



Investigating Rock and Fluid Parameters in Choosing the Most Appropriate Nanocomposites Concentration in Sandstone Reservoirs

Yaser Ahmadi *

Chemical and Petroleum Engineering Department, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 11 Jul 2022

Accepted: 4 Oct 2022

Abstract

This study investigates the effect of new nanocomposites (ZnO/SiO₂/Xanthan) for the most appropriate selection of nanocomposites concentration in sandstone porous media. This study has been done for the first time in sandstone reservoir. First, the morphology of nanocomposites was investigated using XRD, SEM tests. Then, the effect of nanocomposite on changes in wettability, surface tension, viscosity, zeta potential, pH, and density in different concentrations of nanocomposite in tank conditions was investigated. Based on the results of this study this study, the optimal concentration was selected for fluid dynamic tests. The optimum choice of fluid can reduce many problems, such as reducing oil recovery due to blocking the pores and throat of rocks. According to lowest contact angle (36°), highest zeta potential (-49.68 mV) in the presence of nanocomposites, 40 ppm was chosen as the optimum concentration.

Keyword: Sandstone, Nanocomposites, Interfacial Tension, Xanthan, Silica

* yaser.ahmadi@ilam.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Ahmadi, Y., "Investigating Rock and Fluid Parameters in Choosing the Most Appropriate Nanocomposites Concentration in Sandstone Reservoirs", Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 79, pp. 15-24, In Persian, (2022).

بررسی پارامترهای سنگ و سیال در انتخاب مناسب‌ترین غلظت نانو کامپوزیت در مخازن ماسه سنگی

ياسر احمدی *

استادیار گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام، ایلام

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

چکیده

این مطالعه اثر یک نانو کامپوزیت جدید ($ZnO/SiO_2/Xanthan$) را برای انتخاب مناسب‌ترین غلظت متناسب با محیط متخلخل ماسه سنگی مورد مطالعه قرار می‌دهد. این مطالعه برای اولین بار در شرایط مخزنی و مخازن ماسه سنگی صورت گرفته است. ابتدا مورفولوژی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از آزمایش‌های XRD و SEM مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثر نانو کامپوزیت بر تغییرات ترشوندگی، کشش سطحی، ویسکوزیته، پتانسیل زتا، pH و چگالی در غلظت‌های مختلف نانو کامپوزیت در شرایط مخزن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس اطلاعات ترشوندگی و زتا پتانسیل در این مطالعه، بهترین غلظت برای آزمایش‌های دینامیک سیال انتخاب شد. انتخاب بهترین غلظت سیال می‌تواند بسیاری از مشکلات مثل کاهش بازبایی نفت در اثر مسدود کردن فضای خالی سنگ‌ها را کاهش دهد. با توجه به کمترین زاویه تماس ($36/46^\circ$) و بالاترین مقدار مطلق زتا پتانسیل ($-49/68mV$)، ۴۰ ppm به‌عنوان بهترین غلظت برای انجام آزمایش‌های دینامیک سیال انتخاب شد.

کلمات کلیدی: ماسه سنگ، نانو کامپوزیت، کشش سطحی، زانتان، سیلیکا

* yaser.ahmadi@ilam.ac.ir

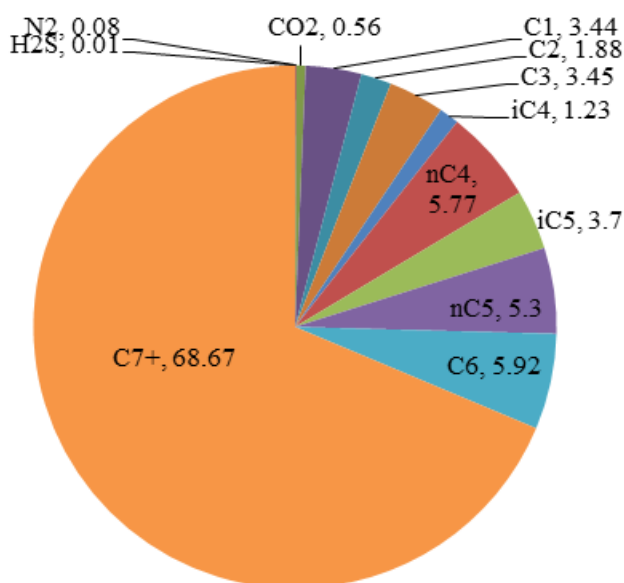
۱- مقدمه

با توجه به کاهش تولید نفت میدین، روش‌های بازیابی نفت تقویت شده شیمیایی در چندین دهه مورد استفاده قرار گرفت که شامل تکنیک‌های مختلفی مانند سیلابزنی پلیمر، سورفکتانت و قلیایی می‌شد [۱-۲]. آنها برای افزایش بازیافت نفت با تغییر پارامترهای موثر مانند کشش سطحی و تغییرات ترشوندگی استفاده شدند. دو چالش اصلی در مواد شیمیایی هزینه و حجم بالای این مواد و تلفات شیمیایی است [۳-۴]. بنابراین، روش‌های جدید بازیافت نفت پیشرفته با راندمان بالا و هزینه کم در میان محققان مختلف توسعه یافته است. به منظور دستیابی به بهترین نتایج در طول افزایش بازیابی نفت، نانوسیال‌ها به دلیل اندازه کوچک و کارایی بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. دو مکانیسم اصلی افزایش یافتن بازیافت نفت در استفاده از نانوسیال‌ها عبارتند از تغییر ترشوندگی، کشش سطحی [۶]. بخش نفت و گاز در حال حاضر توجه زیادی به نانوسیالات دارد [۷]. انرژی سطح بالای نانوساختارها عملکرد الکتریکی، رئولوژیکی، حرارتی ویژه و سطحی را فراهم می‌کند. در هنگام استفاده از نانو ذرات در یک محیط متخلخل، لایه‌ای بین آب و نفت به دلیل افزودن نانوذرات تشکیل می‌شود [۸] و این لایه میزان کشش سطحی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، سطح شوری، نوع حلال و نسبت pH در کاهش کشش سطحی و تغییرات ترشوندگی بسیار مهم هستند. علاوه بر این، تزریق آب با شوری کم به عنوان یک روش بازیابی نفت افزایش یافته سودمند در چندین برنامه تحقیقاتی و میدانی شناخته شده است [۹]. سلیمان و همکاران نشان داد که ذرات فلز غیر آهنی می‌توانند کشش سطحی را کاهش دهند [۱۰]. حائری و همکاران نشان داده‌اند که ترکیب سورفکتانت‌ها با ذرات سیلیکا پتانسیل خوبی برای تغییر ترشوندگی از حالت نفت دوست به آب دوست را دارند [۱۱]. مهاجری و همکاران با ترکیب نانوذرات زیرکونیا و سدیم دودسیل سولفات، نشان دادند که نانوسیال‌ها ترشوندگی و کشش سطحی را بهبود می‌بخشند [۱۲]. در مخازن نفتی در سرتاسر جهان، به کارگیری یک استراتژی موثر برای افزایش تولید نفت ضروری است، زیرا تعداد زیادی از مخازن که روند کاهشی تولید نفت را تجربه کرده‌اند. تحقیقات تجربی روی فرآیند تزریق آب نشان داده است که چگونه اصلاح ترکیب آب بر بازیافت نهایی نفت تأثیر می‌گذارد [۱۳-۱۴]. به طور کلی، بازیافت نفت از کربنات‌ها و ماسه سنگ را می‌توان با تغییر ساختار آب بهبود بخشید. نانو ذرات مانند سیلیکا و اکسید روی با اندازه کوچک بین ۱۰-۱۰۰ نانومتر در بین محققان مختلف برای افزایش بازیافت نفت در سناریوهای مختلف مانند سیلاب شیمیایی، پلیمری و سورفکتانت استفاده شده است [۱۵-۱۷]. دو پارامتر اصلی زیست سازگاری و سمیت کم، ذرات اکسید روی را به یک ماده صنعتی موثر تبدیل کرده‌اند [۱۸]. جدول ۱ پیشرفت‌های اخیر را برای تغییر پارامترهای موثر در مخزن مانند کاهش کشش سطحی در حضور ZnO، SiO₂، ZnO/SiO₂ و دیگر نانوذرات اصلی برای افزایش بازیافت آورده شده است. اخیراً از عصاره گیاهی برای تثبیت ذرات نانو ذرات استفاده شده است که یکی از مهمترین موارد در ازدیاد برداشت نفت است [۱۹]. همچنین مشاهده شده است که استفاده از دانه انار حاوی مواد زیست فعال و فیتوکمیکال برای تولید ذرات تثبیت کننده نانو ذرات و تغییر مکانیسم‌های مؤثر در محیط‌های متخلخل مفید بوده است [۲۰]. اگرچه، بسیاری از آزمایش‌ها در حضور ZnO/SiO₂ انجام شده، اما تاکنون تلاشی برای بدست آوردن بهترین نقطه در شرایط مخزنی و استاتیک در حضور این نانو کامپوزیت صورت نگرفته است. بر این اساس، در این مطالعه، انتخاب بهترین غلظت بر اساس آزمایش‌های استاتیکی pH، چگالی، زتا پتانسیل، کشش بین سطحی، ترشوندگی و ویسکوزیته صورت گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

یکی از مخازن ماسه سنگی ایران و نفت خام برای انجام آزمایشات استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در دمای مخزن ۶۰ درجه سانتی گراد، چگالی، API و ویسکوزیته نفت خام به ترتیب ۰/۸۴۶ سانتی متر مکعب بر گرم، ۲۸ درجه و ۹/۹ cP است. در این مطالعه درصد ترکیب نفت مورد نظر در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- درصد ترکیب نفت مورد مطالعه

همچنین نمک‌های کلرید کلسیم، کلرید سدیم، هگزا هیدرات کلرید منیزیم و کلرید پتاسیم از شرکت مرک آلمان خریداری شد.

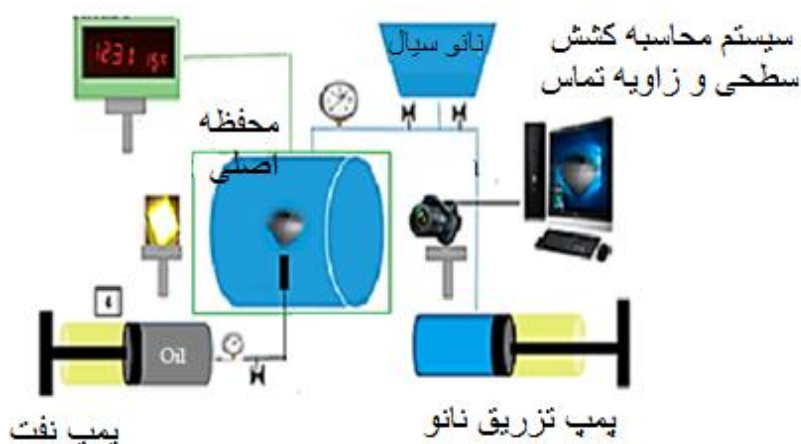
۲-۲- روش انجام آزمایش

۲-۲-۱- سنتز نانو کامپوزیت‌های ZnO-SiO₂

نانو کامپوزیت‌های SiO₂-ZnO-Xanthan و روش سنتز در مقاله علی و همکاران آورده شده است [۲۰]. دانه‌های انار در دمای محیط خشک شده و پس از آبگیری، استخراج می‌شود. سپس متاسیلیکات سدیم (۵ گرم) و کلرید روی (۲ گرم) با ۲۰۰ میلی لیتر محلول استخراج شده از مرحله قبل [دو ساعت در ۸۵۰ دور در دقیقه و ۸۰ درجه سانتی گراد] مخلوط شدند. پس از قرار دادن مخلوط در مکان تاریک و هم زدن، از کوره برای حذف ناخالصی‌ها استفاده شد [دمای تنظیم شده در ۶۰۰ درجه سانتی گراد]. در نهایت ۱۰ گرم زانتان به مدت ۲ ساعت به مخلوط به دست آمده اضافه شد و اجازه داده شد که سیستم کاملاً خشک شود. برای تهیه نانوسیال‌ها، محلول‌های آب نمک با غلظت کلرید منیزیم: ۲۸/۵۶ ppm کلرید کلسیم: ۴۰۲۸۷ ppm، کلرید پتاسیم: ۸۰۰ ppm و کلرید سدیم: ۴۰۳۱۶ ppm در محلول آب نمک در غلظت نانو ذره مد نظر استفاده و محلول‌های به دست آمده به مدت ۱ روز برای به دست آوردن محلول یکنواخت با اولتراسونیک مخلوط شدند [۲۱].

۲-۲-۲- زاویه تماس و کشش سطحی

زاویه تماس و کشش سطحی در دما و فشار مخازن، با استفاده از دستگاه مطابق شکل ۳ بدست آورده شد. دستگاه شامل دو پمپ مختلف برای نفت و آب (یا نانوسیال) و محفظه اصلی دما و فشار بالا و فشار بالا که از آب (یا نانوسیال) پر می‌شود، می‌باشد. مجموعه بعدی تنظیم فشار و دمای مخزن است که به ترتیب با پمپ آب و ژاکت گرمایش قابل مشاهده است. برای گرفتن تصویر قطرات نفت در حین تست کشش سطحی از دوربین استفاده شده که در شماتیک دستگاه آورده شده است در نهایت، پس از گرفتن تصویر قطره، کشش بین سطحی با نرم افزار موجود در سیستم اندازه گیری می‌شود. روش به دست آوردن زاویه تماس یکسان است با این تفاوت که در حین اندازه گیری زاویه تماس، ورق‌های ماسه سنگی در محفظه اصلی قرار می‌گیرند. در این مقاله از روش احمدی و همکاران برای به دست آوردن اندازه گیری IFT و زاویه تماس استفاده شد [۲۱]. هر آزمایش سه بار تکرار شد و نتایج متوسط گزارش شد.

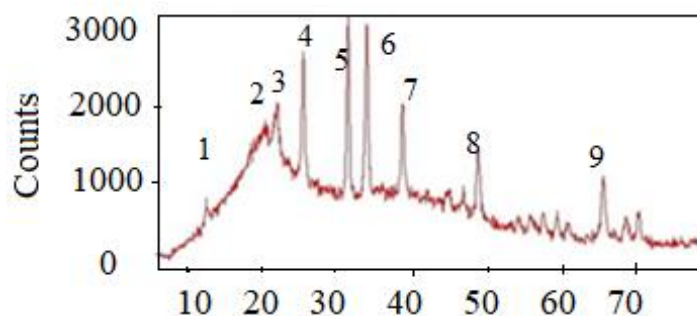


شکل ۳- دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس

۳- نتایج و بحث

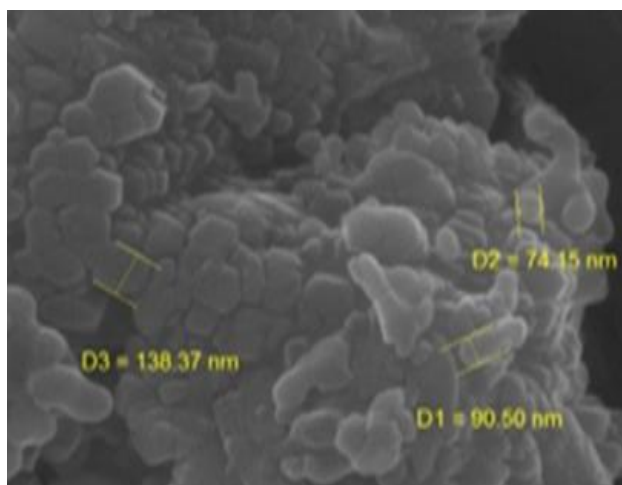
۳-۱- نانو کامپوزیت‌ها، خصوصیات، مورفولوژی سطح و ترکیب شیمیایی

یکی از ابزارهای اصلی برای تشخیص تغییرات در بخش‌های ساختاری نانوذرات، الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) است. الگوهای نانو کامپوزیت XRD از ۵ درجه تا ۸۰ درجه در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، انعکاس بین ۲۳ درجه و ۴۰ درجه (قله‌های ۲ الی ۷) نشان دهنده صفحات اکسید روی و سیلیس است [۲۲]. هیچ قله دیگری به جز سیلیس و اکسید روی مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد نانو کامپوزیت‌ها دارای خلوص بالایی هستند.



شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) در حضور نانو کامپوزیت سنتز شده

شکل ۵ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و قطرهای مختلف D1، D2 و D3 را برای نانو کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، سه قطر ۹۰/۵۰ نانومتر، ۷۴/۱۵ نانومتر و ۱۳۸/۳۷ نانومتر برای نانو کامپوزیت‌ها مشاهده شد.



شکل ۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در حضور نانو کامپوزیت سنتز شده

۲-۳- مشخصات نانوسیال

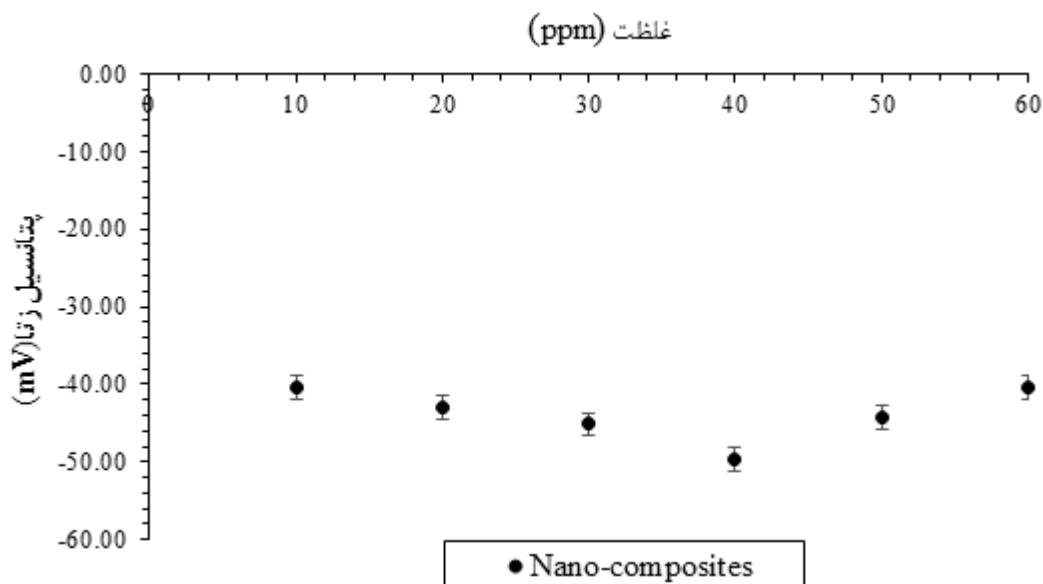
کشش سطحی، زاویه تماس، چگالی، pH، تست پایداری و ویسکوزیته در غلظت‌های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm برای نانو کامپوزیت‌ها انجام شد. نتایج تست‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- خواص نانوسیال تهیه شده در غلظت‌های مختلف نانو کامپوزیت

غلظت نانو کامپوزیت (ppm)	کشش سطحی (mN m ⁻¹)	pH (-)	دانسیته (g/cc)	رسانایی الکتریکی (μs/cm)	ویسکوزیته (cP)	تست پایداری (mV)	زاویه تماس (°)
۱۰	۲۰/۹۵	۷/۵۰	۰/۹۹۹۲	۱۲۰/۰۰	۱/۹۱	-۴۰/۴۴	۱۳۹/۰۴
۲۰	۱۸/۵۸	۷/۳۶	۰/۹۹۹۳	۱۵۰/۰۰	۱/۹۴	-۴۲/۹۱	۸۶/۰۵
۳۰	۱۶/۴۸	۷/۰۳	۰/۹۹۹۵	۲۰۲/۰۰	۱/۹۷	-۴۵/۱۵	۷۶/۰۵
۴۰	۱۱/۹۱	۶/۹۶	۰/۹۹۹۶	۲۶۰/۰۰	۱/۹۸	-۴۹/۶۸	۳۶/۴۶
۵۰	۸/۱۹	۶/۲۱	۰/۹۹۹۷	۲۶۵/۰۰	۲/۰۰	-۴۴/۲۴	۴۵/۶۸
۶۰	۶/۴۸	۵/۹۵	۰/۹۹۹۹	۲۷۰/۰۰	۲/۰۲	-۴۰/۴۴	۴۹/۲۹

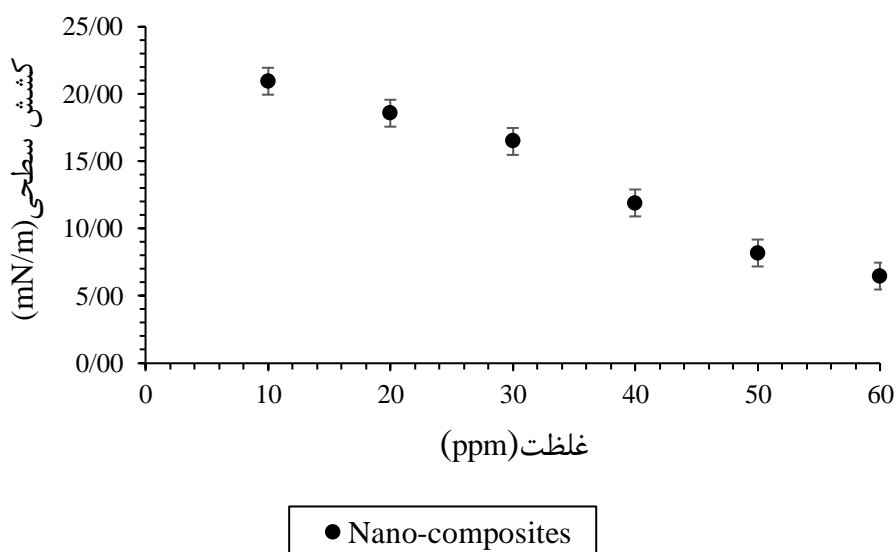
چگالی، pH نانوسیال در حضور نانو کامپوزیت‌ها در محدوده ۰/۹۹۹۲-۰/۹۹۹۹ g/cc، ۵/۷-۹۵/۵۰ است. با افزایش غلظت نانو کامپوزیت‌ها از ۱۰ به ۶۰ ppm چگالی نانو کامپوزیت‌ها از ۰/۹۹۹۲ به ۰/۹۹۹۹ افزایش می‌یابد. که این مسئله را می‌توان در ارتباط با ویسکوزیته و میزان لزجت سیال دانست. به عبارت دیگر، در این رابطه، ویسکوزیته نانوسیالات در غلظت‌های مختلف (۱۰-۶۰) ppm از ۱/۹۱ تا ۲/۰۲ cP متغیر است. تست‌های زتا پتانسیل برای بررسی پایداری به عنوان یک تکنیک ساده و قابل اجرا می‌باشد. شکل ۶، میزان زتا پتانسیل را در غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm در حضور نانو کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، نانو کامپوزیت‌ها زتا پتانسیل بالاتری

در ۴۰ ppm داشتند که دارای بالاترین مقدار پتانسیل زتا با $-49/68 \text{ mV}$ است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، داده‌های پتانسیل زتا، پایداری بالای نانوسیال‌ها را ثابت می‌کند.

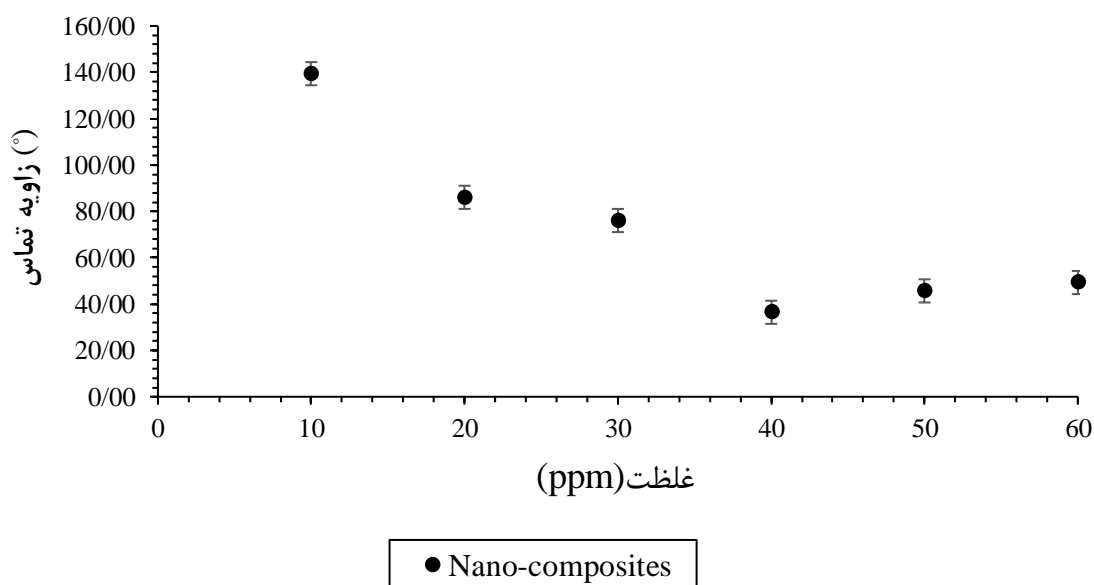


شکل ۶- زتا پتانسیل در غلظت‌های مختلف نانو کامپوزیت

شکل ۷ و ۸ اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس را در حضور نانو کامپوزیت‌ها نشان می‌دهند. اثرات کشش سطحی بر نیروهای مویبندی در مخزن، آن را به یکی از پارامترهای کلیدی در ازدیاد برداشت تبدیل کرده است. مقادیر کشش سطحی نانوسیال‌ها با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm از نانو کامپوزیت‌ها تهیه شد و کشش سطحی این مقادیر mN m^{-1} (۲۰/۹۵، ۱۸/۵۸، ۱۶/۴۸، ۱۱/۹۱، ۸/۱۹ و ۶/۴۸) اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، یکی دیگر از عوامل مهم در محیط متخلخل، ترشوندگی است. ترشوندگی، نقش مهمی در جابجایی نفت و مکانیسم‌های مربوطه با استفاده از سیلابزنی نانوسیال ایفا می‌کند و ترشوندگی سنگ در حضور نانوذرات از حالت نفت دوست به آب دوست تغییر می‌کند. در هنگام جذب در سطح سنگ، لایه‌ای از نانوسیال بر روی سطح سنگ تشکیل می‌شود. اثرات نانوسیال بر سطح مشترک سیال / سیال و سیال / سنگ نیاز به توجه بیشتری دارد تا ثابت شود. لایه تشکیل شده بر روی سطح سنگ به عوامل مختلفی از جمله غلظت، اندازه نانوذرات، ویژگی‌های سنگ و برهمکنش بین ذرات نانو و سنگ بستگی دارد به طوری که سطح سنگ می‌تواند از حالت نفت دوست به آب دوست تبدیل شود. به منظور بررسی تغییر ترشوندگی، مقاطع نازکی به دست آمد و سپس روی سلول اصلی در غلظت‌های مختلف نانو کامپوزیت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm قرار گرفت. همچنین برای اندازه‌گیری ترشوندگی از روش قطره آویز استفاده شد. بر اساس زاویه تماس و عدد زتا پتانسیل در حضور نانوذرات، نانو کامپوزیت ۴۰ ppm به عنوان غلظت بهینه برای انجام آزمایش‌های سیلاب زنی و دینامیک انتخاب شد.



شکل ۷- کشش بین سطحی در غلظت‌های مختلف نانو کامپوزیت



شکل ۸- میزان ترشوندگی در غلظت‌های مختلف نانو ذرات

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، نانو کامپوزیت‌های ZnO-SiO₂ با پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخص شدند. در مطالعه حاضر، آزمون‌های کشش سطحی مختلف، زاویه تماس، ویسکوزیته و پتانسیل زنا در حضور نانو کامپوزیت‌ها در غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ppm انجام گردید. بر اساس نتایج ۴۰ ppm به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد. از این رو این غلظت به عنوان یک غلظت ایده آل برای آزمایش دینامیک با کمک نانو کامپوزیت‌ها انتخاب شد. در ۴۰ ppm، مقادیر بار سطحی ۴۹/۶۸ mV- به دست آمده که پایداری نانوسیال‌ها را ثابت می‌کند. کشش سطحی در این نقطه کاهش قابل قبولی دارد و میزان پتانسیل زتا در وضعیت پایداری نسبی به غلظت‌های دیگر قرار داشت. از این نظر، ویسکوزیته (μ) و زاویه تماس در بین سایر غلظت‌ها کمترین میزان را داشتند.

فهرست علائم

سنٹی پویز، واحد ویسکوزیته	cP
کشش بین سطحی mN/m	IFT
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
الگوی پراش ایکس	XRD

۵- منابع

- [1] Ahmadi, Y., Mohammadi, M., Sedighi, M. Chapter 1- Introduction to chemical enhanced oil recovery, In Enhanced Oil Recovery Series, Chemical Methods, Gulf Professional Publishing., pp. 1-32, 2018.
- [2] Ahmadi, Y., "Relationship between Asphaltene Adsorption on the Surface of Nanoparticles and Asphaltene Precipitation Inhibition during Real Crude Oil Natural Depletion Tests", *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology* Vol. 10, No. 3, pp. 69-82, 2021.
- [3] E. Jafarbeigi, E., Y. Ahmadi, M. Mansouri, S. Ayatollahi, "An experimental core flooding investigation of new ZnO-Al₂O₃ Nanocomposites for enhanced oil recovery in carbonate reservoir" *ACS omega*, vol. 43, pp. 39107–39121, 2022.
- [4] M. Mansouri, Y. Ahmadi, E. Jafarbeigi, "Introducing a new method of using nanocomposites for preventing asphaltene aggregation during real static and dynamic natural depletion tests", *Energy Sources, Part A*, vol. 44, pp. 7499–7513, 2022.
- [5] Ahmadi, Y., Malekpour, M., Kikhavani, T., Bayati, "The study of the spontaneous oil imbibition in the presence of new polymer-coated nanocomposites compatible with reservoir conditions", *Petroleum Science and Technology*, 2022.
- [6] Y. Ahmadi, "Improving Fluid Flow through Low Permeability Reservoir in the presence of Nanoparticles: An Experimental Core flooding WAG tests", *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, vol. 1, pp. 1-15, 2022.
- [7] Y. Ahmadi, M. Mansouri, "An experimental investigation of using Ni-doped ZnO–ZrO₂ nanoparticles as a new asphaltene deposition inhibitor in ultra low carbonate porous media", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 4, pp. 9429-9447, 2022.
- [8] Ahmadi, Y., Mansouri, M., Jafabeigi, E., "Improving Simultaneous Water Alternative Associate Gas Tests in the Presence of Newly Synthesized γ -Al₂O₃/ZnO/Urea Nano-Composites, An Experimental Core Flooding Tests", *ACS omega*, Vol. 8, No. 1, pp. 1443–1452, 2023.
- [9] M. Golmohammadi, S. Mohammadi, H. Mahani, S. Ayatollahi, "The non-linear effect of oil polarity on the efficiency of low salinity waterflooding: A pore-level investigation", *Journal of Molecular Liquids*, vol. 346, 117069, 2022.
- [10] B. A. Suleimanov, F.S. Ismailov, E.F. Veliyev, "Nanofluid for Enhanced Oil Recovery", *J. Pet. Sci. En*, vol, 78, pp. 431–437, 2021.
- [11] F. Haeri, D.N. Rao, "Precise Wettability Characterization of Carbonate Rocks to Evaluate Oil Recovery Using Surfactant-Based Nanofluids", *Energy Fuels*, vol. 33, pp. 8289–8301, 2019.
- [12] M. Mohajeri, M. Hemmati, A.S. Shekarabi, "An experimental study on using a nanosurfactant in an EOR process of heavy oil in a fractured micromodel", *J. Pet. Sci. Eng*, vol. 126, pp. 162–173, 2015.
- [13] Y. Ahmadi, S.E. Eshraghi, P. Bahrami, et al., "Comprehensive Water–Alternating-Gas (WAG) injection study to evaluate the most effective method based on heavy oil recovery and asphaltene precipitation tests", *J. Pet. Sci. Eng*, vol. 133, pp. 123-129, 2015.
- [14] Y. Ahmadi, R. Kharrat, A.Hashemi, P. Bahrami, S. Mahdavi, "The effect of temperature and pressure on the reversibility of asphaltene precipitation", *Petroleum science and technology*, vol. 18, pp. 2263-2273, 2014.

- [15] Y. Ahmadi, M. Hassanbeygi, R. Kharrat, "The Effect of Temperature and Injection Rate during Water Flooding Using Carbonate Core Samples: An Experimental Approach", *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, vol. 5, pp. 18-24, 2016.
- [16] Y. Ahmadi, B. Aminshahidy, "Improving water-oil relative permeability parameters using new synthesized calcium oxide and commercial silica nanofluids", *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, vol. 8, pp. 58-72, 2019.
- [17] Y. Ahmadi, "Improving Fluid Flow through Low Permeability Reservoir in the presence of Nanoparticles: An Experimental Core flooding WAG tests", *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 2021.
- [18] P.K., Vabbina, R, Sinha, A. Ahmadvand, et al., "Sonochemical synthesis of a zinc oxide core-shell nanorod radial p-n homojunction ultraviolet photodetector", *ACS applied materials & interfaces*, vol. 23, pp. 19791-19799, 2017.
- [19] S.M., Sajadi, K. Kolo, M. Pirouei, S.A., Mahmud, et al., "Natural iron ore as a novel substrate for the biosynthesis of bioactive-stable ZnO@ CuO@ iron ore NCs: a magnetically recyclable and reusable superior nanocatalyst for the degradation of organic dyes, reduction of Cr (vi) and adsorption of crude oil aromatic compounds, including PAHs", *RSC advances*, vol. 8, pp. 35557-35570, 2018.
- [20] J.A., Ali, K, Kolo, S.M., Sajadi, A.K, Khaksar Manshad, et al., "Modification of LoSal water performance in reducing interfacial tension using green ZnO/SiO₂ nanocomposite coated by xanthan", *Applied Nanoscience*, vol. 9, pp. 397-409, 2019.
- [21] Y. Ahmadi, M. Mansouri, M., "Using New Synthesis Zirconia-Based NCs for Improving Water Alternative Associated Gas Tests Considering Interfacial Tension and Contact Angle Measurements", *Energy Fuels*, vol. 35, pp. 16724-16734, 2021.
- [22] F.O, Asl, G. Zargar, A. Khaksar Manshad, M. Arif, S. Iglauer, A. Keshavarz, "Impact of PAM-ZnO nanocomposite on oil recovery", *Micro & Nano Letters*, vol. 14, pp. 638-641, 2022.