



تولید لایه‌های حجیم نانوالیاف با اعمال تغییراتی در روش الکتروریسی و بررسی برخی از مشخصه‌های آنها

فرزاد دبیریان، سید عبدالکریم حسینی راوندی*

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، گروه پژوهشی علوم و تکنولوژی الیاف، صندوق پستی ۸۴۱۵۶

دریافت: ۸۶/۱۲/۷، پذیرش: ۸۷/۳

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، ارائه روشی جدید برای تولید لایه‌های حجیم تشکیل شده از نانوالیاف است. در این روش اثر برخی از عوامل الکتروریسی از قبیل سرعت برداشت، ولتاژ اعمالی و غلظت محلول پلیمری بر چگالی لایه و هم چنین ارزیابی خواص فشاری لایه تولید شده در شرایط بهینه الکتروریسی بررسی شد. با افزایش غلظت محلول پلیمر، چگالی لایه کاهش یافت و افزایش ولتاژ و سرعت برداشت سبب افزایش چگالی لایه شد. در این پژوهش، سبک‌ترین لایه با چگالی $0.000374215 \text{ g/cm}^3$ و $99/98\%$ درصد تخلخل از محلول پلیمری با غلظت ۱۵ درصد و سرعت برداشت 4.24 m/min در ولتاژ 8 kV به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

نانوالیاف، الکتروریسی،
دو نازل، حجیم،
پلی آکریلونیتریل

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

hoseinir@cc.iut.ac.ir

Production and Some Characteristics of Bulk Nanofibers Layers by Manipulation of Electrospinning System

F. Dabirian and S.A. Hosseini Ravandi*

Research Center of Science and Fibers Technology, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156, Isfahan, Iran

Received 26 February 2008; accepted 24 September 2008

Abstract

The main purpose of this study is to introduce a new method for nanofibers by bulk layer production. In the present method the effect of some parameters including take-up velocity, applied voltage, polymer solution concentration on density of produced layers is investigated. The compression characteristic of nanofiber layers produced under optimum electrospinning is also investigated. It was shown that the layer density decreased by increasing polymer solution density while an increase in applied voltage and take-up velocity increased layer density. The lightest layer with density of $0.000374215 \text{ g/cm}^3$ with 99/98% porosity are produced by this method at 15% polymer solution concentration with take-up velocity equal to 4.24 m/min and 8 kV voltages.

Key Words

nanofiber, electrospinning,
two nozzle, bulk,
polyacrylonitrile

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hoseinir@cc.iut.ac.ir

مقدمه

الکتروریسی روشی شناخته شده برای تولید نانوالیاف است و به کمک این روش می‌توان پلیمرهای مختلفی را رسید. نانوالیاف به علت ظرافت و سطح ویژه زیاد کاربردهای متعددی دارند که به عنوان مثال می‌توان به استفاده از این الیاف در کامپوزیت‌ها [۱]، ساخت صافی‌ها [۲]، الیاف رسانا [۳، ۴]، حس‌گرها [۵، ۶]، الیاف سرامیکی [۷]، داربست بافت [۸]، حمل دارو [۹] و زخم‌پوش‌ها [۱۰] اشاره کرد. برای برخی از کاربردها مانند مهندسی بافت نیاز به تولید لایه‌هایی با ضخامت و تخلخل بیشتر است [۱۱]. در روش‌های معمول الکتروریسی به دلیل متراکم شدن الیاف حین جمع‌آوری درصد تخلخل لایه الکتروریسی شده در حدود ۸۰-۳۰ درصد است [۱۲].

در این پژوهش، با استفاده از الکتروریسی با دو نازل با بارهای مخالف نخستین روش برای تولید لایه‌های حجیم تشکیل شده از نانوالیاف معرفی شده است. در این روش، از متراکم شدن و به هم چسبیدن الیاف جلوگیری شده و مسیر حرکت الیاف جمع‌آوری شده در فضای سه بعدی است. این موضوع سبب کاهش چگالی لایه و افزایش تخلخل می‌شود. در این پژوهش، نحوه تولید و جمع‌آوری لایه‌های حجیم، خواص برگشت‌پذیری و هم‌چنین عوامل مؤثر بر چگالی لایه شامل سرعت برداشت، ولتاژ به کار گرفته شده و غلظت محلول پلیمر تغییر داده شد و اثر هر یک بر چگالی لایه حاصل مورد بررسی قرار گرفت.

تجربی

مواد

پودر پلی‌آکریلونیتریل (PAN) تجاری با وزن مولکولی متوسط وزنی (\overline{M}_w) ۱۰۰۰۰۰ g/mol و وزن مولکولی متوسط عددی (\overline{M}_n) ۷۰۰۰۰ g/mol از شرکت پلی‌آکریل ایران و حلال DMF از شرکت Merk آلمان تهیه شد. محلول پلیمر در پنج غلظت ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی پلی‌آکریلونیتریل در حلال DMF در دمای محیط و هم‌زدن با سرعت ثابت تهیه و سپس برای تکمیل مرحله انحلال، محلول تهیه شده به مدت ۲h در دمای ۷۰°C قرار داده شد.

دستگاه‌ها

در این پژوهش، دوربین رقمی Sony مدل DCR-PC115E، ترازوی Shimadzu مدل AEN-Z10 و میکروسکوپ الکترون پویشی به کار گرفته شد.

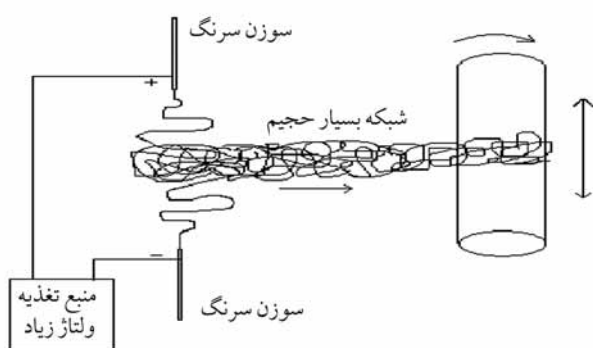
روش‌ها

تولید لایه حجیم

در این پژوهش، با استفاده از دو نازل با بارهای مخالف و حذف صفحه جمع‌کننده، شیوه جدیدی از الکتروریسی ابداع شد. در این روش از دو نازل در برابر هم استفاده می‌شود، یکی از نازل‌ها به قطب مثبت و دیگری به قطب منفی منبع تغذیه وصل می‌شود. در زمان الکتروریسی الیاف تولید شده به وسیله هر یک از نازل‌ها دارای بار هم‌نام با بار نازل رسیدگی می‌شوند. به دلیل این اختلاف بار، الیاف یک‌دیگر را در فاصله بین دو نازل جذب کرده و تخلیه بار می‌شوند [۱۳]. اگر حین فرایند الکتروریسی با استفاده از دو نازل، الیاف تخلیه شده که در ناحیه بین دو نازل جمع شده‌اند به طرف بیرون کشیده شوند، نانوالیاف الکتروریسی شده به شکل رشته‌ای در هم تنیده شده و پیوسته برداشت می‌شوند [۱۴]. با جمع‌آوری رشته‌های تولید شده، می‌توان لایه‌هایی با چگالی بسیار کم تولید کرد که در سامانه معمول الکتروریسی این امر مقدور نیست. برای جمع‌آوری رشته تشکیل شده، از غلتک برداشت که دارای حرکت رفت و برگشت است، استفاده می‌شود. رشته تشکیل شده به شکل تصادفی روی غلتک جمع‌آوری شده و بدین ترتیب لایه‌ای حجیم از نانوالیاف روی غلتک تشکیل می‌شود. در شکل ۱ طرح کلی نحوه تولید لایه و در شکل ۲ تصاویری از رشته در زمان تشکیل و پس از آن نشان داده شده است.

اندازه‌گیری چگالی لایه حجیم

برای محاسبه چگالی لایه تولید شده ابتدا از غلتک برداشت بدون لایه و همراه با لایه تشکیل شده، با استفاده از مقیاس اندازه‌گیری، به کمک دوربین رقمی Sony تصاویری تهیه شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار موتیک و با قیاس کردن با مقیاس تصویر، قطر غلتک در ۱۰۰ ناحیه



شکل ۱- طرح کلی نحوه تولید لایه.

اعمالی و غلظت محلول پلیمری بر چگالی لایه تشکیل شده، برای هر یک از عوامل پنج حالت، در محدوده میسر ریسندگی، در نظر گرفته شد که به قرار زیر است:

سرعت برداشت

برای تعیین اثر سرعت برداشت بر چگالی وزنی لایه، رشته نانوالیاف تشکیل شده با پنج سرعت ۲/۱۲، ۳/۱۸، ۴/۲۴، ۶/۳۸ و ۸/۴۸ m/min به وسیله غلتک برداشت جمع‌آوری شد. در هر یک از سرعت‌های یاد شده برای ریسندگی از محلول پلیمر با غلظت ۱۵ درصد استفاده شد. فاصله دو نازل از هم و ولتاژ اعمالی، به ترتیب ۱۰ cm و ۸ kV انتخاب شد.

ولتاژ

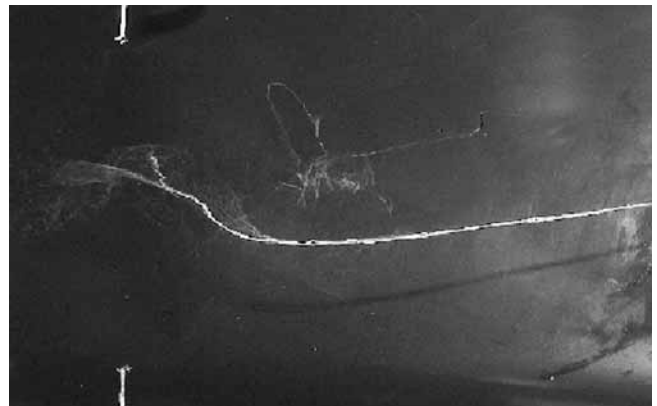
برای بررسی اثر ولتاژ بر چگالی لایه تشکیل شده پنج ولتاژ ۸، ۹/۵، ۱۰/۷۵ و ۱۲ kV انتخاب شد. فاصله دو نازل از هم ۱۰ cm، سرعت خطی غلتک برداشت ۴/۲۴ m/min و از محلول ۱۵ درصد برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد.

غلظت

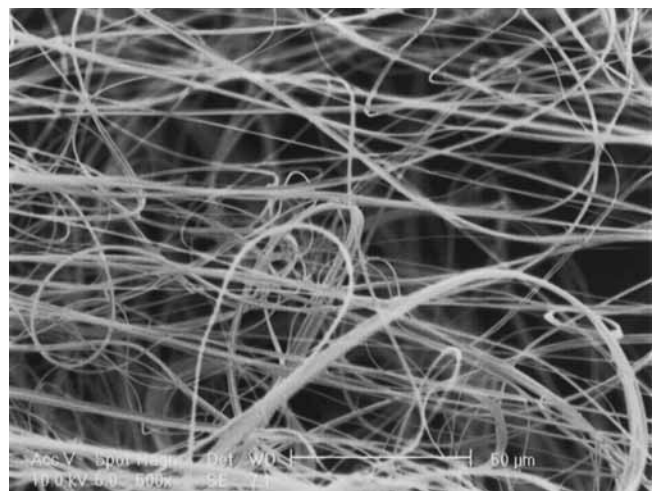
به منظور بررسی اثر غلظت محلول بر چگالی لایه، از پنج غلظت ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ درصد استفاده شد. برای تهیه نمونه‌ها در پنج غلظت مزبور فاصله دو نازل از هم ۱۰ cm، ولتاژ ۸ kV و سرعت خطی غلتک برداشت ۴/۲۴ m/min انتخاب شد.

شرایط تهیه نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری و برگشت‌پذیری لایه‌ها

برای اندازه‌گیری خواص فشاری و برگشت‌پذیری لایه‌های تولید شده ابتدا نیاز بود که لایه‌های مسطح تولید شود. به این منظور ۸ کارت با ابعاد $8 \times 5 \times 4$ cm روی غلتک برداشت نصب و الیاف روی آنها جمع‌آوری شدند. فاصله بین دو نازل از هم ۱۰ cm تنظیم شد. ولتاژ به کار گرفته شده ۸ kV و غلظت محلول پلیمری ۱۵ درصد بود. از غلتک برداشت با سرعت خطی ۴/۲۴ m/min برای جمع‌آوری الیاف استفاده شد. زمان تهیه نمونه ۳ h بود و برای مشابه بودن شرایط تولید نمونه‌ها، ۸ کارت روی غلتک برداشت نصب و همه آنها هم زمان پوشش داده شدند. سپس، با یک تیغ الیاف بین کارت‌ها به آرامی بریده و کارت‌ها از غلتک جدا شدند. با توجه به این که کناره‌های لایه تشکیل شده روی کارت به علت برش و جابه‌جایی آسیب می‌بینند و هم‌چنین به علت تفاوت تراکم الیاف در کناره‌های کارت با مرکز آن، از صفحه‌ای با ابعاد 7.6×2.6 cm برای اعمال فشار بر مرکز لایه استفاده شد. بعد از تولید نمونه‌ها تمام آنها به مدت ۲۴ h



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) تصویر رشته در زمان تشکیل و پس از آن تهیه شده به وسیله دوربین رقیمی و (ب) تصویر SEM از درون رشته.

اندازه‌گیری و سپس با استفاده از اختلاف قطر غلتک همراه با لایه و بدون لایه میانگین قطر لایه محاسبه شد. بنابراین با محاسبه تغییرات قطر، می‌توان حجم لایه تولید شده را محاسبه کرد. وزن لایه با استفاده از ترازو با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری و با تقسیم وزن بر حجم لایه، چگالی لایه محاسبه شد. برای دست‌یابی به یک لایه یکنواخت ابتدا لایه با طول ۲۵ cm تولید و سپس از ۱۰ cm وسط آن به عنوان نمونه برای اندازه‌گیری‌ها استفاده شد. برای هر یک از دسته‌ها ۵ نمونه تهیه و میانگین آنها به عنوان چگالی در نظر گرفته شد.

شرایط ریسندگی

به منظور مشخص کردن اثر هر یک از عوامل سرعت برداشت، ولتاژ

جدول ۱ - چگالی لایه تولید شده با سرعت‌های برداشت مختلف.

دسته‌های آماری	انحراف معیار	چگالی (g/cm ³)	سرعت برداشت (m/min)
۱	۰/۱۳۶۲۳۵	۰/۴۰۲۸۱۸	۲/۱۲
۱	۰/۰۰۹۰۱۷	۰/۴۱۲۳۵۸	۳/۱۸
۱	۰/۰۰۸۸۶۰	۰/۳۷۴۲۱۵	۴/۲۴
۲	۰/۰۱۱۷۰۵	۰/۵۸۶۳۵۶	۶/۳۸
۲	۰/۰۱۲۱۵۳	۱/۲۳۶۵۰۴	۸/۴۸

ساختار رشته، با افزایش سرعت برداشت را به خوبی در این تصاویر می‌توان مشاهده کرد. هم‌چنین، کشش ایجاد شده در رشته با افزایش سرعت، افزایش یافته و سبب پیچیده شدن فشرده رشته روی غلتک برداشت می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی لایه تولید شده در پنج سرعت در جدول ۱ آمده است. نتایج بیان‌گر این نکته است که سرعت ۴/۲۴ m/min برای جمع‌آوری الیاف مناسب‌تر از سایر سرعت‌هاست.

در بررسی اثر ولتاژ، همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ چگالی لایه افزایش می‌یابد. دلیل آن را این‌طور می‌توان بیان کرد که با افزایش ولتاژ، چگالی بار در سطح لیف افزایش یافته و در نتیجه، الیاف در فضای بین دو نازل با شدت بیشتری یک‌دیگر را جذب می‌کنند که این امر می‌تواند موجب متراکم‌تر شدن رشته الیاف شود. شایان ذکر است، افزایش بیش از حد ولتاژ سبب خروج چند جت از نازل شده و این امر موجب پراکندگی الیاف در هوا می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که ولتاژ ۸ kV برای تولید لایه‌های حجیم مناسب‌تر است.

جدول ۳، نتایج اندازه‌گیری چگالی لایه تولید شده از محلول پلیمری با غلظت‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ درصد PAN/DMF را نشان می‌دهد.

جدول ۲ - چگالی لایه‌های تهیه شده با ولتاژهای الکتروریسی مختلف.

دسته‌های آماری	انحراف معیار	چگالی (g/cm ³)	ولتاژ (kV)
۱	۰/۰۰۸۸۶۰	۰/۳۷۴۲۱۵	۸
۲	۰/۰۱۱۴۸۰	۰/۴۶۸۲۵۴	۸/۷۵
۳	۰/۰۱۰۱۶۴	۰/۶۶۶۵۶۵	۹/۵
۴	۰/۰۱۳۶۰۹	۰/۶۹۲۲۴۳۶	۱۰/۷۵
۵	۰/۰۲۸۳۲۰	۰/۵۳۹۸۶۴	۱۲

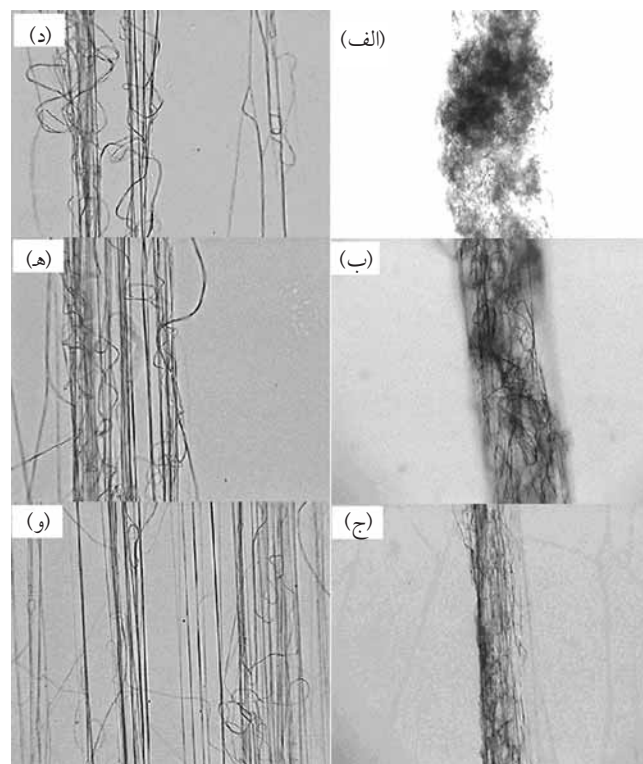
در شرایط استاندارد (۲۰±۲°C و رطوبت نسبی ۶۵ درصد) قرار داده شدند.

نتایج و بحث

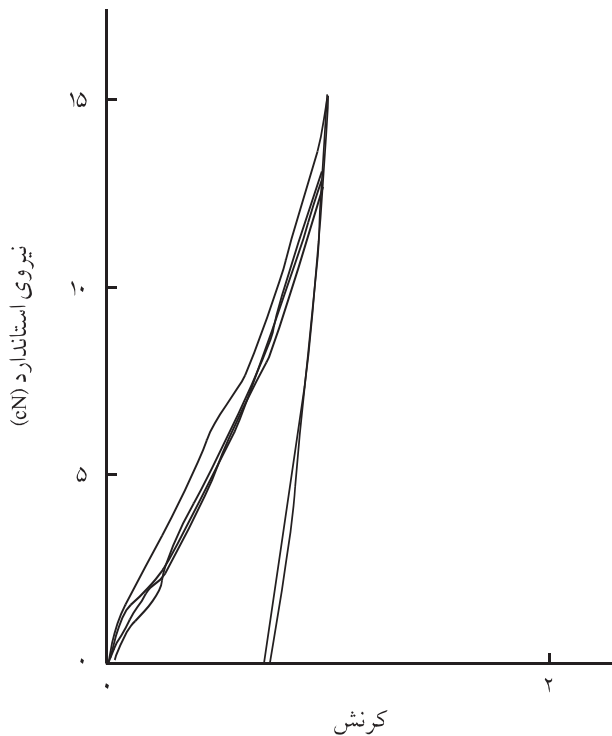
چگالی لایه

سرعت جمع‌آوری الیاف به وسیله غلتک برداشت روی تراکم لایه تشکیل شده اثر می‌گذارد. به همین دلیل، ابتدا سرعت مناسب برای جمع‌آوری رشته روی غلتک معین شد.

الیاف در سرعت کم در فضای بین دو نازل روی هم جمع شده و گلوله‌ای می‌شوند، این موضوع سبب فشردگی جزئی و تراکم الیاف می‌شود. در سرعت‌های زیاد به دلیل سرعت بیشتر و کشش ایجاد شده در رشته الیاف، ساختار رشته دارای آرایش یافتگی محوری شده و این آرایش یافتگی سبب می‌شود که الیاف منظم و متراکم‌تر کنار هم قرار گیرند. شکل ۳، تصاویری از رشته‌های جمع‌آوری شده در شرایط یکسان الکتروریسی و با سرعت‌های متفاوت را نشان می‌دهد که روی لام نصب شده روی غلتک جمع‌آوری شده است و به کمک میکروسکوپ نوری تصویربرداری شده است. آرایش یافتن الیاف در



شکل ۳ - تصاویری از رشته‌های جمع‌آوری شده در شرایط یکسان الکتروریسی با سرعت‌های متفاوت: (الف) ۴/۱، (ب) ۷، (ج) ۱۴، (د) ۲۸، (ه) ۴۲ و ۷۰ m/min.



شکل ۴ - نمودارهای رفت و برگشت در آزمایش برگشت پذیری.

ساختار این لایه از الیاف درهم پیچیده است، افزایش مقاومت خمشی، مانع از خمش و به هم چسبیدن الیاف در ساختار لایه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در غلظت‌های کم به دلیل ظریف شدن الیاف و کاهش سختی خمشی، الیاف در زمان تخلیه در فضای بین دو نازل به شکل فشرده‌تر جمع‌آوری و رشته متراکم‌تری را تشکیل می‌دهند، در نتیجه چگالی بیشتر می‌شود. بنابراین، لایه حاصل از محلول پلیمری با غلظت ۱۵ درصد چگالی کمتری دارد و به همین دلیل برای تولید لایه‌های حجیم مناسب‌تر است.

مقاومت فشاری و برگشت پذیری لایه‌های حجیم

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری و برگشت پذیری لایه‌ها از نرم‌افزار نصب شده روی دستگاه Zwick مدل ۶۰-۱۴۴۶ استفاده شد. ابتدا ضخامت لایه به کمک دستگاه Zwick به ۴ mm رسانده، سپس به مقدار

جدول ۳ - چگالی لایه تولید شده با غلظت‌های مختلف.

دسته‌های آماری	انحراف معیار	چگالی (g/cm ³)	غلظت محلول پلیمری (% wt)
۱	۰/۰۵۷۸۳۲	۱/۲۸۲۴۹۳	۱۱
۲	۰/۰۶۸۵۶۶	۰/۹۹۲۵۲۳	۱۲
۳	۰/۰۱۷۸۱۳	۰/۷۴۴۳۸۵	۱۳
۴	۰/۰۱۴۹۸۳	۰/۵۲۳۶۰۷	۱۴
۵	۰/۰۰۸۸۶۰	۰/۳۷۴۲۱۵	۱۵

مقادیر به دست آمده نشان دهنده کاهش چگالی با افزایش غلظت است. علت این امر را بدین شکل می‌توان بیان کرد که در الکتروریسی قطر الیاف به شدت وابسته به غلظت محلول پلیمری است و با ازدیاد غلظت افزایش می‌یابد. برای تعیین قطر از تصاویر SEM استفاده شد. قطر الیاف را برای ۱۰۰ لیف با استفاده از نرم‌افزار موتیک اندازه‌گیری و از میانگین آن به عنوان قطر الیاف استفاده شد. برای غلظت‌های ۱۱ و ۱۵ درصد به ترتیب میانگین قطری ۳۶۲ و ۷۲۳ nm به دست آمد. به نحوی که با افزایش ۴ درصدی غلظت محلول پلیمری، قطر الیاف حاصل دو برابر شده است. رابطه خمش لیف با سطح مقطع دایره‌ای به شکل زیر است:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi R^4}{4} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{EI}{M} \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = 4 \frac{M}{E\pi R^4} \quad (3)$$

در این معادله P شعاع انحناء، K مقدار خمیدگی، M ممان خمشی، E مدول، R قطر لیف، I ممان اینرسی و مقدار EI بیان‌گر سختی خمشی است. با توجه به معادله‌های گفته شده با افزایش قطر، مقاومت خمشی الیاف را که رابطه توان ۴ با قطر دارد، افزایش می‌یابد. با توجه به این که

جدول ۴ - برخی از خواص اندازه‌گیری شده حاصل از اندازه‌گیری خواص برگشت پذیری.

تغییر شکل (پلاستیک (%))	بازگشت کشسان (%)	انرژی تلف شده (N/mm)	انرژی برگشت (N/mm)	خطی بودن نمودار (%)	بازگشت پذیری (%)	انرژی فشاری (N/mm)	نیرو (cN)	پارامتر اندازه‌گیری شده
۷۳	۲۷	۰/۰۴۲	۰/۰۲	۸۷/۳۲	۳۲/۲۵	۰/۰۶۲	۱۴/۲۹	میانگین

بهینه است و نمونه‌ها در دو دسته قرار گرفته‌اند.

بر خلاف روش معمول الکترووریسی که نحوه فرارگیری الیاف در وب جمع آوری شده فضای دو بعدی است، در این روش مسیر قرار گرفتن الیاف در ساختار لایه سه بعدی است. جمع‌آوری الیاف به این شکل می‌تواند دریچه‌ای برای کاربردهای جدید نانوالیاف باشد، با این روش می‌توان توده الیاف را به شکل سه بعدی با کاربردهای خاص در آورد. به عنوان مثال این قابلیت می‌تواند در مهندسی بافت برای ضخامت دادن کاربرد داشته باشد و با توجه به حجم زیاد هوای حبس شده در لایه، استفاده از آن به عنوان پرکننده و عایق گرمایی بسیار سبک پیشنهاد می‌شود.

در این پژوهش، سبک‌ترین لایه با وزن $0.00374215 \text{ g/cm}^3$ با غلظت ۱۵ درصد و سرعت برداشت $24/4 \text{ m/min}$ در ولتاژ 8 kV به دست آمد، توجه به کم‌ترین چگالی به دست آمده برای لایه‌ها، $0.00374215 \text{ g/cm}^3$ از پلیمر پلی‌آکریلونیتریل با چگالی 1.198 g/cm^3 بیشترین درصد تخلخل $99/98$ درصد به دست آمد که این درصد از تخلخل بی‌نظیر و تاکنون دست نیافتنی بوده است. تغییرات پلاستیک لایه، در شرایط بهینه تولید، در اثر نیروی فشاری معادل 73 درصد بود. مقدار بازگشت‌پذیری کم به ماهیت سامانه الکترووریسی برمی‌گردد که الیاف تولید شده به کمک الکترووریسی آرایش یافتگی کمی دارند [۱۵]. بنابراین، نتایج به دست آمده دور از انتظار نیست. با توجه به مقدار برگشت‌پذیری کم، این لایه می‌تواند در مواردی استفاده شود که زیر نیرو قرار نمی‌گیرد.

مراجع

- Kim J.S. and Reneker D.H., Mechanical Properties of Composites Using Ultrafine Electrospun Fibers, *Polym. Compos.*, **20**, 124-131, 1999.
- Tsaia P.P., Gibson S.H., and Gibson P., Different Electrostatic Methods for Making Electret Filters, *J. Electrostatic.*, **54**, 333-341, 2002.
- Norris D.I., Shaker M.M., Ko F.K., and MacDiarmid A.G., Electrostatic Fabrication of Ultrafine Conducting Fibers: Polyaniline/Polyethylene Oxide Blends, *Synth. Met.*, **114**, 109-114, 2000.
- MacDiarmid A.G., Jones W.E., Norris I.D., Gao J., Johnson A.T., Pinto N.J., Hone J., Han B., Ko F.K., Okuzaki H., and Llaguno M., 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., Shaoa C., 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.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی برای جمع‌آوری نانوالیاف به شکل حجیم و تشکیل لایه از آن معرفی و شرح داده شد. هم‌چنین عوامل مؤثر بر چگالی لایه شناسایی و بررسی شدند. محاسبات آماری به کمک نرم افزار SPSS انجام شد و نتایج آماری بیان‌گر این نکته است که با افزایش غلظت محلول پلیمری چگالی لایه کاهش و اختلاف معنی‌داری در سطح 95 درصد بین تمام نمونه‌ها به وجود می‌آید. افزایش ولتاژ سبب افزایش چگالی لایه می‌شود و بین نمونه‌ها در سطح 95 درصد اختلاف معنی‌دار است. هم‌چنین، برای جمع‌آوری الیاف نیاز به تعیین سرعت

9. Kenawy E.R., Bowlin G.L., Mansfield K., Layman J., Simpson D.G., Sanders Elliot H., and Wnek G.E., Release of Tetracycline Hydrochloride from Electrospun Poly(ethylene-co-vinylacetate), Poly(lactic acid) and a Blend, *J. Contr. Release*, **81**, 57-64, 2002.
10. Jin H.J., Fridrikh S., Rutledge G.C., and Kaplan D., Electrospinning Bombyx Mori Silk with Poly(ethylene oxide), *Biomacromolecules*, **3**, 1233-1239, 2002.
11. Pham Q.P., Sharma U., and Mikos A.G., Electrospun Poly(ϵ -caprolactone) Microfiber and Multilayer Nanofiber/Microfiber Scaffolds: Characterization of Scaffolds and Measurement of Cellular Infiltration, *Biomacromolecules*, **7**, 2796 -2805, 2006.
12. Gibson P., Schreuder-Gibson H., and Rivin D., Transport Properties of Porous Membranes Based on Electrospun Nanofibers, *Colloid Surf., A: Phys. Eng. Aspects*, **187-188**, 469-481, 2001.
13. Dabirian F. and Hosseini Ravandi S.A., Instrument Designing for Bulky Nanofibers Production, *Iran Pat. 34894*, March, 2006.
14. Borhani S., Hosseini Ravandi S.A., and Dabirian F., Investigation of Parameters Affecting Diameter of PAN Nanofibers Produced by Modified Electrospinning Method, *13th International Conference, Structure and Structural Mechanics of Textile Fabrics*, Czech, November 2006.
15. 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.