



آزمایش‌های مشاهده‌ای سیلاب‌زنی با پلیمر در مسیر بسته با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای

احمد رمضانی سعادت‌آبادی^۱، دانشگاه صنعتی شریف

هادی جباری^۲، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

جهت بررسی عملکرد پلیمر بر خروج نفت باقیمانده در مسیرهای بسته (بن‌بست‌ها)، نمونه میکرومدل شیشه‌ای با حفره‌هایی به ابعاد مختلف ساخته شد. سیلاب‌زنی پلیمرهای مختلف در سرعت تزریق ثابت انجام شد. نتایج به دست آمده در جریان آزمایش‌های سیلاب‌زنی آبی و محلول‌های پلیمری نشان می‌دهد که با افزایش گرانشی^۳ سیال تزریقی، بازیافت نفت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند به افزایش تنش برشی و هم‌چنین افزایش فشار حفره نسبت داده شود. نتایج ارائه شده هم‌چنین نشان‌دهنده جاروب بیشتر نفت از مسیرهای بسته در اثر افزایش درصد هیدرولیز و سولفون‌شدن در زنجیره‌های پلی‌اکریل آمید است.

واژگان کلیدی: سیلاب‌زنی پلیمر-سورفکتنت، سولفوناسیون، هیدرولیز، مسیرهای بسته، فشار حفره، خواص الاستیسیته

مقدمه

طی فرآیند سیلاب‌زنی بیشتر نفت باقیمانده به سختی با آب جابه‌جا و بازیابی می‌شود. سیلاب‌زنی پلیمر فرآیند شیمیایی مهم و تأثیرگذاری است. با توجه به اینکه حجم زیادی از سنگ‌های مخزن شامل حفره‌ها و مسیرهای بسته‌ای است که نفت باقیمانده در آنها طی فرآیند سیلاب‌زنی آبی بی‌حرکت باقی می‌ماند، استفاده از روش‌هایی که منجر به حداکثرسازی خروج نفت از این حفره‌ها خواهد شد مهم ارزیابی می‌شوند.

با توجه به اینکه نفت باقیمانده در مخزن به چهار دسته تقسیم‌بندی شده و یکی از مهم‌ترین آنها نفت باقیمانده در بن‌بست است، اطلاعات حاصل از بررسی اثر سیالات ویسکوالاستیک در استخراج این نوع نفت می‌تواند به افزایش استخراج نفت کمک کند [۸]. بهینه‌سازی روش‌هایی چون تزریق پلیمر می‌تواند به استخراج نفت از فضاهاى مرده کمک کند که این مقاله به مطالعه و بررسی این موضوع اختصاص دارد.

جهت بررسی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی میزان نفت خارج شده از درون حفره، یک میکرومدل ساخته شد و پس از اینکه مسیرها از نفت پر شد، سیال تزریقی که شامل انواع پلیمر با غلظت‌های مختلف بود به آن تزریق و از نحوه حرکت جریان عکس‌برداری شد. سپس این تصاویر به منظور تعیین میزان نفت جاروب‌شده از درون حفره، تحلیل شد تا اثر پلیمر در غلظت‌های مختلف و در حالت‌های هیدرولیز شده

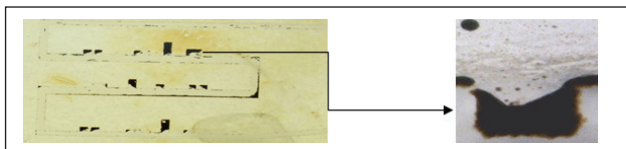
در اوائل قرن بیستم صنعت نفت به این باور رسید که برای ازدیاد برداشت، روش‌های اولیه و ثانویه کافی نیست. از آن پس تحقیقات زیادی در راستای بهبود بازده جاروب‌زنی و جابه‌جایی در صنعت نفت انجام شد. در این زمان سیلاب‌زنی پلیمری به گونه‌ای طراحی شد تا با اصلاح نسبت تحرک‌پذیری بازده جاروبی بهبود یابد. در سال ۱۹۴۴ دتلینگ^۴ با افزودن پلیمرهایی که در آب حل می‌شدند فرآیند سیلاب‌زنی با پلیمر را اختراع کرد [۱]. پس از او در طی دو دهه در حدود ۲۵ اختراع در زمینه سیلاب‌زنی با پلیمر ثبت شد. اولین بار در سال ۱۹۶۴ ساندیفرود^۵ [۲] و پی^۶ [۳] متوجه شدند که می‌توان تحرک‌پذیری آب استفاده شده در سیلاب‌زنی آبی را با افزودن مقدار کمی پلیمر محلول در آب کاهش داد [۴]. تزریق پلیمر با استفاده از محلول پلی‌اکریل آمید به میدان بایرون از دیگر پروژه‌های موفق است که در دسامبر ۱۹۸۲ با استفاده از ۳۶ حلقه چاه صورت گرفت [۵]. پاپ و همکارانش در سال ۱۹۷۹ آنالیز حساسیت سیلاب‌زنی مسیلی/پلیمر را به انجام رساندند. آنها شبیه‌ساز پاپ و نلسون [۶] را برای اضافه کردن چند اثر دیگر گسترش داده و بازده جابه‌جایی نفت را به عنوان تابعی از اندازه توده، اندازه پلیمر محرک، مواد فعال سطحی و غلظت نفت در توده، نسبت تحرک‌پذیری توده نفت و محرک به توده نفت و... محاسبه کردند [۷].

حفرات ۳ تا ۴ میلی متر انتخاب شد تا جریان پس از عبور از حفره و قبل از رسیدن به حفره بعدی کاملاً توسعه یابد.

برای تزریق سیال از پمپ Quizix که یکی از پمپ‌های بسیار دقیق موجود است استفاده می‌شود. دقت این پمپ‌ها ۰/۰۰۰۱ cc/min بوده و به وسیله کامپیوتر کنترل می‌شوند. پمپ دارای دو سیلندر است که جهت فراهم کردن امکان تزریق پیوسته، با یکدیگر موازی هستند. به منظور نگهداری سیال تزریقی از یک ظرف انتقال استفاده می‌شود که توانایی مقاومت در فشار زیاد را دارد. سیال مورد نظر در ظرف منتقل‌کننده ریخته می‌شود. پیستون با نیروی پمپ و توسط سیال منتقل‌شده به جلو رانده و باعث می‌شود که سیال جابه‌جاکننده از سیلندر به بیرون رانده شده و وارد مدل گردد. شکل ۲-نمایی از دستگاه‌های مورد استفاده در فشار ثابت را نشان می‌دهد.

۲- مواد و سیالات به کار گرفته شده

مشخصات محلول‌های مختلف پلیمری که برای آزمایش‌های سیلاب‌زنی استفاده شدند در جدول ۱- آمده و نفت مورد استفاده با



شکل ۳ | وضعیت نفت در درون حفره‌ها

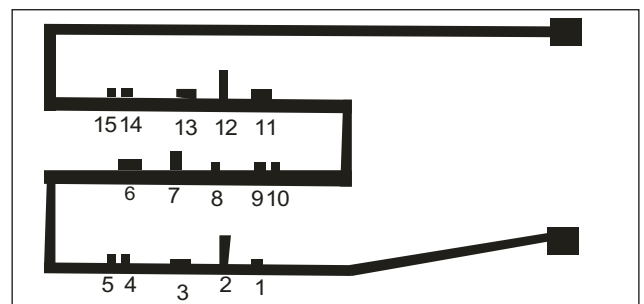
نام اختصاری و مشخصه پلیمر و سورفکتانت	غلظت‌ها (ppm)	جرم مولکولی پلیمر (میلیون دالتون)	میزان سولفوناسیون پلیمر (%)	میزان هیدرولیز پلیمر (%)
PA	۳۵۰ ۷۰۰ ۱۴۰۰	۸	۰	۰
HPAM	۳۵۰ ۷۰۰ ۱۴۰۰	۸	۰	۲۵
AN105	۳۵۰ ۷۰۰ ۱۴۰۰	۶	۵	۰
AN125	۳۵۰ ۷۰۰ ۱۴۰۰	۸	۲۵	۰
H2O	-	-	-	-

جدول ۱ | نوع و مشخصات سیالات تزریق شده در آزمایش سیلاب‌زنی

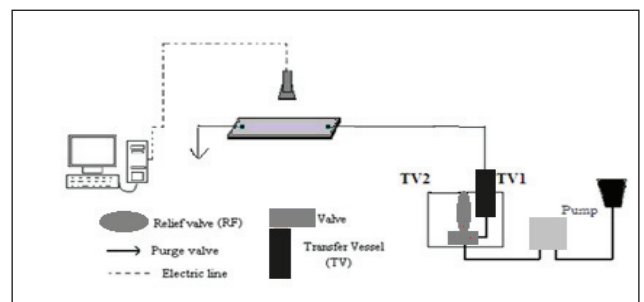
و هیدرولیز نشده و هم‌چنین سولفون شده و سولفون نشده مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت اثر تغییرات ناشی از همه این حالات بر ازدیاد برداشت نفت مقایسه شد.

۱- شرح دستگاه

اندازه ابعاد حفره مدل ساخته شده که در شکل ۱- نشان داده شده متفاوت است. در این نوشتار حفره ۳- با ابعاد ۲×۰/۵ میلی متر بررسی شده است. با توجه به پیچیدگی شکل مسیرهای بسته در مقیاس واقعی، به منظور ساده‌سازی اجرای آزمایش، مطابق شکل ۱- مسیر بسته به شکل ایده آل و ساده ساخته شده است. واحد اندازه‌های نشان داده شده در این شکل میلی متر است. به منظور ناچیز کردن اثرات نیروهای مویبندی بر الگوی جریان و بررسی دقیق‌تر حرکت سیال، اندازه کانال نیز در مقیاس میلی متر در نظر گرفته شده است. عمق کانال ساخته شده ۱۶۶ میکرون است. جهت ساختن مدل شیشه‌ای، ابتدا نقشه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار کورل درا-۱۲ رسم شد و سپس با استفاده از اشعه لیزر تصویر مورد نظر روی شیشه حکاکی گردید. پس از حکاکی و تمیزسازی مسیرهای عبور جریان، شیشه را با شیشه دیگری در کوره گذاشته و به هم چسبانند. فاصله بین



شکل ۴ | نمایی از مدل ساخته شده اشباع از نفت و شماره‌گذاری حفره‌ها



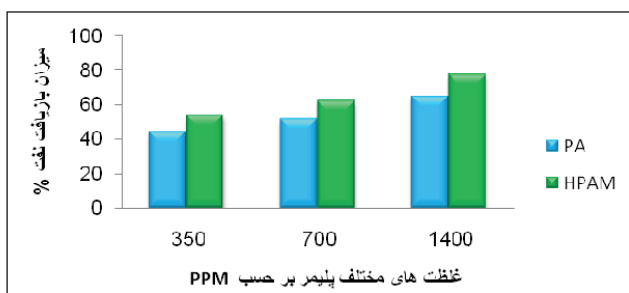
شکل ۵ | نمایی از دستگاه‌های میکرومدل در فشار اتمسفر



با افزایش غلظت PA از ۳۵۰ به ۷۰۰ ppm، میزان بازیافت نفت به اندازه ۷/۸ درصد و با افزایش غلظت PA از ۱۴۰۰ به ۷۰۰ ppm، میزان بازیافت نفت به اندازه ۱۳ درصد افزایش داشته است. هم چنین برای HPAM با افزایش غلظت از ۳۵۰ به ۷۰۰ ppm، میزان بازیافت نفت به اندازه ۸/۵۸ درصد و با افزایش غلظت از ۷۰۰ به ۱۴۰۰ ppm، میزان بازیافت نفت به اندازه ۱۵/۶ درصد افزایش داشته است. اما با یک مقایسه می توان متوجه شد که هیدرولیز کردن تا چه حد می تواند نسبت به افزایش غلظت به صرفه باشد. با مقایسه پلیمر هیرولیز نشده (PA) در غلظت ۷۰۰ ppm با پلیمر ۲۵ درصد هیدرولیز شده (HPAM) در غلظت ۳۵۰ ppm، متوجه می شویم که مقدار بازیافت نفت در هر دو یکسان بوده و حتی در پلیمر هیدرولیز شده به اندازه ۱/۸۳ درصد هم بیشتر بوده است. شکل ۶- مقایسه بین پلیمرهای AN 125 و AN 105 در غلظت های مختلف در حفره-۳ را نشان می دهد.

بر این اساس در غلظت ۳۵۰ ppm AN 125 به اندازه ۱۵/۲۳ درصد، در غلظت ۷۰۰ ppm AN 125 به اندازه ۱۸/۸ درصد و در غلظت ۱۴۰۰ ppm AN 125 به اندازه ۲۳/۲ درصد بازیافت نفت بیشتری نسبت به AN 105 دارد. بنابراین سولفونیزه کردن AN 125 اندازه ۲۰ درصد بیشتر از AN 105، تأثیر به سزایی در افزایش جاروب نفت از مسیره های بسته دارد. از طرفی اثر افزایش غلظت مانند PA و HPAM مشهود است. در اینجا می توان به ارزش سولفونیزه شدن پلیمر نسبت به افزایش غلظت پی برد. با مقایسه پلیمر ۵ درصدی سولفونیزه شده (AN105) در غلظت ۷۰۰ ppm با پلیمر ۲۵ درصد سولفونیزه شده (AN125) در غلظت ۳۵۰ ppm، متوجه می شویم پلیمر ۲۵ درصد سولفونیزه شده به اندازه ۷/۶۱ درصد افزایش بازیافت نفت بیشتری دارد.

مقایسه آب تازه و برخی از سیلاب زنی های پلیمرهای مختلف روی



شکل ۵ | میزان بازیافت نفت برای پلیمرهای PA و HPAM در غلظت های مختلف برای حفره-۳

چگالی $\frac{gt}{cm^3}$ ۰/۸۶۹۶ و درجه سبکی (API) برابر ۳۱/۲ انتخاب شده است.

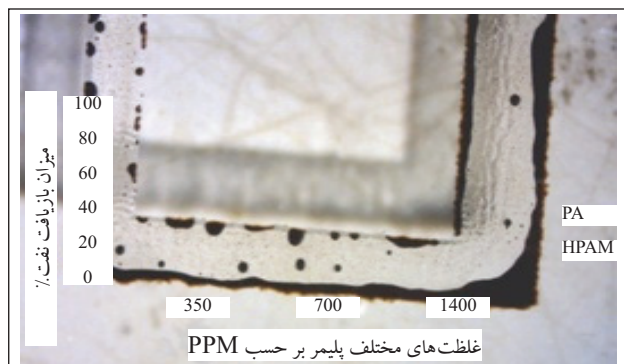
۳- تشخیص نفت دوست یا آب دوست بودن مدل

با توجه به شکل های ۳-۴ مشخص است که سطح نفت در درون حفره مقعر است. از طرفی لایه ای از نفت نیز بر جداره میکرومدل چسبیده است. هم چنین می توان مشاهده کرد که نفت گوشه های مدل را هم اشغال کرده و بنابراین مدل نفت دوست است.

۴- مشاهدات و تجزیه و تحلیل نتایج

آب و محلول های پلیمری ذکر شده در جدول-۱، با نرخ تزریق ثابت ۰/۰۰۰۱ cc/min در میکرومدلی که قبلاً از نفت اشباع شده تزریق می شود. برای اینکه میکرومدل به طور کامل از نفت اشباع گردد، از خلاء مناسب استفاده شده است. آزمایش ها با بررسی اثر آب خالص بر بازده بازیافت شروع شده و با تزریق محلول های پلیمری ادامه می یابد. این آزمایش ها می تواند به ما کمک کند تا به بررسی و مقایسه اثر انواع پلیمر در غلظت های ثابت و متغیر بر روی بازده جاروب نفت از مسیره های بسته بپردازیم. برخی از نتایج به دست آمده در شکل های ۵- تا ۷ ارائه شده اند. شکل ۵- مقایسه بین پلیمرهای PA و HPAM در غلظت های مختلف در حفره-۳ را نشان می دهد.

بر این اساس در غلظت ۳۵۰ ppm HPAM به اندازه ۹/۶۲ درصد، در غلظت ۷۰۰ ppm HPAM به اندازه ۱۰/۴ درصد و در غلظت ۱۴۰۰ ppm HPAM به اندازه ۱۳ درصد بازیافت نفت بیشتری نسبت به PA دارد. بنابراین هیدرولیز پلیمر به اندازه ۲۵ درصد تأثیر به سزایی در افزایش جاروب نفت از مسیره های بسته دارد. از طرفی



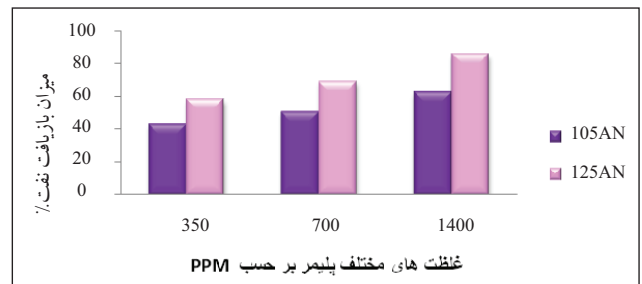
شکل ۴ | وضعیت نفت در جداره ها و گوشه های میکرومدل

این مقایسه نشان می‌دهد که سولفون‌شدن پلیمر اثرات قابل توجهی بر توانایی آن جهت افزایش بازده جاروب نفت از مسیرهای بسته دارد. با توجه به اینکه تمامی پلیمرها در غلظت یکسان (۱۴۰۰ ppm) و تقریباً با وزن مولکولی یکسان هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار هیدرولیز شدن می‌تواند بازیابی نفت را افزایش دهد؛ اما این افزایش نسبت به مقدار سولفون‌شدن بسیار کمتر است.

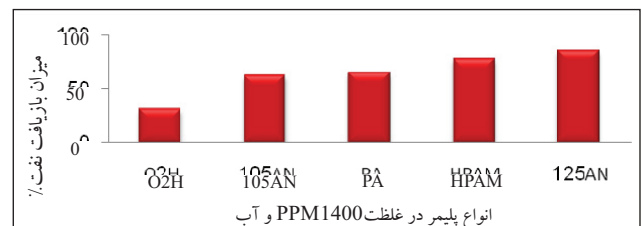
نتیجه‌گیری

جهت بررسی اثر غلظت‌ها خصوصیات پلیمر در بازیابی نفت از مسیرهای بسته، یک میکرومدل شیشه‌ای استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

- افزایش غلظت پلیمرها، بازده جاروبی را افزایش می‌دهد.
- افزایش میزان سولفوناسیون پلیمر باعث افزایش مقدار فشار حفره و جاروب نفت از درون مسیرهای بسته می‌شود.
- افزایش میزان هیدرولیز پلیمر باعث افزایش مقدار فشار حفره و جاروب نفت از درون مسیرهای بسته می‌شود.
- با مقایسه بین آب و پلیمرهای دیگر مشخص می‌شود که پس از سیلاب‌زنی آب می‌توان از سیلاب‌زنی پلیمر استفاده کرد.
- با توجه به هزینه کمتر هیدرولیز کردن و سولفون‌کردن پلیمرها نسبت به افزایش غلظت پلیمر می‌توان سیال تزریقی را طوری انتخاب کرد که بیشترین کارایی و صرفه اقتصادی را داشته باشد.



شکل ۶ | میزان بازیافت نفت برای پلیمرهای AN105 و AN125 در غلظت‌های مختلف برای حفره-۳



شکل ۷ | میزان بازیافت نفت برای انواع پلیمر با غلظت ۱۴۰۰ ppm و آب در حفره-۳

بازیابی نفت از حفره-۳ در شکل-۷ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که تمام نمونه‌های پلیمری در بازیابی نفت از مسیرهای بسته در نظر گرفته شده، بازده بیشتری نسبت به آب خالص دارند. با این حال بیشترین بازده جاروب (۶۵/۳ درصد) مربوط به نمونه AN125 که ۲۵ درصد سولفونیزه شده و کمترین بازده در میان پلیمرها نیز مربوط به نمونه AN 105 می‌باشد که تنها ۱۱/۱ درصد بوده و وزن مولکولی آن کمی کمتر از AN 125 است.

پانویس‌ها

- ¹hadi_oilengineering@yahoo.com ⁴Detling ⁷CorelDRAW-12
²ramazani@sharif.edu ⁵Sandiford
³viscosity ⁶Pye

منابع

1. C. Aurel, "Applied Enhanced Oil Recovery", Prentice Hall Publishing, USA (1995).
2. Sandiford B.B, "Laboratory and Field Studies of Water Floods Using Polymer Solutions to Increase Oil Recoveries", J. Pet. Tech. 917, Trans., AIME, 231 (Aug. 1964)
3. Pye D. J., "Improved Secondary Recovery by Control of Water Mobility", J. Pet. Tech. 911, Trans., AIME, 231 (Aug. 1964)
4. H.L. Chang, «Polymer Flooding Technology- Yesterday, Today, and Tomorrow», J. Pet. Tech. , (1978).
5. Manrique and pope et al., «EOR Field Experiences in Carbonate Reservoirs in the United States», SPE 100063 (2006).
6. Pope G.A., and Nelson R.C., « A Chemical Flooding Compositional Simulator», SPE J. 339 (Oct. 1978)
7. Pope G.A., Wang B., Tsaur K., «A Sensitivity Study of Micellar/Polymer Flooding», SPE 357 (Dec. 1979)
8. A. Ramazani S.A., M. Nourani, and M.A. Emadi, "Investigation of Intrinsic Viscosity and Mark- Houwink Parameters of high Molecular Weight, Partially Hydrolyzed Polyacrylamide in Petroleum Reservoir Conditions, 9th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST2009), Tehran/Iran,(October, 17-21, 2009)