

آماده‌سازی و بذرنشانی توری فولادی ضد زنگ جهت ساخت غشای مس فریت برای جداسازی آب و نرمال-هگزان

هاله مهدوی ثابت و رضا نوروزبیگی*

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ آخرین تغییرات: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

چکیده

این پژوهش به بررسی و مقایسه دو رویکرد مجزا در آماده‌سازی و بذرنشانی توری فولادی ضدزنگ پرداخته است، که به عنوان مراحل کلیدی در دستیابی به غشای توری پوشش دهی شده با مس فریت جهت جداسازی آب و نرمال-هگزان محسوب می‌شوند. در ابتدا، با بهره‌گیری از طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان، شرایط بهینه دو روش بذرنشانی شامل غوطه‌وری و اکسایش حرارتی تعیین گردید. روش غوطه‌وری پس از آماده‌سازی سطح با شست و شو و حکاکی شیمیایی انجام شده، در حالی که روش اکسایش حرارتی پس از آماده‌سازی سطح با صیقل‌دهی به کار گرفته شده است. سپس با فرض استفاده از روش شست و شو، حکاکی شیمیایی/غوطه‌وری و طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان، شرایط بهینه مربوط به پوشش دهی مس فریت بر روی توری فولادی شامل غوطه‌ورسازی توری فولادی بذرنشانی شده در محلول حاوی مس نیترات و آهن نیترات با نسبت مولی ۰/۵، همراه با آمونیاک (pH = ۱۰)، به روش هیدروترمال در دمای ۱۳۰ °C به مدت ۱۲ ساعت و کلسینه شدن در دمای ۸۰۰ °C به مدت ۶ ساعت حاصل گردید. در نهایت، با به کارگیری شرایط بهینه پوشش دهی مس فریت، دو آزمایش با مقادیر بهینه هر یک از روش‌های بذرنشانی انجام گردید و به این ترتیب غشای توری به دست آمده با پوشش مس فریت که به روش شست و شو، حکاکی شیمیایی/غوطه‌وری آماده سازی و بذرنشانی شده بود، مطلوب‌ترین عملکرد را در تشکیل پوشش یکنواخت و قابلیت جداسازی بالا به اثبات رساند. شرایط بهینه بذرنشانی این نمونه، شامل ترکیب بذرلایه مس اکسید، مدت زمان غوطه‌وری ۶۰ دقیقه و بذرلایه تک مرحله‌ای است. توری ساخته شده دارای خاصیت آب دوستی با راندمان جداسازی بیش از ۹۹/۹٪، شار نفوذ ۳۱۸۹۸ L/m²h و زاویه تماس قطره روغن زیر آب معادل ۱۴۲ درجه می‌باشد. این نتایج در مقایسه با مطالعات پیشین، بهبود قابل توجهی در یکنواختی پوشش، شار و بازدهی جداسازی نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: توری فولادی ضد زنگ، بذرلایه مس اکسید، پوشش مس فریت، جداسازی آب و روغن، خاصیت آب دوستی.

مقدمه

آب شناخته می‌شوند. منسوجات و الیاف پارچه‌ای، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر وزن پایین، هزینه تولید اقتصادی و قابلیت تجدیدپذیری زیست‌محیطی، در کاربردهای صنعتی مرتبط با جداسازی فازهای مایع، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. افزون بر این، غشاهای پلیمری به واسطه ساختار و خصوصیات سطحی منحصر به فرد خود، قابلیت بالایی در مدیریت امولسیون‌های پیچیده و جداسازی قطرات بسیار ریز روغن یا آب از فاز پیوسته نشان می‌دهند. همچنین، سیستم‌های جذب‌محور شامل ذرات ریز، پودرهای جاذب و سازه‌های متخلخل سه بعدی، از طریق مکانیسم جذب انتخابی یکی از فازها، فرایند جداسازی را تسهیل می‌کنند.

این دسته از مواد به واسطه کارایی بالا و سادگی در به کارگیری، در حوزه جداسازی آب و روغن مورد استقبال قرار گرفته‌اند. با این حال، ظرفیت جذب به نسبت محدود و هزینه‌های بالای تولید از جمله محدودیت‌هایی هستند که کارایی عملیاتی آن‌ها را در مقیاس صنعتی با چالش‌هایی همراه ساخته‌اند. در کاربردهای صنعتی، انتخاب مؤثرترین روش برای جداسازی فازهای آب و روغن مستلزم بررسی جامع عواملی همچون ویژگی‌های ترشوندگی سطح، پایداری مکانیکی، هزینه‌های اجرایی و سازگاری با شرایط محیطی خاص است؛ ارزیابی هم‌زمان این معیارها، دستیابی به عملکرد بهینه جداسازی را امکان‌پذیر می‌سازد. غشاهای پاسخ‌گو به تحریکات خارجی^۱، به عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته در فناوری‌های نوین، قابلیت تغییر در ویژگی‌های سطحی خود را در واکنش به محرک‌هایی نظیر تابش نور، تغییرات دما، نوسانات pH و نیز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دارا هستند [۵]. این دسته از غشاهای هوشمند، بسته به نوع تحریک اعمال شده، قادرند ویژگی‌هایی چون اندازه حفره، بار سطحی و درجه ترشوندگی را به صورت دینامیک تنظیم کنند؛ ویژگی‌ای که امکان جداسازی انتخابی و واکنش‌پذیر

جداسازی مخلوط آب و روغن و همچنین امولسیون آن، به عنوان یک چالش مهم، نقشی اساسی در رفع مشکلات مرتبط با پساب‌های روغنی ایفا می‌کند [۱]. پساب‌های نفتی حاصل از فرآیندهای صنعتی، به دلیل برخورداری از ترکیباتی که به سختی از طریق فرآیندهای بیوشیمیایی تجزیه می‌شوند، قادرند آسیب‌های جدی و غیرقابل جبران به جوامع انسانی وارد کنند [۲]. همچنین، اندازه بسیار کوچک قطرات نفت در مقیاس میکرومتری، جداسازی آن‌ها از این نوع پساب‌ها را با پیچیدگی‌های بیشتری همراه می‌کند. برای تصفیه آب با رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، روش‌های سنتی صاف کردن مایع نظیر گرانش، جذب، کف‌گیری، انعقاد و اکسایش بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با این حال، این روش‌ها با چالش‌های متعددی از جمله پیچیدگی در عملیات، بازدهی پایین، مصرف زیاد انرژی، ایجاد آلودگی ثانویه و موارد مشابه روبه‌رو هستند که نمی‌توانند نیازهای مرتبط با صرفه‌جویی در انرژی و حفاظت از محیط زیست را برآورده کنند [۳، ۱]. جداسازی غشایی، به دلیل سهولت کاربرد و عملکرد مطلوب، به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها در تصفیه پساب شناخته می‌شود [۲، ۱]. بر اساس ویژگی‌های ترشوندگی، مواد مورد استفاده در جداسازی روغن از آب را می‌توان به طور کلی در دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: مواد فیلترکننده و مواد جاذب [۴]. مواد مبتنی بر عملکرد صاف کردن، از جمله توری‌های فلزی، الیاف نساجی و غشاهای پلیمری، با بهره‌گیری از ترشوندگی منحصر به فرد سطح، عبور انتخابی یکی از فازهای مایع (آب یا روغن) را امکان‌پذیر ساخته و به این ترتیب، جداسازی مؤثر دو فاز را تسهیل می‌کنند. در میان انواع مختلف مواد صاف کردن، توری‌های فلزی به دلیل برخورداری از استحکام مکانیکی بالا و قابلیت عبور سیال با شار زیاد، به عنوان گزینه‌ای مناسب و کارآمد در کاربردهای جداسازی روغن از

با توجه به نقش تعیین‌کننده ساختار و ویژگی‌های سطحی غشا در عملکرد جداسازی، بررسی عوامل مؤثر بر این ویژگی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این میان، ضخامت پوشش اعمال شده بر سطح غشا به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی مطرح می‌باشد. ضخامت پوشش تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌هایی مانند اندازه مؤثر حفره‌ها، زبری سطح، ترشوندگی و شار عبوری سیال دارد [۷ و ۸]. افزایش ضخامت به طور معمول با کاهش اندازه حفره و افزایش زبری همراه است که می‌تواند موجب بهبود ترشوندگی و ارتقاء بازده جداسازی شود. با این حال، در صورت افزایش بیش از حد، احتمال انسداد نسبی منافذ، کاهش شار عبوری و افت عملکرد کلی وجود دارد. همچنین، ضخامت مناسب می‌تواند پایداری مکانیکی پوشش را افزایش داده و دوام عملکردی غشا را در شرایط عملیاتی دشوار تضمین کند. بر اساس مطالعه چن و همکاران، ضخامت لایه سیلیس تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های کلیدی عملکردی از جمله پایداری مکانیکی، زبری سطحی و خاصیت فوق‌آب‌گریزی دارد [۷]. در این پژوهش، با تنظیم زمان فرآیند رسوب دهی بخار شیمیایی به عنوان عامل کنترل ضخامت، توانستند بازده جداسازی مطلوب و پایداری عملکردی قابل قبول را حتی پس از چندین چرخه استفاده مداوم حفظ کنند. با این حال، نتایج همچنین نشان داد که افزایش بیش از حد ضخامت، باعث کاهش شفافیت پوشش و افت شار عبوری سیال می‌شود، در حالی که ضخامت ناکافی منجر به کاهش زبری سطح و تضعیف خاصیت ترشوندگی انتخابی شده و عملکرد جداسازی را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. در مطالعه‌ای توسط سولومون و همکاران، اثر ساختاری غشاهای سلسله مراتبی بر جداسازی نانومولسیون‌های آب و روغن بررسی شد [۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش ضخامت لایه فعال جداساز ضمن حفظ بازده جداسازی، منجر به افزایش قابل توجه شار

در مواجهه با شرایط محیطی مختلف را فراهم می‌سازد. غشاهای نامتقارن^۱، به واسطه برخورداری از دو رفتار ترشوندگی مجزا در سطوح مخالف خود، قادرند شرایط لازم برای عبور انتخابی یکی از فازهای مایع را فراهم سازند. این ویژگی، آن‌ها را به گزینه‌ای کارآمد برای جداسازی هدفمند آب و روغن در کاربردهای صنعتی و محیطی تبدیل کرده است. جداسازی دو مایع از دیدگاه شیمیایی جداسازی دو مایع از منظر شیمیایی بر پایه تفاوت در ویژگی‌های مولکولی و نیروهای بین‌مولکولی آن‌ها استوار است [۶]. یکی از عوامل کلیدی در این پدیده، قطبیت مولکولی است؛ به طوری که مایعات قطبی نظیر آب تمایل دارند با سایر ترکیبات قطبی برهم‌کنش برقرار کنند، در حالی که مایعات غیرقطبی مانند روغن، تنها با ترکیبات غیرقطبی امتزاج‌پذیرند. این تفاوت در ماهیت شیمیایی موجب می‌شود که دو مایع با قطبیت متفاوت، به‌طور طبیعی از یکدیگر جدا شوند. در کنار آن، نیروهای بین‌مولکولی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. مایعات قطبی عمدتاً از طریق پیوندهای هیدروژنی پایدار با یکدیگر برهم‌کنش دارند، در حالی که در مایعات غیرقطبی، برهم‌کنش‌ها عمدتاً از نوع نیروهای واندروالسی است. این ناهمگونی در نوع و شدت برهم‌کنش‌ها منجر به ناسازگاری انرژی سطحی شده و به افزایش تمایل به تفکیک فازی کمک می‌کند. از منظر ترمودینامیکی نیز، زمانی که انرژی آزاد گیبس مخلوط‌سازی دو مایع مثبت باشد، سیستم به طور ذاتی به جداسازی گرایش دارد. این وضعیت زمانی رخ می‌دهد که برهم‌کنش میان مولکول‌های ناهم‌نوع (مثلاً آب و روغن) ضعیف‌تر از برهم‌کنش میان مولکول‌های هم‌نوع باشد. در مجموع، تفاوت در قطبیت، نوع نیروهای بین‌مولکولی و شرایط ترمودینامیکی، مبنای شیمیایی جداسازی دو مایع را تشکیل می‌دهد و پایه‌گذار طراحی سیستم‌های جداسازی مؤثر نظیر غشاهای ویژه آب-روغن محسوب می‌شود.

غشاهای توری برای جداسازی فازهای آب و روغن صورت گرفته که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ساختارها در کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی است. لی و همکارانش، به ساخت سطح فوق روغن‌گریز/فوق آب دوست ترکیب نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و فلئوروسورفکتانت اصلاح شده با اجزای دارای خاصیت قطبی جهت بهبود عملکرد سطحی پرداخته‌اند [۱۲]. پوشش اعمال‌شده بر روی توری فولادی ضد زنگ، عملکرد مؤثر خود در جداسازی سامانه‌های دو فازی غیرقابل امتزاج آب و روغن را نشان می‌دهد؛ در حالی که پوشش اعمال شده بر روی پنبه، توانایی جداسازی هر دو نوع امولسیون پایدار شده با سورفکتانت، شامل امولسیون‌های روغن در آب و آب در روغن، را نیز داراست. از توری فولادی پوشش دهی شده برای جداسازی دی‌کلرواتان، روغن دانه سویا، دیزل و هگزادکان با بازدهی جداسازی بیش از ۹۹٪ و میزان روغن باقی‌مانده ۳۵ mg/L الی ۴۰ mg/L استفاده شده است. زاویه تماس استاتیک قطره روغن و قطره آب بر روی غشای توری به ترتیب بیش از ۱۵۰° و به طور تقریبی ۰° اندازه‌گیری شده است. گو و همکارانش، سطح فوق آب دوست پوشش سیمان بر روی توری فولادی ضد زنگ را به روش غوطه‌وری جهت جداسازی آب و روغن آماده سازی کرده‌اند [۱۳]. زاویه تماس استاتیک روغن در محیط آبی برای سطح ساخته شده ۲۰ ± ۱۵۹° اندازه‌گیری شده است. همچنین، این سطح دارای بازدهی ۹۰٪، شار جداسازی ۳۳۹۷ L/m² h و پایداری شیمیایی در محیط با pH در محدوده ۴ الی ۱۲ و مقاوم در برابر خوردگی می‌باشد. زاویه تماس استاتیک آب و روغن بر روی سطح توری استیل ضد زنگ بدون پوشش به ترتیب برابر با ۵۵/۴۳° و ۰° در هوا اندازه‌گیری شده است. بنابراین توری دارای خاصیت آب دوستی و روغن دوستی در هوا و روغن‌گریزی در آب می‌باشد. در حالی که، زاویه تماس استاتیک آب و روغن در آب برای توری پوشش داده شده به ترتیب برابر با ۰° و

عبوری می‌شود؛ در حالی که ضخامت بیش از حد می‌تواند مقاومت هیدرولیکی غشا را افزایش داده و عملکرد کلی غشا را محدود کند. این یافته‌ها بر اهمیت بهینه سازی ضخامت لایه جداساز برای دستیابی به تعادل مطلوب میان نفوذپذیری، انتخاب‌پذیری و پایداری مکانیکی تأکید دارند. از این رو، علاوه بر ضخامت پوشش که به طور مستقیم بر ساختار و خواص سطحی غشا اثر می‌گذارد، سایر پارامترهای ساختاری و عملیاتی نیز در تعیین شار عبوری نقش دارند. شار عبوری در غشاهای جداساز آب و روغن تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل ساختاری، سطحی و عملیاتی قرار دارد [۹ و ۱۰]. ساختارهای با تخلخل بالا، حفره‌های یکنواخت و زبری سطح مناسب می‌توانند مسیر عبور سیال را تسهیل کرده و شار را افزایش دهند. ویژگی‌های سطحی مانند ترشوندگی انتخابی نیز با جلوگیری از چسبندگی فاز ناخواسته، موجب کاهش گرفتگی و پایداری عملکرد می‌گردند. از منظر عملیاتی، افزایش فشار گذر و دمای خوراک در صورت حفظ پایداری غشا، می‌تواند با کاهش ویسکوزیته سیال و افزایش نیروی محرکه، بازدهی و شار جداسازی را بهبود بخشد. پس از بررسی عوامل مؤثر بر شار عبوری، لازم است به مکانیسم‌های انتقال درون غشا پرداخته شود تا ارتباط ساختار و عملکرد به صورت جامع‌تر تبیین گردد. مکانیسم عبوردهی در غشاهای جداسازی بسته به ساختار غشا متفاوت است [۱۱]. در غشاهای متخلخل، عبور سیال به طور عمده از طریق جریان حجمی یا نفوذ نادرین انجام می‌شود و به پارامترهایی مانند اندازه حفره و خواص سطحی وابسته است. در مقابل، در غشاهای غیر متخلخل، مکانیسم غالب حل‌شدن-پخش‌شدن است که طی آن مولکول‌های سیال ابتدا در غشا جذب و سپس از آن عبور می‌کنند. عواملی نظیر فشار گذر، ضخامت لایه فعال، ترشوندگی و دما نقش کلیدی در کنترل این فرآیند دارند. تاکنون، مطالعات بسیاری در زمینه بهره‌گیری از

و پس از گذشت ۱۰ ثانیه به پایداری رسیده است و زاویه تماس استاتیک آب ۱۰۹° اندازه‌گیری شده است. در حالی که، قطره آب بر روی سطح دارای پوشش پس از گذشت ۳۴ ms بر روی سطح پخش گردیده و زاویه تماس استاتیک آب به ۰° رسیده است که نشان دهنده خاصیت فوق آب دوستی سطح ساخته شده می‌باشد. بر اساس مطالعات ولایی و همکارانش، فیلم فوق آب گریز نانوکامپوزیت روی اکسید/مس اکسید بر روی توری‌های فولادی ضد زنگ به روش غوطه‌وری در محلول به منظور استفاده در جداسازی ترکیب کلروفرم و آب (با درصد حجمی برابر) آماده سازی گردیده است [۱۵]. زاویه تماس استاتیک آب و پسماند زاویه تماس فیلم‌های نانوساختار مس اکسید/روی اکسید بر روی توری‌های فولادی ضد زنگ به ترتیب ۱۵۴/۶±۳ درجه و ۳/۵ گزارش شده است. همچنین به علت خاصیت دفع بالای آب توسط توری‌ها، بازدهی فرآیند جداسازی آب و کلروفرم بالاتر از ۹۰٪ به دست آمده است. شایسته و همکارانش، به ساخت نانوسیم‌های نیکل مغناطیسی با ساختار میکرو/نانو ساختار تیغ دار به روش هیدروترمال به منظور جداسازی آب و روغن به همراه اصلاح سطح توسط اکتا دسیل تری کلروسیلان دارای خاصیت فوق آب گریزی با زاویه تماس استاتیک آب و روغن به ترتیب با مقادیر ۱۶۹/۱۷ درجه و ۰° پرداخته‌اند [۱۶]. ظرفیت جذب این نانوساختارها برای طیف وسیعی از حلال‌های آلی و روغن‌ها در محدوده ۳/۸۶ الی ۵/۲۷ (g/g) گزارش شده است. ساخت پوشش نانوذرات کبالت اکسید بر روی توری فولادی ضد زنگ با استفاده از روش‌های رسوب دهی و اسپری کردن به منظور جداسازی آب و روغن توسط بیگ و همکارانش انجام گردیده است [۱۷]. ۳/۵ گزارش شده است. همچنین به علت خاصیت دفع بالای آب توسط توری‌ها، بازدهی فرآیند جداسازی آب و کلروفرم بالاتر از ۹۰٪ به دست آمده است. شایسته و همکارانش، به ساخت نانوسیم‌های نیکل مغناطیسی با ساختار میکرو/

۱۵۹° است که نشان دهنده خاصیت فوق آب دوستی و فوق روغن‌گریزی در آب روی سطح توری پس از پوشش دهی می‌باشد. سطح فوق آب دوست مقاوم با خاصیت ضد رسوب روغن اکسید کبالت منگنز بر روی توری فولادی ضد زنگ به روش هیدروترمال توسط ژانگ و همکارانش جهت جداسازی آب و روغن ساخته شده است [۱۴]. میکروساختار ساخته شده با جذب قوی آب حاکی از خاصیت فوق آب دوستی و فوق روغن‌گریزی سطح در آب و بازدهی جداسازی بالای آب و روغن می‌باشد. سطح ساخته شده دارای بازدهی جداسازی آب و روغن بیش‌تر از ۹۹٪ و شار جداسازی بیش از ۶۳ L/m² در ثانیه با پایداری مکانیکی و شیمیایی است. قطره آب بر روی سطح بدون پوشش به آهستگی پخش شده و پس از گذشت ۱۰ s به پایداری رسیده است و زاویه تماس استاتیک آب ۱۰۹° اندازه‌گیری شده است. در حالی که، قطره آب بر روی سطح دارای پوشش پس از گذشت ۳۴ ms بر روی سطح پخش گردیده و زاویه تماس استاتیک آب به ۰° رسیده است که نشان دهنده خاصیت فوق آب دوستی سطح ساخته شده می‌باشد. بر اساس مطالعات ولایی و همکارانش، فیلم فوق آب گریز نانوکامپوزیت روی اکسید/مس اکسید بر روی توری‌های فولادی ضد زنگ به روش غوطه‌وری در محلول به منظور استفاده در جداسازی ترکیب کلروفرم و آب (با درصد حجمی برابر) آماده سازی گردیده است [۱۵]. زاویه تماس استاتیک آب و پسماند زاویه تماس فیلم‌های نانوساختار مس اکسید/روی اکسید بر روی توری‌های فولادی ضد زنگ به ترتیب ۱۵۴/۶±۳ درجه و میکروساختار ساخته شده با جذب قوی آب حاکی از خاصیت فوق آب دوستی و فوق روغن‌گریزی سطح در آب و بازدهی جداسازی بالای آب و روغن می‌باشد. سطح ساخته شده دارای بازدهی جداسازی آب و روغن بیش‌تر از ۹۹٪ و شار جداسازی بیش از ۶۳ L/m² در ثانیه با پایداری مکانیکی و شیمیایی است. قطره آب بر روی سطح بدون پوشش به آهستگی پخش شده

نانو ساختار تیغ‌دار به روش هیدروترمال به منظور جداسازی آب و روغن به همراه اصلاح سطح توسط اکتادسیل تری کلروسیلان دارای خاصیت فوق آب‌گریزی با زاویه تماس استاتیک آب و روغن به ترتیب با مقادیر ۱۶۹/۱۷ درجه و ۰° پرداخته‌اند [۱۶]. ظرفیت جذب این نانوساختارها برای طیف وسیعی از حلال‌های آلی و روغن‌ها در محدوده ۳/۸۶ الی ۵/۲۷ g/g گزارش شده است. ساخت پوشش نانوذرات کبالت اکسید بر روی توری فولادی ضد زنگ با استفاده از روش‌های رسوب دهی و اسپری کردن به منظور جداسازی آب و روغن توسط بیگ و همکارانش انجام گردیده است [۱۷]. سطح به‌دست آمده دارای خاصیت فوق آب‌دوستی در هوا با زاویه تماس استاتیک آب ۰° و خاصیت فوق روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس استاتیک روغن ۱۶۰° و بازدهی جداسازی آب و روغن بیش از ۹۹/۹٪ اندازه‌گیری شده است. ین و همکارانش به ساخت غشای توری فولادی ضد زنگ با پوشش نانولوله‌های کربنی به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار دارای خاصیت آب‌دوستی/روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس استاتیک روغن زیر آب بیش از ۱۵۰° پرداخته‌اند [۱۸]. شار عبوری آب از این غشا برابر با $10639 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ و بازدهی جداسازی آب و دی کلرومتان بیش از ۹۸/۸۹٪ به دست آمده است. ساخت غشای توری فولادی ضد زنگ با پوششی از نانوساختارهای گل مانند از فسفات فلزی به روش خودآرایی القا شده با استفاده خوردگی در محل توسط سان و همکارانش انجام گردیده است [۱۹]. غشای ساخته شده دارای خاصیت روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس روغن بیش از ۱۵۰° بوده که برای جداسازی روغن از پساب‌ها شامل مخلوط امتزاج ناپذیر آب و روغن، امولسیون آب و روغن و روغن‌های شناور مورد استفاده قرار گرفته است. بازدهی جداسازی امولسیون آب و روغن‌های نرمال هگزان، اتر نفتی، دیزل، روغن دانه سویا و نفت خام ۹۹٪ گزارش شده است. همچنین شار سیال عبوری برابر با L

$79,942/5 \text{ m}^2\cdot\text{h}$ می‌باشد. توری فولادی ضد زنگ با پوشش تیتانیوم اکسید به روش سل ژل و اسپری کردن توسط شو و همکارانش ساخته شده است [۲۰]. این سطح دارای خاصیت فوق آب‌دوستی در هوا و فوق روغن‌گریزی در آب به ترتیب با زاویه تماس استاتیک آب و روغن برابر با ۵° و بیش از ۱۵۰° است. از این غشا در جداسازی روغن با اندازه قطرات بزرگ‌تر و برابر با $10 \mu\text{m}$ از امولسیون آب و روغن استفاده شده است. شار سیال عبوری برای مش ۲۰۰ و ۶۰۰ به ترتیب برابر با $3/6 \times 10^4 \text{ L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ و $3/1 \times 10^4 \text{ L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ و بازدهی جداسازی بیش از ۹۵٪ حاصل شده است. لی و همکارانش به ساخت پوشش فیلم کامپوزیتی پلی دوپامین و مس بر روی توری فولادی ضد زنگ به روش رشد در محل پرداخته‌اند [۲۱]. سطح ساخته شده به وسیله سدیم اکتادسیل دی تیول کربومات اصلاح گردیده و سطحی با خاصیت فوق آب‌گریزی به دست آمده است. شار سیال عبوری در جداسازی آب و روغن‌های کروسن، کلروفرم و نرمال هگزان به ترتیب برابر با مقادیر $44052 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ و $53810 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ ، $26241 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ است. زاویه تماس استاتیک آب بر روی این سطح بزرگ‌تر از $151/5^\circ$ و بازدهی جداسازی آن بیش از ۹۶/۲٪ به دست آمده است. در مطالعه شیانگ و همکارانش، یک پوشش ترکیبی میکرو-نانوساختار از آلیاژ روی/نیکل تقویت‌شده با نانوذرات روی اکسید با موفقیت بر روی توری فولادی ضد زنگ ۳۰۴ ساخته شد [۲۲]. این پوشش با استفاده از فرآیند هم‌افزایی الکترولیز و اصلاح شیمیایی و بر پایه نظریه کسی-باکستر طراحی شد تا انرژی سطحی بهینه شود. سطح به دست آمده دارای خاصیت فوق آب‌گریزی با زاویه تماس استاتیک آب ۱۶۴°، بازدهی جداسازی آب و کلروفرم برابر با ۹۷/۳٪ و شار سیال عبوری $6413 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ است. بر اساس پژوهش یو و همکارانش، توری مسی با پوشش نیکل-کبالت و ویژگی فوق آب‌گریزی با استفاده از الکترولیز جریان ثابت و اصلاح سطح با محلول

نانو ساختار تیغ‌دار به روش هیدروترمال به منظور جداسازی آب و روغن به همراه اصلاح سطح توسط اکتادسیل تری کلروسیلان دارای خاصیت فوق آب‌گریزی با زاویه تماس استاتیک آب و روغن به ترتیب با مقادیر ۱۶۹/۱۷ درجه و ۰° پرداخته‌اند [۱۶]. ظرفیت جذب این نانوساختارها برای طیف وسیعی از حلال‌های آلی و روغن‌ها در محدوده ۳/۸۶ الی ۵/۲۷ g/g گزارش شده است. ساخت پوشش نانوذرات کبالت اکسید بر روی توری فولادی ضد زنگ با استفاده از روش‌های رسوب دهی و اسپری کردن به منظور جداسازی آب و روغن توسط بیگ و همکارانش انجام گردیده است [۱۷]. سطح به‌دست آمده دارای خاصیت فوق آب‌دوستی در هوا با زاویه تماس استاتیک آب ۰° و خاصیت فوق روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس استاتیک روغن ۱۶۰° و بازدهی جداسازی آب و روغن بیش از ۹۹/۹٪ اندازه‌گیری شده است. ین و همکارانش به ساخت غشای توری فولادی ضد زنگ با پوشش نانولوله‌های کربنی به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار دارای خاصیت آب‌دوستی/روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس استاتیک روغن زیر آب بیش از ۱۵۰° پرداخته‌اند [۱۸]. شار عبوری آب از این غشا برابر با $10639 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ و بازدهی جداسازی آب و دی کلرومتان بیش از ۹۸/۸۹٪ به دست آمده است. ساخت غشای توری فولادی ضد زنگ با پوششی از نانوساختارهای گل مانند از فسفات فلزی به روش خودآرایی القا شده با استفاده خوردگی در محل توسط سان و همکارانش انجام گردیده است [۱۹]. غشای ساخته شده دارای خاصیت روغن‌گریزی زیر آب با زاویه تماس روغن بیش از ۱۵۰° بوده که برای جداسازی روغن از پساب‌ها شامل مخلوط امتزاج ناپذیر آب و روغن، امولسیون آب و روغن و روغن‌های شناور مورد استفاده قرار گرفته است. بازدهی جداسازی امولسیون آب و روغن‌های نرمال هگزان، اتر نفتی، دیزل، روغن دانه سویا و نفت خام ۹۹٪ گزارش شده است. همچنین شار سیال عبوری برابر با L

پروپیل تری متوکسی سیلان، مس، با بهره‌گیری از روش رسوبدهی شیمیایی به عنوان کاتالیست صورت گرفته است [۲۸]. تولید نانوکامپوزیت سیلیس، مس فریت و نانولوله‌های کربنی چنددیواره به روش‌های رسوبدهی شیمیایی و هیدروترمال، به منظور حذف جذبی رنگ‌های کاتیونی متیلن آبی^۴ و سلسنتین آبی^۵ از آب انجام شد [۲۹]. تولید پوشش آب‌گریز متشکل از نانوذرات فوتوکاتالیست مس فریت، لوریک اسید و میریستیک اسید بر روی الیاف پلی‌استر با استفاده از روش هیدروترمال، جهت بهره‌برداری از خاصیت ضدباکتریایی آن صورت پذیرفت [۳۰].

علی‌رغم پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه جداسازی آب و روغن، تاکنون کاربرد مستقیم ترکیب مس فریت به عنوان پوشش عملکردی بر روی توری‌های فولادی به طور نظام‌مند مورد بررسی قرار نگرفته است. افزون بر این، فقدان مطالعات جامع در خصوص مراحل پیش از پوشش‌دهی از جمله آماده‌سازی سطح و بذرنشانی اولیه، خلأ قابل توجهی در مسیر توسعه این فناوری ایجاد کرده که پژوهش حاضر درصدد رفع آن است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه دو رویکرد مختلف در آماده‌سازی و بذرنشانی توری فولادی ضدزنگ پیش از اعمال پوشش طراحی شده است؛ این فرآیند در راستای ساخت غشای توری با پوشش مس فریت انجام گرفته است. در ادامه، کارایی سطح حاصل شده در جداسازی مخلوط آب و نرمال هگزان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بخش تجربی

مواد

به منظور شست و شو و حکاکی شیمیایی سطح، آب مقطر یک بار تقطیر با خلوص ۱۰۰٪ از شرکت

استفازات اتانول ساخته شد [۲۳]. ساختار کروی در مقیاس میکرو و نانو، زبری لازم برای ایجاد خاصیت فوق‌آب‌گریزی با زاویه تماس استاتیک آب برابر با ۱۵۸° را فراهم کرد. شار سیال عبوری برای جداسازی آب و هگزیل هیدرید در محدوده $h^{\circ}L/m^2$ ۲۰،۰۰۰ الی $L/m^2 \cdot h$ ۶۰،۰۰۰ بوده و بازدهی جداسازی نیز بین ۹۳/۶٪ تا ۹۷/۹٪ گزارش شده است. بر اساس پژوهشی دیگر، توری مسی با پوشش نقره از طریق رسوب‌گذاری شیمیایی ساده و عملیات حرارتی ساخته شد که بدون نیاز به مواد سمی یا تجهیزات پیچیده، ویژگی‌های سطحی فوق‌العاده‌ای برای جداسازی روغن و آب ارائه می‌دهد. زاویه تماس استاتیک آب بر روی این سطح ۱۵۸° بوده و بازدهی جداسازی آب و روغن (هگزان، تولوئن، بنزن، کلروفرم، گازوئیل و...) بیش از ۹۷٪ است.

در سال‌های اخیر، نانوذرات مس فریت به عنوان یکی از مواد نوظهور در حوزه فناوری نانو، به دلیل عملکرد مؤثر در حذف آلاینده‌های آلی و معدنی از آب، مورد توجه فزاینده محققان قرار گرفته‌اند [۲۴]. نانوکامپوزیت روی اکسید، مس فریت و نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش رسوبدهی شیمیایی مرطوب به منظور حذف آلاینده‌های آلی مانند بنزوئیک اسید و رنگ کونگو قرمز با تابش نور خورشید ساخته شد [۲۵]. در تحقیقی دیگر، نانوکامپوزیتی از گرافن و مس فریت با بهره‌گیری از روش احتراق خودکار سل-ژل برای حذف آرسنیک از محلول‌های آبی تولید گردید [۲۶]. تولید غشای سرامیکی آلفا-آلومین با پوشش فریتی شامل مس فریت ($CuFe_2O_4$)، کبالت فریت ($CuFe_2O_4$) و ترکیب مس و کبالت فریت ($Co_{0.5}Cu_{0.5}Fe_2O_4$) با استفاده از روش سل-ژل، جهت حذف روغن امولسیون شده شامل سدیم دودسیل بنزن سولفونات^۱ و کروسن^۲ صورت گرفته است [۲۷]. تولید نانوکامپوزیت مغناطیسی شامل مس فریت، سیلیس، آمینو اتیل آمینو پروپیل تری متوکسی سیلان^۳، نیکل و همچنین نانوکامپوزیت مس فریت، سیلیس، آمینو اتیل آمینو

1. Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS)

2. Krosene

3. Amino Ethyl Amino Propyl Tri Methoxy Silane (AAPTMS)

4. Cationic Methylene Blue

5. Celestine Blue

نقش کلیدی در عملکرد نهایی غشا و کارایی جداسازی ایفا می‌کند [۳۱ و ۳۲]. این مرحله با حذف آلودگی‌ها، لایه‌های اکسیدی و افزایش زبری کنترل شده، موجب افزایش انرژی سطحی، بهبود چسبندگی پوشش و یکنواختی لایه نهایی می‌گردند. در نتیجه، ویژگی‌های سطحی مانند ترشوندگی انتخابی و مقاومت در برابر گرفتگی بهبود یافته و در نهایت، شار عبوری و بازده جداسازی آب و روغن افزایش می‌یابد.

سطح آب دوست غشای توری فولادی با پوشش مس فریت با انجام مراحل آماده سازی پایه، ایجاد بذرایه و لایه نشانی مس فریت بر روی آن به روش هیدروترمال حاصل گردیده است. در این راستا، ابتدا توری فولادی ضد زنگ (مش ۲۵۰) در ابعاد $2/5 \times 2/5$ cm جهت استفاده برش زده شدند. پس از آن، به منظور انجام مرحله آماده‌سازی دو روش مجزای P_1 و P_2 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش P_1 شامل مراحل شست و شوی سطح با آب مقطر و اتانول هر کدام به مدت ۲۰ min در حمام فراصوت و حکاکی شیمیایی سطح با هیدروکلریک اسید (۳۶٪) ۴ مولار است [۳۳]. و در روش P_2 از صیقل دادن سطح با سنباده سیلیکون کارباید گریت ۲۰۰۰ و شست و شوی آن با آب مقطر استفاده شده است [۳۴ و ۳۵]. در ادامه بر اساس جدول‌های ۱ و ۲، دو روش بذرنشانی شامل غوطه‌وری (S_1) و اکسایش حرارتی (S_2) به ترتیب پس از آماده‌سازی پایه به روش‌های P_1 و P_2 به کار گرفته شده‌اند. در جدول ۱، فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش غوطه‌وری (S_1) دسته‌بندی و معرفی شده‌اند. این عوامل شامل نوع ترکیب (فاکتور A)، مدت زمان غوطه‌وری (فاکتور B) و تعداد لایه‌های بذرایه (فاکتور C) هستند که به صورت مستقل در سطوح مختلف با استفاده از طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

زالال طب شیمی، اتانول با خلوص ۷۰٪ و هیدروکلریک اسید ۳۶ درصد وزنی از شرکت قطران شیمی تهیه گردیدند. اتانول با خلوص ۹۹/۸٪، روی استات و مس استات با خلوص ۹۸/۵٪ از شرکت قطران شیمی و سوربیتان مونواسترات-۶۰، سدیم دو دسیل سولفات، پلی سوربات-۸۰ و استتاریک اسید با خلوص ۹۹٪ از شرکت مرک جهت انجام بذرنشانی خریداری شدند. برای انجام سنتز و رشد مس فریت، مس نیترات سه آب و آهن نیترات با خلوص ۹۸٪ و محلول آمونیاک ۲۵ درصد وزنی از شرکت قطران شیمی، هگزامتیلن تترامین با خلوص ۹۹٪ و اوره با خلوص ۹۹٪ از شرکت مرک تهیه شدند. نرمال هگزان با خلوص ۹۹٪ و رنگ قرمز حلال در روغن از شرکت قطران شیمی خریداری شدند.

دستگاه‌های مورد استفاده

داده‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌ها توسط پراش سنج پرتو ایکس ساخت شرکت Panalytical هلند، مدل X'Pert pro، با استفاده از تابش Cu Ka فیلتر شده با نیکل ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) به دست آمد. خواص ریخت شناسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، توسط دستگاه Tescan مدل Mira-3 مجهز به یک طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس مشخص شد. ترشوندگی سطح با اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیک قطره روغن زیر آب با استفاده از روش قطره چسبیده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یک قطره روغن (هگزان) $5 \mu\text{L}$ روی سطح قرار گرفت و تصویر قطره با استفاده از میکروسکوپ نوری دیجیتال DINOLITE تایوان گرفته شد. از نرم‌افزار ImageJ با پلاگین تجزیه و تحلیل شکل قطره متقارن محوری برای تخمین زاویه تماس استفاده شد. اندازه‌گیری زاویه تماس در پنج نقطه مختلف ثبت و مقادیر میانگین گزارش شده است.

روش کار

آماده‌سازی سطح توری استیل پیش از بذرنشانی،

جدول ۱ فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش غوطه‌وری (S_1)
 Table 1 Effective parameters on seeding by immersion method (S_1)

Assigned letter	Parameter	Parameter levels	Preparation condition
A	Composition type	A ₁ : zinc oxide A ₂ : copper oxide A ₃ : zinc oxide and copper oxide composite A ₄ : copper oxide and SPAN-60 composite A ₅ : copper oxide and SDS composite A ₆ : copper oxide and Tween-80 composite	A1: 0.02 M zinc acetate and ethanol A2: 0.02 M copper acetate and ethanol A3: 0.01 M zinc acetate, 0.01 M copper acetate and ethanol A4: 0.02 M copper acetate, 0.15 g SPAN-60 and ethanol A5: 0.02 M copper acetate, 0.15 g SDS and ethanol A6: 0.02 M copper acetate, 0.15 g Tween-80 and ethanol
B	Immersion time (min)	B ₁ : 40 B ₂ : 60	-
C	Number of seed layers	C ₁ : 1 C ₂ : 2 C ₃ : 3 C ₄ : 4	-

جدول ۲ فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش اکسایش حرارتی (S_2)

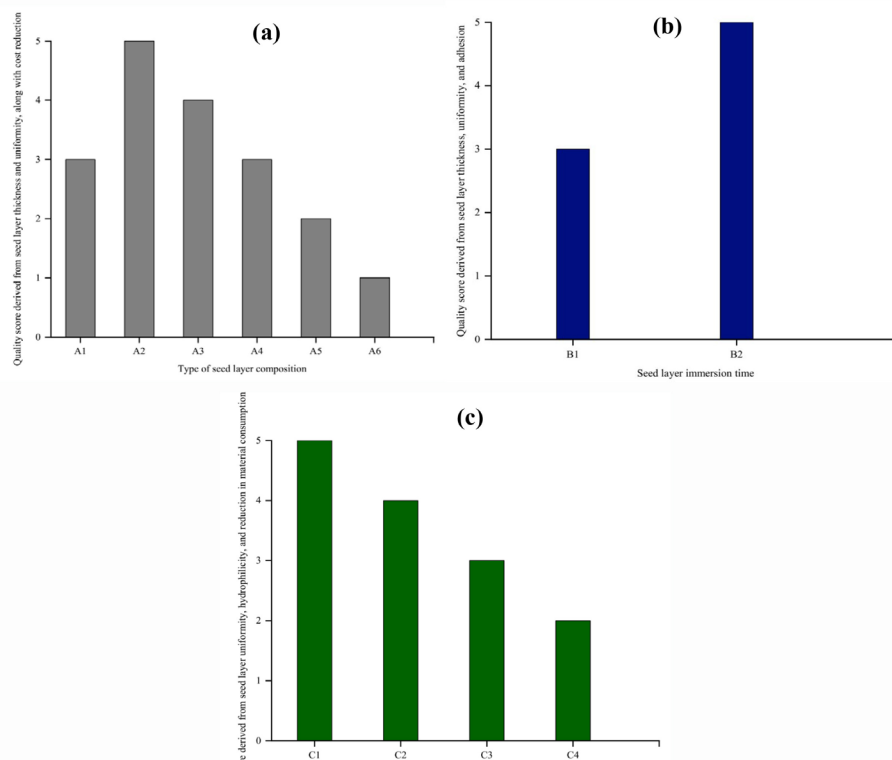
Table 2 Effective parameters on seeding by thermal oxidation method (S_2)

Assigned letter	Parameter	Parameter levels
D	Composition type	D ₁ : iron oxide D ₂ : iron oxide with chemical etching of the oxidized surface by hydrochloric acid (0.5 M) D ₃ : iron oxide with chemical etching of the oxidized surface by ammonia solution (pH=10) D ₄ : iron oxide with surface modification of the seed-deposited iron oxide by ethanol and stearic acid solution (0.05 M) D ₅ : iron oxide with chemical etching of the oxidized surface by hydrochloric acid (0.5 M), followed by surface modification with ethanol and stearic acid solution (0.05 M) D ₆ : iron oxide with chemical etching of the oxidized surface by ammonia solution (pH=10), followed by surface modification with ethanol and stearic acid solution (0.05 M)
E	Thermal oxidation temperature (°C)	E ₁ : 300 E ₂ : 400 E ₃ : 500
F	Thermal oxidation time (h)	F ₁ : 2 F ₂ : 3

را فراهم می‌سازند.

بر اساس شکل ۱، بخش‌های (a) تا (c) به ترتیب به بررسی اثر سه عامل مستقل نوع ترکیب بذرنشانی (A)، مدت زمان غوطه‌وری (B) و تعداد لایه‌های بذریلایه (C) بر شاخص عملکرد نهایی بذرنشانی می‌پردازد.

به منظور ارزیابی کمی اثر عوامل مستقل بر شاخص عملکرد بذرنشانی در روش (S_1)، نتایج حاصل از طراحی آزمایش به صورت نمودارهای میله‌ای ارائه شده‌اند. این نمودارها تغییرات میانگین امتیاز عملکرد را در پاسخ به سطوح مختلف هر عامل نشان می‌دهند و امکان مقایسه مستقیم بین عوامل



شکل ۱ مقایسه میزان اثر گذاری فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش غوطه‌وری (S_1) با استفاده از نمودار میله‌ای: (a) نوع ترکیب بذر لایه، (b) مدت زمان غوطه‌وری بذر لایه، (c) تعداد لایه‌های بذر لایه

Fig. 1 Comparison of the influence of key factors affecting seed layer deposition by immersion method (S_1) using bar charts: (a) type of Seed layer composition, (b) seed layer immersion time, (c) number of seed layers.

می‌دهد. بر این اساس، افزایش زمان غوطه‌وری موجب بهبود قابل توجه در یکنواختی و چسبندگی بذر لایه شده است. بخش (C) نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه بذر لایه (C_1) بالاترین امتیاز را به همراه داشته و با افزایش تعداد لایه‌ها، عملکرد به صورت تدریجی کاهش یافته است. لایه‌های اضافی موجب افزایش ضخامت غیر ضروری، کاهش یکنواختی و افت خاصیت آب دوستی سطح شده‌اند. بنابراین، استفاده از یک لایه بذر لایه به عنوان گزینه بهینه توصیه می‌شود.

در نهایت، ترکیب مس اکسید با مدت زمان غوطه‌وری ۶۰ min و تعداد یک لایه بذر لایه به عنوان شرایط بهینه در روش بذرنشانی غوطه‌وری (S_1) انتخاب گردیدند. لازم به ذکر است، پس از انجام فرآیند بذرنشانی با این روش، توری فولادی در دمای 400°C به مدت ۲ h در کوره کلسینه گردید [۳۳].

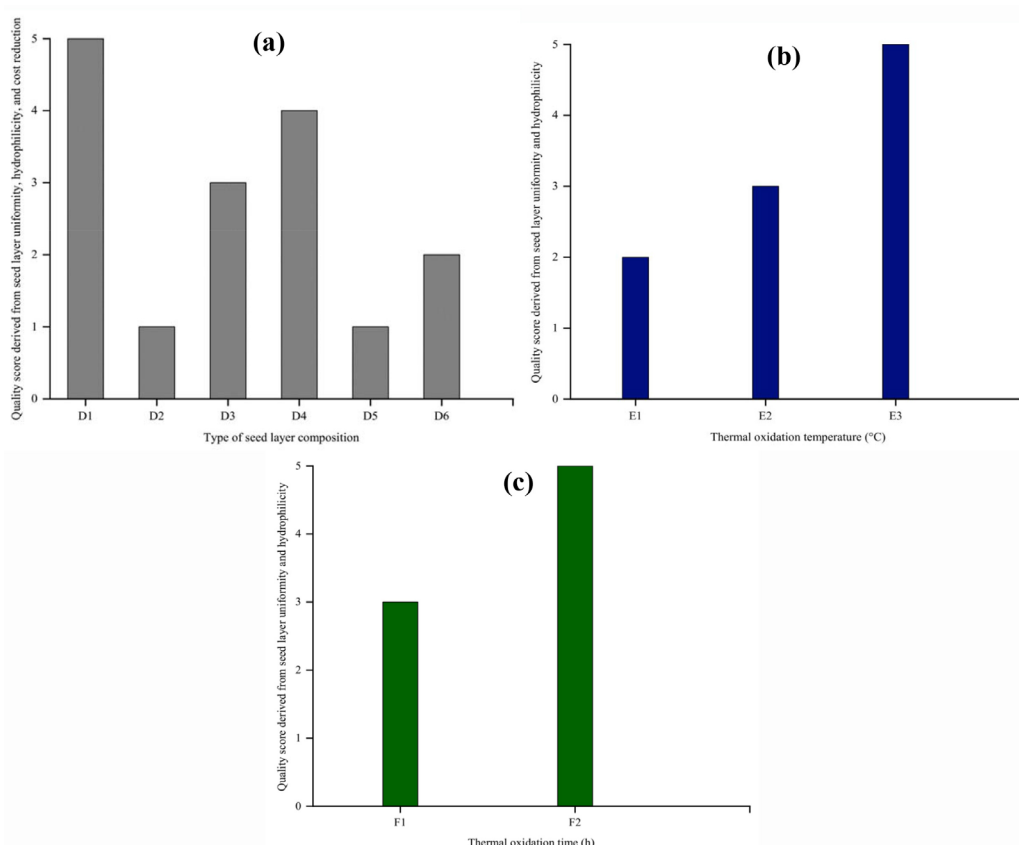
شاخص عملکرد بر اساس سه معیار اصلی توزیع یکنواخت، چسبندگی پوشش و صرفه‌جویی اقتصادی در مقیاس طبقه‌بندی شده از ۱ تا ۵ ارزیابی شده است. در بخش (A)، ترکیب مس اکسید (A_2) بالاترین امتیاز را کسب کرده است و با ایجاد ضخامت یکنواخت، چسبندگی مناسب و کاهش هزینه‌های اضافی، به عنوان ترکیب بهینه معرفی می‌گردد. ترکیب روی اکسید و مس اکسید (A_3) به علت ایجاد بذر لایه با ضخامت کم‌تر از سطح A_2 و همچنین استفاده از دو ماده اولیه، امتیاز پایین‌تری به خود اختصاص داده است. با به کارگیری ترکیب روی اکسید (A_1)، بذر لایه غیر یکنواخت با ضخامت کم بر روی سطح تشکیل شد. همچنین، ترکیب‌های حاوی سرفکتانت (A_4 تا A_6) به علت ایجاد بذر لایه با ضخامت و یکنواختی غیر قابل قبول و هزینه‌های بالا در سطح پایین‌تری قرار گرفتند. بخش (b)، مقایسه دو سطح B_1 ۴۰ min و B_2 ۶۰ min را نشان

شده‌اند و نقش مهمی در تبیین انتخاب شرایط بهینه ایفا می‌کنند.

شکل ۲ بخش‌های (A) تا (C) به ترتیب به بررسی اثر سه عامل مستقل نوع ترکیب بذرنشانی (D)، دمای اکسایش حرارتی (E) و مدت زمان اکسایش حرارتی (F) بر شاخص عملکرد نهایی بذرنشانی می‌پردازد. شاخص عملکرد بر اساس دو معیار اصلی توزیع یکنواخت و خاصیت آب دوستی در مقیاس طبقه‌بندی شده از ۱ تا ۵ ارزیابی شده است. بخش (A)، تأثیر شش نوع ترکیب بذرنشانی بر شاخص عملکرد سطحی شامل یکنواختی بذرلایه، آب دوستی و کاهش پیچیدگی فرآیند را نشان می‌دهد.

در جدول ۲، فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش اکسایش حرارتی (S_۲) شامل نوع ترکیب (فاکتور D)، دمای اکسایش حرارتی (E) و مدت زمان اکسایش حرارتی (F) با سطوح مختلف ارائه شده‌اند که در ادامه مقادیر بهینه این فاکتورها با استفاده از طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان به دست آمده‌اند.

به‌منظور امکان بررسی مستقیم و مقایسه‌پذیر اثر هر سطح از فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش اکسایش حرارتی (S_۲)، مجموعه‌ای از نمودارهای میله‌ای طراحی و تحلیل گردید. این نمودارها با هدف نمایش روند تغییرات شاخص عملکرد در پاسخ به سطوح مختلف هر سه عامل مستقل رسم



شکل ۲ مقایسه میزان اثر گذاری فاکتورهای مؤثر بر بذرنشانی به روش اکسایش حرارتی (S_۲) با استفاده از نمودار میله‌ای: (a) نوع ترکیب بذرنشانی، (b) دمای اکسایش حرارتی، (c) مدت زمان اکسایش حرارتی

Fig. 2 Comparison of the effect of factors on seed layer deposition using thermal oxidation method (S₂) with bar charts: (a) type of seed layer composition, (b) thermal oxidation temperature, (c) Thermal oxidation time.

شرایط بهینه در روش بذرنشانی اکسایش حرارتی (S_p) انتخاب گردیدند.

با توجه به دستیابی به دو مجموعه شرایط بهینه در روش‌های بذرنشانی S_1 و S_p ، پارامترهای مؤثر بر رشد مس فریت شامل نسبت مولی مس نیترات به آهن نیترات، دما و مدت زمان فرآیند رشد، نوع عامل رسوبدهی، pH محلول لایه نشانی، دما و مدت زمان فرآیند کلسینه شدن، مطابق **جدول ۳** طبقه‌بندی شده‌اند. سپس، مقادیر بهینه پارامترهای رشد مس فریت بر روی توری فولادی به کمک طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان با معیار به دست آوردن پوشش مس فریت آب دوست با ساختار یکنواخت و دارای قابلیت بالا در جداسازی آب و هگزان حاصل گردیدند. تمامی آزمایش‌ها با فرض به کارگیری شرایط S_1/P_1 جهت آماده‌سازی و بذرنشانی انجام شده‌اند. مطابق **جدول ۴**، به منظور یافتن تأثیر هر فاکتور در هر مرحله، یک پارامتر به صورت متغیر در نظر گرفته شده در حالی که سایر فاکتورها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر بهینه به دست آمده برای هر فاکتور در هر مرحله، به طور پیوسته در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نهایت، شرایط بهینه فرآیند رشد مس فریت در ستون انتهایی **جدول ۴** درج شده است. نسبت مولی مس نیترات به آهن نیترات در تشکیل مس فریت، دمای فرآیند رشد در کنترل فرآیند رشد و افزایش نظم ساختاری، مدت زمان فرآیند رشد در ایجاد پوشش با ضخامت و یکنواختی قابل قبول، نوع عامل رسوبدهی و pH در کنترل فرآیند رشد مس فریت، دما و مدت زمان فرآیند کلسینه شدن در ایجاد قابلیت جداسازی آب و هگزان مؤثر هستند.

به منظور ارزیابی کمی تأثیر هر پارامتر و نمایش روند تغییرات عملکردی در پاسخ به سطوح مختلف عوامل، مجموعه‌ای از نمودارهای میله‌ای مطابق **شکل ۳** رسم گردیده‌اند.

در میان ترکیب‌ها، D_1 (آهن اکسید بدون اصلاح یا حکاکی شیمیایی سطح) بالاترین امتیاز را کسب کرده و به طور معناداری از سایر ترکیب‌ها برتر بوده است. ترکیب‌های D_2 تا D_6 که شامل مراحل حکاکی شیمیایی و اصلاح سطح با محلول‌های مختلف (هیدروکلریک اسید، آمونیاک، اتانول و استناریک اسید) هستند، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به D_1 نشان داده‌اند. این کاهش عملکرد ناشی از ایجاد غیریکنواختی سطح، کاهش آب‌دوستی و پیچیدگی‌های فرآیندی است. در نتیجه ترکیب D_1 به عنوان گزینه بهینه در روش S_p معرفی می‌شود، زیرا ضمن حفظ ساختار ساده، پوششی یکنواخت و فعال سطحی ایجاد کرده و هزینه‌های اضافی را حذف می‌کند. بخش (B)، اثر سه سطح دمایی را بر شاخص عملکرد سطحی بررسی می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که دمای 500°C (E_p) بالاترین امتیاز را دارا می‌باشد. در دمای 300°C ، فرآیند اکسایش ناقص بوده و پوشش نهایی از یکنواختی کافی برخوردار نبوده است. دمای 400°C عملکرد متوسطی داشته، اما تنها در دمای 500°C ساختار اکسیدی پایدار، یکنواخت و آب دوست حاصل شده است. در نتیجه دمای 500°C به عنوان شرایط حرارتی بهینه برای تشکیل فاز مطلوب آهن اکسید و دستیابی به پوشش فعال سطحی انتخاب می‌شود. بخش (C)، اثر دو سطح زمانی را بر شاخص عملکرد سطحی نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که مدت زمان 3 h (F_p) منجر به افزایش قابل توجه در یکنواختی، چسبندگی و خاصیت آب دوستی بذرلایه شده است. زمان کوتاه‌تر 2 h موجب تشکیل لایه‌ای نازک و ناقص شده که از نظر عملکرد سطحی در سطح پایین‌تری قرار دارد. در نتیجه افزایش زمان اکسایش تا 3 h موجب تکامل ساختار پوشش و تثبیت فاز اکسیدی شده و شرایط مناسبی برای رشد مس فریت در مراحل بعدی فراهم می‌آورد. در نهایت، ترکیب آهن اکسید حاصل از اکسایش حرارتی در دمای 500°C و مدت زمان 3 h به عنوان

جدول ۳ پارامترهای رشد مس فریت بر روی توری فولادی ضد زنگ.
Table 3 Parameters of copper ferrite growth on stainless steel mesh.

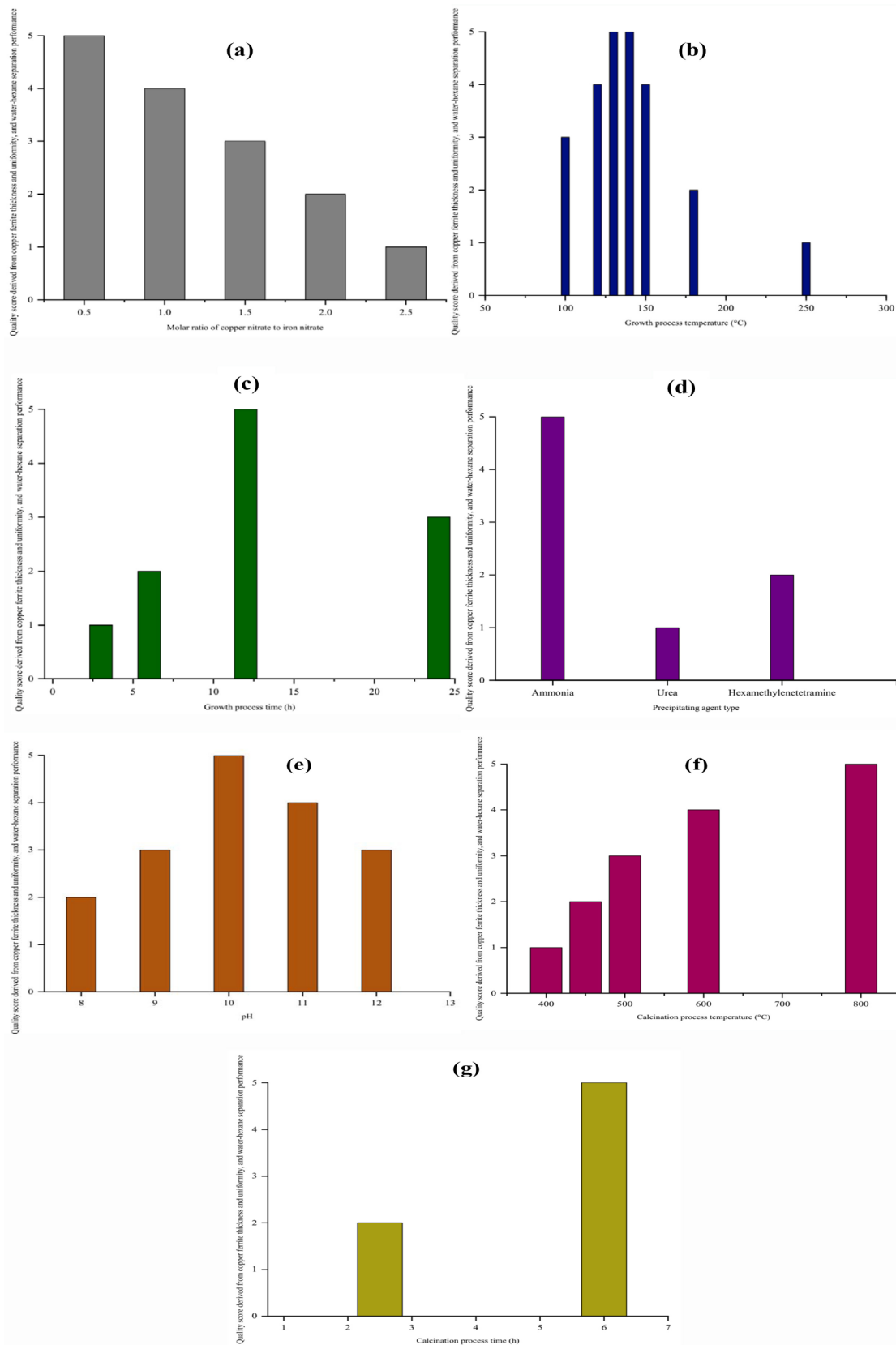
Assigned letter	Parameter	Evaluated type/ amount
A'	Molar ratio of copper nitrate trihydrate to iron nitrate	2.5, 2, 1.5, 1, 0.5
B'	Growth process temperature (°C)	100-250
C'	Growth process time (h)	24, 12, 6, 3
D'	Precipitating agent type	Ammonia Urea (molar ratio of precipitating agent to iron nitrate: 2) Hexamethylenetetramine (molar ratio of precipitating agent to iron nitrate: 2)
E'	pH	8-12
F'	Final calcination process temperature (°C)	400-800
G'	Calcination process time (h)	6, 2.5

جدول ۴ طراحی آزمایش یک فاکتور در یک زمان برای بهینه سازی پارامترهای رشد.
Table 4 One factor at a time design of experiments for optimizing the growth parameters.

Parameter	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7	Optimum condition
Molar ratio of copper nitrate trihydrate to iron nitrate	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Variable	0.5 (optimum)	0.5
Growth process temperature (°C)	120	Variable	130 (optimum)	130	130	130	130	130
Growth process time (h)	Variable	12	12	12	12	12	12	12
Precipitating agent type	Ammonia	Ammonia	Variable	Ammonia (optimum)	Ammonia	Ammonia	Ammonia	Ammonia
pH	10	10	10	10	Variable	10	10	10
Calcination temperature (°C)	600	600	600	600	600	600	Variable	800
Calcination time (h)	2.5	2.5	2.5	Variable	6 (optimum)	6	6	6

رشد یافته بر سطح توری فولادی می‌پردازد. نسبت‌های مورد بررسی شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ بوده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت مولی ۰/۵، بیشترین کارایی جداسازی حاصل شده است. با افزایش نسبت یون‌های مس، شاخص عملکرد جداسازی به طور پیوسته کاهش یافته است. این روند نزولی بیانگر آن است که افزایش غلظت یون مس فراتر از مقدار استوکیومتری مطلوب، موجب اختلال در فرآیند تشکیل فاز مس فریت می‌شود. در نسبت‌های بالاتر از ۱/۵، افت عملکرد جداسازی به صورت محسوس‌تر مشاهده شده است.

این نمودارها امکان تحلیل بصری و آماری نتایج را فراهم کرده و نقش مهمی در تبیین رفتار سیستم در برابر تغییرات متغیرهای مستقل ایفا می‌کنند. همچنین، نمودارها مبنای انتخاب مقادیر بهینه برای تشکیل پوشش مس فریت یکنواخت و آب دوست با قابلیت جداسازی بالا را فراهم می‌سازند. در ادامه، هر نمودار به صورت جداگانه تحلیل شده و تأثیر هر عامل بر کیفیت ساختار نهایی پوشش بررسی می‌گردد. بخش (A) به بررسی تأثیر نسبت مولی مس نیترات به آهن نیترات بر کارایی جداسازی فازی آب و هگزان توسط پوشش مس فریت



شکل ۳ مقایسه میزان اثر گذاری فاکتورهای مؤثر بر رشد مس فریت با استفاده از نمودار میله‌ای: (الف) نسبت مولی مس نیترات به آهن نیترات، (ب) دمای فرآیند رشد، (ج) مدت زمان فرآیند رشد، (د) نوع عامل رسوب دهی، (ه) pH، (و) دمای کلسینه شدن، (ز) مدت زمان کلسینه شدن.

Fig. 3 Comparison of the degree of influence of factors on copper ferrite growth using bar charts: (a) molar ratio of copper nitrate to iron nitrate, (b) growth process temperature, (c) growth process time, (d) precipitating agent type, (e) pH, (f) calcination temperature, (g) calcination time.

فریت تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی غشای توری دارد. در زمان رشد ۳ h، ارزیابی کیفی در پایین‌ترین سطح قرار دارد. این مقدار پایین احتمالاً ناشی از تشکیل ناقص پوشش، ضخامت ناکافی، و عدم یکنواختی سطحی است که مانع از جداسازی انتخابی بین آب و هگزان می‌شود. با افزایش زمان رشد به ۶ h، کیفیت پوشش به طور محسوسی بهبود می‌یابد.

در این مرحله، ضخامت پوشش افزایش یافته و یکنواختی سطحی به حد قابل قبولی رسیده است، که منجر به ارتقای نسبی عملکرد جداسازی می‌شود. در مدت زمان ۱۲ h، نمودار به بیشینه مقدار ارزیابی کیفی می‌رسد. این نقطه نشان‌دهنده تشکیل پوشش مس فریت با ضخامت بهینه، یکنواختی سطحی بالا، و ساختار پیوسته است. در این شرایط، غشا دارای ویژگی‌های سطحی مطلوبی مانند آب دوستی و روغن‌گریزی مؤثر بوده و جداسازی فازی با کارایی بالا انجام می‌شود. در مقابل، در مدت زمان رشد ۲۴ h، ارزیابی کیفی کاهش می‌یابد. این افت می‌تواند ناشی از رشد بیش از حد پوشش، انسداد منافذ توری، یا تشکیل لایه‌های ناهمگن و ترک‌دار باشد. در این مرحله، ضخامت زیاد و عدم یکنواختی باعث کاهش نفوذپذیری انتخابی و اختلال در عملکرد جداسازی شود. بر اساس بخش (D)، انتخاب عامل رسوب دهی در سنتز مس فریت تأثیر مستقیمی بر ساختار پوشش نهایی و کیفیت عملکرد جداسازی دارد. استفاده از آمونیاک به عنوان عامل رسوب‌دهی منجر به تشکیل پوششی با بالاترین سطح ارزیابی کیفی شده است؛ پوششی که به لحاظ ضخامت، یکنواختی سطحی و کارایی جداسازی بین آب و هگزان شرایط بهینه را فراهم می‌سازد. این رفتار را می‌توان حاصل رشد کنترل شده نانوذرات و توزیع همگن آن‌ها روی غشای توری دانست، که در حضور یون‌های هیدروکسید با سرعت مناسب و پیوستگی مؤثر صورت می‌گیرد. در مقابل، عملکرد اوره پایین‌ترین مقدار ارزیابی را نشان می‌دهد.

این کاهش می‌تواند ناشی از عدم تطابق نسبت یونی با نسبت ساختاری مورد نیاز برای تشکیل فاز اسپینلی مس فریت باشد. نسبت‌های نامتعادل ممکن است منجر به تشکیل فازهای جانبی (مانند اکسیدهای آزاد مس یا آهن) یا ساختارهای آمورف شوند که فاقد ویژگی‌های سطحی مطلوب برای جداسازی مؤثر هستند. بخش (B)، نمودار حاصل از آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد که دمای فرآیند نقش تعیین‌کننده‌ای در ماهیت ساختاری و سطحی ماده دارد. با افزایش دما از 100°C تا 130°C ، تعداد بلورهای تشکیل شده به صورت پیوسته افزایش یافته و در دمای 130°C به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این روند صعودی بیانگر فعال شدن سازوکارهای ترمودینامیکی مؤثر در رشد بلوری است؛ به‌گونه‌ای که دمای 130°C شرایط بهینه‌ای برای نظم‌یابی مولکولی و دستیابی به ساختارهای بلوری منظم فراهم می‌آورد. در دماهای پایین‌تر، تعداد بلورها محدود بوده و هیچ‌گونه پوشش سطحی با خواص عملکردی مشاهده نشده است. این موضوع بیانگر آن است که انرژی حرارتی در این بازه برای آغاز فرآیندهای رشد ساختاری و سطحی کافی نیست. در ادامه، با افزایش دما به 180°C و 250°C ، تعداد بلورها کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند؛ با این حال، در همین بازه دمایی، تشکیل پوشش‌های ضخیم و پیوسته با خواص آب‌گریزی و روغن‌گریزی گزارش شده است. این رفتار نشان‌دهنده آن است که در دماهای بالا، مسیرهای فیزیکی-شیمیایی جدیدی فعال می‌شوند که برخلاف رشد بلوری کلاسیک، منجر به تشکیل لایه‌های سطحی با عملکرد خاص می‌گردند. این لایه‌ها از طریق فرآیندهایی نظیر تغلیظ مواد فرّار، تشکیل فازهای آمورف یا بازآرایی گروه‌های شیمیایی سطحی به وجود آمده‌اند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که کنترل دقیق دمای فرآیند می‌تواند منجر به بهینه‌سازی رشد ساختارهای بلوری گردد. بخش (C)، نشان می‌دهد که زمان رشد مس

این افت کیفیت ناشی از تأخیر در آزادسازی گونه‌های فعال و تشکیل پوششی ناهمگن و کم ضخامت است. تجزیه آهسته اوره و تولید مرحله‌ای یون‌های آمونیوم، فرآیند رسوب دهی را با نوساناتی همراه ساخته و منجر به کاهش یکپارچگی ساختاری و عملکرد جداسازی می‌شود. هگزامین نیز رفتاری حد واسط را از خود نشان داده است. تجزیه حرارتی این ترکیب و آزادسازی تدریجی عوامل بازی در محیط واکنش، موجب رشد نسبتاً منظم ولی نه کاملاً یکنواخت پوشش مس فریت شده و اگرچه عملکرد جداسازی را نسبت به اوره بهبود بخشیده، اما نسبت به آمونیاک همچنان از بازدهی کمتری برخوردار بوده است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آمونیاک گزینه مطلوب‌تری برای ایجاد پوششی با کیفیت بالا در ساخت غشاهای توری پوشش‌دار است. بخش (f)، تأثیر مقدار pH بر کیفیت پوشش مس فریت و عملکرد جداسازی آب و هگزان به صورت یک الگوی غیرخطی و به شدت وابسته به شرایط یونی محیط واکنش مشاهده می‌شود. در pH پایین‌تر (pH=۸) ارزیابی کیفی در کمترین سطح قرار دارد. این مقدار پایین را می‌توان ناشی از پایداری کم فازهای فریتی، رشد ناقص پوشش و تشکیل ساختارهای ناپیوسته دانست؛ در این شرایط، رسوب‌دهی یون‌های مس و آهن با نرخ مناسب صورت نمی‌گیرد و منافذ توری به درستی پوشش داده نمی‌شوند. با افزایش pH به مقدار ۹ و سپس رسیدن به مقدار ۱۰، نمودار به بیشینه مقدار ارزیابی کیفی می‌رسد. این نقطه نشان‌دهنده شرایط بهینه برای تشکیل پوشش مس فریت با ضخامت کنترل شده، یکنواختی سطحی بالا و نفوذپذیری انتخابی مطلوب است. در این حالت، حضور یون‌های OH⁻ در مقدار متناسب، باعث تسهیل رسوب دهی فاز فریتی و رشد پیوسته ذرات روی غشای توری می‌شود که در نهایت به عملکرد جداسازی مؤثر منجر می‌گردد. در pHهای بالاتر از مقدار بهینه، یعنی در مقادیر برابر با ۱۱ و ۱۲، ارزیابی کیفی کاهش می‌یابد. این

افت می‌تواند به دلیل رسوب بیش از حد، رشد بی‌رویه یا ناهمگون ذرات، و تشکیل پوشش‌های متخلخل یا ترک‌دار باشد. در این شرایط، افزایش یون‌های هیدروکسید ممکن است منجر به اختلال در توازن ساختاری پوشش شود و عملکرد جداسازی آب و هگزان را محدود سازد. بخش (e)، نشان می‌دهد که دمای کلسینه شدن پس از رشد مس فریت تأثیر بسیار مهمی بر کیفیت نهایی پوشش و عملکرد جداسازی دارد. با افزایش دمای کلسینه از ۴۰۰ °C به سمت ۸۰۰ °C، شاهد روند افزایشی در شاخص ارزیابی کیفی هستیم؛ به طوری که در دماهای پایین‌تر از حدود ۸۰۰ °C، پوشش به صورت تدریجی اما محدود رشد می‌کند. این روند تدریجی را می‌توان نتیجه حذف رطوبت باقیمانده، کاهش ناپایداری سطحی، و بهبود جزئی در ساختار لایه‌ها دانست، اما لازم به تأکید است که در این بازه دمایی، فاز اصلی مس فریت در مقدار ناچیزی تشکیل شده است. در واقع، در دماهای پایین‌تر از ۸۰۰ °C، محصول غالب واکنش‌ها شامل آهن اکسید و مس اکسید است. در نقطه بحرانی ۸۰۰ °C، نمودار به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این دما، شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی برای آغاز واکنش تولید فاز فریتی اسپینلی با ساختار بلوری پایدار فراهم می‌شود و یک پوشش با ضخامت مطلوب، یکنواختی سطحی بالا، و عملکرد مناسب برای جداسازی آب و هگزان ایجاد می‌شود. در این حالت، رشد سطحی ذرات مس فریت به شکل پیوسته و منظم انجام می‌شود، پیوندهای درون‌لایه‌ای مستحکم‌تر شده، و پوشش نهایی از نظر مکانیکی و عملکردی تکامل می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که دمای کلسینه نه فقط در تکمیل ساختار پوشش، بلکه در تشکیل واقعی فاز عملکردی مس فریت نقش کلیدی دارد. بخش (g)، نشان می‌دهد که مدت زمان کلسینه شدن پس از رشد مس فریت نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی پوشش و عملکرد جداسازی دارد. در زمان ۲/۵ h، ارزیابی کیفی در

مرحله پیش، دو آزمایش با نام‌های O_1 و O_2 مطابق **جدول ۵** انجام شدند. این دو آزمایش به جهت تکمیل شرایط بهینه‌سازی پوشش مس فریت بر روی غشای توری فولادی است. در نهایت نمونه O_1 با معیار تشکیل مس فریت با ضخامت و یکنواختی مناسب و قابلیت بالا در جداسازی آب و هگزان به عنوان حالت بهینه انتخاب گردید. به منظور انجام فرآیند رشد مس فریت بر روی توری فولادی در همه آزمایش‌ها، در ابتدا، محلول نمک‌های مس نیترات ۳ آبه به همراه آهن نیترات با نسبت مولی مشخص در ۱۰۰ mL آب آماده می‌شود. سپس، عامل رسوب دهی به صورت قطره‌ای تا رسیدن به pH مورد نظر به محلول نمک‌های اولیه اضافه و به مدت ۳۰ min مخلوط می‌گردند. در ادامه، توری فولادی بذرنشانی شده به کمک شلنگ سیلیکونی داخل شیشه درب آبی حاوی محلول نمک‌ها و عامل رسوب دهی به صورت مورب قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، سیستم فوق در دما و زمان مشخص در آن قرار گرفته تا فرآیند رشد آغاز گردد. پس از انجام فرآیند رشد در آن، توری با آب مقطر شسته شده و به مدت ۳ h در آن در دمای 90°C خشک می‌گردد. در مرحله آخر، توری فولادی خشک شده در آن در دما و زمان مشخص داخل کوره کلسینه می‌شود.

در **شکل ۴**، نمای کلی فرآیندهای انجام گرفته در مراحل آماده‌سازی، بذرنشانی و رشد مس فریت به طور خلاصه نمایش داده شده است.

سطح پایین‌تری قرار دارد. این مقدار محدود را می‌توان ناشی از ناکافی بودن زمان حرارت‌دهی برای تکامل ساختار بلوری مس فریت دانست. در این شرایط، واکنش بین اکسیدهای مس و آهن هنوز کامل نشده، و فازهای جداگانه‌ای مانند مس اکسید و آهن اکسید در سطح باقی مانده‌اند. این ترکیبات غیرفریتی باعث ایجاد پوششی با تراکم پایین، یکنواختی ضعیف و عملکرد جداسازی محدود می‌شوند. با افزایش مدت زمان به ۶ h، شاخص ارزیابی کیفی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این رشد نشان‌دهنده آن است که زمان کافی برای تثبیت ساختار اسپینلی مس فریت فراهم شده است. در این مرحله، ذرات فریتی به صورت منظم‌تر در سطح توری توزیع می‌شوند، پیوندهای درون‌لایه‌ای تقویت می‌گردند، و پوششی با ضخامت بهینه و یکنواختی سطحی بالا حاصل می‌شود. این ویژگی‌ها مستقیماً موجب افزایش کارایی جداسازی آب و هگزان می‌شوند. در کنار تحلیل دمایی که نشان داد دمای بالا برای تشکیل فاز فریتی ضروری است، این نمودار تأکید می‌کند که زمان ماند در کوره نیز به همان اندازه حیاتی است. حتی در دمای مناسب، اگر زمان کافی برای تکامل ساختار فراهم نشود، پوشش نهایی فاقد کیفیت عملکردی مطلوب خواهد بود.

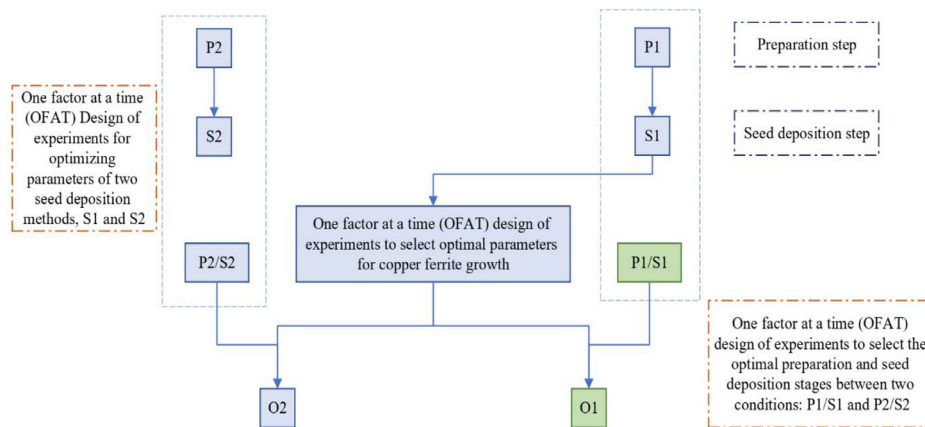
در گام بعد، با هدف معرفی بهترین روش آماده‌سازی و بذرنشانی بین دو روش S_1/P_1 و S_2/P_2 ، با استفاده از پارامترهای بهینه رشد مس فریت به دست آمده از

جدول ۵ آزمایش‌های نهایی برای تعیین نمونه بهینه غشای توری پوشش دهی شده با مس فریت.

Table 5 Final experiments for specifying the optimum sample of copper ferrite coated Stainless steel mesh membrane.

Sample	Preparation condition	Seeding condition	Copper ferrite growth condition
O_1	P_1	S_1	Molar ratio of copper nitrate trihydrate to iron nitrate: 2 Growth process temperature: 130°C Growth process time: 12 h Precipitating agent type: Ammonia pH: 10 Calcination process temperature: 800°C Calcination process time: 6 h
O_2	P_2	S_2	

- Optimum (1)
- Optimum (2)

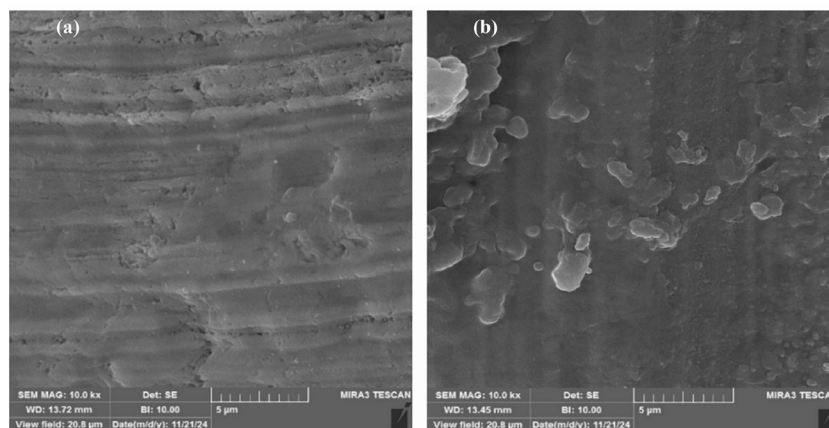


شکل ۴ نمای کلی فرآیندهای انجام شده در مراحل آماده سازی، بذرنشانی و رشد مس فریت.
Fig. 4 Overview of the processes carried out in the preparation, seed deposition, and copper ferrite growth stages.

بذرنشانی در مرحله بعدی می‌گردد. توری فولادی استفاده شده دارای ساختار شبکه‌ای یکنواخت با قطر منافذ $82 \mu\text{m}$ می‌باشد که به عنوان بستری منظم برای پوشش‌دهی عمل می‌کند. در بخش (B)، حضور ذرات کوچک با ساختار دانه‌ای در مقایسه با تصاویر توری شست و شو و حکاکی شیمیایی شده، نشان‌دهنده شروع تشکیل بذرایه مس اکسید با قطر متوسط تقریبی 350 nm است. بذرایه مس اکسید به عنوان مکان‌های هسته‌زایی ناهمگن برای رشد کنترل شده بلورهای ثانویه (مس فریت در مرحله بعدی) عمل می‌کند. ذرات بذرایه دارای مرزهای مشخص و نسبتاً مجزا هستند که حاکی از رشد مستقل بلورها و عدم تجمع شدید است.

بحث و نتایج

تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مربوط به توری فولادی آماده‌سازی شده به روش P_1 و توری فولادی بذرنشانی شده به روش S_1 در شکل ۵ نمایش داده شده است. در بخش (A)، پس از شست و شوی توری با آب و اتانول و احکاک شیمیایی آن با هیدروکلریک اسید، آلودگی و لایه‌های اکسیدی احتمالی ایجاد شده از بین می‌رود و سطح برای بذرنشانی آماده می‌شود. سطح ناهموار با شیارهای نامنظم و کوچک بیانگر تغییرات ساختاری ناشی از حکاکی شیمیایی با هیدروکلریک اسید می‌باشد که موجب افزایش زبری سطح فعال، بهبود چسبندگی لایه‌های پوششی و تسهیل



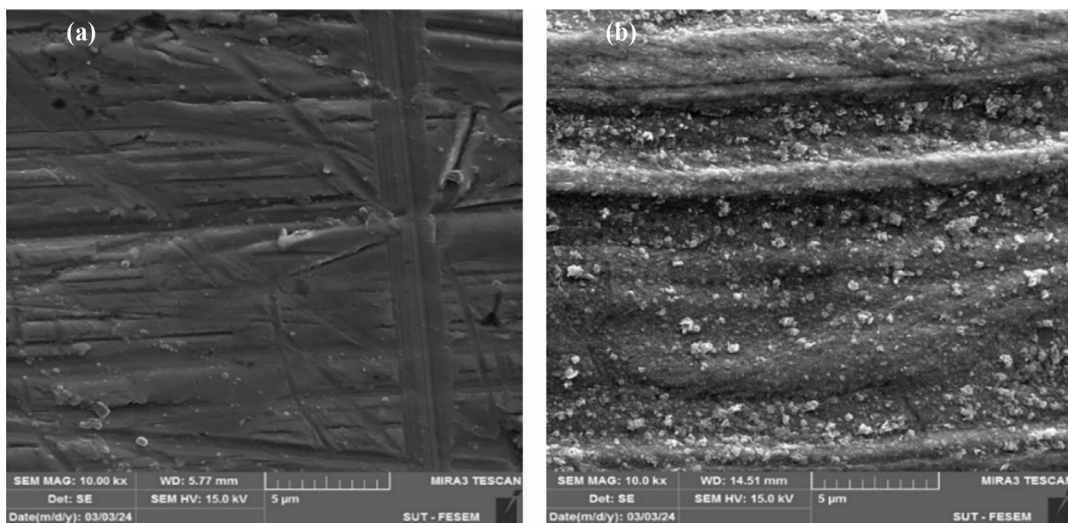
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای (الف) توری فولادی آماده شده به روش P_1 و (ب) توری فولادی بذرنشانی شده به روش S_1 .

Fig. 5 Field emission scanning electron microscopy images of (a) steel mesh prepared by method P_1 and (b) steel mesh seed-deposited by method S_1 .

می‌باشد. این ذرات یکنواخت سپس به عنوان مراکز هسته‌زایی ناهمگن، فرایند رشد جهت‌دار و کنترل شده لایه‌های بعدی (مانند مس فریت) را تسهیل می‌کنند.

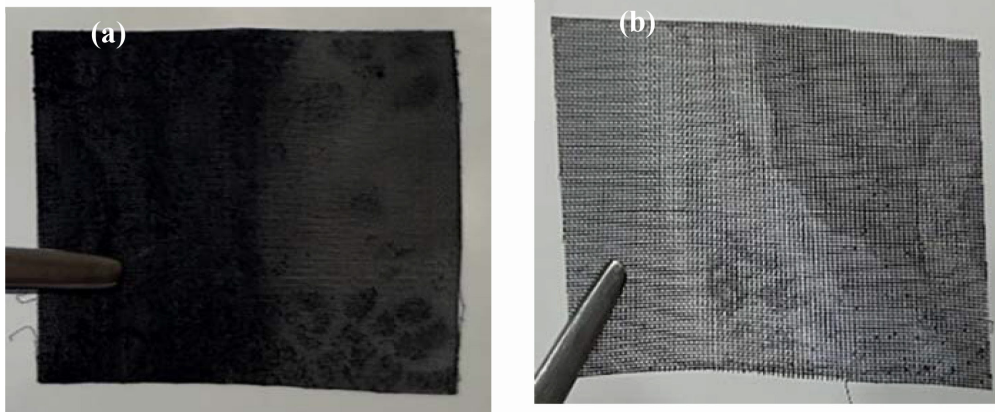
حال به منظور معرفی بهترین نمونه غشای توری پوشش‌دهی شده با مس فریت، دو آزمایش نهایی با جزئیات ارائه شده در **جدول ۵** انجام گردیده است. بر اساس **شکل ۷** بخش (A)، غشای توری O_1 با پوشش یکنواخت و یکپارچه مس فریت نمایش داده شده است. عدم مشاهده ترک یا حفره، یکنواختی نسبی ضخامت لایه و تغییر رنگ همگن سطح، گواه حصول تعادل بهینه بین سرعت رسوب یون‌ها و نفوذ به پایه است. در مقابل، بخش (B) نشان دهنده غشای توری O_2 با پوشش ناپیوسته و ضخامت بسیار کم، چگالی پایین ذرات و مناطق عاری از پوشش است. پوشش منسجم و یکنواخت نمونه O_1 ، انتظاری منطقی برای بازدهی جداسازی فازها (آب/نرمال-هگزان) را فراهم می‌کند. در حالی که پوشش ناپیوسته نمونه O_2 به دلیل کاهش انسداد مؤثر منافذ و کاهش توانایی در انتخاب‌پذیری، گزینه مناسبی برای کاربردهای جداسازی محسوب نمی‌شود.

عدم وجود ترک‌های سطحی بیانگر پراکندگی یکنواخت و چسبندگی خوب به زیرلایه است. تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مربوط به توری فولادی آماده سازی شده به روش P_2 و توری فولادی بذرنشانی شده به روش S_2 در **شکل ۶** نمایش داده شده است. بخش (A)، بیان‌گر اثرات صیقل دادن مکانیکی سطح توری با هدف حذف آلودگی‌ها، اکسیدهای سطحی و زبری‌های ناخواسته برای ایجاد سطح مناسب جهت انجام فرآیند اکسایش حرارتی می‌باشد. سطح صیقلی به دست آمده منجر به رشد یکنواخت‌تر لایه‌های اکسیدی در مراحل بعدی خواهد شد. در بخش (B)، حضور ذرات کروی شکل با پراکندگی یکنواخت بر روی سطح توری مشاهده می‌شود. این ذرات با قطر تقریبی در محدوده ۲۵۰ nm الی ۴۰۰ nm، به عنوان هسته‌های اولیه رشد لایه آهن اکسید عمل می‌کنند. مشاهده مرز واضح بین ذرات اکسیدی و زیرلایه بدون هر گونه اختلاط یا نفوذ متقابل، گواه بر رشد یک لایه اکسیدی کاملاً مجزا از فلز پایه است. سطح ذرات به‌طور یکنواخت، صاف و بدون نشانه‌ای از شکستگی یا ترک خوردگی است که نشان دهنده رشد همگن لایه اکسید تحت شرایط دمایی و زمانی بهینه فرآیند اکسایش



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای (a) توری فولادی آماده سازی شده به روش P_2 و (b) توری فولادی بذرنشانی شده به روش S_2 .

Fig. 6 Field emission scanning electron microscopy images of (a) steel mesh prepared by method P_2 and (b) steel mesh seed-deposited by method S_2 .

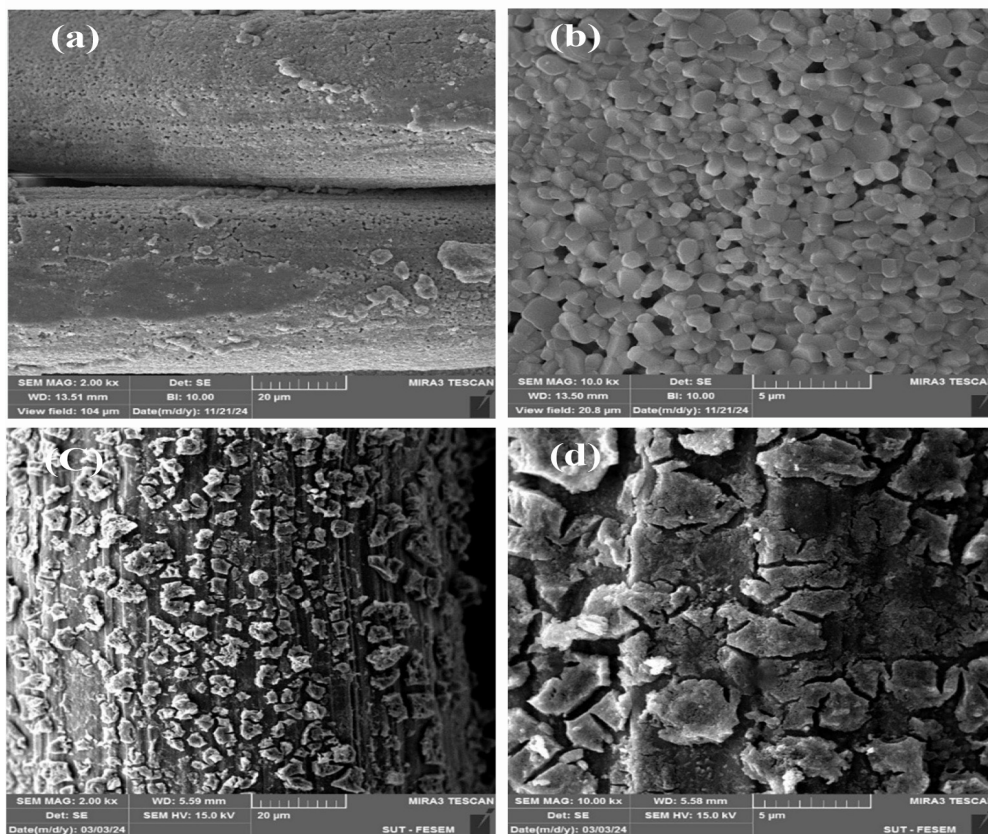


شکل ۷ تصاویر (الف) غشای توری O_1 و (ب) غشای توری O_2
 Fig. 7 Images of (a) membrane O_1 and (b) membrane O_2 .

فعال و افزایش خطر نفوذپذیری ناخواسته می‌گردند. از منظر کاربردی، ساختار سطحی منسجم و یکنواخت نمونه O_1 به عنوان غشایی با راندمان بالاتر در جداسازی فازهای مایع (مانند آب و نرمال-هگزان) قابل ارزیابی است؛ در حالی که ناهنجاری‌های مشاهده شده در نمونه O_2 ممکن است باعث افت انتخاب پذیری، کاهش عملکرد جداسازی و تضعیف پایداری مکانیکی در شرایط عملیاتی شوند.

بر اساس تصاویر FESEM ارائه شده در مطالعه حاضر، ساختار سطحی نمونه O_1 نشان‌دهنده توزیع یکنواخت و منظم ذرات کروی مس فریت با رشد مؤثر و کنترل شده بلورها است که با چسبندگی بالا به سطح پایه فولادی و ایجاد لایه‌ای پیوسته و فاقد نواحی خالی، کارایی بالای فرآیند رسوبدهی را تأیید می‌کند. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط جرج و همکاران شباهت دارد، جایی که ذرات کروی با اندازه نمونه‌های سنتز شده از مس فریت با حرارت دهی در دمای 800°C مدت ۴ h مشاهده شده‌اند [۳۶]. با این حال، در مطالعه مذکور، تصاویر وجود کلوخه‌شدگی شدید و تمایل ذرات ریز به تشکیل دانه‌های بزرگ‌تر را نشان می‌دهند، به گونه‌ای که سطح نهایی فاقد یکنواختی بوده و در صورت استفاده به عنوان پوشش در غشا، عملکرد جداسازی را محدود می‌سازد.

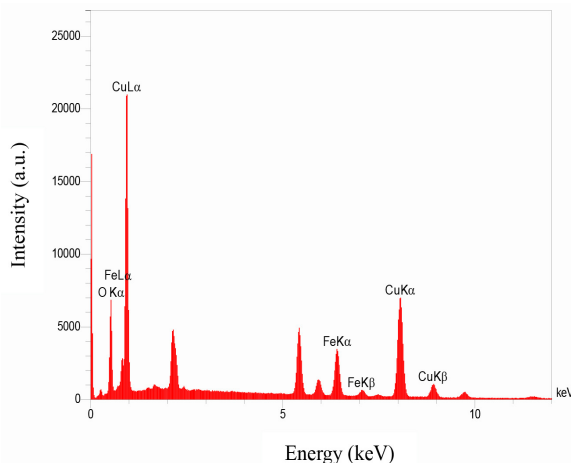
جهت ارزیابی دقیق ساختار سطحی غشاهای توری پوشش داده شده با مس فریت، تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی به ترتیب مربوط به نمونه بهینه اول و دوم با بزرگنمایی‌های مختلف در شکل ۸ نمایش داده شده است. بخش (A) و (B)، ساختاری یکنواخت از ذرات مس فریت را نشان می‌دهد که با ضخامت مناسب و چسبندگی مؤثر به پایه فولادی، سطحی منظم و عاری از نواحی بدون پوشش ایجاد کرده‌اند. ریخت‌شناسی ذرات به صورت کروی و با اندازه‌های در محدوده ۵۰۰ nm-۹۱۰ nm قابل مشاهده است؛ توزیع همگن نانوذرات همراه با تخلخل‌های کوچک و پراکنده، بیانگر شکل‌گیری مؤثر بذریه و رشد کنترل شده بلورهای مس فریت تحت شرایط بهینه فرآیند رسوب دهی می‌باشد. در مقابل، تصاویر (C) و (D) مربوط به نمونه O_2 ، بیانگر پوشش ناپیوسته با ریخت‌شناسی نامنظم و تجمعات کلوخه‌ای از ذرات کروی هستند. توزیع غیر همگن ذرات، وجود نواحی فاقد پوشش و ظاهر شدن ترک‌ها و شکست‌های سطحی، حاکی از اختلال در فرآیند رشد بلورها بوده که احتمالاً ناشی از ناسازگاری‌های ساختاری بین پوشش و زیرلایه، یا تنش‌های باقی‌مانده حرارتی در مرحله‌ی کلسینه‌سازی می‌باشد. این ناپیوستگی‌ها منجر به افت چسبندگی، کاهش ضخامت مؤثر لایه



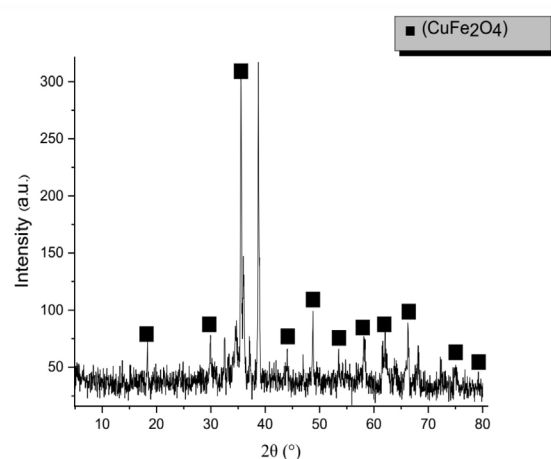
شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای (الف و ب) غشای توری O_1 و (ج و د) غشای توری O_2 با بزرگنمایی‌های مختلف. **Fig. 8** Field emission scanning electron microscopy images for (a and b) membrane O_1 and (c and d) membrane O_2 at different magnifications.

پردازنده می‌شود. پیک‌های مشاهده شده در مقدار 2θ برابر با $32/5^\circ$ و 72° مربوط به مس اکسید (CuO) هستند [۴۱]. در زوایای $34/4^\circ$ و $67/6^\circ$ پیک‌های مربوط به هماتیت (Fe_2O_3) و در زاویه $36/8^\circ$ پیک مربوط به مگنتیت (Fe_3O_4) ملاحظه می‌گردند [۴۲-۴۴]. تجزیه و تحلیل طیف سنجی پخشی انرژی پرتو ایکس برای بررسی بیشتر ترکیب شیمیایی و تعیین کمیت عناصر موجود در سطح انجام گردیده است [۴۵]. طیف سنجی پخشی انرژی پرتو ایکس شامل محور انرژی (keV) در راستای افقی و شدت نسبی ($Intensity$) در راستای عمودی است. در شکل ۱۰، پیک‌های مربوط به آهن به عنوان عنصر اصلی تشکیل‌دهنده توری فولادی با مقادیر انرژی $0/7 keV$ ، $6/4 keV$ و $7/1 keV$ و منگنز و کروم به عنوان عناصر جانبی به ترتیب با مقادیر انرژی $2/1 keV$ و $5/2 keV$ مشاهده شده است.

مطابق الگوی آنالیز پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونه O_1 در شکل ۹، محور افقی نشان‌دهنده زاویه پراش (2θ) بر حسب درجه و محور عمودی بیانگر شدت نسبی پراش ($Intensity$) است. پیک‌های مشاهده شده مربوط به فاز مکعبی مس فریت (JCPDS-01-080-1912) در مقادیر 2θ برابر با $53/4^\circ$ ، $48/7^\circ$ ، $47/3^\circ$ ، $44/0^\circ$ ، $35/5^\circ$ ، $29/9^\circ$ ، $18/3^\circ$ ، $58/2^\circ$ ، $62/1^\circ$ ، $66/0^\circ$ و $75/0^\circ$ و $79/3^\circ$ به ترتیب متناظر با صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۸۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، (۲۲۰)، (۵۳۳) و (۴۴۴) نمایش داده شده‌اند [۳۷-۳۹]. لازم به ذکر است، پیک مشاهده شده در مقدار 2θ برابر با $38/8^\circ$ مربوط به مس اکسید (CuO) می‌باشد [۴۰]. علاوه بر پیک‌های شاخص گزارش شده، تعدادی پیک با شدت بسیار کم نیز در الگوی XRD مشاهده گردید. هرچند این پیک‌ها از نظر شدت ناچیز هستند، اما جهت تکمیل بررسی فازی، در ادامه به آن‌ها



شکل ۱۰ آنالیز طیف سنجی پخشی انرژی پرتو ایکس برای نمونه O_۱.
Fig. 10 Energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of sample O_۱.



شکل ۹ الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه O_۱.
Fig. 9 X-ray diffraction pattern for sample O_۱.

به ترتیب برابر با $31898 \text{ Lm}^2/\text{h}$ و بیش از $0.99/9$ اندازه‌گیری شده‌اند [۳]. این نتایج مؤید عملکرد فوق‌العاده غشا در تفکیک فازی با شار، بازدهی و انتخاب پذیری بالا است. همچنین بر اساس شکل ۸ بخش (B)، تصویر قطره هگزان زیر آب بر روی سطح غشای توری O_۱ نمایش داده شده است. زاویه تماس استاتیک روغن زیر آب برای این سطح 142° اندازه‌گیری شده است. بر این اساس به علت وجود خاصیت روغن‌گریزی زیر آب، قطره هگزان به طور تقریبی به شکل کروی بر روی سطح باقی‌مانده و به سادگی بر روی سطح می‌غلتد و مانع انباشت آلودگی‌های روغنی می‌شود که طول عمر و ثبات عملکرد غشا را ارتقا می‌دهد و خاصیت ضد گرفتگی و خود تمیز شونده‌گی غشا را تضمین می‌کند.

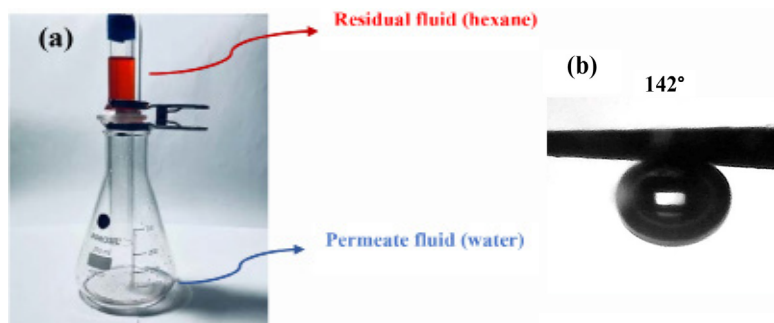
$$\eta = (1 - C_1/C_0) \times 100 \quad (1)$$

$$F = V/St \quad (2)$$

در نهایت، با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیزهای مشخصه‌یابی و آزمون جداسازی آب و هگزان مبنی بر تشکیل بلورهای مس فریت با ساختار متخلخل و یکنواخت با ریخت شناسی کروی بر روی توری فولادی و انتخاب‌پذیری غشا در عبور آب، نمونه O_۱ به عنوان بهترین نمونه در ساخت غشای توری آب دوست با پوشش مس فریت بر روی توری فولادی ضد زنگ بذرنشانی شده با مس اکسید معرفی می‌گردد.

پیک‌های مربوط به مس در مقادیر انرژی 0.9 keV ، $8/1 \text{ keV}$ و $8/9 \text{ keV}$ و پیک اکسیژن با انرژی 0.5 keV مشاهده می‌شود. آنالیز طیف سنجی EDS نشان داد پوشش حاصل، توآمان شامل یون‌های مس، آهن و اکسیژن است که ترکیب مس فریت را تشکیل می‌دهند. حضور هم‌زمان این سه عنصر در لایه سطحی، حاکی از انسجام شیمیایی مطلوب پوشش است. پیک‌های مربوط به منگنز و کروم تنها بیانگر نفوذ جزئی تابش به زیرلایه فولادی بوده و نقشی در ساختار پوشش ندارد. علاوه بر این، نسبت شدت پیک اکسیژن به پیک‌های فلزی (مس و آهن) در طیف EDS حکایت از تشکیل کامل ساختار مس فریت و حداقل حضور فازهای هیدروکسیدی دارد. این امر نشان می‌دهد که واکنش رسوبدهی و کلسینه‌سازی به‌گونه‌ای بهینه انجام شده که پوشش نه تنها از ترکیب استوکیومتری صحیح برخوردار است، بلکه فاقد ناخالصی‌های هیدروکسیدی بوده و پایداری شیمیایی و حرارتی بالایی در شرایط عملیاتی خواهد داشت.

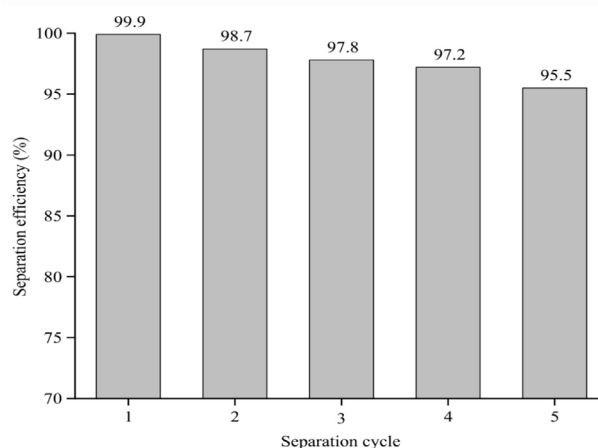
تصویر آزمون جداسازی مربوط به نمونه بهینه اول مطابق شکل ۱۱ بخش (A) ارائه شده است که منتج به عبور آب و عدم عبور هگزان می‌باشد. شار و راندمان جداسازی در نمونه O_۱ بر اساس روابط (۱) و (۲) برای مقدار 10 mL از هر یک از دو سیال



شکل ۱۱ (الف) آزمون جداسازی آب و هگزان و (ب) تصویر قطره هگزان زیر آب مربوط به نمونه O_1 .
Fig. 11 (a) Water and hexane separation test and (b) image of the hexane droplet under water related to sample O_1 .

جداسازی پس از اتمام پنج چرخه همچنان بیش‌تر از ۹۶٪ محاسبه گردیده است. کاهش راندمان می‌تواند به علت تجمع قطرات نرمال هگزان بر روی سطح یا داخل منافذ غشای توری باشد، اما بالا بودن راندمان پس از پنج چرخه جداسازی نشان دهنده پایداری قابل قبول عملکرد غشای توری است.

فرآیند جداسازی آب و هگزان پنج مرتبه متوالی انجام گردید. شکل ۱۲ تغییرات راندمان جداسازی را در چرخه‌های مختلف نمایش می‌دهد. بیش‌ترین مقدار راندمان مربوط به اولین چرخه جداسازی است (>۹۹/۹٪) و مقادیر در چرخه‌های بعدی کاهش یافته‌اند. لازم به ذکر است که مقادیر راندمان



شکل ۱۲ ارزیابی عملکرد چرخه‌های مختلف جداسازی آب و هگزان مربوط به نمونه O_1 .
Fig. 12 Performance evaluation of different water and hexane separation cycles for sample O_1 .

در یک زمان انجام شد و شرایط بهینه برای رشد لایه مس فریت شامل نسبت مولی ۰/۵ برای مس نیترات به آهن نیترات، استفاده از آمونیاک به عنوان عامل رسوبدهی، pH برابر با ۱۰، دمای 130°C و زمان رشد ۱۲ h تعیین گردید. نمونه حاصل در ادامه در دمای 80°C به مدت ۶ h کلسینه شد. ارزیابی عملکرد غشا نشان داد که در جداسازی مخلوط آب و نرمال-هگزان، آب بر خلاف نرمال هگزان به طور کامل از غشا عبور کرده و شار عبوری برابر با $31898 \text{ h}\cdot\text{L}/\text{m}^2$ و بازدهی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ارتقای عملکرد جداسازی در توری‌های فولادی، ابتدا سطح توری فولادی تحت فرآیند آماده‌سازی شامل شست و شو با آب مقطر و اتانول، حکاکی شیمیایی سطح با محلول هیدروکلریک اسید، و بذرنشانی با لایه‌ای از مس اکسید به روش غوطه‌وری به مدت ۶۰ min و خشک کردن در دمای 90°C به مدت ۱ h قرار گرفت. سپس طراحی آزمایش با روش یک فاکتور

برای بررسی و تحلیل دقیق تر عملکرد نمونه تهیه شده، مقایسه‌ای میان نتایج این پژوهش و برخی مطالعات پیشین صورت گرفته است که **جدول ۶** خلاصه‌ای از این مقایسه را نشان می‌دهد.

جداسازی بیش از ۹۹/۹٪ حاصل شد. نتایج آنالیزهای XRD، FESEM و EDS تشکیل یکنواخت بذرایه مس اکسید با قطر میانگین ۳۵۰ nm و پوشش همگن ذرات مس فریت با شکل نانوکره در بازه ۵۰۰ nm تا ۹۱۰ nm را تایید کردند.

جدول ۶ مقایسه عملکرد غشای تهیه شده با نتایج گزارش شده در مقالات مشابه.
Table 6: Comparison of the prepared membrane with reported results of similar articles.

Reference	Substrate type/ preparation of substrate	Seed composition/ seed deposition method	Coating type/coating method	Separation permeate flux (L.m ² .h ⁻¹)	Separation efficiency (%)	Characteristics
[33]	Stainless steel mesh/ washing and chemical etching	Zinc oxide (zinc acetate and ethanol)/ immersion	Zinc oxide/ chemical bath deposition	Chloroform: 4200 Water: 9700	>99.9	Creation of micro/nano structure, tuning wettability without using low surface energy materials, changing wettability by applying 400 °C temperature, exhibiting superhydrophobic/superoleophilic in air, superhydrophilic/superoleophobic under water.
[46]	Stainless steel mesh/ washing and chemical etching	Without seeding	Titanium oxide/ hydrothermal	Not reported	>98	Exhibiting amphiphilic wettability (superhydrophilic/ superoleophilic in air), separation of immiscible mixtures and water-oil emulsion.
[47]	Stainless steel mesh/ washing	Without seeding	Tungsten oxide/ hydrothermal	9870±15	98±1	Use of tungsten oxide as a hydrophilic compound, exhibiting high flux and hydrophilicity in air/ oleophobicity underwater.
[48]	Stainless steel mesh/ washing	Without seeding	Iron oxide (Fe ₂ O ₃)/ immersion and in-situ flame	Not reported	97.5	Fast and simple construction method, with superhydrophobic wetting behavior
This research	Stainless steel mesh/ washing and chemical etching	Copper oxide (copper acetate and ethanol)/ immersion	Copper ferrite/ hydrothermal	31,898	>99	Investigation of two approaches for preparation and seeding of the mesh, selection of optimal conditions, use of ferrite composite for water-oil separation, high permeability and separation efficiency, exhibiting superhydrophilicity in air and superoleophobicity under water.

علائم و نشانه‌ها	S: سطح مقطع مؤثر غشای توری (m ²)
C ₀ : غلظت آب یا روغن در محلول تصفیه شده (mol/L)	SDS: سدیم دو دسیل سولفات -
C ₁ : غلظت آب یا روغن در محلول خوراک (mol/L)	SPAN-60: سوربیتان مونواسترات-۶۰ -
EDS: طیف سنجی پخشی انرژی پرتو ایکس -	t: زمان جداسازی (h)
F: شار محلول تصفیه شده (L/m ² .h)	Tween-80: پلی سوربات-۸۰ -
FESEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی -	V: حجم محلول فیلتر شده (L)
HMTA: هگزامتیلن تترامین -	XRD: پراش پرتوی ایکس -
	η: راندمان جداسازی (%)
	2θ: زاویه پراش پرتو ایکس (°)

مراجع

- [1]. Zheng, Y., Sun, F., Zeng, P., & Su, Y. (2025). Recent development of special wettability filtration membrane for selective oil/water separation applications. A review. *Progress in Organic Coatings*, 198, 108885. doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108885.
- [2] Ghasemi Chapi, N.; Pirovi, M.; & Jahanshahi, M. (2018). Application of a hydrophilic AC/TiO₂ dynamic membrane for reducing fouling of polymeric support membranes in oily wastewater treatment. *Petroleum Research*, 28(97-2), 93–102. doi.org/10.22078/pr.2017.2748.2272. (in Persian).
- [3] Parvizian, F.; Mousavi Motahar, M. S.; Hosseini, S. M.; & Bagheripour, A. (2019). Fabrication and evaluation of a nanofiltration composite membrane based on polyethersulfone/polyvinylidene fluoride for wastewater treatment. *Petroleum Research*, 28(97-6), 68–79. doi.org/10.22078/pr.2018.3022.2402. (in Persian).
- [4]. Zhang, B. (2025). Application of surface super-wettability materials in oil/water separation. *Applied and Computational Engineering*, 122, 40-44. doi.org/10.54254/2755-2721/2025.19596.
- [5]. Yaxin Zheng, F. S., Pengjin Zeng, Yi Su (2025). Recent development of special wettability filtration membrane for selective oil/water separation applications: A review. *Progress in Organic Coatings*, 198. doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108885.
- [6]. Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces*: Academic press.
- [7]. Chen, B., Zhang, R., Fu, H., Xu, J., Jing, Y., Xu, G., & Hou, X. (2022). Efficient oil–water separation coating with robust superhydrophobicity and high transparency. *Scientific Reports*, 12(1), 2187. doi.org/10.21203/rs.3.rs-930057/v1.
- [8]. Solomon, B. R., Hyder, M. N., & Varanasi, K. K. (2014). Separating oil-water nanoemulsions using flux-enhanced hierarchical membranes. *Scientific Reports*, 4(1), 5504. doi.org/10.1038/srep05504.
- [9]. Sob, P. B. (2020). Modeling the Impacts of liquid entry pressure on membrane performance during oil-water separation. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(12), 4163–4170. ISSN (E): 2249–8001.
- [10]. Zhou, J. E., Hu, X. B., Wang, Y. Q., Zhang, X. Z., & Pan, J. T. (2012). Influence of operational parameters on oil-water separation efficiency of titanium oxide modified alpha-alumina microfiltration membrane. *Key Engineering Materials*, 512(1), 655-1658. doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.512-515.1655.
- [11]. Lewis, J. (2018). Gas separation membranes: polymeric and inorganic by AF Ismail, KC Khulbe, and T. Matsuura. *Chemical Engineering Education*, 52(3), 223-223.
- [12]. Li, F., Kong, W., Zhao, X., & Pan, Y. (2020). Multifunctional TiO₂-based superoleophobic/superhydrophilic coating for oil–water separation and oil purification. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(15), 18074-18083. doi.org/10.1021/acsmi.9b22625.
- [13]. Gou, X., Zhang, Y., Long, L., Liu, Y., Tian, D., Shen, F., & Deng, S. (2020). Superhydrophilic and underwater superoleophobic cement-coated mesh for oil/water separation by gravity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 605, 125338. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125338.
- [14]. Zhang, Y., Wang, H., Wang, X., Liu, B., & Wei, Y. (2021). An anti-oil-fouling and robust superhydrophilic MnCo₂O₄ coated stainless steel mesh for ultrafast oil/water mixtures separation. *Separation and Purification Technology*, 264, 118435. doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118435.
- [15]. Velayi, E., & Norouzbeigi, R. (2019). Fabrication of superhydrophobic CuO-ZnO nanostructured films on

- the stainless steel meshes for oil-water separation. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 31(s3), 351-354. doi.org/10.21271/zjpas.31.s3.49.
- [16]. Shayesteh, H., Rahbar-Kelishami, A., & Norouzbeigi, R. (2022). Superhydrophobic/superoleophilic micro/nanostructure nickel particles for oil/water mixture and emulsion separation. *Ceramics International*, 48(8), 10999-11008. doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.320.
- [17]. Baig, U., Dastageer, M., & Gondal, M. (2023). Facile fabrication of super-wettable mesh membrane using locally-synthesized cobalt oxide nanoparticles and their application in efficient gravity driven oil/water separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 660, 130793. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130793.
- [18]. Yin, X., He, Y., Li, H., Ma, X., Zhou, L., He, T., & Li, S. (2021). One-step in-situ fabrication of carbon nanotube/stainless steel mesh membrane with excellent anti-fouling properties for effective gravity-driven filtration of oil-in-water emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 592, 87-94. doi.org/10.1016/j.jcis.2021.02.043.
- [19]. Sun, K., Hong, X., Yu, T., & Wang, Z. (2025). Three-dimensional-nanostructured superhydrophilic mesh membrane for oil/water separation via a corrosion-mediated self-assembly strategy. *ACS Applied Nano Materials*, 8(11), 5653-5662. doi.org/10.1021/acsnm.5c00150.
- [20]. Xu, W., Li, S., Sun, S., & Chen, Y. (2025). TiO₂ coated stainless steel mesh with high separation efficiency and flux to separate dispersed and emulsified oil in oil-in-water solution. *Separation and Purification Technology*, 133605. doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133605.
- [21]. Li, Z., Zhao, H., Meng, Y., Cheng, H., & Zhang, X. (2025). A nanocoated stainless steel mesh for oily wastewater separation and its superhydrophobic mechanism. *Journal of Water Process Engineering*, 72, 107410. doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107410.
- [22]. Xiang, H., Zhang, W., Huang, X., Hu, C., Yin, H., Ma, B. & Ren, K. (2025). ZnO Nanoparticle-enhanced Zn/Ni superhydrophobic stainless steel mesh: microstructural control for high-efficiency oil-water separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 117595. doi.org/10.1016/j.jece.2025.117595.
- [23]. You, Z., Han, X., Qiao, Z., Liu, Y., Gao, Q., Ma, R. & Yang, M. (2025). Preparation of corrosion-resistant superhydrophobic Ni-Co coatings on copper mesh and oil-water separation properties. *Materials Chemistry and Physics*, 332, 130228. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130228.
- [24]. Masunga, N., Mmelesi, O. K., Kefeni, K. K., & Mamba, B. B. (2019). Recent advances in copper ferrite nanoparticles and nanocomposites synthesis, magnetic properties and application in water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103179. doi.org/10.1016/j.jece.2019.103179.
- [25]. Afaq, M., Basha, B., Warsi, M. F., Shahid, M., Alrowaili, Z., Al-Buriahi, M., & Yousaf, S. (2023). Fabrication of ZnO-CuFe₂O₄-CNTs ternary nanocomposite for harmful organic effluents degradation by sunlight irradiation. *Materials Science and Engineering: B*, 292, 116444. doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116444.
- [26]. Abdullah, M., Murtaza, G., & Khan, M. A. (2023). Synthesis and characterizations of graphene/copper ferrite for efficient arsenic removal. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(4), 276. doi.org/10.1007/s11270-023-06276-x.
- [27]. Xie, L., Coffie, E. S., Li, P., & Zhang, B. (2021). Removal of emulsified oil by ferrite-coated ceramic membranes. *New Journal of Chemistry*, 45(13), 5863-5871. doi.org/10.1039/D0NJ05956K.
- [28]. Zeynizadeh, B., Sadeghbari, M., & Noroozi Pesyan, N. (2020). Fabrication and characterization of the immobilized Cu (II) and Ni (II) species on silica-coated copper ferrite: as novel magnetically reusable nanocatalysts toward synthesis of biscoumarins. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 17(1), 73-88. doi.org/10.1007/s13738-019-01750-y.
- [29]. Wabaidur, S. M., Khan, M. A., Siddiqui, M. R., Otero, M., Jeon, B.-H., Alothman, Z. A., & Hakami, A. A. H. (2020). Oxygenated functionalities enriched MWCNTs decorated with silica coated spinel ferrite-A nanocomposite for potentially rapid and efficient de-colorization of aquatic environment. *Journal of Molecular Liquids*, 317, 113916. doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113916.
- [30]. Rezaie, A. B., Montazer, M., & Rad, M. M. (2019). Facile fabrication of cytocompatible polyester fiber composite incorporated via photocatalytic nano copper ferrite/myristic-lauric fatty acids coating with antibacterial and hydrophobic performances. *Materials Science and Engineering: C*, 104, 109888. doi.org/10.1016/j.msec.2019.109888.
- [31]. Wang, L. Z., Y.; Chen, H.; Li, X. (2020). Surface Cleaning and etching strategies for enhancing coating adhesion on stainless steel meshes used in oil/water separation. *Applied Surface Science*, 529. doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147100.
- [32]. Zhang, Y., Li, H., Wang, X., & Chen, J. (2021). Effect of surface pretreatment on the adhesion and separation performance of superhydrophobic coatings for oil/water separation. *Journal of Membrane Science*, 635. doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119509.

- [33]. Velayi, E., & Norouzbeigi, R. (2020). A mesh membrane coated with dual-scale superhydrophobic nano zinc oxide: Efficient oil-water separation. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125394. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125394.
- [34]. Budiman, F., Bashirrom, N., Tan, W. K., Razak, K. A., Matsuda, A., & Lockman, Z. (2016). Rapid nanosheets and nanowires formation by thermal oxidation of iron in water vapour and their applications as Cr (VI) adsorbent. *Applied Surface Science*, 380, 172-177. doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.209.
- [35]. Budiman, F., Ismardi, A., Muhammad, R., Hardinah, T., Rozana, M., Ismail, S., & Lockman, Z. (2021). Thermally oxidized steel mesh for oil-water separation application and its automation device. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100538. doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100538.
- [36]. George, J., & Abraham, K. (2021). The structural phase change of copper ferrite and its gas-sensing properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(10), 13220-13238. 10.1007/s10854-021-05869-8.
- [37]. Al-Qasbi, N., Al-Gethami, W., Alhashmialameer, D., Ismail, S. H., & Sadek, A. H. (2022). Evaluation of green-synthesized cuprospinel nanoparticles as a nanosensor for detection of low-concentration Cd (II) ion in the aqueous solutions by the quartz crystal microbalance method. *Materials*, 15(18), 6240. doi.org/10.3390/ma15186240.
- [38]. Mojaver, V., Ahmadpour, A., Bastami, T. R., & Mahmoodi, V. (2021). Synthesis and characterization of CuFe₂O₄ magnetic nanoparticles and their application for removal of reactive red 141 from aqueous solution. *Journal of Metallurgical & Materials Engineering*, 27(2). doi.org/10.22067/jmme.2021.58831.0.
- [39]. Zhu, Z., Li, X., Zhao, Q., Li, Y., Sun, C., & Cao, Y. (2013). Photocatalytic performances and activities of Ag-doped CuFe₂O₄ nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 48(8), 2927-2932. doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.04.042.
- [40]. Mobarak, M. B., Hossain, M. S., Chowdhury, F., & Ahmed, S. (2022). Synthesis and characterization of CuO nanoparticles utilizing waste fish scale and exploitation of XRD peak profile analysis for approximating the structural parameters. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(10), 104117. doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104117.
- [41]. Parekh, Z. R., Chaki, S. H., Hirpara, A. B., Patel, G. H., Kannaujiya, R. M., Khimani, A. J., & Deshpande, M. (2021). CuO nanoparticles—synthesis by wet precipitation technique and its characterization. *Physica B: Condensed Matter*, 610, 412950. doi.org/10.1016/j.physb.2021.412950.
- [42]. Cui, H., Liu, Y., & Ren, W. (2013). Structure switch between α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ during the large scale and low temperature sol-gel synthesis of nearly monodispersed iron oxide nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 24(1), 93-97. doi.org/10.1016/j.appt.2012.03.001.
- [43]. Jayanthi, S. A., Nathan, D. M. G. T., Jayashainy, J., & Sagayaraj, P. (2015). A novel hydrothermal approach for synthesizing α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ mesoporous magnetic nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 162, 316-325. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.05.073.
- [44]. Sahadevan, J., Sojiya, R., Padmanathan, N., Kulathuraan, K., Shalini, M., Sivaprakash, P., & Muthu, S. E. (2022). Magnetic property of Fe₂O₃ and Fe₃O₄ nanoparticle prepared by solvothermal process. *Materials Today: Proceedings*, 58, 895-897. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.420.
- [45]. Luo, T., Guo, Y., Deng, Z., Liu, X., Sun, Z., Qi, Y., & Yang, M. (2023). Energy-dispersive X-ray spectroscopy for the quantitative analysis of pyrite thin specimens. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 38(6), 1304-1310. doi.org/10.1007/s11595-023-2824-z.
- [46]. Zhang, Y.-P., Wang, Y.-N., Wan, L., Chen, X.-X., & Zhao, C.-H. (2023). Superwetting stainless steel mesh used for both immiscible oil/water and surfactant-stabilized emulsion separation. *Membranes*, 13(10), 808. doi.org/10.3390/membranes13100808.
- [47]. Nouri, M., Sadeghi, M. T., Rashidi, A., & Norouzbeigi, R. (2024). Hydrothermally synthesized WO₃ coated stainless steel mesh for oil-water separation purposes. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 14(5), 1247-1258. doi.org/10.1007/s13202-023-01741-z.
- [48]. Sun, Y., Ke, Z., Shen, C., Wei, Q., Sun, R., Yang, W., & Yin, Z. (2022). Facile construction and fabrication of a superhydrophobic and super oleophilic stainless steel mesh for separation of water and oil. *Nanomaterials*, 12(10), 1661. doi.org/10.3390/nano12101661.