

Optimizing Production and Modification of Surface Morphology of Nano-Fibrous Polysulfone Membranes

AMIN NAJAFI¹, ZAHRA EMAM-DJOMEH^{2*}, GHOLAMREZA ASKARI³

1. Graduate MSc student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(Received: Apr. 28, 2018- Revised: May. 18, 2019- Accepted: May. 25, 2019)

ABSTRACT

The scope of this research was to model and optimize the electrospun parameters for the production of nanofiber membrane from polysulfone (PSF) polymer using the response surface methodology (RSM) with application in membrane systems. For this purpose, the influence of applied voltage (12-18 KV), flow rate (0.3-0.6 mL/h), the distance between needle and collector (10.5-17.5 cm) and effect of non-ionic surfactant Triton x-100 (TR-100) on the morphology and structure of nanofibers membrane was investigated. The optimal conditions for the fabrication of nanofibers were found to be as follow: the voltage 16.31 kV, the flow rate 0.39 mL/h, and the spinning distance 15.45 cm. The results of SEM demonstrated that with the addition of the surfactant, the fiber diameter reduced about 20% and the morphological properties of PSF nanofiber improved and homogeneous nanofibers have been produced. The contact angle of the developed nanofibers demonstrated that their surfaces were hydrophobic (PSF and PSF/TR-100).

Keywords: Electrospinning, Nanofiber Membrane, Surfactant, Polysulfone.

بهینه‌سازی تولید و اصلاح خصوصیات سطحی غشاء نانوفیبری پلی‌سولفون ابگریز

امین نجفی^۱، زهرا امام جمعه^{۲*}، غلامرضا عسکری^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۴)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای دستگاه الکترورسی برای تولید غشاء نانوالیافی با کاربرد در سیستم‌های غشایی از پلیمر پلی‌سولفون (PSF) با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد. برای این منظور، تاثیر ولتاژ (۱۸-۱۲ کیلوولت)، سرعت جریان محلول پلیمری (۰/۳-۰/۶ میلی‌لیتر در ساعت) و فاصله بین سوزن و جمع‌کننده (۱۷/۵-۱۰/۵ سانتی‌متر) و اثر سورفکتانت غیر یونی Triton x-100 (TR-100) بر مورفولوژی و ساختار غشاء نانوالیافی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه برای تولید نانوالیاف به این صورت می‌باشد: ولتاژ اعمال شده ۱۶/۳۱ کیلوولت، سرعت جریان محلول پلیمری ۰/۳۹ میلی‌لیتر در ساعت و فاصله الکترورسی ۱۵/۴۵ سانتی‌متر. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد با افزودن سورفکتانت، قطر نانوالیاف حدود ۲۰ درصد کاهش یافته و خواص مورفولوژیکی نانوالیاف بهبود یافته و نانوالیاف یکدست و همگن تولید گردیده است. زاویه تماس غشاءهای نانوالیافی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج بیانگر آبگریز بودن هر دو غشاء (PSF/TR-100 و PSF) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الکترورسی، غشاء نانوالیافی، سورفکتانت، پلی‌سولفون

مقدمه

روش الکترورسی یک فناوری مدرن و انعطاف‌پذیر برای تولید نانوالیاف نابافته با استفاده از نیروی الکترواستاتیک می‌باشد. در این روش، یک میدان الکتریکی قوی بر محلول پلیمری در حال خروج از سرنگ اعمال می‌گردد (Suja et al., 2017). نانوالیاف تولیدی دارای ویژگی‌های برجسته‌ای همچون نسبت سطح به حجم خیلی بالا، قطر کم، انعطاف‌پذیری در عملکرد و مقاومت مکانیکی مطلوب می‌باشند. سیستم الکترورسی شامل یک منبع تامین ولتاژ بالا، پمپ سرنگی به همراه یک سوزن فلزی یا پلاستیکی و الکتروود انباشتگر فلزی می‌باشد (Suja et al., 2017). مورفولوژی و کیفیت نانوالیاف تحت تاثیر چند پارامتر و شرایط مختلف الکترورسی قرار دارد. پارامترهای محلول الکترورسی شامل وزن مولکولی، ویسکوزیته، هدایت الکتریکی، کشش سطحی و ثابت الکتریکی است. پارامترهای فرآیند هم ولتاژ اعمال شده، فاصله الکترورسی و سرعت جریان محلول پلیمری می‌باشد (Noruzi, 2016; Pokorny et al., 2015). در میان پلیمرهای

سنتزی، پلی‌سولفون یک پلیمر ترموپلاستیک و آبگریز می‌باشد که با توجه به مقاومت بالای مکانیکی، شیمیایی و حرارتی آن، به طور گسترده برای تولید غشاء استفاده می‌شود (Uzal et al., 2017). در سال ۲۰۱۷، Kerianne و همکاران ساخت غشاء پلیمری پلی‌سولفون به همراه سلولز استات توسط روش الکترورسی را گزارش کردند و عملکرد آن را در فرآیند اولترافیلتراسیون مورد بررسی قرار دادند. میانگین قطر الیاف و ضخامت غشاء به ترتیب ۱ و ۵۰ میکرون بدست آمد. آن‌ها گزارش دادند که نانوفیبرهای بدست آمده به طور موثری عملکرد جداسازی را بهبود می‌بخشد و موجب افزایش شار عبوری می‌شوند (Dobosz et al., 2017). کشش سطحی و ویسکوزیته محلول پلیمری از مهمترین عوامل موثر بر مورفولوژی نانوالیاف هستند (Kriegel et al., 2008). به طور کلی کشش سطحی باید به اندازه کافی پائین باشد تا نیروی الکترواستاتیک بتواند بر آن غلبه کند و ویسکوزیته باید به اندازه کافی بالا باشد تا از تجزیه جت به قطرات جلوگیری شود (Rogina, 2014). افزودن

± 40 تحت شرایط همزنی یکنواخت با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت. در مرحله بعد، سورفکتانت TR-100 به نسبت ۱ درصد (وزنی/وزنی) محلول پلی سولفون اضافه گردید. پس از این زمان، محلول همگن و شفاف به دست آمد و سپس این محلول به شیشه‌های درب‌دار منتقل گردید تا برای آزمون از پیش تعیین شده ویسکوزیته به کار برده شود (Ray et al., 2017).

اندازه‌گیری ویسکوزیته محلول پلیمری

ویسکوزیته هر یک از محلول‌های پلیمری در سرعت برشی ثابت 10 s^{-1} و در دمای محیط با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد (Brookfield DV-III, LV Viscometer, USA) با اسپیندل SC4-18 اندازه‌گیری شد.

طراحی آزمایش‌ها و آنالیز آماری

طرح مرکب مرکزی^۱ (CCD) برای ارزیابی اثر متغیرهای مستقل (ولتاژ اعمالی: ۱۲-۱۸ کیلوولت، سرعت خروج محلول پلیمری: ۳/۶-۰/۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فاصله الکتروریسی: ۱۷/۵-۱۰/۵ سانتی‌متر) بر متغیرهای پاسخ (قطر الیاف و تخلخل غشاء) به کار برده شد. در تحلیل داده‌های بدست آمده در بخش‌های مختلف، از نرم‌افزارهای Design Expert 10 و Microsoft excel 2016 استفاده شد. برای به حداقل رساندن اثر خطاهای آزمایشی بر پاسخ‌های مشابه شده، همه‌ی آزمون‌ها تا اندازه ممکن در زمان‌های مشابه انجام شدند. همه‌ی داده‌های گزارش شده در این پایان‌نامه، میانگین ۳ تکرار به همراه انحراف استاندارد است. مورفولوژی و سطوح نانوفیبرهای الکتروریسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Vega 3 TESCAN Model) مشاهده شد. قبل از انجام عکس‌برداری، سطوح نانوفیبرها با یک لایه نازک طلاپوشانی شد. میانگین قطر نانوفیبرها با استفاده از نرم افزار Image j (windows version) و اندازه‌گیری حداقل ۱۰۰ نانوفیبر بررسی گردید (Dobosz et al., 2017).

تخلخل کلی غشاء نانوفیبری

تخلخل کلی (ε) غشاءهای نانوفیبری الکتروریسی با استفاده از روش وزن‌سنجی اندازه‌گیری شد (Liao et al., 2013; Shokrollahzadeh and Tajik, 2018). ابتدا غشاءهای نانوفیبری به مدت ۲۴ ساعت در اتانول قرار داده شدند و پس از خارج نمودن از ظرف اتانول، وزن شدند (w_1). سپس غشاءها به مدت ۱۰ ساعت در دسیکاتور قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند و وزن شدند (w_2). معادله زیر برای محاسبه تخلخل استفاده شد:

سورفکتانت موجب افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کشش سطحی می‌شود و همچنین جت پلیمری راحت‌تر تشکیل می‌گردد و در نهایت اثر مثبت روی مورفولوژی و یکنواختی نانوالیاف دارد. (Broumand et al., 2014a). TR-100 یک سورفکتانت غیر یونی می‌باشد و با کاهش کشش سطحی محلول پلیمری، کیفیت و یکنواختی نانوالیاف را بهبود می‌دهد (Yu et al., 2012). سورفکتانت در هنگام تشکیل جت پلیمری موجب افزایش هدایت الکتریکی می‌شود (Broumand et al., 2015). روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهای به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Heidari et al., 2017). روش سطح پاسخ می‌تواند یک روش مطلوب برای بهینه‌سازی تولید نانوالیاف الکتروریسی باشد (Sarlak et al., 2012). برومند و همکاران در سال ۲۰۱۴ تولید نانوالیاف سلولزاستات را با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی کردند و قطر نانوالیاف بهینه بدست آمده ۸۳ نانومتر بدست آمد (Broumand et al., 2014b). هدف از پژوهش حاضر، بهینه‌یابی، مدل‌سازی و تولید غشاء نانوالیافی الکتروریسی پلیمر پلی سولفون با حداکثر تخلخل و حداقل قطر الیاف با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد. علاوه بر این، تاثیر افزودن سورفکتانت TR-100، بر خواص فیزیکی، شیمیایی و ویژگی‌های سطحی غشاء نانوفیبری و همچنین افزایش در میزان تخلخل غشاء و شار عبوری بالاتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت غشاء بهینه جهت کاربرد ویژه در صنعت غذا و آبمیوه با ویژگی‌های مهندسی شده معرفی و تولید می‌گردد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

پلی سولفون با وزن مولکولی ۶۰۰۰۰ گرم بر مول از شرکت BASF آلمان تهیه گردید. حلال‌های دی متیل فرمامید (DMF) و اتانول از شرکت مرک خریداری شد. سورفکتانت غیر یونی (TR-100) از شرکت Bio basic کانادا تهیه و خریداری گردید.

روش‌ها

آماده‌سازی محلول پلیمری

برای آماده‌سازی محلول پلیمری پلی سولفون، ابتدا مقدار معینی از پلیمر به حلال دی متیل فرمامید (DMF) اضافه گردید به طوری که نسبت نهایی کل مواد جامد حل شده به ۲۰ درصد (وزنی/حجمی) رسید. این آمیزه به مدت ۴ ساعت در دمای 2°C

$$\varepsilon = \frac{w_1 - w_2}{\frac{\rho_1}{w_1 - w_2} + \frac{\rho_2}{w_2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

ρ_1 و ρ_2 به ترتیب دانسیته اتانول و پلیمر پلی سولفون می باشند.

اندازه گیری مقاومت مکانیکی غشاء

مقاومت مکانیکی غشاء نانوفیبری ساخته شده با استفاده از دستگاه آنالیز بافت سنج (Testometric Co. Ltd., Rochdale, U.K.) اندازه گیری شد. ابعاد غشاء نانوفیبری برای اندازه گیری ۱۰ میلی متر × ۱۰۰ میلی متر (عرض × طول) بود و فاصله بین دو گیره دستگاه بافت سنج ۶۰ میلی متر بود.

اندازه گیری ضخامت غشاء

ضخامت غشاء نانوفیبری با استفاده از میکرومتر دیجیتالی (Mitutoyo 689037, Detroit, MI) با دقت ۰/۰۱ میلی متر و به طور تصادفی از ۱۰ نقطه غشاء اندازه گیری شد.

زاویه تماس آب با سطح غشاء

زاویه تماس آب با سطح غشاء نانوفیبری با استفاده از دستگاه زاویه سنج و دوربین مخصوص اندازه گیری شد. برای این منظور، یک قطره آب مقطر از فاصله ۱ سانتی متری توسط یک میکروسرنج بر روی سطح غشاء ریخته شد. این زاویه، زاویه بین سطح جامد و تانژانت سطح مقطع مایع است. هر چقدر این زاویه بزرگتر باشد، بیانگر آبگریزتر بودن سطح غشاء می باشد.

طیف سنجی فروسرخ تبدیل فوریه^۱ (FT-IR)

آنالیز طیف سنجی FT-IR نانوالیاف الکتروریسی در دمای محیط و با استفاده از طیف سنج مادون قرمز (Thermo Avatar, USA) انجام شد. اندازه گیری در دامنه عدد موجی 4000-500 cm⁻¹ و با رزولوشن 4 cm⁻¹ صورت پذیرفت.

میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ (AFM)

مورفولوژی و زبری نسبی سطح غشاء نانوفیبری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (NT-MDT, Moscow, Russia) در حالت غیر تماسی (سطح مورد بررسی ۱۲ میکرون × ۱۲ میکرون) و در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

برازش مدل

مطالعات اولیه برای به دست آوردن محدوده مناسب پارامترهای الکتروریسی در طراحی این آزمایش انجام شد. اثر های سه متغیر

مستقل شامل ولتاژ اعمالی، سرعت خروج محلول پلیمری و فاصله الکتروریسی بر متغیرهای پاسخ شامل قطر الیاف و تخلخل غشاء بررسی شد. جدول (۱) طرح مرکب مرکزی و نتایج آزمایشات برای پاسخ قطر و تخلخل را نشان می دهد. آنالیز واریانس (ANOVA) برای میانگین قطر فیبرها و تخلخل غشاء نانوفیبری پلی سولفون در جدول (۲) نشان داده شده است. به منظور بررسی کفایت مدل، روش های مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند که شامل تجزیه و تحلیل باقیمانده ها، سنجش باقیمانده ها، خطای پیش بینی شده باقیمانده های مجموع مربعات و امتحان کردن عدم تطابق می باشند (Hinkelmann, n.d.). P-value معنی دار بودن یا نبودن مدل را نشان می دهد و مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده معنی دار بودن مدل است (Khuri, 2011; Yolmeh and Jafari, 2017). همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، مقدار P-value مدل چند جمله ای برای پاسخ های قطر الیاف و تخلخل غشاء معنی دار بوده و مدل درجه دوم به طور دقیق رابطه بین پاسخ ها را پیش بینی نموده است. عدم تطابق، واگرایی مدل را از مقادیر تجربی نشان می دهد. بی معنی بودن عدم تطابق ($P > 0.05$) تأکیدی بر کارایی و کفایت مدل است. کفایت مدل با استفاده از ضریب تعیین (R^2) هم بررسی می شود. در واقع، R^2 نشان دهنده درصد تغییرات مدل است که توسط متغیر مستقل پاسخ داده می شود (Broumand et al., 2015). هر چه مقدار R^2 بیشتر باشد نشان می دهد خطای استاندارد کمتر است، که احتمال یک پیش بینی دقیق تر را در مدل ارائه شده افزایش می دهد.

مقدار R^2 برای قطر الیاف و تخلخل غشاء به ترتیب ۰/۹ و ۰/۹۵ بدست آمده است. البته لازم به ذکر است که R^2 به تنهایی نمی تواند دقت و صحت مدل را مورد سنجش قرار دهد، زیرا این پارامتر در واقع مقیاسی از کاهش میزان قابلیت تغییر پذیری پاسخ^۳ بدست آمده با استفاده از متغیرهای مانع شونده^۴ در مدل است. بنابراین از ضریب دیگری به نام ضریب تعیین تعدیل شده و بهبود مدل پیشنهادی کاهش می دهد (Myers and Montgomery, 2002). ضریب پراکندگی^۵ (CV) میزان پراکندگی داده ها را از میانگین نشان می دهد. به طور کلی، CV و $Adj-R^2$ مناسب بودن مدل را ارزیابی می کنند و به ترتیب برای تخلخل ۳/۱ و ۰/۹ و قطر الیاف ۶/۴۱ و ۰/۸ می باشند.

جدول ۱. طرح مرکب مرکزی و نتایج آزمایشات

شماره تیمار	متغیرهای وابسته		متغیرهای مستقل		
	تخلخل (درصد)	قطر الیاف (نانومتر)	فاصله الکتروریسی (سانتی متر)	سرعت خروج محلول (میلی لیتر بر ساعت)	ولتاژ (کیلوولت)
۱	۶۴/۳۱	۹۷۴	۱۷/۵	۰/۳	۱۸
۲	۶۹/۴۱	۱۳۵۲	۱۰/۵	۰/۶	۱۲
۳	۷۷/۹۶	۱۱۹۸	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۴	۶۳/۱۲	۱۱۷۹	۱۷/۵	۰/۶	۱۸
۵	۶۵/۵۳	۱۰۴۰	۱۰/۵	۰/۶	۱۸
۶	۶۰/۴	۹۲۸	۱۴	۰/۲	۱۵
۷	۶۱/۳	۹۸۸	۱۴	۰/۴۵	۲۰
۸	۶۰/۲۴	۹۳۰	۸	۰/۴۵	۱۵
۹	۶۸/۸۸	۱۰۸۹	۲۰	۰/۴۵	۱۵
۱۰	۶۷/۹۸	۱۳۶۴	۱۴	۰/۴۵	۱۰
۱۱	۷۸/۳۶	۱۳۱۵	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۱۲	۷۵/۵۶	۱۲۰۱	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۱۳	۷۹/۵	۱۲۸۲	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۱۴	۶۶/۶۲	۱۳۲۱	۱۴	۰/۷	۱۵
۱۵	۷۶/۳۶	۱۲۰۱	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۱۶	۶۳/۹۲	۱۲۶۴	۱۰/۵	۰/۳	۱۲
۱۷	۶۳/۱۳	۱۵۳۰	۱۷/۵	۰/۶	۱۲
۱۸	۷۶/۹۶	۱۱۹۸	۱۴	۰/۴۵	۱۵
۱۹	۶۹/۹۸	۱۴۰۹	۱۷/۵	۰/۳	۱۲
۲۰	۵۸/۹۸	۱۰۳۰	۱۰/۵	۰/۳	۱۸

جدول ۲. آنالیز واریانس بهینه سازی تولید نانوالیاف

مشخصه	درجه آزادی	قطر الیاف (نانومتر)		تخلخل غشاء (درصد)	
		P-value	مجموع مربعها	P-value	مجموع مربعها
مدل	۹	۰/۰۰۱۵	۴۶۵۷۰۹/۹۲	۰/۰۰۰۱	۸۳۸/۲۶
ولتاژ (A)	۱	۰/۰۰۰۱	۳۰۰۰۲۶/۹۷	۰/۰۱۷۱	۳۸/۴۰
سرعت جریان (B)	۱	۰/۰۰۳۷	۸۶۱۹۱/۵	۰/۰۹۸۱	۱۵/۳۵
فاصله (C)	۱	۰/۰۳۹۵	۳۳۲۰۴/۸۹	۰/۰۵۵۸	۲۱/۷۲
AB	۱	۰/۹۷۸۳	۴/۵	۰/۲۹۲۶	۵/۶۳
AC	۱	۰/۲۹۱۴	۷۲۰۰	۰/۶۱۳۱	۱/۲۴
BC	۱	۰/۳۱۴۸	۶۴۹۸	۰/۰۰۸۶	۵۰/۳۵
A ²	۱	۰/۰۸۰۹	۲۲۱۵۶/۹۶	۰/۰۰۰۴	۱۳۶/۴۰
B ²	۱	۰/۲۸۲۹	۷۴۷۸/۴۷	۰/۰۰۰۱	۳۰۲/۶۰
C ²	۱	۰/۰۱۲۱	۵۶۱۸۳/۶۵	۰/۰۰۰۱	۲۵۶/۷۱
Residual	۹	-	۵۱۵۹۲/۸۱	-	۴۰/۵۶
Lack of Fit	۴	۰/۱۰۱۷	۳۷۹۷۱/۳۱	۰/۰۹۲۱	۳۰/۳۱
Pure Error	۵	-	۱۳۶۲۱/۵	-	۱۰/۲۵
Total	۲۰	-	۵۱۷۳۰۲/۷۳	-	۸۷۸/۸۲

نانوفیبرهای یکنواخت و همگن است. در واقع، با افزایش شدت ولتاژ در یک فاصله ثابت، به دلیل افزایش نیروی الکترواستاتیک و اعمال نیروی بیشتر بر قطرات، میانگین قطر فیبرها به طور متناوب شروع به کاهش می‌کند. پس از مدتی به علت کاهش زمان پرواز و در نتیجه کاهش نیروهای اعمال شده برای کشش جت در فاصله ثابت، میانگین قطر نانوفیبرها بعد از یک نقطه مشخص به آرامی شروع به افزایش می‌کند. به طور کلی، افزایش ولتاژ می‌تواند هم تعداد و اندازه مهره و گره‌ها را افزایش دهد و هم می‌تواند آنها را حذف کند و میانگین قطر نانوفیبرها را کاهش دهد (Myers and Montgomery, 2002). در این تحقیق، یک رابطه معکوس بین قطر الیاف و ولتاژ اعمالی بدست آمده است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است قطر فیبرها در شرایط فاصله ثابت، با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش یافته‌اند. Ahmadipourroudposht و همکاران در سال ۲۰۱۵، تولید نانوالیاف پلی‌وینیل الکل را با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه نمودند و متغیر پاسخ، میزان قطر الیاف و توزیع آن بود. دو پارامتر سرعت جریان و ولتاژ اعمال شده در ارزیابی اولیه به عنوان مهمترین عوامل شناخته شدند. طراحی کامپوزیت مرکزی برای بهینه‌سازی متغیر توزیع قطر استفاده شد (Ahmadipourroudposht et al., 2015).

جدول آنالیز واریانس (۲) نشان دهنده بالا بودن مقدار ضریب تعیین برای دو پاسخ تخلخل غشاء و قطر الیاف می‌باشد که بیانگر مناسب بودن مدل ارائه شده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته است. علاوه بر این، جدول آنالیز واریانس نشان داده است که برای پاسخ قطر الیاف مشخصه‌های A، B، C و C^2 معنی‌دار هستند ($P < 0.05$)، در حالی که مشخصه‌های AB، AC، BC، A^2 و B^2 غیر معنی‌دار هستند ($P > 0.05$). برای پاسخ تخلخل غشاء نانوالیافی، مشخصه‌های A، BC، A^2 ، B^2 و C^2 معنی‌دار هستند. مدل‌های تجربی نهایی با حذف مشخصه‌های غیر معنی‌دار بدست آمدند و به شرح زیر می‌باشند:

$$\text{Porosity} = 77.42 - 2.07A - 2.5 BC \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$- 4.03 A^2 - 4.7 B^2 - 4.33 C^2$$

$$\text{Diameter} = 1230.23 - 183.18 A + \quad (\text{رابطه ۳})$$

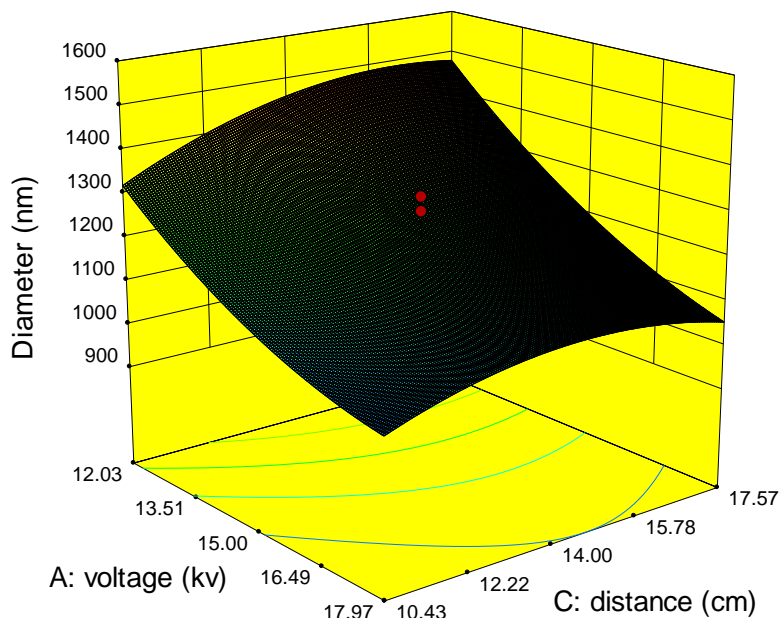
$$79.44 B + 49.3 C - 64.01 C^2$$

A، B و C به ترتیب ولتاژ، سرعت جریان و فاصله الکتروروسی می‌باشند.

اثر پارامترهای الکتروروسی بر قطر الیاف

ولتاژ

ولتاژ اعمال شده یکی از پارامترهای مهم و اساسی برای تولید



شکل ۱. نمودار سه بعدی اثر ولتاژ بر قطر نانوفیبر در سرعت جریان ۰/۴۵ میلی لیتر بر ساعت

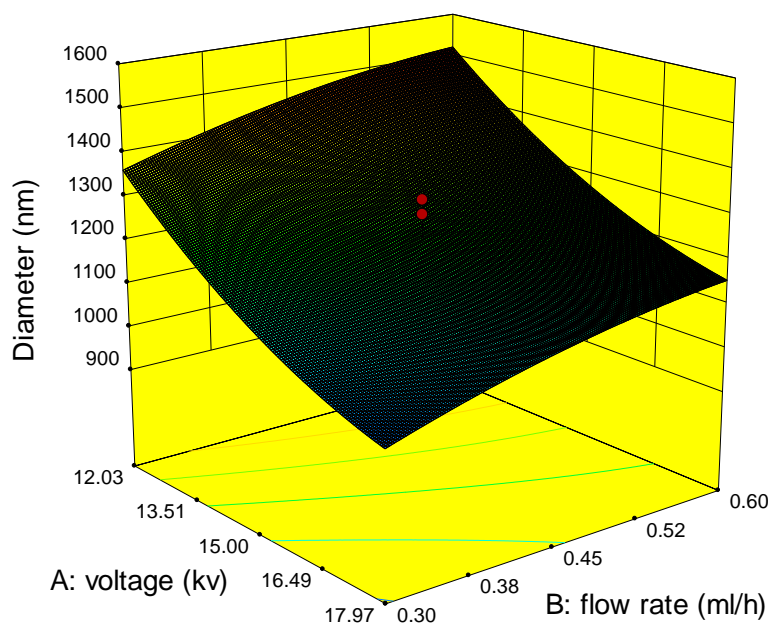
افزایش سرعت جریان محلول پلیمری، قطر و ضخامت الیاف افزایش می‌یابند. در هر زمانی، در طول تشکیل نانوفیبر اگر گره و مهره تشکیل شوند، افزایش سرعت خروج محلول پلیمری باعث افزایش اندازه آن‌ها می‌شود. همچنین سرعت جریان بیش از میزان بحرانی، می‌تواند باعث اتصال الیاف به یکدیگر شود. این

سرعت خروج محلول پلیمری

سرعت جریان خروج محلول پلیمری اثر مهم و قابل توجهی بر مورفولوژی نانوالیاف الکتروروسی دارد و مقدار محلول مورد استفاده در فرآیند الکتروروسی را تعیین می‌نماید. قطر الیاف با سرعت جریان محلول پلیمری رابطه مستقیمی دارد. در واقع با

به اندازه کافی پایین باشد. در همین راستا، Ray و همکاران در سال ۲۰۱۱ از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی قطر نانویاف TiO_2 استفاده نمودند و اثر پارامترهای دستگاه الکتروریسی (سرعت جریان محلول پلیمری، فاصله الکترودها و ولتاژ اعمال شده) را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر آن بود در شرایط اختلاف پتانسیل ۴۰ کیلوولت، فاصله الکترودها ۳۲/۵ سانتی‌متر و حداقل سرعت جریان محلول پلیمری (۰/۶ میلی‌لیتر بر ساعت)، حداقل قطر الیاف ۴۳ نانومتر و توزیع مناسب بدست می‌آید (Ray and Lalman, 2011).

پدیده هنگامی رخ می‌دهد که زمان کافی برای تبخیر حلال وجود ندارد، به طوری که الیافی که در کنار هم قرار دارند، به خوبی خشک نمی‌شوند و از مناطق مختلف به یکدیگر متصل می‌شوند. در نتیجه، حداقل سرعت جریان خروج محلول پلیمری برای تشکیل یک مخروط تیلور پایدار در نوک سوزن پیشنهاد می‌گردد (Li and Wang, 2013). همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، قطر الیاف به علت افزایش سرعت جریان خروج محلول از نوک سوزن، افزایش یافته است. به طور کلی، توصیه می‌گردد که سرعت جریان محلول برای تشکیل نانوفیبرهای یکنواخت و نازک



شکل ۲. نمودار سه بعدی اثر سرعت خروج محلول پلیمری بر قطر الیاف در فاصله ۱۴ سانتی‌متر

آن‌ها افزایش می‌یابد. شکل (۳) تاثیر فاصله الکتروریسی را بر میانگین قطر الیاف نشان می‌دهد. تغییر در فاصله الکتروریسی اثر قابل توجهی بر قطر الیاف نداشته است و احتمالاً به دلیل کاهش قدرت میدان الکتریکی می‌باشد، که باعث کمتر کشیده شدن الیاف می‌شود.

اثر پارامترهای الکتروریسی بر تخلخل غشاء نانوفیبری

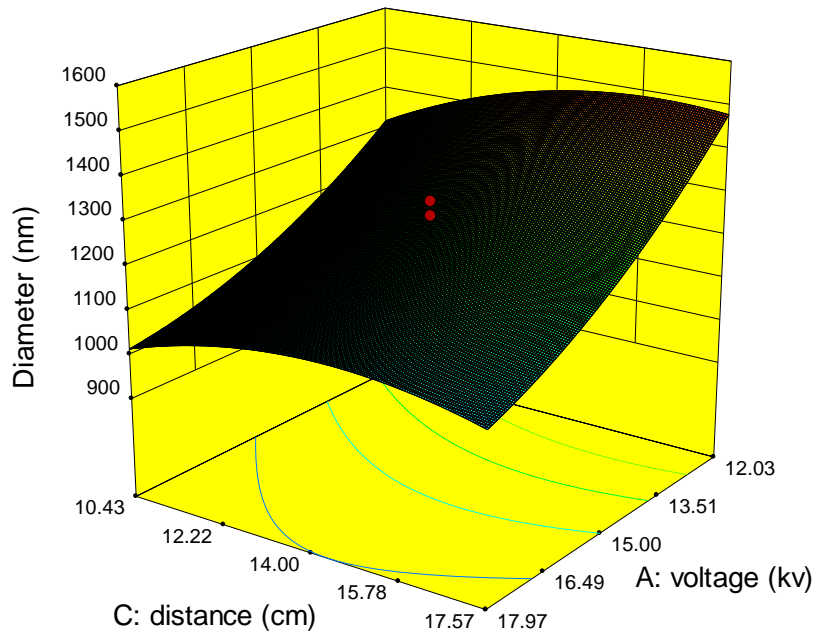
یکی از مهمترین ویژگی‌های غشاءهای نانوفیبری، تخلخل بسیار بالا آن‌ها می‌باشد. تخلخل نسبت حجم خالی منافذ به حجم کل از غشاء است. میزان تخلخل غشاءهای نانوفیبری علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی و سطحی، تحت تاثیر پارامترهای الکتروریسی هم می‌باشد (Moghadam et al., 2015). در این مطالعه، اثر تمام پارامترهای الکتروریسی به تخلخل غشاء نانوفیبری الکتروریسی بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، از میان پارامترهای الکتروریسی فقط ولتاژ اعمالی تاثیر

فاصله بین نوک سوزن و الکترود انباشتگر

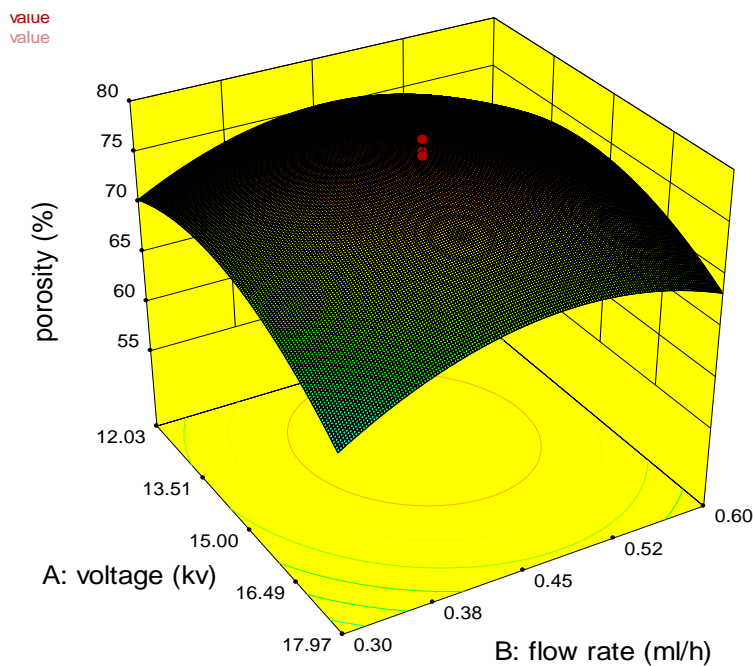
فاصله بین نوک سوزن و الکترود انباشتگر تاثیر مستقیم بر زمان پرواز جت الکتروریسی و نیروی میدان الکتریکی دارد. هنگامی که فاصله بین نوک سوزن و الکترود انباشتگر کاهش یابد، جت الکتروریسی در زمان کمتری به الکترود انباشتگر می‌رسد. به طور خلاصه، اگر این فاصله بیش از حد کوتاه باشد، زمان کافی برای تبخیر حلال وجود ندارد و حلال باقیمانده سبب اتصال فیبرها به یکدیگر و فرو رفتن در یکدیگر و ایجاد نقط اتصال می‌شود (Angamma and Jayaram, 2016). با توجه به این موضوع که افزایش فاصله بین نوک سوزن و الکترود انباشتگر می‌تواند به کاهش میانگین قطر الیاف منجر شود، در بعضی موارد مشاهده می‌شود که قطر الیاف با افزایش فاصله، افزایش می‌یابد. این پدیده ممکن است به دلیل کاهش نیروی میدان الکترواستاتیک و در نتیجه باعث کمتر کشیده شدن الیاف می‌شود و میانگین قطر

اعمال نیروی بیشتر از حد است که موجب کاهش زمان پرواز می‌گردد و حلال به خوبی تبخیر نشده است. در واقع، برای رسیدن به حداکثر تخلخل، مقدار بهینه از سرعت جریان محلول پلیمری و فاصله الکترورسی باید به دست آید. در این مطالعه، حداکثر مقدار تخلخل در نرخ سرعت جریان ۰/۴۵ میلی‌لیتر در ساعت و فاصله الکترورسی ۱۴ سانتی‌متر به دست آمد.

معنی‌دار بر تخلخل غشاء دارد و سرعت خروج محلول پلیمری و فاصله الکترورسی اثر معنی‌دار ندارند. شکل (۴) اثر ولتاژ اعمالی بر تخلخل غشاء را توصیف می‌کند. علاوه بر این، ولتاژ اعمال شده اثر دوگانه‌ای بر تخلخل غشاء دارد و با افزایش ولتاژ تا ۱۵ کیلوولت، تخلخل افزایش یافته است اما پس از آن، افزایش ولتاژ منجر به کاهش تخلخل غشاء شده است که احتمالاً دلیل آن



شکل ۳. اثر فاصله الکترورسی بر میانگین قطر الیاف در سرعت جریان ۰/۴۵ میلی‌لیتر در ساعت



شکل ۴. اثر ولتاژ اعمال شده بر تخلخل غشاء نانوفیبری در سرعت جریان ۰/۴۵ میلی‌لیتر در ساعت و فاصله ۱۴ سانتی‌متر

جریان و فاصله نوک سوزن تا الکتروود انباشتگر به ترتیب ۱۶/۳۱ کیلوولت، ۰/۳۹ میلی لیتر در ساعت و ۱۵/۴۴ سانتی متر می باشد. جدول ۳ نشان می دهد که مقادیر تجربی و پیش بینی شده به یکدیگر نزدیک هستند و مقدار انحراف کمتر از ۵ درصد است و در نتیجه عملکرد مدل تأیید شده است. جدول ۴ نشان دهنده مشخصات غشاهای PSF و PSF/TR-100 می باشد.

اعتبارسنجی مدل های پیش بینی شده

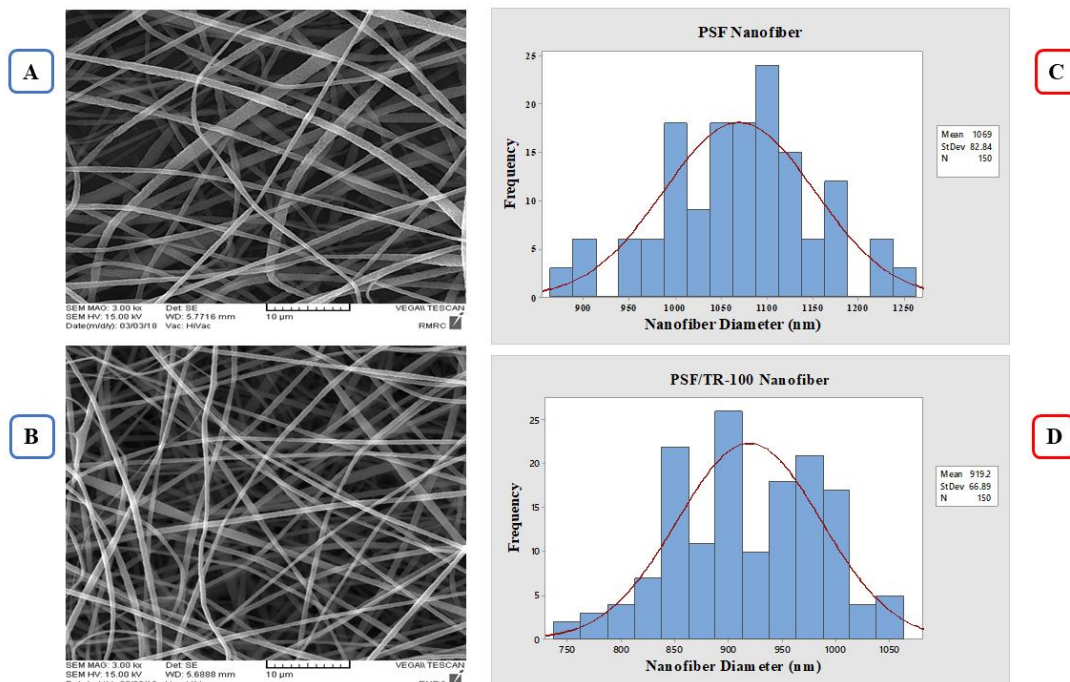
اعتبارسنجی مدل یک روش ایده آل برای تعیین کارایی مدل است. به منظور تولید یک غشاء نانوفیبری یکنواخت، دارای تخلخل بالا و با ویژگی های قطر کم و عدم تشکیل مهره و گره ها، شرایط مطلوب ذکر شده در این تحقیق باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، بهینه سازی نهایی برای متغیرهای وابسته صورت پذیرفت. مقادیر بهینه بدست آمده برای ولتاژ اعمال شده، سرعت

جدول ۳. نتایج حاصل از مقادیر تجربی و پیش بینی متغیرهای وابسته

متغیر	هدف	کمترین	بیشترین	پیش بینی شده	واقعی	خطا (درصد)
قطر (نانومتر)	کم بودن	۹۲۸	۱۵۳۰	۱۱۲۲/۷۳	۱۰۶۹ ± ۸۲/۸۴	۴/۷۸
تخلخل (درصد)	زیاد بودن	۵۸/۹۸	۷۹/۴۹	۷۴/۶۵	۷۷/۴۲	۳/۵۷

یکنواختی نانوفیبرها افزایش و بهبود یافته اند و قطر نانوفیبرها حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است که دلیل آن به خاطر کاهش کشش سطحی محلول پلیمری و تشکیل راحت تر مخروط تیلور و جت الکترورسی می باشد و الیاف بیشتر کشیده شده اند و قطر کاهش یافته است.

اثر سورفکتانت TR-100 بر مورفولوژی سطحی غشاء نانوفیبری مورفولوژی سطحی غشاء نانوفیبری با استفاده از تصاویر الکترونی (SEM) مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵) نشان دهنده اثر سورفکتانت بر یکنواختی نانوفیبرها و مورفولوژی سطح غشاء است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، کیفیت و



شکل ۵. تصاویر الکترونی مربوط به غشاهای نانوفیبری PSF (A) و PSF/TR-100 (B) و منحنی توزیع قطر الیاف غشاهای PSF (C) و PSF (D)

جدول ۴. مشخصات غشاهای PSF و PSF/TR-100

مقاومت کششی (مگاپاسکال)	زاویه تماس (درجه)	تخلخل (درصد)	میانگین قطر الیاف (نانومتر)	نوع غشاء
۴/۸۳	۹۰/۷۷	۷۷/۵ ± ۴/۵ ^a	۱۰۶۹ ± ۸۲/۸۴ ^a	PSF
۶/۱۳	۱۰۳/۳۵	۸۰/۵ ± ۴ ^b	۹۱۹/۲ ± ۶۶/۸۹ ^b	PSF/TR-100

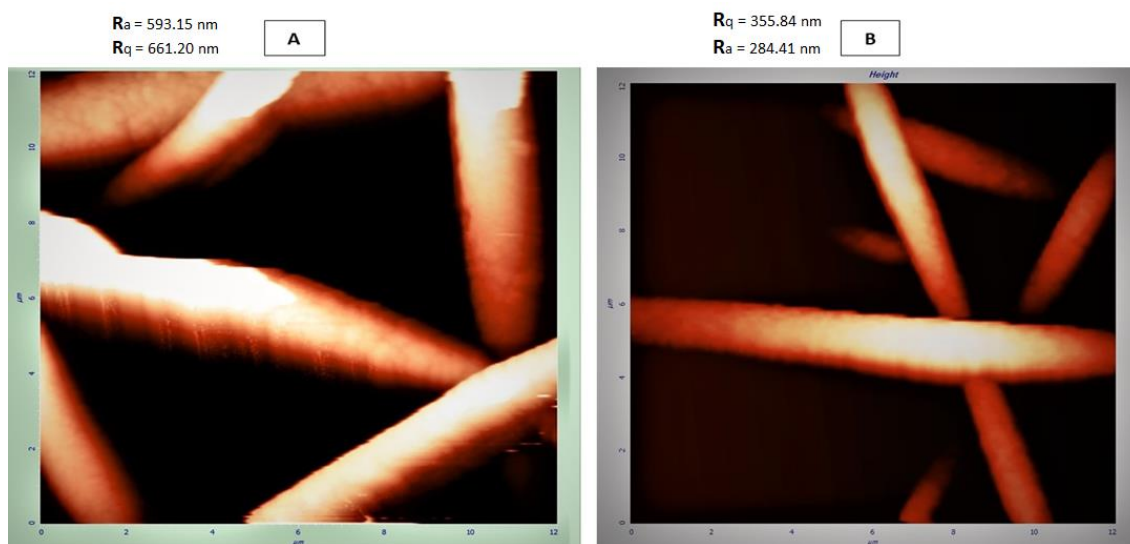
ویسکوزیته محلول‌های پلیمری

ویسکوزیته محلول پلیمری یک ویژگی مهم محلول پلیمری است که بر تشکیل و مورفولوژی نانوفیبر تاثیر بسزایی دارد. به عنوان مثال، گزارش شده است که برای محلول‌های پلیمری با غلظت بالا و ویسکوز، قدرت کافی برای کشش محلول پلیمری و تشکیل مخروط تیلور به دلیل انرژی الکتریکی کم وجود ندارد و قادر به تولید نانوفیبر نمی‌باشند (Gupta et al., 2005). علاوه بر این، زمانی که ویسکوزیته کم باشد جت الکتروسی ممکن است به قطرات کوچک شکسته شود و هیچگونه الیافی شکل نگیرد. بر اساس منابع موجود و تحقیق‌های صورت گرفته، ویسکوزیته محلول پلیمری به طور عمده وابسته به وزن مولکولی پلیمر است. پلی‌سولفون یک پلیمر با وزن مولکولی کم است و به این ترتیب انتظار می‌رود که این پلیمر مناسب برای تشکیل فیبر باشد. ویسکوزیته محلول PSF/TR-100 به منظور بررسی اثر سورفاکتانت در تشکیل الیاف اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته PSF و PSF/TR-100 به ترتیب $1/006$ و $0/715$ پاسکال.ثانیه بود. بنابراین، انتظار می‌رود که اضافه کردن سورفاکتانت به محلول پلی‌سولفون به دلیل کاهش ویسکوزیته آن، منجر به بهبود کیفیت الیاف شود. Aykut و همکاران در سال ۲۰۱۳ گزارش نمودند که با افزودن TR-100 به محلول پلیمری پلی‌آکریل نیتریل (PAN)

موجب کاهش قطر الیاف و افزایش یکنواختی شده است. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که کاهش قطر الیاف به دلیل تشکیل پیوند هیدروژنی بین سورفاکتانت TR-100 و محلول پلی‌آکریل نیتریل و همچنین تعامل آبریز زنجیره کربنی TR-100 و پلی‌آکریل نیتریل است (Aykut et al., 2013).

ویژگی‌های توپوگرافی

تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های توپوگرافی فیلم‌ها و غشاءها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع، این روش برای مشخص کردن زبری سطح (پارامتر کمی) و ویژگی‌های ساختاری (پارامتر کیفی) استفاده شده است. ویژگی‌های سطحی غشاء نانوفیبری ساخته شده با آنالیز AFM مورد بررسی قرار گرفته است و شکل (۶) نشان‌دهنده تصاویر AFM می‌باشد. در این تصاویر مشاهده می‌گردد که غشاء نانوفیبری پلی‌سولفون بدون سورفاکتانت دارای R_a و R_q به ترتیب 593.15 و 661.20 نانومتر می‌باشد و بعد از افزودن سورفاکتانت، کاهش قابل توجهی در زبری سطح مشاهده گردیده است دلیل آن کاهش قطر الیاف تشکیل دهنده غشاء می‌باشد که موجب کاهش زبری کل سطح غشاء شده است و نتایج آن با تصاویر SEM همخوانی دارد.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (PSF: A و PSF/TR-100: B)

(Salarbashi et al., 2018). زاویه تماس غشاء نانوفیبری ساخته شده با PSF و PSF/TR-100 به ترتیب ۹۰ و ۱۰۳ درجه بود، که نشان داد سطوح هر دو غشاء نانوفیبری ساخته شده، آبریز است. علاوه بر این، افزودن سورفاکتانت به محلول پلی‌سولفون موجب افزایش زاویه تماس غشاء می‌شود. همچنین افزایش میزان آبریزی را می‌توان به تغییرات توپوگرافی غشاء در اثر افزودن

میزان آبریزی سطح غشاء

اندازه‌گیری زاویه تماس سطح غشاء نانوفیبری به منظور ارزیابی میزان آبریز بودن آن انجام شد. اندازه زاویه تماس عمده‌تاً وابسته به ترکیب شیمیایی و ساختار هندسی سطح غشاء نانوفیبری است (Ahmed, 2015). همچنین ثابت شده است که زاویه تماس زیر ۳۰ درجه نشان دهنده یک سطح بسیار آبدوست است

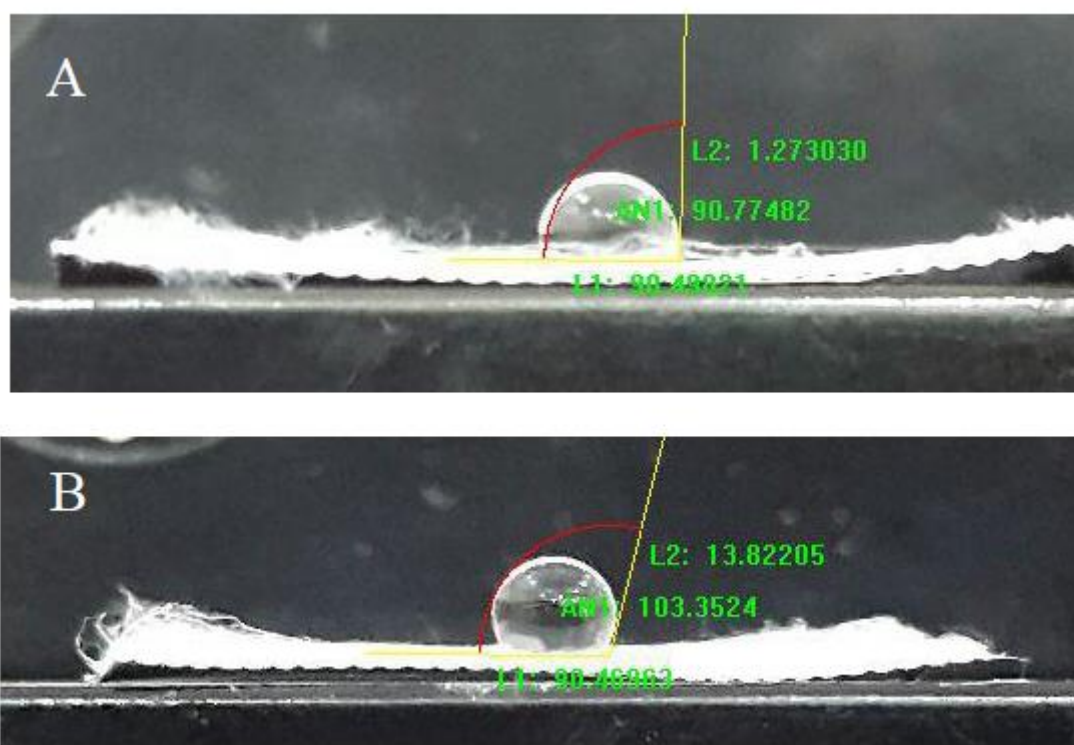
(Salarbashi *et al.*, 2016). این پارامتر با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود (Ahmed, 2017; Fleming *et al.*, 2011):

$$A = (1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این فرمول A ، θ و γ_L به ترتیب برابر نیروی چسبندگی، زاویه تماس و کشش سطحی مایع (کشش سطحی آب مقطر برابر با ۷۲/۸ میلی‌نیوتن بر متر) است.

مقدار نیروی چسبندگی برای پلی‌سولفون و پلی‌سولفون به همراه سورفکتانت به ترتیب ۴/۰۷ و ۱۵/۸۵ بدست آمد و می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سورفکتانت موجب افزایش هر دو پارامتر زاویه تماس و نیروی چسبندگی می‌شود.

سورفکتانت نسبت داد. در واقع، به علت کاهش زبری سطح، سطح تماس بین سطح جامد و قطره تغییر کرد و در نتیجه میزان آبریزی سطح غشاء افزایش یافت (Dhakate *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2008). این نتیجه توسط تجزیه و تحلیل AFM که در بالا شرح داده شده، تأیید می‌گردد. Rao و همکاران در سال ۲۰۱۰، نشان دادند که زاویه تماس با آب یک پارامتر مهم برای تعیین ویژگی میزان جذب آب است. علاوه بر این، سطوح با مقدار زاویه تماس کمتر (آبدوست‌تر) برای پوشش دادن ذرات از طریق فعل و انفعالات الکترواستاتیک و قطرات آب مناسب‌تر هستند (Rao *et al.*, 2010). نیروی چسبندگی نیز جهت بررسی ترشوندگی سطوح مواد جامد استفاده می‌شود (Ahmed, 2015);



شکل ۷. میزان زاویه تماس برای غشاءهای نانوفیبری (A: PSF/TR-100 و B: PSF)

تغییر و جا به جایی در محل پیک‌ها مشاهده نشده است و ساختار اولیه حفظ شده است. با این حال، افزودن سورفکتانت به محلول پلیمری منجر به افزایش اندکی در ناحیه زیر پیک ۳۵۰۰ شده است که مربوط به تعامل سورفکتانت و پلیمر پلی‌سولفون می‌باشد که باعث عدم دسترسی به گروه‌های هیدروکسیل می‌شود.

مقاومت مکانیکی غشاء نانوفیبری

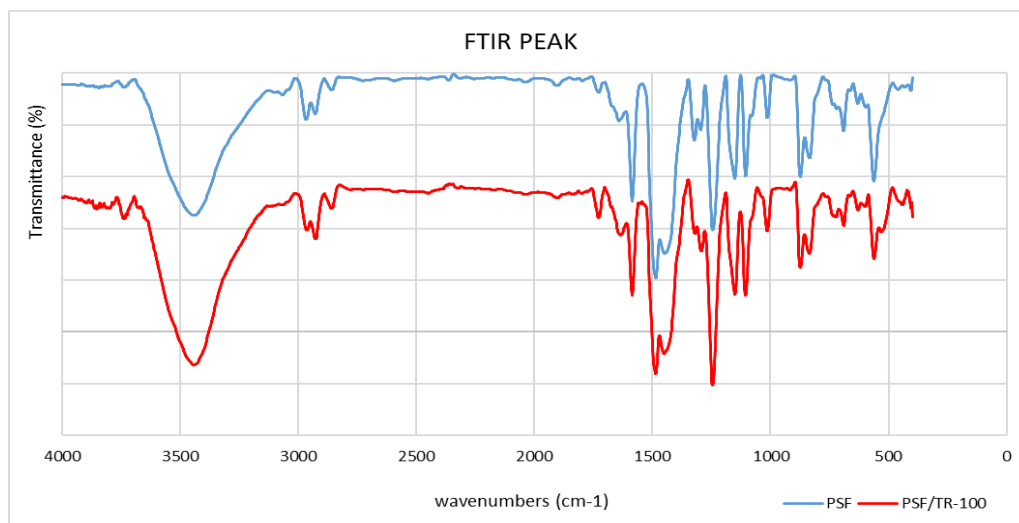
خصوصیات مکانیکی غشاءهای نانوفیبری پلی‌سولفون و پلی‌سولفون به همراه سورفکتانت با اندازه‌گیری مقاومت کششی^۱ (TS) و افزایش طول تا نقطه شکست^۲ (EB) مورد تجزیه و تحلیل

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه

طیف‌های FTIR مربوط به پلی‌سولفون و پلی‌سولفون به همراه سورفکتانت در شکل (۸) نشان داده شده است. در پیک مربوط به نمونه پلی‌سولفون، چند پیک در عدد موجی ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ مشاهده می‌شود. پیک‌های مربوط در دامنه عدد موجی ۳۲۰۰ تا ۳۵۰۰ مربوط به کشش گروه‌های هیدروکسیل می‌باشد و پیک اصلی در دامنه عدد موجی ۲۸۵۰ تا ۲۹۵۰ مربوط به ارتعاش کششی C-H- است (Fleming *et al.*, 2011; Rupiasih *et al.*, 2013). در پیک مربوط به نمونه پلی‌سولفون به همراه سورفکتانت در دامنه عدد موجی ۶۰۰ تا ۳۵۰۰، بعد از افزودن سورفکتانت

دهد. اثر مثبت افزودن سورفکتانت ممکن است به دلیل تعامل شیمیایی با پلی سولفون باشد که با تجزیه و تحلیل FT-IR نسبت داده شد و همچنین می توان نتیجه گرفت با افزودن سورفکتانت به دلیل کاهش قطر نانوالیاف و افزایش نسبت سطح به حجم و ایجاد نقاط اتصال بین نانوالیاف، مقاومت کششی غشاء افزایش می یابد زیرا مقاومت مکانیکی غشاهای نانوفیبری ناشی از مقاومت فیبرها نیست بلکه تعداد نقاط تماس و در نتیجه اصطکاک آن ها با یکدیگر است. در نتیجه هر چه قطر آن ها کاهش یابد تعداد نقاط تماس بیشتری ایجاد می شود. از سوی دیگر، افزودن سورفکتانت اثر معنی دار و قابل توجهی روی میزان افزایش طول تا نقطه پارگی نداشت.

قرار گرفت. مقاومت کششی، مقاومت مکانیکی غشاء را نشان می دهد که توسط نیروهای منسجم در زنجیره های نانوفیبری ایجاد شده است. افزایش طول تا نقطه شکست، نشان دهنده انعطاف پذیری غشاء می باشد. ضخامت غشاءهای مورد اندازه گیری ۱۵۰ میکرون بود و مقاومت کششی غشاء نانوفیبری پلی سولفون، ۴/۸۳ مگاپاسکال بدست آمد که نشان دهنده مقاومت کششی پائین می باشد. قابل توجه است که با افزودن سورفکتانت به محلول پلیمری، مقاومت کششی غشاء به طور قابل توجهی افزایش یافت و به ۶/۱۳ مگاپاسکال رسیده است. عوامل مختلفی از جمله ترکیب شیمیایی، خواص ساختاری و تعاملاتی بین نانوفیبرها با دیگر اجزا ممکن است خواص مکانیکی غشاء نانوفیبری را تحت تأثیر قرار



شکل ۸. طیف FTIR مربوط به نمونه های PSF و PSF/TR-100

مدل نشان بودن کفایت و عملکرد بالای مدل می باشد. اضافه نمودن سورفکتانت TR-100، باعث بهبود مورفولوژی سطح، یکنواختی و کیفیت نانوالیاف شده است. نتایج آزمون AFM بیانگر کاهش قابل توجه در زبری سطح نانوالیاف با افزودن سورفکتانت می باشد که با نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی همخوانی دارد. همچنین افزودن سورفکتانت موجب افزایش آبگریزی و افزایش مقاومت مکانیکی غشاء نانوالیافی شده است. به طور کلی، غشاء های نانوالیافی توسعه یافته را می توان به عنوان یک غشاء مناسب برای کاربردهای غذایی و دارویی استفاده نمود.

نتیجه گیری

در این پژوهش از روش سطح پاسخ بر پایه مرکب مرکزی برای بهینه سازی و تولید غشاء نانوالیافی الکترورسی از پلیمر پلی-سولفون استفاده شده است. متغیرهای مستقل شامل ولتاژ اعمالی، سرعت جریان محلول پلیمری و فاصله الکترورسی بودند و متغیرهای وابسته قطر نانوالیاف و تخلخل غشاء است. شرایط بهینه برای ولتاژ اعمالی، سرعت جریان محلول پلیمری و فاصله الکترورسی به ترتیب ۱۶/۳۱ کیلوولت، ۰/۳۹ میلی لیتر بر ساعت و ۱۵/۴۴ سانتی متر بدست آمد. ضریب تبیین بالای بدست آمده

REFERENCES

- Ahmadipourrouposht, M., Fallahiazouard, E., Yusof, N.M., Idris, A., 2015. Application of response surface methodology in optimization of electrospinning process to fabricate ferrofluid/polyvinyl alcohol magnetic nanofibers. Mater. Sci. Eng. C 50, 234–241.
- Ahmed, R.M., 2017. Surface Characterization and

- Optical Study on Electrospun Nanofibers of PVDF/PAN Blends. Fiber Integr. Opt. 36, 78–90. <https://doi.org/10.1080/01468030.2017.1280098>
- Ahmed, R.M., 2015. Surface and spectroscopic properties of CdSe/ZnS/PVC nanocomposites. Polym. Compos. 38, 749–758. <https://doi.org/10.1002/pc.23634>

- Angamma, C.J., Jayaram, S.H., 2016. Fundamentals of electrospinning and processing technologies. Part. Sci. Technol. 34, 72–82. <https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1043678>
- Aykut, Y., Pourdeyhimi, B., Khan, S.A., 2013. Effects of surfactants on the microstructures of electrospun polyacrylonitrile nanofibers and their carbonized analogs. J. Appl. Polym. Sci. 130, 3726–3735. <https://doi.org/10.1002/app.39637>
- Broumand, A., Emam-Djomeh, Z., Khodaiyan, F., Davoodi, D., Mirzakhanelouei, S., 2014a. Optimal fabrication of nanofiber membranes from ionized-bicomponent cellulose/polyethyleneoxide solutions. Int. J. Biol. Macromol. 66, 221–228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.042>
- Broumand, A., Emam-Djomeh, Z., Khodaiyan, F., Davoodi, D., Mirzakhanelouei, S., 2014b. Optimal fabrication of nanofiber membranes from ionized-bicomponent cellulose/polyethyleneoxide solutions. Int. J. Biol. Macromol. 66, 221–228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.042>
- Broumand, A., Emam-Djomeh, Z., Khodaiyan, F., Mirzakhanelouei, S., Davoodi, D., Moosavi-Movahedi, A.A., 2015. Nano-web structures constructed with a cellulose acetate/lithium chloride/polyethylene oxide hybrid: Modeling, fabrication and characterization. Carbohydr. Polym. 115, 760–767. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.055>
- Dhakate, S.R., Singla, B., Uppal, M., Mathur, R.B., 2010. Effect of processing parameters on morphology and thermal properties of electrospun polycarbonate nanofibers. Adv. Mater. Lett. 1, 200–204.
- Dobosz, K.M., Kuo-Leblanc, C.A., Martin, T.J., Schiffman, J.D., 2017. Ultrafiltration Membranes Enhanced with Electrospun Nanofibers Exhibit Improved Flux and Fouling Resistance. Ind. Eng. Chem. Res. 56, 5724–5733. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00631>
- Fleming, R.R., Pardini, L.C., Brito, C.A.R., Oliveira, M.S., Alves, N.P., Massi, M., 2011. Plasma treatment of polyacrylonitrile/vinyl acetate films obtained by the extrusion process. Polym. Bull. 66, 277–288. <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0318-6>
- Gupta, P., Elkins, C., Long, T.E., Wilkes, G.L., 2005. Electrospinning of linear homopolymers of poly(methyl methacrylate): Exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent. Polymer (Guildf). 46, 4799–4810. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.04.021>
- Heidari, M., Bahrami, H., Ranjbar-Mohammadi, M., 2017. Fabrication, optimization and characterization of electrospun poly(caprolactone)/gelatin/graphene nanofibrous mats. Mater. Sci. Eng. C 78, 218–229. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2017.04.095>
- Hinkelmann, K., n.d. Design and Analysis of Experiments.
- Khuri, A.I., 2011. Response Surface Methodology BT - International Encyclopedia of Statistical Science, in: Lovric, M. (Ed.), . Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1229–1231. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_492
- Kriegel, C., Arrechi, A., Kit, K., McClements, D.J., Weiss, J., 2008. Fabrication, Functionalization, and Application of Electrospun Biopolymer Nanofibers. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 48, 775–797. <https://doi.org/10.1080/10408390802241325>
- Li, Z., Wang, C., 2013. One-Dimensional nanostructures. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36427-3>
- Liao, Y., Wang, R., Tian, M., Qiu, C., Fane, A.G., 2013. Fabrication of polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofiber membranes by electro-spinning for direct contact membrane distillation. J. Memb. Sci. 425–426, 30–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.09.023>
- Moghadam, B.H., Haghi, A.K., Kasaei, S., Hasanzadeh, M., 2015. Computational-Based Approach for Predicting Porosity of Electrospun Nanofiber Mats Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network Methods. J. Macromol. Sci. Part B 54, 1404–1425. <https://doi.org/10.1080/00222348.2015.1090654>
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., 2002. Response Surface Methodology: Process and Product in Optimization Using Designed Experiments, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Noruzi, M., 2016. Electrospun nanofibres in agriculture and the food industry: a review. J. Sci. Food Agric. 96, 4663–4678. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7737>
- Pokorny, M., Novak, J., Rebicek, J., Klemes, J., Velebný, V., 2015. An Electrostatic Spinning Technology with Improved Functionality for the Manufacture of Nanomaterials from Solutions. Nanomater. Nanotechnol. 5, 17. <https://doi.org/10.5772/60773>
- Rao, M.S., Kanatt, S.R., Chawla, S.P., Sharma, A., 2010. Chitosan and guar gum composite films: Preparation, physical, mechanical and antimicrobial properties. Carbohydr. Polym. 82, 1243–1247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.058>
- Ray, S., Lalman, J.A., 2011. Using the Box–Benken design (BBD) to minimize the diameter of electrospun titanium dioxide nanofibers. Chem. Eng. J. 169, 116–125.
- Ray, S.S., Chen, S.-S., Hsu, H.-T., Cao, D.-T., Nguyen, H.-T., Nguyen, N.C., 2017. Uniform hydrophobic electrospun nanofibrous layer composed of polysulfone and sodium dodecyl sulfate for improved desalination performance. Sep. Purif. Technol. 186, 352–365. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.032>

- Rogina, A., 2014. Electrospinning process: Versatile preparation method for biodegradable and natural polymers and biocomposite systems applied in tissue engineering and drug delivery. *Appl. Surf. Sci.* 296, 221–230. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.01.098>
- Rupiasih, N.N., Suyanto, H., Sumadiyah, M., Wendri, N., 2013. Study of effects of low doses UV radiation on microporous polysulfone membranes in sterilization process. *Open J. Org. Polym. Mater.* 3, 12.
- Salarbashi, D., Mortazavi, S.A., Noghabi, M.S., Fazly Bazzaz, B.S., Sedaghat, N., Ramezani, M., Shahabi-Ghahfarrokhi, I., 2016. Development of new active packaging film made from a soluble soybean polysaccharide incorporating ZnO nanoparticles. *Carbohydr. Polym.* 140, 220–227. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2015.12.043>
- Salarbashi, D., Tafaghodi, M., Bazzaz, B.S.F., 2018. Soluble soybean polysaccharide/TiO2 bionanocomposite film for food application. *Carbohydr. Polym.* 186, 384–393. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.081>
- Sarlak, N., Nejad, M.A.F., Shakhesi, S., Shabani, K., 2012. Effects of electrospinning parameters on titanium dioxide nanofibers diameter and morphology: An investigation by Box–Wilson central composite design (CCD). *Chem. Eng. J.* 210, 410–416. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.087>
- Shokrollahzadeh, S., Tajik, S., 2018. Fabrication of thin film composite forward osmosis membrane using electrospun polysulfone/polyacrylonitrile blend nanofibers as porous substrate. *Desalination* 425, 68–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.017>
- Suja, P.S., Reshmi, C.R., Sagitha, P., Sujith, A., 2017. Electrospun Nanofibrous Membranes for Water Purification. *Polym. Rev.* 57, 467–504. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1309664>
- Uzal, N., Ates, N., Saki, S., Bulbul, Y.E., Chen, Y., 2017. Enhanced hydrophilicity and mechanical robustness of polysulfone nanofiber membranes by addition of polyethyleneimine and Al2O3 nanoparticles. *Sep. Purif. Technol.* 187, 118–126. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.047>
- Yolmeh, M., Jafari, S.M., 2017. Applications of Response Surface Methodology in the Food Industry Processes. *Food Bioprocess Technol.* 10, 413–433. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1855-2>
- Yu, D.G., Chatterton, N.P., Yang, J.H., Wang, X., Liao, Y.Z., 2012. Coaxial electrospinning with triton X-100 solutions as sheath fluids for preparing PAN nanofibers. *Macromol. Mater. Eng.* 297, 395–401. <https://doi.org/10.1002/mame.201100258>
- Zhang, X., Shi, F., Niu, J., Jiang, Y., Wang, Z., 2008. Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application. *J. Mater. Chem.* 18, 621–633.