

## ساخت و ارزیابی غشاهای جدید اولترافیلتراسیون پلی اترسولفون/نانوذرات اکسید آهن هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ): تصفیه پساب صنایع غذایی

مجید استرآبادی<sup>۱</sup>، مریم امیدوار<sup>۱\*</sup>، اسماعیل کوهستانیان<sup>۲</sup>، زهرا هجری<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران
۲. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### چکیده

در این تحقیق، غشاهای اولترا فیلتراسیون پلی اترسولفون جدید به وسیله روش وارونگی فاز تهیه شد. از پلی اتر سولفون بعنوان پلیمر، نانوذرات اکسید آهن هماتیت بعنوان افزودنی، پلی وینیل پیرولیدون بعنوان شکل دهنده حفرات و ۱-ان متیل -۲- پیرولیدون بعنوان حلال در تهیه محلول‌های ریخته‌گری ساخت غشاها و همچنین از آب مقطر بعنوان محیط انعقاد استفاده شد. تاثیر غلظت نانوذرات اکسید آهن ( $0/25\%$ ،  $0/5\%$ ،  $0/75\%$  و  $1\%$  وزنی) بر روی خصوصیات غشا شامل مورفولوژی، زاویه تماس، شار آب خالص و تصفیه پساب صنایع غذایی بررسی شد. افزایش غلظت نانوذرات اکسید آهن از  $0$  تا  $0/75\%$  وزنی به محلول ریخته‌گری منجر به ساخت غشاهایی بهبودیافته با ضخامت بیشتر، ساختاری حفره‌دارتر در لایه زیرین، آبدوستی و شار آب خالص بیشتر می‌گردد. همانطور که نتایج نشان داد در غشای حاوی  $0/75\%$  وزنی نانوذرات اکسید آهن هماتیت، زاویه تماس از  $2/36 \pm$  تا  $65/79$  به  $1/38 \pm 35/19$  درجه کاهش و شار آب خالص در فشار  $5$  بار از  $33/09 \text{ l/m}^2\text{h}$  به  $53/98 \text{ l/m}^2\text{h}$  افزایش یافت. این غشا عملکرد بسیار خوبی در دفع آلاینده‌های پساب از خود نشان داد.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۴ دی ۱۳۹۸

دریافت پس از اصلاح: ۲۵ خرداد ۱۳۹۹

پذیرش نهایی: ۲۵ تیر ۱۳۹۹

### کلمات کلیدی:

اولترا فیلتراسیون  
پلی اتر سولفون  
نانوذرات اکسید آهن هماتیت  
تصفیه پساب.

حقوق ناشر محفوظ است.

\* عهده دار مکاتبات

omidvar\_qu@yahoo.com/

momidvar@iauu.ac.ir

## ۱-مقدمه

تکنولوژی جداسازی توسط غشاها نسبت به فرآیندهای معمولی و کلاسیک جدا سازی، دارای برتری‌های فراوانی است که از جمله آنها می‌توان به مصرف کم‌تر انرژی (بعلت عدم تغییر فاز و نیز انجام آن در دماهای پایین)، پایین بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و توانایی جداسازی مواد حساس به دما در صنایع غذایی، دارویی، بیوتکنولوژی و غیره اشاره کرد. علاوه بر این، انجام برخی جداسازی‌هایی که توسط فرآیندهای غشایی صورت می‌گیرد، با سایر روش‌های جداسازی امکان‌پذیر نیست [۱]. وجود مزایای فوق سبب گسترش روزافزون استفاده از غشاها، به ویژه نوع پلیمری آن، در صنایع مختلف مرتبط با جداسازی اعم از شیرین‌سازی آب [۲]، تصفیه پساب [۳]، صنایع نفت، گاز و پتروشیمی [۴، ۵] و صنایع غذایی [۶] شده است.

یکی از پلیمرهایی که بطور عمده در فرآیندهای غشایی کاربرد دارد، پلی اتر سولفون<sup>۱</sup> (PES) است. این پلیمر دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مناسبی از جمله مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا می‌باشد [۷، ۸]. مهمترین ایراد این پلیمر آبدوستی نسبتاً کم آن است که باعث ایجاد مشکل گرفتگی در غشاهای حاصله از این پلیمر می‌گردد [۸، ۹]. تا کنون روش‌های متعددی به منظور رفع این مشکل ارائه شده است. یکی از جدیدترین روش‌های مورد استفاده برای بهبود آبدوستی غشاهای پلی اتر سولفون، ترکیب این پلیمر با نانوذرات است. تحقیقات نشان می‌دهد که آبدوستی نانوذرات نقش مهمی در بهبود مورفولوژی، خصوصیات ضد رسوب و نفوذپذیری غشاها از جمله غشاهای پلی اتر سولفون ایفا می‌کند [۱۰]. در ادامه، مروری بر تحقیقات پیشین مرتبط با موضوع ارائه می‌گردد.

اعلم و همکاران غشاهای پلی اتر سولفون را با افزودن مقادیر مختلفی از نانو ذرات اکسید آهن ( $Fe_3O_4$ ) ساختند. طبق نتایج بدست آمده غشای حاوی ۱۵٪ وزنی نانو ذرات اکسید آهن، بیشترین شار آب خالص را داشت در حالی که بیشترین دفع  $NaCl$  و  $MgSO_4$  مربوط به غشای حاوی ۱۰٪ وزنی نانو ذرات اکسید آهن بود. همچنین، با افزودن نانو ذرات

اکسید آهن، آبدوستی غشاها افزایش یافت [۱۱]. هوانگ و همکاران غشای PES را به همراه نانوذره زیرکونیوم سدیم نقره با استفاده از روش جدایی فاز تهیه کردند. در این تحقیق، تأثیر نانوذرات زیرکونیوم سدیم نقره بر روی عملکرد غشا نظیر مورفولوژی، میزان آبدوستی، نفوذ پذیری، ثابت حرارتی و خواص ضد رسوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز توزین حرارتی<sup>۲</sup> (TGA) نشان داد که ثابت حرارتی غشا با افزایش نانوذره زیرکونیوم سدیم نقره بهبود پیدا کرده است. همچنین به کمک آزمون زاویه‌ی تماس نشان دادند که تحت تأثیر اضافه کردن نانوذرات، میزان آبدوستی غشا افزایش و زاویه تماس از ۷۱/۵ درجه به ۵۲/۶ درجه کاهش یافته است. نتایج تحقیق آنها همچنین نشان داد که خواص ضد رسوبی و نفوذپذیری غشای اصلاح یافته بهبود پیدا کرده و شار آب خالص نیز با افزودن نانوذره از  $۸۲/۱ \text{ l/m}^2\text{h}$  به  $۱۰۰/۶ \text{ l/m}^2\text{h}$  رسیده است [۱۲]. قائمی و همکاران غشای PES را با استفاده از مقادیر مختلف نانوذره اکسید آهن ( $Fe_3O_4$ ) اصلاح شده تولید کردند و خواصی همچون مورفولوژی و میزان آبدوستی را بوسیله آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> (SEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۴</sup> (AFM) و زاویه تماس مورد بررسی قرار دادند. نتایج SEM نشان داد که زبری سطح بعد از اضافه نمودن نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده افزایش پیدا کرده است و غشایی که با ۰/۱٪ وزنی نانوذره ساخته شده، بهترین عملکرد را در حذف مس داشته است. همچنین نتایج تحقیقات آنها نشان داد که غشاهای اصلاح یافته، قابلیت استفاده‌ی مجدد با بهترین عملکرد را نیز دارا است [۱۳]. رزالی و همکاران غشای PES را به همراه مقادیر مختلفی از نانوذرات پلی آنیلین اصلاح کردند تا عملکرد غشا را بهبود بخشند. در این تحقیق آنها از سه مدل غشا یعنی غشای PES خالص، غشای PES به همراه نانوذره پلی آنیلین سنتز شده (PES-PANI) و غشای PES به همراه نانوذره پلی آنیلین تجاری استفاده کردند و عملکرد آنها را در تشکیل رسوب سرم آلبومین گاوی<sup>۵</sup> (BSA)، هیومیک اسید، نانوذرات سیلیکا و باکتری‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد میزان آبدوستی سطح غشاها با افزودن نانوذرات پلی آنیلین بهبود یافته است و غشای اصلاح یافته با نانو ذره سنتز شده عملکرد

<sup>۱</sup>. Polyethersulfone

<sup>۲</sup>. Thermal Gravimetric Analysis

<sup>۳</sup>. Scanning electron microscope

<sup>۴</sup>. Atomic Force Microscope

<sup>۵</sup>. Bovine serum albumin

### صنایع غذایی

پایداری مکانیکی، مقاومت در برابر تشکیل رسوب و راندمان حذف می‌شود [۱۸-۲۰]. محققان به منظور بهبود عملکرد غشاهای پلیمری مختلف در حذف آلاینده‌ها از آب، از نانوذرات اکسید فلز مختلفی همچون اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید زینک، اکسید گرافن و اکسید آهن هماتیت استفاده کرده اند. علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته، تاکنون هیچ تحقیقی در رابطه با اصلاح غشاهای پلی اترسولفون در تصفیه پساب صنایع غذایی با استفاده از نانوذرات اکسید آهن هماتیت خودسنتز شده به روش آسیاکاری مکانیکی انجام نشده است. تجهیزات ساده، عدم نیاز به دمای بالا و انجام عملیات تولید تنها در طی یک مرحله، از ویژگی‌های روش آسیاکاری مکانیکی است که می‌تواند تولید بسیاری از مواد و آلیاژها را به کمک این فرآیند، مقرون به صرفه‌تر از روش‌های متداول سازد [۲۱].

بر این اساس، تحقیق پیش رو با هدف ساخت غشاهای اولترافیلتر پلی اتر سولفون جدید با استفاده از نانوذرات اکسید آهن هماتیت خود سنتز شده به روش آسیاکاری مکانیکی به انجام رسید. جدایی فاز روشی است بسیار کاربردی که در این مطالعه به منظور ساخت غشاهای پلیمری از آن استفاده شد. هدف بررسی اثرات ناشی از افزودن غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید آهن هماتیت بر ویژگی‌های غشا از جمله مورفولوژی، نفوذپذیری آب و زاویه تماس بود. عملکرد غشاهای ساخته شده در کاهش کل جامدات محلول<sup>۸</sup> (TDS)، COD و کدورت نمونه‌ای از پساب صنایع غذایی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فرض بر آن بود که نانوذرات اکسید آهن هماتیت با توجه به ویژگی‌هایی نظیر ارزانی، فراوانی، روش سنتز و خاصیت سوپرمغناطیسی در جذب فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها، می‌تواند جایگزین مناسبی نسبت به سایر افزودنی‌های معدنی در اصلاح خواص و عملکرد غشا باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد

پلی اتر سولفون (Ultrason E6020P) با جرم مولکولی مول/گرم ۵۸۰۰۰ از شرکت بی ای اس اف (BASF) آلمان

بهتری در شار عبوری و همچنین مقابله با باکتری‌ها داشته است [۱۴]. میرزوا و همکاران از نانوذرات خاک رس به عنوان یک افزودنی برای ساخت غشای PES استفاده کردند و اثر آن را بر عملکرد و مورفولوژی غشا مورد مطالعه قرار دادند. آزمون نفوذپذیری آب خالص برای بررسی عملکرد غشا انجام شد. نتایج بدست آمده موید آن بود که غشاهای با ۱٪ خاک رس به همراه ۱٪ سدیم هگزامتاسفات<sup>۶</sup> (SHMP) و ۲٪ خاک رس بیشترین میزان نفوذپذیری را از خود نشان می‌دهند. همچنین غشای حاوی ۲٪ نانوذره خاک رس دارای حفرات منظم‌تر و بهترین عملکرد، نسبت به سایر غشاهای است [۱۵]. رزمجو و همکاران تأثیر نانوذره دی اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) را بر روی غشای الیاف توخالی PES بررسی نمودند و گزارش دادند که غشای الیاف توخالی PES به همراه ۲٪ وزنی نانوذره  $\text{TiO}_2$ ، عملیات جداسازی را بهبود می‌بخشد. همچنین، آنها ضمن بررسی اثرات اصلاح شیمیایی و مکانیکی بر روی غشای حاوی نانوذره نشان دادند که تجمع نانوذرات در لایه خارجی تنها بعد از اصلاح مکانیکی رخ می‌دهد درحالی‌که کاهش چشمگیر اندازه توده‌های انباشته شده بعد از اصلاحات مکانیکی و شیمیایی محقق می‌گردد. یافته‌های بدست آمده نشان داد اصلاح مکانیکی و شیمیایی سبب پراکندگی بهتر نانوذرات در سطح غشا شده و میزان آبدوستی را بهبود می‌بخشد. افزایش مقاومت حرارتی و میزان استحکام غشا از دیگر دستاوردهایی بود که در نتیجه اعمال اصلاحات مکانیکی و شیمیایی بدست آمد [۱۶]. رحیمی و همکاران غشای PES را با استفاده از نانوذرات O-Carboxy methyl Chirosan/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  اصلاح کردند. غشاهای چهار درصد وزنی مختلف از نانوذرات شامل ۰، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۱٪ ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از اندازه‌گیری نسبت شار خالص برگشتی<sup>۷</sup> (FRR) خواص ضد رسوب غشا مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که غشای حاوی ۰/۱٪ نانوذره بیشترین میزان FRR را از خود نشان می‌دهد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزودن نانوذرات OCMCS- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  باعث افزایش شار آب خالص می‌شود بطوری که بیشترین شار عبوری در غشای حاوی ۰/۱٪ نانوذره محقق شد [۱۷].

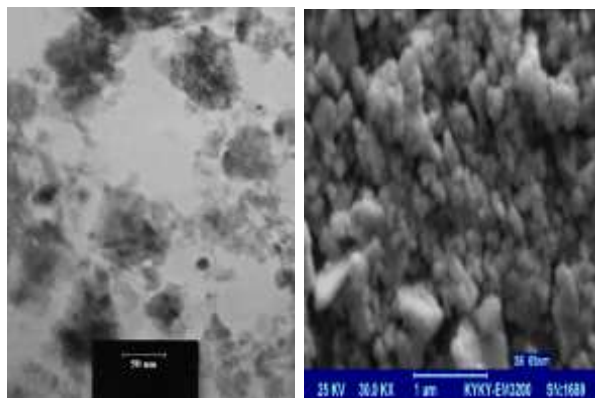
استفاده از نانوذرات اکسید فلز در ساخت غشا بسیار موثر است زیرا باعث بهبود خصوصیات غشا از جمله آبدوستی سطح،

<sup>۶</sup>. Sodium hexametaphosphate

<sup>۷</sup>. Flux recovery ratio

<sup>۸</sup>. Total dissolved solid

۵۰ نانومتر است. دلیل اختلاف شکل ذرات در میکروسکوپ SEM و TEM این است که آماده‌سازی نمونه‌ها در میکروسکوپ TEM توسط دستگاه آلتراسونیک انجام می‌گیرد. این دستگاه باعث می‌شود ذرات از همدیگر جدا شده و شکل بهتری پیدا کنند. به عبارت دیگر، شکل نامنظمی که در میکروسکوپ SEM مشاهده می‌شود بر اثر استفاده از دستگاه آلتراسونیک در بهتری حاصل می‌شود.



شکل ۱: تصاویر SEM و TEM نانوذرات اکسید آهن هماتیت سنتز شده

### ۲-۳- ساخت غشاهای

از روش وارونگی فاز برای ساخت غشای PES خالص و غشاهای همراه با نانو ذرات اکسید آهن هماتیت استفاده شد. برای تهیه محلول ریخته‌گری، درصد‌های وزنی مختلف از نانو ذرات اکسید آهن هماتیت به حلال NMP اضافه شد. سپس، توسط دستگاه هموژنایزر التراتوراکس (مدل IKA T25، کشور آلمان) به مدت یک ساعت همگن شد، آنگاه به وسیله دستگاه روبشگر مافوق صوت (مدل Bandeline HD3200)، نانوذرات اکسید آهن هماتیت به طور کامل در حلال پراکنده شد. محلول حاصل، روی همزن مغناطیسی قرار داده شد و پلیمر PES و PVP بتدریج به آن اضافه گشت. هم‌زدن به مدت ۱۲ ساعت ادامه یافت تا محلولی همگن حاصل شود. سپس، محلول‌های حاصله روی صفحه شیشه‌ای بوسیله فیلم کش با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر ریخته‌گری شد و در حمام حاوی آب

خریداری شد. پلی وینیل پیرولیدون<sup>۹</sup> (PVP) با جرم مولکولی مول/گرم ۴۰۰۰۰ و نام اختصاری PVP K 40 از شرکت مرک<sup>۱۰</sup> آلمان خریداری شد. از این پلیمر برای ایجاد حفره و تخلخل در ساختار غشا استفاده می‌شود. ۱-ان متیل -۲- پیرولیدون با نام اختصاری NMP از شرکت مرک آلمان خریداری و به عنوان حلال در فرآیند تهیه آزمایشگاهی غشاهای به کار گرفته شد. اکسید آهن هماتیت در ابعاد میکرونی و با اندازه دانه حدود ۵ μm و متانول تجاری نیز از شرکت مرک تهیه شد. از آب مقطر بعنوان ضد حلال در ساخت غشاهای استفاده گردید.

### ۲-۲- روش سنتز نانو ذرات اکسید هماتیت (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

پودر میکرونی (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و متانول تجاری به عنوان مواد اولیه سنتز نانوذرات اکسید آهن هماتیت مورد استفاده قرار گرفت. آسیاکاری مکانیکی در یک آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای (مدل Fritsch Pulverisette 5) با محفظه و گلوله‌هایی از جنس فولاد سخت کاری شده انجام شد. جهت جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته، تمام مراحل آزمایش از جمله، ورود مواد اولیه به داخل محفظه، قرار گرفتن محفظه داخل آسیا و نهایتاً تخلیه محصول نهایی، تحت اتم‌سفر کنترل شده آرگون انجام گردید. در این تحقیق به جای پارامتر نسبت وزنی گلوله به پودر<sup>۱۱</sup> (BPR)، از نسبت وزنی سیال (متانول) به پودر که به اختصار با R نمایش داده شده است، استفاده گردید. در واقع، BPR خود تابعی از R است و با آن تغییر می‌کند. با توجه به شرایط بهینه سنتز نانوذرات اکسید آهن هماتیت در روش آسیاکاری مکانیکی [۲۱]، فرآیند آسیاکاری با نسبت R=۳۰ و به مدت ۳۰ ساعت و با سرعت ثابت ۳۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت. جهت جلوگیری از حرارت اضافی، بعد از هر ۱ ساعت آسیاکاری مکانیکی دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه خاموش گردید. به منظور اطمینان از نانو بودن پودر اکسید آهن هماتیت مورد استفاده، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۱۲</sup> (TEM) و SEM آن تهیه شد که در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که از تصویر TEM مشخص است، نانوذرات اکسید آهن هماتیت دارای مورفولوژی کروی با اندازه ذراتی کمتر از

<sup>۹</sup>. Poly vinyl pyrrolidone

<sup>۱۰</sup>. Merck

<sup>۱۱</sup>. Ball to Powder Ratio

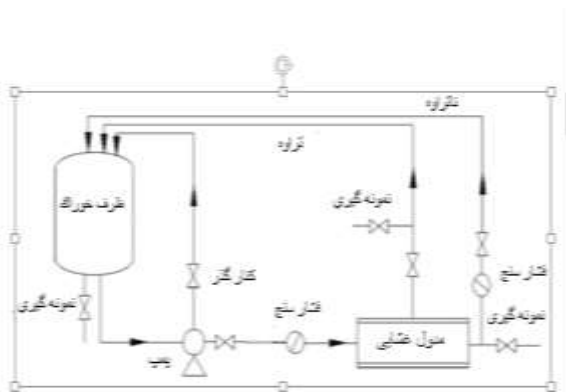
<sup>۱۲</sup>. Transmission Electron Microscopy

### صنایع غذایی

طرح شماتیک آن در شکل (۳) نشان داده شده است. تمام آزمایشات در دمای محیط  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  انجام گرفت. برای اندازه گیری شار آب خالص از آب مقطر استفاده شد. تست شار آب خالص در فشار عملیاتی ۵ بار بعد از گذشت ۱۵ دقیقه که سیستم به شرایط پایا رسیده بود، انجام گرفت. بدین منظور در بازه زمانی ۲ دقیقه، حجم آب تراوش یافته از غشا اندازه گیری و شار آب خالص با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید [۹]:

$$PWF^{14} = Q/(A \cdot \Delta t) \quad (1)$$

که در آن، Q مقدار جریان تراوه (l)، A سطح موثر غشا ( $\text{m}^2$ ) و  $\Delta t$  زمان نمونه گیری (hr) است.



شکل ۳: طرح شماتیک دستگاه آزمایشگاهی غشایی

از یک نمونه پساب صنایع غذایی با  $\text{pH} = 7/2$  برای آزمون شار پساب و تصفیه آن بوسیله غشاهای تهیه شده در فشار ۵ بار استفاده شد که مشخصات پساب خام در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول ۲: مشخصات پساب صنایع غذایی مورد استفاده

مقدار	شاخص آلودگی
۷۳/۶۴	$15$ کدورت (NTU)
۶۰۸	TDS (mg/L)
۶۱۱۰	COD (mg/L)

شار پساب بعد از گذشت ۳۰ دقیقه و رسیدن به شرایط پایا با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد و توانایی جدا سازی غشاها بر حسب درصد حذف کدورت، TDS و COD با استفاده از رابطه (۲) مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه‌های

مقطر با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت غوطه‌ور گشت. برای حذف کامل حلال و نانوذرات اکسید آهن هماتیت، غشاها در ظرف حاوی آب مقطر تازه به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و سپس، با قرار دادن بین کاغذ صافی برای مدت ۲۴ ساعت، در دمای اتاق خشک شد. ترکیب محلول‌های ریخته‌گری در جدول (۱) ارائه شده است و شکل (۲)، مرحله شکل‌گیری غشا را در درون حمام انعقاد نشان می‌دهد.

جدول ۱: ترکیب محلول‌های ریخته‌گری جهت ساخت غشاها

غشاها	PVP (wt%)	NPs <sup>۱۳</sup> (wt%)	PES (wt%)
M <sub>1</sub>	۱	۰	۱۸
M <sub>2</sub>	۱	۰/۲۵	۱۸
M <sub>3</sub>	۱	۰/۵	۱۸
M <sub>4</sub>	۱	۰/۷۵	۱۸
M <sub>5</sub>	۱	۱	۱۸



شکل ۲: مرحله شکل‌گیری غشا در حمام انعقاد

### ۴-۲- خصوصیات غشاها

#### ۴-۲-۱- تست غشاها بوسیله دستگاه آزمایشگاهی

#### غشایی

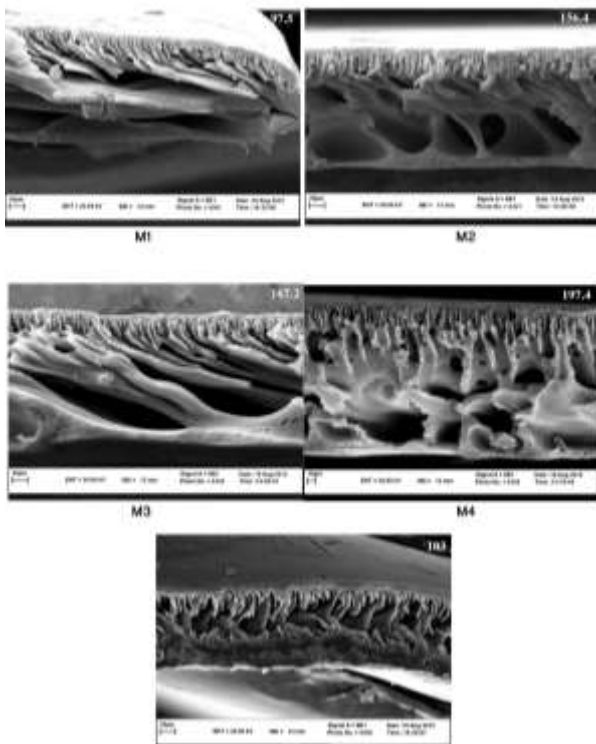
عملکرد غشاهای ساخته شده، بوسیله دستگاه آزمایشگاهی غشایی به روش ناپیوسته بررسی شد. این دستگاه شامل تانک خوراک، پمپ، فشارسنج‌های عقب‌بای، مدول غشایی با قطر ۳/۴ cm و نیز لوله و اتصالات جانبی است که

<sup>۱۳</sup>. Nano particles

<sup>۱۴</sup>. Pure water flux

<sup>۱۵</sup>. Unit Turbidity Nephelometric

ساختار نامتقارن شامل یک لایه فوقانی متراکم و یک لایه زیرین حفره دار تشکیل شده اند. تصاویر شکل (۴) نشان می دهد که با افزودن نانوذرات اکسید آهن هماتیت از ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی، ساختار غشا متخلخل تر و حتی حاوی حفرات نسبتاً درشت شده است و به تبع آن ضخامت لایه فوقانی غشا از ۳۲/۷ به ۱۶/۴ میکرومتر کاهش و تخلخل لایه زیرین آن افزایش یافت. از طرفی با افزایش غلظت نانوذره اکسید آهن از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی، ضخامت لایه فوقانی غشا افزایش یافت و غشا ساختار متراکم تری پیدا کرد. حضور افزودنی ها همزمان می تواند دو اثر متضاد بر روی ساختار غشا داشته باشد. از سویی با توجه به تشدید ناپایداری ترمودینامیکی می تواند جدایش آنی را تسهیل کند و غشایی با ساختاری متخلخل و دارای حفرات درشت ایجاد کند، و از سوی دیگر می تواند با افزایش ویسکوزیته، مسبب تشکیل غشایی با ساختار متراکم گردد. در واقع ساختار نهایی غشا ایجاد شده به این بستگی دارد که سرانجام کدام یک از دو اثر فوق بر دیگری فائق آید [۲۲، ۲۳].



شکل ۴: تصاویر SEM حاصل از سطح مقطع عرضی غشاهای ساخته شده با بزرگنمایی ۱۰۰۰.

در واقع ساختار نهایی غشا ایجاد شده به این بستگی دارد که سرانجام کدام یک از دو اثر فوق بر دیگری فائق آید [۲۲، ۲۳].

مورد استفاده برای اندازه گیری این شاخص های آلودگی به ترتیب عبارتند از دستگاه کدورت سنج مدل TURB355 ساخت کشور آلمان، دستگاه TDS سنج مدل 4510 ساخت شرکت JEN WAY آلمان و دستگاه اندازه گیری COD مدل AL800 ساخت شرکت AQUALYTIC کشور آلمان.

$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

$C_p$ : غلظت شاخص آلودگی در جریان تراوه

$C_f$ : غلظت شاخص آلودگی در جریان خوراک

$\%R$ : درصد حذف

### ۲-۴-۲ مورفولوژی غشاها

تصاویر سطح مقطع عرضی غشاها بوسیله میکرو سکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VP 1450 ساخت شرکت LEO آلمان گرفته شد. برای مشاهده ساختار مقاطع عرضی غشاها، نمونه ها توسط نیتروژن مایع شکسته شد و پس از خشک شدن در دمای محیط با پوشش نازکی از طلا به منظور رسانا کردن نمونه برای آزمون SEM آماده شد.

### ۲-۴-۳ زاویه تماس

برای تعیین میزان آبدوستی غشاها، زاویه تماس بین قطره آب مقطر و سطح غشا در دمای اتاق بوسیله دستگاه اندازه گیری زاویه تماس G10, KRUSS ساخت کشور آلمان اندازه گیری شد. مقدار زاویه تماس برای هر غشا حداقل در چهار مکان مختلف از سطح غشا اندازه گیری و مقدار میانگین آنها گزارش شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ اثر افزودن نانوذرات اکسید آهن بر مورفولوژی

#### و ساختار غشاهای PES

تصاویر SEM غشاهای PES اصلاح شده در غلظت های مختلف افزودنی نانوذرات اکسید آهن هماتیت با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) و ضخامت تقریبی لایه فوقانی و کل هر غشا در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که در شکل (۴) دیده می شود، همه ی غشاها از

### صنایع غذایی

جدول ۳: ضخامت لایه فوقانی و ضخامت کل غشاهای ساخته

شده بر حسب میکرومتر

شماره غشا	M1	M2	M3	M4	M5
ضخامت لایه فوقانی	۳۲/۷	۲۹/۲	۲۵/۳	۱۶/۴	۳۱/۳
ضخامت کل	۹۷/۵	۱۵۶/۴	۱۶۷/۲	۱۹۷/۴	۱۰۳

۲-۳ تاثیر افزودن نانو ذرات اکسید آهن بر آبدوستی

### غشاهای PES

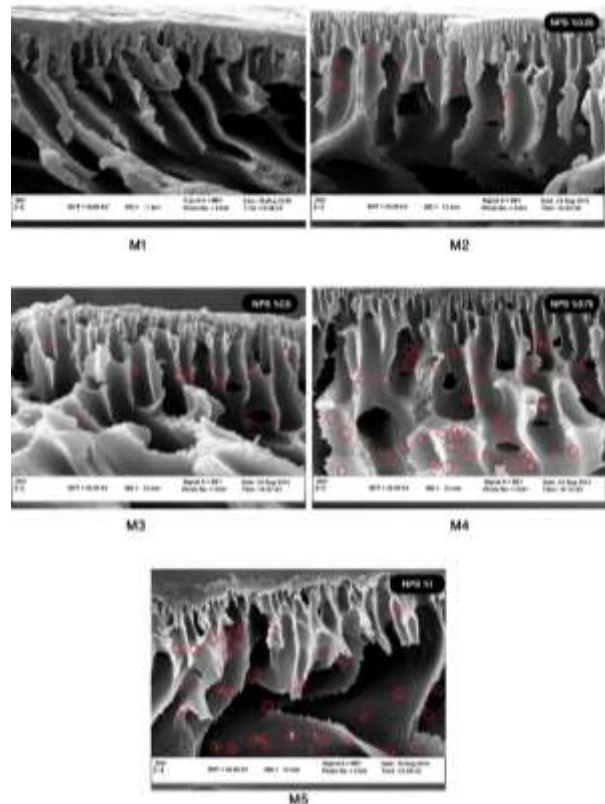
تصاویر حاصل از انجام آنالیز زاویه‌ی تماس غشاهای در شکل

(۶) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده

می‌شود، بیشترین زاویه تماس و به عبارت دیگر، کمترین آبدوستی مربوط به غشا PES خالص است. غشاهای اصلاح شده با افزودن مقادیر مختلف نانوذرات اکسید آهن، زاویه تماس کمتری نسبت به غشا PES خالص نشان داد بطوری که با افزودن غلظت نانوذرات اکسید آهن از ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی به محلول ریخته‌گری، زاویه تماس بطور چشمگیری کاهش یافت. زاویه تماس غشا به شیمی سطح (آبدوستی یا آبگریزی) و مورفولوژی آن بستگی دارد بطوری که اگر نوع پلیمر سطح دو غشا یکسان باشد رابطه‌ای مستقیم بین مورفولوژی و زاویه تماس غشاهای برقرار می‌گردد. غشایی که حفره دارتر است از زاویه تماس کمتری برخوردار می‌باشد اگرچه ممکن است غشا آبدوست نباشد [۸، ۹].

با افزودن غلظت نانوذرات اکسید آهن از ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی، زاویه تماس غشاهای از ۶۵/۷۹ به ۳۵/۱۹ درجه کاهش یافت. این به دلیل طبیعت آبدوست نانوذرات اکسید آهن و حضور آن در سطح غشا است [۱۳]. با اینحال با افزایش نانوذرات اکسید آهن از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی، زاویه تماس تنها اندکی افزایش یافت و به ۶۰/۹۲ درجه رسید که می‌تواند به دلیل تخلخل کمتر این غشا باشد. همچنین، این احتمال وجود دارد که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید آهن از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی و افزایش ویسکوزیته محلول پلیمری، نانوذرات کمتری بتواند به سطح راه یافته و در نتیجه زاویه تماس سطح اندکی افزایش یابد. به عبارت دیگر، هم تغییر در مورفولوژی

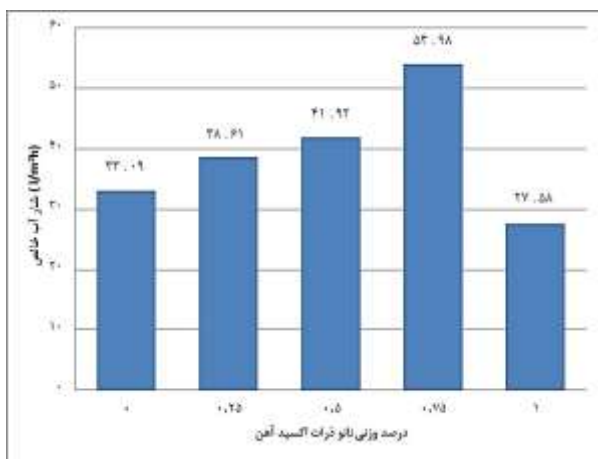
افزایش ضخامت و تخلخل غشاهای با افزودن ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی نانوذرات ناشی از افزایش ناپایداری ترمودینامیکی فیلم غوطه‌ور شده است. در واقع حضور نانوذرات اکسید آهن به عنوان ماده‌ای با خواص ضدحلالی، ناپایداری ترمودینامیکی فیلم غوطه‌ور شده را افزایش می‌دهد. به این ترتیب، شرط لازم برای تسهیل در انجام جدایش آبی و در نتیجه، ایجاد غشایی با ضخامت لایه فوقانی کمتر، تخلخل بیشتر و حفرات درشت‌تر فراهم می‌گردد به طوری که ضخامت لایه فوقانی از ۳۲/۷ میکرومتر به ۱۶/۴ میکرومتر کاهش می‌یابد [۲۴]. افزایش غلظت نانوذره اکسید آهن از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی، ویسکوزیته فیلم ریخته‌گری را افزایش می‌دهد و افزایش ویسکوزیته، موجب کاهش نرخ نفوذ دو جانبه حلال و ضد حلال در حین فرایند انجماد می‌گردد. در نتیجه از جدایش آبی ممانعت می‌کند و موجب جدایش تاخیری و نهایتاً سرکوب ماکروویدها، تشکیل لایه فوقانی با ضخامت بیشتر ۳۱/۳ میکرومتر و ساختار متراکم‌تر در غشا می‌شود [۲۴].



شکل ۵: تصاویر SEM حاصل از سطح مقطع عرضی غشاهای ساخته شده با بزرگنمایی ۵۰۰۰.

در شکل (۵) حضور نانوذرات اکسید آهن در ساختار غشا با دایره‌های قرمز رنگ نشان داده شده است.

توانایی غشاهای در کاهش آلاینده‌های پساب صنایع غذایی در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش غلظت نانوذرات در محلول فیلم ریخته‌گری از ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی، درصد حذف آلاینده‌ها افزایش یافت به طوری که در غشا، M4 حداکثر درصد حذف یعنی ۶۹/۷۹٪، ۷۲/۲۰٪ و ۹۶/۸۹٪ به ترتیب برای TDS, COD و کدورت حاصل شد. با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی، این روند معکوس شد و درصد حذف کاهش یافت.

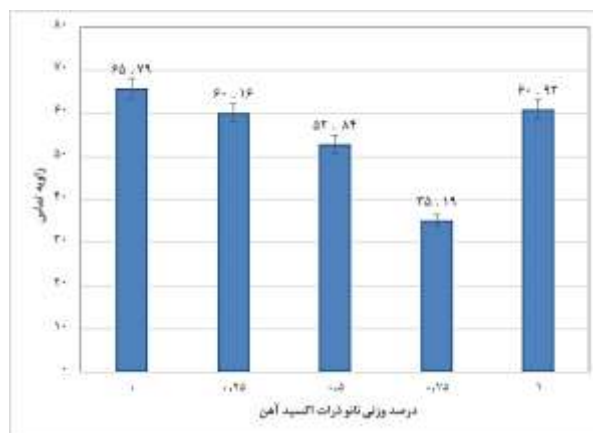


شکل ۷: نتایج حاصل از شار آب خالص غشاهای بر حسب درصد وزنی نانوذرات اکسید آهن هماتیت در فشار ۵ بار

در توجیه این نتایج می‌توان گفت، مطابق تصاویر SEM، غشای بدون افزودنی نانوذرات اکسید آهن در مقایسه با دیگر غشاهای متراکم‌تر و دارای لایه رویین ضخیمی است. بنابراین مقاومت این غشاهای در برابر نفوذپذیری مولکول‌های آلاینده و مولکول‌های آب هر دو قابل توجه است. با اضافه کردن نانوذرات اکسید آهن به محلول ریخته‌گری و تغییراتی که در مورفولوژی غشاهای ایجاد می‌شود انتقال مولکول‌های آب و آلاینده تسهیل می‌یابد. این تغییر در مورفولوژی برای انتقال اجزای کوچک مانند مولکول‌های آب در مقایسه با مولکول‌های بزرگ مواد آلاینده موثرتر است و موجب کاهش مواد آلاینده در جریان تراوه و در نتیجه، حذف بیشتر این مواد می‌شود [۲۴، ۲۵].

مقایسه بین عملکرد غشاهای ساخته شده در شکل (۸) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، غشای M4 که محلول ریخته‌گری آن حاوی ۰/۷۵٪ وزنی نانوذرات اکسید آهن هماتیت بود بهترین عملکرد را در بین غشاهای ساخته شده داشت زیرا علاوه بر شار و آبدوستی بالا،

غشا و هم کاهش مقدار نانوذرات در سطح غشا می‌تواند موجب افزایش زاویه تماس شود [۹].



شکل ۶: تغییرات زاویه تماس غشاهای با افزایش درصد وزنی نانو ذره اکسید آهن هماتیت در محلول ریخته‌گری

### ۳-۳ عملکرد غشاهای

نتایج شار آب خالص و شار پساب در برابر غلظت نانوذرات اکسید آهن در فشار ۵bar به ترتیب در شکل (۷) و جدول (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شار آب خالص و شار پساب در غشاهایی که محلول ریخته‌گری آنها حاوی ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی از این افزودنی است نسبت به غشاهای PES خالص بیشتر است. به عنوان مثال، شار آب خالص غشا PES بعد از افزودن ۰/۷۵٪ وزنی نانوذرات اکسید آهن از ۳۳/۰۹ l/m² h به ۵۳/۹۸ l/m² h رسید اما با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات تا ۱٪ وزنی، شار آب خالص به ۲۷/۵۸ l/m² h کاهش یافت.

آبدوستی و مورفولوژی غشاهای دو عامل تاثیرگذار بر شار آب خاص و شار پساب است. مقادیر زاویه تماس (شکل ۶) و تصاویر SEM (شکل ۴) روند مشاهده شده برای شار آب خالص و شار پساب را تایید می‌کند. در حقیقت غشاهای با آبدوستی و تخلخل بیشتر و ضخامت لایه فوقانی کمتر، به خاطر مقاومت کمتر در برابر نفوذ آب، از شار آب خالص و شار پساب بیشتری برخوردار هستند [۹، ۲۴]. با افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۷۵٪ به ۱٪ وزنی، ویسکوزیته محلول ریخته‌گری افزایش می‌یابد و لذا جدایش تاخیری اتفاق می‌افتد، به این ترتیب غشایی با ضخامت و تخلخل کمتر و ضخامت لایه فوقانی بیشتر ایجاد می‌شود. این افزایش ضخامت لایه فوقانی، مقاومت بیشتری در برابر نفوذ آب دارد و لذا شار آب و شار پساب کاهش می‌یابد [۹، ۲۴].

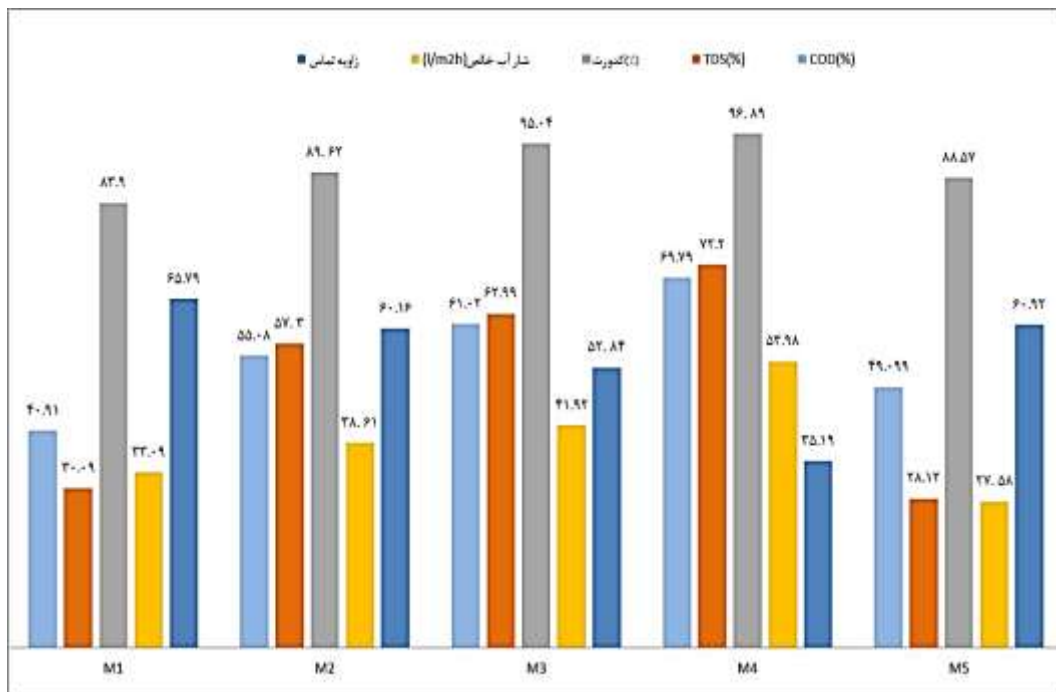


صنایع غذایی

شاخص‌های آلودگی پساب یعنی COD، TDS و کدورت را نیز بطور چشمگیری کاهش داد.

جدول ۴: نتایج حاصل از شار پساب و درصد حذف کدورت، TDS و COD بوسیله غشاهای ساخته شده

M5	M4	M3	M2	M1	نوع غشا
$2/2 \pm 10/45$	$1/4 \pm 20/93$	$2/6 \pm 17/68$	$2/1 \pm 15/36$	$1/8 \pm 12/21$	شار پساب ( $L/m^2h$ )
$88/57 \pm 1/7$	$96/89 \pm 1/9$	$95/04 \pm 1/3$	$89/62 \pm 1/1$	$2/3 \pm 83/90$	کدورت (%)
$28/12 \pm 3/8$	$72/20 \pm 1/6$	$62/99 \pm 2/6$	$57/73 \pm 2/6$	$1/4 \pm 30/09$	TDS (%)
$49/09 \pm 3/5$	$69/79 \pm 1/9$	$61/02 \pm 3/2$	$55/08 \pm 1/8$	$3/1 \pm 40/91$	COD (%)



شکل ۸: مقایسه عملکرد غشاهای ساخته شده.

اولیه نام برده شده محلول‌های مختلفی تهیه شد و بعد از فیلم کشی به منظور شکل‌گیری نهایی غشاهای، در حمام انعقاد با دمای  $25^\circ C$  قرار داده شد. تاثیر افزودن نانوذرات اکسید آهن روی مورفولوژی، قابلیت خیسی و عملکرد دفع مواد آلاینده پساب صنایع غذایی در غشاهای آماده شده بوسیله تصاویر SEM، تست زاویه تماس، فلاکس آب خالص عبوری از میان غشاهای و حذف مواد آلاینده مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

#### ۴- نتیجه‌گیری:

در این تحقیق از روش جدایی فاز برای تهیه غشاهای مسطح PES استفاده شد. پلیمر PES، افزودنی‌های PVP و نانوذرات اکسید آهن هماتیت و نیز حلال NMP به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفت. با ترکیب‌های متنوعی از مواد

- Fiber Membrane Systems*" Journal of Petroleum Science and Technology, **9**(1): p. 28-43.
- [5] S. Singh (2019), "Treatment and Recycling of Wastewater from Oil Refinery/Petroleum Industry", *Journal of Advances in Biological Treatment of Industrial Waste Water and their Recycling for a Sustainable Future*, Springer. p. 303-332.
- [6] A. Nazira, K. Khanb, A. Maanb, R. Ziac, L. Giornod, K. Schroene, (2019) , "Membrane separation technology for the recovery of nutraceuticals from food industrial streams". *Journal of Trends in food science & technology*: p. 426-438.
- [7] M. Omidvar, Z. Hejri, and A. Moarefian, (2019) "The effect of Mersol surfactant on the morphology and performance of PES/PVP membranes: antibiotic separation", *International Journal of Industrial Chemistry*, **10**(4): p. 301-309.
- [8] M. Omidvar, M. Soltanieh, S. M. Mousavi, E. Saljoughi, A. Moarefian, and H. Saffaran (2015) "Preparation of hydrophilic nanofiltration membranes for removal of pharmaceuticals from water". *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **13**(1): p. 42.
- [9] M. Omidvar, S. M. Mousavi, M. Soltanieh and A. A. Safekordi, (2014) "Preparation and characterization of poly (ethersulfone) nanofiltration membranes for amoxicillin removal from contaminated water", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **12**(1): p. 18.
- [10] X. Huang, J. Zhang, K. Peng, Y. Na, Y. Xiong, W. Liu, J. Liu, and L. Lu, (2019) "Functional magnetic nanoparticles for enhancing ultrafiltration of waste cutting emulsions by significantly increasing flux and reducing membrane fouling", *Journal of membrane science*, **573**: p. 73-84.
- [11] J. Alam, L. A. Dass, M. Ghasemi, and M. Alhoshan (2013) "Synthesis and optimization of PES-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> mixed matrix nanocomposite membrane: Application studies in water purification", *Polymer composites*, **34**(11): p. 1870-1877.
- [12] J. Huang, G. Arthanareeswaran, and K. Zhang, (2012) "Effect of silver loaded sodium zirconium phosphate (nanoAgZ) nanoparticles incorporation on PES membrane performance", *Journal of Desalination*, **285**: p. 100-107.
- [13] N. Ghaemi, S. S. Madaeni, P. Daraei, H. Rajabi, S. Zinadini, A. Alizadeh, R. Heydari, M. Beygzadeh, S. Ghouzivad, (2015) "Polyethersulfone membrane enhanced with iron oxide nanoparticles for copper removal from water: application of new functionalized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles", *Chemical Engineering Journal*, **263**: p. 101-112.
- [14] N. F. Razali, A.W. Mohammad, and N. Hilal, (2014) "Effects of polyaniline nanoparticles in polyethersulfone ultrafiltration membranes: Fouling behaviours by different types of foulant",

افزودن نانوذرات اکسید آهن از ۰ تا ۰/۷۵٪ وزنی از یک سو باعث تشدید ناپایداری ترمودینامیکی فیلم غوطه‌ور شده در حمام انعقاد شد و در نتیجه، فرایند جدایی آبی را تسهیل کرد. به این ترتیب، تسهیل در انجام فرآیند جدایش آبی، باعث افزایش تخلخل غشا شد و ضخامت لایه رویین غشا را از ۳۲/۷ به ۱۶/۴ میکرومتر کاهش داد که این امر، افزایش شار آب خالص عبوری از میان غشای حاصله را به دنبال داشت. از سوی دیگر، با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات اکسید آهن از ۰/۷۵٪ تا ۱٪ وزنی، افزایش ویسکوزیته فیلم ریخته‌گری، موجب تاخیر در جدایش آبی و در نتیجه تخلخل کمتر در غشای حاصله و کاهش شار آب خالص خروجی شد. بر اساس نتایج بررسی‌های بدست آمده، خصوصیت آبدوستی غشاها با افزودن نانوذرات اکسید آهن در محلول ریخته‌گری بهبود یافت. این غشاهای بهبودیافته با آبدوستی بیشتر قادر به دفع مقدار قابل توجهی از مواد آلاینده پساب بودند. بر این اساس، غشای بهینه حاصل از این تحقیق حاوی ۰/۷۵٪ وزنی نانوذرات اکسید آهن بود. ساخت و ارتقای این غشای یک فرآیند ساده تک مرحله‌ای انجام گرفت و عملکرد بسیار خوبی در دفع آلاینده‌های پساب از خود نشان داد. آبدوستی آن در مقایسه با سایر غشاهای مورد بررسی بسیار بیشتر بود به طوری که از بیشترین شار آب خالص در بین غشاهای حاصله برخوردار بود.

## مراجع

- [۱] احسان سلجوقی، وحیده غفار یان، و احمد اخوت، (۱۳۹۲)، "فناوری ساخت، اصلاح و ارزیابی غشاهای پلیمری"، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی، تهران.
- [2] E. Yang, K. J. Chae, M. J. Choi, Z. He, I. Kim (2019) "Critical review of bioelectrochemical systems integrated with membrane-based technologies for desalination, energy self-sufficiency, and high-efficiency water and wastewater treatment", *Journal of Desalination*, **452**: p. 40-67.
- [3] M. Aslam, A. Charfi, and J. Kim (2019) "Membrane scouring to control fouling under fluidization of non-adsorbing media for wastewater treatment", *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, **26**(2): p. 1061-1071.
- [4] M. A. Abedinzadegan Abdi, J. Jing Cai, and K. Hawboldt (2019) "CO<sub>2</sub> Capture by Dual Hollow

صنایع غذایی

- هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) به روش آسیاکاری مکانیکی و مقایسه آن با روش سل-ژل"، فصلنامه نانومواد، شماره ۱۲، ۲۴۸-۲۵۸.
- [22] E. Saljoughi, M. Amirilargani, and T. Mohammadi, (2009) "Effect of poly (vinyl pyrrolidone) concentration and coagulation bath temperature on the morphology, permeability, and thermal stability of asymmetric cellulose acetate membranes", Journal of Applied Polymer Science, **111**(5): p. 2537-2544.
- [23] E. Saljoughi, M. Sadrzadeh, and T. Mohammadi, (2009) "Effect of preparation variables on morphology and pure water permeation flux through asymmetric cellulose acetate membranes", Journal of Membrane Science, 2009. **326**(2): p. 627-634.
- [24] E. Saljoughi, and S. M. Mousavi (2012), "Preparation and characterization of novel polysulfone nanofiltration membranes for removal of cadmium from contaminated water". Journal of Separation and purification technology, **90**: p. 22-30.
- [25] V. Ghaffarian, S. M. Mousavi, M. Bahreini, and H. Jalaei (2014), "Polyethersulfone/poly (butylene succinate) membrane: Effect of preparation conditions on properties and performance", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, **20**(4): p. 1359-1366.
- Journal of Industrial and Engineering Chemistry, **20**(5): p. 3134-3140.
- [15] J. C. Mierzwa, V. Arieta, M. Verlage, J. Carvalho, and C. D. Vecitis (2013) "Effect of clay nanoparticles on the structure and performance of polyethersulfone ultrafiltration membranes". Journal of Desalination, **314**: p. 147-158.
- [16] A. Razmjou, A. Resosudarmo, R. Holmes, H. Li, J. Mansouri, and V. Chen, (2012) "The effect of modified  $\text{TiO}_2$  nanoparticles on the polyethersulfone ultrafiltration hollow fiber membranes". Journal of Desalination, **287**: p. 271-280.
- [17] Z. Rahimi, A. A. Zinatizadeh, and S. Zinadini, Preparation and characterization of a high antibiofouling ultrafiltration PES membrane using OCMCS- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  for application in MBR treating wastewater. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 2014. **1**(1): p. 13-17.
- [18] P. Bahmani, A. Maleki, H Daraei, M Khamforoush, S. A. Athar, F. Gharibi, (2018), "Fabrication and characterization of novel polyacrylonitrile/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ultrafiltration mixed-matrix membranes for nitrate removal from aqueous solutions", Journal of Molecular Liquids, **271**: p. 557-570.
- [19] E. Roy, S. Patra, R. Madhuri, P. Sharma, (2016), "A single solution for arsenite and arsenate removal from drinking water using cysteine@ $\text{ZnS}:\text{TiO}_2$  nanoparticle modified molecularly imprinted biofouling-resistant filtration membrane". Chemical Engineering Journal, **304**: p. 259-270.
- [20] Y. Tan, P. S. Goh, A. F. Ismail, B. C. Ng, and G. S. Lai, (2017), "Decolourization of aerobically treated palm oil mill effluent (AT-POME) using polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane incorporated with coupled zinc-iron oxide nanoparticles", Chemical Engineering Journal, **308**: p. 359-369.
- [۲۱] اسماعیل کوهستانیان، علی اصغر روحانی و ایمان فرح بخش (۱۳۹۱)، "سنتر نانو ساختارهای اکسید آهن

# Preparation and characterization of modified poly (ether sulfone)/hematite iron oxide nano particles ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ultrafiltration membranes: food industrial wastewater treatment

Majid Estarabadi<sup>1</sup>, Maryam Omidvar<sup>1,\*</sup>, Esmail Koohestanian<sup>2</sup>, Zahra Hejri<sup>1</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran

2. Department of Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

---

## ABSTRACT

In this research, new polyethersulfone ultrafiltration membranes was prepared via phase inversion technique. polyethersulfone was used as a polymer, hematite iron oxide nanoparticles ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) as an additive, polyvinylpyrrolidone as a pore former, 1-methyl-2-pyrrolidone as a solvent, in preparation of the casting solutions and the distilled water as a gelation media. The effect of nanoparticles concentration (0, 0.25, 0.75 and 1 wt. %) was studied on the membrane characteristics, including membrane morphology, contact angle, pure water flux and the food industrial wastewater treatment. According to the results, increasing the concentration of the iron oxide nanoparticles from 0 to 0.75 wt. % led to the improved membranes with a higher thickness, a more porous structure in the sublayer, and a higher hydrophilicity and pure water flux. In the membrane containing 0.75 wt% hematite iron oxide nanoparticles, the contact angel decreased from  $65.79 \pm 2.36$  to  $35.19 \pm 1.38$  and pure water flux increased from 33.09 l/m<sup>2</sup>h to 53.98 l/m<sup>2</sup>h at pressure of 5 bar. The membrane performed well in rejecting the wastewater contaminants.

---

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: December 25, 2019

Received in revised form: June 14, 2020

Accepted: July 15, 2020

---

Key words:

Ultrafiltration membrane  
Polyethersulfone  
hematite iron oxide  
nanoparticles  
wastewater treatment.

\* Corresponding author

Email: [omidvar\\_qu@yahoo.com](mailto:omidvar_qu@yahoo.com)/

[momidvar@iauu.ac.ir](mailto:momidvar@iauu.ac.ir)

---

All right reserved.