

جداسازی آب و نفت به کمک مش استیل پوشش دهی شده با نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) مزوپور

سونیا میر^۱، علیمراد رشیدی^{۲*}، عباس نادری فر^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ استاد، هیئت علمی، مرکز تحقیقات نانوفناوری، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

چکیده

وجود آب در نفت اغلب منجر به مشکلات گزارش شده در منابع از محدودیت در خط جریان فشار، کاهش تولید، خوردگی خط لوله، نقص عملکرد پمپ‌ها، مسمومیت کاتالیست‌های جریان پایین‌دستی پالایشگاه کاتالیزورها و سایر مشکلات مرتبط با تجهیزات تولید و ستون تقطیر می‌شود. در این مطالعه فیلتر پوشش‌دهی شده با نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) آماده سازی شد و به عنوان جایگزینی برای امولسیون‌زداها برای جداسازی آب از نفت در مرحله ی قبل از ورود نفت به پالایشگاه پیشنهاد شد. بدین منظور، نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی مزوپور با روش پلی کاندنسیشن حرارتی و با به کار گیری روش قالب سخت سنتز شد و روی سطح مش استیل ضد زنگ به کمک اسپری پاشی پوشش داده شد. سطح مش پوشش‌دهی شده با نانورق $g-C_3N_4$ خواص ترشوندگی آبدوستی در هوا و فوق نفت‌گریزی زیر آب را نشان داد. نتایج جداسازی آب و نفت به کمک فیلتر آماده شده نشان داد که آب با فلاکس عبوری $2200 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ با بازده جداسازی تقریباً بیشتر از ۹۹٪ از سطح عبور می‌کند، در حالیکه نفت عبور نکرده و در بالای فیلتر باقی می‌ماند. تکرارپذیری فیلتر برای جداسازی آب و نفت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که بازده جداسازی و فلاکس عبوری فیلتر پس از ۲۵ مرحله تکرار جداسازی آب و نفت تغییر ناچیزی داشته است.

کلمات کلیدی: جداسازی آب از نفت، نانوفیلتر، کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$)، آبدوستی و نفت‌گریزی

مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی که اغلب در طول تولید و حمل‌ونقل نفت خام در صنایع نفتی وجود دارد، شکل‌گیری امولسیون‌های پیچیده و بسیار پایدار با آب شور است [۱، ۲]. این امولسیون‌ها قطرات آب یا آب نمکی هستند که در یک فاز پیوسته از نفت خام پراکنده می‌شوند: از این رو، آن‌ها به عنوان امولسیون آب در نفت (W/O) شناخته می‌شوند [۳]. امولسیون‌هایی که در طول تولید نفت خام با آن‌ها روبرو می‌شویم از نظر ماهیت پیچیده است و می‌توان آن‌ها را در سه دسته‌ی آب در نفت (W/O)، نفت در آب (O/W) و امولسیون آب در نفت در آب (W/O/W) گروه‌بندی کرد [۴]. در میان این نوع امولسیون‌ها، اغلب امولسیون آب در نفت گزارش شده است، درحالی‌که انواع دیگر به نسبت‌های ناچیز موجود هستند [۲]. تشکیل امولسیون‌های آب در نفت اغلب با فشار و نیروهای برشی در ارتباط است. وجود آب امولسیون شده اغلب منجر به مشکلاتی در طول تصفیه نفت خام می‌شود [۵]. مشکلات گزارش شده در منابع از محدودیت در خط جریان فشار، کاهش تولید، خوردگی خط لوله، نقص عملکرد پمپ‌ها، مسمومیت کاتالیست‌های جریان پایین‌دستی پالایشگاه کاتالیزورها و سایر مشکلات مرتبط با تجهیزات تولید و ستون تقطیر است [۶، ۷]. سود و بهره‌وری صنایع نفتی معمولاً به خاطر چالش‌های بی‌شماری در ارتباط با آب امولسیون شده کاهش می‌یابد [۸، ۹]. از این رو، برای جلوگیری از ضرر اقتصادی و چالش‌های عملیاتی، نیاز به جدا کردن مخلوط آب شور و نفت خام به دو فاز جداگانه، که این فرایند به عنوان فرایند تعلیق‌شکنی^۱ شناخته می‌شود در فرآیندی که قبل از حمل‌ونقل یا پالایش نفت خام وجود دارد [۱۰]. فرآیند تعلیق‌شکنی غالباً با استفاده از تعلیق‌شکن مناسب انجام می‌شود. چندین روش برای تعلیق‌شکنی نفت خام در مطالعات گزارش شده است و می‌توانند به سه دسته گسترده: شیمیایی، فیزیکی (مکانیکی، حرارتی یا ماکروویو، الکتریکی، اولتراسونیک و غشایی) و بیولوژیکی تقسیم شوند [۱۰].

امروزه در جهان ۲۱۰ میلیون بشکه آب همراه نفت تولید می‌شود که این مقدار تقریباً ۳ برابر نفت تولید شده است. برای تعلیق‌شکنی مؤثر جدایش فازهای آب و نفت باید روزانه انجام شود، اجزای آب باقی‌مانده در نفت خام باید کم باشد و آب باقیمانده برای دور ریختن باید شامل اجزای نفتی ناچیزی باشد [۱۱]. در یک نمونه نفت خام تصفیه شده یعنی نفت تولید شده‌ای که برای بارگیری به کشتی آماده است (۱) نباید بیشتر از ۰/۲ درصد ته‌نشین اولیه^۲ داشته و (۲) نباید بیشتر از ۱۰ پوند نمک در هر هزار بشکه نفت خام داشته باشد [۱۲]. اما این ویژگی‌ها بسته به تقاضا در صنایع پایین دستی و ویژگی‌های خط لوله‌ای که استفاده می‌شود متفاوت هستند. هدف اصلی پژوهش در صنایع تصفیه نفت خام ایجاد یک روش مؤثر برای جداسازی امولسیون‌های نفت خام است. شایان توجه است که استفاده از تعلیق‌شکن‌های شیمیایی به طور وسیعی در صنایع تاکنون استفاده شده‌اند اما آن‌ها دارای معایبی شامل تشکیل ذرات ثانویه ریز و لزوم جداسازی آن‌ها پس از فرایند جداسازی، مصرف انرژی و غیره می‌شود برای این روش‌ها بسته به نوع سیستم امولسیون کاملاً متفاوت و انتخابی هستند. تعلیق‌شکن‌ها برای یک سیستم امولسیون می‌تواند به عنوان یک عامل امولسیون‌کننده برای سیستم دیگر عمل کند. همچنین، تغییر در یک یا بیشتر از یک خاصیت فیزیکی-شیمیایی نفت خام می‌تواند نیازمند تغییر در ساختار تعلیق‌شکن به کار برده باشد [۱۳]. بدین ترتیب، با توجه به مشکلات مربوط به تعلیق‌شکن‌های شیمیایی و روش‌های فیزیکی-مکانیکی جداسازی نفت و آب، نانو مواد جدید مختلفی برای غشاهای مختلف طراحی شده‌اند و قادر به جداسازی امولسیون‌ها با بازده و شار بالایی بوده‌اند [۱۴، ۱۵].

^۱ demulsification

^۲ Basic sediment

نانومواد مختلف گزارش شده در مطالعات بر روی بستر پوشش‌دهی می‌شوند و خواص موردنظر را با روش‌های مختلف اصلاح سطح^۳ به آن القا می‌کنند. آب‌دوستی^۴ و آب‌گریزی^۵ سطح با انتخاب درست نانومواد و نشانیدن گروه‌های عاملی مناسب در جداسازی نفت و آب انجام می‌شود [۱۶-۲۳].

در این مطالعه فیلتر پوشش داده شده با نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی آماده سازی شده و به عنوان جایگزینی برای امولسیون‌زداها برای جداسازی آب از نفت در مرحله ی قبل از ورود به پالایشگاه پیشنهاد می‌شود. بدین منظور، نانوصفحات کربن نیتريد با روش پلی کاندنسیشن حرارتی سنتز شده و روی سطح مش استیل ضد زنگ به کمک اسپری پاششی پوشش داده می‌شود. تعیین مشخصات نمونه‌های به دست آمده با استفاده از آزمون‌های SEM, XRD و FTIR انجام می‌شود. خواص ترشوندگی سطح به کمک اندازه‌گیری زاویه تماس آب و نفت روی سطح اندازه گیری می‌شود. جداسازی آب و نفت خام توسط فیلتر آماده شده در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

مش استیل ضدزنگ (استیل 316l سایز حفره ۵ μm)، اوره، نانوذرات SiO₂ با سایز ذرات ۲۰-۳۰ nm، اوره، استن.

۲-۲- سنتز نانوصفحات g-C₃N₄

به منظور سنتز g-C₃N₄ متخلخل مزوپور از روش پلی کاندنسیشن حرارتی به کمک قالب سخت (hard-template) استفاده شد. بدین منظور از نانوذرات SiO₂ با سایز ذرات ۱۵-۳۰ nm به عنوان قالب سخت استفاده شد. در این روش، پس از تهیه ۵ gr محلول کلئیدی ۴۰٪ از نانوذرات SiO₂، مقدار ۱۰ gr اوره به آن اضافه می‌شود و تحت استیرر در دمای ۹۰ °C قرار گرفته تا آب آن تبخیر شود. جامد سفید رنگ حاصل به کمک هاون پودر شده و در قایق کوارتز در پوشیده به داخل کوره لوله‌ای در دمای ۵۵۰ °C و رمپ ۳ K.min⁻¹ به مدت ۴ h قرار داده شد تا پلیمریزاسیون اوره تکمیل شود.

جامد زرد رنگ به دست آمده در محلول سود ۲ M ریخته شد و ۲۴ h در دمای محیط قرار داده شد تا قالب جدا شود. سپس محلول فیلتر شده و چندین مرحله با آب و اتانول شست و شو داده شد. در نهایت در دمای ۷۰ °C در آون خلا خشک شد (شکل ۱).



شکل ۱- مراحل سنتز g-C₃N₄ مزوپور به روش قالب سخت

³ Surface treatment

⁴ Hydrophilicity

⁵ Hydrophobicity

۲-۳- پوشش دهی سطح فیلتر با نانوصفحات g-C₃N₄

مش فولاد ضدزنگ^۶ (stainless steel mesh) با قطر حفره ۵ μm به منظور لایه‌نشانی سطحی فعال سازی شد (ابعاد ۳ cm × ۲ cm). بدین منظور، ابتدا برای رفع آلودگی‌ها از سطح، مش در محلولی با نسبت مساوی از آب و اتانول و استون تحت آلتراسونیک در دمای ۲۳ °C و زمان ۳۰ min قرار داده شد. سپس ۱ gr / ۰/۱ پلی‌اورتان واترپورن^۷، ۵ gr / ۰/۵ g-C₃N₄ به ۴۰ ml استون افزوده و به مدت ۲ h تحت آلتراسونیک قرار داده شد. در نهایت محلول هموژن تهیه شده به کمک اسپری پاششی تحت فشار ۰/۲ MPa بر روی سطح مش استیل پاشیده شد. فیلتر پوشش داده شده با نانوصفحات g-C₃N₄ پس از خشک شدن در دمای محیط آماده‌سازی شد.

۲-۴- تعیین مشخصات سطح

شکل و اندازه نانوذرات به دست آمده توسط میکروسکوپ اسکن الکترونی روبشی^۸ بررسی خواهد شد. تجزیه و تحلیل ترکیب فاز و کریستالوگرافی g-C₃N₄ پس از عامل دار شدن و تغییرات در ساختار در هنگام شکل‌گیری با پراش پرتو X^۹ و طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^{۱۰} و اندازه‌گیری سطح ویژه مورد بررسی در صورت لزوم با اندازه‌گیری جذب N₂ تعیین می‌شود. تعیین می‌شود. تجزیه و تحلیل زاویه تماس به منظور تعیین میزان آب‌دوستی سطح توسط ابزار اندازه‌گیری زاویه تماس انجام خواهد شد. در آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس، قطره‌ای با اندازه مشخص روی نمونه قرار می‌گیرد سپس توسط دوربینی با دقت بالا از قطره، زاویه تماس و خط سه فازی آن در محل برخورد با سطح تصویربرداری می‌شود. سپس به وسیله نرم‌افزارهای پردازش تصویر، بررسی و زوایا محاسبه می‌شوند. راندمان جداسازی و شار عبوری دو عامل مهم برای ارزیابی جداسازی فیلتر است [۲۴]. بازده جدایش آب از نفت طبق رابطه‌ی زیر برای هر آزمون محاسبه می‌شود:

$$SE = \frac{V}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

که V_0 حجم آب در نفت قبل از جدایش است و V حجم مقدار آب جدا شده پس از جدایش است. اندازه‌گیری شار (فلاکس) عبوری از فیلتر از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{V}{At} \quad (2)$$

A ، t و V به ترتیب مساحت سطح فیلتر، زمان فیلتراسیون و حجم عبوری از فیلتر است.

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون پراش پرتو X (XRD) به منظور بررسی ساختار کریستالی g-C₃N₄ آماده شده به روش قالب سخت در شکل ۲ آورده شده است. پیک (d = 0.68 nm) $2\theta = 13.1^\circ$ در g-C₃N₄ دیده می‌شود. زاویه مربوطه که با (100)

⁶ stainless steel mesh

⁷ Waterborn polyurethane

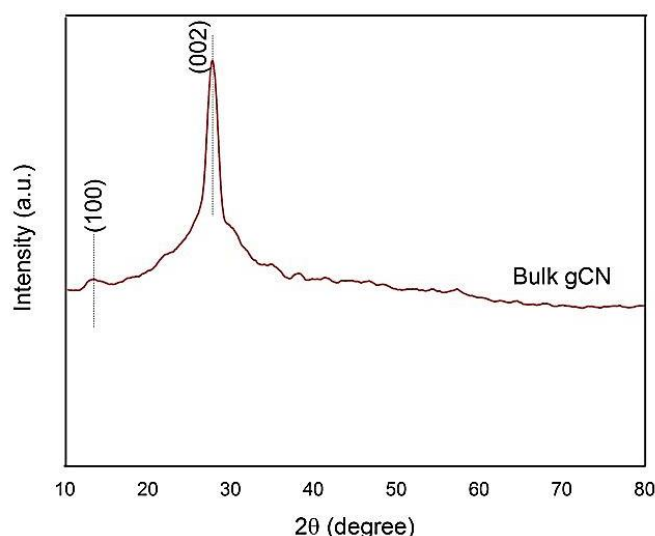
⁸ Field emission Scanning electron microscopy (SEM)

⁹ X-ray diffraction (XRD)

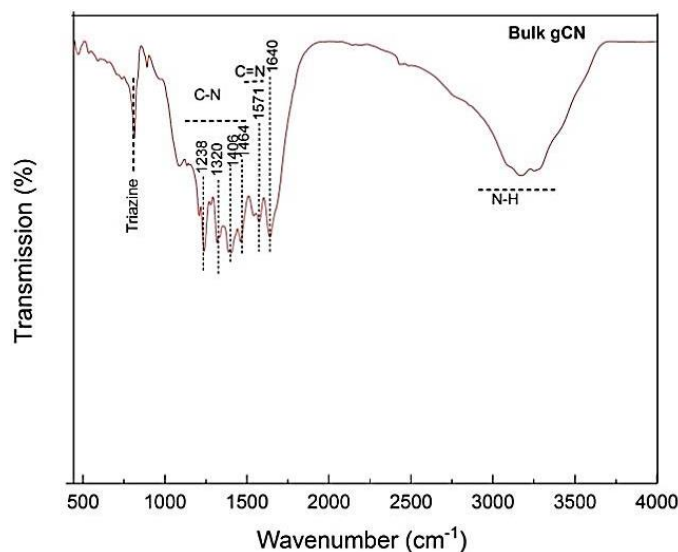
¹⁰ Fourier-transform infrared

مشخص می‌شود ساختار بین صفحه‌ای (۱۰۰) در $g-C_3N_4$ است، درحالی‌که پیک قوی $2\theta = 27.4^\circ$ ($d = 0.325$ nm) که با (002) مشخص می‌شود ناشی از diffraction درون لایه‌های $g-C_3N_4$ است. پیک (002) در $g-C_3N_4$ نشان‌دهنده حفظ ساختار درون لایه‌ای $g-C_3N_4$ در روش قالب سخت است.

به منظور بررسی گروه‌های عاملی روی سطح $g-C_3N_4$ آنالیز FTIR انجام شده و نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، پیک جذب حلقه tri-s-triazine و هتروسایکل CN بین 1200 cm^{-1} و 1600 cm^{-1} مشهود است. پیک در 801 cm^{-1} باندهای کووالانسی مشابه میان اتم‌های کربن و نیتروژن را نشان می‌دهد. پیک جذب در 1678 cm^{-1} ناشی از وجود گروه‌های کربوکسیل و کربونیل در $g-C_3N_4$ است که در مقایسه با $g-C_3N_4$ پیک قابل ملاحظه‌تری دارد. پیک وسیع در گستره 3300 cm^{-1} و 3600 cm^{-1} در $g-C_3N_4$ وجود گروه N-H و همچنین گروه هیدروکسیل به خاطر آب باقیمانده در نمونه را نشان می‌دهد.

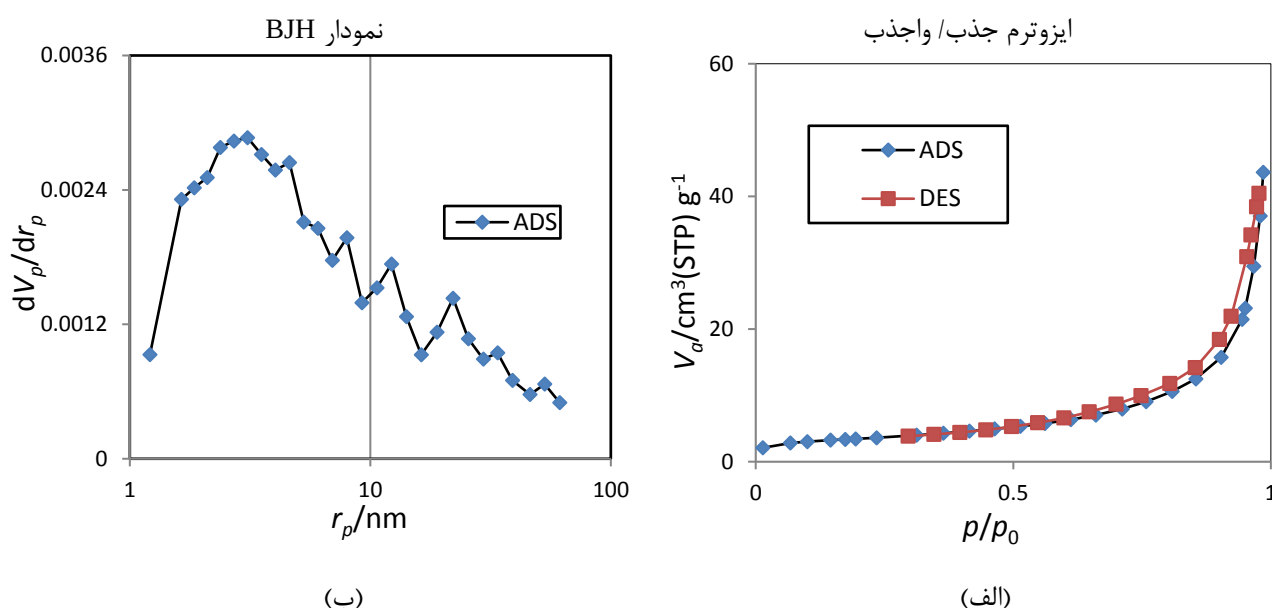


شکل ۲- نتایج آزمون پراش پرتو X (XRD)



شکل ۳- نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه $g-C_3N_4$ (FTIR)

به منظور تعیین مشخصات سطح و اندازه و شکل حفرات $g-C_3N_4$ سنتز شده، آنالیز BET گرفته شد. مساحت سطح ویژه ذرات حدود $72 \text{ m}^2/\text{gr}$ بوده و شکل نمودارهای جذب و واجذب BET که هیستریسیس H3 (طبق شکل ۴) است حاکی از آن است که ذرات متخلخل بوده و ریخت‌شناسی^{۱۱} ورقه‌ای (Plate-like) دارد. همانطور که از نمودار BJH^{12} دیده می‌شود بیشترین توزیع سایز حفرات بین $2-50 \text{ nm}$ است که نشان‌دهنده‌ی مزوپور بودن ذرات است. به منظور بالا بردن مساحت سطح ویژه $g-C_3N_4$ و بهبود پراکندگی ذرات در محلول احتمالاً نیاز به اصلاح بعدی^{۱۳} ذرات باشد. در مطالعات زیادی از روش‌های اصلاح به کمک اسید^{۱۴}، اصلاح حرارتی^{۱۵}، لایه‌ای شدن مکانیکی^{۱۶} و اکسیداسیون^{۱۷} استفاده شده است. در این مطالعه به کمک آلتراسونیک در مرحله‌ی پوشش‌دهی بهبود ساختار و لایه‌لایه شدن صورت می‌گیرد.



شکل ۴- نتایج آنالیز BET نمونه $g-C_3N_4$. الف) نمودار جذب و واجذب $g-C_3N_4$ ب) نمودار BJH

نتایج زاویه تماس سطح پوشش داده شده با نانورق $g-C_3N_4$ زاویه تماس آب را 32° درجه و نفت صفر درجه در هوا و زاویه تماس 155° زیر آب را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که سطح مش پوشش داده شده با نانورق $g-C_3N_4$ دارای خاصیت آبدوستی در هوا و فوق نفت‌گریزی زیر آب (Superoleophobic hydrophilic/underwater) است (شکل ۵). ماهیت آبدوست نانوصفحات $g-C_3N_4$ باعث کاهش زاویه تماس آب روی سطح می‌شود. زبری ایجاد شده به خاطر نانوصفحات $g-C_3N_4$ ، موجب افزایش زاویه تماس نفت زیر آب و القای خاصیت فوق نفت‌گریزی زیر آب می‌شود.

¹¹ Morphology

¹² Barrett, Joyner, Halenda (BJH)

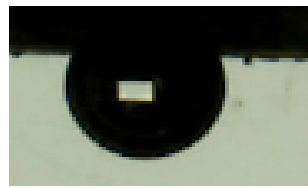
¹³ Post-treatment

¹⁴ Acid treatment

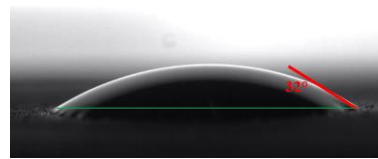
¹⁵ Thermal treatment

¹⁶ Mechanical exfoliation

¹⁷ Oxidation treatment



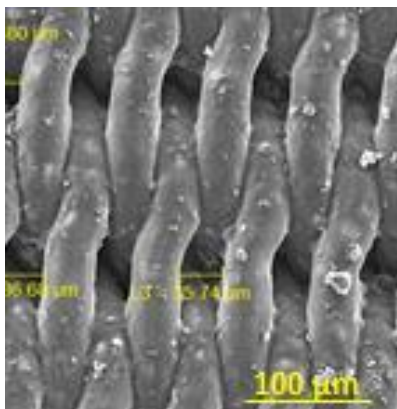
(ب)



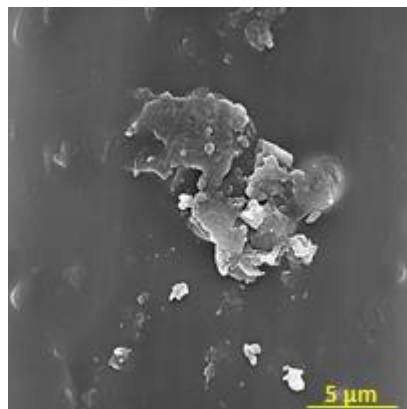
(الف)

شکل ۵- بررسی زاویه تماس (الف) آب در هوا و (ب) نفت زیر آب روی سطح مش پوشش داده شده با $g-C_3N_4$

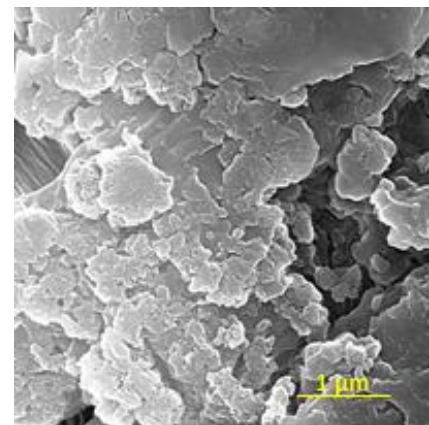
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با کیفیت بالا (FESEM) در شکل ۶ نشان داده شده است. توزیع یکنواخت و پوشش کامل وایرهای مش در شکل ۶ (ج) کاملاً مشهود است. ریخت‌شناسی^{۱۸} نانورق‌های $g-C_3N_4$ در شکل ۶ (الف) دیده می‌شود. نتایج FE-SEM ارائه شده در این شکل، ساختارهای ورقه‌ای سلسله‌مراتبی و پیچ‌خورده در مقیاس میکرو-نانو با منافذ نامنظم در آن‌ها نشان می‌دهد. این ساختارهای سلسله‌مراتبی میکرو-نانو توسط نانوذرات در مقیاس نانو و سیم‌های مشبک مش در مقیاس میکرو تشکیل شده‌اند. مشخص شده است که این ریخت‌شناسی‌ها نقش مهمی در القای زبری به سطح ایفا می‌کنند و به بدین ترتیب به جداسازی آب و نفت کمک می‌کنند [۲۵]. همچنین تخلخل ایجاد شده از نانورق‌های $g-C_3N_4$ موجب به دام انداختن آب بیشتری در حفرات می‌شود.



(ج)



(ب)



(الف)

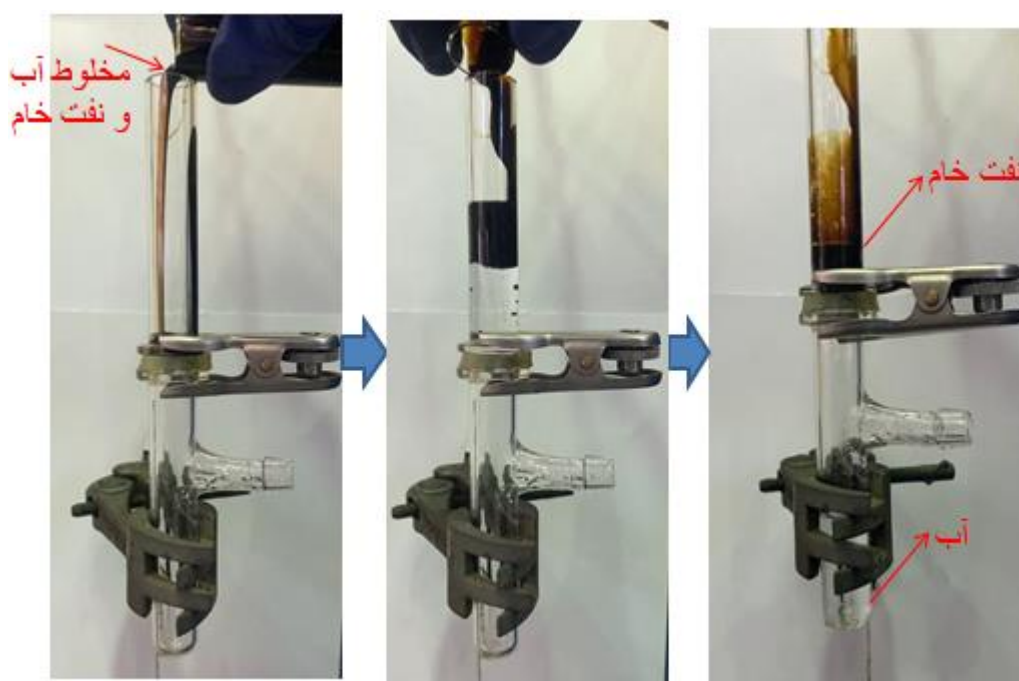
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) از مش استیل پوشش داده شده با نانوصفحات $g-C_3N_4$ در مقیاس‌های مختلف

عملکرد جداسازی آب و نفت توسط فیلتر مش استیل پوشش‌دهی شده با نانوصفحات $g-C_3N_4$ با خاصیت ترشوندگی آب دوست/فوق نفت‌گریز زیر آب مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، فیلتر به کمک یک گیره بین دو لوله آزمایش نصب شد. مخلوط دو فاز نفت خام و آب آزاد (۳۰٪ vol. آب) روی سطح فیلتر از پیش خیس شده ریخته شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، آب با فلاکس عبوری $2200 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ از سطح عبور می‌کند، در حالیکه نفت عبور نکرده و در بالای فیلتر باقی می‌ماند. با توجه به فوق‌نفت‌گریزی زیر آب و آب‌دوستی فیلتر آماده‌سازی شده، با خیس کردن فیلتر، مولکول‌های آب در ساختار زبر سطح به دام افتاده و لایه‌ی هیدراسیونی در سطح فیلتر تشکیل شده که مانع تماس نفت با سطح فیلتر و در نتیجه جلوگیری از عبور نفت می‌شود. این نتایج با رابطه

¹⁸ Morphology

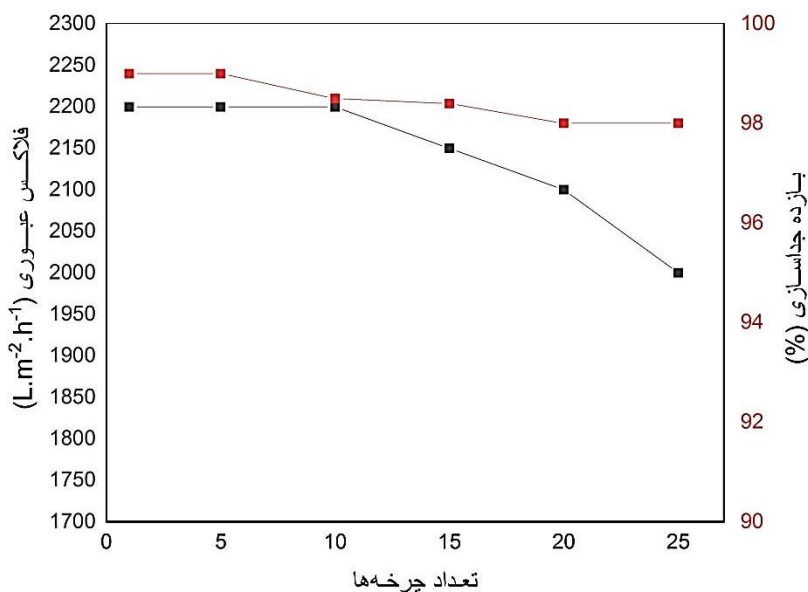
کاسیه باکتر^{۱۹} در تطابق است. این رابطه بیان می‌کند که زاویه تماس نفت زیر آب با افزایش زبری سطح افزایش می‌یابد [۲۵]. مقدار آب باقی‌مانده در بالای فیلتر پوشش داده شده با نانوصفحات $g-C_3N_4$ طبق روش استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که بازده جداسازی تقریباً بیشتر از ۹۹٪ است.

با توجه به اینکه پایداری فیلتر پوشش‌دهی شده در کارایی آن برای جداسازی بسیار مؤثر است، تکرارپذیری فیلتر در چرخه‌های جداسازی پی‌در پی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، پس از هر بار جداسازی، فیلتر با آب و استون شست و شو می‌شود. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج بازده جداسازی و فلاکس اندازه‌گیری شده در هر ۵ چرخه دیده می‌شود، فلاکس آب عبوری از فیلتر پس از ۲۵ مرحله تکرار جداسازی به $1997 L.m^{-2}.h^{-1}$ و بازده جداسازی به ۹۸٪ درصد رسیده است. بنابراین فیلتر آماده شده با خواص ترشوندگی آب‌دوست/ فوق نفت‌گریز زیر آب دارای قابلیت خوبی و پایداری قابل قبولی در جداسازی آب از مخلوط آب و نفت خام دارد.



شکل ۷- جداسازی آب از مخلوط آب و نفت (۳۰٪ vol. آب) به کمک فیلتر پوشش‌دهی شده با نانورق‌های $g-C_3N_4$ آب از فیلتر عبور کرده درحالی‌که نفت بالای فیلتر باقی می‌ماند.

¹⁹ Cassie-Baxter



شکل ۸- تغییرات فلاکس و بازده جداسازی در چرخه‌های متوالی جداسازی آب از مخلوط آب و نفت خام به کمک فیلتر مش استیل پوشش داده شده با نانوصفحات g-C₃N₄

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه فیلتر پوشش داده شده با نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی (g-C₃N₄) آماده سازی شد و به عنوان جایگزینی برای امولسیون‌زداها برای جداسازی آب از نفت در مرحله ی قبل از ورود نفت به پالایشگاه پیشنهاد می‌شود. بدین منظور، نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی مزوپور با روش پلی کاندنسیشن حرارتی و با به کارگیری روش قالب سخت سنتز شد و سپس روی سطح مش استیل ضد زنگ به کمک اسپری پاششی پوشش داده می‌شود. به منظور بررسی خواص ترشوندگی سطح فیلتر آماده شده، زاویه تماس آب و نفت روی آن اندازه‌گیری شد. سطح مش پوشش‌دهی شده با نانووورق g-C₃N₄ خواص ترشوندگی آبدوستی در هوا و فوق نفت‌گریزی زیر آب را نشان داد. نتایج جداسازی آب و نفت به کمک فیلتر آماده شده نشان داد که آب با فلاکس عبوری ۲۲۰۰ L.m⁻².h⁻¹ با بازده جداسازی تقریباً بیشتر از ۹۹٪ از سطح عبور می‌کند، در حالیکه نفت عبور نکرده و در بالای فیلتر باقی می‌ماند. تکرارپذیری فیلتر برای جداسازی آب و نفت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که بازده جداسازی و فلاکس عبوری فیلتر پس از ۲۵ مرحله تکرار جداسازی آب و نفت تغییر ناچیزی داشته است.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پژوهشگاه صنعت نفت در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- منابع

- [1] Dejam, M., H. Hassanzadeh, and Z. Chen, Shear dispersion in combined pressure-driven and electro-osmotic flows in a channel with porous walls. *Chemical Engineering Science*, 2015. 137: pp. 205-215.
- [2] Zolfaghari, R., et al., Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. *Separation and Purification Technology*, 2016. 170: pp. 377-407.
- [3] Daniel-David, D., et al., Destabilisation of water-in-crude oil emulsions by silicone copolymer demulsifiers. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 2008. 63(1): pp. 165-173.
- [4] Aditya, N., et al., Co-delivery of hydrophobic curcumin and hydrophilic catechin by a water-in-oil-in-water double emulsion. *Food chemistry*, 2015. 173: pp. 7-13.
- [5] Abdulredha, M.M., H.S. Aslina, and C.A. Luqman, Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 2018.
- [6] Liu, J., et al., Demulsification of crude oil-in-water emulsions driven by graphene oxide nanosheets. *Energy & Fuels*, 2015. 29(7): pp. 4644-4653.
- [7] Salam, K., et al., Improving the demulsification process of heavy crude oil emulsion through blending with diluent. *Journal of Petroleum Engineering*, 2013. 2013.
- [8] Kang, W., et al., Demulsification performance, behavior and mechanism of different demulsifiers on the light crude oil emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018. 545: pp. 197-204.
- [9] Liu, J., et al., Recyclable magnetic graphene oxide for rapid and efficient demulsification of crude oil-in-water emulsion. *Fuel*, 2017. 189: pp. 79-87.
- [10] Yi, M., J. Huang, and L. Wang, Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier. *Journal of Chemistry*, 2017.
- [11] Martínez-Palou, R., et al., Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating. *Fuel*, 2013. 113: pp. 407-414.
- [12] Abdurahman, N., et al., Pipeline transportation of viscous crudes as concentrated oil-in-water emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012. 90: pp. 139-144.
- [13] Marquez-Silva, R., et al. Chemical dehydration: Correlations between crude oil, associated water and demulsifier characteristics, in real systems. in *International Symposium on Oilfield Chemistry*. 1997. Society of Petroleum Engineers.
- [14] Hu, L., et al., Photothermal-responsive single-walled carbon nanotube-based ultrathin membranes for on/off switchable separation of oil-in-water nanoemulsions. *ACS nano*, 2015. 9(5): pp. 4835-4842.
- [15] Tao, M., et al., An intelligent superwetting PVDF membrane showing switchable transport performance for oil/water separation. *Advanced Materials*, 2014. 26(18): pp. 2943-2948.
- [16] Liu, J., et al., An AgNP-deposited commercial electrochemistry test strip as a platform for urea detection. *Scientific reports*, 2020. 10(1): pp. 1-11.
- [17] Moakhar, R.S., et al., One-pot microwave synthesis of hierarchical C-doped CuO dandelions/g-C₃N₄ nanocomposite with enhanced photostability for photoelectrochemical water splitting. *Applied Surface Science*, 2020. 530: pp. 147271.
- [18] Zhang, Y., et al., Facial fabrication of superhydrophobic ZIF-7 coatings with fast self-healing ability for ultra-efficient emulsion separation. *Separation and Purification Technology*, 2021. 276: pp. 119272.
- [19] Chen, J., et al., Enhanced oil adsorption and nano-emulsion separation of nanofibrous aerogels by coordination of pomelo peel-derived biochar. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020. 59(18): pp. 8825-8835.



- [20] Chen, Y., et al., Under-oil superhydrophilic TiO₂/poly (sodium vinylphosphonate) nanocomposite for the separation of water from oil. *Separation and Purification Technology*, 2020. 251: pp. 117397.
- [21] Amirpoor, S., R.S. Moakhar, and A. Dolati, A novel superhydrophilic/superoleophobic nanocomposite PDMS-NH₂/PFONa-SiO₂ coated-mesh for the highly efficient and durable separation of oil and water. *Surface and Coatings Technology*, 2020. 394: pp. 125859.
- [22] Ghadimi, M.R., et al., Developing a new superhydrophilic and superoleophobic poly (4-(1-vinyl-1H-imidazol-3-ium-3-yl) butane-1-sulfonate): vinyl imidazole@ Perfluorooctanoic acid@ SiO₂ coated stainless steel mesh for highly efficient, stable, and durable oil/water separation. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2021. 18(2): pp. 511-521.
- [23] Cramer, N.B. and C.N. Bowman, Kinetics of thiol-ene and thiol-acrylate photopolymerizations with real-time fourier transform infrared. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2001. 39(19): pp. 3311-3319.
- [24] Crick, C.R., J.A. Gibbins, and I.P. Parkin, Superhydrophobic polymer-coated copper-mesh; membranes for highly efficient oil-water separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013. 1(19): pp. 5943-5948.
- [25] Jung, Y.C. and B.J.L. Bhushan, Wetting behavior of water and oil droplets in three-phase interfaces for hydrophobicity/philicity and oleophobicity/philicity. 2009. 25(24): pp. 14165-14173.