

بررسی آزمایشگاهی جریان متقاطع ناشی از گرانروی در جریان تزریق فوم در یک ماتریس شکاف‌دار

یگانه خوشکلام^۱، مریم خسروی^۲ و بهزاد رستمی^{۱*}

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

۲- پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۲۶

چکیده

در این مطالعه تزریق فوم در سیستم شکاف ماتریس انجام شده و چگونگی انتقال فوم و چگونگی تولید نفت به‌جامانده در ماتریس از طریق مشاهداتی در مقیاس حفرات بررسی گردیده است. در بررسی حرکت جبهه فوم در ماتریس چند ناحیه ایجاد می‌شود. در جلوی جبهه، ناحیه دینامیکی وجود دارد که فعالیت جریان و سرعت حرکت سیالات بیشتر است و شبیه به کمان است. جلوی این ناحیه، اشباع فوم کمتر است و درصد فضای بیشتری توسط ماده فعال سطحی نسبت به گاز اشغال شده است. پشت این ناحیه، اشباع فوم بیشتر است و ناحیه استاتیک و پایداری وجود دارد که سرعت حرکت سیالات نسبت به جلوی جبهه کمتر است. در جلوی جبهه بخشی از نفت به‌وسیله گلبول شدن و مکانیزم امولسیون تولید می‌شود. گلبول‌های نفت در مسیر کمان حرکت می‌کنند و نزدیک پایین دست جریان متراکم شده و از طریق شکاف تولید می‌شوند. با کاهش اشباع نفت در شکاف ناحیه‌ای موسوم به ناحیه اختلاط در بخش‌های میانی محل ارتباط شکاف-ماتریس دیده شده است. نیروی رانش گلبول‌های نفت، افت فشار در جریان اصلی است. برای یک تزریق پایدار فوم، این افت فشار ثابت است. بنابراین نیروی رانش ثابت است و این افت فشار ثابت، جریان سیالات در جبهه دینامیک را (که گرانروی کمتری نسبت به فوم دارند) تا میزان مشخصی تقویت می‌کند. این بدین معنی است که هر افت فشار متناظر با عمق نفوذ خاصی از فوم در ماتریس است. بنابراین میزان ازدیاد برداشت حاصل از آن مقدار مشخصی خواهد بود و بدین ترتیب می‌توان گفت هر افت فشار ناشی از گرانروی فوم در جریان اصلی با یک ضریب بازیافت متناسب است.

کلمات کلیدی: تزریق فوم درون شکاف، جریان متقاطع ناشی از گرانروی، مکانیزم امولسیون، تزریق غیرامتزاجی، ازدیاد برداشت

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
brostami@ut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2018.3406.2561)

مقدمه

[۶ و ۷]. به علاوه در سرعت‌های بالاتر مقیاس حفره نسبت به مقیاس مغزه نیز نشان داده شده است که فوم رفتاری رقیق شونده دارد [۸]. هدف اصلی مطالعات انجام شده در سیستم‌های ناهمگنی مانند مخازن شکاف‌دار، منحرف کردن جریان گاز یا مایع از شکاف به سمت ماتریس سنگ بوده است. برترین و همکاران از جمله اولین افرادی بودند که به بررسی جریان متقاطع فوم در غیاب نفت از طریق کنترل انتقال‌پذیری جریان سیالات در یک مدل ناهمگن شعاعی با اختلاف تراوایی بین دو محیط پرداختند [۹]. چانگ و همکاران اثر کیفیت فوم و دبی تزریق فوم دی اکسید کربن را در شرایط دما و فشار مخزن در یک مغزه بررسی کردند [۱۰]. هاوگن و همکارانش از فوم جهت کاهش قابلیت عبوردهی شکاف و بهبود جاروب ماتریس در سنگ آهک نفت دوست با تراوایی پایین استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که تولید در جای فوم، در مغزه‌های شکاف‌دار ضعیف است درحالی‌که فوم پیش ساخته قادر به هدایت سیال درون شکاف به ماتریس است [۱۱].

ما و همکاران به بررسی اثر بهبود جاروب فوم نسبت به گاز در میکرومدل ناهمگن بدون حضور نفت پرداختند و مقدار بهینه‌ای برای کیفیت فوم پیشنهاد دادند [۱۲]. کان و همکارانش در مقیاس حفره باز یافت نفت به وسیله فوم را در سیستمی مشابه ما بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که فوم تنها سیالی بوده است که قادر به جاروب ناحیه با تراوایی پایین بوده است و ماتریس به وسیله فاز مایع تخلیه شده است [۱۳]. فرن و همکارانش تزریق فوم در یک شبکه شکاف ساخته شده از سنگ مرمر را مطالعه کردند و نشان دادند با افزایش کیفیت فوم و دبی تزریق، مقاومت جریان افزایش یافته است [۱۴].

در بسیاری از فرآیندهای ازدیاد برداشت به دلیل حرکت سیال تزریقی در مسیرهایی که ممکن است با نفت مخزن در تماس قرار نگیرد، نفت باز یافت نشده باقی می‌ماند. به جا ماندن نفت به فاکتورهای بسیاری از جمله ناهمگنی‌های مخزن و ترشوندگی محیط متخلخل بستگی دارد. بخش قابل توجهی از نفت به جامانده از طریق مکانیزم‌هایی از جمله نفوذ مولکولی، پراکندگی و جریان‌های متقاطع، که شامل جریان ویسکوز، موئینه و ثقلی هستند- قابل باز یافت است [۱]. زاپاتا جریان متقاطع ناشی از گرانیوی را جریانی تعریف کرد که از حرکت سیالات جابه‌جاکننده و جابه‌جاشونده در کنار هم با تحرک‌پذیری متفاوت متاثر می‌شود [۲]. به دلیل حضور بخش زیادی از نفت به جامانده در مخازن شکاف‌دار، تقویت جریان متقاطع ناشی از گرانیوی به عنوان یکی از مکانیزم‌های تولید نفت، می‌تواند باز یافت نفت از این مخازن را به میزان قابل توجهی ارتقا دهد.

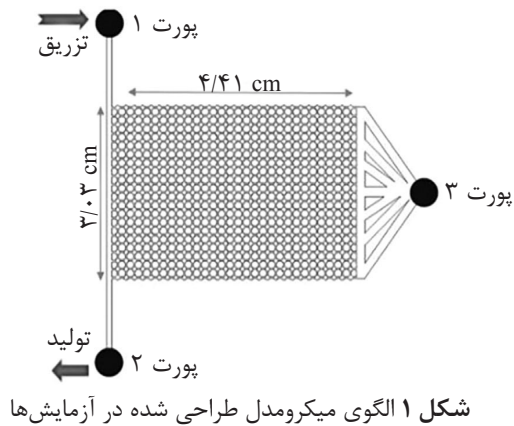
بر این اساس تزریق فوم به عنوان سیالی با گرانیوی بسیار بالا می‌تواند به ازدیاد برداشت نفت کمک کند. فوم شامل حباب‌های گازی است که به وسیله فیلم‌های نازک مایع که لاملا^۱ نامیده می‌شوند از هم جدا شده‌اند [۳]. بنابراین، احتمال احاطه شدن حفرات به وسیله برخی از حباب‌ها و لاملاها، وجود دارد. برای داشتن جریان قوی فوم، حرکت لاملا و تقسیم آن باعث افزایش گرانیوی ظاهری فوم می‌شود [۴]. استرله و جانته^۲ دو رژیم متفاوت برای فوم در بستر شنی گزارش کردند: رژیم کیفیت‌های بالا و رژیم کیفیت‌های کم [۵]. در رژیم کیفیت‌های کم، گرانیوی ظاهری فوم از سرعت مایع مستقل است و معمولاً توسط سرعت گاز کنترل می‌شود و این ناحیه رفتاری رقیق‌شونده^۳ نشان می‌دهد و با افزایش کیفیت فوم در این ناحیه، گرانیوی ظاهری افزایش می‌یابد

1. Lamellae

2. Ostorleh and Jante

3. Shear Thining Behaviour

شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، پورت ۱ محل تزریق و پورت ۲ محل تولید است.



شکل ۱ الگوی میکرومدل طراحی شده در آزمایش‌ها

پورت ۳ در طول آزمایش بسته است. در طراحی این الگو نسبت حفره به گلوگاه $3/2$ در نظر گرفته شد. دلیل این انتخاب تشکیل فوم درجه ۵ است که اغلب توسط مکانیزم گسیختگی تشکیل فوم در نسبت‌های حفره به گلوگاه بیشتر از ۳ اتفاق می‌افتد. بنابراین، قطر گلوگاه‌ها 0.25 mm و قطر حفرات 0.8 mm در نظر گرفته شد. این الگو بر روی شیشه‌هایی با تحمل فشار بالا با استفاده از دستگاه لیزر دی اکسید کربن حکاکی شده است. پس از حکاکی، شیشه‌ها درون کوره‌ای خاص به منظور ایجاد محیط متخلخل، ذوب و درهم آمیخته شدند.

تجهیزات آزمایشگاهی

نمودار تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۲ آمده است که شامل دستگاه تشکیل فوم^۱، پمپ تزریقی جهت تزریق آب و نفت و گاز، میکروپمپ برای تزریق فاز ماده فعال سطحی با قابلیت نرخ تزریق کم سیال و پمپ دیگری هم برای تثبیت فشار به کار رفته است.

در مطالعات انجام شده در حیطه تزریق فوم، اغلب اظهارات موجود در زمینه نحوه حرکت فوم در مخازن شکافدار، مربوط به منحرف کردن جریان فوم از لایه با تراوایی بیشتر به لایه کم تراوا بوده است. در این مطالعه از تزریق فوم در یک میکرومدل دوبعدی به منظور بررسی دقیق وجود جریان متقاطع ناشی از گرانشی فوم و امکان مشاهده عینی پدیده‌ها استفاده شده است. در این راستا دو دسته آزمایش براساس تغییر دبی تزریقی و کیفیت فوم طراحی شد و حرکت جریان گرانشی متقاطع به صورت مستقیم در یک سیستم شکافدار مشاهده شده است.

روش کار

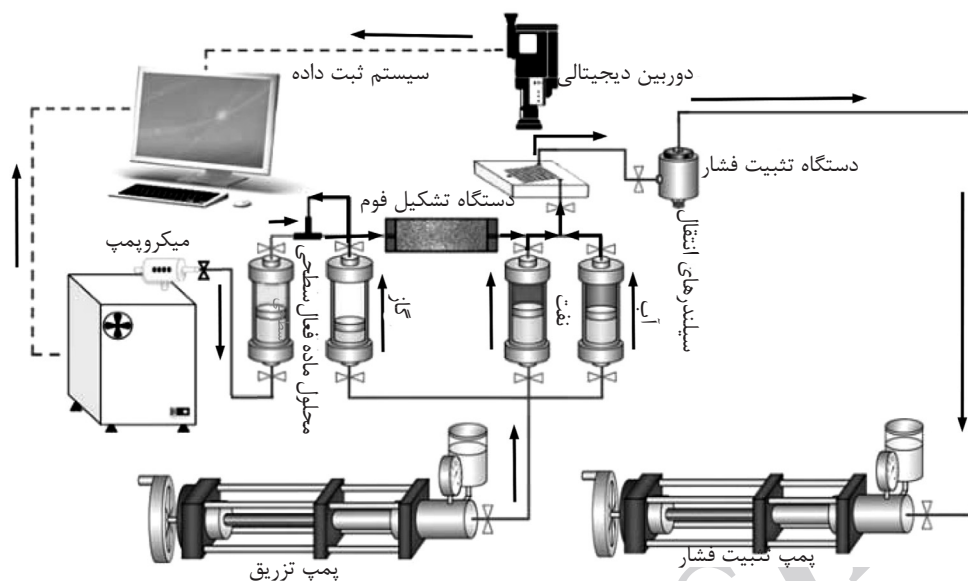
مواد آزمایش

در این پژوهش از سیال دکان و آب مقطر با خلوص $99/99\%$ به منظور اشباع سازی میکرومدل و از گاز نیتروژن با خلوص $99/95\%$ به منظور تزریق فوم استفاده شده است. از آنجا که دکان و آب سیال‌هایی بی‌رنگ هستند و در جریان آزمایش‌های میکرومدل همواره باید از الگوی مورد نظر عکس‌برداری نمود، رنگ دکان با افزودن 0.06% جرمی ماده رنگی قابل حل در مواد نفتی، (سودان رد)^۱، به قرمز تغییر داده شد و رنگ آب نیز با افزودن متیلن بلو^۲ با غلظت درصد جرمی به آبی تغییر داده شد و در دو مرحله از فیلتر واتمن عبور داده شد تا سیال تزریقی به درون میکرومدل دارای مواد جامد حل نشده در محلول نباشد و از رسوب در میکرومدل جلوگیری شود. گاز نیتروژن میزان انحلال ناچیزی در مایعات دارد و به علت نفوذ آرام‌تر در لاملا نسبت به گاز دی اکسید کربن فوم پایدارتری ایجاد می‌کند [۱۵]. همچنین، از ماده فعال سطحی آنیونی آلفا اولفین سولفونات^۳ تولید شده توسط شرکت استپان^۴ به عنوان تولیدکننده فوم استفاده شد.

طراحی و ساخت میکرومدل

الگوی میکرومدل طراحی شده در آزمایش‌ها در

1. Sudan Red
2. Methylene Blue
3. Alpha Olefin Sulfonate C₁₄₋₁₆
4. Stepan Company
5. In Situ Foam Generation
6. Foam Generator



شکل ۲ نمودار تجهیزات آزمایشگاهی

میکرومدل به وسیله حلال ایزوپروپیل الکل شسته شده و خشک می شود تا از تمیز بودن میکرومدل و برابر بودن شرایط آزمایشها اطمینان حاصل گردد.

طراحی آزمایشها

از مهم ترین عوامل اثرگذار بر افت فشار گرانیرو براساس معادله دارسی، گرانیروی است. آزمایشها نشان داده اند گرانیروی ظاهری به کیفیت فوم و دبی تزریق بستگی دارد [۱۶ و ۱۷]. یکی از عوامل محدودکننده استفاده از فوم به عنوان سیال جابه جاکنده در محیط متخلخل پایداری فوم در حضور نفت است. اثر مخرب نفت بر پایداری فوم در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس های مختلف، فوم توده و فوم در محیط متخلخل، مشاهده شده است [۱۸]. به منظور بررسی اثر حضور نفت بر جریان متقاطع ناشی از گرانیروی فوم آزمایشها در دو محیط اشباع انجام شدند. بنابراین جهت بررسی تاثیر این عوامل، دو دسته آزمایش طراحی شدند. در دسته اول اثر سرعت، در دسته دوم اثر کیفیت فوم بر جریان بررسی شده است. در اول آزمایشها (بررسی اثر سرعت)، در شرایط اشباع اولیه میکرومدل با آب انجام گردیده است.

از سیلندرهای انتقال برای نگهداری سیالات تزریقی استفاده شده است. از دوربین و منبع نور جهت تصویربرداری از میکرومدل استفاده گردید. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اتصال تی شکل (سه راهی) قبل از دستگاه تشکیل فوم، به گونه ای تعبیه شده است که ماده فعال سطحی در مسیر افقی جریان داشته باشد و ورودی گاز به صورت عمود بر آن قرار گیرد.

برای انجام آزمایشها پورت ۳ میکرومدل بسته بوده و به منظور ایجاد اشباع سیالات و اعمال فشار اشباع موردنظر از پورت ۱ و ۲ استفاده می شود. پس از آن تزریق سیالات از طریق پورت ورودی انجام می گردد. جهت تزریق فوم ابتدا دستگاه تشکیل فوم از ماده فعال سطحی اشباع می شود و سپس با تزریق گاز از تشکیل فوم اطمینان حاصل می شود. پس از آن تزریق سیال با نرخ ثابت در شکاف آغاز می گردد. آزمایشها تا زمانی که سیال اولیه در میکرومدل در حال تخلیه شدن است، ادامه می یابد. در طول تزریق با استفاده از دوربین دیجیتال تصاویر میکرومدل ضبط شده و سپس از طریق آنالیز تصویر، تصاویر تحلیل می شود. در پایان هر آزمایش

جبهه فوم در شکل‌های ۳ و شکل ۴ آمده است. بخش‌های تیره رنگ، نواحی جاروب نشده و بخش‌های دارای حباب، نواحی جاروب شده توسط فوم هستند. همچنین اثر دو پارامتر دبی تزریق و کیفیت فوم بر میزان بازیافت از ماتریس اشباع در شکل‌های ۵ و ۶ بررسی شده است.

بحث

در این تحقیق، از تزریق فوم به منظور تقویت جریان متقاطع ناشی از گرانیوی از طریق انجام دو دسته آزمایش استفاده شده که در دسته اول، اثر دبی تزریق فوم و در دسته دوم اثر کیفیت فوم بر این جریان مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به شرایط ذکر شده در طراحی آزمایش‌ها، تمامی تست‌ها در شرایط غیرامتزاجی و در حالت افقی انجام شده‌اند. مکانیزم‌های بازیافت در شرایط غیرامتزاجی به‌طور معمول شامل جریان‌های متقاطع است. با استفاده از فرض تئوری تعادل عمودی می‌توان فرض کرد اختلاف فشارها در همه زمان‌ها و مکان‌ها در جهت عمودی صفر است. بنابراین نیروی ثقلی وجود ندارد و نیروهای موئینگی و ویسکوز در سیستم کنترل‌کننده جریان هستند. هنگامی که دو لایه با نسبت‌های متحرک‌پذیری متفاوت در کنار هم قرار گرفته‌اند، به‌دلیل مقاومت کمتر در مسیر تراواتر، سیال از ناحیه کم تراوا عبور نمی‌کند.

در این دسته آزمایش پس از به‌دست آوردن دبی تزریقی بهینه، از این دبی در دسته دوم آزمایش‌ها استفاده می‌شود. همچنین، دسته دوم آزمایش‌ها (بررسی اثر کیفیت فوم) در شرایط اشباع اولیه میکرومدل با نفت انجام شده است.

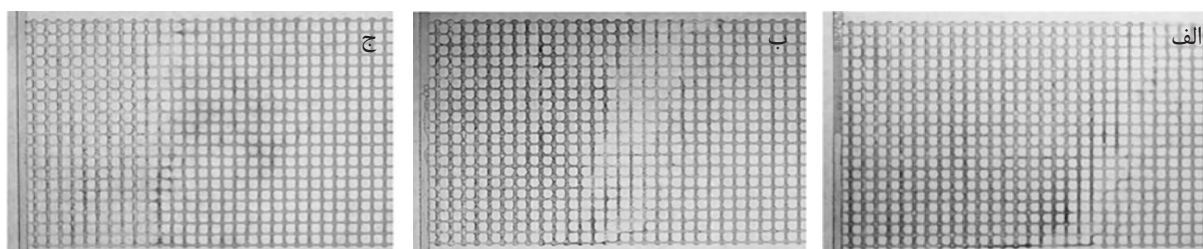
در طراحی‌ها از تئوری تعادل عمودی (VE)^۱ به منظور حداکثر کردن اثر جریان متقاطع ناشی از گرانیوی استفاده شد و تمامی تست‌ها در حالت افقی انجام شده است تا از تاثیر نیروی ثقلی در آزمایش‌ها جلوگیری گردد. در جدول ۱ مشخصات آزمایش‌ها ذکر شده است. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط (۲۵ °C) انجام شده و فشار آزمایش‌ها ۲ MPa است که در این فشار دما کنترل شده است. به منظور نزدیک کردن شرایط حرکت سیال در محیط متخلخل، به آنچه در شرایط مخزن اتفاق می‌افتد، از آنالیز مقیاس حفره استفاده می‌گردد. در این آنالیز از اعداد بدون بعد استفاده می‌شود که از جمله این اعداد بدون بعد، عدد موئینگی است که نسبت نیروی ویسکوز به موئینگی است. بدین منظور، دبی‌ها براساس مطلوب بودن دامنه عدد موئینگی انتخاب شده‌اند تا نتایج آزمایش‌ها نماینده شرایط مخزن باشند.

نتایج و بحث

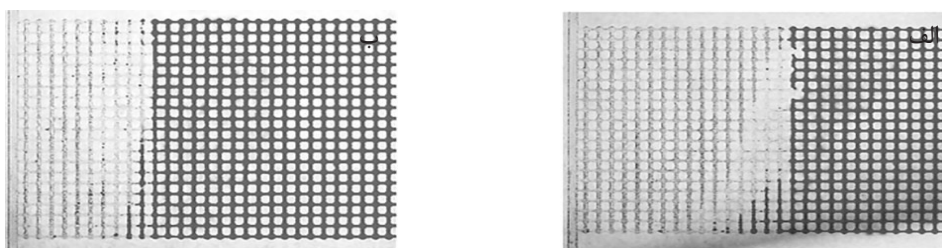
توزیع نهایی اشباع سیالات و میزان پیشروی

جدول ۱ آزمایش‌ها و خواص فیزیکی

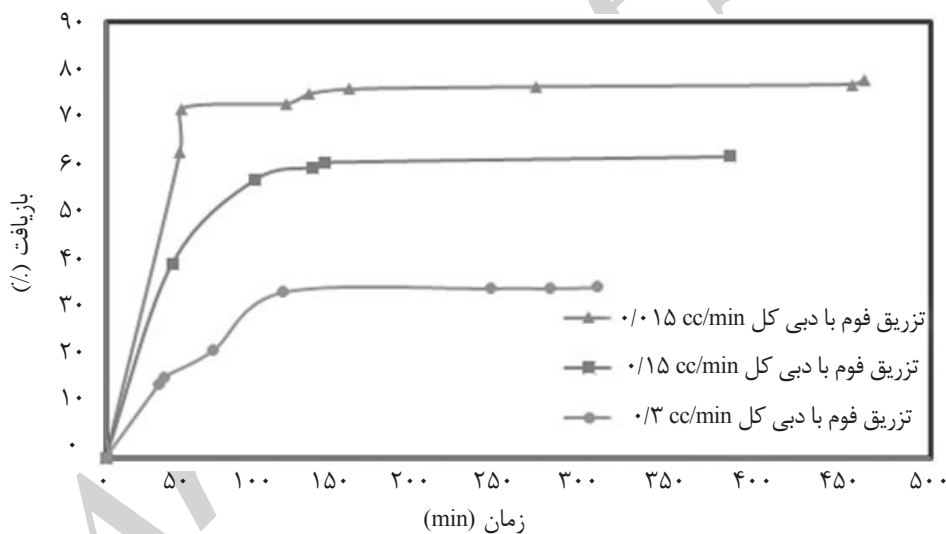
بازیافت نهایی (%)	تعداد اجزا	کیفیت فوم	دبی تزریق (cc/min)	سیال تزریقی	فشار (MPa)	شرایط اولیه اشباع	شماره آزمایش	سری آزمایش
۷۸/۰	۲	۰/۸۶	۰/۰۱۵	فوم	۲	آب	۱	سری ۱
۶۲/۲	۲	۰/۸۶	۰/۱۵۰	فوم	۲	آب	۲	
۳۵/۳	۲	۰/۸۶	۰/۳۰۰	فوم	۲	آب	۳	
۵۳/۳	۳	۰/۸۶	۰/۰۱۵	فوم	۲	دکان	۴	سری ۲
۳۱/۹	۳	۰/۸۰	۰/۰۱۵	فوم	۲	دکان	۵	
۱۹/۸	۳	۰/۷۰	۰/۰۱۵	فوم	۲	دکان	۶	



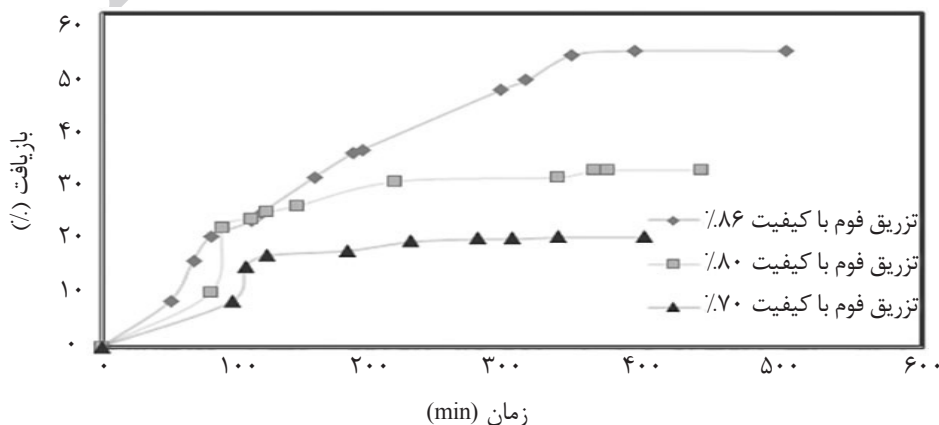
شکل ۳ توزیع اشباع نهایی سیالات در ماتریس اشباع از آب، اثر افزایش دبی تزریقی در کیفیت یکسان ۰/۸۶: الف) دبی تزریق ۰/۱۵ cc/min، ب) دبی تزریق ۰/۱۵ cc/min و ج) دبی تزریق ۰/۳ cc/min



شکل ۴ توزیع اشباع نهایی سیالات در ماتریس اشباع از نفت، اثر افزایش کیفیت فوم در دبی تزریق یکسان ۰/۱۵ cc/min: الف) کیفیت فوم ۰/۸۶ و ب) کیفیت فوم ۰/۸۰



شکل ۵ نمودار میزان بازیافت سیال درون ماتریس بر حسب زمان، بررسی اثر دبی تزریق در کیفیت فوم یکسان ۰/۸۶



شکل ۶ نمودار میزان بازیافت سیال درون ماتریس بر حسب زمان، بررسی اثر کیفیت فوم در دبی تزریق یکسان

(شکاف) ایجاد می‌شود. به دلیل وجود افت فشار بیشتر در دو طرف شکاف نسبت به ناحیه مجاور در ماتریس، فوم در جهتی که در شکل ۷ نشان داده شده به مرور زمان وارد ماتریس می‌شود و نفت درون ماتریس به علت جریان متقاطع ناشی از گراندروی و مکانیزم امولسیون به طریق شکاف تولید می‌شود. در بررسی حرکت جبهه فوم در ماتریس که در جلو شبیه به کمانی است که در شکل ۷ نشان داده شده است چند ناحیه ایجاد می‌شود. در جلوی جبهه، ناحیه دینامیکی وجود دارد که فعالیت جریان و سرعت سیالات بیشتر است. اشباع فوم در این ناحیه به علت تماس با نفت و ناپایداری شدن حباب‌های فوم کم است. بنابراین، ناپایداری فوم در جلوی جبهه تزریق و محل تماس فوم/نفت بیشتر است. اشباع این ناحیه بیشتر متشکل از فاز مایع است و درصد اشباع گاز بسیار اندک است و به همین دلیل جبهه کمانی شکل فاز آبی نامیده شده است. پشت این ناحیه اشباع فوم بیشتر است و ناحیه استاتیک و پایداری وجود دارد. اشباع فوم در این ناحیه به وسیله ورود فوم از شکاف به ماتریس تقویت می‌شود. سرعت حرکت سیالات و جریان در این ناحیه کمتر است و جریان شبیه به گاز به دام افتاده^۲ است.

به همین ترتیب، در حالتی که ماتریس و شکاف در کنار هم قرار گرفته‌اند نیز شکاف به عنوان لایه‌ای که سیال با سرعت بیشتری در آن جریان دارد در نظر گرفته می‌شود و سیال در درون ماتریس ساکن است (شکل ۷). با توجه به این شکل، ناحیه خط چین ۱ ناحیه مجاور پرت ورودی (تزریق) و ناحیه خط چین ۲ مجاور پرت خروجی (تولید) است. در لحظه اولیه شروع آزمایش ($t=0$):

$$P_{f1} = P_{M1} = P_0 \quad (1)$$

$$P_{f2} = P_{M2} = P_0 \quad (2)$$

که در روابط بالا، P_{f1} و P_{M1} به ترتیب فشار سیال در شکاف و ماتریس در نقطه ۱ است و به همین ترتیب P_{f2} و P_{M2} فشار سیال در شکاف و ماتریس در نقطه ۲ است. P_0 فشار آزمایش است که در زمان تست ثابت است. در صورتی که مقدار فشار آزمایش ۲ MPa باشد، با شروع تزریق در شکاف تساوی در روابط ۱ و ۲ تغییر می‌کند. در ورودی شرایط مرزی به وسیله یک دبی حجمی ثابت در واحد سطح به طور یکنواخت توزیع شده است و با شروع تزریق فشار تغییر می‌کند. از طرفی شرایط مرزی خروجی مطابق با معادله ۲ است که بعد از شروع تست فشار خروجی مقدار کمی کاهش می‌یابد. بنابراین افت فشاری در جریان اصلی^۱

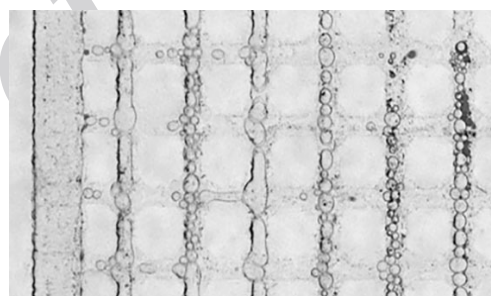


شکل ۷ مشخصات ناحیه‌های مشاهده شده در باز یافت نفت به وسیله تزریق فوم در محیط متخلخل شکاف دار

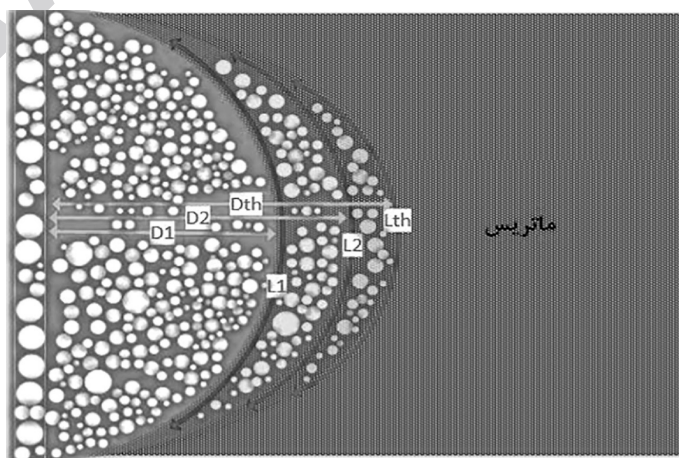
1. Mainstream
2. Trapped Gas

این ناحیه در زمان‌های انتهایی فرآیند جابه‌جایی و هنگامی که شکاف از وجود نفت خالی شده باشد و فوم امکان تشکیل و ورود از قسمت‌های میانی را داشته باشد، شکل گرفته است. در این حالت نفت از ماتریس به شکاف وارد می‌شود و سعی در ایجاد اتصال به لاملای فوم در شکاف دارد و در همان نقطه فوم به واسطه مکانیزم گسیختگی از شکاف به ماتریس وارد شده است که بر طبق مطالعات پیشین [۲ و ۱۹] وجود این ناحیه نسبت به زمانی که هیچ‌گونه جریان متقاطعی در سیستم وجود نداشته باشد، موجب بهبود فرآیند جابه‌جایی می‌شود. افت فشار در جریان اصلی نیروی رانش این گلبول‌ها است. برای یک تزریق پایدار فوم، این افت فشار ثابت است. وجود افت فشار در جریان اصلی باعث حرکت تدریجی فوم در ماتریس می‌شود. به زبان دیگر، اگر در کنار ماتریسی تزریق فوم در کنار شکاف مطابق شکل ۹ صورت بگیرد و جبهه جابه‌جایی ناحیه کمانی باشد که در شکل ۹ با L_1 ، L_2 و L_n نشان داده شده است، عمق نفوذ^۲ فوم در هر جبهه با D_1 ، D_2 و D_n نشان داده می‌شود و بر جریان اصلی در شکاف عمود است. با گسترش و توسعه جبهه فوم با گذر زمان، عمق نفوذ فوم نیز افزایش می‌یابد و به حد آستانه‌ای می‌رسد (D_n در شکل ۹) که فراتر از آن توان تخلیه سیال درون ماتریس را ندارد.

در جلوی جبهه بخشی از نفت به‌وسیله امولسیون و گلبول شدن نفت تولید می‌شود. گلبول‌های نفت به موازات جریان اصلی (جریان در شکاف) در ماتریس به سمت پرت تولید در مسیر کمان حرکت می‌کند، در آنجا تجمع می‌یابد و در جهت فلش نشان داده شده در شکل ۷ تولید می‌شود و یک جریان همرفتی در مسیر تولید ایجاد می‌کند. با تشکیل گلبول‌های نفت به‌وسیله مکانیزم امولسیون، در قسمت‌های میانی محل تماس ماتریس و شکاف شواهدی شبیه به ناحیه اختلاط^۱ که در مطالعات جریان متقاطع ناشی از گرانیروی عنوان شده بود در این مطالعه مشاهده شد که در شکل ۸ نشان داده شده است [۲ و ۱۹].



شکل ۸ ناحیه اختلاط، فلش سفید جهت ورود فوم به ماتریس و فلش مشکی جهت خروج لنز نفت از ماتریس و وصل شدن به لاملا را نشان می‌دهد



شکل ۹ شماتیک افزایش عمق نفوذ فوم با گسترش جبهه فوم در ماتریس در یک افت فشار ثابت

1. Mixing Zone
2. Invasion Depth

کیفیت فوم در آزمایش‌های محیط اشباع از نفت می‌توان اشاره کرد که با افزایش کیفیت فوم در رژیم کیفیت‌های کم، گرانشی ظاهری فوم افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه ۳ با افزایش گرانشی ظاهری فوم، افت فشار در جریان اصلی افزایش و در نتیجه میزان بازیافت از ماتریس افزایش می‌یابد. این افزایش تولید با مشاهدات پیشین در دیگر مطالعات تطابق دارد [۱۰، ۱۳ و ۱۴].

نتیجه‌گیری

۱- با تزریق فوم از شکاف به ماتریس، نفت و آب به‌جامانده تولید شد. طبق مشاهدات مکانیزم جریان متقاطع ناشی از گرانشی در هر دو محیط اشباع از آب و نفت و مکانیزم امولسیون در محیط اشباع از نفت مشاهده شد. حضور نفت اثری بر مکانیزم جریان متقاطع ناشی از گرانشی نداشته است و این مکانیزم عامل رانش در هر دو محیط اشباع بوده است. در بررسی حرکت جبهه فوم که شبیه به کمان دیده شده است، چند ناحیه مشاهده شد. در جلوی جبهه، ناحیه دینامیکی وجود دارد که سرعت حرکت سیالات بیشتر بوده و اشباع فوم در پشت تماس با نفت و ناپایدار شدن کم است. در پشت جبهه ناحیه استاتیکی وجود دارد که سرعت حرکت سیالات کم و اشباع فوم بیشتر است.

۲- هنگام تزریق فوم در شکاف مجاور ماتریس اشباع از نفت، بخشی از نفت به‌وسیله مکانیزم امولسیون و گلبول شدن نفت تولید شد. این گلبول‌ها در مسیر کمان و به موازات جریان اصلی حرکت کرده و نزدیک پایین دست متراکم و تولید می‌شوند. با تشکیل لنت‌های نفت، در قسمت‌های میانی محل ارتباط ماتریس- شکاف ناحیه‌ای موسوم به ناحیه اختلاط دیده شده است که هم‌زمان با ورود فوم به ماتریس، گلبول‌های نفت در همان نقطه از ماتریس خارج می‌شوند.

بنابراین با ثابت بودن افت فشار و حداکثر شدن عمق نفوذ فوم در این افت فشار منحصر به فرد، نیروی رانش ثابت است و این افت فشار ثابت، جریان سیالات در جبهه دینامیک را تا میزان مشخصی تقویت می‌کند. این بدین معنی است که هر افت فشار در جریان اصلی متناظر با عمق نفوذ خاصی از فوم در ماتریس است. بنابراین میزان ازدیاد برداشت مقدار مشخصی خواهد بود و بدین ترتیب می‌توان گفت هر افت فشار ناشی از گرانشی فوم در جریان اصلی با یک ضریب بازیافت متناسب است. در بررسی تست‌های تغییر دبی، اگر همبستگی بین سرعت سیال و گرادیان فشار با استفاده از قانون پوازی^۱ برای جریان تک فاز در یک شکاف به‌صورت رابطه ۳ شود:

$$u_g = -\frac{R^2 \Delta P_g}{8\mu_g} \quad (3)$$

که R در اینجا شعاع شکاف است. در صورتی که به‌جای جریان تک فاز، جریان دوفازی مانند فوم در شکاف در جریان باشد، μ_g با $\mu_{app \text{ foam}}$ جایگزین می‌شود که به مراتب بزرگ‌تر از گرانشی گاز است. با توجه به اینکه سری آزمایش‌های افزایش دبی، میزان تولید کاهش یافته است، اگر در نظر گرفته شود که در رژیم کیفیت‌های کم، (که زیر ۹۰٪ هستند) و همچنین در سرعت‌های بالاتر مقیاس حفره نسبت به مقیاس مغزه فوم رفتار رقیق شونده دارد، بنابراین با افزایش سرعت انتظار می‌رود گرانشی ظاهری فوم کاهش یابد. با توجه به رابطه ۳ با مقایسه آزمایش‌های ۱ و ۲ می‌توان دریافت که حتی با وجود افزایش ۱۰ برابری دبی، کاهش گرانشی به‌قدری بوده است که بر افزایش دبی غلبه کرده و موجب کاهش گرادیان فشار شده و تولید کاهش یافته است. این نتیجه با نتیجه فرن [۱۴] تفاوت دارد و به‌نظر می‌رسد که افزایش تولید ایجاد شده به‌وسیله افزایش دبی، ناشی از تولید از حفره‌هایی بوده که در شبکه شکاف آن‌ها موجود بوده است. در توجیه افزایش تولید متأثر از افزایش

1. Poiseuille Law

فوم در رژیم کیفیت‌های کم و متناظر آن کاهش افت فشار جهت تولید، نسبت داد.
۵- با افزایش کیفیت فوم تزریقی در شکاف که موجب افزایش گرانیروی ظاهری فوم و افت فشار در محیط متخلخل می‌شود؛ ضریب بازیافت نفت افزایش یافته است.

علائم و نشانه‌ها

L_f : طول کمان فوم (cm)

D_f : عمق نفوذ فوم (cm)

P : فشار (Pa)

u : سرعت سیال ($\mu\text{m/s}$)

R : شعاع شکاف، میکرومتر

ΔP : گرادیان فشار (Pa)

μ : گرانیروی (Pa.s)

۳- نیروی رانش در فرآیند جابه‌جایی نفت درون ماتریس توسط فوم، افت فشار در جریان اصلی است. برای پایدار بودن تزریق، این افت فشار ثابت و در نتیجه نیروی رانش ثابت است. در آزمایش‌ها مشاهده شد که این افت فشار ثابت، جریان سیالات در جبهه دینامیک را تا میزان مشخصی تقویت می‌کند و با گسترش جبهه فوم و افزایش عمق نفوذ فوم در ماتریس، در نهایت این عمق نفوذ به مقدار بیشینه‌ای می‌رسد و فراتر از آن تولیدی صورت نمی‌گیرد. در نتیجه می‌توان گفت هر افت فشار ناشی از گرانیروی فوم در جریان اصلی با یک ضریب بازیافت متناسب است.

۴- با افزایش دبی در ماتریس اشباع از آب، کاهش تولید و مقاومت جریان مشاهده شد. دلیل این کاهش تولید را می‌توان به رفتار رقیق شونده فوم که افزایش دبی موجب کاهش گرانیروی ظاهری

مراجع

- [1]. Khosravi M., Bahramian A., Emadi M., Rostami B. and Roayaie E., "Mechanistic investigation of bypassed-oil recovery during CO₂ injection in matrix and fracture", Fuel, Vol. 117, pp. 43-49, 2014.
- [2]. Zapata V. J. and Lake L. W., "A theoretical analysis of viscous crossflow", in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1981.
- [3]. Fergui O., Bertin H. and Quintard M., "Transient aqueous foam flow in porous media: experiments and modeling," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 9-29, 1998.
- [4]. Gauglitz P. A., Friedmann F., Kam S. I. and Rossen W. R., "Foam generation in homogeneous porous media," Chemical Engineering Science, Vol. 57, No. 19, pp. 4037-4052, 2002.
- [5]. Osterloh W. and Jante Jr M., "Effects of gas and liquid velocity on steady-state foam flow at high temperature," in SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [6]. Alvarez J., Rivas H. and Rossen W., "A unified model for steady-state foam behavior at high and low foam qualities," in IOR 1999-10th European Symposium on Improved Oil Recovery, 1999.
- [7]. Hirasaki G. and Lawson J., "Mechanisms of foam flow in porous media: apparent viscosity in smooth capillaries," Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 25, No. 2, pp. 176-190, 1985.
- [8]. Kahrobaei S., Vincent-Bonnieu S. and Farajzadeh R., "Experimental study of hysteresis behavior of foam generation in porous media," Scientific Reports, Scientific Reports 7, Article Number 8986, 2017.
- [9]. Bertin H., Apaydin O., Castanier L. and Kovscek A., "Foam flow in heterogeneous porous media: Effect of crossflow," in SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1998.

- [10]. Chang S. H. and Grigg R., "Effects of foam quality and flow rate on CO₂-foam behavior at reservoir temperature and pressure," SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 248-254, 1999.
- [11]. Haugen Å., Fernø M. A., Graue A. and Bertin H. J., "Experimental study of foam flow in fractured oil-wet limestone for enhanced oil recovery," SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 15, No. 02, pp. 218-228, 2012.
- [12]. Ma K., Lontas R., Conn C. A., Hirasaki G. J. and Biswal S. L., "Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics," Soft Matter, Vol. 8, No. 41, pp. 10669-10675, 2012.
- [13]. Conn C. A., Ma K., Hirasaki G. J. and Biswal S. L., "Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast," Lab on a Chip, Vol. 14, No. 20, pp. 3968-3977, 2014.
- [14]. M. A. Ferno, Gauteplass J., Pancharoen M., Haugen A., Graue A., Kovscek A. R., Hirasaki G. J., "Experimental study of foam generation, sweep efficiency, and flow in a fracture network," SPE Journal, Vol. 21, No. 04, pp. 1,140-1,150, 2016.
- [15]. Farajzadeh R., Andrianov A., Bruining H. and Zitha P. L., "Comparative study of CO₂ and N₂ foams in porous media at low and high pressure-temperatures", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 48, No. 9, pp. 4542-4552, 2009.
- [16]. Llave F., Chung F. H., Louvier R. and Hudgins D., "Foams as mobility control agents for oil recovery by gas displacement", in SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1990.
- [17]. Falls A., Musters J. and Ratulowski J., "The apparent viscosity of foams in homogeneous bead packs," SPE Reservoir Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 155-164, 1989.
- [18]. Osei-Bonsu K., Shokri N. and Grassia P., "Fundamental investigation of foam flow in a liquid-filled hele-Shaw cell," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 462, pp. 288-296, 2016.
- [19]. Debbabi Y., Jackson M. D., Hampson G. J., Fitch P. J. and Salinas P., "Viscous crossflow in layered porous media," Transport in Porous Media, Vol. 117, No. 2, pp. 281-309, 2017.