

بررسی آزمایشگاهی پدیده مارانگونی حرارتی در بازیافت نفت پسمانده در یک ماتریس شکافدار

پژمان ابوالحسینی^۱، مریم خسروی^۲، بهزاد رستمی^{۱*} و محمد مسعودی^۱

۱- انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۸

چکیده

تزریق گاز از جمله روش‌های ازدیاد برداشت موفق به شمار می‌رود. اما سیال تزریقی از مسیرهایی حرکت می‌کند که ممکن است با تمامی نفت مخزن در تماس قرار نگیرد و نفت به تله بیافتد. پدیده مارانگونی می‌تواند یکی از مکانیزم‌های موثر در تولید نفت بجا مانده باشد که سبب ایجاد جریان همرفتی از نقطه‌ای با تنش میان رویه کم به سمت نقطه‌ای با تنش میان رویه زیاد می‌شود. این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان مارانگونی حرارتی در میزان بازیافت نفت بجا مانده درون ماتریس، در یک سیستم ماتریس شکافدار را گزارش می‌دهد. آزمایش‌های مغزه تحت فشار و دمای بالا، در دو حالت «هم‌دما» و «غیرهم‌دما» و حالت رژیم تزریق غیرامتزاجی انجام شده است تا سطح تماس بین فازها حفظ شود. در شرایط هم‌دما، گرادیان دمایی وجود ندارد و درجه آزادی صفر خواهد بود. لذا جریان مارانگونی وجود ندارد. اما در شرایط غیرهم‌دما براساس جهت شیب گرادیان تنش میان رویه، این جریان می‌تواند سبب تولید و یا مانع از آن شود. با تحلیل و بررسی اعداد بدون بعد، نقش نیروهای ثقلی، گرانش و موئینه و همچنین نیروهای نفوذ مولکولی مشخص گردیده است. از این رو، آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که از نظر تعادل نیروهای ثقلی، گرانش و موئینه هم ارز باشند و بتوان نقش جریان مارانگونی را از مقایسه میزان بازیافت، تحقیق کرد. همچنین به دلیل کاربرد گسترده دی‌اکسیدکربن از این گاز برای تزریق استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده، نشان می‌دهد که جریان مارانگونی حرارتی یکی از مکانیزم‌های موثر در بازیافت نفت، تحت فشار و دمای بالا، می‌باشد و می‌تواند با غلبه بر نیروی موئینه سبب حرکت نفت شود. شدت این جریان متناسب با اختلاف دمای گاز و نفت در سطح تماس دو سیال می‌باشد. افزایش یا کاهش میزان بازیافت نسبت به آزمایش‌های هم‌دما، نشانگر نقش این مکانیزم درون محیط متخلخل است.

کلمات کلیدی: تزریق گاز درون شکاف، جریان مارانگونی، جریان مارانگونی حرارتی، تزریق غیرامتزاجی، ازدیاد برداشت.

مقدمه

آزمایش‌هایی را طراحی کردند و نشان دادند که جهت جریان به‌وسیله تنش میان رویه تعادلی قابل تشخیص نیست [۱۲]. دابتر و همکاران دو مدل آزمایش انتقال حرارت و انتقال جرم با الکل‌های الیفاتیکی و دی‌اکسیدکربن به‌صورت مجزا طراحی کردند و نشان دادند که هرچه فراریت افزایش یابد، به این معنی است که با وقوع گرادیان دمایی، آن ماده تمایل به تبخیر آسان‌تر دارد و ناپایداری‌های شدیدتری در سطح تماس ایجاد می‌شود. بنابراین اثر مارانگونی سهم بیشتری خواهد داشت [۱۳]. خسروی و همکاران اثر گرادیان تنش میان رویه (جریان مارانگونی) در بازیافت نفت به‌جامانده را در شرایط امتزاجی و نزدیک امتزاجی تزریق دی‌اکسیدکربن در سیستم ماتریس- شکاف یک بعدی بررسی کردند و نشان دادند که جریان مارانگونی بازیافت نفت به‌جامانده درون ماتریکس را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد و این اثر در شرایط نزدیک امتزاجی در حالت بیشینه می‌باشد [۱۴]. در این مقاله، گازهای مختلف به‌صورت غیر امتزاجی درون شکاف تزریق شده است تا سیال درون ماتریس را خارج کند. اثر نیروی مارانگونی حرارتی در بازیافت نفت به واسطه طراحی ۲ دسته آزمایش بررسی شده است به منظور تحقیق تاثیر این پدیده لازم است میزان بازیافت آزمایش‌های شامل مارانگونی، با آزمایش‌های مشابه که مارانگونی در آن‌ها وجود ندارد، در هر دسته مقایسه شود. تشابه آزمایش‌ها، از نظر مکانیزم‌های تولیدی معمول، از طریق اعداد بدون بعد بررسی شده است. لذا از طریق تغییرات میزان بازیافت آزمایش‌ها، می‌توان به وجود پدیده‌ی مارانگونی پی برد.

روش کار**مواد آزمایش**

در آزمایش‌ها، از دکان با خلوص ۹۹/۵٪ به‌عنوان نفت مصنوعی و از گاز دی‌اکسیدکربن با خلوص ۹۹/۹٪ برای تزریق در شکاف استفاده شده است.

تولید نفت به دام افتاده درون مخازن شکاف‌دار، یکی از مشکلات مهم این مخازن می‌باشد. نفت پس‌مانده را می‌توان با نیروها و مکانیزم‌هایی نظیر نفوذ/انتشار، جریان‌های متقاطع ویسکوز، ثقلی و موئینه [۴-۱] تولید کرد. میزان بازیافت نفت به رژیم تزریق (غیرامتزاجی، نزدیک امتزاجی و امتزاجی) حضور آب و میزان حفرات ته‌بسته بستگی دارد. یکی از مکانیزم‌هایی که تاکنون در بازیافت نفت در محیط متخلخل در نظر گرفته نشده است، جریان همرفتی مارانگونی حرارتی می‌باشد. اختلاف دما در سطح تماس دو سیال می‌تواند گرادیان تنش میان رویه به‌وجود آورد که در اثر این گرادیان تنش میان رویه، جریان همرفتی از تنش میان رویه کمتر به سمت تنش میان رویه بیشتر ایجاد می‌شود. به این پدیده مارانگونی حرارتی گفته می‌شود و می‌تواند در بازیافت نفت موثر باشد. هانری بنارد نخستین بار به درستی تشخیص داد که سیال گرم به سمت مراکز سلول‌های حرارتی جریان می‌یابد [۵]. در ادامه رایلی از طریق تجزیه و تحلیل پایداری خطی، بیان کرد که نیروهای شناوری عامل تولید سلول‌های همرفتی است؛ [۶]. در سال ۱۹۶۰، گروتیوس و زویدروگ برای اولین بار نقش مارانگونی در تولید نفت را مطرح کردند و گزارش دادند که مارانگونی بسته به جهت انتقال جرم می‌تواند باعث پیوستگی فاز گسسته و یا گسستگی بیشتر آن شود [۷]. کمپل [۸] و مهانتی [۹] تاثیر جریان مارانگونی را در میزان بازیافت نفت به‌جامانده، براساس جریان متقاطع موئینه بیان کردند. فانتون و کازابات با مطالعه روی صفحه صاف دریافتند که گرادیان تنش میان رویه می‌تواند باعث بالا راندن فاز ترکننده بر خلاف جهت نیروی ثقلی شود [۱۰]. نیلد [۱۱] با استفاده از یک روش تئوری روی ارتباط و اثرگذاری متقابل بین همرفت مارانگونی و رایلی نشان داد که این دو همرفت همدیگر را تقویت می‌کنند. لیفورد و پرت با محلول آبی نرمال هپتانول و نرمال هگزانول

و از قسمت پایینی شکاف خارج می‌شود. دبی گاز تزریقی ۱۰ cc در ساعت تنظیم شده است که مطابق با سرعت حرکت سیال درون مخزن باشد. همچنین در طول آزمایش برای سرد نگه داشتن گاز تزریقی، لوله تزریق گاز از درون محفظه‌ای که به‌طور پیوسته آب سرد در آن جریان دارد، عبور می‌کند.

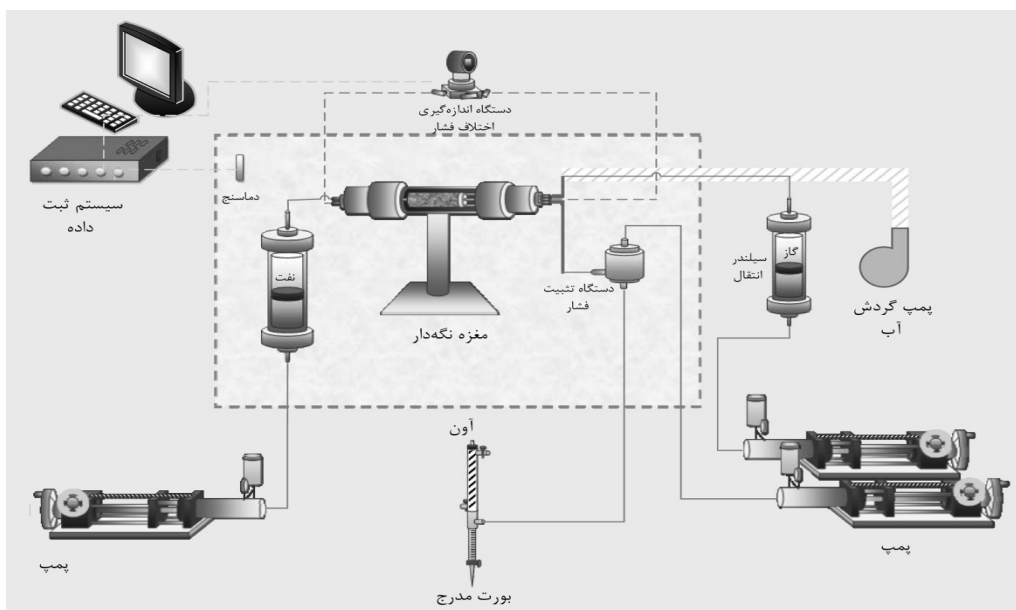
طراحی سیستم و اجزا

با توجه به اینکه جریان همرفتی مارانگونی در اثر گرادیان تنش میان رویه در سطح تماس دو سیال ایجاد می‌شود، لذا لازم است آزمایش‌ها در شرایط غیرامتزاجی (شرایطی که مرز بین دو فاز مشخص است و میان رویه فازها از بین نرفته است) انجام شوند. به منظور مطالعه نحوه تغییرات تنش میان رویه با دما و فشار در بخش طراحی آزمایش‌ها از شبیه‌ساز تجاری PVTi استفاده شده است. در شکل ۲ داده‌های آزمایشگاهی تنش میان رویه برحسب فشار [۱۵] برای سیستم دی‌اکسیدکربن/دکان (در دماهای ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ °C)، با نتایج شبیه‌سازی در دمای ۷۰ °C مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل ساخته شده داده‌های تنش میان رویه را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند

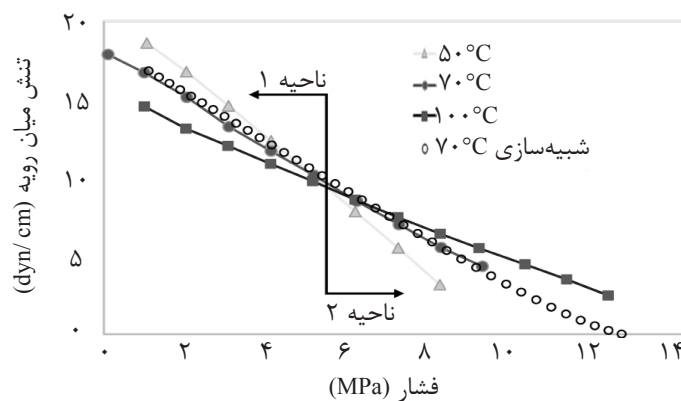
همچنین مغزه مورد استفاده استوانه‌ای و از جنس ماسه سنگ با قطر ۳/۸ cm و ۷ cm می‌باشد و دارای تخلخل ۱۵٪ و نفوذپذیری ۱۳۰ mD است.

تجهیزات آزمایشگاهی

نمودار تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۱ آمده است که مغزه‌نگهدار و دستگاه تثبیت کننده فشار درون آن قرار داده می‌شوند و از پمپ برای تزریق سیال با دبی ثابت استفاده می‌شود. در یک سمت مغزه نگه‌دار از فضای خالی ۰/۳ cm به‌عنوان شکاف استفاده شده است. برای ثابت نگه داشتن فشار آزمایش‌ها از دستگاه تثبیت کننده فشار استفاده شده است. جریان خروجی از دستگاه تثبیت کننده فشار درون بورت مدرج جمع‌آوری می‌شود و گاز خروجی به‌سمت دستگاه جمع‌آوری گاز می‌شود. همچنین برای جلوگیری از تبخیر دکان از مبرد در دمای ۲۱ °C استفاده شده است. بعد از شستشوی مغزه و خشک کردن آن، سیستم خلا شده و سپس از دکان اشباع می‌شود و نفوذپذیری مغزه محاسبه می‌گردد. در این مرحله سنگ آماده می‌شود که به فشار و دمای مورد آزمایش برسد. سپس تزریق گاز آغاز می‌شود و گاز از قسمت بالایی شکاف تزریق می‌شود و با سطح سنگ در تماس قرار می‌گیرد



شکل ۱ نمودار تجهیزات آزمایشگاهی.



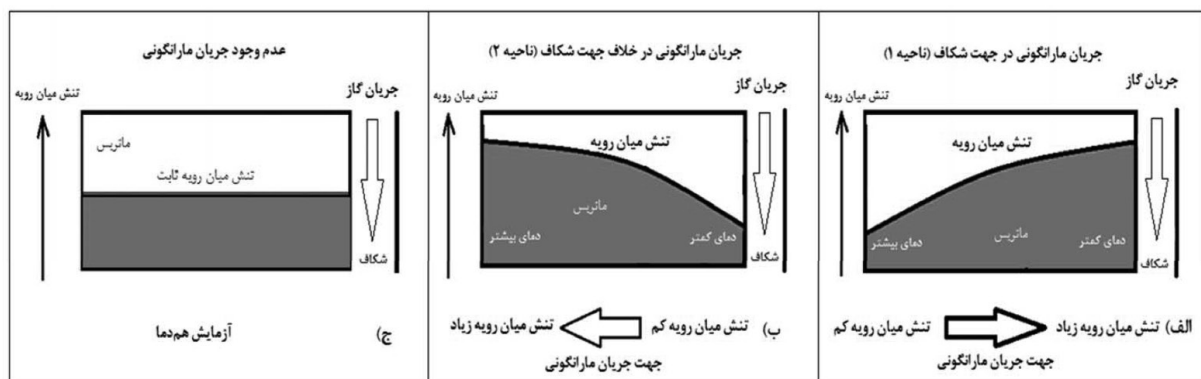
شکل ۲ تغییرات تنش میان رویه نسبت به فشار در دماهای مختلف و مقایسه نتایج آزمایشگاهی [۱۵] و شبیه‌سازی سیستم دی‌اکسیدکربن/دکان.

مارانگونی وجود ندارد. با توجه به این موضوع که هدف در این مطالعه، بررسی اثر پدیده مارانگونی ناشی از گرادیان دما روی میزان بازیافت نفت در سیستم ماتریس-شکاف می‌باشد؛ نیروهای فعال و مکانیزم‌های موثر در حرکت نفت باید هم ارز باشند تا امکان مقایسه فراهم شود. این نیروها در قالب اعداد بدون بعد بررسی می‌شود. فشار آزمایش‌ها براساس آنالیز ابعادی بدون بعد به گونه‌ای طراحی شده است که از نظر قدرت، نیروها در یک سطح باشند و قابلیت مقایسه وجود داشته باشد.

برای محاسبه اعداد بدون بعد از خواص فیزیکی بانک اطلاعاتی داده‌های آزمایشگاهی استاندارد، (NIST) [۱۶] استفاده شده است. سپس به‌وسیله شبیه‌ساز PVTi و با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون سه پارامتری مدل مورد نظر ساخته شده و از روش تغییر حجم (۱۹۸۲) برای تطابق داده‌های چگالی مولی گزارش شده استفاده شده است. در این مقاله داده‌های تنش میان رویه، ضریب تورم و غلظت دکان در فاز گاز از طریق آزمایش‌های تورم نرم‌افزار شبیه‌سازی PVTi به‌دست آمده است.

خواص نفت و گاز مانند چگالی، گرانشی، تنش میان رویه، میزان نفوذ گاز در نفت، کسر مولی گاز در فشار اشباع، ضریب تورم و نسبت نیروهای موثر در جدول ۱ آمده است.

مطابق با شکل ۲ برای سیستم دی‌اکسیدکربن/دکان، در فشارهای مختلف روند تغییرات تنش میان رویه با دما متفاوت است. به‌صورتی که در فشارهای کم (تا حدود ۵ MPa) با افزایش دما تنش میان رویه کاهش می‌یابد و در فشارهای بالاتر (بیشتر از حدود ۵ MPa) این روند برعکس می‌باشد. از این رو در آزمایش‌ها دو ناحیه وجود خواهد داشت که این نواحی در شکل ۳-الف و ۳-ب مشخص است. بر این اساس سه سناریو مختلف مطابق با جهت جریان مارانگونی وجود دارد. شکل ۳ بیانگر سناریوهای مختلف تزریق براساس تغییرات تنش میان رویه در ماتریس و در طول مغزه می‌باشد که مطابق با آن در ناحیه ۱ تزریق گاز سرد در شکاف باعث سرد شدن ناحیه ماتریس نزدیک شکاف می‌شود و تنش میان رویه در ماتریس و نزدیک شکاف، کاهش می‌یابد و جریان همرفتی مارانگونی درون ماتریس و به سمت شکاف ایجاد خواهد شد و در ناحیه ۲ این روند برعکس می‌باشد و جریان مارانگونی در خلاف جهت شکاف خواهد بود. به این معنی که جریان همرفتی مارانگونی سبب حرکت سیال از ناحیه نزدیک به شکاف به سمت انتهای مغزه می‌شود و مانع از تولید می‌شود. همچنین شکل ۳-ج سیستم هم‌دما را نشان می‌دهد (آزمایش‌های صفر مارانگونی) که تنش میان رویه در سطح تماس سیالات ثابت می‌ماند و جریان



شکل ۳ نحوه تزریق گاز و تغییرات تنش میان رویه و جریان مارانگونی در طول مغزه: الف) ناحیه ۱ (مارانگونی در جهت تولید از شکاف) (ب) ناحیه ۲ (مارانگونی در خلاف جهت تولید از شکاف) (ج) تزریق هم‌دما (عدم وجود مارانگونی).

جدول ۱ آزمایش‌ها و خواص فیزیکی.

| ناحیه آزمایش | شماره آزمایش | فشار آزمایش (MPa) | دمای نفت (°C) | دمای گاز (°C) | چگالی نفت (cc/g) | گرانروی نفت (cP) | چگالی گاز (cc/g) | گرانروی گاز (cP) | درصد غلظت دکان در فاز گاز | تنش میان رویه (mN/m) | ضریب نفوذ مولکولی (cm ² /Sec) | ضریب تورم | سرعت تخلیه نفت از ماتریس (cm/s) |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|----------------------|--|-----------|---------------------------------|
| ناحیه ۱ | ۱ | ۳/۵ | ۸۰ | ۸۰ | ۰/۶۸۴ | ۰/۴۵۸ | ۰/۰۸۰ | ۰/۰۱۵ | ۰/۳۴ | ۱۲/۷ | ۹/۶×۱۰ ^{-۵} | ۱/۰۹ | ۴/۶۰×۱۰ ^{-۶} |
| | ۲ | ۳ | ۸۰ | ۲۰ | ۰/۶۸۶ | ۰/۴۵۵ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۰ | ۱۴/۶ | ۱۱/۸×۱۰ ^{-۵} | ۱/۱۰ | ۷/۰۵×۱۰ ^{-۶} |
| ناحیه ۲ | ۳ | ۱۰ | ۸۰ | ۸۰ | ۰/۶۹۴ | ۰/۴۹۴ | ۰/۲۲۱ | ۰/۰۲۱ | ۰/۸۳ | ۳/۷ | ۲/۹۴×۱۰ ^{-۵} | ۱/۴۹ | ۳/۷۴×۱۰ ^{-۵} |
| | ۴ | ۸ | ۸۰ | ۲۰ | ۰/۶۹۲ | ۰/۴۸۳ | ۰/۸۲۷ | ۰/۰۷۵ | ۰/۲۶ | ۵/۹ | ۱/۹۴×۱۰ ^{-۶} | ۱/۵۸ | ۸/۲۹×۱۰ ^{-۶} |
| | ۵ | ۹ | ۱۰۰ | ۲۰ | ۰/۶۷۸ | ۰/۴۰۵ | ۰/۸۴۳ | ۰/۰۷۸ | ۰/۵۵ | ۵/۰ | ۱/۹۲×۱۰ ^{-۶} | ۱/۶۳ | ۸/۹۳×۱۰ ^{-۶} |

در رابطه ۲، P_c فشار موئینگی (Pa) و Δp اختلاف چگالی گاز و نفت (g/cm^3) و g ثابت گرانش می‌باشد. براساس مطالعات ژو و فایرز، معادلاتی برای توصیف جریان‌های متقاطع ارائه شده است که این اعداد بدون بعد در بازه‌های مختلف بیانگر غالب بودن نیروی خاصی است. این نیروها شامل نیروی متقاطع ثقلی به ویسکوز N_{gv} ، نیروی متقاطع موئینه به ویسکوز N_{cv} و نیروی متقاطع موئینه به ثقلی N_{pcg} هستند که در بازه بین ۰/۲ تا ۵ این نیروها تقریباً برابرند و در بازه‌های کمتر از ۰/۲ یا بیشتر از ۵ یکی از نیروها نسبت به دیگری غالب است [۲۰].

$$N_{cv} = \frac{P_c}{\Delta P_{viscous}} = \frac{P_c K}{\nu \mu L} \quad (۳)$$

در این راستا، نقش مکانیزم نفوذ مولکولی از مقدار زمان لازم برای اعمال اثر نفوذ مولکولی، به‌دست می‌آید.

$$\text{زمان لازم جهت نفوذ مولکولی} = \frac{L^2}{D_{gm}} \quad (۱)$$

در رابطه ۱، L طول مغزه (cm)، D ضریب نفوذ مولکولی گاز در نفت (cm^2/s) می‌باشد. در این مطالعه نفوذ مولکولی با استفاده از رابطه سیگموند [۱۷] و داسیلوا [۱۸] محاسبه شده است. برای بررسی نقش نیروهای ثقلی در بازیافت نفت در زمان‌های ابتدایی آزمایش از ارتفاع آستانه موئینگی استفاده می‌شود. این عدد از تقسیم بیشینه مقدار فشار موئینگی بر اختلاف چگالی (ثابت گرانش) به‌دست می‌آید [۱۹].

$$\text{ارتفاع آستانه موئینگی} = \frac{P_c}{\Delta \rho g} \quad (۲)$$

، N_{cv} ، N_{gv} و همچنین ارتفاع آستانه موئینگی گزارش شده است.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های میزان بازیافت نفت برحسب حجم فضای متخلخل تزریق شده، در شکل ۴ آمده است. آزمایش‌های ناحیه ۱ (مارانگونی در جهت شکاف) با خط چین و به رنگ خاکستری نمایش داده شده است و آزمایش‌های ناحیه ۲ (مارانگونی در خلاف جهت تولید) به صورت علائم سیاه رنگ می‌باشد.

بحث

در این تحقیق دودسته آزمایش انجام شده است که مربوط به ناحیه ۱ (مارانگونی در جهت شکاف) و ناحیه ۲ (مارانگونی خلاف جهت شکاف) است.

که در رابطه، N_{cv} عدد بی‌بعد موئینه به ویسکوز، فشار موئینگی K (Pa)، تراوایی (cm^3) ، v سرعت حرکت سیال درون مغزه (cm/s) ، μ ویسکوزیته دکان $(pa.s)$ و L طول مغزه (cm) می‌باشد.

$$N_{gv} = \frac{\Delta\rho g H}{\Delta P_{viscous}} = \frac{\Delta\rho g H K}{v \mu L} \quad (4)$$

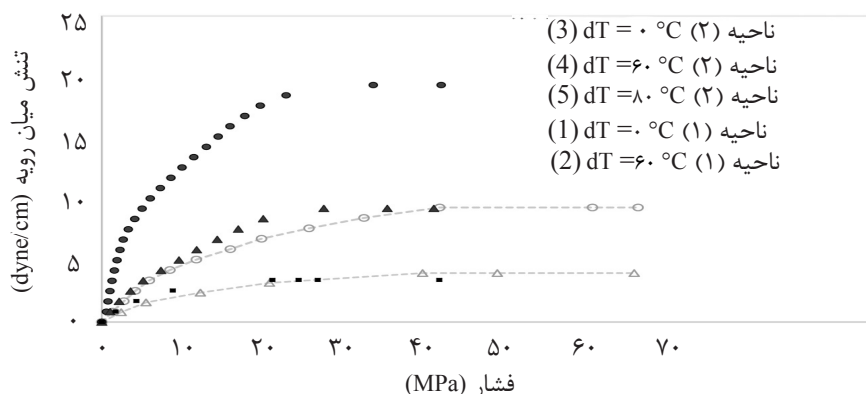
همچنین در رابطه ۴، N_{gv} عدد بی‌بعد نیروی ثقلی به ویسکوز، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی گاز و نفت (g/cm^3) و g ثابت گرانش می‌باشد.

$$N_{PcG} = \frac{P_c}{\Delta\rho g H} \quad (5)$$

هدف از محاسبه این اعداد، مقایسه نسبت نیروهای مقاوم در برابر حرکت با نیروهای پیشران است که قابلیت مقایسه نیروها میسر شود و تنها "وجود و عدم وجود جریان مارانگونی"، تفاوت آزمایش‌های طراحی شده در یک دسته باشد. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به آزمایش‌ها، فشار موئینه، عدد موئینگی و بوند، ضریب تورم، اعداد بدون بعد N_{PcG}

جدول ۲ مقادیر پارامترهای بدون بعد و ارتباط آن با میزان تولید نفت.

| ناحیه | شماره آزمایش | فشار (MPa) | دمای نفت | دمای گاز | فشار موئینگی (MPa) | زمان لازم برای نفوذ مولکولی (hr) | ارتفاع آستانه موئینگی (cm) | N_{gv} | N_{cv} | N_{PcG} | میزان بازیافت (%) |
|---------|--------------|------------|----------|----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|----------|----------|-----------|-------------------|
| ناحیه ۱ | ۱ | ۳/۵ | ۸۰ | ۸۰ | ۰/۸۰۸ | ۱۴۳ | ۲۶/۷۱ | ۱۹/۴۹ | ۱۳۷/۰ | ۷/۰۲۹ | ۴/۰ |
| | ۲ | ۳ | ۸۰ | ۲۰ | ۰/۶۸۶ | ۱۱۷ | ۳۰/۰۱ | ۱۳/۰۴ | ۱۰۳/۰ | ۷/۸۹۳ | ۹/۳ |
| ناحیه ۲ | ۳ | ۱۰ | ۸۰ | ۸۰ | ۰/۶۹۴ | ۴۷۲ | ۹/۹۹ | ۱/۷۲ | ۴/۵۴ | ۲/۶۲۸ | ۳/۴ |
| | ۴ | ۸ | ۸۰ | ۲۰ | ۰/۶۹۲ | ۷۶۹۸ | ۲۹/۷۹ | ۲/۲۸ | ۱۷/۹۰ | ۷/۸۴۰ | ۱۹/۳ |
| | ۵ | ۹ | ۱۰۰ | ۲۰ | ۰/۶۷۸ | ۷۲۴۹ | ۲۷/۹۳ | ۲/۶۸ | ۱۹/۷۰ | ۷/۳۵۴ | ۹/۳ |



شکل ۴ بازیافت دکان نسبت به حجم فضای متخلخل تزریق شده در ناحیه ۱ و ۲ برای سیستم دی‌اکسیدکربن/دکان.

به عنوان نیروی مقاوم در برابر حرکت در نظر گرفته شده است. زیرا از آنجا که گاز در درون شکاف تزریق می‌شود، جابه‌جایی فاز نفت ناشی از اختلاف فشار ایجاد شده از حرکت گاز نیست و نیروی گرانشی به عنوان نیروی پیشران عمل نمی‌کند. بنابراین این نیرو در فاز نفت در نظر گرفته شده و به صورت عاملی که در برابر جریان مقاومت می‌کند، بررسی شده است. مطابق با جدول ۲ و آنچه در مورد بازه تغییرات اعداد بدون بعد گفته شد، در آزمایش‌های ناحیه ۱ (مارانگونی در جهت تولید)، نیروی گرانشی نسبت به ثقلی و موئینه ناچیز است و همچنین نیروی موئینه نسبت به ثقلی غالب است. لذا می‌توان گفت که دو آزمایش شماره ۱ و ۲ تحت تاثیر نیروهایی با قدرت یکسان هستند و تفاوت این دو آزمایش در اختلاف دمای نفت و گاز (وجود یا عدم وجود مارانگونی) می‌باشد. به همین ترتیب در آزمایش‌های ناحیه ۲ (جریان مارانگونی در خلاف جهت تولید)، نیروهای گرانشی و ثقلی هم‌ارزند و نیروی موئینه نسبت به هر دو غالب است. در این دسته آزمایش (آزمایش‌های شماره ۳، ۴ و ۵)، به دلیل بالاتر بودن فشار آزمایش، نیروهای موئینه نسبت به آزمایش‌های ناحیه ۱ ضعیف‌تر است اما با این حال نیروهای موئینه نسبت به ثقلی غالب است. مشابه آنچه که در مورد ناحیه ۱ گفته شد، در این ناحیه هم به لحاظ توازن قدرت نیروها، هر سه آزمایش مشابه هستند و تفاوت در وجود یک گردایان دما غالب و یا همان همرفت حرارتی مارانگونی و یا شدت آن می‌باشد. زیرا اختلاف دمای نفت و گاز سبب تفاوت در شدت جریان مارانگونی می‌شود).

برای بررسی مکانیزم تورم و تبخیر، به ترتیب از "ضریب تورم" و "درصد غلظت دکان در فاز گاز" که از شبیه‌ساز PVTi استخراج شده است، استفاده می‌شود.

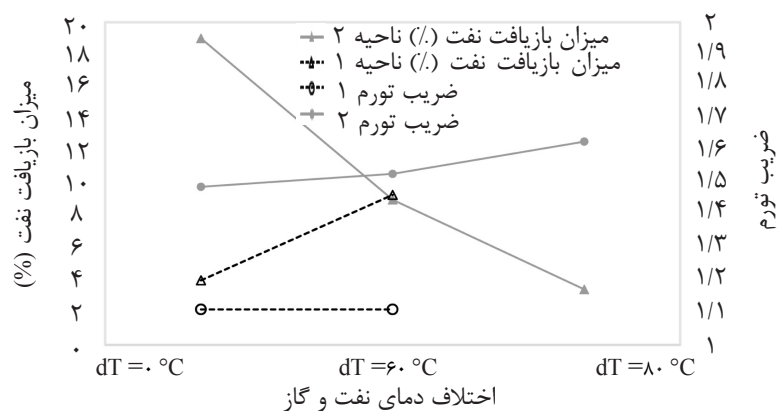
هنگامی که نفت و گاز در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند

در هر ناحیه یک آزمایش نماینده "سطح صفر مارانگونی" می‌باشد و به دلیل ثابت بودن دمای سیستم، درجه آزادی آن صفر خواهد بود و گردایان تنش میان رویه وجود نخواهد داشت. لذا جریان مارانگونی در این آزمایش‌ها نقشی ندارد. در بقیه آزمایش‌ها، با تزریق گاز سرد به درون شکاف، دمای ماتریس در محل شکاف کاهش می‌یابد و تغییرات دما در طول ماتریس پیشروی می‌کند. در این شرایط درجه آزادی، یک خواهد بود و تغییر دما منجر به ایجاد گردایان تنش میان رویه می‌شود. مکانیزم‌های موثر و معمول در بازیافت نفت، شامل جریان متقاطع ثقلی، موئینه و ویسکوز، تبخیر، تورم و نفوذ مولکولی می‌شود. زمان نفوذ مولکولی به معنی مدت زمان مورد نیاز برای تولید تمام نفت درون مغزه از طریق نیروی نفوذ مولکولی است. از آنچه در جدول ۲ مربوط به آنالیز مقیاس مغزه آمده است می‌توان دریافت که زمان لازم برای نیروهای نفوذ مولکولی بسیار بیشتر از مدت زمان آزمایش است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت آنچه موجب تولید نفت در زمان‌های نخستین شده است ناشی از نفوذ مولکولی نبوده است و این مکانیزم در آزمایش‌ها نقش اصلی را ایفا نخواهد کرد. با توجه به ارتفاع آستانه موئینگی که در جدول ۲ آمده است، در این آزمایش‌ها مقادیر ارتفاع آستانه موئینگی از قطر مغزه بزرگ‌تر می‌باشد و در این شرایط انتظار می‌رود در زمان‌های ابتدایی نفتی به واسطه ریزش ثقلی تولید نشود.

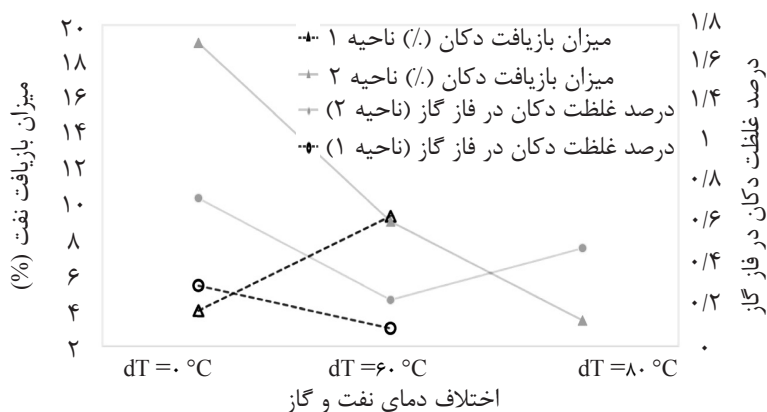
نسبت نیروهای ثقلی، گرانشی و ویسکوز که با اعداد بدون بعد گزارش شده است، نشان‌دهنده مقایسه قدرت هر کدام از این نیروها در حضور نیروی دیگر است. با بررسی بزرگی اعداد بدون بعد N_{cv} ، N_{peg} ، N_{gv} در جدول ۲، معلوم می‌گردد که آزمایش‌های تعریف شده در هر دسته، به لحاظ توازن نیروهای ثقلی، گرانشی و موئینه مشابه هستند و مقایسه این نتایج در این دسته‌ها معنادار می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها، نیروی گرانشی

تورم، میزان بازیافت افزایش یافته و در ناحیه ۲ با وجود افزایش ضریب تورم، میزان بازیافت کاهش یافته است. بنابراین، تورم عامل کنترل کننده میزان بازیافت دکان نمی باشد. از طرفی "درصد غلظت دکان در فاز گاز" می تواند معیاری از میزان تبخیر دکان باشد و ارتباط مستقیم با میزان بازیافت دارد. بنابراین انتظار می رود که با افزایش درصد غلظت در فاز گاز، میزان بازیافت افزایش یابد. اما مطابق با شکل ۶، در آزمایش های غیرهم دما (شامل جریان مارانگونی) روند تغییرات ضریب تورم از الگوی خاصی پیروی نمی کند. بنابراین مکانیزم تبخیر در آزمایش ها مکانیزم غالب نمی باشد و کنترل کننده حرکت نفت نیست. برای ناحیه نخست که گرایان تنش میان رویه سبب ایجاد جریان مارانگونی در جهت تولید نفت می شود، ۲ آزمایش در نظر گرفته شده است.

و سطح تماس بین دو فاز تشکیل می شود، مقداری از گاز درون نفت حل می شود (تورم) و همچنین مقداری از نفت درون فاز گاز تبخیر می شود. بنابراین، درصد غلظت دکان در فاز گاز می تواند معیاری از شدت مکانیزم تبخیر در آزمایش ها باشد. "درصد غلظت دکان در فاز گاز" که در جدول ۱ گزارش شده است، از آزمایش های تورم توسط شبیه ساز PVTi استخراج شده است که در دمای میانگین سطح تماس نفت و گاز به دست آمده است. شکل ۵ روند تغییرات میزان بازیافت و ضریب تورم را برای هر ناحیه آزمایش نشان می دهد. با افزایش ضریب تورم انتظار می رود که تحرک پذیری نفت افزایش یابد و میزان بازیافت دکان زیاد شود. اما براساس شکل ۵ در هیچ کدام از نواحی ۱ و ۲، تغییرات میزان بازیافت نفت با تغییرات ضریب تورم هماهنگ نیست. در ناحیه ۱ با وجود ثابت بودن میزان ضریب



شکل ۵ مقایسه روند تغییرات ضریب تورم و میزان بازیافت در نواحی مختلف.



شکل ۶ میزان بازیافت دکان بر حسب درصد غلظت دکان در فاز گاز در نواحی مختلف.

درون شکاف، در یک سیستم ماتریس-شکاف، تحت سه سناریو مختلف بر اساس جهت جریان مارانگونی، در فشار بالا و دماهای متفاوت در یک مغزه نگهدار ویژه، انجام شد و نتایج حاصله به کمک اعداد بدون بعد تحلیل و از مقایسه آزمایش‌های هم‌دما (به‌عنوان نقطه صفر مارانگونی) و آزمایش‌های غیرهم‌دما (وجود جریان مارانگونی)، وجود پدیده مارانگونی در محیط متخلخل ماتریس-شکاف بررسی شد. براساس مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، وجود گرادیان تنش میان رویه ناشی از اختلاف دما، باعث به‌وجود آمدن جریان همرفتی مارانگونی می‌شود. قدرت نیروهای موئینه، ثقلی و ویسکوز از طریق اعداد بدون بعد محاسبه گردید. نسبت این نیروها نشان‌دهنده ناچیز بودن نیروی گرانی و غالب بودن نیروی موئینه در هر دو ناحیه بود که جریان همرفتی مارانگونی حرارتی قادر است بر نیروی موئینه غلبه کند و سبب حرکت نفت درون ماتریس شود. شدت این جریان ارتباط مستقیمی با گرادیان تنش میان رویه ایجاد شده دارد و هرچه اختلاف دما بیشتر باشد گرادیان تنش میان رویه بیشتری به‌وجود می‌آید که منجر به افزایش تاثیر روی بازیافت می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

H : ارتفاع (m)

g : ثابت گرانش (m/s^2)

k : تراوایی (D)

N_{cv} : عدد بی بعد موئینه به ویسکوز

P : فشار (Pa)

N_{gv} : عدد بدون بعد ثقلی به ویسکوز

T : دما ($^{\circ}C$)

N_{pcG} : عدد بدون بعد موئینه به ثقلی

D : ضریب نفوذ انتقال جرم (m^2/s)

A : سطح مقطع مغزه (m^2)

l : طول مغزه (m)

σ : تنش میان رویه (mN/m^2)

آزمایش شماره ۱ حالت هم‌دما ($80^{\circ}C$) و سطح صفر مارانگونی را نشان می‌دهد و در آزمایش شماره ۲، اختلاف دمای $60^{\circ}C$ نفت و گاز سبب به‌وجود آمدن جریان مارانگونی شده است. همچنین برای ناحیه دو، ۳ آزمایش طراحی شده است که در آزمایش‌های غیرهم‌دما جریان مارانگونی در جهت خلاف شکاف ایجاد می‌شود. تفاوت این دو آزمایش در دمای نفت می‌باشد که منجر به ایجاد گرادیان دمای متفاوت می‌شود و سبب می‌شود که جریان مارانگونی با شدت متفاوت به‌وجود آید. با توجه به آنچه در مورد نقش مکانیزم‌های مختلف در حرکت نفت درون مغزه گفته شد، تفاوت در میزان بازیافت دکان، ناشی از مکانیزم جریان مارانگونی می‌باشد و متناسب با جهت جریان، باعث افزایش یا کاهش میزان بازیافت می‌گردد. اکنون، با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که برای ناحیه اول، آزمایش شماره ۱ (سطح صفر مارانگونی) دارای میزان بازیافت کمتری نسبت به آزمایش شماره ۲ (شامل جریان مارانگونی) می‌باشد و اختلاف دمای نفت و گاز سبب شده است که جریان همرفتی مارانگونی به تولید نفت کمک کند و بازیافت را افزایش دهد. همچنین، برای ناحیه‌ی دو، در آزمایش شماره ۵ (اختلاف دمای نفت و گاز $80^{\circ}C$) میزان بازیافت، کمتر از آزمایش شماره ۴ (اختلاف دمای نفت و گاز $60^{\circ}C$) می‌باشد که نشان‌دهنده تاثیر بیشتر جریان مارانگونی در جلوگیری از میزان تولید می‌باشد. در همین دسته، آزمایش شماره ۳ که جریان مارانگونی در آن نقشی ندارد دارای بیشترین میزان بازیافت است. بنابراین با هم ارز قرار دادن نیروهای موثر و طراحی آزمایش، به گونه‌ای که اثر بخشی آنها معادل باشد، اثر مثبت و منفی یک مکانیزم دیگر به نام مارانگونی، در دو ناحیه مختلف فشاری که جهت جریان همرفتی متفاوتی دارند، نشان داده شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌های تزریق گاز دی‌اکسیدکربن

μ : گرانیوی (Pa.s)

ϕ : تخلخل

ρ : چگالی (kg/m^3)

مراجع

- [1]. Hara S. and Christman P., "Investigation of a cyclic countercurrent light-oil/ CO_2 immiscible process," SPE Advanced Technology Series, Vol. 1, pp. 159-165, 1993.
- [2]. Pande K. and Orr Jr F., "Analytical computation of breakthrough recovery for CO_2 floods in layered reservoirs," Paper SPE, Vol. 20177, pp. 22-25, 1990.
- [3]. Ringen J. K., Haugse V., Høier L., Berge L. I. and Reed J., "Experimental and numerical studies of gas injection in fractured carbonates: pressure and compositional effects," in International Symposium of the Society of Core Analysts, Toronto, Canada, 2005.
- [4]. Fayers F. and Lee S. T., "Crossflow mechanisms by gas drive in heterogeneous reservoirs," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1992.
- [5]. Bernard H., "Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide [the cellular vortices in a liquid layer," Rev. Gén. Sci. Pure. Appl., Vol. 11, pp. 1261-1271, 1900.
- [6]. Rayleigh L., "lix. on convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 32, pp. 529-546, 1916.
- [7]. Groothuis H. and Zuiderweg F., "Influence of mass transfer on coalescence of drops," Chemical Engineering Science, Vol. 12, pp. 288-289, 1960.
- [8]. Campbell B. T. and Orr Jr F. M., "Flow visualization for CO_2 /crude-oil displacements," Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 25, pp. 665-678, 1985.
- [9]. Mohanty K., Gupta A. and Deruiter R., "Pore-level mechanisms of residual oil formation during miscible displacement," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 163, pp. 199-216, 1994.
- [10]. Fanton X., Cazabat A. and Quéré D., "Thickness and shape of films driven by a marangoni flow," Langmuir, Vol. 12, pp. 5875-5880, 1996.
- [11]. Nield D., "Modelling the effect of surface tension on the onset of natural convection in a saturated porous medium," Transport in Porous Media, Vol. 31, pp. 365-368, 1998.
- [12]. Lyford P. A., Pratt H., Shallcross D. C. and Grieser F., "The marangoni effect and enhanced oil recovery part 1. porous media studies," The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 76, pp. 167-174, 1998.
- [13]. Aubeterre A. D., Da Silva R. and Aguilera M., "Experimental study on marangoni effect induced by heat and mass transfer," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 32, pp. 677-684, 2005.
- [14]. Khosravi M., Bahramian A., Emadi M., Rostami B. and Roayaie E., "Mechanistic investigation of bypassed-oil recovery during CO_2 injection in matrix and fracture," Fuel, Vol. 117, pp. 43-49, 2014.
- [15]. Georgiadis A., Llovel F., Bismarck A., Blas F. J., Galindo A., Maitland G. C., Martin Trusler J.P. and George Jackson, "Interfacial tension measurements and modelling of (carbon dioxide+n-alkane) and (carbon dioxide+

water) binary mixtures at elevated pressures and temperatures," The Journal of Supercritical Fluids, Vol. 55, pp. 743-754, 2010.

[16]. NIST. National Institute of Standards and Technology (NIST): Data bank of thermodynamic properties, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. (Online) 2017.

[17]. Sigmund P. M., "*Prediction of molecular diffusion at reservoir conditions. part ii-estimating the effects of molecular diffusion and convective mixing in multicomponent systems,*" Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 15, Issue 03, July 1976.

[18]. F. Da Silva and P. Belery, "*Molecular diffusion in naturally fractured reservoirs: a decisive recovery mechanism,*" in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1989.

[19]. Dominguez G., "*Carbonate reservoir characterization: a geologic-engineering analysis,*" Vol. 30: Elsevier, 1992.

[20]. Zhou D., Fayers F. and Orr Jr F., "*Scaling of multiphase flow in simple heterogeneous porous media,*" SPE Reservoir Engineering, Vol. 12, pp. 173-178, 1997.