



Fabrication and Enhancement of Polyethersulfone Hollow Fiber Membrane Properties by Incorporation of Activated Carbon Particles for Blood Purification Applications

Farkhondeh Arabloo

Ph.D. Student, Faculty of Materials Engineering,
Shiraz University, Shiraz, Iran.

Sirus Javadpour*

Professor, Faculty of Materials Engineering,
Shiraz University, Shiraz, Iran.

Mitra Barzegar Marvosti

M.Sc. Student in Corrosion and Protection of
Materials, Faculty of Materials Engineering,
Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

Membranes are the main component in blood purification processes such as hemodialysis, responsible for removing metabolic waste products like urea. Pure polymer-based membranes often suffer from drawbacks such as hydrophobicity and poor biocompatibility. Therefore, this study aims to improve the surface properties of polyethersulfone (PES) membranes by incorporating activated carbon particles. Hollow fiber membranes were fabricated using the phase inversion method via non-solvent induced phase separation. The surface characteristics of pure PES membranes and those containing 0.3 wt% activated carbon particles were investigated and compared. The pure PES membrane was characterized in terms of morphology and pure water permeability (PWP), which was measured at $29 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$. A decrease in water contact angle from 54° to 40° in the composite membrane indicated enhanced surface hydrophilicity, positively affecting membrane performance. Additionally, the surface roughness of the composite membrane increased compared to the pure sample (from 7.00 nm to 7.83 nm). Thus, the incorporation of activated carbon particles enhanced the hydrophilicity of PES hollow fiber membranes, consequently improving their performance for hemodialysis applications.

Keywords: polyethersulfone, activated carbon particles, hollow fiber membrane, hemodialysis

Received: 10/April/2025

Accepted: 28/May/2025

eISSN: -----

ISSN: -----

ساخت و بهبود خواص غشای الیاف توخالی پلی اترسولفون با افزودن ذرات کربن فعال جهت کاربرد در تصفیه‌ی خون

فرخنده عربلو

دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

سیروس جوادپور*

استاد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

میترا برزگر مروستی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش خوردگی و حفاظت مواد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده

غشا، بخش اصلی فرایند تصفیه‌ی خون در همودیالیز است که وظیفه‌ی حذف مواد زائد متابولیکی مانند اوره را بر عهده دارد. غشاهای ساخته‌شده از پلیمرهای خالص، با مشکلاتی نظیر آب‌گریزی و ناسازگاری زیستی همراه هستند؛ بنابراین، این مطالعه، با هدف بهبود ویژگی‌های سطحی غشای پلی‌اترسولفون (PES) از طریق افزودن ذرات کربن فعال انجام شده است. غشای الیاف توخالی، از طریق روش جداسازی فازی ناشی از ضدحلال استفاده شد. ویژگی‌های سطحی غشای PES خالص و غشای حاوی ۰/۳ درصد وزنی ذرات کربن فعال، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. غشای PES خالص، از نظر مورفولوژی و نفوذپذیری آب خالص (PWP) مشخصه‌یابی شد و مقدار PWP آن، برابر با ۲۹ لیتر بر مترمربع در ساعت بر بار ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$) به دست آمد. کاهش زاویه‌ی تماس از ۵۴ به ۴۰ درجه در غشای کامپوزیتی، نشان‌دهنده‌ی افزایش آب‌دوستی سطحی بود که اثر مثبتی بر عملکرد این غشا داشت. همچنین زبری سطح غشای کامپوزیتی نسبت به نمونه‌ی خالص، افزایش یافت (از ۷/۰۰ نانومتر و ۷/۸۳ نانومتر)؛ بنابراین، افزودن ذرات کربن فعال در این مطالعه، موجب افزایش آب‌دوستی غشای الیاف توخالی PES شده و در نتیجه، عملکرد غشای تولیدشده را برای کاربرد در همودیالیز بهبود بخشیده است.

کلیدواژه‌ها: پلی اترسولفون، ذرات کربن فعال، غشای الیاف توخالی، همودیالیز

۱- مقدمه

غشا، یک مانع نیمه تراوا است که اجازه‌ی انتقال جرم مورد نظر را می‌دهد. عملکرد غشا، به گونه‌ای است که یک یا چند جزء در جریان ورودی می‌توانند از غشا عبور کنند، در حالی که بقیه باقی می‌مانند. از آنجایی که اجزا با سرعت‌های مختلف در غشا نفوذ می‌کنند، جداسازی گونه‌های مختلف حاصل می‌شود (۱). غشاها را می‌توان از طیف وسیعی از مواد آلی (مانند پلیمرها، مایعات) یا معدنی (به عنوان مثال، کربن، زئولیت و غیره) ساخت. در حال حاضر، اغلب غشاهای تجاری از پلیمرها ساخته شده‌اند. ویژگی‌های غشا توسط مواد غشایی و ساختار غشا کنترل می‌شود (۲). غشاهای پلیمری، به ویژه غشاهای الیاف توخالی، به طور گسترده در تصفیه‌ی آب (UF، NF، MF، RO و غیره)، فرآیندهای شیمیایی و پزشکی مانند همودیالیز، استفاده می‌شوند (۳). در بین پلیمرهای آب‌گریز، پلی اتر سولفون (PES)، یکی از مهم‌ترین مواد پلیمری است که به طور گسترده در زمینه‌های جداسازی استفاده می‌شود. غشاهای مبتنی بر PES، پایداری اکسیداسیون و حرارتی خوبی دارند و همچنین خواص مکانیکی خوبی را از خود نشان می‌دهند. این غشاها، همیشه با روش وارونگی فازی تهیه می‌شوند و ساختار نامتقارن دارند (۴). ساختار غشایی نهایی، تحت تأثیر ترکیب (غلظت، حلال، مواد افزودنی) و دمای محلول PES، ضدحلال^۱ یا مخلوط ضدحلال‌ها و حمام انعقادی است (۵). همچنین غشاهای PES، به طور گسترده در زمینه‌های پزشکی مانند اندام‌های مصنوعی و دستگاه‌های پزشکی مورد استفاده برای تصفیه‌ی خون (همودیالیز، هموفیلتراسیون، هموفیلتراسیون، plasmapheresis) استفاده می‌شوند (۶). اگرچه غشاهای مبتنی بر PES به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اما دارای معایبی هستند. عیب اصلی این غشا، ویژگی آب‌گریزی آن است. در سال‌های اخیر، استفاده از ذرات معدنی و آلی در ساختار غشا به منظور اصلاح سطحی، به عنوان یک روند نوظهور در فناوری غشا مطرح شده است؛ این روش با هدف افزایش نفوذپذیری، گزینش‌پذیری، آب‌دوستی و پایداری حرارتی غشاها، مورد توجه قرار گرفته است (۷). مواد آلی کربنی، به عنوان افزودنی در ساختار غشاها مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. به کارگیری این مواد، موجب تولید غشاهایی با تخلخل مناسب و اتصال‌پذیری بالای ساختاری شده و در نتیجه، بهبود عملکرد جداسازی غشا را در پی داشته است. کالم و همکاران^۲ (۸)، با افزودن نانوکامپوزیت کربن فعال اصلاح‌شده با هیدروکسی‌آپاتیت به عنوان نانوپرکننده برای ساخت غشاهای نانوکامپوزیتی پلی اترسولفون^۳، نفوذپذیری آب و مقاومت در برابر گرفتگی را بهبود دادند. همچنین تأثیر قابل توجه ذرات کربن فعال بر مورفولوژی ساختاری غشای الیاف توخالی، تخلخل و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، استفاده از کربن فعال در غشاهای پلیمری، منجر به بهبود ویژگی‌های سطحی، از جمله افزایش آب‌دوستی، می‌شود (۸، ۹). افزون بر آن، کربن فعال، به طور گسترده‌ای در کاربردهای پزشکی، به ویژه به عنوان جاذب اوره، مورد استفاده قرار گرفته است. این ویژگی‌ها، زمینه‌ی مناسبی را برای استفاده از کربن فعال به عنوان ماده‌ی پرکننده در غشاهای مورد استفاده در همودیالیز فراهم می‌کنند (۱۰). در کاربرد همودیالیز، از غشاهای الیاف توخالی به دلیل داشتن سطح تماس بیشتر استفاده می‌شود که این ویژگی برای حفظ عملکرد عملیاتی در فشار عبوری بسیار پایین اهمیت دارد؛ از این رو، فراهم‌سازی شرایط مناسب برای تولید غشا و همچنین ایجاد ساختاری با حفرات مطلوب به منظور حذف مؤثر مواد زائد خون، نیازمند بررسی و مطالعه‌ی دقیق است.

تمرکز اصلی پژوهش حاضر، ساخت غشاهای الیاف توخالی با استفاده از روش وارونگی فاز خشک-مرطوب و بررسی مورفولوژی ساختاری حفرات و تخلخل ایجادشده در طول فرآیند تولید غشا، به همراه بررسی ویژگی PWP

1. Nonsolvent-induced phase separation (NIPS)
2. Kallem et al.
3. polyethersulfone

در غشای تولید شده است. همچنین بررسی تأثیر افزودن ذرات کربن فعال به غشای خالص پلی‌اتر سولفون از نظر ویژگی‌های سطحی مانند آب‌دوستی و زبری سطح در این غشا، از دیگر اهداف این مطالعه است.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- مواد

پلی‌اتر سولفون، مدل Ultrason E 6020P از شرکت BASF خریداری شد و به‌عنوان پلیمر جهت ساخت غشا مورد استفاده قرار گرفت. حلال N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP) با خلوص ۹۹/۵٪ از شرکت سمچون خریداری شد و به‌عنوان حلال استفاده گردید. از کربن فعال (AC) خریداری شده از شرکت مرک، به‌عنوان مواد افزودنی در ساخت غشا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از آب دی‌یونیزه به‌عنوان ضدحلال در فرآیند وارونگی فاز استفاده شد.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- آماده‌سازی محلول پلیمری

قبل از تهیه محلول، پلیمر PES در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شد. ترکیب محلول پلیمری برای غشاهای خالص PES و PES/AC، در جدول ۱ آورده شده است. مخلوط‌ها، به مدت ۲۴ ساعت به‌طور مداوم هم زده شدند تا محلول‌های یکنواخت حاصل شوند. پیش از فرایند ریسندگی، حباب‌های هوا از محلول حذف شدند.

جدول ۱. ترکیب محلول پلیمری (درصد وزنی) غشاهای خالص PES و PES/AC

غشا	(پلیمر) PES	(ذرات افزودنی) AC	(حلال) NMP
PES خالص	۱۸	۰	۸۲
PES/AC	۱۸	۰/۳	۸۱/۷

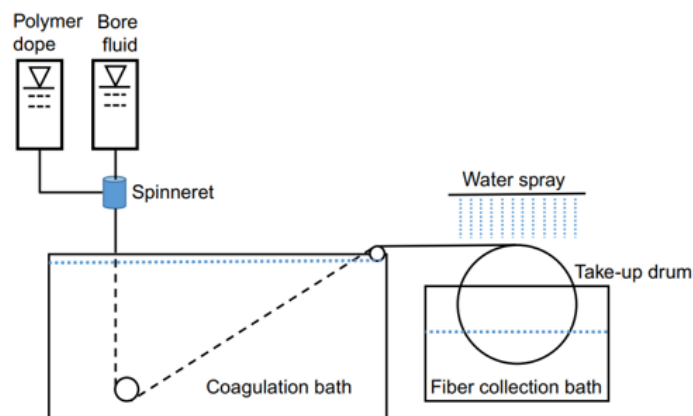
۲-۲-۲- ساخت غشاهای الیاف توخالی

غشای الیاف توخالی خالص PES، با استفاده از روش جداسازی فازی ضد حلال در شرایط دمای اتاق تهیه شدند. محلول دوپ^۱، از طریق یک اسپینر^۲ با قطر بیرونی-داخلی (۰/۷-۰/۵) میلی‌متر و با سرعت تزریق ۲/۵ میلی‌لیتر در دقیقه، توسط یک پمپ دنده‌ای به بیرون رانده شد. bore fluid که شامل آب خالص بود، با سرعت ۶/۵ میلی‌لیتر در دقیقه از داخل اسپینر عبور داده شد تا الیاف غشا شکل گیرد. فاصله‌ی هوایی^۳ در فرایند ساخت، ۲۰ سانتی‌متر تنظیم شد. الیاف تولیدشده، وارد حمام انعقاد شدند و به مدت یک روز در آب نگهداری شدند. شکل ۱، شماتیکی از روش تولید غشای الیاف توخالی را نشان می‌دهد.

3. dope solution

4. spinneret

3. air gap



شکل ۱. شماتیک تولید غشاهای فیبر توخالی به روش NIPS

۲-۲-۳- ساخت غشاهای تخت

فرایند ریخته‌گری، برای غشاهای کامپوزیتی PES/AC، در دمای اتاق بر روی سطح شیشه‌ای و با استفاده از دستگاه فیلم‌کش با ضخامت لایه‌ی ۲۰۰ میکرومتر انجام شد. بلافاصله پس از ریخته‌گری، غشاها به داخل حمام انعقاد حاوی آب مقطر در دمای اتاق منتقل شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، برای حذف کامل باقی‌مانده‌ی حلال، غشاهای تخت تولیدشده به حمام انعقاد دوم منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آن نگهداری شدند.

۲-۳-۲- شناسایی غشا و انجام آزمون‌ها

۲-۳-۲-۱- زاویه‌ی تماس و میزان آب‌دوستی

برای ارزیابی آب‌دوستی غشاها، زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب با سطح آن‌ها اندازه‌گیری شد. این آزمون، با استفاده از دستگاه زاویه‌سنج مدل JIKAN/CAG-10 انجام شد. برای هر نمونه، سه نقطه به‌صورت تصادفی انتخاب گردید و میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، به‌عنوان زاویه‌ی تماس نهایی گزارش شد.

۲-۳-۲-۲- آنالیز زبری سطح

جهت بررسی زبری سطح غشاها، از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با سیستم مولتیمود استفاده شد. همچنین میانگین زبری سطح (R_a) برای هر نمونه محاسبه گردید.

۲-۳-۳- ارزیابی عملکرد غشا

ظرفیت نفوذپذیری آب غشا (PWP)، ازجمله‌ی ارزیابی‌هایی است که برای بررسی ویژگی‌های غشا انجام می‌شود. نفوذپذیری آب (PWP) غشا، با توجه به میزان عبور آب خالص ارزیابی می‌شود. برای محاسبه‌ی نفوذپذیری آب غشا (PWP)، از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

$$P_w = \frac{V}{A \times \Delta t \times \Delta P} \quad (1)$$

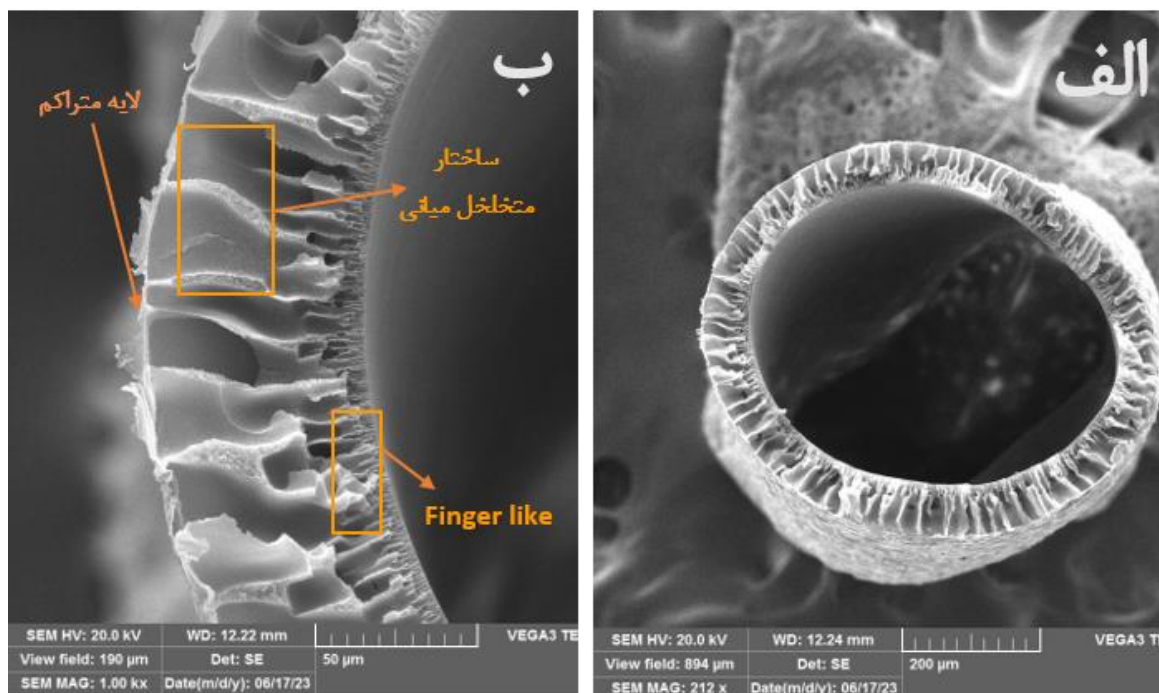
که در آن V حجم عبوری (برحسب لیتر)، A مساحت کل الیاف توخالی (برحسب مترمربع)، Δt زمان صرف‌شده (برحسب ساعت) و ΔP اختلاف فشار (bar) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت بررسی مورفولوژی غشای خالص PES و میزان نفوذپذیری

بررسی مورفولوژیکی سطح مقطع غشا، جهت ارزیابی عملکرد غشاها، ضروری است. با تحلیل این موارد، می‌توان به درک بهتری از ساختار بافت غشا و اندازه‌ی حفرات دست یافت. برای بررسی مورفولوژی سطح مقطع غشا، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود، سطح مقطع غشای الیاف توخالی پلیمر خالص ۱۸٪، دارای ساختار منظم و بدون عیب در ناحیه‌ی دایره‌ی مرکزی است. این ساختار منظم، به‌وضوح نشان‌دهنده‌ی بهینه بودن شرایط تولید الیاف توخالی از جمله سرعت دوپ، سرعت تزریق و شکاف هوایی است. به‌طور خاص، این پارامترها، تأثیر مستقیمی بر فرآیند فاز جداسازی دارند و به‌طور محسوسی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی غشا و عملکرد آن در فرآیندهای جداسازی مانند فیلتراسیون و تصفیه تأثیر می‌گذارند. تحقیقات مختلف، نشان داده‌اند که کنترل دقیق این پارامترها، می‌تواند موجب بهبود کیفیت و کارایی غشاهای تولیدی گردد. با توجه به شکل ۲ (ب)، مقطع عرضی الیاف توخالی، در بزرگ‌نمایی بیشتر نمایش داده شده است. مطابق با تصویر، در فرآیند تولید، غشا از سه لایه‌ی مشخص تشکیل شده است: لایه‌ی بیرونی، لایه‌ی میانی و لایه‌ی درونی. این ساختار لایه‌ای، به‌طور معمول در فرآیندهای فاز جداسازی مشاهده می‌شود و به دلیل ویژگی‌های خاص هر لایه، نقش کلیدی در کارایی غشا در کاربردهای مختلف دارد. مطالعات، نشان داده‌اند که این لایه‌بندی می‌تواند بر ویژگی‌های مکانیکی، نفوذپذیری و مقاومت به آلودگی غشا، تأثیر قابل توجهی داشته باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در لایه‌ی بیرونی، ساختار متراکم قابل مشاهده است. این ویژگی، به دلیل تغییرات سریع در فرآیند تولید و تشکیل فاز آبی در سطح بیرونی غشا ایجاد می‌شود. این ساختار، به‌ویژه در جلوگیری از نفوذ مولکول‌های بزرگ و افزایش انتخاب‌پذیری غشا برای جداسازی مؤثرتر نقش دارد. در لایه‌ی میانی، ساختاری متخلخل با حفرات بزرگ‌تر نسبت به لایه‌ی بیرونی مشاهده می‌شود. این لایه، به‌طور عمده به‌عنوان بخش اصلی انتقال جریان عمل می‌کند و ویژگی‌های حفرات آن تأثیر زیادی بر ظرفیت نفوذپذیری غشا دارند. این نوع ساختار، به تسهیل جریان آب و بهبود عملکرد فیلتراسیون کمک می‌کند. در لایه‌ی درونی، ساختار بسیار متخلخل با حفرات درشت و ساختار *fingerlike* با کانال‌های باریک و طولانی مشاهده می‌شود که موجب افزایش سطح تماس بین محلول و غشا و بهبود فرآیند جذب می‌گردد. به‌طور کلی، این ساختارها، به‌طور مستقیم بر ظرفیت جداکنندگی و بازده غشا در فرایندهای جداسازی تأثیر می‌گذارند (۱۱).

میزان نفوذپذیری غشای الیاف توخالی PES در شرایط آزمایش، برابر با ۲۹ لیتر بر مترمربع در ساعت بر بار ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$) اندازه‌گیری شد که تا حد زیادی ناشی از آب‌دوستی و قابلیت ترشوندگی بالای سطح غشا و همچنین ساختار متخلخل آن است.

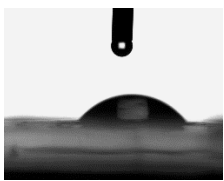


شکل ۲. تصاویر مورفولوژیکی مقطع عرضی میکروسکوپ الکترونی روبشی از غشای الیاف توخالی PES (الف) مقطع عرضی غشا با بزرگنمایی ۲۱۲ برابر و (ب) مقطع عرضی غشا با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

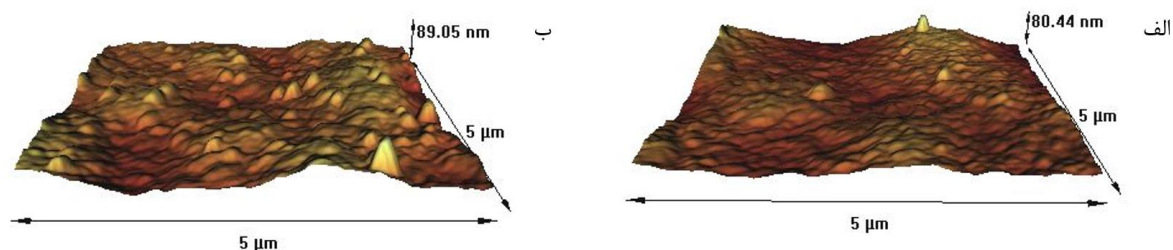
۳-۲- خواص سطحی غشاهای خالص و کامپوزیتی

در غشاهای همودیالیز، خواص سطحی مانند آب دوستی، از ویژگی‌های اساسی به شمار می‌روند. حالت ترشوندگی غشاهای، نشان‌دهنده‌ی واکنش‌های بین اجزای خون، از جمله پروتئین‌ها، مولکول‌های آب و سطح غشا است. این ویژگی‌ها، تأثیر زیادی بر عملکرد غشا در فرایند جداسازی و فیلتر کردن مواد دارند و می‌توانند بازده جداسازی، نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری غشا را بهبود بخشند. جدول ۲، اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس آب را برای غشاهای مبتنی بر PES نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، به‌وضوح دیده می‌شود که افزودن ذرات AC باعث کاهش زاویه‌ی تماسی از ۵۴ به ۴۰ درجه شده و در نتیجه، بهبود آب دوستی سطح غشاهای نسبت به غشای PES خالص شده است. تخلخل بالا و سطح گسترده‌ی کربن فعال، این امکان را فراهم می‌کند تا آب از طریق نیروهای جاذبه‌ی بین‌مولکولی و جذب فیزیکی به سطح کربن متصل شود و در نتیجه، آب دوستی سطح غشا افزایش یابد (۱۲).

جدول ۲. زاویه‌ی تماس آب برای غشای الیاف توخالی مبتنی بر پلی اترسولفون

غشا	زاویه	تصویر قطره
غشای خالص PES	۵۴ درجه	
غشای کامپوزیتی PES/AC	۴۰ درجه	

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز توپوگرافی سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۳، مقدار زبری متوسط سطح (R_a) در غشای خالص، برابر با $7/00$ نانومتر اندازه‌گیری شد؛ در حالی که با افزودن ذرات کربن فعال به محلول دوپ پلیمری، این مقدار به $7/83$ نانومتر افزایش یافت. این افزایش زبری سطح، ناشی از پراکندگی ذرات AC بر روی سطح غشا است که به ایجاد ناهمواری‌های میکروسکوپی کمک می‌کند. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان دادند که با افزودن ذرات، خواص آب‌دوستی غشا نظیر تخلخل، ظرفیت جذب آب، زاویه‌ی تماس آب و همچنین نفوذپذیری آب خالص، بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند (۱۳). این نتایج، به افزایش سایت‌های فعال سطحی و بهبود برهم‌کنش‌های سطحی بین غشا و مولکول‌های آب نسبت داده می‌شود.



شکل ۳. زبری سطح سه‌بعدی غشاهای تهیه‌شده شامل (الف) غشای خالص PES و (ب) غشای کامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی کربن فعال (PES/AC)

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، غشاهای الیاف توخالی اولترافیلتراسیون، از پلی اترسولفون به روش جداسازی فازي ناشی از ضدحلال تولید شدند. آنالیز مقطع عرضی، نشان داد که ساختار منظم و سه‌لایه‌ی غشای الیاف توخالی، حاصل از شرایط مناسب تولید، با دارا بودن ویژگی‌های متفاوت در هر لایه، مانند ساختار حفرات درشت در لایه‌ی میانی و کانال‌های طولانی در لایه‌ی درونی، نقش مؤثری در بهبود نفوذپذیری، انتخاب‌پذیری و افزایش کیفیت و بازده فرآیند جداسازی دارد. تأثیر افزودن ذرات کربن فعال بر خواص سطحی غشاهای کامپوزیتی پلی اترسولفون مورد بررسی قرار گرفت و با غشای خالص پلی اترسولفون مقایسه شد. نتایج، نشان داد که افزودن AC، موجب بهبود آب‌دوستی سطحی شده و در نتیجه، نفوذپذیری آب خالص (PWP) افزایش یافت که به دلیل افزایش برهم‌کنش‌های بین مولکول‌های آب و سطح غشا بود. غشای اصلاح‌شده با سطحی آبدوست‌تر و زبری سطحی بیشتر، می‌تواند عملکرد مؤثرتری را در جداسازی مواد زاید خون هم از نظر کیفیت و هم بازده نشان دهد.

منابع

1. Chung TS, Feng Y. Hollow fiber membranes. Elsevier; 2021.
2. Pinnau IF, Freeman BD. Formation and modification of polymeric membranes: Overview. ACS Symposium Series. 1999;744:1-22.
3. Lang WZ, Ji Q, Shen JP, Guo YJ, Chu LF. Modified poly (vinylidene fluoride) hollow fiber composite membranes reinforced by hydroxyapatite nanocrystal whiskers. Journal of Applied Polymer Science. 2013 Mar 15;127(6):4564-72.
4. Zhao C, Xue J, Ran F, Sun S. Modification of polyethersulfone membranes—A review of methods. Progress in Materials Science. 2013 Jan 1;58(1):76-150.
5. Barth C, Gonçalves MC, Pires AT, Roeder J, Wolf BA. Asymmetric polysulfone and polyethersulfone membranes: effects of thermodynamic conditions during formation on their performance. Journal of Membrane Science. 2000 May 1;169(2):287-99.
6. Stamatiadis DF, Papenburg BJ, Gironés M, Saiful S, Bettahalli SN, Schmitmeier S, Wessling M. Medical applications of membranes: Drug delivery, artificial organs and tissue engineering. Journal of Membrane Science. 2008 Feb 1;308(1-2):1-34.

7. Ng LY, Mohammad AW, Leo CP, Hilal N. Polymeric membranes incorporated with metal/metal oxide nanoparticles: A comprehensive review. *Desalination*. 2013 Jan 2;308:15-33.
8. Kallem P, Ouda M, Bharath G, Hasan SW, Banat F. Enhanced water permeability and fouling resistance properties of ultrafiltration membranes incorporated with hydroxyapatite decorated orange-peel-derived activated carbon nanocomposites. *Chemosphere*. 2022 Jan 1;286:131799.
9. Lewis J, Al-sayaghi MA, Buelke C, Alshami A. Activated carbon in mixed-matrix membranes. *Separation & Purification Reviews*. 2021 Jan 2;50(1):1-31.
10. Abidin MN, Goh PS, Said N, Ismail AF, Othman MH, Abdullah MS, Ng BC, Hasbullah H, Kadir SH, Kamal F, Mansur S. Polysulfone/amino-silanized poly (methyl methacrylate) dual layer hollow fiber membrane for uremic toxin separation. *Separation and Purification Technology*. 2020 Apr 1;236:116216.
11. Mansur S, Othman MH, Abidin MN, Ismail AF, Kadir SH, Goh PS, Hasbullah H, Ng BC, Abdullah MS, Mustafar R. Enhanced adsorption and biocompatibility of polysulfone hollow fibre membrane via the addition of silica/alpha-mangostin hybrid nanoparticle for uremic toxins removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021 Oct 1;9(5):106141.
12. Julien F, Baudu M, Mazet M. Relationship between chemical and physical surface properties of activated carbon. *Water Research*. 1998 Nov 1;32(11):3414-24.
13. Kumar M, Isloor AM, Todeti SR, Nagaraja HS, Ismail AF, Susanti R. Effect of binary zinc-magnesium oxides on polyphenylsulfone/cellulose acetate derivatives hollow fiber membranes for the decontamination of arsenic from drinking water. *Chemical Engineering Journal*. 2021 Feb 1;405:126809.

