

تأثیر پدیده مارانگونی در ازدیاد برداشت نفت و تفاوت آن با پدیده جریان متقاطع موئینه

مریم خسروی*، پژوهشکده‌ی ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۴/۱۰/۲۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش داور: ۹۴/۱۰/۲۶

جریان همرفت از نقاطی با تنش میان‌روییه‌ی کمتر به سمت نقاطی با تنش میان‌روییه‌ی بیشتر را جریان مارانگونی می‌نامند. متأسفانه این پدیده در مهندسی نفت کمتر شناخته شده است. حال آنکه نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط مطلوب، مارانگونی بازیافت نفت را تا حدود ۳۵ درصد افزایش می‌دهد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که این پدیده گاهی در نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده اما با استفاده از مفهوم جریان متقاطع موئینه، توجیه یا مدل‌سازی شده است. در حالی که جریان موئینه‌ی متقاطع و مارانگونی تفاوت‌های بنیادینی با یکدیگر دارند. در این مقاله با استفاده از طراحی دقیق آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن در شکاف نشان خواهیم داد که در شرایطی که نیروهای موئینه رو به زوال هستند (یعنی در فشارهای نزدیک بحرانی) جریان قوی مارانگونی چگونه فعال می‌شود و به صورت کاملاً مستقل به بازیافت نفت کمک می‌کند. برای تحقیق این ادعا، ابتدا دی‌اکسید کربن در فشارهای مختلف در سیستم شکاف/ماتریس اشباع از دکان خالص به عنوان سیستم عاری از جریان‌های مارانگونی، تزریق می‌گردد. در هریک از آزمایش‌های فشار ثابت درجه‌ی آزادی ترمودینامیکی سیستم صفر است و بنابراین در نقاط مختلف تنش میان‌روییه ثابت است و می‌توان مطمئن بود نتایج این آزمایش‌ها در سطح صفر مارانگونی انجام می‌شوند. در سری آزمایش‌های بعدی با اضافه کردن یک جزء نفتی دیگر (پروپان)، درجه‌ی آزادی به یک افزایش می‌یابد و بنابراین در نقاط مختلف محیط متخلخل و میان‌روییه‌ی نفت و گاز، تنش‌های میان‌روییه‌ی متفاوتی تجربه می‌شود که در اثر آن انتظار وجود جریان‌های همرفت مارانگونی را داریم. مقایسه‌ی تفاوت نتایج بازیافت نفت از این دو سری آزمایش با عدد مارانگونی نشان می‌دهد که میزان ازدیاد برداشت ناشی از مارانگونی با عدد مارانگونی متناسب است. در شرایط غیرامتزاجی این جریان‌ها بسیار ضعیف هستند و در شرایط بحرانی از بین می‌روند. در حالی که در شرایط نزدیک بحرانی مارانگونی بسیار قوی و فعال عمل می‌کند.

واژگان کلیدی:

جریان مارانگونی، عدد مارانگونی، تزریق دی‌اکسید کربن، شکاف و ماتریس

مقدمه

تورنتون را متأثر از مارانگونی دانستند و نخستین بار این فرضیه را مطرح کردند که مارانگونی می‌تواند به تولید نفت کمک کند. آنها گزارش دادند که مارانگونی از طریق ایجاد نوسان در سطح تماس دو فاز، انتقال جرم را افزایش می‌دهد و بسته به جهت انتقال جرم می‌تواند سبب پیوستگی فاز گسسته یا گسستگی بیشتر آن شود. آنها همچنین نشان دادند که با تزریق یک اسلاگ از حلال مناسب، می‌توان نفت به تله افتاده را تولید کرد [۵]. لم^۶ در ۱۹۸۳ مدل قابل مشاهده‌ای ساخت که با دانه‌های مصنوعی پر شده بود و در آن نفت به تله افتاده از طریق تزریق آب و نرمال پروپانول تعادلی با نفت تولید می‌شد. او در کار خود عدد بی‌بعد موئینگی^۸ بحرانی را در حالت عادی تزریق و در حالتی که مقدار الکل تزریقی کمی بیش از حد تعادلی باشد محاسبه کرد و از مقایسه‌ی آنها نتیجه گرفت که وقتی پروپانول بیش از حد تعادلی استفاده شود عدد موئینگی بحرانی کاهش

اثر مارانگونی نخستین بار در ۱۸۵۴ توسط وبر^۱ مطالعه شد [۱]. تامسون^۲ حرکت قطرات مخلوط آب و الکل را که همواره در جداری شیشه‌ای به بالا کشیده می‌شدند و سپس به سمت داخل آن بازمی‌گشتند را به گرادیان تنش میان‌روییه مربوط دانست و آنرا پدیده‌ی واین تیر^۳ نامید [۲]. این پدیده بعدها در ۱۸۶۵ توسط مارانگونی^۴ در قالبی مشخص معرفی شد [۳]. وی اظهار داشت هنگامی که در میان‌روییه‌ی فازهای مجاور، گرادیان تنش میان‌روییه (به دلیل گرادیان غلظت، دما یا الکتریسیته) وجود داشته باشد جریانی از نقاط با تنش میان‌روییه‌ی کم به سمت نقاط با تنش میان‌روییه‌ی بالا ایجاد می‌شود. تورنتون^۵ در مطالعات خود در زمینه‌ی تزریق حلال نشان داد که اگر حلال در فاز ناپیوسته باشد انتقال جرم، باعث پیوستن قطرات گسسته به یکدیگر می‌شود و اگر حلال نباشد یا در فاز پیوسته باشد این اتفاق بسیار دیرتر می‌افتد [۴]. در ۱۹۶۰ گروتیوس و زویدروگ^۶ نتایج

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (khosravi.inbox@gmail.com)

کرده و نشان داد که تغییرات تنش میان‌رویه در سیستم نفت و پروپانول بیشینه است.

در پروژه‌های تزریق سیال، ماده‌ی تزریقی به گونه‌ای در مخزن حرکت کرده و در مسیرهایی جاری می‌شود که لزوماً با تمامی نفت مخزن در تماس قرار نمی‌گیرد. به نفت باقی‌مانده در مسیرهای دور از دسترس، نفت به‌جامانده می‌گویند و این پدیده ممکن است اغلب به دلیل ناهمگنی سنگ مخزن و در ابعاد میکروسکوپی یا ماکروسکوپی اتفاق بیفتد؛ ناهمگنی‌های رایج و ناچیز در سنگ‌ها (مانند واگ‌ها، صفحات رسوبی و تغییرات منطقه‌ای رس‌ها) یا ناهمگنی‌های عمده (مانند شکاف‌ها در مخازن شکاف‌دار، لایه‌های با تراوایی‌های متفاوت، لزه‌ها و لایه‌های شیلی). در شرایط مناسب عوامل مختلفی می‌توانند به تولید نفت به‌جامانده کمک کنند که نفوذ مولکولی و انتشار، جریان متقاطع ناشی از نیروی ویسکوز/نیروی موئینه/نیروی ثقلی، تبخیر و تورم از آن جمله هستند. در این مقاله نشان داده خواهد شد که جریان مارانگونی نیز می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر جابجایی نفت به‌جامانده باشد.

در جریان پسماندن نفت در مخازن ناهمگن، سیال تزریقی در مسیر با تراوایی بیشتر جاری شده و سبب می‌گردد یک مسیر خاص نسبت به مسیرهای مجاور در شرایط موئینگی متفاوتی قرار گیرد. مثلاً در تزریق آب در سنگ آب‌دوست، مسیر با تراوایی زیاد، اشباع آب بیشتری خواهد داشت و در نتیجه فشار موئینگی در آن بسیار کم خواهد بود. در حالی که لایه‌ی با تراوایی کمتر، اشباع آب کمتر و در نتیجه فشار موئینگی بیشتری دارد. این مسأله سبب می‌شود به دلیل گرادیان فشار موئینه‌ی ایجاد شده، نفت به مسیر با تراوایی بیشتر و آب به مسیر با تراوایی کمتر برود. همان‌طور که در بخش بحث و بررسی نشان داده می‌شود این پدیده ناشی از وجود شیب فشاری بوده و با مارانگونی متفاوت است. در مهندسی نفت، کمبل^{۱۳} [۱۲]، مهانتی^{۱۴} [۱۳] و برگر^{۱۵} [۱۴] در آزمایش‌های میکرومدل خود پدیده‌های مشابهی مشاهده کردند که آنها را مرتبط با نیروهای موئینه دانستند.

افراد مثل فایرز^{۱۶} [۱۵] و جمیلی^{۱۷} [۱۶] جریان متقاطع موئینگی را از طریق تغییر نمودارهای فشار موئینه و بر حسب اشباع مدل‌سازی کرده‌اند. از آنجا که مارانگونی بر اساس تغییر اشباع فاز ترکننده ایجاد نمی‌شود ممکن است از دیدگاه مدل‌سازی بتوان با تغییر نمودارهای موئینه، نتایج را بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق کرد. اما این روش دور از واقعیت و فیزیک مسأله است و جریان همرفت ناشی از عدم توازن تنش‌های برشی در میان‌رویه، مکانیسم کاملاً مجزایی است.

۱- تجهیزات آزمایشگاهی و روش‌ها

در تست‌های آزمایشگاهی انجام شده به‌منظور ساده‌سازی تحلیل

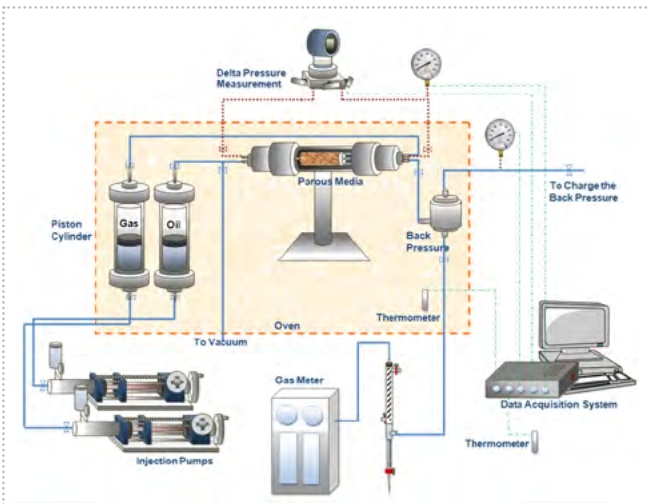
می‌یابد؛ یعنی نفت بیشتری در شرایط عادی جاری است و این به معنی تولید بیشتر است. او همچنین نشان داد که با افزایش غلظت الکل، حجم نفت افزایش یافته (نفت متورم می‌شود) و تنش میان‌رویه کاهش می‌یابد [۶]. وی برای جدا کردن نقش مارانگونی از انتقال جرم، از نتایج کار سورنسن^۹ [۷] و استرلینگ^{۱۱} [۸] بهره جست و اظهار داشت که در شرایط خاصی انتقال جرم روی سطح تماس می‌تواند منجر به نوسانات و ناپایداری‌های سطحی (پدیده‌ی مارانگونی) شود. بر اساس محاسبات تحلیلی و عددی سورنسون، در سیستم لم وقتی گرادیان غلظت به حد مشخصی می‌رسید باید نوسانات سطحی آغاز می‌شد. بنابراین لم، گرادیان غلظت را در جابجایی با سرعت‌های مختلف در غلظت‌های کمتر و بیشتر از این حد محاسبه کرد و نشان داد که در تزریق با سرعت‌های زیاد (غلظت‌های کم الکل) گرادیان غلظت بسیار زیاد است. بنابراین نوسانات سطحی شدیدی به سیستم اعمال می‌گردد، انتقال جرم چندین برابر تسریع می‌شود و در نتیجه به دلیل همزمانی انتقال جرم و مارانگونی در این محدوده تولید تا حد بسیاری متأثر از اختلاف غلظت عمومی و تعادلی است و فاصله‌ی عدد موئینگی بحرانی تعادلی و غیرتعادلی منطقی است. اما در حالتی که سرعت جابجایی کم است (غلظت زیاد الکل) گرادیان غلظت سیستم محدود بوده و بنابراین نوسانات سطحی بسیار کم است (مارانگونی بسیار کم) و فاصله‌ی بین حالت تعادلی و غیرتعادلی چندان زیاد نیست. وی در پایان گزارش داده که در ابعاد میدانی یا مغزه، نوسانات سطحی بسیار ناچیز خواهد بود.

لو^{۱۱} و همکاران در مطالعه‌ی حلال‌های الکی مختلف بدین نتیجه رسیدند که مارانگونی، انتقال جرم را ۳-۴ برابر افزایش می‌دهد [۹]. لیفورد^{۱۲} در ادامه‌ی کار لم، محیط دانه‌جدا‌ی عمودی بزرگی ساخت که از گرانول‌های آب‌دوست پر شده بود. او مدل خود را با آب اشباع کرد و سپس تا رسیدن به S_{wi} نفت تزریق نمود. او برای بازیافت نفت، در چهار حالت مختلف، حلال تزریق کرد و نتایج را بدین صورت گزارش داد که تزریق اسلاگ بهترین گزینه است و نیازی نیست با افزایش الکل مصرفی، سیستم به حالت امتزاجی برسد. با توجه به تغییرات میزان تنش میان‌رویه احتمالاً عامل افزایش تولید، ایجاد نوسانات سطحی (مارانگونی) است. وی پیشنهاد کرد که بهتر بود تحلیل‌ها بر مبنای محاسبه‌ی عدد بی‌بعد مارانگونی تکرار شوند [۱۱ و ۱۰]. لیفورد آزمایش‌های اسلاگ را با انواع مختلف الکل انجام داده و نشان داد که با تزریق نرمال پروپانول بیشترین بازیافت حاصل می‌شود. او در مطالعه‌ی بعدی خود تغییرات تنش میان‌رویه برای سیستم آب و نفت را در حضور درصدهای مختلفی از الکل‌های مختلف بررسی

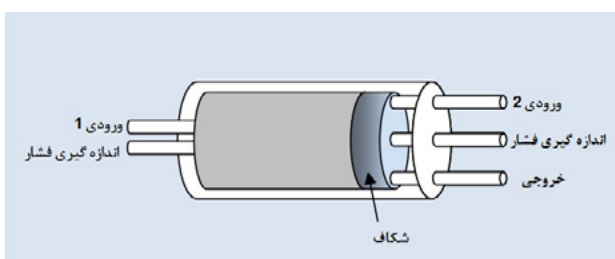
در این آزمایش‌ها از یک سنگ ماسه‌ای رخنمون به دست آمده تا علاوه بر مقاومت بیشتر آن در برابر دی‌اکسیدکربن، سنگ کمتر مستهلک شده و تخلخل و تراوایی آن نیز بیشتر باشد. تراوایی این سنگ ۱۷۶ میلی‌داریسی، تخلخل آن حدود ۱۷ درصد و مجموع حجم تخلخل هیدروکربنی^{۱۸} آن حدود ۱۵/۵ سی‌سی است. در حالی که قطر و طول مغزه به ترتیب ۳/۸ و ۸ سانتی‌متر است. شکل ۱- تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مغزه‌ی نگهدار^{۱۹}، دستگاه تثبیت فشار^{۲۰} (BPR) و سلول‌های انتقال^{۲۱} سیالات داخل گرمکن قرار گرفته‌اند. سیالات با استفاده از پمپ، با نرخ ثابت ۱۰ سی‌سی در ساعت به داخل سنگ یا شکاف تزریق می‌شوند؛ در حالی که BPR در خروجی فشار را ثابت نگه می‌دارد. سیالات تولید شده به جداکننده هدایت می‌شوند و مایع و گاز تولیدی به ترتیب در بورت مدرج و دستگاه جمع‌آوری گاز^{۲۲} جمع می‌گردند. بالای بورت مدرج یک مبرد نصب شده تا از ورود بخارات دکان به دستگاه جمع‌آوری گاز جلوگیری به عمل آید. در این طراحی جهت مدل‌سازی شکاف، فضایی خالی به ضخامت ۳ میلی‌متر در داخل درپوش مغزه‌ی نگهدار در نظر

پدیده‌ها، آزمایش‌های پایه بر اساس استفاده از دی‌اکسیدکربن و دکان خالص طراحی شده‌اند؛ بدین صورت که ماتریس از دکان خالص اشباع می‌گردد و دی‌اکسیدکربن در دمای ثابت ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشارهای مختلف، در شکاف مجاور ماتریس تزریق می‌گردد. در دما و فشار ثابت، با وجود دو فاز گاز و نفت، درجه‌ی آزادی ترمودینامیکی این سیستم صفر است، هر آزمایش با یک تنش میان‌روی‌ی ثابت انجام می‌گردد و بنابراین جریان مارانگونی در آن وجود ندارد. برای مطالعه‌ی پدیده‌ی مارانگونی ضروری است در آزمایش‌هایی مشابه، درجه‌ی آزادی سیستم به یک ارتقاء یابد تا امکان تغییر IFT وجود داشته باشد. بدین منظور در سری دوم آزمایش‌ها، جزء نفتی دیگری به دکان اضافه می‌شود. طی تزریق دی‌اکسیدکربن در شکاف، غلظت کلی دی‌اکسیدکربن در نزدیکی شکاف زیاد است و با دور شدن از شکاف و رفتن به سمت قسمت‌های داخلی ماتریس غلظت آن کمتر می‌شود. با افزایش غلظت کلی دی‌اکسیدکربن، IFT افزایش می‌یابد و در نتیجه IFT در مسیر اصلی بیشتر خواهد بود. بر این اساس انتظار می‌رود جریان مارانگونی، میان‌روی‌ی نفت و گاز را به سمت شکاف هدایت کند.

دو سیستم نفتی (دکان خالص و دکان ترکیب شده با پروپان) به گونه‌ای طراحی شده‌اند که رفتار فازی آنها از جمله تغییرات چگالی، گرانی، تورم و فشار بحرانی، در شرایط مختلف تقریباً با یکدیگر باشند تا نتایج آزمایش‌های متناظر آنها قابل قیاس باشد. جدول ۱- خلاصه‌ی آزمایش‌های انجام شده و میزان بازیافت نفت در هر یک را نشان می‌دهد. مغزه‌ی استفاده شده



شکل ۱ | نمای تجهیزات آزمایشگاهی تزریق دی‌اکسیدکربن در ماتریس یا شکاف



شکل ۲ | درپوش مغزه‌ی نگهدار الف (درپوش متداول ب) درپوش لازم جهت مدل‌سازی شکاف

جدول ۱ | مقایسه‌ی بازیافت نهایی ناشی از تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در شکاف

اجزای نفت	شماره‌ی آزمایش	رژیم جریان	فشار (مگاپاسکال)	بازیافت نهایی (%)
۱۰۰% دکان	۱	غیرامتراجی	۱۱/۰۳	۸/۰۹
	۲		۱۳/۱	۲۳/۵۹
	۳	نزدیک امتراجی	۱۴/۰۲	۸۷/۴۲
۸۰% دکان	۴	غیرامتراجی	۱۱/۰۳	۱۵/۳۹
	۵		۱۲/۶۵	۳۷/۶۵
	۶		۱۲/۸۹	۵۶/۹۰
۲۰% پروپان	۷		۱۳/۱	۴۷/۱۵
	۸		۱۳/۶۵	۵۴/۵۰
	۹	نزدیک امتراجی	۱۳/۸۹	۸۰/۲۰

۲- محاسبه‌ی عدد مارانگونی

جهت مطالعه‌ی اثر مارانگونی باید عدد مارانگونی طبق فرمول ۱- محاسبه گردد [۱۷]:

$$Ma = 100 \times \frac{\left| \frac{\partial IFT}{\partial c} \right| c_0 H}{\mu D} \quad (1)$$

که در آن c_0 غلظت دی‌اکسیدکربن در میان‌روی (٪)، H طول مشخصه (سانتی‌متر؛ که در ابعاد ضخامت میان‌روی است)، μ چگالی نفت (سنتی‌پوآز) و D ضریب نفوذ مولکولی دی‌اکسیدکربن در نفت مورد نظر (سانتی‌متر مربع بر ثانیه) است. $\frac{\partial IFT}{\partial c}$ شیب تغییرات IFT با تغییر غلظت دی‌اکسیدکربن در فاز مایع است که از محاسبات فلش معادله‌ی حالت سه‌متغیری پنگ-راینسون و رابطه‌ی پاراکور به شرح زیر قابل محاسبه است:

برای یک فشار خاص (مثلاً ۱۳/۷۹ مگاپاسکال)، c_0 از نمودار P-X (که نتیجه‌ی محاسبات آزمایش تورم است) خوانده می‌شود (۸۶/۷۲٪).

سه غلظت (z) بیشتر از c_0 در نظر گرفته می‌شود (۸۸٪، ۹۰٪ و ۹۲٪). به‌ازای هر غلظت کلی دی‌اکسیدکربن (z) محاسبات فلش انجام می‌شود. از آنجا که غلظت دی‌اکسیدکربن بیشتر از حد اشباع آن است دو فاز مایع و گاز به‌وجود می‌آیند. تنش میان‌روی‌ی این دو فاز (IFT) و غلظت دی‌اکسیدکربن در فاز مایع در هر مرحله ثبت می‌شود (جدول-۲).

گرفته شده (شکل-۲) که قسمت بالایی آن یک ورودی برای تزریق سیال وجود دارد. در پایین این فضا یک خروجی به‌عنوان خروجی اصلی سیالات و در بخش میانی نیز یک خروجی جهت اندازه‌گیری فشار تعبیه شده است.

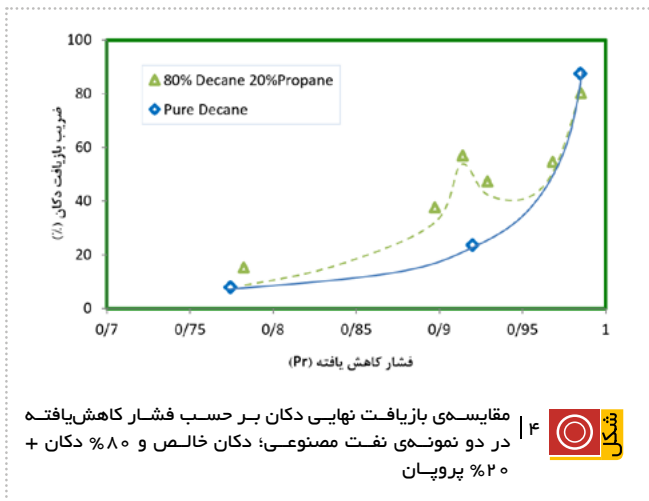
در این طرح، سیالات به‌ترتیب از طریق ورودی-۱ یا ۲ قابلیت تزریق به ماتریس یا شکاف را دارند. جهت اشباع سنگ، نفت از ورودی-۱ به مغزه تزریق می‌شود و در حالی که ورودی-۲ بسته است از خروجی خارج می‌گردد. در طول تزریق دی‌اکسیدکربن ورودی-۱ بسته می‌شود، گاز از ورودی-۲ وارد فضای شکاف شده، از کنار سنگ عبور کرده و از خروجی تولید می‌گردد.

۲ | تغییرات IFT بر حسب غلظت دی‌اکسیدکربن در فاز مایع در شرایط فشار و دمای ثابت (۱۳/۷۹ مگاپاسکال و ۸۰ درجه سانتی‌گراد)

تنش میان‌روی (mN/m)	غلظت دی‌اکسیدکربن در میان‌روی- C CO ₂ (٪)	غلظت کلی دی‌اکسیدکربن (z٪)
۰/۰۰۴۹	۸۵/۵۵	۸۸/۰۰
۰/۰۰۸۸	۸۵/۲۶	۹۰/۰۰
۰/۰۱۴۲	۸۵/۰۱	۹۲/۰۰

۳ | خواص سیالات، مقادیر شیب IFT و Ma/H محاسبه شده برای سیستم پروپان-دکان-دی‌اکسیدکربن

فشار (Mpa)	CCO ₂ (%)	IFT اشباع (mN/m)	ضریب تورم	شیب IFT (mN/m/ %mole)	چگالی نفت (g/cc)	چگالی دی‌اکسیدکربن (g/cc)	گرانروی نفت (cp)	گرانروی دی‌اکسیدکربن (cp)	ضریب نفوذ مولکولی (cm ² /s)	Ma/H (cm/l)
۱۵/۸۶	۰	۰			۰/۶۸۷	۰/۴۴۴	۰/۴۹۰۲	۰/۳۳۴		
۱۳/۷۹	۸۶/۷۲	۰/۰۰۱	۳/۶۹	-۰/۰۱۷۰	۰/۶۸۵	۰/۳۶۷	۰/۴۶۳۶	۰/۰۲۸۵	۸/۱۴E-۰۵	۳/۹۱E+۰۶
۱۳/۶۵	۸۴/۶۸	۰/۰۰۷	۳/۱۷	-۰/۰۳۴۱	۰/۶۸۵	۰/۳۶۲	۰/۴۶۱۸	۰/۰۲۸۲	۸/۳۵E-۰۵	۷/۴۹E+۰۶
۱۳/۱	۷۹/۴۶	۰/۱۵	۲/۳۲	-۰/۵۸۲۵	۰/۶۸۴	۰/۳۴	۰/۴۵۴۸	۰/۰۲۷۱	۹/۲۶E-۰۵	۱/۱۰E+۰۸
۱۲/۸۹	۷۸/۲۳	۰/۲۳۴	۲/۲۲	-۲/۰۷۰۰	۰/۶۸۴	۰/۳۳۲	۰/۴۵۲۲	۰/۰۲۶۷	۹/۶۶E-۰۵	۳/۷۱E+۰۸
۱۲/۸۲	۷۷/۸۲	۰/۲۶۲	۲/۱۹	-۸/۶۹۰۰	۰/۶۸۴	۰/۳۳	۰/۴۵۱۳	۰/۰۲۶۶	۹/۷۹E-۰۵	۱/۵۳E+۰۹
۱۲/۷۶	۷۷/۴۲	۰/۲۸۹	۲/۱۵	+۵/۴۹۰۰	۰/۶۸۴	۰/۳۲۷	۰/۴۵۰۵	۰/۰۲۶۵	۹/۹۲E-۰۵	۹/۵۱E+۰۸
۱۲/۴۱	۷۵/۳۸	۰/۴۲۹	۱/۹۸	+۰/۸۷۶۹	۰/۶۸۳	۰/۳۱۴	۰/۴۴۶۱	۰/۰۲۵۸	۱/۰۶E-۰۴	۱/۴۰E+۰۸
۱۱/۰۳	۶۷/۳۴	۱/۴۵۹	۱/۶۲	+۰/۵۴۰۰	۰/۶۸۲	۰/۲۶۲	۰/۴۲۸۸	۰/۰۲۳۸	۱/۳۹E-۰۴	۶/۰۹E+۰۷
۹/۶۵	۶۱/۵	۳/۳۵۲	۱/۵۳	+۰/۵۱۳۹	۰/۶۸	۰/۲۱۴	۰/۴۱۱۸	۰/۰۲۲۳	۱/۷۸E-۰۴	۴/۳۱E+۰۷



۳- بحث و بررسی

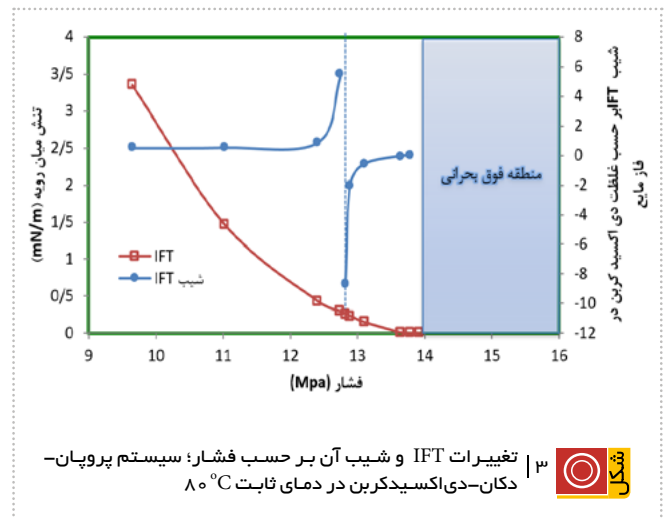
به‌طور خلاصه در این مطالعه، دی‌اکسید کربن در شکاف مماس بر مغزه‌ی اشباع از نفت مصنوعی تزریق شد. تعدادی از آزمایش‌ها با نفت ۱۰٪ دکان و تعدادی با نفت ۸۰٪ دکان + ۲۰٪ پروپان انجام شد که فشار بحرانی سیستم آنها به ترتیب ۱۴/۲۴ و ۱۴/۱ مگاپاسکال است. در ادامه، آنالیزها بر اساس فشار کاهش یافته (نسبت فشار به فشار بحرانی) انجام می‌شوند. در فشار بیشتر از فشار بحرانی، میان‌رویه‌ی نفت و گاز از بین رفته و مقدار بازیافت نهایی در هر سه نمونه تقریباً برابر است. در این شرایط انتظار بروز پدیده‌های سطحی وجود ندارد و بنابراین آنالیزها در فشارهای کاهش‌یافته‌ی کمتر از یک متمرکز می‌شوند. شکل ۴- نشان می‌دهد که در این دو نمونه‌ی نفت، مقدار بازیافت نهایی چگونه با فشار کاهش یافته تغییر می‌کند.

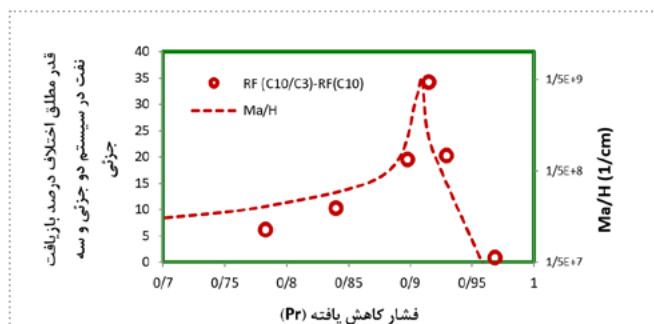
مقادیر RFC3/C10/CO2-RFC10 با استفاده از نمودارهای ارائه شده در شکل ۴- محاسبه می‌شوند. همان‌طور که در این شکل مشخص است در فشارهای کاهش‌یافته‌ی ۰/۷۸-۰/۹۵ بازیافت از سیستم سه‌جزئی پروپان بیشتر از سیستم دو جزئی دکان خالص است و بنابراین RFC3/C10/CO2-RFC10 مقادیر مثبتی خواهد داشت. در نقاطی که آزمایش‌های متناظر در فشارهای کاهش‌یافته‌ی یکسان انجام نشده، مقادیر بازیافت از روی خطوط میان‌یابی می‌شوند. از مقایسه‌ی این اختلاف بازیافت‌ها و عدد مارانگونی (Ma/H) (شکل ۵-) مشخص می‌شوند که الگوی تغییرات آنها یکسان است و با در نظر گرفتن آزمایش‌های دو جزئی به‌عنوان سطح صفر مارانگونی، می‌توان اظهار داشت که قدرمطلق اختلاف بازیافت در آزمایش‌های سه‌جزئی و دو جزئی (RF3-comp. sys.-RF2-comp. sys) با عدد مارانگونی متناسب بوده و جریان مارانگونی بازیافت نفت را بهبود بخشیده است. اختلاف مقدار بازیافت در این دو سیستم نفتی نمی‌تواند ناشی از هیچ کدام از عوامل

مقادیر IFT بر حسب غلظت دی‌اکسید کربن رسم می‌شود و شیب خط مستقیم واصل به‌عنوان $\frac{\partial IFT}{\partial c}$ ثبت می‌گردد (۱۷/۰-).

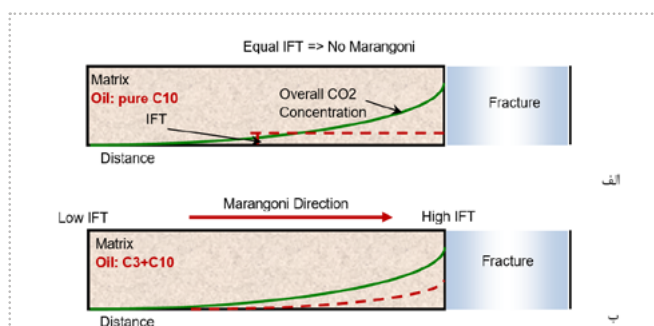
در مطالعات گذشته [۱۷] به‌سادگی یک واحد طولی به H نسبت داده شده است. اما در این مقاله جهت کسب اطمینان از درگیر کردن هرگونه فرض احتمالی نادرست، به‌جای عدد مارانگونی (Ma)، متغیر Ma/H گزارش می‌شود که واحد آن cm/1 خواهد بود. در جدول ۳- نتایج این محاسبات برای نفت پروپان-دکان گزارش شده‌اند. همان‌گونه که این جدول نشان می‌دهد شیب IFT نیز مانند IFT با نزدیک شدن به شرایط بحرانی، به سمت صفر میل می‌کند. در شرایط غیرامتزاجی، IFT مقادیر بزرگی دارد؛ در حالی که با غیرامتزاجی تر شدن تزریق، شیب IFT به سمت صفر میل می‌کند و بنابراین در فاصله‌ای بین این دو (امتزاجی تک‌تماسه و غیرامتزاجی) قدر مطلق شیب IFT، بیشینه‌ی مقدار خود را دارد.

در سیستم پروپان/دکان همواره با افزایش غلظت کلی دی‌اکسید کربن (z) IFT زیاد می‌شود. اما شیب IFT بر حسب غلظت دی‌اکسید کربن در فاز مایع رفتاری یکنواخت ندارد و به‌دلیل نزدیک شدن به نقطه‌ی بحرانی و ورود به ناحیه‌ی میعان معکوس^۳، علامت آن در ۱۲/۷ مگاپاسکال عوض می‌شود. در فشار بیشتر از ۱۲/۷ مگاپاسکال هرچه دی‌اکسید کربن بیشتری وارد سیستم شود، مقدار انحلال آن در فاز مایع کمتر می‌شود. بنابراین در سیستم سه‌جزئی پروپان/دکان/دی‌اکسید کربن، علاوه بر آزمایش‌های قبلی که جهت مطالعه‌ی تغییر رژیم امتزاجی در فشارهای ۱۱، ۱۳/۱، ۱۳/۷۹ و ۱۵/۸۶ مگاپاسکال نیز طراحی شده بود، انجام آزمایش‌های دیگری در فشار ۱۲/۶۵ و ۱۲/۸۵ مگاپاسکال نیز ضروری است. تغییرات گرادیان IFT با فشار در شکل ۳- برای این سیستم نمایش داده شده است.





شکل ۵ | قدر مطلق اختلاف باز یافت نهایی نفت سیستم‌های پروپان/دکان/دی‌اکسیدکربن و دکان/دی‌اکسیدکربن و مقایسه‌ی آن با عدد مارانگونی بخش بر ضخامت میان‌رویه



شکل ۶ | تغییرات IFT با تغییر غلظت کلی دی‌اکسیدکربن در ماتریس و بر حسب فاصله از شکاف (الف) دکان/دی‌اکسیدکربن و (ب) پروپان/دکان/دی‌اکسیدکربن



می‌گردد (شکل ۵-۵). با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان گفت جهت جریان مارانگونی از روی نحوه‌ی تغییرات IFT با غلظت کلی دی‌اکسیدکربن مشخص می‌شود اما بزرگی این جریان متناسب است با عدد مارانگونی که از گرادیان IFT در فاز مایع به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۴ مشخص شده با افزایش فشار و از بین رفتن تنش میان‌رویه در شرایط بحرانی (فشارهای کاهیده‌ی حدود یک)، جریان مارانگونی صفر می‌شود. در این شرایط درجه‌ی آزادی سیستم، صفر و تغییرات تنش میان‌رویه ناچیز می‌شود. در شرایط غیرامتزاجی، جریان مارانگونی وجود دارد و بر مقدار باز یافت اثر می‌گذارد اما مقدار اثر گذاری به حدی نیست که بر کاهش تولید در برابر افت فشار غلبه کند. در شرایط نزدیک بحرانی، به دلیل تغییرات شدید تنش میان‌رویه، جریان مارانگونی بسیار قوی است؛ به طوری که قادر به افزایش تولید در برابر کاهش فشار است.

نتیجه گیری

در این مطالعه پس از انجام ۹ بار آزمایش تزریق دی‌اکسیدکربن

شناخته شده و مؤثر در باز یافت (مثل تبخیر، تورم، اختلاف چگالی، اختلاف گرانی و ...) باشد؛ چرا که در مرحله‌ی طراحی، آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در این بخش‌ها رفتار یکسانی داشته باشند. این اختلاف همچنین نمی‌تواند ناشی از جریان‌های متقاطع موئینه باشد؛ چرا که با افزایش فشار، نیروهای موئینه کاهش می‌یابند. بنابراین اگر جریان‌های متقاطع موئینه بر نتایج مؤثر بود انتظار می‌رفت که اولاً در شرایط غیرامتزاجی اختلاف مقدار باز یافت در دو سیستم بیشتر باشد و این فاصله با افزایش فشار کاهش یابد و ثانیاً تفاوت دو نمودار تغییرات پیوسته، بدون هیچ گونه بیشینه، کاهشی نسبی داشته باشد. حال آنکه در فشارهای کاهیده‌ی حدود ۰/۹۱، یک تغییر شیب و بیشینه‌ی نسبی دیده می‌شود. شاید بتوان انتظار داشت که در شرایط غیرامتزاجی، جریان متقاطع بر داده‌های باز یافت نفت اثر گذاشته باشند. اما به طور حتم در مورد آزمایش‌های مذکور این اختلاف جزئی وجود خواهد داشت؛ چرا که بازه‌ی تغییرات بزرگی تنش میان‌رویه چندان وسیع نیست.

تفاوت جریان مارانگونی و جریان متقاطع موئینه را می‌توان با مثالی ساده مشخص کرد: در یک ظرف بزرگ آب به دلیل مسطح بودن سطح تماس (بزرگ بودن شعاع موئینگی)، بزرگی نیروهای موئینه صفر است اما کافی است کمی پودر فلفل (به عنوان مشخص کننده‌ی جهت جریان‌ها) روی سطح آب پاشیده شود و با یک گوش پاک‌کن آغشته به مایع صابون کمی مرکز سطح تماس آب و هوا لمس گردد. تمامی ذرات فلفل به صورت شعاعی از مرکز تماس (نقطه‌ی با تنش میان‌رویه‌ی کمتر؛ نیروی موئینه صفر) فاصله می‌گیرند. در این مثال تنها عامل فعال، جریان مارانگونی است. در شرایط نزدیک بحرانی نیز نیروهای موئینه بسیار ضعیف هستند و نمی‌توان انتظار وقوع جریان فعال متقاطع موئینه را داشت. همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد در سیستم دو جزئی، IFT مقدار ثابتی دارد (شکل ۶-الف) و در نتیجه وقوع جریان مارانگونی در آن پیش‌بینی نمی‌شود. در طول تزریق دی‌اکسیدکربن در سیستم سه جزئی (پروپان-دکان)، با افزایش غلظت کلی دی‌اکسیدکربن، IFT بین نفت و گاز بیشتر می‌شود. در نزدیکی شکاف، غلظت کلی دی‌اکسیدکربن نسبت به نواحی داخلی ماتریس بیشتر است. بنابراین در سیستم پروپان/دکان همان‌طور که شکل ۶-ب نشان می‌دهد IFT در شکاف (کانال اصلی جریان) بیشتر است و جریان مارانگونی نفت را به سمت مسیر اصلی و تولیدی می‌کشاند. در فشارهایی که عدد مارانگونی مقادیر قابل توجهی دارد (مثلاً ۱۲/۶۵، ۱۲/۸۵ و ۱۳/۱ مگاپاسکال) تولید نفت با زمان، خطی است و غلبه‌ی این جریان همرفتی در تولید به وضوح مشخص

- در شکاف، در دو سیستم نفتی دوجزئی و سه جزئی، اثر پدیده مارانگونی در مقدار بازیافت نفت بررسی و نتایج زیر حاصل شد:
- جریان مارانگونی تفاوتی مفهومی با جریان متقاطع موئینه دارد که باید این تفاوت در تعاریف، تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها مدنظر قرار گیرد.
 - جریان مارانگونی در شرایط امتزاجی، صفر و در شرایط غیرامتزاجی بسیار ضعیف است.
 - جریان مارانگونی در شرایط نزدیک به امتزاجی بسیار قوی بوده و بر اساس نحوه تغییرات تنش میان‌رویبه در جریان اصلی، بسته به نوع نفت و ترکیباتش می‌تواند تا حدود ۳۵ درصد سبب افزایش بازیافت نفت گردد.
 - بزرگی جریان مارانگونی متناسب است با عدد مارانگونی

پانویس‌ها

- | | | |
|---------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 1. Weber | 9. Sorensen | 17. Jamili |
| 2. Thompson | 10. Sterling | 18. Total Hydrocarbon Pore Volume |
| 3. Wine Tear | 11. Lu | 19. Core holder |
| 4. Marangoni | 12. Lyford | 20. Back-Pressure-Regulator (BPR) |
| 5. Thornton | 13. Campbell | 21. Transfer-vessel |
| 6. Groothuis and Zuideweg | 14. Mohanty | 22. Gasmeter |
| 7. Lam | 15. Burger | 23. Retrograde |
| 8. Capillary Number | 16. Fyeres | |

منابع

- [1] Weber, E. H. Mikroskopische Beobachtungensgesetzmäßiger Bewegungen, welche die Bildung von Niederschlag harziger Körper aus Weingeist begleiten. Berichte Über die Verhandlung der Königlich-Schsischen Gesellschaft der Wissenschaften. Mathematisch-Physische Classe, 57, 1854. {Tarry substances precipitated from alcoholic solutions.}
- [2] Thompson, J., Phil. Mag. 10 (4), 330, 1855.
- [3] Marangoni, C., "Sull' espansione della goccia di un liquido galleggiante sulla superficie di altro liquido", Fusi, Pavia 16, 1865.
- [4] Thornton, J. D., "Liquid-Liquid Extraction Part XIII: The Effect of Pulse Waveform and Plate Geometry on The Performance And Throughput of A Pulsed Column," Trans. Inst. Chem. Eng. 35, 316, 1957.
- [5] Groothuis, H., Zuideweg, F.J., "Influence of Mass Transfer on Coalescence Drops," Chem. Eng. Sci. 12, 288-289, 1960.
- [6] Lam, A. C., Schechter, R.S. and Wade, W.H., "Mobilization of Residual Oil Under Equilibrium and Nonequilibrium Conditions," SPE paper 10198, Soc. Pet. Eng. J., 23(5), 781-790, 1983.
- [7] Sorensen, T. S., Hennenberg, M., Steinchen, A. and Sanfield, A., "Chemical and Hydrodynamical Analysis of Stability of a Spherical Interface," J. Colloid and Interface Sci. 56, 191-205, 1976.
- [8] Sternling, C. V., Scriven, L. E., "Interfacial Turbulence, Hydrodynamic Instability and the Marangoni Effect," AIChU. 5, 514-523, 1959.
- [9] Lu, H., Yang, Y., Maa, J., "Effect of Artificially Provoked Marangoni Convection at a Gas/Liquid Interface on Absorption," Ind. Eng. Chem. Res. 35, 1921-1928, 1996.
- [10] Lyford, P. A., Pratt, H. R. C., Grieser, F. and Shallcross, D.C., "The Marangoni Effect and Enhanced Oil Recovery: Part 1. Porous Media Studies," Can. J. Chem. Eng. 76(2), 167-174, 1998.
- [11] Lyford, P. A., Pratt, H. R. C., Grieser, F. and Shallcross, D.C., "The Marangoni Effect and Enhanced Oil Recovery: Part 2. Interfacial Tension and Drop Instability," Can. J. Chem. Eng. 76(2), 175-182, 1998.
- [12] Campbell B.T., Franklin M., Orr J.: "Flow Visualization for CO₂/Crude-Oil Displacement" SPE J., 665-678, 1985.
- [13] Mohanty, K.K., Gupta A., Deruiter R.A., "Pore-Level Mechanisms of Residual Oil Formation During Miscible Displacement," J. Colloid and Interface science 163, 199-216, 1969.
- [14] Burger, J.E., "Bypassing and mass transfer during gas injection", PhD Dissertation, University of Huston, USA, 1995.
- [15] Fayers, F. J. and Lee, S. T., "Crossflow mechanisms by gas drive in heterogeneous reservoirs", SPE 24934 presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D.C., 1992.
- [16] Jamili, A., "Modeling effects of diffusion and gravity drainage on oil recovery in naturally fractured reservoirs under gas injection", Ph.D. dissertation, University of Kansas, 2010.
- [17] Molenkamp, T., "Marangoni Convection, Mass Transfer and Microgravity", PhD Dissertation, Rijksuniversiteit Groningen, 1998.