

بررسی اثر تابش پلاسمایی نانوساختارهای کربن شبه الماس بر عملکرد جداسازی غشاهایی بر پایه PES، PP و PVDF

زینب کیامهر^۱، مجتبی شفیع^۲، بابک شکری^۳، سید علی رضوی راد^۲

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ گروه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

شاپای چاپی: 2588-493x

شاپای الکترونیکی: 2588-4921

* نویسنده مسئول

z.kiamehr@tafreshu.ac.ir



این مطالعه یک استراتژی جدید اصلاح سطح را برای غشاهای متفاوت (PES, PVDF, PP) با استفاده از نانوساختارهای کربن شبه الماس از طریق رسوبدهی بخار شیمیایی افزایش یافته با پلاسما ارائه می کند. یک بررسی سیستماتیک برای مقایسه اصلاحات پوشش نانوساختارهای کربن شبه الماس تحت شرایط بهینه پلاسما (قدرت ۴۰ وات، فشار ۷۰ میلی تور، تابش دهی ۳۰ دقیقه ای) انجام شد. غشای PES اصلاح شده (غشاء بهینه)، پیشرفت های چشمگیری در معیارهای کلیدی عملکرد نشان می دهد، به طوری که زاویه تماس آب از ۹۲° به ۴۰° کاهش، شار آب خالص از ۲۰ به ۶۰ L/m²h و دفع نمک از ۴۰٪ به ۹۸٪ بهبود می یابد. تغییر مورفولوژی سطح از زبری متوسط ۱۶۰ nm به ۹۰ nm به افزایش خواص ضد رسوب کمک می کند. بعد از غشای بهینه، غشای PVDF نیز نتایج قابل توجهی نشان داد: به طوری که زاویه تماس آب از ۱۲۴° به ۶۱° کاهش، شار آب خالص از ۱۸ به ۴۳ L/m²h و دفع نمک از ۳۷٪ به ۹۶٪ بهبود می یابد. تغییر مورفولوژی سطح از زبری متوسط ۱۶۴ nm به ۱۰۹ nm به افزایش خواص ضد رسوب کمک می کند. اصلاح پلاسمایی در غشاء PP با آب گریزتر کردن آن، شار آب خالص را حفظ کرد، که نشان می دهد پوشش کربن شبه الماس، نفوذپذیری ذاتی غشاء را به خطر نمی اندازد. تست های پایداری در محلول های نمک اشباع، خواص تمیز کنندگی آسان و حفظ آبدوستی را پس از چندین دوره شستشو نشان داد که نشان دهنده دوام عالی است. این کار، برای توسعه غشاهای ضد رسوب با کارایی بالا و با کاربردهای بالقوه در کارخانه های نمک زدایی و تأسیسات تصفیه فاضلاب، یک رویکرد اقتصادی مقرون به صرفه را معرفی می کند. یافته ها در مورد رابطه بین اصلاح سطح، ویژگی های ساختاری غشاء و عملکرد آن، بینش های ارزشمندی را ارائه می دهد.

واژگان کلیدی: اصلاح سطح، اصلاح پلاسمایی، غشاء با تراوایی بالا، نانوساختارهای کربن شبه الماس، ضد رسوب، نمک زدایی.

مقدمه

مسدودشدگی منافذ غشاء باعث کاهش سطح مقطعی می‌شود که مایع از آن عبور می‌کند. اگر فشار اعمال شده ثابت بماند، شار عبوری از غشا کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش توان، فشار اعمال شده باید در طول فرآیند جداسازی افزایش یابد که منجر به افزایش هزینه خواهد شد. از آنجا که بزرگترین مزیت جداسازی غشایی هزینه‌های عملیاتی پایین آنهاست، این افزایش فشار مورد نیاز و هزینه‌های متعاقب آن، استفاده از این غشاها را محدود می‌کند [۲۳]. به‌طور کلی، اصلاح ویژگی‌های سطح غشاهای پلیمری با استفاده از روش‌های مختلف برای اهداف مختلف به‌دست می‌آید. با این‌حال، بیشتر اصلاحات سطحی بر روی غشاهای پلیمری در فرآیندهای تصفیه فاضلاب برای کاهش مسدودشدگی انجام می‌شود [۲۴]. از آنجایی‌که تهیه غشاء ضد رسوب مطرح شد، روش‌های مختلفی از جمله اصلاح غشاء با پیوند مونومرهای آبدوست، تیمار پلاسما، افزودن نانوذرات و غیره استفاده شده است. جلوگیری از رسوب غشاء با ارائه غشاهای پلیمری آبدوست با خاصیت ضد گرفتگی یا حتی خودتمیزشوندگی، کارایی و طول عمر غشاء را بهبود می‌بخشد و هزینه‌های عملیاتی ناشی از تمیز کردن یا تعویض غشاها را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش مسدودشدگی منافذ غشاهای پلیمری، اصلاح غشاء با ساختارهای آبدوست است که می‌تواند از مسدودشدگی منافذ جلوگیری کرده و عملکرد جداسازی غشاء را افزایش دهد [۲۵-۲۷].

غشاء را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش‌های وارونگی فاز [۲۸]، سل-ژل، الکتروریسی [۲۹]، اصلاح با اشعه ماوراء بنفش [۳۰]، پلیمریزاسیون [۳۱]، کشش و رسوب از فاز بخار اصلاح کرد. نانوذرات دارای خواص منحصر به فردی هستند که آنها را قادر می‌سازد تا وارد ساختارهای غشایی شوند. آنها ساختار و ویژگی‌های غشاء را تغییر می‌دهند که منجر به بهبود کیفیت سطح و کاهش چسبندگی می‌شود.

محدودیت منابع آب شیرین موجود و افزایش تقاضا در جوامع صنعتی امروزی توجه را به تصفیه فاضلاب و توسعه بهترین روش برای بازیابی و استفاده مجدد از فاضلاب با کیفیت بالا از طریق تصفیه‌خانه‌های پیشرفته جلب کرده است. فرآیند فیلتراسیون غشایی یک گزینه امیدوارکننده در میان فناوری‌های موجود است [۱-۴]. اخیراً این روش، به دلیل پیشرفت در تکنیک و مواد اولیه ساخت و اصلاح غشاء، روشی کارآمد برای حذف انواع آلاینده‌های آب در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه منافذ و فشار اعمال‌شده، بازده غشاها و طول عمر آن‌ها متفاوت خواهد بود [۵ و ۶].

پایداری طول عمر غشاها، کارایی و مقرون به صرفه بودن سیستم فیلتراسیون غشایی را تعیین می‌کند. علاوه بر این، رسوب غشایی، شار خروجی و عملکرد جداسازی غشاها را کاهش داده و منجر به طول عمر کوتاه‌تر غشاها و هزینه‌های عملیاتی بالاتری می‌شود [۷ و ۸]. خواص فیزیکی/شیمیایی غشاها (آبدوستی، آبگریزی، مقاومت در برابر رسوب، اثر پایداری شیمیایی، و غیره) تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد آن‌ها دارد. به عنوان مثال، خواص ضد رسوب غشاء در فرآیند جداسازی رسوب از غشاء بسیار اهمیت دارد [۹-۱۵]. بنابراین، تهیه غشاهای پلیمری با راندمان و طول عمر بالا که نیاز به شستشو و تعویض را به حداقل می‌رساند، تا حد زیادی از اثرات منفی زیست محیطی و هزینه‌های بالا جلوگیری کند [۱۶]. در فرآیندهای جداسازی غشایی که برای تصفیه آب استفاده می‌شود، رسوب به تدریج و در طول زمان در سطح غشاء جمع می‌شود. این رسوب فزاینده منجر به کاهش جریان عبوری آب از غشاء شده و در نهایت بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. این پدیده‌ها به دلیل مسدودشدگی منافذ غشاء و جذب رسوب رخ می‌دهد [۱۷-۲۰]. به طور کلی، مسدودشدگی غشاء یک پدیده پیچیده شیمیایی-فیزیکی است که معمولاً شامل رسوب و جذب عوامل مسدودشدگی در سطح بیرونی و حفره‌های داخلی غشا می‌شود [۲۱ و ۲۲].

نانوذرات اکسید فلزی مانند تیتانیوم، آلومینیوم، زیرکونیوم، سیلیس، آهن و روی از جمله پرکاربردترین نانوذرات در ساختار غشاها هستند [۳۲، ۳۳]. چالش اصلی در استفاده از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم، تجمع آنها در ماتریس غشا و توزیع ناهموار در سطح غشاء است. مطالعه منابع قبلی نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات از طریق روش اختلاط در فرآیند وارونگی فاز منجر به مشکلاتی از جمله کاهش شار شده است. این کاهش به این دلیل رخ می‌دهد که نانوذرات به درستی در ماتریس غشاء پلیمری توزیع نشده‌اند و در نتیجه منافذ غشاء مسدود می‌شود [۳۴]. مطالعات اخیر پیشرفت قابل‌توجهی را در تکنیک‌های اصلاح غشا نشان داده‌اند. لی و همکاران (۲۰۲۴) با دفع نمک ۹۳.۹۶ درصد با استفاده از نانوکامپوزیت‌های ZnO/PHMB روی غشاهای PES به نتایج قابل‌توجهی دست یافتند [۴۶]. درحالی‌که لیو و همکاران (۲۰۲۴) ۸۵ درصد مقاومت در برابر رسوب را از طریق اصلاح سطح TA/Fe_3 گزارش کردند [۴۷]. علی‌رغم این پیشرفت‌ها، چالش‌ها در پایداری طولانی‌مدت و پوشش سطحی یکنواخت همچنان در روش‌های اصلاح فعلی به‌عنوان مسائل پایدار باقی می‌مانند.

بررسی‌های جامع اخیر اهمیت رو به رشد مواد مبتنی بر کربن را در اصلاح غشاء برجسته کرده‌اند [۵۰، ۵۱]. روش‌های رسوب‌گذاری عامل مهمی در نانوساختارهای کربن شبه‌الماس هستند. نانوساختارهای کربن شبه‌الماس به‌دلیل پایداری شیمیایی بالا، انرژی سطحی قابل کنترل و زیست سازگاری عالی، به مواد امیدوارکننده‌ای برای اصلاح سطح تبدیل شده‌اند [۴۸، ۴۹]. درحالی‌که این نانوساختارها به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، پتانسیل آنها در اصلاح خواص غشاء، به‌ویژه در تصفیه غشایی آب، تا حد زیادی ناشناخته باقی مانده است، به‌ویژه برای کاربردهای تصفیه آب. انواع مختلفی از اصلاح‌های رسوب‌گذاری برای فیلم‌های کربن شبه‌الماس استفاده می‌شوند. روش‌های مختلف و طیف وسیعی از دماها (صفر تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای لایه‌نشانی فیلم‌های کربن شبه‌الماس مورد استفاده واقع می‌شوند. نوع لایه پوشش با توجه به پارامترهای مختلف تولید پلاسما متفاوت است. پیوند قوی بین لایه رسوب‌شده و بستر، منجر به بهترین خواص

پوشش‌های نانوساختارهای کربن شبه‌الماس می‌شود [۳۵]. جنبه‌های نوآورانه این پژوهش عبارتند از: (۱) اولین کاربرد نانوساختارهای کربن شبه‌الماس برای اصلاح غشاهای مورد مطالعه، (۲) اجرای فرآیند اصلاح پلاسمایی کنترل‌شده و (۳) ادغام خواص ضد رسوب و جداسازی رسوب با عملکرد بالا. مطالعات اخیر در فرآیندهای غشایی بر افزایش استفاده عملی از غشاهای پلیمری با اصلاح خواص آبدوست و آبگریز آنها متمرکز شده است. هدف این رویکرد بهبود ویژگی‌های ضد رسوب آنها است و پیشرفت قابل‌توجهی در این زمینه حاصل شده است. در این مقاله سعی شده است دیدگاه جدیدی از اصلاح پلاسمایی غشاهای PES، PP و PVDF و آبگریز ارائه شود. برای اولین بار، غشاهای PES، PP و PVDF با استفاده از نانوساختارهای کربن شبه‌الماس تحت اصلاح پلاسمایی قرار گرفت. این کار یک رویکرد نوآورانه را برای کاهش هزینه‌های اصلاح این غشاها معرفی کرده و به محققان کمک می‌کند بینش عمیق‌تری نسبت به عوامل مؤثر بر شار حلال به‌دست آورند.

۱- مواد

در این تحقیق غشاهای تجاری PES، PP و PVDF به دلیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف و هزینه کم مورد بررسی قرار گرفتند. غشاهای مورد مطالعه با ضخامت $114\mu m$ و اندازه منافذ $0.42\mu m$ توسط شرکت BASF آلمان تولید شد. ابتدا تمام سطوح نمونه‌ها با پلاسمای آرگون-هیدروژن، با توان ۴۰ وات و فشار ۷۰ میلی‌تور برای ۳۰ ثانیه پردازش می‌شوند [۷]. تمام نمونه‌ها ابتدا در آب مقطر به مدت ۱۰ دقیقه و سپس در اتانول اولتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه خشک می‌شوند. به منظور طبقه‌بندی، نمونه‌هایی که نمونه‌های کنترل انتخابی محسوب می‌شوند از نمونه‌های دیگری که برای پوشش و فرآوری هستند جدا می‌شوند.

۲- سیستم PECVD و نحوه تابش‌دهی

سطح روی غشاء قرار گرفت. تجزیه و تحلیل AFM، CA آب و خواص ضد رسوب بر روی غشاهای PES، PP و PVDF نمونه‌های اصلاح‌شده و نمونه کنترل برای مطالعه انجام شد.

جدول ۱. انواع پوشش در فرآیند اصلاح سطح غشا با

نانوساختارهای کربن شبه‌الماس	
نوع پوشش	غشاء
کنترل PES	M ₀₁
اصلاح شده PES	M ₁
کنترل PVDF	M ₀₂
اصلاح شده PVDF	M ₂
کنترل PP	M ₀₃
اصلاح شده PP	M ₃

۳- تجزیه و تحلیل غشاء و فرآیندهای

غشایی

برای بررسی زبری سطح و تغییر آن پس از فرآیند لایه‌نشانی، تصاویر میکروسکوپ اتمی (Femto-Scan) از سطح تهیه شد. برای ارزیابی تغییر در آبدوستی، از تکنیک CA آب استفاده شد. از این نظر، آب بدون یون به صورت قطره‌هایی بر روی غشاهای فوق چکانده شد و نتیجه مشاهدات گزارش گردید. روش بررسی عملکرد غشاهای اصلاح‌شده مشابه روش تحقیقات قبلی است [۷]. از آب خالص برای فشرده‌سازی غشا با فشار ۰.۶ مگاپاسکال به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شد. سپس فشار عملیاتی برای آزمایش نمک روی ۰.۵۵ مگاپاسکال تنظیم شد.

$$J_{w,1} = V / A \Delta t \quad (۱)$$

از معادله ۱ برای تعیین شار آب تصفیه شده استفاده می‌شود که در این معادله $J_{w,1}$ شار آب تصفیه‌شده برحسب $V, L/m^2h$ حجم آب تصفیه‌شده برحسب لیتر، A سطح مقطع غشاء برحسب مترمربع، Δt زمان تصفیه برحسب ساعت است. محلول نمک سولفات سدیم با غلظت 0.1 m/L به عنوان محلول خوراک برای بررسی عملکرد سلول‌های تهیه شده استفاده شد. معادله ۲ برای اندازه‌گیری میزان جداسازی استفاده شد.

$$R\% = \left(\frac{C_f - C_p}{C_f} \right) * 100 \quad (۲)$$

در اینجا از روش PECVD برای به‌دست آوردن ساختار شبه‌پایدار نانوساختارهای کربن شبه‌الماس استفاده می‌شود. سپس لایه‌های کربن شبه‌الماس با استفاده از تکنیک کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم با منبع گرافیتی و کندوپاش فرکانس رادیویی رسوب‌گذاری شدند. سیستم PECVD دارای یک راکتور پلاسما است که در آن ذرات گاز ابتدا با یکدیگر واکنش داده و سپس به صورت جامد بر روی سطح نمونه رسوب می‌کنند [۵۲].

گازهای O₂، H₂ و Ar از طریق دریچه‌های اصلی وارد محفظه می‌شوند. در این روش پس از ورود گازهای مختلف به محفظه برای رسوب نانوساختارهای کربن شبه‌الماس، فضای پلاسما ایجاد و واکنش‌های شیمیایی در فضای پلاسما انجام می‌شود. یک منبع گرافیت و گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد به عنوان گاز کندوپاش در همه لایه‌ها استفاده شد. فاصله بین نمونه‌ها و کاتد برای همه نمونه‌های مورد مطالعه ۵ میلی‌متر تعیین شد [6-8]. پس از تخلیه هوای محفظه، گاز انتخابی به داخل آن تزریق شده و پس از اعمال ولتاژ پلاسما تشکیل می‌شود. در این مرحله، غشاء واقع شده در محل مورد نظر، تحت تیمار پلاسما قرار می‌گیرد. برای لایه‌نشانی غشاها، فشار محفظه در هنگام تیمار بر روی ۷۰ میلی‌تور و توان منبع کربن آمورف ۱۵۰ وات تنظیم گردید. برای به حداقل رساندن اثرات حرارتی ناشی از پلاسما و آسیب به غشاها، از حالت پالس پلاسما با چرخه کاری ۱۵ درصد استفاده شد. کل زمان تابش فیلم ۳۰ دقیقه است. پس از هر ۳۰ ثانیه تابش کربن آمورف بر روی سطح نمونه‌ها، ۱۵ ثانیه پلاسما آرگون (تا پایان ۳۰ دقیقه عملیات سطحی) اعمال شد. این پوشش با توان ۵۰ وات با چرخه کاری ۱۵ درصد برای جداسازی نوارهای کربن سست یا هیدروکربن‌های قرار گرفته روی سطح اعمال می‌شود تا لایه نهایی ایجاد شده یک لایه کربنی متراکم و در محیط پایدار باشد.

در بیشتر موارد، رسوب خطی است و پوشش فقط در یک طرف بستر قرار می‌گیرد (جدول ۱). در تمامی این نمونه‌ها می‌توان با کنترل میزان گروه‌های آمیدی یا کربوکسیلیک میزان آبدوستی را افزایش داد. برای گروه‌های آمین از آمونیاک و برای گروه‌های آمید از اتو یا اسید استیک استفاده شد. بهترین نسبت برای ایجاد سطوح آبگریز ۱۵ سانتی‌متر استیلن و ۵ سانتی‌متر متان است. در نهایت پس از اتمام زمان مشخص شده ولتاژ قطع می‌شود. بر اساس آخرین مطالعات، اصلاح سطح غشاهای PES، PP و PVDF با روش پوشش نانوساختارهای کربن شبه‌الماس برای بهبود همزمان خاصیت ضد رسوب و توانایی جداسازی یون‌ها هنوز گزارش نشده است. به این معنا، همانطور که قبلاً گفته شد، حالات مختلفی از لایه اصلاح‌کننده

سانتی‌گرا، فشار: ۰/۵۵ مگاپاسکال) در سه تکرار انجام شد و میانگین‌ها با انحرافات استاندارد مربوطه گزارش می‌شوند. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از روش‌های محاسبه خطای استاندارد انجام شد.

۴- بحث و نتایج

۴-۱ خواص فیزیکی/شیمیایی غشاهای

تصاویر AFM برای بررسی ساختار فیزیکی سطوح غشاهای اصلاح‌شده و کنترل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تغییرات مورفولوژیکی سطح این غشاهای و زبری آنها در تصاویر میکروسکوپ اتمی در شکل ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است. این تحلیل زبری و صافی سطوح مورد مطالعه را برجسته می‌کند. اندازه‌گیری‌های AFM اثر صاف‌سازی سطح را با متوسط کاهش زبری از ۱۶۰ به ۹۰ nm برای PES، از ۱۶۴ تا ۱۰۹ nm برای PVDF و از ۲۱۰ تا ۱۶۵ nm برای PP را نشان دادند. این کاهش زبری سطح به‌طور مستقیم با به حداقل رساندن مکان‌های اتصال موجود برای رسوبات به افزایش خواص ضد رسوب کمک می‌کند.

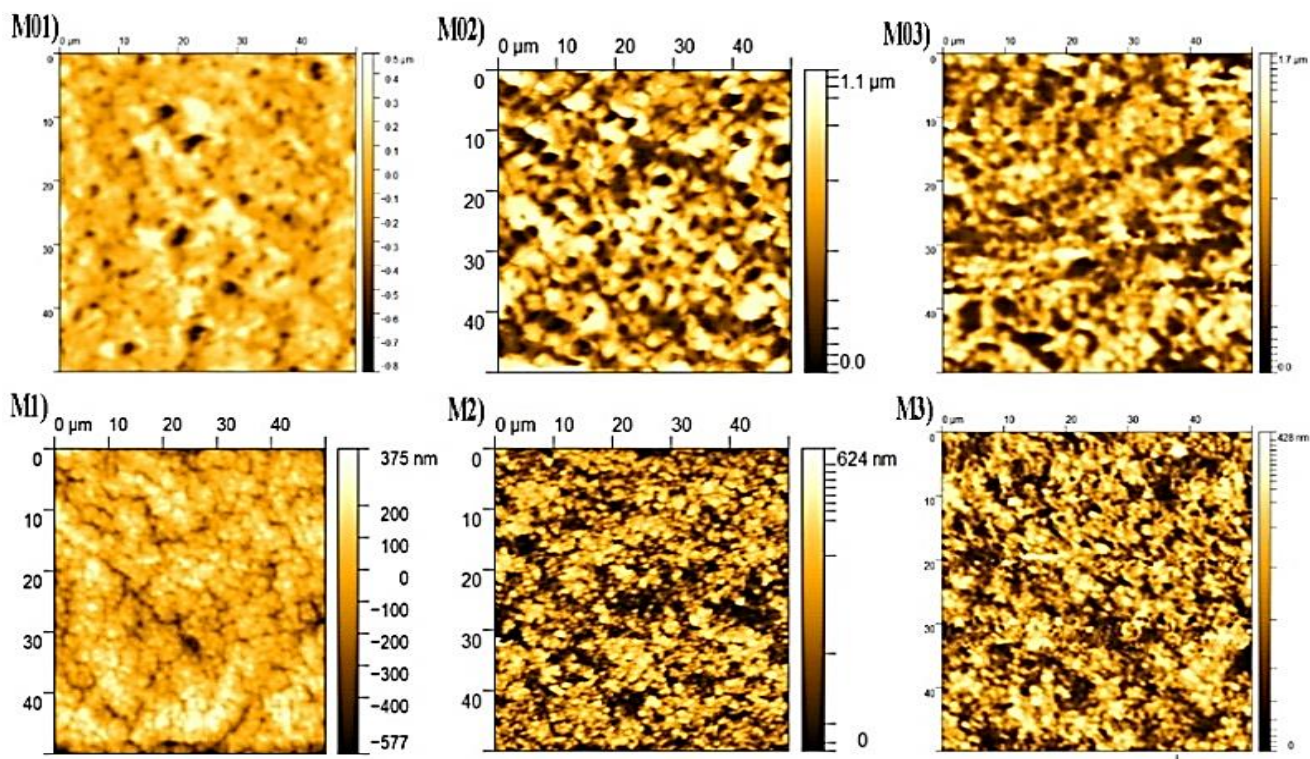
C_p و C_f مقدار غلظت نمک به ترتیب در محلول خوراک (تصفیه‌نشده) و آب عبور کرده از غشاء (تصفیه‌شده) برحسب مولار می‌باشند. برای بررسی عملکرد غشاهای مورد مطالعه، سل فیلتراسیون یک‌انتهاسته، بلافاصله با محلول نمک اشباع پر شد [7]. براساس مقدار آب نفوذی از درون غشاء، شار آب خالص $J_{(w,1)}$ برحسب L/m^2h در فشار ۰/۵۵ MPa به مدت ۱۲۰ دقیقه، با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد. از آب یون‌زدایی شده برای شستشوی غشاء گرفته شده پس از مسدود کردن آن با نمک اشباع استفاده شد. برای تخمین میزان بازیابی آب، شار خالص آب پس از فرآیند آمایش نمک اشباع دوباره اندازه‌گیری شد و $J_{(w,2)}$ نام‌گذاری شد. نرخ بازیابی شار (FRR) از معادله محاسبه شد.

$$FRR\% = \left(\frac{J_{w,2}}{J_{w,1}} \right) * 100 \quad (3)$$

به همین ترتیب، برای اندازه‌گیری میزان مسدودشدگی کامل غشاء معادله ۴ استفاده شد [۳۶ و ۳۳]:

$$Rt(\%) = \left(1 - \frac{J_n}{J_{w,1}} \right) * 100 \quad (4)$$

Rt میزان گرفتگی کلی و J_n شار آب عبوری برحسب L/m^2h می‌باشند. همه اندازه‌گیری‌ها در شرایط یکسان (دما: 25 ± 1 درجه



شکل ۱. تصاویر AFM غشاهای کنترل و غشاهای اصلاح‌شده پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس.

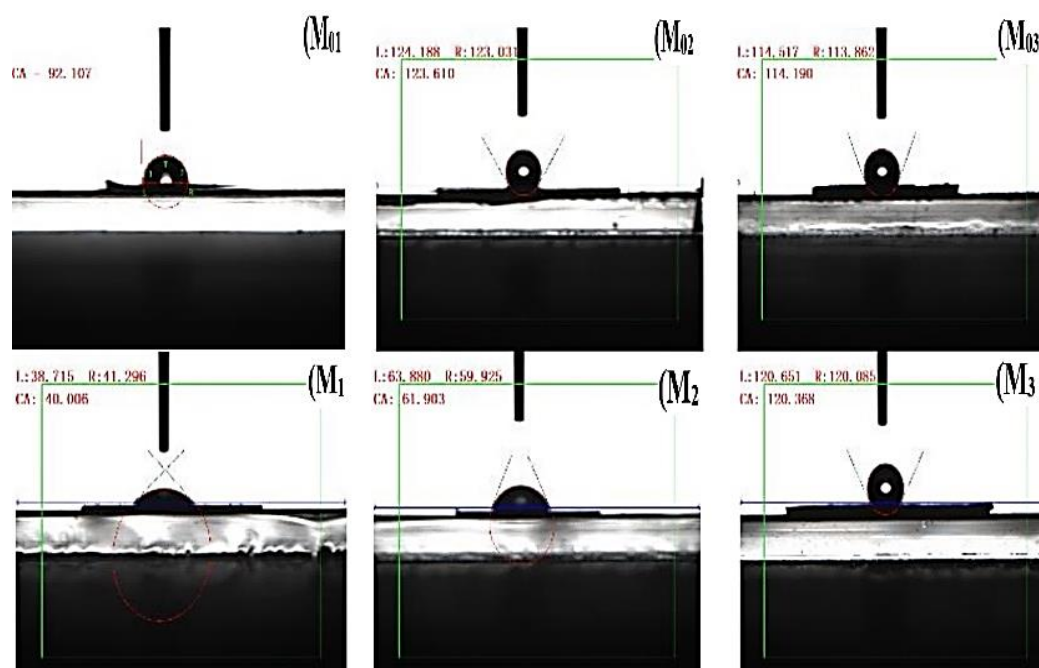
برهمکنش‌های آن‌ها منجر به تشکیل یک لایه متراکم می‌شود. در نتیجه، این فرآیند زبری سطح را کاهش داده و آبدوستی را در نمونه‌های PES و PVDF به‌خوبی بهبود می‌بخشد [۴۴].

۴-۲ تابع جداسازی

هرچه سطح غشاء آبدوست‌تر شود، رسوب آلودگی بر روی آن کاهش یافته و جداسازی رسوب بهبود می‌یابد [۴۵]. همان‌طور که از شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود، غشاهای اصلاح‌شده بهبود عملکرد استثنایی را نشان دادند. به‌طوری‌که شار آب خالص در غشاء بهینه (PES) از ۲۰ به $60 \text{ L/m}^2\text{h}$ افزایش یافت، در حالی که همزمان به افزایش دفع نمک از ۴۰٪ به ۹۸٪ و در غشای PVDF شار آب خالص از ۱۸ به $43 \text{ L/m}^2\text{h}$ افزایش و دفع نمک از ۳۷٪ به ۹۶٪ دست یافتیم. در غشاء PP با وجود آب‌گریزتر شدن، شار آب خالص حفظ (حدود $15 \text{ L/m}^2\text{h}$) و دفع نمک از ۲۵٪ تا ۳۵٪ افزایش یافت.

جدول ۲. متوسط زبری تمام غشاهای	
غشاء	$R_a \text{ (nm)}$
M01	۱۶۰
M1	۹۰
M02	۱۶۴
M2	۱۰۹
M03	۲۱۰
M3	۱۶۵

آبدوستی سطح به جلوگیری از رسوب آلودگی با حفظ یک لایه متراکم آب بر روی سطح غشا کمک می‌کند و مقاومت در برابر مسدودشدگی آن را در طول فیلتر افزایش می‌دهد [۳۶]. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، اندازه‌گیری زاویه تماس، کاهش آن را از 92° به 40° برای غشاء PES، از 124° تا 61° برای غشاء PVDF و از 114° تا 120° برای غشاء PP کنترل در مقایسه با غشای اصلاح‌شده توسط پوشش نانوساختار کربن شبه‌الماس نشان داد. وجود نانوساختارهای کربن شبه‌الماس بر روی سطح غشاء، همراه با

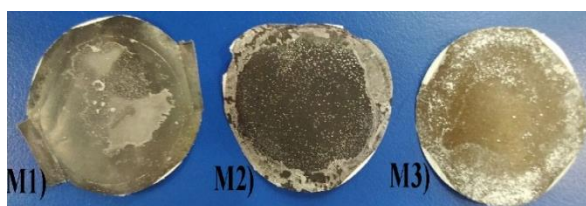
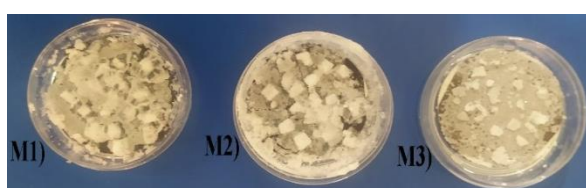


شکل ۲. تصاویر آنالیز زاویه تماس غشاهای کنترل و غشاهای اصلاح‌شده پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس.

را به حداقل می‌رساند و حذف آسان‌تر مواد رسوب‌شده را تسهیل می‌کند [۴۶]. این مکانیسم با یافته‌های اخیر لی و همکاران (۲۰۲۴)، که اثرات الکترواستاتیک مشابهی را در غشاهای اصلاح‌شده خود گزارش کردند، همسو می‌باشد [۴۶].

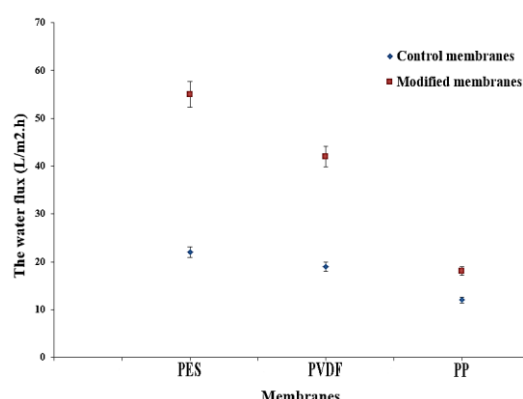
این ترکیب غیرمعمول از افزایش شار و بهبود دفع را می‌توان به شیمی سطح بهینه و ساختار منافذ حاصل از اصلاح پلاسمایی نانوساختارهای کربن شبه‌الماس نسبت داد. این بهبودها ناشی از افزایش آبدوستی و کاهش زبری سطح است که چسبندگی رسوبات

خاصیت تمیزشوندگی برتر، اثربخشی اصلاح سطح را در جلوگیری از رسوبگیری دائمی نشان می‌دهد. نمونه اصلاح شده خواص آبدوست خود را پس از چندین سیکل شستشو حفظ کرد و پایداری خوبی در برابر تعداد چرخه‌های شستشو نشان داد که یک مزیت حیاتی برای کاربردهای عملی است [48]. غشاء PVDF اصلاح شده پس از نمونه‌های PES با آبدوستی کمتر، چسبندگی و رسوب متوسط را نشان داد و بیشترین میزان چسبندگی و رسوب بر روی غشاء PP اصلاح شده دیده شد که با توجه به آگریزتر شدن این غشاء پس از اصلاح، قابل پیش‌بینی بود. افزایش آبدوستی و سطح صاف‌تر غشاهای PES و PVDF اصلاح شده توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس در مقایسه با غشاء کنترل به‌طور قابل‌توجهی خاصیت ضد رسوب غشاء M1 را بهبود بخشید [30].



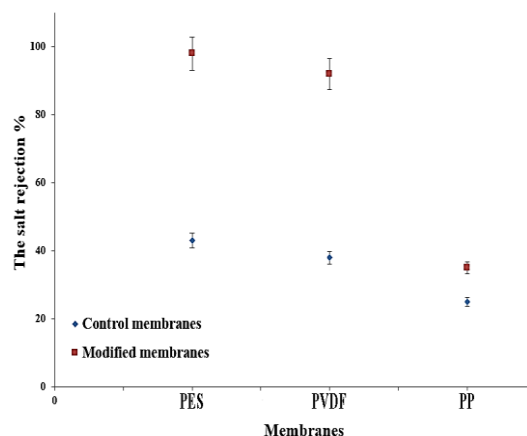
شکل ۵. تصاویر غشاهای اصلاح شده پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس پس از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در محلول نمک اشباع و بررسی میزان مسدودشدگی غشاها.

نتایج این تحقیق در مقایسه با مطالعات اخیر، بهبود قابل‌توجهی را در این زمینه نشان می‌دهند. لی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از ترکیب نانوکامپوزیت‌های ZnO/PHMB روی سطح غشاء PES، دفع نمک ۹۳/۹۶٪ را به دست آوردند [46]، درحالی‌که روش غشاء اصلاح شده در این گزارش، به دفع نمک ۹۸٪ دست یافت. لیو و همکاران با اصلاح سطح غشاء PES توسط TA/Fe_3 مقاومت ۸۵ درصدی را در برابر رسوب نشان داد [47]، درحالی‌که غشاء ما ۹۱ درصد نرخ بازیابی شار را نشان داد. دسیریانی و همکاران با پوشش دادن سطح غشاء PES با استفاده از CS و PGT، کارایی ضد رسوب ۹۹٪ را البته با فرآیند اصلاح پیچیده‌تری گزارش کردند، که با نتایج این تحقیق قابل‌مقایسه است [48]. ژای و همکاران [49] همچنین حفظ نفوذپذیری نمک بالا را با تولید یک غشاء فوق تراوا PES با استفاده از ترکیبی از تکنیک‌های تبلور و انتشار CCD گزارش کردند،



شکل ۳. نمودار تغییرات شار عبوری از غشاهای کنترل و غشاهای اصلاح شده پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس.

این نتایج نسبت به دستاوردهای گزارش اخیر لیو و همکاران، که ۸۵٪ (کاهش) مقاومت رسوب را از طریق رویکردهای مختلف اصلاح سطح به دست آوردند، پیشی می‌گیرد [47]. برای هر دو غشاء، کاهش شار به دلیل ته‌نشین شدن ذرات نمک در سطح غشاها مشاهده شد. شار عبوری از محلول نمک اشباع برای غشاهای اصلاح شده چندین برابر بیشتر از غشاهای کنترل بود. این نتایج نشان‌دهنده‌ی رابطه مستقیم میان نرخ بازیابی شار و سطح آبدوستی غشاهای اصلاح شده می‌باشند، که با یافته‌های اخیر در این زمینه همسویی دارند [49 و 48].



شکل ۴. نمودار تغییرات میزان دفع نمک غشاهای کنترل و غشاهای اصلاح شده پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس.

ارزیابی پایداری غشاء و عملکرد طولانی‌مدت آن نتایج قابل‌توجهی را نشان داد. غشاهای اصلاح شده به مدت ۴۷ ساعت در محلول نمک اشباع غوطه‌ور شده و پس از خشک کردن و بررسی آنها، نشان داده شد که کمترین میزان چسبندگی و رسوب بر روی غشاء PES اصلاح شده توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس باقی مانده است و نمک‌های متصل به سطح به راحتی از آن جدا می‌شوند. این

اگرچه رویکرد این تحقیق، پردازش ساده‌تر و پایداری بهتری را ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای چندین مزیت قابل توجه از رویکرد اصلاح پلاسمایی توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس ما را نشان می‌دهد: ۱. خواص سطحی:

- زاویه تماس آب به‌دست آمده (40°) به‌طور قابل‌توجهی کمتر از سایر روش‌ها است که نشان‌دهنده آبدوستی برتر است.
- زبری سطح (90 nm) در مقایسه با سایر اصلاحات به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است که منجر به بهبود خواص ضد رسوب شده است.
- پوشش نانوساختارهای کربن شبه‌الماس یکنواخت، اصلاح سطح یکنواختی را فراهم می‌کند و از مشکلات تجمع راجع در روش‌های مبتنی بر نانوذرات جلوگیری می‌کند.

۲. عملکرد جداسازی:

- دفع نمک (98%) از تمام مطالعات مقایسه شده پیشی می‌گیرد و راندمان جداسازی استثنایی را نشان می‌دهد.
- شار بالای آب خالص ($60\text{ L/m}^2\text{h}$) نشان می‌دهد که جداسازی بهبود یافته بدون به خطر انداختن نفوذپذیری حاصل می‌شود.
- این پیشرفت‌ها به ترکیب بهینه بار سطحی و اصلاح اندازه منافذ توسط پوشش نانوساختارهای کربن شبه‌الماس نسبت داده می‌شود.

۳. خواص ضد رسوب:

- زبری سطح کمتر همراه با آبدوستی بهبود یافته به کاهش تمایل به رسوب کمک می‌کند.
- پوشش نانوساختارهای کربن شبه‌الماس پایدار، عملکرد ضد رسوب را در شرایط عملیاتی حفظ می‌کند.

۴. مزایای فرآیند:

- روش عملیات پلاسمای در مقایسه با روش‌های اصلاح شیمیایی، کنترل بهتری بر اصلاح سطح ارائه می‌دهد.
- فشار عملیاتی با وجود بهبود عملکرد، استاندارد (0.55 مگاپاسکال) باقی می‌ماند.
- فرآیند اصلاح در مقایسه با آماده‌سازی‌های پیچیده نانوکامپوزیت، ساده‌تر است.

این مقایسه نشان می‌دهد که ما استراتژی اصلاح پلاسمایی نانوساختارهای کربن شبه‌الماس ضمن حفظ سادگی عملیاتی،

بهبودهای جامعی را در تمام پارامترهای کلیدی عملکرد ارائه می‌دهد. ترکیبی از آبدوستی افزایش‌یافته، زبری سطح کاهش‌یافته و راندمان جداسازی بهبودیافته نشان می‌دهد که این رویکرد، راه‌حل مؤثرتری برای توسعه غشاء با عملکرد بالا فراهم می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

از آنجایی که یکی از مهم‌ترین اثرات نامطلوب زیست محیطی آب‌شیرین‌کن‌ها، تخلیه فاضلاب با شوری بالا به محیط دریا است، تصفیه پساب آب‌شیرین‌کن‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی آنها بسیار حائز اهمیت است. فرآیندهای غشایی کاربردهای عملی گسترده‌ای برای نمک‌زدایی آب و حذف نمک دارند، اما رسوب غشاها مشکل اصلی در فرآیند فیلتراسیون است که منجر به تخریب عملکرد می‌شود. در این تحقیق، اصلاح پلاسمایی غشاهای پلیمری (PES, PVDF, PP) توسط نانوساختارهای کربن شبه‌الماس با رویکردی جدید مورد بحث قرار گرفت. مشخصه‌های سطحی هر سه غشاء مورد مطالعه، ترکیب موفقیت‌آمیز نانوساختارهای کربن شبه‌الماس را نشان داد. غشای PES اصلاح‌شده (غشاء بهینه)، پیشرفت‌های چشمگیری در معیارهای کلیدی عملکرد نشان می‌دهند، به‌طوری‌که زاویه تماس آب از 92° به 40° کاهش می‌یابد، شار آب خالص از 20 به $60\text{ L/m}^2\text{h}$ افزایش می‌یابد و دفع نمک از 40% به 98% بهبود می‌یابد. تغییر مورفولوژی سطح از زبری متوسط 160 nm به 90 nm به افزایش خواص ضد رسوب کمک می‌کند. بعد از غشای بهینه، غشای PVDF نیز نتایج قابل‌توجهی نشان داد: به‌طوری‌که زاویه تماس آب از 124° به 61° کاهش می‌یابد، شار آب خالص از 18 به $43\text{ L/m}^2\text{h}$ افزایش می‌یابد و دفع نمک از 37% به 96% بهبود می‌یابد. تغییر مورفولوژی سطح از زبری متوسط 164 nm به 109 nm به افزایش خواص ضد رسوب کمک می‌کند. اصلاح پلاسمایی در غشاء PP شار آب خالص را حفظ کرد، که نشان می‌دهد پوشش کربن شبه‌الماس، نفوذپذیری ذاتی غشاء را به خطر نمی‌اندازد. این امر از طریق بهینه‌سازی دقیق پارامترهای تصفیه پلاسمای حاصل شد که منجر به اصلاح یکنواخت سطح بدون مسدود شدن منافذ شد. هنگام آزمایش با محلول نمک اشباع، غشاء به نرخ بازیابی شار 91% در مقایسه با 40% برای غشاء کنترل دست یافت. سطح صاف‌تر و آبدوست‌تر غشاهای اصلاح‌شده باعث این پیشرفت‌ها شده است. این فناوری برای انواع کاربردهای صنعتی از جمله کارخانه‌های نمک‌زدایی، تصفیه فاضلاب صنعتی و فرآیندهای جداسازی که عملکرد بالا و مقاومت در برابر رسوب بسیار حیاتی است، نویدبخش است. فرآیند اصلاح پلاسمایی از نظر اصلاح سطح یکنواخت و عملکرد ثابت در مقایسه با روش‌های سنتی ادغام

[7] Z. Kiamehr, "Modification of a highly-permeable thin-film-based nanofiltration membrane (PVC) to increase efficiency and separation by Air Plasma Treatment", *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol. 50, no. 2952, 2022.

[8] A. Broeckmann, J. Busch, T. Wintgens, W. Marquardt, "Modeling of Pore Blocking and Cake Layer Formation in Membrane Filtration for Wastewater Treatment." *Desalination*, vol. 189, no. 97, 2006.

[9] I. Soroko, Y. Bhole, A. Livingston, "Environmentally Friendly Route for the Preparation of Solvent Resistant Polyimide Nanofiltration Membranes", *Green Chemistry*, vol. 13, no. 162, 2011.

[10] Y. Zhao, X. Zhu, K. Wee, R. Bai, "Achieving Highly Effective Non-Biofouling Performance for Polypropylene Membranes Modified by Uv-Induced Surface Graft Polymerization of Two Oppositely Charged Monomers", *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 114, no. 2422, 2010.

[11] Y. Chiao, S. Chen, M. Sivakumar, M. Ang, T. Patra, J. Almodovar, R. Wickramasinghe, W. Hung, "Zwitterionic Polymer Brush Grafted on Polyvinylidene Difluoride Membrane Promoting Enhanced Ultrafiltration Performance with Augmented Antifouling Property" *Polymers*, vol. 12, no. 1, 2020.

[12] Z. Kiamehr, S. Mozaffari, "Investigating the wetting behavior of polypropylene hydrophobic membrane using CF₄ plasma treatment", *Modern Physics Letters B*, vol. 37, PP. 2350104, 2023.

[13] T. Nguyen, F. Roddick, L. Fan, "Biofouling of water treatment membranes", *Membranes*, vol. 2, no. 804, 2012.

[14] Y. Koc, A. Mello, G. McHale, M. Newton, P. Roach, N. Shirtcliffe, "Nano-scale Superhydrophobicity: Suppression of Protein Adsorption and Promotion of Flow-induced Detachment", *Lab on a Chip*, vol. 8, no. 528, 2008.

[15] P. Scopelliti, A. Borgonovo, M. Indrieri, L. Giorgetti, G. Bongiorno, R. Carbone, A. Podesta, P. Milani, "The Effect of Surface Nanometre-scale Morphology on Protein Adsorption", *PloS One*, vol. 5, pp. 11862, 2010.

نانوذرات مزایایی را ارائه می دهد. این ویژگی ها غشاهای اصلاح شده را به ویژه برای عملیات صنعتی مداوم که قابلیت اطمینان و راندمان جداسازی بالا ضروری است، ارزشمند می کند. موفقیت معرفی شده در این رویکرد اصلاح پلاسمایی، پایه ای برای توسعه فناوری های غشایی نسل بعدی فراهم می کند. ادغام نانوساختارهای کربن شبه الماس از طریق تصفیه پلاسمایی نشان دهنده یک استراتژی نوآورانه برای افزایش عملکرد غشاء در کاربردهای تصفیه آب است. انجام آنالیزهای SEM/TEM یک اولویت کلیدی برای مطالعات آتی ما خواهد بود تا بتوانیم درک کامل تری از ساختار لایه و ارتباط آن با پارامترهای فرآیند پلاسما و عملکرد بلندمدت غشاء به دست آوریم.

منابع

[1] A. Ahmad, N. C. Lah, S. Ismail, B. Ooi, "Membrane Antifouling Methods and Alternatives: Ultrasound Approach", *Separation and Purification Reviews*, vol. 41, no. 318, 2012.

[2] B. Farokhi, M. Rezaei, Z. Kiamehr and S. Hosseini, "A new approach to provide high water permeable polyethersulfone based nanofiltration membrane by air plasma treatment", *International Journal of Engineering*, vol. 32, no. 354, 2019.

[3] Z. Kiamehr, B. Farokhi, S. Hosseini, "Development of a highly-permeable thin-film-based nanofiltration membrane by using surface treatment with Air-Ar plasma", *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 38, no. 114, 2021.

[4] A. Esfahani, L. Zhai, A. Sadmani, "Removing Heavy Metals from Landfill Leachate Using Electrospun Polyelectrolyte Fiber Mat-Laminated Ultrafiltration Membrane", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 53, 2021.

[5] S. Arefi, A. Khataee, M. Safarpour, V. Vatanpour, "Modification of Polyethersulfone Ultrafiltration Membrane Using Ultrasonicassisted Functionalized MoS₂ for Treatment of Oil Refinery Wastewater", *Separation and Purification Technology*, vol. 238, no. 6495, 2020.

[6] Z. Kiamehr, S. Farahani, B. Farokhi S. Hosseini, "Investigation the Effect of Ar-Air plasma Treatment on Separation Performance of Nanofiltration Membrane: Influence of Time, Power and Composition of Plasma", *petroleum Research*, vol. 31, no. 105, 2021.

minimizing (bio) colloidal fouling," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 206, pp. 116, 2014.

[26] J. Kim, B. Bruggen, "The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: Review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment", *Environ. Pollut.*, vol. 158, pp. 2335, 2010.

[27] L. Ng, A. Mohammad, C. Leo, N. Hilal, "Polymeric membranes incorporated with metal/metal oxide nanoparticles: A comprehensive review", *Desalination*, vol. 308, no. 15, 2013.

[28] R. Damodar, S. You, H. Chou, "Study the self-cleaning, antibacterial and photocatalytic properties of TiO₂ entrapped PVDF membranes", *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, pp. 1321, 2009.

[29] H. Song, J. Shao, Y. He, B. Liu, X. Zhong, "Natural organic matter removal and flux decline with PEG–TiO₂-doped PVDF membranes by integration of ultrafiltration with photocatalysis", *J. Membr. Sci.*, vol. 405, no. 48, 2012.

[30] V. Vatanpour, S. Madaeni, R. Moradian, S. Zinadini, B. Astinchap, "Fabrication and Characterization of Novel Antifouling Nanofiltration Membrane Prepared from Oxidized Multiwalled Carbon Nanotube/Polyethersulfone Nanocomposite", *Journal of Membrane Science*, vol. 375, pp. 284, 2011.

[31] S. Madaeni, S. Zinadini, V. Vatanpour, "A New Approach to Improve Antifouling Property of PvdF Membrane Using in Situ Polymerization of Paa Functionalized TiO₂ Nanoparticles", *Journal of Membrane Science*, vol. 380, pp. 155, 2011.

[32] V. Vatanpour, S. Madaeni, L. Rajabi, S. Zinadini, A. Derakhshan, "Boehmite Nanoparticles as a New Nanofiller for Preparation of Antifouling Mixed Matrix Membranes", *Journal of Membrane Science*, vol. 401, pp. 132, 2012.

[33] S. Zinadini, A. Zinatizadeh, M. Rahimi, V. Vatanpour, H. Zangeneh, "Preparation of a Novel Antifouling Mixed Matrix Pes Membrane by Embedding Graphene Oxide Nanoplates",

[16] Q. Wang, Z. Wang, J. Wang, Z. Wu, "Antifouling behaviours of PVDF/nano-TiO₂ composite membranes revealed by surface energetics and quartz crystal microbalance monitoring," *RSC Adv.*, vol. 4, pp. 43990, 2014.

[17] D. Rana, T. Matsuura, "Surface modifications for antifouling membranes", *Chem. Rev.*, vol. 110, pp. 2448, 2010.

[18] A. Rahimpour, "Photo-Grafting of Hydrophilic Monomers onto the Surface of Nano-Porous Pes Membranes for Improving Surface Properties", *Desalination*, vol. 265, no. 93, 2011.

[19] M. Padaki, A. Isloor, R. Kumar, A. Ismail, T. Matsuura, "Characterization and Desalination Study of Composite Nf Membranes", *Journal of Membrane Science*, vol. 428, no. 489, 2013.

[20] Z. Chong, Y. Koo, "Self-Assembling of NCQDs-TiO₂ Nanocomposite on Poly(Acrylic Acid)- Grafted Polyethersulfone Membrane for Photocatalytic Removal and Membrane Filtration", *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 1901, 2021.

[21] A. Esfahani, L. Zhai, A. Sadmani, "Filtration of Biological Sludge by Immersed Hollow-Fiber Membranes: Influence of Initial Permeability Choice of Operating Conditions", *Desalination*, vol. 146, pp. 427, 2002.

[22] Q. Gao, H. Li, X. Zeng, "Novel Nanoparticles Incorporated Polyvinylidene Fluoride Ultrafiltration 18 Membrane" *Advanced Materials Research*, vol. 746, pp. 390, 2013.

[23] J. Garcia, M. Iborra, M. Alcaina, J. Mendoza L. Pastor, "Development of Fouling-Resistant Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes via Surface UV Photografting with Polyethylene Glycol/Aluminum Oxide Nanoparticles", *Separation and Purification Technology*, vol. 135, pp. 88, 2014.

[24] V. Goel, U. Mandal, "Surface Modification of Polysulfone Ultrafiltration Membrane by In-Situ Ferric Chloride Based Redox Polymerization of Aniline-Surface Characteristics and Flux Analyses", *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 36, pp. 573, 2019.

[25] V. Kochkodan, D. Johnson, N. Hilal, "Polymeric membranes: Surface modification for

- [43] F. Wu, R. Tseng, R. Juang, "A review and experimental verification of using chitosan and its derivatives as adsorbents for selected heavy metals", *Journal of Environmental Management*, vol. 91, pp. 798, 2010.
- [44] V. Vatanpour, S. Madaeni, R. Moradian, S. Zinadini, B. Astinchap, "Novel anti fouling nanofiltration polyethersulfone membrane fabricated from embedding TiO₂ coated multiwalled carbon nanotubes", *Separation and Purification Technology*, vol. 90, no. 69, 2012.
- [45] R. Damodar, S. You, H. Chou, "Study the self-cleaning, antibacterial and photocatalytic properties of TiO₂ entrapped PVDF membranes", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, pp. 1321, 2009.
- [46] M. Li, Z. Zeng, Y. Zhao, C. Hong, Q. Li, "Development of an antimicrobial and antifouling PES membrane with ZnO/Poly(hexamethylene biguanide) nanocomposites incorporation", *Chemical Engineering Journal*, vol. 481, pp. 148744, 2024.
- [47] C. Liu, M. Zhang, F. Gao, P. Hong, Z. Wang, "Ta-Fe in-situ coating PES membrane and its application in oily wastewater treatment: insight into modification and anti-fouling mechanisms", *Separation and Purification Technology*, vol. 346, pp. 127506, 2024.
- [48] R. Desiriani, L. Marbelia, A. Kurniawan, I.G. Wenten, "Preparation of polyethersulfone ultrafiltration membrane coated natural additives toward antifouling and antimicrobial agents for surface water filtration", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, pp. 111797, 2024.
- [49] M. Zhai, Y. Li, J. Wang, F. Liu, "High-performance loose nanofiltration membranes with excellent antifouling properties for dye/salt separation", *Journal of Membrane Science*, vol. 708, pp. 123028, 2024.
- [50] F. Pasandidehpour, S.R. Ghaffarian, T. Mohammadi, "A Review of the Performance of Nanofiltration Membranes Modified with Inorganic, Carbon Nanomaterials and their Combinations", *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, vol. 8, pp. 15, 2023.
- [51] M.E. Batouti, O.M. Ahmed, R. El-Ghazaly, "Review of New Approaches for Fouling *Journal of Membrane Science*, vol. 453, pp. 292, 2014.
- [34] K. Al Mahmud, M. Kalam, H. Masjuki, H. Mobarak, N. Zulkifli, "An updated overview of diamond-like carbon coating in tribology", *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* vol. 40, no. 90, 2015.
- [35] R. Roy, S. Ahmed, J. Yi, M. Moon, K. Lee, Y. Jun, "Improvement of adhesion of DLC coating on nitinol substrate by hybrid ion beam deposition technique", *Vac.* pp. 1179–1183, 2009.
- [36] J. Li, Z. Xu, H. Yang, C. Feng, J. Shi, "Hydrophilic micro porous PES membranes prepared by PES/PEG/DMAc casting solutions", *Journal of applied polymer science*, vol. 107, pp. 4100, 2008.
- [37] L. Fan, C. Luo, X. Li, F. Lu, H. Qiu, M. Sun, "Fabrication of novel magnetic chitosan grafted with graphene oxide to enhance adsorption properties for methyl blue", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 215, pp. 272, 2012.
- [38] P. Qu, H. Tang, Y. Gao, L. Zhang, S. Wang, "Polyethersulfone Composite Membrane Blended with Cellulose Fibrils", *BioResources*, vol. 5, pp. 2323, 2010.
- [39] D. Pavia, G. Lampman, G. Kriz, G. Randall, "Introduction to Organic Laboratory Techniques: A Small-Scale Approach: Cengage Learning", *Second ed.*, Brooks/Cole: Belmont, CA, 2005.
- [40] L. Ge, Z. Zhu, V. Rudolph, "Enhanced Gas Permeability by Fabricating Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes and Polyethersulfone Nanocomposite Membrane", *Separation and Purification Technology*, vol. 78, no. 76, 2011.
- [41] B. Li, W. Zhao, Y. Su, Z. Jiang, X. Dong, W. Liu, "Enhanced Desulfurization Performance and Swelling Resistance of Asymmetric Hydrophilic Pervaporation Membrane Prepared Through Surface Segregation Technique", *Journal of Membrane Science*, vol. 326, pp. 556, 2009.
- [42] J. Jhaveri, C. Patel, Z. Murthy, "Preparation, characterization and application of GO-TiO₂/PVC mixed matrix membranes for improvement in performance", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 52, no. 138, 2017.

[۵۲] ز کیامهر، ب فرخی، م حسینی، ۱۴۰۰، تاثیر پلاسما بر خواص شیمی-فیزیکی غشاء نانوفیلتراسیون مورد استفاده در دستگاههای تصفیه آب دریا، دانشگاه اراک، pp. 1-130.

Mitigation in Membrane Separation Processes in Water Treatment Applications”, *Separations*, vol. 9, no. 1, 2022.



Investigation of the effect of plasma irradiation of diamond-like carbon nanostructures on the separation performance of PES, PP and PVDF based membranes

¹Zeynab Kiamehr, ²Mojtaba Shafiee, ^{2, 3}Babak Shokri, ²Seyed Ali Razavi Rad

^{1*} Department of Physics, Tafresh University, Tafresh, Iran

² Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article details

Received: 2025/03/13
Accepted: 2025/08/21
Published: 2025/09/06

ISSN: 2588-493x
eISSN: 2588-4821

Correspondence email:
z.kiamehr@tafreshu.ac.ir



Abstract

This study presents a novel surface modification strategy for various membranes (PES, PVDF, PP) utilizing diamond-like carbon nanostructures deposited via plasma-enhanced chemical vapor deposition. A systematic review compared the coating modifications of diamond-like carbon nanostructures under optimized plasma conditions (power 40 W, pressure 70 mTorr, irradiation time 30 min). The modified PES membrane (the optimized membrane) demonstrated significant improvements in key performance metrics: its water contact angle decreased from 92° to 40°, its pure water flux increased from 20 to 60 L/m²h, and its salt rejection improved from 40% to 98%. The change in surface morphology, specifically a reduction in average roughness from 160 nm to 90 nm, contributed to enhanced antifouling properties. Following the PES membrane, the PVDF membrane also exhibited remarkable results: its water contact angle decreased from 124° to 61°, its pure water flux increased from 18 to 43 L/m²h, and its salt rejection improved from 37% to 96%. Similarly, a change in surface morphology, with average roughness decreasing from 164 nm to 109 nm, aided in enhancing its antifouling properties. Plasma modification of the PP membrane maintained its pure water flux by rendering it more hydrophobic, indicating that the diamond-like carbon coating did not compromise the membrane's intrinsic permeability. Stability tests in saturated salt solutions revealed easy cleaning properties and maintained hydrophilicity after several wash cycles, demonstrating excellent durability. This work introduces a cost-effective approach for developing high-performance antifouling membranes with potential applications in desalination plants and wastewater treatment facilities. The findings provide valuable insights into the relationship between surface modification, membrane structural properties, and performance.

Keywords: Surface modification, plasma modification, high permeability membrane, diamond-like carbon nanostructures, antifouling, desalination.