Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iranian Journal of Polymer Science and Technology
Vol. 25, No. 1, 3-10
April - May 2012
ISSN: 1016-3255

Effect of Solution Surface Tension on Morphology of PLGA and Gelatin Electrospun Fibers

S. Mehdi Saeed[1], Mojgan Zandi*[1], and Hamid Mirzadeh[2]

1. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

2. Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

Received 24 January 2011, accepted 10 March 2012

ABSTRACT

Based on specific applications of electrospinning technology in tissue engineering there is a need for more crucial advances to be made in electrospinning of biocompatible polymer systems. In this study we investigated the effect of surface tension of different solvent systems on the morphology of electrospun nanofibers of gelatin and PLGA. At first the best solvent system was established to optimize nanofiber formation of the polymers. The overall approach of this research was to prepare several solutions of identical concentrations with different solvent systems for electospinning into nanofibes. Finally, the changes in electrospun fiber morphology were studied by scanning electron microscopy (SEM) and the best solvent system was established in order to pave the way for further research on tissue engineering. It is observed that electrospinning of PLGA with lower surface energy solvent system leads to more homogeneous and smooth fibers. This result is similarly obtained for a system of natural gelatin. For ultimate confirmation of these results, it was observed that by changing the solvent system from high surface energy of DMF to lower surface energy of HFIP, the micro-structure of the prepared mat was changed from microspheres to smooth fibers.

Key Words:
electrospinning,
PLGA,
gelatin,
surface tension,
nanofiber

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

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

اثر کشش سطحی محلول پلیمر بر شکل‌شناسی الیاف الکتروریسی شده PLGA و ژلاتین

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و پنجم، شماره ۱،
صفحه ۱۰-۳، ۱۳۹۱
ISSN: 1016-3255

سید مهدی سعید[۱]، مژگان زندی[۱*]، حمید میرزاده[۲]

۱ـ تهران، پژوهشگاه پلیمر وپتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱٤۹٦۵

۲ـ تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و تکنولوژی رنگ، صندوق پستی ٤٤۱۳-۱۵۸۷۵

دریافت: ۸۹/۱۱/٤، پذیرش: ۹۰/۱۲/۲۰

چکیده

با توجه به کاربرد خاص فرایند الکتروریسی در مهندسی بافت و ضرورت پیش‌رفت در زمینه الکتروریسی پلیمرهای زیست‌سازگار، در این پژوهش اثر کشش سطحی سامانه‌های مختلف حلال روی شکل‌شناسی نانوالیاف الکتروریسی شده PLGA و ژلاتین بررسی شده است. سعی شده است، بهترین سامانه حلال برای بهینه‌سازی نانوالیاف دو پلیمر گفته شده معرفی شود. روش کلی کار بدین ترتیب بود که ابتدا محلول‌های با غلظت‌های مساوی در سامانه‌های مختلف حلال تهیه و در شرایط ثابت فرایند و محیط، الکتروریسی شدند. در نهایت، با نشان دادن تغییر در شکل‌شناسی الیاف الکتروریسی شده در سامانه‌های مختلف حلال، به وسیله میکروسکوپ الکترونی پویشی و بیان علت آن بهترین سامانه حلال برای الکتروریسی این دو پلیمر معرفی شد تا به مطالعات بعدی در زمینه مهندسی بافت روی نانوالیاف این دو پلیمر کمک شایانی کند و پژوهش‌های بعدی در این زمینه راحت‌تر انجام شود. با توجه به نتایج می‌توان گفت، الکتروریسی PLGA به وسیله سامانه‌هایی، که کشش سطحی کمتری دارند، منجر به تولید الیافی یکنواخت‌تر می‌شود که این نتایج در مورد پلیمر طبیعی ژلاتین نیز قابل مشاهده بود. مثلا برای PLGA مشاهده شد، با تغییر سامانه حلال از DMF با کشش سطحی بسیار زیاد به HFIP با کشش سطحی کم، ساختار محصولات الکتروریسی از ذرات کروی به سمت الیاف صاف تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی

الکتروریسی،
PLGA،
ژلاتین،
کشش سطحی،
نانوالیاف

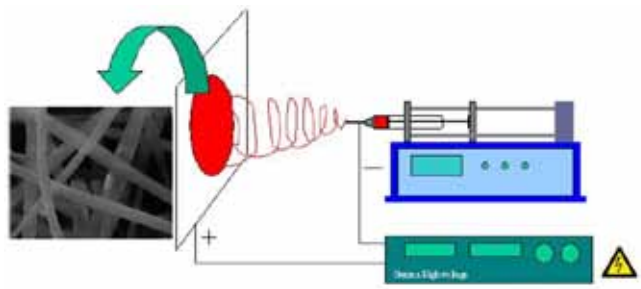
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
m.zandi@ippi.ac.ir

مقدمه

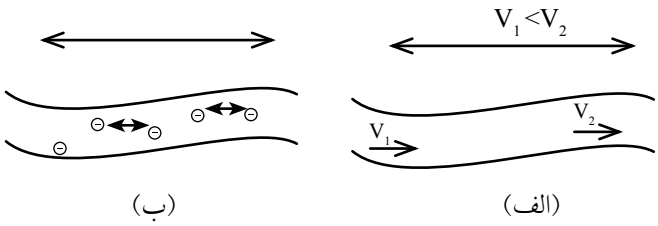
فرایند الکتروریسی به عملیاتی گفته می‌شود که طی آن مذاب یا محلول پلیمری به الیاف در حد میکرو و نانو تبدیل می‌شود. اساس کار این عملیات در شکل ۱ نشان داده شده است. به طور کلی، دستگاه الکتروریسی از چهار بخش شامل منبع تغذیه ولتاژ، پمپ سرنگ، سرنگ، سر سوزن و جمع‌کننده تشکیل شده است. برای کار با این دستگاه ابتدا باید محلول یا مذاب پلیمری تهیه شده داخل سرنگ یا مخزن ریخته شود. سپس، سرنگ در پمپ سرنگ قرار داده شود. سر سوزن و جمع‌کننده هر یک به یکی از قطب‌های منبع تغذیه متصل می‌شود. سرانجام با قراردادن جمع‌کننده در جلوی سر سوزن با فاصله معین و اعمال اختلاف پتانسیل و شروع تزریق، فرایند الکتروریسی آغاز می‌شود. قطبی که به سر سوزن متصل می‌شود، معمولا قطب مثبت و قطبی که به جمع‌کننده وصل می‌شود، قطب منفی است.

با شروع فرایند الکتروریسی پمپ سرنگ که باید مقادیر بسیار کم محلول را به طور دقیق و بسیار یکنواخت تزریق کند، آغاز به کار می‌کند. محلول به سر سوزن فلزی می‌رسد و به وسیله قطب متصل به آن باردار شده و از سر سوزن خارج می‌شود. به دلیل وجود دو قطب ناهم‌نام، بین سر سوزن و جمع‌کننده میدان الکتروستاتیک تشکیل می‌شود. محلول باردار پلیمر شروع به حرکت به سوی جمع‌کننده می‌کند که حرکتی شتاب‌دار است. در این جا دو عامل سبب کشیده شدن محلول پلیمر و در نتیجه ایجاد الیاف با قطر بسیار کم می‌شود که اولین عامل تغییر در نیم‌رخ سرعت و دومین عامل نیروهای کولنی است. عامل غالب نیروهای کولنی هستند، به طوری که از عامل اول در برابر نیروهای کولنی می‌توان صرف نظر کرد. نیروهای کولنی همان نیروهای دافعه بین بارهای هم‌نام‌اند که باعث کشش در جریان باردار و شتاب‌دار می‌شود. در شکل ۲ کشش محلول به وسیله هر دو عامل نشان داده شده است [۱].

در این فرایند، ابتدا قطره محلول پلیمر در نوک سوزن باردار شده و



شکل ۱- شکل کلی دستگاه الکتروریسی.



(ب) (الف)

شکل ۲- عوامل ایجاد کشش در محلول: (الف) تغییر در نیم‌رخ سرعت و (ب) نیروهای دافعه کولنی بارهای هم نام.

رفته رفته با افزایش چگالی بار الکتریکی شکل کروی قطره به مخروطی تبدیل می‌شود که این مخروط را، مخروط تیلور می‌نامند. با افزایش چگالی بار، قطره باز هم ناپایدارتر شده و در نهایت به شکل جت شتاب‌دار در می‌آید. این جت در فاصله بین سوزن و جمع‌کننده به وسیله نیروهای کولنی کشیده شده و رفته رفته حلال فرار، تبخیر می‌شود. در نهایت، الیاف جامد با آرایش‌یافتگی‌ها و شکل‌های مختلف روی جمع‌کننده جمع می‌شوند که به طور کلی الیاف نهایی به شکل بافته نشده و نمدی در می‌آیند.

کروی بودن شکل قطره در ابتدای فرایند به دلیل نیروهای کشش سطحی است که محلول را به سمت شکلی با کمترین نسبت حجم به سطح (شکل کروی) متمایل می‌کند. مخروطی شدن قطره نیز به دلیل نیروهای دافعه کولنی و نیروهای الکتروستاتیک است که در نهایت زمانی که این نیروها بر نیروهای کشش سطحی غلبه کنند، جت تشکیل می‌شود [۲،۳].

به طور کلی، نیروهای وارد بر محلول پلیمری را می‌توان به چهار نوع دسته‌بندی کرد:

ـ نیروهای الکتروستاتیک: همان نیرویی است که میدان الکتریکی بر جت باردار وارد می‌کند و سبب حرکت شتاب‌دار می‌شود.

ـ نیروهای کولنی: نیروهای دافعه بین بارهای هم‌نام‌اند که سبب کشیده شدن محلول در بین دو الکترود می‌شوند.

ـ نیروی کشش سطحی: این نیرو باعث کاهش سطح و جمع‌شدن محلول می‌شود و از ایجاد جت در ابتدای کار جلوگیری می‌کند.

ـ نیروی گرانروی: این نیرو مربوط به گره‌خوردگی پلیمر در محلول است و از کشیده شدن محلول در بین دو الکترود جلوگیری می‌کند.

نیروهای کشش سطحی و گرانروی در برابر ایجاد کشش در محلول پلیمری با نیروهای الکتروستاتیکی و کولنی مخالفت می‌کنند. قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی می‌تواند از ۳ nm تا چند میکرون باشد و طول لیف می‌تواند از چند سانتی‌متر تا متر متغیر باشد [۱].

به طور کلی، عواملی که روی عملیات الکتروریسی اثر می‌گذارند و شکل‌شناسی الیاف را (به عنوان مثال الیاف آرایش یافته و بی‌نظم) تغییر می‌دهند، به سه دسته عوامل کلی تقسیم می‌شوند که به ترتیب

اهمیت عبارتند از:
۱- خواص محلول،
۲- عوامل فرایند و
۳- عوامل محیطی.

خواص محلول پلیمری اهمیت زیادی دارد [۱]. چرا که اولین شرط لازم برای انجام فرایند الکتروریسی داشتن محلولی مناسب با قابلیت الکتروریسی است. اگر این شرط برقرار نباشد، نمی‌توان سایر عوامل را بررسی کرد. از میان خواص محلول نیز کشش سطحی و ضریب رسانایی الکتریکی آن، اهمیت ویژه‌ای دارد. با افزایش نیروی کشش سطحی محلول نیروی مخالف کشش در جت پلیمری افزایش می‌یابد، در نتیجه قطر الیاف یا تعداد مهره‌ها در الیاف بی‌بافت افزایش می‌یابد. هم‌چنین، افزایش ضریب رسانندگی الکتریکی محلول باعث می‌شود مقدار الکترون‌هایی که محلول می‌تواند حمل کند، افزایش یابد. در نتیجه با افزایش مقدار الکترون‌ها روی جت پلیمری، نیروهای دافعه کولنی بین آنها افزایش یافته و کشش جت پلیمری بهتر انجام می‌شود. در نتیجه ضخامت کاهش می‌یابد یا تعداد مهره‌ها کمتر می‌شود. البته شایان ذکر است، در پاره‌ای از گزارش‌ها افزودن نمک علاوه بر افزایش رسانایی الکتریکی، موجب ازدیاد گرانروی می‌شود که در نتیجه افزایش قطر را به همراه داشته است [٤]. جدول ۱ ضریب

جدول ۱- ضریب رسانایی الکتریکی برخی از حلال‌های رایج در الکتروریسندگی.

حلال	رسانایی (mS/m)
دی‌کلرواتان	۰/۰۳٤
استون	۰/۰۲۰۲
بوتانول	۰/۰۰۳٦
تتراهیدروفوران	۰/۰۰٦۱
دی‌متیل فرمامید	۱/۰۹۰
آب مقطر	۰/٤٤۷
متانول	۰/۱۲۰۷
پروپانول	۰/۰۳۸۵
اتانول	۰/۰۵۵٤
اتانول (۹۵٪)	۰/۰٦۲٤
اتانول- آب (٦۰/٤۰)	۰/۱۵۰
دی‌کلرومتان- دی‌متیل فرمامید (٦۰/٤۰)	۰/۵۰۵
دی‌کلرومتان- دی‌متیل فرمامید (۲۵/۷۵)	۰/۲۷۳
تتراهیدروفوران- اتانول (۵۰/۵۰)	۰/۰۳۷

رسانندگی الکتریکی سامانه‌های حلالی مختلف را نشان می‌دهد. از بین متغیرهای محلول در مرحله بعد متغیرهایی مانند گرانروی و غلظت اثر به سزایی دارند. اثر غلظت نیز به شکل غیرمستقیم است، بدین معنی که غلظت روی متغیرهایی مثل کشش سطحی، گرانروی و رسانایی الکتریکی اثر می‌گذارد و اثر اصلی روی فرایند مربوط به این متغیرهاست [۱].

He و همکاران روی اثر عوامل محیطی مانند دما روی کشش سطحی و ریزساختار الیاف به دست آمده از روش الکتروریسی مطالعه کرده‌اند [۵]. Tiwari و همکاران نیز اثر گرانروی را روی فرایند الکتروریسی بررسی [٦] و Angammana و همکاران روی اثر ضریب رسانندگی محلول بحث کرده‌اند [۷].

هدف از این مطالعه، بررسی اثر نیروهای کشش سطحی بر کیفیت الیاف الکتروریسی شده است که نوآوری این بحث نیز بررسی این موضوع در دو پلیمر PLGA و ژلاتین در سامانه‌های مختلف حلالی است. این دو پلیمر با توجه به کاربرد گسترده در پزشکی انتخاب شده‌اند.

تجربی

مواد

به منظور تهیه محلول پلیمری برای الکتروریسی از کوپلیمر مصنوعی پلی‌لاکتیک - گلیکولیک اسید (PLGA) با نسبت لاکتیک اسید به گلیکولیک اسید ۵۰/۵۰ تهیه شده از شرکت بوهرینگر (Rg-504h) با وزن مولکولی kDa ٥٤-۳۸ و پلیمر طبیعی ژلاتین از شرکت ژلیتا (آلمان) با وزن مولکولی kDa ۱۵۰-٦۰ استفاده شد. حلال‌های استفاده شده در این پژوهش، کلروفرم، هگزافلوئوروایزوپروپانول (HFIP)، دی‌متیل فرمامید (DMF)، تتراهیدروفوران (THF)، اتانول، متانول، استیک اسید، فرمیک اسید و آب دوبار تقطیر شده است که همگی به جز آب دو بار تقطیر شده از شرکت Merck تهیه شده‌اند.

دستگاه‌ها

برای تهیه بی‌بافت نانولیفی از دستگاه الکتروریسندگی مدل CO881007NYI ساخت شرکت نانوساختار آسیای کشور ایران استفاده شد. این دستگاه به دو پمپ سرنگ که قابلیت تزریق محلول را از ۰/۱ تا mL/h ۵ دارد و منبع تغذیه ولتاژ که قابلیت تأمین اختلاف پتانسیل تا kV ۳٤ با دقت V ۵۰۰ را دارد، مجهز است (این مقدار تقریبا زیاد است و دستگاه از این نظر دقت کمی دارد.

جدول۲- سامانه‌های حلال مورد استفاده برای بهینه‌سازی الیاف PLGA و ژلاتین.

سامانه حلال برای بهینه‌سازی الیاف	حلال‌های به کار رفته				
PLGA	DMF	DMF-THF (۱/۱)	DMF–کلروفرم (۳/۱)	متانول–کلروفرم (۳/۱)	HFIP
ژلاتین	HFIP	فرمیک اسید – اتانول ـ آب (٤/۱/۰/۱)	استیک اسید ـ آب (۱/۱)	–	–

در حال حاضر دستگاه‌های مورد استفاده در کشور دقت V ۲۰۰ دارند). هم‌چنین، جمع‌کننده استفاده شده در این پژوهش، استوانه چرخان با قطر cm ۱۰ و عرض cm ۵ است و از سوزن الکتروریسی با قطر خارجی mm ۰/۷ استفاده شد. برای تعیین کشش سطحی سامانه‌های مختلف حلال از دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی پویای مایعات مدل K12 ساخت شرکت Kruss کشور آلمان استفاده شد. شکل‌شناسی نانوالیاف با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل T-B2.5 X ساخت شرکت Nikon ژاپن بررسی شد. برای اختلاط محلول‌های الکتروریسی، هم‌زن مغناطیسی ساخت شرکت Heidolf کشور آلمان به کار گرفته شد.

روش‌ها

تهیه بی‌بافت‌های الکتروریسی شده

همان طور که در مقدمه گفته شد، متغیرهای مؤثر بر ساختار نانوالیاف الکتروریسی شده به سه گروه اصلی محیطی، محلولی و دستگاهی دسته‌بندی می‌شوند که برای بهینه‌سازی الیاف و داربست تهیه شده می‌توان از این متغیرها استفاده کرد. بنابراین، برای تهیه محصولی بی‌بافت با الیاف کاملا صاف (الیاف صاف به الیافی گفته می‌شود که روی سطح هر لیف آن هیچ نوع زبری و چین و چروک دیده نشود) و بدون مهره ابتدا باید محلولی مناسب تهیه کرد. بدین منظور، سامانه‌های مختلف حلال برای دو پلیمر PLGA و ژلاتین بررسی شده است. جدول ۲ سامانه‌های مختلف حلال را برای این دو پلیمر نشان می‌دهند. سایر شرایط محیط و فرایند نیز برای الکتروریسی محلول این دو پلیمر در جدول ۳ آمده است.

نتایج و بحث

اثر سامانه حلال بر شکل‌شناسی الیاف PLGA

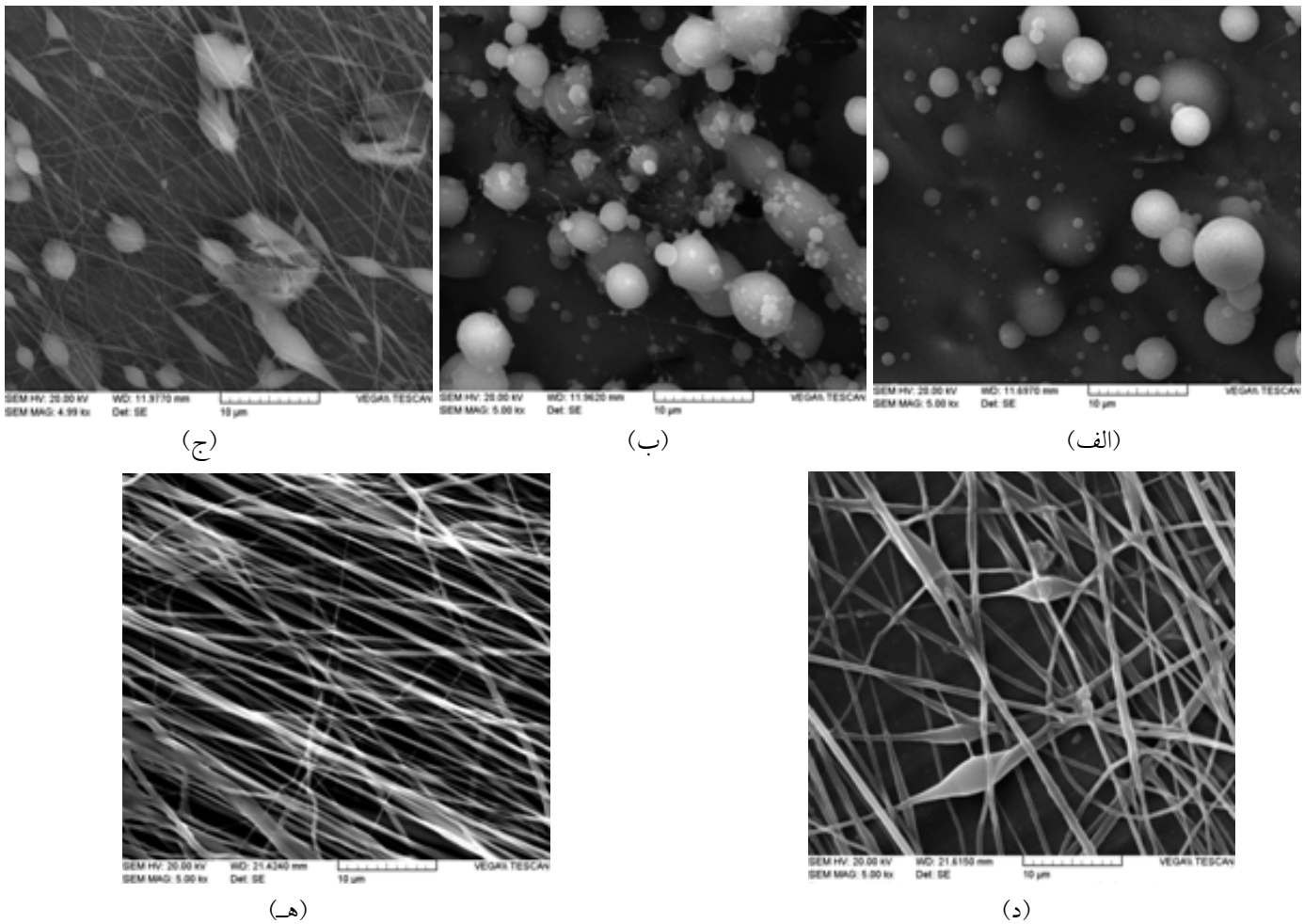
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی نمونه‌های الکتروریسی شده با سامانه‌های مختلف حلال را که در بخش قبل گفته شد، نشان می‌دهد. تمام شرایط فرایند، محلول و محیط به جز سامانه حلال، در همه نمونه‌های این بخش یکسان است.

نیروی کشش سطحی به گونه‌ای ضریب تمایل کشیده شدن یک مولکول ماده را به سمت مولکول‌های خود نسبت به مولکول‌های محیط بیرون نشان می‌دهد. به عبارتی، اگر نیروهای بین مولکول‌های ماده A نسبت به نیروهای بین مولکول ماده A با مولکول ماده B زیاد باشد، تمایل آن ماده به خودش بیشتر است و مولکول‌های این ماده یک‌دیگر را به سمت خود می‌کشند و در نتیجه نیروی کشش سطحی زیاد است. از سوی دیگر، می‌توان گفت که نیروی کشش سطحی نیرویی است که با افزایش سطح مشترک ماده با محیط بیرون مقابله می‌کند. با این تعاریف می‌توان گفت، هنگام کشیده شدن یا افزایش نسبت سطح به حجم یک سیال این نیروی کشش سطحی است که با افزایش کشش یا نسبت سطح به حجم مخالفت می‌کند.

با توجه به شکل ۳- الف می‌توان گفت، میکروساختار بی‌بافت الکتروریسی شده از محلول DMF/PLGA کاملا کروی است و به وسیله نیروهای کولنی و الکتروستاتیک، هیچ نوع کششی به محلول پلیمری اعمال نشده است، اما در شکل ۳-ب کره‌ها مقداری کشیده شده‌اند که نشان‌دهنده این است که نیروهای کشنده الکتریکی توانسته‌اند روی محلول PLGA در سامانه حلال DMF/THF،

جدول ۳- متغیرهای ثابت اعمال شده بر محلول‌های تهیه شده از هر دو پلیمر.

پلیمر	غلظت (٪)	سرعت تغذیه (mL/h)	فاصله دو الکترود (mm)	اختلاف پتانسیل (kV)	دما (°C)	رطوبت (٪)	سرعت چرخش جمع‌کننده (rpm)
PLGA	۱۲/۵	۲	۱۵۰	۲۵	۲۵	٤۲	۱۰۰۰
ژلاتین	۱۲/۵	۰/۷	۱۲۵	۳۰	۲۵	٤۲	۲۰۰۰



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی PLGA الکتروریسی شده با سامانه‌های مختلف حلال و بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر: (الف)DMF، (ب) DMF/THF، (ج) DMF- کلروفرم، (د) کلروفرم ـ متانول و (ه) HFIP.

مقداری کشش اعمال کنند. این روند با تغییر سامانه حلال ادامه یافته و رفته رفته ساختار لیفی شکل پدیدار می‌شود. در نهایت، شبکه‌ای لیفی شکل بدون وجود مهره، به وسیله سامانه حلال HFIP ظاهر می‌شود. همان طور که در جدول ۱ آمده است، DMF دارای بیشترین رسانایی الکتریکی در بین حلال‌های رایج است، ولی در این بخش طی فرایند الکتروریسی محلول PLGA در DMF، هیچ لیفی پدیدار نشده است. این تناقض بین کیفیت الیاف و ضریب رسانندگی الکتریکی، این ذهنیت را تداعی می‌کند که شکل‌شناسی‌های به دست آمده از محلول‌های پلیمری متاثر از کشش سطحی باشند.

جدول ٤ نتایج کشش سطحی پویای محلول‌های پلیمری الکتروریسی شده را به همراه قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی این محلول‌ها و انحراف معیار قطر الیاف (در هر مورد تعداد ۲۰ نقطه از الیاف در هر تصویر اندازه‌گیری شده است) نشان می‌دهد.

با توجه به این جدول مشخص است که کیفیت الیاف الکتروریسی شده کاملا به کشش سطحی (نیروهای مخالف ایجاد کشش و افزایش سطح) محلول پلیمری وابسته است. هم‌چنین، این اثر نسبت به اثر ضریب رسانندگی الکتریکی بسیار پر رنگ‌تر است و با کاهش کشش سطحی شکل‌شناسی کروی به سمت الیاف بدون مهره برده می‌شود. زیرا، افزایش نیروی کشش سطحی معادل افزایش نیروی مخالف افزایش سطح است. در نتیجه، افزایش این نیرو ساختار را به سمت شکل هندسی با کمترین سطح ممکن می‌برد که همان کره است.

اثر سامانه حلال بر شکل‌شناسی الیاف ژلاتین

شکل ٤ الیاف الکتروریسی شده از سامانه‌های مختلف محلول ژلاتین را نشان می‌دهد. ساختار الیاف در دو تصویر اول تفاوت زیادی با یک‌دیگر ندارند. با وجود این، تعداد مهره‌ها در سامانه حلال استیک اسید – آب مقداری کمتر از سامانه آب– اتانول– فرمیک اسید است. این پدیده ممکن است، به این دلیل باشد که کشش سطحی سامانه

جدول ٤- نتایج کشش سطحی پویای محلول‌های حاوی PLGA و قطر الیاف حاصل از الکتروریسی آنها.

سامانه حلال	کشش سطحی (mN/m)	قطر الیاف (nm)
DMF	۳۵/۷٦	بدون لیف
DMF-THF (۱/۱)	۲۸/۸	بدون لیف
DMF-کلروفرم (۳/۱)	۲۸/۳۲	*۵۳/۵±۸۹/۹
متانول-کلروفرم (۳/۱)	۲٤/۹۸	۱۵۱/۰±٤۹۱/۱
HFIP	۱٦/۳	۱۲۳/۰±۲٦۸/۳

* مقدار انحراف معیار

حلال اول همان طور که در جدول ۵ آمده است، مقداری کمتر از سامانه حلال دوم است. در الیاف به دست آمده از محلول ژلاتین در HFIP هیچ مهره‌ای وجود ندارد، اما ساختار الیاف با دو بی‌بافت دیگر متفاوت است و ساختار نواری دارد. با توجه به این که شکل هندسی صفحه‌ای دارای نسبت سطح به حجم بیشتری در برابر شکل هندسی استوانه‌ای است، یکی از دلایل این پدیده نیز می‌تواند کم بودن کشش سطحی HFIP نسبت به دو سامانه حلال دیگر باشد. دلیل دیگر ایجاد ساختار نواری این است که در بعضی از سامانه‌های حلال ـ پلیمر با سرعت تبخیر زیاد حلال و وجود نیروهای برهم‌کنش خاص بین حلال و پلیمر، هنگام تبخیر حلال یک ساختار هسته ـ پوسته تشکیل می‌شود. در این حالت، هسته لیف استوانه‌ای هنوز حالت سیالیت خود را حفظ کرده در حالی که پوسته حالتی ژل مانند پیدا کرده است. این ساختار هسته ـ پوسته به وسیله نیروهای الکتروستاتیک و کولنی که در جهت عرض الیاف اعمال می‌شوند یا

جدول ۵- نتایج کشش سطحی پویای محلول‌های پلیمری الکتروریسی شده برای ژلاتین و قطر الیاف حاصل از الکتروریسی آنها.

سامانه حلال	کشش سطحی (mN/m)	قطر الیاف (nm)
استیک اسید-آب	۳۷/٦٤	*۳٤۰/۱±۲۰۵۵/٦
آب- اتانول- اسید	۳۹/۹۸	۲۷/۳±۹۵/۹
HFIP	۱٦/۳	۲٤/۱±۱۰۰/۲

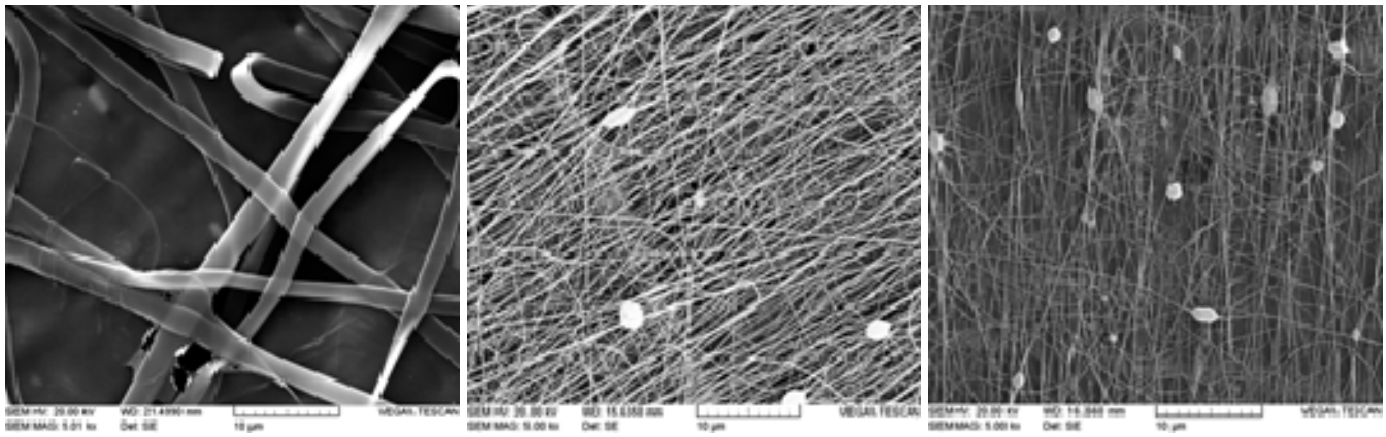
* مقدار انحراف معیار

به وسیله نیروی ضربه‌ای که به هنگام برخورد لیف با جمع کننده، به آن اعمال می‌شود، می‌تواند به ساختار نواری تبدیل شود [۱۱-۸].

نظریه معتبرتر این است، زمانی که پوسته شکل گرفت، حلال درون هسته تبخیر و خارج می‌شود. در نتیجه، باعث ایجاد فشاری منفی درون محفظه پوسته می‌شود و در نتیجه فشار اتمسفری زمینه متلاشی کردن و فروپاشی پوسته را فراهم می‌آورد. در این حالت، سطح مقطع دایره‌ای الیاف ابتدا بیضی شکل شده و سپس به حالت تخت در می‌آید [۱۵-۱۰]. در این بخش نیز به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، با کاهش نیروی کشش سطحی تعداد مهره‌ها در بی‌بافت الکتروریسی شده کاهش می‌یابد و ساختار نانولیفی یکنواخت‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر سامانه‌های مختلف حلال روی شکل‌شناسی بی‌بافت‌های الکتروریسی شده دو پلیمر PLGA و ژلاتین بررسی



(الف) (ب) (ج)

شکل ٤- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی الیاف ژلاتین الکتروریسی شده با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر از سامانه‌های مختلف حلال: (الف) آب- اتانول- فرمیک اسید، (ب) آب- استیک اسید و (ج) HFIP.

شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، به طور کلی می‌توان گفت که کشش سطحی نقش بسیار مهمی را روی شکل شناسی الیاف ایفا می‌کند. با توجه به نتایج آزمون کشش سطحی و تصاویر SEM می‌توان نتیجه گرفت، با کاهش نیروی کشش سطحی محلول‌های پلیمری می‌توان به بی‌بافت‌های یکنواخت‌تری از نانوالیاف پلیمری دست یافت. هم‌چنین، نوع حلال می‌تواند روی شکل الیاف به دست آمده نیز اثرگذار باشد و می‌تواند سطح مقطع الیاف الکتروریسی شده را از شکل دایره‌ای تا خطی صاف تغییر دهد. هم‌چنین، با مقایسه کلی بین نمونه‌های PLGA و ژلاتین می‌توان نتیجه‌گیری کرد، به طور کلی با افزایش نیروی کشش سطحی ساختار الیاف به سمت ساختار مهره‌دار و حتی ساختار غیرلیفی و کروی تغییر می‌کند. اما، حلال HFIP روی ژلاتین اثر متفاوتی نسبت به PLGA دارد. این امر به دلیل ایجاد ساختار هسته ـ پوسته است که برای ژلاتین رخ می‌دهد و دلیل این ساختار ممکن است، به علت برهم‌کنش‌هایی باشد که بین ژلاتین و HFIP وجود دارد.

مراجع

1. Ramakrishna S., *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, World Scientific, 2005.
2. Zhang J., Yang D., and Nie J., Effect of Electric Potential and Coulombic Interactions on Electrospinning Nanofiber Distribution, *Polym. Int. J.*, **57**, 1194-1197, 2008.
3. Jalili R., Hosseini Ravandi S.A., and Morshed M., Electrospinning of Uniaxially Aligned and Molecularly Oriented Polyacrylonitrile Nanofibers with Divided Collectors, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **4**, 241-248, 2005.
4. Mituppatham C., Nithitanakul M., and Supaphol P., Ultra Fine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter, *Macromol. Chem. Phys. J.*, **25**, 1289-1297, 2004.
5. He J., Effect on Temperature on Surface Tension of a Bubble and Hierarchical Ruptured Bubbles for Nanofiber Fabrication, *Int. Sci. J.*, **10**, 103-111, 2011.
6. Tiwari S.K. and Venkatraman S., Importance of Viscosity Parameters in Electrospinning of Monolithic and Core-Shell Fibers, *Mater. Sci. Eng.*, **32**, 84-92, 2012.
7. Angamana C.J., Analysis of the Effects of Solution Conductivity on Electrospinning Process and Fiber Morphology, *Indust. Applicat. J.*, **47**, 1109-1117, 2011.
8. Torres-Giner S., Gimenez E., and Lagaron J., Characterization of The Morphology and Thermal Properties of Zein Prolamine Nanostructures Obtained by Electrospinning, *Food Hydrocolloids J.*, **22**, 601-614, 2008.
9. Koombhongse S., Liu W., and Reneker D., Flat Polymer Ribbons and other Shapes by Electrospinning, *J. Polym Sci., Part B: Polym. Phys.*, **39**, 2598-2606, 2001.
10. Frenot A. and Chronakis I., Polymer Nanofibers Assembled by Electrospinning, Current Opinion, *Colloid Interface Sci.*, **8**, 64-75, 2003.
11. Ner Y., Stuart J., Whited G., and Sotzing G., Electrospinning Nanoribbons of a Bioengineered Silk-Elastin-Like Protein (SELP) from Water, *Polym. J.*, **50**, 5828-5836, 2009.
12. Reneker D. and Yarin A., Electrospinning Jets and Polymer Nanofibers, *Polym. J.*, **49**, 2387-2425, 2008.
13. Jarusuwannapoom T., Hongrojjanawiwat W., Jitjaicham S., Wannatong L., Nithitanakul M., Pattamaprom C., Koombhongse P., Rangkupan R., and Supaphol P., Effect of Solvents on Electro-spinnability of Polystyrene Solutions and Morphological Appearance of Resulting Electrospun Polystyrene Fibers, *Eur. Polym. J.,* **41**, 409-421, 2005.
14. Theron S., Zussman E., and Yarin A., Experimental Investigation of the Governing Parameters in the Electrospinning of Polymer Solutions, *Polym. J.,* **45**, 2017-2030, 2004.
15. Prego M., Cabeza O., Carballo E., and Franjo C., Measurement and Interpretation of the Electrical Conductivity of 1-Alcohols from 273 K to 333 K, *J. Molecul. Liquid*, **89**, 233-238, 2000.