

بررسی آزمایشگاهی تزریق نانوسیال گرافن اکساید- هگزا متیل دی سیلان به مغزه در راستای بهبود بازیافت نفت

احسان جعفریگی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

احسان کمری

پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

فرهاد سلیمی*

گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چنگیز کرمی

گروه شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده: یکی از روش‌های موثر در فرایند ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به کارگیری فناوری نانو در راستای تغییرهای ترشوندگی سنگ مخزن می‌باشد. در این پژوهش ابتدا ترکیب گرافن اکساید- هگزا متیل دی سیلان (GO-HMDS) سنتز شد و در ادامه به منظور بررسی تغییرهای ترشوندگی سنگ مخزن کرناتنه به کار گرفته شد. با استفاده از آنالیزهای XRD و FT-IR ساختار نمونه سنتز شده بررسی شد. در این کار اثر غلظت GO-HMDS (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی) بر روی تغییرهای ترشوندگی سنگ مخزن با استفاده از آنالیزهای پتانسیل زتا، کشش بین سطحی و زاویه تماس مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که با استفاده از آنالیز پتانسیل زتا بهترین نمونه یعنی غلظت ۰/۲ درصد وزنی نانوسیال GO-HMDS برای بررسی تغییر ترشوندگی به دست آمد که مقدار مقدار پتانسیل زتا برای این غلظت 36 mV - تعیین شد. همچنین نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های کشش بین سطحی و زاویه تماس بین سنگ مخزن و محلول GO-HMDS بهترین مقدار در غلظت ۰/۲ درصد وزنی به دست آمد به طوری که در این غلظت کشش بین سطحی از مقدار اولیه ۱۵/۱ به $12/9\text{ mN/m}$ کاهش یافته و زاویه تماس از حالت اولیه 161° به 44° تقلیل یافت. بنابراین نانو سیال سنتز شده (غلظت ۰/۲ درصد وزنی از محلول GO-HMDS) باعث کاهش کشش بین سطحی، زاویه تماس و تغییرهای ترشوندگی سنگ شده و سرانجام منجر به آبدوستی سطح مغزه کرناتنه می‌شود.

واژگان کلیدی: نانو سیال گرافن اکساید، زاویه تماس، پتانسیل زتا، ترشوندگی، سنگ کرناتنه، کشش بین سطحی

KEYWORDS: Graphene oxide Nanofluid, Contact Angle, Zeta potential, Wettability, Carbonate Rock, Interfacial Tension (IFT).

مقدمه

با توجه به کاهش تولید نفت در بسیاری از مخازن نفتی، فناوری‌های پیشرفته‌ای برای ادامه تولید نفت و بازیافت بیش‌تر نفت درجای اولیه لازم است [۱]. در بین این روش‌ها استفاده از فناوری نانو برای ازدیاد برداشت نفت به عنوان روند جدیدی در نظر گرفته می‌شود [۲-۴]. نتیجه‌های نهایی مطالعه‌های گوناگون نشان داده‌اند که نانوذره‌ها می‌توانند ترشوندگی سنگ را تغییر دهند، و در این رابطه تغییر ترشوندگی سنگ مکانیسم مهمی در ازدیاد برداشت نفت از مخازن است [۵-۱۲]. در ازدیاد برداشت شیمیایی، بازیافت نفت با تزریق مواد شیمیایی خاص به دست می‌آید. این مواد شیمیایی به منظور بهبود نسبت جابه‌جایی به منظور کاهش کشش بین سطحی و یا تغییر ترشوندگی سنگ تزریق می‌شوند [۱۸-۱۳]. نسبت جابه‌جایی در کل، نسبت جابه‌جایی فاز (آب) به جابه‌جایی فاز (نفت) است. به طوری که نسبت جابه‌جایی کم‌تر از ۱ با استفاده از پلیمرهای محلول در آب به دست می‌آید [۱۹-۲۱]. در ضمن بیش‌تر نفت با توجه به نیروهای موینگی بالا به دام افتاده و فشار موینگی تحت تأثیر ترشوندگی و کشش بین سطحی آب-نفت قرار گرفته است [۲۲]. استفاده از نانوتکنولوژی امکان حل مشکل‌های گوناگونی در صنعت نفت و گاز را فراهم می‌کند [۲۳، ۲۴]. نانو سیالات را می‌توان به صورت نانوذره‌های معلق (به طور اسمی ۱۰۰-۱ نانومتر) را در مایع‌های پایه معرفی کرد [۲۲]. نانو سیالات از مخلوط کلئیدی از نانو ذره‌ها در یک مایع تشکیل شده است، که نقش مهمی در عملکرد انتقال گرما در یک سامانه گرمایی ایفا می‌کنند [۲۶]. از طرفی کشش بین سطحی نیز یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که بر خاصیت ترشوندگی سنگ تأثیر می‌گذارد [۲۷]. نانو ذره‌ها می‌توانند یک اثر قوی بر کشش بین سطحی داشته باشند [۲۸]. در این راستا اندازه‌گیری زاویه تماس هم رایج‌ترین روش برای تعیین ترشوندگی سطح می‌باشد [۲۹-۳۲]. *شادی زاده* و *امیر پور* در سال ۲۰۱۹ میلادی در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از انواع گوناگونی از سورفکتانت به بررسی تغییر ترشوندگی سنگ مخزن پرداختند. آنان با استفاده از انواع غلظت‌های گوناگون سورفکتانت‌هایی، مانند سورفکتانت‌های آنیونی، کاتیونی و غیر یونی از روش آزمایش زاویه تماس به این نتیجه رسیدند که سورفکتانت کاتیونی زاویه تماس را نسبت به سایر سورفکتانت‌ها به حالت آب دوستی تغییر می‌دهد [۳۳]. *علی* و *همکاران* در سال ۲۰۱۹ میلادی [۳۴] مطالعه‌های کاهش کشش بین سطحی و تغییرهای ترشوندگی را با تزریق نانوسیال پلیمری با شوری کم را در مقیاس یک مغزه

کربناته انجام دادند. به طوری که این نانوسیال پلیمری باعث کاهش چشمگیری در کشش بین سطحی و تغییر ترشوندگی شدید سنگ به سمت آبدوستی با تغییر زاویه تماس از 137° به 34° درجه شد. که این باعث افزایش بیش‌تر بازیافت نفت به میزان $19/28\%$ از نفت درجای اولیه شد. *اوگولو* و *همکاران* اثر روی، نیکل، منیزیم، آهن، قلع، زیرکونیوم، سیلیکون دی اکساید و اکسید آلومینیوم را بر روی بازیافت نفت مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیلیکون دی اکساید و آلومینیوم اکسید بهترین عامل برای ازدیاد برداشت نفت می‌باشند. همچنین سیلیکون دی اکساید علاوه بر کاهش کشش بین سطحی آب و نفت نیز باعث تغییر ترشوندگی سنگ شد در حالی که اکسید آلومینیوم باعث کاهش ویسکوزیته نفت شد [۳۵]. *الانصری* و *همکاران* تغییرهای ترشوندگی سنگ مخزن کربناته نفت دوست را به وسیله نانوسیال سیلیکا بررسی و تشریح کردند [۳۶]. در مطالعه دیگر *روستایی* و *همکاران* در سال ۲۰۱۲ میلادی بر روی بررسی نانوذره‌های پلی سیلیکون به این نتیجه رسیدند که این ذره‌ها توانایی افزایش جابه‌جایی را در مقیاس منافذ از روش کاهش کشش بین سطحی و تغییرهای ترشوندگی دارند. و باعث تغییرهای ترشوندگی سنگ ماسه سنگی از حالات خنثی یا حد وسط به آب دوست شد. در مطالعه آنان کشش بین سطحی آب-نفت در هنگام روبه‌رو شدن با نانو ذره‌ها، از مقدار $26/3$ mN/m به $1/75$ mN/m و $2/55$ mN/m کاهش یافت [۳۷]. در بررسی پژوهش‌های منتشر یافته در رابطه با گرافن اکساید، نشان‌دهنده تأثیر مثبت آن در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن است. ولی آزمایش‌های محدودی بر روی تأثیر اصلاح سطحی این ماده بر ازدیاد برداشت نفت صورت گرفته است. از طرفی نتیجه‌های مطالعه‌های صورت گرفته نشان داده که عامل‌دار کردن گرافن اکساید در حضور سایر ترکیب‌ها تأثیر بسزایی بر روی تغییر ترشوندگی سنگ نداشته است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از یک فرایند پیچیده در حضور یک ترکیب جدید تحت عنوان هگزامتیل دی سیلازان به اصلاح سطحی نانو گرافن اکساید به منظور بالا بردن کارایی آن در تغییر ترشوندگی سنگ پرداخته شده است. این ماده برای اولین بار سنتز شده و بررسی اثر تزریق نانوسیال گرافن اکساید-هگزامتیل دی سیلازان بر نمونه مغزه در یکی از مخازن غرب کشور صورت گرفته است. در این رابطه آزمایش‌های متعددی همچون آزمایش پتانسیل زتا، کشش بین سطحی، زاویه تماس برای تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و افزایش آبدوستی آن و همچنین چگونگی عملکرد جذب نانو ذره بر سطح سنگ مورد بررسی

ساخت شرکت Malvern و از طرفی برای اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش بین سطحی از دستگاه IFT700-32175 ساخت کشور فرانسه بهره برده شده است.

سنتر نانو گرافن اکساید

در این آزمایش از روش شناخته شده هامر استفاده شده است [۳۹،۳۸]، در این رابطه به طور مختصر، ۳۶۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید و ۴۰ میلی‌لیتر فسفریک اسید در هم مخلوط شدند. و سپس مخلوط را در یک حمام یخ قرار داده و مقدار ۱۸ گرم پتاسیم پرمنگنات به آرامی به آن افزوده شد. در ادامه در دمای ۴۵°C مقدار ۳ گرم پودر گرافیت به تدریج به آن افزوده و به مدت ۱۶ ساعت به طور یکنواخت همزده شد. سپس، به آرامی هیدروژن پراکسید تا زمانی که رنگ مخلوط به طور کامل از بنفش به زرد رنگ تبدیل شود، به تدریج به مخلوط سرد شده، افزوده شد. مخلوط آماده شده را دو بار با آب و چهار بار با اتانول و یک بار با هیدروکلریک اسید شسته شد تا نمک‌ها و اسیدهای اضافی از آن زدوده شده و سرانجام در آن ۳۰۰ ml خشک شد. در آخر ۱ گرم از گرافن اکسید خشک شده را به ۳۰۰ ml آب دیونیزه افزوده و پس از دو ساعت همزدن، آن را به مدت ۱ ساعت دیگر در امواج فراصوت قرار داده تا ذره‌های یکنواختی از گرافن اکساید در آب به دست آید.

عامل‌دار کردن نانو گرافن اکساید

به منظور بازدهی بیش‌تر و عامل‌دار نمودن گرافن اکساید در مرحله اول باید در ابتدا نمک ۴ سولفونبنزن دیازونیوم سنتز شده شود. برای انجام فرایند فوق به طور خلاصه مقدار ۶/۲ گرم ۴-آمینوبنزن سولفونیک اسید در ۳۵۰ میلی‌لیتر آب حل شده و سپس ۲۹ میلی‌لیتر از هیدروکلریک اسید (۲۰٪) به محلول اضافه می‌شود. در ادامه ۲/۵ گرم نیتريت سدیم در ۱۰ میلی‌لیتر آب حل کرده و آن را به صورت قطره‌ای به محلول در دمای ۰-۵ درجه سلسیوس اضافه می‌شود. با افزودن نیتريت سدیم، محلول روشنی به دست می‌آید. سپس پس از هم زدن یک ساعت دیگر در همان درجه گرما، مقدار رسوب سفید نمک ۴-سولفونبنزن دی‌آزونیوم تشکیل می‌شود. محلول آماده شده فوق برای آماده شدن فرایند اول عامل‌دار شدن نانوگرافن اکساید صورت گرفت تا به نوعی بتوان از آن به عنوان محلول اولیه برای عامل‌دار شدن گرافن اکساید نام برد [۴۰،۴]. به منظور انجام فرایند عامل‌دار شدن در مرحله اول، مقدار ۱ گرم سدیم دو دسیل بنزن سولفونات (SDBS) به منظور انجام یک فرایند عاملی خوب

قرار گرفت. این پژوهش، در ازدیاد برداشت نفت چشم‌اندازی واضح‌تر با به کارگیری این نانوذره‌ها ترسیم می‌کند تا به صورت دقیق‌تر و کاربردی‌تر در این عرصه امکان استفاده از آن مشخص شود.

بخش تجربی

مواد شیمیایی

در این مطالعه گرافیت، سولفوریک اسید، پتاسیم کلرات، نیتريت اسید، فسفریک اسید، سولفونیک اسید، نیتريت سدیم، اسید فرمیک، اتانول، متانول، هیدروکلریک اسید، سدیم کلرید، تولوئن، تیونیل کلرید، هگزا متیل دی سیلان، دی کلرومتان، ۴-آمینو بنزن سولفونیک اسید، تیونیل کلرید، سدیم دو دسیل بنزن سولفونات، دی کلرو متان، اتیلن گلیکول و سدیم دو دسیل بنزن سولفونات با خلوص آزمایشگاهی همه از شرکت مرک آلمان تهیه شده است. همچنین از نمونه نفت خام متعلق به یکی از میادین نفتی در غرب ایران به منظور انجام فرایند پیر کردن سنگ کربناته استفاده شده است. چگالی و ویسکوزیته نفت مذکور به ترتیب 0.831 gr/cm^3 و $15/41 \text{ cp}$ درجه API برابر $38/7$ استفاده شده است. سنگ مخزن مورد استفاده در این پژوهش نیز سنگ مخزن کربناته می‌باشد. بنابراین نمونه‌های سنگ به صورت مغزه استوانه‌ای به طول حدود $5/105 \text{ cm}$ آماده کرده و سپس به وسیله دستگاه برش آزمایشگاه به صورت مقطعی به قطر حدود 2 cm و ضخامت حدود $3/800 \text{ mm}$ برش زده شد. در ضمن مغزه دارای تراوایی 0.483 md ، تخلخل $22/613\%$ و با حجم خلل و فرج $13/05 \text{ ml}$ می‌باشد. همچنین پایداری نانوسیالات با استفاده از دستگاه پتانسیل زتا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در مقدارهای گوناگون pH محاسبه می‌شود.

دستگاه‌ها

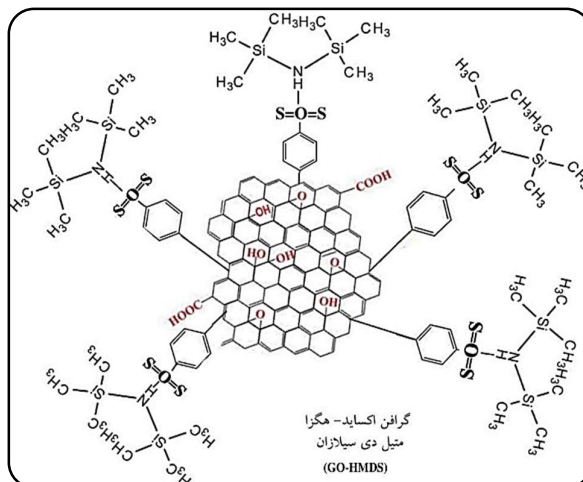
در این مطالعه برای اندازه‌گیری مواد مورد نیاز برای ساخت محلول‌ها از دستگاه‌هایی نظیر میله سنجش فراصوت مدل (USH1200) با توان 1200 W و فرکانس 25 KHz ، حمام فراصوت مدل Grant XB6، ات پلیت و مگنت (هیتر همزن مغناطیسی) مدل RHBasic2، سانتریفیوژ 6000 دور در دقیقه مدل Rotofix ۳۲A و آن آزمایشگاهی مدل UN55 برای سنتز نانو گرافن اکساید به کار گرفته شده است. در این رابطه از دستگاه‌های پراش اشعه ایکس مدل ultima iv، دستگاه طیف‌سنجی فروسرخ مدل IR Spirit برای آنالیز و شناسایی ساختار مواد سنتزی و همچنین برای اندازه‌گیری پتانسیل زتا از دستگاه Zetasizer مدل Nano Z

پخش کرده و سپس تحت مخلوط شدن در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت تحت هم زدن قرار داده تا واکنش به صورت کامل انجام گیرد. سوسپانسیون گرافن اکساید عامل‌دار شده همگن متعاقباً سانتریفیوژ شده، و برای تمیز کردن این فراورده جامد آن را با آب و اتانول چندین بار شسته و سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در آن خشک شد. بنابراین فراورده نهایی به عنوان GO-HMDS نام‌گذاری شده است. در این رابطه ساختار نهایی سنتز شده این ترکیب جدید در شکل ۱ نشان داده شده است.

آنالیزها

اندازه‌گیری پتانسیل زتا، زاویه تماس و کشش بین سطحی

برای انجام آنالیزهای فوق در ابتدا طول و قطرهای کربناته پس از سه بار اندازه‌گیری در جهت‌های متفاوت، به ترتیب اندازه‌گیری شد. سپس نیمی از نمونه مغزه کربناته با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای پودر کرده و سپس آن را از الک ۵ μm عبور داده تا از اندازه و یکنواخت بودن مورد نظر اطمینان به‌دست آید. در این رابطه نیمه دوم مغزه به چند قسمت با ضخامت یکسان برش داده و پس از صیقل دادن سطوح آن‌ها، در آزمایش‌های زاویه تماس و کشش بین سطحی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور آزمایش پتانسیل زتا در ابتدا نفت مرده مخزن را با برش‌های مغزه کربناته در تماس قرار داده شد. سپس پودر و برش‌های مغزه کربناته درون محفظه مخصوص پیر کردن برای نزدیک شدن شرایط آن‌ها به شرایط مخزنی قرار داده شدند. همچنین به مدت ۵ هفته سیلندر و محتویات آن در فشار ۵۵۰ psi و دمای ۹۰°C قرار داده شد. پس از این زمان، میزان ۰/۰۵ از پودر کربناته با نانوسیال در تماس قرار داده شد. برای رسیدن به یکنواختی بیش‌تر توسط دستگاه آلتراسونیک مرحله همگن سازی آن انجام شد. سپس پس از گذشت ۴۸ ساعت، برای رسیدن محلول‌ها به شرایط تعادل، پتانسیل زتای نمونه‌ها در شرایط محیط با استفاده دستگاه Zetasizer اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش‌ها زاویه تماس و کشش بین سطحی، برش‌های نمونه مغزه‌هایی که دوران پیرشدگی را سپری کرده‌اند به کار برده شده است. به طوری که نمونه مغزه در دستگاه زاویه تماس قرار گرفته و اطراف نمونه‌ها از محلول نانوسیال GO-HMDS پر کرده می‌شود. در این رابطه برای تست زاویه تماس، نمونه نفتی از زیر دستگاه به سامانه تزریق شد و قطره به گونه‌ای که حالت ترشوندگی نمونه سنگ مخزن کربناته حفظ شود در زیر نمونه قرار گرفت. با گذشت زمان تغییرهای زاویه تماس در حضور نانوسیال ثبت شد. همچنین برای اندازه کشش

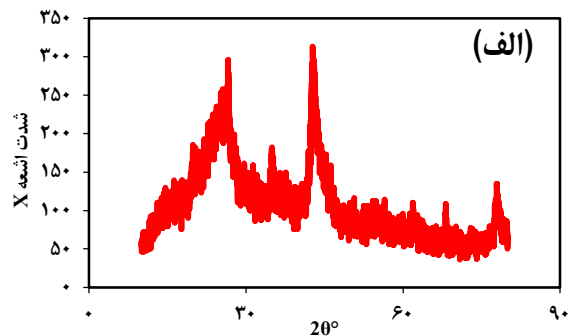
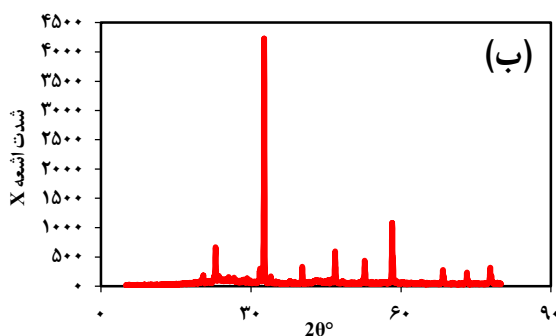


شکل ۱ - فرایند نهایی ترکیب سنتزی عامل‌دار شده

برای گرافن اکساید، این سورفکتانت به پراکندگی گرافن اکساید در حضور نمک ۴-سولفوبنزن دی‌آزونیوم اضافه شد. در این مرحله به منظور آماده سازی کامل ترکیب GO-DS، ۲ گرم نانو گرافن اکساید در ۲۰۰ میلی‌لیتر آب پراکنده می‌شود. و نانو گرافن اکساید مورد اصلاح سطحی قرار گرفته می‌شود. و در اینجا در مرحله اول فرایند اصلاح سطحی شده ترکیب GO-DS آماده می‌شود. که در ترکیب فوق GO مخفف گرافن اکساید، D مخفف دی‌آزونیوم و نقاط S به گروه‌های سولفونیک مربوط می‌باشد. در این مطالعه برای انجام مرحله دوم از یک مسیر جدید برای افزودن گروه‌های سولفونات بیش‌تر به GO-DS و تهیه یک گرافن اکساید عامل‌دار شده جدید و موثر به نام GO-HMDS استفاده شده است. به طوری که در این راستا برای عامل‌دار کردن GO-DS ابتدا گروه‌های OH با استفاده از تیونیل کلرید با کلر جایگزین کرده و سپس مخلوط واکنش در مدت زمان ۷۲ ساعت به‌طور مداوم در شرایط رفلکسینگ همزده می‌شود. مقدار اضافی تیونیل کلرید با روش تقطیر از فراورده جامد جدا می‌شود. در مرحله بعدی، ماده جامد سیاه رنگ (GO-DS-Cl) در دمای ۵-۰ درجه سلسیوس با ۱۰ میلی‌لیتر از ترکیب جدید هگزا متیل دی سیلازان (HMDS) و ۴۵ میلی‌لیتر دی کلرومتان مخلوط می‌شود. این مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط در حالت همزدن نگهداری می‌شود تا واکنش به صورت کامل در آید. این محلول سیاه در نتیجه سانتریفیوژ شده، و با آب و اتانول شسته می‌شود. سپس فراورده جامد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در فر خشک می‌شود. در این رابطه ۰/۷ گرم از این ماده خشک شده در ۵۰ میلی‌لیتر دی کلرومتان



شکل ۲ - الف) شماتیک چگونگی اندازه‌گیری زاویه تماس، ب) چگونگی اندازه‌گیری کشش بین سطحی در حضور نانوسیال



شکل ۳ - الف) طیف XRD نانو ذره‌های گرافن اکساید، ب) نانو ذره‌های گرافن اکساید عامل‌دار شده

۲۷/۰۳ = ۲۰ درجه می‌باشد، به طوری که نانو گرافن اکساید بر اساس قانون براگ ($n\lambda = 2d\sin\theta$) دارای ۳ لایه گرافن اکساید با فاصله بین لایه‌های ۰/۳۳ نانومتر می‌باشد. از طرف دیگر در شکل ۳ ب گرافن اکساید که توسط ساختار جدید مورد اصلاح سطحی قرار گرفته شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ ب دیده می‌شود ساختار گرافن اکساید از حالت مورفی تغییر پیدا کرده و به سمت بلوری رفته، که این نشان می‌دهد با عامل‌دار کردن گروه‌های گوناگون روی سطح نانو گرافن اکساید فاصله بین لایه‌ها بیشتر شده و می‌توان نتیجه گرفت که گروه‌های عاملی به خوبی روی سطح قرار گرفته‌اند.

طیف FT-IR گرافن اکساید و گرافن اکساید عامل‌دار شده در شکل ۴ الف و ب نشان داده شده است. در شکل ۴ الف سیگنال نشان داده شده در بازه 2800 cm^{-1} مربوط به حضور sp^2 در ساختار ترکیب سنتز شده می‌باشد. این سیگنال بیانگر وجود نانو گرافن اکساید در ترکیب می‌باشد [۴۱]. از سوی دیگر سیگنال $1224/26 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های C-O و سیگنال $3387/74 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های O-H می‌باشد. در شکل ۴ ب همچنین حضور گروه‌های عاملی سولفونیک اسید در حضور ترکیب SDBS در ساختار GO-DS توسط سیگنال‌های ۱۰۰۸، ۱۰۵۲ و 1121 cm^{-1} نشان داده شده است [۴۲]. سیگنال موجود در بازه $1618/85 \text{ cm}^{-1}$ مطابق با سیگنال N-H می‌باشد. در این رابطه ظاهراً یک باند تقریباً به صورت گسترده در بازه

بین سطحی از روش قطره آویز بهره برده شده است، به طوری که قطره نفت به عنوان قطره معلق سیال محیطی محلول نانوذره‌ها می‌باشد. این دستگاه متصل به دوربین با قابلیت زوم بالاست که تصویرهای ثبت شده را به رایانه‌ای که به آن متصل است منتقل می‌کند، سپس توسط نرم‌افزار مربوطه محاسبه‌ها صورت گرفته و مقدار کشش بین سطحی را مشخص می‌کند. از طرفی این دستگاه دارای ویژگی‌هایی از قبیل؛ مجهز به نرم‌افزار برای محاسبه اطلاعات به صورت آنالین و دوربین با قدرت تفکیک بالا می‌باشد. در آخر، آزمایش به مدت ۲۴ تا ۴۷ ساعت، البته برای زمانی که هیچ تغییری در کشش بین سطحی و زاویه تماس ایجاد نشود، ادامه پیدا می‌کند. سپس توسط دستگاه، زاویه‌های مربوط به سطح سنگ/نفت/نانوسیال و همچنین کشش بین سطحی نفت و آب اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی آب و نفت می‌بایست از لوله U شکل استفاده کرد (به علت دانسیته کمتر نفت نسبت به محلول آبی). در شکل ۲ الف و ب شماتیک چگونگی اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی در حضور نانوسیال نشان داده شده است.

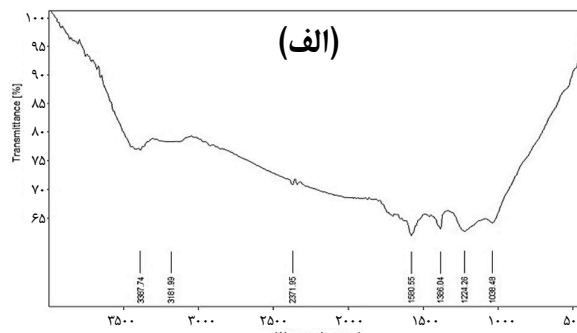
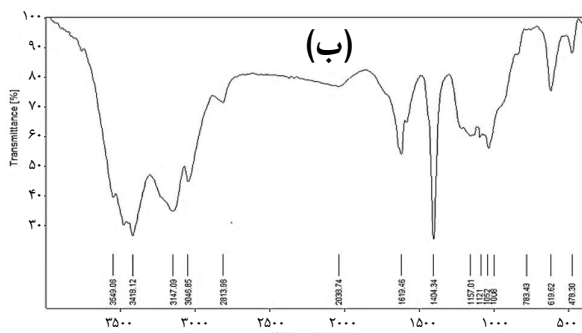
نتیجه‌ها و بحث

ویژگی‌ها نانو گرافن اکساید

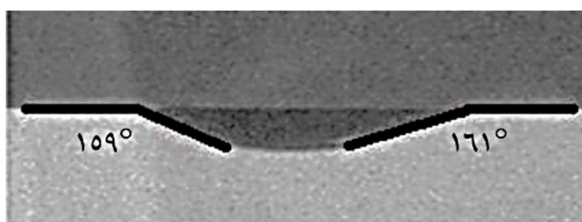
الگوی XRD از نانو ذره‌های گرافن اکساید در شکل ۳ الف نشان داده شده است. در شکل ۳ الف اوج مشخصه گرافن اکساید

جدول ۱ - اندازه‌گیری پتانسیل زتا با استفاده از نانوسیال GO-HMDS

پتانسیل زتا (mV)	pH	نوع
-۲۵/۲	۳	۰/۰۵ نانو سیال GO-HMDS + ۰/۰۵ درصد وزنی پودر سنگ
-۳۱/۷	۶	۰/۱ نانو سیال GO-HMDS + ۰/۰۵ درصد وزنی پودر سنگ
-۳۶	۹	۰/۲ نانو سیال GO-HMDS + ۰/۰۵ درصد وزنی پودر سنگ



شکل ۴ - (الف) طیف FT-IR از نانو ذره‌های گرافن اکساید، (ب) نانو ذره‌های گرافن اکساید- هگزا متیل دی سیلان



شکل ۵ - زاویه تماس در شرایط اولیه

$1404/34 \text{ cm}^{-1}$ که نشان‌دهنده سیگنال کشش پیوندی برای C-N است. علاوه بر این حضور گروه‌های آمین در ساختار گرافن اکساید توسط سیگنال‌های 3005 تا $3477/27 \text{ cm}^{-1}$ تایید شد [۴۱-۴۵]. همچنین سیگنال‌های $1157/01$ و $1105/01 \text{ cm}^{-1}$ حضور گروه‌های سولفونیک در سطح GO-HMDS را تایید می‌کند. سیگنال مربوط به Si-O در بازه 1100 cm^{-1} می‌باشد. بنابراین، ساختار GO-HMDS توسط تجزیه و تحلیل نمودار FT-IR نشان داده شد. در نتیجه با توجه به ساختار سنتزی، این نانوسیال می‌تواند عملکرد موثری در بازیافت نفت از خود نشان دهد.

بررسی تأثیر نانو سیال GO-HMDS بر تغییر ترشوندگی

تأثیر نانوسیال GO-HMDS بر پتانسیل زتا

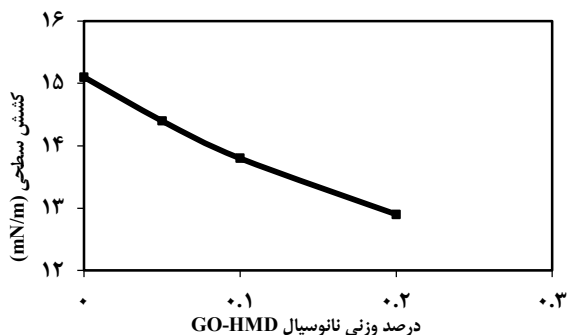
جدول ۱ اندازه‌گیری‌های پتانسیل زتا برای نانو سیال سنتز شده و پودر سنگ $0/05$ درصد وزنی با غلظت‌های گوناگون مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. به طوری که افزودن $0/05$ درصد وزنی پودر سنگ ب نانوسیال GO-HMDS با غلظت‌های $0/05$ ، $0/1$ و $0/2$ درصد وزنی مقدارها پتانسیل زتا با pH های ۳، ۶ و ۹ را به ترتیب $-25/2$ ، $-31/7$ و -36 افزایش می‌دهد، که این بدان معناست که نانوسیال GO-HMDS تغییرهای ترشوندگی قوی به دلیل حضور گروه‌های عاملی بیش‌تر بر روی ساختار آن دارا می‌باشد. همچنین با افزایش pH بار سطحی GO-HMDS در مقدارهای pH اصلی منفی‌تر می‌شود که منجر به کاهش مقدار بالقوه زتا می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده، نانوسیال $0/2$ درصد وزنی

پایداری خوبی دارد. ولی از طرفی نانوسیال $0/05$ درصد وزنی GO-HMDS در معرض ناپایداری با زمان است، زیرا پتانسیل زتا آن در لبه است. بر اساس نتیجه‌های به‌دست آمده، نانوسیال $0/2$ درصد وزنی GO-HMDS دارای بالاترین پایداری است. از طرفی هم نتیجه‌ها نشان داد این نانوسیال به مدت ۳۵ ساعت در محلول پایدار است.

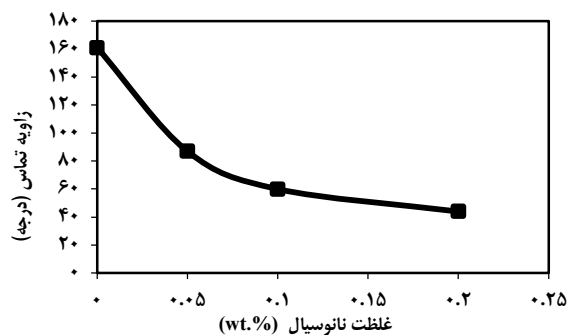
اثر غلظت GO-HMDS بر زاویه تماس سنگ مخزن

به منظور آماده سازی سنگ و اطمینان از نفت دوست بودن آن پس از تمیزسازی آن، به مدت ۳ هفته مقطع سنگ مخزن را در نفت خام مخزن قرار داده تا سنگ نفت دوست شود. به طوری که پس از مدت زمان ۳ هفته زاویه تماس سنگ مخزن اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود زاویه تماس آب با سنگ مخزن در مجاورت قطره نفت 161° می‌باشد در این حالت سنگ مخزن نفت دوست شده است.

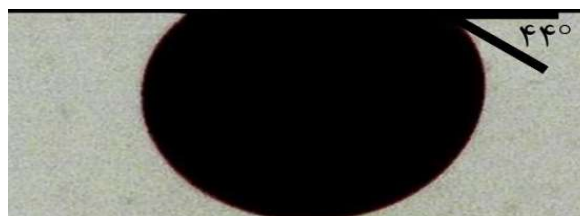
سپس نمونه سنگ با غلظت‌های $0/05$ ، $0/1$ و $0/2$ درصد وزنی در محلول‌های GO-HMDS قرار داده شد. در ادامه آنالیز زاویه



شکل ۸ - کشش بین سطحی بر حسب درصد وزنی برای محلول GO-HMDS



شکل ۶ - تاثیر غلظت GO-HMDS بر کاهش زاویه تماس



شکل ۷ - کمینه زاویه تماس در حضور GO-HMDS

در نتیجه‌های آزمایش‌ها دیده می‌شود GO-HMDS در هر دو مکانیسم مربوط به افزایش برداشت نفت یعنی تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین سطحی رفتار مشابهی از خود نشان داده است. در واقع GO-HMDS با واکنش دادن با نفت باعث کاهش کشش بین سطحی و به افزایش میزان آب دوستی سنگ مخزن کمک می‌کند. اما نکته دارای اهمیت همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود غلظت بهینه GO-HMDS است. کم‌ترین مقدار کشش بین سطحی در غلظت بهینه ۰/۲ درصد وزنی از نانوسیال GO-HMDS برابر ۱۲/۹ mN/m است.

از سوی دیگر مکانیسم احتمالی جذب نانوذره‌های GO-HMDS در سطح سنگ کربنات با توجه به وجود گروه‌های هیدروکسیل و سیلیسیم روی سطح سنگ کربنات و همچنین گروه‌های (هیدروژن، اکسیژن، سیلیسیم و سولفونیک) موجود در ساختار نانوذره GO-HMDS تمایل به انجام فعل و انفعال دارند. با توجه به این توضیح‌ها نانوسیال GO-HMDS روی سطح کربنات جذب شده و باعث ایجاد تغییر ترشوندگی آن به سمت آبدوستی می‌شود. روند این فرایند باعث تولید بهتر نفت می‌شود. بنابراین وقتی که سطح سنگ کربنات با استفاده از این گروه‌های آبدوست پوشیده می‌شود، در این حالت یک فیلم آبی مثلثی شکل به وجود می‌آید. و قطره‌های نفت تحت تاثیر آن فیلم آبی قرار گرفته و باعث جدا شدن آن‌ها از سطح سنگ مخزن می‌شود. در این رابطه مکانیسم جذب نانوذره با سنگ مخزن کربنات مطابق شکل ۹ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

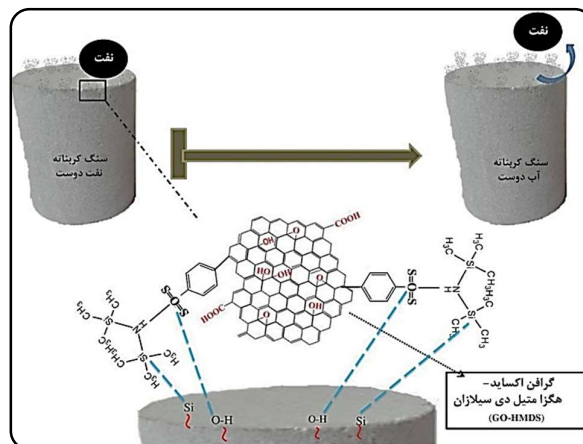
به کارگیری نانوسیالات یکی از موثرترین روش‌ها در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به سمت آب دوستی است. در این مطالعه، نانو گرافن اکساید با استفاده از روش‌های سنتز شده و با ترکیب جدید HMDS مورد

تماس برای تمام نمونه‌ها صورت گرفت. با افزایش درصد وزنی GO-HMDS مطابق شکل ۶ زاویه تماس سنگ با آب کاهش یافته است. این نشان‌دهنده تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوستی به سمت آبدوستی است. به طوری که با افزایش آب دوستی سنگ مخزن، میزان تولید نفت افزایش خواهد یافت. در این رابطه مقدار نانوسیال با غلظت ۰/۲ درصد وزنی به عنوان مقدار بهینه به دست آمد. که در این مقدار کم‌ترین مقدار زاویه تماس مشاهده می‌شود. با توجه به نتیجه‌ها می‌توان دریافت که مقدار زاویه تماس پس از قرار دادن سنگ در محلول GO-HMDS با غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی به ترتیب برابر با ۸۷° و ۷۰° به دست آمد. همچنین با توجه به شکل ۷ کم‌ترین میزان زاویه تماس سنگ در محلول ۰/۲ درصد وزنی GO-HMDS به مقدار ۴۴° به دست آمده است.

تاثیر ترکیب GO-HMDS بر کشش بین سطحی

پس از تعیین تغییرهای ترشوندگی با استفاده از GO-HMDS لازم است تا مکانیسم موثر دیگر در افزایش میزان برداشت نفت یعنی کشش بین سطحی محلول متشکل از GO-HMDS و نفت مخزن مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در درصدهای وزنی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ میزان کشش بین سطحی اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزودن درصد بیش‌تری از GO-HMDS کشش بین سطحی آب و نفت مخزن کاهش محسوسی داشته است.

برای کاهش کشش بین سطحی نیز یک غلظت بهینه از GO-HMDS وجود دارد که در آن بیشترین میزان کاهش کشش بین سطحی اتفاق می‌افتد که در این پژوهش در غلظت ۰/۲ درصد وزنی GO-HMDS با بهینه غلظت ۰/۲ درصد وزنی بیشترین کاهش کشش بین سطحی ایجاد شد. نکته دارای اهمیت در این پژوهش این است که نانوسیال GO-HMDS در هر دو مکانیسم تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین سطحی موثر عمل می‌کند که این امر تاثیر به سزایی در افزایش بازیافت نفت خواهد داشت. همچنین اندازه‌گیری پتانسیل زتا نشان داد که نانوسیال ۰/۲ درصد وزنی با $\text{pH} = 6$ دارای بالاترین پایداری در میان نانوسیال‌ها است که همان‌گونه که انتظار می‌رود، مطابق با نتیجه‌های کشش بین سطحی و زاویه تماس می‌باشد. به عبارت دیگر، پایدارترین نانوسیال ۰/۲ درصد وزنی GO-HMDS بود، که با پایین‌ترین کشش بین سطحی و زاویه تماس معرفی شد. از سوی دیگر هماهنگی بین ساختار سنگ و گروه‌های عاملی موجود در ساختار نانوذره بیانگر موثر بودن این نوع نانوذره جدید در راستای تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و افزایش بهره‌وری تولید است.



شکل ۹ - مکانیسم جذب نانوذره سنتز شده بر سطح سنگ کربناته

اصلاح سطحی قرار گرفته به طوری که طیف FT-IR حضور گروه -Si و گروه سولفونیک در ساختار GO-HMDS را تأیید می‌کند. در ضمن با افزایش غلظت GO-HMDS در بازه مورد آزمایش تا ۰/۲ درصد وزنی، زاویه تماس سنگ مخزن و آب از 161° به 34° رسید. در واقع با افزایش درصد وزنی GO-HMDS زاویه تماس کاهش یافته و سنگ آب دوست‌تر شد. در حالی که می‌توان گفت حضور GO-HMDS در آب باعث کاهش کشش بین سطحی آب و نفت می‌شود. با افزایش درصد وزنی نانوسیال GO-HMDS کشش بین سطحی آب و نفت به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. در واقع

تاریخ دریافت: ۱۶/۰۲/۱۴۰۰؛ تاریخ پذیرش: ۰۸/۰۶/۱۴۰۰

مراجع

- [1] Dahle G.S., *Investigation of how Hydrophilic Silica Nanoparticles Affect Oil Recovery in Berea Sandstone*, Master thesis, *Petroleum Engineering and Applied Geophysics*, Trondheim, (2014).
- [2] Ju B., Shugao D., Zhian L., Tiangoa Z., Xiatao S., Xiaofeng Q., *A Study of Wettability and Permeability Change Caused by Adsorption of Nanometer Structured Polysilicon on the Surface of Porous Media*, *SPE Journal*, Melbourne, Australia, 8–10 October, (2002).
- [3] Rezaei-Namin A., Rashidi A., Gharesheikhloou A.A., Ghasemy E., Jalilian M., *Experimental Application of Functionalized N-Doped Graphene for Improving Enhanced Oil Recovery*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **581**: 123-801 (2019).
- [4] Radnia H., Rashidi A., Nazar A.R.S., Eskandari M.M., Jalilian M., *A Novel Nanofluid based on Sulfonated Graphene for Enhanced Oil Recovery*, *Journal of Molecular Liquids*, **271**: 795-806 (2018).
- [5] Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., Hussein I.A., *Review on Polymer Flooding: Rheology, Adsorption, Stability, and Field Applications of Various Polymer Systems*, *Polymer Reviews*, **55(3)**: 491–530 (2015).

- [6] Gong H., Li Y., Dong M., Ma S., Liu W., [Effect of Wettability Alteration on Enhanced Heavy Oil Recovery by Alkaline Flooding](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **488**: 28–35 (2016).
- [7] Bayat M., Lashkarbolooki M., Hezave A.Z., Ayatollahi S., [Investigation of Gas Injection Flooding Performance as Enhanced Oil Recovery Method](#), *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **29**: 37–45 (2016).
- [8] Lu T., Li Z., Li S., Wang P., Wang Z., Liu S., [Enhanced Heavy Oil Recovery after Solution Gas Drive by Water Flooding](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **137**: 113–124 (2016).
- [9] Liyanage P.J., Lu J., Arachchilage G.W.P., Weerasooriya U.P., Pope G.A., [A Novel Class of Large-Hydrophobe Tristyrylphenol \(TSP\) Alkoxy Sulfate Surfactants for Chemical Enhanced Oil Recovery](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **128**: 73–85 (2015).
- [10] Goudarzi A., Delshad M., Mohanty K. K., Sepehrnoori K., [Surfactant Oil Recovery in Fractured Carbonates: Experiments and Modeling of Different Matrix Dimensions](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **125**: 136–145 (2015).
- [11] Wang C., Li X., Li P., Niu Y., [Interactions between Fluorinated Cationic Guar Gum and Surfactants in the Dilute and semi-Dilute Solutions](#), *Carbohydrate Polymers*, **99**: 638–645 (2014).
- [12] Rostami A., Zargar G., Takassi M.A., Moradi S., Jabari B., [Evaluation of a New Agent for Wettability Alteration during Enhanced Oil Recovery](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **39(5)**: 333–341 (2020).
- [13] Olajire A.A., [Review of ASP EOR \(Alkaline Surfactant Polymer Enhanced Oil Recovery\) Technology in the Petroleum Industry: Prospects and Challenges](#), *Energy*, **771**: 963–982 (2014).
- [14] Kamari A., Gharagheizi F., Shokrollahi A., Arabloo M., Mohammadi A.H., [Integrating a Robust Model for Predicting Surfactant-Polymer Flooding Performance](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **137**: 87–96 (2016).
- [15] Bikkina P., Wan J., Kim Y., Kneafsey T.J., Tokunaga T.K., [Influence of Wettability and Permeability Heterogeneity on Miscible CO₂ Flooding Efficiency](#), *Fuel*, **166**: 219–226 (2015).
- [16] Ahmadi M.A., Shadizadeh S.R., [Implementation of a Highperformance Surfactant for Enhanced Oil Recovery from Carbonate Reservoirs](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **110**: 66–73 (2013).
- [17] Ahmadi M.A., Shadizadeh S.R., [Experimental Investigation of Adsorption of a New Nonionic Surfactant on Carbonate Minerals](#), *Fuel*, **104**: 462–467 (2013).
- [18] Zendejboudi S., Ahmadi M.A., Rajabzadeh A.R., Mahinpey N., Chatzis I., [Experimental Study on Adsorption of a New Surfactant onto Carbonate Reservoir Samples-Application to EOR](#), *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **91(8)**: 1439–1449 (2013).
- [19] Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., Hussein I.A., Y Feng., [Rheological Properties of Thermoviscosifying Polymers in High-temperature and High-salinity Environments](#), *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **93(7)**: 1194–1200 (2015).

- [20] Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., Hussien I.A., Pabon M., [Evaluation of Rheological and Thermal Properties of a New Fluorocarbon Surfactant-Polymer System for EOR Applications in High-Temperature and High-Salinity Oil Reservoirs](#), *Journal of Surfactants and Detergents*, **17(5)**: 985–993 (2014).
- [21] Wang Y., Feng Y., Wang B., Lu Z., [A Novel Thermoviscosifying Water-Soluble Polymer: Synthesis and Aqueous Solution Properties](#), *Journal of Applied Polymer Science*, **116(6)**: 3516–3524 (2010).
- [22] Wu Y., Shuler P.J., Blanco M., Tang Y., Goddard-III W.A., [An Experimental Study of Wetting Behavior and Surfactant EOR in Carbonates with Model Compounds](#), *SPE Journal*, **13(1)**: 26–34 (2008).
- [23] Lan Q., Yang F., Zhang S., Liu S., Xu J., Sun D., [Synergistic Effect of Silica Nanoparticle and Cetyltrimethyl Ammonium Bromide on the Stabilization of O/W Emulsions](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **302(1-3)**: 126–135 (2007).
- [24] Hashemi R., Nassar N.N., Almao P.P., [Nanoparticle Technology for Heavy Oil In-Situ Upgrading and Recovery Enhancement: Opportunities and Challenges](#), *Applied Energy*, **133**: 374–387 (2014).
- [25] Bhuiyan M.H.U., Saidur R., Amalina M.A., Mostafizur R.M., Islam A., [Effect of Nanoparticles Concentration and their Sizes on Surface Tension of Nanofluids](#), *Procedia Engineering*, **105**: 431–437 (2015).
- [26] Taylor R., Coulombe S., Otanicar T., Phelan P., Gunawan A., Lv W., Rosengarten G., Prasher R., Tyagi H., [Small Particles, Big Impacts: A Review of the Diverse Applications of Nanofluids](#), *Journal of Applied Physics*, **113(1)**: 011301 (2013).
- [27] Gräfe W., [A Simple Quantum Mechanical Model for the Contribution of Electronic Surface States to Surface Stress, Strength and Electrocapillarity of Solids](#), *Journal of Materials Science*, **48(5)**: 2092–2103 (2013).
- [28] Zargartalebi M., Barati N., Kharrat R., [Influences Ofhydrophilic and Hydrophobic Silica Nanoparticles on Anionic Surfactant Properties: Interfacial and Adsorption Behaviors](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **119**: 36– 43 (2014).
- [29] Morrow N., [Wettability and Its Effect on Oil Recovery](#), *Journal of Petroleum Technology*, **42(12)**: 1476–1484 (1990).
- [30] Ali J.A., Kolo K., Khaksar-Manshad A., Stephen K.D., [Potential Application of Low-Salinity Polymeric-Nanofluid in Carbonate Oil Reservoirs: IFT Reduction, Wettability Alteration, Rheology and Emulsification Characteristics](#), *Journal of Molecular Liquids*, **284**: 735-747 (2019).
- [31] Ali J.A., Kolo K., Khaksar-Manshad A., Mohammadi A.H., [Recent Advances in Application of Nanotechnology in Chemical Enhanced Oil Recovery: Effects of Nanoparticles on Wettability Alteration, Interfacial Tension Reduction, and Flooding](#), *Egyptian Journal of Petroleum*, **27(4)**: 1371-1383 (2018).

- [۳۲] علائی م، افضل‌ی تبار م، رشیدی ع، تعیین نانوساختار کربنی برتر برای سنتز سیلیکا نانوهیبرید برای ازدیاد برداشت از مخازن نفت، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۴۰: ۲۱۵ تا ۲۲۳ (۱۳۹۸).
- [33] Jalali A., Firozjahi A.M., Shadizadeh S.R., [Experimental Investigation on New Derived Natural Surfactant: Wettability Alteration, IFT Reduction, and Core Flooding in Oil Wet Carbonate Reservoir, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects](#), **45(2)**: 4282-4292 (2019).
- [34] Ali J.A., Kolo K., Khaksar-Manshad A., Stephen K.D., [Potential Application of Low-Salinity Polymeric-Nanofluid in Carbonate Oil Reservoirs: IFT Reduction, Wettability Alteration, Rheology and Emulsification Characteristics](#), *Journal of Molecular Liquids*, **284**: 735-747 (2019).
- [35] Ogolo N.A., Olafuyi O.A., Onyekonwu M.O., [Enhanced Oil Recovery using Nanoparticles](#), *SPE Journal*, Al-Khobar, Saudi Arabia, 8–11 April, (2012).
- [36] Al-Ansari S., Barifcani A., Wang S., Maxim L., Iglauer S., [Wettability Alteration of Oil-Wet Carbonate by Silica Nanofluid](#), *Journal of Colloid and Interface Science*, **461**: 435–442 (2016).
- [37] Roustaei A., Moghadasi J., Bagherzadeh H., Shahrabadi A., [An Experimental Investigation of Polysilicon Nanoparticles' Recovery Efficiencies through Changes in Interfacial Tension and Wettability Alteration](#), *SPE Journal*, Noordwijk, Netherlands, 12–14 June, (2012).
- [38] Yoo M.J., Park H.B., [Effect of Hydrogen Peroxide on Properties of Graphene Oxide in Hummers Method](#), *Carbon*, **141**: 515-522 (2019).
- [39] Zaaba N.I., Foo K.L., Hashim U., Tan S.J., Liu W.W., Voon C.H., [Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence](#), *Procedia Engineering*, **184**: 469-477 (2017).
- [40] Peng C., Xiong Y., Liu Z., Zhang F., Ou E., Qian J., Xiong Y., Xu W., [Bulk Functionalization of Graphene using Diazonium Compounds and Amide Reaction](#), *App. Sur. Sci.*, **280**: 914-919 (2013).
- [41] Tuteja S.K., Kukkar M., Suri C., Paul A., Deep A., [One Step in-Situ Synthesis of Amine Functionalized Graphene for Immunosensing of Cardiac Marker cTnI](#), *Biosens Bioelectron*, **66**: 129–135 (2015).
- [42] Mondragon R., Julia J.E., Barba A., Jarque J.C., [Characterization of Silica–Water Nanofluids Dispersed with an Ultrasound Probe: A Study of their Physical Properties and Stability](#), *Powder Technol.*, **224**: 138–146 (2012).
- [43] Chai H., Lin Y., Evans D. G., Li D., [Synthesis and UV Absorption Properties of 2-Naphthylamine-1,5-Disulfonic Acid Intercalated Zn-Al Layered Double Hydroxides](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**: 2855–2860 (2008).
- [44] Refat M.S., Adam A.M.A., Sharshar T., Saad H.A., Eldaroti H.H., [Utility of Positron Annihilation Lifetime Technique for the Assessment of Spectroscopic Data of Some Charge-Transfer Complexes Derived from N-\(1-Naphthyl\)Ethylendiamine Dihydrochloride](#), *Spectrochim. Acta Mol. Biomol. Spectrosc.*, **122**: 34-47 (2014).
- [45] Radnia H., Solaimany-Nazar A.R., Rashidi A.M., [Experimental Assessment of Graphene Oxide Adsorption onto Sandstone Reservoir Rocks through Response Surface Methodology](#), *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **8080**: 34-45 (2017).