



## مطالعه شبیه‌سازی روش‌های سیلاب‌زنی شیمیایی

سید شروان خللی‌نژاد\*، میلاد امیدوار، سرخ‌آبادی، امید محمودی، امین جوادی بنگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قوچان

### چکیده

روش‌های سیلاب‌زنی شیمیایی به‌منظور بهبود برداشت نفت در پروژه‌های میدانی به‌دلیل هزینه‌های زیاد مواد شیمیایی و عدم قطعیت در قیمت نفت عمدتاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. یک طراحی بهینه با استفاده از روش‌های جدید مانند استفاده از عامل‌های شیمیایی جدید و یا مطالعات کامل سیلاب‌زنی شیمیایی در ابعاد مغزه باید انجام گیرد تا اجرای سیلاب‌زنی شیمیایی مقرون به‌صرفه‌تر باشد. بنابراین، مهم‌ترین قسمت در ارزیابی روش‌های سیلاب‌زنی شیمیایی، مطالعات آزمایشگاهی بر روی مکانیزم‌های موجود در این روش‌هاست به‌طوری‌که توانایی این روش‌ها در بازیافت نفت را مورد بررسی قرار می‌دهد. سپس، نتایج این مطالعات می‌تواند در پروژه‌های میدانی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه هزینه و زمان زیادی برای اجرای مطالعات آزمایشگاهی نیاز است، کاربرد نرم‌افزارهایی که می‌توانند مطالعات آزمایشگاهی را نیز مورد شبیه‌سازی قرار دهند، مشخص می‌شود. در این مقاله، فرآیندهای مختلفی به‌منظور بازیافت نفت مانند تزریق آب، پلیمر و سورفکتانت در مقیاس مغزه مورد شبیه‌سازی و مقایسه قرار می‌گیرند. همچنین، مجموعه‌ای از مطالعات حساسیت‌سنجی نسبت به غلظت، نوع و شوری مواد شیمیایی انجام می‌پذیرد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک شبیه‌ساز سیلاب‌زنی شیمیایی، چندجزئی چندفازی و سه‌بعدی به نام UTCHEM صورت می‌پذیرد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که غلظت عامل‌های شیمیایی، نوع مواد شیمیایی و همچنین شوری آن‌ها تأثیر شدیدی بر مقدار افزایش برداشت به‌وسیله مواد شیمیایی می‌گذراند. علاوه بر این، سیلاب‌زنی ASP به‌عنوان بهترین روش برای بازیافت از یک مغزه ماسه‌سنگی انتخاب گردید.

واژگان کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، سیلاب‌زنی شیمیایی، شبیه‌سازی عددی مخزن، UTCHEM

### مقدمه

تزریق پلیمر به مخزن، جریان جزئی<sup>۲</sup> سیال تزریقی در مخزن کاهش یافته و باعث بهبود راندمان جاروبی در مخزن می‌گردد. تأثیر دیگری نیز می‌توان از تزریق پلیمر در مخازن نفتی مشاهده نمود که به آن، کاهش تراوایی پلیمر می‌گویند. در این حالت، به‌دلیل جذب پلیمر بر روی سنگ، تراوایی نسبت به فاز آبی کاهش یافته و به‌عبارتی دیگر، نفت مخزن در مجاورت آب، با سهولت بیشتری به سمت چاه تولیدی حرکت می‌نماید [۱].

سیلاب‌زنی سورفکتانت: نیروهای موئینه موجود در مخازن نفت که عمدتاً در نتیجه وجود کشش سطحی بین نفت و آب ایجاد می‌شوند، باعث جلوگیری از حرکت قطرات نفت در مخزن شده و در نهایت، باعث عدم تولید نفت باقی‌مانده در مخزن می‌گردند [۱]. محلول سورفکتانت در مخازن نفتی یا به‌منظور تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و یا به‌منظور کاهش کشش سطحی بین نفت و آب تزریق می‌شود که ایجاد مکانیزم‌های مذکور وابسته به نوع سورفکتانت مورد استفاده در یک مخزن صورت می‌گیرد. زمانی که محلول سورفکتانت به‌منظور کاهش کشش سطحی در مخزن تزریق می‌گردد، مقدار

در میان روش‌های مختلف ازدیاد برداشت نفت، روش‌های شیمیایی افزایش بازیافت عمدتاً به‌عنوان یکی از پرهزینه‌ترین روش‌ها در نظر گرفته شده است و در طی چندسال اخیر، با توجه به کاهش مقدار بازیافت از مخازن و افزایش جهانی قیمت نفت، استفاده از مواد شیمیایی برای بازیافت نفت از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد. سیلاب‌زنی پلیمر یکی از ساده‌ترین روش‌های افزایش بازیافت نفت در مقیاسه با سایر روش‌های نوین ازدیاد برداشت نفت در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی از تزریق محلول‌های پلیمری در یک مخزن نفتی را می‌توان بهبود نسبت تحرک سیالات جابه‌جاکننده و جابه‌جاشونده عنوان نمود. در این روش، پلیمر استفاده شده باعث افزایش گران‌روی آب تزریقی می‌شود و بنابراین، میزان (مقدار) تحرک آب را کاهش می‌دهد. کاهش میزان تحرک آب در مخزن باعث جلوگیری از ناپایداری‌های جریانی<sup>۱</sup> در جبهه حرکت سیال در مخزن شده و سیالات جابه‌جاکننده و جابه‌جاشونده نسبت به یکدیگر یکنواخت‌تر به سمت چاه تولیدی حرکت می‌کنند. همچنین، در اثر

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Sh.Khalilinezhad.srbiau@gmail.com)

مغزه آب تر و همگن نمی‌تواند جاروب کند و اشباع نفت را کاهش دهد، اما سیلاب‌زنی پلیمری در زمان ثانویه می‌تواند اشباع نفت را تا مقداری کمتر از اشباع نفت باقی‌مانده پس از سیلاب‌زنی آب در یک مغزه مشابه کاهش دهد. این مقدار کاهش اشباع باقی‌مانده نفت در حالت ثانویه، نتیجه ترکیبی از تأثیر مثبت بهبود جاروبی و کاهش در اشباع نفت باقی‌مانده است. ال‌صوفی و همکاران [۵] با انجام مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی‌های شیمیایی سورفکتانت-پلیمر در مقیاس مغزه و اعتبارسنجی و تطبیق نتایج آن با مدل ساخته شده‌ی سیلاب‌زنی مغزه در شبیه‌ساز UTCHEM، پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی در مقیاس میدانی را محاسبه کردند. آن‌ها در ابتدا داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی رفتار سیال را با استفاده از مدل‌های موجود در شبیه‌ساز مذکور و داده‌های آزمایشگاه محاسبه کرده و سپس، با انجام سیلاب‌زنی مغزه، داده‌های به‌دست آمده در مرحله قبل را اعتبارسنجی کردند. خلیلی‌نژاد [۶] مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های سیلاب‌زنی شیمیایی را برای یک مدل ناهمگن از مخازن نفتی ایران که دارای ناهنگی زیادی بود، اجرا نمود. در این مطالعه، از شبیه‌ساز UTCHEM استفاده گردید و تمامی روش‌های سیلاب‌زنی شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، شبیه‌سازی سیلاب‌زنی شیمیایی در مقیاس مغزه نیز به‌منظور انجام آزمایش‌های حساسیت‌سنجی<sup>۶</sup> اجرا گردید.

#### ۱- توصیف شبیه‌ساز

شبیه‌ساز چندجزئی شیمیایی دانشگاه تگزاس در آستین برای سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی شیمیایی در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبیه‌ساز، یک شبیه‌ساز سه‌بعدی و چندجزئی سیلاب‌زنی شیمیایی است. برنامه راه‌حل این شبیه‌ساز، یک فرمولاسیون<sup>۷</sup> IMPES است، جایی که فشار آب به‌صورت ضمنی محاسبه می‌شود و غلظت‌های اجزاء به‌صورت صریح مورد محاسبه قرار می‌گیرند. پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی شامل رفتار فازی میکرومولسیون، مدل‌های کشش سطحی، مدل‌های گران‌روی چندجزئی فازی، مدل‌های به‌دام‌افتادگی فازها<sup>۸</sup>، مدل‌های تراوایی سه‌فازی که وابسته به عدد به‌دام‌افتادگی<sup>۹</sup> هستند، مدل‌های جذب شیمیایی و مدل‌های رئولوژیکی پلیمری توسط این شبیه‌ساز مدل‌سازی می‌شوند و چگونگی وابستگی مستقیم و غیر مستقیم این مدل‌ها به پارامترهایی از جمله شوری (غلظت یون‌های دو ظرفیتی) و متغیرهای دیگری از جمله غلظت حلال همراه<sup>۱۰</sup> قابل بررسی و

تغییرات کشش سطحی سیستم، تابعی از شوری، ترکیب نفت، نوع سورفکتانت و غلظت آن، وجود الکترولیت و دمای مخزن می‌باشد. سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر: در این روش، از عامل شیمیایی آلکالین در محلول سورفکتانت-پلیمر استفاده می‌شود و واکنش‌های بین آلکالین و اجزای اسیدی موجود در نفت باعث تشکیل سورفکتانت، درون مخزن می‌شود و می‌تواند باعث کاهش کشش سطحی آب و نفت گردد. همچنین، وجود عامل آلکالین در محلول سورفکتانت-پلیمر باعث کاهش مقدار سورفکتانت موردنیاز در این فرآیند می‌شود. از سوی دیگر، افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت-پلیمر باعث بهبود رفتار فازی<sup>۳</sup> آن محلول می‌گردد. یکی از عوامل کاهش راندمان سیلاب‌زنی سورفکتانت، میزان جذب این عامل بر سطح سنگ می‌باشد؛ در این شرایط، افزودن آلکالین به محلول دارای سورفکتانت می‌تواند با افزایش pH سیستم باعث کاهش مقدار جذب سورفکتانت بر روی سطح سنگ گردد. بنابراین، محلول آلکالین-سورفکتانت-پلیمر از ترکیب چند مکانیزم در بازیافت نفت سود می‌برد و همچنین به‌علت وجود آلکالین، میزان عملکرد و مدت‌زمان عملکرد سورفکتانت و پلیمر در محلول مذکور در بازیافت می‌تواند افزایش یابد [۲]. هادی‌اوه‌مکاران [۳] مطالعات آزمایشگاهی و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها را برای سیلاب‌زنی آب در مغزه‌های با طول بلند و کوتاه برای بازیافت نفت سنگین انجام دادند. پس از تزریق آب با دبی‌های مختلف، نشان داده شد که افزایش دبی تزریق در سیلاب‌زنی آب برای مغزه با طول کوتاه، تا یک دبی مشخص، باعث افزایش بازیافت نفت می‌شود و پس از آن دبی بهینه نیز، با افزایش دبی تزریق، بازیافت نفت کاهش می‌یابد. دلیل این امر وجود پدیده انگشتی شدن<sup>۴</sup> در جبهه حرکت سیال می‌باشد که باعث می‌شود با افزایش دبی تزریق، جبهه حرکت سیال ناپایدار شده و شدیداً وابسته به سرعت سیال و دبی تزریق آن گردد. همین آزمایش‌ها برای مغزه‌ای با طول بلند صورت گرفت اما مشخص شد که برای دبی‌های مختلف تزریقی، تا یک حجم مشخص از تزریق آب، با افزایش دبی تزریق، بازیافت نفت کاهش می‌یابد و از یک حجم مشخص به بعد، با افزایش دبی تزریق، بازیافت نفت افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده پایداری بیشتر جبهه سیال در مغزه با طول بلند نسبت به مغزه با طول کوتاه عنوان گردید. هاه و همکاران [۴] مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی‌های پلیمری را در حالت‌های ثانویه و ثالثیه<sup>۵</sup> انجام و نشان دادند که با وجود اینکه سیلاب‌زنی پلیمری در زمان ثالثیه، اشباع نفت باقی‌مانده پس از سیلاب‌زنی آب را در یک



شبهه‌سازی است. [۷]

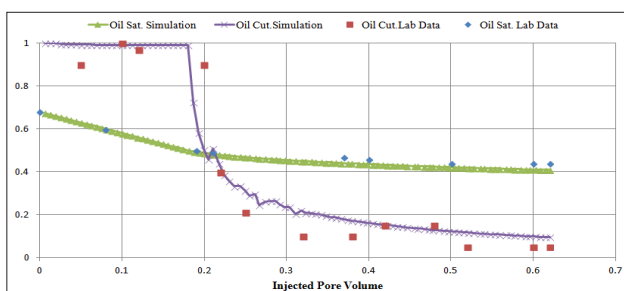
## ۲- سیلاب‌زنی آب

این مغزه در زمان آغاز سیلاب‌زنی آب برابر با ۰/۶۸ و دبی تزریق آب نیز در این مغزه برابر با ۰/۲ میلی لیتر بر دقیقه در دمای ۵۵°C می‌باشد. سیلاب‌زنی آب تا زمانی که برش نفت به مقدار ۵ درصد رسید، ادامه یافت. این مقدار تزریق برابر با ۰/۶۲ حجم حفرات خالی مغزه است. شکل‌های ۱-۲ و تطابق نتایج مدل شبهه‌ساز و مدل آزمایشگاهی سیلاب‌زنی آب را به ترتیب برای تغییرات ضریب بازیافت نفت، تغییرات اشباع و برش نفت نشان می‌دهند. تطبیق تاریخچه نتایج مدل شبهه‌ساز و نتایج سیلاب‌زنی در آزمایشگاه با استفاده از تغییر توان تراوایی نسبی در نمودار تراوایی نسبی حاصل گردید. با توجه به شکل ۱- بازیافت نفت تا زمان تزریق ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی به شدت افزایش می‌یابد اما در این لحظه، هم‌زمان با تولید آب در قسمت خروجی، نرخ افزایش بازیافت نفت با سرعت کمتری انجام و نهایتاً در زمانی که آب به مقدار ۰/۶۲ برابر حجم حفرات خالی تزریق می‌شود، ضریب بازیافت نفت برابر با ۴۰ درصد نفت درون مغزه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تطبیق قابل قبولی بین نتایج مدل شبهه‌ساز و نتایج آزمایشگاهی سیلاب‌زنی مغزه برای تغییرات اشباع نفت و برش نفت در این فرآیند مشاهده می‌شود.

## ۳- سیلاب‌زنی پلیمر

مشخصات سنگ و سیال مورد استفاده همانند مشخصات ذکر شده در قسمت قبل است و نتایج سیلاب‌زنی آب به‌عنوان شرایط آغازین برای انجام سیلاب‌زنی پلیمر در مغزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از تطبیق تاریخچه نتایج مدل آزمایشگاه و شبهه‌ساز، پارامترهایی مختلفی که بر عملکرد سیلاب‌زنی پلیمر در مقیاس مغزه تأثیر می‌گذارند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

### ۳-۱- تطبیق تاریخچه نتایج مدل آزمایشگاه و مدل شبهه‌ساز

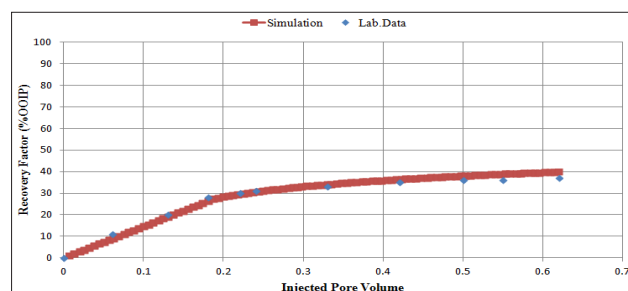


شکل ۳ | تطبیق تاریخچه نتایج تغییرات برش نفت و اشباع نفت در سیلاب‌زنی آب برای مدل شبهه‌ساز و مدل آزمایشگاهی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبهه‌سازی فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی برای مدل آزمایشگاهی ساخته شده در شبهه‌ساز، از اطلاعات آزمایشگاهی سیلاب‌زنی مغزه انجام شده توسط وانگ [۸] استفاده می‌شود. سیلاب‌زنی مغزه برای دو فرآیند سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی پلیمر انجام می‌گردد. از تطبیق نتایج آزمایشگاهی سیلاب‌زنی مغزه و مدل ساخته شده در شبهه‌ساز، پارامترهایی از جمله مشخصات نمودارهای تراوایی نسبی، نمودار فشار موئینه و نمودار اشباع‌زدایی موئینگی به‌دست می‌آید و در شبهه‌سازی سایر فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی، نتایج حاصل از تطبیق تاریخچه سیلاب‌زنی مغزه با آب به‌عنوان شرایط اولیه سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ بدین معنی که تمامی روش‌های سیلاب‌زنی‌های شیمیایی در شرایط ثالثیه انجام می‌شوند. مغزه استفاده شده در آزمایش مذکور دارای ۱۱/۶ اینچ طول و ۱/۴ اینچ قطر می‌باشد. جنس این مغزه از نوع ماسه‌سنگ بوده و همچنین تراوایی آن برابر با ۲۲۷ میلی داری و تخلخل ۲۸/۷٪ است. همچنین گرانروی نفت مورد آزمایش ۷۲ cP بوده و دارای API برابر با ۱۹/۳ می‌باشد.

## ۲-۱ توصیف مدل

مدل ساخته شده در شبهه‌ساز برای انجام سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی‌های شیمیایی دارای تعداد بلوک  $100 \times 100 \times 1$  است. هر بلوک در این سیستم دارای ابعاد  $100 \times 100 \times 1$  ft می‌باشد. مدت زمان تزریق آب در مغزه برابر با ۰/۶۲ برابر حجم حفرات خالی<sup>۱۱</sup> است. اشباع اولیه نفت در

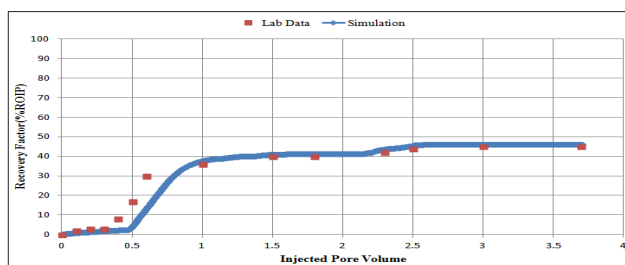


شکل ۲ | تطبیق تاریخچه نتایج ضریب بازیافت نفت در سیلاب‌زنی آب برای مدل شبهه‌ساز و مدل آزمایشگاهی

اول، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و پلیمر نوع دوم، زانتان است. خواص رئولوژیکی پلیمر نوع اول در شکل ۳- و خواص رئولوژیکی پلیمر نوع دوم که در آن از نتایج و [۹] استفاده گردیده، در شکل ۶- نشان داده شده است. در این قسمت، سیلاب زنی پلیمر برای هر دو نوع پلیمر به مقدار ۲ برابر حجم حفرات خالی انجام می شود و غلظت پلیمر در هر دو مورد برابر با ۲۵۰۰ ppm است. خصوصیات و شرایط تزریق مانند حالت قبل می باشد. نتایج حاصل از تزریق این دو نوع پلیمر در شکل ۷- نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد، پلیمر نوع دوم (پلیمر زانتان) دارای عملکرد بهتری در بازیافت نفت باقی مانده درون مغزه نسبت به پلیمر نوع اول (پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی) است. همچنین، برای پلیمر نوع اول بعد از گذشت زمان تزریق به مقدار ۰/۵ برابر حجم حفرات خالی، بازیافت نفت با شدت بیشتری افزایش یافته در حالی که این زمان برای پلیمر نوع دوم ۰/۵ برابر حجم حفرات خالی است. همچنین، بازیافت نفت برای پلیمر نوع اول، ۴۱ درصد از نفت باقی مانده در مغزه می باشد اما بازیافت نفت برای پلیمر نوع دوم ۷۰ درصد از نفت باقی مانده در مغزه است. این اختلاف در مقدار ضریب بازیافت نفت را می توان به خصوصیات رئولوژیکی پلیمر زانتان و مقدار شوری سیستم نسبت داد، زیرا پلیمر زانتان یک بیوپلیمر بوده و در برابر شوری نسبت به پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی مقاوم تر است. بنابراین، با توجه به مقدار شوری این سیستم، پلیمر زانتان نسبت به پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی در بازیافت نفت باقی مانده ی درون مغزه بازده بهتری دارد.

### ۳-۳- بررسی تأثیر غلظت پلیمر تزریقی بر عملکرد سیلاب زنی پلیمر

به منظور بررسی تأثیر غلظت پلیمر تزریقی (پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی) از سه غلظت مختلف ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ ppm برای سیلاب زنی پلیمر استفاده می شود. مدت زمان تزریق در این قسمت نیز



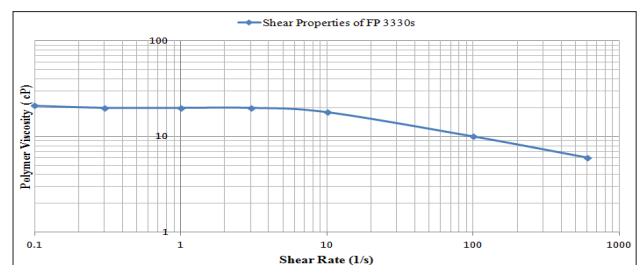
شکل ۴ | تطبیق تاریخچه نتایج ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمر برای مدل شبیه ساز و مدل آزمایشگاهی

پلیمر مورد استفاده در این فرآیند، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی است که خواص رئولوژیکی آن در شکل ۳- نشان داده شده است. سیلاب زنی پلیمر با غلظت ۲۵۰۰ ppm و با دبی تزریقی ۰/۰۶ ml/min درون مغزه تزریق می شود. مدت زمان تزریق برای سیلاب زنی پلیمر ۳/۷ برابر حجم حفرات خالی است و اشباع اولیه نفت در زمان آغاز تزریق محلول پلیمر برابر با ۰/۴۱ بوده است.

تطبیق تاریخچه نتایج ضریب بازیافت نفت و تغییرات برش نفت برای مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه ساز سیلاب زنی پلیمر به ترتیب در شکل های ۴- و ۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴- دیده می شود، بازیافت نفت تا زمانی که محلول پلیمری به مقدار ۰/۵ برابر حجم حفرات خالی تزریق می شود، تقریباً کمتر از ۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه است. دلیل این مقدار ناچیز بازیافت نفت، وجود اشباع زیاد آب در سیستم است. به عبارتی، محلول پلیمری در زمان ثالثیه تزریق می شود و بنابراین، در ابتدا حجم زیادی از محلول پلیمر تزریقی در تماس با مقدار زیاد آب موجود در سیستم قرار گرفته و در این زمان، بازیافت نفت ناچیز است. بعد از گذشت این زمان و با در تماس قرار گرفتن محلول پلیمری با نفت درون مغزه، بازیافت نفت به شدت افزایش می یابد به طوری که تا زمانی که محلول پلیمری به مقدار ۱/۵ برابر حجم حفرات خالی درون مغزه تزریق می شود، بازیافت نفت تا مقدار ۴۰ درصد از نفت باقی مانده در مغزه ادامه می یابد. از این زمان به بعد، تا انتهای زمان سیلاب زنی پلیمر، تنها ۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه بازیافت می شود. شکل ۵ نیز تغییرات برش نفت را در طی سیلاب زنی پلیمر نمایش می دهد. همان طور که در این شکل می توان مشاهده نمود، تطبیق بسیار خوبی بین نتایج مدل آزمایشگاه و مدل شبیه ساز حاصل شده است.

### ۳-۲- بررسی تأثیر نوع پلیمر تزریقی بر عملکرد سیلاب زنی پلیمر

در این قسمت به منظور مقایسه و مطالعه تأثیر نوع پلیمر تزریقی بر بازیافت نفت، از دو نوع پلیمر مختلف استفاده می شود؛ پلیمر نوع



شکل ۵ | تغییرات گرانروی پلیمر Flopaam 3330S بر حسب تغییرات نرخ برش، وانگ [۸]



سطحی است و فرآیند تغییر ترشوندگی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. از اطلاعات آزمایشگاهی و رفتار فازی سورفکتانت مورد استفاده توسط محمدی [۱۰] در تمام سیلاب‌زنی‌های شیمیایی که در آن، سورفکتانت به‌عنوان یک عامل شیمیایی استفاده می‌شود، به‌منظور تعیین مشخصات سورفکتانت در شبیه‌ساز استفاده می‌گردد.

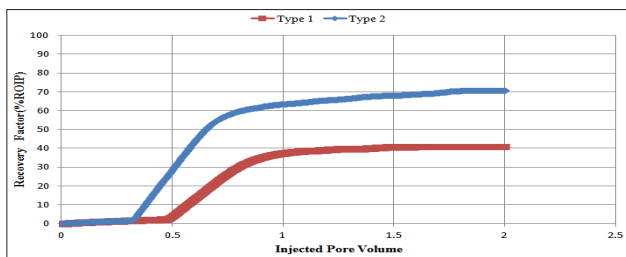
#### ۴-۱-مدل پایه

مشخصات مدل مورد استفاده در این قسمت همانند مدل قبل است. فرآیند سیلاب‌زنی سورفکتانت در این قسمت شامل تزریق محلول سورفکتانت به مقدار ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی و یک محلول پلیمری رانشی به‌عنوان عامل بهبود تحرک محلول سورفکتانت پس از تزریق محلول سورفکتانت، به مقدار ۱/۸ برابر حجم حفرات خالی است. غلظت سورفکتانت در محلول برابر ۱/۵ درصد حجمی و غلظت پلیمر در محلول پلیمری رانشی برابر ppm ۲۰۰۰ می‌باشد. دبی تزریق در هر دو قسمت نیز برابر با ml/min ۰/۰۶ است. نتایج شبیه‌سازی این مدل مبنا در شکل ۹- نشان داده شده است. این شکل ضریب بازیافت نفت از مغزه را در مدت زمان انجام سیلاب‌زنی سورفکتانت نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل می‌توان مشاهده نمود، تا زمان تزریق ۰/۵۲ برابر حجم حفرات خالی، مقدار بازیافت نفت بسیار ناچیز بوده که همانند مورد قبل به دلیل حجم زیاد اشباع آب (انجام سیلاب‌زنی سورفکتانت در زمان ثالثیه)

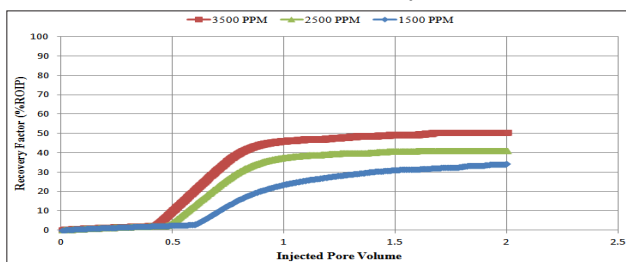
۲ برابر حجم حفرات خالی است. نتایج شبیه‌سازی سیلاب‌زنی پلیمر در سه غلظت ذکر شده در شکل ۸- نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌توان مشاهده کرد، با افزایش غلظت پلیمر، ضریب بازیافت نفت نیز افزایش یافته به طوری که ضریب بازیافت نهایی نفت برای غلظت ppm ۱۵۰۰ برابر با ۳۴ درصد از نفت باقی‌مانده در مغزه، برای غلظت ppm ۲۵۰۰ برابر با ۴۱ درصد از نفت باقی‌مانده در مغزه و نهایتاً برای غلظت ppm ۳۵۰۰ برابر با ۵۰ درصد از نفت باقی‌مانده در مغزه است. همان‌طور که غلظت پلیمر در محلول تزریقی افزایش می‌یابد، گرانروی محلول تزریقی نیز افزایش یافته و در نتیجه، نسبت تحرک سیال جابه‌جاکننده و سیال جابه‌جاشونده بهبود یافته و بازیافت نفت افزایش می‌یابد.

#### ۴- سیلاب‌زنی سورفکتانت

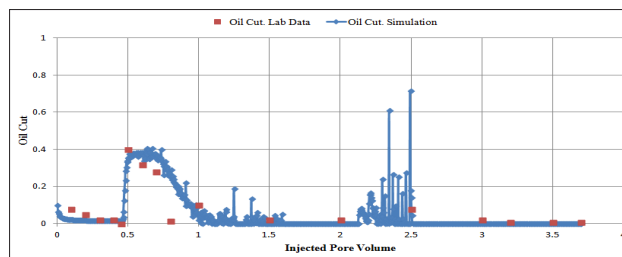
در این قسمت به بررسی عملکرد سیلاب‌زنی سورفکتانت و عواملی که بر بازده این فرآیند تأثیر گذارند، پرداخته می‌شود. به این دلیل که از این پس تطابق تاریخچه‌ی نتایج آزمایشگاهی سیلاب‌زنی شیمیایی مغزه و مدل شبیه‌ساز انجام نمی‌پذیرد، یک مدل مبنا معرفی شده و فرایند مورد بررسی برای آن مدل انجام می‌شود. سپس، نتایج بررسی تأثیر سایر پارامترها با نتایج مدل مبنا مورد مقایسه قرار می‌گیرد. باید عنوان کرد که در این مطالعه، مکانیزم سیلاب‌زنی‌هایی که از سورفکتانت و آلکالین در آن‌ها استفاده می‌شود، تنها، کاهش کشش



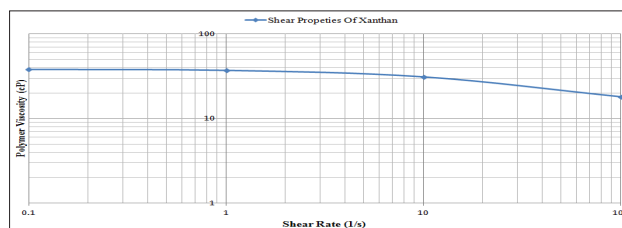
شکل ۷ | نتایج ضریب بازیافت نفت برای سیلاب‌زنی پلیمر با پلیمر Flopamm 3330s و Xanthan



شکل ۸ | تأثیر غلظت پلیمر در سیلاب‌زنی پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۹ | تطبیق تاریخچه نتایج تغییرات برش نفت در سیلاب‌زنی پلیمر برای مدل شبیه‌ساز و مدل آزمایشگاهی



شکل ۱۰ | تغییرات گرانروی پلیمر Xanthan بر حسب تغییرات نرخ برش، [۹]

می باشد، اما بعد از این زمان، بازیافت نفت به شدت افزایش یافته و در نهایت، برابر با مقدار ۶۲ درصد نفت باقی مانده در مغزه می گردد.

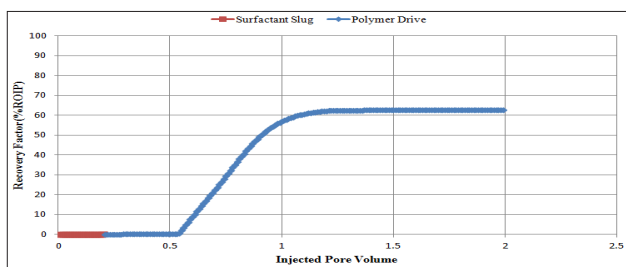
در مغزه تزریق شد، میزان بازیافت نفت برابر با ۶۸ درصد از نفت باقی مانده در مغزه گردید.

#### ۲-۴- بررسی تأثیر غلظت سورفکتانت بر عملکرد سیلاب زنی سورفکتانت

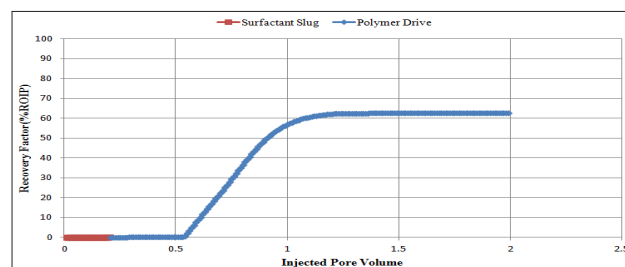
در این قسمت، به منظور بررسی تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت در محلول تزریقی، از سه غلظت متفاوت ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی برای شبیه سازی سیلاب سورفکتانت استفاده می شود. سایر خصوصیات محلول سورفکتانت و همچنین محلول پلیمری (مانند مدل مینا) ثابت است و تنها، غلظت سورفکتانت در مدل شبیه ساز افزایش می یابد. نتایج حاصل از شبیه سازی سیلاب زنی سورفکتانت در شکل ۱۰- نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، با افزایش غلظت سورفکتانت در محلول تزریقی، ضریب بازیافت نفت افزایش می یابد به نحوی که در حالت تزریق محلول سورفکتانت با غلظت ۱ درصد حجمی، ضریب بازیافت نفت برابر با ۵۷ درصد نفت باقی مانده درون مغزه گردید و با افزایش ۰/۵ درصد حجمی غلظت سورفکتانت در محلول تزریقی، میزان بازیافت نفت به مقدار ۵/۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه نسبت به مورد قبل افزایش یافت و در نهایت، زمانی که محلول سورفکتانت با غلظت ۲ درصد حجمی

#### ۳-۴- بررسی تأثیر حجم تزریق سورفکتانت بر عملکرد سیلاب زنی سورفکتانت

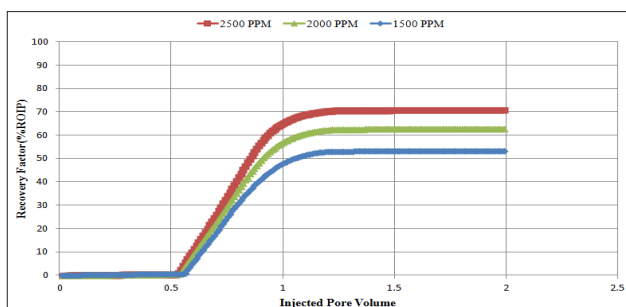
در این قسمت، به منظور مطالعه تأثیر مقدار حجم محلول سورفکتانت تزریقی، مجموعه ای از شبیه سازی ها برای سه حجم متفاوت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ برابر حجم حفرات خالی انجام می شود. در این قسمت نیز مشخصات سیستم تزریق و خصوصیات سنگ و سیال همانند مشخصات مدل میناست، با این تفاوت که حجم محلول سورفکتانت تزریقی افزایش می یابد و متعاقباً به همان مقدار از حجم پلیمر رانشی که پس از محلول سورفکتانت تزریق می شود، کاهش می یابد. نتایج این بررسی در شکل ۱۱- نشان داده شده است. با افزایش حجم محلول سورفکتانت تزریقی، بازیافت نفت افزایش می یابد، به طوری که با افزایش حجم تزریق، از مقدار ۰/۱ برابر حجم حفرات خالی به ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی، ضریب بازیافت نفت به مقدار ۷ درصد از نفت باقی مانده در مغزه افزایش می یابد و در نهایت، در زمان تزریق محلول سورفکتانت به مقدار ۰/۳ برابر حجم حفرات خالی، ۶۵/۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه بازیافت می گردد.



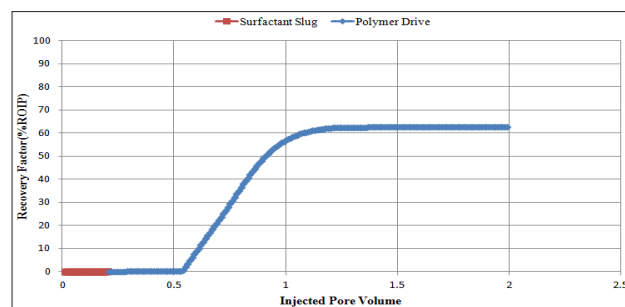
شکل ۱۱ | تأثیر افزایش حجم سورفکتانت تزریقی بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی سورفکتانت



شکل ۹ | تغییرات ضریب بازیافت نفت برای سیلاب زنی سورفکتانت



شکل ۱۲ | تأثیر افزایش غلظت پلیمر در محلول پلیمر رانشی در سیلاب زنی سورفکتانت



شکل ۱۰ | تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی سورفکتانت



همچنین، در شکل ۱۱- مشاهده می شود که می توان یک حجم موثر برای تزریق محلول سورفکتانت در نظر گرفت به نحوی که با افزایش حجم تزریق محلول سورفکتانت از مقدار ۰/۱ برابر حجم حفرات خالی به مقدار ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی، ضریب بازیافت نفت به مقدار ۷/۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه افزایش می یابد. اما با افزایش مجدد حجم محلول سورفکتانت تزریقی از مقدار ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی تزریقی به ۰/۳ برابر حجم خالی حفرات تزریقی، بازیافت نفت تنها ۱/۵ درصد از نفت باقی مانده در مغزه افزایش می یابد و بنابراین، ضریب بازیافت نفت با افزایش حجم سورفکتانت تزریقی از مقدار ۰/۱ برابر حجم حفرات خالی تزریقی تا مقدار ۰/۲ برابر حجم حفرات خالی تزریقی تأثیر بیشتری در بازیافت نفت داشته است. از طرفی، مشاهده می شود که هرچه قدر حجم تزریق محلول سورفکتانت افزایش می یابد، زمان آغاز افزایش بازیافت نفت نیز با تأخیر بیشتری انجام می پذیرد و در مقابل، هرچه این حجم تزریق کاهش یابد، زمان آغاز افزایش بازیافت نفت کوتاه تر می گردد. دلیل این اختلاف در این است که هرچه پلیمر رانشی که دارای گرانروی بالایی است، سریع تر به درون مغزه تزریق شود، زمان آغاز افزایش بازیافت نفت نیز سریع تر اتفاق می افتد، زیرا که با تزریق یک محلول با گرانروی بالا، محلول سورفکتانت تزریق شده و نفت درون مغزه سریع تر و موثرتر با یکدیگر در تماس قرار گرفته و از طرفی، توسط یک محلول با گرانروی بالا با یک نسبت تحرک مناسب، حرکت می کنند.

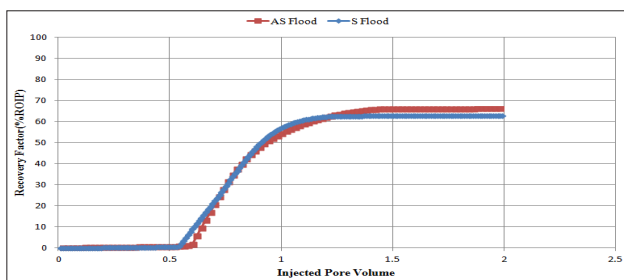
#### ۴-۵- بررسی تأثیر افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت بر عملکرد سیلاب زنی سورفکتانت

در این قسمت، جهت بررسی تأثیر افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت، در مدل ساخته شده در شبیه سازی به محلول سورفکتانت تزریقی ۱/۶ درصد وزنی آلکالین ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) افزوده می شود. به عبارتی دیگر، در این قسمت، نتایج سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت و سیلاب زنی سورفکتانت مورد مقایسه قرار می گیرد. مشخصات آلکالین افزوده شده از نتایج و [۹] اقتباس شده است. نتایج شبیه سازی این مدل و مقایسه آن با مدل مبنا را می توان در شکل های ۱۳ و ۱۴ مشاهده کرد. در شکل ۱۳- تغییرات مقدار جذب سورفکتانت در طی زمان تزریق نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در سیستمی که در آن آلکالین افزوده شده در مدت زمانی که محلول سورفکتانت تزریق شده است، مقدار جذب سورفکتانت کمتر از سیستم بدون آلکالین

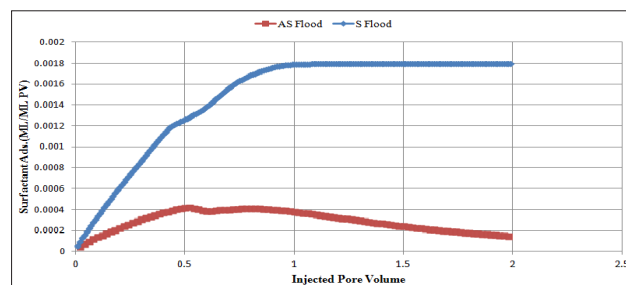
است. نتایج شبیه سازی انجام شده در سه غلظت مختلف پلیمر برای پلیمر رانشی در شکل ۱۲- نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، هرچه غلظت پلیمر در محلول پلیمر رانشی تزریقی پس از تزریق محلول سورفکتانت افزایش یابد، بازیافت نفت نیز زیادتر می شود، به نحوی که تفاوت بین ضریب بازیافت نفت برای مدلی که دارای کمترین غلظت پلیمر رانشی است و مدلی که دارای بیشترین غلظت پلیمر رانشی است، در حدود ۱۸ درصد از نفت باقی مانده در مغزه است و در مقایسه با تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت در محلول سورفکتانت تزریقی در شکل ۱۰-، می توان مشاهده کرد که افزایش غلظت پلیمر و سورفکتانت، هر دو باعث افزایش بازیافت نفت می شود اما افزایش غلظت پلیمر در محلول پلیمری تزریقی را می توان در بازیافت نفت موثرتر دانست که دلیل آن را تا حدی می توان گرانروی بالای نفت موجود در مغزه عنوان کرد که وجود یک سیال گرانرو برای بازیافت آن ضروری است.

#### ۴-۶- بررسی تأثیر غلظت محلول پلیمر رانشی بر عملکرد سیلاب زنی سورفکتانت

در این بخش، به منظور بررسی میزان تأثیر افزایش غلظت پلیمر در پلیمر رانشی که پس از محلول سورفکتانت تزریق می گردد، سه مجموعه شبیه سازی سیلاب زنی سورفکتانت انجام می شود. در این قسمت، از سه غلظت ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ppm برای پلیمر رانشی



شکل ۱۴ | تأثیر افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت بر مقدار ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی سورفکتانت



شکل ۱۳ | تأثیر افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت بر مقدار جذب سورفکتانت در سیلاب زنی سورفکتانت

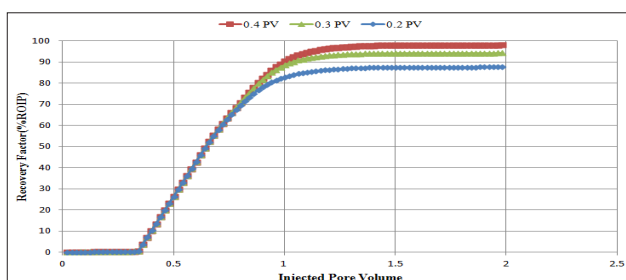
داده شده است. این شکل بیانگر تغییرات ضریب بازیافت نفت بر حسب مدت زمان تزریق است. بازیافت نفت در این فرآیند برابر با ۹۴ درصد از نفت باقی مانده‌ی درون مغزه است که نشان‌دهنده پتانسیل بسیار بالای سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر در بازیافت نفت باقی مانده درون مغزه است (شکل-۱۴).

### ۵-۲- تأثیر حجم تزریق محلول ASP در عملکرد سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر

برای بررسی تأثیر مقدار حجم محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر بر بازیافت نفت در مغزه، سه مدل مجزا در شبیه‌ساز ساخته شد. سه مقدار ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ برابر حجم حفرات خالی برای تزریق محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر توسط این سه مدل شبیه‌سازی می‌شود. مقادیر غلظت آلکالین، سورفکتانت و پلیمر در این سه مدل، یکسان انتخاب شده و همانند مدل پایه می‌باشد. تنها تفاوت این سه مدل، در مقدار حجم محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر تزریقی است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این سه مدل در شکل-۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش حجم تزریق محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر، مقدار ضریب بازیافت نفت نیز افزایش می‌یابد، به نحوی که اختلاف ضریب بازیافت نفت در مدلی که کمترین حجم محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر تزریق می‌شود با مدلی که بیشترین حجم این محلول تزریق می‌شود، برابر با ۱۰ درصد از نفت باقی مانده در مغزه است.

### ۵-۳- تأثیر غلظت سورفکتانت در محلول ASP بر عملکرد سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر

جهت بررسی تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت در محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر بر افزایش ضریب بازیافت نفت باقی مانده، سه مدل مجزا در شبیه‌ساز تعریف گردید و سه غلظت متفاوت ۰/۵، ۱



شکل ۱۶ | تأثیر حجم تزریق ASP بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر

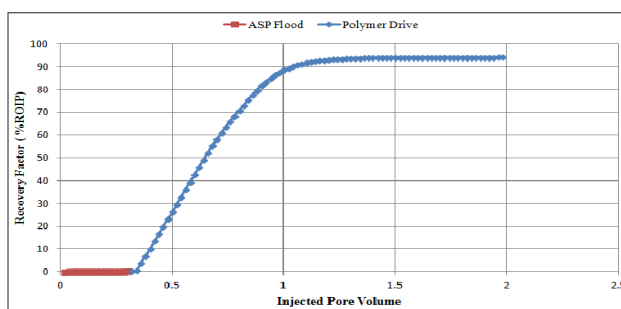
بوده است. همچنین، هرچه از زمان تزریق می‌گذرد، جذب سورفکتانت در سیستم بدون آلکالین ثابت باقی مانده ولی در سیستم حاوی آلکالین، این مقدار جذب کاهش می‌یابد. تأثیر مثبت افزایش آلکالین به محلول سورفکتانت تزریقی باعث افزایش بازیافت نفت باقی مانده در مغزه شده به نحوی که اختلاف ضریب بازیافت این دو سیستم در حدود ۲ درصد از نفت باقی مانده درون مغزه است (شکل-۱۴).

### ۵-۵- سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر

سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر یکی از پیچیده‌ترین روش‌های سیلاب زنی شیمیایی است. این فرآیند عمدتاً در حالت ثلثیه یعنی پس از پایان سیلاب زنی آب انجام می‌شود. در این قسمت، تأثیر سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر در بازیافت نفت باقی مانده در مغزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، به منظور تعیین پارامترهایی که بر عملکرد این فرآیند در بازیافت نفت تأثیر می‌گذارند، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌هایی با خصوصیات متفاوت انجام می‌شود.

### ۵-۱- مدل پایه

به منظور بررسی عملکرد سیلاب زنی آلکالین- سورفکتانت- پلیمر در بازیافت نفت باقی مانده در مغزه، با استفاده از مدل ساخته شده در شبیه‌ساز، سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر انجام گردید. در ابتدا ۰/۳ برابر حجم حفرات خالی محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر تزریق می‌شود و سپس ۱/۷ برابر حجم حفرات خالی، محلول پلیمر رانشی تزریق می‌گردد. در محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر، غلظت  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  برابر با ۱/۶ درصد وزنی، غلظت پلیمر برابر با ۲۵۰۰ ppm و غلظت سورفکتانت نیز برابر با ۱/۵ درصد حجمی است. همچنین، غلظت پلیمر در محلول پلیمر رانشی که پس از محلول آلکالین- سورفکتانت- پلیمر تزریق می‌شود، برابر با ۲۵۰۰ ppm است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مدل در شکل-۱۵ نشان



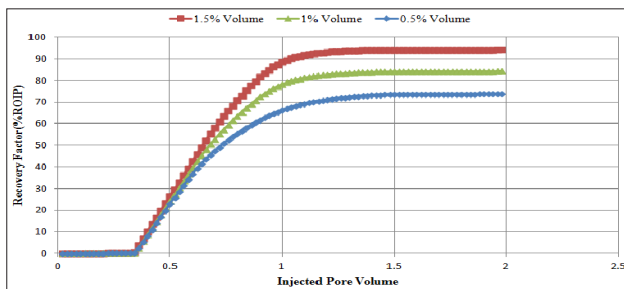
شکل ۱۵ | ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر





آلکالین-سورفکتانت-پلیمر شبیه‌سازی شد. از مقایسه نتایج مشخص گردید که سیلاب‌زنی ASP در مغزه ماسه‌سنگی استفاده شده که در آن آب نیز تزریق شده بود، از بازدهی بیشتری در برداشت نفت نسبت به سایر روش‌های سیلاب‌زنی برخوردار بود.

۳. با توجه به خصوصیات شبیه‌ساز UTCHEM، تأثیر مثبت افزودن آلکالین به محلول سورفکتانت و در نتیجه، کاهش جذب سورفکتانت در طی مدت‌زمان تزریق، شبیه‌سازی گردید. ■



شکل ۱۷ | تأثیر غلظت پلیمر در محلول پلیمر رانشی بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر

و ۱/۵ درصد حجمی برای مقایسه تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت انتخاب شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سه مدل در شکل-۱۷ نشان داده شده است. با افزایش غلظت سورفکتانت در محلول ASP، ضریب بازیافت نفت افزایش یافته به نحوی که اختلاف ضریب بازیافت نفت برای مدلی که کمترین غلظت سورفکتانت و مدلی که بیشترین غلظت سورفکتانت را در محلول آلکالین-سورفکتانت-پلیمر دارد، برابر با ۲۰ درصد از نفت باقی‌مانده در مغزه است.

### نتیجه‌گیری

۱. با توجه به مدل‌های ساخته شده در شبیه‌ساز، تطابق تاریخچه نتایج سیلاب‌زنی مغزه و مدل شبیه‌ساز انجام گردید. این تطابق تاریخچه با استفاده از تغییر مشخصات نمودارهای تراوایی نسبی، فشار موئینه و نمودار اشباع زدایی موئینگی در شبیه‌ساز سیلاب‌زنی شیمیایی (UTCHEM) اجرا گردید.

۲. سه فرآیند سیلاب‌زنی پلیمر، سیلاب‌زنی سورفکتانت و سیلاب‌زنی

### پانویس‌ها

- Flow Instabilities
- Fractional Flow
- Phase Behavior
- Fingering
- Secondary and Tertiary State
- Sensitivity
- Implicit Pressure Explicit Saturation
- Phase Trapping Models
- Trapping Number
- Co-Solvents
- Pore Volumes

### منابع

- [1] Green, D. W., Willhite, G.P., (1998) "Enhanced Oil Recovery", Textbook Series, SPE, Richardson,
- [2] Sheng, James J., (2011) "Modern Chemical Enhanced Oil Recovery" (Theory and Practice), Elsevier Inc, USA. 3100
- [3] Hadia, N., Chaudhari, L., Aggarwal, A., Mitra, S. K., Vinjamur, M., and Singh, R., (2007) "Experimental And Numerical Investigation Of One-dimensional Waterflood In Porous Reservoir", Experimental Thermal and Fluid Science, 32(2), pp: 355361-
- [4] Huh, C., Pope, G. : (2008) "Residual Oil Saturation from Polymer Floods: Laboratory Measurements and Theoretical Interpretation", SPE 113417 At SPE / DOE Symposium On Improved Oil Recovery, Tulsa, U.S.A,
- [5] Alsofi, A.M., Liu, J.S., Han, M.: (2012) "Numerical Simulation Of Surfactant-Polymer Coreflooding Experiments For Carbonates", SPE 154659 Presented at the SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia, Muscat, Oman,
- [6] KhaliliNezhad, Sh., (2013) "Comparative Simulation Study of Chemical Enhanced Oil Recovery methodologies For one of the Iranian oil reservoir Using UTCHEM Simulator", MS Thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- [7] UTCHEM-9, Volume II: Technical Documentation For UTCHEM 9.0. (2000) "A Three-Dimensional Chemical Flooding Simulator.", The University Of Texas at Austin, Texas,
- [8] Wang, L. (2013) "A Study Of Offshore Viscouse Oil Production By Polymer Flooding", MS Thesis, University Of Texas at Austin
- [9] Wu, Wei-Jr, (1996) "Optimum Design Of Field-Scale Chemical Flooding Using Reservoir Simulation", PhD Dissertation, University Of Texas at Austin, Austin
- [10] Mohammadi, H.: (2008) "Mechanistic Modeling Design, and Optimization Of Alkaline/Surfactant/Polymer Flooding", PhD Dissertation, University Of Texas at Austin