

نانوالیاف؛ لایه‌هایی همه‌کاره برای جداسازی کارآمد آب و روغن



نانو تکنولوژی

بخش اول

مترجم: علیرضا شیاسی | منبع: ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

۱- مقدمه

در این مقاله، مروری اجمالی بر طراحی، تولید و پیشرفت‌های اخیر در نانوالیاف الکتروریسی شده‌ای که تنظیم ترشوندگی سطحی در آن‌ها برای به‌کارگیری در جداسازی آب و روغن امکان‌پذیر است، ارائه می‌گردد. براساس دسته‌بندی مواد مختلفی که برای جداسازی استفاده می‌شود، این مقاله مطابق شکل ۱ به سه بخش تقسیم می‌گردد: جاذب‌های نانولیفی برای پاکسازی نشت مواد نفتی، غشاهای نانولیفی برای جداسازی آب و روغن و ایروژل‌های نانولیفی (NFA) برای جداسازی امولسیون‌های آب و روغن. در هر بخش با ذکر مثال‌هایی از مواد مورد استفاده، سازوکار مربوطه به روشنی شرح داده شده و درباره خصوصیت‌های بنیادی ذاتی و روش‌های بهینه‌سازی آن‌ها توضیح داده می‌شود. چشم‌انداز آینده این مواد و چالش‌های مطرح در آن‌ها در پایان هر بخش برجسته شده است.

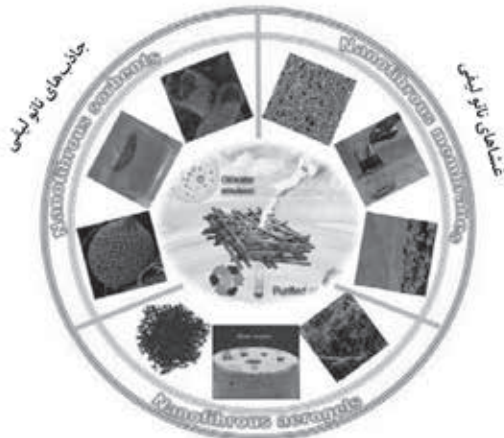
۲- جاذب‌های نانولیفی در پاکسازی نشت نفت و لکه‌های نفتی

استخراج مکانیکی با استفاده از جاذب‌ها یکی از کارآمدترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای پاکسازی نشت مواد نفتی است که شامل به‌کارگیری جاذب‌ها برای تغلیظ و انتقال این مواد در حالت جامد یا نیمه‌جامد می‌شود.

از این رو، یک جاذب ایده‌آل ماده‌ای با آب‌گریزی و چربی‌دوستی همزمان است که ویژگی‌هایی نظیر ظرفیت و نرخ جذب بالا، خاصیت شناوری زیاد و امکان استفاده مجدد داشته باشد.

آلودگی‌های روغنی ناشی از صنایع مواد غذایی، نساجی، پتروشیمی و همچنین حوادث مکرر نشت نفت که در حین تولید در سکوها نفتی و یا انتقال با نفتکش‌های دریایی رخ می‌دهد (مانند نشت مواد نفتی در خلیج مکزیک) سبب هدر رفتن عظیم منابع انرژی و آسیب‌های جبران‌ناپذیر و بلندمدت به محیط زیست می‌شود. روش‌های مرسوم برای جداسازی مخلوط‌های متنوع مواد نفتی و آب مانند جمع‌آوری سطحی آلودگی‌های شناور، جداسازی با استفاده از امواج فراصوت و سرریز کردن مواد سبک از روی سطح اگرچه مفید هستند، اما از محدودیت‌های فراوانی نظیر کارایی پایین در جداسازی، نیاز به انرژی زیاد و ایجاد آلودگی‌های ثانویه رنج می‌برند و عملاً برای جداسازی امولسیون‌های آب قابل استفاده نیستند. از این رو مواد جدید مقرون به صرفه و کارآمد برای جداسازی آب و روغن، به ویژه در شرایطی که عوامل دیسپرس‌کننده یا سورفکتانت‌ها در محیط موجودند، به طور جدی مورد مطالبه است.

جداسازی با استفاده از موادی که تمایل‌پذیری به آب یا نفت داشته باشند، عرصه‌ی نسبتاً جدیدی در توسعه صنعتی است که آینده بسیار درخشانی دارد. با استفاده از ترکیب شیمیایی و ساختار سطحی مناسب می‌توان سطوح ترشونده ویژه‌ای با خصوصیات فوق‌ترشوندگی گزینشی نسبت به آب و روغن (مانند سطوح آب‌گریز با ویژگی فوق‌چربی‌دوستی در مجاورت هوا یا فوق‌چربی‌دوستی در محیط آبی) برای جداسازی مخلوط‌های متنوع آب و مواد روغنی و امولسیون‌های آن‌ها تولید کرد. به تازگی تکنیک الکتروریسی به عنوان روشی عملی و انعطاف‌پذیر برای تولید نانوالیاف که می‌توان ساختار و ترکیب شیمیایی این مواد را در آن به آسانی کنترل کرد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این روش وقتی ویژگی‌های چشمگیری مانند نسبت سطح به حجم بالا و ساختارهایی با تخلخل متنوع به آسانی در کنار قابلیت‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی بی‌همتا - تأمین شده با کمک مواد دیگر - قرار می‌گیرد، به صورت مخصوصی قدرتمندتر می‌شود. به این ترتیب الکتروریسی راهکاری ایده‌آل برای ساخت سطوح ترشونده خاص فراهم می‌آورد و پژوهش‌ها در ساخت جاذب‌ها، غشاهای ایروژل‌های نانولیفی برای جداسازی مؤثر آب و روغن در سال‌های اخیر شاهدهی بر گسترش سریع این حوزه است.



ایروژل‌های نانولیفی

شکل ۱. نانوالیاف تولیدشده به روش الکتروریسی برای جداسازی آب و روغن.



به‌طور کلی می‌توان جاذب‌های نانولیفی تولید شده با فرایند الکتروروسی را که تاکنون برای جذب نفت و مواد روغنی توسعه یافته‌اند به سه دسته اصلی تقسیم کرد: نانولیف پلیمری آب‌گریز با خاصیت چربی دوستی همزمان، نانولیف کامپوزیتی و نانولیف کربنی.

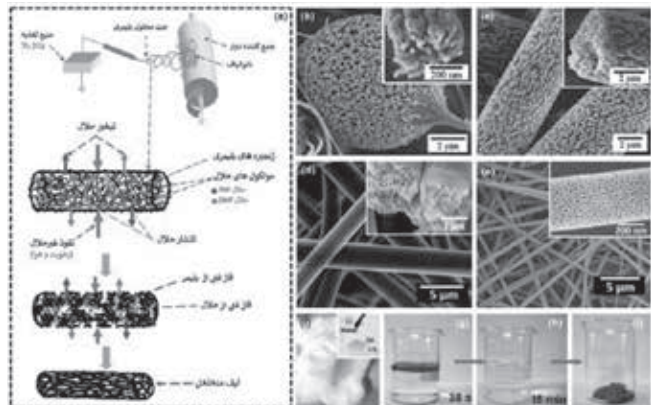
۱-۲- نانولیف پلیمری آب‌گریز با خاصیت چربی دوستی همزمان

الکتروروسی نانولیف متخلخل از پلیمرهای آب‌گریزی که خاصیت چربی دوستی دارند (مانند پلی استایرن، PS) روشی مؤثر را برای ایجاد جاذب‌های لیفی مواد نفتی ارائه می‌دهد. براساس اصول مکانیزم جداسازی فازی، تاکنون لیف پلی استایرن با تخلخل‌های نانومقیاس و میکروساختارهای مختلف (مانند بخش مغزی توپر- غلاف متخلخل، پلی استایرن فوق متخلخل و پلی استایرن با مغز متخلخل- سطح ناهموار چین خورده) تولید شده است (شکل ۲-۲ تا ۲-۳). ایجاد ساختار متخلخل و ناهموار در پلی استایرن آب‌گریز و چربی دوست منجر به تبدیل آن به جاذبی فوق چربی دوست و فوق آب‌گریز می‌شود که ظرفیت جذب روغن و مواد نفتی آن را تا ۱۱۳.۸۷ گرم به ازای هر گرم جاذب - یعنی حدود ۳ تا ۴ برابر لایه‌های بی‌بافت پلی پروپیلن - افزایش می‌دهد. علاوه بر این، میکروساختارها و کارایی پلی استایرن در جذب مواد نفتی با اعمال تغییر در غلظت محلول پلیمری، وزن مولکولی پلیمرها با منشأ متفاوت و استفاده از ترکیب درصد حلال‌های مختلف به طرز ماهرانه‌ای قابل تنظیم است.

برای انتخاب یک جاذب در پاکسازی نشت مواد نفتی، گزینش پذیری لایه نسبت به آب یا مواد نفتی پارامتر مهمی به شمار می‌رود. درحالی که قطرات آب قرار گرفته روی لیف پلی استایرن با آن زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه می‌سازند، قطرات روغن بلافاصله جذب این لیف شده و در سطح لیف پخش می‌شوند (شکل ۲-۴). این موضوع در یک آزمایش متداول جذب روغن با لیف پلی استایرن شناور در سطح که از ابتدای آزمایش شروع به جذب روغن موجود کرده و پس از ۱۵ دقیقه موفق به جذب همه روغن موتور موجود در آب می‌شود، گزارش شده است (شکل ۲-۳ تا ۲-۴).

۲-۲- نانولیف کامپوزیتی

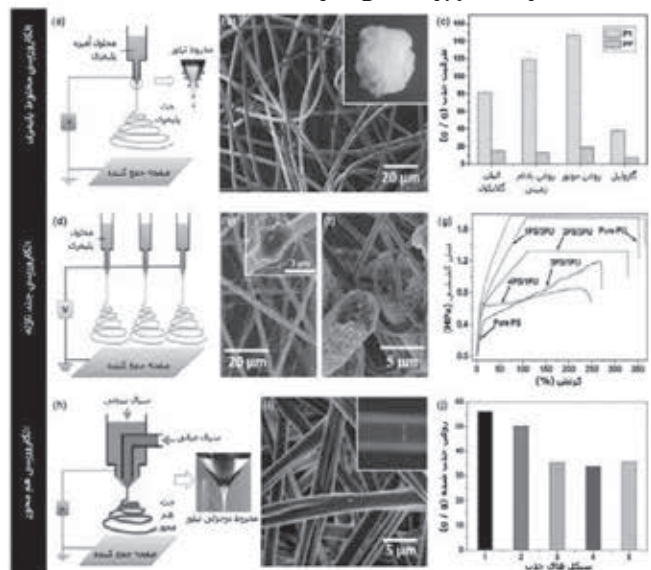
یکی از نقطه ضعف‌های جاذب‌های ساخته شده با لیف پلی استایرن، ایجاد حالت ارتجاعی پس از جذب مواد نفتی و کاهش استحکام آن‌هاست که به امکان استفاده مجدد ناکارآمد آن‌ها منجر می‌شود. یک راه مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و قابلیت استفاده مجدد نانولیف پلی استایرن، تهیه کامپوزیت‌های آن با مواد دیگر است، به گونه‌ای که از پتانسیل جذب مواد نفتی آن جزء نیز بتوان بهره برد. در انتخاب اجزای تقویت کننده باید توجه داشت که بخش تقویت کننده باید با دوام و انعطاف پذیر باشد تا بتواند تنش‌های مکانیکی وارده حین



شکل ۲. (a) نمای شماتیک فرآیند شکل‌گیری لیف متخلخل در حین انجام الکتروروسی، (b) تصاویر FE-SEM لیف PS با وزن مولکولی $M_w = 20,8000$ g/mol تهیه شده از انحلال در مخلوط حلال THF و DMF (نسبت اختلاط وزنی حلال ۱ به ۴) به ترتیب با غلظت‌های ۰.۱ (درصد ۳۰ و ۳۰ درصد وزنی، (c) و تصاویر FE-SEM لیف PS با وزن مولکولی $M_w = 25,000$ g/mol تهیه شده از انحلال در مخلوط حلال THF و DMF با غلظت ۲۰ درصد وزنی (به ترتیب با نسبت اختلاط وزنی حلال ۱ به ۴ و ۱ به ۱) (f، g) ترشوندگی لیف PS با آب و روغن، (h و i) جمع‌آوری لکه روغن موتور از آب با استفاده از لیف PS.

در بین جاذب‌های متداول مواد نفتی، لیف مصنوعی آلی مانند لایه‌های بی‌بافت پلی پروپیلن (PP) با وجود آنکه در عمل ظرفیت پایینی در جذب روغن داشته‌اند (کمتر از ۳۰ گرم به ازای هر گرم جاذب)، به‌طور گسترده‌ای در پاکسازی نشت روغن و مواد نفتی استفاده می‌شدند.

تحقیقات اخیر در زمینه نانولیف تولید شده به روش الکتروروسی کارایی بالای آن‌ها را به عنوان جاذب روغن و مواد نفتی نوید می‌دهد. ظرفیت جذب نانولیف نه تنها به دلیل حفرات فراوان بین نانولیف، بلکه به‌خاطر ساختار پرتخلخل خود لیف است.



شکل ۳. (a) نمای شماتیک چیدمان فرآیند الکتروروسی مخلوط پلیمری، (b) تصویر SEM لیف کامپوزیتی PVC/PS، (c) مقایسه حداکثر ظرفیت جذب لیف کامپوزیتی PVC/PS و لیف PP برای مواد مختلف، (d) نمای شماتیک چیدمان فرآیند الکتروروسی چندنازله، (e) تصویر FE-SEM نانولیف کامپوزیتی PS/PVDF/Fe₃O₄، (f) تصویر FE-SEM لیف کامپوزیتی PS/PU با نسبت نازل‌های ۴ به ۱، (g) نمودار تنش-کرنش لیف کامپوزیتی PS/PU با نسبت نازل‌های مختلف تحت بارگذاری کششی، (h) نمای شماتیک چیدمان فرآیند الکتروروسی هم‌محور ساده، (i) تصاویر FE-SEM و TEM کامپوزیت میکرولیفی PS-PU تولید شده به روش الکتروروسی هم‌محور، (j) قابلیت استفاده مجدد لایه کامپوزیتی لیفی PS-PU برای جذب روغن موتور.



استایرن با سطح مخصوص بالا - به عنوان جاذب روغن - منتشر کردند که برای تولید آن از روش الکترورسی هم محور استفاده شده بود (شکل ۳-۱ و ۱). این لایه‌ها با جذب ۶۴,۴۰ گرم روغن موتور و ۴۷,۴۸ گرم روغن دانه آفتابگردان به ازای هر گرم جاذب، ظرفیت جذب خوبی را از خود به نمایش گذاشتند. حفظ ظرفیت بالای جذب روغن - حتی پس از انجام پنج سیکل کاری - نشان از قابلیت استفاده مجدد عالی این جاذب‌های کامپوزیتی دارد (شکل ۳-۲).

۳-۲- نانوالیاف کربن

بازیافت جاذب‌های فعلی تولید شده از پلیمرهای آلی یا الیاف زیستی با استفاده از حلال‌های آلی ممکن است به تورم و حتی انحلال آن‌ها منجر شود. Lin و همکارانش با توسعه روشی مبتنی بر تصعید، از الیاف الکترورسی شده لایه نازک نانوالیاف کربنی با منافذ درشت تولید کردند که چنین مشکلی را ندارد. این لایه با ظرفیت جذب حداکثر ۱۳۸,۴ گرم روغن سیلیکون به ازای هر گرم جاذب، خصوصیات بسیار خوبی در جذب روغن از خود نشان داده است. نکته قابل توجه، قابلیت بازیافت و استفاده مجدد عالی این لایه‌ها با استفاده از حلال‌های آلی مناسب است که آینده درخشان آن را در پاکسازی لکه‌های نفتی و پساب‌های روغنی نوید می‌دهد.

با وجود آینده امیدوارکننده و پتانسیل فراوان جاذب‌های نانولیفی در پاکسازی لکه‌های نفتی و نشست مواد روغنی، به دلیل محدودیت در ظرفیت جذب آن‌ها، حجم زیادی از این مواد جاذب برای پاکسازی و جبران اثرات یک حادثه نشست مواد نفتی نیاز است که مسائل اقتصادی سنگینی را مطرح می‌سازد. به علاوه، فرآیند پیچیده و زمان بر بازیافت نفت و مواد روغنی از این جاذب‌ها، یک مانع برای به‌کارگیری آن‌ها در شرایط واقعی است. برای حل این مشکلات لازم است تلاش‌های

بازیافت مجدد جاذب‌ها را تحمل کند.

همچنین این بخش لازم است چربی‌دوست و آب‌گریز باشد تا نفت و مواد روغنی را به خود جذب نماید. برای تأمین این معیارها و اصلاح الیاف متخلخل پلی‌استایرن، پلیمرهایی مانند پلی یورتان (PU)، پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) و پلی وینیل کلراید (PVC) به عنوان بخش تقویت‌کننده استفاده می‌شوند. به منظور ترکیب این مواد در الیاف پلی‌استایرن، روش‌های زیادی مانند الکترورسی مخلوط پلیمری، الکترورسی چندفازی و الکترورسی هم محور به کار گرفته شده است. افزودن مستقیم تقویت‌کننده‌های پلیمری (مانند پلی یورتان یا پلی وینیل کلراید) به محلول پلیمری پلی‌استایرن و سپس الکترورسی و تولید نانوالیاف مخلوط (PU/PS یا PVC/PS)، که با عنوان الکترورسی مخلوط (شکل ۳-۱) شناخته می‌شود، روشی کارآمد و مؤثر است که به آسانی قابل اجرا است.

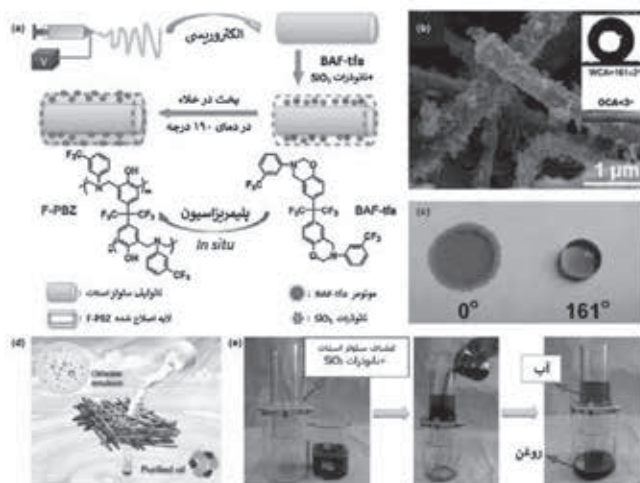
نمونه‌ای از جاذب نانولیفی کامپوزیتی پلی‌استایرن/پلی وینیل کلراید به روش الکترورسی مخلوط ساخته شده است (شکل ۳-۲) که ظرفیت جذب آن برای روغن موتور، روغن بادام زمینی، اتیلن گلیکول و گازوئیل به ترتیب ۱۱۹، ۸۱ و ۳۸ گرم ماده به ازای هر گرم جاذب است. این مقادیر به مراتب از جاذب‌های تجاری تولید شده با الیاف پلی پروپیلن بیشتر است (شکل ۳-۳).

الکترورسی چند نازله هم روش دیگری برای تولید نانوالیاف کامپوزیتی به شمار می‌رود که خواص پلیمرهای مختلف را برای ایجاد هم افزایی در نانوالیاف کامپوزیتی با یکدیگر درمی‌آمیزد.

به تازگی لایه نانولیفی کامپوزیت PVDF/PS که نانوذرات Fe₃O₄ را در درون و روی بخش پلی‌استایرن به همراه داشت، به آسانی با روش الکترورسی چندنازله به‌طور موفقیت آمیز الکترورسی گردید (شکل ۳-۴).

کامپوزیت نانولیفی حاصله ظرفیت خوبی در جذب روغن داشته و ویژگی‌های مکانیکی بهبود یافته‌ای را از خودش نشان می‌دهد که پتانسیل آن را برای به‌کارگیری در جداسازی آب و روغن افزایش می‌دهد (شکل ۳-۵). برای بهبود بیشتر در رفتار کشسانی و بازیافت پذیری بهتر جاذب‌های لیفی، الیاف پلی یورتان با استفاده از روش الکترورسی چندنازله به جاذب‌های پلی‌استایرن الکترورسی شده اضافه شد (شکل ۳-۶). همان‌طور که در نمودارهای شکل ۳-۶ نشان داده شده است، با افزودن الیاف کشسان پلی یورتان، خصوصیات مکانیکی لایه‌های تولید شده به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد که این ویژگی استفاده مجدد از جاذب‌های لیفی را ممکن می‌سازد.

ایجاد پیکربندی پوسته - مغزی در الیاف با استفاده از روش الکترورسی هم محور، روش دیگری برای افزایش خصوصیات مکانیکی و تقویت جاذب‌های لیفی پلی‌استایرن در کاربردهای عملی است. اخیراً Lin و همکارانش گزارشی را در خصوص میکروالیاف کامپوزیت پلی یورتان - پلی



شکل ۴-۱ (a) نمای شماتیک روش پلیمریزاسیون درجا F-PBZ با حضور نانوذرات SiO₂ روی غشای نانولیفی سلولز استات، (b) تصویر FE-SEM غشای نانولیفی اصلاح‌شده سلولز استات با F-PBZ و نانوذرات SiO₂ به همراه زاویه تماس آب و روغن با غشای، (c) تصویر فطرات روغن کلزا (قرمز) و آب (آبی) روی غشای نانولیفی، (d) نمای شماتیک جداسازی امولسیون آب و روغن تحت نیروی پیش‌راندنده جاذبه به‌وسیله غشای نانولیفی، (e) فرآیند آزمایش عملی جداسازی آب و روغن.



فراوانی در یافتن روشی برای برداشت و جمع آوری مداوم، سریع و کارآمد لکه‌های نفتی در محل حادثه از سطح آب متمرکز گردد.

۳- غشاهای نانولیفی برای جداسازی آب و نفت

فناوری غشایی به دلیل کارایی بالا در جداسازی و فرآیند اجرایی نسبتاً ساده، به عنوان امیدوارکننده‌ترین روش تصفیه پساب‌های روغنی شناخته شده است. به‌طور کلی با تغییر در ترکیب شیمیایی و دستکاری ساختار هندسه سطح می‌توان به غشاهای لیفی با خصوصیات ترشوندگی گزینشی مطلوب دست یافت. غشاهای جداسازی عموماً به سه دسته تقسیم می‌شوند: غشاهای برداشت روغن، غشاهای برداشت آب و غشاهای جداسازی هوشمند.

۳-۱- غشاهای نانولیفی با فوق چربی دوستی و فوق آب‌گریزی همزمان

غشاهای نانولیفی فوق ترشونده برداشت روغن درحالی که به آسانی روغن‌ها و مواد نفتی را عبور می‌دهند، قادر به دفع کامل آب هستند. براساس مدل Wenzel و Cassie-Baxter، همان‌طور که وجود ناهمواری‌های نامنظم می‌توانند یک سطح آب‌گریز را به سطحی فوق آب‌گریز تبدیل کنند، چربی دوستی سطح را به فوق چربی دوستی تبدیل خواهند کرد. بنابراین با افزودن ناهمواری سطحی مناسب و ایجاد انرژی سطح پایین می‌توان غشایی ساخت که به‌طور همزمان رفتار فوق آب‌گریزی و فوق چربی دوستی داشته باشد. پژوهشگران دانشگاه Donghua توانسته‌اند با استفاده از روش پلیمریزاسیون درجا، غشاهای نانولیفی فوق چربی دوست و فوق آب‌گریز را برای جداسازی کارآمد آب و روغن توسعه دهند. این غشاها از پلیمریزه کردن درجای لایه‌ی فلئوئوردار شده‌ی پلی بنزوکسازین (F-PBZ) و الحاق نانوذراتی نظیر SiO_2 و Al_2O_3 در سطح نانوالیاف الکترورسی شده، به سهولت ساخته می‌شوند.

نانوالیاف مورد استفاده در این غشاها می‌توانند از منشأ پلیمری (نظیر سلولز استات) و حتی نانوالیاف SiO_2 باشند. غشای نانولیفی آب‌دوست اولیه پس از اصلاح به واسطه الحاق نانوذرات و حضور F-PBZ، از خصوصیت فوق آب‌گریزی و فوق چربی دوستی با زاویه تماس آب حدود ۱۶۱ درجه و زاویه تماس روغن کمتر از ۳ درجه برخوردار گردید که قادر است مخلوط آب و روغن را تنها تحت تأثیر نیروی پیشراننده جاذبه زمین به‌طور مؤثر و سریع جداسازی کند (شکل ۴-d). نفوذ سریع روغن و عبور آن از غشاهای نانولیفی سلولز استات اصلاح شده با F-PBZ و نانوذرات SiO_2 - درحالی که آب در بالای غشا ثابت مانده است - در شکل ۴-e نشان داده شده است. نمونه برجسته در جداسازی مؤثر مخلوط امولسیون شده آب و نفت، غشاهای نانوالیاف SiO_2 اصلاح شده با F-PBZ و نانوذرات Al_2O_3 به روش بالاست که نه تنها نرخ

عبور جریان بسیار زیادی تحت فشار پیشراننده جاذبه زمین دارد، بلکه از دوام، پایداری حرارتی مناسب و خصوصیات ضدگرفتگی مطلوب نیز برخوردار است.

به منظور شکل دهی ساختارهای ناهموار چندلایه سطحی و ایجاد انرژی سطح پایین، پژوهشگران غشاهای نانولیفی برداشت روغن متنوعی را با افزودن نانوخوشه‌های نقره یا نانو سیلیکاهای آب‌گریز به سطوح نانولیف توسعه دادند.

برای نمونه غشاهای نانولیفی فوق چربی دوست و فوق آب‌گریزی از ترکیب روش‌های آمینه کردن نانوالیاف پلی اکریلونیتریل و تثبیت نانوخوشه‌های نقره به روش آبرکاری شیمیایی (بدون اعمال جریان برق) - به همراه اصلاح سطحی لایه - ساخته شده است. غشاهای تولید شده به این روش کارایی جداسازی چشمگیری در محیط‌های فوق شور و در محدوده‌های مختلف pH از خود نشان می‌دهند و به دلیل بازیافت پذیری عالی، گزینه بسیار خوب و امیدوارکننده‌ای برای تصفیه پساب آلوده به روغن در صنایع و پاکسازی نشت مواد نفتی در دریا هستند.

تولید مستقیم ساختارهای متخلخل از مواد ترشونده خاص نیز روشی محبوب برای تولید غشاهای فوق ترشونده برداشت روغن است که می‌تواند جایگزین استفاده از پوشش نانوذرات و اصلاحات شیمیایی مکرر شود. Yoon و همکارانش توانسته‌اند تنها با الکترورسی یک مرحله‌ای پلی استاتین بر روی توری سیمی از آهن زنگ نزن، غشای فوق ترشونده‌ای را بدون هیچ اصلاح شیمیایی اضافه برای جداسازی آب و روغن تولید کنند. در آینده بهره‌گیری از پلیمرهای آب‌گریز مختلف برای تولید غشاهای نانولیفی فوق چربی دوست و فوق آب‌گریز بر مبنای این روش دور از انتظار نیست.

۳-۲- غشاهای نانولیفی فوق آب‌دوست با فوق چربی‌گریزی در محیط آبی

غشاهای برداشت روغن به دلیل خاصیت چربی دوستی به راحتی آلوده و مسدود می‌شوند که این مسئله ظرفیت جداسازی آن‌ها را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار داده و تعداد چرخه‌هایی که می‌توان پس از بازیابی از این غشاها استفاده کرد را محدود می‌کند. پیشرفت‌های اخیر در توسعه غشاهای عامل‌دار با ویژگی فوق آب‌دوستی و فوق چربی‌گریزی همزمان که به آن‌ها غشاهای برداشت آب نیز گفته می‌شود، راه جایگزین دیگری را برای رفع برخی مشکلات جداسازی آب و روغن ارائه می‌دهد.

غشاهای آب‌دوست که در محیط آبی رفتار فوق چربی‌گریزی دارند، از طبیعت دافع چربی فلس‌های ماهی الهام گرفته شده است و امکان طراحی و ساخت آن‌ها براساس ترکیب انرژی سطح مناسب و ویژگی ناهمواری سطحی وجود دارد. نمونه‌ای از غشاهای فوق آب دوست و



با اضافه شدن نانوذرات SiO_2 ، انعطاف پذیری غشا تغییری پیدا نمی‌کند (شکل ۵-b). این در حالی است که ناهمواری‌های نانومقیاسی در سطح نانوالیاف ایجاد شده است. بررسی ساختاری با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اضافه شدن نانوذرات SiO_2 به سطح نانوالیاف را به خوبی تأیید می‌کند (شکل ۵-c). غشاهای ارتقا یافته به این روش در مجاورت هوا به طور همزمان فوق آب‌دوست و فوق چربی‌دوست است (شکل ۵-d). با این حال، به محض معلق کردن این غشاها در محیط آبی، رفتار چربی‌گریزی از آن‌ها بروز می‌کند (شکل ۵-e) که این موضوع می‌تواند آن‌ها را تبدیل به گزینه‌ای مناسب برای جداسازی آب و روغن کند (شکل ۵-f). همچنین در پژوهش دیگری با افزودن نانوذرات NiFe_2O_4 بر روی نانوالیاف SiO_2 ، غشای مغناطیسی نانولیفی برداشت آب با ساختار چندلایه تولید شده است که کارایی جداسازی بالا و نرخ عبور جریان بسیار زیادی تا ۲۲۳۷ لیتر بر مترمربع ساعت دارد (شکل ۵-g). این غشاها مقاومت خوبی در برابر آلودگی‌ها و گرفتگی داشته و پایداری حرارتی بالا (شکل ۵-h) و سهولت بازیافت آن‌ها (شکل ۵-i)، نیازهای واقعی در تصفیه پساب‌های امولسیون شده در مقیاس انبوه را برآورده می‌کند.

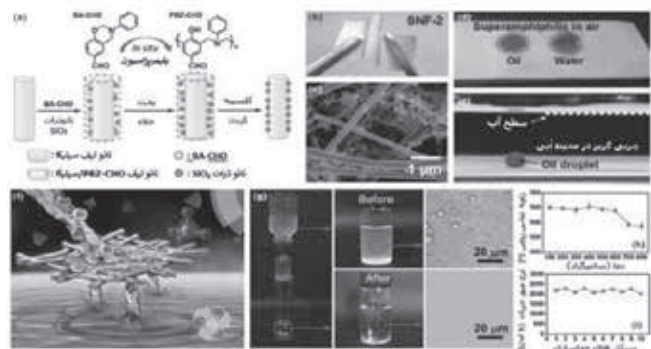
۳-۳- غشاهای اولترافیلتراسیون نانولیفی

غشاهای نانولیفی الکترونیسی شده با داشتن نفوذپذیری بالا و هزینه انرژی پایین نسبت به روش‌های متداول و مرسوم تصفیه آب، روز به روز با استقبال بیشتری مواجه می‌شوند.

برای حل مشکلات ناشی از گرفتگی بالا و نرخ عبور پایین در غشاهای اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون مبتنی بر نانوالیاف، ایجاد یک لایه نازک از مواد آب‌دوست مانند پلی وینیل الکل (PVA)، کیتوزان یا پلی آمید بر روی غشاهای نانولیفی با استفاده از روش جذب فیزیکی یا پلیمریزاسیون به میان سطحی، عملی و امکان‌پذیر است. Chu و همکارانش به منظور رسیدن به نرخ عبور جریان بالا برای جداسازی امولسیون روغن در آب، اصلاح سطحی لایه آب‌دوست را در غشاهای اولترافیلتراسیون نانولیفی گزارش کردند.

همان‌طور که در شکل ۶-a و ۶-b نشان داده شده است، ابتدا یک داربست نانولیفی (از موادی مانند PVA و PAN) بر روی زیرلایه بی‌یافت میکرولیفی الکترونیسی گردید و پس از آن، لایه آب‌دوست از موادی مانند کیتوزان و هیدروژل PVA به روش ریختگری چرخشی بر روی این داربست قرار گرفته تا به این ترتیب، یک غشای نانولیفی سه لایه ایجاد گردد.

به دلیل وجود لایه صاف و بسیار نازک حائل و تخلخل بالا در این غشای برداشت آب، کارایی فوق‌العاده خوب، نرخ عبور جریان بالا و خواص ضدگرفتگی در عملکرد آن مشاهده شده است. طی آزمایش دراز مدت عبور امولسیون روغن در آب از عمق این فیلترها، نرخ عبور



شکل ۵. (a) نمای شماتیک فرآیند تولید غشای SiO_2/SNM با ترکیب روش پلیمریزاسیون درجا و الکترونیسی SiO_2/SNM (b) انعطاف‌پذیری خوب غشای SiO_2/SNM (c) تصویر FE-SEM از غشای SiO_2/SNM (d) تصویر قطرات روغن و آب روی غشای SiO_2/SNM (e) تصویر قطره روغن روی SiO_2/SNM در زیر سطح آب، (f) نمای شماتیک جداسازی امولسیون آب و روغن تحت نیروی پیش‌راننده جاذبه به‌وسیله غشاهای نانولیفی، (g) تصاویر آزمایش جداسازی آسان میکروامولسیون‌های نفت در آب به‌وسیله غشای SiO_2/SNM تحت نیروی پیش‌راننده جاذبه، (h) نمودار زاویه تماس روغن با غشای SiO_2/SNM در زیر سطح آب پس انجام عملیات کلسینه‌کردن برای مدت ۱۰ دقیقه در دماهای مختلف، (i) نمودار تغییرات در نرخ عبور جریان با افزایش چرخه‌های جداسازی.

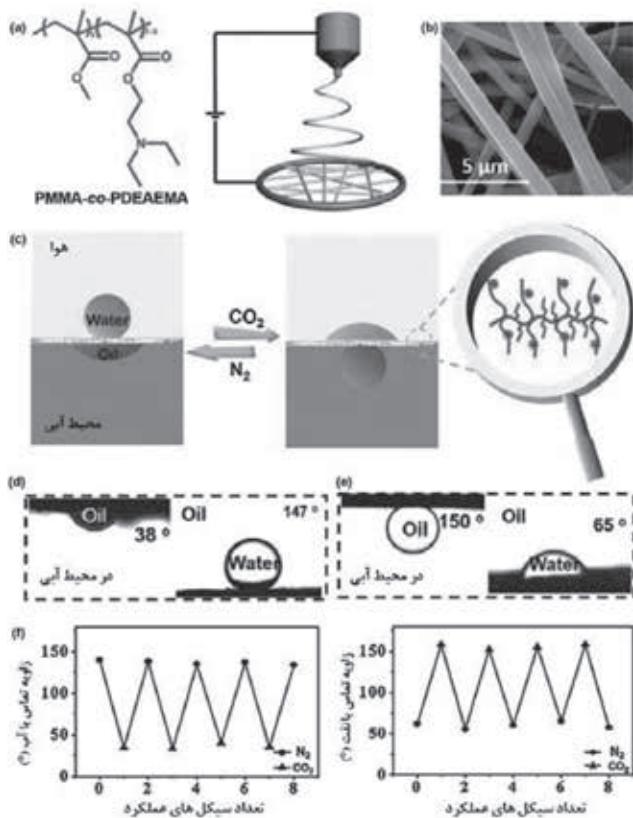
فوق چربی‌گریز از رسوب دادن پوشش معدنی بر پایه کربنات کلسیم (CaCO_3) بر روی سطح غشاهای نانولیفی پلی پروپیلن پیوند زده شده با پلی اکریلیک ساخته شده است.

این غشا زمانی که در محیط آبی قرار گرفته باشد، مقدار زیادی آب را به وسیله پوشش معدنی سفت خود به دام می‌اندازد و لایه هیدراته شده ضخیمی را در سطح حفره‌ی غشا ایجاد تشکیل می‌دهد که به غشا خاصیت فوق چربی‌گریزی در محیط‌های آب می‌دهد. این غشاهای پیوندی قادر به جداسازی امولسیون‌ها و مخلوط‌های مختلف آب و روغن با کارایی و نرخ عبور آب زیاد، تحت فشار و حتی تأثیر نیروی جاذبه هستند.

بر اساس همین قاعده، در پژوهش دیگری پلی استر آب دوست (P_{34}HB) را برای تنظیم تخلخل ساختاری و آب دوستی غشاهای کامپوزیتی به نانوالیاف پلی لاکتیک اسید اضافه کردند که این امر منجر به ایجاد فوق چربی‌گریزی بیشتر غشاهای نفوذپذیر در زیر آب گردید. همچنین غشاهای نانولیفی از الکترونیسی کوپلیمر PVDF-HFP و سلولز - با خاصیت فوق چربی‌گریزی در محیط آبی - ساخته شده است که جداسازی آب از نفت را با کارایی تا ۹۹٫۹۸٪ انجام می‌دهد.

در مقایسه با غشاهای پلیمری، غشاهای نانوالیاف معدنی مزیت‌های بالقوه‌ای را در پایداری تحت شرایط سخت کاری، قابلیت‌های ضدگرفتگی و چرخه آسان در استفاده درازمدت از خود نشان می‌دهند.

مطالعات روی غشای جدید، انعطاف‌پذیر و پایدار در برابر حرارت نانوالیاف SiO_2 با تخلخل چندلایه سطحی، نمونه‌ای برای این موضوع است که جداسازی آب از میکروامولسیون‌های روغن - پایدار شده با مواد سطح فعال - را تحت نیروی جاذبه انجام می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵-a دیده می‌شود، از غشای الکترونیسی شده نانوالیاف SiO_2 به عنوان قالبی برای انجام پلیمریزاسیون درجا و الحاق نانوذرات SiO_2 استفاده شده است.

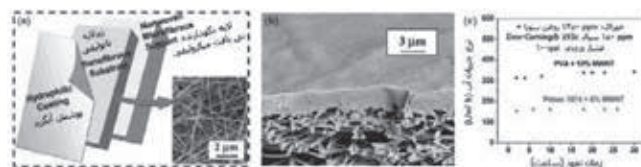


شکل ۳. (a) نمای شماتیک فرآیند الکتروسیسی نانوالیاف PMMA-co-PDEAEMA. (b) تصویر SEM از غشای متخلخل. (c) تغییر ترشوندگی سطح غشا در حضور گاز CO₂ و N₂ و (d) زاویه تماس آب و روغن قبل و بعد از قرارگیری در معرض گاز CO₂ (f) زاویه تماس آب و روغن با غشا در حضور گازهای CO₂ و N₂ پس از انجام چند سیکل اعمال گاز.

MA-co-PDEAEMA با قابلیت تعویض ترشوندگی بین آب و روغن ساخته شده است (شکل ۳-۸ و b). اصول کار این غشا بر مبنای واکنش دادن گاز CO₂ موجود در آب با سومین گروه‌های آمین در بخش PDEAEMA است که منجر به شکل‌گیری زنجیره آب‌دوست گسترش یافته‌ای می‌شود.

اما به محض قرارگیری در مجاورت گاز نیتروژن، گاز CO₂ از غشای جدا شده و خاصیت آب‌گریزی سطح است بازبایی می‌شود. به این ترتیب با استفاده از محرک‌های گازی CO₂/N₂ می‌توان ترشوندگی سطح غشا را نسبت به آب و روغن تنظیم نمود (شکل ۳-۸ تا ۳-۸). به بیان دیگر، به‌کارگیری همزمان نانوساختار متخلخل و واکنش سطح به گاز CO₂ در این غشا می‌تواند آن را چیزی شبیه به کلید قطع و وصل در عبور آب یا روغن کند (شکل ۳-۸). سادگی و تطبیق‌پذیری امیدوارکننده این سیستم نه تنها روش جدیدی را برای تنظیم ترشوندگی سطح مواد با گازها به ما ارائه می‌دهد، بلکه از مزایای مشهود در جداسازی بسیار کنترل‌شده آب و روغن با استفاده از گاز CO₂ نیز برخوردار است.

علاوه‌بر غشاهای حساس و واکنش‌دهنده به محرک‌های خارجی، گزارش‌هایی از امکان جداسازی آب و روغن با غشاهای نانولیفی دولایه هوشمند، به واسطه ظرفیت قابل هدایت انتقال روغن، منتشر شده است.



شکل ۴. (a) روش تولید غشاهای اولترافیلتراسیون سه‌لایه با نرخ عبور جریان بالا و گرفتگی کم، (b) تصویر برش خورده از سطح روی یک غشای کامپوزیتی، (c) نمودار نرخ عبور جریان آب از غشاهای کامپوزیتی آب‌دوست مورد استفاده برای جداسازی امولسیون‌های آب و روغن.

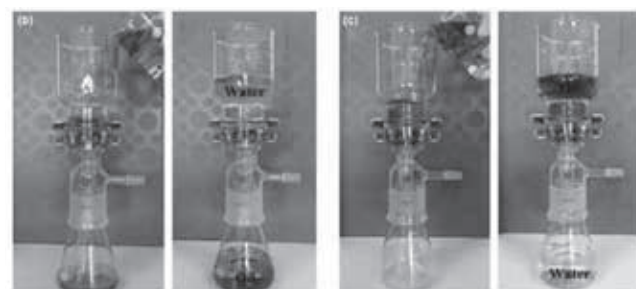
جریان به اندازه غشاهای اولترافیلتراسیون تجاری بالا بوده و کاهش چشمگیر و قابل توجهی در پس‌زدن روغن مشاهده نگردید (شکل ۴-۶).

۳-۴- غشاهای نانولیفی هوشمند با ترشوندگی مخصوص

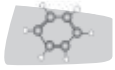
غشاهایی که رفتار ترشوندگی آن‌ها متناسب با شرایط و تحریک محیطی تغییر می‌کند، به‌خاطر اهمیتی که در کاربردهای صنعتی و مطالعات پایه دارند، به‌طور روزافزون مورد توجه قرار می‌گیرند. ترشوندگی سطحی این غشاها با اعمال محرک‌های بیرونی مانند pH، دما، میدان الکتریکی و حتی حضور گازها قابل کنترل است.

به تازگی غشاهای نانولیفی هوشمندی براساس امکان تغییر بسیار زیاد در ترشوندگی نسبت به آب و روغن توسعه یافته‌اند که اهمیت زیادی در تصفیه آب‌های آلوده به روغن برای تقاضاهای مختلف بازار دارند. پلیمرهایی که گروه‌های اسیدی یا بازی دارند، معمولاً به دلیل اینکه بارها و ساختار ترکیبی آن‌ها در محیط‌هایی با pH مختلف به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، رفتار ترشوندگی وابسته به pH دارند. اخیراً Li و همکارانش غشای لیفی هوشمندی را با الکتروسیسی PMMA-b-P4VP بر روی توری آهن زنگ‌نزن ساختند که به دلیل ماهیت حساس به pH بخش P4VP و آب‌دوستی و چربی‌دوستی PMMA در محیط آبی، خاصیت ترشوندگی سطحی قابل تغییر نسبت به آب و روغن دارد (شکل ۳-۷). درحالی که به دلیل گزینش‌پذیری، تنها روغن می‌تواند از این غشا عبور کند و آب در حالت اولیه خود باقی می‌ماند (شکل ۳-۷). در محیط‌های اسیدی (pH=۳) گزینش‌پذیری و جداسازی به‌طور معکوس انجام می‌شود (شکل ۳-۷).

کنترل ترشوندگی سطحی غشاهای نانولیفی با استفاده از گاز دی‌اکسید کربن نیز توسعه یافته است. به تازگی غشای نانولیفی PM-



شکل ۵. (a) نمای شماتیک روش تولید غشای هوشمند PMMA-b-P4VP برای جداسازی آب و روغن، (b) عبور روغن از غشا و باقی ماندن آب در بالای غشا، (c) عبور آب اسیدی (pH=3) از غشا و باقی ماندن روغن در بالای غشا.



پژوهش بعدی در غشاهای جداسازی هوشمند و قابل کنترل آب و روغن می‌بایست تمرکز خود را بر سنتز انواع جدید این غشاها با حساسیت و واکنش به حرارت، میدان الکتریکی، اعمال تنش و حتی چندین محرک همزمان متمرکز کند.

۴- ایروژل‌های نانولیفی برای جداسازی امولسیون‌های آب و روغن

ایروژل‌های حجیم سه بعدی به دلیل داشتن تخلخل بسیار زیاد، چگالی کم و خواص مربوط به سطح جانبی بسیار زیاد در فضای درونی شان شناخته می‌شوند. به این ترتیب ایروژل‌های عامل‌دار با ترشوندگی مخصوص می‌توانند راهبرد دیگری برای تحقق بخشیدن به اجرای جداسازی امیدوارکننده - بلافاصله پس از شکستن امولسیون‌ها - باشند. تاکنون ایروژل‌های عامل‌دار مختلفی نظیر ایروژل‌های کلوتید سیلیکا، ایروژل‌های نانولوله‌های کربن، مونولیت‌های گرافن، نیتريد بور متخلخل و همچنین اسفنج‌های پلیمری برای جداسازی آب و نفت به کار گرفته شده است. ساخت ایروژل متخلخل با ترشوندگی ویژه و خواص مکانیکی قدرتمند است که قادر باشد به‌طور مؤثر و مقرون به صرفه، امولسیون‌های آب و نفت را به‌طور مداوم، مستقیم و بدون نیاز به پیش‌راندن‌های خارجی جداسازی کند، چالش اصلی این حوزه است. اخیراً تیم ما با پرورش ایده‌های مفهومی، موفق به ساخت ایروژل‌های بازبایی شده الاستیک لیفی با پیوندهای ساختاری ایزوتروپیک (به اختصار [ii] FIBER) با ترکیب روش‌های الکتروریسی و انجماد خشک شده است که ترشوندگی و ساختار متخلخل قابل تنظیمی دارد. شکل ۹-a فرآیند تولید این ماده را نشان می‌دهد: ابتدا غشای نانولیفی SiO_2 و نانوالیاف انعطاف‌پذیر پلی‌اکریلونیتریل / بنزوکسازین [iii] (PAN/BA-a) الکتروریسی گردید.

سپس این نانوالیاف به خوبی پراکنده و همگن شدند. در مرحله سوم، مخلوط همگن شده قالب‌گیری شده و به منظور رسیدن به ایروژل نانولیفی، مورد انجماد خشک قرار گرفت. در انتها برای تقویت ایروژل نانولیفی اتصالات عرضی ایجاد و فرآیند تولید ایروژل‌های نانولیفی FIBER تکمیل گردید. به دلیل سادگی فرآیند تولید و انطباق پذیری عالی روش ساخت در کنترل شکل نهایی محصول (شکل ۹-b)، ساختار پرتخلخل (شکل ۹-c) و مقیاس پذیری برای تولید در حجم بالا (شکل ۹-d)، ساخت ایروژل نانولیفی FIBER در مقیاس صنعتی امکان‌پذیر است. در پژوهش تکمیلی بعدی، نانوذرات SiO_2 هم به این ایروژل‌ها اضافه شدند تا تخلخل ساختاری و کارایی جداسازی آن را افزایش دهند (شکل ۹-e). ایروژل‌های نانولیفی FIBER که به روش بالا تهیه شده اند، چگالی بسیار کم (شکل ۹-f)، چم تخلخل [iv] بالا، خصوصیات ترشوندگی زیاد و قابلیت بازبایی فوق‌العاده‌ای در روش‌های فشاری دارند که قادر به جداسازی مؤثر امولسیون‌های پایدارسازی شده‌ی آب در روغن - تنها با نیروی پیش‌راننده جاذبه زمین و نرخ عبور جریان بالا (220 ± 814 لیتر بر مترمربع ساعت) - هستند (شکل ۹-g). کارایی جداسازی این ایروژل‌ها حتی بیشتر از غشاهای اولترافیلتراسیون تجاری است که با فشار پیش‌راننده خارجی کار می‌کنند (شکل ۹-h). در این پژوهش برای پی بردن به امکان جمع‌آوری مداوم، سریع، کارآمد و در محل نفت از امولسیون‌های آب و نفت، دستگاه ساده‌ای مشتمل بر یک پمپ پرستالتیک [v] و ایروژل FIBER به کار گرفته شد که در شکل ۹-i دیده می‌شود.

ساخت ایروژل‌های FIBER برای جداسازی آب و روغن براساس سه معیار شاخص انجام گرفت: نخست اینکه بتوان از نانوالیاف، ساختارهای سه بعدی با معماری پرتخلخل و باز تهیه کرد. معیار دوم، مقاومت مکانیکی ایروژل‌ها برای دوام آوردن در برابر خستگی‌های ناشی از تغییر شکل‌های فشاری است. شکستن امولسیون‌های آب در روغن و جداسازی آن‌ها بلافاصله پس از ورود به ایروژل‌ها، شاخص سوم این طرح است. در آینده لازم است تلاش‌هایی برای طراحی ایروژل‌های FIBER با خواص مطلوب در کاربردهای عملی مختلف مانند پاکسازی نشت مواد و لکه‌های نفتی، تصفیه پساب‌ها، خالص‌سازی سوخت و جداسازی امولسیون‌های تجاری انجام گردد.

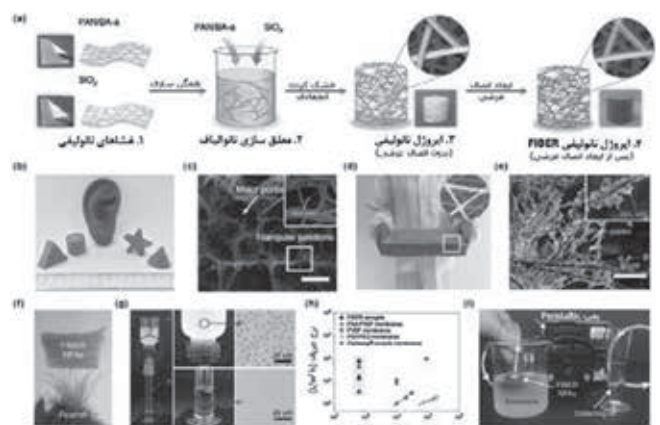
۵- چشم انداز و نتیجه‌گیری

الکتروریسی روشی بسیار امیدوارکننده در تولید نانوالیاف برای جداسازی کارآمد و مؤثر آب و روغن پدیدار است که مزایای بالقوه‌ای را در ساخت لایه‌های مورد استفاده در جداسازی آب و روغن به لحاظ ترشوندگی تنظیم‌پذیر، ظرفیت و نرخ بالای جذب (در جاذبه‌های نفت و روغن)، نرخ عبور جریان و اثربخشی زیاد (در ایروژل‌ها و غشاها) ارائه می‌دهد. در طی سال‌ها تلاش مستمر و بی‌پایان، دستاوردهای بزرگی را در این

پژوهش بعدی در غشاهای جداسازی هوشمند و قابل کنترل آب و روغن می‌بایست تمرکز خود را بر سنتز انواع جدید این غشاها با حساسیت و واکنش به حرارت، میدان الکتریکی، اعمال تنش و حتی چندین محرک همزمان متمرکز کند.

۴- ایروژل‌های نانولیفی برای جداسازی امولسیون‌های آب و روغن

ایروژل‌های حجیم سه بعدی به دلیل داشتن تخلخل بسیار زیاد، چگالی کم و خواص مربوط به سطح جانبی بسیار زیاد در فضای درونی شان شناخته می‌شوند. به این ترتیب ایروژل‌های عامل‌دار با ترشوندگی مخصوص می‌توانند راهبرد دیگری برای تحقق بخشیدن به اجرای جداسازی امیدوارکننده - بلافاصله پس از شکستن امولسیون‌ها - باشند. تاکنون ایروژل‌های عامل‌دار مختلفی نظیر ایروژل‌های کلوتید سیلیکا، ایروژل‌های نانولوله‌های کربن، مونولیت‌های گرافن، نیتريد بور متخلخل و همچنین اسفنج‌های پلیمری برای جداسازی آب و نفت به کار گرفته شده است. ساخت ایروژل متخلخل با ترشوندگی ویژه و خواص مکانیکی قدرتمند است که قادر باشد به‌طور مؤثر و مقرون به صرفه، امولسیون‌های آب و نفت را به‌طور مداوم، مستقیم و بدون نیاز به پیش‌راندن‌های خارجی جداسازی کند، چالش اصلی این حوزه است. اخیراً تیم ما با پرورش ایده‌های مفهومی، موفق به ساخت ایروژل‌های بازبایی شده الاستیک لیفی با پیوندهای ساختاری ایزوتروپیک (به اختصار [ii] FIBER) با ترکیب روش‌های الکتروریسی و انجماد خشک شده است که ترشوندگی و ساختار متخلخل قابل تنظیمی دارد. شکل ۹-a فرآیند تولید این ماده را نشان می‌دهد: ابتدا غشای نانولیفی SiO_2 و نانوالیاف انعطاف‌پذیر پلی‌اکریلونیتریل / بنزوکسازین [iii] (PAN/BA-a) الکتروریسی گردید.



شکل ۹. (a) نمای شماتیک روش تولید ایروژل‌های نانولیفی FIBER. (b) اشکال مختلف ساخته شده با ایروژل‌های نانولیفی FIBER. (c) تصویر SEM از میکروساختار ایروژل‌های نانولیفی FIBER در مقیاس ۲۰ میکرون. (d) ایروژل FIBER به حجم ۲/۵ لیتر. (e) تصویر SEM از نانوذرات SiO_2 افزوده‌شده به ایروژل‌های FIBER. (f) ایروژل نانولیفی FIBER به حجم ۲۰ سانتی‌متر مکعب ($p=0.12 \text{ mg cm}^{-3}$) بر روی پر. (g) آزمایش جداسازی آسان میکروامولسیون‌های آب در روغن به‌وسیله‌ی ایروژل نانولیفی FIBER تحت نیروی پیش‌راننده جاذبه. (h) نمودار مقایسه فشار پیش‌راننده و نرخ عبور جریان چند جداساز مختلف. (i) دستگاه جمع‌آوری مداوم روغن از امولسیون‌های آب در روغن.



نانونالیف دارای ترشوندگی مخصوص، چالشی اساسی و قابل توجه است. متأسفانه اغلب روش‌های تولید (مانند پلی‌میزاسیون درجا) به تحقیقات آزمایشگاهی محدودند و برای تولید در مقیاس انبوه مناسب نیستند. با وجود آنکه تولید نانونالیف در مقیاس صنعتی به روش الکترورسی امکان‌پذیر است، ضعف کلی این ساختارها در پایداری مکانیکی، نیاز مبرم به روشی برای تولید مواد بادوام با امکان استفاده در جداسازی آب و روغن به‌طور جدی احساس می‌شود. در شرایط فعلی، بیشتر تحقیقات در طراحی، آماده‌سازی و ساخت مواد برای جداسازی گوناگون متمرکز است. توجه کمتری به تحقیق و بررسی دقیق فرآیند جداسازی آب و روغن و فهم تئوری‌ها و مکانیزم‌های آن وجود دارد. باوجود اینکه معضلات و چالش‌های زیادی در آینده وجود خواهد داشت، الکترورسی همچنان پتانسیل عظیمی برای تولید

عرصه به‌دست آمده است. در این مقاله سعی شد تحقیق و توسعه در جداسازی کارآمد آب و روغن - با دربرگرفتن ایده‌ها، مفاهیم اولیه و روش‌های تولید نانونالیف - به‌طور خلاصه بیان شود.

جدول ۱ تنوع فراوانی از نانونالیف مختلف با ترشوندگی سطحی قابل تنظیم را که برای کاربردهای جداسازی آب و روغن توسعه یافته‌اند، به اختصار بیان می‌کند. علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر در توسعه نانونالیف برای به‌کارگیری در جداسازی آب و روغن، هنوز چالش‌های زیادی برای پاسخ‌دهی وجود دارد.

معرفی ساختارهایی با ناهمواری‌های چندلایه در سطح لیف می‌تواند به فوق ترشوندگی آن منجر شود. با این حال، اغلب ساختارهای سطح نازک تحت تأثیر عوامل خارجی به راحتی ممکن است آسیب ببینند. لذا طراحی و ساخت ناهمواری‌های سطحی پایدار و بادوام بر روی

جدول ۱. خلاصه‌ای از نانونالیف تولیدشده به روش الکترورسی برای کاربردهای جداسازی آب و روغن

دسته‌بندی	مواد تشکیل‌دهنده	زاویه تماس آب / روغن	کارایی در جداسازی آب و روغن*
جاذب‌های نانولیفی	الیاف PS با تخلخل‌های نانومقیاس	۱۴۷/۶°	۱۱۳/۸۷ گرم روغن موتور
			۱۱۱/۸ گرم روغن سویا
			۹۶/۸۹ گرم روغن دانه آفتابگردان
	الیاف PS با تخلخل‌های نانومقیاس	۱۵۱/۳±۱/۶°	۱۳۱/۶۱ گرم روغن موتور
			۱۱۲/۳۰ گرم روغن بادام زمینی
			۸۱/۴۰ گرم روغن سیلیکون
			۷/۱۳ گرم گازوئیل
	نانوالیاف کامپوزیتی PS/PVC	-	۱۴۶ گرم روغن موتور
			۱۱۹ گرم روغن بادام زمینی
			۸۱ گرم اتیلن گلاکول
نانوالیاف کامپوزیتی PS/PU	۱۱۸-۱۳۸°	۲۸ گرم گازوئیل	
		۳۰/۸۱ گرم روغن موتور	
		۲۴/۳۶ گرم روغن دانه آفتابگردان	
نانوالیاف کامپوزیتی PS/PVDF با نانوذرات Fe ₃ O ₄ در بخش PS	۱۲۶°	۲۵-۴۵ گرم برای روغن‌های دانه آفتابگردان، روغن موتور، روغن سویا و گازوئیل	
		۶۴/۴۰ گرم روغن موتور	
الیاف پوسته-مغزی PS-PU	۱۴۰°	۴۷/۴۸ گرم روغن دانه آفتابگردان	
		۱۳۸/۴ گرم روغن سیلیکون	
نانوالیاف کربن	۱۵۵/۳°	۹۴ گرم روغن ذرت	
		۷۳/۸ گرم روغن پمپ خلاء	
غشای نانولیفی سلولز استات اصلاح‌شده با F-PBZ و نانوذرات SiO ₂	۱۶۱°	۲۰۰ گرم مخلوط ۵۰٪ حجمی آب و روغن	
		۳	
غشای نانولیفی PMIA اصلاح‌شده با F-PBZ و نانوذرات SiO ₂	۱۶۱°	۲۳۱۱ لیتر بر مترمربع ساعت روغن مخلوط ۵۰٪ حجمی آب و دی‌کلرومتان	



دسته‌بندی	مواد تشکیل دهنده	زاویه تماس آب / روغن	کارایی در جداسازی آب و روغن*
غشاهای نانولیفی	غشای SNM اصلاح شده با F-PBZ و نانوذرات Al_2O_3	161° °	۸۹۲ لیتر بر مترمربع ساعت روغن امولسیون پایدار شده آب در نفت با سورفکتانت Span80
	غشای PAN آمینه - اصلاح شده با نانوخوشه‌های نقره	$162/4 \pm 1/9^\circ$ °	$45/6 \pm 4774/6$ لیتر بر مترمربع ساعت ۲۰۰ میلی‌لیتر مخلوط ۵۰٪ حجمی آب و روغن
	غشای نانوالیاف کامپوزیت SiO_2 -کربن	$144/2 \pm 1/3^\circ$ °	$234/6 \pm 3032/4$ لیتر بر مترمربع ساعت روغن $2648/8 \pm 89/7$ لیتر بر مترمربع ساعت هگزان
	غشای نانوالیاف PS بر روی توری آهن زنگ‌نزن	$155 \pm 3^\circ$ °	به آسانی گازوئیل را از آب جدا می‌کند.
	غشای PP پیوندخورده با PAA متصل به $CaCO_3$	° $157 \pm 2/4^\circ$	بیشتر از ۲۰۰۰ لیتر بر مترمربع ساعت آب با کارایی بیشتر از ۹۹٪ در جداسازی آب و روغن
	غشای SNM اصلاح شده با نانوذرات SiO_2	° 161°	۲۲۳۷ لیتر بر مترمربع ساعت آب امکان جداسازی امولسیون نفت با نیروی پیشراننده جاذبه
	غشای SNM اصلاح شده با نانوذرات $NiFe_2O_4$	° 145°	1580 ± 106 لیتر بر مترمربع ساعت آب برای امولسیون پایدار شده آب در نفت با سورفکتانت Span80
	غشای سه‌لایه هیدروژل PAN/PVA/لایه بی‌یافت	-	۳۳۰ لیتر بر مترمربع ساعت آب در فشار خوراک ۱۰۰ psi برای امولسیون آب و روغن
	غشای سه‌لایه کیتوزان/PAN/لایه بی‌یافت	-	۱۷۰ لیتر بر مترمربع ساعت آب در فشار خوراک ۱۳۰ psi و کارایی تصفیه بیشتر از ۹۹/۹٪
	غشای کامپوزیتی PVA/PAN	-	۲۱۰ لیتر بر مترمربع ساعت آب در فشار ۰/۳ مگاپاسکال با کارایی ۹۹/۵٪ در جداسازی امولسیون آب و روغن
	غشای PMMA-co-PDEAEMA	در مجاورت N_2 147° 36° در مجاورت CO_2 36° 155°	۱۷۰۰۰ لیتر بر مترمربع ساعت روغن قبل از CO_2 دهی ۹۵۵۴ لیتر بر مترمربع ساعت آب پس از یک ساعت CO_2 دهی
	ایروژل‌های نانولیفی FIBER	145° °	810 ± 160 لیتر بر مترمربع ساعت آب از امولسیون آب در نفت - پایدار شده با سورفکتانت
	ایروژل‌های نانولیفی FIBER همراه با نانوذرات SiO_2	162° °	8140 ± 220 لیتر بر مترمربع ساعت آب از امولسیون آب در نفت - پایدار شده با سورفکتانت

*کارایی جداسازی برای جاذب‌ها بر اساس گرم روغن به ازای هر گرم جاذب و برای غشاهای ایروژل‌ها بر اساس نرخ عبور سیال (لیتر بر مترمربع ساعت) اعلام شده است.

مسئله نیروی پیشراننده نسبتاً مهمی برای جهش رو به جلو در توسعه عرصه جداسازی آب و روغن خواهد بود.

ادامه دارد...

لایه‌های نانولیفی تطبیق‌پذیر و با قابلیت کنترل فوق‌ترشوندگی دارد. پیش‌بینی می‌شود توسعه مداوم روش الکتروریسی در حوزه طراحی و ساخت لایه‌های جداسازی در دهه‌های آینده ادامه یابد که این