

مطالعه آزمایشگاهی اثر نانوذرات سیلیکونی بر روی ترشوندگی محیط متخلخل

صابر محمدی^{۱*}، مسعود اخوان شریف^۲، فربرز رشیدی^۲

۱- تهران، پژوهشگاه صنعت نفت

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: mohammadisab@ripi.ir

چکیده

افزایش قیمت جهانی نفت خام و نیاز روز افزون کشورهای جهان به این انرژی، مهندسين مخزن را واداشته تا با طراحی شیوه مناسب با کمترین هزینه ممکن، بیشترین تولید را از مخازن نفتی داشته باشند. استفاده صحیح از منابع نفتی کشور، به منظور افزایش طول عمر آنها و برخورداری نسل‌های آینده از این ذخایر خدادادی، ایجاب می‌کند تا با اتخاذ روش‌هایی مناسب برای حفظ و صیانت مخازن نفت تلاش شود. بررسی بیشتر مخازن و شناسایی عوامل مؤثر و همچنین پیدایش فناوری‌های نوین، روش‌های مناسبی را برای پژوهش بیشتر محققان در زمینه‌های گوناگون از دیاد برداشت فراهم کرده است. در این راستا پیدایش فناوری نانو نقش مهمی را در جهت بهبود روش‌های از دیاد برداشت داشته است. نانوذرات با تأثیر بر روی ترشوندگی که یکی از عوامل تأثیرگذار بر توزیع سیالات در محیط متخلخل و نیز میزان بازیافت نفت می‌باشد، نقش به‌سزایی در بهبود تولید و بهره‌وری از مخازن ایفا می‌کنند. با این وجود استفاده از ذرات نانو به عنوان عاملی در جهت تغییر ترشوندگی محیط متخلخل و در راستای از دیاد برداشت از مخازن زیرزمینی یکی از مباحث مورد مطالعه روز دنیاست. در این پژوهش، به صورت آزمایشگاهی به مطالعه پتانسیل نانوذرات پلی‌سیلیکونی و بررسی عوامل مختلفی مانند زمان، دما و غلظت نانوذرات در جهت تغییر ترشوندگی سنگ مخزن پرداخته شده است. بدین منظور، زاویه تماس قطرات نفت در محیط نفت / آب / سنگ به عنوان شاخصی برای تعیین تغییر ترشوندگی سنگ مخزن اندازه‌گیری شده است. با مقایسه نتایج زاویه تماس دیده می‌شود سنگ‌های اشباع شده از آب و نفت با ترشوندگی نفت‌دوست پس از قرار گرفتن در نانو سیال‌های سیلیکونی به سمت ترشوندگی آب‌دوست تغییر می‌کنند. همچنین با افزایش دما و افزایش غلظت، تغییر ترشوندگی در مدت کمتری صورت می‌پذیرد. در پایان با استفاده از دستگاه میکرومدل و الگوهای شیشه‌ای یک- چهارم پنج- نقطه‌ای و انجام آزمون‌های سیلاب‌زنی به بررسی اثر نانوذرات سیلیکونی بر روی عملکرد جاروبی فرایند سیلاب‌زنی آبی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: ترشوندگی، زاویه تماس، سنگ مخزن، نانوذرات پلی‌سیلیکونی، از دیاد برداشت نفت، آزمایشگاهی

۱- مقدمه

مصرف انرژی ۵۰٪ افزایش یابد. اگرچه در سالیان اخیر استفاده از

انرژی‌های جایگزین روبه رشد بوده است اما این رشد در مقابل

تقاضای فزاینده انرژی ناچیز بوده و نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای

تقاضای جهانی برای انرژی در دهه‌های اخیر به شدت در حال

افزایش بوده است به صورتی که انتظار می‌رود در ۲۰ سال آینده

جلوگیری از حرکت قطرات نفت می‌شوند. برای جریان آب یا گاز در اغلب مواقع جریان پیشرونده^۳، یک کانال به سمت چاه تولیدی ایجاد می‌کند و با کنار زدن^۴ نفت اثر ناچیزی در برداشت نفت خواهد داشت. فرایندهای ازدیاد برداشت شیمیایی مانند جریان بسپاری یا تزریق آلكالین و جریان سورفکتانت یا ترکیبشان با یکدیگر به دلیل هزینه زیاد تزریق، پتانسیل خوردگی و اتلاف تزریق شونده به صورت محدود استفاده می‌شوند.

نانوذرات یک راه مناسب برای کنترل برداشت نفت ارائه می‌دهند که با راه‌های گذشته و کنونی متفاوت می‌باشد. این مواد با تغییر کشش سطحی و خواص رئولوژیکی سیال باعث تغییر خواص سیالات مخزن شده و سبب افزایش برداشت نفت از مخزن می‌شوند. گر انرژی سیالات تزریقی (آب، دی‌کسیدکربن و محلول‌های سورفکتانت) از گر انرژی نفت کمتر است، که با استفاده از نانوذرات، گر انرژی سیال تزریقی به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند که باعث بهبود خاصیت جابجایی و در نتیجه ضریب برداشت نهایی می‌شود [۳].

مقالات زیادی در زمینه تهیه نانو ذرات وجود دارد [۴و۵]. نانوذرات در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، خواص فیزیکی متفاوتی داشته و از طرق مختلف تهیه می‌شوند. این مواد از آنجایی که می‌توانند رابطی بین مواد حجیم و ساختار اتمی یا مولکولی باشند مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. وقتی ذرات به ابعاد نانو در می‌آیند خواص مختلف آنها مانند خواص مغناطیسی، مقاومت حرارتی، فعالیت شیمیایی و نقطه ذوب با حالت عادی آن مواد متفاوت خواهد بود. زمانی که سایز ذرات کاهش می‌یابد، سطح تماس آنها افزایش یافته به گونه‌ای که نسبت سطح به حجم نانوذرات بیشتر از ۱۰۰۰ برابر میکرو ذرات می‌باشد [۶].

روش‌های نوین زیادی برای افزایش برداشت نفت مورد استفاده قرار گرفته است [۷و۸]. تحقق این روش‌ها به عوامل زیادی مانند چگونگی حرکت سیال در محیط متخلخل و خواص محیط متخلخل در ابعاد میکروسکوپی و ماکروسکوپی بستگی دارد. در میان فاکتورهای مختلفی که بر روی توزیع جریان و برداشت نفت در محیط متخلخل تأثیر می‌گذارند، ترشوندگی محیط متخلخل نقش به‌سزایی دارد [۹و۱۰]. در تعدادی از پژوهش‌ها تأثیر ترشوندگی بر روی توزیع جریان در محیط متخلخل و مکانیزم میکروسکوپی

سوختهای هیدروکربنی در آینده به حساب آید. در نتیجه افزایش بی‌رویه مصرف انرژی در دهه‌های آینده تحولی عظیم در صنعت نفت و گاز را خواهان است. با توجه به ساختار و خصوصیات نانوذرات و موادی که از نانو ساختارها شکل می‌گیرند، تکنولوژی نانو می‌تواند نقش مؤثری را در جهت این تحول عظیم مورد نیاز در صنعت نفت و گاز ایفا کند [۱]. در یکی از مقالاتی که اخیراً انتشار یافته، بیان شده است که استفاده از تکنولوژی نانو قابلیت افزایش ۱۰٪ متوسط ضریب برداشت نفت و گاز را داراست. به دلیل مطالعات گسترده در صنعت نفت و گاز، در آینده نزدیک پیشرفت سریعی در استفاده از نانو تکنولوژی در این صنعت قابل انتظار است [۲].

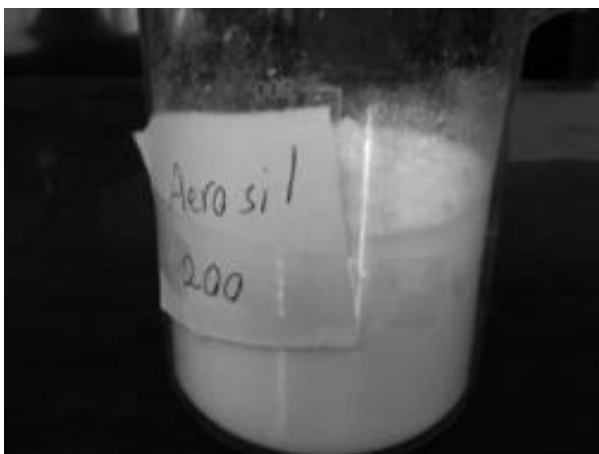
صنعت نفت و گاز و به صورت کلی انرژی در آینده با مشکلات متعددی از حوزه بالادستی تا پایین‌دستی مانند مواد، تکنیک‌ها و محیط زیست مواجه خواهد شد، که این مشکلات مهندسین را مجبور به یافتن راه‌حل‌های جدید می‌کند. از این رو فناوری‌های میکرو و نانو به دلیل پتانسیل بالا در ایجاد راه‌حل‌های مناسب برای رفع این مشکلات بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

رشد سریع تقاضای نفت و گاز تنها از دو راه قابل عرضه می‌باشد: ۱- پیدا کردن مخازن هیدروکربوری جدید ۲- استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت در مخازن زیرزمینی. اهمیت بهبود تولید به وسیله روش‌های ازدیاد برداشت قابل درک است زیرا در خیلی از مخازن موجود، در حدود دو سوم نفت در جای^۱ مخزن را نمی‌توان با روش‌های اولیه برداشت کرد. سه دسته از روش‌های ازدیاد برداشت تا به حال مؤثر واقع شده‌اند: ۱- روش‌های حرارتی؛ که شامل استفاده از حرارت مانند تزریق بخار که سبب کاهش گر انرژی شده و در نتیجه حرکت سیال در مخزن راحت‌تر صورت می‌گیرد. ۲- تزریق گاز؛ با استفاده از گازهایی مانند گاز طبیعی، نیتروژن یا دی‌اکسیدکربن که با گسترده شدن در مخزن سبب جابجایی نفت باقی‌مانده^۲ به سمت چاه‌های تولیدی می‌شوند، یا گازهای دیگری که در نفت حل شده که باعث کاهش گر انرژی و در نتیجه بهبود توانایی حرکتی آن می‌شوند. ۳- تزریق مواد شیمیایی، که شامل استفاده از مولکول‌هایی با زنجیره بلند به نام بسپارها می‌باشند که سبب افزایش تأثیر سیلاب‌زنی می‌شوند و یا استفاده از موادی به نام سورفکتانت که کاهش کشش سطحی را در پی داشته و اغلب سبب

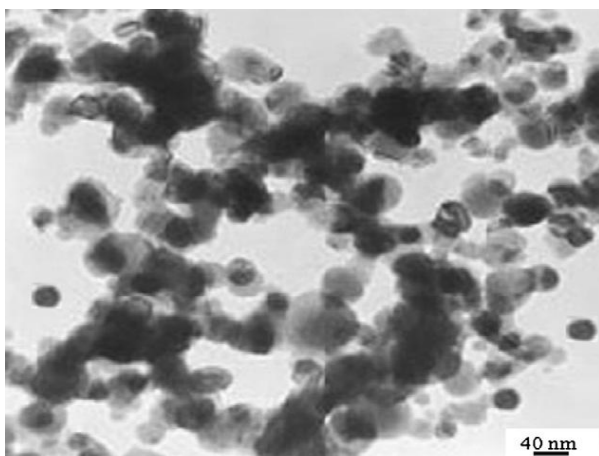
3. Displacement Front
4. Bypassing

1. Oil in Place
2. Residual Oil

عبوری^۴ گرفته شده از نانو سیال را نشان می‌دهد که بیانگر پخش مناسب ذرات نانو و ابعاد آنها در محلول می‌باشد.



شکل ۱- نانوذرات سیلیکونی آبدوست



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) گرفته شده از نانو سیال

این نانوذرات به علت خاصیت آبدوستی به خوبی در آب پخش می‌شوند. همچنین می‌توان با استفاده از دستگاه فراصوت^۵ نانوسیالات پایدار از این مواد تهیه کرد. در این کار از پخش کردن این نانوذرات در آب و استفاده از دستگاه فراصوت، نانوسیالاتی با درصدهای وزنی ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱۰، و ۰/۵۰ تهیه گردید که در شکل (۳) تصاویری از این محلول‌ها نمایش داده شده است. جهت تهیه امولسیون پایدار از نانوذرات در آب (سیال پایه) از دستگاه فرا

جریان سیال در ابعاد حفره گزارش شده است [۱۴-۱۱]؛ با این وجود اثر نانوذرات بر روی ترشوندگی سنگ مخزن به طور کامل و جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. جو و همکارانش [۱۵ و ۱۶] گزارش دادند نانو ذرات پلی‌سیلیکونی آبدوست می‌توانند خاصیت ترشوندگی مخزن را تغییر دهند، به طوری که مخزن نفت دوست می‌تواند با جذب نانوذره پلی‌سیلیکونی آبدوست به گونه‌ای تغییر کند که تراوایی نفت افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش بازدهی جابجایی و بهبود برداشت نفت شود. همچنین اونیکنو و اوگولو [۱۷] تغییر ترشوندگی سنگ‌های مخزن را با نانوذرات پلی‌سیلیکونی گزارش کردند. آنها در آزمایش‌های خود مشاهده کردند نانوذرات پلی‌سیلیکونی نفت دوست و خنثی از لحاظ ترشوندگی، برای افزایش برداشت در مخازنی که سنگ‌های آنها آبدوست هستند مؤثرند و نانوذرات پلی‌سیلیکونی آبدوست برای مخازنی که سنگ‌های آنها نفت دوست هستند مناسب می‌باشند. با این تفاسیر صنعت نفت و گاز می‌تواند از نانوذرات به دلیل برخورداری از خواص ویژه به صورتی مطلوب بهره‌مند شود.

در این پژوهش، به صورت آزمایشگاهی به مطالعه پتانسیل نانوذرات پلی‌سیلیکونی و بررسی عوامل مختلفی مانند زمان، دما و غلظت نانوذرات در جهت تغییر ترشوندگی سنگ مخزن که موجب تغییر تراوایی و در نهایت تأثیر پذیری میزان تولید می‌شود، پرداخته شده است. در پایان تعدادی آزمایش سیلاب‌زنی توسط دستگاه آزمایشگاهی میکرومدل و با استفاده از الگوی شیشه‌ای یک-چهارم پنج-نقطه‌ای^۱ در غلظت‌های متفاوت از نانوذرات برای بررسی تأثیر این ذرات بر روی بازیافت نفت و تعیین غلظت بهینه انجام گرفته است.

۲- روش کار

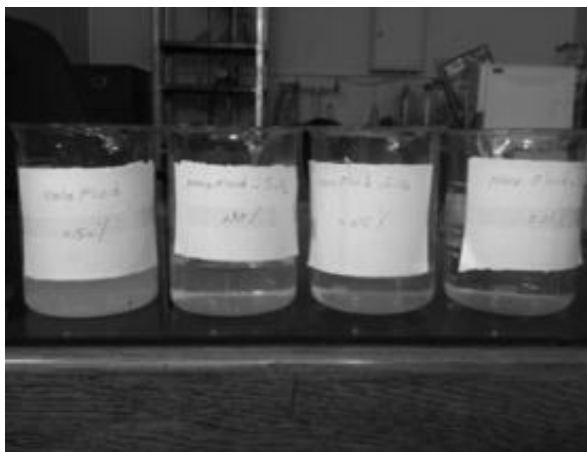
در این پژوهش از نانو ذرات سیلیکونی آبدوست در ابعاد ۱۴ نانومتر ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) با نام تجاری اروسیل^۲ ساخت شرکت دگوسا^۳ آلمان استفاده شده است. این نانوذرات به صورت پودری سفید رنگ و بدون بو با چگالی 0.48 g/cm^3 می‌باشند که در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی

4. Transmission Electron Microscope (TEM)
5. Ultrasonic Probe

1. One-quarter Five-spot Glass Micromodel
2. Aerosil
3. Degussa

آزمایش‌ها در دما و فشار محیط و همچنین در دمای ۸۰ درجه سلسیوس با استفاده از کوره حرارتی و فشار محیط انجام شده است. در این پژوهش از نفت استخراج شده از یکی از مخازن جنوب غربی ایران با چگالی $0.8865 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ استفاده شده است. سنگ مورد استفاده در آزمایش‌ها، رخنمون سنگ کربناته حوزه آسماری-چهرم می‌باشد. مغزه‌ها به قطر $3/8$ سانتی‌متر و طول $10/5$ سانتی‌متر پس از اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی برای انجام آزمون‌های زاویه تماس به وسیله دستگاه Trimming Saw به برش‌هایی به ضخامت ۵ میلی‌متر در آمدند (شکل (۴)). تراوایی سنگ‌ها در محدوده $4-7 \text{ mD}$ و میزان تخلخل سنگ‌ها در حدود $8-4\%$ می‌باشد. برای شبیه‌سازی بهتر شرایط مخزن، این برش‌ها در آب نمکی مشابه با آب نمک مخزن به مدت ۱۵ روز قرار داده شدند. سپس آنها را به مدت ۴۰ روز درون نفت نگه داشته به گونه‌ای که از نفت اشباع شده و سپس زاویه تماس نفت با سنگ‌ها اندازه‌گیری شد. بدین منظور از میکروسکوپ دیجیتالی Dino Capture، با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر جهت ثبت تصاویر استفاده شد. در مرحله بعد، هر کدام از برش‌ها را در سوسپانسیون‌هایی با غلظت‌های مختلف در محیط و در کوره حرارتی قرار داده و زاویه تماس نفت با سنگ در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. قطره نفت خام با استفاده از سوزن سرکج بر سطح سنگ گذاشته می‌شود و با استفاده از میکروسکوپ از قطره نفت که بر سطح زیری سنگ قرار دارد، عکس‌برداری می‌شود (شکل (۵)).

صوت مدل UP200S ساخت شرکت Hielscher آلمان استفاده شد. در این تحقیق هر نمونه به مدت ۶۰-۴۵ دقیقه در دامنه 100% و دوره زمانی $0/8$ زیر دستگاه قرار گرفت. در جدول (۱) برخی از خصوصیات سیالات بکار برده شده در آزمایش‌ها آورده شده است. برای محاسبه چگالی از دستگاه چگالی سنج مدل DMA4500 ساخت شرکت Anton Paar اتریش استفاده شده است. باید توجه داشت که در این تحقیق سیال پایه جهت تهیه محلول نانو آب خالص بوده است. به همین جهت امکان بررسی اثر نمک بر پایداری سیال نانو در این مطالعه میسر نبوده است. طبق منابع مطالعاتی موجود حضور نمک در سیال پایه سبب کاهش پایداری محلول نانو و رسوب آنها در محلول می‌شود. این مسئله را می‌توان در مطالعات آینده بررسی کرد.

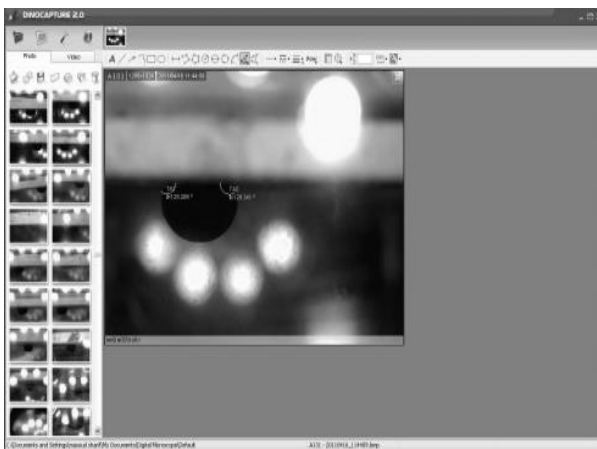


شکل ۳- نانو سیالات تهیه شده با درصد‌های وزنی مختلف

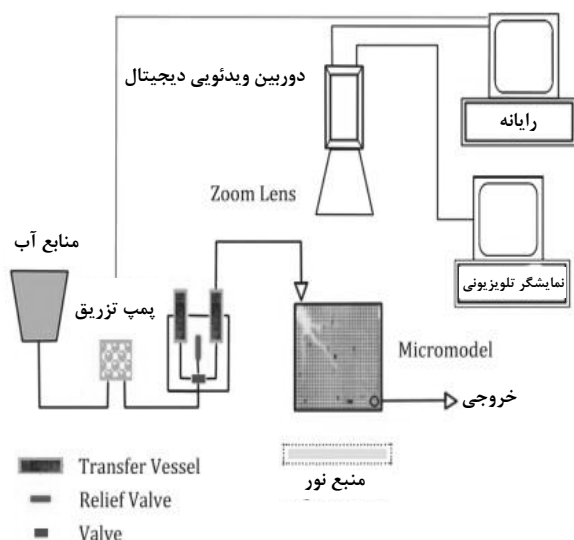
جدول ۱- خواص سیالات به کار برده شده در آزمایش‌ها.

آب نمک	نانو سیال سیلیکونی ۰/۵۰ درصد	نانو سیال سیلیکونی ۰/۱۰ درصد	نانو سیال سیلیکونی ۰/۰۵ درصد	نانو سیال سیلیکونی ۰/۰۱ درصد	نوع سیال
۱/۰۶۶۵	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۵۸	چگالی (g/cm^3)
۹۸/۰	۵/۰	۱/۰	۰/۵	۰/۱	غلظت (g/lit)

تحت دبی تزریقی ثابت انجام شده‌اند. از مهمترین تجهیزات مورد استفاده در این سیستم آزمایشگاهی می‌توان به پمپ تزریق، لوله‌های رابط جریان، سیستم کنترل دما و فشار و سیستم عکس‌برداری با کیفیت و دقت بالا اشاره کرد. در شکل (۸) شماتیکی از الگوی شیشه‌ای استفاده شده در آزمون تزریق نشان داده شده است. الگوی شیشه‌ای فوق با استفاده از روش لیزر ساخته شده است [۱۸]. در جدول (۲) مشخصات الگوی استفاده شده در آزمایش‌های سیلاب‌زنی آورده شده است.



شکل ۶- سیستم نرم افزار Dino Capture جهت اندازه‌گیری زاویه تماس



شکل ۷- طرح اجمالی سیستم آزمایشگاهی میکرومدل به همراه سیستم تحلیل



شکل ۴- برش‌های مغزه مورد استفاده در آزمایش‌ها

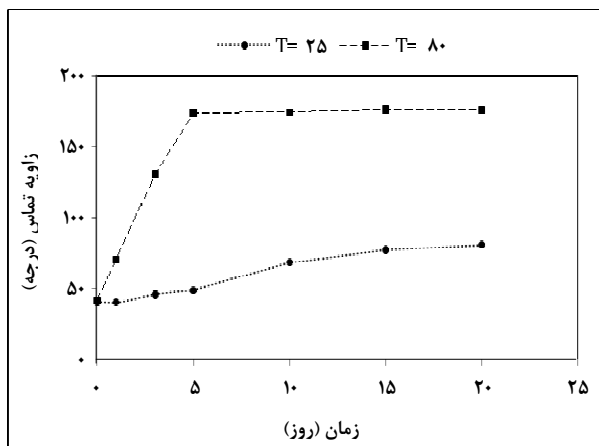
در فواصل زمانی مختلف از شکل قطره نفت عکس‌برداری شده تا تغییر شکل قطره ثبت شود. با استفاده از نرم‌افزار میکروسکوپ (شکل ۶)) زاویه تماس قطره نفت و سنگ تعیین می‌شود. زاویه تماس نهایی، میانگین اندازه زاویه‌های تماس محاسبه شده در دو سوی قطره می‌باشد. زاویه تماس در فاز آبی در تمام آزمایش‌ها گزارش شده است. در پایان تعدادی از تست‌ها جهت بررسی صحت داده‌های آزمایشگاهی و تکرارپذیری آنها مجدداً انجام شدند.



شکل ۵- نحوه عکس‌برداری از قطره نفت

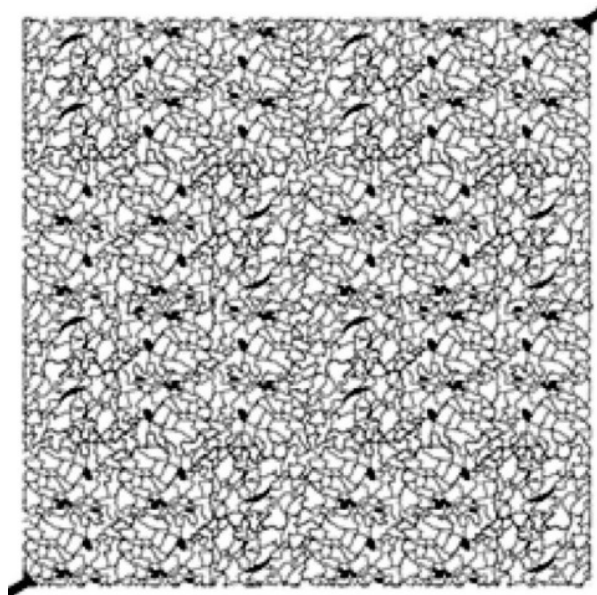
برای انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی از یک سیستم میکرومدل شیشه‌ای کم‌فشار استفاده شده است. شماتیکی از این سیستم در شکل (۷) نشان داده شده است. آزمایش‌ها در دما و فشار محیط و

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود سنگ‌ها در شرایط دمایی ۸۰ درجه سلسیوس به سرعت نفت‌دوست شدند، به گونه‌ای که بعد از گذشت ۵ روز سنگ‌ها کاملاً نفت‌دوست بوده و زاویه تماس قطره نفت با سنگ کمتر از ۱۰ درجه شد و در نتیجه زاویه تماس پس رونده^۱ آب نسبت به سنگ بیشتر از ۱۷۰ درجه می‌باشد. اما در شرایط دمایی محیط، زاویه تماس پس‌رونده قطره آب با سنگ پس از گذشت ۲۰ روز در حدود ۸۰ درجه شد که نشان دهنده ترشوندگی خنثای سنگ می‌اشد.



شکل ۹- تغییرات زاویه تماس بر حسب زمان روی سنگ در مجاورت نفت در دمای ۲۵ و ۸۰ درجه سلسیوس.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۲ از باریکه‌های مغزه قبل و بعد از قرار گرفتن در نانوسیال سیلیکونی ۰/۱۰ درصد وزنی پس از ۲۰ روز به تصویر کشیده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد ذرات نانو به خوبی بر روی سطح سنگ قرار گرفته‌اند. برای انجام آزمون‌ها، بازه‌های زمانی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ روز با توجه به مطالعات انجام شده انتخاب شدند؛ همچنین برای اطمینان از صحت انتخاب، برای دو غلظت مختلف طی زمان‌های چند ساعت تا چند روز نیز زاویه تماس‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد که نشان داد بیشترین تغییر زاویه تماس مربوط به بازه‌های زمانی ۱۰ تا ۱۵ روز و برای غلظت‌های مختلف می‌باشد. بدین منظور آزمون‌ها پس از گذشت بازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ روز برای غلظت‌های مختلف انجام شد.



شکل ۸- طرح اجمالی الگوی شیشه‌ای استفاده شده در آزمون تزریق

جدول ۲- مشخصات الگوی شیشه‌ای استفاده شده در آزمون تزریق

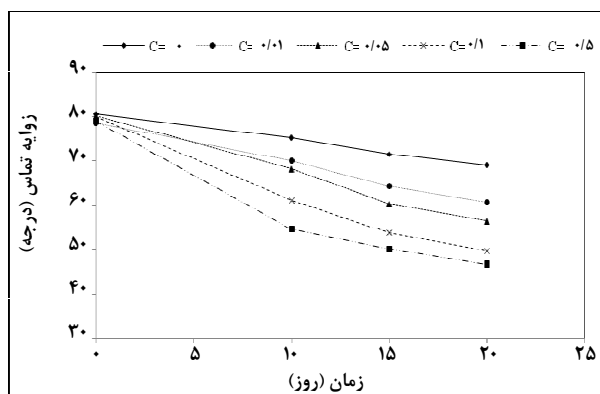
۶/۰۰	طول (cm)
۶/۰۰	عرض (cm)
۰/۸۰۰۰	عمق متوسط (cm)
۰/۱۲۹۶	حجم محیط متخلخل (cm ³)
۴۱	تخلخل (%)
۳۵۰	تراوایی مطلق (mD)
۳	نسبت اندازه حفره-گلوگاه

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- آزمایش‌های زاویه تماس

در حین انجام آزمایش‌ها مشاهده گردید پایداری نانوسیالات وابسته به شرایط محیط می‌باشد. پایداری نانوسیالات با افزایش غلظت و همچنین افزایش دما کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، نانوسیال با غلظت ۰/۵۰ درصد وزنی بعد از ۱۲ روز، نانو سیال با غلظت ۰/۱۰ درصد وزنی بعد از ۱۸ روز و نانو سیال با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی بعد از ۲۵ روز شروع به ته‌نشین شدن کردند، در صورتی که سایر محلول‌های تهیه شده پس از گذشت ۱ ماه نیز پایدار بودند.

1. Receding Contact Angle
2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

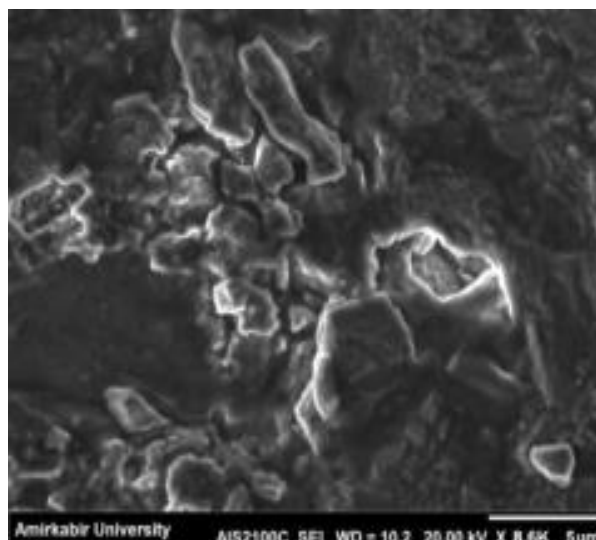


شکل ۱۲- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ بر حسب زمان روی سنگ در دمای محیط

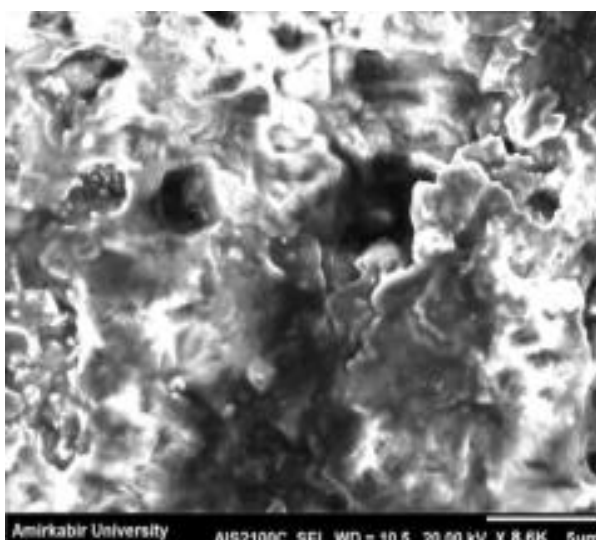
از نقطه نظر کاربردی تعیین غلظت بهینه ذرات نانو به وسیله آزمایش‌های تغییر ترشوندگی مناسب نمی‌باشد؛ زیرا افزایش غلظت نانوذرات علی‌الخصوص در حین حرکت سیالات در محیط متخلخل محدودیت‌هایی را در پی خواهد داشت. همانطور که قبلاً بیان شد افزایش غلظت نانوذرات سبب کاهش پایداری سیال شده و از طرفی احتمال انسداد حفرات و گلوگاه‌های محیط متخلخل بیشتر می‌شود. در نتیجه، این مسئله باعث کاهش تراوایی محیط متخلخل شده و کاهش تولید از مخزن را در پی خواهد داشت. به این علت تعیین غلظت بهینه نانوذرات با انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی نتایج مفیدتری را ارائه می‌دهد.

در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، با توجه به شکل (۱۳) زاویه تماس پس‌رونده آب با سنگ کاهش یافته است؛ هر چند که زاویه تماس در دمای ۸۰ درجه سلسیوس همچنان بیشتر از زاویه تماس در دمای ۹۰ درجه می‌باشد و سنگ نفوذ دوست می‌باشد اما نفوذ دوستی سنگ کاهش یافته است. همچنین اثر نانوذرات با افزایش غلظت بیشتر می‌شود و تغییرات زاویه تماس محسوس‌تر است. عدم گزارش تغییرات زاویه تماس برای بعضی از غلظت‌ها در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به علت عدم پایداری لازم نانوسیال با گذشت زمان می‌باشد.

در شکل (۱۴) تغییرات زاویه تماس در دو شرایط دمایی متفاوت پس از گذشت زمان ۱۰ روز نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است، تغییرات زاویه تماس در دمای ۸۰ درجه سلسیوس بیشتر است؛ به عبارتی با افزایش دما تغییر زاویه تماس چشمگیرتر بوده است.

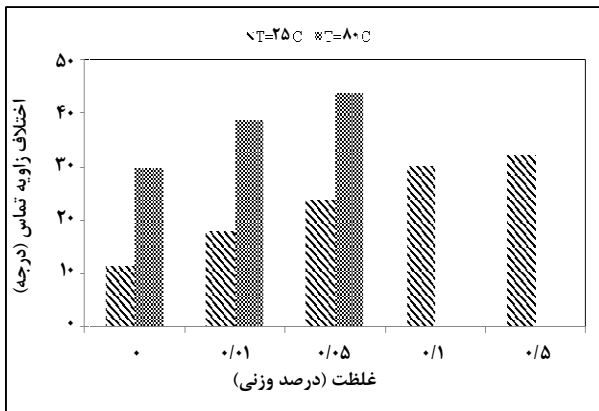


شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) قبل از قرار گرفتن باریکه مغزه در نانوسیال

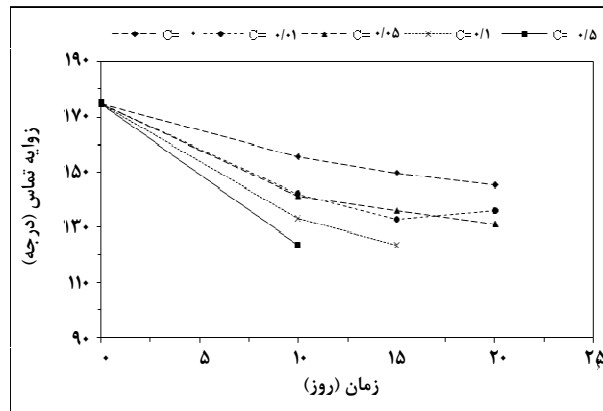


شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) بعد از قرار گرفتن باریکه مغزه در نانوسیال سیلیکونی ۰/۱۰ درصد وزنی

همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است، در دمای محیط زاویه تماس پس‌رونده آب با سنگ کاهش یافته و خاصیت ترشوندگی سنگ‌ها از ترشوندگی متوسط به سمت ترشوندگی آب‌دوست تغییر کرده است. همانطور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش غلظت نانوذرات، زاویه تماس کمتر می‌شود. قابل ذکر است که در همه نمودارها، غلظت بر حسب درصد وزنی بوده و غلظت صفر بیانگر آب نمک به عنوان سیال شاهد می‌باشد.



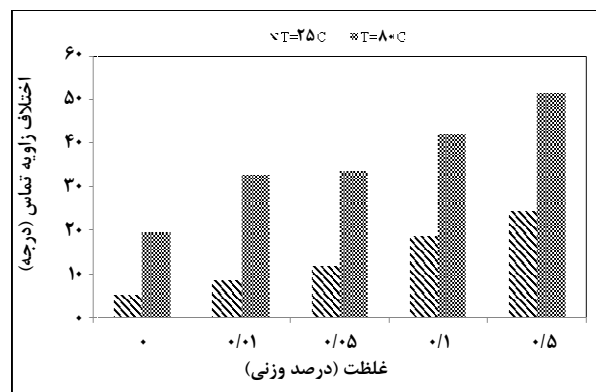
شکل ۱۶- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ در دو دمای متفاوت پس از گذشت ۲۰ روز



شکل ۱۳- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ بر حسب زمان روی سنگ در دمای ۸۰ درجه سلسیوس

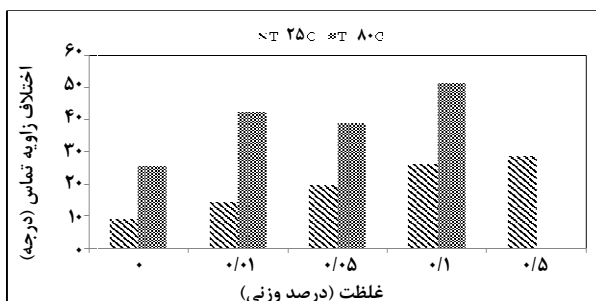
۳-۲- آزمایش‌های سیلاب‌زنی با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای

میکرومدل‌ها با هدف درک بهتر فرایندهای ازدیادبرداشت در مقیاس حفره و مشاهده مستقیم جریان سیال در محیط‌های متخلخل به کار می‌روند. این میکرومدل‌ها به عنوان شبیه ساز دو بعدی سنگ مخزن نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهمترین مزیت آنها، قابلیت مشاهده حرکت سیال در آنها است که از لحاظ کیفی به تهیه بهترین مدل‌های حرکت سیال در محیط متخلخل کمک می‌نمایند. لذا استفاده از میکرومدل شیشه‌ای می‌تواند امکان انجام مطالعات پایه و توسعه تئوری‌های انتقال پدیده‌ها و همچنین مشاهده کمی و کیفی وقایع در این سیستم‌ها را میسر سازد. بسیاری از محققان با استفاده از این الگوها به بررسی و درک بهتر مکانیسم‌های انتقال در جایجایی‌های امتزاجی و غیرامتزاجی پرداخته‌اند [۲۲-۲۰]. همچنین میکرومدل‌ها برای بررسی موارد گوناگون مرتبط با جریان سیال در محیط متخلخل از جمله: ترشوندگی [۲۳]، فشار موئینگی [۲۴]، رسوب آسفالتین [۲۵] و انتقال جرم [۲۶] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این با استفاده از این مدل‌ها به بررسی خصوصیات هندسی شکاف در فرایند تزریق حلال [۲۷]، و نیز مطالعه اثر شکل و هندسه حفره‌ها بر کارایی تزریق حلال [۲۸] پرداخته شده است. در این قسمت به منظور بررسی اثر نانوذرات بر روی بهبود عملکرد جارویی سیلاب‌زنی آبی و تأثیر این ذرات بر روی بازیافت نفت به وسیله تغییر ترشوندگی و همچنین تعیین غلظت بهینه نانوذرات،



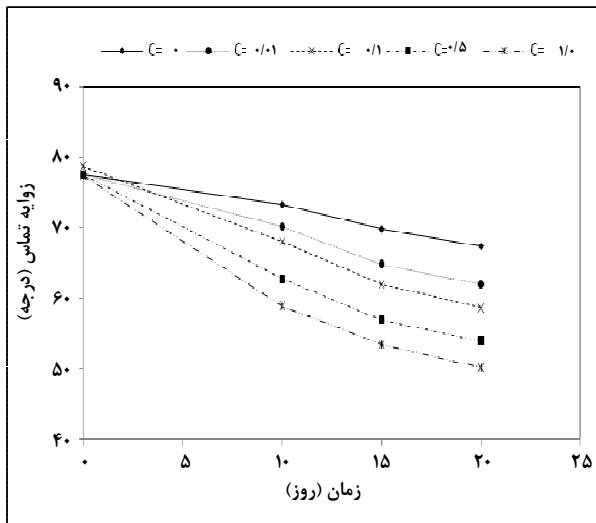
شکل ۱۴- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ در دو دمای متفاوت پس از گذشت ۱۰ روز

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نیز تغییرات زاویه تماس در دو شرایط دمایی متفاوت پس از گذشت زمان‌های ۱۵ و ۲۰ روز نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است، تغییرات زاویه تماس در دمای ۸۰ درجه سلسیوس بیشتر است.

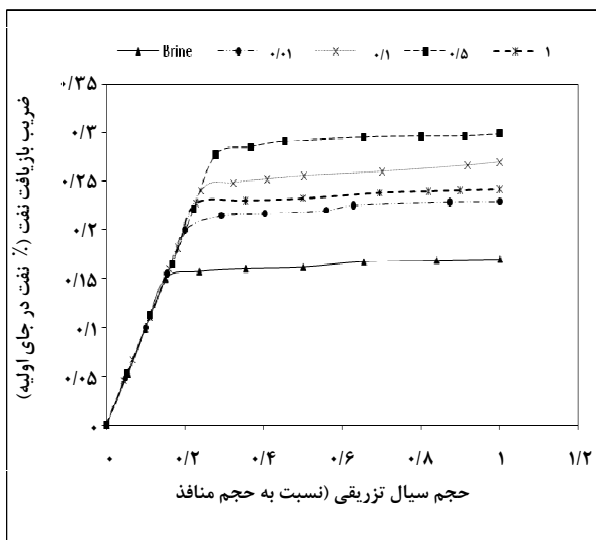


شکل ۱۵- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ در دو دمای متفاوت پس از گذشت ۱۵ روز

زمان میان‌شکنی^۲ سیال تزریقی و در نهایت بهبود بازیافت نهایی نفت خواهد شد. با افزایش غلظت ذرات نانو بیش از ۰/۵۰ درصد وزنی، بازیافت نهایی نفت و همچنین زمان میان‌شکنی کاهش یافته است. دلیل این امر می‌تواند کاهش تراوایی مطلق محیط متخلخل در اثر جذب ذرات نانو و مسدود شدن حفره‌ها و گلوگاه‌ها باشد [۱۹].



شکل ۱۷- اثر غلظت ذرات نانو بر روی زاویه تماس نانوسیالات با سنگ بر حسب زمان روی شیشه در دمای محیط



شکل ۱۸- تغییرات ضریب بازیافت نفت بر حسب میزان حجم سیال تزریقی

آزمایش‌های سیلاب‌زنی به وسیله میکرومدل ترتیب داده شده است. بدین جهت ابتدا برای بررسی تأثیر نانوذرات بر ترشوندگی، آزمایش‌های زاویه تماس بر روی سطح شیشه انجام شده است؛ در ادامه نیز آزمایش‌های سیلاب‌زنی توسط میکرومدل و با استفاده از الگوهای شیشه‌ای یک-چهارم پنج-نقطه‌ای انجام گرفته است.

۳-۲-۱ اندازه‌گیری زاویه تماس روی شیشه

آزمایش‌های زاویه تماس روی شیشه مانند آزمایش‌های زاویه تماس روی سنگ می‌باشد با این تفاوت که زاویه تماس اندازه‌گیری شده در این مرحله از قرار دادن قطره آب بر روی سطح شیشه حاصل گردید که این زاویه تماس، زاویه تماس پیشرو^۱ می‌باشد. در این حالت زاویه تماس اندازه‌گیری شده در محیط آب/ هوا/ سطح جامد (شیشه) بوده و قطره آب به عنوان سیال با چگالی بیشتر، لایه هوا در مجاورت شیشه را کنار زده و بر سطح شیشه قرار می‌گیرد؛ به این دلیل زاویه تماس اندازه‌گیری شده، زاویه تماس پیشرو می‌باشد. هنگامی که زاویه تماس روی سطح سنگ مدنظر است زاویه تماس در محیط نفت/ آب/ سطح جامد (سنگ) اندازه‌گیری شده و سیال نفت به عنوان سیال با چگالی کمتر، سیال آب در مجاورت سطح سنگ را کنار زده و بر سطح آن قرار می‌گیرد؛ در این حالت زاویه تماس اندازه‌گیری شده، زاویه تماس پسرو می‌باشد. در این مرحله تمام آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شده و همانطور که پیش‌بینی می‌شد تغییرات زاویه تماس روی شیشه مانند تغییرات زاویه تماس روی سنگ با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد (شکل (۱۷)). افزایش تغییر زاویه تماس بر خلاف تصور بین غلظت‌های ۰/۵۰ و ۱/۰۰ چشمگیر نبوده و انتظار می‌رود با افزایش بیشتر غلظت، افزایش تغییرات زاویه تماس کمتر شود.

۳-۲-۲ آزمایش‌های سیلاب‌زنی

در این قسمت آزمایش‌های سیلاب‌زنی با استفاده از آب نمک و همچنین ۴ غلظت مختلف ۰/۰۱، ۰/۱۰، ۰/۵۰، و ۱/۰۰ درصد وزنی از نانوسیالات به وسیله میکرومدل و با به کارگیری الگوی شیشه‌ای یک-چهارم پنج-نقطه‌ای در شرایط محیط انجام گرفت. با توجه به شکل (۱۸) افزایش غلظت ذرات نانو تا یک حد بهینه که در محدوده آزمایش‌های انجام شده ۰/۵۰ درصد وزنی می‌باشد باعث افزایش

2. Breakthrough

1. Advancing Contact Angle

۴- نتیجه گیری

مراجع

- در این مقاله به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیکونی بر روی ترشوندگی سنگ‌های مخزن پرداخته شد که در این راستا نانو سیالات پایداری با غلظت‌های متفاوت از نانوذرات سیلیکونی تهیه گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:
۱. پایداری نانوذرات سیلیکونی با افزایش دما و همچنین افزایش غلظت نانوذرات در محلول کاهش می‌یابد.
 ۲. نانوذرات سیلیکونی باعث تغییر ترشوندگی سنگ‌ها از نفت دوست به آب دوست شده که با افزایش غلظت نانوذرات در محلول تغییرات ترشوندگی و اثرگذاری ذرات نانو چشمگیرتر خواهد بود.
 ۳. با افزایش دما میزان اثرگذاری نانوذرات افزایش خواهد یافت؛ همچنین این اثرگذاری و نیز تغییرات ناشی از آن در مدت زمان کمتری صورت می‌پذیرد.
 ۴. با توجه به اندازه کوچک نانوذرات، حرکت آنها در محیط متخلخل راحت‌تر از دیگر مواد صورت گرفته و در نتیجه امکان انسداد حفرات و گلوگاه‌های محیط متخلخل کمتر است.
 ۵. استفاده از نانوذرات در مقایسه با سایر روش‌های شیمیایی از دیدگاه برداشت از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. علاوه بر این با توجه به نسبت سطح ویژه بالای این مواد به جرم آنها استفاده از این مواد به صورت بهینه انجام می‌گیرد. به این معنی که مقدار کمی از نانوذرات معادل مقادیر زیادی از مواد دیگر کارایی داشته که این مسئله باعث کاهش میزان مصرف مواد و در نتیجه کاهش هزینه کل خواهد شد.
 ۶. آزمایش‌های سیلاب‌زنی در الگوی شیشه‌ای یک چهارم پنج نقطه‌ای و با استفاده از سیال نانو در غلظت‌های مختلف باعث افزایش زمان میان‌شکنی سیال تزریقی و در نتیجه بهبود بازیافت نهایی نفت شد. با افزایش غلظت ذرات نانو بیش از ۵۰ درصد وزنی، بازیافت نهایی نفت و همچنین زمان میان‌شکنی کاهش یافته است. دلیل این امر می‌تواند کاهش تراوایی مطلق محیط متخلخل در اثر جذب ذرات نانو و انسداد حفرات و گلوگاه‌های محیط متخلخل باشد.
- [1] Saggaf, M. M., "A Vision for Future Upstream Technologies", SPE Journal, 60(3), 54-98, (2008).
- [2] Tippee, B., "Nanotechnology Seen Boosting Recovery Factors", Oil and Gas Journal, (2009).
- [3] Xiangling, K., Ohadi, M., "Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress", SPE Paper 138241, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, (2010).
- [4] Chen, G. G., Luo, G. S., Xu, J. H., Wang, J. D., "Membrane Dispersion Precipitation Method To Prepare Nanoparticles", Powder Technology, 139(2), 180-185, (2004).
- [5] Hong, R., Ding, J., and Zheng, G., "Thermodynamic And Particle-Dynamic Studies On Synthesis Of Silica Nanoparticles Using Microwave-Induced Plasma Cvd", China Particuology, 2(5), 207-214, (2004).
- [6] Burgard, D., "Chemomechanical Processing- the Innovative Way of Integrating Nanoparticles into Industry Products", Petrotech Conference, New Delhi, India, (2009).
- [7] Hongyan, W., Xulong, C., Jichao, Z., Aimei, Z., "Development And Application Of Dilute Surfactant-Polymer Flooding System For Shengli Oilfield", Journal of Petroleum Science and Engineering, 65(1-2), 45-50, (2009).
- [8] Jinfeng, L., Lijun, M., Bozhong, M., Rulin, L., Fangtian, N., Jiayi, Z., "The Field Pilot Of Microbial Enhanced Oil Recovery In A High Temperature Petroleum Reservoir", Journal of Petroleum Science and Engineering, 48(3-4), 265-271, (2005).
- [9] Drummond, C., Israelachvili, J., "Surface Forces And Wettability", Journal of Petroleum Science and Engineering, 33(1-3), 123-133, (2002).
- [10] Agbalaka, C., Dandekar, Y., Patil, L., Khataniar, S., Hemsath, R., "The Effect Of Wettability On Oil Recovery: A Review", SPE Paper 114496, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, (2008).
- [11] Suicmez, V. S., Piri, M., Blunt, M. J., "Effects Of Wettability And Pore-Level Displacement On Hydrocarbon Trapping", Advances in Water Resources, 31(3), 503-512, (2008).
- [12] Yadali Jamaloei, B., Kharrat, R., "Analysis of Microscopic Displacement Mechanisms of Dilute Surfactant Flooding in Oil-wet and Water-wet Porous Media", Transport in Porous Media, 81(1), 1-19, (2010).
- [13] Zhao, X., Blunt, M. J., Yao, J., "Pore-Scale Modeling: Effects Of Wettability On Waterflood Oil Recovery", Journal of Petroleum Science and Engineering, 71(3-4), 169-178, (2010).
- [14] Dijke, M. I. J., Sorbie, K. S., "Pore-Scale Modelling Of Three-Phase Flow In Mixed-Wet Porous Media: Multiple Displacement Chains", Journal of Petroleum Science and Engineering, 39(3-4), 201-216, (2003).
- [15] Ju, B., Fan, T., Ma, M., "Enhanced Oil Recovery By Flooding With Hydrophilic Nanoparticles", China Particuology, 4(1), 41-46, (2006).

- [16] Ju, B., Fan, T., "Experimental Study And Mathematical Model Of Nanoparticle Transport In Porous Media", *Powder Technology*, 192(2), 195-202, (2009).
- [17] Onyekonwu, M. O., Ogolo, N. A., "Investigating the Use of Nanoparticles in Enhancing Oil Recovery", SPE Paper 140744, Nigeria Annual International Conference and Exhibition: Tinapa - Calabar, Nigeria, (2010).
- [18] Mohammadi, S., "Screening of the EOR Scenarios for Shaly Heavy Oil Reservoirs Using Five-Spot Glass Micromodel: an Experimental Study", M.Sc Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (2010).
- [19] Wu, S., Firoozabadi, A., "Permanent Alteration of Porous Media Wettability from Liquid-Wetting to Intermediate Gas-Wetting", *Transport in Porous Media*, 85(1), 189-213, (2010).
- [20] Sohrabi, M., Tehrani, D., Danesh, A., Henderson, G., "Visualization of Oil Recovery by Water-Alternating-Gas Injection Using High-Pressure Micromodels", *SPE Journal*, 9, 290-301, (2004).
- [21] Chatzis, I., Dullien, F. A. L., "Dynamic Immiscible Displacement Mechanisms in Pore Doublets: Theory versus Experiment", *Journal of Colloid and Interface Science*, 91, 199-222, (1983).
- [22] Morrow, N., "Multiphase Displacement, In Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery", NewYork: Marcel Dekker, 36, (1991).
- [23] Romero-Zeron, L. B., Kantzas, A., "The Effect of Wettability and Pore Geometry on Foamed-Gel-Blockage Performance", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 10, 150-163, (2007).
- [24] Ghazanfari, M. H., Rashtchian, D., Kharrat, R., Vossoughi, S., "Capillary Pressure Estimation of Porous Media Using Statistical Pore Size Function", *Journal of Chemical Engineering & Technology*, 30, 862-869, (2007).
- [25] Danesh, A., Krinis, D., Henderson, G., Peden, J., "Asphaltene Deposition in Miscible Gas Flooding of Oil Reservoirs", *Journal of Chemical Research & Design*, 66, 339-344, (1988).
- [26] Mahers, E., Dawe, R., "The Role of Diffusion and Mass Transfer Phenomena in the Mobilization of Oil during Miscible Displacement", *European Symposium on Enhanced Oil Recovery, ARTEP, IFP, Paris*, 279-288, (1982).
- [27] Farzaneh, S. A., Kharrat, R., Ghazanfari, M. H., "Experimental Study of Solvent Flooding to Heavy Oil in Fractured Five-Spot Micromodels: The Role of Fracture Geometrical Characteristics", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49, 36-43, (2010).
- [28] Dehghan, A. A., Kharrat, R., Ghazanfari, M. H., Farzaneh, S. A., "Studying the Effects of Pore Geometry, Wettability and Co-Solvent Types on the Efficiency of Solvent Flooding to Heavy Oil in Five-Spot Models", *Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition, Jakarta, Indonesia: Society of Petroleum Engineers*, (2009).