

Fabrication of a Mixed Matrix Membrane Containing Cadmium Titanate Nanoparticles and its Application for Treatment of Dye Wastewater

Shahla Hosseinpour, Mahdie Safarpour*, Alireza Amani-Ghadim

Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Azarbaijan Shahid Madani University, P.O. Box: 83714-161, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26-08-2021

Accepted: 02-01-2022

Available online: 11-12-2022

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.6.2

Keywords:

Mixed Matrix Membrane

Ultrafiltration

Polyethersulfone

Cadmium titanate

Wastewater treatment

ABSTRACT

In this research, cadmium titanate nanoparticles ($CdTiO_3$) were first synthesized by a fast and simple hydrothermal method. The phase separation method was used to fabricate mixed matrix polyethersulfone ultrafiltration membranes. It contained different concentrations of $CdTiO_3$. Structural studies through SEM and AFM analysis showed that the modified membranes have differences in morphology, porosity, and surface properties compared to the unmodified membrane due to the addition of $CdTiO_3$ nanoparticles. Mixed matrix membranes showed higher surface hydrophilicity, water flux, and lower fouling than unmodified PES membranes. In the presence of 0.1 wt. % $CdTiO_3$, the water flux reached a maximum of 306 $L/m^2.h$ when it was 204 $L/m^2.h$ in the unmodified membrane. The filtration results of colored wastewater showed that the optimized membrane could separate more than 90 % of Reactive yellow 105 and Reactive blue 21 dyes and 80 % of Reactive red 195 dye.

*Corresponding author: ac.safarpour@azaruniv.ac.ir
safarpour_88@yahoo.com





ساخت غشای زمینه مخلوط حاوی نانوذرات کادمیم تیتانات و کاربرد آن برای تصفیه پساب رنگی

شهلا حسین پور^۱، مهدیه صفر پور^{۲*}، علیرضا امانی قدیم^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۱۶۱-۸۳۷۱۴
- ۲- استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۱۶۱-۸۳۷۱۴
- ۳- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۱۶۱-۸۳۷۱۴

چکیده

در این تحقیق، ابتدا نانوذرات کادمیم تیتانات ($CdTiO_3$) به روش سریع و ساده هیدروترمال سنتز شد. سپس، غشاهای اولترافیلتراسیون زمینه مخلوط پلی اترسولفون حاوی غلظت‌های مختلف $CdTiO_3$ به روش جدایش فازی ساخته شدند. مطالعات ساختاری از طریق آنالیزهای SEM و AFM نشان داد که غشاهای اصلاح شده به دلیل افزودن نانوذرات $CdTiO_3$ در مقایسه با غشای اصلاح نشده، تفاوت‌هایی را در ریخت، تخلخل و خواص سطحی به نمایش می‌گذارند. غشاهای زمینه مخلوط آبدوستی سطح بیشتر، شار آب بالاتر و گرفتگی کمتری را در مقایسه با غشای پلی اترسولفون اصلاح نشده نشان دادند. در حضور $CdTiO_3$ ۱ wt. %، شار آب به بیشینه $3.6 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ رسید در حالی که این عامل در غشای اصلاح نشده $2.4 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$ بود. نتایج صاف کردن پساب رنگی نشان داد که غشای بهینه قادر به جداسازی بیش از ۹۰ درصد مواد رنگزای زرد راکتیو ۱۰۵ و آبی راکتیو ۲۱ و ۸۰ درصد ماده رنگزای قرمز راکتیو ۱۹۵ می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۹/۲۰
شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.6.2

واژه‌های کلیدی:

غشای زمینه مخلوط
اولترافیلتراسیون
پلی اترسولفون
کادمیم تیتانات
تصفیه پساب



۱- مقدمه

آب به دلیل رشد جمعیتی و توسعه صنعتی که بر کیفیت آن تاثیر منفی می‌گذارد، یک منبع اساسی برای زندگی در کره‌ی زمین است. متاسفانه، در بیشتر موارد پساب تولید شده به صورت مستقیم و بدون تصفیه کافی برای از بین بردن یا کاهش آلودگی آن، در دریا و رودخانه‌ها ریخته می‌شود [۱]. در حال حاضر بیش از صد هزار رنگ مصنوعی تجاری در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شود و سالانه بیش از $10^5 \times 7$ تن ماده رنگی در جهان تولید و مصرف می‌شود [۲]. فراوانی رنگ‌های باقیمانده در پساب‌های تخلیه شده از نساجی، چرم‌سازی، رنگرزی، فراوری مواد غذایی و صنایع متعدد در سرتاسر جهان، در حال حاضر تهدیدی جدی برای پایداری محیط‌زیست جهانی است [۳، ۴]. بخش منسوجات به دلیل حجم زیادی از پساب تولیدی که حدود ۲۰ درصد از آلودگی آب صنعتی را تشکیل می‌دهد، یکی از اصلی‌ترین منابع آلودگی آب در نظر گرفته می‌شود [۵]. از طرف دیگر، اغلب رنگ‌های استفاده شده در صنایع نساجی در برابر نور فرابنفش پایدار و مقاوم بوده (به دلیل تابش اشعه خورشید تخریب نمی‌شوند) و همچنین زیست تخریب‌پذیر نیستند [۶، ۷]. تاثیرات این رنگ‌دهنده‌های سمی خطرناک در محیط‌های آبی شامل تمایل آنها برای جلوگیری از فتوسنتز گیاهان آبی با جلوگیری از نفوذ نور است [۳]. همچنین، اکثر این رنگ‌ها به دلیل ساختار پیچیده از جمله آزو و گروه‌های آروماتیک، سرطان‌زا و جهش‌زا بوده و می‌توانند موجب حساسیت پوستی و اختلال عملکرد کلیه‌ها شده یا به سیستم عصبی مرکزی آسیب جدی برسانند [۸، ۵]. تا به امروز، چندین روش بیولوژیکی و فیزیکی شیمیایی برای تصفیه پساب‌های نساجی توسعه یافته است. با این حال بسیاری از فن‌آوری‌های متداول مانند انعقاد / لخته شدن، جذب، ازن‌زنی، فرآیندهای اکسید شدن پیشرفته و هضم بی‌هوازی به دلیل پیچیدگی پساب نساجی قادر به حذف موثر تمام مواد شیمیایی و رنگ نیستند. ادغام فرآیندها با روش‌های مختلف می‌تواند به بهبود عملکرد جداسازی کمک کند، اما باعث افزایش قابل توجه سرمایه و هزینه‌های عملیاتی می‌شود [۹، ۱۰].

فرآیند جداسازی غشایی به عنوان یک فناوری مهم در تصفیه پساب رنگی در نظر گرفته شده است [۱۱]. این فناوری به دلیل مصرف انرژی کم، بازده بالا، کاربرد آسان، مقیاس‌پذیری صنعتی، پایداری شیمیایی طولانی مدت و مقاومت مکانیکی بالا به عنوان روش غالب و کارآمد در نظر گرفته می‌شود [۱۲-۱۴]. استفاده از مواد پلیمری برای ساخت غشاهای صنعتی، این فناوری را به طیف وسیعی از کاربردها از جمله تبادل یونی، تصفیه پساب و نمک‌زدایی ارتقا داده است. مطالعات اخیر به روشنی نشان می‌دهد که پلیمرها به دلیل سهولت ساخت و خصوصیات قابل توجه، مواد اولیه مناسب‌تری برای ساخت غشاهای صنعتی هستند. این پلیمرها شامل پلی‌سولفون،

پلی‌اتر سولفون پلی‌وینیلیدین فلوراید و استات سلولز هستند [۱۵]. فرآیندهای غشایی تحت فشار یعنی میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس به طور گسترده در تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند. انتخاب فرآیند غشایی مناسب به طور عمده به عوامل مختلفی مانند گونه‌های هدف، مقدار پساب و شرایط عملیاتی بستگی دارد [۵]. اولترافیلتراسیون، یک روش جداسازی بین میکروفیلتراسیون و نانو فیلتراسیون است که در زمینه تصفیه پساب رنگی مورد توجه قرار گرفته است [۱۶]. از آنجا که غشاهای میکروفیلتراسیون با اندازه منافذ بزرگ در محدوده ۰.۱-۱۰ میکرومتر قادر به حذف مولکول‌های رنگ با وزن مولکولی از چند صد تا بیش از هزار دالتون نیستند، میکروفیلتراسیون عملکرد محدودی در این زمینه دارد؛ در حالی که نانوفیلتراسیون به طور موثر اکثر رنگ‌ها را حذف می‌کند اما نیاز به انرژی زیاد داشته و با مشکلات جدی گرفتگی غشا مواجه است [۱۷، ۱۸]. اولترافیلتراسیون می‌تواند مزایای میکروفیلتراسیون و نانوفیلتراسیون را با هم ترکیب کند تا با مصرف انرژی بسیار کم بازده مطلوب داشته باشد و از این رو برای جداسازی رنگ‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹، ۱۷].

طی سه دهه گذشته نانومواد با افزایش فرآیندهای از توجه تحقیقاتی روبرو شده‌اند. این امر به دلیل خاصیت منحصر به فرد وابسته به اندازه نانومواد است که به طور عمده به عنوان یک حالت جداگانه و میانی ماده بین اتم‌های منفرد و مواد فله در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. ادغام فناوری نانو و فناوری غشا منجر به پیشرفت‌های بی‌شماری در طراحی غشاها شده است. این امر باعث کنترل ساختار منافذ غشاها شده و از این رو آب دوستی را بهبود می‌بخشد [۲۱]. غشاهای پلیمری / نانوذرات معدنی رویکرد جالبی را برای بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و همچنین جداسازی غشاهای پلیمری ارائه می‌دهند، زیرا آنها دارای ویژگی‌های غشاهای آلی و معدنی مانند نفوذپذیری خوب، انتخاب‌پذیری، مقاومت مکانیکی و پایداری حرارتی هستند [۲۰]. در دهه‌های اخیر ترکیب مواد معدنی به دلیل عملکردهای پایدار و شرایط آسان تهیه غشا، مورد توجه تحقیقاتی فراوانی قرار گرفته است. انتظار می‌رود ترکیب نانو ذرات در ماتریس پلیمری غشا باعث افزایش عملکرد غشای هیبریدی از نظر مقاومت در برابر گرفتگی و همچنین خاصیت ضد باکتریایی شود. نانوذرات به طور گسترده‌ای برای کاهش رفتار گرفتگی غشاهای پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برخی از نانوذرات برای اصلاح غشاهای پلیمری مانند آلومینا (Al_2O_3)، اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید سیلیکون (SiO_2)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید آهن (Fe_3O_4) و اکسید روی (ZnO) استفاده شده است. در میان این نانوذرات، TiO_2 ، ZnO و MgO به دلیل خاصیت ضدگرفتگی آن در سال‌های اخیر عملکرد بسیار خوبی را نشان داده‌اند. علاوه بر این،

گرم سدیم هیدروکسید به محلول اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه به طور مداوم هم زده شد. در ادامه محلول به یک اتوکلاو منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد در آن قرار داده شد. سرانجام سوسپانسیون سفید رنگ حاصل با سانتریفوژ جدا شده و تا رسیدن pH آن به ۷ با آب / اتانل (۱:۱) شستشو داده شده و در پایان در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک شد.

۲-۳- ساخت غشاهای اولترافیلتراسیون به روش وارونگی فاز
برای ساخت غشاهای به روش وارونگی فاز ابتدا مقدار مشخصی از پلیمر حفره‌زای پلی وینیل پیرولیدون به حلال دی‌متیل استامید اضافه شده و بر روی هم‌زن قرار داده شد تا حل شود. سپس مقدار مشخصی از پلیمر پلی‌اتر سولفون (۱۸ درصد وزنی) به محلول اضافه شده و به مدت ۲۴ ساعت برای انحلال کامل بر روی هم‌زن قرار داده شد. بعد از حل شدن کامل پلیمرها در حلال و به دست آمدن یک محلول یکنواخت و همگن، محلول حاصل به مدت حداقل ۱۲ ساعت در دمای محیط به حالت ساکن یا به مدت ۴-۵ ساعت در آن در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا گاززدایی برای حذف حباب‌های هوا از محلول انجام شود. بعد از گاززدایی محلول، فیلم‌کشی بر روی بستر شیشه‌ای کاملاً تمیز و خشک با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر از محلول پلیمری با سرعت ثابت انجام شده و بلافاصله در حمام انعقاد (حمام آب) غوطه‌ور شد. بعد از گذشت ۱ ساعت غشاهای به درون ظرف دیگری که حاوی آب مقطر بود انتقال داده شده و تا زمان استفاده در آب مقطر نگهداری شدند.

برای ساخت غشاهای حاوی نانوذرات (اصلاح شده)، ابتدا مقدار مشخصی از نانوذرات (طبق جدول ۱) به حلال دی‌متیل استامید اضافه شده و به مدت ۹۰ دقیقه در حمام فراصوت قرار گرفت تا نانوذرات به صورت همگن در حلال پخش شوند. سایر مراحل همانند مراحل ذکر شده برای ساخت غشاهای بدون نانوذرات انجام گرفت.

۲-۴- شناسایی نانوذرات و غشاهای ساخته شده
از دستگاه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) مدل D8-Advance، شرکت MER آلمان برای شناسایی ساختار کریستالی نانوذرات CdTiO_3 و از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل MIRA- Tescan، VEGA- III جمهوری چک برای بررسی ریخت‌شناسی سطح و مقطع عرضی غشاهای ساخته شده. برای بررسی ریخت‌شناسی مقطع عرضی غشا، قطعه‌ای از غشا به مدت ۲۰-۳۰ ثانیه در نیتروژن مایع غوطه‌ور شده و شکسته شد تا از آسیب دیدگی و تغییر ریخت‌شناسی سطح مقطع غشاهای جلوگیری شود. از طیف‌سنجی پراش انرژی ایکس (EDX) برای بررسی چگونگی توزیع نانوذرات در بستر پلیمری بهره گرفته شد. از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) (Nanosurf Mobile S) سوئیس، برای تجزیه و تحلیل زبری سطح غشاهای ساخته شده استفاده شد. آب

ترکیب نانوذرات ترکیبی در غشاهای پلیمری می‌تواند به طور قابل توجهی خصوصیات فیزیکی مانند نفوذپذیری آب، پایداری شیمیایی و همچنین خاصیت ضد باکتریایی را بهبود بخشیده و مزایای خاصی را با توجه به مقاومت حرارتی و شیمیایی، عملکرد جداسازی و کاهش گرفتگی فراهم کند [۲۲]. محققان برای بهبود ساختار مواد غشایی، نفوذپذیری و مقاومت در برابر گرفتگی و همچنین کیفیت نفوذ، غشایی با نانوذرات اکسید فلز یا نانولوله‌های کربنی ساخته‌اند. به دلیل خاصیت کاتالیزوری برخی از نانوذرات اکسید فلز (عمدتاً TiO_2)، ترکیب اکسید شدن شیمیایی با غشاهای مبتنی بر نانوذرات می‌تواند گرفتگی غشا را کاهش دهد. کیفیت نفوذ نیز باید به دلیل تجزیه ترکیبات آلی در سطح غشای کاتالیزوری بهبود یابد. غیرفعال‌سازی باکتری‌ها و ویروس‌ها با نانومواد مبتنی بر کربن نیز اثبات شده است [۲۳]. همچنین، برخی از نتایج نشان داده است که افزودن بیش از حد مواد افزودنی معدنی ممکن است بر ریخت و کشش غشاهای تأثیر منفی بگذارد. برای غلبه بر این معایب، جستجو و شناسایی موادی که نه تنها آب‌دوستی غشا را افزایش می‌دهند بلکه مقاومت آن را نیز بهبود می‌بخشند، بیشتر شده است. نانوذرات کادمیم تیتانات از اکسیدهای فلزی مستعد برای اصلاح عملکرد غشاهای پلیمری محسوب می‌شود که بر اساس جستجوی صورت گرفته تا کنون تحقیقی در این زمینه منتشر نشده است. لذا، در کار پژوهشی حاضر امکان استفاده از نانوذرات کادمیم تیتانات برای بهبود خواص فیلتراسیون غشاهای پلی‌اتر سولفون استفاده خواهد شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

از تیتانیم ایزوپروکساید، محصول شرکت سیگما آلدردیج استفاده شد. کادمیم نیترات ۴ آب و هیدروکسید سدیم به ترتیب از شرکت‌های تیتراکم و دکتر مجلی ایران تهیه شد. پلیمرهای پلی‌اتر سولفون و پلی وینیل پیرولیدون به ترتیب از شرکت‌های اولتراسون آلمان و رهاورد تامینایران خریداری شد. حلال دی‌متیل استامید و اتیلن گلیکول محصول شرکت مرک و حلال اتانل محصول شرکت نگین فام طب ایران بود. پروتئین آب پنیاز شرکت اوپتیموم نوتریشن ایرلند فراهم شده و برای بررسی عملکرد گرفتگی غشاهای استفاده شد. در تمامی مراحل نیز از آب مقطر استفاده شد.

۲-۲- سنتز نانوذرات کادمیم تیتانات

نانوذرات کادمیم تیتانات به روش هیدروترمال سنتز شد. ابتدا ۳ میلی‌لیتر پیش ماده تیتانیم ایزوپروکساید به ۲۰ میلی‌لیتر اتیلن گلیکول اضافه شد. سپس ۳٫۸۵ گرم کادمیم نیترات ۴ آب و ۴٫۹۹

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

$J_{w,1}$ فلاکس آب مقطر اولیه، $J_{w,2}$ فلاکس آب مقطر ثانویه است.

مطالعات جداسازی مواد رنگزا برای بررسی عملکرد غشاهای اولترافیلتراسیون انجام شد. رنگ‌های زرد راکتیو ۱۰۵، آبی راکتیو ۲۱ و ماده رنگزای قرمز راکتیو ۱۹۵ به عنوان نمونه برای جداسازی استفاده شد. تست محلول رنگ با غلظت 500 mg/l در فشار عملیاتی ۳ بار انجام شد. شار عبوری از غشا در فواصل زمانی مشخص جمع‌آوری و بعد از تعیین غلظت ماده رنگزا در تراوش یافته و خوراک، درصد پس‌زنی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (4)$$

C_p و C_f به ترتیب غلظت ماده رنگزا (g/l) در جریان‌های عبوری و خوراک هستند که با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis مدل (UV/VIS2100S) اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی نانوذرات سنتز شده

شکل ۱ ساختار کریستالی نانوذرات $CdTiO_3$ سنتز شده با الگوی XRD را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش مشاهده شده در 2θ مربوط به سطوح بازتابش (003) ، (101) ، (012) ، (104) ، (110) ، (015) ، (113) ، (021) ، (024) ، (116) ، (018) و (214) می‌باشند (شماره کارت JCPDS، Card No: 29-277) که تایید کننده سنتز صحیح نانوذرات $CdTiO_3$ است. قله‌های پراش نانوذرات $CdTiO_3$ شدید بوده و نشانگر تبلور بالای نانوذرات است [۲۵، ۲۴]. شکل ۱ b تصویر SEM نانوذرات $CdTiO_3$ است که نشان‌دهنده صفحات $CdTiO_3$ که شبیه سکه بوده و دارای ابعاد نانومتری هستند. شکل ۱ c نیز تصویر TEM نانوذرات می‌باشد که نشان‌دهنده ریخت شش ضلعی برای نانوذرات $CdTiO_3$ مشابه مقالات گزارش شده می‌باشد [۲۵].

۳-۲- شناسایی غشاهای ساخته شده

شکل ۲ تصاویر SEM سطح غشاهای PES اصلاح نشده و اصلاح شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، غشای اصلاح نشده و نیز غشاهای اصلاح شده حاوی مقادیر متفاوت از نانوذره همگی دارای سطح صاف و یکنواخت بوده و مواد افزودنی ($CdTiO_3$) به صورت جرم یا توده در سطح دیده نمی‌شود. بنابراین نانوذرات به خوبی در زمینه پلیمر پراکنده شده و تجمع در بستر پلیمر مشاهده نمی‌شود. همچنین هیچ نقص ساختاری شامل سوراخ یا ترک خوردگی در سطح غشاها دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده برهم‌کنش مناسب نانوذرات با ماتریس پلیمر و ثبات لازم غشاهای حاصل می‌باشد [۲۶].

دوستی سطح غشاهای ساخته شده با اندازه‌گیری زاویه تماس آب بررسی شد. برای این منظور، قطره آب با حجم ثابت بر روی غشا انداخته شده و بلافاصله تصویربرداری از سطح انجام گرفت. زاویه تشکیل شده بین سطح غشا و قطره آب به کمک نرم‌افزار دیجی مایز محاسبه شد. برای کاهش خطای اندازه‌گیری، میانگین زاویه تماس اندازه‌گیری شده از پنج محل مختلف بر روی سطح هر نمونه غشایی گزارش شده است. میزان تخلخل کلی غشاها با اندازه‌گیری ظرفیت جذب آب برای نمونه‌های غشایی محاسبه شد. قطعاتی در سه اندازه متفاوت از هر نمونه غشایی برش داده شده و وزن خیس آنها پس از قرارگیری به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر اندازه‌گیری شد (w_1). نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای 60°C درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس وزن خشک هر نمونه توزین شد (w_2). میزان تخلخل کلی (درصد) طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\varepsilon = \frac{w_1 - w_2}{A \times l \times d_w} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، w_2 وزن غشای خشک (g)، w_1 وزن غشای تر یا خیس (g)، A مساحت سطح غشا (m^2)، l ضخامت غشا (m) و d_w چگالی آب (0.998 g/cm^3) می‌باشد.

۵-۲- آزمون‌های فیلتراسیون غشایی

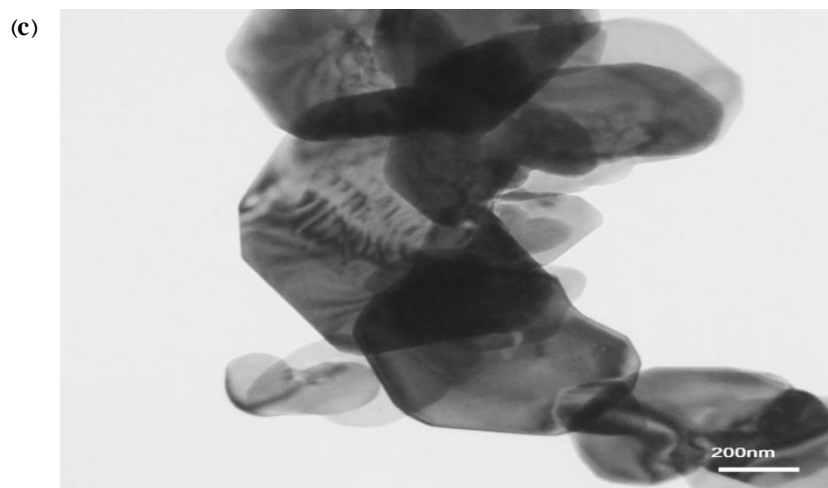
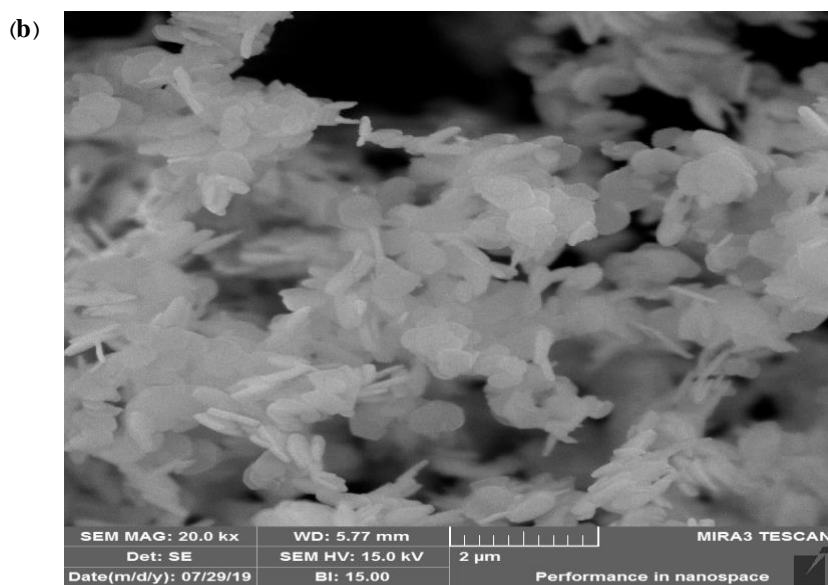
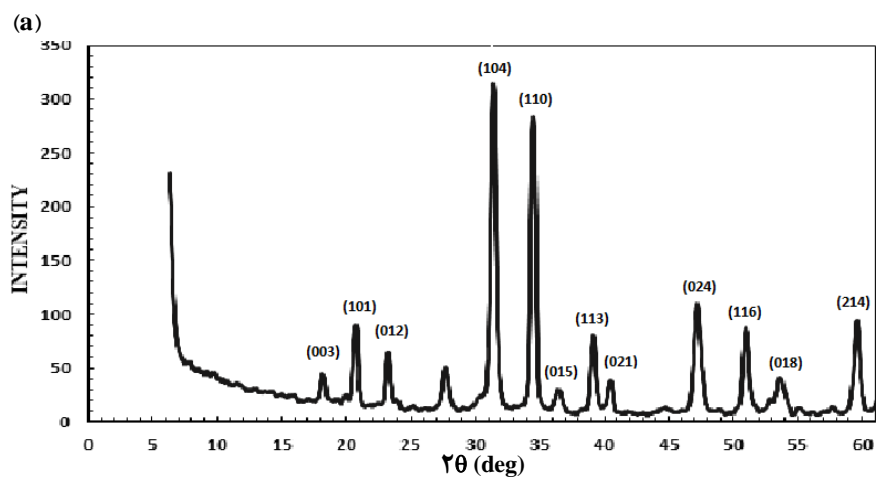
به منظور بررسی تراوایی و میزان گرفتگی غشاها و نیز جداسازی مواد رنگزا، از یک سیستم ته‌بسته^۱ متصل به کمپرسور هوا به عنوان منبع فشار برای انجام آزمون‌های فیلتراسیون غشایی استفاده شد. سل غشایی به کار رفته در این سیستم دارای قطر ۵ سانتی‌متر و ظرفیت ۲۰۰ میلی‌لیتر بوده است. قبل از اندازه‌گیری شار آب، تمام غشاها با فشار ۴ بار برای حدود ۲۰ دقیقه فشرده‌سازی شدند. شار آب خالص عبوری برای هر نمونه غشایی در فشار عملیاتی ۳ بار با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

در این رابطه، ΔV حجم تراوش یافته از غشا (L)، A مساحت سطح موثر غشا (m^2) و Δt زمان اندازه‌گیری فلاکس (h) است.

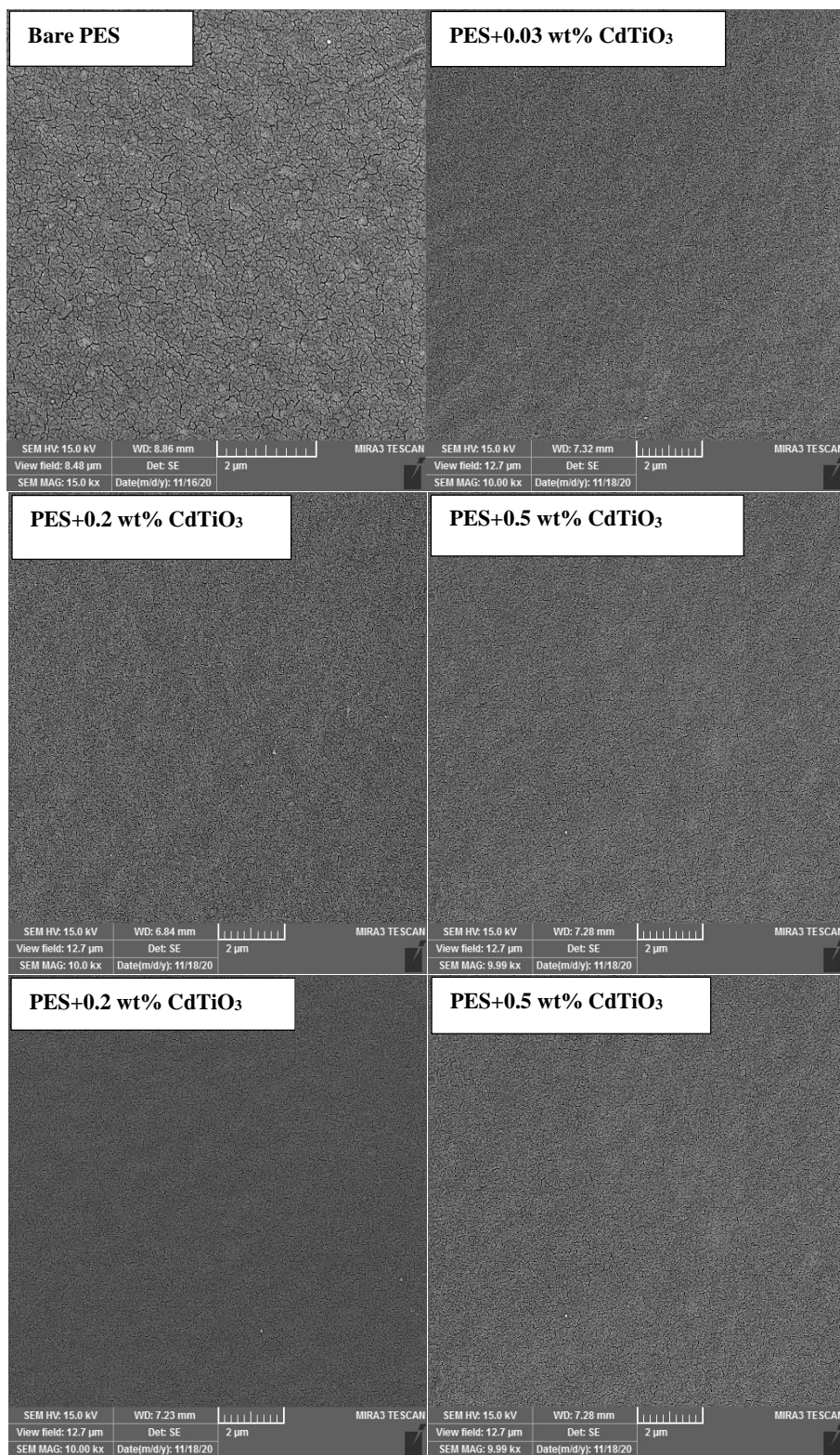
برای بررسی خاصیت گرفتگی غشا از نسبت بازیابی فلاکس (FRR) استفاده شد این مشخصه در واقع مقایسه بین فلاکس آب مقطر قبل و بعد از تست پروتئین آب پنیر می‌باشد که از محلول 500 ppm (5 g/l) به عنوان محلول نمونه استفاده شد (رابطه ۳).

1- Dead-end



شکل ۱: تصاویر نانوذرات CdTiO_3 سنتز شده (a) الگوی XRD، (b) تصویر SEM، و (c) تصویر TEM.

Figure 1: Images of synthesized CdTiO_3 nanoparticles (a) XRD, (b) SEM, (c) TEM.



شکل ۲: تصاویر SEM از سطح غشاهای اصلاح شده و اصلاح نشده ساخته شده به روش وارونگی فاز.

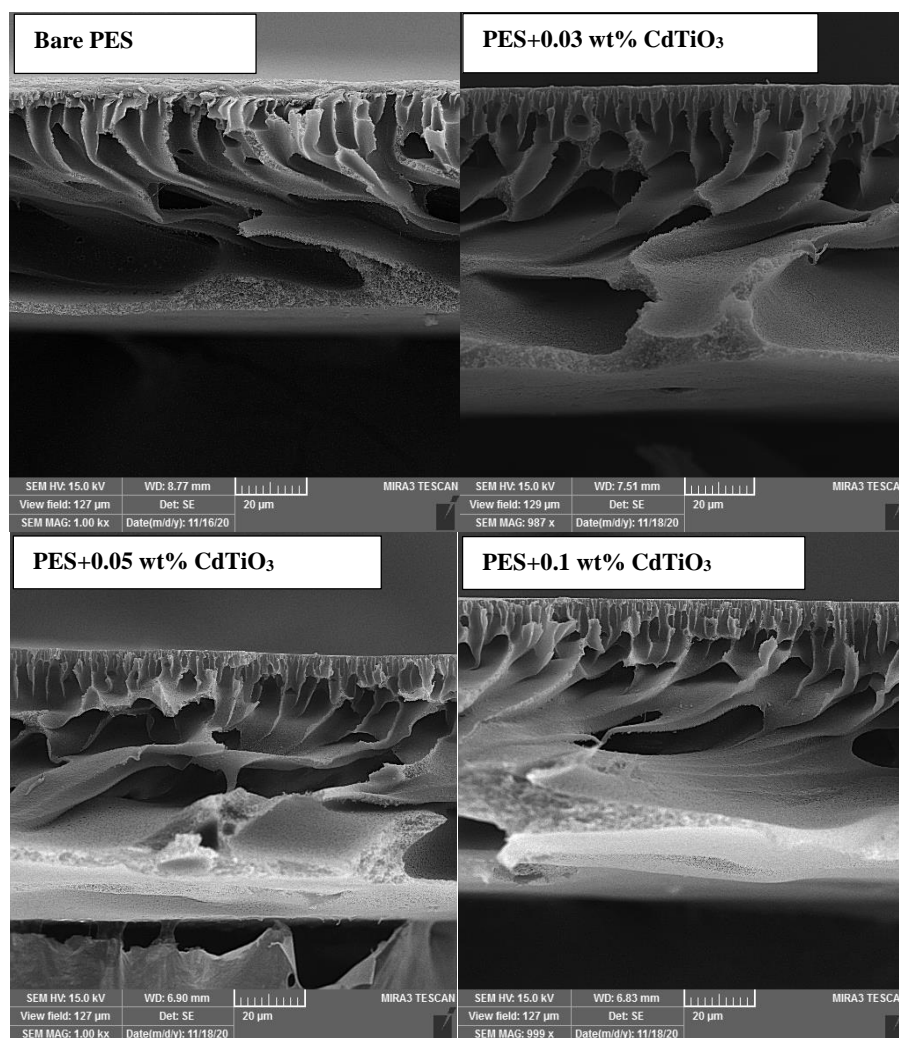
Figure 2: SEM images of the surface of modified and unmodified membranes fabricated by phase inversion method.

مانع تشکیل حفرات بزرگ تر شود.

برای اثبات حضور و بررسی نحوه پخش CdTiO_3 در بستر غشای پلیمری از آنالیز EDX بر روی نمونه حاوی 0.1 wt\% CdTiO_3 استفاده شد (شکل ۴). در نقشه عنصری مربوطه نقاط رنگی نشان دهنده عناصر Cd و Ti و نماینده نانوذرات CdTiO_3 می باشند. پراکندگی یکنواخت CdTiO_3 بر روی سطح غشاهای اصلاح شده، عدم وجود تجمع CdTiO_3 در ساختار این غشاها را ثابت می کند. مهاجرت خود به خودی نانوذرات آبدوست CdTiO_3 به سطح لایه آب-پلیمری می تواند به عنوان توجیهی قوی برای ماهیت آبدوست غشاهای مخلوط $\text{CdTiO}_3 / \text{PES}$ در نظر گرفته شود. چگالی نسبتاً بالاتر نقاط قرمز و سبز به سمت سطح بالایی غشا، مهاجرت جزئی نانوذرات آبدوست را نشان می دهد.

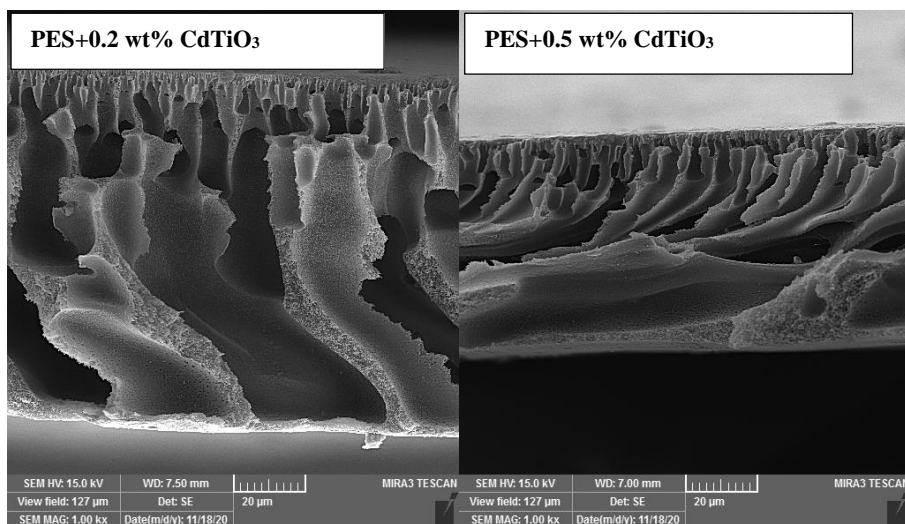
1- Finger-like

تصاویر SEM مربوط به برش عرضی غشاهای PES و غشاهای PES/CdTiO_3 در شکل ۳ نمایش داده شده است. مشخصه تمام غشاها ساختار متخلخل نامتقارن از نوع انگشت مانند^۱ شامل یک لایه پوستی متراکم به عنوان لایه انتخابگر و یک لایه زیرین ضخیم تر با حفرات درشت تر می باشد. وجود ساختار نامتقارن در تصاویر SEM حاکی از آن است که سازوکار تشکیل غشا در فرآیند وارونگی فاز با اضافه کردن نانوذرات CdTiO_3 به محلول پلیمری تغییر نمی کند. به نظر می رسد در غشاهای مخلوط PES/CdTiO_3 منافذ انگشت مانند کمی گسترده تر از غشای PES اصلاح نشده بودند. ماهیت آبدوست غشاهای مخلوط باعث افزایش سرعت انتقال جرم بین حلال و ضدحلال در طی فرآیند جداسازی فاز شده و متعاقباً تشکیل کانالهایی با حفرات بزرگ تر می شود [۲۶، ۱۵]. از سوی دیگر، افزایش گرانیوی محلول ریخته گری به دلیل افزودن CdTiO_3 بیشتر می تواند منجر به تبادل تاخیری حلال و غیر حلال شود که در نتیجه



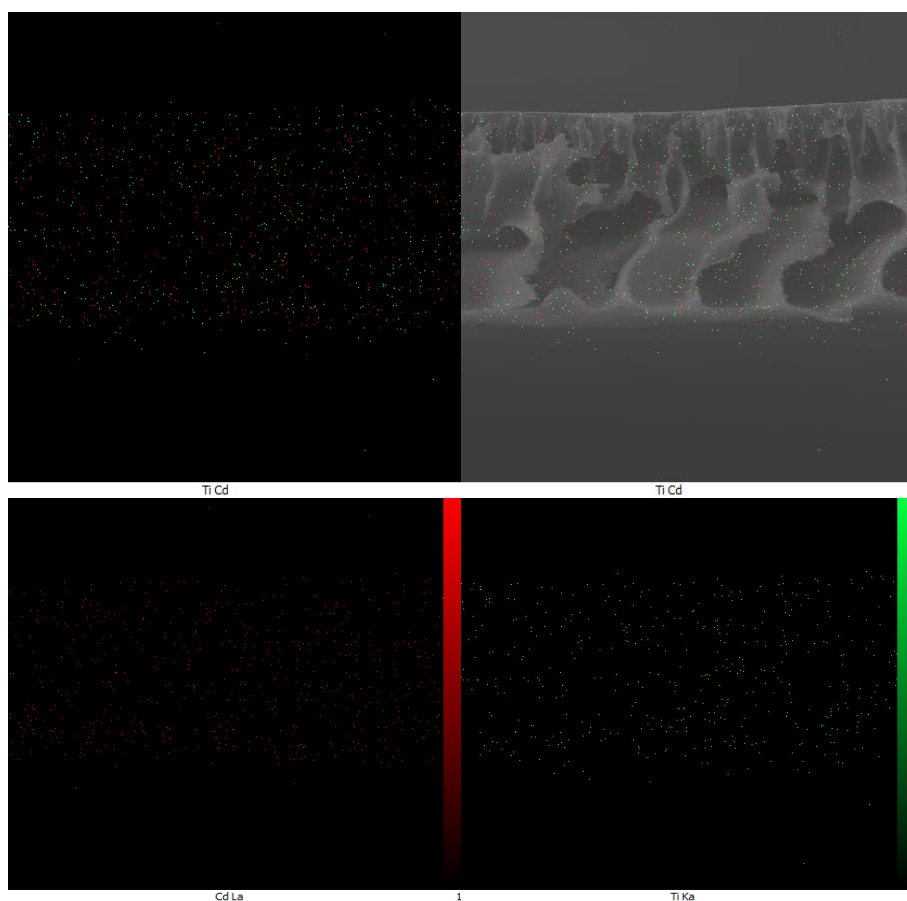
شکل ۳: تصاویر SEM برش عرضی (سطح مقطع) غشاهای اصلاح شده و اصلاح نشده ساخته شده به روش وارونگی فاز.

Figure 3: Cross-sectional SEM images of modified and unmodified membranes fabricated by phase inversion method.



شکل ۳: ادامه

Figure 3: Continue.

شکل ۴: نقشه EDX در غشای PES اصلاح شده بهینه ۰/۱ wt% CdTiO₃ که نقاط قرمز نشان دهنده عنصر Cd و سبز نشان دهنده عناصر Ti می باشد.Figure 4: EDX map in the optimally modified PES membrane with 0.1 wt% CdTiO₃, where the red points represent Cd elements and the green ones represent Ti elements.

۳-۳- آب دوستی، تخلخل و شار آب خالص

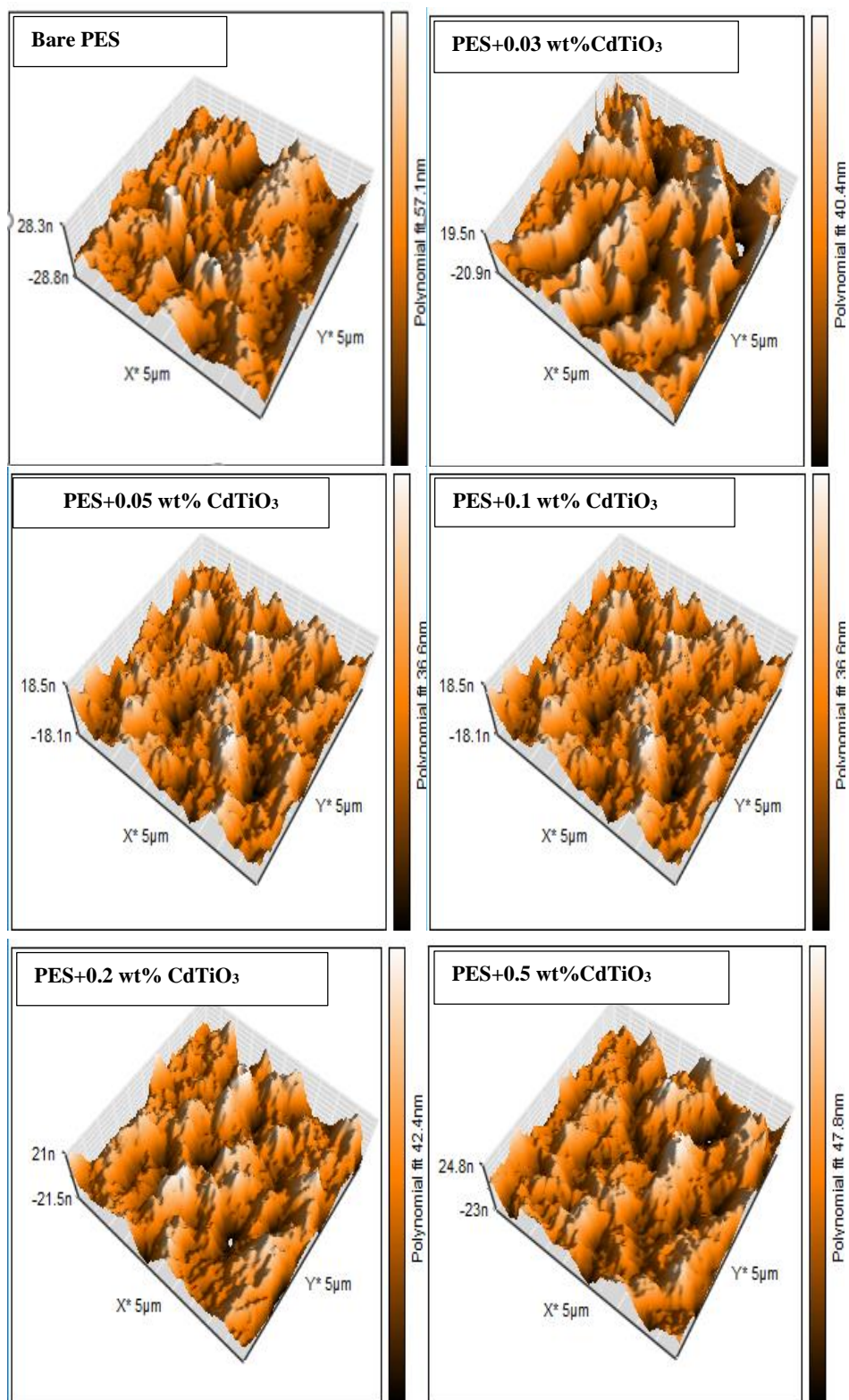
شکل ۶ نشان دهنده شار آب خالص غشاهای ساخته شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقدار شار آب خالص غشاهای اصلاح شده برای اکثر درصد نانوذرات بالاتر از غشای اصلاح نشده است. شار آب خالص برای غشای PES از $2.04 \text{ l/m}^2\text{h}$ به ترتیب به 2.47 ، 2.42 ، 3.06 و 2.43 برای نمونه های M_1 ، M_2 ، M_4 و M_5 افزایش یافته است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار شار آب خالص متعلق به غشای اصلاح شده با 0.1 wt\% CdTiO_3 است که به عنوان درصد بهینه تعیین شد. گروه های آب دوست هیدروکسیل CdTiO_3 می توانند دلیل اصلی بهبود عملکرد غشای اصلاح شده نسبت به غشای PES اصلاح نشده باشند. با این وجود، کاهش اندک شار آب در مقادیر بالاتر نانوذرات CdTiO_3 مشاهده شد که می تواند به دلیل تمایل مواد معدنی به انباشته شدن باشد. انباشتگی نانوذرات می تواند منجر به انسداد غشا و کاهش نفوذ پذیری آب شود. همچنین، افزایش ویسکوزیته محلول در حضور غلظت های بالاتر نانوذرات باعث کاهش تخلخل کلی غشا شده و کاهش نفوذ پذیری غشا را در پی دارد. افزایش آب دوستی غشاهای اصلاح شده با اندازه گیری زاویه تماس سطح غشاها نیز تأیید شد.

تصاویر سه بعدی AFM غشاهای ساخته شده در شکل ۵ ارائه شده است. در این تصاویر نواحی روشن نقاط مرتفع سطح غشا و نواحی تیره دره های (حفرات) سطح غشاها را نشان می دهند. برای بررسی دقیق تر زبری سطح غشاها از پارامتر زبری حاصل از تصاویر AFM شامل R_a (زبری متوسط) استفاده شد. این پارامتر با استفاده از نرم افزار Nanosurf Mobile S و تصاویر AFM دو بعدی استخراج شده و در جدول ۱ گزارش شده است. مطابق جدول ۱، غشای اصلاح نشده دارای زبری سطح بالاتری نسبت به غشای اصلاح شده بهینه است. به عبارت دیگر، با افزودن CdTiO_3 در تمام غلظت های بررسی شده کاهش پارامترهای زبری مشاهده شد. کمترین مقدار زبری را می توان در غشای حاوی 0.05 درصد وزنی از نانوذره مشاهده کرد. پس از غلظت ذکر شده، با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات، افزایش جزئی در زبری و تعداد دره ها مشاهده شد. تجمع نانوذرات آب دوست CdTiO_3 بر روی سطح غشا در غلظت بالای نانوذرات می تواند دلیل اصلی این افزایش زبری باشد. خصوصیات زبری سطح می تواند به شدت بر جذب یا دفع مواد روی سطح غشا تاثیر گذاشته و گرفتگی را کنترل کند. براین اساس، با کاهش زبری سطح غشای آب دوست، امکان به دام افتادن و چسبندگی آلاینده ها در دره ها و قله ها محدود شده و با کاهش تجمع آلاینده ها در سطح غشا تمایل به گرفتگی آن کاهش می یابد. به عبارت دیگر، غشایی با سطح صاف تر، توانایی ضد گرفتگی بالاتری دارد.

جدول ۱: ترکیب درصد و نتایج زبری و تخلخل کلی غشاهای اصلاح شده و اصلاح نشده.

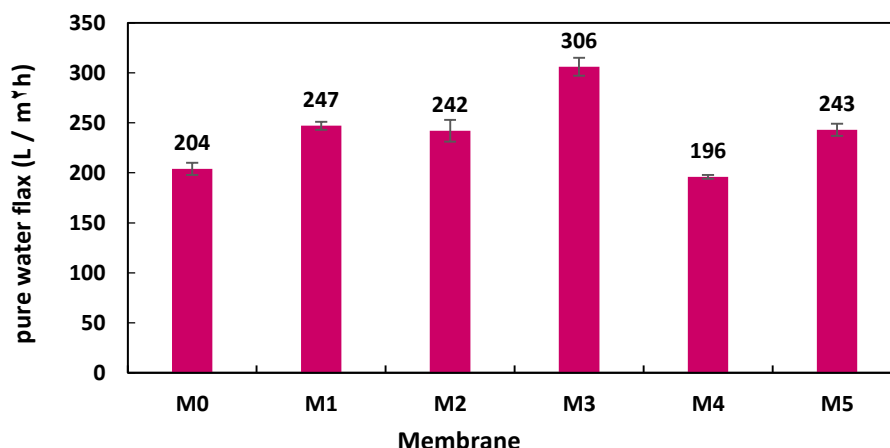
Table 1. Composition and roughness and overall porosity results of modified and unmodified membranes.

Membrane type	Membrane composition (weight percent)		surface roughness R_a (nm)	porosity ϵ (%)
	PES (wt%)	CdTiO_3 (wt%)		
M_0	18	0	8.4	74.55
M_1	18	0.03	7.2	84.64
M_2	18	0.05	5.6	83.13
M_3	18	0.1	7.5	84.36
M_4	18	0.2	7.3	87.82
M_5	18	0.5	5.7	90.15



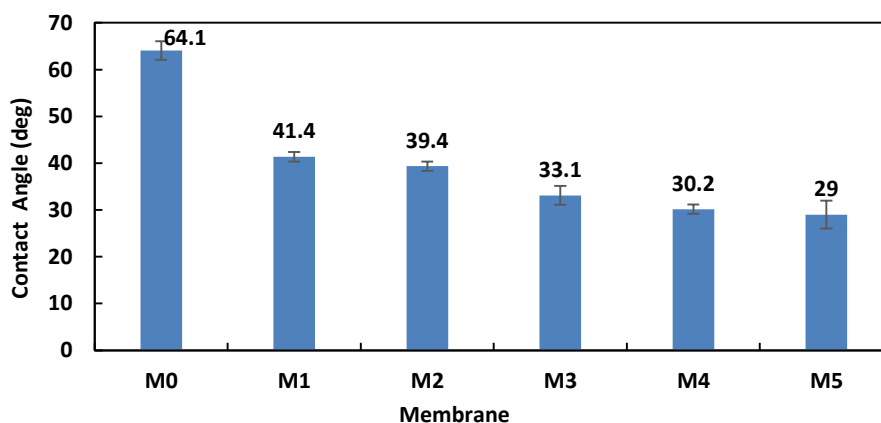
شکل ۵: تصاویر AFM غشاهای اصلاح شده و اصلاح نشده ساخته شده به روش وارونگی فاز.

Figure 5: AFM images of modified and unmodified membranes fabricated by phase inversion method.



شکل ۶: فلاکس آب مقطر غشاهای اصلاح نشده و اصلاح شده با درصدهای وزنی مختلف از CdTiO₃ بعد از فیلتراسیون آب مقطر به مدت ۶۰ دقیقه تحت فشار عملیاتی ۳ bar.

Figure 6: Pure water flux of modified and unmodified membranes with different weight percentages of CdTiO₃ after filtration of distilled water for 60 minutes under operating pressure of 3 bar.



شکل ۷: میانگین نتایج زاویه تماس برای غشاهای اصلاح نشده و اصلاح شده با درصدهای وزنی مختلف از CdTiO₃.

Figure 7: Average contact angle result for unmodified and modified membranes with different weight percentages of CdTiO₃.

اندازه‌گیری تخلخل غشا (جدول ۱) به وضوح نشان داد که تخلخل غشاهای مخلوط به دلیل افزودن CdTiO₃ افزایش یافته است. به طور کلی، تمام غشاهای اصلاح شده دارای تخلخل بالاتری نسبت به غشای PES اصلاح نشده هستند. افزایش تخلخل را می‌توان به تبادل سریع حلال، ضدحلال در طی فرآیند وارونگی فاز به دلیل ماهیت آب‌دوست نانوذرات CdTiO₃ نسبت داد [۲۷].

۳-۴- عملکرد ضد گرفتگی

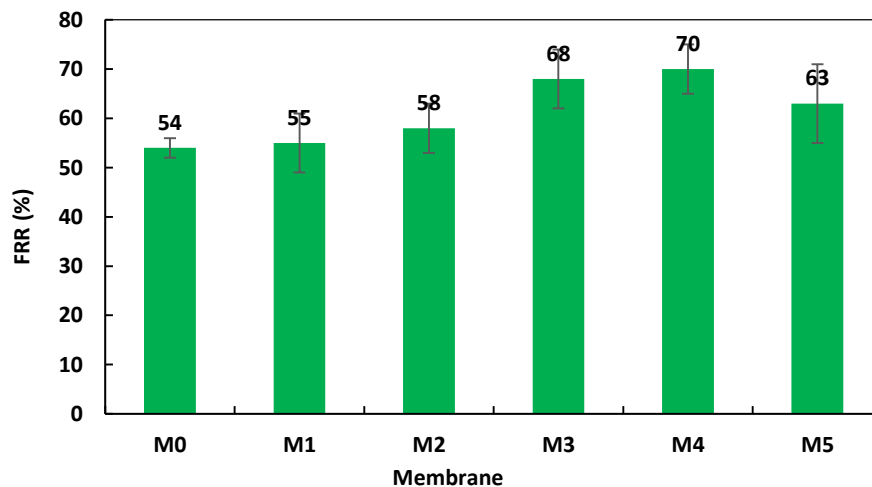
گرفتگی در غشاها هنوز مشکلی جدی است که توانایی فرآیندهای غشایی را محدود می‌کند. مانع عمده در استفاده از فرآیندهای غشایی کاهش سریع شار نفوذ در طول زمان در نتیجه گرفتگی غشا است. در پژوهش حاضر از محلول پروتئین با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر به

اندازه‌گیری زاویه تماس آب یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آب‌دوست بودن سطح غشاهای پلیمری است. از نظر تئوری، زاویه تماس سطح آب‌دوست باید کمتر از سطح آب‌گریز باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، حداکثر مقدار زاویه تماس مربوط به غشای PES اصلاح نشده است (۶۴٫۱ درجه). با افزودن نانوذرات CdTiO₃ آب‌دوست به بستر PES، زاویه تماس غشاهای اصلاح شده کاهش می‌یابد. حداقل مقدار زاویه تماس مربوط به غشای بستر مخلوط با ۰٫۵ wt % CdTiO₃ است (۲۹٫۰ درجه). نتایج زاویه تماس، خاصیت آب‌دوستی افزایش یافته غشاهای مخلوط را تأیید می‌کند. افزایش آب‌دوستی غشای بستر اصلاح شده را می‌توان به حضور گروه‌های آب‌دوست مانند هیدروکسیل و چندین گروه حاوی اکسیژن در سطح نانوذرات CdTiO₃ نسبت داد. همچنین نتایج

۳-۵- جداسازی مواد رنگزا

در این مطالعه، عملکرد اولترافیلتراسیون برای غشای مخلوط بهینه شده با $0.1 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ و غشای PES برای جداسازی مواد رنگزای معرفی شده در جدول ۲ بررسی شد. شکل ۹ مقادیر جداسازی بدست آمده برای محلول 500 mg/l مواد رنگزای زرد راکتیو ۱۰۵، آبی راکتیو ۲۱ و قرمز راکتیو ۱۹۵ با جرم مولکولی‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جداسازی برای مواد رنگزای زرد راکتیو ۱۰۵ و آبی راکتیو ۲۱ بیش از ۹۰ درصد است که به دلیل جرم مولکولی بالای این مواد و عدم امکان عبور آنها از حفرات کوچک سطح غشا می‌باشد. بنابراین تفاوت محسوسی در عملکرد غشای اصلاح نشده و اصلاح شده برای جداسازی این مواد مشاهده نشد. مقدار جداسازی برای رنگزای قرمز راکتیو ۱۹۵ با جرم مولکولی 1100 g/mol در غشای اصلاح نشده در حدود ۸۶ درصد و در غشای بهینه بالاتر از ۸۸ درصد بوده است. بهبود اندک مشاهده شده در میزان جداسازی غشاهای مخلوط می‌تواند به اثر دافعه بین سطح غشای اصلاح شده با چگالی بار منفی بیشتر و مولکول‌های رنگزا مرتبط باشد. در pH طبیعی، اغلب مواد رنگزای راکتیو به دلیل تفکیک گروه‌های سولفونیک دارای بار منفی هستند [۲۹]. همچنین سطح غشاهای اصلاح شده با نانوذرات CdTiO_3 به دلیل حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار دارای بار منفی است. بنابراین دافعه ایجاد شده بین بارهای همنام باعث افزایش جداسازی مواد رنگزا می‌شود [۳۰، ۲۶]. این نتایج عملکرد موثر غشاهای بستر مخلوط ساخته شده برای تصفیه پساب رنگی را تأیید می‌کند.

عنوان عامل گرفتگی استاندارد برای بررسی پدیده گرفتگی استفاده شد. نفوذپذیری و خاصیت ضد گرفتگی غشاهای PES، دو ویژگی اصلی است که در اثر افزودنی نانوذرات معدنی تحت تأثیر قرار گرفته و بر عملکرد غشاها تأثیر می‌گذارد. در مطالعات حاضر، پدیده گرفتگی با استفاده از تغییرات شار در طول صاف کردن جایگزین آب خالص و محلول پروتئین آب پنیر بررسی شده و به کمک پارامتر نسبت بازیابی شار (FRR) در شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت بازیابی شار برای غشای اصلاح شده با $0.3 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ ، $0.5 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ ، $0.1 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ و $0.2 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ به ترتیب به ۵۸، ۵۵، ۶۸، ۷۰ و ۶۳ درصد افزایش یافته است. در مقایسه با غشاهای مخلوط شده $0.2 \text{ wt } \% \text{ CdTiO}_3$ بهترین عملکرد ضد گرفتگی را نشان می‌دهد. عملکرد بهبود یافته غشاهای اصلاح شده را می‌توان به آب‌دوستی بیشتر و زبری کمتر سطح این غشاها نسبت داد. بهبود آب‌دوستی غشا با تأثیر بر خصوصیات جذب سطحی غشا، گرفتگی غشا را کاهش می‌دهد. همچنین، روند FRR مشاهده شده با زبری غشا که با استفاده از تجزیه و تحلیل AFM محاسبه شده است، مطابقت خوبی دارد (طبق جدول ۱). زبری سطح غشاهای PES بالاتر از غشاهای اصلاح شده است که به دلیل تجمع پروتئین در "دره‌ها" احتمال رسوب این غشا را افزایش می‌دهد. افزایش آب‌دوستی سطح غشا باعث می‌شود غشا به دلیل انتشار آسان حلال (آب) از طریق ضخامت غشا، مقاومت بیشتری در برابر گرفتگی داشته باشد [۲۸]. از این رو غشاهای مخلوط CdTiO_3 نسبت به غشای PES شانس بیشتری برای توانایی ضد گرفتگی دارند.

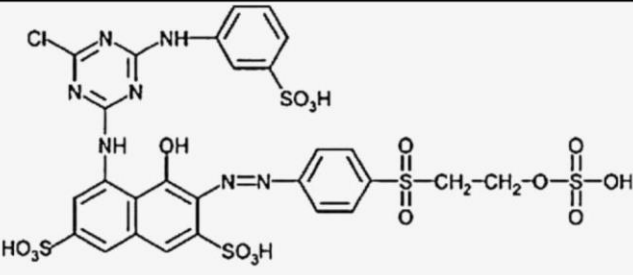
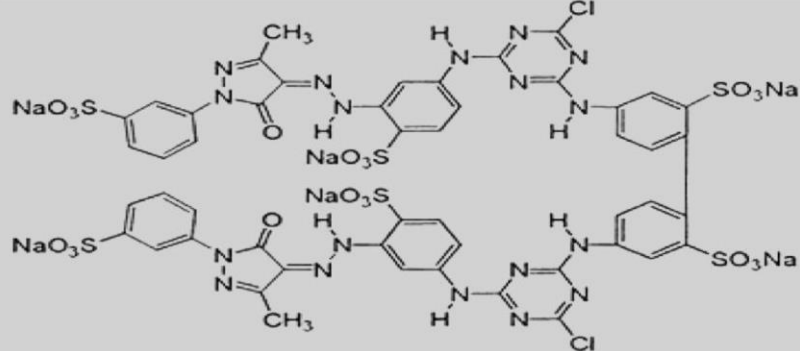
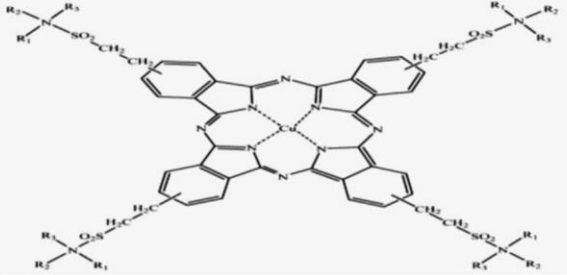


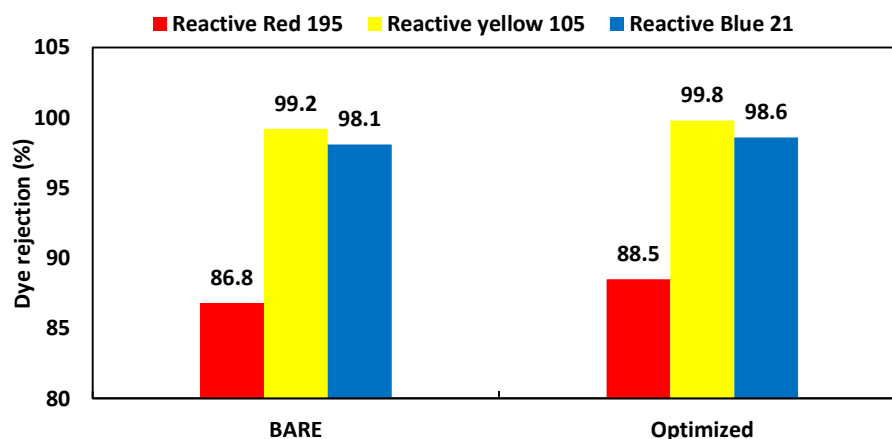
شکل ۸: نسبت بازیابی فلاکس (FRR) برای غشاهای اصلاح نشده و اصلاح شده حاوی درصد‌های وزنی مختلف از CdTiO_3 .

Figure 8: Flux recovery ratio (FRR) for unmodified and modified membranes containing different weight percentages of CdTiO_3 .

جدول ۲: خصوصیات مواد رنگزای استفاده شده.

Table 2: Characteristics of the used dyes.

Molecular weight (g/mol)	Chemical structure	pigment
1100		Reactive Red 195
1606.14		Reactive Yellow 105
626.5		Reactive Blue 21



شکل ۹: جداسازی مواد رنگزای مختلف توسط غشای اصلاح نشده و غشای اصلاح شده بهینه حاوی ۰,۱ wt% CdTiO₃ (تست محلول رنگ با غلظت ۵۰۰ mg/l در فشار عملیاتی ۳ بار انجام شد).

Figure 9: Separation of different dyes by the unmodified PES membrane and the optimal modified membrane containing 0.1 wt% CdTiO₃ (dye solution test with a concentration of 500 mg/l was performed at an operating pressure of 3 bar).

مواد رنگزا با جرم مولکولی بالاتر از 1000 g/mol نزدیک به 100 درصد بوده و برای ماده‌ی رنگزا با جرم مولکولی 626 g/mol میزان جداسازی بیش از 80 درصد حاصل شد. اثر غلظت‌های مختلف CdTiO_3 بر روی غشاهای ساخته شده بررسی شده و مقدار wt. \% CdTiO_3 $0,1$ در مقایسه با غشاهای دیگر بهترین عملکرد از جمله شار آب، ضد گرفتگی و تصفیه پساب رنگی را نشان داد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله تقدیر و تشکر خود را از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان جهت حمایت‌های مادی و معنوی صورت گرفته از این تحقیق اعلام می‌دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی ابتدا نانوذرات CdTiO_3 به روش هیدروترمال سنتز شده و سپس غشاهای اولترافیلتراسیون اصلاح شده با ترکیب مقدار متفاوتی از CdTiO_3 بر پایه پلی‌اتر سولفون تهیه شد. اثر نانوذرات CdTiO_3 بر ساختار غشا، آبدوستی، تخلخل، شار آب خالص و گرفتگی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی خصوصیات نشان داد که غشاهای مخلوط PES/CdTiO_3 دارای شار عبوری بالاتر، آبدوستی سطح بیشتر و گرفتگی کمتر نسبت به غشای اصلاح نشده می‌باشند. عملکرد اولترافیلتراسیون غشاها با جداسازی سه ماده رنگزای آلی با وزن‌های مولکولی مختلف بررسی شد. نتایج حاصل عملکرد مناسب این غشاها برای تصفیه پساب رنگی را نشان داد. میزان جداسازی

۵- مراجع

- G. Derouich, S. A. Younssi, J. Bennazha, J. A. Cody, M. Ouammou, M. El Rhazi, Development of low-cost polypyrrole/sintered pozzolan ultrafiltration membrane and its highly efficient performance for congo red dye removal. *J. Environ. Chem. Eng.* 8(2020), 103809.
- D. M. Al-Ani, F. H. Al-Ani, Q. F. Alsahy, S. S. Ibrahim, Preparation and characterization of ultrafiltration membranes from PPSU-PES polymer blend for dye removal. *Chem. Eng. Commun.* 208(2021), 41-59.
- A. B. Fradj, A. Boubakri, A. Hafiane, S. B. Hamouda, Removal of azoic dyes from aqueous solutions by chitosan enhanced ultrafiltration. *Results Chem.* 2(2020), 100017.
- M. Heydari, M. Ghargozlou, M. Ghahari, Nano-structures of magnetic metal-organic frameworks as nano-adsorbents for the removal of organic dyes from industrial effluents. *J. Color Sci. Tech.* 10(2020), 11-27.
- S. Saja, A. Bouazizi, B. Achiou, H. Ouaddari, A. Karim, M. Ouammou, Fabrication of low-cost ceramic ultrafiltration membrane made from bentonite clay and its application for soluble dyes removal. *J. Eur. Ceram. Soc.* 40(2020), 2453-2462.
- A. Bouazizi, M. Breida, B. Achiou, M. Ouammou, J. I. Calv, A. Aaddane, Removal of dyes by a new nano-TiO₂ ultrafiltration membrane deposited on low-cost support prepared from natural Moroccan bentonite. *Appl. Clay Sci.* 149, pp. 127-135, 2017.
- S. Rafiee, Optimizing the production of activated carbon nanofibers based on polyacrylonitrile in order to treat colored wastewater. *J. Color Sci. Technol.* 14(2020), 281-294.
- T. T. Van Tran, S. R. Kumar, S. J. Lue, Separation mechanisms of binary dye mixtures using a PVDF ultrafiltration membrane: Donnan effect and intermolecular interaction. *J. Membr. Sci.* 575(2019), 38-49.
- G. Han, Y. Feng, T.-S. Chung, M. Weber, C. Maletzko, Phase inversion directly induced tight ultrafiltration (UF) hollow fiber membranes for effective removal of textile dyes. *Environ. Sci. Technol.* 51(2017), 14254-14261.
- M. Jiang, K. Ye, J. Deng, J. Lin, W. Ye, S. Zhao, Conventional ultrafiltration as effective strategy for dye/salt fractionation in textile wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 52(2018), 10698-10708.
- D. Zou, X. Chen, M. Qiu, E. Drioli, Y. Fan, Flux-enhanced α -alumina tight ultrafiltration membranes for effective treatment of dye/salt wastewater at high temperatures. *Sep. Purif. Technol.* 215(2019), 143-154.
- H. Shao, Y. Qi, S. Liang, S. Qin, J. Yu, Polypropylene composite hollow fiber ultrafiltration membranes with an acrylic hydrogel surface by in situ ultrasonic wave-assisted polymerization for dye removal. *J. Appl. Polym. Sci.* 136(2019), 47099.
- A. Karimi, V. Vatanpour, A. Khataee, M. Safarpour, Contradiffusion synthesis of ZIF-8 layer on polyvinylidene fluoride ultrafiltration membranes for improved water purification. *J. Ind. Eng. Chem.* 73(2019), 95-105.
- C. Yang, W. Xu, Y. Nan, Y. Wang, Y. Hu, C. Gao, et al., Fabrication and characterization of a high performance polyimide ultrafiltration membrane for dye removal. *J. Colloid Interface Sci.* 562(2020), 589-597.
- K. Rambabu, N. Srivatsan, A. V. Gurumoorthy, Polyethersulfone-barium chloride blend ultrafiltration membranes for dye removal studies, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 032027.
- B. Said, S. M'rabet, R. Hsissou, A. El Harfi, Synthesis of new low-cost organic ultrafiltration membrane made from Polysulfone/Polyetherimide blends and its application for soluble azoic dyes removal. *J. Mater. Res. Technol.* 9(2020), 4763-4772.
- X. Chen, Y. Zhao, J. Moutinho, J. Shao, A. L. Zydney, Y. He, Recovery of small dye molecules from aqueous solutions using charged ultrafiltration membranes. *J. Hazardous Mater.* 284(2015), 58-64.
- J. Dasgupta, J. Sikder, S. Chakraborty, S. Curcio, E. Drioli, Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: a state of the art review. *J. Environ. Manage.* 147(2015), 55-72.
- M. Erkanlı, L. Yilmaz, P. Z. Culfaz-Emecen, U. Yetis, Brackish water recovery from reactive dyeing wastewater

- via ultrafiltration. *J. Cleaner Prod.* 165(2017), 1204-1214.
20. H. M. Abbasa, R. M. Kamelb, M. Alic, A. H. Attab, H. Hassanb, A. Shahatb, Fabrication of polysulfone/carbon nanospheres ultrafiltration membranes for removing some dyes from aqueous solutions. *Desalin. Water Treat.* 193(2020), 57-63.
21. R. Singh, M. K. Sinha, M. K. Purkait, Stimuli responsive mixed matrix polysulfone ultrafiltration membrane for humic acid and photocatalytic dye removal applications. *Sep. Purif. Technol.* 250(2020), 117247.
22. H. Susanto, R. Desiriani, A. A. Prasetyo, D. Hermita, T. Istirokhatun, I. N. Widiassa, Incorporation of Nanoparticles as Antifouling Agents into PES UF Membrane. *Mater. Today: Proceedings*, 13(2019), 217-223.
23. J. Kim, B. Van der Bruggen, The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment. *Environ. Pollut.* 158(2010), 2335-2349.
24. M. S. Hassan, T. Amna, M. S. Khil, Synthesis of High aspect ratio CdTiO₃ nanofibers via electrospinning: characterization and photocatalytic activity. *Ceram. Int.* 40(2014), 423-427.
25. H. Wang, X. Zhang, A. Huang, H. Xu, M. Zhu, B. Wang, A new phase of cadmium titanate by hydrothermal method. *J. Cryst. Growth.* 246 (2002), 150-154.
26. M. Safarpour, V. Vatanpour, A. Khataee, Preparation and characterization of graphene oxide/TiO₂ blended PES nanofiltration membrane with improved antifouling and separation performance. *Desalination*, 393(2016), 65-78.
27. S. Zinadini, A. A. Zinatizadeh, M. Rahimi, V. Vatanpour, H. Zangeneh, Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates. *J. Membrane Sci.* 453(2014), 292-301.
28. M. Safarpour, A. Khataee, V. Vatanpour, Preparation of a novel PVDF ultrafiltration membrane modified with reduced graphene oxide/TiO₂ nanocomposite with enhanced hydrophilicity and antifouling properties. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53(2014), 13370-13382.
29. J. Tafreshi, H. Fashandi, Gh. Amini Ershad, Modification of Polysulfone membrane using basil seed gum nanoparticles for removal of methylene blue from wastewater. *J. Color Sci. Tech.* 14(2020), 25-39.
30. A. Khataee, G. A. Mansoori, Nanostructured titanium dioxide materials: Properties, preparation and applications: World scientific, Singapore, 2011, 71-86.

How to cite this article:

Sh. Hosseinpour, M. Safarpour, A. Amani-Ghadim, Fabrication of a Mixed Matrix Membrane Containing Cadmium Titanate Nanoparticles and its Application for Treatment of Dye Wastewater. *J. Color Sci. Tech.* 16, 3(2022), 237-252.

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.6.2