



## مطالعه شبیه سازی سیلاب زنی پلیمری در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از شبیه ساز UTCHEM

محمد همتی پژوهشگاه صنعت نفت

محمد حسین خشنودی دانشگاه صنعتی شریف

سید شروان خلیلی نژاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

سیلاب زنی پلیمری در مخازن نفتی به عنوان یکی از روش های ازدیاد برداشت نفت شناخته می شود. در این روش، با افزودن پلیمر به آب تزریقی، نسبت تحرک بهبود می یابد و باعث افزایش زمان میان شکن ۱ آب تزریقی شده، در نتیجه، راندمان جاروبی نفت را بهبود می بخشد. این روش، عمدتاً برای مخازن ناهمگن و مخازن دارای نفت با گرانیوی بالا، مورد استفاده قرار می گیرد. روش های افزایش برداشت نفت از جمله سیلاب زنی شیمیایی، ابتدا نیازمند بررسی آزمایشگاهی حرکت سیال در محیط متخلخل، محاسبه پارامترهای موثر و تعیین بازده فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی هستند؛ سپس می توان نتایج حاصل از این مطالعات را در مقیاس میدانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از طرفی، هزینه بالا و مدت زمان زیاد آزمایش اجرای فرآیندهای سیلاب زنی برای مدل های آزمایشگاهی، اهمیت استفاده از ابزار و نرم افزارهای مختلف شبیه سازی این نوع از مطالعات را نیز روشن می سازد. در این مقاله، به مطالعه شبیه سازی سیلاب زنی پلیمری در مقیاس آزمایشگاهی (مقیاس مغزه و مقیاس میکرو مدل) پرداخته می شود. به منظور بررسی دقیق فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی، یک شبیه سازی چند جزئی سیلاب زنی شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این شبیه ساز، پارامترهایی که مهمترین تأثیر را در بازده سیلاب زنی پلیمری در مقیاس مغزه و میکرو مدل دارند، مورد بررسی قرار می گیرند. نتایج حاصل از شبیه سازی و بررسی پارامترهای موثر در دو سیستم ذکر شده، نشان داد که پارامترهایی از جمله: غلظت پلیمر، نوع پلیمر، تزریق پلیمر قبل یا بعد از سیلاب زنی آب، شوری محلول پلیمری و میزان اشباع آب همراه، مهمترین تأثیر را بر روی بازده این فرآیند و نحوه حرکت سیال در محیط متخلخل می گذارند.

سیلاب زنی مغزه و سیلاب زنی میکرو مدل، شبیه سازی سیلاب زنی پلیمری، UTCHEM

واژگان کلیدی

مقدمه

سیلاب زنی آب به طور گسترده در صنعت نفت مورد استفاده قرار می گیرد و به عنوان یک روش کم هزینه در ازدیاد برداشت نفت شناخته می شود. کریگ و همکاران [۱]، دلایل عمومیت سیلاب زنی آب را به صورت زیر خلاصه نمودند:

۱) در دسترس بودن آب

۲) تزریق آسان آب به مخزن

۳) توانایی آب در توزیع درون ضخامت تولیدی مخزن

۴) بازده آب در جابجایی نفت در ضخامت تولیدی مخزن

اما، مهمترین نقص این روش، بازده کم جاروبی آن است. سیلاب زنی پلیمری می تواند درصد بازیافت نفت را افزایش دهد، به طوریکه اضافه نمودن پلیمر باعث افزایش گرانیوی آب تزریقی و بهبود نسبت تحرک شده، نهایتاً باعث افزایش بازیافت نفت می گردد. بنابر گفته نیدهام و همکاران [۲]، محلول های پلیمری به سه دلیل باعث افزایش بازیافت نفت می شوند:

۱) بوسیله تأثیر محلول های پلیمری بر جریان جزئی

۲) با کاهش نسبت تحرک آب به نفت  
۳) با تغییر جهت سیال تزریقی به سمت لایه های جاروب نشده  
روش های افزایش برداشت نفت از جمله سیلاب زنی شیمیایی، نیازمند بررسی آزمایشگاهی حرکت سیال در محیط متخلخل، محاسبه پارامترهای موثر و تعیین بازده فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی هستند تا بتوان پس از این مرحله، نتایج را در مقیاس میدانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از طرفی، هزینه بالا و مدت زمان زیاد آزمایش و اجرای فرآیندهای سیلاب زنی در آزمایشگاه، لزوم استفاده از ابزاری مناسب برای شبیه سازی این نوع از مطالعات را مشخص می سازد. ارزیابی کاربرد سیلاب زنی پلیمری برای یک میدان وابسته به عواملی چون: گرانیوی نفت، اشباع نفت متحرک، توانایی پلیمر برای توزیع در مخزن، تطابق پلیمر با سیال و سنگ مخزن در شرایط درجا، ناهمگنی مخزن، فاصله چاهها و دبی جریانی، هزینه پلیمر و تهیه و کنترل کیفیت محلول پلیمر تزریقی است. بنابراین، ارزیابی و طراحی یک سیلاب زنی پلیمری نیازمند ترکیبی از مشخصه سازی مخزن، مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی فرایندی است. [۳].

\* نویسنده عهده دار مکاتبات (sh.khalilnezhad.srbiau@gmail.com)

وجود اینکه سیلاب‌زنی پلیمری در زمان ثالثیه، اشباع نفت باقی مانده پس از سیلاب‌زنی آب را در یک مغزه آب‌تر<sup>۴</sup> 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 باقی مانده پس از سیلاب‌زنی آب در یک مغزه مشابه کاهش دهد و این مقدار کاهش اشباع باقی مانده نفت در حالت ثانویه، نتیجه ترکیبی از تأثیر مثبت بهبود جاروبی و کاهش در اشباع نفت باقی مانده است. به عبارت دیگر، تزریق محلول پلیمری در زمان ثانویه، دارای بازایافت نفت به مراتب بیشتری نسبت به تزریق محلول پلیمری در زمان ثالثیه است.

ال قریب و همکاران<sup>[۶]</sup>، آزمایش‌هایی را برای بررسی اثر پارامترهای مختلف در سیلاب‌زنی پلیمری در سیستمی با شوری بالا، اجرا کردند. آنها اثر پارامترهای مقدار شوری آب شست‌وشوی اولیه<sup>۵</sup>، گرانیروی آب شست‌وشوی اولیه و حجم آن را بر روی بازایافت نفت در طی سیلاب‌زنی پلیمری مورد بررسی قرار دادند. آنها شرایط مخزن را با استفاده از مغزه ماسه‌سنگی و ایجاد شرایط شوری بالا در آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه ایجاد کردند. نتیجه آزمایش آنها نشان داد که تا یک مقدار مشخص، هر چه مقدار شوری شست‌وشوی اولیه کاهش یابد، ضریب بازایافت حاصل از سیلاب‌زنی پلیمری افزایش می‌یابد. از نظر مقدار حجم آب

هادیا و همکاران<sup>[۴]</sup>، مطالعات آزمایشگاهی و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها را برای سیلاب‌زنی آب در مغزه‌های با طول بلند و کوتاه برای بازایافت نفت سنگین انجام دادند. به منظور بررسی تأثیر دبی تزریق در هر یک از این مغزه‌ها، سه دبی تزریق مختلف انتخاب شد. بعد 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 بازایافت نفت می‌شود و پس از آن دبی بهینه، با افزایش دبی تزریق، بازایافت نفت کاهش می‌یابد. بنابراین، در این سیلاب‌زنی یک دبی بهینه برای تزریق آب وجود دارد. دلیل این امر نیز وجود پدیده انگشتی شدن در جبهه حرکت سیال است که باعث می‌شود در دبی‌های تزریقی بالا، جبهه حرکت سیال ناپایدار شود و شدیداً وابسته به سرعت و دبی تزریق سیال گردد. همین آزمایش‌ها برای مغزه‌ای با طول بلند نیز انجام گردید اما مشخص شد که برای دبی‌های مختلف تزریقی، تا یک حجم مشخص از تزریق آب، با افزایش دبی تزریق، بازایافت نفت کاهش و از یک حجم مشخص به بعد با افزایش دبی تزریق، بازایافت نفت افزایش می‌یابد؛ دلیل این پدیده، پایداری بیشتر جبهه سیال در مغزه با طول بلند نسبت به مغزه با طول کوتاه عنوان گردید.

ه‌ا و همکاران<sup>[۵]</sup> مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی‌های پلیمری را در حالت‌های ثانویه<sup>۲</sup> و ثالثیه<sup>۳</sup> انجام دادند و نشان داده شد که با

مشخصات سیستم میکرومدل به کار رفته در شبیه‌سازی<sup>[۱۲]</sup>

مشخصات سیستم میکرومدل	
60.01 mm	طول
59.44 mm	عرض
0.080 mm	عمق
29.56 %	تخلخل
1.68 D	تراوایی
1 %	اشباع آب اولیه
2 PV	حجم تزریق در سیلاب‌زنی آب و سیلاب زنی پلیمر
0.0006 cm <sup>3</sup> /min	دبی تزریق آب و پلیمر
49 * 10 <sup>-7</sup>	(عدد موئینگی معادل دبی تزریقی آب)
2.46 * 10 <sup>-4</sup>	(عدد موئینگی معادل دبی تزریقی پلیمر)
2500 ppm	غلظت پلیمر
1.2 PV	حجم تزریق در سیلاب‌زنی پلیمری
2000 ppm	غلظت پلیمر

مشخصات سیستم مغزه مورد استفاده در شبیه‌سازی<sup>[۱۱]</sup>

مشخصات سیستم مغزه	
ماسه‌سنگ	نوع مغزه
29.85 cm	طول
5.05 cm	قطر
18.6 %	تخلخل
365 mD	تراوایی
32 %	اشباع آب اولیه
سیلاب‌زنی آب	
0.2 ml/min	دبی تزریق آب
6.18 * 10 <sup>-6</sup>	عدد موئینگی معادل دبی تزریقی
2.2 PV	حجم تزریق در سیلاب‌زنی آب
سیلاب‌زنی پلیمر	
0.06 ml/min	دبی تزریق پلیمر
5.8 * 10 <sup>-5</sup>	عدد موئینگی معادل دبی تزریقی
1.2 PV	حجم تزریق در سیلاب‌زنی پلیمری
2000 ppm	غلظت پلیمر



مهرانفر و همکاران [۷] به منظور بررسی تأثیر وجود شیل بر بازده سیلاب زنی پلیمری در مخازن نفت سنگین، مجموعه‌ای از سیلاب زنی‌های پلیمری را با استفاده از میکرومدل انجام دادند. آنها در این مطالعه، عملکرد سه نوع پلیمر پلی آکریلامید، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و زانتان را مورد بررسی قرار دادند. به منظور مقایسه نتایج سه نوع پلیمر ذکر شده، سیلاب زنی‌های پلیمری مختلفی برای هر نوع پلیمر در چهار غلظت متفاوت انجام گردید. نتایج نشان داد که سه ناحیه مجزا برای عملکرد پلیمرهای مختلف

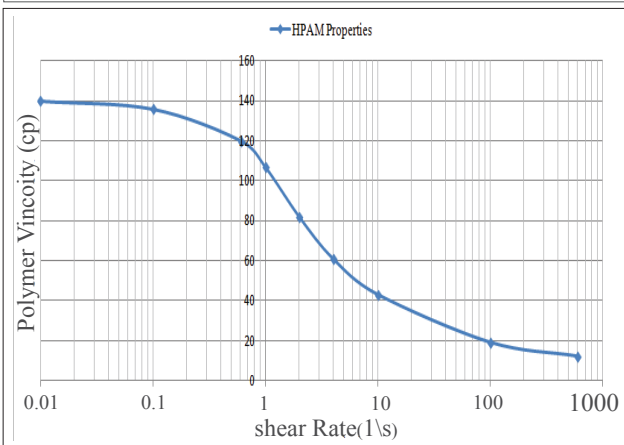
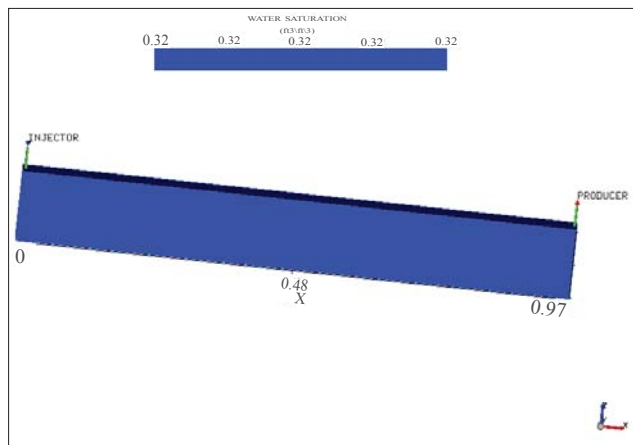
شست و شوی اولیه نیز، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هرچه حجم آب شست و شوی اولیه کاهش یابد، ضریب بازیافت حاصل از سیلاب زنی پلیمری افزایش می‌یابد. البته عنوان کردند که این تأثیر، ناشی از مقدار کم گرانیروی آب تزریقی بوده است و با افزایش حجم آب تزریقی، مقدار پدیده انگشتی نیز افزایش یافته است.

جدول ۴ | مشخصات پلیمرهای به کار رفته در شبیه‌سازی [۱۳ و ۱۴]

پلیمرهای مورد استفاده در شبیه‌سازی	
منبع مورد استفاده	نوع پلیمر
Mohammadi (2008)	HPAM (3630s)
Wu (1996)	Xanthan

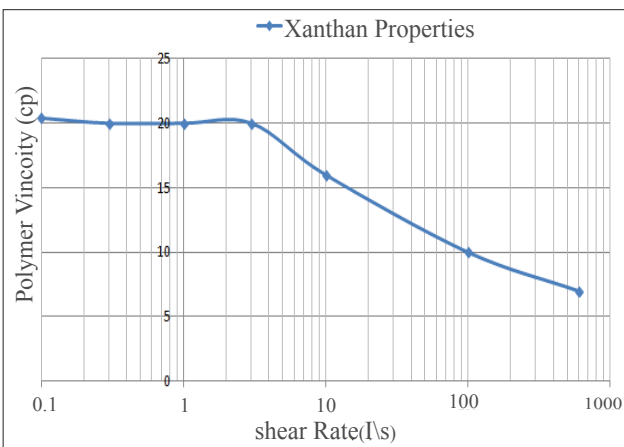
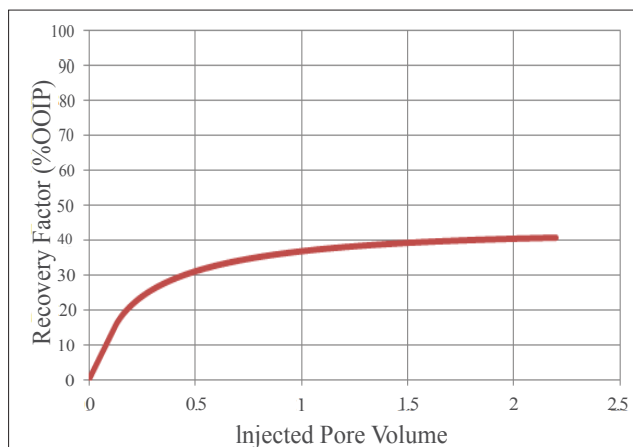
جدول ۳ | مشخصات سیال به کار رفته در شبیه‌سازی [۱۱]

مقدار	کمیت
52 cP	گرانروی نفت
0.4065 psi/ft	جرم حجمی نفت
0.9 cP	گرانروی آب
51756 ppm	شوری آب سازندی
Cl : 0.45 meq/ml Ca : 0.0254 meq/ml Na : 0.397 meq/ml	اجزای موجود در پلیمر تزریقی



شکل ۴ | توزیع یکنواخت اشباع آب در مغزه قبل از تزریق آب

شکل ۱ | گرانروی محلول پلیمری بر حسب نرخ برش برای پلیمر، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی [۱۳]



شکل ۴ | تغییرات ضریب بازیافت نفت بر حسب مقدار سیال تزریقی

شکل ۲ | گرانروی محلول پلیمری بر حسب نرخ برش برای پلیمر، زانتان [۱۴]

جریان نشان داد که افزایش بیشتر اشباع آب همراه، این تأثیر منفی را افزایش می‌دهد.

ال صوفی و همکاران [۹]، با استفاده از انجام مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی‌های شیمیایی سورفکتانت-پلیمر در مقیاس مغزه و اعتبارسنجی و تطبیق نتایج آن با مدل ساخته شده‌ی سیلاب‌زنی مغزه در شبیه‌ساز<sup>۷</sup> UTCHEM، پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی در مقیاس میدانی<sup>۷</sup> را مورد محاسبه قرار دادند. آنها در ابتدا داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی رفتار سیال را با استفاده از مدل‌های موجود در شبیه‌ساز مذکور و داده‌های آزمایشگاه محاسبه و سپس با استفاده از انجام سیلاب‌زنی مغزه، داده‌های به دست آمده در مرحله قبل را با نتایج سیلاب‌زنی مغزه اعتبارسنجی کردند. آنها همچنین با استفاده از این شبیه‌ساز، به طور عددی، شبیه‌سازی فرمولاسیون شیمیایی محلول تزریقی را انجام دادند.

#### ۱- توصیف شبیه‌ساز

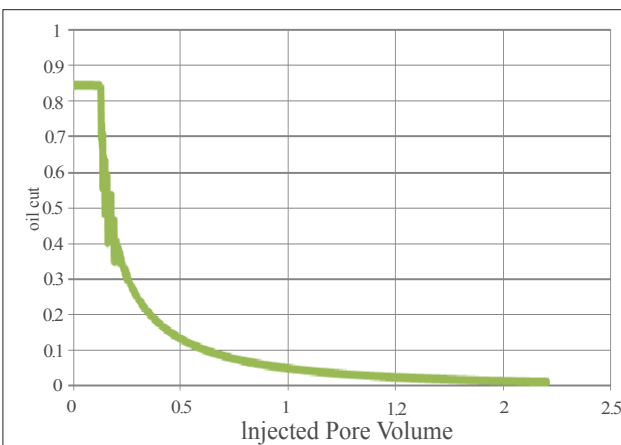
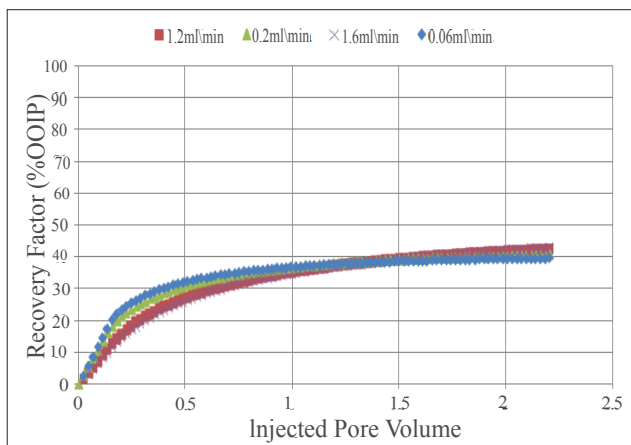
شبیه‌سازی چند جزئی شیمیایی دانشگاه تگزاس در آستین برای سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی پلیمری در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبیه‌ساز، یک شبیه‌ساز سه‌بعدی و چند جزئی سیلاب‌زنی شیمیایی<sup>۸</sup> است. برنامه راه‌حل این شبیه‌ساز، یک فرمولاسیون<sup>۹</sup> IMPES است. جایی که فشار آب به صورت ضمنی<sup>۱۰</sup> محاسبه می‌شود و غلظت‌های اجزاء به صورت صریح<sup>۱۱</sup> مورد محاسبه قرار می‌گیرند. پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی شامل رفتار فازی میکرومولسیون، مدل‌های کشش سطحی، مدل‌های گرانیوی چند جزئی فازی<sup>۱۲</sup>، مدل‌های به دام افتادگی فازها<sup>۱۳</sup>، مدل‌های تراوایی سه‌فازی که وابسته به عدد به دام افتادگی هستند، مدل‌های جذب شیمیایی و مدل‌های رئولوژیکی پلیمری توسط این شبیه‌ساز مدل‌سازی می‌شوند و چگونگی وابستگی مستقیم و غیرمستقیم

وجود دارد و این نواحی تابعی از غلظت پلیمر و نوع پلیمر هستند به طوری که در ناحیه اول، پلی‌آکریلامید هیدرولیز شده‌ی جزئی، نسبت به پلی‌آکریلامید و زانتان، دارای تأثیر بیشتری در بازیافت نفت هستند. (این ناحیه، از غلظت صفر تا غلظت برابر با 1800 ppm ادامه دارد). در ناحیه دوم از غلظت 1800 تا 3000 ppm است). همچنین، پلی‌آکریلامید هیدرولیز شده‌ی جزئی، نسبت به پلی‌آکریلامید و زانتان، در بازیافت نفت موثرتر است اما در این ناحیه زانتان نسبت به پلی‌آکریلامید دارای تأثیر بیشتری در بازیافت نفت می‌باشد. نهایتاً، در ناحیه سوم (که از غلظت 3000 تا 4800 ppm مشخص شده است)، پلی‌آکریلامید و پلی‌آکریلامید جزئی دارای تأثیر نسبتاً برابری در بازیافت نفت هستند در حالی که در این ناحیه زانتان بیشترین اثر مثبت را در بازیافت نفت دارد.

محمدی و همکاران [۸] مجموعه‌ای از سیلاب‌زنی‌های پلیمری را به منظور بررسی تأثیر مشخصات لایه شیلی و وجود اشباع آب همراه با استفاده از دستگاه میکرومدل و انجام شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌ساز Eclipse مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در سیلاب‌زنی میکرومدل، اشباع آب همراه در سیستم، باعث افزایش بیشتر آشفته‌گی جبهه جریان، ایجاد پدیده انگشتی شدن، و کاهش بازیافت نفت می‌گردد؛ از طرف دیگر، نتایج شبیه‌سازی

۵ | ضریب بازیافت نهایی نفت برای دبی‌های تزریقی مختلف

دبی تزریق	عدد موئینگی معددل دبی تزریق	ضریب بازیافت نهایی نفت
0.06 ml/min	$18.5 \times 10^{-7}$	۳۹.۹۳
0.2 ml/min	$6.18 \times 10^{-6}$	۴۰.۷۹
1.2 ml/min	$3.7 \times 10^{-5}$	۴۲.۷۷
1.6 ml/min	$4.94 \times 10^{-5}$	۴۳.۰۹



۶ | ضریب بازیافت نفت تابعی از دبی تزریقی بر حسب مقدار سیال تزریقی

۵ | تغییرات برش نفت بر حسب مقدار سیال تزریقی

این مدل‌ها به پارامترهایی از جمله شوری (و غلظت یون‌های دو ظرفیتی) و متغیرهای دیگری از جمله غلظت حلال همراه ۱۴ قابل بررسی و شبیه‌سازی است. [۱۰]

## ۲- مشخصات سیستم‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

به منظور انجام شبیه‌سازی در مقیاس مغزه و میکرومدل، در این قسمت، اطلاعات سیستم‌های مورد استفاده عنوان می‌گردد. این اطلاعات، شامل مشخصات مغزه، سیستم میکرومدل مورد استفاده در جداول ۱ و ۲، و خواص سیالات تعریف شده در شبیه‌سازی است (جدول ۳). همانطور که مشخص است دبی تزریقی در سیستم سیلاب‌زنی مغزه برای سیلاب‌زنی پلیمری متفاوت بوده در حالی که دبی تزریقی برای این دو فرآیند در سیستم میکرومدل یکسان می‌باشد. باید عنوان کرد که نمودارهای تراوایی نسبی دو فاز و نمودار فشار موئنیگی که برای سیستم مغزه و سیستم میکرومدل در نظر گرفته شده، مبین یک سیستم آب‌تر در تمام شبیه‌سازی‌هاست. در شبیه‌سازی سیلاب‌زنی پلیمری در مقیاس مغزه و مقیاس میکرومدل، از دو نوع پلیمر به نام‌های پلی‌آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و زانتان استفاده شده است (جدول ۴).

همچنین، تغییرات گرانی روی این دو پلیمر به عنوان تابعی از نرخ برش<sup>۱۵</sup>، به منظور نمایش خواص رئولوژیکی آنها در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. سایر مشخصات رئولوژیکی این دو پلیمر در منابع ذکر شده قابل بررسی است.

## ۳- نتایج و مباحث

### ۳-۱- سیلاب زنی آب در مقیاس مغزه

در ابتدا یک مدل یک بعدی از مغزه مورد آزمایش در شبیه‌سازی به صورت کارترین و با تعداد سلول 100x1x1 ساخته شد. شکل ۳

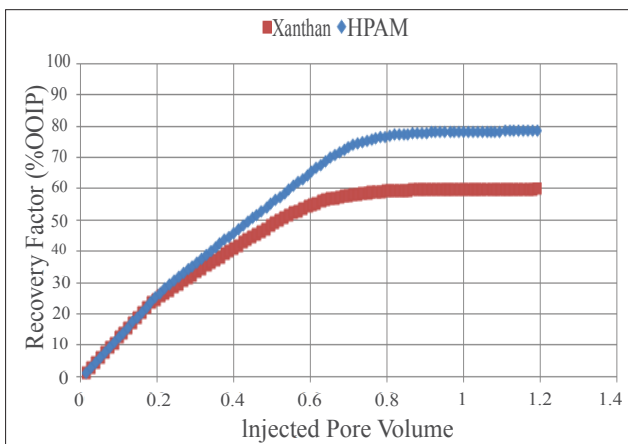
نشان‌دهنده مدل شبیه‌ساز برای انجام سیلاب‌زنی آب و سیلاب‌زنی پلیمری است و توزیع یکنواخت آب قبل از تزریق آب در مغزه را نشان می‌دهد. تمامی سیلاب‌زنی‌ها برای سیستم مغزه در این مدل، شبیه‌سازی گردید. سیلاب‌زنی آب به دو منظور انجام شد:

- ۱) به منظور مقایسه نتایج سیلاب‌زنی پلیمری در دو حالت زمان ثالثیه و زمان ثانویه
  - ۲) به منظور بررسی عملکرد سیلاب‌زنی پلیمری برای بازیافت نفت درون مغزه و مقایسه عملکرد آن با سیلاب‌زنی آب
- بعد از ساخت مدل یک بعدی در شبیه‌ساز، سیلاب‌زنی آب در دبی تزریق ۲/۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام گردید. سیلاب‌زنی آب تا زمانی که برش آب ۱۶ در قسمت تولیدی مغزه به ۹۹ درصد رسید، ادامه یافت که این زمان معادل با تزریق به مقدار ۲/۲ برابر حجم حفرات خالی ۱۷ مغزه است. بازیافت نهایی نفت تا این زمان برابر با ۷/۴ درصد بود. نمودار ضریب بازیافت نفت و برش نفت در سیلاب‌زنی آب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

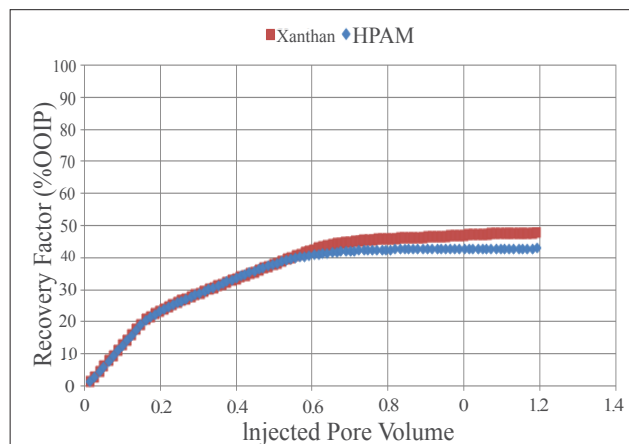
### ۳-۱-۱- تاثیر دبی تزریق بر سیلاب زنی آب در مغزه

به منظور بررسی اثر دبی تزریق آب در این مغزه، سیلاب زنی آب در چهار دبی تزریقی متفاوت ۰.۰۶، ۰.۲، ۱.۲ و 1.6 ml/min انجام گردید. باید عنوان نمود که معمولاً سیلاب زنی در سیستم‌های مغزه و میکرومدل به نحوی انجام می‌پذیرد که دبی تزریق سیال بیانگر سرعت واقعی سیال در محیط متخلخل مخزن باشد. نتایج حاصل از مقایسه تاثیر دبی‌های مختلف بر ضریب بازیافت نفت در این سیستم یک بعدی در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی تزریق تا زمانی که آب مقدار ۱ برابر حجم حفرات خالی تزریق شده است، ضریب بازیافت نفت کاهش یافته است. این اثر را می‌توان به



شکل ۸ | مقایسه تاثیر پلیمر نوع اول و پلیمر نوع دوم در غلظت 3500 PPM



شکل ۷ | مقایسه تاثیر پلیمر نوع اول و پلیمر نوع دوم در غلظت 500 PPM

کم برای هر دو پلیمر و غلظت 3500 ppm بعنوان غلظت زیاد برای هر دو پلیمر، (پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و زانتان) استفاده می شود. باید بیان نمود که بدلیل وجود املاح و شوری محلول تزریقی و همچنین توانایی شبیه ساز UTACHEM در شبیه سازی تاثیر وجود یون های دو ظرفیتی و شوری در عملکرد محلول پلیمری، اثر این املاح و شوری نیز در شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی ها در دو غلظت ذکر شده، به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده می باشد.

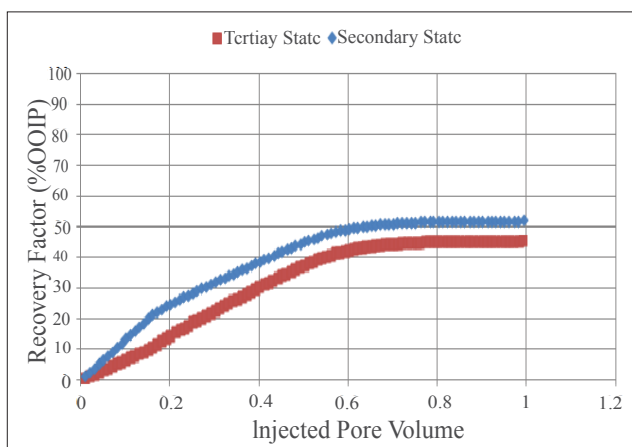
همانطور که در دو شکل ۷ و ۸ مشاهده می شود در هر دو شکل ضریب بازیافت نفت حاصل از پلیمر زانتان بیشتر می باشد. همانطور که قبلاً نیز ذکر گردید، در غلظت های زیاد از پلیمر تزریقی، پلیمر زانتان دارای عملکرد بهتری در بازیافت نفت می باشد به طوریکه با توجه به شکل ۱۸ اختلاف بین ضریب بازیافت نفت برای پلیمر زانتان در حدود ۲۰٪ بیشتر از مقدار ضریب بازیافت نفت برای پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی است. از طرفی با توجه به جدول شماره ۲ و محتوای یون های دو ظرفیتی و شوری هر دو محلول پلیمری، در شکل ۷ مشاهده می شود علی رغم انتظار در غلظت های کم برای پلیمر نیز این پلیمر زانتان است که دارای عملکرد بهتری در بازیافت نفت نسبت به پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی است. زیرا زانتان که یک نوع بیوپلیمر ۱۸ بوده در برابر شوری و وجود یون های دو ظرفیتی مقاومت بهتری از خود نشان می دهد و اثر منفی این یون ها بر عملکرد زانتان نسبت به پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی کمتر است. بنابراین بر خلاف انتظار که باید در غلظت های کم پلیمر، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی دارای عملکرد بهتری در بازیافت نفت داشته باشد، اما با توجه به شوری محلول، پلیمر زانتان در این بازه از غلظت پلیمر نیز عملکرد بهتری در بازیافت نفت نسبت به پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی دارد.

ناپایداری جبهه جریان سیال نسبت داد که هر چه دبی تزریق افزایش می یابد، زمان میان شکن و ضریب بازیافت نفت نیز کاهش می یابد. از طرفی دیگر وقتی مقدار تزریق سیال در این مغزه بیشتر از ۱ برابر حجم حفرات خالی تزریق شده باشد، این رفتار برای ضریب بازیافت نسبت به تغییرات دبی تزریق، معکوس شده و مشاهده می شود که با افزایش دبی تزریق، ضریب بازیافت نفت افزایش می یابد که البته همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود، این مقدار افزایش بسیار ناچیزتر است. بنابر هادی و همکاران [۴]، ضریب بازیافت نفت در مغزه هایی با طول بلند و زمانی حجم آب تزریقی زیاد است، تقریباً مستقل از دبی تزریق بوده و دلیل آن نیز وجود جبهه پایدارتر سیال در مغزه می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تا یک زمان مشخص از تزریق، با کاهش دبی تزریق، ضریب بازیافت نفت افزایش یافته و از آن زمان به بعد با افزایش دبی تزریق، ضریب بازیافت نفت افزایش می یابد که البته افزایش ضریب بازیافت در مرحله دوم ناچیز می باشد.

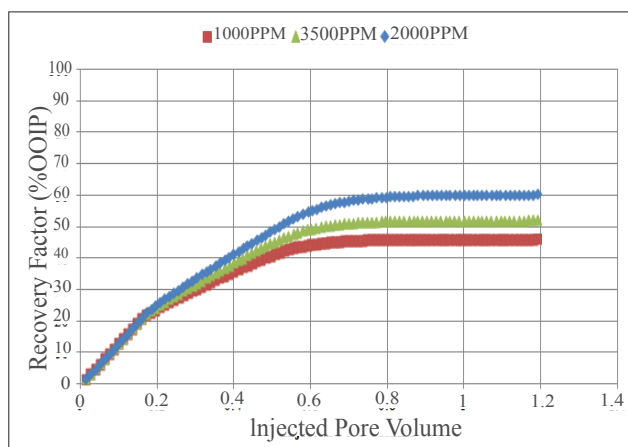
### ۲-۳- سیلاب زنی پلیمری در مقیاس مغزه

#### ۲-۳-۱- اثر نوع پلیمر تزریقی

در ابتدای سیلاب زنی پلیمری در سیستم مغزه، تاثیر نوع پلیمر تزریقی بر بازیافت نفت مورد بررسی قرار می گیرد. در این شبیه سازی از مشخصات پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و پلیمر زانتان که در جدول شماره ۴ و شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده اند، استفاده شده است. بنابر بر مهرانفر و همکاران [۷]، در غلظت های کم در زمان تزریق پلیمر، پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی نسبت به زانتان موثرتر می باشد و در غلظت های زیاد در زمان تزریق پلیمر، این اثر معکوس بوده و زانتان دارای تاثیر بیشتری بر بازیافت نفت می باشد. در این مجموعه از شبیه سازی ها، از دو غلظت 500 ppm بعنوان غلظت



شکل ۱۰ | مقایسه تاثیر زمان تزریق پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



شکل ۹ | مقایسه تاثیر غلظت پلیمر بر ضریب بازیافت نفت



### ۲-۲-۳- اثر غلظت پلیمر تزریقی

به منظور بررسی تاثیر افزایش غلظت یک نوع پلیمر در بازیافت نفت از مغزه، سه غلظت 1000، 2000 و 3500 ppm برای پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی در شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از مقایسه این مورد در شکل ۹ قابل مشاهده می باشد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش غلظت پلیمر تا مقدار تزریق برابر با ۰.۳ برابر حجم حفرات خالی تزریقی<sup>۱۹</sup>، عملکرد پلیمر در غلظت های مختلف یکسان است و از این مقدار به بعد هر چه غلظت محلول تزریقی بیشتر باشد، ضریب بازیافت نفت نیز افزایش می یابد. با توجه به نتایج عنوان شده در قسمت قبل، همین حالت رفتاری نیز برای پلیمر زانتان قابل مشاهده است و تنها با این تفاوت که در غلظت های زیاد پلیمر زانتان، تاثیر این پلیمر در بازیافت نفت بیشتر می باشد.

### ۳-۲-۳- اثر زمان پلیمر تزریقی

با توجه به اینکه یکی از اهداف این مطالعه بررسی تاثیر زمان تزریق پلیمر می باشد (زمان ثانویه یا زمان ثالثیه)، سیلاب زنی آب که در قسمت های قبل نتایج آن مورد بحث قرار گرفت در این قسمت بعنوان حالت اولیه برای تزریق پلیمر در نظر گرفته می شود که این حالت مبین تزریق پلیمر در زمان ثالثیه می باشد. از طرفی دیگر همان مدل با شرایطی که در آن سیلاب زنی صورت نگرفته است، (شکل ۳) برای حالت سیلاب زنی پلیمری در زمان ثانویه انتخاب گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در این دو حالت مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود و بنابر گفته هاه و همکاران [۵]، سیلاب زنی پلیمری در زمان ثانویه دارای عملکرد

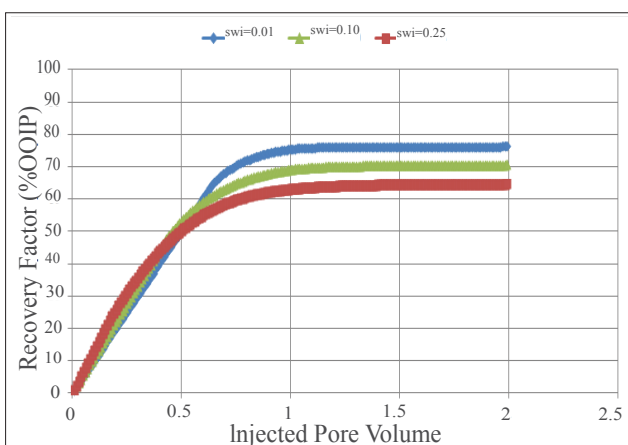
بهتری نسبت به سیلاب زنی پلیمری در زمان ثالثیه می باشد به عبارتی دیگر هر چه تزریق پلیمر زودتر آغاز شود محلول پلیمری با نفت بیشتری در تماس قرار می گیرد (اشباع نفت بیشتر) و آشفته گی<sup>۲۰</sup> جبهه جریان در اثر وجود اشباع کم آب در سیستم کمتر است و در نقطه مقابل هر چه محلول پلیمری دیرتر تزریق شود، اشباع آب، ناشی از تزریق آب در مخزن و همچنین مقدار آب همراه اولیه مخزن باعث ایجاد آشفته گی و ناپایداری در جبهه سیال شده و بازیافت نفت را کاهش می دهد.

### ۳-۳- سیلاب زنی آب و سیلاب زنی پلیمری در مقیاس میکرومدل

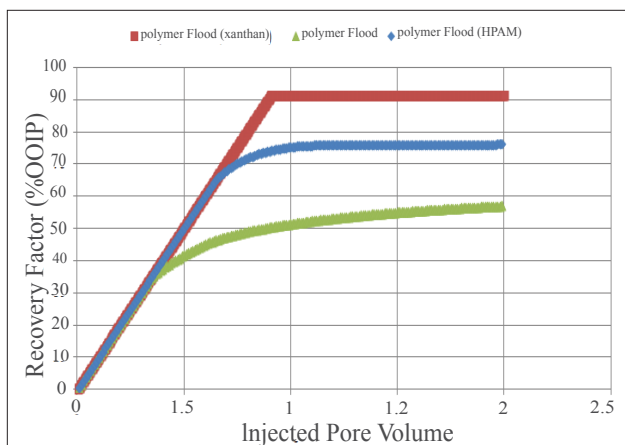
#### ۳-۳-۱- اثر تزریق پلیمر در بازیافت نفت

در این قسمت، به منظور بررسی نتایج بدست آمده از شبیه سازی سیلاب زنی مغزه، در سیستم میکرومدل و بررسی حرکت سیالات جابجا کننده و جابجا شونده در یک سیستم دو بُعدی، مجموعه ای از شبیه سازی ها برای سیستم میکرومدل که مشخصات آن در جدول ۱ عنوان شده است، انجام می گردد. مشخصات پلیمرهای مورد استفاده نیز همانند پلیمرهای مورد استفاده در سیلاب زنی مغزه هستند. مدل ساخته شده در شبیه سازی، شامل 60x60x1 عدد سلول<sup>۲۱</sup> می شود. در این قسمت، شبیه سازی برای سیلاب زنی آب، سیلاب زنی با پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و سیلاب زنی با پلیمر زانتان (در یک غلظت ثابت برای هر دو پلیمر) انجام شده است (شکل ۱۱).

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، تأثیر افزایش پلیمر به آب تزریقی، باعث افزایش بازیافت نفت در این سیستم دو بُعدی شده است. به طوری که اختلاف ضریب بازیافت برای سیلاب زنی آب در مقیاسه با سیلاب زنی پلیمری با پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی در حدود ۲۰ درصد و با ضریب بازیافت نفت حاصل از



شکل ۱۱ | تاثیر مقدار اشباع آب اولیه (همراه بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمری با HPAM



شکل ۱۰ | مقایسه ضریب بازیافت نفت برای سیلاب زنی با آب و پلیمرهای مختلف در غلظت 2500 PPM

از شکل های ۱۲ و ۱۳ می توان دریافت که با افزایش مقدار اشباع آب همراه در سیستم، بازیافت نفت حاصل از سیلاب زنی پلیمری برای هر دو پلیمر کاهش یافته است و در مقادیر زیاد از اشباع آب همراه، با افزایش اشباع آب همراه، تأثیر منفی آن بر ضریب بازیافت حاصل از سیلاب زنی پلیمری با زانتان کاهش می یابد. این بررسی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل می توان مشاهده نمود، تا مقدار اشباع آب همراه برابر با ۱۲ درصد، با افزایش مقدار اشباع آب همراه، ضریب بازیافت نفت با یک نسبت برای هر دو پلیمر کاهش می یابد؛ به عبارتی دیگر، شیب هر دو نمودار تقریباً برابر است، اما با افزایش مقدار اشباع آب همراه از مقدار ۱۲ درصد، تأثیر منفی این افزایش بر عملکرد پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی بیشتر از پلیمر زانتان است، به طوری که در اشباع آب همراه برابر با ۱۲ درصد، ضریب بازیافت نهایی نفت در سیلاب زنی پلیمری با پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و زانتان به ترتیب برابر با ۷۰ و ۸۳ درصد است اما بعد از افزایش اشباع آب همراه تا مقدار ۲۵ درصد، ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمری با پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و زانتان به ترتیب ۶ و ۳ درصد کاهش یافته است.

### نتیجه گیری

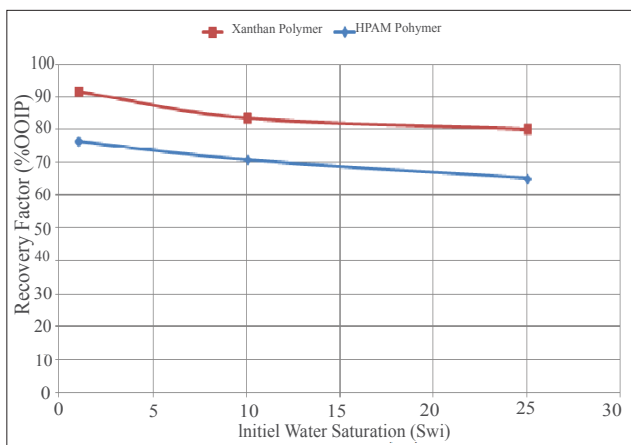
- بسته به غلظت تزریق در سیلاب زنی پلیمری، نوع پلیمر تزریقی در عملکرد سیلاب زنی پلیمری تأثیر زیادی دارد به طوری که در غلظت های کم برای پلیمر تزریقی، معمولاً پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و در غلظت های زیاد برای پلیمر تزریقی، پلیمر زانتان می تواند باعث افزایش موثر بازیافت نفت شود.
- محلول های پلیمری نسبت به شوری حساسیت بالایی دارند. در این

سیلاب زنی پلیمری با زانتان در حدود ۳۲ درصد است. همانطور که در قسمت سیلاب زنی مغزه بیان شد، تأثیر افزودن پلیمر زانتان در این سیستم نسبت به پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی موثر تر بوده به طوری که اختلاف در ضریب بازیافت نفت حاصل از سیلاب زنی پلیمری با زانتان در حدود ۱۲ درصد بیشتر از ضریب بازیافت نفت حاصل از سیلاب زنی پلیمری با استفاده از پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی است.

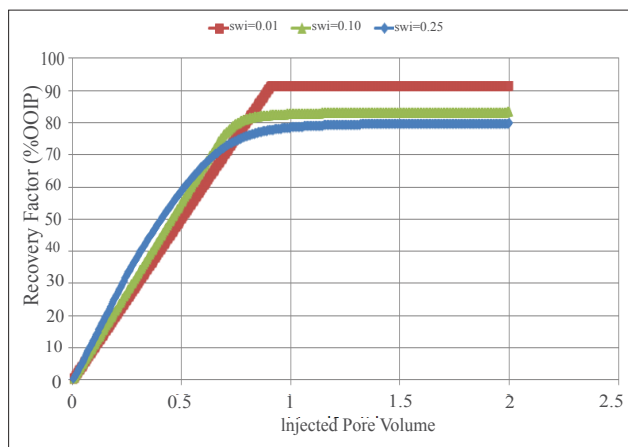
از طرفی دیگر، با دقت در شکل ۱۱ مشاهده می شود که در زمان تزریق آب، زمان میان شکن برابر با ۴۵/۰ برابر حجم حفرات خالی تزریقی، برای پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی ۷۲/۰ برابر حجم حفرات خالی تزریقی و برای پلیمر زانتان ۹۲/۰ برابر حجم حفرات خالی تزریقی است. این مقایسه، بیانگر تأثیر مثبت افزودن زانتان به آب تزریقی بوده که باعث افزایش زمان میان شکن سیال تزریقی شده است.

### ۳-۲- اثر اشباع آب همراه در زمان تزریق پلیمرهای مختلف

به منظور بررسی تأثیر مقدار اشباع آب همراه بر عملکرد سیلاب زنی پلیمری در بازیافت نفت، برای هر دو نوع پلیمر در سه مقدار مختلف از اشباع آب همراه و به مقادیر ۱، ۱۰ و ۲۵ درصد، در مقیاس میکرومدل مجموعه ای از شبیه سازی ها انجام شد. نتایج حاصل از شبیه سازی برای بررسی عملکرد پلیمر پلی آکریلامید هیدرولیز شده جزئی و پلیمر زانتان به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ها مشخص است، افزایش مقدار اشباع آب همراه، باعث کاهش ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمری می شود. همچنین، افزایش مقدار اشباع آب همراه، باعث کاهش زمان میان شکن می گردد.



شکل ۱۴ | مقایسه تاثیر مقدار اشباع اولیه (همراه) بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمری با HPAM و Xanthan



شکل ۱۳ | مقایسه مقدار اشباع آب اولیه (همراه) بر ضریب بازیافت نفت در سیلاب زنی پلیمری با Xanthan





حاصل از سیلاب‌زنی پلیمری نیز افزایش می‌یابد. ■ تأثیر مقدار اشباع آب همراه در سیستم میکرومدل بر عملکرد هر دو پلیمر مورد بررسی قرار گرفت. افزایش اشباع آب همراه باعث کاهش ضریب بازیافت نفت حاصل از سیلاب‌زنی پلیمری برای هر دو پلیمر گردید. اما هرچه اشباع آب همراه افزایش یافت، تأثیر منفی آن بر عملکرد پلی‌آکریلامید هیدرولیز شده جزئی بیشتر از زانتان مشاهده شد. ■

مطالعه نتایج بدست آمده از یک شبیه‌ساز چندجزئی شیمیایی که قادر به مدل‌سازی تأثیر شوری و یون‌های دو ظرفیتی بر رفتار رئولوژی محلول پلیمری است، نشان داد که در صورت وجود نمک حتی در غلظت‌های کم، بیوپلیمرها مانند زانتان به دلیل مقاومت در برابر شوری و یون‌های دو ظرفیتی می‌توانند در سیلاب‌زنی پلیمری مورد استفاده قرار گیرند. ■ با افزایش غلظت پلیمر (هر دو نوع پلیمر)، ضریب بازیافت

## پانویس‌ها

- |                                     |                                       |                          |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 1. Breakthrough time                | Flood Simulator                       | 15 Shear Rate            |
| 2. Secondary State                  | 9. Implicit Pressure Explicit Concen- | 16 Water Cut             |
| 3. Tertiary State                   | tration                               | 17 Pore Volume           |
| 4. Water-wet                        | 10. Implicit                          | 18 Biopolymer            |
| 5. Water Preflush                   | 11. Explicit                          | 19 Injected Pore Volumes |
| 6. The University of Texas Chemical | 12. Compositional Phase Viscosity     | 20 Perturbations         |
| Compositional Simulator             | Models                                | 21. Number Of Grids      |
| 7. Field Scale Simulation           | 13. Phase Trapping Models             |                          |
| 8. 3D Compositional Chemical        | 14. Co-solvents                       |                          |

## منابع

- [1] Craig Jr., F.F. (1980) "The Reservoir Engineering Aspects Of Water Flooding" SPE of AIME, Richardson, Texas, third printing,
- [2] Needham, R. B. and Doe, P. H. (1987) "Polymer Flooding Review" .. SPE 17140, SPE Distinguished Author Series,
- [3] Kaminsky, R.D., Wantenbarger, R.C., Szafranski, R.C.: (2007) "Guidelines For Polymer Flooding Evaluation and Development" IPTC 11200 At the International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E
- [4] 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: 355-361,
- [5] 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,
- [6] Algharib, M., Alajmi, A., Gharbi, R.: (2011) "Investigation of Polymer Flood Performance In High Salinity Oil Reservoir", SPE 149133 Presented at the SPE / DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-khubar, Saudi Arabia,
- [7] Mehranfar, A., Ghazanfari, M.H., Masihi, M., Rashtchian, D., (2011) "Experimental Study of Polymer Injection To Enhance Heavy Oil Recovery From Shaly Reservoir Using Micromodels" 14th National Chemical Engineering Congress, Tehran, Sharif University of Technology
- [8] 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
- [9] 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,
- [10] UTCHEM-9, Volume II: Technical Documentation For UTCHEM 9.0. (2000) "A Three-Dimensional Chemical Flooding Simulator.", The University Of Texas at Austin, Texas,
- [11] Wang, L. (2013) "A Study Of Offshore Viscous Oil Production By Polymer Flooding", MS Thesis, University Of Texas at Austin
- [12] 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 Europec / EAGE Annual Conference and Exhibition, Rome, Italy
- [13] Mohammadi, H.: (2008) "Mechanistic Modeling Design, and Optimization Of Alkaline/Surfactant/Polymer Flooding", PhD Dissertation, University Of Texas at Austin,
- [14] Wu, Wei-Jr, (1996) "Optimum Design Of Field-Scale Chemical Flooding Using Reservoir Simulation", PhD Dissertation, University Of Texas at Austin, Austin