

شبیه‌سازی فرآیند سیلاب‌زنی ASP به منظور افزایش بازیافت نفت در مخازن نفتی

امین احمدی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر ■ برزو عسگری پیربلوطی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان ■ ساناز امامی بیلاقی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

چکیده

پس از مراحل اولیه و ثانویه تولید از مخازن هیدروکربوری، بخش زیادی از هیدروکربور درون حفرات سنگ مخزن تحت تاثیر نیروهای موینگی باقی می‌ماند که تولید آن نیازمند روش‌های ازدیاد برداشت است. یکی از این روش‌ها تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر است که می‌تواند اثر چشمگیری بر افزایش برداشت نفت داشته باشد. در این روش سورفکتانت حاضر در محلول ASP باعث کاهش کشش سطحی نفت و سیال تزریقی می‌شود. همچنین سورفکتانت در جای حاصل از واکنش خنثی شدن اسیدهای آلی در نفت سنگین با آلکالین تزریقی- باعث کاهش مضاعف کشش سطحی و آزادسازی بیشتر نفت می‌شود. پلیمر نیز به منظور افزایش گرانشی سیال و حداقل نمودن پدیده انگشتی و بهبود تحریک‌پذیری استفاده می‌شود.

هدف از این مطالعه مقایسه افزایش تولید و ارزیابی سناریوهای مختلف از جمله تزریق سورفکتانت، تزریق آلکالین-سورفکتانت، آلکالین-سورفکتانت-پلیمر با تخلیه طبیعی است. به این منظور سناریوهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار ECLIPSE 100 شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که استفاده از آلکالین-سورفکتانت-پلیمر باعث افزایش بازیافت نفت، کاهش افت فشار و کاهش تولید آب در مقایسه با سایر سناریوها می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۹/۲۴

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۱۲/۰۸

واژگان کلیدی:

نیروی موینگی، ازدیاد برداشت، آلکالین، سورفکتانت، پلیمر

مقدمه

و دانگ (۲۰۰۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی محدوده‌ای برای ویسکوزیته پلیمر گزارش کردند که تزریق پلیمر در این محدوده اقتصادی بوده و بهره‌وری پلیمر در بالاترین حد است [۱]. استول و همکارانش (۲۰۱۱) امکان توسعه سیستم پلیمر، سورفکتانت، آلکالین که به منظور ازدیاد برداشت در مخازن ماسه سنگی و کربناته میادین نفتی عمان استفاده می‌شد را آزمایش کردند. در این مطالعه گزارش شد که شرایط استفاده از سیستم پلیمر، سورفکتانت، آلکالین در آزمایشگاه با میدانی بسیار متفاوت است. اگرچه این سیستم می‌تواند برای مخازن ماسه سنگی مفید باشد [۲]. کو و همکارانش (۲۰۱۴) در مطالعه آزمایشگاهی سیلاب‌زنی سورفکتانت نشان دادند سیلاب‌زنی مخازن نفت سنگین با سورفکتانت نتایج بهتری از سیلاب‌زنی با آب داشته اما این مخازن در مقایسه با نفت سبک، نیازمند غلظت بالاتر سورفکتانت است [۳]. لطف‌اللهی و همکارانش (۲۰۱۶) مکانیسم تزریق‌پذیری پلیمر را شبیه‌سازی و گزارش کردند که فشار مخزن حین تزریق پلیمر بدلیل رئولوژی پلیمر افزایش و کاهش تراوایی با زمان پایدار می‌شود [۴]. بارنس و همکارانش (۲۰۰۸) در مطالعه استفاده سورفکتانت در سیلاب‌زنی شیمیایی در شرایط مختلف مخزن نشان دادند که توانایی سورفکتانت به نوع سیال مخزن، دما و ترکیب آب بستگی دارد و ساختار سورفکتانت جهت اثر بهینه بر کشش بین سطحی باید متناسب با این شرایط باشد.

تعداد قابل توجهی از مخازن ایران با افت فشار طبیعی و کاهش نرخ تولید روبرو هستند. با ادامه این روند و در صورت عدم اجرای روش‌های ازدیاد برداشت، تولید از این میادین در آینده متوقف خواهد شد. در حالی که بخش قابل توجهی از ذخیره نفت خام در جای اولیه در مخزن باقی مانده است. برای تولید این هیدروکربن بجا مانده، استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت ضروری است. در مجموع سه نیرو بر حرکت سیال در محیط متخلخل و میزان برداشت نفت تاثیر دارند. نیروهای ناشی از گرانشی، گرانش و موینگی و نیروهای موینگی، که از طریق دو عدد بدون بعد موینگی و پیوستگی به ترتیب با نیروهای گرانشی و جاذبه ارتباط دارد. در صورت وجود عدد موینگی کمتر از 10^{-3} و همچنین عدد پیوستگی کمتر از 10^{-1} ، نیروهای موینگی غالب خواهند بود. عدد بدون بعد مهم دیگر در حرکت سیال درون محیط متخلخل، نسبت تحرک‌پذیری است که عدد کوچکتر و یا مساوی با یک، بیانگر جابجایی پایدار و مطلوب است. بنابراین جهت افزایش ضریب بازیافت از مخازن، باید اعداد بدون بعد موینگی و پیوستگی را افزایش و نسبت تحرک‌پذیری را کاهش داد.

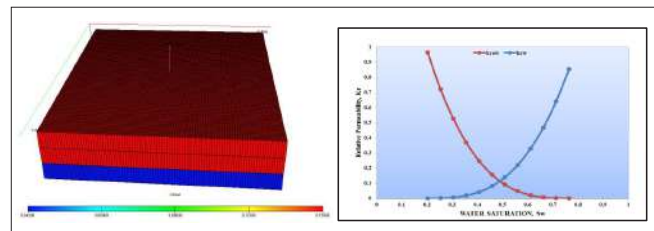
سیلاب‌زنی با آلکالین-سورفکتانت-پلیمر یکی از روش‌های نوین ازدیاد برداشت به منظور کاهش کشش سطحی میان سیالات و افزایش گرانشی است، که نیروهای موینگی را کاهش می‌دهد. ونگ

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Ahmadi.amin68@yahoo.com)

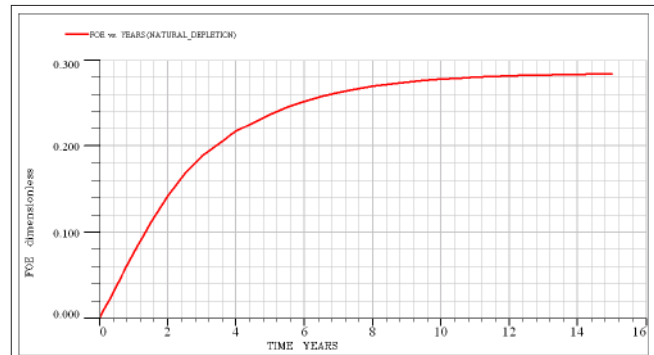
هدف از مطالعه فعلی مقایسه و ارزیابی سناریوهای مختلف تزریقی همانند تزریق آب، تزریق سورفکتانت، تزریق آلکالین-سورفکتانت، آلکالین-سورفکتانت-پلیمر و تخلیه طبیعی به منظور افزایش بازیافت نفت خام توسط نرم افزار Eclipse 100 است.

۱- مشخصات مدل شبیه‌ساز

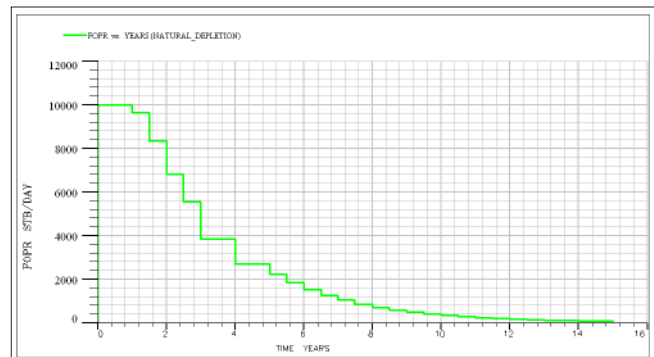
اطلاعات یکی از میداین ماسه‌سنگی جنوب غربی ایران در این مطالعه استفاده شد. این مخزن دارای نفت خام با درجه API ۳۳ و فشار نقطه حباب ۲۴۷۰ پام، فشار اولیه ۴۶۰۰ پام، دمای ۲۲۶°F در عمق مبنای ۱۰۱۲۰ فوت زیر سطح دریا است. در این مطالعه از



شکل ۱ | مدل استاتیک مخزن مصنوعی مورد مطالعه (راست) و نمودار تراوایی نسبی (چپ)



شکل ۲ | نمودار بازیافت نهایی نفت خام در فرآیند تخلیه طبیعی



شکل ۳ | نمودار نرخ تولید روزانه در فرآیند تخلیه طبیعی

اطلاعات بخش شمالی مخزن با ۴ چاه فعال، برای تهیه یک مدل مصنوعی استفاده شد. در ساخت مدل آنالیز حساسیت‌سنجی بر روی اثر اندازه بلوک‌ها انجام و یک مدل کارترین با ابعاد ۳*۱۰۰۲ بلوک با اندازه‌های ۴۰*۲۰۰ فوت مکعب تهیه شد (شکل-۱). تراوایی، تخلخل و نسبت NTG به ترتیب ۵۰ میلی‌داری، ۲۰ درصد و ۹۰ درصد است. ضریب حجمی آب برابر ۱/۰۳ RB/STB، گرانیوی cp ۰/۳ و تراکم‌پذیری $6 \text{ psi}^{-1} - 3/16e$ است.

۲- پیش‌بینی فرآیند تخلیه طبیعی

فرآیند تخلیه طبیعی به مدت ۱۵ سال شبیه‌سازی شد. دبی تولیدی از هر چاه ۲۵۰۰ بشکه در روز و حالت کنترلی تولید در چاه‌ها دبی در نظر گرفته شد. مقدار کمینه فشار ته چاهی ۱۷۵۰ پام لحاظ شد که در این فشار، چاه‌ها بسته شد. در این حالت بازیافت نهایی نفت ۲۸/۴۱ درصد گزارش شد (شکل-۲).

شکل-۳ دبی تولید روزانه نفت خام در فرآیند تخلیه طبیعی را نشان می‌دهد. در این شکل دبی تولید روزانه از ۱۰ هزار بشکه در روز به تدریج کاهش یافته و بعد از ۱۰ سال به کمتر از ۳۰۰ بشکه در روز می‌رسد. افت فشار در سناریوی تخلیه طبیعی حدود ۲۸۵۱ پام است و این افت فشار شدید احتمالاً باعث هدر رفت نفت خام می‌شود.

۳- سناریو تزریق سورفکتانت

در این سناریو مدل استاتیک و شرایط چاه‌های تولیدی همانند تخلیه طبیعی است و تزریق پیوسته سورفکتانت همراه با آب در غلظت‌های مختلف انجام شد. تزریق سورفکتانت با غلظت‌های متفاوت ۱، ۲/۵، ۳/۵ و ۵ درصد وزنی شبیه‌سازی شد که به کاهش کشش سطحی آب و نفت، افزایش گرانیوی آب و کاهش نسبت تحرک‌پذیری منجر شد که در افزایش بازیافت نفت خام موثر بود. در همه سناریوها مجموع دبی تولیدی ۱۰ هزار بشکه در روز و دبی

سناریو	غلظت سورفکتانت (Wt.%)	FOE (%)	FOPT (MMSTB)	FPR (PSIA)
۱	سناریو مبنا (تزریق آب)	۴۸/۹۱	۲۳/۸۴	۲۷۶۴
۲	۱	۴۸/۹۹	۲۳/۸۸	۲۷۷۱
۳	۲/۵	۴۹/۳۹	۲۴/۰۷	۲۸۰۵
۴	۳/۵	۴۹/۸۱	۲۴/۲۸	۲۸۳۹
۵	۵	۵۰/۶۴	۲۴/۶۸	۲۹۰۴

خلاصه نتایج عملکرد مخزن در تزریق سورفکتانت با غلظت‌های مختلف

بازیافت نفت خام و تولید انباشتی افزایش می‌یابد، مخروطی شدن جبهه آب به تاخیر می‌افتد و حجم آب تولیدی کمتر می‌شود. بهترین سناریو در این بخش سناریو ۵ با بیشترین غلظت سورفکتانت است.

۴- سناریو تزریق آلكالین- سورفكتانت

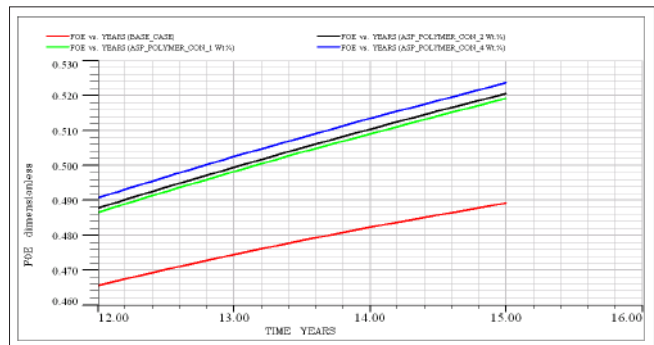
در این سناریو تاثیر افزودن آلكالین به محلول سورفكتانت بررسی شد. آلكالین تزریقی در مخزن با اسیدهای آلی موجود در نفت خام واکنش داده و سبب تولید مواد فعال سطحی درجا شد که منجر به تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوست به آب دوست، کاهش کشش سطحی و افزایش بازیافت نفت خام شد. در این سناریو غلظت سورفكتانت ۵ درصد وزنی و به منظور بررسی تاثیر افزایش آلكالین در محلول تزریقی، آلكالین با غلظت ۳ درصد وزنی بررسی شد. پارامترهای نرخ تولید و تزریق مشابه بخش ۳- بود. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲- ارایه شده است.

نتایج جدول ۲- نشان می‌دهد، تزریق آلكالین به محلول سورفكتانت باعث افزایش ضریب بازیافت نفت خام به میزان ۱ درصد و به تاخیر افتادن مخروطی شدن جبهه آب می‌شود. البته مهم‌ترین مزیت استفاده از آلكالین در کنار سورفكتانت در سیلاب‌زنی، کاهش جذب سورفكتانت به سطح سنگ (با افزایش pH) است. جذب سورفكتانت به سطح سنگ باعث کاهش راندمان آن و افت تزریق پذیری می‌شود.

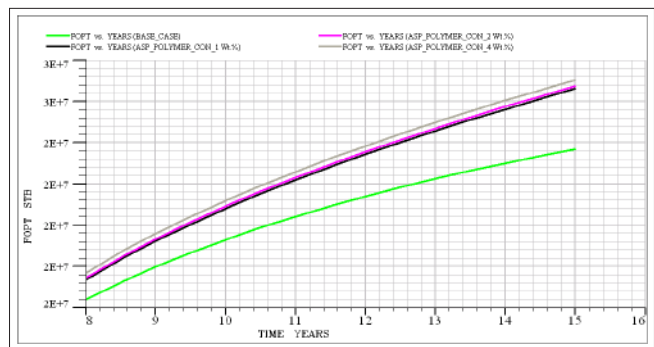
۵- سناریو تزریق آلكالین- سورفكتانت- پلیمر

فرآیند تزریق آلكالین-سورفكتانت-پلیمر یکی از پیچیده‌ترین

تزریق ۴ هزار بشکه در روز بود و سایر خصوصیات سورفكتانت غیر از غلظت ثابت بود. نتایج در جدول ۱- نمایش داده شده است. بر اساس نتایج جدول ۱- با افزایش غلظت سورفكتانت ضریب



شکل ۴ | ضریب بازیافت نفت خام در سناریوهای تزریق آلكالین- سورفكتانت- پلیمر با غلظت‌های مختلف پلیمر



شکل ۵ | تولید تجمعی نفت در سناریوهای تزریق آلكالین-سورفكتانت- پلیمر با غلظت‌های مختلف پلیمر

جدول ۲ | خلاصه نتایج عملکرد مخزن در تزریق آلكالین- سورفكتانت و سورفكتانت

سناریو	غلظت سورفكتانت (Wt.%)	غلظت آلكالین (Wt.%)	FOE (%)	FOPT (MMSTB)	FPR (PSIA)	FOSAT (%)
۱	۵	---	۵۰/۶۴	۲۴/۶۸	۲۹۰۴	۴۶/۱۶
۲	۵	۳	۵۱/۰۷	۲۴/۸۹	۲۹۳۹	۴۵/۶۱

جدول ۳ | خلاصه نتایج عملکرد مخزن در تزریق آلكالین- سورفكتانت- پلیمر

سناریو	غلظت پلیمر (Wt.%)	FOE (%)	FOPT (MMSTB)	FWPT (MMSTB)
۱	سناریو مبنا (تزریق آب)	۴۸/۹۱	۲۳/۸۴	۸۴/۷۴
۲	۱	۵۱/۹۱	۲۵/۳۰	۵۹/۱۶
۳	۲/۵	۵۲/۰۵	۲۵/۳۷	۵۸/۵۹
۴	۴/۵	۵۲/۳۶	۲۵/۵۲	۵۷/۸۵

بهینه پلیمر در فرآیند تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر، پلیمر با غلظت‌های ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی فرض شد. محدودیت‌های تولید و تزریق در این بخش همانند سناریوی قبل بود.

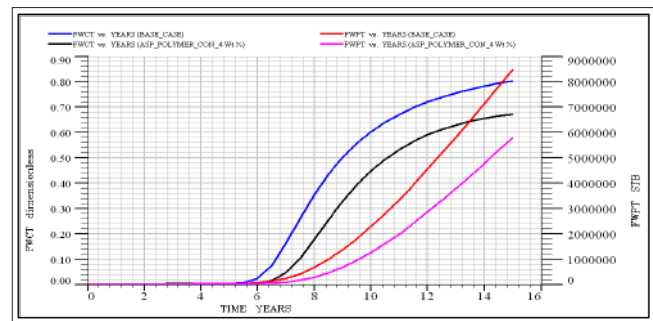
بر اساس شکل‌های ۴، ۵ و ۶ با افزایش غلظت پلیمر در فرآیند تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر، ضریب بازیافت نفت خام و تولید انباشتی بیشتر شده و سناریوی تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر با غلظت پلیمر ۴ درصد وزنی بهترین عملکرد را دارد. این سناریو مخروطی شدن جبهه آب را بیش از پیش به تاخیر انداخته و آب تولیدی را نسبت به فرآیند تزریق آب (مدل پایه) کمتر می‌کند (شکل ۶).

۶- مقایسه سناریوها

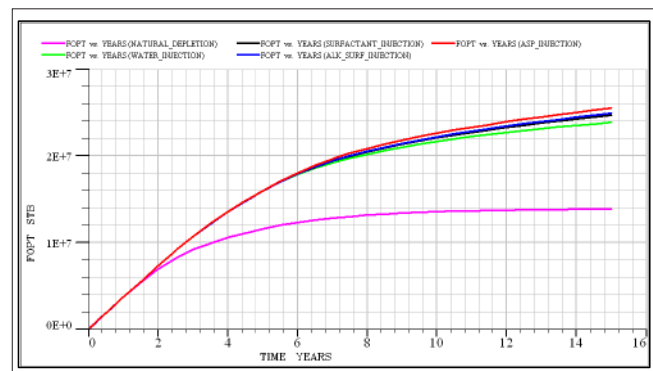
به منظور مقایسه سناریوها، بهترین سناریوهای هر بخش شامل سناریو تزریق آب با دبی تزریق ۴۰۰۰ بشکه در روز، تزریق سورفکتانت (با غلظت ۵ درصد وزنی)، تزریق آلكالین- سورفکتانت (با غلظت آلكالین ۳ و سورفکتانت ۵ درصد وزنی) و آلكالین- سورفکتانت- پلیمر (با غلظت آلكالین ۴، سورفکتانت ۶ و پلیمر ۴ درصد وزنی) انتخاب شد و پارامترهای مهم در این پنج سناریو از جمله ضریب بازیافت نفت خام، تولید انباشتی نفت خام و درصد اشباع نفت خام باقی مانده بررسی شد. جدول ۴- ضریب بازیافت نفت خام در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. سناریوی تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر نسبت به بقیه سناریوها بالاترین ضریب بازیافت نفت را دارد.

در شکل ۷- تولید انباشتی نفت خام در سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. سناریوی تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر نسبت به حالت‌های دیگر دارای بیشترین تولید نفت خام است. در شکل‌های ۸ و ۹ فشار مخزن و درصد اشباع نفت باقی مانده در

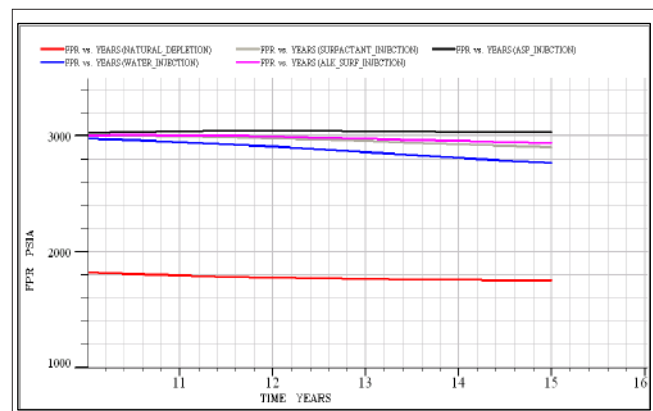
روش‌های سیلاب‌زنی شیمیایی است. این فرآیند بیشتر در حالت بازیافت ثالثیه و پس از پایان سیلاب‌زنی با آب انجام می‌شود. در این سناریو تاثیر سیلاب‌زنی آلكالین- سورفکتانت- پلیمر در بازیافت نفت خام باقیمانده در مخزن بررسی شد (جدول ۳-). همچنین آنالیز حساسیت‌سنجی بر روی پارامترهای تاثیرگذار بر تولید انجام شد (شکل ۴- و ۵). در این فرآیند غلظت آلكالین و سورفکتانت به ترتیب ۴ و ۶ درصد وزنی در نظر گرفته شد و به منظور تعیین غلظت



شکل ۶ | نمودار برش و تولید انباشتی آب در سناریوهای تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر و تزریق آب



شکل ۷ | مقایسه تولید انباشتی نفت خام در سناریوهای مختلف



شکل ۸ | مقایسه فشار مخزن در سناریوهای مختلف

جدول ۴ | مقایسه ضریب بازیافت نفت خام در سناریوهای مختلف

نام سناریو	FOE (%)
تخلیه طبیعی	۲۸/۴۱
تزریق سورفکتانت	۵۰/۶۴
تزریق آلكالین- سورفکتانت	۵۱/۰۷
تزریق آلكالین- سورفکتانت- پلیمر	۵۲/۳۶

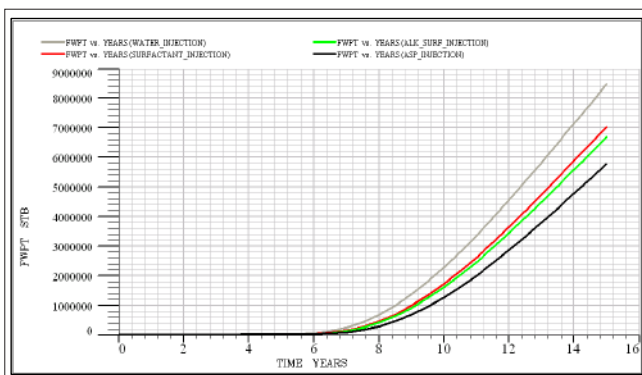
آب به ترتیب در سناریوهای تزریق آب، تزریق سورفکتانت، تزریق آلکالین- سورفکتانت و تزریق آلکالین- سورفکتانت- پلیمر است.

نتیجه‌گیری

۱. در سناریوی تزریق سورفکتانت با افزایش غلظت سورفکتانت، مخروطی شدن جبهه آب به تاخیر می‌افتد.

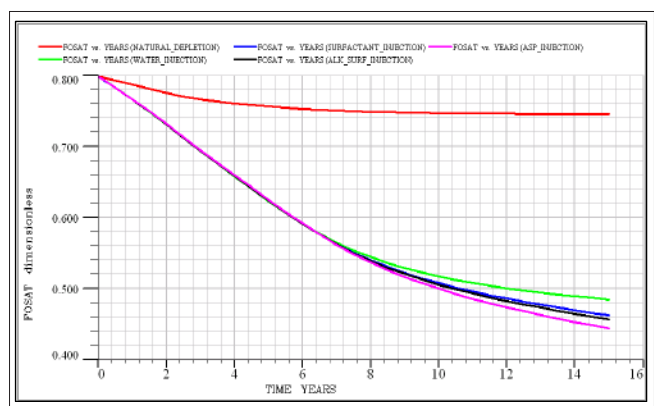
۲. افزایش غلظت پلیمر در سناریوی تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر موجب افزایش ضریب بازیافت نفت خام و کاهش تولید انباشتی آب می‌شود.

۳. نتایج پیش‌بینی عملکرد مخزن نشان می‌دهد که میزان بازیافت ۱۵ ساله در سناریو تخلیه طبیعی، سناریوی تزریق آب برتر، سناریو تزریق سورفکتانت برتر (با غلظت سورفکتانت ۵ درصد وزنی)، سناریو تزریق آلکالین-سورفکتانت (با غلظت آلکالین ۳ و سورفکتانت ۵ درصد وزنی) و سناریو تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر (با غلظت آلکالین ۴، سورفکتانت ۶ و غلظت پلیمر ۴ درصد وزنی) به ترتیب برابر ۲۸/۴۱، ۵۰/۶۴، ۵۱/۰۷ و ۵۲/۳۶ درصد است. افزایش چشمگیر ضریب برداشت از حدود ۳۰ درصد به بالای ۵۰ درصد نشان‌دهنده تاثیر روش ازدیاد برداشت تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر در مدل مورد بررسی است.

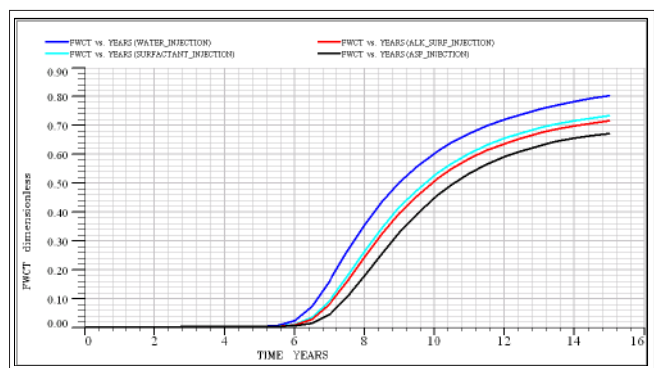


شکل ۱۱ | مقایسه نمودار تولید انباشتی آب در سناریوهای مختلف

پنج سناریو مقایسه شده است که نتیجه شکل-۷ را تایید می‌کند (سناریوی تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر منجر به کمترین افت فشار مخزن و پایین‌ترین اشباع نفت باقیمانده می‌شود). شکل-۱۰ برش آب سناریوهای مختلف را نمایش می‌دهد. در این شکل سناریوی تزریق آلکالین-سورفکتانت-پلیمر (ASP) باعث به تاخیر افتادن پدیده مخروطی شدن جبهه آب به مدت دو سال نسبت به سناریوی تزریق آب می‌شود. شکل-۱۱ برتری سناریو تزریق ASP را در تولید انباشتی آب نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بیشترین تولید



شکل ۱۰ | مقایسه درصد اشباع نفت خام باقی مانده در سناریوهای مختلف



شکل ۱۰ | مقایسه نمودار برش آب در سناریوهای مختلف

منابع

- [1] Wang, J. and Dong, M., 2009. Optimum effective viscosity of polymer solution for improving heavy oil recovery. Journal of Petroleum Science and Engineering, 67(3), pp.155158-.
- [2] Stoll, M., Al-Harthy, S.A.A., Van Wunnik, J. and Faber, M.J., 2011, April. Alkaline-surfactant-polymer Flood-From the Laboratory to the Field. In IOR 201116-th European Symposium on Improved Oil Recovery
- [3] Ko, K.M., Chon, B.H., Jang, S.B. and Jang, H.Y., 2014. Surfactant flooding characteristics of dodecyl alkyl sulfate for enhanced oil recovery. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20(1), pp.228233-.
- [4] Lotfollahi, M., Farajzadeh, R., Delshad, M., Al-Abri, A.K., Wassing, B.M., Al-Mjeni, R., Awan, K. and Bedrikovetsky, P., 2016. Mechanistic Simulation of Polymer Injectivity in Field Tests. SPE Journal.
- [5] Barnes, J.R., Smit, J., Smit, J., Shpakoff, G., Raney, K.H. and Puerto, M., 2008, January. Development of surfactants for chemical flooding at difficult reservoir conditions. In SPE Symposium on Improved Oil Recovery. Society of Petroleum Engineers.