پژوهش‌های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای
سال دوم، شماره۲، نسخه۱،
تابستان ۱۳۹۷، صفحه ٥٦-٤١

امکان‌سنجی و بررسی میکروسکوپی سازوکارفرایند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از تزریق نانوذرات خاک رس در میکرو مدل شیشه‌ای

آرزو جعفری*، رضا غریب شاهی، وحید برخورداری
تهران، بزرگراه جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت علم نانو، بسیاری از محققین به استفاده از این مواد برای حل مشکلات موجود در بخش‌های مختلف صنعت نفت روی آورده‌اند. نانو سیال‌های تهیه شده با این مواد می‌توانند جدایش نفت و گاز در داخل مخزن را تسهیل کرده و میزان برداشت نفت را نسبت به روش‌های فعلی افزایش دهند. لذا در این پژوهش اثر نانوذرات خاک رس بر روی ضریب برداشت نفت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از دو سیال پایه مختلف آب و اتانول برای پخش شدن نانوذرات در آن‌ها استفاده شد. اثر افزودن نانو ذرات خاک رس بر روی تغییرات گرانروی و کشش بین سطحی اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور بررسی اثر غلظت نانوذرات در سیال پایه بر روی ضریب برداشت نهایی نفت، نانو سیالات با ۳ و ۵ درصد وزنی نانوذرات تهیه شدند. نتایج نشان دادند که اگرچه نانو سیالات حاوی نانوذرات خاک رس پایداری کمی دارند اما در همین شرایط نیز با اضافه کردن آن‌ها به سیال پایه ضریب برداشت نفت، افزایش چشمگیری داشت. همچنین اثر این نانو ذرات هنگامی که در سیال پایه آب پخش می‌شوند بیشتر از اتانول خواهد بود. به عنوان مثال در ۵ درصد وزنی، ضریب برداشت نفت با نانو سیال پایه آبی ٤٩/٧ درصد و با نانو سیال پایه اتانولی ٤٦ درصد است.

واژه‌های کلیدی

ازدیاد برداشت نفت
نانوذرات خاک رس
گرانروی
کشش بین سطحی
پایداری
میکرو مدل

* **مسئول مکاتبات:**
ajfari@modares.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

۱ مقدمه

با پیشرفت صنایع، نیاز مبرم و روزافزون به انرژی و تأمین آن به شدت احساس می‌شود. در حال حاضر بسیاری از مخازن در نیمه دوم عمر تولید خود قرار دارند و برداشت نفت از این مخازن بسیار اندک است [۱]. لذا استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت نفت به منظور برداشت نفت باقی‌مانده در مخازن زیرزمینی راه‌حلی مناسب برای این مشکل است [۲]. در حال حاضر حتی با به کار بردن روش‌های پیچیده و مختلف ازدیاد برداشت نفت مانند استفاده از مواد شیمیایی، میکروبی و نیز روش‌های حرارتی، مقادیر عظیم نفت و گاز بدون استفاده در مخزن باقی می‌ماند. در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری نانو و ظهور قابلیت‌های بالقوه آن، بسیاری از محققین به استفاده از نانوذرات در بهبود برداشت نفت روی آورده‌اند [۳، ٤]. نانو ذرات دارای خواص ویژه و منحصربه‌فردی هستند و می‌توانند سبب جدایش راحت‌تر و مؤثرتر نفت و آب درون مخزن شوند [۵، ٦]. اضافه کردن این ذرات به سیال پایه باعث بهبود خواص آن سیال از قبیل چگالی، گرانروی، خواص حرارتی و تنظیم بر روی مقدار بهینه می‌شوند و در نهایت کارایی آن سیال درون مخزن به منظور بهبود برداشت نفت افزایش می‌یابد [۷، ۸]. با اضافه کردن این مواد به سیال پایه، نسبت پویایی سیال تزریقی بهبود می‌یابد [۹]. درنتیجه در هنگام تزریق، پدیده انگشتی شدن کاهش می‌یابد و سطح بیشتری از محیط متخلخل در تماس با سیال تزریقی خواهد بود [۱۰، ۱۱]. لذا بازدهی جاروبی سیال تزریقی افزایش می‌یابد و نفت بیشتری از مخزن برداشت خواهد شد. تزریق نانوسیال‌ها به درون مخزن، باعث تغییر ترشوندگی سنگ مخزن از نفت‌تر به آب‌تر می‌شوند [۱۲، ۱۳] و از این طریق باعث حرکت راحت‌تر نفت از درون خلل و فرج سنگ مخزن به سمت چاه تولیدی می‌شوند [۱٤]. همچنین نانوذرات قادر هستند کشش بین سطحی نفت و سیال تزریقی را به مقدار قابل توجهی کاهش دهند [۱۵]. استفاده از نانوسیالات می‌تواند راه‌حل مناسبی برای غلبه بر مشکلات روش‌های متداول ازدیاد برداشت نفت از قبیل پتانسیل خوردگی بالا، تلفات مواد تزریق در طی حرکت در درون مخزن، کاهش تراوایی به علت گیر افتادن در گلوگاه‌ها، عدم پایداری تنشی و مکانیکی برای استفاده در مخازن عمیق تحت دما و فشار بالا و ... باشد [۱٦]. علی‌رغم تمام تلاش‌های صورت گرفته در این حوزه، تاکنون اثر تعداد کمی از نانوذرات بر روی ضریب برداشت نفت مطالعه شده است و اثر نوع سیال‌های پایه مختلف بر روی میزان برداشت نفت از مخازن، مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته است [٦، ۱۷]. همچنین اثر این ذرات بر روی مسائل زیست‌محیطی و امکان‌سنجی اقتصادی استفاده از این ذرات در مقیاس میدانی شناخته نشده است. به همین دلیل هنوز موانعی بر سر راه استفاده از این روش در پروژه‌های میدانی وجود دارد و انجام مطالعات بیشتری در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد [۱۷]. لذا در این پژوهش اثر نانوذرات خاک رس بر روی ضریب برداشت نفت مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوذرات خاک رس دارای ریشه‌ای معدنی بوده و به دلیل اینکه این ذرات هم‌جنس بسیاری از مخازن از قبیل ماسه سنگی و ... هستند، سازگاری زیادی با مخازن در حین فرایند تزریق می‌توانند داشته باشند. از طرف دیگر این نانو ذرات دارای چگالی توده زیادی هستند و به همین دلیل در درصد وزنی مشخصی از نانوذرات مختلف، تعداد کمتری از این نانوذرات می‌تواند به سیال پایه اضافه شود. لذا مسائلی از قبیل گیرافتادگی، رسوب و ... در حین فرایند تزریق نانو سیالات حاوی این ذرات در مخزن کمتر خواهد شد. لذا به نظر می‌رسد که نانوذرات خاک رس،توان بالقوه بالایی برای استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت دارد. به همین دلیل در این مقاله، سازوکار اثر این نانوذرات در فرایند ازدیاد برداشت مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور انجام آزمایش‌های سیلابزنی از دستگاه میکرو مدل شیشه‌ای به عنوان محیط متخلخل استفاده شد. میکرو مدل شیشه‌ای، محیط متخلخل دوبعدی است

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

که به محققین امکان مشاهده حرکت سیال درون آن را می‌دهد [۱۸]. به منظور داشتن میکرو مدلی مناسب که بتواند به خوبی حرکت سیال در سنگ مخزن واقعی را نشان دهد، نوع الگوی حک شده بر روی آن بسیار مهم است [۱۹، ۲۰]. لذا استفاده از طرح های شبیه سنگ مخزن واقعی می تواند به محققین برای مطالعه دقیق حرکت سیالات درون محیط متخلخل کمک شایانی کند. لذا در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های اصلی تزریق از طرح نامنظمی که تاحدی بیانگر ناهمگنی توزیع حفرات ومسیرهای مخازن کربناته است، برای تهیه میکرو مدل شیشه‌ای استفاده شد. در این راستا، بررسی اثر اضافه کردن نانوذرات خاک رس بر روی گرانروی وکشش بین سطحی سیال پایه، بررسی پایداری نانوسیالات تهیه شده با نانوذرات خاک رس، مطالعه تأثیر نوع سیال پایه (آب مقطر و اتانول) بر روی کارایی نانو ذرات خاک رس به منظور افزایش برداشت نفت و بررسی اثر درصد وزنی نانوذرات درسیال پایه برروی میزان برداشتن هایی نفت ازمحیط متخلخل از اهداف اصلی این مقاله است.

۲ مواد، دستگاه‌ها و روش‌ها

در این پژوهش از مواد و تجهیزات مختلفی برای رسیدن به اهداف موردنظر استفاده شده است. آزمایش‌های مختلفی به منظور بررسی کارایی نانوذرات خاک رس در سیالات پایه مختلف (آب و اتانول) به‌منظورافزایش برداشت نفت انجام پذیرفته است. در ادامه، مواد و دستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش معرفی شده‌اند.

۲-۱ مواد و سیالات مورد استفاده

در آزمایش‌های انجام شده از نانوذرات خاک رس (مونت موریلونیت) استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این نانوذرات قهوه‌ای رنگ از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شده‌اند.

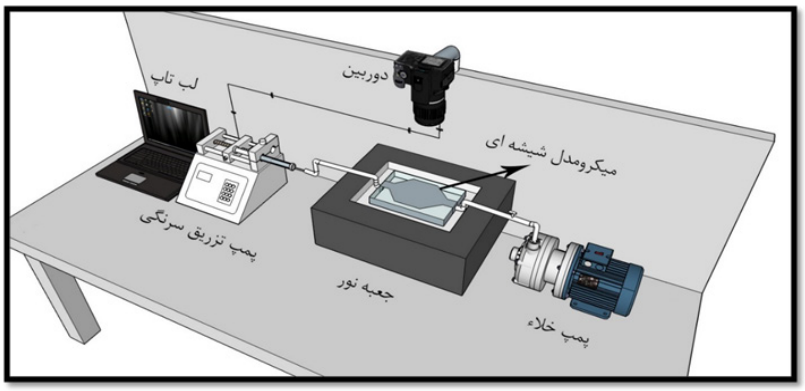
در این تحقیق از دو سیال پایه آب مقطر و اتانول برای انجام آزمایش‌های تزریق، استفاده شده است. اتانول از شرکت مرک آلمان خریداری شده است. از تولوئن نیز برای شست‌وشوی میکرو مدل شیشه‌ای استفاده شده است. همچنین از نفت با درجه API° ۱۹ و گرانروی ۳۴۰ سانتی پوازبه منظوراستفاده درآزمایش‌های با هدف اشباع میکرو مدل مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شد. از آنجا که سیالی که به عنوان محیط پخش شدن انتخاب می‌شود، نقش مهمی دربازده‌ی نفت به وسیله نانوذرات دارد، دلیل انتخاب سیال پایه آب، فراوانی، در دسترس بودن و ارزان بودن آن و همچنین دلیل انتخاب اتانول به عنوان سیال پایه دیگر در این پژوهش، مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه است که نشان می‌دهد پخش شدن نانوذرات در سیال پایه اتانول می‌تواند ضریب برداشت بالایی را به همراه داشته باشد [۱۱].

از دو سیال پایه آب و اتانول به همراه نانوذرات خاک رس به منظور تهیه نانوسیالات استفاده شده است. در این راستا قبل از انجام هر آزمایش تزریق، سیال پایه بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفته و نانوذرات وزن شده به آرامی به سیال پایه اضافه می‌شوند و به مدت ۱۵ دقیقه فرایند هم زدن ادامه پیدا می‌کند. سرعت همزن مورد استفاده در این تحقیق با هدف پراکنده ساختن نانوذرات، ۴۰۰ rpm است. این عمل جهت توزیع اولیه و جدایش کلوخه‌های نانوذره، انجام پذیرفته است و به تنهایی برای پایدارسازی و همگن کردن محلول نانوسیال کافی نیست. لذا پس از آن، سیال هم زده را به مدت ۴۰ دقیقه در حمام فراصوت قرار داده و با ۱۰۰ درصد

جدول ۱- مشخصات نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش.

نانوذره	اندازه متوسط ذره (nm)	چگالی (gr/cm^3)	مساحت سطح مخصوص (m^2/gr)
خاک رس	۱/۱۸	۵-۷	۵۰۰-۷۵۰

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



شکل ۱- طرح‌واره سامانه استفاده شده در این پژوهش

توان دستگاه، نانو ذرات در سیال پایه توزیع می‌شوند تا نانوسیال مورد نیاز با پایداری مناسب تهیه شود.

۲-۲ دستگاه‌ها و روش تحقیق

مراحل انجام آزمایش تزریق نانوسیال در میکرومدل شیشه‌ای شامل مراحل گوناگونی است. طرح‌واره مجموعه دستگاه‌های فعال در فرایند تزریق، شامل پمپ خلأ، پمپ تزریق سرنگی، جعبه تنظیم نور، دوربین عکس‌برداری، رایانه و اتصالات در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

مراحل انجام فرایند سیلابزنی به ترتیب شامل شست‌وشوی میکرو مدل شیشه‌ای، تخلیه میکرو مدل، اشباع میکرو مدل از نفت، تزریق سیالات پایه و نانو سیالات و تحلیل تصاویر به‌دست آمده در زمان‌های مختلف تزریق است. به منظور جلوگیری از به دام افتادن حباب‌های هوا در هنگام اشباع میکرومدل از نفت، با استفاده از پمپ خلأ، هوای موجود درون میکرومدل و سیالات شوینده شامل آب و تولوئن خارج می‌شود. برایاشباع میکرو مدل از نفت و تزریق سیالات مختلف به درون میکرومدل از پمپ تزریق سرنگی مدل SP1000HPM استفاده می‌شود. دقت پمپ تزریقی سرنگی در آزمایشگاه توسط سرنگ کم‌حجم و دقیق همیلتون با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی مشخص و بررسی حجم تزریقی تأیید شده است. این پمپ دارای حداقل و حداکثر سرعت تزریق ۰/۵ و ۱۰۰۰ میلی‌لیتر در ساعت و دقت حرکت پدال ۲۰ نانومتر است.

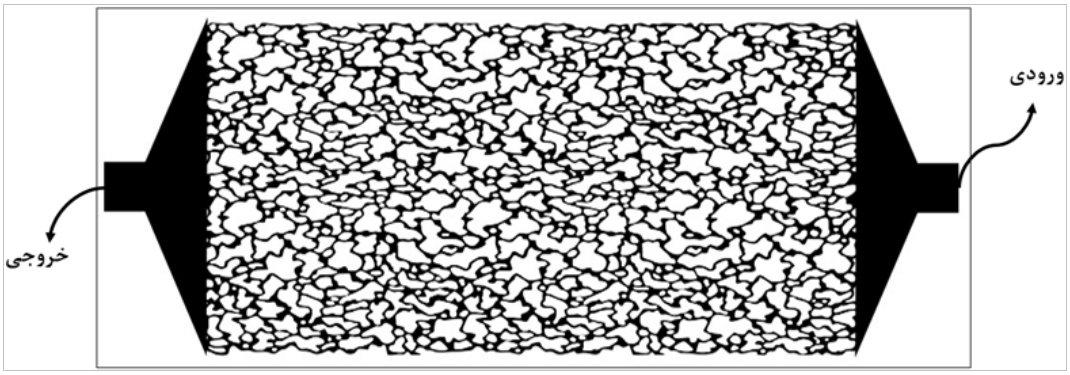
به منظور تجزیه و تحلیل دقیق اطلاعات و به‌دست آوردن میزان بازیافت نفت در هر مرحله از تزریق، دوربین حرفه‌ای شرکت کانن مدل EOS 7D که مجهز به لنز ماکرو است، برای گرفتن عکس‌های با کیفیت از فرایند تزریق استفاده شده است.

میکرو مدل شیشه‌ای وسیله‌ای برای نمایش محیط متخلخل در دو بعد با ضخامت میکرون است. برای ساخت میکرو مدل شیشه‌ای ابتدا باید طرح موردنظر که به عنوان بستر متخلخل درانجام آزمایش‌های تزریق مورد استفاده قرار می‌گیرد را طراحی کرد. برای طراحی این بستر باید از نرم‌افزار کورل دراو استفاده کرد. در این پژوهش از الگوی دولومیتی جهت انجام آزمایش‌های اصلی تزریق استفاده شد که حجم فضای متخلخل آن برابر با ۰/۰۶۷ سی‌سی است. دلیل استفاده از این الگو، شبیه‌سازی و مطالعه دقیق حرکت سیال در سنگ مخزن واقعی است. در شکل ۲ طرح‌واره میکرو مدل مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات بستر متخلخل به کار گرفته شده در این پژوهش نشان داده شده است.

۲-۳ تعیین گرانروی و کشش بین سطحی سیالات و نفت درجا

به منظور بررسی و درک سازوکار اثر نانوذرات خاک رس برضریب برداشت نفت، علاوه بر آزمون‌های تزریق نانوسیالات، آزمون‌های جانبی دیگری شامل تعیین کشش بین سطحی سیالات و نفت درجا و همچنین

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



شکل ۲- طرح‌واره میکرو مدل مورد استفاده

جدول ۲- مشخصات بستر متخلخل به کار گرفته شده در این پژوهش

طرح	الگوی تزریق	تخلخل (٪)	ابعاد (cm)	ضخامت (µm)
دولومیتی	خطی	۳۸	۳/۳×۹	۶۰

تعیین گرانروی سیالات تزریقی انجام شد. کشش بین سطحی سیال تزریقی و نفت یکی ازعامل‌های مهم در فرایند ازدیاد برداشت نفت است که بر میزان برداشت نفت تأثیر بسزایی دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین کشش بین سطحی مانند روش قطره آویزان، روش حلقه ، روش فشار بیشینه حباب و ... به کار گرفته می‌شود. در این پژوهش از روش حلقه و از دستگاه sigma 700 برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی سیال تزریقی و نفت استفاده شده است. در این پژوهش همچنین از گرانروی‌سنج بروکفیلد عقربه‌ای مدل NDJ-4 برای اندازه‌گیری گرانروی سیالات استفاده شده است.

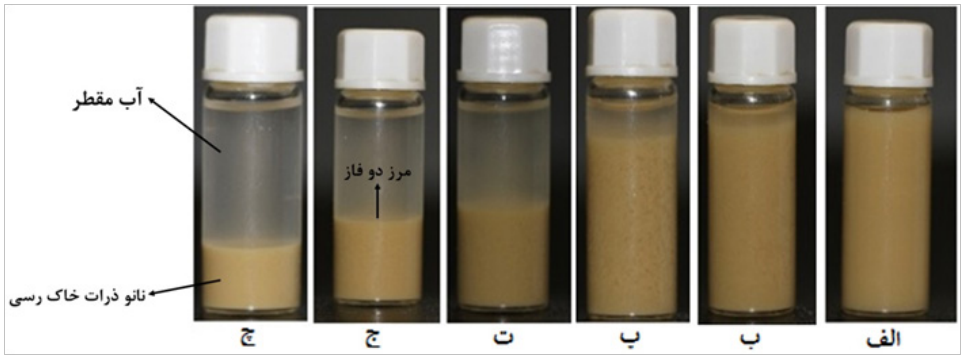
۳ نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های پایداری نانوسیالات، آزمایش‌های تزریق، تعیین گرانروی نانوسیالات و تعیین کشش سطحی بین نانوسیالات و نفت ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۳-۱ پایداری نانوسیالات

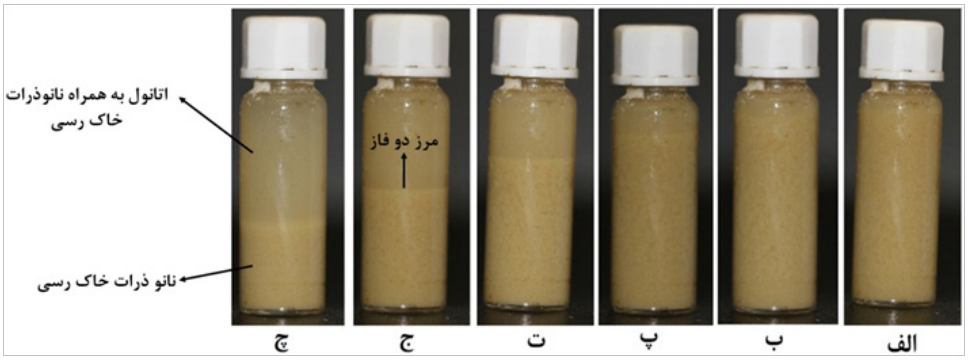
پایداری نانوسیالات یکی از عامل‌هایی است که کارایی آن‌ها را به منظور تزریق در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت و بهبود برداشت نفت از درون سنگ مخزن تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۱]. در این پژوهش بعد از ساخت هر نانوسیال توسط حمام فراصوت و قبل از تزریق آن در بستر متخلخل، حجمی از نمونه درون ظرفی نگه داشته شد تا بر حسب زمان، پایداری آن مورد بررسی قرار گیرد. پایداری نانوسیالات تا ٤٨ ساعت بعد از تهیه آن‌ها با استفاده از دوربین عکس‌برداری بررسی شده است. نتایج نشان دادند که نانوسیالات حاوی نانوذرات خاک رس پس از گذشت زمان کمی (تقریباً ٤ ساعت) رسوب داده و پایداری خود را از دست می‌دهند. اما نکته قابل توجه این است که نانوذره خاک رس در سیال پایه اتانول پایدارتر از سیال پایه آب است و مدت زمان بیشتری در سیال پایه به صورت پراکنده و توزیع شده حضور دارد که این امر در نتایج مربوط به آزمایش تزریق و برداشت نفت نیز به خوبی خود را نشان داده است. دلیل این موضوع، خاصیت آب‌گریزی است که نانوذارت خاک رس دارند. نتایج پایداری نانوسیالات در ۳ درصد وزنی در شکل‌های۳ و ٤ نشان داده شده است. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که برای استفاده از نانوذرات خاک رس در فرایند ازدیاد برداشت نفت،

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



شکل ۳- پایداری نانوسیالات ۳% وزنی با سیال پایه آب بر حسب گذر زمان - الف: لحظه اولیه، ب: بعد از ۱ساعت پ: بعد از ۲ساعت، ت: بعد از ٦ ساعت، ج: بعد از ٢٤ساعت، چ: بعد از ٤٨ ساعت

به منظور جلوگیری از ته‌نشینی و حفظ پایداری آن‌ها در سیال پایه، سطح این نانوذرات اصلاح شود تا بر مشکلات عدم پایداری آن‌ها غلبه کرد. سطح نانوذرات را می‌توان با روش‌های مختلفی از قبیل مکانیکی، عملیات حرارتی، لیزر، پرتوالکترونی، کاشت یونی، پلیمری‌شدن پلاسما، رسوب فیزیکی و شیمیایی بخار و اتصال‌های عامل یا صلاح کرد. با اصلاح سطح نانو ذرات، خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوتی را می‌توان در سطح آن‌ها ایجاد کرد [۲۲ و ۲۳]. برای بهبود پایداری نانوذرات خاک رس در سیال پایه اتانول باید سطح آن‌ها را آب‌گریز یا چربی‌دوست کرد. به همین دلیل راهکارهای مختلفی مانند استفاده از لیگاندهایی چون سیلان‌ها واسیدهای کربوکسیلی برای تولید نانو کریستال‌های قطبی می‌تواند مفید باشد. همچنین از اسیدهای مناسب برای فعال شدن سطح قبل از اتصال لیگاند، برای بهتر برقرارشدن پیوند بین سطح نانوذرات ومولکول‌های زنجیره کوتاه وهمچنین ازمونومرها، پلیمرهای مختلف مانند سیلان‌ها وپلیمرهای طبیعی برای اصلاح سطح نانوذرات به منظور تغییر شیمیایی درسطح آن‌ها و جلوگیری از کلوخه شدن آن‌ها و همچنین موادفعال سطحی کاتیونی از قبیل آمونیوم که به راحتی از طریق تبادل کاتیونی در فضای بین لایه‌ای نانوذرات خاک رس می‌نشینند، می‌توان استفاده کرد [۲۲ و ۲۳]. همچنین لازم به یادآوری است که چون آزمایش‌های تزریق در این پژوهش بلافاصله پس از تهیه نانوسیالات انجام شده‌اند، به همین دلیل مشکلات عدم پایداری نانوسیالات در این پژوهش بر روی نتایج



شکل ٤- پایداری نانوسیالات ۳% وزنی با سیال پایه اتانول بر حسب گذر زمان - الف: لحظه اولیه، ب: بعد از ۱ساعت پ: بعد از ۲ساعت، ت: بعد از ٦ ساعت، ج: بعد از ٢٤ساعت، چ: بعد از ٤٨ ساعت

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

جدول ۳- نتایج تزریق آب مقطر و نانوسیال خاک رس/آب مقطر

آزمایش	مدت زمان میان‌شکنی سیال تزریقی (دقیقه)	میزان برداشت تا زمان میان-شکنی سیال تزریقی (٪)	میزان برداشت نهایی (٪)
تزریق آب	۱۱۴	۳۵	۳۷
تزریق نانوسیال ۰٫۱٪ وزنی	۱۲۸	۳۹/۵	۴۲

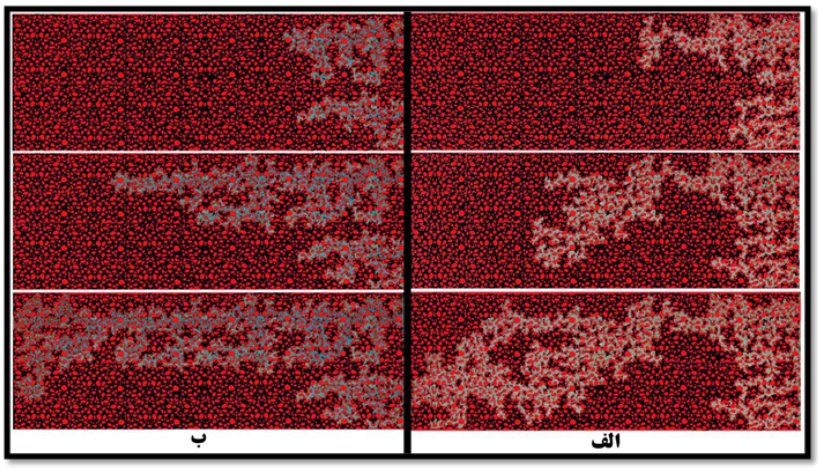
ضریب برداشت نفت تأثیری نداشته است و به عبارت دیگر به احتمال زیاد در زمان انجام آزمایش‌های تزریق، نانوسیالات پایداری خود را از دست نداده بودند.

۲-۳ بررسی اولیه کارایی نانوذره خاک رس

در این تحقیق برای اولین بار از نانوذرات خاک رس به منظور ازدیاد برداشت نفت، استفاده شده است. برای اطمینان از کارایی این نانوذره، آزمایش تزریق نانوسیال خاک رس/آب مقطر در غلظت ۱% وزنی از نانوذره خاک رس در الگوی میکرو مدل خطی ماسه‌سنگی انجام پذیرفت. میکرو مدل شیشه‌ای از نفت به طور کامل اشباع شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ با گذشت زمان میزان توسعه عرضی جبهه تزریقی و در نتیجه برداشت نفت در تزریق نانو سیال آب/خاک رس نسبت به تزریق آب به تنهایی افزایش یافته است. در تزریق آب، نفت موجود در قسمت زیرین بستر متخلخل دست نخورده باقی‌مانده و آب از بالای بستر به بخش خروجی محیط متخلخل رسیده است. اما در تزریق نانو سیال آب/خاک رس، جبهه سیال تزریقی تمایل بیشتری به پخش‌شدگی داشته و نفت بیشتری را در راستای حرکت خود جابجا کرده است. همچنین نتایج ضریب برداشت نهایی نفت، زمان میان‌شکنی و میزان برداشت در زمان میان‌شکنی در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، زمان میان‌شکنی در فرایند تزریق آب مقطر سریع‌تر اتفاق افتاده است و به تبع آن ضریب برداشت نفت در این زمان در فرایند تزریق آب کمتر از تزریق نانو سیال ۱% وزنی خاک رس است.

۳-۳ آزمایش‌های اصلی

دو سیال پایه آب و اتانول به عنوان سیال‌های امتزاج‌ناپذیر با نفت مورد استفاده قرار گرفته و نانوذرات خاک رس در سه درصد وزنی صفر، ۳% و ۵% درون سیالات پایه نام برده توزیع گشته و به میزان ۱/۲ حجم منافذ از



شکل ۵- مقایسه تزریق الف) نانوسیال خاک رس/آب مقطر ۱% وزنی و ب) آب مقطر

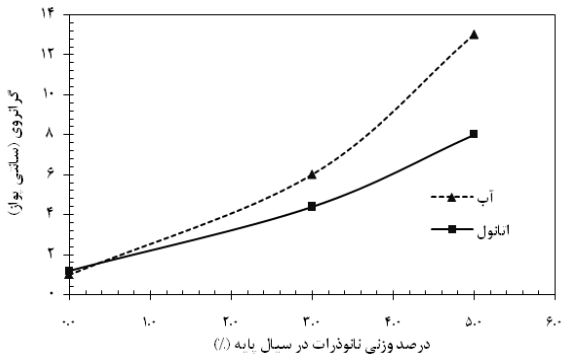
[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

سیالات تزریقی به درون محیط متخلخل تزریق شده و نتایج ضریب برداشت نهایی نفت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ابتدا به منظور یافتن سازوکار اثر نانوذرات در فرایند ازدیاد برداشت نفت، نتایج تغییرات گرانروی و کشش سطحی بین نانوسیال و نفت اندازه‌گیری شد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱-۳-۳ تعیین گرانروی نانوسیالات

نتایج تعیین گرانروی نانوسیالات نشان می‌دهد که تغییرگرانروی سیال تزریقی با اضافه کردن نانوذرات باعث بهبود نسبت پویایی سیال تزریقی و تشکیل جبهه سیال یکنواخت‌تری می‌شود که به تبع آن حجم بیشتری از محیط متخلخل در تماس با سیال تزریقی خواهد بود. لذا بدین منظور با استفاده از گرانروی‌سنج بروکفیلد، اثر گرانروی نانوسیالات به عنوان یکی از متغیرهای مهم سیال تزریقی در فرایند ازدیاد برداشت نفت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش تعیین گرانروی نانوسیالات در دو سیال پایه مختلف در شکل ٦ نشان داده شده است.

همان‌طور که از نتایج آزمایش تعیین گرانروی مشاهده می‌شود، بیشترین میزان افزایش گرانروی در حضور نانو ذرات خاک رس در سیال پایه آب بوده که گرانروی آب تا۱۳سانتی پواز با اضافه کردن ۵ درصد وزنی ازنانو ذرات خاک رس افزایش یافته است. هم‌چنین قابل توجه است که افزایش گرانروی در حضور نانوذرات در سیال پایه اتانول کمتر از آب است. این امر به این دلیل است که نانوذرات در درصدهای وزنی برابر در سیالات پایه توزیع شده‌اند و به دلیل اینکه سیال پایه اتانول، چگالی کمتری نسبت به آب دارد، لذا غلظت نانوذرات در سیال پایه آب بیشتر از سیالات دیگر بوده و به همین دلیل تأثیرنانوذرات بر افزایش گرانروی در آب بیشتر از اتانول است. مطالعه قبلی صورت گرفته درزمینه تغییر گرانروی نانو سیالات مختلف، موید این موضوع است که افزایش گرانروی نانوسیالات از فرمول‌های متداول مانند رابطه انیشتین پیروی نمی‌کند و همچنین نرخ افزایش گرانروی برای سیالات پایه با گرانروی کمتر مانند آب بیشتر از سیالات پایه با گرانروی بیشتر مانند اتانول است [٢٤].



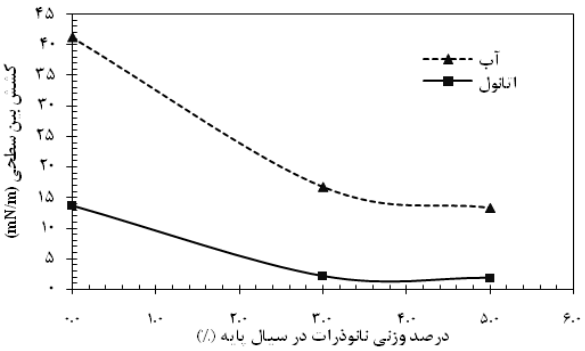
شکل ٦- تغییر گرانروی آب و اتانول بر حسب درصد وزنی نانوذرات خاک رس

۲-۳-۳ تعیین کشش بین سطحی نانوسیالات و نفت درجا

طبق مطالعات موجود در زمینه افزودن نانوذرات به سیالات پایه و استفاده از آن‌ها در ازدیاد برداشت نفت، کشش بین سطحی سیالات پایه و نفت درجا با افزودن نانوذرات کاهش یافته و در واقع این کاهش یکی از سازوکارهای مؤثردر بهبود برداشت نفت و حرکت راحت‌تر آن به سمت چاه تولیدی است [١٥]. به همین منظور کشش بین سطحی سیالات تزریقی و نفت مورد بررسی گرفت. مشاهدات این پژوهش، تأییدی بر مطالعات قبلی بوده و نشان داد که با افزودن نانوذرات،میزان کشش سطحی بین نفت و سیالات امتزاج‌ناپذیر کاهش می‌یابد. نتایج تغییرات کشش بین سطحی آب و اتانول با نفت بر حسب درصد وزنینانو ذرات خاک رس در شکل ٧ نشان داده است.

همان‌طور که از شکل ٧ مشخص است، کاهش کشش سطحی بین سیال تزریقی و نفت در درصد وزنی‌های کمتر نانوذرات، بسیار قابل ملاحظه‌تر از درصدهای وزنی بالاتر است. به عنوان مثال با اضافه کردن ٣ درصد وزنی نانوذرات خاک رس به آب، کشش بین سطحی از ٤١/٢٥ به ١٦ /٨١ mN/m کاهش می‌یابد؛ ولی با اضافه کردن نانوذرات از ٣ به ٥ درصد وزنی، کشش بین سطحی تقریباً ٣/٤ mN/m کاهش می‌یابد. این امر نشان دهنده این است که اثر نانوذرات در کاهش

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



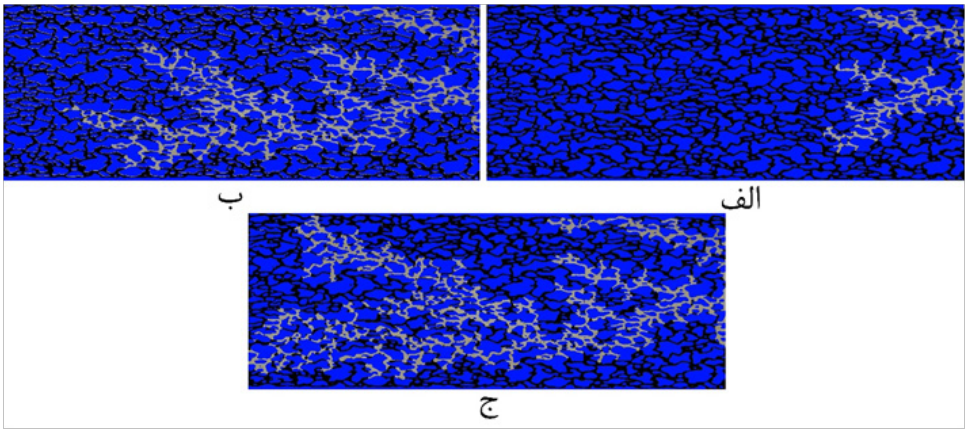
شکل ۷- کشش بین سطحی آب و اتانول با نفت بر حسب درصد وزنی نانوذرات خاک رس

کشش سطحی بین سیال تزریقی و نفت در غلظت‌های پایین‌تر، بیشتر است. این پدیده به این دلیل است که در غلظت‌های بالا از نانوذرات در سیال تزریقی، تعداد نانوذرات در فصل مشترک دو سیال (سیال تزریقی و نفت) بیشتر می‌شود و تقریباً فصل مشترک دو سیال را نانوذرات تشکیل خواهند داد. از این طریق نیروی لازم برای آوردن مولکول‌ها از توده سیال به فصل مشترک دو سیال بیشتر می‌شود. لذا نیروی کشش بین سطحی دو سیال از مقدار مشخصی از نانوذرات به بعد دیگر تغییر نخواهد کرد. همچنین اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه آب، توانایی بیشتری نسبت به سیال پایه اتانول در کاهش کشش بین سطحی دارد.

۳-۳-۳ تزریق آب

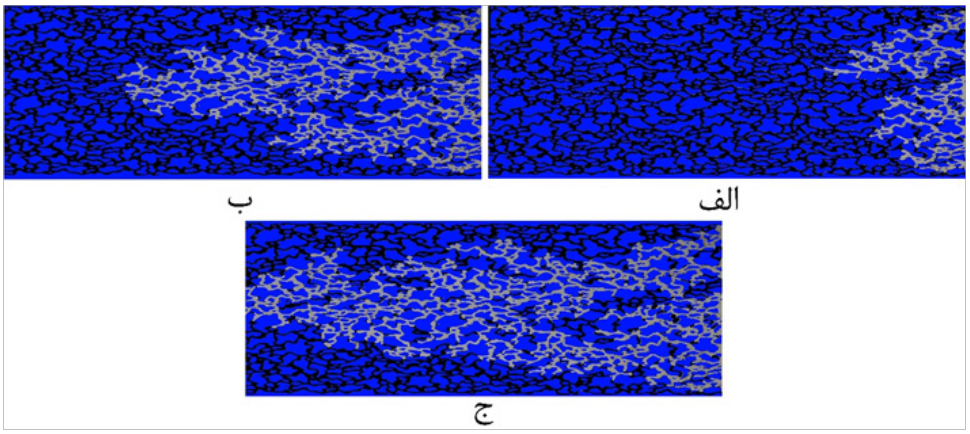
به منظور بالا بردن تشابه شرایط آزمایش با شرایط مخزن و همچنین بررسی بهتر پدیده‌های حاکم بر بستر متخلخل مانند پدیده انگشتی شدن، برای انجام آزمایش‌های اصلی تزریق ازطرح نامنظمی که تا حدی بیانگر ناهمگنی توزیع حفرات ومسیرهای مخازن کربناته است، استفاده شد. در ابتدا به منظور مقایسه نتایج ضریب برداشت نهایی نفت در حضور و بدون حضور نانوذرات، تزریق آب مقطر به تنهایی در میکرو مدل انجام شد. تصاویر ماکروسکوپی از فرایند تزریق آب مقطر در زمان‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در تزریق آب مقطر به تنهایی، پدیده انگشتی شدن بیشتر اتفاق می‌افتد و با ادامه فرایند تزریق، این پدیده رشد کرده و حجم زیادی از نفت درجای محیط متخلخل دست نخورده باقی‌مانده و در معرض جبهه سیال تزریقی قرار نگرفته است. در واقع با توجه به تصاویر گرفته شده از فرایند تزریق، میزان توسعه عرضی جبهه سیال تزریقی بسیار کم بوده که باعث کاهش بازده جاروبی و در نتیجه میزان تولید اندک نفت شده است. از علل پایین بودن میزان تولید نفت می‌توان به نامناسب بودن نسبت تحرک آب و نفت اشاره کرد که این به دلیل



شکل ۸- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق آب مقطر، الف) بعد از ۵ دقیقه، ب) بعد از ۲۰ دقیقه، ج) برداشت نهایی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



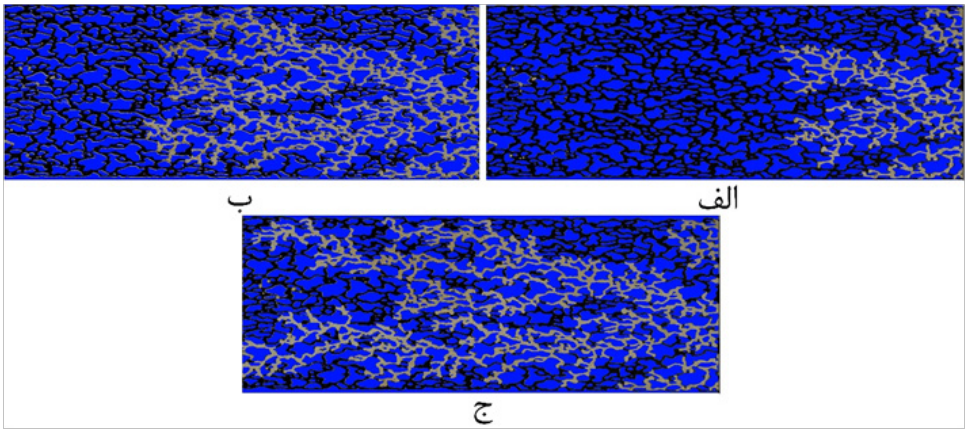
شکل ۹- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/آب مقطر ۳%، الف) بعد از ۵ دقیقه، ب) بعد از ۲۰ دقیقه، ج) برداشت نهایی

پایین بودن میزان گرانروی سیال تزریقی است. همچنین به دلیل پدیده‌ی انگشتی شدن، میان‌شکنی سیال تزریقی (آب مقطر) به سرعت رخ داده است. میزان برداشت نهایی این فرایند پس از تزریق ۱/۲ PV برابر با ۳۲/۸% است.

۴-۳-۳ تزریق آب به همراه نانوذرات خاک رس

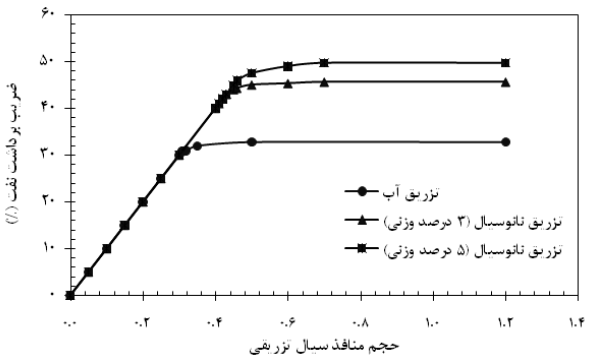
در ادامه نانوذرات خاک رس نیز در درصدهای وزنی ۳ و ۵ درصد توسط دستگاه اولتراسونیک در آب مقطر توزیع شد و به درون بستر متخلخل اشباع از نفت تزریق شد. با توجه به تزریق انجام شده و نتایج مربوطه مشاهده شد که اضافه کردن نانوذرات خاک رس به آب منجر به بهبود برداشت نفت در مقایسه با تزریق آب مقطر به تنهایی می‌شوند. تصاویر ماکروسکوپی از فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/آب مقطر در درصد وزنی‌های ۳ و ۵ درصد به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰مشاهده می‌شود که جبهه سیال تزریقی نسبت به تزریق آب یکنواخت‌تر و پیستونی‌تر حرکت کرده است و حجم بیشتری از محیط متخلخل در تماس با سیال تزریقی بوده است. به همین دلیل بازدهی جاروبی در این فرایند بیشتر بوده است. یکنواخت‌تر بودن جبهه سیال تزریقی در این فرایند، نشان‌دهنده بیشتر بودن گرانروی نانوسیال خاک رس/آب مقطر نسبت به آب مقطرخالص است که در آزمایش‌های تعیین گرانروی نیز نتایج به همین صورت



شکل ۱۰- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/آب مقطر ۵%، الف) بعد از ۸ دقیقه، ب) بعد از ۲۲ دقیقه، ج) برداشت نهایی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



شکل ۱۱- ضریب برداشت نفت بر حسب حجم سیال تزریقی در فرایند تزریق آب و نانوسیال بر پایه آب

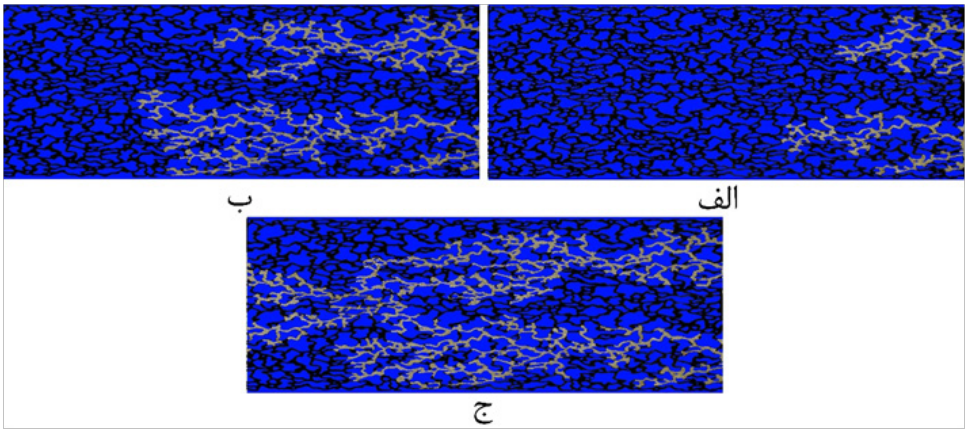
بوده است. در واقع نانوذرات خاک رس به علت داشتن ذرات کوچک‌تر توانایی بیشتری در کاهش کشش بین سطحی داشته و هم‌چنین گرانروی سیال تزریقی را به میزان بیشتری افزایش می‌دهند. به همین دلیل میزان نفت بیشتری در این فرایند در مقایسه با تزریق آب به تنهایی برداشت می‌شود. اگر چه در طول فرایند تزریق نانوسیالات در این پژوهش، نانوسیالات پایدار بوده‌اند اما به این نکته نیز باید توجه کرد که این نانوسیال به علت پایداری نامناسب، کارایی خود را در طول فرایند تزریق در عملیات میدانی که زمان تزریق بالایی نیاز دارند، از دست می‌دهد. به همین دلیل در مطالعات آتی باید راهی برای پایدار نگه‌داشتن این ذرات در سیال پایه در شرایط مخزن پیدا کرد. میزان برداشت نهایی نانوسیال خاک رس/آب در درصد وزنی ۳ % و ۵ % از نانوذره به ترتیب ٤٥/٦% و ٤٩/٧% بوده است. نتایج کمی ضریب برداشت نفت در فرایندهای تزریق مربوط به نانوسیالات پایه آبی در شکل ۱۱ نشان داده است.

۵-۳-۳ تزریق اتانول

اتانول به عنوان سیال پایه امتزاج‌ناپذیر دیگر مورد استفاده قرار گرفته و نانوذرات خاک رس در درصد وزنی ۳ و ۵ در این سیال نیز توزیع گشته و به درون بستر متخلخل تزریق شدند. بدین منظور مشابه تزریق سیال پایه آب، اتانول به تنهایی نیز درون بستر متخلخل تزریق شده تا نتایج تزریق اتانول همراه با نانوذرات را با آن مقایسه کرده و کارایی نانوذرات را در بهبود برداشت نفت بررسی کرد.

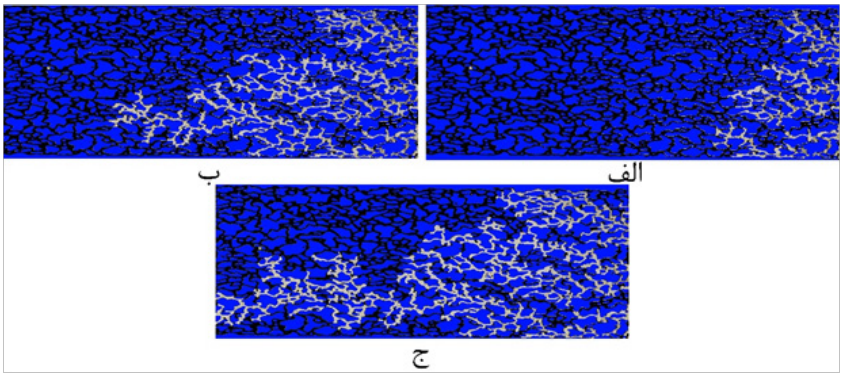
نتایج نشان دادند که تزریق اتانول به تنهایی توانایی بیشتری در برداشت نفت درجا نسبت به تزریق آب دارد. این به دلیل کشش بین سطحی کمتر اتانول نسبت به آب (طبق نتایج ذکر شده در شکل۷) است. در شکل ۱۲ تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق اتانول به تنهایی در زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، به علت گرانروی پایین این سیال همانند آب، جبهه سیال تزریقی از پیوستگی مطلوبی برخوردار نبوده و پدیده انگشتی شدن نیز در این فرایند اتفاق می‌افتد و بخش



شکل ۱۲- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق اتانول، الف) بعد از ۵ دقیقه، ب) بعد از ۱۸ دقیقه، ج) برداشت نهایی.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



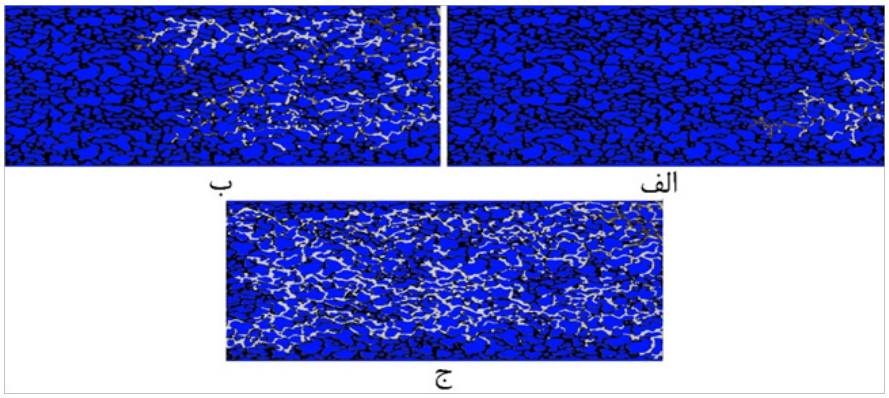
شکل ۱۳- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/اتانول ۳%، الف) بعد از ۸ دقیقه، ب) بعد از ۱۵ دقیقه، ج) برداشت نهایی

عظیمی از نفت درجا دست‌نخورده باقی‌مانده است. با تزریق اتانول به تنهایی میزان ۳۶% از نفت درجای بستر متخلخل تولید شده است که نسبت به آب مقطر که سیال ارزان‌تری است تنها ۳/۲ درصد بیشتر است. بالاتر بودن میزان برداشت نفت در این فرایند نسبت به تزریق آب به علت کشش بین سطحی کمتر اتانول و نفت نسبت به کشش بین سطحی آب و نفت بوده که ناشی از گروه‌های آلی موجود در ساختار اتانول است.

۶-۳-۳ تزریق اتانول به همراه نانوذرات خاک رس

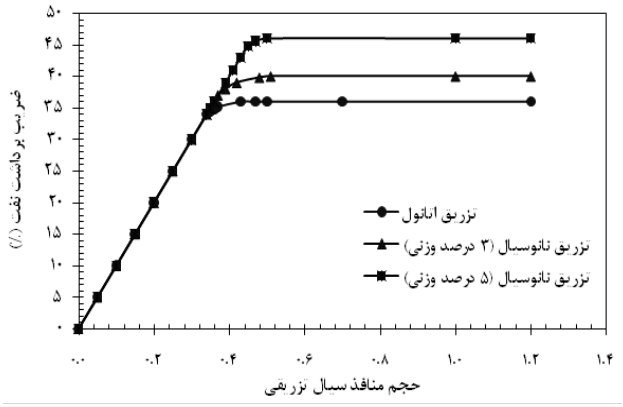
در تزریق نانوسیال خاک رس/اتانول مشاهده شد که میزان برداشت نفت نسبت به تزریق اتانول بدون نانوذره افزایش می‌یابد. سازوکارهای تولید نفت در این فرایند نیز شامل کاهش کشش بین سطحی و افزایش گرانروی سیال پایه است. تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق اتانول در درصد وزنی‌های ۳ و ۵ در زمان‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان غلظت نانوذرات در سیال پایه (اتانول) پدیده انگشتی شدن کاهش می‌یابد و سطح بیشتری از محیط متخلخل در تماس با سیال تزریقی خواهد بود و به تبع آن میزان برداشت نفت از میکرو مدل افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش‌های تعیین گرانروی و کشش بین سطحی سیال تزریقی در فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/اتانول و مقایسه آن با فرایند تزریق اتانول به تنهایی می‌توان نتیجه گرفت که بهبود برداشت نفت در فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/اتانول به علت افزایش گرانروی سیال تزریقی و کاهش کشش بین سطحی با نفت درجا است. میزان برداشت نفت در حضور این

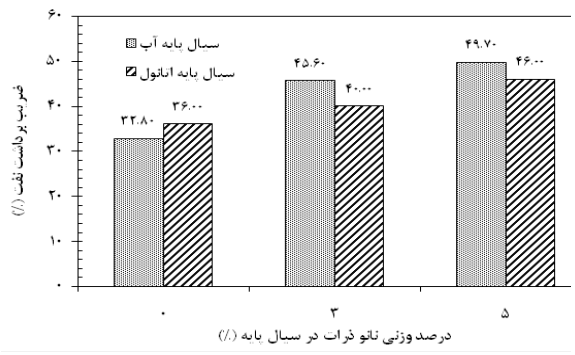


شکل ۱۴- تصاویر ماکروسکوپی فرایند تزریق نانوسیال خاک رس/اتانول ۵%، الف) بعد از ۵ دقیقه، ب) بعد از ۱۵ دقیقه، ج) برداشت نهایی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]



شکل ۱۵- ضریب برداشت نفت بر حسب حجم سیال تزریقی در فرایند تزریق اتانول و نانوسیال بر پایه اتانول



شکل ۱۶- مقایسه نتایج ضریب برداشت نهایی نفت در سیالات پایه آب و اتانول در درصد وزنی‌های مختلف

نانوذرات در اتانول پس از تزریق PV ۱/۲ از نانو سیال ۳ و ۵ درصد وزنی به ترتیب ٤٠% و ٤٦% است. میزان ضریب برداشت نفت در فرایندهای تزریق نانوسیالات بر پایه اتانول بر حسب حجم تزریقی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

به منظور داشتن مقایسه‌ای بهتر بین نتایج ضریب برداشت نفت در درصد وزنی‌های مختلف و در سیالات پایه مختلف در شکل ١٦ نتایج ضریب برداشت نهایی نفت در سیالات پایه آب و اتانول در درصد وزنی‌های ۰، ۳ و ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ١٦ نشان داده شده است، در عدم حضور نانوذرات ضریب برداشت نفت در تزریق اتانول بیشتر از تزریق آب است. این پدیده به دلیل کشش بین سطحی کمتر اتانول با نفت در مقایسه با آب است. اما با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه، ضریب برداشت نفت در تزریق نانوسیال آب/خاک رس بیشتر از نانوسیال تهیه شده با اتانول/خاک رس است. به عنوان مثال در ۵ درصد وزنی، ضریب برداشت نفت با نانوسیال پایه آبی ٤٩/٧ درصد و با نانوسیال پایه اتانولی ٤٦ درصد است. این پدیده به این دلیل است که افزودن نانوذرات خاک رس به سیال پایه آب تأثیر بیشتری در کاهش کشش بین سطحی با نفت در مقایسه با اتانول دارد. همچنین در درصد وزنی‌های یکسان از نانوذرات، چگالی نانوسیال بر پایه آب بیشتر از چگالی نانوسیال بر پایه اتانول است. لذا در هنگام تزریق در محیط متخلخل، پویایی نانوسیال بر پایه آب بهتر خواهد بود و جبهه سیال یکنواخت‌تری را تشکیل خواهد داد و در نهایت سطح بیشتری از محیط متخلخل در تماس با سیال تزریقی خواهد شد. لذا استفاده از نانوذرات خاک رس در سیال پایه آب مؤثرتر از سیال پایه اتانول است.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از نانوذرات خاک رس در ازدیاد برداشت نفت به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. از دو سیال پایه مختلف شامل آب و اتانول برای تهیه نانوسیالات استفاده شد. نتایج ضریب برداشت نهایی در تزریق آب و اتانول به تنهایی و نانوسیال‌های تهیه شده با این سیالات در درصد وزنی‌های ۳ و ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه به صورت خلاصه به شرح زیر است:

• نانوسیالات حاوی نانوذره خاک رس پایداری مطلوبی نداشته و پس از گذشت زمان کمی رسوب داده و پایداری خود را از دست می‌دهند. نانوذره خاک رس در سیال پایه اتانول پایدارتر از سیال پایه آب است و

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

مدت زمان بیشتری در سیال پایه به صورت پراکنده و توزیع شده حضور دارد. لذا برای غلبه بر مشکلات عدم پایداری این نانوذرات، سطح آن‌ها باید اصلاح شود.

• افزایش گرانروی در حضور نانوذرات در سیال پایه اتانول کمتر از آب است. بیشترین میزان افزایش گرانروی در حضور نانوذره خاک رس در سیال پایه آب بوده که گرانروی آب تا ۱۳ سانتی پواز با اضافه کردن ۵ درصد وزنی نانوذرات خاک رس افزایش یافته است.

• با افزودن نانوذره میزان کشش بین سطحی نفت و سیالات امتزاج‌ناپذیر با نفت کاهش می‌یابد.

• کاهش کشش بین سطحی بین سیال و نفت در درصد وزنی‌های کمتر نانوذرات بسیار قابل ملاحظه‌تر از درصدهای وزنی بالاتر است.

• میزان برداشت نهایی تزریق آب به تنهایی پس از تزریق، ۱/۲ PV برابر با ۳۲/۸% است. همچنین میزان برداشت نهایی نانو سیال خاک رس/آب در درصد وزنی ۳% و ۵% از نانوذره به ترتیب ٤٥/٦% و ٤٩/٧% بوده است. دلیل این امر آن است که در واقع با اضافه کردن نانوذرات خاک رس به سیال پایه، به علت اندازه بسیار ریز، این ذرات توانایی بیشتری در کاهش کشش بین سطحی دارند و گرانروی سیال تزریقی را به میزان بیشتری افزایش می‌دهد. همچنین با اضافه کردن نانوذرات خاک رس به سیال پایه، از یک طرف چگالی سیال تزریقی تغییر و در نتیجه حرکت سیال تزریقی درون محیط متخلخل بهبود می‌یابد وسیال تزریقی با جبهه یکنواخت‌تری در محیط متخلخل حرکت خواهد کرد و سطح بیشتری از محیط متخلخل با آن در تماس خواهد بود.

• با تزریق اتانول به تنهایی میزان ٣٦% از نفت درجای بستر متخلخل تولید شده است که نسبت به آب مقطر که سیال ارزان‌تری است تنها ۳/۲ درصد بیشتر است. این به علت کشش بین سطحی کمتر اتانول و نفت نسبت به کشش بین سطحی آب و نفت بوده که ناشی از گروه‌های آلی موجود در ساختار اتانول است.

• استفاده از نانوذرات خاک رس در سیال پایه آب مؤثرتر از سیال پایه اتانول است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران به دلیل حمایت‌های مالی از انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

مراجع

۱۰- میثم حقگو و آرزو جعفری، بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای شکاف بر بازده جاروب نفت حین تزریق نانوسیال،پژوهش نفت،۱۵۰،٤-١٦٤، ١٣٩٦.

11- N. A. Ogolo, O. A. Olafuyi, and M. O. Onyekonwu, Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles, SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 8-11 April, 2012.

12- S. Al-Anssari, A. Barifcani, S. Wang, and S. Iglauer, Wettability Alteration of Oil-Wet Carbonate by Silica Nanofluid, J. Colloid Interface Sci.,461, 435–442, 2016.

13- N. Cao, M. A. Mohammed, and T. Babadagli, Wettability Alteration of Heavy-Oil-Bitumen-Containing Carbonates by Use of Solvents, High-pH Solutions, and Nano/Ionic Liquids, SPE Reserv. Eval. &Eng., 20, 9, 2016.

14- L. Hendraningrat and O. Torsæter, Effects of The Initial Rock Wettability on Silica-Based Nanofluid-Enhanced Oil Recovery Processes at Reservoir Temperatures,Energy & Fuels, 28, 6228–6241, 2014.

15- G. Cheraghian and L. Hendraningrat, A Review on Applications of Nanotechnology in the Enhanced Oil Recovery Part A: Effects of Nanoparticles on Interfacial Tension, Int. Nano Lett., 6, 129–138, 2016.

16- A. Bera and H. Belhaj, Application of Nanotechnology by Means of Nanoparticles and Nanodispersions in Oil Recovery-A Comprehensive Review, J. Nat. Gas Sci. Eng., 34,1284–1309, 2016.

17- M. H. Sedaghat, H. Mohammadi, and R. Razmi, Application of SiO_2 and TiO_2 Nano Particles to Enhance the Efficiency of Polymer-Surfactant Floods, Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.,38, 22–28, 2016.

18-V. A. Lifton, Microfluidics: an Enabling Screening Technology for Enhanced Oil Recovery (EOR),Lab

1- J. Sheng, Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. Gulf Professional Publishing, Gulf Professional Publishing, USA, 648, 2010.

2- S. M. Ali and S. Thomas, The Promise and Problems of Enhanced Oil Recovery Methods, J. Can. Pet. Technol., 35, 7, 1996.

3- H. C. Lau, M. Yu, and Q. P. Nguyen, Nanotechnology for Oilfield Applications: Challenges and Impact, J. Pet. Sci. Eng., 157, 1160-1169, 2017.

4- M. Sabet, S. N. Hosseini, A. Zamani, Z. Hosseini, and H. Soleimani, Application of Nanotechnology for Enhanced Oil Recovery: A Review, Defect and Diffusion Forum, 367,149-156, 2016.

5- M. Amanullah and A. M. Al-Tahini, Nanotechnologyits Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application, SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, Al-Khobar, Saudi Arabia, 9-11 May,2009.

6- B. A. Suleimanov, F. S. Ismailov, and E. F. Veliyev, Nanofluid for Enhanced Oil Recovery, J. Pet. Sci. Eng., 78, 431–437, 2011.

7- G. Cheraghian, Application of Nano-Fumed Silica in Heavy Oil Recovery, Pet. Sci. Technol., 34, 12–18, 2016.

8- M. Barahoei, Z. A. Hezave, S. Sabbaghi, and S. Ayatollahi, Copper Oxide Nano-Fluid Stabilized by Ionic Liquid for Enhancing Thermal Conductivity of Reservoir Formation: Applicable for Thermal Enhanced Oil Recovery Processes, Chem. Ind. Chem. Eng. Q., 22, 211−225, 2016.

9- R. Gharibshahi, A. Jafari, A. Haghtalab, and M. S. Karambeigi, Application of CFD to Evaluate Pore Morphology Effect in the Nanofluid Flooding for Enhanced Oil Recovery,RSC Adv.,5, 28938–28949, 2015.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]

Chip, 16, 1777–1796, 2016.

19- D. Ross-Coss, W. Ampomah, M. Cather, R. S. Balch, P. Mozley, and L. Rasmussen, An Improved Approach for Sandstone Reservoir Characterization, SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska,23-26 May, 2016.

20- S. Schlüter et al., Pore Scale Displacement Mechanisms as a Source of Hysteresis for Two Phase Flow in Porous Media, Water Resour. Res., 52, 2194–2205, 2016.

21- A. J. Hojat Allah Yousefvand, Stability and Flooding Analysis of Nanosilica/ NaCl /HPAM/SDS Solution for Enhanced Heavy Oil Recovery, J. Pet. Sci. Eng., vol. accepted, 2017.

22- P. Liu, Polymer Modified Clay Minerals: A Review, Appl. Clay Sci.,38, 64–76, 2007.

23- F. Bergaya and G. Lagaly, Surface Modification of Clay Minerals, Elsevier, 2001.

24-N. Jamshidi, M. Farhadi, D. D. Ganji, and K. Sedighi, Experimental Investigation on Viscosity of Nanofluids, Int. J. Eng., 25, 201–209, 2012.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-04-26]