

بهبود خواص ضدآب و تنفس پذیری غشای نانولیفی هیبریدی پلی یورتان-پلی(وینیلیدین فلوراید)

حسین شهریار فر^۱، مهدی حسن‌زاده^۲

۱ کارشناسی ارشد، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران



تاریخ دریافت:

۹۹/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۰/۰۱/۱۶

در این پژوهش غشای نانولیفی هیبریدی ضدآب با قابلیت تنفس پذیری و مقاومت بالا در برابر نفوذ آب تهیه شد. برای این منظور نانولیفای هیبریدی پلی یورتان- پلی(وینیلیدین فلوراید) با نسبت‌های مختلف و در حضور نانوذرات سیلیکا به کمک روش الکترورسی تولید شدند. تأثیر نسبت‌های مختلف پلیمرهای مورد مطالعه بر مورفولوژی و خواص عملکردی غشای نانولیفی نظیر تنفس پذیری و خواص ضدآب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای این منظور از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون‌های نفوذپذیری هوا، فشار هیدرواستاتیکی و تراوایی بخار آب استفاده شد. مطالعه مورفولوژی غشای نانولیفی هیبریدی نشان‌دهنده تولید نانولیفای یکنواخت و عاری از دانه‌تسبیحی با متوسط اندازه قطر ۶۰ تا ۸۰ نانومتر می‌باشد. همچنین افزایش نسبت پلیمر PVDF در غشای نانولیفی به میزان ۷۰٪ سبب افزایش میزان نفوذپذیری هوا و فشار هیدرواستاتیکی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که غشای نانولیفی تولید شده با نسبت PVDF به PU برابر ۷۰ به ۳۰، خواص تنفس پذیری و ضدآب بهتری را نشان می‌دهد، بطوریکه مقدار نفوذپذیری هوا به اندازه ۶۸/۶ mL/cm².s و مقدار تراوایی بخار آب حدود ۲۸۵۳ g/m²/day بدست آمد.

مکاتبات

الکترورسی، نانولیفای، نفوذپذیری هوا، عبور بخار آب، ضد آب، تنفس‌پذیر

واژگان کلیدی

Improving Waterproof and Breathability of Nanofibrous Polyurethane-Poly(Vinylidene Fluoride) Hybrid Membrane

H. Shahriyari Far¹, M. Hasanzadeh^{2*}

1. Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2. Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

In this study, a waterproof hybrid nanofibrous membrane with breathability and high resistance to water penetration was prepared. For this purpose, polyurethane-poly(vinylidene fluoride) hybrid nanofibers with different ratios and with addition of silica nanoparticles were produced by electrospinning method. The effect of different ratios of the studied polymers on the morphology and performance of nanofibrous membranes such as breathability and waterproof properties were studied. Scanning electron microscopy and analysis of air permeability, hydrostatic pressure and water vapor permeability were used for this purpose. Morphological study of hybrid nanofibrous membrane shows the fabrication of uniform and bead-free fibers with average diameter of 60 to 80 nm. Moreover, increasing the ratio of PVDF polymer in nanofibrous membrane by 70% increased their air permeability and hydrostatic pressure. The results also show that the nanofibrous membrane containing 70:30 PVDF/PU, exhibits better breathability and waterproof properties, as its air permeability and water vapor permeability were obtained 68.6 mL/cm².s and 2853 g/m²/day, respectively.

Keywords

Electrospinning, nanofibers, air permeability, water vapor permeation, waterproof, breathable

۱- مقدمه

منسوجات ضدآب تنفس پذیر با قابلیت عبور بخار آب و جلوگیری از نفوذ آب می‌تواند از بدن انسان در شرایط آب و هوایی نامناسب نظیر باران و باد شدید محافظت نماید. از این منسوجات در تهیه انواع مختلف پوشاک نظیر ورزشی، نظامی، پزشکی، آتش‌نشانی و غیره استفاده می‌شود. در این میان غشاهای نانولیفی بدلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصر بفردی نظیر نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، انعطاف پذیری بالا، تخلخل زیاد، اندازه منافذ کوچک و قطر کم [۱-۳]، مورد توجه محققان و طراحان پوشاک ورزشی و محافظتی قرار گرفته است. در بین روش‌های مختلفی که تاکنون برای تولید غشای ضدآب تنفس پذیر بکار گرفته شده، فرایند الکتروریسی بعنوان یک روش کارآمد و رایج بیشتر مورد توجه و استقبال محققان واقع شده است. محققان از پلیمرهای مختلفی به منظور تولید غشاهای ضدآب استفاده کرده‌اند که از جمله آنها می‌توان به پلی یورتان [۴]، پلی(اکریلونیتریل) [۵]، پلی آمید [۶]، پلی(تترافلورواتیلن) [۷] و پلی(وینیلیدین فلوراید) [۸] اشاره کرد. در این میان پلی یورتان یکی از متداول‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در تولید غشاهای ضدآب تنفس پذیر محسوب می‌شود [۹]. [۱۰]. پلی یورتان که از قطعه‌های نرم و سخت در زنجیره اصلی تشکیل شده است، دارای استحکام تا حدپارگی زیاد، مقاومت سایشی عالی، مقاومت در برابر هوا و مواد شیمیایی است [۱۰، ۱۱]. این خصوصیات موجب شده تا از این پلیمر در بسیاری از صنایع نظیر اسفنج، رنگ، چسب، لیاف مصنوعی و غیره استفاده شود [۱۲]. در مطالعه‌ای که بر روی نانوالیاف پلی یورتان انجام شد، اثر زمان الکتروریسی بر خواص آبگریزی و تنفس پذیری منسوج مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده کاهش میزان تنفس پذیری منسوج، با افزایش زمان الکتروریسی و در نتیجه افزایش ضخامت لایه نانوالیاف بوده است [۴]. علاوه بر ضخامت غشای نانولیفی، قطر نانوالیاف و میزان تخلخل لایه نانوالیاف نیز در خواص آبگریزی و تنفس پذیری آن تأثیرگذار است. بطور مثال در مطالعه‌ای که بر روی اثر قطر نانوالیاف پلی(وینیلیدین فلوراید) بر خواص ضدآب و تنفس پذیری منسوج صورت گرفت، نتایج بدست آمده بیانگر بهبود خاصیت ضدآب با کاهش قطر نانوالیاف بوده است [۸].

استفاده از ترکیبات آبگریز برپایه سیلان، سیلوکسان، ارگانوسیلان، فلئوئورالکیل سیلان و یا پرکننده‌هایی نظیر نانوذرات سیلیکا می‌تواند سبب افزایش خاصیت آبگریزی و ضدآب منسوج شود [۱۳]. در این راستا، در مطالعه‌ای غشای متخلخل پلی یورتان/نانوذرات سیلیکا با خاصیت تنفس پذیری و آبگریزی طولانی مدت تولید شد [۱۴]. همچنین محققان هیبرید کردن مواد و لایه‌های مختلف را به منظور دستیابی به خواص ضدآب و تنفس پذیری مطلوب پیشنهاد کرده‌اند. بطور مثال، امینی و همکارانش [۱۵] نانوالیاف هیبریدی پلی یورتان/نایلون ۶۶ را به منظور استفاده در لباس‌های ضدآب تهیه کردند. یافته‌های این محققان بیانگر بهبود خاصیت تنفس پذیری نانوالیاف

هیبریدی در مقایسه با نانوالیاف پلی یورتان بوده است.

علیرغم تحقیقات متعدد صورت گرفته در زمینه تولید منسوجات ضدآب تنفس پذیر، همچنان دستیابی به غشای ضدآب با قابلیت تنفس پذیری و عبور بخار آب مطلوب با محدودیت‌هایی روبرو بوده است. از اینرو هدف این پژوهش توسعه غشاهای نانولیفی برپایه پلی یورتان با خاصیت ضدآب و تنفس پذیری مطلوب است. برای این منظور از پلی(وینیلیدین فلوراید) بدلیل برخورداری از خاصیت آبگریزی، مقاومت خوب در برابر مواد شیمیایی و استحکام مناسب برای هیبرید کردن با غشای پلی یورتان استفاده شد. براین اساس غشای نانولیفی هیبریدی پلی یورتان-پلی(وینیلیدین فلوراید) با نسبت‌های مختلف حاوی نانوذرات سیلیکا به روش الکتروریسی تهیه شد. در ادامه ضمن بررسی ساختار و مورفولوژی غشای نانولیفی، ضدآب بودن، تنفس پذیری، مقاومت در برابر نفوذ آب و قابلیت تراوایی بخار آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

در این مطالعه از پلی(وینیلیدین فلوراید) (PVDF) با جرم مولکولی ۲۷۵ کیلوالتون (خریداری شده از شرکت Merck) و پلی یورتان (PU) (خریداری شده از شرکت Desmocoll) به عنوان پلیمر در تولید نانوالیاف استفاده شده است. حلال‌های N-N-دی‌متیل فرم‌امید (DMF) و تتراهیدروفوران (THF) با درجه خلوص ۹۹/۵٪ ساخت شرکت Merck آلمان نیز مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نانوذرات سیلیکا با متوسط اندازه ذرات ۱۶ نانومتر از شرکت Evonik تهیه شد.

۲-۲- روش‌ها

به منظور تهیه نانوالیاف، ابتدا محلول‌های پلیمرهای پلی(وینیلیدین فلوراید) (PVDF) و پلی یورتان (PU) با نسبت‌های مختلف و در غلظت ۱۰ درصد وزنی در حلال‌های THF و DMF (۵۰:۵۰) تهیه شد. سپس به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس توسط همزن مغناطیسی با سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه هم‌زده شدند تا محلول کاملاً همگن بدست آید. در ادامه نانوذرات سیلیکا با نسبت ۳ درصد وزنی (که در آزمایشات اولیه بعنوان نسبت بهینه تعیین شده بود) به محلول‌های فوق اضافه گردید و به مدت ۱ ساعت تحت امواج فراصوت قرار داده شد. در نهایت محلول‌ها به مدت ۱۰ ساعت در دمای محیط بر روی همزن مغناطیسی هم‌زده شدند و جهت فرایند الکتروریسی بکار گرفته شدند. محلول‌های پلیمری تهیه شده توسط سرنگ ۵ میلی‌لیتری با قطر سوزن ۰/۷ میلی‌متر و با نرخ تغذیه مناسب الکتروریسی شدند. فاصله بین نازل و صفحه جمع‌کننده دوار به میزان ۱۵ سانتی‌متر تنظیم شد و با اعمال اختلاف پتانسیل ۲۰- ۱۳ کیلوولت، نانوالیاف یکنواخت بر روی صفحه جمع‌کننده دوار با سرعت چرخش ۴۳۰ دور بر دقیقه جمع‌آوری شدند. نانوالیاف پلیمری توسط

به صورت عمود بر مقطع مشخصی از نانوالیاف، با اندازه گیری اختلاف فشار هوا در دو طرف نمونه صورت می گیرد. با محاسبه سرعت عبور هوا، میزان نفوذپذیری هوا محاسبه می گردد. این آزمون برای هر نمونه در ۵ بخش مختلف در شرایط یکسان انجام شد. مقاومت نانوالیاف تهیه شده در برابر نفوذ آب براساس استاندارد AATCC TM127 و با استفاده از دستگاه آزمون فشار هیدرواستاتیک (Electronic Hydro-Static head Tester) مدل M018 ساخت شرکت Shirley صورت گرفت. همچنین میزان تراوایی بخار آب با استفاده از روش فنجان و مطابق استاندارد ISO 2528 اندازه گیری شد. برای این منظور ۴۰ میلی لیتر آب درون فنجان هایی با قطر ۹ سانتی متر ریخته شد. سپس نانوالیاف به اندازه دهانه فنجان بریده شده و به کمک چسپ روی آن نگه داشته شدند. در ابتدا وزن اولیه فنجان با ترازوی دیجیتالی اندازه گیری شده و پس از آن هر یک ساعت، وزن نمونه ها اندازه گیری می شد. این روند تا ۶ ساعت ادامه داشت. در نهایت میزان تراوایی بخار آب (WVP) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

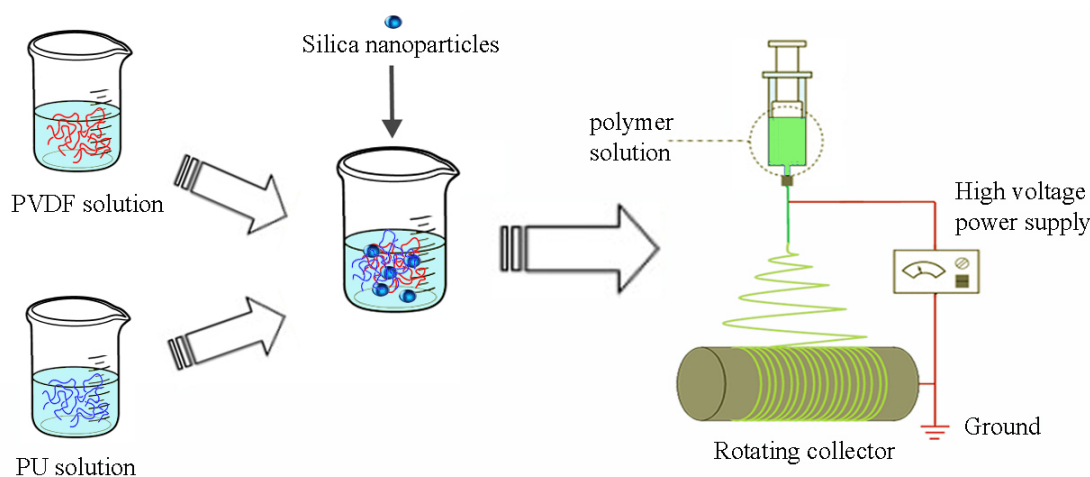
$$WVP(g / m^2 \cdot day) = \frac{MW}{A \cdot t} \quad (1)$$

که در آن MW جرم آب بخار شده از فنجان بر حسب گرم، A مساحت موثر نمونه نانوالیاف بر حسب مترمربع و زمان تبخیر جرم آب بر حسب روز می باشد.

دستگاه الکترورسی ساخت شرکت فناوران نانو مقیاس (ایران) در دمای ۳۰ درجه سلسیوس تولید شدند. شکل ۱ شماتیک فرایند تولید نانوالیاف هیبریدی PU-PVDF را نشان می دهد. جدول ۱ مشخصات نانوالیاف کامپوزیتی تولید شده با نسبت های مختلف PVDF به PU را نشان می دهد.

۲-۳- مشخصه یابی

مورفولوژی و توزیع قطر نانوالیاف تولیدی حاوی نانوذرات سیلیکا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Nova Nano SEM 450 ساخت کشور هلند بررسی گردید. با اندازه گیری قطر حدود ۴۰ قسمت از نانوالیاف موجود مشاهده شده در تصویر SEM با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر Digimizer، میانگین قطر نانوالیاف و توزیع قطر آنها بدست آمد. همچنین بررسی توزیع نانوذرات سیلیکا در نمونه نانوالیاف هیبریدی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل TESCAN Mira III مجهز به طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) ساخت کشور چک ارزیابی شد. تخلخل لایه نانوالیاف تولید شده نیز با استفاده از تکنیک های پردازش تصویر و نرم افزار ImageJ بررسی و محاسبه گردید. به منظور ارزیابی قابلیت تنفس پذیری نانوالیاف تهیه شده از دستگاه سنجش نفوذپذیری هوا ساخت شرکت Shirley و مطابق استاندارد ASTM D737 استفاده شد. در این روش سرعت عبور هوا



شکل ۱: شماتیک فرایند تولید نانوالیاف هیبریدی پلی یورتان-پلی (وینیلیدین فلوراید).

جدول ۱: مشخصات نانوالیاف هیبریدی تولید شده

کد نمونه	پلی یورتان (wt.%)	پلی (وینیلیدین فلوراید) (wt.%)	نانوذرات سیلیکا (wt.%)	ولتاژ اعمالی (kV)	متوسط قطر الیاف (nm)	تخلخل لایه نانوالیاف (%)
PU	۱۰۰	۰	۳	۱۷	۶۶	۵۰/۳۷
PU70-PVDF30	۷۰	۳۰	۳	۱۳	۶۵	۵۷/۵۰
PU50-PVDF50	۵۰	۵۰	۳	۱۵/۵	۷۵	۵۴/۵۵
PU30-PVDF70	۳۰	۷۰	۳	۱۳	۶۵	۵۹/۳۴
PVDF	۰	۱۰۰	۳	۱۴/۵	۸۴	۵۱/۱۹

۳- نتایج و بحث

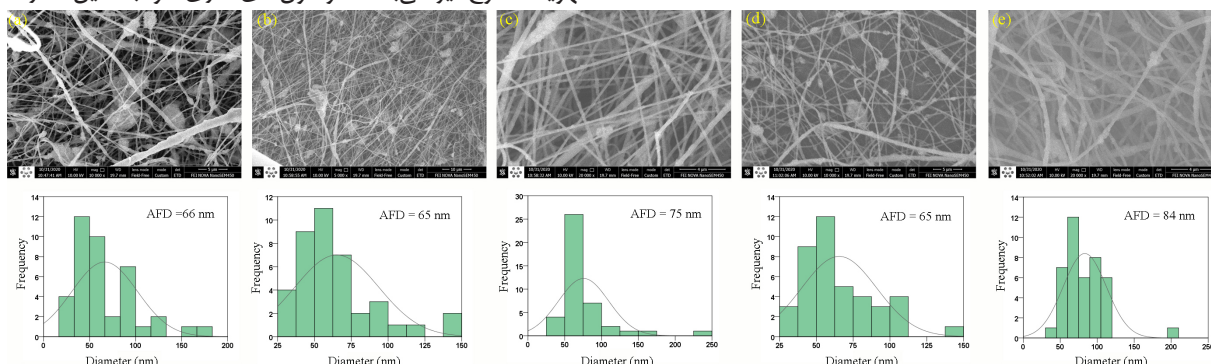
۳-۱- مورفولوژی نانوالیاف

در این مطالعه، مورفولوژی نانوالیاف هیبریدی تولید شده با درصدهای مختلف PU و PVDF با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. شکل ۲ تصویر میکروسکوپی نانوالیاف هیبریدی و همچنین توزیع قطر آنها را نشان می‌دهد. همچنین نتایج متوسط قطر نانوالیاف و میزان تخلخل لایه نیز در جدول ۱ ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تمامی نمونه‌های نانوالیاف تهیه شده، دارای ساختار نسبتاً یکنواخت می‌باشند و حضور نانوذرات سیلیکا در بین الیاف بخوبی قابل مشاهده است. با افزایش درصد PVDF به نمونه نانوالیاف PU، بر مقدار متوسط قطر الیاف افزوده شده، بطوریکه نانوالیاف PVDF دارای متوسط قطر ۸۴ نانومتر می‌باشد. این مقدار در مورد نانوالیاف هیبریدی و ترکیب دو پلیمر PU و PVDF با نسبت‌های مختلف کمتر و در محدوده ۶۵-۷۵ نانومتر می‌باشد. کمترین قطر اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه‌های PU30-PVDF70 و PU70-PVDF30 است. شکل ۳ توزیع نانوذرات سیلیکا در بستر نانوالیاف هیبریدی را توسط

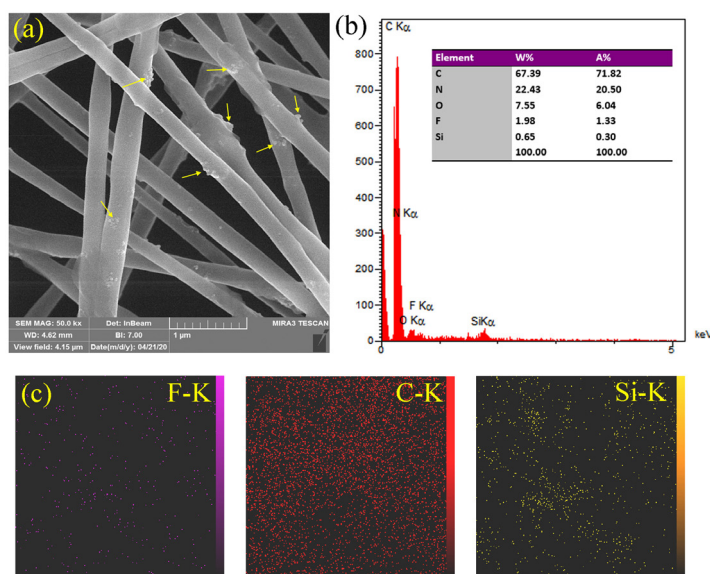
تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر میکروسکوپی نانوالیاف هیبریدی PU30-PVDF70 مشاهده می‌شود (شکل ۳a)، این نانوذرات در داخل نانوالیاف بخوبی مشخص شده‌اند. یکنواختی بسیار خوب و عدم تشکیل دانه‌تسبیحی بیانگر شرایط مناسب و بهینه الکتروریسی و همچنین تولید نانوالیافی عاری از عیوب ساختاری می‌باشد. وجود پیک عنصر سیلیسیم در نمودار EDX به میزان ۰/۶۵ درصد وزنی نشان‌دهنده حضور نانوذرات سیلیکا در نانوالیاف هیبریدی PU30-PVDF70 است (شکل ۳b). همچنین مشاهده نقشه توزیع عناصر موجود از جمله سیلیسیم (شکل ۳c)، نشان دهنده توزیع یکنواخت این عنصر در نانوالیاف و پراکندگی خوب آن می‌باشد.

۳-۲- نفوذپذیری هوا

نفوذپذیری هوا معیاری برای بررسی عملکرد تنفس‌پذیری منسوجات بشمار می‌رود. این معیار بیانگر راحتی حرارتی و قابلیت تهویه منسوج نیز می‌باشد. مولکول‌های گازی هوا به دلیل اندازه



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و توزیع قطر نانوالیاف هیبریدی (a) PU، (b) PU70-PVDF30، (c) PU50-PVDF50، (d) PU30-PVDF70 و (e) PVDF

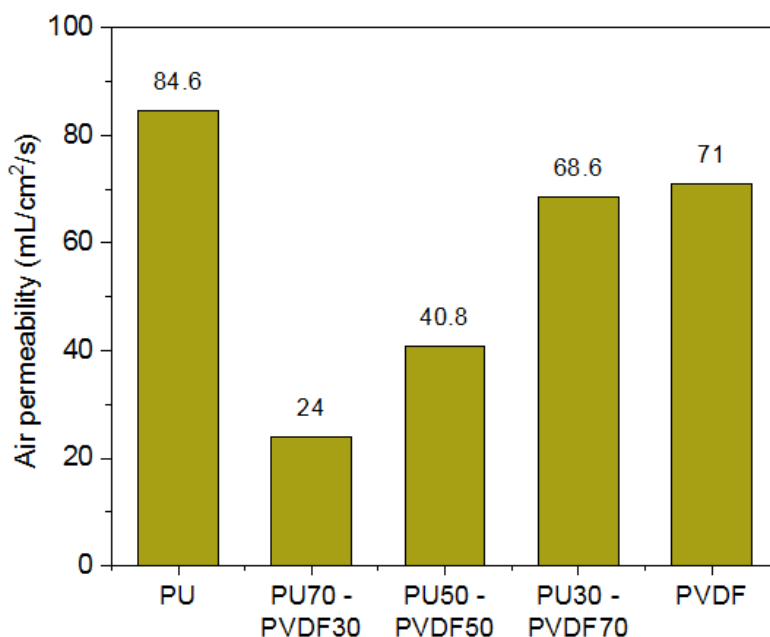


شکل ۳: (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، (b) طیف پراش انرژی پرتو ایکس و (c) نقشه توزیع عناصر نانوالیاف هیبریدی PU30-PVDF70

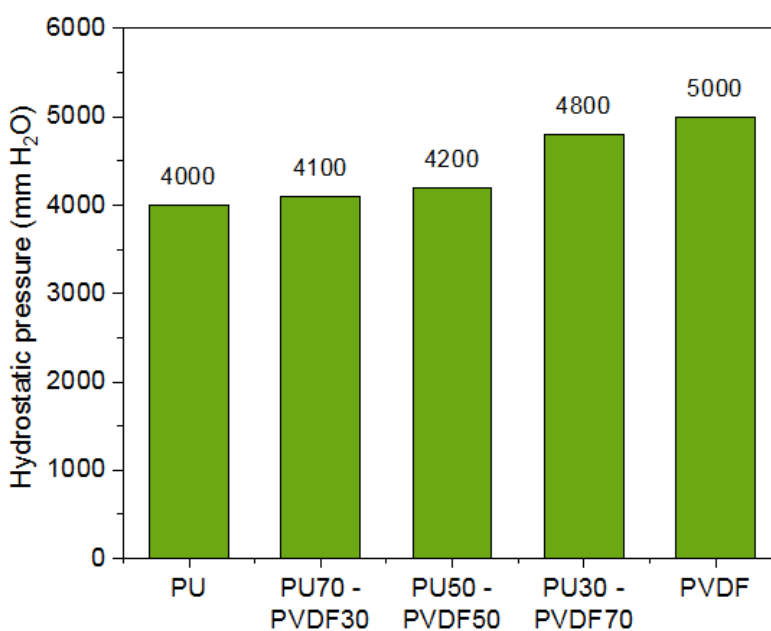
۳-۳- مقاومت در برابر نفوذ آب

بررسی مقاومت در برابر نفوذ آب به عنوان یکی از آزمون‌های مهم که بیانگر خاصیت ضدآب منسوج می‌باشد، حائز اهمیت است. یک منسوج ضدآب علاوه بر آبگریزی و زاویه تماس آب زیاد، باید در برابر تماس طولانی مدت با آب نظیر شرایط بارانی شدید و افزایش فشار هیدرواستاتیک نیز مقاوم باشد. افزایش فشار هیدرواستاتیکی نمونه به منزله افزایش خاصیت ضدآب آن است. شکل ۵ مقاومت در برابر نفوذ آب نانوالیاف تهیه شده را مطابق

نانومتری (کمتر از یک نانومتر)، به راحتی از بین الیاف غشاء عبور می‌کنند و هر چه غشاء دارای تخلخل بیشتری باشد، عبور هوا نیز افزایش می‌یابد. شکل ۴ نفوذپذیری هوا از لایه نانوالیاف تولیدی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد PVDF در نانوالیاف هیبریدی PU-PVDF، میزان نفوذپذیری هوا نیز افزایش می‌یابد؛ بطوریکه لایه نانوالیاف هیبریدی PU30-PVDF70 بهترین میزان نفوذپذیری هوا ($68.6 \text{ mL/cm}^2 \cdot \text{s}$) را نشان داده است.



شکل ۴: نفوذپذیری هوای نانوالیاف خالص و هیبریدی PU-PVDF با نسبت‌های مختلف



شکل ۵: فشار هیدرواستاتیک نانوالیاف خالص و هیبریدی PU-PVDF با نسبت‌های مختلف

یک نانومتر [۱۶] می‌تواند به راحتی از بین الیاف غشاء عبور کنند. تخلخل بیشتر نیز باعث افزایش عبور مولکول‌های گازی می‌شود. شکل ۶ نرخ تراوایی بخار آب در ۲۴ ساعت از سطح یک مترمربع لایه نانولیف خالص و هیبریدی PU-PVDF را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، لایه نانولیف هیبریدی PU30-PVDF70 بالاترین نرخ تراوایی بخار آب ($2853 \text{ g/m}^2/\text{day}$) را نشان داده است. بخوبی واضح است که با افزایش درصد PVDF در لایه نانولیف هیبریدی، بر میزان توانایی عبور بخار آب لایه نانولیف افزوده می‌شود؛ بطوریکه افزایش میزان PVDF به میزان ۷۰ درصد سبب افزایش نرخ عبور بخار آب به میزان ۳/۷۴ درصد شده است. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققان گزارش شده است. بطور مثال می‌توان به مطالعه صورت گرفته بر روی غشای نانولیف هیبریدی پلی‌یورتان و پلی(۲-اکریلامیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید) (PAMPS) اشاره کرد [۱۷]. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش درصد PAMPS به نانولیف هیبریدی PU-PAMPS، از میزان نرخ تراوایی بخار آب کاسته می‌شود. بطوریکه تغییرات نرخ تراوایی بخار آب برحسب ترکیب نانولیف هیبریدی بصورت زیر بیان می‌شود: $\text{PAMPS} < \text{PU33-PAMPS67} < \text{PU50-PAMPS50} < \text{PU67-PAMPS33}$.

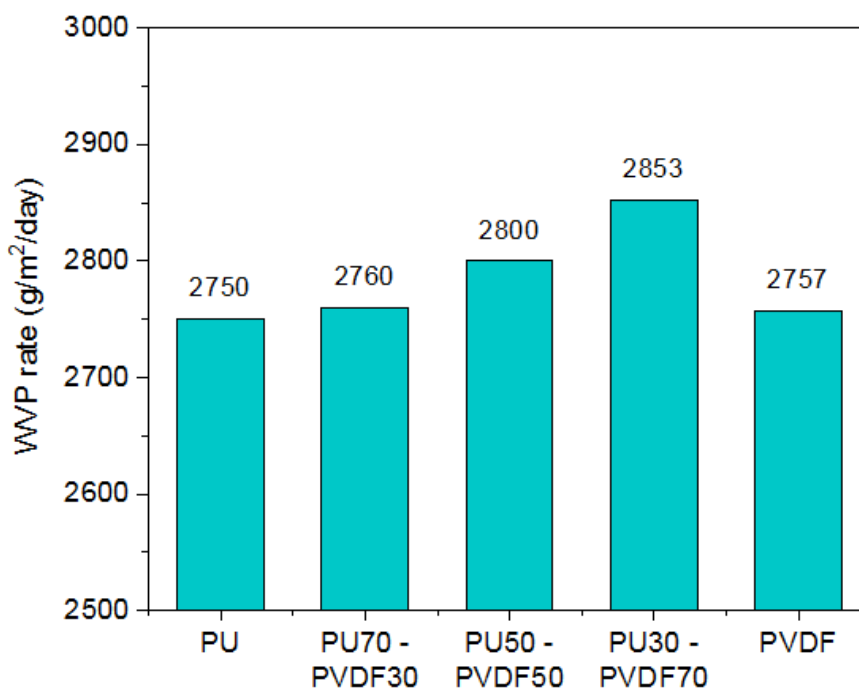
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق غشاهای نانولیفی هیبریدی پلی‌یورتان-پلی(وینیلیدین فلوراید) با نسبت‌های مختلف و حاوی نانوذرات

آزمون فشار هیدرواستاتیکی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، لایه نانولیف هیبریدی PU30-PVDF70 بالاترین فشار هیدرواستاتیکی و مقاومت در برابر نفوذ آب ($4800 \text{ mmH}_2\text{O}$) را نشان داده است. با افزایش میزان PVDF انرژی سطحی لایه غشاء کاهش می‌یابد و نیروی موئینگی که باعث مقاومت به نفوذ آب می‌شود به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به طور کلی، ساختار و جهت‌گیری سه‌بعدی الیاف لایه هیبریدی PU-PVDF، کانال‌های متخلخل و متعددی با مقیاس چند میکرومتر را فراهم کرده است. جلوگیری از نفوذ آب از طریق این کانال‌ها به طور عمده متأثر از نیروی موئینگی است. همچنین حضور نانوذرات آبگریز سیلیکا در این کانال‌ها نیز بسیار تاثیرگذار است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش PVDF به میزان ۷۰ درصد در نانولیف هیبریدی PU-PVDF، مقاومت در برابر نفوذ آب لایه نانولیف به میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

۳-۴- تراوایی بخار آب

تراوایی بخار آب به‌عنوان معیاری برای ارزیابی راحتی حرارتی منسوجات شناخته می‌شود. این معیار نشان‌دهنده توانایی منسوج در برابر عبور بخار و رطوبت است. این مورد در آب و هوای گرم و مرطوب بیشتر حائز اهمیت است؛ زیرا با خروج عرق و بخار بدن از منسوج، سبب حفظ راحتی حرارتی و خنک شونده می‌شود. برخلاف قطرات آب که توسط نیروی مویرگی در کانال‌ها پیشگیری می‌شوند، مولکول‌های گازی ریز (مانند بخار آب) با اندازه کمتر از



شکل ۶: میزان تراوایی بخار آب نانولیف خالص و هیبریدی PU-PVDF با نسبت‌های مختلف

۵- مراجع

- [1] B. Hadavi Moghadam, M. Hasanzadeh, and A. K. Haghi, "On the contact angle of electrospun polyacrylonitrile nanofiber mat," *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 45, no. 2, p. 23, 2013.
- [۲] م. علیزاده، م. حسن‌زاده، س. محتشمی، بهبود رفتار جذب صوت فوم پلی یورتان نرم تقویت شده با نانوالیاف پلیمری، نانولوله کربنی و نانوذرات، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین، دوره ۸، شماره ۲۹، ۲۰۸۰-۲۰۷۲، تابستان ۱۳۹۸.
- [۳] ب. مداح، ع. باوری پور، س. حسنی رمدانی، ح. حسینی، م. حسن‌زاده، بهبود جذب گاز سولفید هیدروژن در غشاهای نانولیفی پلی یورتان با استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با نانوذرات اکسید فلزی، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین، دوره ۸، شماره ۳۰، ۲۱۳۸-۲۱۳۰، پاییز ۱۳۹۸.
- [4] M. Gorji, A. A. A. Jeddi, and A. A. Gharehaghaji, "Fabrication and Characterization of Polyurethane Electrospun Nanofiber Membranes for Protective Clothing Applications," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 125, no. 5, pp. 4135–4141, 2012.
- [5] R. Bagherzadeh, M. Latifi, S. S. Najari, M. A. Tehran, M. Gorji, and L. Kong, "Transport properties of multi-layer fabric based on electrospun nanofiber mats as a breathable barrier textile material," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 1, pp. 70–76, 2011.
- [6] T. M. Akshat, S. Misra, M. Y. Gudiyawar, J. Salacova, and M. Petru, "Effect of Electrospun Nanofiber Deposition on Thermo-physiology of Functional Clothing," *Fibers Polym.*, vol. 20, no. 5, pp. 991–1002, 2019.
- [7] H. Efficiency and P. M. Filter, "Waterproof-breathable PTFE nano- and Microfiber Membrane as High Efficiency PM2.5 Filter," *Polymers (Basel)*, vol. 11, p. 590, 2019.
- [8] G. Amini, M. Karimi, and F. Z. Ashtiani, "The Influence of Fibers Diameter on Water Vapor Permeability, Waterproof and Windproof Properties of Electrospun Poly(vinylidene fluoride) Membrane," *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 6, pp. 485–495, 2020.
- [9] G. Amini, M. Karimi, and F. Z. Ashtiani, "Hybrid electrospun membrane based on poly (vinylidene fluoride)/ poly (acrylic acid)– poly (vinyl alcohol) hydrogel for waterproof and breathable applications," *J. Ind. Text.*, 2020.
- [10] J. Sheng, J. Zhao, X. Yu, L. Liu, J. Yu, and B. Ding, "Electrospun nanofibers for waterproof and

سیلیکا به روش الکترورسی تهیه شد و رفتار غشایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی مورفولوژی نانوالیاف تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده تولید نانوالیافی نسبتاً یکنواخت و عاری از نقص‌های ساختاری نظیر دانه‌تسبیحی بوده است. همچنین بررسی توزیع قطر نانوالیاف حاکی از تولید نانوالیاف با متوسط اندازه قطر ۶۰ تا ۸۰ نانومتر می‌باشد. خواص غشایی شامل تنفس‌پذیری، مقاومت در برابر نفوذ آب و قابلیت تراوایی بخار آب نانوالیاف هیبریدی نیز ارزیابی شد. بررسی‌های بعمل آمده نشان‌دهنده عملکرد مناسب نانوالیاف هیبریدی با نسبت PVDF به PU ۷۰:۳۰ (PU30-PVDF70) در مقایسه با سایر نانوالیاف هیبریدی است؛ بطوریکه بالاترین نرخ تراوایی بخار آب به میزان $4800 \text{ H}_2\text{O mL/cm}^2 \cdot \text{s}$ و بهترین فشار هیدرواستاتیکی به میزان $2853 \text{ g/m}^2/\text{day}$ را ۶۸/۶ را نشان داد. افزایش میزان PVDF به ۷۰ درصد در نانوالیاف هیبریدی و همچنین حضور نانوذرات سیلیکا سبب کاهش انرژی سطحی لایه غشاء نانولیفی و افزایش مقاومت به نفوذ آب در غشا گردیده است.

breathable clothing,” in *Electrospinning: Nanofabrication and applications*, 2019, pp. 543–570.

[11] H. W. Ahn, C. H. Park, and S. E. Chung, “Waterproof and breathable properties of nanoweb applied clothing,” *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 14, pp. 1438–1447, 2010.

[12] H. Abdollahi, A. Salimi, M. Barikani, and H. Daemi, “Toughening Modification of Epoxy Resins Using Polyurethanes: A Review,” *Polymerization*, vol. 6, no. 4, pp. 52–64, 2015.

[۱۳] م. پارسامنش، ش. شکرریز، اثر ذرات سیلیکای سنتزی، رزین اورتانی و فلونئوروکربن روی آب/روغن گریزی پنبه، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش های نوین، دوره ۷، شماره ۲۵، ۱۸۱۵–۱۸۲۳، تابستان ۱۳۹۷.

[14] F. L. Article et al., “Superhydrophobic and breathable SiO₂/polyurethane porous membrane for durable water repellent application and oil-water separation,” *Appl. Surf. Sci.*, p. 144837, 2019.

[15] G. Amini, S. Samiee, A. A. Gharehaghaji, and F. Hajiani, “Fabrication of Polyurethane and Nylon 66 Hybrid Electrospun Nanofiber Layer for Waterproof Clothing Applications,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1–9, 2016.

[16] J. Ge, Y. Si, F. Fu, J. Wang, J. Yang, and L. Cui, “Microfibrous membranes with robust waterproof and breathable performances 3,” *RSC Adv.*, vol. 3, pp. 2248–2255, 2013.

[17] M. Salmani Sangtabi, M. Kamali Dolatabadi, M. Gorji, A. A. Gharehaghaji, and A. Rashidi. “Hybrid electrospun nanofibrous membranes: Influence of layer arrangement and composition ratio on moisture management behavior.” *J. Ind. Text.*, pp. 1528083719871271, 2019.