

Optimization of the electrospinning process of polyurethane nanofibers and their filtration performance for use in respiratory protection mask filters

Majid Habibi Mohraz¹, Farideh Golbabaie^{2*}, Il Je Yu³, Asghar Ghahri⁴

¹ Assistant Professor, Center of Excellence for Occupational Health Engineering, Occupational Health and safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

² Professor, Department of Occupational Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³ Professor, Institute of Nano Products Safety Research, Hoseo University, Asan, South Korea

⁴ Assistant Professor, Department of Occupational Health, Alborz University of Medical Sciences, Alborz, Iran

Received: 17 February 2019 Accepted: 26 April 2019

Abstract

Background and Aim: Electrospun nanofibers can be used to produce filter media in personal protective equipment for the military. The present study aimed to optimize the electrospinning process used to create polyurethane nanofiber substrates and compare the optimum substrate filtration performance with a typical commercial substrate used in the structure of N95 respirators.

Methods: In this experimental study, polyurethane polymer solutions were prepared in a solvent system consisting of dimethylformamide and tetrahydrofuran with a mixing ratio of 3: 2 (v/v%). The main and interactive effects of electrospinning process parameters (polymeric solution concentration, applied voltage, electrospinning distance, and polymer injection rate) on the mean diameter and uniformity of electrospun nanofibers and their optimal values were studied using response surface methodology, specifically, a central composite design. The filtration efficiency and pressure drop of the electrospun polyurethane nanofiber filter media were compared with the commercial media used in the N95 respiratory mask structure using a prepared filtration test rig.

Results: Based on the results of the quadratic model, the optimal conditions for the electrospinning of polyurethane polymer were polymeric solution concentration, applied voltage, electrospinning distance, and polymer injection rate of 14 w/v%, 17 kV, 10 cm, and 0.4 ml/h, respectively. The results showed that despite having a lower base weight, the filtration efficiency and quality factor of four layers of polyurethane nanofiber filter media were higher than that of a three-layer N95 mask (98.24% % versus 98.1%, and a quality factor of 0.061 versus 0.084 Pa⁻¹, respectively).

Conclusion: It can be concluded that the electrospun polyurethane nanofiber media have acceptable filtration efficiency and quality factor values for filtration applications. In addition, the fabrication of nanofiber media with desired properties (nanofiber diameter, uniformity, etc.) for use in the filters of respiratory protection equipment is possible by optimizing the electrospinning process.

Keywords: Optimization, Electrospinning, Nanofiber media, Polyurethane, Filtration.

بهینه سازی فرایند الکتروریسی بسترهای نانوفیبری پلی اورتان و بررسی عملکرد فیلتراسیونی آنها به منظور استفاده در فیلترهای ماسک های حفاظت تنفسی

مجید حبیبی محرز^۱، فریده گلبابایی^{۲*}، Il Je Yu^۳، اصغر قهری^۴

^۱ استادیار، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، انستیتو تحقیقات ایمنی محصولات نانو، دانشگاه هوسئو، کره جنوبی

^۴ استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی البرز، البرز، ایران

چکیده

زمینه و هدف: نانوفیبرهای ساخته شده از طریق فرایند الکتروریسی می توانند به منظور ساخت بسترهای فیلترکننده در ساخت تجهیزات حفاظت فردی نظامی، مورد استفاده قرار بگیرند. مطالعه حاضر با هدف بهینه سازی فرایند الکتروریسی برای ساخت بسترهای نانوفیبری پلی اورتان و مقایسه عملکرد فیلتراسیونی بستر بهینه ساخته شده با یک نمونه از بسترهای تجاری معمول مورد استفاده در ساختار ماسک های حفاظت تنفسی N95 انجام شده است.

روش ها: در مطالعه تجربی حاضر، ابتدا، محلول های پلیمری پلی اورتان در سیستم حلالی متشکل از دی متیل فرمامید و تتراهیدروفوران با نسبت اختلاط ۳ به ۲ آماده سازی شدند و سپس نحوه تاثیر پارامترهای الکتروریسی همانند غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتروریسی، فاصله الکتروریسی و دبی تزریق پلیمر بر روی قطر و یکنواختی نانوفیبرها و همچنین مقادیر بهینه این پارامترها با استفاده از طرح آزمایشات روش سطح پاسخ بر اساس طرح مرکب مرکزی بررسی شدند. سیستم تست عملکرد فیلتراسیونی این بسترها ساخته شد و راندمان فیلتراسیون و افت فشار بستر تولید شده با بستر تجاری مورد استفاده در ساختار ماسک های تنفسی N95 مقایسه شد.

یافته ها: بر اساس نتایج مدل درجه دوم به دست آمده، شرایط بهینه برای الکتروریسی پلیمر پلی اورتان شامل غلظت محلول الکتروریسی ۱۴ درصد وزنی حجمی، ولتاژ الکتروریسی ۱۷ کیلو ولت، فاصله الکتروریسی ۱۰ سانتی متر، دبی تزریق پلیمر ۰/۴ میلی لیتر در ساعت بود. بستر نانوفیبری چهار لایه پلی اورتان با وجود وزن پایه کمتر در مقایسه با بستر سه لایه ماسک N95 از راندمان فیلتراسیون و فاکتور کیفیت بالاتری برخوردار بود (به ترتیب ۹۸/۲۴ در مقابل ۹۸/۰۱ درصد و فاکتور کیفیت ۰/۰۶۱ در مقابل ۰/۰۴۸ Pa⁻¹).

نتیجه گیری: نتایج کسب شده نشان داد که بسترهای ساخته شده از لحاظ راندمان فیلتراسیون و فاکتور کیفیت مقادیر قابل قبولی را به منظور کاربردهای فیلتراسیونی دارا می باشند. علاوه براین با بهینه سازی فرایند الکتروریسی می توان با تغییر در پارامترهای موثر، بسترهای با ویژگی های دلخواه (قطر نانوفیبر، یکنواختی و ...) جهت استفاده در فیلترهای ماسک های حفاظت تنفسی تولید نمود.

کلیدواژه ها: بهینه سازی، الکتروریسی، بستر نانوفیبری، پلی اورتان، فیلتراسیون.

مقدمه

کاربرد گسترده نانو تکنولوژی در صنایع نظامی به منظور ساخت انواع تسلیحات، ادوات جنگی و سایر تجهیزات و ملزومات پشتیبانی به ایجاد مقوله نانوتکنولوژی دفاعی منجر شده است (۱)، بدیهی است که استفاده از نانو ذرات و سایر مواد ریز مقیاس در صنایع نظامی باعث افزایش مواجهه پرسنل شاغل در این صنایع با آلاینده های ناشی از این مواد خواهد شد (۲)، بنابراین به منظور حفاظت از این پرسنل نیازمند ایجاد روش ها و تجهیزات حفاظتی جدیدی می باشیم.

امروزه بسترهای فیبری غیر بافتی به عنوان بسترهای متخلخل، به طور گسترده ای در کاربردهای مختلف نظیر ماسک های حفاظت تنفسی یکبار مصرف، لباس ها و تجهیزات حفاظت در برابر سموم بیولوژیکی، هسته ای و شیمیایی در نظامیان، تجهیزات صنعتی پالایش هوا، سیستم های تصفیه هوا در اتاق تمیز، فیلترهای هوای داخل کابین خودرو و تصفیه کننده های هوا در محیطهای داخلی مورد استفاده قرار می گیرند (۳). با این حال، بسترهای فیبری معمولی دارای نقایص ساختاری و عملکردی متعددی همانند فیبرهای با قطر زیاد، عدم یکنواختی قطر فیبرها و منافذ آنها، راندمان فیلتراسیون نسبتا کم، وزن پایه بالا و مقاومت حرارتی کم هستند (۴).

مطالعات نشان داده اند که نانوفیبرهای ساخته شده از طریق فرایند الکترورسی به دلیل سبک بودن، سطح ویژه بالا، تخلخل بی نظیر، راندمان فیلتراسیون فیزیکی بالای ذرات، قابلیت عامل دار سازی برای خنثی نمودن انتخابی مواد شیمیایی خطرناک همانند گازهای جنگی و مخفی نمودن سربازان از دید دوربین های دید در شب، قابلیت بالا در انتقال بخار آب و سهولت تولید گزینه مناسبی جهت ساخت بسترهای فیلترکننده ذرات ریز مقیاس به منظور استفاده در ماسک های حفاظتی نظامی و همچنین لباس های حفاظتی مقاوم در برابر نفوذ گازهای جنگی و ذرات می باشد (۵). مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد بسترهای نانوفیبری ساخته شده بوسیله فرایند الکترورسی در جهت ساخت لباس های حفاظتی مقاوم در برابر نفوذ مواد شیمیایی، بیولوژیکی و رادیواکتیویته و همچنین ماسک های حفاظت تنفسی انجام شده است که نشان دهنده اثر بخشی و راندمان مناسب این بسترها بوده اند (۶، ۷). در فرایند الکترورسی بسترهای نانوفیبری از طریق شارژ با ولتاژ بالای محلول های پلیمری و نانوکامپوزیتی مختلف تولید می شوند (۸).

پلیمرهای مختلفی تا کنون برای ساخت بسترهای فیلتراسیونی نانوفیبری مورد بررسی قرار گرفته اند که در این میان پلیمرهای با پایه پلی اورتان به دلیل داشتن خصوصیات فیزیکی همانند مقاومت مکانیکی و کشسانی بالا، دوام و عدم حلالیت در آب، سطح متخلخل جهت جذب آلاینده های گازی و ... گزینه مناسبی برای ساخت بسترهای فیلتراسیونی با استفاده از فرایند الکترورسی می باشند

(۹). در فرایند الکترورسی متغیر های مختلفی از قبیل رژیم غلظتی پلیمر، ولتاژ الکترورسی، دبی تزریق محلول، و فاصله الکترورسی بر روی ساختار و خصوصیات نانوفیبرهای تولید شده تاثیر گذار هستند (۱۰).

هدف مطالعه حاضر بهینه سازی فرایند الکترورسی برای ساخت بسترهای نانوفیبری پلی اورتان و تعیین عملکرد فیلتراسیونی بستر بهینه ساخته شده به منظور استفاده در بسترهای فیلترهای حفاظت تنفسی می باشد.

روش ها

مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی بود که طی سال های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ بخشی از آن در دانشگاه علوم پزشکی تهران و بخشی نیز با همکاری انیستیتو ایمنی محصولات نانو دانشگاه هوستو کشور کره جنوبی انجام گردید.

مواد: پلیمر پلی اورتان ($MW=2 \times 10^5$) از شرکت Lubrizol خریداری گردید. حلال های دی متیل فرمامید (DMF)، تتراهیدروفوران (THF) از شرکت مرک آلمان، پودر کلرید پتاسیم (KCl) از شرکت سیگما آلدردیج خریداری شد.

تعیین حلال مناسب و شرایط مرزی پارامترهای

الکترورسی: به منظور انتخاب حلال مناسب و همچنین بهینه سازی شرایط الکترورسی برای پلیمر پلی اورتان ابتدا شرایط مرزی پارامترهای غلظت پلیمر، ولتاژ الکترورسی، فاصله الکترورسی و دبی تزریق محلول پلیمری از طریق انجام مطالعه اولیه به منظور تولید مداوم و یکنواخت نانوفیبرها تعیین شدند.

تعیین طرح آزمایشات بهینه سازی با استفاده از نرم

افزار Design Expert: پس از انتخاب حلال و شرایط مرزی مناسب برای تمامی پارامترها، طرح آزمایشات بهینه سازی از طریق روش سطح پاسخ بر اساس طرح مرکب مرکزی و با استفاده از نرم افزار Design (Version 7, Stat-Ease, Minneapolis) Expert انجام شد. در مطالعه حاضر طبق طراحی آزمایشات انجام شده برای بهینه سازی فرایند الکترورسی پلی اورتان ۲۱ نوبت آزمایش تعیین شد.

آماده سازی محلول های پلیمری برای الکترورسی: بعد

از انجام طرح آزمایشات بر اساس طراحی انجام شده غلظت های مختلف از پلیمر پلی اورتان (۱۲، ۱۴ و ۱۶ درصد وزنی) ساخته شد. برای ساخت محلول های پلی اورتان در غلظت های مورد نظر، پلیمر پلی اورتان به منظور ایجاد محلول پلیمری یکنواخت به مخلوط حلال متشکل از دی متیل فرمامید و تتراهیدروفوران با نسبت اختلاط ۳ به ۲ اضافه گردید و با استفاده از هم زن مغناطیسی به مدت ۱۲ ساعت محلول های یکنواختی از پلی اورتان آماده گردید (۹، ۱۱).

توسط فیلترهای صنعتی با راندمان بالا تصفیه می شد. در ورودی هوا از سنسور پایش رطوبت و درجه حرارت (Kimo, TH 210) به منظور پایش مشخصات هوای ورودی استفاده شد. اوریفیس تنظیم جریان نیز در انتهای سیستم تست قرار گرفت. همچنین به منظور تولید آئروسول های مورد استفاده در تست بسترها از آئروسول های جامد کلرید پتاسیم (KCl) در اتمایزر ساخت شرکت HCT کره جنوبی (4920, HCT Co., Ltd., Korea) استفاده شد. برای این منظور سوسپانسیون ۰/۰۱ درصد کلرید پتاسیم در آب بوسیله اختلاط ۲۰ دقیقه ای توسط همزن برقی آماده سازی گردید و در اتمایزر مورد استفاده قرار گرفت. پس از اختلاط هوای ترقیقی و هوای حاوی نانو ذرات تولید شده توسط اتمایزر و عبور جریان از صفحه اختلاط جریان هوا وارد بخش نگهدارنده بستر مورد آزمون گردید. قطر بخش نگهدارنده در حدود ۶ سانتی متر بود. در دو طرف بخش نگهدارنده چهار پراب تعبیه شد که یک پراب در هر طرف برای نمونه برداری از هوا جهت تعیین تراکم شمارشی نانو ذرات و یک پراب در هر طرف برای تعیین میزان افت فشار ایجاد شده توسط بستر مورد استفاده قرار گرفت. افت فشار ایجاد شده توسط بسترها توسط مانومتر دیجیتال (Kimo, CP 110) اندازه گیری شد.

در مطالعه حاضر تراکم عددی و توزیع سایز ذرات ورودی و خروجی از هر نمونه با استفاده از سیستم اسپکترومتر پویشی نانو ذرات (SNPS, HCT Co., Ltd., Korea) که شامل یک ایمپکتور، طبقه بندی کننده الکترواستاتیکی مجهز به ستون آنالیزگر افتراقی مبتنی بر تحرک پذیری الکتریکی ذره (DMA) متصل شده به شمارشگر کندانسونی ذرات (CPC, model 3022A, TSI Inc., Shoreview, MN, USA) و پایشگر گرد و غبار (Model 1.1.09, Grimm Technologies Inc., Douglasville, GA, USA) بود، اندازه گیری گردید.

نتایج

بر اساس بررسی های انجام شده و مرور مطالعات قبلی حلال هایی که امکان استفاده از آنها به عنوان حلال پلیمر پلی اورتان وجود داشت استخراج شدند. در اغلب مطالعات از دی متیل فرمامید، تتراهیدروفوران و یا ترکیب های مختلف این دو حلال برای الکترورسی پلی اورتان استفاده گردیده بود. در مطالعه حاضر پس از انجام مطالعه مقدماتی و بررسی های اولیه ترکیب ۳ به ۲، DMF به THF بهترین شرایط را برای انحلال یکنواخت و الکترورسی پلیمر پلی اورتان فراهم نمود.

جدول ۱- طراحی آزمایشات پارامترهای الکترورسی و مقادیر متغیر های پاسخ به دست آمده در هر نوبت از الکترورسی پلیمر پلی اورتان را نشان می دهد. شکل ۱ تصاویر SEM تهیه شده در نوبت های آزمایش مختلف را نمایش می دهد.

تنظیم شرایط الکترورسی و انجام نوبت های آزمایش:

پس از آماده سازی محلول های پلیمری، این محلول جهت الکترورسی به سرنگ های ۵ میلی لیتری مجهز به نیدل استیل با قطر استاندارد شماره ۱۸ انتقال داده شدند و سپس بر اساس طرح آزمایشات انجام شده شرایط الکترورسی که شامل ولتاژ الکترورسی، فاصله الکترورسی و دبی تزریق محلول پلیمری بود برای هر آزمایش تنظیم گردید و الکترورسی به ترتیب برای تمامی آزمایشات انجام شد.

تصویربرداری SEM از نمونه های نانوفیبر و تعیین

مشخصات ساختاری با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر:

بعد از اتمام آزمایشات جهت تعیین مشخصات ساختاری نانوفیبرها که شامل میانگین قطر نانوفیبرها و یکنواختی قطر (درصد ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها) نانوفیبرهای جمع آوری شده بود با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (S-3000N, Hitachi, Tokyo, Japan) تصویر برداری انجام شد. به منظور تعیین میانگین قطر نانوفیبرها با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر، در هر تصویر (سه تصویر برای هر نمونه) ۵۰ نانوفیبر بطور تصادفی انتخاب شدند و قطر آنها با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر (ImageJ 1.44p) مورد سنجش قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری داده ها: تجزیه و تحلیل آماری داده

ها با استفاده از نرم افزار Design-Expert و بر اساس تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) و ضریب همبستگی پیرسون انجام شد.

نشاندن لایه نانو فیبرها بر روی بستر زیر لایه: پس از

تعیین شرایط بهینه الکترورسی پلیمرها (سطوح یا مقادیری از پارامترهای الکترورسی که در آن نانوفیبرها با کیفیت، قطر و یکنواختی ساختاری مناسب تولید می شوند)، بسترهای فیلتراسیونی نهایی مورد نظر از طریق نشاندن لایه های نانوفیبرها بر روی یک بستر زیر لایه آماده سازی شدند. در مطالعه حاضر پارچه اسپان باند پلی پروپیلن با وزن پایه (گراماژ) در حدود ۱۶/۵ گرم بر مترمربع، قطر فیبر ۱۱/۵-۳/۵ μm و ضخامت ۱۰۰ μm به عنوان زیر لایه جهت نشاندن لایه های نانوفیبری مورد استفاده قرار گرفت.

تعیین مشخصات عملکرد فیلتراسیونی بسترهای

نانوفیبری تولید شده

مشخصات سیستم تست راندمان فیلتراسیون بسترها:

به منظور ارزیابی عملکرد فیلتراسیونی بسترهای مورد بررسی در آزمایشگاه گروه مکانیک سیالات دانشگاه هانیاگ کشور کره جنوبی سیستم تستی ساخته شد که متشکل از چهار قسمت اصلی شامل بخش تامین و تنظیم جریان، بخش مولد ذرات، بخش نگهدارنده نمونه بستر و بخش شمارش کننده ذرات تشکیل شده بود. سیستم تامین هوا شامل یک فن و اینورتر تنظیم جریان بود که در ابتدای سیستم تست قرار گرفته بود و هوای ورودی به فن

تولیدی مشاهده شد ($t=0/502, P_v<0/05$). رابطه بین فاصله الکتروریسی با قطر نانوفیبرها نیز به صورت مستقیم و البته غیر معنی دار از لحاظ آماری به دست آمد ($t=0/246, P_v>0/05$). در میان پارامترهای الکتروریسی تنها رابطه بین فاصله الکتروریسی با یکنواختی نانوفیبرها (درصد ضریب تغییرات قطر) از لحاظ آماری معنی دار بود ($t=0/672, P_v<0/05$) که نشان از کاهش یکنواختی قطر نانوفیبرها با افزایش فاصله الکتروریسی داشت. همچنین رابطه بین متغیرهای غلظت پلیمر و ولتاژ الکتروریسی با یکنواختی قطر نانوفیبرها از نوع ضعیف و مستقیم بود که از لحاظ آماری فاقد معنی داری بود.

به منظور بررسی اثر تعاملی پارامترهای الکتروریسی بر روی متغیرهای پاسخ و تعیین روابط بین متغیرهای پاسخ و پارامترهای الکتروریسی از روش تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) و برازش مدل استفاده شد. در این روش بر اساس طراحی آزمایشات انجام شده برای هر پلیمر مدل مناسب تعیین می شود و ضرایب پارامترها در این مدل پیش بینی می شوند. با مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده، از میان مدل‌های مختلف، مدل درجه دوم که دارای شاخص‌های آماری مطلوبی از جمله داشتن ریشه میانگین مربعات خطای کمتر، ضرایب تبیین تنظیم شده و پیش‌بینی بالاتر و همچنین مجموع مربعات مانده پیش‌بینی مدل کمتر نسبت به سایر مدل‌ها برای پیش بینی متغیرهای پاسخ استفاده گردید.

همانطور که در جدول ۱- نشان داده شده است، بیشترین میزان یکنواختی نانوفیبرهای پلی اورتان تولیدی مربوط به آزمایش شماره ۸ (غلظت: ۱۴ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ الکتروریسی: ۱۷ کیلو ولت، فاصله الکتروریسی: ۱۰ سانتی متر و دبی تزریق پلیمر: ۰/۴ میلی لیتر بر ساعت) می باشد. همچنین کمترین قطر نانوفیبرهای تولید شده در آزمایش شماره ۴ (غلظت: ۱۲ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ الکتروریسی: ۲۰ کیلو ولت، فاصله الکتروریسی: ۱۶ سانتی متر و دبی تزریق پلیمر: ۰/۲ میلی لیتر بر ساعت) مشاهده شد. بیشترین قطر نانوفیبرهای پلی اورتان نیز در آزمایش شماره ۵ (غلظت: ۱۶ درصد وزنی - حجمی، ولتاژ الکتروریسی: ۱۴ کیلو ولت، فاصله الکتروریسی: ۱۶ سانتی متر و دبی تزریق پلیمر: ۰/۶ میلی لیتر در ثانیه) مشاهده شد.

بررسی تاثیر انفرادی و تعاملی پارامترهای الکتروریسی بر متغیرهای پاسخ

میزان همبستگی بین پارامترهای الکتروریسی و متغیرهای پاسخ پلیمر پلی اورتان در جدول ۲- نشان داده شده است. طبق نتایج جدول ۲- بالاترین ضریب همبستگی بین پارامترهای الکتروریسی و قطر نانوفیبرهای پلی اورتان مربوط به غلظت پلیمر بود که رابطه مستقیم و معنی داری ($t=0/559, P_v<0/01$) را نشان داد. همچنین رابطه معکوس و معنی داری بین ولتاژ الکتروریسی و قطر نانوفیبرهای پلی اورتان مشاهده شد ($t=-0/496, P_v<0/05$). رابطه مستقیم و معنی دار بین دبی تزریق پلیمر با قطر نانوفیبرهای

جدول ۱- طراحی آزمایشات پارامترهای الکتروریسی و مقادیر پاسخ به دست آمده از الکتروریسی پلیمر پلی اورتان

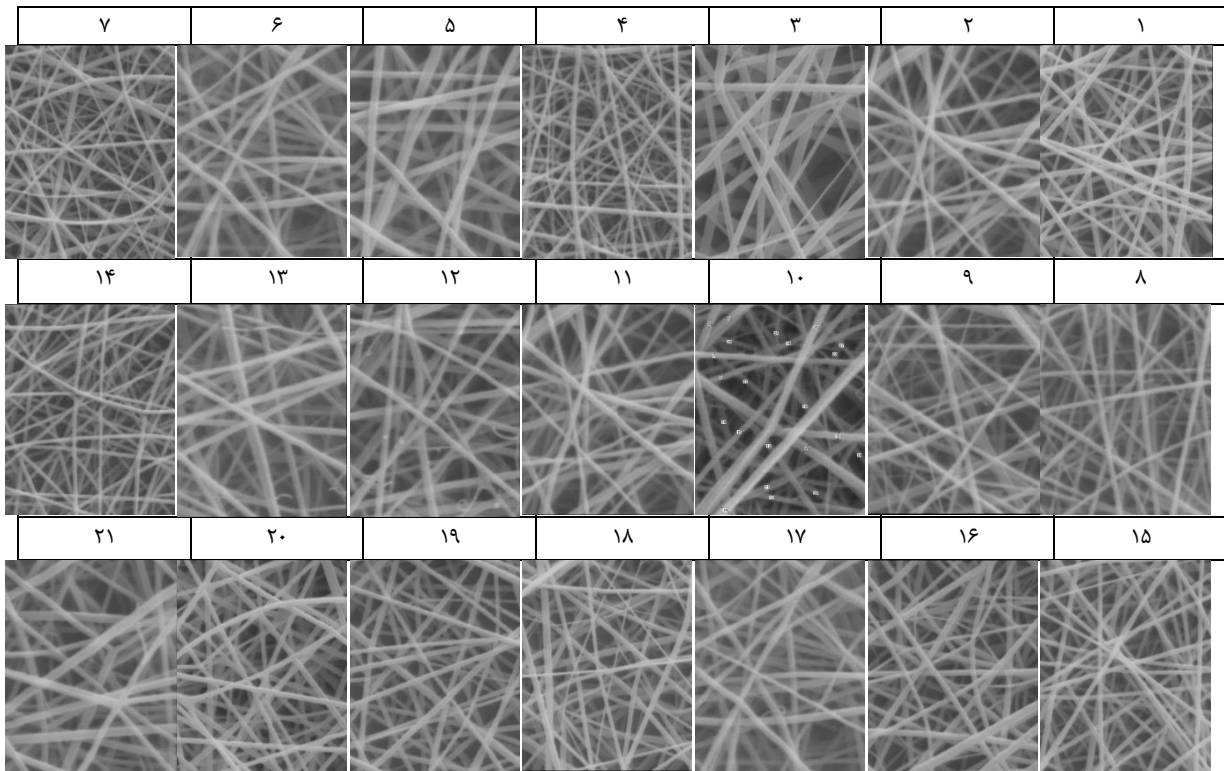
شماره آزمایش	مقادیر واقعی متغیرها			یکنواختی یا درصد ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها
	غلظت پلیمر (درصد وزنی)	ولتاژ الکتروریسی (کیلو ولت)	دبی تزریق (میلی لیتر بر ساعت)	
۱	۱۲	۱۴	۰/۶	۳۴/۷۵۹
۲	۱۴	۱۷	۰/۲	۳۲/۲۲
۳	۱۴	۱۴	۰/۴	۴۳/۱۷۶
۴	۱۲	۲۰	۰/۲	۳۹/۶۲۵
۵	۱۶	۱۴	۰/۶	۴۰/۲۵
۶	۱۶	۱۴	۰/۲	۳۵/۹۷۹
۷	۱۲	۱۷	۰/۴	۳۰/۷۸۸
۸	۱۴	۱۷	۰/۴	۲۲/۲۴۹
۹	۱۴	۱۷	۰/۴	۲۸/۵۶۱
۱۰	۱۶	۲۰	۰/۶	۲۶/۳۵۴
۱۱	۱۴	۱۷	۰/۴	۳۴/۷۶۴
۱۲	۱۴	۱۷	۰/۴	۳۲/۸۵۸
۱۳	۱۴	۱۷	۰/۴	۲۷/۷۶۵
۱۴	۱۲	۱۴	۰/۲	۲۹/۸۵۹
۱۵	۱۴	۱۷	۰/۴	۳۰/۳۹۷
۱۶	۱۴	۱۷	۰/۶	۳۴/۴۱۸
۱۷	۱۴	۲۰	۰/۴	۲۷/۴۴
۱۸	۱۲	۲۰	۰/۶	۴۲/۲۸۵
۱۹	۱۴	۱۷	۰/۴	۳۱/۵۴۵
۲۰	۱۶	۲۰	۰/۲	۲۴/۰۵۳
۲۱	۱۶	۱۷	۰/۴	۳۲/۶۶۸

یابی به مقادیر حداقل، حداکثر و یا خاصی از متغیرهای پاسخ نیز مورد استفاده قرار گیرد (۱۲). بنابراین می توان مقادیر دلخواه از متغیرهای پاسخ (به عنوان مثال قطر یا یکنواختی نانوفیبرهای مورد نظر) را بر اساس نیاز تعیین نمود و بر اساس اهمیت هر یک از متغیرهای پاسخ، مقادیر بهینه از متغیرهای ورودی (غلظت پلیمر، ولتاژ الکتروریسی و ...) برای دست یابی به متغیرهای پاسخ مورد نظر توسط نرم افزار پیشنهاد می گردد. جدول ۵- برخی از راه حل ها یا ترکیبات بهینه پیشنهادی از متغیرهای پاسخ را ارائه می دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۵- و همچنین مشاهدات عینی حین آزمایشات از میان ۳۰ راه حل پیشنهادی مدل، شرایط بهینه برای الکتروریسی پلیمر پلی اورتان عبارت بود از غلظت محلول الکتروریسی ۱۴ درصد وزنی حجمی، ولتاژ الکتروریسی ۱۷ کیلو ولت، فاصله سوزن تا کالکتور ۱۰ سانتی متر، دبی تزریق پلیمر ۰/۴ میلی لیتر در ساعت.

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل واریانس مدل درجه دوم بهینه سازی پارامترهای الکتروریسی برای پیش بینی متغیرهای پاسخ (میانگین قطر و یکنواختی نانوفیبرها) پلیمر پلی اورتان را نشان می دهد. بر اساس نتایج به دست آمده در مدل پیش بینی میانگین قطر نانوفیبرهای پلی اورتان پارامترهای A (غلظت پلیمر)، B (ولتاژ الکتروریسی)، C (دبی تزریق)، D (فاصله الکتروریسی)، AC، ADA²، C²، D² به عنوان پارامترهای معنی دار در مدل باقی ماندند. همچنین برای متغیر یکنواختی قطر نانوفیبرها نیز پارامترهای B، C، D، AD، BD، B² به دلیل معنی داری در مدل باقی مانده و سایر پارامترها از مدل خارج شدند. جدول ۴- مدل های رگرسیونی پیشنهادی برای پیش بینی متغیرهای پاسخ (قطر و یکنواختی قطر نانوفیبرها) را نشان می دهد.

نرم افزار Design Expert علاوه بر ارائه مدل مناسب برای پیش بینی متغیرهای پاسخ بر اساس متغیرهای ورودی می تواند در پیش بینی ترکیبات بهینه از متغیرهای ورودی به منظور دست



شکل-۱. نمونه تصاویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ تهیه شده از بسترهای تولید شده در نوبت های آزمایش الکتروریسی پلیمر پلی اورتان

جدول-۲. ضریب همبستگی بین پارامترهای الکتروریسی و متغیرهای پاسخ

متغیرهای پاسخ		پارامتر الکتروریسی / نانوفیبر
یکنواختی (درصد)	میانگین قطر نانوفیبرها (نانومتر)	
پلی اورتان	پلی اورتان	
-۰/۲۲۵	۰/۵۹۹**	غلظت پلیمر
-۰/۳۰۳	-۰/۴۹۶*	ولتاژ الکتروریسی
۰/۲۰۴	۰/۵۰۲*	دبی تزریق پلیمر
۰/۶۷۲**	۰/۲۴۶	فاصله الکتروریسی

*رابطه در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.

**رابطه در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

بررسی عملکرد فیلتراسیونی بستر بهینه ساخته شده و مقایسه آن با بستر استفاده شده در ساختار ماسک N95: جدول-۶ تعداد لایه ها، مشخصات و عملکرد فیلتراسیونی بسترهای مورد بررسی در سرعت سطحی ۲ سانتی متر در ثانیه برای دامنه اندازه ذرات ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر را نشان می دهد.

نتایج ارائه شده در جدول-۶ نشان می دهد که بستر نانوفیبری چهار لایه پلی اورتان در مقایسه با بستر سه لایه ماسک N95 از راندمان فیلتراسیون و فاکتور کیفیت بهتری برخوردار می باشد (به ترتیب ۹۸/۲۴ در مقابل ۹۸/۰۱ درصد و فاکتور کیفیت ۰/۰۶۱ در مقابل ۰/۰۴۸ Pa⁻¹).

جدول-۳. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس مدل درجه دوم بهینه سازی الکتروریسی پلیمر پلی اورتان

منبع	مجموع مربعات		درجه آزادی		مقدار پارامتر آماری F		PValue
	قطر	یکنواختی	قطر	یکنواختی	قطر	یکنواختی	
مدل	۱۱۱۶۹/۵۴	۶۰۴/۴۷	۹	۹	۸۱/۸۱	۲۰/۹۱	<۰/۰۰۰۱
غلظت (A)	۴۰۵۹/۹۴	۱/۷۹	۱	۱	۲۹۷/۳۸	۰/۵۶	<۰/۰۰۰۱
ولتاژ (B)	۱۰۰۴/۶۹	۱۲۳/۸۱	۱	۱	۷۳/۵۹	۳۸/۵۴	<۰/۰۰۰۱
دبی تزریق (C)	۲۸۴۹/۴۵	۲۶/۶۷	۱	۱	۲۰۸/۲۷	۸/۳	<۰/۰۰۰۱
فاصله (D)	۶۸۶/۷۳	۲۸۸/۶۲	۱	۱	۵۰/۳	۸۹/۸۴	<۰/۰۰۰۱
AB	-	-	۱	۱	-	-	-
AC	۲۱۰/۰۵	-	-	-	۱۵/۳۹	-	۰/۰۰۲
AD	۸۲/۲۶	۷۴/۰۲	-	-	۶/۰۳	۲۳/۰۴	۰/۰۰۰۶
BC	۵۴/۲۷	-	۱	۱	۳/۹۸	-	۰/۰۷۴
BD	-	۱۸/۸۴	-	-	-	۵/۸۶	۰/۰۳۳
A2	۱۹۸/۴۴	-	۱	۱	۱۴/۵۴	-	۰/۰۰۳
B2	-	۵۱/۵	-	-	-	۱۶/۰۳	۰/۰۰۲
C2	۲۲۲	۱۴/۹۸	۱	۱	۱۶/۲۶	۴/۶۶	۰/۰۵۳
D2	۸۳/۴	۲۳/۶۷	۱	۱	۶/۱۱	۱۰/۱۷	۰/۰۳۳

جدول-۴. مدل های پیشنهادی برای پیش بینی پارامترهای قطر نانوفیبرها و یکنواختی آنها

نوع پلیمر	پارامتر	مدل پیشنهادی
پلی اورتان	میانگین قطر نانوفیبرها (نانومتر)	$R1 = 145.41 + 20.15 * A - 22.41 * B + 16.88 * C + 8.29 * D + 5.12 * A * C - 7.17 * A * D - 2.6 * B * C - 8.47 * A2 + 8.96 * C2 - 5.49 * D2$
	یکنواختی قطر (درصد)	$R2 = 30.95 + 0.94 * A - 7.48 * B + 1.63 * C + 5.37 * D - 6.80 * A * D + 3.43 * B * D + 4.32 * B2 + 2.33 * C2 - 3.44 * D2$

جدول-۵. برخی از راه حل ها یا ترکیبات پیشنهادی بهینه پارامترهای الکتروریسی بسترهای نانوفیبری پلی اورتان

نوع بستر	شماره راه حل	غلظت (w/v %)	ولتاژ الکتروریسی (Kv)	دبی تزریق (ml/h)	فاصله (cm)	میانگین قطر نانوفیبر ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها (%)
پلی اورتان	۱	۱۴	۱۷	۰/۴	۱۰	۱۳۱
	۲	۱۶	۲۰	۰/۲	۱۰	۱۱۷
	۳	۱۲	۱۵	۰/۲	۱۰	۱۰۵

جدول-۶. تعداد لایه ها، مشخصات و عملکرد فیلتراسیونی بسترهای مورد بررسی در سرعت سطحی ۲ سانتی متر بر ثانیه در دامنه ذرات ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر

نوع بستر	تعداد لایه ها	وزن پایه بستر (گرم بر متر مربع)	قطر فیبرها (نانومتر)	افت فشار اولیه (پاسکال)	میانگین راندمان فیلتراسیون (درصد)	میانگین فاکتور کیفیت (Pa ⁻¹)
بستر پلی اورتان	چهار لایه یکسان	۱/۹۳	۱۲۳	۶۶	۹۸/۲۴ ± ۰/۱۳	۰/۰۶۱ ± ۰/۰۰۶
	زیر لایه پلی پروپیلن	۱۶/۵۷	۸۰۰	۱		
بستر ماسک N95	لایه اول	۷۷/۴۲	۲۱۶۰۰	۹۷	۹۸/۰۱ ± ۰/۱۶	۰/۰۴۸ ± ۰/۰۰۹
	لایه دوم	۹۹/۳۹	۷۸۶۰			
	لایه سوم	۲۸۳/۰۸	۲۴۷۰۰			

بحث

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲- رابطه مستقیم و معنی داری بین غلظت پلیمر پلی اورتان و قطر نانوفیبرهای تولید شده مشاهده شد. به نظر می رسد افزایش غلظت محلول پلیمری منجر به افزایش ویسکوزیته آن شده و در ویسکوزیته بالا محلول پلیمری به سختی در اثر اعمال میدانی الکتریکی کشیده شده و همین شرایط منجر به تولید نانوفیبرهای با قطر بالاتر می گردد (۱۳) از طرفی افزایش ویسکوزیته محلول در اثر افزایش غلظت محلول پلیمری می تواند از شکسته شدن و پراکندگی جریان پلیمر پس از خروج از سر سرنگ جلوگیری نماید و منجر به تولید نانوفیبرهایی با قطر بیشتر گردد (۱۴). این یافته ها در انطباق با نتایج دیگر مطالعات انجام شده می باشد (۱۵). به عنوان مثال Rabbi و همکاران دریافته اند که با افزایش غلظت پلیمر پلی اورتان از ۹ به ۱۱ و ۱۳ درصد وزنی حجمی قطر نانوفیبرهای تولید شده در فرایند الکترورسی بطور معنی داری افزایش می یابد (۱۶).

در مطالعه حاضر مشاهده شد که با افزایش ولتاژ الکترورسی پلیمر پلی اورتان از ۱۴ به ۲۰ کیلو ولت، قطر نانوفیبرهای تولید شده روند نزولی داشته است. افزایش ولتاژ الکترورسی می تواند از طریق اعمال نیروی کششی بیشتر بر جریان پلیمر منجر به حرکت سریع جریان پلیمر گردد، در این شرایط ایجاد نانوفیبرهای با قطر کوچکتر امکان پذیر می باشد (۱۷).

همچنین مشاهده شد که رابطه بین دبی تزریق پلیمر و قطر نانوفیبرهای پلی اورتان بصورت مستقیم و از لحاظ آماری معنی دار می باشد. با افزایش دبی تزریق پلیمر، میزان پلیمر موجود در مخروط تیلور افزایش می یابد و همین امر باعث می شود که تبخیر حلال و خشک شدن جریان پلیمر تا رسیدن به کالکتور با تاخیر اتفاق بیفتد بنابراین افزایش دبی تزریق پلیمر به دلیل ایجاد محدودیت در خشک شدن پلیمر در فرایند الکترورسی باعث تولید نانوفیبرهای قطورتر و تعداد دانه های بیشتر می گردد (۱۸، ۱۹).

در مطالعه حاضر رابطه بین فاصله الکترورسی و میانگین قطر نانوفیبرهای پلی اورتان از نوع مستقیم بود ولی این رابطه از لحاظ آماری معنی دار نبود. این یافته در انطباق با نتایج برخی از مطالعات همانند مطالعه مگلسکی و همکاران می باشد که رابطه معنی داری بین تغییر فاصله الکترورسی با قطر نانوفیبرها پیدا نمودند (۲۰). نتایج مطالعات دیگر نیز نشان داده که افزایش فاصله الکترورسی از طریق تضعیف شدت میدان الکتریکی اعمال شده به جریان پلیمر باعث افزایش قطر نانوفیبرهای تولید شده می شود (۲۱).

مشاهده شد که رابطه معکوسی بین پارامترهای غلظت پلیمر و ولتاژ اعمال شده با درصد ضریب تغییرات قطر نانوفیبرها (یکنواختی) وجود دارد. به نظر می رسد افزایش غلظت محلول پلیمری باعث توزیع بارهای یونی در زنجیره های پلیمر و ملکول های حلال می گردد و از این طریق منجر به تولید نانوفیبرهای با یکنواختی بیشتر می گردد. همچنین افزایش ولتاژ اعمال شده با

افزایش نیروی کشش اعمال شده بر جریان پلیمر از پراکنده شدن جریان پلیمر در حین پرواز آن جلوگیری می کند و منجر به تولید نانوفیبرهای یکنواخت می گردد (۱۵، ۲۲).

نتایج کسب شده در مطالعه حاضر حاکی از این بود که افزایش دبی تزریق پلیمر و فاصله الکترورسی باعث کاهش یکنواختی قطر نانوفیبرها شده است. نتایج سایر مطالعات نیز نشان داده است که در دبی تزریق کم به دلیل عدم تشکیل مخروط تیلور در اثر اعمال نیروی کششی ناشی از ولتاژ اعمال شده از یکنواختی نانوفیبرها کاسته می شود و در دبی های تزریق بالا نیز به دلیل جمع شدن پلیمر در سر نیدل تزریق و همچنین عدم تبخیر کافی حلال در فاصله سر نیدل تا کالکتور نانوفیبرهای غیریکنواخت تولید می گردد (۲۳، ۲۴). در خصوص تاثیر افزایش فاصله بر یکنواختی نانوفیبرها نیز نتایج متفاوتی در مطالعات گزارش شده است، در برخی از مطالعات بیان شده است که با افزایش فاصله شدت نیروی کششی اعمال شده بر جریان پلیمر کاهش یافته و به دلیل پراکنده شدن و عدم تمرکز جریان یکنواختی نانوفیبرها کاهش می یابد (۲۵). از طرفی در برخی از مطالعات عنوان شده است که با افزایش فاصله الکترورسی زمان کافی برای تبخیر حلال فراهم می گردد، در نتیجه حلال قبل از رسیدن جریان پلیمر به کالکتور تبخیر می گردد و نانوفیبرهای یکنواخت ایجاد می شود (۲۶).

در نهایت انجام تجزیه و تحلیل واریانس و مدلسازی تاثیر پارامترهای الکترورسی بر روی متغیرهای پاسخ نشان داد که مطابق با سایر مطالعات (۲۷) مدل درجه دوم نتایج مناسب و قابل تاییدی برای پیش بینی اثرات انفرادی و تعاملی پارامترهای مختلف الکترورسی بر روی متغیرهای پاسخ ارائه می دهد و شرایط بهینه الکترورسی برای پلیمر پلی اورتان زمانی حاصل می شود که غلظت محلول الکترورسی ۱۴ درصد وزنی حجمی، ولتاژ الکترورسی ۱۷ کیلو ولت، فاصله سوزن تا کالکتور ۱۰ سانتی متر، دبی تزریق پلیمر ۰/۴ میلی لیتر در ساعت باشد.

مقایسه عملکرد فیلتراسیونی بسترهای نانوفیبری پلی اورتان ساخته شده در مطالعه حاضر نشان داد که با وجود وزن پایه کم بستر پلی اورتان در مقایسه با بستر فیلتر N95 (در حدود ۲۵ برابر) اما راندمان فیلتراسیون و فاکتور کیفیت این بستر بهتر از بستر ماسک N95 بود. به نظر می رسد که قطر کم فیبرهای استفاده شده در بستر پلی اورتان در مقایسه با بستر ماسک N95 از طریق ایجاد جریان لغزشی در حین فیلتراسیون نانو ذرات باعث شده است که علاوه بر ایجاد افت فشار کمتر بتوان عملکرد فیلتراسیونی بالایی با وجود وزن پایه کم بستر فیلتراسیونی ایجاد نمود که یکی از مزایای منحصر به فرد بسترهای نانوفیبری در مقایسه با بسترهای میکروفاایبر می باشد. لی و گانگ شاجی نیز در مطالعات جداگانه به مقایسه عملکرد فیلتراسیونی بسترهای نانوفیبری با بسترهای ماسک N95 برای بدام اندازی ذرات زیر ۲/۵ میکرومتر پرداختند. نتایج مطالعات آنها حاکی از این بود که بسترهای نانوفیبری با وجود

نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعه حاضر می توان نتیجه گیری نمود که بسترهای ساخته شده از لحاظ راندمان فیلتراسیون و فاکتور کیفیت مقادیر قابل قبولی را به منظور کاربردهای فیلتراسیونی دارا می باشند. علاوه براین با بهینه سازی فرایند الکتروسیستی می توان با تغییر در پارامترهای موثر بسترهای فیلتراسیونی با ویژگی های دلخواه (قطر نانوفیبر، یکنواختی و ...) تولید نمود.

تشکر و قدردانی: مقاله حاضر بخشی از طرح تحقیقاتی

مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران به کد ۹۴-۰۱-۲۷-۲۸۵۵۳ می باشد که با حمایت این دانشگاه اجرا شده است. همچنین نویسندگان از مساعدت مالی و همکاری انیستیتو ایمنی محصولات نانو کشور کره جنوبی در اجرای این پروژه کمال تشکر و قدردانی را دارد.

تضاد منافع: بدینوسیله نویسندگان تصریح می نمایند که

هیچگونه تضاد منافی در خصوص مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

1. Altman J. Nanotechnology and preventive arms control. 2005.
2. Kurahatti R, Surendranathan A, Kori S, Singh N, Kumar AR, Srivastava S. Defence applications of polymer nanocomposites. 2010;60(5):551-63.
3. Wang C-s, Otani YJI, Research EC. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: a review. 2012;52(1):5-17.
4. Adiletta JG. Fibrous nonwoven web. Google Patents; 1999.
5. Sundarrajan S, Tan KL, Lim SH, Ramakrishna SJPE. Electrospun nanofibers for air filtration applications. 2014;75:159-63.
6. Chen L. Next generation of electrospun textiles for chemical and biological protection and air filtration. Massachusetts Inst of Tech Cambridge; 2009.
7. Ramaseshan R, Sundarrajan S, Liu Y, Barhate R, Lala NL, Ramakrishna SJN. Functionalized polymer nanofibre membranes for protection from chemical warfare stimulants. 2006;17(12):2947.
8. Desai K, Kit K, Li J, Davidson PM, Zivanovic S, Meyer HJP. Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications. 2009;50(15):3661-9.
9. Zdraveva EJTmič. Electrospinning of polyurethane nonwoven fibrous mats. 2011;1(1):55-60.
10. Mohraz M, Golbabaie F, Yu I, Mansournia M, Zadeh A, Dehghan SJIJoES, et al. Preparation and optimization of multifunctional electrospun polyurethane/chitosan nanofibers for air pollution control applications. 2018:1-14.
11. Karakaş H, Sarac A, Polat T, Budak E, Bayram S, Dağ N, et al. Polyurethane nanofibers obtained by electrospinning process. 2013;7(3):177-80.

کارایی فیلتراسیونی بالا و نزدیک به بسترهای N95 دارای افت فشار کمتری می باشند (۲۸، ۲۹).

از محدودیت های این مطالعه می توان به این مورد اشاره نمود که به دلیل عدم دسترسی به تجهیزات اندازه گیری نانو ذرات امکان تست بسترهای ساخته شده در شرایط واقعی و بررسی بیشتر پارامترهای تاثیر گذار بر روی راندمان این بسترها میسر نبود و تمامی آزمایشات در شرایط آزمایشگاهی انجام گردید.

با توجه به نتایج کسب شده می توان بیان نمود که با تغییر پارامترهای الکتروسیستی، امکان ساخت بسترهای نانوفیبری با مشخصات و عملکردهای فیلتراسیونی متفاوت وجود دارد که به دلیل وزن پایه و افت فشار کمتر و عملکرد فیلتراسیونی بهتر در مقایسه با بسترهای موجود، می توانند در ساخت بسترهای فیلتراسیونی مورد استفاده در تجهیزات حفاظت تنفسی نظامی و همچنین سایر اهداف فیلتراسیونی در صنایع نظامی مورد استفاده قرار گیرند.

12. Candiotti LV, De Zan MM, Camara MS, Goicoechea HCJT. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. 2014;124:123-38.
13. Srivastava Y, Marquez M, Thorsen TJJoaps. Multijet electrospinning of conducting nanofibers from microfluidic manifolds. 2007;106(5):3171-8.
14. Mit-uppatham C, Nithitanakul M, Supaphol PJMC, Physics. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter. 2004;205(17):2327-38.
15. Wang N, Burugapalli K, Song W, Halls J, Moussy F, Zheng Y, et al. Tailored fibro-porous structure of electrospun polyurethane membranes, their size-dependent properties and trans-membrane glucose diffusion. 2013;427:207-17.
16. Rabbi A, Nasouri K, Bahrambeygi H, Shoushtari AM, Babaei MRJF, Polymers. RSM and ANN approaches for modeling and optimizing of electrospun polyurethane nanofibers morphology. 2012;13(8):1007-14.
17. Karakaş H, Jahangiri S, Saraç A, editors. Structure and process parameter relations of electrospun nanofibers. 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery; 2016.
18. Gholipour A, Bahrami S, Nouri MJe-P. Optimization of chitosan-polyvinylalcohol electrospinning process by Response Surface Methodology (RSM). 2010;10(1).
19. Fridrikh SV, Jian HY, Brenner MP, Rutledge GCJPrI. Controlling the fiber diameter during electrospinning. 2003;90(14):144502.
20. Megelski S, Stephens JS, Chase DB, Rabolt JFJM. Micro-and nanostructured surface

- morphology on electrospun polymer fibers. 2002;35(22):8456-66.
21. Doshi J, Reneker DHJoe. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. 1995;35(2-3):151-60.
22. Pillay V, Dott C, Choonara YE, Tyagi C, Tomar L, Kumar P, et al. A review of the effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications. 2013.
23. Zargham S, Bazgir S, Tavakoli A, Rashidi AS, Damerchely RJJoEF, Fabrics. The effect of flow rate on morphology and deposition area of electrospun nylon 6 nanofiber. 2012;7(4): 155892501200700414.
24. Ziabari M, Mottaghitalab V, Haghi AKJKjoce. A new approach for optimization of electrospun nanofiber formation process. 2010;27(1):340-54.
25. Ding B, Wang M, Wang X, Yu J, Sun GJMT. Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors. 2010;13(11):16-27.
26. Homayoni H, Ravandi SAH, Valizadeh MJCP. Electrospinning of chitosan nanofibers: Processing optimization. 2009;77(3):656-61.
27. Pezeshki-Modaress M, Mirzadeh H, Zandi MJMS, C E. Gelatin-GAG electrospun nanofibrous scaffold for skin tissue engineering: fabrication and modeling of process parameters. 2015;48:704-12.
28. Li X, Gong YJJoC. Design of polymeric nanofiber gauze mask to prevent inhaling PM2. 5 particles from haze pollution. 2015;2015.
29. Skaria SD, Smaldone GCJAooh. Respiratory source control using surgical masks with nanofiber media. 2014;58(6):771-81.