Research Article

DOI: 10.22034/IJCHE.2021.291709.1122

DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.123.2.8

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

Investigation of the Effect of Microstructure on the Mechanical Properties of Electrospun Biofilms Scraped from a Mixture of Polyvinyl Alcohol and Gum Arabic

A. Ghasemabadi[1], H. Kourki[2*], S. Modiri[2], D. Afzali[3]

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering - Biotechnology, Graduate University of Advanced Technology

2- Assistant Professor of Polymer Engineering, Graduate University of Advanced Technology

3- Associate Professor of Analytical Chemistry, Graduate University of Advanced Technology

Email: hajir.kourki@kgut.ac.ir

Abstract

The behaviors of biological scaffolds from the attack of their mechanical behavior are a function of their microstructure. In this research, an attempt is made to find the relationship between the microstructure and mechanical properties of the studied scaffolds. Therefore, electrospinning of 10% polyvinyl alcohol and 20% gum arabic solution was performed in different ratios (60-40, 30-70, 20-80, 10-90, 0-100), and the effect of gum arabic on physical properties, microstructure, and properties. The mechanical nature of the spun scaffolding was investigated. The structural properties of the solution and the association between its phases were investigated using a light microscope. The viscosity of the solution was also investigated to investigate the effect of gum arabic on the electrospinning process. Fourier transform infrared spectroscopy of production scaffolds was performed to investigate the presence of gum arabic in the structure of electrified fibers. A tensile test was used to evaluate the mechanical properties of production scaffolds. The results showed that the presence of gum arabic causes the production of thinner fibers with higher density in the scaffolds and as a result of these changes, the modulus and strength of biological scaffolds increase.

Received: 23 June 2021
Accepted: 9 November 2021
Page Number: 22-31

Keywords:
Bioscaffold,
Microstructure,
Mechanical Properties,
Nanofibers,
Polyvinyl Alcohol,
Arabic Gum

Please Cite this Article Using:

Ghasemabadi, A., Kourki, H., Modiri, S., Afzali, D., "Investigation of the Effect of Microstructure on the Mechanical Properties of Electrospun Biofilms Scraped from a Mixture of Polyvinyl Alcohol and Gum Arabic", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 123, pp. 22-31, In Persian, (2022).

مقـــالـــه پـــژوهشی

DOI: 10.22034/IJCHE.2021.291709.1122
DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.123.2.8

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

بررسی اثر ریزساختار بر خواص مکانیکی داربست‌های زیستی برق‌ریسی‌شده از مخلوط پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی

آتنا قاسم‌آبادی[۱]، هژیر کورکی[۲*]، سینا مدیری[۲]، داریوش افضلی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- بیوتکنولوژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته
۲- استادیار مهندسی پلیمر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته
۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

پیام نگار: hajir.kourki@kgut.ac.ir

چکیده

رفتارهای داربست‌های زیستی به‌ویژه رفتار مکانیکی آن‌ها تابع ریزساختارشان است. این تحقیق بر آن است تا رابطهٔ میان ریزساختار و خواص مکانیکی داربست‌های مورد مطالعه، یافت شود. بدین منظور برق‌ریسی از محلول ۱۰٪ پلی‌وینیل‌الکل و ۲۰٪ صمغ عربی در نسبت‌های مختلف (۶۰-۴۰ و ۳۰-۷۰، ۲۰-۸۰، ۱۰-۹۰، ۰-۱۰۰) انجام شد و تأثیر میزان صمغ عربی بر خصوصیات فیزیکی و ریزساختار و خواص مکانیکی داربست‌های ریسیده، بررسی شد. خواص ساختاری محلول و بررسی پیوستگی بین فازهای آن با میکروسکوپ نوری انجام شد. گرانروی محلول نیز برای بررسی اثر صمغ عربی بر فرایند برق‌ریسی، مطالعه و تبدیل فوریه طیف‌سنجی مادون قرمز از داربست‌های تولیدی برای بررسی حضور صمغ عربی در ساختار الیاف برق‌ریسی شده انجام شد. آزمون کشش برای بررسی خواص مکانیکی داربست‌های تولیدی به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که حضور صمغ عربی سبب تولید الیاف باریک‌تر با تراکم بیشتر در داربست‌ها می‌شود و در نتیجهٔ این تغییرات، مدول و استحکام داربست‌های زیستی افزایش می‌یابد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸
شماره صفحات: ۲۲ تا ۳۱

کلیدواژه‌ها:
داربست زیستی،
ریزساختار،
خواص مکانیکی،
نانوالیاف،
پلی‌وینیل‌الکل،
صمغ عربی

* کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

استناد به مقاله:
قاسم‌آبادی، آ.، کورکی، ه.، مدیری، س.، افضلی، د.، "بررسی اثر ریزساختار بر خواص مکانیکی داربست‌های زیستی برق‌ریسی‌شده از مخلوط پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۳، صص. ۳۱-۲۲، (۱۴۰۱).

۱. مقدمه

امروزه پلیمرهای محلول در آب با استقبال بسیاری روبه‌رو هستند؛ زیرا این مواد به‌طور گسترده در شوینده‌ها، رنگ‌ها، منسوجات، پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر و غیره استفاده می‌شوند[۱]. پلیمرهای استفاده‌شده در این مطالعه پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی است. پلی‌وینیل‌الکل به‌دلیل داشتن خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر به فردی مانند سمی نبودن، بلورینگی بالا و حلالیت در آب کاربرد تجاری گسترده‌ای دارد[۲]. در برق‌ریسی به‌عنوان روشی ویژه در تولید الیاف بسیار نازک در مقیاس نانومتر تا میکرومتر، از محلول یا مذاب پلیمری استفاده می‌شود[۳و۴]. چون پلی‌وینیل‌الکل خالص، گران و نانوالیاف‌های آن نسبت به آب حساس است؛ بنابراین با افزودن پلیمرهای طبیعی می‌توان ضمن کاهش هزینه‌ها، ویژگی‌هایش را بهبود بخشید. مطالعات نشان داد که نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل و پلیمرهای طبیعی مانند نشاسته، کیتوزان و صمغ عربی می‌توانند ویژگی‌های بهتری نسبت به پلی‌وینیل‌الکل خالص ارائه دهند[۵و۶]. در این تحقیق از پلیمر طبیعی صمغ عربی برای بهبود خواص الیاف برق‌ریسی‌شدهٔ پلی‌وینیل‌الکل استفاده شده است. این ماده سمی نیست و زیست‌تخریب‌پذیر و ارزان‌تر از سایر صمغ ها مانند زانتان و بوگوار است. از کاربردهای این ماده می‌توان به مصارف غذایی، دارویی، آرایش و پزشکی اشاره کرد[۷]. پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی دارای گروه‌های هیدروکسیل فراوانی در ساختارخود هستند؛ بنابراین میان آن‌ها فعل و انفعالات پیوند هیدروژنی رخ می‌دهد که در نتیجه، خواص مکانیکی و فیزیکی را بهبود می‌بخشد.

میروسلاو چرنیک و همکارش در سال ۲۰۱۴ خواص فیزیکی نانوالیاف صمغ عربی و پلی‌وینیل‌الکل را بررسی کردند. بهترین نسبت برای ساخت نانوالیاف (۱۰:۹۰درصد وزنی) با غلظت پلی‌وینیل‌الکل ۱۲ درصد و صمغ عربی۲۵ درصد قطر بین ۱۳۰تا۴۳۰ نانومتر، گرانروی ۱۴۷۴سانتی‌پوایز نشان داد[۸]. پرامیت‌دی و همکارانش درسال ۲۰۲۰ با ترکیب صمغ عربی و پلی‌وینیل‌الکل نانوالیاف قابل تجزیه به‌روش برق‌ریسی تولید کردند. خواص فیزیکی و مکانیکی نانوالیاف بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن صمغ عربی باعث افزایش تراکم الیاف وکاهش قطر می‌شود[۹]. نعیمه اقبالی‌فام و همکارانش در سال ۲۰۲۰ بر روی ساخت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل و صمغ عربی که خاصیت ضد میکروبی، جذب آب، نفوذپذیری بخار آب و خواص مکانیکی خوبی دارد، مطالعاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که میانگین قطرنانوالیاف در محدودهٔ ۱۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر است. جذب آب و نفوذپذیری بخار آب به‌ترتیب ۳۴/۳۷ و ۳۰/۵۴ گرم بر متر مربع است. قطر الیاف با افزایش صمغ کاهش یافته درحالی که با افزایش پلی‌وینیل الکل قطر افزایش یافته است. افزایش صمغ باعث ایجاد نانو الیاف مهره‌دار می‌شود[۱۰].

نتایج این پژوهش اثبات کرد که امکان ترکیب پلیمر طبیعی و مصنوعی در غلظت‌های بالا وجود دارد و طی فرایند برق‌ریسی از ترکیب این مواد در نسبت پایین، نانوالیاف صاف و بدون مهره با تراکم بالا تولید شد. هم‌چنین نتایج گویای این مسأله است که وجود صمغ باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود. در این مطالعه ریزساختارهای مختلف نانوالیاف بررسی شد. تأثیر ریزساختار بر خواص مکانیکی، مطالعه و رابطهٔ خوبی میان ریزساختار و خواص مکانیکی ایجاد شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد اولیه

در این تحقیق از پلیمر پلی‌وینیل‌الکل خالص با وزن مولکولی (۸۸۰۰۰ گرم بر مول)، صمغ عربی ترشح شده از درخت اقاقیا با وزن مولکولی (۵۰۰۰۰۰ گرم بر مول) شرکت سیگما و از آب دیونیزه به‌عنوان حلال استفاده شد.

۲-۲ آماده‌سازی محلول

۰/۵ گرم پلی‌وینیل‌الکل و ۱ گرم صمغ عربی هرکدام به‌طور مجزا در ظرفی حاوی ۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه حل شد. برای همگن‌شدن محلول پلی وینیل‌الکل، محلول به‌مدت ۵ ساعت در حمام آب جوش بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه قرارگرفت. ۵ میلی‌لیتر محلول صمغ عربی در حمام آب گرم ۷۰ درجهٔ سلسیوس و به‌مدت ۳ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه قرار گرفت، تا به‌طور کامل حل شود[۱۰و۱۱].

۲-۳ فرایند برق‌ریسی

محلول ۱۰٪ وزنی پلی وینیل‌الکل و ۲۰٪ وزنی صمغ عربی جدا جدا در آب دیونیزه تهیه شد. نیز محلول‌های ترکیب صمغ عربی و

پلی وینیل‌الکل در نسبت‌های ۱۰۰، ۱۰-۹۰، ۲۰-۸۰، ۳۰-۷۰، ۴۰-۶۰ برای فرایند برق‌ریسی آماده شد. در فرایند برق‌ریسی سرعت تغذیه ۰/۵ میلی‌لیتر در ساعت، ولتاژ اعمالی ۳۰ کیلو ولت، فاصلهٔ نوک سوزن تا جمع کننده ۱۵ سانتی‌متر و مدت زمان فرایند ۳ ساعت در نظر گرفته شد. نانوالیاف بر روی یک ورق آلومینیومی متصل به جمع‌کنندهٔ استوانه‌ای، جمع‌آوری و سرعت چرخش جمع‌کننده، به‌منظور ایجاد الیاف یک‌نواخت، ۳۵۰ دور بر دقیقه تعیین شد[۱۲-۱۰].

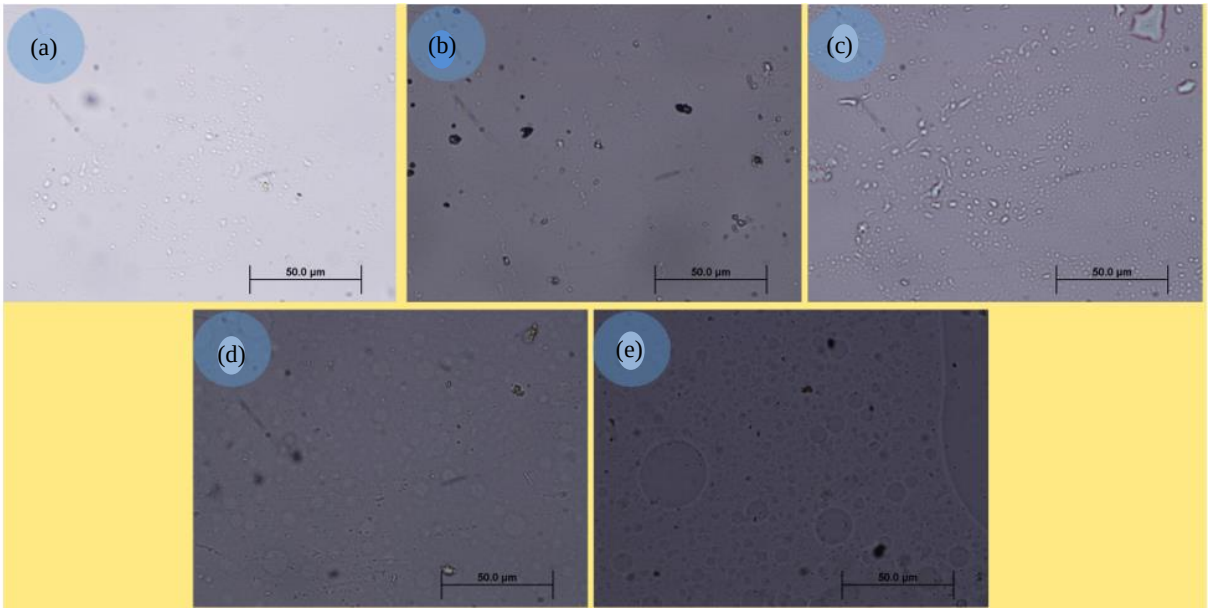
۲-۴ آزمون‌ها

برای مشاهدهٔ تأثیر نسبت‌های مختلف صمغ عربی بر ریزساختار نانوالیاف از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. قطر متوسط نانوالیاف با نرم‌افزار ایمج‌جی با انتخاب تصادفی از ۳۰ نمونهٔ میکروسکوپ روبشی الکترونی بررسی شد. از میکروسکوپ نوری برای بررسی ریزساختار محلول پلیمرها با بزرگ‌نمایی ۵۰ میکرومتر عکس گرفته شد. برای بررسی پیوندهای گروه‌های عاملی و حضور صمغ عربی در الیاف ریسیده‌شده در نسبت‌های مختلف در محدودهٔ طول موج ۵۰۰ تا ۴۵۰۰ سانتی‌متر مربع از طیف‌سنجی مادون‌قرمز استفاده شد. گرانروی محلول با استفاده از گرانروی‌سنج بروکفیلد(RVDV-II) در دمای اتاق به‌وسیلهٔ دو اسپیندل ۱۸ و۲۱ و سرعت ۱۰ دور بر دقیقه و حجم نمونه ۱۵ میلی‌لیتر تخمین زده شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمون کشش با دستگاه SANTAM STM-۱۰ استفاده شد. در این آزمون نمونه‌های ترکیبی در نسبت‌های مختلف با ابعاد ۱۰×۷۰ میلی متر برش داده شد. سرعت آزمون ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار داده شد.

۳. بحث و نتایج

۳-۱ ریزساختار محلول

یکی از عواملی که بر ریزساختار نانوالیاف تأثیرگذار است، گرانروی محلول برق‌ریسی است. گرانروی محلول، مخلوطی از پلیمرهای مختلف متأثر از ریزساختار آن است. با افزایش یک جزء در محلول دو جزئی از پلیمرها، فاز پیوسته از جزء با میزان بیشتر جای خود را به فاز پیوسته از جزء دیگری می‌دهد. تشکیل فاز پیوسته از جزء دوم، سبب غالب‌شدن رفتار آن در مخلوط آن‌ها می‌شود. تصاویر میکروسکوپ نوری محلول حاوی پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی با نسبت‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.



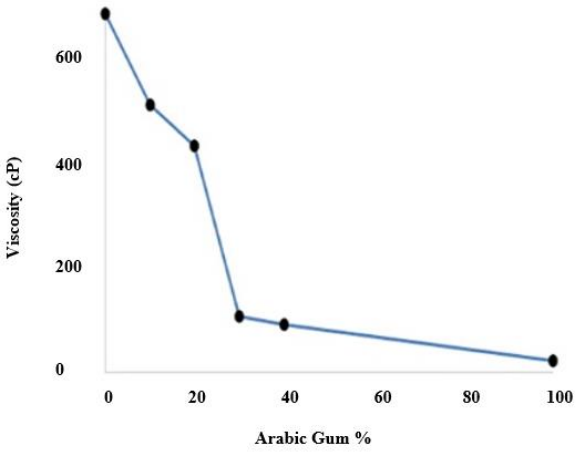
شکل ۱. بررسی تأثیر نسبت صمغ عربی بر ریزساختار محلول. (a) صفر درصد، (b) ده درصد، (c) بیست درصد، (d) سی درصد و (e) چهل درصد.

Figure 1. Investigation of the effect of Arabic gum ratio on solution microstructure. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30 % and (e) 40 %.

چنان‌که از نتایج مطالعات میکروسکوپ نوری که در این شکل نشان داده شده است، در نسبت‌های ۰:۱۰۰، ۱۰:۹۰ و ۲۰:۸۰ به‌دلیل کم بودن میزان صمغ عربی، قطرات صمغ پیدا نیست و فاز پیوسته از پلی‌وینیل‌الکل دیده می‌شود؛ اما در نسبت‌های ۳۰:۷۰ و ۴۰:۶۰ با افزایش میزان صمغ، قطرات صمغ به‌وضوح دیده می‌شود. افزایش صمغ عربی باعث تغییر در زیرساختار محلول و تشکیل فاز پیوسته از صمغ عربی می‌شود. این فاز پیوسته از صمغ عربی بر گرانروی محلول تأثیرگذار است.

۳-۲ اثر غلظت صمغ عربی بر گرانروی محلول

چنان‌که بیان شد یکی از عوامل تأثیرگذار بر ریزساختار نانوالیاف برق‌ریسی‌شده، گرانروی محلول است. با افزایش گرانروی محلول، نیروی لازم برای کشش الیاف بلندشده از جت نوک سوزن تزریق، افزایش خواهد یافت. این نیرو از اختلاف پتانسیل اعمالی بین سوزن و جمع‌کننده به‌وجود می‌آید؛ لذا در اختلاف پتانسیل‌های ثابت و افزایش گرانروی محلول، توانایی میدان برای کشیدن الیاف کاهش می‌یابد. در نتیجه ریزساختار الیاف ریسیده‌شده متفاوت خواهد بود. داده‌های حاصل از اندازه‌گیری گرانروی محلول پلی‌وینیل‌الکل ۱۰٪ و صمغ عربی ۲۰٪ در نسبت‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. تأثیر نسبت‌های مختلف صمغ عربی بر گرانروی محلول.

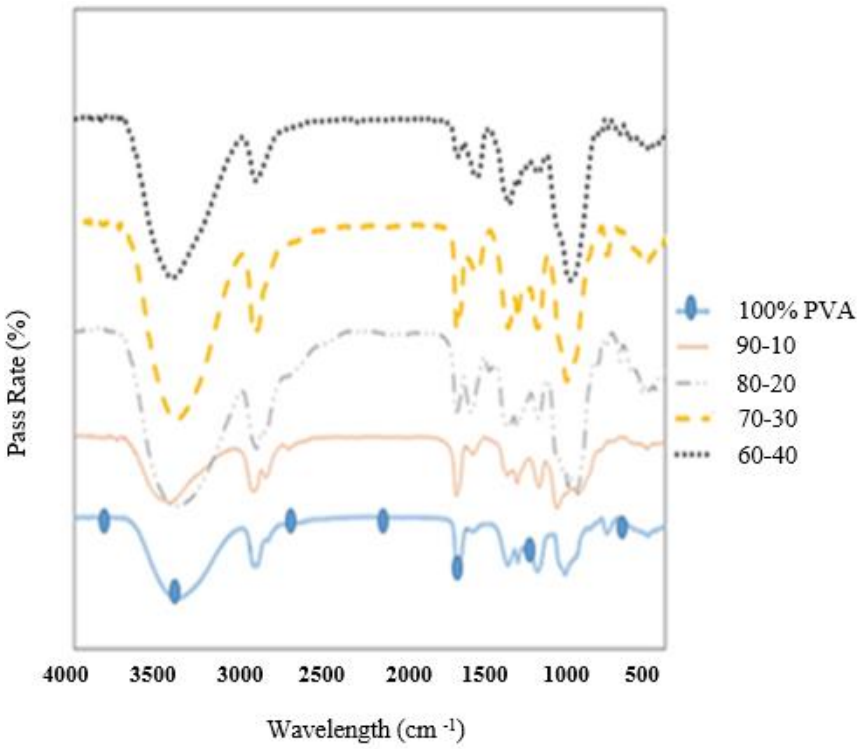
Figure 2. The effect of different ratios of Arabic gum on the viscosity of the solution.

چنان‌که در این شکل ارائه شده است گرانروی محلول پلی‌وینیل‌الکل خالص با غلظت ۱۰درصد برابر با ۶۹۰ سانتی پوایز است. با افزایش نسبت صمغ عربی به پلی‌وینیل‌الکل گرانروی از ۶۹۰ به ۲۳ سانتی‌پوایز کاهش می‌یابد؛ اما نکتهٔ جالب داده‌های گرانروی این است که تا نسبت ۳۰ از صمغ عربی میزان گرانروی با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و از نسبت ۳۰ به بعد با شیب کمتری در حال تغییر است. اگر داده‌های گرانروی، با ریزساختار محلوهای مختلف ارائه‌شده در شکل (۱) مقایسه شود؛ می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت‌های کم از صمغ عربی، فاز غالب پلی‌وینیل الکل است که با فزایش میزان صمغ عربی این فاز نقش خود را از دست می‌دهد و نسبت ۳۰ جایی است که قطرات صمغ عربی با هم برخورد می‌کنند و تشکیل فازهای بزرگ‌تر و پیوسته می‌دهند و سهم فاز پیوسته از پلی‌وینیل الکل کم می‌شود و در نتیجه بعد از نسبت ۳۰ از صمغ عربی، کاهش گرانروی با افزایش میزان صمغ عربی شدت کمتری می‌یابد.

۳-۳ بررسی حضور صمغ عربی در الیاف ریسیده‌شده

چون امکان دارد در مخروط تیلور شکل‌گرفته در نوک سوزن تزریق، جدایی فازی ایجاد شده و یکی از مخلوط‌های پلیمری همراه با جت در میدان الکتریکی بر نخواسته باشد و در نتیجه الیاف حاصل متشکل از یک پلیمر باشند؛ بنابراین یکی از چالش‌هایی که برای برق‌ریسی مخلوط دو پلیمر مطرح می‌شود ریسیده‌شدن هم‌زمان دو پلیمر است. بدین منظور برای نشان‌دادن عمل ریسیده‌شدن صمغ عربی همراه پلی‌وینیل‌الکل، شناسایی اتصالات شیمیایی در مولکول پلی‌وینیل‌الکل/ صمغ عربی، بررسی تغییرات ساختاری طی برق‌ریسی و برهم‌کنش بین صمغ عربی/پلی‌وینیل‌الکل از طیف‌سنجی مادون‌قرمز استفاده شد. طیف‌سنجی مادون‌قرمز نانوالیاف برق‌ریسی‌شدهٔ پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی که در شکل (۳) نشان داده شد.

برای شناسایی پلی‌وینیل‌الکل می‌توان آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز استفاده کرد؛ مشخصه‌های اصلی این ماده در آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز می‌تواند قلهٔ پهن در محدودهٔ طول موج ۳۴۰۰ باشد که مربوط به ارتعاشات کششی باند O-H- است. این قله نمایانگر باند هیدروژنی درون و بین مولکولی مربوط به پلی‌وینیل‌الکل است. از دیگر مشخصه‌های طیف مادون قرمز مربوط به پلی‌وینیل الکل می‌توان به قله‌هایی در محدودهٔ طول موج ۱۷۲۰، ۱۴۴۰ و ۱۳۸۰ اشاره کرد. قلهٔ ظاهرشده در محدودهٔ ۱۷۲۰ را می‌توان برای اتعاشات کششی باند C=O- انگاشت و قله‌های ۱۴۴۰ و ۱۳۸۰ مربوط به ارتعاشات خمشی گروهای CH2- و CH3- هستند.



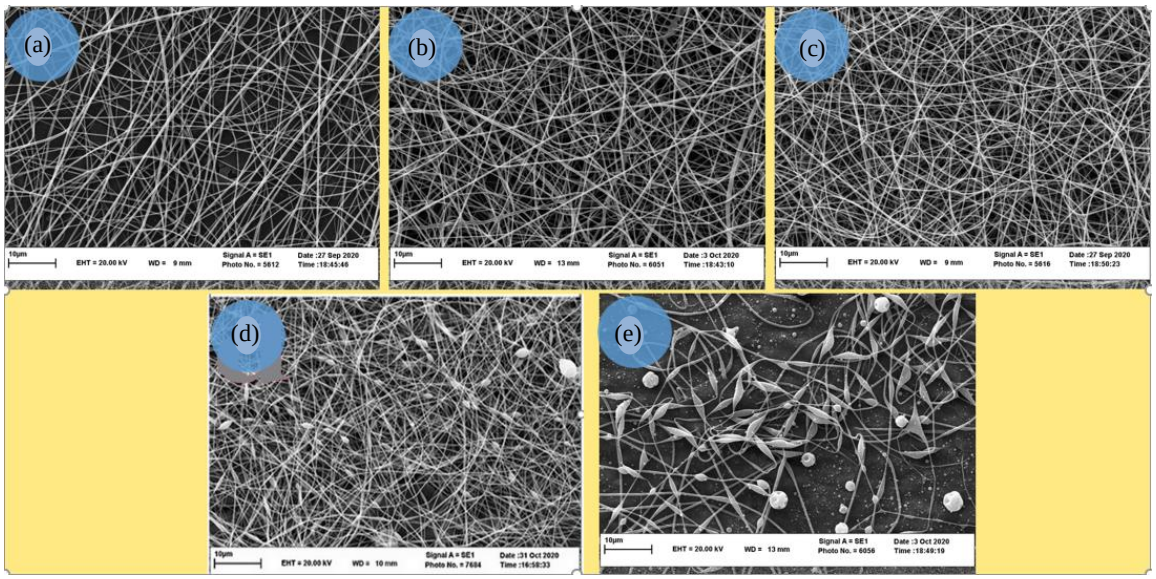
شکل ۳. نمودار طیف سنجی مادون‌قرمز نانوالیاف برق‌ریسی‌شدهٔ پلی‌وینیل‌الکل/ صمغ عربی در نسبت‌های مختلف.

Figure 3. Infrared spectroscopy diagram of red electrospun polyvinyl alcohol / Arabic gum in different ratios.

۴-۳ ریزساختار نانوالیاف برق‌ریسی‌شده

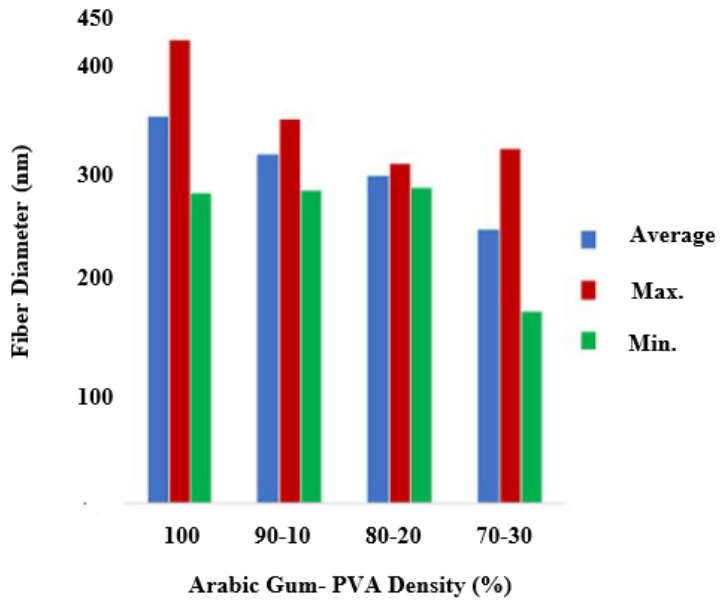
غلظت پلیمر تأثیر زیادی بر فرایند برق‌ریسی و کشش سطحی محلول دارد. اگر میزان غلظت محلول خیلی کم باشد به‌دلیل گرانروی پایین و کشش سطحی بالا به‌جای برق‌ریسی، الکترواسپری می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صمغ عربی و پلی‌وینیل‌الکل در نسبت‌های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. برای شناسایی صمغ عربی می‌توان به قله‌های اصلی در محدودهٔ ۳۴۰۰ که مربوط به ارتعاشات کششی باند O-H- است، ۲۹۰۰ مربوط به ارتعاشات کششی C–H- ، محدودهٔ ۱۴۰۰ مربوط به ارتعاشات خمشی C–H- و محدودهٔ ۱۰۰۰ مربوط به ارتعاشات کششی C-O- اشاره کرد[۱۳و۱۰]. نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز نشان داده شده در شکل (۴) حاکی از افزایش طول قله در محدودهٔ ۱۰۰۰ برای داربست‌های ریسیده‌شده با افزودن صمغ عربی است. چنان‌که بیان شد این قطه مربوط به ارتعاشات کششی C-O- است که از مشخصه‌های شناسایی صمغ عربی است؛ بنابراین می‌توان گفت که حین فرایند برق‌ریسی صمغ عربی نیز همزمان با محلول پلی‌وینیل‌الکل از سر سوزن تزریق برخاسته و الیاف تشکیل‌شده حاوی صمغ عربی است. در نتیجه ریسیده‌شدن صمغ عربی همزمان با پلی‌وینیل‌الکل قابل پذیرش است.

چون صمغ عربی یک پلی‌ساکارید اسیدی است، ریزساختار نانوالیاف برق‌ریسی تحت تأثیر نسبت وزنی صمغ عربی قرار می‌گیرد. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، الیاف تولیدشده از پلی‌وینیل‌الکل خالص دارای الیاف صاف و یک‌نواخت با تراکم اندک است. با اضافه‌کردن صمغ عربی تا ۳۰٪ تراکم الیاف نسبت به پلی‌وینیل‌الکل خالص افزایش یافت و قطر الیاف کاهش پیدا کرد. هم‌چنین تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی نشان داده است که داربست‌های ریسیده‌شده از محلول‌های حاوی نسبت‌های بالاتر از ۳۰ صمغ عربی سبب تولید الیاف مهره‌دار می‌شود؛ به‌طوری که در نسبت ۴۰ از صمغ عربی دیگر داربستی با الیاف مناسب تولید نشده است. نتایج تحلیلی از اندازهٔ الیاف تولیدی در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۴. بررسی تأثیر نسبت صمغ عربی بر ریزساختار داربست‌های تولیدی. (a) صفر درصد، (b) ده درصد، (c) بیست درصد، (d) سی درصد و (e) چهل درصد.

Figure 4. Investigation of the effect of Arabic gum ratio on the microstructure of production scaffolds. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30 % and (e) 40 %.



شکل ۵. بررسی تأثیر نسبت صمغ عربی از صفر تا ۳۰ درصد بر متوسط اندازهٔ قطر الیاف.

Figure 5. Investigation the effect of Arabic gum ratio (0 to 30%) on the average fiber diameter size.

چنان‌که از داده‌های این شکل پیداست، میانگین قطرنانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی با افزایش نسبت صمغ عربی به‌تدریج کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که با افزایش نسبت از صفر درصد وزنی به ۳۰ درصد وزنی منجر به کاهش میانگین قطر نانوالیاف از ۳۵۰ به ۲۵۰ نانومتر می‌شود. با افزایش درصد وزنی صمغ عربی از ۳۰ به ۴۰ به‌دلیل تشکیل مهره به جای الیاف، امکان اندازه‌گیری قطر نانو الیاف وجود نداشت.

نتایج جالب داده‌ها حاکی از این است که با افزایش میزان صمغ

عربی در محلول، قطر الیاف کاهش یافته و تراکم آن بیشتر شده است و در درصدهای بالا از صمغ عربی تشکیل مهره‌ها به‌جای الیاف نمایان شده است. با توجه به داده‌های اثر صمغ عربی بر گرانروی ارائه‌شده در شکل (۲) که نشان دهندهٔ کاهش گرانروی با افزایش میزان صمغ عربی است، می‌توان گفت که با کاهش گرانروی محلول، توانایی میدان الکتریکی تشکیل‌شده در بین نوک سوزن تزریق و صفحهٔ جمع‌کننده برای کشیدن الیاف بیشتر شده است؛ در نتیجه داربست‌های تولیدی دارای الیاف باریک‌تری هستند. در مورد تراکم الیاف نیز می‌توان گفت: از آنجایی که با افزودن صمغ عربی، گرانروی محلول کاهش می‌یابد، توانایی میدان الکتریکی برای شکستن قطرهٔ تشکیل‌شده در نوک سوزن به تعداد الیاف بیشتر افزایش یافته و هم‌چنین با کشیده‌شدن بیشتر الیاف، طول آن‌ها افزایش می‌یابد. تعداد الیاف بیشتر و طول الیاف بلندتر منجر به تراکم بیشتر الیاف در داربست تولیدی است. نیروی الکتریکی وارده بر محلول باردار با غلبه بر نیروی ویسکوالاستیک محلول پلیمری و نیروی کشش سطحی آن سبب تولید الیاف می‌شود. مواقعی که نیروی میدان الکتریکی در مقایسه با آن دو نیروی بازدارندهٔ تولید الیاف کمتر باشد، الیافی تشکیل نخواهد شد. اگر تعادل مناسبی بین این نیروها برقرار شود الیاف به‌خوبی از نوک مخروط تیلور تشکیلی سر سوزن ریسیده می‌شوند و بر سطح جمع‌کننده می‌نشینند؛ اما اگر میدان الکتریکی از حد نیاز بیشتر باشد یا نیروهای بازدارنده برای یک میدان کم باشد، محلوهای پلیمری به‌صورت مهره- مهره از سر سوزن جدا می‌شوند و الیاف تولیدی حاوی مقدار زیادی مهره در راستای طولی خود خواهند بود. بنابراین تشکیل مهره‌ها در الیاف تولیدی از محلول حاوی نسبت‌های بالای صمغ عربی را می‌توان به کم‌بودن گرانروی یا به‌عبارتی به کم‌بودن نیروهای ویسکوالاستیک ربط داد.

۳-۵ بررسی خواص مکانیکی داربست‌های تولیدی

مهم‌ترین خصوصیت یک داربست زیستی که بر عمل‌کرد آن تأثیر فراوانی دارد، خواص مکانیکی آن است. خواص مکانیکی یک داربست زیستی بر سرعت رشد سلول‌ها و شکل‌گیری آن‌ها تأثیرگذار است. خواص مکانیکی یک داربست زیستی باید در محدودهٔ خواص مکانیکی آن بافتی باشد که قرار بر تولید یا بهبود آن است. اگر خواص مکانیکی داربست با بافت هدف، تفاوت داشته باشد به‌دلیل تنش‌های بین سطحی، سلول‌ها به‌خوبی رشد نمی‌کنند و بافت‌های مجاور نیز در معرض آسیب احتمالی قرار می‌گیرند. هم‌چنین داربست با خواص مکانیکی مناسب توانایی تحمل تنش‌های اولیهٔ قبل از رشد و تولید بافت هدف را نخواهد داشت.

خصوصیات مکانیکی یک داربست زیستی به ساختار شیمیایی، ریزساختار و برهمکنش بین فازهای آن بستگی دارد. واضح است که با تغییر عوامل ریزساختار یک داربست، مانند قطر الیاف، تراکم الیاف و تخلخل آن خواص مکانیکی آن نیز تغییر خواهد کرد؛ بنابراین برای کنترل خواص مکانیکی یک داربست لازم است که رابطهٔ میان عوامل ریزساختار و خواص مکانیکی آن شناخته شود. بدین ریزساختار داربست‌های تولیدی بررسی شد و خواص مکانیکی هرکدام که از آزمون تنش-کرنش به‌دست آمد. داده‌های منحنی تنش-کرنش داربست‌های تولیدی از نسبت‌های مختلف پلی‌وینیل‌الکل و صمغ عربی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی نانو الیاف برق‌ریسی شده پلی‌وینیل‌الکل/ صمغ عربی در نسبت‌های مختلف.

Table 1. Mechanical properties of electrified polyvinyl alcohol / Arabic gum nanofibers in different ratios.

Arabic Gum Ratio	Yang Module (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Failure Strain (%)
0	19.76	9.16	46
10	28.13	11.2	88
20	49.48	11.9	95
30	50.54	12	39
40	14.91	8	27

از داده‌های جدول (۱) مشخص است کـه بـا افـزایش نسـبت صـمغ عربی تا ۳۰ درصد مدول و مقاومت کششی افزایش می‌یابد و پس از آن کم می‌شود. کرنش تا نقطهٔ پارگی هم، برای داربست‌های تولیدی تا میزان ۲۰ درصـد از صـمغ عربـی افـزایش مـی‌یابـد و بعـد از آن با کاهش چشم‌گیری همراه است. با توجه بـه تصـاویر میکروسـکوپ روبشی الکترونی ارائه‌شده در شکل (۴)، هرچه میزان صمغ عربی تـا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد، تراکم الیاف بیشتر و قطر نانوالیاف کمتـر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش قطـر الیـاف کـه سبب افزایش تراکم آن‌ها در داربست‌های تولیدی می‌شود، مـدول و مقاومت کششی داربست‌ها افزایش مـی‌یابـد. هـم‌چنـین از مقایسـهٔ داده‌های خواص مکانیکی و تصاویر میکروسـکوپ روبشـی الکترونـی برای نسبت ۴۰ درصد از صمغ عربـی مـی‌تـوان گفـت کـه تشـکیل مهره‌ها به‌جای الیاف در داربست‌های تولیـدی سـبب کـاهش تـراکم الیاف می‌شود و در نتیجه مدول و استحکام کششی آن‌هـا بـه‌شـدت ضعیف می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

نانوالیاف از محلول پلی‌وینیل‌الکل ۱۰ درصد و صمغ عربی ۲۰ درصد با نسبت‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد از صمغ عربی برق‌ریسـی شد. تصاویر میکروسکوپ نوری مخلوط دو محلول در نسبت‌های ۰ تا ۲۰ درصد از صمغ عربی هیچ اثری از وجود قطـرات صـمغ را نشـان نمی‌دهد. با افزایش میزان صمغ بیشتر از ۲۰ درصد فـاز مربـوط بـه صمغ عربی، قطرات تشکیل می‌شوند. بررسی گرانروی محلول نشـان داد که با اضافه‌کردن صمغ از ۰تا۳۰ درصد نمودار گرانروی به‌شـدت کاهش یافته و از۳۰ تا ۱۰۰ درصد میزان گرانروی با شـیب کمتـری کاهش یافته است. دلیل کاهش گرانـروی بـا افـزودن صـمغ عربـی، می‌تواند کمتر بودن گرانروی صمغ عربی باشد و رفتار کاهشی تا ۳۰ درصد از صمغ عربی را می‌توان به تشکیل فاز پیوسته از صمغ عربی در محلول دو پلیمر ربط داد. نتایج حاصـل از طیـف‌سـنجی مـادون قرمز الیـاف نشـان دهنـدهٔ ریسـیده‌شـدن هـر دو پلیمـر از محلـول آن‌هاست. نتـایج میکروسـکوپ الکترونـی روبشـی نشـان داد کـه بـا افزودن صـمغ عربـی بـه محلـول پلـی‌وینیـل الکـل، از قطـر الیـاف ریسیده‌شده کاسته می‌شود و تراکم الیاف افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان به کاهش گرانروی با افزودن صمغ عربی ربـط داد. نیـز از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پیداست که بـا افـزودن صـمغ عربی در نسبت‌های بالاتر از ۳۰ درصد، مهره‌ها در داربست تشـکیل شده است. تشکیل مهره‌ها به‌گونـه‌ای اسـت کـه مـی‌تـوان گفـت در نسبت ۴۰، دیگر الیافی تشکیل نشده و هر آنچه از سر سوزن تزریـق برخاسته است، تـودهٔ مخلـوط دو پلیمـر اسـت. دلیـل ایـن رفتـار را می‌توان کاهش بیش از اندازهٔ گرانروی محلـول دانسـت. در بررسـی خواص مکانیکی داربست‌های متشکل از نانوالیاف، می‌تـوان افـزایش مدول کششی و مقاومت کششی را تا نسبت‌های ۳۰ درصد از صمغ عربی مشاهده کرد. کاهش مدول و مقاومت کششی با افزودن صـمغ عربی بیش از ۳۰ درصد دیگر پدیده‌ای اسـت کـه در مطالعـهٔ رفتـار مکانیکی داربست‌های تولیدی مشاهده مـی‌شـود. افـزایش مـدول و مقاومت کششی را می‌توان به کاهش قطـر الیـاف و افـزایش تـراکم آن‌ها ربط داد و کاهش مدول پس از افـزودن بـیش از انـدازهٔ صـمغ عربی را نیز می‌توان به تشکیل مهره‌ها بـه‌جـای الیـاف ربـط داد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت کـه بـا کـاهش انـدازهٔ الیـاف و افـزایش تراکم آن‌ها در داربست زیستی، مدول و مقاومـت کششـی افـزایش می‌یابد و تشکیل مهره‌ها به‌جای الیاف سبب کاهش چشم‌گیر خواص مکانیکی می‌شود.

مراجع

[1] Swift, G., "Environmentally biodegradable water-soluble polymers: In Degradable polymers", 2nd edition; Springer, Dordrecht, pp. 379-412, (2002).

[2] Chen, Z., Mo, X., Qing, F., "Electrospinning of collagen–chitosan complex", Materials Letters, 61(16), pp.3490-3494, (2007).

[3] Qin, X. H., Wang, S. Y., "Sandra, T., Lukas, D. "Effect of LiCl on the stability length of electrospinning jet by PAN polymer solution", Materials Letters, 59(24-25), pp. 3102-3105, (2005).

[4] Reneker, D. H., Chun, I., "Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. Nanotechnology", 7(3), 216, 216–223, (1996).

[5] Ahmad, S. I., Hasan, N., Zainul Abid, C. K. V., Mazumdar, N., "Preparation and characterization of films based on crosslinked blends of gum acacia, polyvinylalcohol, and polyvinylpyrrolidone-iodine complex", Journal of applied polymer science, 109(2), pp. 775-781, (2008).

[6] Pereira Jr, V. A., de Arruda, I. N. Q., Stefani, R., "Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (Red Cabbage) as Time–Temperature Indicators for application in intelligent food packaging", Food Hydrocolloids, 43, pp. 180-188, (2015).

[7] Bashiri, S., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., Dehghannya, J., "Beta-Carotene loaded nanoliposome: effects of gama–oryzanol on particle size stability and encapsulation", Research and Innovation in Food Science and Technology, 4(4), pp. 365-382, (2016).

[8] Vellora Thekkae Padil, V., Černík, M., "Tree Gum Based Electrospun Nanofibre Membranes., Process Optimization, Characterization and Environmental Application", Nanocon, 1, pp. 1-6, (2014).

[9] Dey, P., Bal, T., Gupta, R. N., "Fabrication and invitro evaluation of electrospun gum ghatti-polyvinyl alcohol polymeric blend green nanofibre mat (GG-PVA NFM) as a novel material for polymeric scaffolds in wound healing", Polymer Testing, 91, p. 106826, (2020).

[10] Eghbalifam, N., Shojaosadati, S. A., Hashemi-Najafabadi, S., Khorasani, A. C., "Synthesis and characterization of antimicrobial wound dressing material based on silver nanoparticles loaded gum Arabic nanofibers", International journal of biological macromolecules, 155, pp. 119-130, (2020).

[11] Farokhzadeh, M., "Microstructure control of bio-scaffolds consisting of nanofibers for wound dressing", MSc thesis, In Persian, (2017).

[12] Farokhzadeh, M., Kourki, H., Modiri S., Afzali, D., "Microstructural Study of Poly(Vinyl Alcohol) Nano-Fiberous Bio-Scaffold From Global Data", Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, in press, In Persian., (2018).

[13] Fahami, A., Fathi, M., "Fabrication and characterization of novel nanofibers from cress seed mucilage for food applications", Journal of Applied Polymer Science, 135(6), p. 45811, 1-6, (2018).