

بررسی تأثیر تزریق نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم بر مهاجرت ذرات ریزسازندی حین تزریق آب کم‌شور

مهرشاد منصوری، علی نخعی*، دانشگاه تهران • پیمان پورافشاری، دانشگاه سلطان قابوس عمان

چکیده

در اغلب مخازن ماسه‌سنگی تولید ریزدانه‌های سازندی حین تولید به مشکلی اساسی تبدیل شده است. این ذرات می‌توانند تراوایی مخزن را به شدت کاهش دهند یا در صورت تولید شدن باعث خوردگی تجهیزات سطحی گردند. جابه‌جایی این ذرات می‌تواند ناشی از عوامل شیمیایی مثل درجه‌ی شوری و pH باشد یا در اثر نیروی هیدرودینامیکی سیال تولیدی انجام گیرد. یکی از روش‌های کارآمد برای مقابله با مهاجرت این ریزدانه‌ها، استفاده از نانوذرات جهت تثبیت ذرات سازندی در منشأ تولیدشان است. هدف این مقاله، بررسی تأثیر تزریق نانوسیال در کنترل مهاجرت ریزدانه‌های سازندی با منشأ شیمیایی در محیط متخلخل مصنوعی است که تاکنون بررسی و مطالعه نشده است. گفتنی است در آزمایش‌های موردنظر، نانوذرات اکسید سیلیسیم به کار رفته و ترکیب هیدروکربن‌های دکان و پارافین به‌عنوان نفت استفاده شده‌اند. همچنین تأثیر غلظت نانوسیال تزریقی در کنترل مهاجرت ذرات بررسی شده است. در تمامی مراحل ذکر شده، بازیافت نفت اندازه‌گیری خواهد شد.

نتایج آزمایش‌های اولیه نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید سیلیسیم توانایی زیادی در کنترل مهاجرت ذرات ریزسازندی دارند. با استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیم، مقدار افت فشار در طول مغزه کاهش چشمگیری یافت که نشان از کاهش مهاجرت ذرات ریز داشت. همچنین غلظت بهینه‌ی نانوذره برابر ۰/۱ درصد وزنی تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های AFM نشان داد که نانوسیال اکسید سیلیسیم با جذب روی سطح شیشه به شدت سبب تغییر زبری سطح شیشه شده است. در نتیجه مکانیزم اصلی و غالب کنترل مهاجرت ذرات ریز توسط نانوسیال اکسید سیلیسیم، افزایش زبری سطح مغزه متخلخل معرفی گردید.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۲/۰۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۳/۰۳

واژگان کلیدی:

تزریق آب کم‌شور، مهاجرت ریزدانه‌های سازندی، غلظت بحرانی نمک، نرخ بحرانی تزریق، نانوسیال اکسید سیلیسی

مقدمه

از دید برداشت، سرعت حرکت سیال، دمای محیط متخلخل و ... می‌تواند تعادل بین نیروهای جاذبه و دافعه‌ی اعمالی به ذره را بر هم زده و شرایط را برای جدایی ذرات سازندی از سطح محیط متخلخل و مهاجرت آنها فراهم آورد.

بسته به اندازه‌ی ریزدانه‌های سازندی موجود در محیط متخلخل، امکان وقوع دو مشکل اساسی در اثر مهاجرت این ذرات وجود دارد: ■ اگر قطر ریزدانه‌های سازندی از قطر خلل و فرج سازند بزرگ‌تر باشد مهاجرت این ذرات سبب انسداد خلل و فرج و در نتیجه کاهش تراوایی سازند می‌شود.

■ اگر قطر ریزدانه‌های سازندی از قطر خلل و فرج سازند کوچک‌تر باشد ریزدانه‌ها به‌همراه سیال از چاه تولید شده و باعث خوردگی و فرسایش تجهیزات سرچاهی، پمپ‌ها و خطوط لوله می‌گردند.

بنابراین در صنعت به منظور جلوگیری و کنترل مهاجرت ریزدانه‌ها

کاهش تراوایی سازند نفتی توسط هر فرآیند نامطلوبی، آسیب سازندی تلقی می‌گردد. در واقع آسیب سازند در بخش‌های مختلف صنایع نفت و گاز به‌عنوان یک معضل شناخته شده که ممکن است طی انجام فازهای مختلف برداشت هیدروکربن از مخازن زیرزمینی از جمله تولید، حفاری، فرآیندهای ازدیاد برداشتی مانند ایجاد شکاف مصنوعی و تزریق آب‌شور مشاهده گردد.

پدیده‌ی مهاجرت ریزدانه‌های سازندی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی آسیب سازند به‌خصوص در مخازن ماسه‌سنگی شناخته شده است. برخی ذرات ریز جامد در محیط متخلخل حضور دارند که به دیواره‌ی محیط متخلخل سیمان نشده‌اند و کاملاً سست و غیرمستحکم روی آن قرار گرفته‌اند. بنابراین در حالت تعادل، این ذرات توسط نیروی جاذبه‌ی اعمالی بین ذره و سطح خلل و فرج به دیواره‌ی محیط متخلخل چسبیده‌اند. اعمال برخی عوامل شیمیایی و هیدرودینامیکی مانند شوری سیال سازندی و سیال تزریقی جهت

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (anakhaee@ut.ac.ir)

برای ازدیاد برداشت مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. همچنین آب سازند به دلیل داشتن ترکیبات آروماتیک و رادیواکتیو، بسیار برای محیط زیست خطرناک است. بنابراین با انجام اصلاحاتی می توان آنرا به آب کم شور تبدیل و دوباره به مخزن تزریق کرد. هدف این مقاله، بررسی تأثیر تزریق نانوسیال در کنترل مهاجرت ذرات ریزسازندی با منشأ شیمیایی است که در اثر تزریق سیال کم شور به وجود می آید. درجهی شوری سیال تزریقی جهت عملیات ازدیاد برداشت، یکی از عوامل اصلی شیمیایی مؤثر در برخی پدیده های مهاجرت ذرات سازندی شناخته شده است. بررسی ها نشان می دهد اگر درجهی شوری از یک حد بحرانی کمتر شود، نیروهای الکتروستاتیک دافعه خواهند بود و این مسأله باعث می شود در پروژه های میدانی، هنگام تزریق آب کم شور در مهاجرت ریزدانه های سازندی مشکل ایجاد شود. هدف از انجام این پروژه بررسی تأثیر نانوذرات بر کاهش مهاجرت ریزدانه های سازندی در هنگام تزریق آب کم شور در محیط دو فاز نفت و آب است که تاکنون بررسی نشده است. در بسیاری مواقع کنترل مهاجرت ذرات سازندی در منشأ تولید ذرات امکان پذیر نیست. در اثر مهاجرت ذرات سازندی در مخزن مشکلاتی مثل کاهش تراوایی (به خصوص در نواحی نزدیک چاه) یا خوردگی لوله ها و تجهیزات درون چاهی و تجهیزات سطحی جهت تولید ایجاد خواهد شد [۱]. تاکنون گزارش های بسیاری مبنی بر تأثیر مثبت تزریق پلیمر، به خصوص پلیمرهای کاتیونی در کنترل مهاجرت ریزدانه های سازندی ارائه شده است [۱]. در این روش محلول پلیمر با غلظت مشخص به محیط متخلخل تزریق می گردد. در اثر جذب پلیمر بر سطح ریزدانه های سازندی، لایه ای نازک از پلیمر روی سطح ذرات کشیده شده و مانع از انتقال نیروی اعمالی از طرف سیال به سطح ریزدانه ها می شود. از معایب این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هزینه ی زیاد مواد شیمیایی مورد استفاده
- به علت وزن مولکولی زیاد و همچنین بلند زنجیره بودن پلیمرها، احتمال کاهش تراوایی در اثر انسداد خلل و فرج وجود دارد

منظور از فن آوری نانو تمام فن آوری هایی است که در مقیاس نانو یعنی از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر فعالیت دارند. نانوذرات پرکاربردترین صورت از مواد مصرفی در فن آوری نانو هستند. با توجه به تعریف فن آوری نانو، تمایل به پیدا کردن کاربردهایی برای فن آوری نانو در صنعت نفت به وجود آمده و اخیراً محققان فراوانی تحقیقات خود را به سمت یافتن این کاربردها سوق داده اند که این علاقه ی شدید به ویژگی های منحصر به فرد این ذرات باز می گردد. مهم ترین این ویژگی ها عبارت است از:

- حرکت آزادانه ی نانوذرات در محیط متخلخل به علت کوچک بودن قطر نانوذرات

روش های مختلفی مانند اسیدکاری، تزریق پلیمر و تشکیل بسته ی شنی^۱ در اطراف چاه استفاده می گردد. اما کوتاه مدت و مقطعی بودن تأثیر هر یک از روش ها، اقتصادی نبودن و حتی کاهش تراوایی توسط برخی از آنها، مشکلاتی را در به کارگیری این روش ها در صنعت ایجاد کرده است.

فن آوری نانو به دلیل ویژگی های منحصر به فردی مثل سطح مخصوص بسیار زیاد و همچنین اندازه ی بسیار کوچک، نظر بسیاری از محققان در علوم مختلف از جمله مهندسی نفت را به خود جلب کرده است. از جمله کاربردهای این روش در صنعت نفت تغییر ترشوندگی سنگ مخزن، بهبود خواص رئولوژی گل حفاری، کاهش کشش سطحی بین آب و نفت، ازدیاد برداشت در مخازن نفت و کنترل آسیب سازند است.

هم اکنون تزریق آب در بسیاری از مخازن دنیا به عنوان روشی جهت ازدیاد برداشت به کار برده می شود. مطالعات آزمایشگاهی زیادی روی تزریق آب به مخزن با در نظر گرفتن ترکیبات یکسان و متفاوت آب همزاد و تزریقی انجام شده که بیانگر آنست که درصد باز یافت به دلیل تزریق آب به ترکیب آب نمک تزریقی وابسته است. به دلیل آنکه تزریق آب کم شور به میدان از نظر عملیاتی شبیه به سیلاب زنی آب است و مانند روش های ازدیاد برداشت شیمیایی به مواد افزودنی گران قیمت نیازی ندارد در دهه های اخیر این روش به عنوان روشی

۱ | مدت زمان پایداری محلول های نانوسیال ساخته شده برای آزمایش های مرحله ی اول

نانوذره	غلظت (درصد وزنی)	مدت زمان پایداری در آب نمک ۰/۳ مولار	مدت زمان پایداری در آب نمک ۰/۳ مولار
اکسید سیلیسیم	۰/۱	۶۲ روز	۳۹ روز
اکسید آلومینیم	۰/۱	ناپایدار	۷ ساعت
اکسید منیزیم	۰/۱	ناپایدار	۱ ساعت

۲ | نتایج باز یافت نهایی نفت در آزمایش های مرحله ی اول

آزمایش	سیال تزریقی	S _{or}	باز یافت نفت (%)
آزمایش پایه	PV ۱۰ آب کم شور	۰/۴۲	۵۸
نانوسیال ۰/۱ wt% اکسید سیلیسیم	PV ۱ نانوسیال + PV ۹ سیال کم شور	۰/۳۵	۶۵/۱

هم pH زیاد محلول سبب مهاجرت ریزدانه‌های سازندی از مخزن می‌گردد. آزمایش‌های آصف تأثیر بسیار مثبت تزریق نانوسیال MgO را در کنترل مهاجرت ذرات سازندی حتی در pH بسیار زیاد نشان می‌دهد.

تمامی بررسی‌هایی که تاکنون در زمینه‌ی کنترل مهاجرت ذرات ریز سازندی با استفاده از نانوذرات انجام شده، در محیط‌های اشباع از آب صورت گرفته است. از دیگر اثراتی که باید در نظر گرفته شود، وجود هیدروکربن است. هدف این پروژه بررسی تأثیر تزریق نانوسیال در کنترل مهاجرت ریزدانه‌های سازندی با منشأ شیمیایی در حضور هیدروکربن است که تاکنون بررسی و مطالعه نشده است. در آزمایش‌ها، سه نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم و اکسید نیتروژن بررسی شدند؛ زیرا در کارهای قبلی این سه نانوذره از خود اثرات مثبتی در کنترل مهاجرت ذرات سازندی نشان دادند [۷و۶و۴و۳]. شایان ذکر است در این آزمایش‌ها نفت مورد استفاده، ترکیبی از هیدروکربن‌های دکان و پارافین خواهد بود.

۱- تئوری

بروز برخی تغییرات شیمیایی در محیط متخلخل سبب جدایش ذرات ریز از سطح خلل و فرج و در نتیجه مهاجرت این ذرات می‌شود. این عامل اغلب در اثر نفوذ و تزریق سیال با خصوصیات شیمیایی متفاوت از سیال سازندی ایجاد می‌گردد. روش‌های ازدیاد برداشت مختلفی وجود دارد که سبب تغییر خصوصیات شیمیایی سیال مخزن شده که برخی از آنها در کنار آثار بسیار مثبتی که در مقدار هیدروکربن تولیدی از خود نشان می‌دهند، به شدت منجر به گونه‌های مختلفی از آسیب سازند مانند تورم رس، جدایش و مهاجرت ذرات ریز سازندی و ... می‌شوند. در ادامه برخی از مهم‌ترین عوامل شیمیایی مؤثر در جدایش ذرات ریز تشریح خواهند شد.

- نسبت زیاد سطح به حجم برای نانوذرات: مواد زمانی که در اندازه‌ی نانو هستند، نسبت سطح به حجم آنها به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد
- داشتن انرژی سطحی زیاد
- توانایی قابل توجه برای انتقال حرارت

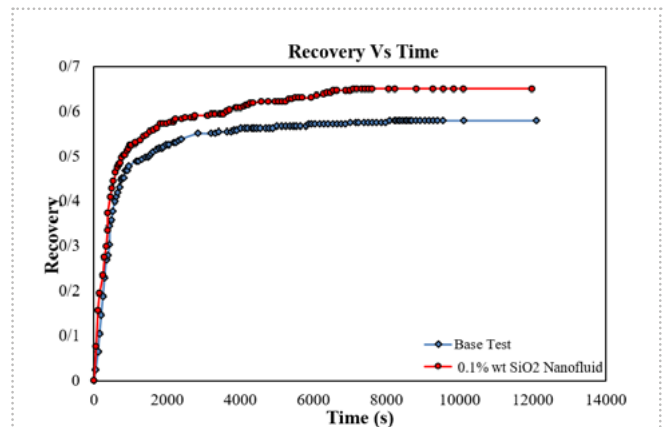
در سال ۲۰۰۸ هوانگ و همکاران برای اولین بار از نانوسیال جهت تثبیت ریزدانه‌های سازندی استفاده کردند. آنها با انجام یک کار آزمایشگاهی، یک لایه‌ی پروپانت را که در شکاف هیدرولیکی استفاده می‌شود به نانوسیال آغشته کردند. به‌عنوان اولین عامل، رسانش جریان سیال در لایه‌ی پروپانت آغشته شده به نانوسیال ارزیابی و مشاهده شد که تزریق نانوسیال به سیستم، رسانش را در عبور جریان سیال کاهش نمی‌دهد. همچنین با عبور یک محلول سوسپانسیون شامل ریزدانه‌های سازندی از داخل لایه‌ی پروپانت آغشته به نانوسیال و تحلیل نتایج به تأثیر مثبت نانوسیال در تثبیت ریزدانه‌های سازندی پی بردند [۲].

عرب و همکاران تأثیر نوع سیال پخش‌کننده‌ی مورد استفاده در نانوسیال را بر عملکرد نانوذره در جذب ریزدانه‌های سازندی بررسی کردند [۳و۴]. در این آزمایش پنج نانوذره‌ی Al_2O_3 , CuO , MgO , SiO_2 و ZnO به همراه دو سیال پخش‌کننده‌ی آب مقطر و آب کم‌شور ترکیب شده و قابلیت هر کدام از نانوسیالات در جذب ریزدانه‌های سازندی بررسی گردید. نتایج بیانگر آنست که نانوذره‌ی ZnO به همراه آب مقطر بیشترین قابلیت جذب را دارد؛ در حالی که در آب کم‌شور قابلیت جذب نانوذره‌ی Al_2O_3 بیشتر از سایرین است.

آصف و همکاران تأثیر نانوذره‌ی MgO را در کنترل مهاجرت ذرات ریز در اثر تزریق آب کم‌شور و قلیایی بررسی نمودند [۵]. تزریق محلول قلیا با درجه‌ی شوری کم شرایط مطلوبی جهت ازدیاد برداشت نفت از مخازن فراهم می‌کند اما هم درجه‌ی شوری کم و

جدول ۳ | نتایج بازیافت نهایی نفت در آزمایش‌های مرحله‌ی دوم

بازیافت نفت (%)	S_{or}	سیال تزریقی	آزمایش
۵۷	۰/۴۳	۱۰ PV آب کم‌شور	آزمایش پایه
۶۳	۰/۳۷	۱ PV نانوسیال + ۹ PV سیال کم‌شور	نانوسیال ۰/۰۳ wt اکسید سیلیسیم
۶۷	۰/۳۳	۱ PV نانوسیال + ۹ PV سیال کم‌شور	نانوسیال ۰/۱ wt اکسید سیلیسیم
۶۰	۰/۴۰	۱ PV نانوسیال + ۹ PV سیال کم‌شور	نانوسیال ۰/۳ wt اکسید سیلیسیم



شکل ۱ | نمودار بازیافت نهایی نفت در آزمایش‌های مرحله‌ی اول



۱-۱- قدرت یونی

از عوامل اصلی مهاجرت ذرات سازندی، قدرت یونی سیال موجود در سازند است. قدرت یونی سیال به شدت به غلظت نمک موجود در آن و همچنین جنس نمک بستگی دارد.

تاکنون موارد بسیاری مبنی بر کاهش تراوایی نمونه‌های ماسه‌سنگی مختلف که تحت تزریق آب کم‌شور قرار گرفته‌اند گزارش شده است [۸-۱۰]. در گذشته این گونه تصور می‌شد که کاهش تراوایی مخازن ماسه‌سنگی ناشی از تزریق شور آب رقیق، به دلیل وجود رس‌های متورم شونده در این مخازن است. اما آزمایش‌های لند^۳ و همکاران نشان داد که کاهش تراوایی ناشی از تزریق بخار آب در نمونه‌های ماسه‌سنگی خالی از رس متورم شونده نیز هست. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که علاوه بر تورم رس، مکانیزم دیگری به نام مهاجرت ریزدانه‌های سازندی نیز بر کاهش تراوایی نمونه‌ها مؤثر است [۱۱]. تاکنون محققان مختلفی در خصوص تأثیر شوری آب تزریقی بر تراوایی نمونه‌های ماسه‌سنگی مطالعه کرده‌اند. خیلا و فوگلر^۴ در سیلاب‌زنی نمونه‌ی ماسه‌سنگی با آب حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید مشاهده کردند که کاهش تراوایی نمونه از یک غلظت نمک به خصوص آغاز شده که این غلظت را غلظت

بحرانی نمک^۵ (CSC) نامیدند [۱۰].

۱-۲- pH سیال

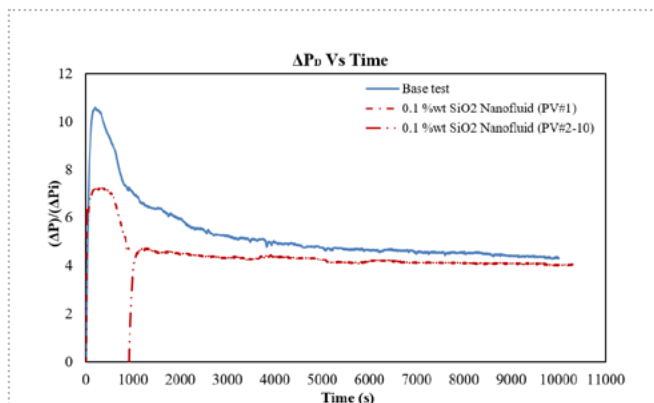
از دیگر عوامل شیمیایی مؤثر بر مهاجرت ذرات ریز، pH محلول تزریقی است [۱۴-۱۲]. کیا^۶ و همکاران با انجام آزمایش‌های مختلف مشاهده کردند که با افزایش pH محلول تزریقی، تراوایی نمونه‌های ماسه‌سنگی به شدت کاهش می‌یابد. آنها با اندازه‌گیری بار سطحی ریزدانه‌ها و همچنین دیواره‌ی خلل و فرج مشاهده نمودند که با افزایش pH محلول، بار سطحی ریزدانه و سطح خلل و فرج بیشتر (منفی‌تر) شده و نتیجه گرفتند که با افزایش pH محلول تزریقی، نیروی دافعه‌ی بین ریزدانه و سطح خلل و فرج بیشتر شده و در نتیجه جدایش و مهاجرت ذرات سازندی افزایش می‌یابد [۱۳].

۱-۳- دما

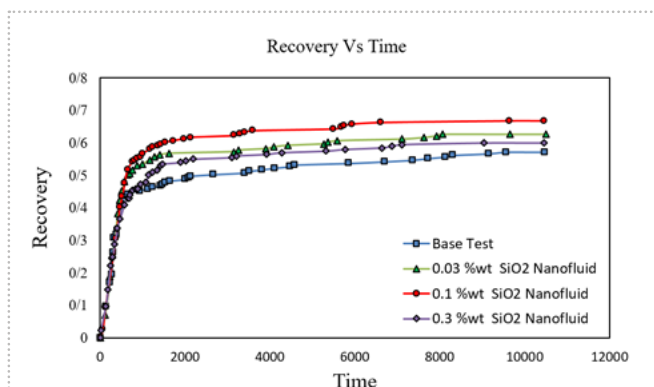
دمای سیال موجود در مخزن یکی دیگر از عوامل مهاجرت ذرات ریز موجود در سازند است. محققان مختلفی با بررسی تأثیر دما به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای سیال تزریقی، مقدار مهاجرت ذرات ریز سازندی موجود در مخزن افزایش می‌یابد [۱۵ و ۱۶]. علت آنست که نیروی دافعه‌ی الکتریکی با دمای سیال رابطه‌ی مستقیم داشته و در اثر افزایش دما، نیروی دافعه‌ی الکتریکی بین ذرات ریز و دیواره‌ی محیط متخلخل نیز افزایش می‌یابد.

۲- کار آزمایشگاهی

همان‌گونه که بیان شد، پدیده‌ی مهاجرت ریزدانه‌های سازندی عمدتاً مشکلی است که در مخازن ماسه‌سنگی وجود دارد. از نظر ترکیبات تشکیل‌دهنده، ماسه‌سنگ‌ها اغلب از دانه‌های سیلیسی تشکیل شده‌اند. همچنین عمده‌ی ترکیب تشکیل‌دهنده‌ی دانه‌های شیشه‌ای نیز از جنس سیلیس است؛ در نتیجه محیط متخلخل ساخته شده توسط این ذرات می‌تواند معرف خوبی برای مخازن ماسه‌سنگی باشند. بنابراین تمامی آزمایش‌ها در این پروژه روی مغزه‌ی ساخته شده از دانه‌های شیشه‌ای انجام گردید. اندازه‌ی دانه‌های شیشه‌ای مورد استفاده ۴۲۰-۲۱۲ میکرون انتخاب شد و برای ساختن مغزه‌ی مصنوعی، از ۹۰ درصد دانه‌های شیشه‌ای و ۱۰ درصد ذرات ریز استفاده گردید. ابتدا غلظت بحرانی نمک (CSC) برای سدیم کلرید برابر ۰/۲۳ اندازه‌گیری شد. جهت اشباع اولیه‌ی محیط متخلخل، در تمامی آزمایش‌ها از محلول آب‌نمک سدیم کلرید با غلظت بیشتر از CSC نمک استفاده گردید. در نتیجه از آب‌نمک ۰/۳ مولار سدیم کلرید برای اشباع اولیه‌ی مغزه استفاده شد. همچنین از محلول آب‌نمک سدیم کلرید ۰/۳ مولار (۱۷۵۰ قسمت در میلیون) که درجه‌ی شوری کمتری از CSC دارد به عنوان سیال از یاد برداشت و سیال پایه‌ی محلول نانو سیال استفاده گردید.



۲ | نمودار تغییرات فشار نسبت به فشار مینا برای آزمایش‌های مرحله‌ی اول



۳ | نمودار بازیافت نهایی نفت در آزمایش‌های مرحله‌ی دوم



اکسید منیزیم به دلیل پایداری نامناسب کنار گذاشته شدند و اکسید سیلیسیم به عنوان نانوسیال مناسب انتخاب شد. بدین ترتیب در آزمایش‌های سیلاب‌زنی با نانوسیال، از نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم استفاده می‌شود.

در این مرحله ابتدا نرخ بحرانی تزریق برای جابه‌جایی ذرات ریز توسط سیالات اندازه‌گیری شد که برای محلول آب‌نمک ۰/۳ مولار سدیم کلرید ۳۰۰ و برای نفت مورد استفاده ۱۲۰ سی‌سی بر ساعت به دست آمد. بنابراین نرخ تزریق به مغزه کمتر از مقادیر ذکر شده انتخاب گردید.

جهت بررسی اثرگذاری نانوذرات، ابتدا یک آزمایش پایه انجام شد که طی آن مغزه در اشباع آب کاهش نیافتنی، با نفت اشباع گردید و سپس ۱۰ حجم تخلخل سیال کم‌شور به عنوان سیال ازدیاد برداشت تزریق گردید و اثر آن بر مهاجرت ذرات و بازیافت نهایی نفت بررسی شد. در آزمایش دوم پس از اشباع مغزه توسط نفت، ابتدا یک حجم تخلخل نانوسیال ۰/۱ درصد وزنی اکسید سیلیسیم تزریق می‌شود. دو سر مغزه را بسته و نانوسیال به مدت ۱۲ ساعت درون مغزه می‌ماند تا اثرگذاری انجام شود. سپس به مقدار ۹ حجم تخلخل، محلول آب‌نمک کم‌شور تزریق می‌گردد و در تمامی مقدار بازیافت نفت مراحل بر حسب زمان ثبت خواهد شد. نتایج بازیافت نهایی در شکل-۱ ارائه شده است. در جدول-۲ مقدار بازیافت نهایی نفت نشان داده شده است.

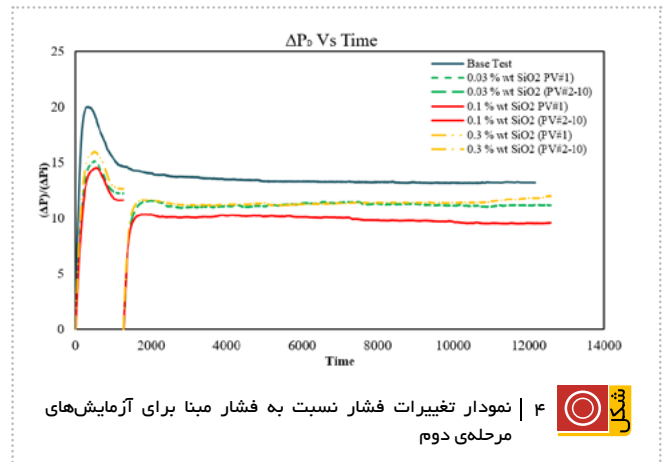
همچنین در اثر انسداد بخشی از خلل و فرج مغزه، افت فشار دو سر مغزه افزایش یافته و در نتیجه تراوایی مغزه نیز کاهش می‌یابد. جهت بررسی تغییرات فشار مغزه حین سیلاب‌زنی، هنگام اندازه‌گیری تراوایی مطلق مغزه با سیال ۰/۳ مولار آب‌نمک که سبب مهاجرت ذرات سازندی نمی‌گردد، فشار در نرخ ۵۰ cc/hr به عنوان فشار مبنا (ΔP_i) انتخاب گردید و فشار اندازه‌گیری شده حین سیلاب‌زنی نسبت به فشار مبنا بدون‌بُعد خواهد شد. مقدار افت فشار بدون‌بُعد دو سر مغزه در شکل-۲ ارائه شده که این مقدار برای آزمایش تزریق نانوذرات، مقدار کمتری را نشان می‌دهد. این مطلب حاکی از کاهش مهاجرت ذرات ریز است.

در دسته‌ی دوم آزمایش‌ها تأثیر غلظت نانوسیال تزریقی بر عملکرد نانوسیال در کنترل مهاجرت ریزدانه‌های سازندی بررسی شد. در این آزمایش‌ها نانوسیالات با سه غلظت ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۳ درصد وزنی به مغزه تزریق گردید. سپس مغزه‌ها به مدت ۲۴ ساعت بسته شدند و پس از آن ۹ حجم تخلخل سیال کم‌شور به مغزه تزریق گردید. نتایج مربوط به بازیافت نفت در این آزمایش‌ها در شکل-۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تزریق نانوسیال نسبت به آزمایش پایه نتیجه‌ی بهتری داشته و باعث افزایش بازیافت نفت شده است. آزمایش تزریق نانوسیال با غلظت ۰/۱ درصد وزنی بهترین نتیجه را در میان این سه غلظت داشت. همچنین با مقایسه‌ی بازیافت نهایی نفت در آزمایش تزریق نانوسیال با غلظت ۰/۳ درصد

گفتنی است در پروژه‌های تزریق آب کم‌شور، درجه‌ی شوری آب معمولاً کمتر از ۲۰۰۰-۸۰۰۰ ppm است [۲۰-۱۷]. در آزمایش‌های موردنظر، نفت مورد استفاده، ترکیبی از هیدروکربن‌های دکان و پارافین خواهد بود. علت استفاده از این هیدروکربن‌ها امتزاج‌پذیری کامل آنها با یکدیگر است و اینکه هیدروکربن ترکیبی، مایعی بی‌رنگ و شامل هیدروکربن‌های سبک و سنگین است.

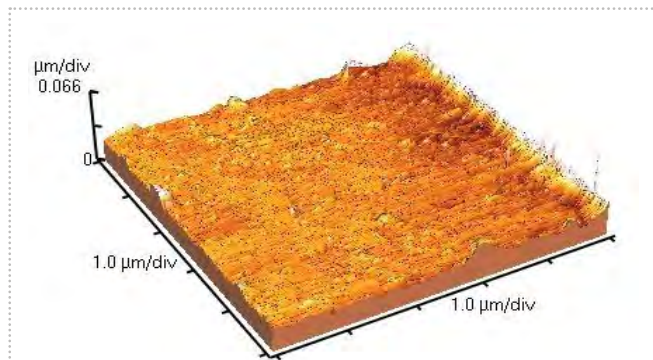
جهت بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد نانوسیال، دو دسته آزمایش مختلف انجام گردید. هدف از انجام دسته‌ی اول آزمایش‌ها، انتخاب نانوذره‌ای است که علاوه بر پایداری، بهترین عملکرد را در کنترل مهاجرت ذرات سازندی از خود نشان می‌دهد.

سه نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم در غلظت‌های ۰/۱ درصد وزنی در محلول آب‌نمک ۰/۳ مولار سدیم کلرید پخش شدند و زمان پایداری هر کدام به ثبت رسید. نتایج آزمایش‌های اولیه نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید سیلیسیم پایداری و توانایی زیادی در کنترل مهاجرت ذرات سازندی دارد. در جدول-۱ میزان پایداری نانوسیالات مختلف نشان داده شده است. اطلاعات حاصل برای زمان پایداری محلول نانوسیال نیز بیانگر آنست که کیفیت نانوسیال اکسید سیلیسیم به مراتب بهتر از نانوسیال اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم است. از آنجا که پایداری نانوسیال بسیار مهم است از میان سه نانوسیال مذکور، اکسید آلومینیم و

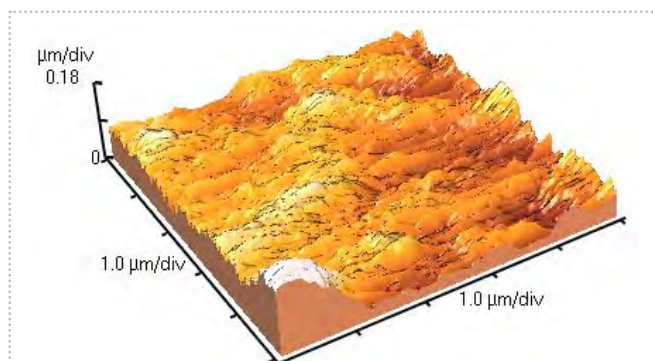


۴ | قطر نانوذرات اندازه‌گیری شده برای آزمایش‌های مرحله‌ی اول

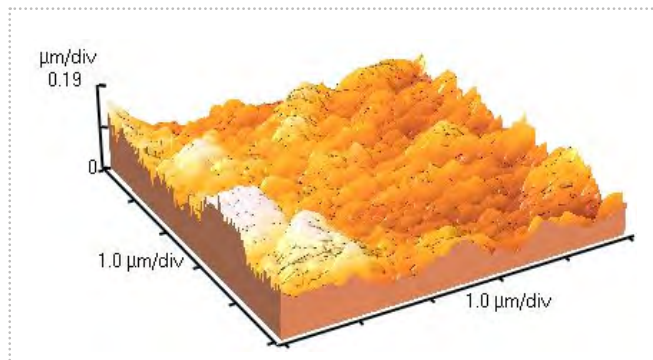
نانوذره	غلظت (درصد وزنی)	قطر نانوذره (نانومتر)
اکسید سیلیسیم	۰/۱	۱۴۵
اکسید آلومینیم	۰/۱	۷۶۰
اکسید منیزیم	۰/۱	۱۰۲۵



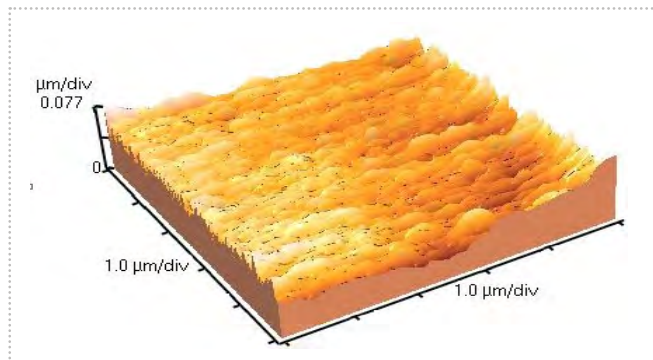
شکل ۵ | زبری سطح شیشه‌ی آغشته‌ی در حالت پایه



شکل ۶ | زبری سطح شیشه‌ی آغشته به ۰/۰۳٪ wt اکسید سیلیسیم



شکل ۷ | زبری سطح شیشه‌ی آغشته به ۰/۱٪ wt اکسید سیلیسیم



شکل ۸ | زبری سطح شیشه‌ی آغشته به ۰/۳٪ wt اکسید سیلیسیم

وزنی نانوذره با بازیافت نفت در آزمایش پایه مشخص می‌شود که استفاده از غلظت زیاد نانوذره تأثیری بر بازیافت نهایی نفت نخواهد داشت. بنابراین می‌توان گفت که لزوماً با افزایش غلظت نانوذره در سیال تزریقی، بازیافت نفت بهبود نمی‌یابد؛ بلکه یک غلظت بهینه برای نانوذره وجود دارد که در آن، نانوذره بیشترین اثرگذاری را خواهد داشت. جدول ۳- بازیافت نهایی و اشباع باقیمانده‌ی نفت را نشان می‌دهد.

در این مرحله نیز مثل مرحله‌ی قبل، اختلاف فشار دو سر نمونه بر حسب زمان اندازه‌گیری شد. تزریق سیال کم‌شور جهت ازدیاد برداشت، موجب حرکت و مهاجرت ذرات سازندی در محیط متخلخل می‌شود که بسته به اندازه و غلظت ذرات ریز، احتمال انسداد گلوگاه حفره‌ها توسط این ذرات وجود دارد. در اثر انسداد بخشی از خلل و فرج مغزه، افت فشار دو سر مغزه افزایش می‌یابد. در شکل ۴- نتایج مربوط به آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است.

۳- تحلیل نتایج

خواص منحصر به فرد نانوذرات سبب کاربرد فراوان آنها در صنایع گوناگون شده است. نانوذرات اندازه‌ی بسیار کوچک، سطح مخصوص بسیار زیاد و انرژی سطحی زیادی دارند. تا زمانی که اندازه‌ی نانوذرات پخش شده در محلول در مقیاس نانو باشد خواص نانوذرات حفظ می‌گردد. در نتیجه هرچه نانوذرات پخش شدگی بهتری در محلول نانوسیال داشته باشند، پایداری محلول نانوسیال افزایش یافته و در نتیجه کارآیی نانوذرات در پدیده‌ی جذب سطحی حفظ می‌شود. همچنین مدت زمان پایداری نانوسیال نیز به‌عنوان یک عامل اساسی در کارآیی محلول نانوسیال محسوب می‌گردد. به‌عبارت دیگر زمان پایداری محلول نانوسیال باید به اندازه‌ای باشد که این ذرات بتوانند در مدت زمان کافی تأثیر خود را بر سطح مغزه بگذارند. در صورت کم بودن زمان پایداری نانوسیال، پس از گذشت مدت زمانی نانوذرات به یکدیگر چسبیده و کلوخه‌هایی با اندازه‌ی بزرگ ایجاد می‌شود. در نتیجه تأثیر نانوذرات بر سطح محیط متخلخل به‌شدت کاهش می‌یابد و خود می‌تواند به‌عنوان عامل آسیب سازند عمل کند. بنابراین اندازه‌گیری قطر نانوذرات پخش شده در محلول نانوسیال و همچنین تعیین مدت زمان پایداری نانوسیال می‌تواند اطلاعات مهمی را در مورد عملکرد نانوسیال در تغییر خصوصیات سطحی مغزه در اختیار قرار دهد. در جدول ۴- قطر نانوذرات اندازه‌گیری شده ارائه گردیده است.

نانوذرات اکسید سیلیسیم پخش شدگی بسیار خوبی در محلول آب‌نمک ۰/۰۳ مولار سدیم کلرید از خود نشان داد. اما کلوخه‌شدگی نانوذرات اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم در محلول آب‌نمک بسیار زیاد بوده و همین قطر زیاد نانوذرات

سیال تزریقی بررسی و مشخص شد که غلظتی بهینه برای نانوذره وجود دارد که در آن، افت فشار دو سر مغزه نسبت به حالت مینا کمترین مقدار را دارد. حرکت ذرات ریز سازندی ممکن است موجب انسداد خلل و فرج سنگ شود که در این صورت تراوایی سنگ کاهش و افت فشار دو سر مغزه افزایش می‌یابد. استفاده از غلظت بهینه‌ی نانوذره باعث کاهش افت فشار درون مغزه شد که نشان از کنترل بهتر مهاجرت ذرات ریز دارد.

در این قسمت جهت تحلیل اثر غلظت نانوذره بر کاهش مهاجرت ذرات ریز سازندی، بار دیگر باید به عامل زبری سطح دانه‌های شیشه‌ی آغشته به محلول نانوسیال توجه نمود. در بخش قبلی تصاویر مربوط به تغییرات زبری سطح شیشه در حالت مینا و در حالت آغشته به نانوسیال با غلظت ۰/۱ درصد وزنی که توسط دستگاه AFM اندازه‌گیری شد ارائه گردید. با تصویربرداری از سطح شیشه‌ی آغشته به نانوسیال اکسید سیلیسیم در غلظت‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ درصد وزنی نتایج جالبی به دست آمد. در شکل‌های ۵- تا ۸ میزان زبری سطح شیشه در حالت پایه و حالت آغشته به نانوسیال اکسید سیلیسیم در غلظت‌های ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی نشان داده شده است. همچنین دستگاه AFM برای این حالت مقدار زبری متوسط سطح شیشه را به ترتیب برابر ۲۷/۷۳، ۴۳/۰۱ و ۱۶/۵۰ نانومتر اندازه‌گیری کرد [۲۲]. نتایج زبری سطح در جدول ۵- ارائه شده است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پروژه تأثیر تزریق آب کم‌شور بر مهاجرت ذرات بررسی شد. تزریق آب کم‌شور از عوامل شیمیایی است که بر نیروی دافعه‌ی الکتریکی مؤثر است و مقدار این نیرو را افزایش می‌دهد. همچنین تزریق نانوسیال نیز با تغییر خصوصیات الکتریکی سطح مغزه‌ی متخلخل، دافعه‌ی الکتریکی بین ذرات ریز و سطح مغزه را کاهش داده و سبب کنترل و کاهش مهاجرت ذرات سازندی می‌گردد. دو مرحله آزمایش سیلاب‌زنی مغزه جهت بررسی ابعاد مختلف تأثیر کنترل مهاجرت ذرات سازندی انجام و نتایج زیر حاصل شد:

- نانوسیال‌های اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم بسیار به درجه‌ی شوری حساس هستند و در غلظت ۰/۰۳ مولار سدیم کلرید، پایداری خوبی از خود نشان ندادند.
- نانوسیال اکسید سیلیسیم در محلول آب‌نمک ۰/۰۳ مولار سدیم کلرید پایداری حدود ۳۹ روز داشت که نشان می‌دهد می‌توان از آن در پروژه‌های میدانی استفاده کرد.
- در هنگام استفاده از نانوسیال سیلیکا در مغزه، افت فشار در مرحله‌ی تزریق، به‌طور چشم‌گیری بهبود یافته و در نتیجه با تزریق نانوسیال آسیب سازندی کاهش می‌یابد.
- همواره افزایش غلظت نانوسیال تزریقی سبب بهبود کنترل مهاجرت ذرات سازندی نخواهد شد. برای هر نانوسیال، غلظت بهینه‌ای وجود دارد که این مقدار برای نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم

سبب شده پایداری آنها به مراتب کمتر از نانوسیال اکسید سیلیسیم باشد. آنچه باعث پایداری کم این نانوسیالات شده میزان نمک موجود در محلول نانوسیال است. این نانوسیالات نسبت به درجه‌ی شوری محلول بسیار حساس بوده‌اند و وجود نمک در محلول سبب ناپایداری این نانوسیال‌ها می‌گردد. این در حالی است که نانوسیال اکسید سیلیسیم از میزان نمک موجود در محلول تأثیر کمتری می‌پذیرد و در محلول آب‌نمک پایداری خوبی نشان می‌دهد. در حالت کلی می‌توان گفت نوع و اندازه‌ی بار الکتریکی موجود در سطح نانوذرات به شدت به مقدار pH محلول و درجه‌ی شوری بستگی دارد. برای هر نانوذره، یک pH وجود دارد که میزان پتانسیل زتای نانوذرات در آن صفر است. این مقدار pH را نقطه‌ی ایزوالکتریک (IEP) نانوذره‌ی مورد نظر گویند. حال اگر pH محلول نانوسیال از IEP نانوذره بیشتر باشد نانوذرات موجود در محلول پتانسیل الکتریکی منفی دارند و اگر pH محلول نانوسیال از IEP نانوذره کمتر باشد پتانسیل الکتریکی نانوذرات مثبت خواهد بود. هر چه اختلاف pH محلول با مقدار IEP نانوذره بیشتر باشد مقدار پتانسیل زتای نانوذرات نیز افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش نیروی دافعه‌ی الکتریکی بین نانوذرات شده و در نتیجه پایداری محلول نانوسیال نیز افزایش خواهد یافت. در مقالات متعدد مقدار IEP برای نانوسیال اکسید آلومینیم و اکسید سیلیسیم به ترتیب برابر ۷/۵-۹ و ۲/۵-۳ گزارش شده است [۲۱]. مقدار pH محلول ۵/۹ اندازه‌گیری شد. در نتیجه فاصله‌ی بین pH محلول تا IEP نانوذره‌ی اکسید سیلیسیم وجود دارد. اما برای پایدار کردن نانوذرات اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم باید مقدار pH محلول را کاهش داد که این کار سبب تغییر در نتایج آزمایش‌ها و کاهش مهاجرت ذرات ریز می‌شود. ضمن اینکه کاهش pH تغییر چشم‌گیری در پایداری نانوسیالات اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم ایجاد نمی‌کند. همچنین در دسته‌ی دوم آزمایش‌ها اثر افزایش غلظت نانوذره در

۵ | مقادیر زبری اندازه‌گیری شده برای سطح شیشه در حالت‌های مختلف توسط دستگاه AFM

ردیف	آزمایش	R _a (nm)
۱	حالت مینا	۲/۳۲۴
۲	شیشه‌ی آغشته به نانوذره با غلظت ۰/۰۳ درصد وزنی	۲۷/۷۳
۳	شیشه‌ی آغشته به نانوذره با غلظت ۰/۱ درصد وزنی	۴۳/۰۱
۴	شیشه‌ی آغشته به نانوذره با غلظت ۰/۳ درصد وزنی	۱۶/۵۰

برابر ۰/۱ درصد وزنی به دست آمد.

مشخص شد که تزریق نانوسیال، زبری سطح مغزه را به شدت افزایش می‌دهد. بهترین نتیجه‌ی کنترل مهاجرت ذرات ریز برای غلظت ۰/۱ درصد وزنی به دست آمد.

■ با بررسی مقدار زبری و برآمدگی سطح مغزه‌ی آغشته به نانوسیال اکسید سیلیسیم در سه غلظت ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی،

پانویس‌ها

- | | | |
|------------------|--------------------|--------------------------------|
| 1. Gravel Pack | 3. Land | 5. Critical salt concentration |
| 2. Clay swelling | 4. Khilar & Fogler | 6. Kia |

منابع

- [1] Rawlins, C. H., and Hewett, T. J., "A Comparison of Methodologies for Handling Produced Sand and Solids to Achieve Sustainable Hydrocarbon Production", In European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, January, 2007.
- [2] Huang, T., Crews, J. B., and Willingham, J. R., "Nanoparticles for formation fines fixation and improving performance of surfactant structure fluids", International Petroleum Technology Conference, January, 2008.
- [3] Arab, D., Pourafshary, P., "Nanoparticles-Assisted Surface Charge Modification of the Porous Medium to Treat Colloidal Particles Induced by Low Salinity Water Flooding", Journal of Colloid and Surfaces, 436, 803-814, 2013.
- [4] Arab, D., Pourafshari, P., Ayatollahi, Sh., Habibi, A., "Remediation of Colloid-Facilitated Contaminant Transport in Saturated Porous Media Treated by Nanoparticles", Int. J. Environ. Sci. Technol, 11, 207-216, 2013.
- [5] Assef, Y., Arab, D., Pourafshari, P., "Application of Nanofluid to Control Fines Migration to Improve the Performance of Low Salinity Water Flooding and Alkaline Flooding", Journal of Petroleum Science and Engineering, 124, 331-340, 2014.
- [6] Habibi, A., Ahmadi, M., Pourafshary, P., Ayatollahi, S., Al-Wahaibi, Y., "Reduction of Fines Migration by Nanofluids Injection: An Experimental Study", J. Pet. Technol, 2012.
- [7] Ahmadi, M., "Impact of Nanoparticles for Formation Fines Fixation and Reduction of Formation Damage", Master Thesis, University of Tehran, Iran, 2011.
- [8] Muecke, T. W., "Formation fines and factors controlling their movement in porous media", J. Pet. Technol., 31 (2), 144-150, 1979.
- [9] Mungan, N., "Permeability reduction due to salinity changes", Journal of Canadian Petroleum Technology, 7(03), 113-117, 1968.
- [10] Khilar, K.C.; Fogler, H. S., "The existence of a critical salt concentration for particle release", Journal of Colloid and Interface Science, 101, 214-224, 1984.
- [11] Land, C. S., "Effect of hydration of montmorillonite on the permeability to gas of water-sensitive reservoir rocks", J. Pet. Technol., 17, 1213-1218, 1965.
- [12] Valdy, R., Fogler, H., "Fines migration and formation damage: Influence of pH and ion exchange", SPE-19413-PA., 7, 325-330, 1992.
- [13] Kia, S. F., Fogler, H. S., Reed, M. G., Vaidya, R. N. "Effect of pH on colloiddally induced fines migration", J. Colloid and Interface Science, 118, 158-168, 1987.
- [14] Mungan, N., "Permeability reduction through changes in pH and salinity", J. Pet. Technol, SPE-1283-PA., 17(12), 1449-1453, 1965.
- [15] Musharova, D. A., Mohamed, I. M., Nasr-El-Din, H. A., "Detrimental Effect of Temperature on Fines Migration in Sandstone Formations", Proceedings of the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, USA, 15-17 February, 2012.
- [16] Schembre, J. M., Kovsky, A. R., "Mechanism of Formation Damage at Elevated Temperature", Journal of Energy Resources Technology, 127, 171-180, 2005.
- [17] Tang, G.Q., and Morrow, N.R., "Salinity, temperature, oil composition, and oil recovery by waterflooding", SPE Reservoir Engineering, 12(04), pp.269-276, 1997.
- [18] Tang, G.Q., and Morrow, N.R., "Influence of brine composition and fines migration on crude oil/brine/rock interactions and oil recovery", Journal of Petroleum Science and Engineering, 24(2), pp.99-111, 1999.
- [19] Ashraf, A., Hadia, N., Torsaeter, O. and Tweheyo, M.T., "Laboratory investigation of low salinity waterflooding as secondary recovery process: effect of wettability", In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, January, 2010.
- [20] Morrow, N.R., Buckley, J., 2011. "Improved oil recovery by low-salinity waterflooding", J. Petrol. Technol. 63, 106-112.
- [21] Sahai, N., "Is silica really an anomalous oxide? Surface acidity and aqueous hydrolysis revisited", Environmental science & technology, 36(3), 445-452, 2002.
- [۲۲] حسن‌زاد، رضا، "تاثیر تزریق نانوسیال بر تغییر دبی بحرانی برای مهاجرت ریزدانه‌های سازندی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۴