

بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای شکاف بر بازده جاروب نفت حین تزریق نانوسیال

میثم حقگو و آرزو جعفری*

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۲۴

چکیده

فن آوری جدید و منحصر به فرد نانو این ظرفیت و پتانسیل را دارد که تغییرات چشم گیری در حوزه های متنوع نفت و گاز ایجاد نماید و تحقیقات اخیر نشان داده است که حضور نانوذرات در آب تزریقی به میادین نفتی باعث افزایش بازیافت نفت می شود. از آنجایی که تولید از مخازن شکاف دار سهم قابل توجهی از تولید نفت در دنیا را به خود اختصاص داده است؛ در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف شکاف از قبیل: طول، زاویه، موقعیت و تعداد شکاف هنگام تزریق نانوسیال حاوی ۱ درصد وزنی نانوذره سیلیکا در مجموعه میکرومدل بررسی شد. قبل از تزریق، بررسی های مرتبط با پایداری نانوسیال های مورد استفاده که شامل آب مقطر و محلول حاوی ۱ درصد وزنی نانوذره سیلیکا و محلول حاوی ۱ درصد وزنی نانوذره سیلیکا و ۳ درصد وزنی نمک NaCl بودند، به صورت کیفی و کمی انجام شد و نتایج نشان دهنده پایداری مناسب نانوذره سیلیکا می باشد. پس از طراحی و ساخت میکرومدل های مختلف و نیز تهیه سیالات بمنظور تزریق درون میکرومدل، فرآیند تزریق توسط دوربین عکس برداری شد. با توجه به آنالیز تصویرهای گرفته شده در بازه های زمانی مشخص میزان بازیافت نفت در هر فرآیند تزریق محاسبه می شود. همچنین بمنظور بررسی مکانیسم های موثر بر ازدیاد برداشت نفت اندازه گیری های مرتبط با گرانشی سیال تزریقی و میزان کشش میان سطحی انجام گرفته است. بررسی داده های میکروسکوپی تاثیر نانوذره بر تغییر ترشوندگی محیط به حالت آبدوست در بخش هایی از میکرومدل را نشان می دهد که این امر باعث افزایش ضریب بازیافت میکروسکوپی نفت می شود. نتایج آزمایشگاهی حاصل از مطالعه پارامترهای موثر شکاف ثابت می کند که با افزایش طول شکاف از ۲ به ۶ cm میزان بازیافت نفت تا ۸/۴۲٪ هنگام تزریق آب مقطر کاهش یافته است و وجود شکاف های عمود بر مسیر جریان میزان بازیافت نفت بیشتری به میزان ۳/۳۸٪ را برای حالت تزریق نانوسیال حاوی نانوذره سیلیکا نشان داد. همچنین هرچه شکاف به محل تولید نفت نزدیک تر باشد میزان تولید نفت بیشتر می شود و وجود دو شکاف موازی نیز تولید نفت را به میزان ۴/۲٪ افزایش داده است.

کلمات کلیدی: شکاف، پایداری، نانوذره سیلیکا، ازدیاد برداشت نفت، تغییر ترشوندگی.

مقدمه

بازده کلی هر روش ازدیاد برداشت نفت شامل دو بخش بازده جابه‌جایی میکروسکوپی و ماکروسکوپی است [۱] که مقدار جابه‌جایی کلی برابر با حاصل‌ضرب جابه‌جایی میکروسکوپی و ماکروسکوپی می‌باشد. بازده جابه‌جایی میکروسکوپی مرتبط به جابه‌جایی نفت در مقیاس خلل و فرج است و بازده جابه‌جایی ماکروسکوپی با میزان تماس سیال جابه‌جا شونده در مخزن در یک دید حجمی مرتبط می‌شود [۲]. در روش سیلاب‌زنی آب، به دلیل زیاد بودن کشش سطحی بین آب و نفت در محیط متخلخل و پایین بودن ویسکوزیته آب، بازیافت نفت کم است [۳]. لازم به ذکر است که نیروی موینگی یکی از عوامل بدام افتادن نفت در حفرات محیط متخلخل می‌باشد. نیروی موینه به دلیل وجود کشش سطحی در مایعات به وجود می‌آید که کاهش کشش سطحی بین سیالات درون محیط متخلخل، باعث افزایش عدد موینگی و در نتیجه کاهش نیروهای موینگی و اشباع نفت باقیمانده می‌گردد [۴]. شایان ذکر است که نانوذرات با تأثیر بر نیروهای موینه و کاهش میزان نفت باقیمانده^۱، بازیافت میکروسکوپی نفت را افزایش می‌دهند.

نانوذرات می‌توانند از طریق کاهش کشش سطحی بین سیال تزریقی و نفت [۵]، تغییر میزان ترشوندگی محیط متخلخل [۶] همچنین تشکیل خودبه‌خود امولسیون [۷] باعث آزاد شدن نفت از داخل حفره‌ها شده و به افزایش بازیافت نفت کمک کنند. در تحقیق صورت گرفته توسط زرگر و همکاران [۸] غلظت‌های ثابت نانوذره سیلیکای آب‌دوست و آب‌گریز در بازه‌ای از غلظت ماده فعال سطحی SDS مورد بررسی قرار گرفت. هندانیگرات و همکاران [۹] تأثیر مکانیسم تغییر ترشوندگی محیط با استفاده از اندازه‌گیری زاویه تماس را هنگام استفاده از نانوذره سیلیکا بررسی کردند. روستایی و همکاران [۱۰] در آزمایش‌های حاوی تزریق

نانوسیال در مغزه‌ای حاوی ۵ درصد وزنی نمک NaCl تأثیر غلظت نانوذرات بر تغییرات ترشوندگی و کشش بین سطحی را مورد بررسی قرار دادند، در این بررسی‌ها نشان داده شد که با افزایش غلظت نانوذره سیلیکا از ۱ تا ۴ درصد وزنی علاوه بر تغییر در ترشوندگی جداره‌های محیط متخلخل توانسته است میزان کشش بین سیالات را تا میزان ۱۵ برابر کاهش دهد. رفیعی نشان داد که ماده فعال سطحی کاتیونی توانسته است میزان بازیافت نفت را نسبت به استفاده از مواد فعال سطحی آنیونی و خنثی بیشتر افزایش دهد و به‌منظور بررسی اثر نانوذرات مختلف در غلظت ثابت ماده فعال سطحی کاتیونی، تأثیر بهتر نانوذره تیتانیوم مشاهده شد [۱۱]. به‌منظور انتخاب میزان غلظت نانوسیلیکای مورد استفاده رجب و همکاران نشان دادند که غلظت نانوسیلیکا تا میزان ۰/۵ درصد وزنی به افزایش بازیافت نفت در هنگام تزریق درون مغزه‌ای با تخلخل ۳۰ درصد و تراوایی ۶۴۲ mD کمک کرده است؛ اما غلظت ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا باعث کاهش اثر تغییر ترشوندگی و کشش سطحی محیط سیال و نفت می‌شود [۱۲]. در آزمایش دیگری که توسط مغزی و همکاران صورت گرفت تأثیر غلظت نانوسیلیکا از ۰/۱ درصد وزنی تا ۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوسیلیکا بر بازیافت نفت تا میزان بهینه ۳ درصد وزنی را نشان می‌دهد، اما افزایش غلظت نانوذره از ۳ به ۵ درصد وزنی سبب کاهش تراوایی عبور سیال شده و در نتیجه بازیافت نفت را کاهش می‌دهد [۱۳]. لذا در این پژوهش از غلظت ۱ درصد وزنی نانوذره سیلیکا بهره گرفته شده است.

وجود مخازن شکاف‌دار سبب شده است که مطالعه در رابطه با تزریق نانو سیال در حالت وجود شکاف انجام گیرد که این مطالعات توسط مغزه انجام گرفته است [۱۴].

نفت در فرایند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانو سیال و بررسی مکانیزم‌های تاثیرگذار هنگام استفاده از میکرومدل‌های ناهمگن دارای شکاف می‌باشد. شایان ذکر است که بر اساس تحقیقات انجام شده تا کنون؛ نانوذرات با مکانیزم‌های متفاوتی می‌توانند باعث افزایش برداشت شوند. جدول ۱ مکانیزم‌های موثر هنگام تزریق نانوسیال در حضور یا عدم حضور نمک را نشان می‌دهد. بدین منظور از آزمایش‌های اندازه‌گیری گرانشی سیال تزریقی و نیز اندازه‌گیری میزان کشش میان سطحی سیال تزریقی و نفت استفاده می‌شود. همچنین به منظور بررسی کیفی میزان تغییر ترشوندگی دیواره محیط متخلخل از آنالیز عکس‌ها در مقیاس حفره‌ها می‌توان بهره گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد و سیالات به کار رفته

در آزمایش‌های انجام شده از نانوذره سیلیکا به دلیل پایداری مناسب با خلوص ۹۸٪ بهره گرفته شده است که اندازه نانوذرات ۱۱-۱۳ nm می‌باشد. در این تحقیق سیال پایه آب مقطر بوده که در آزمایش‌های مختلف به آن نمک سدیم کلرید و نانوذره اضافه شده است. از تری کلرو متیل سیلان جهت نفت دوست کردن میکرو مدل و از تولوئن علاوه بر نفت دوست کردن میکرو مدل جهت شستشوی میکرو مدل استفاده شده است. همچنین از نفت با درجه API ۱۹ استفاده شده که گرانشی آن ۳۴۰ cp است. به طور کلی مواد استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

وجود شکاف درون میکرومدل به دلیل تراوایی بالاتر سبب ایجاد مسیرهای متفاوت سیال تزریقی و در نتیجه جاروب نفت می‌شود، با توجه به اینکه عمده مخازن موجود در کشور شکافدار می‌باشد؛ لذا تحقیقاتی در ارتباط با تزریق برخی مواد شیمیایی نظیر پلیمر و ماده فعال سطحی در حالت وجود شکاف انجام شده است [۱۵-۱۶]. کریمی و همکاران [۱۷] به منظور بررسی تاثیر ویژگی‌های شکاف بر زمان میان‌شکنی نفت از چندین میکرومدل با زوایا و طول‌های مختلف استفاده کردند، شایان ذکر است که نوع فرآیند مورد بررسی تزریق امتزاجی گاز بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش طول شکاف مسیر حرکت سیال از تزریق به تولید کوتاه‌تر می‌شود. رزمی و همکاران از میکرومدل‌هایی مشابه که دارای شکاف‌هایی با طول، زاویه و تعداد متفاوتی بودند جهت تزریق ماده فعال سطحی با غلظت‌های مختلف استفاده کردند و مشاهده شد وجود شکاف باعث کاهش زمان میان‌شکنی نفت می‌شود و در نهایت مدلی که دارای زاویه عمود بر راستای جریان می‌باشد، بازیافت نفت بیشتری را باعث می‌شود [۱۸]. در تحقیقی که توسط فرزانه و همکاران [۱۹] صورت گرفته است از دو میکرومدل با ساختار مربع و لوزی استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا زاویه شکاف که تاثیر بیشتری بر میزان بازیافت دارد مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه در شکاف‌هایی با طول یکسان بررسی شد. از آنجایی تاکنون تاثیر پارامترهای شکاف همزمان با تزریق نانوسیال بررسی نشده است؛ هدف اصلی این تحقیق تاثیر پارامترهای شکاف بر میزان بازیافت

جدول ۱ مکانیزم‌های تاثیرگذار بر بازیافت نفت.

نوع مکانیزم	علت	مراجع
افزایش گرانشی سیال تزریقی	با حضور نانوذرات به همراه نمک گرانشی سیال تزریقی تغییر می‌کند	اوگلو و همکاران [۲۰]
کاهش کشش بین سطحی	حضور نمک یا نانوذره در سطح تماس سیال تزریقی با نفت	روستایی و همکاران [۱۰]، رزمی و همکاران [۱۸]
تغییر ترشوندگی دیواره داخلی مدل	برهم کنش و جذب نانوذرات به دیواره مدل یا وجود فشار جداسازی ساختاری	هندانینگرت و همکاران [۹]، روستایی و همکاران [۱۰]، مغزی و همکاران [۱۳]

جدول ۲ مشخصات مواد مورد استفاده.

ماده	وزن مولکولی (g/mol)	چگالی (g/cm ³)	شرکت سازنده
نانوذره سیلیکا	۶۰/۰۸	۲/۴	US-NANO
نمک (سدیم کلرید)	۵۸/۴۴	۲/۱۶	Merck
تری کلرو متیل سیلان	۱۴۹/۴۷	۱/۲۷۳	Merck
تولوئن	۹۲/۱۴	۰/۸۷	مجتمع صنایع شیمیایی مجلی
متانول	۳۲/۰۴	۰/۷۹	Merck
سود	۴۰	۲/۱۳	Merck
آب مقطر	۱۸	۱	-

آماده‌سازی نانوسیالات

در آزمایش‌های تزریق، دو سیال که یکی حاوی نانوذره و دیگری بدون نانوذره است استفاده شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها از ترازی دیجیتالی با دقت ۰/۱ mg جهت وزن کردن و از همزن مغناطیسی استفاده شده است. برای تهیه محلول حاوی نانوذره مراحل زیر انجام می‌شود:

ابتدا نانوذره سیلیکا با درصد وزنی مشخص به مدت ۲۰ دقیقه توسط همزن مغناطیسی با دور ۵۰۰ rpm درون آب مقطر هم‌زده می‌شود، در مرحله‌ای بعد نانو سیال به مدت ۴۵-۶۰ min توسط دستگاه التراسونیک (۴۰۰ W، ۲۰ kHz) سونیک می‌شود. در صورت استفاده از نمک ابتدا سدیم کلرید با غلظت مشخص به آب مقطر اضافه شده و تا انحلال کامل با همزن مغناطیسی هم زده می‌شود سپس مراحل گفته شده به‌منظور افزودن نانوذره تکرار می‌شود.

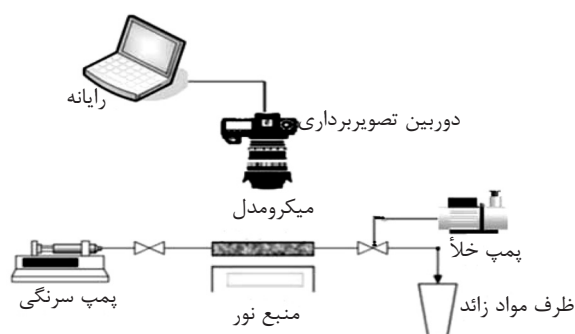
شرح دستگاه

به‌منظور بررسی تأثیر نانوسیال در فرآیند ازدیاد برداشت نفت در این تحقیق از سامانه میکرومدل (شکل ۱) استفاده شده است. قبل از هر مرحله تزریق برای جلوگیری از به دام افتادن حباب‌های هوا هنگام اشباع از سیال مورد نظر باید با استفاده از پمپ خلا میکرومدل را از هوا خالی نمود. همچنین از پمپ خلا جهت تخلیه‌ای میکرومدل شیشه‌ای از سیالات شوینده هم چون آب و تولوئن استفاده می‌شود. از پمپ تزریق سرنگی مدل SP1000HPM که دارای

حداقل و حداکثر سرعت تزریق ۰/۵ و ۱۰۰۰ cc/hr در ساعت و دقت حرکت پدال ۲۰ nm است و توسط شرکت فناوران نانومقیاس در ایران ساخته شده است، جهت اشباع میکرومدل از نفت و تزریق سیالات به درون بستر متخلخل استفاده می‌شود. دقت این پمپ در آزمایشگاه توسط سرنگ کم‌حجم و دقیق همیلتون با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی مشخص و بررسی حجم تزریقی در نرخ تزریق پایین تأیید شده است. از آنجایی که برای تحلیل اطلاعات و بدست آوردن بازیافت نفت نیاز به عکس‌هایی با کیفیت بالا ضروری است لذا از دوربین حرفه‌ای شرکت کانن مدل EOS 7D جهت عکس‌برداری از فرآیند تزریق که مجهز به لنز ماکرو می‌باشد، استفاده شده است. به‌منظور ثبت اطلاعات و ذخیره کردن آنها همزمان با انجام آزمایش و حین عکس برداری از رایانه استفاده می‌شود و کار آنالیز داده‌ها و عکس‌ها در انتها صورت می‌گیرد.

میکرومدل شیشه‌ای

میکرومدل شیشه‌ای وسیله‌ای جهت نمایش یک محیط متخلخل در دو بعد با ضخامت ۱۶۰ μm است. جهت ساخت میکرومدل ابتدا طرح موردنظر با استفاده از نرم‌افزار Corel Draw طراحی شده سپس توسط لیزر بر روی یک شیشه حکاکی می‌شود و پس از انجام حکاکی با استفاده از سمباده مخصوص سطح لیزر شده تمیز می‌شود تا طرح به‌صورت یکدست بر روی شیشه حک شود.



شکل ۱ سامانه میکرومدل.

تصاویر مقطع نازک سنگ دولومیتی تهیه شده، مورد استفاده قرار گرفته است و الگوی تزریق ۱/۴ پنج نقطه‌ای است. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش بررسی پارامترهای شکاف می‌باشد لذا از چندین بستر متخلخل شکاف دار استفاده شده است. شکل ۲ طرح‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که مشخصات این مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

نتایج و بحث

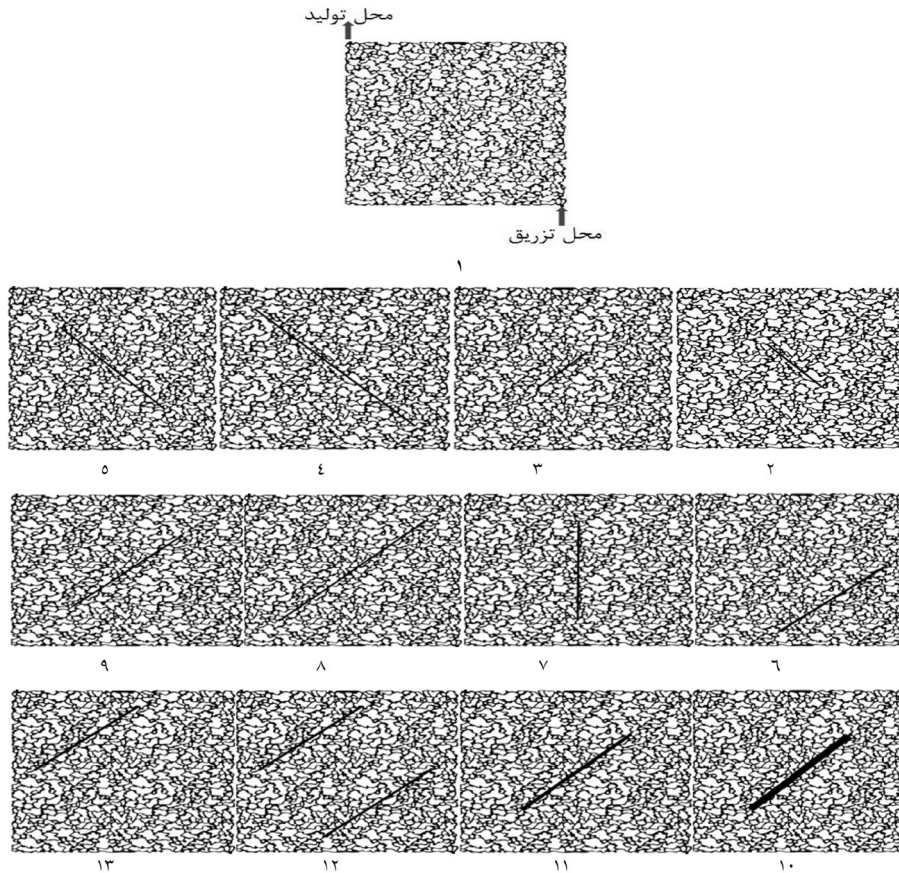
آنالیز پایداری

به‌منظور بررسی پایداری نانوسیالات بکار رفته از دو روش کیفی و کمی استفاده شده است. در آزمایش ۱ غلظت ۱ درصد وزنی نانو ذره سیلیکا درون آب مقطر سونیک شده است و در آزمایش ۲ پس از افزودن ۳ درصد وزنی نمک NaCl درون همزن مغناطیسی، نانو ذره سیلیکا با غلظت ۱ درصد وزنی اضافه شده و سونیک می‌شود. به منظور بررسی کیفی میزان پایداری از محلول‌های ساخته شده در بازه‌های زمانی مشخص عکس گرفته شده است که شکل ۳ پایداری بالای نانوذره سیلیکا در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد، اما هنگامی که از نمک با غلظت ۳ درصد وزنی استفاده می‌شود؛ به دلیل برهم خوردن تعادل الکتریکی محیط میزان پایداری محلول ساخته شده کاهش می‌یابد و همان‌طور که در شکل ۴-د مشخص است پس از مدت زمان تقریباً دو روز رسوب اتفاق افتاده است.

سپس دو سر شیشه به‌منظور ایجاد مجرای ورود و خروج سیال به محیط متخلخل با استفاده از مته سوراخ می‌شود. در مرحله بعد شیشه دیگری به ابعاد یکسان با شیشه حک شده روی هم قرار داده و برای چسباندن به یکدیگر درون کوره قرار داده می‌شوند و با استفاده از کوره WiseTherm با اعمال زمان‌بندی مشخص دمای کوره تا 700°C بالا می‌رود که در این دما دو سطح شیشه به یکدیگر چسبیده و تنها فضای خالی حکاکی شده و مته شده بازمی‌ماند. از آنجایی که سطح شیشه دارای خاصیت آبدوستی می‌باشد باید مراحل زیر برای نفت‌دوست کردن مدل‌ها انجام گیرد [۲۱-۲۲].

میکرومدل با محلولی شامل ۰/۵ درصد وزنی سدیم هیدروکسید (سود) شسته می‌شود و به مدت ۱ hr میکرومدل در حالت اشباع در سیال قرار داده می‌شود. به‌منظور از بین بردن تمامی باقی مانده‌ها میکرومدل با آب مقطر شسته شده و سپس به مدت حداقل ۱۵ min در آون با دمای 200°C قرار داده می‌شود. محلول رقیق ۲٪ تری کلرو متیل سیلان و ۹۸٪ دی هیدرات تولوئن تهیه می‌شود، سپس به مدت ۵ min میکرومدل با محلول رقیق گفته شده اشباع می‌شود. به‌منظور پاک کردن میکرومدل از سیالات سیلیکونی اضافی، میکرومدل با متانول که سیالی شوینده و فرار است، شستشو داده می‌شود. به‌منظور حفظ نگه‌داشتن لایه‌ای سیلیکونی میکرومدل به مدت یک ساعت درون آون با دمای 100°C قرار داده می‌شود.

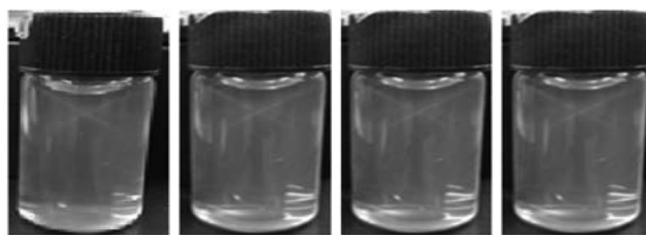
در این تحقیق طرح دولومیتی ناهمگن که از



شکل ۲ میکرومدل‌های مورد استفاده در این تحقیق.

جدول ۳ خصوصیات میکرومدل‌های مورد استفاده.

طرح	تخلخل (%)	ابعاد (cm ²)	زاویه شکاف (درجه)	طول شکاف (cm)	ضخامت شکاف (mm)	فاصله از محل تزریق (cm)
۱	۳۸	۶×۶	-	-	-	-
۲	۳۸/۲	۶×۶	۰	۲	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۳	۳۸/۴	۶×۶	۰	۴	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۴	۳۸/۶	۶×۶	۰	۶	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۵	۳۸/۲	۶×۶	۹۰	۲	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۶	۳۸/۴	۶×۶	۹۰	۴	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۷	۳۸/۶	۶×۶	۹۰	۶	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۸	۳۸/۴	۶×۶	۴۵	۴	۰/۵۲۵	۴/۲۵
۹	۳۸/۴	۶×۶	۹۰	۴	۰/۵۲۵	۲/۸۳
۱۰	۳۸/۴	۶×۶	۹۰	۴	۰/۵۲۵	۵/۶۵
۱۱	۳۸/۸	۶×۶	۹۰	۴	۰/۵۲۵	-
۱۲	۳۸/۸	۶×۶	۹۰	۴	۱/۰۵	۴/۲۵
۱۳	۳۹/۶	۶×۶	۹۰	۴	۲/۱	۴/۲۵



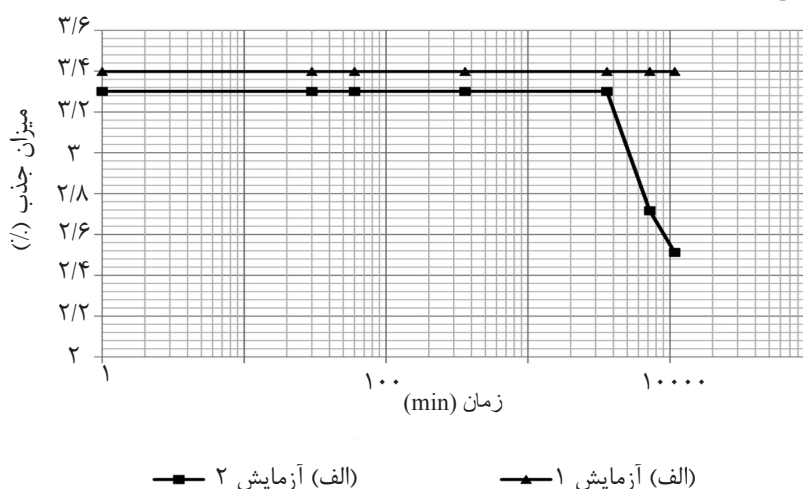
شکل ۳ بررسی پایداری آزمایش ۱ در زمان‌های: (الف) اولیه، (ب) ۱ ساعت، (ج) ۱ روز و (د) ۷ روز.



شکل ۴ بررسی پایداری آزمایش ۲ در زمان‌های: (الف) اولیه، (ب) ۱ ساعت، (ج) ۱ روز و (د) ۲ روز.

نتایج میزان جذب نور عبوری برحسب درصد برای ۲ نمونه سیال در زمان‌های مختلف در شکل ۵ ارائه شده است، هنگامی که میزان جذب نور عبوری کاهش شدید دارد یعنی زمانی است که ذرات معلق در فاز مایع در حال رسوب کردن هستند و شفافیت سیال افزایش یافته و به شفافیت آب مقطر نزدیک شده است. به عبارت دیگر نتایج کیفی و کمی بیانگر پایداری بالای سیال آزمایش ۱ و پایداری تقریباً ۲ روزه سیال آزمایش ۲ می‌باشند.

در روش کمی با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری مدل Optizen 3220 UV میزان جذب نور عبوری از محلول‌های ساخته شده را طی زمان‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و میزان پایداری نانو سیالات تخمین زده شد. در ابتدا به منظور انتخاب طول موج بهینه برای انجام مشاهدات میزان جذب، بازه‌ای از طول موج‌ها (۱۹۰ تا ۱۱۰۰ nm) انتخاب شد که در طول موج ۲۳۰ nm میزان بیشینه جذب برای دو نمونه سیال بدست آمد؛ لذا در محاسبات میزان جذب از این طول موج بهره گرفته شده است.



شکل ۵ میزان جذب نور عبوری برحسب درصد برای ۲ نمونه سیال (الف) (آب مقطر/ سیلیکا ۰/۱٪) (ب) (آب مقطر/ سیلیکا ۱٪ / نمک ۳٪ NaCl) در زمان‌های مختلف

آزمایش گرانروی و کشش سطحی

به منظور محاسبه میزان گرانروی سیالات مورد استفاده از گرانروی سنج بروکفیلد استفاده شد تا از گرانروی به عنوان یکی از خواص مهم سیال تزریقی که به بررسی مکانیزم‌های موثر بر ازدیاد برداشت کمک می‌کند استفاده شود. جدول ۴ نتایج گرانروی مربوط به دو آزمایش را نشان می‌دهد و همانطور که مشخص است حضور نانو ذره و نمک توانسته است میزان گرانروی سیال تزریقی را افزایش دهد.

جدول ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده گرانروی سیالات.

غلظت نانو ذره (%wt)	غلظت نمک (%wt)	گرانروی (cP)
۱	۰	۲
۱	۳	۴

با توجه به سیال‌های تزریقی که شامل آب مقطر و محلول حاوی ۱ درصد وزنی نانو ذره سیلیکا و محلول حاوی ۱ درصد وزنی نانو ذره سیلیکا و ۳ درصد وزنی نمک NaCl بودند، ۳ آزمایش کشش سطحی با استفاده از روش قطره آویزان و بهره‌گیری از نرم‌افزار PAT انجام شد تا میزان کشش سطحی بین سیال‌های تزریقی و نفت به دست آید (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو ذره سیلیکا تأثیری بر میزان کشش بین سطحی ندارد؛ اما استفاده از نمک

به دلیل وجود پیوندهای قطبی باعث کاهش ناحیه تماس بین دو فاز یا عبارتی کاهش میزان کشش سطحی می‌شود. دلیل تأثیر ناچیز و منفی نانو ذره سیلیکا را می‌توان آب‌دوست بودن نانو ذره سیلیکای به کار رفته شده دانست. همان طور که احمدی و همکاران در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانو ذره سیلیکای آب‌گریز قدرت بهتری برای کاهش میزان جذب ماده فعال سطحی به کار رفته شده دارد و به عبارتی وجود نانو ذره سیلیکای آب‌دوست نتوانسته میزان جذب نانو ذره روی سطح محیط متخلخل را کاهش دهد که این امر به دلیل خاصیت آبدوستی نانو ذره سیلیکا می‌باشد که میزان کشش بین سطحی دو سیال آب و نفت را تغییری نمی‌دهد [۲۳].

آزمایش‌های انجام شده در میکرومدل

لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های انجام شده درون میکرومدل در دما و فشار محیط و با استفاده از پمپ سرنگی با نرخ تزریق ۰/۰۵ cc/hr انجام شده است. در ابتدا به منظور محاسبه میزان بازیافت نفت، تزریق آب مقطر و نانوسیال حاوی ۱ درصد وزنی نانو ذره سیلیکا درون میکرومدل شماره ۱ صورت گرفت که نتایج در جدول ۶ نشان از تأثیر مثبت نانو ذره می‌دهد.

جدول ۵ مقادیر اندازه‌گیری شده کشش سطحی سیالات.

غلظت نانو ذره (%wt)	غلظت نمک (%wt)	کشش سطحی (mN/m)
۰	۰	۲۲/۸
۱	۰	۲۳
۱	۳	۱۸/۷

جدول ۶ نتایج آزمایش‌های تزریق در میکرومدل ساده.

آزمایش	زمان میان‌شکنی (min)	بازیافت نهایی نفت (%)
آب مقطر	۴۵	۱۷/۲
نانو سیال	۸۴	۳۳/۴

بررسی طول شکاف

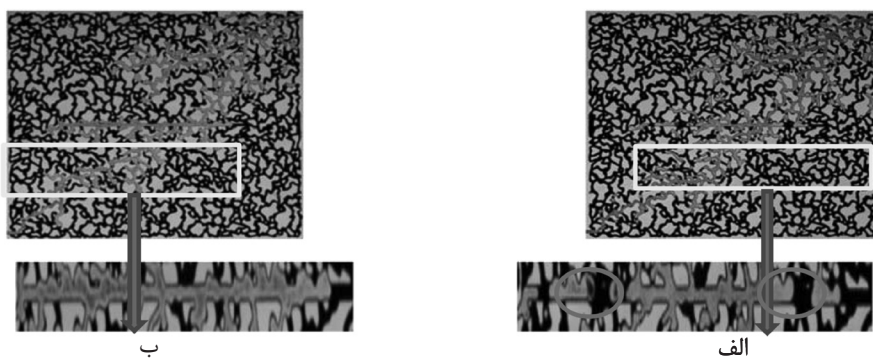
حالت بدون شکاف (۰/۱۷/۲) است که علت این امر آن است که تمایل جبهه‌های سیال قبل از رسیدن به شکاف همچنان وجود دارد. به عبارتی سیال تزریقی دیرتر حضور شکاف را احساس می‌کند؛ اما در شکاف‌های بلندتر سیال بلافاصله پس از رسیدن به شکاف از مسیرهای با منافذ کوچکتر حرکت نکرده و بازیافت پایین در میکرومدل با شکاف بلند تا میزان ۷/۹٪ را بوجود آورده است. شکل ۶ مسیر میکروسکوپی حرکت آب مقطر در شکاف با طول ۶ cm را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است آب مقطر در مواجهه با گلوگاه‌های دارای نیروی مویینه بالاتر نیروی لازم برای جاروب نفت را نداشته و تولید از شکاف بدلیل نیروی مویینه پایین‌تر صورت می‌گیرد. استفاده از نانوذره میزان بازیافت نفت را افزایش داده است؛ اما در مدل با شکاف به طول ۲ cm میزان بازیافت نفت تا میزان (۴/۲۸٪) بهبود یافته است. بعبارت دیگر نانوذره سیلیکا توانسته است میزان بازیافت نهایی نفت را ۱/۲۶ برابر افزایش دهد.

در بررسی‌های اولیه مشخص شد که انتخاب زاویه شکاف در نتایج مربوط به شکاف‌های با طول مختلف تاثیرگذار است. لذا انتخاب زاویه صفر درجه بعنوان مرجعی در بررسی طول کافی نبوده و نتایج آن به درستی اثر طول را مشخص نمی‌کرد، از طرفی تاثیر دو پارامتر طول و زاویه بر یکدیگر یکی از نتایج مهم تحقیق است که بدین منظور دوازده آزمایش انجام گرفت که در جدول ۷ نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است. متغیرهای این آزمایش‌ها زاویه و طول شکاف است و از طرفی دیگر به‌منظور مشاهده تاثیر نانوسیال از دو سیال آب مقطر و آب مقطر حاوی ۱ درصد وزنی نانو سیلیکا استفاده شد.

با افزایش طول شکاف هنگام تزریق آب مقطر در مدل‌های دارای شکاف در مسیر جریان (صفر درجه) میزان بازیافت نفت تا ۸/۴۲ درصد کاهش یافته است، اما نکته قابل توجه بازیافت نزدیک نفت در حالت شکاف کوتاه (۱۶/۳۲٪) در مقایسه با

جدول ۷ نتایج آزمایش‌های انجام شده برای پارامتر طول.

شماره آزمایش	سیال تزریقی	زاویه شکاف (درجه)	طول شکاف (cm)	زمان میان‌شکنی (min)	بازیافت نهایی نفت (%)
۱	آب مقطر	۰	۲	۳۴	۱۶/۳۲
۲	نانوسیال	۰	۲	۴۳	۲۰/۱۶
۳	آب مقطر	۰	۴	۱۷	۱۰/۶۷
۴	نانوسیال	۰	۴	۱۷	۱۰/۹
۵	آب مقطر	۰	۶	۱۴	۷/۹
۶	نانوسیال	۰	۶	۱۴	۸/۱
۷	آب مقطر	۹۰	۲	۳۰	۱۴/۵
۸	نانوسیال	۹۰	۲	۴۴	۲۱/۸
۹	آب مقطر	۹۰	۴	۲۶	۱۲/۳
۱۰	نانوسیال	۹۰	۴	۲۸	۱۴/۲۸
۱۱	آب مقطر	۹۰	۶	۲۱	۱۱
۱۲	نانوسیال	۹۰	۶	۲۴	۱۱/۵



شکل ۶ تأثیر نانوذر بر بدام افتادگی نفت در شکاف زاویه ۴۵ درجه هنگام تزریق: (الف) آب مقطر (ب) نانوسیال (آب مقطر / سیلیکا ۱٪).

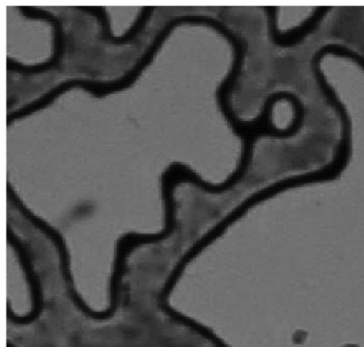
بررسی زاویه شکاف

در بررسی آزمایش‌های مرتبط با طول متوسط و بلند مشاهده شد که سیال تزریقی طول مشخصی از شکاف را شسته است و شکاف بلند نسبت به شکاف متوسط راندمان پایین‌تری دارد و از آنجایی که عمده مخازن موجود در ایران دارای شکاف‌هایی با طول متوسط و بلند می‌باشند [۲۴]؛ در بررسی پارامترهای بعدی شکاف از طول ۴ cm بهره گرفته شد. پس از ثابت فرض کردن طول شکاف به میزان ۴ cm، زوایا از صفر به ۴۵ و ۹۰ درجه تغییر پیدا کرد. جدول ۸ نتایج آزمایش‌های انجام شده مربوط به این بخش را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه شکاف میزان زمان میان‌شکنی افزایش می‌یابد و وجود شکاف عمود بر جریان باعث جاروب حجم بیشتری از نفت می‌شود. بررسی حرکت جبهه سیال تزریقی درون شکاف مشخص می‌کند که در هر دو حالت تزریق سیال تمایل به شستن نفت درون شکاف

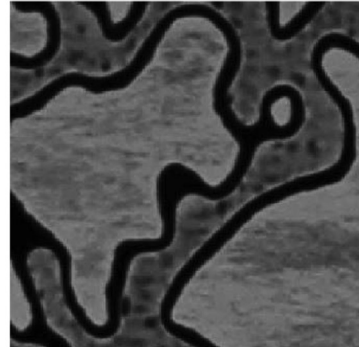
و عدم تمایل برای تشکیل زبانه‌های دیگر را دارد. ولی هنگام تزریق آب مقطر نفت درون شکاف به دام افتاده است که این امر به علت وجود مسیرهای با نیروی موئینه کم در دو سمت ناحیه بدام افتاده است؛ درحالی‌که هنگام تزریق نانوسیال این موضوع مشاهده نشده است. شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی تزریق سیال‌های مختلف را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده تأثیر نانوذر بر تغییر ترشوندگی محیط نسبت به حالت بدون نانوذر است که با کاهش ضخامت لایه نفتی این موضوع را مشخص می‌کند. وقتی که زاویه تماس محلول آبی روی دیواره مدل کاهش یابد، به معنای پراکندگی ذرات بر روی سطح است. با حرکت نانوسیال، نانوذرهای روی سطح داخلی میکرومدل کاملاً پخش می‌شوند و لایه‌هایی از ذرات را تشکیل می‌دهند؛ بطوریکه هرچه ذرات کوچکتر بیشتر شوند، نیروی الکترواستاتیکی به دلیل دافعه افزایش می‌یابد.

جدول ۸ نتایج آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی تأثیر زاویه شکاف.

آزمایش	سیال تزریقی	زاویه شکاف (درجه)	طول شکاف (cm)	زمان میان‌شکنی (min)	بازیافت نهایی نفت (%)
۳	آب مقطر	۰	۴	۱۶	۱۰/۶۷
۴	نانوسیال	۰	۴	۱۶	۱۰/۹
۹	آب مقطر	۹۰	۴	۲۶	۱۲/۳
۱۰	نانوسیال	۹۰	۴	۲۸	۱۴/۲۸
۱۳	آب مقطر	۴۵	۴	۲۲	۱۲/۱
۱۴	نانوسیال	۴۵	۴	۲۷	۱۴/۱



ب



الف

شکل ۷ تاثیر نانوسیال بر کاهش ضخامت لایه نفتی هنگام تزریق: (الف) آب مقطر (ب) نانوسیال (آب مقطر/ سیلیکا ۱٪).

تزریق باشد، سیال پس از خروج از شکاف تمایل زیادی به انگشتی شدن و حرکت به سمت مکان تولیدی دارد که همین امر سبب بازیافت پایین نفت تا میزان ۱۱٪ شده است. اما هنگامی که از نانو سیال (آب مقطر/ سیلیکا ۱٪) استفاده شده است علاوه بر تشکیل مسیرهای چند زبانه‌ای میزان جاروب میکروسکوپی سیال نیز افزایش یافته است که همین امر سبب افزایش بازیافت نفت به میزان ۱۳/۵٪ شده است. اما در مدلی که شکاف نزدیک به مکان تولیدی است؛ سیال تزریقی قبل از رسیدن به شکاف دارای جاروب بالایی می‌باشد. ولی تمایل به پدیده انگشتی شدن همچنان سبب کاهش میزان بازیافت نفت می‌شود.

وجود شکاف نزدیک به مکان تولیدی باعث افزایش زمان میان‌شکنی برای هر دو حالت تزریق سیالات شده و میزان بازیافت نفت افزایش یافته است.

نیروی مشترک بین سه فاز نفت، محلول آبی و نانوذرات جامد باعث می‌شود که زاویه تماس محلول آبی حاوی نانوذرات کاهش یابد که این خود موجب تشکیل فیلمی می‌شود که این فیلم بعنوان یک لایه جداکننده عمل کرده و فازهایی چون آب یا نفت را از سطح مدل جدا می‌کند. همچنین هنگام تزریق نانوسیال به سبب کاهش میزان نیروی لازم جهت جاروب نفت میزان نفت بدام افتاده کاهش یافته است که این سبب افزایش میزان بازیافت نفت می‌شود.

بررسی موقعیت و تعداد شکاف

به‌منظور بررسی تاثیر موقعیت شکاف از شکاف‌هایی با زاویه ۹۰ درجه به علت راندمان بالاتر و طول ۴ cm در موقعیت‌هایی نزدیک به مکان تزریق و نیز تولید نفت استفاده شد که جدول ۹ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. هنگامی که شکاف نزدیک مکان

جدول ۹ نتایج آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی مکان شکاف.

آزمایش	سیال تزریقی	موقعیت شکاف	زمان میان‌شکنی (min)	بازیافت نهایی نفت (%)
۱	آب مقطر	فاصله ۱/۳ تا محل تزریق	۲۰	۱۱
۲	نانوسیال	فاصله ۱/۳ تا محل تزریق	۲۷	۱۳/۵
۳	آب مقطر	فاصله ۱/۳ تا محل تزریق	۳۰	۱۴/۵
۴	نانوسیال	فاصله ۱/۳ تا محل تزریق	۳۴	۱۶/۴
۵	آب مقطر	دو شکاف موازی	۳۸	۱۶/۷
۶	نانوسیال	دو شکاف موازی	۴۲	۱۸/۳

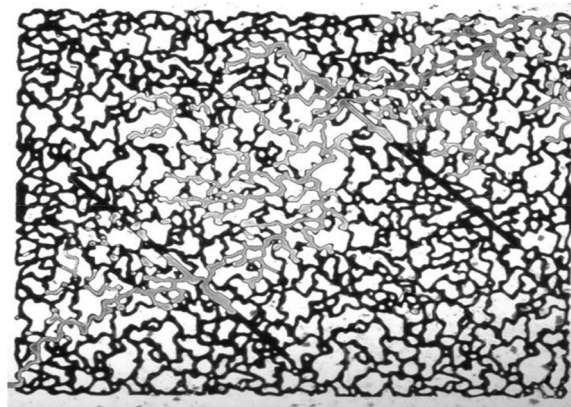
بین سیال تزریقی و نفت را کاهش دهد و با توجه به شکل ۹ سیال تزریقی توانسته است مسیری چند شاخه و پخش شدگی عرضی بیشتری را به وجود آورد و پدیده انگشتی شدن که در انتهای مدل صورت می‌گیرد دارای شدت کمتری می‌باشد.

همان‌گونه که نتایج ارایه شده در این تحقیق نشان می‌دهد، هدف استفاده از نانوذرات، تغییر در میزان نفت باقیمانده درون میکرومدل می‌باشد. لکن همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است؛ میزان زیادی از نفت به‌دلیل گیر افتادن در فضاهایی که امکان تولید ندارند باز یافت نشده باقی می‌ماند. شکل ۱۰ (الف) نفت بدام افتاده ناشی از وجود منافذ مرده درون مدل هنگام تزریق نانوسیال حاوی ۱ درصد وزنی نانو ذره سیلیکا را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ (ب) نیز موید تفاوت نیروی مؤئینه دو منفذ که دارای تراوایی مختلف هستند، می‌باشد. شایان ذکر است که همین امر سبب به دام افتادن نفت می‌شود. در شکل ۱۰ (ج) نیز منفذی با قطر کم نشان داده شده است و به همین دلیل نیروی مؤئینه زیاد است و سیال تزریقی قادر به ورود به منفذ نخواهد بود. لذا محققین در تلاش اند تا با استفاده از روش‌های هیبریدی از جمله ترکیب نانوذرات با سایر مواد شیمیایی مانند پلیمرها و مواد فعال سطحی، تا حد امکان میزان نفت باقیمانده را کاهش دهند.

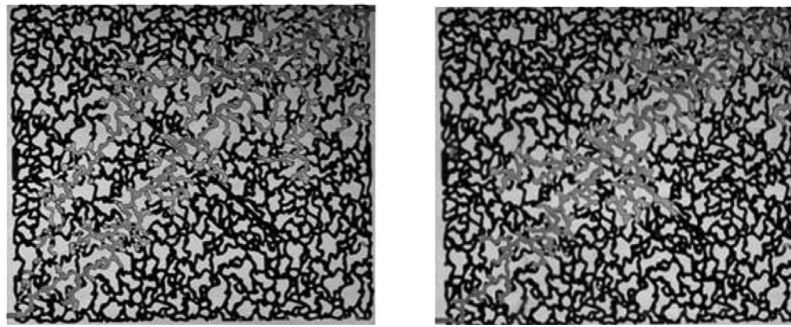
همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است، در مدل دارای دو شکاف سیال تزریقی پس از ورود به شکاف اول چند شاخه‌ای می‌شود و هنگام ورود به شکاف دوم حجم مناسبی از فضای بین دو شکاف را جاروب کرده است؛ اما سیال پس از ورود به شکاف دوم به سمت مکان تولیدی بصورت مسیری واحد حرکت کرده است و پدیده انگشتی شدن اتفاق می‌افتد که همین امر سبب باز یافت نفت بیشتری شده است. اما هنگامی که از نانو سیال (آب مقطر / سیلیکا ۰.۱٪) استفاده شده است علاوه بر تشکیل مسیرهای چند زبانه‌ای میزان جاروب میکروسکوپی سیال نیز افزایش یافته است که همین امر سبب افزایش باز یافت نفت به میزان ۱۳/۵٪ شده است. اما در مدلی که شکاف نزدیک به مکان تولیدی است؛ سیال تزریقی قبل از رسیدن به شکاف دارای جاروب بالایی می‌باشد. ولی تمایل به پدیده انگشتی شدن همچنان سبب کاهش میزان باز یافت نفت می‌شود.

تأثیر شوری

پس از انجام آزمایش‌های طول و زاویه شکاف به‌منظور بررسی اثر شوری آب تزریقی در مدل دارای شکاف عمود بر جریان و طول ۴ cm به نانوسیال تزریقی به میزان ۳ درصد وزنی نمک NaCl که نمایانگر شوری آب دریا می‌باشد [۲۵]؛ اضافه شد. استفاده از نمک توانسته است میزان کشش سطحی



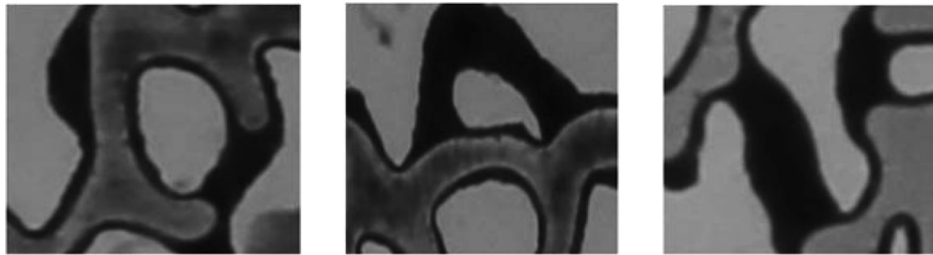
شکل ۸ تزریق آب مقطر در مدل دارای دو شکاف با زاویه ۹۰ درجه و طول ۴ cm.



ب

الف

شکل ۹ تزریق: (الف) (آب مقطر/ سیلیکا ۰.۱٪) (ب) (آب مقطر/ سیلیکا ۰.۱٪ و نمک NaCl ۰.۳٪) در مدل دارای زاویه ۹۰ درجه و طول ۴ cm.



ج

ب

الف

شکل ۱۰ نفت بدام افتاده درون مدل (الف) منافذ مرده (ب) تفاوت نیروی موئینه دو منفذ موازی (ج) منافذ ریز.

به میزان ۱/۹٪ افزایش یافته است. وجود دو شکاف موازی سبب تولید حجم بیشتری از نفت می‌شود. هرچه شکاف‌ها به مکان تولیدی نزدیک‌تر باشند میزان بازیافت نفت افزایش بیشتری می‌یابد. افزایش ضخامت شکاف باعث افزایش میزان تخلخل مدل‌ها می‌شود، اما سیال تزریقی همچنان نیروی کافی برای جاروب نفت موجود در شکاف را به صورت کامل ندارد. با بررسی تزریق در حالت وجود نانوذره سیلیکا نیز مشاهده شد نانوذره سیلیکا از طریق تغییر در ترشوندگی محیط توانسته است میزان نفت بیشتری از میکرومدل‌ها را جاروب کند که از مکانیسم‌های تاثیرگذار بر بازیافت نفت پدیده تغییر ترشوندگی جداره شیشه به سبب وجود نانوذره سیلیکا می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به دلیل حمایت مالی از این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشخص شد که پایداری محلول‌های نانوسیال (آب مقطر/ سیلیکا ۰.۱٪) بیشتر از یک هفته می‌باشد، اما اضافه کردن نمک به سیال تزریقی سبب کاهش میزان پایداری تا تقریباً دو روز شده است. همچنین افزایش نمک به سیال تزریقی سبب کاهش کشش سطحی بین سیالات می‌شود و میزان گرانیروی را نیز افزایش می‌دهد. بررسی پارامترهای شکاف نشان داد که شکاف‌های با طول کم تمایل سیال به پخش‌شدگی عرضی را افزایش می‌دهند که همین امر سبب افزایش زمان میان شکنی و در نتیجه افزایش بازیافت نفت می‌شود. با افزایش زاویه شکاف از صفر به ۹۰ سهم تولید نفت از ماتریکس افزایش می‌یابد؛ به طوری که هنگام تزریق آب مقطر در شکاف کوتاه میزان بازیافت تغییر ۱/۸۲٪ را داشته است. هنگامی که شکاف در مکانی نزدیک به مکان تولید قرار گرفت نسبت به حالت وجود شکاف در نزدیکی محل تزریق میزان بازیافت نفت برای حالت تزریق آب مقطر به میزان ۲/۵٪ و برای حالت تزریق نانوسیال (آب مقطر/ سیلیکا ۰.۱٪)

مراجع

- [1]. Willhite G. P. and Green D. W., "Enhanced oil recovery", Vol. 6, 1998.
- [2]. Lake L. W., "Enhanced oil recovery, 1989.
- [3]. Fangda Q., "Experimental study of solvent based emulsion injection to enhance heavy oil recovery," MSc. Thesis, Texas A&M University, 2010.
- [4]. Zaid H .M., Yahya N. and Latiff N. R., "The effect of nanoparticles crystallite size on the recovery efficiency in dielectric nanofluid flooding," Journal of Nano Research Vol. 21, pp. 103-108, 2013.
- [5]. Alomair O. A., Matar K. M. and Alsaeed Y. H., "Nanofluides application for heavy oil recovery," SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, 2014.
- [6]. Al-Ansari S., Barifcani A., Wang S., Maxim L. and Iglauer S., "Wettability alteration of oil-wet carbonate by silica nanofluid," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 461, pp. 435–442, 2016.
- [7]. Mensah A. E., Opeyemi A. and Shaibu M., "Effects of nano particles (al, Al₂O₃, cu, cuo) in emulsion treatment and separation," SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Nigeria 2013.
- [8]. Zargartalebi M., Barati N. and Kharrat R., "Influences of hydrophilic and hydrophobic silica nano particles on anionic surfactant properties: Interfacial and adsorption behaviors," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.119, pp. 36–43, 2014.
- [9]. Hendraningrat L., Li S. and Torsaeter O., "Effect of some parameters influencing enhanced oil recovery process using silica nanoparticles: an experimental investigation", SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition, UAE, 2013.
- [10]. Roustaei A., Saffarzadeh S. and Mohammadi M., "An evaluation of modified silica nanoparticles efficiency in enhancing oil recovery of light and intermediate oil reservoirs", Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 22, pp. 427–433, 2013.
- [۱۱]. رفیعی، "بررسی تأثیر تزریق نانوسیالات مختلف در حالت وجود مواد فعال سطحی بر ازدیاد برداشت نفت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [12]. Ghafdani R., "Effect of silica percentage in Enhancing oil recovery," SPE 159236, 2007.
- [13]. Maghzi A., Mohammadi S., Ghazanfari M. H., Kharrat R. and Masihi M., "Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 40 , pp. 168–176, 2012.
- [14]. Irvine R., Davidson J., Baker M., Devlin R. and Park H., "Nano spherical polymer pilot in a mature 18° API sandstone reservoir water flood in alberta, canada," SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference, Malaysia, 2015.
- [15]. Nourani M., Panahi H., Roosta R., Haghghi M. and Mohebbi A., "Laboratory studies of MEOR in micromodel as a fractured system," Eastern Regional Meeting, Kentucky USA, 2013.
- [16]. Ghorbani Zadeh S., "Pore-Level study of viscous forces during immiscible gas injection in a fractured multi-block system," PhD Thesis, Institute of Petroleum Engineering, Tehran University, 2011.
- [17]. Kamari E., Rashtchian D., Shadizadeh S. R., "Micro-Model experimental study of fracture geometrical effect

- on breakthrough time in miscible displacement process," Iranian Journal of Chemistry and Chemical Eng., Vol. 30, pp. 1-7, 2011.
- [18]. Razmi R., Sedaghat M. H., Janamiri R. and Hatampour A., "Application of SDS/LABS in recovery improvement from fractured models," World Academy of Science, Engineering and Technology Vol. 6, pp. 1073-1076, 2012.
- [19]. Farzaneh S. A., Kharrat R. and Ghazanfari M. H., "Experimental study of solvent flooding to heavy oil in fractured 5-spot micromodels: the role of fracture geometrical characteristics," Canadian International Petroleum Conference, 2008.
- [20]. Ogolo N. A., Olafuyi O. A. and Onyekonwu M. O., "Enhanced oil recovery using nanoparticles," in SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, 2012.
- [21]. Meybodi H. E., Kharrat R. and Wang X., "Study of microscopic and macroscopic displacement behaviors of polymer solution in water-wet and oil-wet media," Transport in Porous Media, Vol. 89, pp. 97-120, 2011.
- [22]. Maghzi A., Mohebbi A., Kharrat R. and Ghazanfari M. H., "Pore-Scale monitoring of wettability alteration by silica nanoparticle during polymer flooding to heavy oil in a five-spot glass micromodel," Transport in Porous, Vol. 89, pp. 500-508, 2013.
- [23]. Ahmadi M. A. and Shadizadeh S. R., "Induced effect of adding nano silica on adsorption of a natural surfactant onto sandstone rock: Experimental and theoretical study," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 112, pp. 239-247, 2013.
- [24]. Mahmoudian V., Sajjadian S. and Kashani H., "Evaluation Of the fracture sizes by using the frequency dependence of anisotropy," National Iranian Fractured Reservoirs Development Congress, 2011.
- [25]. Skauge T., Hetland S., Spido K. and Skauge A., "Nano-sized particles for EOR," SPE Improved Oil Recovery Symposium, USA, 2010.