

## شبیه‌سازی روش‌های ازدیاد برداشت شیمیایی و انتخاب روش مناسب برای یکی از مخازن نفتی ایران

پویا حاتمى، مجتبی رحیمی\*، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

### چکیده

یکی از روش‌های مهم در ازدیاد برداشت نفت که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از روش ازدیاد برداشت شیمیایی یا آلكالین-سورفکتانت-پلیمر (ASP) است که با ۲۷ درصد، بیشترین سهم را دارا است. انتخاب روش مناسب جهت افزایش برداشت نفت همواره یکی از دغدغه‌های مهم مهندسين مخازن بوده است که در این میان انتخاب روش شیمیایی مناسب نیز اهمیت پیدا می‌کند. در این مطالعه سعی شده است ضمن آشنایی مختصر با روش‌های شیمیایی ازدیاد برداشت نفت (سورفکتانت-پلیمر-آلكالین)، شبیه‌سازی این فرآیندها برای یکی از مخازن نفتی ایران با استفاده از نرم‌افزار اکلپس ۱۰۰ انجام شود. شش سناریوی تزریق آب، تزریق سورفکتانت، تزریق پلیمر، تزریق آلكالین-سورفکتانت، تزریق آلكالین-پلیمر و تزریق هم‌زمان آلكالین-سورفکتانت-پلیمر در نظر گرفته شده است و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سیلاب‌زنی آب، روش بهینه تزریق شیمیایی جهت ازدیاد برداشت نفت انتخاب شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که مناسب‌ترین روش ازدیاد برداشت شیمیایی برای داده‌های مخزنی این پژوهش، روش تزریق ASP با ازدیاد برداشت حدود ۲۰ درصد است. تزریق سورفکتانت، بعد از سیلاب‌زنی ASP، مناسب‌ترین روش ازدیاد برداشت شیمیایی برای داده‌های مخزنی این پژوهش است. هم‌چنین، استفاده از ترکیب آلكالین-پلیمر بدون سورفکتانت به هیچ وجه توصیه نمی‌شود، زیرا وجود آلكالین در کنار پلیمر نه تنها ضریب بازیافت نهایی را افزایش نمی‌دهد بلکه حتی در این پژوهش، استفاده از آلكالین در کنار پلیمر، نرخ افزایش ضریب بازیافت را کاهش داده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۸/۱۹

### واژگان کلیدی:

ازدیاد برداشت، روش‌های شیمیایی، سیلاب‌زنی آب، شبیه‌سازی، آلكالین-سورفکتانت-پلیمر.

### مقدمه

سورفکتانت-پلیمر<sup>۲</sup> با ۲۷ درصد، بیشترین سهم را در ازدیاد برداشت دارا است [۴]. بنابراین، انتخاب روش مناسب جهت افزایش برداشت نفت همواره یکی از دغدغه‌های مهم مهندسين مخازن بوده است که در این میان انتخاب روش شیمیایی مناسب نیز اهمیت پیدا می‌کند. انتخاب روش مناسب به پارامترهای مختلفی از جمله ویژگی‌های مخزن مورد نظر، امکانات موجود در آن منطقه، شرایط اقتصادی، دسترسی به تجهیزات، تکنولوژی و... بستگی دارد.

در این پژوهش سعی شده است شبیه‌سازی این فرآیندها برای یکی از مخازن نفتی جنوب غرب ایران انجام شود. شش حالت یا سناریوی تزریق آب، تزریق سورفکتانت، تزریق پلیمر، تزریق آلكالین-سورفکتانت، تزریق آلكالین-پلیمر و تزریق آلكالین-سورفکتانت-پلیمر در نظر گرفته شده و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سیلاب‌زنی آب، روش بهینه تزریق شیمیایی جهت «ازدیاد برداشت نفت»<sup>۳</sup> انتخاب شده است.

### ۱- مبانی نظری

سیلاب‌زنی پلیمر، شامل افزودن پلیمر به آب در فرآیند سیلاب‌زنی

نفت به عنوان یک فاکتور کلیدی در ادامه توسعه اقتصاد جهان، مورد توجه قرار دارد. بنابراین افزایش ضریب بازیافت نهایی مخازن نفتی دارای اهمیت بسیار بالایی است. سیلاب‌زنی آب در نسبت تحرک نامطلوب یا در مخازنی که به شدت ناهمگن هستند، نتایج رضایت‌بخشی را نشان نمی‌دهد [۱]. روش‌های تزریق شیمیایی در مقیاس میکروسکوپی با سیلاب‌زنی پلیمر (بهبود نسبت تحرک آب-نفت) و در مقیاس میکروسکوپی با تزریق مایسلار، آلكالین و مواد شبه صابون (کاهش دهنده کشش بین سطحی<sup>۱</sup> در مخزن)، می‌توانند ضریب بازیافت را بهبود بخشند. تزریق مواد قلیایی (آلكالین) پتانسیل بسیار بالایی را برای تولید از مخازن نفتی به ویژه مخازنی که حاوی نفت اسیدی سنگین هستند، دارا است [۲].

سیلاب‌زنی شیمیایی تا دهه ۲۰۰۰ روشی بود که از روش‌های حرارتی و گازی رواج کمتری داشت؛ اما هم‌اکنون پروژه‌های مرتبط بسیار وسیعی آغاز و بازبینی شده است؛ به طوری که استفاده از روش‌های شیمیایی در مخازن جدید، به ویژه مخازن شکاف‌دار طبیعی نفت‌دوست و مخازن ترشوندگی مخلوط که دارای مقدار قابل توجهی نفت در جای باقیمانده هستند، گسترش پیدا کرده است [۳]. استفاده از روش ازدیاد برداشت شیمیایی یا آلكالین-

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (rahimi2726@gmail.com)

باردار (جاذب) و یون‌های سورفکتانت (جذب‌شونده) صورت می‌گیرد [۷]. اندازه‌گیری میزان جذب سطحی در دمای ثابت (ایزوترم جذب سطحی) انجام می‌گیرد [۱].

روش سیلاب‌زنی آلکالین به واکنش شیمیایی بین مواد شیمیایی با pH بالا نظیر سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید (رایج‌ترین عامل‌های قلیایی) و اسیدهای آلی (اجزای قابل تبدیل به صابون) در نفت خام برای تولید سورفکتانت‌های درجا (صابون‌ها) به نظر می‌تواند کشش بین سطحی را کاهش دهند. افزودن قلیا، pH را افزایش داده و جذب سطحی سورفکتانت را کاهش می‌دهد، به طوری که می‌توان از غلظت‌های پایین سورفکتانت جهت کاهش هزینه استفاده کرد [۲]. سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر به عنوان یکی از تکنیک‌های مناسب EOR شناخته شده است که می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی در تولید نفت‌های سبک و با گراویته متوسط که پس از بازیافت اولیه و ثانویه باقی مانده است، استفاده شود [۸].

#### ۲- پیشینه تحقیق

پیشینه پژوهش، با استناد به برخی از مطالعات اخیر در جدول ۱- نشان داده شده است.

#### ۳- توصیف مدل‌سازی

مدل در نظر گرفته شده در این مطالعه دارای ابعاد ۱۰، ۱۰ و ۳ در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  است. دو چاه، یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی به ترتیب در گریدهای (۱۰، ۳) و (۱۰، ۳) قرار دارند. این مدل مسطح است و از داده‌های یکی از مخازن ایران و خواص سیال آن برای شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل ۱- این مدل را نشان می‌دهد. مقادیر نفوذپذیری نسبی فازها بر حسب درصد اشباع مورد استفاده در

آب است تا تحرک آن کاهش یابد. افزایش گرانیروی همراه با کاهش در نفوذپذیری فاز آبی منجر به نسبت تحرک پایین‌تر می‌شود. این کاهش، بازده جاروب حجمی را افزایش داده و اشباع نفت در منطقه جاروب‌شده را کاهش می‌دهد [۵]. جذب سطحی پلیمر باعث کاهش در نفوذپذیری ظاهری می‌شود. بنابراین در مقایسه با جریان آب، همراه با جریان محلول پلیمری در سنگ، نفوذپذیری سنگ کاهش می‌یابد. فاکتور مقاومت باقی‌مانده معیاری برای تمایل پلیمر به جذب سطحی و در نتیجه انسداد جزئی محیط متخلخل است. پلیمرها سیالات غیرنیوتنی هستند که رفتار رئولوژیکی آن‌ها می‌تواند در قالب «گرانیروی ظاهری» یا  $(\mu_{eff})$  بیان شود. این ویژگی محلول پلیمری مورد استفاده در فرآیندهای EOR با افزایش نرخ برشی کاهش می‌یابد. سیالات دارای چنین مشخصه رئولوژیکی، دارای (نازک‌شدن برشی)<sup>۴</sup> هستند [۶].

اصطلاح «سورفکتانت» به مخلوطی از عامل‌های فعال سطحی گفته می‌شود که روی سطح یا سطح تماس سیال/سیال، جذب شده یا تجمع می‌یابند تا خواص سطح را به طور قابل توجهی دگرگون سازند. به طور ویژه، این مواد، کشش سطحی یا کشش بین سطحی را کاهش می‌دهند. سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیبات آلی هستند که آمفی‌فیلیک بوده و دارای دو گروه عاملی هستند، دم (هیدروفوبیک) یا آبگریز و سر قطبی آب‌دوست یا (هیدروفیلیک). بنابراین هم در آب و هم در حلال‌های آلی حل می‌شوند. سورفکتانت‌ها در چهار گروه طبقه‌بندی می‌شوند که بسته به ماهیت یونی سر ملکول، شامل سورفکتانت‌های آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و (زویتریونی)<sup>۵</sup> یا آمفوتریک (دو خصلتی) هستند [۲]. سطح اغلب جامدات و به خصوص سنگ مخزن، به دلیل کانی‌شناسی متفاوت باردار است. جذب سطحی سورفکتانت‌ها در سطح تماس جامد/مایع با تعامل الکترواستاتیکی بین سطح جامد

#### ۱ | پیشینه پژوهش

نام محقق	موضوع پژوهش	اهم نتایج
کومار و موهانتی (۲۰۱۰) [۹]	روش ASP در بهبود بازیافت نفت ویسکوز	تزریق توده ASP به‌دنبال توده‌های پلیمر، تقریباً ۱۰۰ درصد نفت را بازیافت نمود.
محمدی و همکاران (۲۰۱۲) [۱۰]	شبیه‌سازی سیلاب‌زنی پلیمری در یکی از مخازن نفتی شکافدار ایران، Eclipse100	سیلاب‌زنی پلیمری نسبت به تخلیه طبیعی و سیلاب‌زنی با آب دارای بازیافت نفت بیشتری است
محمدصالحی و همکاران (۲۰۱۷) [۳]	بهبود آزمایشگاهی خواص پلیمر با استفاده از مقداری نانورس، شبیه‌سازی تزریق پلیمر	غلظت بهینه نانورس می‌تواند خواص پلیمر را بهبود بخشد. هم‌چنین سناریو تزریق پلیمر، در مقایسه با تخلیه طبیعی با آب و سیلاب‌زنی آب، بازیافت نفت بیشتری دارد.
لطف‌اللهی و همکاران (۲۰۱۷) [۱۱]	بررسی پتانسیل فنی اعمال روش سیلاب‌زنی سورفکتانت به مخازن با نفوذپذیری پایین	افزایش ضریب بازیافت نفت نسبت به تولید اولیه برای مجموع تولید ۱۵ سال، تا ۴/۸ درصد نفت درجای اولیه بود که بازیافت تولید اولیه را دو برابر نمود.
دریانی و همکارانش (۲۰۱۷) [۱۲]	بررسی کارآیی تزریق مواد قلیایی بر تولید نفت‌های خام و سنتز شده آسفالتینی	در نفت‌های خام و سنتز شده، تزریق مواد قلیایی در شرایطی که آسفالتین رسوب نکرده باشد، تأثیر مناسب، اما پس از رسوب آسفالتین، تأثیر چندانی بر تولید نخواهد داشت.

آلکالین-پلیمر و آلکالین-سورفکتانت-پلیمر در نظر گرفته شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- سیلاب‌زنی آب

نتایج مربوط به ضریب بازیافت (FOE) و نرخ تولید نفت (FOPR) برای تزریق آب در اشکال-۳ و ۴ نشان داده شده است.

مقدار ضریب بازیافت نهایی برای سناریو سیلاب‌زنی آب که سناریوی مبنا نیز هست برابر ۷۸/۵۲ درصد است که مقدار نسبتاً بالایی است. علت بالا بودن ضریب بازیافت نهایی برای سیلاب‌زنی آب، همگن و مسطح بودن مدل و در نتیجه جاروب مناسب مخزن است. سایر حالت‌های شبیه‌سازی با این حالت مبنا مقایسه شده است. در مورد نمودار نرخ تولید نفت، شکل-۴ نشان می‌دهد که یک افت پایا در نرخ تولید در تمام مدت زمان ۶۰۰ روز رخ داده است.

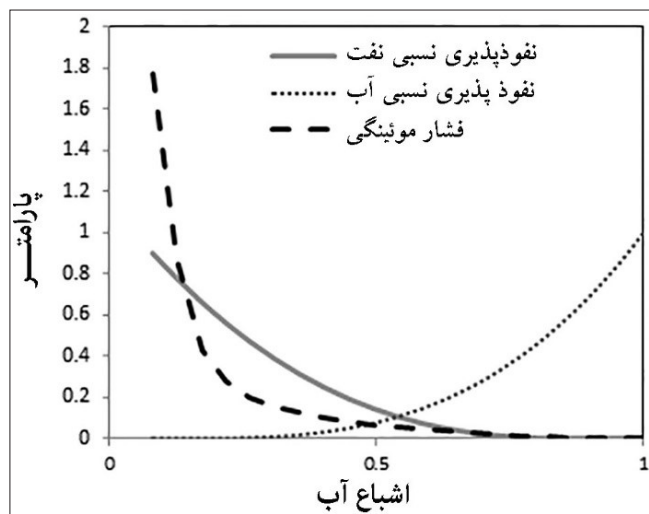
##### ۴-۲- سیلاب‌زنی سورفکتانت

همان‌طور که شکل-۵ نشان می‌دهد ضریب بازیافت نفت در زمان ۶۰۰ روز در سیلاب‌زنی سورفکتانت در مقایسه با حالت مبنای تزریق آب، به اندازه‌ی ۱۸/۸۱ درصد افزایش است و به ۹۷/۳۳ درصد رسیده است. این میزان، بیانگر بازیافت اضافی نفت در اثر کاهش کشش بین سطحی بین آب و نفت و در نتیجه، تولید بیشتر نفت است.

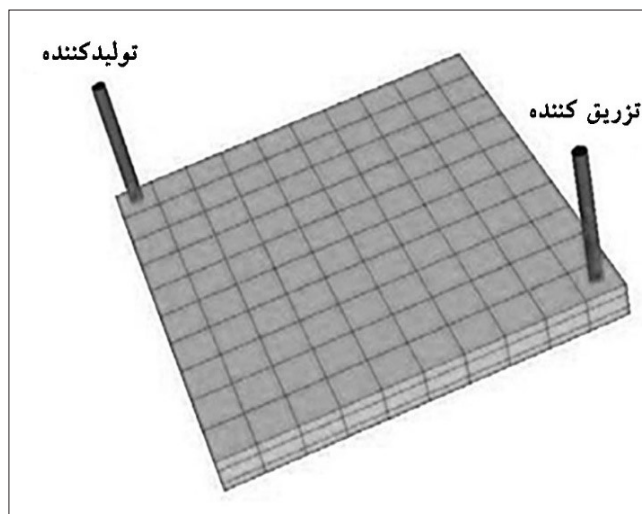
در شکل-۶ اثر سیلاب‌زنی پیوسته‌ی سورفکتانت بر نرخ تولید نفت نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در این نمودار یک افزایش در نرخ تولید نفت، از نقطه‌ی شروع تزریق سورفکتانت تا نرخ تولید حدود ۱۲۰ مترمکعب بر روز، وجود دارد. این درحالی است که

شبیه‌سازی، در شکل-۲ ارائه شده است. خواص سنگ و سیال مورد استفاده برای شبیه‌سازی ازدیاد برداشت به کمک روش‌های شیمیایی در جدول-۲ ارائه شده است. داده‌های نفوذپذیری در جهت‌های مختلف برای سه دسته‌گردد ۱۰۰ تا بی در نظر گرفته شده است. حالت‌های شبیه‌سازی نیز به صورت زیر تعریف شده اند:

- ۱- حالت مبنا: فقط تزریق آب.
  - ۲- سیلاب‌زنی پیوسته سورفکتانت: بعد از سیلاب‌زنی آب به مدت ۱۵۰ روز، سورفکتانت به چاه تزریقی معرفی و به مدت ۴۵۰ روز تزریق می‌شود.
  - ۳- سیلاب‌زنی پیوسته پلیمر: بعد از سیلاب‌زنی آب به مدت ۱۵۰ روز، پلیمر به چاه تزریقی معرفی و به مدت ۴۵۰ روز تزریق می‌شود.
  - ۴- سیلاب‌زنی پیوسته آلکالین-سورفکتانت: بعد از سیلاب‌زنی آب به مدت ۱۵۰ روز، آلکالین-سورفکتانت با نسبت ۵ به ۱ به چاه تزریقی معرفی و به مدت ۴۵۰ روز تزریق می‌شود.
  - ۵- سیلاب‌زنی پیوسته آلکالین-پلیمر: بعد از سیلاب‌زنی آب به مدت ۱۵۰ روز، آلکالین-پلیمر با نسبت ۵ به ۱ به چاه تزریقی معرفی و به مدت ۴۵۰ روز تزریق می‌شود.
  - ۶- سیلاب‌زنی پیوسته آلکالین-سورفکتانت-پلیمر: بعد از سیلاب‌زنی آب به مدت ۱۵۰ روز، آلکالین-سورفکتانت-پلیمر با نسبت ۱۰، ۱، ۱ به چاه تزریقی معرفی و به مدت ۴۵۰ روز تزریق می‌شود.
- در تمام حالت‌های شبیه‌سازی، غلظت ماده شیمیایی تزریقی ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. باید توجه داشت که آلکالین در کلیدواژه‌های نرم‌افزار می‌بایست یا با پلیمر و یا با سورفکتانت تزریق شود. بنابراین سه حالت ممکن شامل تزریق آلکالین-سورفکتانت،



شکل ۲ | نمودار فشار موئینگی و نفوذپذیری نسبی مورد استفاده در شبیه‌سازی



شکل ۱ | مدل شبیه‌سازی برای سیلاب‌زنی شیمیایی

حالت مبنای تزریق آب، یک افت پایا را نشان داد.

#### ۳-۴- سیلاب زنی پلیمر

اثر سیلاب زنی پلیمر بر روی ضریب بازیافت نفت در شکل ۷- نشان داده شده است. در مقایسه با سیلاب زنی آب، تزریق پلیمر موجب افزایش ۲/۹۵ درصدی ضریب بازیافت شده است که در زمان کوتاهی به مقدار ۸۱/۱۵ درصد رسیده است. این افزایش به دلیل کنترل تحرک آب توسط پلیمر است.

اثر سیلاب زنی پلیمر بر نرخ تولید نفت در شکل ۸- نشان داده شده است. با تزریق پلیمر بعد از ۱۵۰ روز، یک حالت پیک در نمودار ایجاد

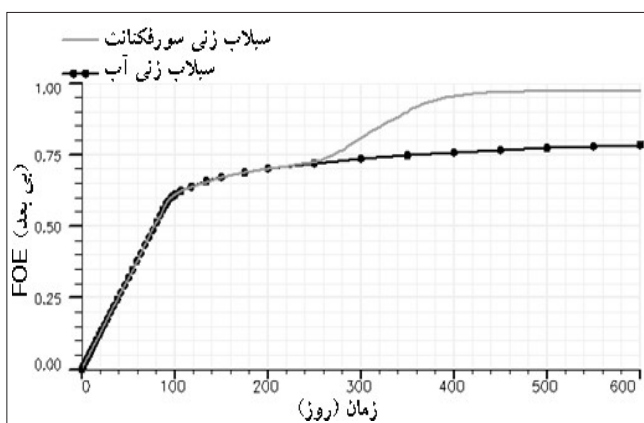
شده است که مقدار نرخ تولید نفت را در روز ۲۰۰م به حدود ۱۹۴ مترمکعب در روز رسانده است؛ اما این افزایش پایدار نبوده و در زمان ۶۰۰ روز، نرخ تولید نفت با یک روند افت حتی به مقداری کمتر از مقدار نرخ تولید در حالت تزریق آب رسیده است. بنابراین تزریق پلیمر اثر مناسب و پایداری بر نرخ تولید نداشته است.

#### ۴-۴- سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت

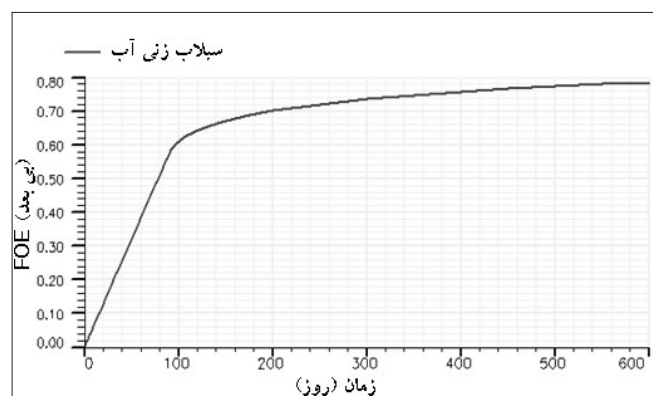
اثر سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت بر ضریب بازیافت نفت در شکل ۹- نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که ضریب بازیافت در هنگام تزریق آلکالین-سورفکتانت شروع به افزایش کرده و تا اتمام زمان

۲ | خواص سنگ و سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی

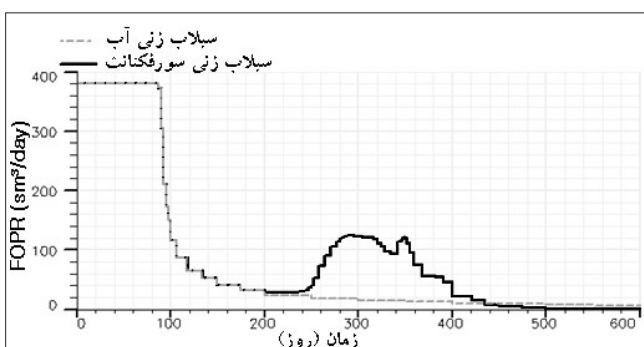
خواص	دانسیتة نفت (kg/m <sup>3</sup> )	دانسیتة آب (kg/m <sup>3</sup> )	دانسیتة گاز (kg/m <sup>3</sup> )	Bw	گرانروی آب (cp)	تراکم‌پذیری (bar/l)	نفوذپذیری x و y (mD)	تخلخل (%)	فشار مخزن (psi)
مقدار	۸۶۰	۱۰۳۳	۰/۸۵۳	۱/۰۳۸	۰/۳۱۸	۴/۶۷E-۵	۷۱۶,۷۱۲,۷۰۶	۱۸	۴۰۱۷



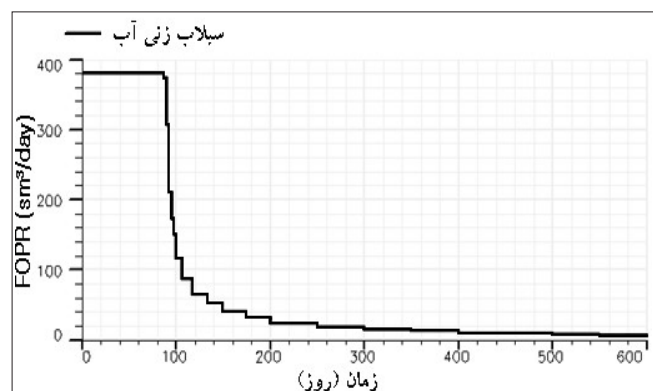
۵ | اثر سیلاب زنی سورفکتانت بر ضریب بازیافت نفت



۳ | نمودار ضریب بازیافت بر حسب زمان برای سیلاب زنی آب



۶ | اثر سیلاب زنی سورفکتانت بر نرخ تولید نفت



۴ | نمودار نرخ تولید نفت بر حسب زمان برای سیلاب زنی آب

بر روز است. این افزایش و تثبیت آن به مدت ۷۵ روز ناشی از تأثیر توأمان سورفکتانت و آلکالین است.

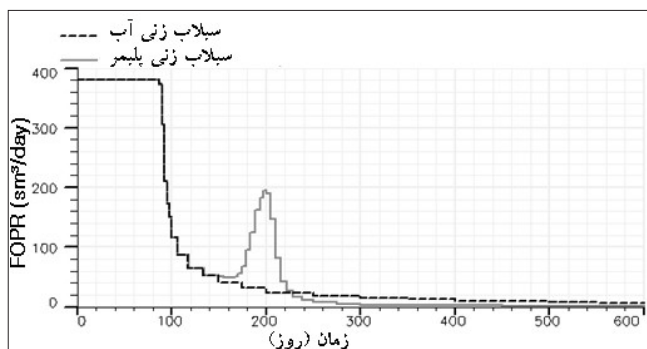
#### ۴-۵- سیلاب زنی آلکالین-پلیمر

اثر سیلاب زنی آلکالین-پلیمر بر ضریب بازیافت نفت برای مدت ۶۰۰ روز، در شکل-۱۱ نشان داده شده است. در مقایسه با سناریوی مبنای تزریق آب، در زمان شروع تزریق آلکالین-پلیمر، ضریب بازیافت شروع به افزایش نموده است و در زمان ۵۰ روز به مقدار ثابتی برابر با ۸۱/۱۷ درصد رسیده که ۲/۹۷ درصد از ضریب بازیافت حاصل از تزریق آب بیشتر است. ضریب تزریق آلکالین-پلیمر تنها ۰/۰۲ درصد از ضریب بازیافت تزریق پلیمر بیشتر بوده است. بنابراین ترکیب این دو ماده، ترکیب مناسبی برای افزایش ضریب بازیافت نبوده است و به نوعی وجود آلکالین در بازیافت نهایی بی اثر بوده است.

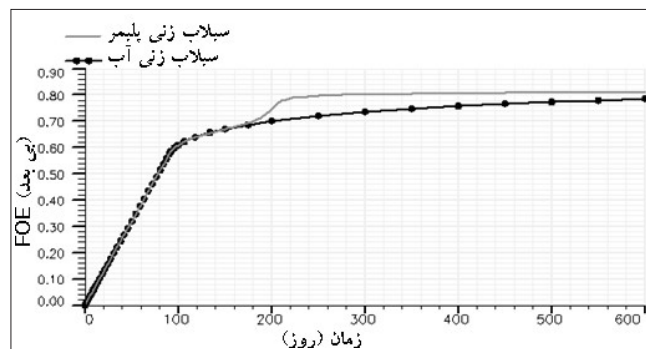
اثر سیلاب زنی آلکالین-پلیمر بر نرخ تولید نفت در شکل-۱۲ نمایش داده شده است. با تزریق آلکالین-پلیمر بعد از ۱۵۰ روز، یک حالت پیک در نمودار ایجاد شده است که مقدار نرخ تولید نفت را در روز ۲۰۰م به حدود ۱۲۸ مترمکعب در روز رسانده است که در مقایسه با تزریق پلیمر مقدار کمتری است، اما بر خلاف تزریق پلیمر سریعاً از حالت پیک خارج

شبه‌سازی هنوز به مقدار ثابتی نرسیده است. بعد از زمان ۶۰۰ روز مقدار ضریب بازیافت به ۸۹/۴۱ درصد رسیده است که نسبت به حالت مبنای تزریق آب، ۱۰/۸۹ درصد افزایش داشته است. استفاده هم‌زمان آلکالین و سورفکتانت نیاز به سورفکتانت برای بازیافت قابل توجه نفت را کاهش می‌دهد. در این فرآیند، برای رسیدن به کشش بین سطحی بسیار پایین بین نفت به تله افتاده و آب تزریقی و سازندی، غلظت کمی از سورفکتانت استفاده می‌شود. این کشش بین سطحی بسیار پایین اجازه می‌دهد که ماده قلیای موجود در سیال تزریقی به طور عمیق در سازند تراوش کند و با قطرات نفت به تله افتاده تماس یابد؛ سپس با مؤلفه‌های اسیدی در نفت خام واکنش داده و سورفکتانت در جای اضافی تشکیل می‌دهد. بنابراین به طور پیوسته کشش بین سطحی کاهش می‌یابد و نفت به تله افتاده آزاد می‌شود.

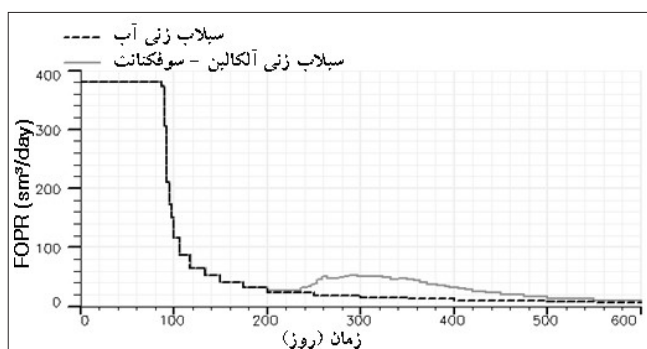
اثر سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت بر نرخ تولید نفت، با نسبت غلظت ۵ به ۱ در شکل-۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش در نرخ تولید نفت پس از تزریق این مواد، به طور نسبتاً تدریجی بوده و تا پایان ۶۰۰ روز با روند کاهش بسیار آهسته‌ای به مقدار نرخ تولیدی برابر با حالت مبنای تزریق آب رسیده است. نرخ تولید بیشینه به مدت ۷۵ روز طول کشیده و در حدود ۵۰ مترمکعب



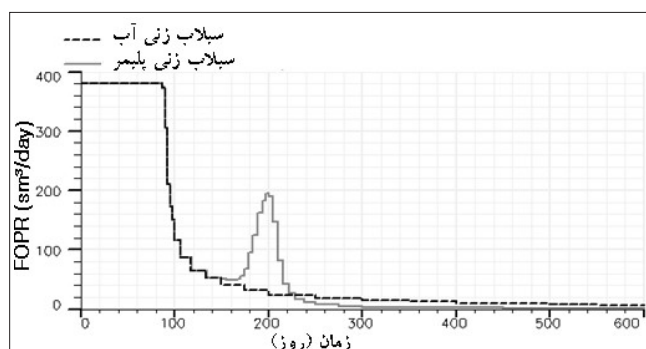
شکل ۹ | اثر سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۷ | اثر سیلاب زنی پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۱۰ | اثر سیلاب زنی آلکالین-سورفکتانت بر نرخ تولید نفت



شکل ۸ | اثر سیلاب زنی پلیمر بر نرخ تولید نفت

دامنه‌ی افزایش نرخ تولید نیز در بازه‌ی زمانی بزرگتری نسبت به سایر حالت‌ها، به جز حالت تزریق سورفکتانت، گسترش یافته است. پیک نمودار به نقطه‌ای با مقدار نرخ تولید ۲۰۷/۴۴ مترمکعب بر روز رسیده است که در مقایسه با تمام سناریوها، بالاترین پیک نرخ تولید است.

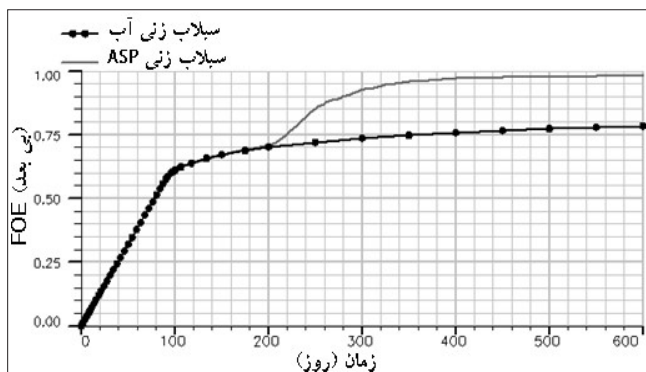
#### ۴-۷- مقایسه ضریب بازیافت تمامی سناریوها

ضریب بازیافت نفت برای تمامی شش حالت سیلاب‌زنی شبیه‌سازی شده در شکل-۱۵ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار می‌توان گفت که بیشترین ضریب بازیافت مربوط به سناریوی تزریق ASP است. ضریب بازیافت نهایی تزریق ASP و تزریق سورفکتانت تقریباً مشابه است، اما نرخ بازیافت توسط تزریق ASP سریع‌تر بوده و زودتر به مقدار بازیافت نهایی می‌رسد. هم‌چنین از سورفکتانت کم‌تری در تزریق ASP استفاده شده است، پس ASP صرفه اقتصادی بیشتری دارد. تزریق آلکالین-سورفکتانت موجب افزایش ضریب بازیافت می‌شود، اما روند افزایش آن تدریجی بوده و نرخ بازیافت آن بسیار آهسته است. تزریق پلیمر و تزریق آلکالین-پلیمر نرخ بازیافت کاملاً مشابه داشته و نسبت به سایر حالت‌ها کمترین ضریب بازیافت را دارند. تأثیر افزودن آلکالین به پلیمر به گونه‌ای است که نرخ بازیافت نفت را نیز کمی به تعویق انداخته است، بنابراین

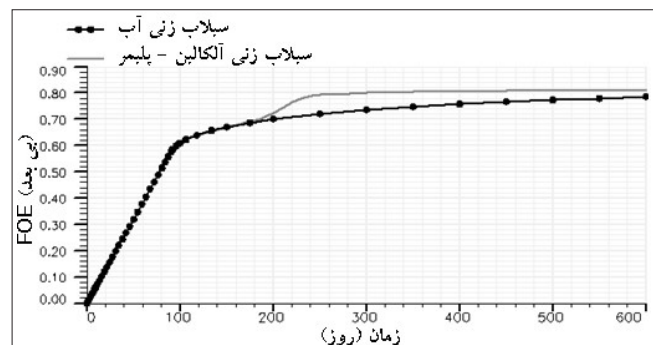
نشده و کاهش سریع نداشته است. همانند تزریق پلیمر، این افزایش پایدار نبوده و با یک روند افت در زمان ۶۰۰ روز حتی به کمتر از مقدار نرخ تولید در حالت تزریق آب رسیده است. بنابراین تزریق آلکالین-پلیمر اثر مناسب و پایداری بر نرخ تولید نداشته است.

#### ۴-۶- سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر

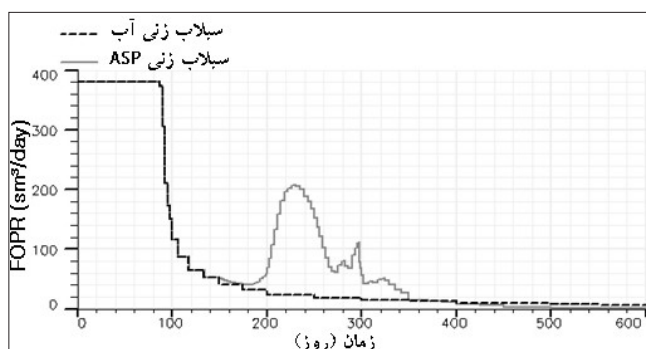
تأثیر سیلاب‌زنی ASP بر ضریب بازیافت نفت برای مدت زمان ۶۰۰ در شکل-۱۳ نشان داده شده است. افزودن توآمان آلکالین، سورفکتانت و پلیمر منجر به افزایش ضریب بازیافت به اندازه‌ی ۱۹/۵۲ درصد شده که بازیافت نهایی ۹۸/۰۴ را نتیجه می‌دهد. این افزایش به دلیل تأثیر سورفکتانت در کاهش کشش بین سطحی، تأثیر پلیمر در کنترل تحرک و تأثیر آلکالین در ایجاد سورفکتانت درجا، کاهش پیوسته‌ی کشش بین سطحی و کاهش نفت به تله افتاده است. علاوه بر این، استفاده از آلکالین به دلیل ارزان بودن با نسبت غلظت ۱۰ به ۱ به نسبت به سورفکتانت و پلیمر، صرفه‌ی اقتصادی را نیز در پی دارد، بنابراین مناسب‌ترین حالت سیلاب‌زنی، تزریق ASP است. اثر سیلاب‌زنی ASP بر نرخ تولید نفت در شکل-۱۴ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که علاوه بر وجود پیک در نمودار،



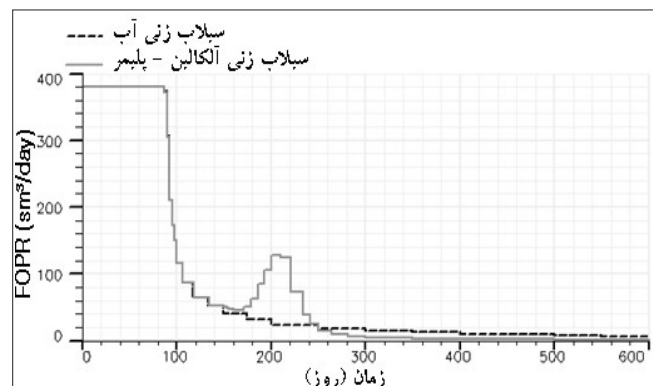
شکل ۱۳ | اثر سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۱۱ | اثر سیلاب‌زنی آلکالین-پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۱۴ | اثر سیلاب‌زنی آلکالین-سورفکتانت-پلیمر بر نرخ تولید نفت



شکل ۱۲ | اثر سیلاب‌زنی آلکالین-پلیمر بر نرخ تولید نفت

ترکیب آلکالین با پلیمر، گزینه‌ی مناسبی نیست.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شد ضمن آشنایی مختصر با روش‌های شیمیایی ازدیاد برداشت نفت (سورفکتانت-پلیمر-آلکالین)، شبیه‌سازی این فرآیندها برای یکی از مخازن نفتی ایران انجام شود. پنج سناریوی تزریق سورفکتانت، تزریق پلیمر، تزریق آلکالین-سورفکتانت، تزریق آلکالین-پلیمر و تزریق ASP در نظر گرفته شد و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سیلاب‌زنی آب (سناریوی ششم)، روش بهینه تزریق شیمیایی جهت ازدیاد برداشت نفت انتخاب شد. اهم نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- مناسب‌ترین روش ازدیاد برداشت شیمیایی برای داده‌های

مخزنی این پژوهش، روش تزریق ASP با ازدیاد برداشت حدود ۲۰ درصد است.

۲- ضریب بازیافت نهایی تزریق ASP و تزریق سورفکتانت تقریباً مشابه است، اما نرخ بازیافت توسط تزریق ASP سریع‌تر بوده و زودتر به مقدار بازیافت نهایی می‌رسد. هم‌چنین از سورفکتانت کم‌تری در تزریق ASP استفاده شده است، پس ASP صرفه اقتصادی بیشتری دارد.

۳- تزریق سورفکتانت، بعد از سیلاب‌زنی ASP، مناسب‌ترین روش ازدیاد برداشت شیمیایی برای داده‌های مخزنی این پژوهش است.

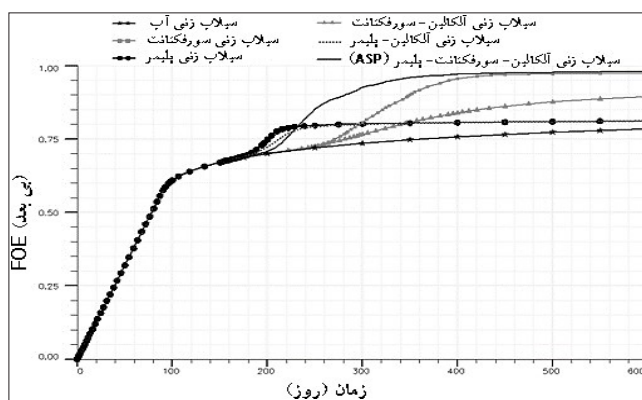
۴- بالاترین پیک نرخ تولید مربوط به سناریوی سیلاب‌زنی ASP است.

۵- طولانی‌ترین بازه‌ی افزایش نرخ تولید مربوط به سیلاب‌زنی سورفکتانت است.

۶- تزریق آلکالین از افت نرخ تولید جلوگیری می‌کند.

۷- استفاده از ترکیب آلکالین-پلیمر بدون سورفکتانت به هیچ وجه توصیه نمی‌شود، زیرا وجود آلکالین در کنار پلیمر نه تنها ضریب بازیافت نهایی را افزایش نمی‌دهد بلکه حتی در این پژوهش پی برده شد که استفاده از آلکالین در کنار پلیمر، نرخ افزایش ضریب بازیافت را کاهش می‌دهد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تأثیر غلظت آلکالین، سورفکتانت و پلیمر و نسبت آن‌ها در تزریق ASP بررسی شود و بهینه‌سازی فرآیند تزریق شیمیایی بر اساس قیمت مواد شیمیایی نیز انجام شود. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مدل‌های مخازن کربناته نظیر مدل تخلخل دوگانه در نظر گرفته شود. ■



۱۵ | مقایسه اثر شش سناریوی مورد نظر این پژوهش بر ضریب بازیافت نفت

### پانویس‌ها

1. (IFT) Interfacial Tension
2. Alkaline-Surfactant-Polymer
3. Enhanced Oil Recovery
4. shear thinning
5. Zwitterionic
6. Field Oil Efficiency
7. Field Oil Production Rate

### منابع

- [1]. Skjæveland S. M. and Kleppe J., SPOR Monograph, Recent advances in improved oil recovery methods for north sea sandstone reservoirs, Norwegian Petroleum Directorate, Norway, 1992.
- [2]. Sheng J., Modern chemical enhance oil recovery: theory and practice, Gulf Professional publishing, London, Oxford, 2011.
- [3]. Salehi M. M., Hekmatzadeh A., Sajjadian V. A., and Masoumi M., Simulation of polymer flooding in one of the Iranian oil fields, Egyptian journal of petroleum, 2017, Vol. 26, pp. 325-330.
- [4]. Llano V., Henthorne L., and Walsh J., Water Management for EOR Applications-Sourcing, Treating, Reuse and Recycle, In Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2013.
- [5]. Lake L. W., Enhanced oil recovery, 1989.
- [6]. Green D. W. and Willhite G. P., Enhanced oil recovery, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 1998.
- [7]. Emegwalu C. C., Enhanced Oil Recovery For Norne Field's E-Segment Using Surfactant Flooding, Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2010.
- [8]. Majidaie S., Isa M. T., and Demiral B. M., Review of ASP Flooding, 2010.
- [9]. Kumar R. and Mohanty K. K., ASP flooding of viscous oils, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2010.
- [۱۰]. محمدی ق.، آقاجانی م.، و خراط ر.، «مطالعه و شبیه‌سازی فرآیند سیلاب زنی پلیمری در یکی از مخازن نفتی شکاف دار ایران»، نشریه نفت، گاز و انرژی، ۱۳۹۱، شماره ۱۴.
- [11]. Lotfollahi M., Beygi M. R., Abouie A., Sepehrnoori K., Wheeler M. F., and DiCarlo D. A., Optimization of Surfactant Flooding in Tight Oil Reservoirs, In Unconventional Resources Technology Conference, Austin, Texas, 2017.
- [۱۲]. دریانی داربونی ح.، بهشتی س. ا.، ریاضی م.، و ملایری م. ر.، «مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تزریق ماده قلیایی بر روی بازدهی تولید از نفت‌های آسفالتینی»، پژوهش نفت، ۱۳۹۶، دوره ۲۷، شماره ۹۳.