



ارزیابی عملکرد سیلاب‌زنی شیمیایی با استفاده از میکرومدل

سید شروان خلیلی‌نژاد^{۱*}، گنابادی جراحیان^۱، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

چکیده

یکی از روش‌های مهم افزایش برداشت در مخازن نفتی، سیلاب‌زنی شیمیایی است. بررسی عملکرد و مقدار بازده این فرآیندها در میزان افزایش برداشت نفت از مخازن به عوامل متعددی از جمله خواص سنگ و سیال مخزن بستگی دارد و بنابراین یکی از مهم‌ترین مراحل در بررسی عملکرد این روش‌ها برای یک مخزن، مطالعه آزمایشگاهی مکانیزم‌های موجود و محاسبه توانایی عوامل شیمیایی در بازیافت نفت است. میکرومدل‌ها به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی سیلاب‌زنی شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیلاب‌زنی میکرومدل نیز به‌عنوان روشی جهت بررسی کمی و کیفی عملکرد سیلاب‌زنی شیمیایی شناخته شده است. این مقاله به بررسی اجمالی مهم‌ترین و آخرین مطالعات و تحقیقاتی که در جهت بررسی عملکرد سیلاب‌زنی شیمیایی با استفاده از میکرومدل‌ها انجام شده پرداخته و بازه وسیعی از اهداف و فرآیندهایی که می‌توان با استفاده از میکرومدل به بررسی آنها پرداخت را ارزیابی کرده است. نتایج این تحقیق نشان داد که از میکرومدل‌ها می‌توان برای بررسی مکانیزم‌های مختلفی استفاده کرد؛ چراکه میکرومدل‌ها می‌توانند سیلاب‌زنی شیمیایی آزمایشگاهی را با دقت زیادی شبیه‌سازی کنند. این مقاله هم‌چنین وابستگی عملکرد سیلاب‌زنی شیمیایی به عواملی مثل غلظت ماده شیمیایی، نوع ماده شیمیایی و مشخصات محیط متخلخل توسط سیلاب‌زنی میکرومدل را نشان داد.

واژگان کلیدی

میکرومدل، سیلاب‌زنی پلیمری، سیلاب‌زنی ماده فعال‌کننده سطحی، نفت سنگین

مقدمه

بر اساس تعریف ویلسون^۲ میکرومدل‌ها^۳ نوعی مدل‌های انتقالی مصنوعی هستند که تداعی‌کننده محیط متخلخل بوده و می‌توانند برای شبیه‌سازی دو بعدی فرآیند انتقال سیال در مقیاس حفره به کار گرفته شوند [۱]. ماتکس^۴ و همکاران نخستین شبکه شیشه‌ای چاپ شده را ساختند [۲] که این روش توسط داویس^۵ و همکاران با استفاده از چاپ تصویر بهبود یافت [۳]. میکرومدل‌ها با ایجاد (چاپ) الگوی دلخواه می‌توانند در شرایط مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. جزئیات ساخت میکرومدل‌ها را می‌توان در منابع مختلف یافت [۱]. در شکل ۱-نمایی کلی از تجهیزات یک میکرومدل نشان داده شده است.

در فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی، برای جابجایی نفت جهت تغییر رفتار فازی و کاهش کشش سطحی، مواد شیمیایی خاصی مثل ماده فعال‌کننده سطحی یا عوامل آلكالین

توده بافر محرک^۱، محلولی حاوی پلیمر با غلظت‌های چند صد ppm، تزریق می‌شود. این محلول پلیمری با تزریق میزان بیشتری از محلول از نظر مقدار پلیمر رقیق‌تر می‌شود. حجم کل محلول پلیمر تزریقی حدوداً به اندازه حجم منافذ است. محلول مایسلار که حلالیت ناچیزی با نفت دارد، جهت کاهش کشش سطحی فاز نفت طراحی شده است. زمانی که این محلول در تماس با قطرات نفت باقیمانده قرار می‌گیرد قطرات تحت گرادیان فشاری در اثر کاهش کشش سطحی تغییر شکل داده و به سمت گلوگاه^{۱۱} خلل و فرج جابجا می‌شوند. به هم پیوستگی قطرات نفت باعث ایجاد بانک نفتی می‌شود که همراه با آب در جلوی توده شیمیایی حرکت می‌کند. محلول مایسلار هم‌چنین باید نسبت حرکت متناسبی با آب و نفت جلوی توده داشته باشد تا مانع از وقوع پدیده انگشتی شدن توده در بانک نفت شده و بازدهی جابجایی ماکروسکوپیک افزایش یابد. هدف از تزریق

تزریق می‌شوند که با این کار بازدهی جابجایی میکروسکوپیک بهبود می‌یابد. در برخی موارد بهبود حرکت^۲ نیز به‌عنوان بخشی از فرآیند سیلاب‌زنی شیمیایی محسوب می‌شود که به طور هم‌زمان امکان بهبود پتانسیل بازدهی جابجایی حجمی و بازدهی جابجایی میکروسکوپی را فراهم می‌کند [۶].

فرآیند سیلاب‌زنی پلیمر/ماده فعال‌کننده سطحی^۷ یکی از مهم‌ترین فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی می‌باشد. در این فرآیند اولین حجم توده مایع جابجاکننده یک سیستم شیمیایی پیچیده است که محلول مایسلار^۸ نامیده می‌شود. این محلول شامل یک ماده فعال‌کننده سطحی (معمولاً یک سولفات نفتی)، کمک‌ماده فعال‌کننده سطحی^۹ (الکل)، نفت، الکترولیت‌ها، آب و پلیمر است. حجم توده ماده فعال‌کننده سطحی نسبتاً کم و معمولاً معادل ۱۰ درصد حجم منافذ است.

به‌دنبال ماده فعال‌کننده سطحی یک حجم

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (sh.khalilinezhad.srbiau@gmail.com)



به بررسی دقیق تر حرکت سیالات و شرایط موجود برای بهبود بازده این فرآیندها پرداخت. در این آزمایش ها میکرومدل ها شرایط مختلفی از محیط متخلخل از جمله وجود شکاف^{۱۳}، وجود شیل ها و وجود محیط ناهمگن را نمایش می دهند. در بعضی از این آزمایش ها از پلیمر به عنوان عامل شیمیایی و در آزمایش های دیگر از مواد فعال کننده سطحی به عنوان عامل شیمیایی برای سیلاب زنی شیمیایی استفاده شده است.

۲- سیلاب زنی پلیمری در سیستمی همگن

در اولین مورد به بررسی عملکرد سیلاب زنی پلیمری در یک میکرومدل با شرایط همگن می پردازیم [۸]. در این مطالعه عملکرد پلیمرهای مختلف، غلظت های مختلف از پلیمر و نرخ های متفاوت تزریق محلول در یک محیط همگن بررسی شده است. از شرایط این مدل می توان به سیال نفتی با درجه سبکی برابر ۱۹/۸ اشاره کرد و از طرفی دیگر تراوایی سیستم همگن نیز حدود ۲۰ داری می باشد. سیال با سه غلظت ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۲۵۰ ppm استفاده شده است. نتایج نشان داده که با افزایش غلظت پلیمر به ۱/۵ برابر حالت اولیه باز یافت نفت ۸-۷ درصد افزایش یافته است.

پس از بررسی اثر غلظت پلیمر در محلول تزریقی، اثر نرخ تزریقی که نشان دهنده سرعت تزریق نیز هست بررسی شد. سه نرخ تزریق متفاوت ۰/۰۰۰۲، ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۰۸ میلی لیتر بر دقیقه استفاده شده است. در اینجا تفاوت نرخ تزریق برای پلیمرهای مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از تزریق با نرخ های متفاوت نشان داد که با افزایش نرخ تزریق، باز یافت نفت کاهش می یابد که مقدار این کاهش تا حدی وابسته به نوع پلیمر نیز هست. دلیل کاهش باز یافت نفت در اثر افزایش نرخ تزریق، وجود شرایط سوزنی در جبهه حرکت سیال است.

در نهایت به منظور بررسی تأثیر نوع پلیمر مورد استفاده در باز یافت نفت، سه نوع پلیمر که خواص آنها در جدول ۱-۱ ارائه شده مورد بررسی

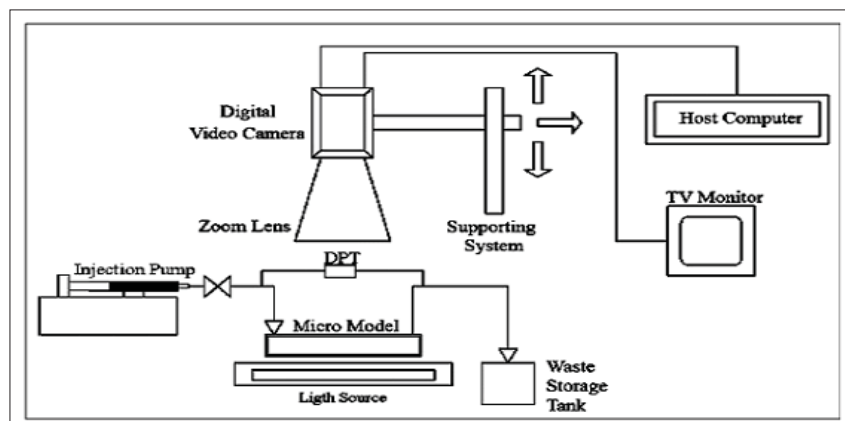
مخازن کربناته و مخازن با شوری زیاد امکان پذیر نبود.

در یک روش متداول، یک محلول نمکی و پلیمر پلی آکریل آمید هیدرولیز شده جزئی^{۱۴} در غلظت چند صد ppm پلیمر، جهت جابجایی نفت به سمت چاه های تولیدی تزریق می شود. حجم توده پلیمر باید ۵۰ تا ۱۰۰ درصد حجم منافذ باشد و ترکیبات آن نیز باید تغییر کند. در ابتدا بیشترین غلظت پلیمر تزریق می شود و در توده های بعدی غلظت آن کاهش یافته و در نهایت سیال تزریقی آب یا آب شور خواهد بود. محلول های پلیمری جهت توسعه یک نسبت تحرک مناسب بین محلول پلیمری تزریقی و بانک نفت جابجا شونده جلوی پلیمر طراحی می شوند. هدف این کار توسعه جاروب حجمی مناسب در مخزن از لحاظ سطحی و عمودی است؛ چراکه در یک سیلاب زنی اگر نسبت تحرک نامناسب باشد، آب به سرعت خود را از کوتاه ترین مسیر به چاه تولیدی خواهد رساند [۷].

۱- سیلاب زنی با میکرومدل

در این قسمت مروری بر آزمایش های انجام شده توسط دستگاه میکرومدل برای بررسی عملکرد فرآیندهای سیلاب زنی شیمیایی خواهیم داشت؛ چراکه به دلیل پیچیدگی فرآیندهای سیلاب زنی شیمیایی در محیط متخلخل، می توان با استفاده از یک محیط شفاف مانند میکرومدل

محلول پلیمری بافر محرک، جابجایی مؤثر محلول مایسلار است. کشش سطحی بین محلول های پلیمری و مایسلار خیلی کم است و تنها مقدار کمی محلول مایسلار باقی می ماند. وجود نسبت تحرک متناسب بین محلول پلیمری و مایسلار عامل مهمی در ایجاد یک جابجایی مؤثر است. در این فرآیند جابجایی ها غیرامتزاجی است و حلالیتی بین محلول مایسلار و نفت یا محلول مایسلار و محلول پلیمری وجود ندارد. فرآیندهای ماده فعال کننده سطحی دارای پتانسیل زیادی هستند؛ چراکه می توانند هم بازده جابجایی ماکروسکوپی و هم بازده جابجایی میکروسکوپی را افزایش دهند. مشکل عمده این فرآیندها فن آوری پیچیده آنهاست و بنابراین تنها در زمان بالا بودن قیمت نفت یا قابل توجه بودن میزان نفت باقیمانده در مخزن پس از فرآیند سیلاب زنی کاربرد خواهند داشت. محلول های شیمیایی دارای ماده فعال کننده سطحی و کمک ماده فعال کننده سطحی گران قیمت هستند. هم چنین هرزروی مواد شیمیایی ممکن است شدید باشد که چنین هرزروی هایی می تواند نتیجه جذب، تفکیک فازی و به دام افتادن مواد شیمیایی باشد. این هرزروی باید توسط تزریق بیشتر محلول مایسلار جبران گردد. پایداری مواد فعال کننده سطحی در دما و شوری های زیاد از دیگر مشکلات این فرآیندهاست. به عنوان مثال در ابتدا کاربرد ماده فعال کننده سطحی در



۱ | نمای از دستگاه میکرومدل [۵]

قرار گرفت که نتایج آزمایش‌ها نشان داد پلیمر نوع دوم بازده بهتری جهت بازیافت نفت دارد.

۳- سیلاب‌زنی پلیمری در سیستمی ناهمگن و لایه‌ای

در این آزمایش مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی‌های پلیمری برای یک میکرومدل با شرایط ناهمگن و لایه‌دار انجام شده است [۹]. این آزمایش هم‌چنین کاربرد میکرومدل در بررسی عملکرد روش‌های ازدیادبرداشت در شرایط ناهمگنی محلی و ناهمگنی کلی و وضعیت لایه‌ها را نسبت به جهت جریان نشان می‌دهد. دو الگو برای بررسی تأثیر ناهمگنی و سه الگو جهت بررسی اثر جهت لایه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه هم‌چنین محل قرارگیری نقاط تزریقی و تولیدی از لحاظ وجود ناهمگنی نیز بررسی شده است. از سوی دیگر در این مطالعه از میکرومدل، هم به منظور بررسی کیفی عملکرد فرآیند و هم به منظور بررسی کمی عملکرد فرآیند استفاده شده است. هم‌چنین در این آزمایش از پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده جزئی استفاده شده است. قبل از اجرای آزمایش‌های اصلی در ابتدا مقادیر شوری، نرخ و غلظت بهینه برای سیلاب‌زنی پلیمری و سیلاب‌زنی آب توسط چند آزمایش سیلاب‌زنی آب در یک محیط آب تر مشخص شد و در آزمایش‌های اصلی از این مقادیر بهینه استفاده گردید. در مقایسه نتایج بازیافت سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی پلیمری مشخص شد که وجود پلیمر در محلول تزریقی به دلیل بهبود نسبت تحرک، باعث شد تأثیر منفی وجود ناهمگنی در سیستم بر بازیافت نفت کاهش یابد. نتایج برای سیلاب‌زنی آب و

سیلاب‌زنی پلیمری هم‌چنین نشان داد که با تغییر نقطه تزریق، بازیافت نفت یک سیستم ناهمگن می‌تواند از بازیافت نفت یک سیستم همگن بیشتر یا کمتر شود. این بدان معنی است که تعیین نقطه تزریق تأثیر شدیدی بر بازیافت نفت دارد. نتایج برای مدل‌هایی با جهت لایه‌ای مختلف نشان داد که در زمان سیلاب‌زنی آب رفتار مشخصی برای بازیافت نفت با تغییر جهت لایه نسبت به جهت جریان مشاهده نمی‌شود و بیشترین مقدار بازیافت برای حالتی است که آب از یک نقطه با تراوایی زیاد به سمت یک قسمت با تراوایی کم تزریق می‌شود. هم‌چنین بیشترین مقادیر بازیافت برای سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی پلیمری در حالتی که جهت لایه با جهت جریان زاویه ۹۰ درجه دارد و سیال از نقطه پُر تراوا به سمت نقطه کم تراوا تزریق می‌شود معرفی گردید. دلیل آن نیز بدین صورت ذکر شده که آب یا محلول پلیمری در ابتدای تزریق در یک لایه پُر تراوا توزیع شده و در نتیجه یک جبهه حرکت گسترده تشکیل می‌گردد که با حجم وسیعی از محیط متخلخل در تماس قرار می‌گیرد. این جبهه باعث کنترل افت فشار در سیستم شده و منجر به طولانی‌تر شدن زمان میان‌شکن می‌گردد و در نتیجه بازیافت نفت افزایش می‌یابد. در زمان سیلاب‌زنی پلیمری با افزایش زاویه لایه نسبت به جهت جریان و تزریق از نقطه پُر تراوا به یک نقطه کم تراوا، بازیافت نفت افزایش می‌یابد. این نتیجه زمانی که تزریق از نقطه کم تراوا به سمت نقطه پُر تراوا صورت گرفت مشاهده نگردید. در این حالت زمانی که جهت لایه با جهت جریان زاویه صفر درجه دارد، ضریب بازیافت بیشترین مقدار را خواهد داشت.

۴- سیلاب‌زنی پلیمری برای بازیافت نفت سنگین در سیستم حاوی شیل

در این قسمت تأثیر وجود شیل در مخازن نفت سنگین در زمان سیلاب‌زنی پلیمری بررسی شده است [۵]. مدل‌های استفاده شده شامل مدل همگن و مدل با شیل‌های تصادفی و در دو حالت با ترشوندگی نفت تر و آب تر تعریف شده‌اند. هم‌چنین پلیمرهای مختلف از جمله پلی‌آکریل‌امید، پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده جزئی و زانتان^{۱۴} مقایسه شده است. وجود شیل در مخازن نفت باعث عدم جاروب مناسب سیالات می‌شود؛ چراکه لایه‌های شیلی موانعی در سر راه سیالات هستند. مدل‌هایی که مبین وجود شیل و عدم وجود شیل در سیستم‌های مورد آزمایش در شکل ۲- ارائه گردیده‌اند.

نتایج بدین صورت مقایسه شده که از سویی سیلاب‌زنی پلیمری با سیلاب‌زنی آب برای مخازن نفت سنگین مقایسه شود و از سوی دیگر تأثیر افزایش غلظت هر نوع پلیمر نیز به طور مجزا مقایسه و بررسی گردد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که بازیافت نفت برای پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده جزئی نسبت به پلی‌آکریل‌امید بیشتر است و از طرفی دیگر با افزایش غلظت این دو نوع پلیمر تا ۱۲۰۰ ppm، بازیافت نفت به شدت افزایش می‌یابد ولی افزایش مقادیر غلظت پلیمرها بیش از این، بازیافت نفت را به کندی افزایش می‌دهد. از طرفی هر دوی این پلیمرها در غلظت ۴۸۰۰ ppm بازده یکسان دارند. این رفتار برای زانتان نیز مشاهده شد؛ به طوری که با افزایش غلظت تا ۲۴۰۰ ppm، بازیافت نفت به شدت افزایش می‌یابد ولی افزایش مقادیر غلظت پلیمرها بیش از این، بازیافت نفت را به کندی افزایش می‌دهد. نتیجه نهایی این قسمت آنست که تا غلظت‌های پلیمری به میزان ۱۸۰۰ ppm، پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده مؤثرتر بوده و در غلظت‌های پلیمری تا ۳۰۰۰ ppm هم‌چنان پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده مؤثرتر است و در غلظت‌های پلیمری تا ۴۲۰۰ ppm زانتان بهترین بازده را داراست.

۱ | پلیمرهای مورد استفاده در سیلاب‌زنی پلیمری [۸]

شماره پلیمر	نوع پلیمر	نام جاری	عدد مشخصه
۱	پلی‌آکریل‌امید	* DRISPAC * Superlo	۲۱۰۶
۲	پلی‌آکریل‌امید	DRISCAL * D	۵۱۰۶
۳	پلی‌آکریل‌امید	DRISPAC * Regular	۱۱۰۴

این نتایج به طور خلاصه در شکل ۳- ارائه شده است.

در نتایج بازیافت نفت برای پلی آکریل آمید هیدرولیز شده و پلی آکریل آمید دو زمان میان شکنی مشاهده شده به طوری که بعد از زمان میان شکن اول برای دقایقی محلول پلیمری تأثیر کمی بر بازیافت نفت گذارده است. چرا که مولکول های پلیمر در این مدت در نواحی مختلف محیط متخلخل ته نشین می شوند و بعد از گذشت این مدت زمان دوباره تزریق پلیمر باعث افزایش بازیافت نفت شده و تا زمان میان شکنی دوم ادامه می یابد. پس از این زمان بازیافت نفت با سرعت بسیار کمی افزایش می یابد.

از مقایسه نتایج سیلاب زنی پلیمری و سیلاب زنی آب برای یک سیستم شیلی و یک سیستم همگن در شرایط آب تر مشخص شد که زمان میان شکنی برای الگوی همگن دیرتر اتفاق می افتد؛ چرا که در الگوی حاوی شیل، سیال تزریقی نمی تواند به خوبی حرکت کند و از طریق کوتاه ترین مسیر و در کمترین زمان به نقطه تولید می رسد. بازیافت نفت نیز کاهش می یابد زیرا حجم قابل توجهی از نفت در این الگو به دلیل وجود شیل به دام می افتد.

در ادامه این مطالعه به تأثیر شرایط آب تر و نفت تر بودن سیستم حاوی شیل در زمان سیلاب زنی آب و سیلاب زنی پلیمری پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که بازیافت نفت

در سیلاب زنی آب و سیلاب زنی پلیمری برای حالت آب تر در زمان میان شکنی و در انتهای آزمایش بیشتر بوده و دلیل این امر آنست که در زمانی که سیستم نفت تراست یک لایه نفتی روی دیواره ها وجود داشته که باعث افزایش نیروی موئینه شده و بازیافت نفت را کاهش می دهد. در این قسمت مکانیزم های موجود در سیلاب زنی پلیمری بررسی خواهد شد.

الف) مکانیزم کشش

با توجه به عکس های گرفته شده از حفرات و گلوگاه ها هم در حالت آب تر و هم در حالت نفت تر مشاهده شد که بعضی از نقاط نزدیک به گلوگاه ها دارای اشباع باقیمانده نفت هستند. (برای حالت آب تر این مقدار کمتر است). این مقدار برای سیلاب زنی پلیمری و سیلاب زنی آب متفاوت است. دلیل آن نیز بدین صورت تشریح شده که پلیمرها رفتار ویسکوالاستیک^{۱۵} دارند و بنابراین علاوه بر استرس برشی بین پلیمر و نفت، استرس نرمال نیز بین آنها وجود دارد. بنابراین در این مناطق پلیمر به آب بیشتر از نفت نیروی کششی وارد می کند و اشباع باقیمانده نفت در این مناطق پس از سیلاب زنی پلیمری به شدت کاهش می یابد.

ب) مکانیزم نازک شدن لایه نفتی

این مکانیزم در شرایط محیط نفت تر صورت می گیرد؛ به این صورت که گرانیوی

زیاد محلول پلیمری و زمان بیشتری که این محلول برای تماس با نفت دارد و از سوی دیگر گرادیان سرعت محلول پلیمری در نزدیکی دیواره ها بیشتر از آب است و در نتیجه باعث جاروب شدن لایه نفتی چسبیده به دیواره ها خواهد شد.

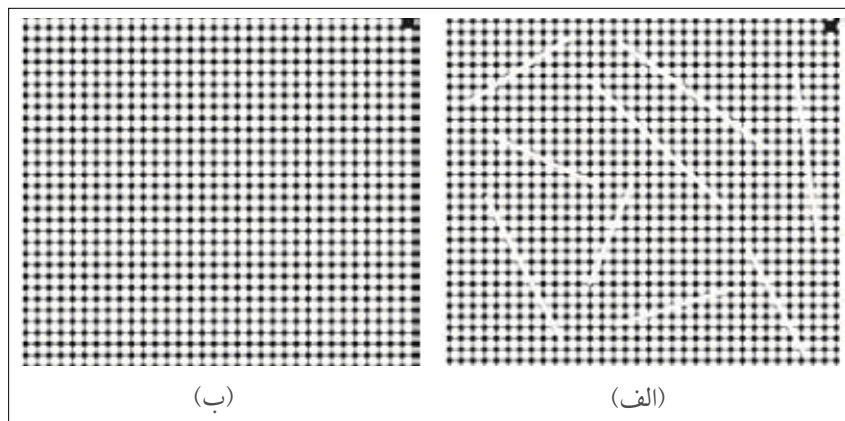
ج) مکانیزم جریان رشته های نفتی

در زمان تزریق آب، قطراتی از نفت به صورت ناپیوسته در محیط باقی می ماند و این قطرات در زمان تزریق پلیمر در طی مسیر به یکدیگر پیوسته و تشکیل یک رشته نفتی می دهند و به دلیل وجود استرس نرمال بین نفت و محلول پلیمری، این رشته از هم گسیخته نمی شود و در نهایت منجر به بازیافت نفت می گردد. این مکانیزم ها توسط سیلاب زنی میکرومدل ها قابل مشاهده و بررسی بوده است.

۵- تأثیر مشخصات لایه شیلی و اشباع آب همراه بر بازیافت نفت از سیلاب زنی پلیمری

در این قسمت تأثیر شکل هندسی شیل ها و اشباع آب اولیه بر عملکرد سیلاب زنی پلیمری با استفاده از میکرومدل بررسی خواهد شد [۱۰]. در این مطالعه نتایج مدل های مختلف ساخته شده، از نظر تغییر در ضریب بازیافت نفت و زمان میان شکن مقایسه می شوند. اولین آزمایش به منظور بررسی تأثیر زاویه شیل با جهت جریان انجام گرفت. به طور کلی در مقایسه با نتایج یک سیستم همگن، وجود شیل در سیستم به عنوان یک مانع، باعث کاهش ضریب بازیافت نفت و همچنین کاهش زمان میان شکن سیال تزریقی گردید. از سوی دیگر نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بین جهت شیل و جهت جریان، مقدار نفت کنار گذاشته شده افزایش می یابد و ضریب بازیافت نفت نیز کاهش می یابد.

به منظور ارزیابی تأثیر فاصله لایه شیلی تا نقطه تزریقی، مدل هایی مخصوص ساخته شده و توسط سیلاب زنی میکرومدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فاصله شیل از



چاه تولیدی تأثیر شدیدی بر ضریب بازیافت نفت دارد؛ به نحوی که با افزایش فاصله شیل از چاه تزریقی، سیال تزریقی قبل از زمان میان‌شکن زمان بیشتری برای تماس با نفت دارد و بنابراین می‌تواند نفت بیشتری را تحت تأثیر حرکت خود قرار داده و بنابراین با افزایش فاصله شیل از چاه تزریقی، ضریب بازیافت نفت نیز افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی اثر طول شیل بر ضریب بازیافت نفت نیز آزمایش‌هایی توسط مدل‌های ساخته شده انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش طول لایه شیلی عمود بر جهت جریان، ضریب بازیافت سیلاب‌زنی پلیمری کاهش می‌یابد. وجود یک مانع بلندتر باعث افزایش فشار مؤثر مانع بین نقطه تولید و تزریق و کاهش زمان میان‌شکن شده و در نتیجه ضریب بازیافت نفت کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش طول شیل، حجم نفت باقیمانده در عقب و جلوی این لایه افزایش می‌یابد که این امر نیز تأثیری منفی بر ضریب بازیافت نفت دارد. به منظور بررسی تأثیر وجود ناپیوستگی بر ضریب بازیافت نفت نیز آزمایش‌هایی با مدل‌های ساخته شده صورت گرفته است. نتایج نشان داد وجود ناپیوستگی در شیل می‌تواند باعث افزایش ضریب بازیافت نفت شود؛ چرا که وجود این ناپیوستگی باعث ایجاد یک توزیع سرعت سیال در سرتاسر مدل شده و در این شرایط نیروی ویسکوز می‌تواند بر نیروی موئینه

غالب شده و باعث افزایش زمان میان‌شکن و افزایش ضریب بازیافت نفت شود.

به منظور بررسی تأثیر تعداد و تراکم شیل‌ها در سیستم و اثر آن بر ضریب بازیافت نفت نیز آزمایش‌هایی با مدل‌های ساخته شده برای این منظور انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله شیل‌ها از یکدیگر ضریب بازیافت نفت کاهش می‌یابد. در حقیقت افزایش فاصله شیل‌ها از سویی باعث افزایش حجم نفت کنار گذاشته شده بین آنها شده و از سوی دیگر سبب کاهش زمان میان‌شکن نیز خواهد شد و در نهایت ضریب بازیافت نفت را کاهش می‌دهد. هم‌چنین با افزایش تعداد شیل‌ها در سیستم، نفت سریع‌تر و بیشتر کنار گذاشته می‌شود که این موضوع به کاهش زمان میان‌شکن و کاهش ضریب بازیافت نفت می‌انجامد.

در نهایت به منظور بررسی اثر مقدار اشباع آب اولیه در سیستم و با استفاده از مدل ساخته شده در نرم‌افزار اکلیس نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مدل‌ها نشان داد که با افزایش مقدار اشباع آب اولیه در یک سیستم حاوی شیل با ترشوندگی نفت‌تر، زمان میان‌شکن و ضریب بازیافت نفت کاهش می‌یابد.

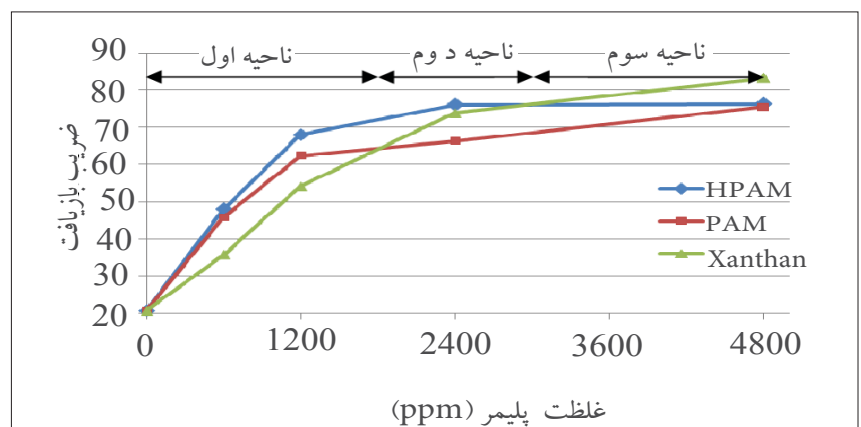
۶- تأثیر سیلاب‌زنی پلیمری و سیلاب‌زنی ماده فعال‌کننده سطحی-پلیمر در بازیافت نفت از نقاط بسته

در این قسمت تأثیر سیلاب‌زنی پلیمری در

بازیافت نفت باقیمانده در مسیرهای بسته محیط متخلخل (درون میکرومدل) بررسی می‌شود [۱۱]. با توجه به اینکه یکی از انواع چهارگانه نفت باقیمانده در مخازن، نفت باقیمانده در حفرات بسته است [۱۲] بازیافت این نفت می‌تواند در کاهش مقدار اشباع نفت باقیمانده در مخزن مؤثر باشد.

ابتدا یک مدل که مبین شرایط وجود یک نقطه یا حفره بسته در سیستم است ساخته شد. سپس عکس برداری از حرکت سیال پلیمری و نفت طی سیلاب‌زنی‌های پلیمری که شامل انواع پلیمر در غلظت‌های مختلف بود به دقت انجام گردید تا مقدار نفت بازیافت شده از نقاط و حفرات بسته بررسی و محاسبه شود. چهار نوع پلیمر و هر کدام در سه غلظت متفاوت مورد استفاده قرار گرفتند.

ابتدا نتایج برای مقایسه بازیافت نفت حاصل از پلی‌آکریل آمید هیدرولیز شده جزئی و پلی‌آکریل آمید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمامی غلظت‌های مورد استفاده بازیافت نفت ناشی از پلی‌آکریل آمید هیدرولیز شده جزئی از بازیافت نفت حاصل از پلی‌آکریل آمید بیشتر بوده و افزایش غلظت هر دو پلیمر باعث افزایش بازیافت نفت می‌شود. از سوی دیگر مقدار بازیافت نفت حاصل از پلیمرهای سولفون‌شده با درجه‌های متفاوت نیز مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن شبیه به نتایج ناشی از تأثیر هیدرولیز شدن پلیمر بود. هر چه به درجه سولفوناسیون پلیمر افزوده شود مقدار بازیافت نفت افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. افزایش درجه سولفوناسیون پلیمر و درجه هیدرولیز پلیمر باعث افزایش فشار حفره و در نتیجه تخلیه نفت داخل حفره می‌شود. اما طی مقایسه‌ای بین تأثیر سولفوناسیون و درجه هیدرولیز شدن پلیمر در یک غلظت ثابت، مشخص شد که سولفوناسیون پلیمر تأثیر بیشتری در تخلیه نفت نسبت به افزایش درجه هیدرولیز پلیمر دارد. شکل ۵- مبین نتایج پلی‌آکریل آمید و پلی‌آکریل آمید هیدرولیز شده جزئی و



تأثیر غلظت پلیمر بر ضریب بازیافت نفت [۵]

شکل ۶- نشان دهنده مقایسه نتایج پلیمر با درجه سولفوناسیون متفاوت می باشد. هم چنین در بخشی دیگر از این مطالعات، مکانیزم بازیافت نفت از نقاط بسته با استفاده از محلول های پلیمر- ماده فعال کننده سطحی بررسی شد [۱۳]. در ابتدا نتایج نشان داد که افزودن ماده فعال کننده سطحی باعث افزایش بازیافت نفت باقیمانده می شود که هر چه غلظت ماده فعال کننده سطحی افزایش یابد و از سوی دیگر این غلظت به مقدار غلظت مایسل بحرانی آن ماده نزدیک تر شود باعث کاهش شدیدتر کشش سطحی شده و بازیافت نفت به مقدار بیشتری افزایش می یابد. از مقایسه نتایج بازیافت پلیمرهایی با درجه سولفوناسیون زیاد و ماده فعال کننده سطحی مشخص شد که این پلیمرها حتی می توانند از مواد فعال کننده سطحی نیز در بازیافت نفت باقیمانده مؤثرتر باشند. همان طور که انتظار می رفت ترکیب پلیمر و ماده فعال کننده سطحی باعث افزایش شدید بازیافت نفت گردید اما به منظور بررسی تأثیر نوع پلیمر مورد استفاده در محلول پلیمر- ماده فعال کننده سطحی، پلیمرهای هیدرولیز شده و سولفونیه شده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پلیمری با درجه سولفوناسیون زیاد نسبت به پلیمری با درجه هیدرولیز شده زیاد در محلول حاوی ماده فعال کننده سطحی می تواند نفت باقیمانده در حفرات بسته را به مقدار بیشتری بازیافت کند که این امر ممکن است به دلیل فعل

و انفعال بهتر این نوع پلیمر و ماده فعال کننده سطحی باشد.

۷- تأثیر وجود سیستم شکاف در سیلاب زنی ماده فعال کننده سطحی

در این قسمت عملکرد سیلاب زنی در شرایطی که در سیستم شکاف مواد فعال کننده سطحی وجود دارد بررسی خواهد شد. صداقت و همکاران مجموعه ای از سیلاب زنی آب و سیلاب زنی مواد فعال کننده سطحی را با استفاده از میکرومدل انجام دادند [۱۴]. آنها هم چنین به مقایسه عملکرد در شرایطی که در سیستم شکاف دو نوع ماده فعال کننده سطحی در غلظت های مختلف وجود دارد پرداختند و نتایج آنرا با یک سیستم همگن مقایسه کردند. دو نوع ماده فعال کننده مورد استفاده در این قسمت (SDS)^{۱۶} و (LABS)^{۱۷} هستند. نتایج حاصل از نخستین آزمایش ها نشان داد که وجود شکاف در سیستم و تأثیر آن بر بازیافت نفت به شدت به جهت شکاف نسبت به جهت جریان سیال وابسته است؛ به نحوی که اگر شکاف با جهت جریان هم جهت باشد، زمان میان شکن در حالت سیستم همگن سریع تر اتفاق می افتد. در حالی که وقتی شکاف عمود بر جهت جریان باشد زمان میان شکن نسبت به سیستم همگن بیشتر خواهد بود. از مقایسه نتایج این سه سیستم این نتیجه حاصل شد که وجود شکاف در سیستم عمود بر مسیر جهت

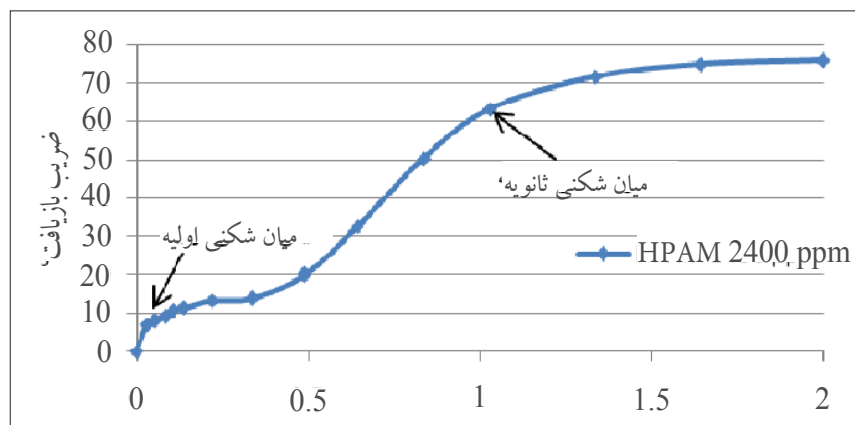
جریان می تواند باعث افزایش زمان میان شکن و هم چنین افزایش بازیافت نفت شود.

به منظور بررسی تأثیر ماده فعال کننده سطحی در بازیافت نفت نسبت به تزریق آب، سیلاب زنی میکرومدل انجام گردید. نتایج نشان داد که ماده فعال کننده سطحی تأثیر بسیار مثبتی در بازیافت نفت نسبت به آب داشته است. از سوی دیگر محلول SDS نسبت به LABS تأثیر مثبت بیشتری در بازیافت نفت داشته زیرا این محلول باعث کاهش بیشتر کشش سطحی سیستم می شود. هم چنین نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ماده فعال کننده سطحی، هم میان شکن افزایش یافته و هم بازیافت نفت به شدت افزایش می یابد.

به منظور بررسی تأثیر طول شکاف در عملکرد سیلاب زنی ماده فعال کننده سطحی، دو سیستم مشابه با طول شکاف متفاوت ساخته شد و سیلاب زنی ماده فعال کننده سطحی انجام گردید. جهت شکاف با جهت جریان سیال زاویه ۴۵ درجه داشت. نتایج نشان داد که با افزایش طول شکاف، زمان میان شکن و نیز بازیافت نفت افزایش می یابد زیرا در شکافی با طول بیشتر، سیال مدت زمان بیشتری برای طی کردن این مسیر نیاز دارد و این موضوع باعث افزایش زمان میان شکن و نیز بازیافت نفت می شود. به منظور بررسی تأثیر تعداد شکاف در بازیافت نفت و زمان میان شکن، آزمایش هایی انجام شد؛ به نحوی که از هر دو نوع ماده فعال کننده سطحی استفاده گردید و نتایج نشان داد که برای هر دو نوع ماده فعال کننده سطحی با افزایش تعداد شکاف در سیستم، مقدار بازیافت نفت و زمان میان شکن افزایش می یابد. این مقایسه برای دو سیستمی که در آنها زاویه جهت شکاف نسبت به جهت جریان برابر با ۴۵ و ۹۰ درجه بود انجام گردید تا اثر این زاویه نیز هم زمان مورد بررسی شده باشد.

۸- بررسی مکانیزم های سیلاب زنی آلكالین

در این قسمت تأثیر سیلاب زنی آلكالین با استفاده از میکرومدل بررسی شده است. دانگ



۴ | تأثیر زمان میان شکن اولیه و ثانویه بر بازیافت نفت [۵]

و همکاران بیان کردند که در بازیافت نفت سنگین توسط سیلاب‌زنی آلکالین دو مکانیزم عمده وجود دارد [۱۵]:

الف) تشکیل امولسیون و وارد شدن نفت به فاز آبی

ب) تغییر ترشوندگی سیستم.

شکل ۷- تشکیل امولسیون در سیستم میکرومدل را به خوبی نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که با تزریق محلول آلکالین بازیافت نفت به شدت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در زمان تزریق این محلول شیمیایی، به دلیل تشکیل امولسیون و جریان آن در محیط، افت فشار سیستم افزایش یافته و تا زمان میان‌شکن ادامه می‌یابد و پس از رسیدن سیال تزریقی به قسمت تولیدی، متوقف می‌شود. از سوی دیگر با تغییر

ترشوندگی سیستم که توسط آلکالین ایجاد شده، سیال تزریقی توانست نفت باقیمانده در مناطقی که توسط آب بازیافت شده بود را تخلیه نماید.

هم‌چنین با افزودن ماده فعال‌کننده سطحی به محلول آلکالین و کاهش کشش سطحی، نتایج بازیافت باز هم بهبود یافته و در نتیجه ضریب بازیافت نفت افزایش یافت. شکل ۸- به خوبی تأثیر تزریق آلکالین را بر بازیافت نفت نسبت به سیلاب‌زنی آب در سیستم نشان می‌دهد.

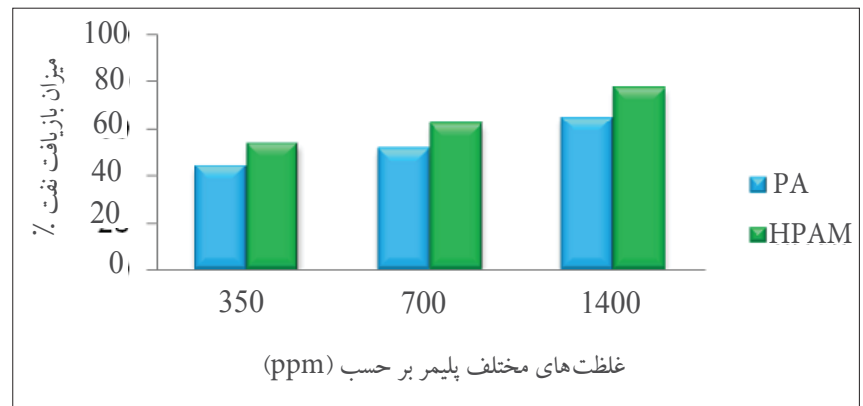
۹- تأثیر سیلاب‌زنی پلیمری، سیلاب‌زنی ماده فعال‌کننده سطحی و آلکالین بر بازیافت نفت

در این قسمت تأثیر سیلاب‌زنی پلیمری و سیلاب‌زنی ماده فعال‌کننده سطحی و آلکالین با استفاده از میکرومدل بررسی و مقایسه

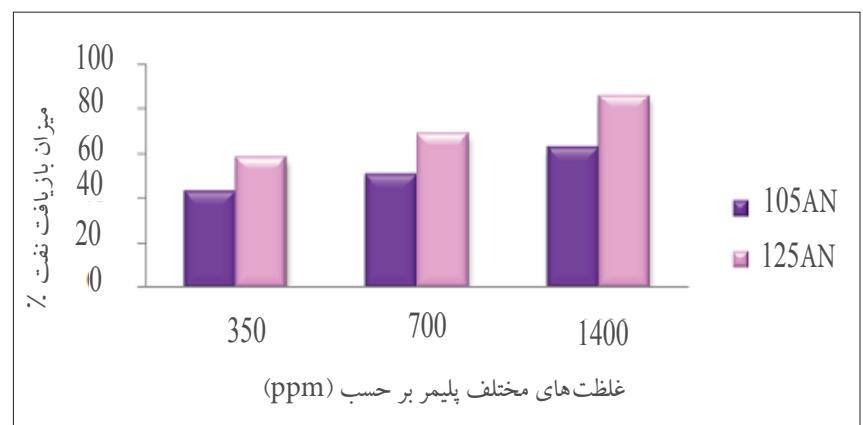
خواهد شد. دوروار و همکاران [۱۶] در ابتدا به منظور بررسی تأثیر وجود نسبت گرانیوی واحد (نسبت گرانیوی برابر است با گرانیوی سیال جابه‌جا شونده به گرانیوی سیال جابجا کننده)، محلول آب گلیسرول^{۱۸} تزریق شده با گرانیوی ۶ سانتی‌پویز نفت با گرانیوی ۶ سانتی‌پویز را جاروب کرد و جبهه جریان توسط میکرومدل، پایدار و بدون ناپیوستگی رؤیت شد. از سوی دیگر به منظور بررسی تأثیر منفی وجود نسبت گرانیوی زیاد، نفت با گرانیوی ۱۰۰۰۰ سانتی‌پویز توسط آب با گرانیوی یک سانتی‌پویز جاروب گردید و پدیده انگشتی شدن و ناپایداری در جبهه جریان مشاهده شد. شکل ۹- دو جبهه متفاوت جریان را نشان می‌دهد.

پس از این مقایسه، برای آزمایش دوم (نفت با گرانیوی ۱۰۰۰۰ سانتی‌پویز) از محلول پلیمری با گرانیوی ۱۰۰ سانتی‌پویز استفاده شد. مشاهدات حاصل از میکرومدل، نشان داد که مقدار و دامنه پدیده انگشتی شدن کاهش یافته اما هنوز جبهه جریان ناپایدار بوده و بازیافت نهایی کم می‌باشد.

به منظور بررسی تأثیر تزریق ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین در سیستمی با نفت سنگین، فرآیند سیلاب‌زنی محلول ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین اجرا شد. این فرآیند یک بار برای یک مدل سیلاب‌زنی شده با آب و یک بار هم برای یک مدل سیلاب‌زنی شده با پلیمر انجام گردید. از مقایسه نتایج مشخص شد که تزریق ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین بعد از سیلاب‌زنی پلیمری، بازده جاروبی بیشتری نسبت به تزریق ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین بعد از سیلاب‌زنی آب دارد. مکانیزم تأثیر مثبت تزریق ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین بعد از سیلاب‌زنی پلیمری بدین صورت است که به دلیل پدیده انگشتی شدن کمتر در سیلاب‌زنی پلیمری نسبت به سیلاب‌زنی آب، در زمان تزریق ماده فعال‌کننده سطحی-آلکالین نیز این



شکل ۵ | تأثیر زمان میان‌شکن اولیه و ثانویه بر بازیافت نفت [۵]



شکل ۶ | تأثیر پلی‌اکریل‌آمید سولفوناته شده بر بازیافت نفت [۱۱]



الف) در زمان سیلاب‌زنی پلیمری یا سیلاب‌زنی آب، پدیده انگشتی شدن و ساختار و وسعت آن بستگی به نسبت گرانیروی (نسبت گرانیروی سیال جابه‌جا شونده به گرانیروی سیال جابه‌جا کننده) دارد.

ب) محلول ماده فعال کننده سطحی-آلکالین از طریق کاهش کشش سطحی سیستم و تشکیل امولسیون، به‌خوبی باز یافت نفت سنگین را افزایش داد. زمانی که محلول ماده فعال کننده سطحی-آلکالین بعد از سیلاب‌زنی پلیمری تزریق می‌شود، مقدار این افزایش بیشتر خواهد بود.

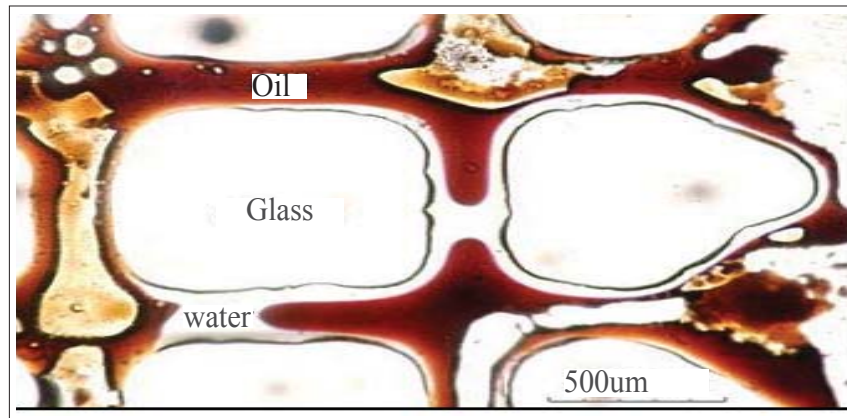
ج) باز یافت نفت در مکانیزم تزریق محلول ماده فعال کننده سطحی-آلکالین به شدت تابع سطح تماس مشترک نفت و آب (محلول شیمیایی) است که این سطح تماس پس از پایان سیلاب‌زنی پلیمری بیشتر از مقدار آن در زمان پایان سیلاب‌زنی با آب است.

نتیجه‌گیری

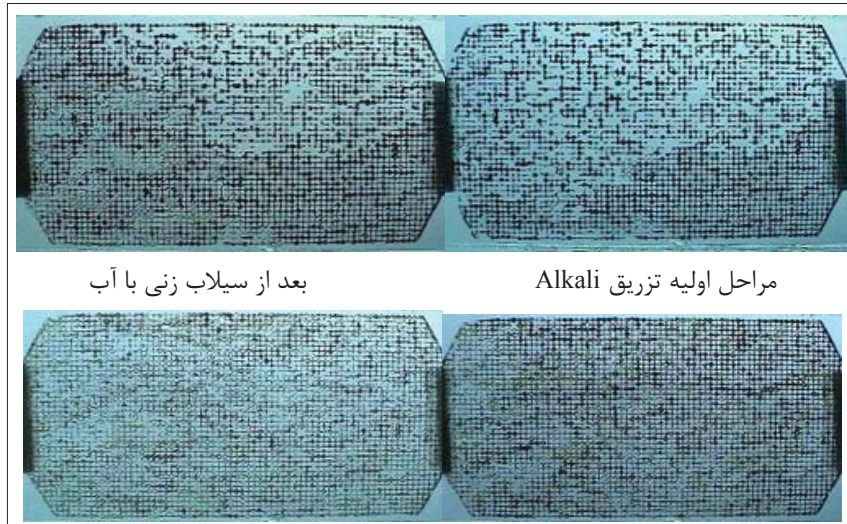
■ میکرومدل‌ها می‌توانند برای بررسی دقیق کمی و کیفی سیلاب‌زنی شیمیایی از جمله تأثیر شرایط مختلف محیط متخلخل مثل وجود شیل، وجود شکاف، وجود سیستم ناهمگن، مقدار نفت باقیمانده در نقاط بسته و شرایط نفت‌تر یا آب‌تر بودن بر باز یافت سیلاب‌زنی شیمیایی مورد استفاده قرار گیرند.

■ سیلاب‌زنی شیمیایی در مقایسه با آب ضریب باز یافت بیشتری برای نفت سنگین و هم‌چنین نفت سبک دارد و هر کدام از فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی دارای مکانیزمی مشخص برای افزایش ضریب باز یافت هستند. پلیمرها با تأثیر بر گرانیروی سیال جابه‌جا کننده و بهبود نسبت تحرک، نفت را مؤثرتر جاروب می‌کنند. از سوی دیگر مواد فعال کننده سطحی و آلکالین به ترتیب با کاهش کشش سطحی، تشکیل امولسیون و بهبود رفتار فازی باز یافت نفت را افزایش می‌دهند.

نیز دارد. شکل-۱۰ نحوه تأثیر محلول ماده فعال کننده سطحی-آلکالین به منظور جاروب و متحرک کردن یک حجم کوچک نفتی به تله افتاده را به‌خوبی نشان می‌دهد. نتیجه کلی این آزمایش‌ها به شکل زیر خلاصه می‌شود:



۷ | تشکیل امولسیون در سیستم در زمان تزریق آلکالین [۱۵]



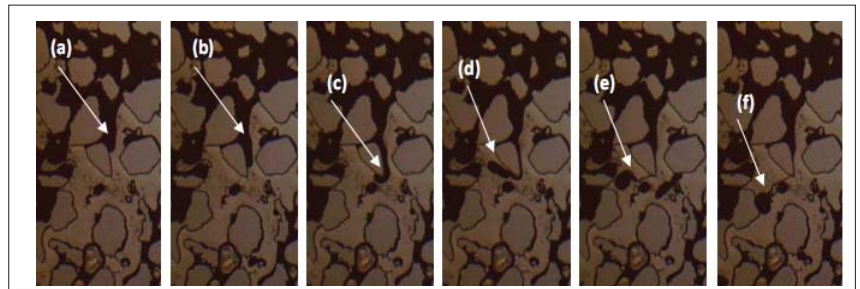
۸ | تأثیر سیلاب‌زنی آلکالین بر بازده جاروبی نفت [۱۵]



۹ | تأثیر نسبت گرانیروی بر بازده جاروبی نفت [۱۶]

■ شرایط مختلف ماده شیمیایی تزریقی از جمله غلظت، نوع و حجم آن ماده، بازیافت نفت را تحت تأثیر قرار می دهد.

■ مشخصات مختلف محیط متخلخل از جمله شیل، شبکه شکاف و ناهمگنی بر بازیافت و زمان میان شکن سیال تزریقی تأثیر گذار است و این پدیده ها به خوبی توسط سیلاب زنی میکرومدل قابل بررسی هستند. ■



۱۰ | تأثیر تشکیل امولسیون در متحرک کردن قطره نفت [۱۶]

پانویس ها

¹ g.cheraghian@srbiau.ac.ir	⁷ surfactant-polymer flooding	¹³ fracture
² Wilson	⁸ Micellar	¹⁴ xanthan
³ micromodel	⁹ Co-Surfactant	¹⁵ viscoelastic behavior
⁴ Mattax	¹⁰ pore throats	¹⁶ Sodium Dodecyl Sulfate
⁵ Davis	¹¹ pore throats	¹⁷ Linear Alkyl Benzene Sulphonates
⁶ mobility improvements	¹² HPAM	¹⁸ glycerol water

منابع

- [1] Wilson, J. L. (1994). "Visualization of Flow and Transport at the Pore Level, in Transport and Reactive Processes in Aquifer". Edited by T.H. Dracos and F. Stauffer, Rotterdam, The Netherlands, 19-36
- [2] Mattax, C. C. and Kyte, J.R.(1961). "Ever See Water Flood?." Oil and Gas J.59, 115-128
- [3] Davis, J. A. and Jones, S. C. (1968). "Displacement Mechanisms of Residual Solutions" . J.Pet. Tech., 20, 1415-1428.
- [4] McKellar, M. and Wardlaw, N.(1982). "A Method of Making Two-Dimensional Glass Micromodels of Pore Systems." J. Can. Pet. Technol.,21, 39-41.
- [5] مهرانفر امین، غضنفری محمد حسین، مسیحی محسن و داوود رشتچیان، ۱۳۹۱، "مطالعه آزمایشگاهی تزریق پلیمر به منظور ازدیاد برداشت نفت سنگین از مخازن حاوی شیل با استفاده از دستگاه میکرومدل" چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران، دانشگاه شریف
- [6] Green, D. W., Willhite, G.P., (1998) "Enhanced Oil Recovery", Textbook Series, SPE, Richardson,
- [7] Sheng, James J., (2011) "Modern Chemical Enhanced Oil Recovery" (Theory and Practice), Elsevier Inc, USA. 3100
- [8] حسینی سید جواد، خراط ریاض و غضنفری محمد حسین (۱۳۸۶)، "مطالعه آزمایشگاهی تزریق پلیمر در محیط همگون با استفاده از میکرومدل"، مجله اکتشاف و تولید شماره ۴۲
- [9] Emami Meybodi, H., Kharrat, R., Ghazanfari, M.H. (2008) : " Effect of Heterogeneity of Layered Reservoir On Polymer Flooding : An Experimental Approach Using Five-Spot Glass Micromodels" SPE 113820 At the SPE Europep / EAGE Annual Conference and Exhibition, Rome , Italy.
- [10] Mohammadi, S., Masihi, M., Ghazanfari, M.H., (2012): "Characterizing the Role of Shale Geometry and Connate Water Saturation on Performance of Polymer Flooding in Heavy Oil Reservoirs: Experimental Observations and Numerical Simulations , J. Porous Media, P.973
- [۱۱] جباری هادی، رضانی سعادت آبادی احمد، (۱۳۹۲): "آزمایش های مشاهده ای سیلاب زنی با پلیمر در مسیر بسته با استفاده از میکرومدل شیشه ای"، مجله اکتشاف و تولید شماره ۹۹
- [12] A. Ramazani S.A., M. Nourani, and M.A. Emadi, (2009) : "Investigation of Intrinsic Viscosity and Mark- Houwink Parameters of hig Molecular Weight, Partially Hydrolyzed Polyacrylamide in Petroleum Reservoir Conditions" 9th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST2009), Tehran/Iran,
- [13] Jabbari, H., Ramazani S.A, A., Masihi, M., (2012) : "Experimental Study on Polymer-Surfactant Effects on Enhance Oil Recovery from Dead-End", J. American Science, 8(3), P.34
- [14] Sedaghat, M.H. Morshedi, S., Masihi, M., Ghazanfari, M.H., Rashtchian, D., (2012) : " Experimental Investigation of Surfactant Flooding for EOR in Fractured Porous Media". 3rd National Iranian Petroleum Engineering Congress,
- [15] Dong, M., Liu, Q., Li, A., (2007) : "Micromodel Study of the Displacement Mechanisms of Enhanced Heavy Oil Recovery by Alkaline Flooding". International Symposium of the Society of Core Analysts, Calgary, Canada, p.10-12
- [16] Doorwar, Sh., Mohanty, K.,(2011) : "Pore Scale Fingering During Viscous Oil Displacement". International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin, Texas, U.S.A.