روش‌های ارائه شده است. همچنین، در بعضی از موارد، امکان تولید پیوسته نانوالیاف با طول‌های زیاد روی یک بستر وسیع وجود ندارد. اگر چه در برخی از روش‌های جدیدتر، نانوالیاف به‌خوبی موازی شده‌اند، اما از لحاظ ضخامت لایه جمع‌آوری شده و طول ناحیه جمع‌آوری مشکلاتی وجود دارد [۲۰]. در سال‌های اخیر، روش جدیدی برای تولید نانوالیاف موازی ارائه و ادعا شده که محدودیت‌های موجود در سایر روش‌های تولید نانوالیاف موازی با این روش رفع شده است [۲۱،۲۲]. در این روش، از دو سوزن الکتروریسی با بارهای مختلف استفاده شده است. با اعمال ولتاژ و غلبه بر نیروهای الکتروستاتیکی، کشش سطحی و گرانیروی محلول پلیمری، دو جریان پلیمری خارج شده از هر یک از سوزن‌ها به دلیل ناهم‌نام بودن بار

الکتریکی روی آنها، هم‌زمان به طرف هم جذب می‌شوند. این دو جریان، در حد فاصل دو سوزن الکتروریسی به هم می‌رسند و پس از تخلیه الکتریکی، به شکل توده الیاف درمی‌آیند. در این مرحله با کشیدن الیاف به وسیله یک میله روی غلتک جمع‌کننده چرخان می‌توان نانوالیاف موازی تولید کرد. صدرجهانی و همکاران [۲۳] این روش را اصلاح کردند و با استفاده از جریان هوای گرم حین هدایت الیاف روی غلتک چرخان، مقدار گسیختگی جریان نانوالیاف را حین موازی‌سازی کاهش دادند.

در این پژوهش، با استفاده از روش تغییر یافته غلتک چرخان، نانوالیاف موازی با حداقل پارگی حین تولید حاصل شد. همچنین، تلاش شده است تا نحوه اثر عوامل مؤثر بر مقدار موازی بودن الیاف مشخص شود. برای مقایسه مقدار موازی بودن الیاف از برنامه‌نویسی و پردازش تصویر در محیط MATLAB استفاده شده است. در نهایت به منظور تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده و بررسی مقدار معنی‌داری آنها از آزمون آماری دانکن استفاده شد.

## تجربی

### مواد

در تهیه محلول پلیمری برای الکتروریسی، از پودر پلی‌آکریلونیتریل (PAN) تجاری با وزن مولکولی متوسط وزنی  $(\bar{M}_w)$  ۱۰۰۰۰۰ g/mol و وزن مولکولی متوسط عددی  $(\bar{M}_n)$  ۷۰۰۰۰ g/mol، از شرکت پلی‌آکریل ایران و حلال DMF از شرکت Merck آلمان استفاده شد.

### دستگاه‌ها

برای الکتروریسی، از دو پمپ تزریق رقمی با دقت ۰/۱ mL/h، سرنگ به حجم ۱ mL، سوزن الکتروریسی با قطر داخلی ۰/۵ mm، مبدل برای افزایش ولتاژ ورودی و تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم با محدوده ولتاژ ۰-۲۲ kV و غلتک جمع‌کننده چرخان با قابلیت کنترل سرعت به شکل رقمی استفاده شد. همچنین، برای عکس‌برداری از نانوالیاف و بررسی مقدار موازی بودن نانوالیاف نسبت به راستای چرخش غلتک جمع‌کننده، میکروسکوپ نوری مجهز به نرم‌افزار Motic مدل B3 ساخت انگلستان به‌کار گرفته شد.

### روش‌ها

#### تهیه نانوالیاف موازی

محلول‌های پلیمری در چهار غلظت ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی

می‌کنند و در نتیجه، نانوالیاف موازی با حداقل مقدار پارگی حین تولید جمع‌آوری می‌شوند.

در روش‌های دیگر، جمع‌آوری نانوالیاف روی غلتک فقط به شکل مکانیکی است. این مسئله سبب پارگی در رشته نانوالیاف می‌شود. اما در این روش، ابتدا نانوالیاف به وسیله میدان الکتریکی ضعیف ایجاد شده بین نازل‌ها و غلتک به سمت غلتک جمع‌کننده هدایت و جذب می‌شوند، سپس به شکل مکانیکی به وسیله غلتک، برداشت و به دور غلتک پیچیده می‌شوند.

در حقیقت می‌توان گفت، در روش دونازلی استفاده شده در این پژوهش، امکان تولید نانوالیاف موازی با آرایش‌یافتگی زیاد در سرعت چرخشی کم برای غلتک برداشت وجود دارد. مقدار موازی بودن بیشتر و جمع‌آوری نامحدود نانوالیاف موازی از نظر وزنی و زمانی، از برجستگی‌های این روش است. دوقطبی شدن باعث جذب الیاف به سمت غلتک شده و سبب کاهش پارگی رشته می‌شود.

#### شرایط ریسندگی

برای تعیین شرایط بهینه تولید نانوالیاف موازی و بررسی اثر عواملی نظیر سرعت برداشت، ولتاژ اعمال شده و غلظت محلول پلیمری بر مقدار موازی بودن و هم‌راستایی نانوالیاف تولید شده و مقایسه آنها، حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شد. به عبارتی، برای تولید نانوالیاف موازی، از محلول‌های پلیمری با غلظت ۱۵-۱۲ درصد وزنی در ولتاژهای ۷-۱۲ kV و سرعت‌های برداشت ۶۰۰-۱۵۰ rpm استفاده شد. برای هر حالت، ۶ نمونه نانوالیاف در محدوده قابل ریسندگی روی لام شیشه‌ای الکتروریسی شد و از نقاط مختلف هر نمونه، ۵ تصویر تهیه شد. به عبارتی، برای هر حالت ۳۰ تصویر به دست آمد. از این تصاویر در پردازش تصویر و برنامه‌نویسی MATLAB به منظور بررسی و مقایسه مقدار موازی بودن الیاف استفاده شد که در ادامه، توضیح داده می‌شود.

#### بررسی مقدار هم‌راستایی نانوالیاف

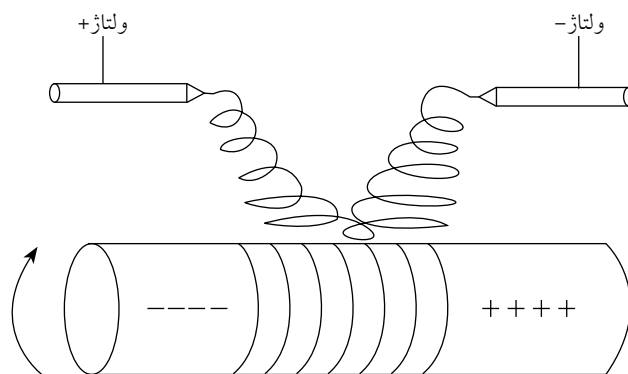
برای بررسی و مقایسه مقدار موازی بودن الیاف از روش پردازش تصویر و طیف زاویه‌ای توان (APS) استفاده شد. این روش برای بررسی ظاهر پارچه استفاده شده است [۲۴]. یکی از کاربردهای این روش، توزیع زاویه‌ای طیف توان (APS)،  $A(\theta)$  است که شامل اطلاعاتی در زمینه جهت‌های موجود در سطح ظاهری یک جسم است. روش محاسبه  $A(\theta)$  به شکل زیر است:

استفاده از انتقال فوری، تصویری از توزیع الیاف در حوزه بسامد با دامنه و فاز متناسب ارائه می‌کند. در فضای دوبعدی، تابع انتقال

پلی‌آکریلونیتریل در حلال DMF، در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) و هم‌زدن با سرعت ثابت تهیه شدند. سپس، برای تکمیل مرحله انحلال، محلول تهیه شده به مدت ۲ h در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. شایان ذکر است، محدوده تولید نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل یکنواخت فاقد دانه، حدود ۱۵-۱۱ درصد است.

در این پژوهش، با اعمال تغییرات در سامانه الکتروریسی و استفاده از دو نازل (سوزن) با بارهای مخالف، روشی کارآمد برای تولید نانوالیاف موازی ارائه شده است. در این روش، دو سوزن الکتروریسی که هریک به ولتاژی با بار مخالف وصل شده‌اند، در مقابل هم به فاصله ۱۳ cm از یکدیگر قرار داده شدند [۲۱]. فاصله هریک از سوزن‌ها با غلتک چرخان  $4/5$  cm در نظر گرفته شد. برای جمع‌آوری نانوالیاف موازی، از لام شیشه‌ای روی سطح غلتک چرخان در فاصله میان سوزن‌ها استفاده شد (شکل ۱).

با قرار گرفتن یک قطعه فلزی (مثلاً غلتک چرخان) درون میدان الکتریکی (مطابق شکل ۱)، الکترون‌های پراکنده شده به دلیل اعمال نیروی دافعه از طرف قطب منفی و نیروی جاذبه از طرف قطب مثبت در سطح صفحه، جابه‌جا می‌شود و در نتیجه چگالی بار در نقاط مختلف سطح صفحه تغییر می‌کند. این در حالی است که برآیند چگالی بار کل صفحه خنثی است. شکل ۱، تصویر کلی از چگالی بارها را در سطح غلتک فلزی درون میدان الکتروستاتیک نشان می‌دهد. در این حالت، نیمه‌ای از غلتک که در نزدیکی قطب مثبت قرار دارد، دارای چگالی بار منفی می‌شود. در نتیجه، نانوالیاف الکتروریسی شده به وسیله نازل قطب مثبت که حامل بارهای مثبت‌اند، به آرامی به وسیله بار منفی موجود در سطح غلتک جذب می‌شود. برای نازل با بار منفی و نیمه دوم غلتک نیز همین اتفاق رخ می‌دهد، با این تفاوت که نوع بار تغییر می‌کند. بدین ترتیب بر خلاف روش‌های پیشین، نانوالیاف به‌طور مستقیم از هر نازل به سمت غلتک حرکت



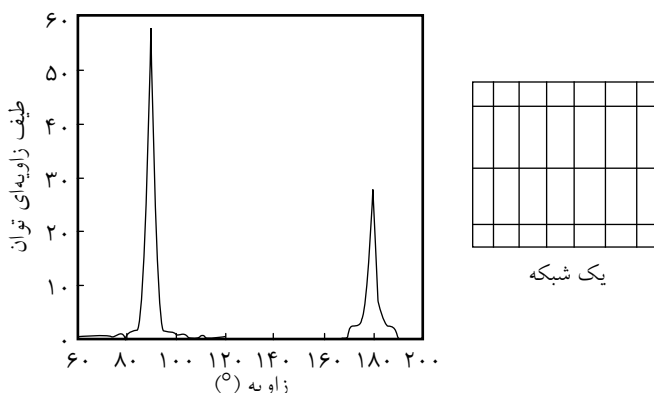
شکل ۱- طرح کلی نحوه تولید نانوالیاف موازی با استفاده از دو سوزن الکتروریسی و یک غلتک جمع‌کننده.

نشان می دهد، دو تکرار در زوایای  $\pi/2$  و  $\pi$  در تصویر وجود دارد که شدت تکرار در جهت عمودی بیشتر از جهت افقی است. با این خروجی می توان به طور نظری، نمونه ها را بررسی و مقایسه کرد. برای مقایسه عددی نمونه های مختلف، واریانس مربوط به شدت در زوایای مختلف از نمودار خروجی برای هر تصویر محاسبه شد. تعریف واریانس، معدل میانگین توان دوم انحرافات (پراکندگی) از میانگین شده باشند، نمودار طیف توان به شکل یک خط راست روی میانگین شدت خواهد بود و هر اندازه الیاف در یک راستا قرار گیرند، پیک ایجاد شده تیزتر و باریک تر می شود. در نتیجه اختلاف از میانگین بیشتر و واریانس بزرگ تر می شود. بنابراین واریانس بزرگ تر به معنی آرایش یافتگی بیشتر الیاف است.

## نتایج و بحث

در شکل ۳، مقادیر انحراف معیار به دست آمده از پردازش تصاویر الیاف PAN الکتروروسی شده در غلظت، ولتاژ و سرعت های مختلف غلتک جمع کننده چرخان، به شکل نمودارهایی نشان داده شده است. این نمودارها نمایانگر اثر سرعت برداشت بر مقدار موازی بودن نانوالیاف در غلظت ها و ولتاژهای مختلف است.

برای بررسی معنادار بودن داده های موجود از آزمون دانکن استفاده شد که نتایج این تجزیه و تحلیل آماری، در جدول ۱ آمده است. بر مبنای این آزمون داده هایی که از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف معناداری با هم ندارند، در یک گروه دسته بندی می شوند، همان طور که در این جدول مشاهده می شود، در آزمون دانکن



شکل ۲- تصویر یک شبکه از خطوط افقی و عمودی به همراه طیف زاویه ای توان (APS) آن.

مستقیم فوریه به شکل معادله (۱) تعریف می شود:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (1)$$

که در آن  $f(x, y)$  تصویر اولیه (حوزه زمان)،  $F(u, v)$  تصویر انتقال یافته (حوزه بسامد)،  $u, v = \sqrt{-1}$  بسامد در راستای  $x$  و  $y$  هستند. پاسخ انتقال فوریه معمولاً تابعی مختلط است که یک جزء حقیقی و یک جزء موهومی دارد:

$$F(u, v) = R(u, v) + jI(u, v) \quad (2)$$

در این معادله،  $R(u, v)$  جزء حقیقی و  $I(u, v)$  جزء موهومی است. مربع اندازه این تابع مختلط، تابعی حقیقی است که به آن طیف توان گفته می شود:

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 \quad u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

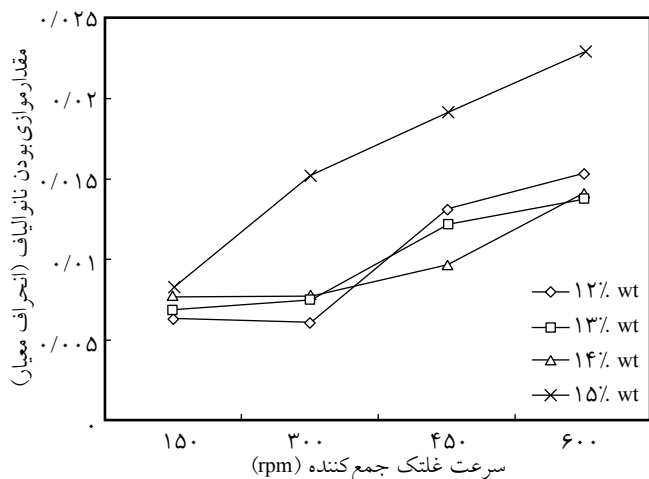
از توابعی که از طیف توان به دست می آید، طیف توان زاویه ای (angular power spectrum) است که اطلاعاتی از آرایش عناصر تصویر ارائه می دهد و از معادله (۴) محاسبه می شود:

$$A(\theta) = \sum_{r=1}^R P_r(\theta) \quad (4)$$

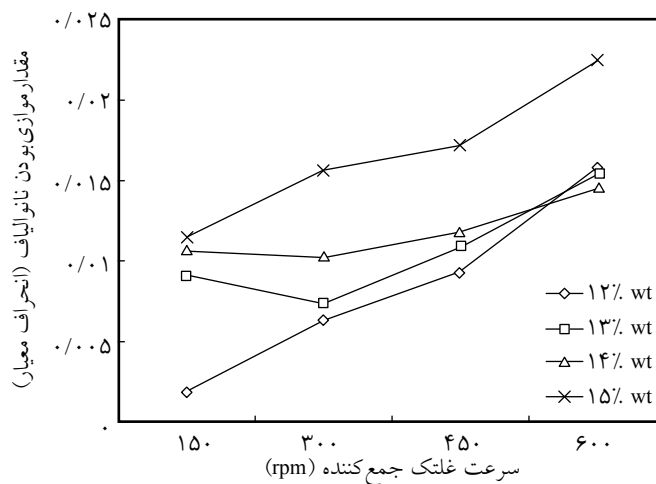
به طوری که  $P$  طیف توان دوبعدی یک تصویر  $N \times N$  (متغیر از  $1-N/2$ ) و  $\theta$  (متغیر از  $0-\pi$ ) مؤلفه های متغیر مختصات قطبی اند.  $A(\theta)$  تابع تجمعی طیف توان در راستای  $\theta$  (= طیف زاویه ای توان) است. در این پژوهش، برای مقایسه دسته های مختلف نانوالیاف از نظر مقدار موازی بودن و چگالی الیاف موازی شده، از APS نرمال شده تصاویر میکروسکوپ نوری نانوالیاف موازی استفاده شد. برای محاسبه  $P(u, v)$  از الگوریتم FFT و برنامه نویسی در محیط MATLAB استفاده شد.

شکل ۲، نشان دهنده تصویر شبکه ای از خطوط افقی و عمودی به همراه طیف زاویه ای توان (APS) نرمال به دست آمده از این برنامه است. وجود خط های عمودی و افقی در هر تصویر باعث ایجاد دو پیک مشخص، به ترتیب در زوایای  $\pi/2$  و  $\pi$  شده است. زاویه هر پیک بیانگر وجود تکرار در آن زاویه (جهت گیری الیاف در آن زاویه) و مساحت زیر هر پیک نشان دهنده شدت این تکرار (چگالی خط های دارای این زاویه) است.

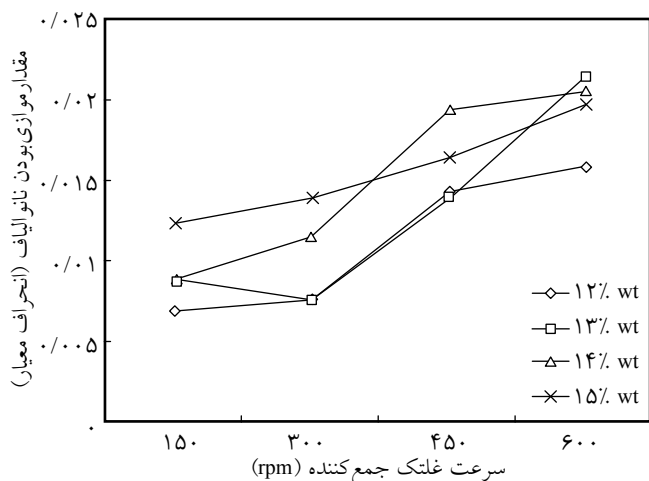
تجزیه و تحلیل تصویر شبکه خطوط با استفاده از برنامه نویسی



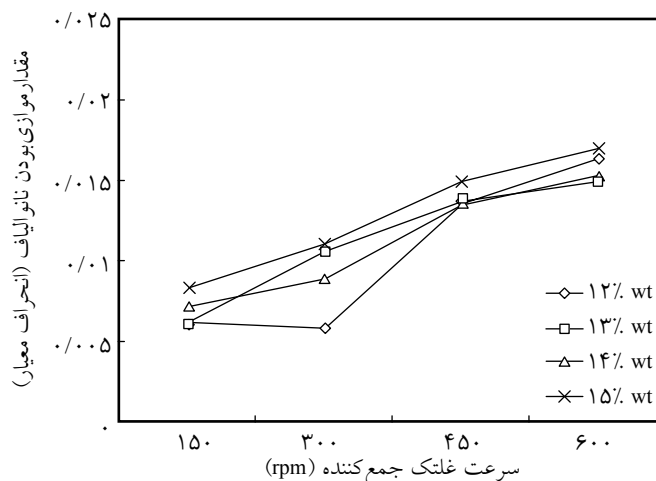
(ب)



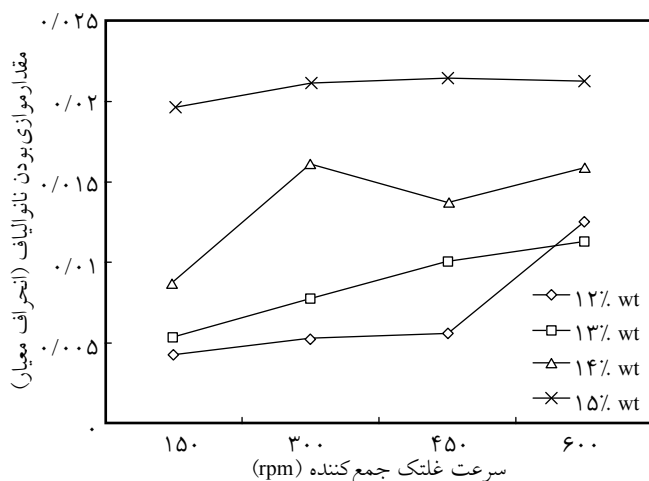
(الف)



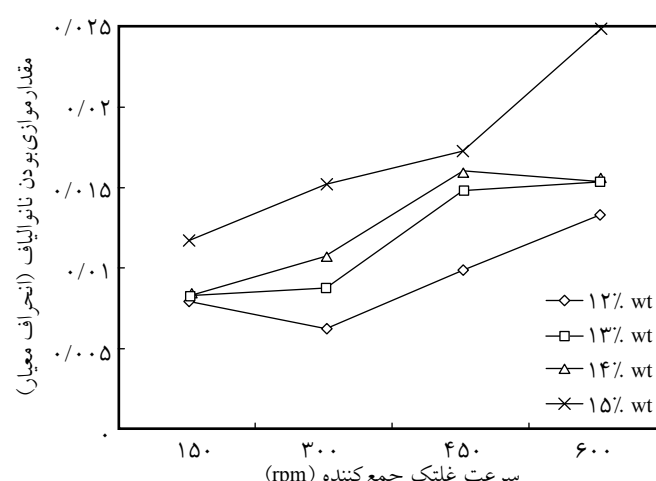
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۳- اثر سرعت برداشت بر مقدار موازی بودن نانوالیاف در غلظت‌ها و ولتاژهای مختلف: (الف) ۷، (ب) ۸، (ج) ۹، (د) ۱۰، (ه) ۱۱ و (و) ۱۲ kV

جدول ۱- اثر سرعت برداشت بر مقدار موازی بودن نانوالیاف در غلظت‌ها و ولتاژهای مختلف (در نتایج آزمون دانکن در سطح معنی دار بودن ۹۵٪ روی مقادیر انحراف معیار به دست آمده از پردازش تصویر، در هر ستون چهارتایی دسته‌بندی گروه‌هایی که با هم اختلاف معنی دار دارند، از ۱ تا ۴ مشخص شده است).

غلظت (%wt)	سرعت متوسط (rpm)	ولتاژ ۷ kV در آزمون دانکن	ولتاژ ۸ kV در آزمون دانکن	ولتاژ ۹ kV در آزمون دانکن	ولتاژ ۱۰ kV در آزمون دانکن	ولتاژ ۱۱ kV در آزمون دانکن	ولتاژ ۱۲ kV در آزمون دانکن
۱۲	۱۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۲
	۳۰۰	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۵۲
	۴۵۰	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۵۵
	۶۰۰	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۲۴
۱۳	۱۵۰	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۵۳
	۳۰۰	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۷۳	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۷
	۴۵۰	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۰۰
	۶۰۰	۰/۰۱۵۳	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۴۵	۰/۰۲۰۹	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۱۲
۱۴	۱۵۰	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۶
	۳۰۰	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۶۰
	۴۵۰	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۳۶
	۶۰۰	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۴۸	۰/۰۲۰۱	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۵۷
۱۵	۱۵۰	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۹۴
	۳۰۰	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۴۹	۰/۰۲۰۹
	۴۵۰	۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۱۲
	۶۰۰	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۲۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۹۳	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۱۰

می‌رسد، در بیشترین غلظت به کار رفته، مقدار موازی بودن نانوالیاف افزایش داشته است، به طوری که بیشترین مقدار موازی بودن در غلظت ۱۵ wt% و ولتاژ ۱۱ kV (مقدار انحراف معیار برابر با ۰/۰۲۴۳) حاصل شده است.

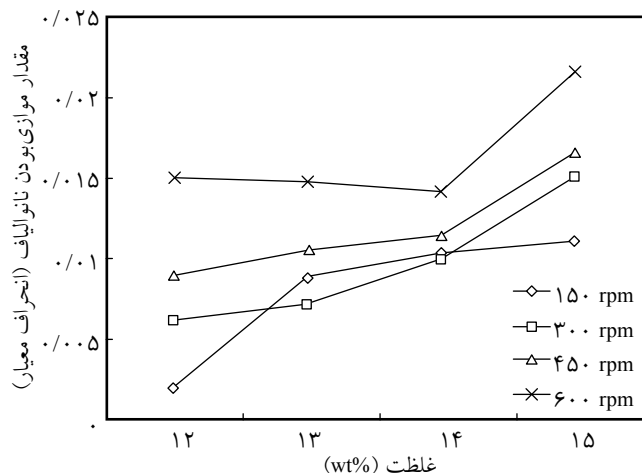
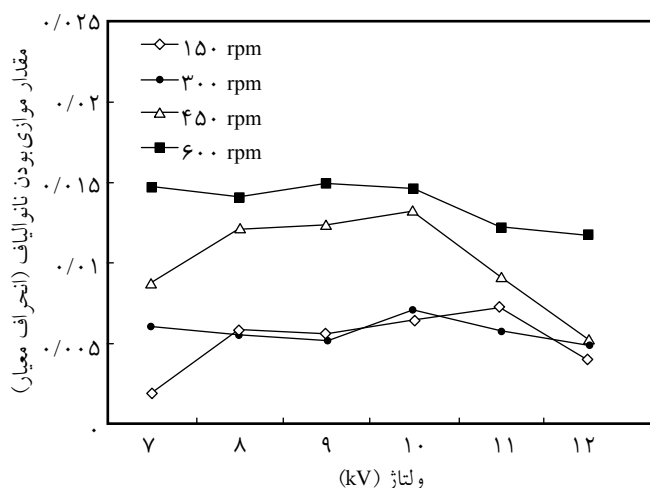
برای مشاهده بهتر روند تغییرات، نتایج مربوط به نمونه‌های رسیده شده در غلظت‌ها و سرعت‌های برداشت مختلف و ولتاژ ثابت ۱۱ kV (که بیشترین موازی بودن در آن رخ داده است)، در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش غلظت، مقاومت جت در برابر کشش ناشی از اعمال ولتاژ افزایش یافته و ناپایداری‌های خمشی در جت کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به هم‌راستایی بیشتر نانوالیاف کمک کند.

برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر مقدار اثر غلظت محلول پلیمر بر مقدار موازی بودن نانوالیاف در سرعت‌های برداشت و ولتاژهای مختلف، نتایج آزمون دانکن در جدول ۲ ارائه شده است.

دسته‌بندی گروه‌هایی که با هم اختلاف معنی دار دارند، از ۱ تا ۴ مشخص شده است. در یک ستون از جدول اگر داده‌ها اختلاف معنی داری نداشته باشند در یک گروه قرار داده شده‌اند.

نتایج حاکی از آن است که سرعت غلتک جمع‌کننده چرخان، اثر قابل توجهی بر مقدار موازی بودن نانوالیاف دارد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جمع‌کننده (در غلظت و ولتاژ ثابت)، مقدار موازی بودن نانوالیاف افزایش می‌یابد. این روند در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود و با افزایش غلظت و کاهش ولتاژ، بیشتر می‌شود. در سرعت‌های زیاد به دلیل اعمال کشش بیشتر، نانوالیاف آرایش یافتگی بیشتری کسب می‌کنند و در نتیجه، الیاف منظم‌تر و متراکم‌تری در کنار هم حاصل می‌شود. با این حال، نتایج حاصل از آزمون دانکن نشان می‌دهد، در ولتاژ ۱۲ kV، افزایش سرعت برداشت اثر کمتری بر مقدار موازی بودن نانوالیاف دارد.

بر اساس انحراف معیار به دست آمده از پردازش تصویر به نظر



شکل ۴- اثر غلظت محلول پلیمر بر مقدار موزی بودن نانوالیاف در سرعت‌های برداشت مختلف و ولتاژ ۱۱ kV.

شکل ۵- اثر تغییر ولتاژ بر مقدار موزی بودن نانوالیاف الکتروریسی شده از محلول پلیمری با غلظت ۱۲ wt% در سرعت‌های برداشت مختلف.

جدول ۲- اثر غلظت محلول پلیمر بر مقدار موزی بودن نانوالیاف در سرعت‌های برداشت و ولتاژهای مختلف (در نتایج آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۹۵٪ روی مقادیر انحراف معیار به دست آمده از پردازش تصویر، در هر ستون چهارتایی دسته‌بندی گروه‌هایی که با هم اختلاف معنی‌دار دارند، از ۱ تا ۴ مشخص شده است).

آزمون دانکن	ولتاژ ۱۲ kV در واریانس	آزمون دانکن	ولتاژ ۱۱ kV در واریانس	آزمون دانکن	ولتاژ ۱۰ kV در واریانس	آزمون دانکن	ولتاژ ۹ kV در واریانس	آزمون دانکن	ولتاژ ۸ kV در واریانس	آزمون دانکن	ولتاژ ۷ kV در واریانس	غلظت (%wt)	سرعت متوسط (rpm)
۱	۰/۰۰۴۲	۱	۰/۰۰۷۷	۱	۰/۰۰۶۸	۱	۰/۰۰۵۹	۱	۰/۰۰۶۲	۱	۰/۰۰۲۰	۱۲	۱۵۰
۱	۰/۰۰۵۳	۱	۰/۰۰۸۱	۱	۰/۰۰۸۶	۱	۰/۰۰۵۸	۱	۰/۰۰۶۶	۲	۰/۰۰۹۱	۱۴	
۲	۰/۰۰۸۶	۱	۰/۰۰۸۱	۱	۰/۰۰۸۷	۱	۰/۰۰۶۸	۱ و ۲	۰/۰۰۷۴	۲	۰/۰۱۰۷	۱۴	
۳	۰/۰۱۹۴	۲	۰/۰۱۱۴	۲	۰/۰۱۲۱	۲	۰/۰۰۷۹	۲	۰/۰۰۸۱	۲	۰/۰۱۱۵	۱۵	
۱	۰/۰۰۵۲	۱	۰/۰۰۶۱	۱	۰/۰۰۷۵	۱	۰/۰۰۵۵	۱	۰/۰۰۵۹	۱	۰/۰۰۶۴	۱۲	۳۰۰
۱	۰/۰۰۷۷	۱	۰/۰۰۸۵	۱	۰/۰۰۷۴	۲	۰/۰۱۰۲	۱	۰/۰۰۷۳	۱	۰/۰۰۷۴	۱۳	
۲	۰/۰۱۶۰	۲	۰/۰۱۰۴	۲	۰/۰۱۱۲	۱ و ۲	۰/۰۰۸۵	۱	۰/۰۰۷۵	۲	۰/۰۱۰۳	۱۴	
۳	۰/۰۲۰۹	۳	۰/۰۱۴۹	۲	۰/۰۱۳۶	۲	۰/۰۱۰۶	۲	۰/۰۱۴۸	۳	۰/۰۱۵۶	۱۵	
۱	۰/۰۰۵۵	۱	۰/۰۰۹۷	۱	۰/۰۱۴۰	۱	۰/۰۱۳۱	۱	۰/۰۱۲۸	۱	۰/۰۰۹۳	۱۲	۴۵۰
۲	۰/۰۱۰۰	۲	۰/۰۱۴۴	۱	۰/۰۱۳۶	۱	۰/۰۱۳۳	۱	۰/۰۱۱۹	۱	۰/۰۱۰۹	۱۳	
۳	۰/۰۱۳۶	۲	۰/۰۱۵۶	۲	۰/۰۱۸۹	۱	۰/۰۱۳۱	۱	۰/۰۰۹۴	۱	۰/۰۱۱۸	۱۴	
۴	۰/۰۲۱۲	۲	۰/۰۱۶۹	۲	۰/۰۱۶۱	۱	۰/۰۱۴۵	۲	۰/۰۱۸۶	۲	۰/۰۱۷۲	۱۵	
۱	۰/۰۱۲۴	۱	۰/۰۱۳۰	۱	۰/۰۱۵۵	۱ و ۲	۰/۰۱۵۸	۱	۰/۰۱۴۹	۱	۰/۰۱۵۶	۱۲	۶۰۰
۱	۰/۰۱۱۲	۱	۰/۰۱۵۲	۲	۰/۰۲۰۹	۱	۰/۰۱۴۵	۱	۰/۰۱۳۴	۱	۰/۰۱۵۳	۱۳	
۲	۰/۰۱۵۷	۱	۰/۰۱۵۰	۲	۰/۰۲۰۱	۱	۰/۰۱۴۸	۱	۰/۰۱۳۷	۱	۰/۰۱۴۶	۱۴	
۳	۰/۰۲۱۰	۲	۰/۰۲۴۳	۲	۰/۰۱۹۳	۲	۰/۰۱۶۵	۲	۰/۰۲۲۳	۲	۰/۰۲۲۴	۱۵	



جدول ۳- اثر ولتاژ بر مقدار موازی بودن نانوالیاف برای غلظت ۱۲ wt% در سرعت های برداشت مختلف (نتایج آزمون دانکن در سطح معنی دار بودن ۹۵٪ اثر ولتاژ را در چهار گروه دسته بندی کرده و در هر ستون دسته بندی گروه هایی که با هم اختلاف معنی دار دارند، از ۱ تا ۴ مشخص شده اند).

غلظت (wt%)	ولتاژ (kV)	آزمون واریانس در سرعت ۱۵۰ rpm	آزمون دانکن	واریانس در سرعت ۳۰۰ rpm	آزمون دانکن	واریانس در سرعت ۴۵۰ rpm	آزمون دانکن	واریانس در سرعت ۶۰۰ rpm	آزمون دانکن
۱۲	۷	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۶۴	۱	۰/۰۰۰۹۳	۲	۰/۰۱۵۶	۲
	۸	۰/۰۰۰۶۲	۳	۰/۰۰۰۵۹	۱	۰/۰۱۲۸	۳	۰/۰۱۴۹	۲
	۹	۰/۰۰۰۵۹	۳	۰/۰۰۰۵۵	۱	۰/۰۱۳۱	۳	۰/۰۱۵۸	۲
	۱۰	۰/۰۰۰۶۸	۳	۰/۰۰۰۷۵	۲	۰/۰۱۴۰	۴	۰/۰۱۵۵	۲
	۱۱	۰/۰۰۰۷۷	۴	۰/۰۰۰۶۱	۱	۰/۰۰۰۹۷	۲	۰/۰۱۳۰	۱
	۱۲	۰/۰۰۰۴۲	۲	۰/۰۰۰۵۲	۱	۰/۰۰۰۵۵	۱	۰/۰۱۲۴	۱

سرعت های برداشت کمتر، کشش کمتری به نانوالیاف وارد می شود. همین موضوع موجب کاهش موازی بودن دسته نانوالیاف در مقایسه با سرعت های برداشت بیشتر می شود. با توجه به افزایش ناپایداری های

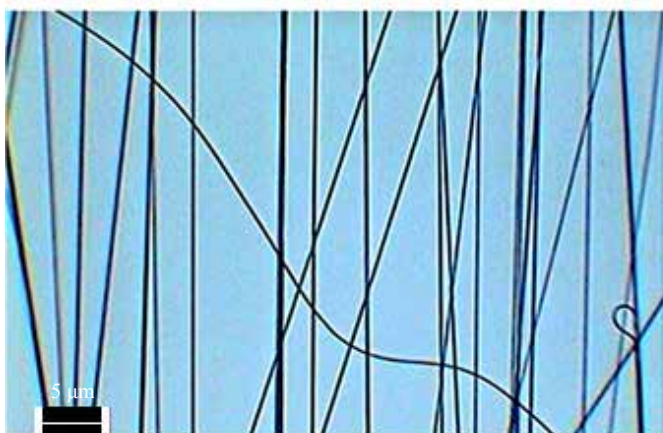
بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت، هر دو عامل غلظت محلول و سرعت برداشت (rpm) نقش قابل توجهی در افزایش موازی بودن نانوالیاف ایفا می کنند. همان طور که بیان شد، در



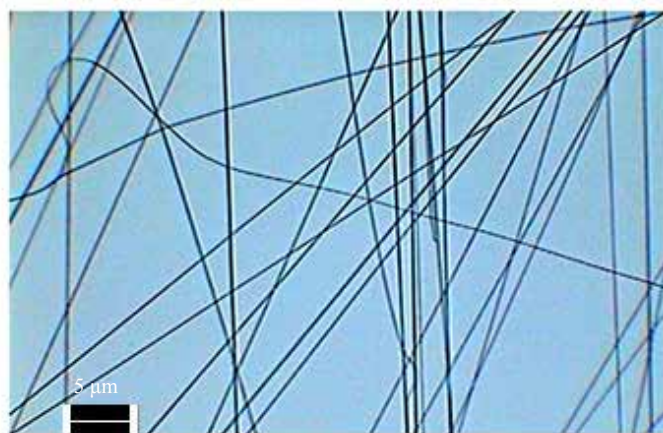
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نوری (با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر) نانوالیاف ریسیده شده از محلول ۱۵ wt% در ولتاژ ۱۱ kV و سرعت های برداشت مختلف: (الف) ۱۵۰ rpm (انحراف معیار ۰/۰۱۱۴)، (ب) ۳۰۰ rpm (انحراف معیار ۰/۰۱۴۹)، (ج) ۴۵۰ rpm (انحراف معیار ۰/۰۱۶۹) و (د) ۶۰۰ rpm (انحراف معیار ۰/۰۲۴۳).

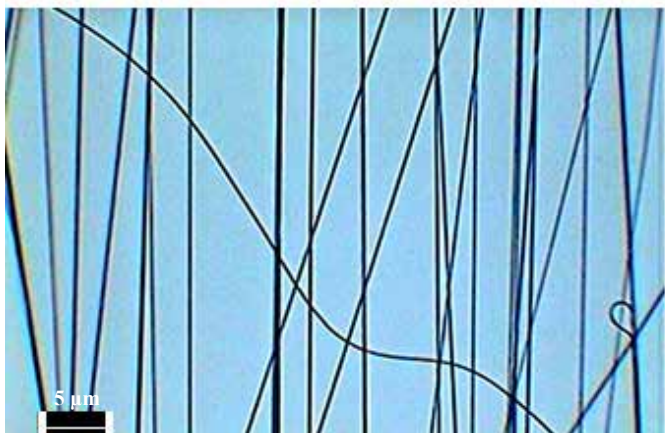




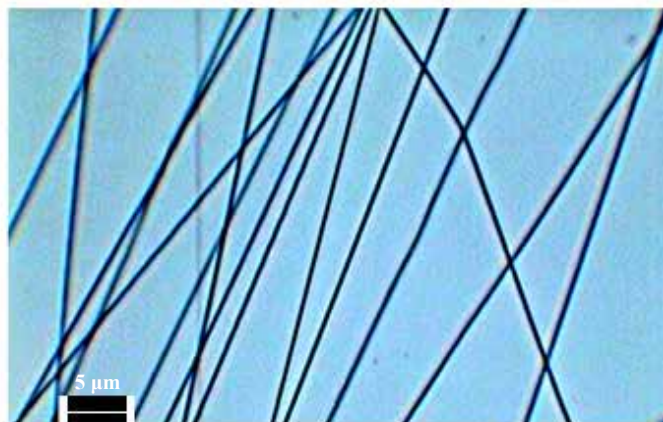
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ نوری (با بزرگ‌نمایی ۴۰۰ برابر) نانوالیاف رسییده شده در ولتاژ ۱۱ kV و سرعت برداشت ۶۰۰ rpm از محلول‌های پلیمری با غلظت‌های متفاوت: (الف) ۱۲ wt% (انحراف معیار ۰/۰۱۳۰)، (ب) ۱۳ wt% (انحراف معیار ۰/۰۱۵۰)، (ج) ۱۴ wt% (انحراف معیار ۰/۰۱۵۲) و (د) ۱۵ wt% (انحراف معیار ۰/۰۲۴۳).

میکروسکوپ نوری نانوالیاف رسییده شده از محلول ۱۵ wt% در ولتاژ ۱۱ kV (بیشترین مقدار موازی بودن الیاف، در این غلظت مشاهده شد) و سرعت‌های برداشت مختلف، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برداشت، هم‌راستایی الیاف افزایش می‌یابد. مقدار واریانس (انحراف معیار) به‌دست آمده برای هر عکس با کمک پردازش تصویری که معیاری از مقدار آرایش‌یافتگی نانوالیاف است، نیز در شکل ۶ بیان شده است. عدد واریانس بزرگ‌تر به معنای موازی بودن بیشتر نانوالیاف است.

همان‌طور که گفته شد، غلظت محلول پلیمر اثر قابل توجهی بر مقدار موازی بودن نانوالیاف دارد. برای مشاهده اثر مزبور، تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های رسییده شده در غلظت‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. از آنجا که بیشترین مقدار موازی بودن نانوالیاف در ولتاژ ۱۱ kV و سرعت برداشت ۶۰۰ rpm دیده شد،

خمشی در اثر افزایش ولتاژ انتظار می‌رود، مقدار موازی بودن کاهش یابد. اما آزمون‌های تجربی بیانگر این موضوع است که با افزایش ولتاژ، ابتدا موازی بودن افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

به نظر می‌رسد، با افزایش ولتاژ ابتدا به علت افزایش دوقطبی شدن غلتک جمع‌کننده، شدت جذب الیاف به وسیله بار سطحی غلتک افزایش یافته و این مسئله سبب افزایش موازی بودن می‌شود. اما با بیشتر شدن ولتاژ، ناپایداری‌های خمشی غالب شده و سبب کاهش مقدار موازی بودن می‌شود. برای مشاهده روند کلی اثر ولتاژ بر مقدار موازی بودن نانوالیاف، نتایج مربوط به موازی بودن نانوالیاف حاصل از الکترورسی محلول پلیمر با غلظت ۱۲ wt% در سرعت‌های برداشت و ولتاژهای مختلف به عنوان نمونه، در شکل ۵ نشان داده شده است. داده‌های مربوط به شکل ۵ در جدول ۳ همراه با نتایج آزمون دانکن گزارش شده است.

برای مشاهده اثر سرعت برداشت بر هم‌راستایی نانوالیاف، تصاویر

## نتیجه گیری

در این پژوهش، از دو نازل در نزدیک یک غلتک جمع کننده چرخان برای جمع آوری نانوالیاف موازی استفاده شد و شرایط بهینه برای کسب بیشترین هم راستایی در نانوالیاف معین شد. با بررسی نتایج به نظر می رسد، با افزایش غلظت از ۱۲٪wt به ۱۵٪wt (تقریباً در هر ولتاژ و سرعت برداشت ثابت)، مقدار موازی بودن الیاف افزایش می یابد. افزون بر این، سرعت غلتک جمع کننده چرخان، اثر قابل توجهی بر مقدار موازی بودن نانوالیاف دارد. نمودارها و تصاویر میکروسکوپ نوری نانوالیاف مؤید این مطلب هستند که بیشترین موازی بودن نانوالیاف در غلظت ۱۵٪wt، ولتاژ ۱۱ kV و سرعت برداشت ۶۰۰ rpm حاصل شده است.

بنابراین، نانوالیاف ریسیده شده در این شرایط در شکل ۷ با هم مقایسه شده اند.

مطابق شکل ۷، با افزایش غلظت محلول پلیمر، هم راستایی الیاف افزایش می یابد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که غلظت باید در محدوده ای تغییر کند که محلول پلیمر قابلیت الکتروریسی داشته باشد، به طوری که نانوالیاف ریسیده شده دارای ظاهری کاملاً یک دست و فاقد عیوب دانه تسییحی باشند. بدیهی است که محلول های بسیار رقیق یا بسیار غلیظ نمی توانند الکتروریسی شوند. شایان ذکر است، کاهش بیش از حد فاصله دو نازل سبب چسبیدن نانوالیاف به نوک نازل ها می شود، این در حالی است که افزایش بیش از حد فاصله دو نازل موجب مختل شدن پیوستگی در ریسندگی و در نهایت قطع فرایند الکتروریسی می شود.

## مراجع

- Ruckh T.T., Kumar K., Kipper M.J., and Popat K.C., Osteogenic Differentiation of Bone Marrow Stromal Cells on Poly( $\epsilon$ -caprolactone) Nanofiber Scaffolds, *Acta Biomaterialia*, **6**, 2949-2959, 2010.
- Cooper A., Bhattarai N., and Zhang M., Fabrication and Cellular Compatibility of Aligned Chitosan-PCL Fibers for Nerve Tissue Regeneration, *Carbohydr. Polym.*, **85**, 149-156, 2011.
- Yeganegi M., Kandel R.A., and Santerre J.P., Characterization of a Biodegradable Electrospun Polyurethane Nanofiber Scaffold: Mechanical Properties and Cytotoxicity, *Acta Biomaterialia*, **6**, 3847-3855, 2010.
- Shalumon K.T., Binulal N.S., Selvamurugan N., Nair S.V., Menona D., Furuike T., Tamura H., and Jayakumar R., Electrospinning of Carboxymethyl Chitin/Poly(vinyl alcohol) Nanofibrous Scaffolds for Tissue Engineering Applications, *Carbohydr. Polym.*, **77**, 863-869, 2009.
- Bal S., Experimental Study of Mechanical and Electrical Properties of Carbon Nanofiber/Epoxy Composites, *Mater. Design*, **31**, 2406-2413, 2010.
- Lee H., Mall S., He P., Shi D., Narasimhadevara S., Yun Y.H., Shanov V., and Schulz M.J., Characterization of Carbon Nanotube/Nanofiber-Reinforced Polymer Composites Using an Instrumented Indentation Technique, *Compos., Part B: Eng.*, **38**, 58-65, 2007.
- Yun K.M., Suryamas A.B., Iskandar F., Bao L., Niinuma H., and Okuyama K., Morphology Optimization of Polymer Nanofiber for Applications in Aerosol Particle Filtration, *Separat. Purificat. Technol.*, **75**, 340-345, 2010.
- Hung C.H. and Leung W.W.F., Filtration of Nano-aerosol Using Nanofiber Filter under Low Peclet Number and Transitional Flow Regime, *Separat. Purificat. Technol.*, **79**, 34-42, 2011.
- Zhang Q., Welch J., Park H., Wu C.Y., Sigmund W., and Marinissen J.C.M., Improvement in Nanofiber Filtration by Multiple Thin Layers of Nanofiber Mats, *J. Aerosol Sci.*, **41**, 230-236, 2010.
- Kumar S., Lively B., Sun L.L., Li B., and Zhong W.H., Highly Dispersed and Electrically Conductive Polycarbonate/Oxidized Carbon Nanofiber Composites for Electrostatic Dissipation Applications, *Carbon*, **48**, 3846-3857, 2010.
- Moon J., Park J.A., Lee S.J., Zyung T., and Kim I.D., Pd-doped TiO<sub>2</sub> Nanofiber Networks for Gas Sensor Applications, *Sensor. Actuat. BChem.*, **149**, 301-305, 2010.
- Shabani I., Hasani-Sadrabadi M.M., Haddadi-Asl V., and Soleimani M., Nanofiber-based Polyelectrolytes as Novel Membranes for Fuel Cell Applications, *J. Membrane Sci.*, **368**, 233-240, 2011.
- Hwang K., Kwon B., and Byun H., Preparation of PVDF Nanofiber Membranes by Electrospinning and their Use as Second-

- ary Battery Separators, *J. Membrane Sci.*, **378**, 111-116, 2011.
14. Sill T.J. and von Recum H.A., Electrospinning: Applications in Drug Delivery and Tissue Engineering, *Biomaterials*, **29**, 1989-2006, 2008.
  15. Agarwal S., Wendorff J.H., and Greiner A., Use of Electrospinning Technique for Biomedical Applications, *Polymer*, **49**, 5603-5621, 2008.
  16. Rujitanaroj P., Pimpha N., and Supaphol P., Wound-dressing Materials with Antibacterial Activity from Electrospun Gelatin Fiber Mats Containing Silver Nanoparticles, *Polymer*, **49**, 4723-4732, 2008.
  17. Shalumon K.T., Anulekha K.H., Nair S.V., Nair S.V., Chennazhi K.P., and Jayakumar R., Sodium Alginate/Poly(vinyl alcohol)/Nano ZnO Composite Nanofibers for Antibacterial Wound Dressings, *Int. J. Biolog. Macromol.*, **49**, 247-254, 2011.
  18. Fennessey S.F. and Farris R.J., Fabrication of Aligned and Molecularly Oriented Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers and the Mechanical Behavior of their Twisted Yarns, *Polymer*, **45**, 4217-4225, 2004.
  19. Gu S.Y., Ren J. and Wu Q.L., Preparation and Structures of Electrospun PAN Nanofibers as a Precursor of Carbon Nanofibers, *Synth. Metal.*, **155**, 157-161, 2005.
  20. Li D., Wang Y., and Xia Y., Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays, *Nano. Lett.*, **3**, 1167-1171, 2003.
  21. Dabirian F. and Hosseini Ravandi S.A., Production and Some Characteristics of Bulk Nanofibers Layers by Manipulation of Electrospinning System, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **21**, 307-313, 2008.
  22. Pan H., Li L., Hu L., and Cui X., Continuous Aligned Polymer Fibers Produced by a Modified Electrospinning Method, *Polymer*, **47**, 4901-4904, 2006.
  23. Sadrejahani M., Hosseini Ravandi S.A., and Dabirian F., Microstructural Characterization of Aligned PAN Nanofibers Collected by Hot Air Flow in Electrospinning Method, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **23**, 271-281, 2010.
  24. Hosseini S.A. and Toriumi K., Fourier Transform Analysis of Plain Weave Fabric Appearance, *Text. Res. J.*, **65**, 676-683, 1995.