

## آزمایشات مشاهده‌ای سیلابزنی با پلیمر در سیستم‌های ناهمگن با استفاده از میکرومدلهای شیشه‌ای

محمد حشمتی<sup>۲</sup>، حسین مهدوی<sup>۱\*</sup>، منوچهر حقیقی<sup>۲</sup> و محمود ترابی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی

<sup>۲</sup> دانشگاه تهران، پردیس فنی، دانشکده مهندسی شیمی

\* مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی [hmahdavi@khayam.ut.ac.ir](mailto:hmahdavi@khayam.ut.ac.ir)

(دریافت: ۸۵/۵/۲؛ پذیرش: ۸۶/۱/۲۳)

### چکیده

در این مطالعه برای بررسی عوامل موثر در سیلابزنی با محلولهای پلیمری از میکرومدلهای شیشه‌ای استفاده شده است. مدل‌های استفاده شده در آزمایشات، دو لایه و با تراوایی‌های متفاوت در هر لایه، ساخته شده اند تا بتوان تفاوت اثر محلولهای پلیمری و آب را در حین تزریق، مشاهده و اندازه گیری کرد. پلیمر مورد آزمایش پلی اکریلامید هیدرولیز شده است که در آزمایشگاه سنتز شده است. نتایج بدست آمده در جریان تستهای سیلابزنی با آب و محلولهای پلیمری روی این مدل‌ها نشان می‌دهد که بازیافت نفت با افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی افزایش می‌یابد و این افزایش در بعضی موارد تا ۱۷٪ نفت در جای اولیه می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی می‌توان از سیلابزنی با محلولهای پلیمری به تنهایی پس از سیلابزنی با آب استفاده نمود. افزایش بازیافت از مخازن نفتی سیلابزنی شده با آب، که توسط محلولهای پلیمری سیلابزنی می‌شوند در بعضی حالات به ۱۱٪ نفت در جای اولیه می‌رسد. بررسی میزان بازیافت در مدل‌های ناهمگن نشان می‌دهد که تفاوت میزان بازیافت بین سیلابزنی با پلیمر و سیلابزنی با آب از ۱٪ تا ۱۷٪ نفت در جای اولیه متغیر است که این مقدار به ویسکوزیته سیال تزریقی، دبی تزریق و همچنین ترتیب تزریق سیالات بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: میکرو مدل، پلیمر، ناهمگونی، بازیافت نهایی، ویسکوزیته

### مقدمه

زیاد تولید شده ولی نفت مناطق اطراف که دارای تراوایی کمی هستند، دست نخورده باقی می‌مانند. با توجه به این موضوع، مقادیر زیادی از نفت مخزن پس از عملیات سیلابزنی، در مخزن به جا می‌ماند. روشهای جایگزین بسیاری بجای سیلابزنی با آب توسعه یافته‌اند. همچنین روشهایی برای بیرون کشیدن نفت باقی مانده پس از سیلابزنی با آب بوجود آمده اند.

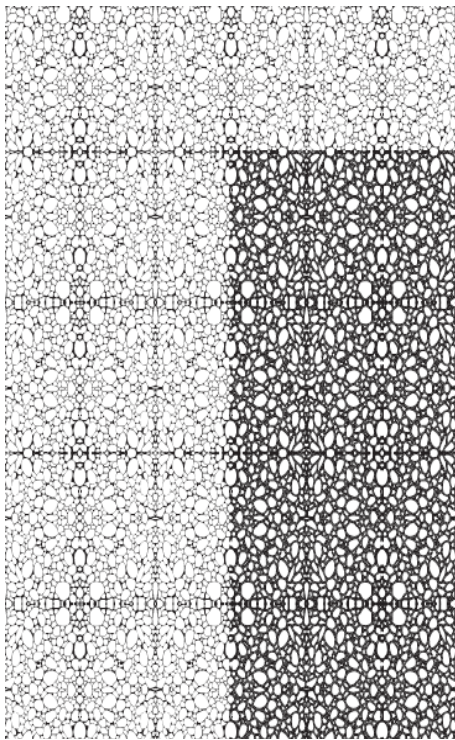
سیلابزنی با محلولهای پلیمری روشی است که می‌توان و بهتر است که در موارد زیادی، از آن بجای سیلابزنی با آب استفاده کرد. این روش بدلیل استفاده از پلیمر در آب تزریقی هزینه برتر است ولی در صورتی که درآمد حاصل از بازیافت بیشتر در نظر گرفته شود، در نهایت در بسیاری از موارد، سیلابزنی با محلولهای پلیمری از لحاظ اقتصادی به صرفه خواهد بود (Demin et al. 2002).

محلولهای پلیمری پلی‌اکریلامید هیدرولیز شده در آب به دلیل افزایش ویسکوزیته آب تزریقی در مخزن، نسبت حرکت آب به نفت را بهبود بخشیده و یکنواخت‌تر در مخزن حرکت می‌کنند. بنابراین توانایی جابجا کردن خیلی بهتر نفت مخزن را دارا هستند (Littmann 1988). اثر دیگری که پلیمرهای سنتزی مثل پلی اکریلامید هیدرولیز شده

بطور کلی در طول تولید، فشار بعضی از مخازن نفتی افت شدیدی پیدا می‌کند. این افت فشار شدید باعث می‌شود که نفت موجود در مخزن نیروی لازم برای تولید شدن را نداشته باشد. روشهای ازدیاد برداشت به این منظور بوجود آمده و توسعه یافته اند که بتوان نفت باقی مانده پس از تولید اولیه را از اعماق مخازن بیرون کشید.

یکی از روشهای ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، سیلابزنی با آب است. در این فرآیند، آب توسط پمپ یا نیروی ثقل از یک یا چند چاه به درون مخزن تزریق می‌شود و باین وسیله نفت باقی مانده در مخزن را به سمت چاههای تولیدی که فشاری کمتر از چاههای تزریقی دارند، می‌راند. تنها راههای خروج نفت موجود در مخزن چاههای تولیدی هستند. سیلابزنی با آب در مورد مخازن همگن بخوبی توسعه یافته است. اما هنگامی که مخزن دارای ناهمگونی (شکاف، لایه‌های دارای تراوایی‌های متفاوت و ...) باشد، آب تزریقی که به دنبال کم مقاومت ترین راه عبور می‌باشد مسیرهای دارای تراوایی زیاد را انتخاب کرده و با سرعت از طریق آن مسیرها به سمت چاههای تولیدی حرکت کرده و تولید می‌شود. بنابراین نفت موجود در مسیرهای دارای تراوایی

شکل ۱ الگوی مورد استفاده برای ساخت مدل را نشان می‌دهد. پس از آماده کردن آینه برای ظهور الگو و پس از حذف قسمتهایی از لمینیت، مدل برای حکاکی (Etching) آماده می‌شود. اما اگر آینه با شرایط فعلی در معرض تماس با اسید قرار گیرد، زیر آینه هم که شیشه‌ای است خورده شده و مدل کدر می‌شود. لذا سطوحی که نباید خورده شوند به پارافین آغشته شده و سپس عملیات حکاکی با اسید انجام می‌شود. برای حکاکی، نمونه در اسید فلوریدریک قرار داده می‌شود تا مناطق شیشه شده مدل خورده شوند و نمونه بر روی شیشه حک شود.



شکل ۱- الگوی مورد استفاده در ساخت میکرومدل

پس از ایجاد سوراخهای ورودی و خروجی سیال روی مدل حکاکی شده، یک شیشه به اندازه مدل انتخاب کرده، بر روی آن قرار داده و در کوره حرارت داده می‌شود. حرارت دهی باید به طور یکنواخت باشد تا شیشه خمیده نشود. همچنین نباید دما را به حدی بالا برد که سیالیت شیشه باعث پر شدن ماتریس شود. دمای مناسب برای فیوز شدن دو شیشه حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱ مشخص است، الگوی استفاده شده در این کار به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان در آن به خوبی تفاوت عملکرد محلولهای پلیمری و آب را مشاهده کرد. به این منظور، دو لایه دارای اندازه حفرات متفاوت و در نتیجه دارای تراوایی متفاوت در مدل تعبیه شده است. این کار با زیاد کردن ضخامت خطوط مورد نظر در الگو انجام شده است.

روی فرآیند ازدیاد برداشت دارند، کمک به کاهش تراوایی مسیرهای دارای تراوایی زیاد است. با ته نشین شدن و جذب ملکولهای پلیمر روی سطح محیط متخلخل، تراوایی مناطقی که تحت تاثیر محلول پلیمری قرار گرفته‌اند کاهش می‌یابد و این کاهش باعث می‌شود که سیالهای تزریقی بعد از محلول پلیمری، به دلیل مقاومت ناشی از این نواحی، از آنها منحرف شده و به سمت مناطقی که نفت آنها دست نخورده باقی مانده حرکت کنند و اینگونه نفت بیشتری را به سمت چاههای تولیدی برانند (Green & Willhite 1998).

مطالعات بسیاری روی سیلابزنی با پلیمر انجام شده است. پارامترهای موثر در میزان جذب پلیمر روی سطح محیط متخلخل (Asghari 2004)، (Zaitoun & Chauveteau 1998) و (Zheng et al. 1998) و ...، مشکلاتی که پلیمر می‌تواند با ژل شدگی احتمالی برای مخزن بوجود آورد (Treiber & Yang 1986)، شبیه سازی حرکت محلولهای پلیمری در مخزن (Bondor 1972)، مقاومت پلیمرها از لحاظ تجزیه در برابر عوامل محیطی موجود در مخازن از مواردی هستند که توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند.

## روشها

برای انجام آزمایشات مشاهده‌ای جریان فازهای آبی و آلی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای استفاده می‌شود. این میکرومدل‌ها به عنوان شبیه ساز دو بعدی سنگ مخزن نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهمترین مزیت این میکرومدلها، قابلیت مشاهده حرکت سیال در آنها است که از لحاظ کیفی به تهیه بهترین مدل‌های حرکت سیال در محیط متخلخل کمک می‌نماید.

## آماده سازی نمونه شبکه متخلخل

تهیه نمونه شبکه متخلخل، اولین مرحله کار است. این عمل می‌تواند با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری و یا عکس برداری از یک مقطع نازک (Thin Section) از سنگ مخزن انجام شود. یکی از نرم افزارهای مناسب برای این کار، کرل درا (Corel Draw) می‌باشد که با داشتن امکان استفاده از ماکرو، ساخت مدل‌ها را بر اساس یک معادله ریاضی خاص با خطوط دارای زوایا و ضخامت‌های متفاوت و همچنین شکلها و الگوهای مختلف، ممکن می‌سازد. با استفاده از یک پلیمر حساس نوری (Laminate) می‌توان با دقت بسیار بالا شبکه ساخته شده را بر روی آینه حک کرد. از آنجا که لمینیت مورد استفاده از نوع نکاتیو می‌باشد، نمونه تهیه شده باید بگونه ای باشد که مناطقی که باید خورده شوند به رنگ مشکی و سایر مناطق بی رنگ باشند. سپس این نمونه بر روی کاغذ شفاف چاپ شده و در مرحله ظهور استفاده می‌گردد.

به بالون آزمایش، از مبرد استفاده می‌شود. بهتر است که واکنش در یک راکتور انجام شود، چون محصول به صورت ژل است و به راحتی از دهانه بالون خارج نمی‌شود. برای خشک کردن پلیمر و اندازه‌گیری بازده پروسه پلیمریزاسیون، ژل بدست آمده روی سطحی کاملاً تمیز پهن شده و اجازه داده می‌شود تا در دمای محیط و توسط تبخیر سطحی، خشک شود. در صورت لزوم، می‌توان برای خشک کردن محصولات، آنها را برای مدت کوتاهی در کوره (ترجیحاً کوره خلاء) قرار داد. مدت زمان ماندن محصولات در کوره نباید از حدود دو ساعت فراتر رود زیرا در غیر این صورت، بین ملکولهای پلیمر تشکیل شده، اتصالات عرضی فراوانی بوجود می‌آید که منجر به تشکیل ژل شبکه‌ای شده‌ای می‌شود که هیدروژل (Hydrogel) نام دارد. این ژل به هیچ عنوان در آب حل نمی‌شود و هنگامی که در مجاورت آب قرار می‌گیرد، حدود ۵۰ برابر وزن خود، آب جذب می‌کند.

#### سیالات مورد استفاده

نفت مورد استفاده در این آزمایشات، کروزین می‌باشد. کروزین علاوه بر دارا بودن خواص و ترکیبات سبک نفت، گرانروی قابل قبولی دارد. باین معنی که از لحاظ تزریق در میکرومدلهای شیشه‌ای توسط پمپهای سرنگ (Syringe Pump) مشکلی بوجود نمی‌آورد. پمپهای سرنگ برای پمپ کردن محلولهای دارای ویسکوزیته بالا، دچار مشکل می‌شوند چون نمی‌توانند نیروی کافی برای تزریق را اعمال کنند. از طرفی در صورت استفاده از نفت سنگین و پمپهای قوی، احتمال شکستن میکرومدل تحت شرایط فشار بالا وجود دارد و همچنین چون پایه آزمایشات میکرومدل بر مشاهدات کیفی استوار است، خطای عددی ایجاد شده در محاسبات قابل اغماض خواهد بود. برای قابل تشخیص بودن کروزین از آب و محلول پلیمری آنرا با سودان رد (Sudan Red) رنگی می‌کنیم. این عمل باعث می‌شود که نفت قرمز شده و براحتی از بقیه سیالات تشخیص داده شود. در آزمایشات میکرومدل انجام شده در تحقیقات گسترده کیفی در مورد نحوه رفتار نفت در شرایط مختلف، کروزین بدلائل ذکر شده در بالا یکی از بهترین انتخابها می‌باشد.

برای سیلابزنی با آب و تهیه محلولهای پلیمری، از آب مقطر استفاده شده است تا بتوان تا حد ممکن از اثرات جانبی ناخالصی‌های آب کاست. آب مقطر مورد استفاده یک بار تقطیر بوده است. برای مشخص کردن آب از محلول پلیمری، از متیلن بلو (Methylene Blue) استفاده شده است. متیلن بلو به محلول پلیمری اضافه نشد چون در مورد اثر متقابل پلیمر و متیلن بلو اطلاعی در دسترس نبود. باین منظور با اضافه کردن مقداری متیلن بلو آب را به رنگ آبی در آوردیم تا ردیابی آن در محیط آسانتر انجام گیرد.

همانطور که در شکل ۱ مشخص می‌باشد، یک لایه دارای تراوایی یکنواخت به ورودی مدل متصل است که به پخش کردن یکنواخت سیال در مدل کمک می‌کند. پس از اینکه سیال از این لایه عبور کرد به دو لایه دارای تراوایی مختلف می‌رسد که به صورت موازی کنار هم قرار گرفته‌اند. این قسمت از مدل نقش اصلی در ایجاد تمایز بین سیلابزنی با آب و محلول پلیمری را بازی می‌کند.

#### سنتز پلیمر

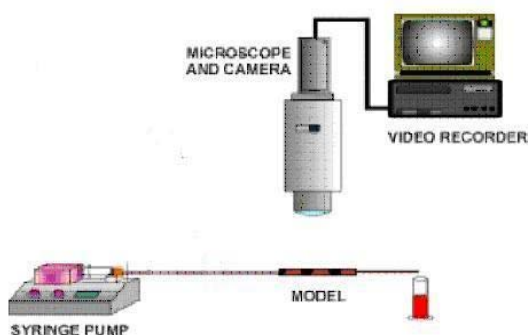
پلیمر مورد استفاده در این پروژه در آزمایشگاه سنتز شده‌است. یکی از خواص پلیمرهای بدست آمده از روشهای آزمایشگاهی، در مقایسه با روشهای صنعتی سنتز پلیمر، جرم ملکولی کم آنهاست. جرم ملکولی کم روی ویسکوزیته محلولهای پلیمری تاثیر مستقیم دارد. به این صورت که افزایش جرم ملکولی باعث افزایش ویسکوزیته محلول پلیمری می‌شود. بنابراین ویسکوزیته محلولهای پلیمری که پلیمر استفاده شده در آنها در آزمایشگاه و توسط روشهای معمول، که در پایین به آن اشاره خواهد شد، سنتز شده است پایین تر از ویسکوزیته محلولهای پلیمری می‌باشد که پلیمر مورد استفاده در آنها در مقیاس صنعتی سنتز شده است.

سنتز، شامل همپلیمریزاسیون رادیکالی مونومرهای اکریلامید و مونومرهای اکریلیک اسید است. محصول این سنتز پلی اکریلامید هیدرولیز شده می‌باشد. در این حالت گروههای آمیدی مونومرهای اکریلامید و گروههای کربوکسیلی مونومرهای اکریلیک اسید به صورت تصادفی در طول زنجیر همپلیمر پخش می‌شوند.

برای تهیه این همپلیمر می‌توان از درصدهای مولی مختلف اکریلامید و اکریلیک اسید استفاده کرد و در نتیجه پلی اکریلامیدهایی با درجه های هیدرولیز مختلف بدست آورد.

در پروسه سنتز پلیمر، حلال، آب دو بار تقطیر شده است و آغازگر مورد استفاده  $K_2S_2O_8$  می‌باشد. ابتدا ۱۵۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر وارد بالون ۲۵۰ میلی لیتری شده و به وسیله گاز نیتروژن، اکسیژن زدایی می‌گردد. برای اکسیژن زدایی، یک لوله گاز نیتروژن داخل آب قرار گرفته و در همان حال آب هم زده می‌شود. این عمل باید به مدت نیم ساعت ادامه یابد. سپس ۰/۵ مول اکریلامید و ۰/۵ مول اکریلیک اسید، همراه با ۵٪ مجموع وزنی هر دو مونومر، آغازگر در حداقل آب مقطر حل شده و به آب اکسیژن زدایی شده اضافه می‌گردد. پس از اینکار محلول تشکیل شده، که هنوز در دمای محیط قرار دارد، اکسیژن زدایی می‌شود. پس از نیم ساعت اکسیژن زدایی دوباره، باید دمای محیط آزمایش به  $70^{\circ}C$  برسد. در تمام مدت انجام آزمایش، ظرف باید پر از نیتروژن باشد. چون مقداری از آب در دمای حدود  $70^{\circ}C$  تبخیر می‌شود، در این آزمایش، برای بازگردانی آب تبخیر شده

میزان فشار ورودی و خروجی، بتنهایی، تاثیر چندانی بر نحوه حرکت سیال نخواهد داشت. تمامی آزمایشات سیلابزنی در فشار اتمسفری انجام گرفته‌اند. از پمپهای مخصوص تزریق سرنگ برای تزریق سیالات در مدل استفاده شده است. شکل ۳ کل سیستم انجام آزمایشات را نشان می‌دهد. سیال از پمپ تزریق به سمت مدل و از خروجی مدل برای اندازه‌گیری حجم تولیدی داخل یک بشر تخلیه می‌شود. یک دوربین فیلم برداری یا عکاسی با وضوح خیلی بالا در زمانهای مقتضی از مدل عکسبرداری می‌کند. عکسها و فیلمها تحلیل شده و نتایج استخراج می‌شود.

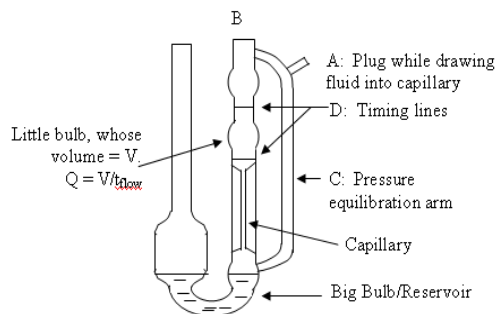


شکل ۳- سیستم تزریق در میکرومدل، همراه با سیستم تحلیل

تستهای مورد نظر در مدل افقی دارای تراوایی بالا از جهات مختلفی سیلابزنی با آب و پلیمر را مقایسه می‌کنند. در کل دو نوع تست در این حالت انجام شده است. نوع اول شامل تزریق آب تا بازیافت نهایی (Ultimate Recovery) و سپس تزریق محلول پلیمری تا بازیافت نهایی است و نوع دوم شامل تزریق محلول پلیمری، به تنهایی، می‌باشد. هدف از انجام این تستها در درجه اول مقایسه نحوه حرکت سیالات آب و محلول پلیمری در محیط متخلخل دارای دو لایه با تراوایی‌های مختلف و در درجه دوم مقایسه کمی/کیفی میزان بازیافت حالات مختلف سیلابزنی در میکرومدلهای شیشه‌ای می‌باشد. بازیافت نهایی سیلابزنی با آب، بازیافت نهایی سیلابزنی با محلول پلیمری و موثر بودن یا نبودن تزریق محلول پلیمری پس از تزریق آب در این تستها بررسی، اندازه‌گیری و تحلیل شده‌اند. تستهای تزریق در دبی‌های مختلف از ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌لیتر بر ساعت انجام شده اند تا بتوان اثر دبی را در پروسه های مختلف تزریق بررسی نمود. مورد دیگری که در این تستها بررسی شده است، مطالعه اثر ویسکوزیته سیال تزریقی (آب و محلول پلیمری) روی میزان بازیافت نهایی و نحوه حرکت سیال در محیط متخلخل می‌باشد. لازم به ذکر است که اعداد موینگی مربوط به این تستها در بازه  $0.7 \times 10^{-7}$  تا  $0.31 \times 10^{-6}$  می‌باشد که در محدوده اعداد موینگی حرکت سیال در مخزن می‌باشد. بنابراین می‌توان نتایج این تحقیق را بصورت کیفی به مقیاس مخزن نیز تعمیم داد.

## اندازه‌گیری پارامترهای سیالات و مدلها

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته محلولهای پلیمری از ویسکومتر آبلوهد (Ubbelohde) استفاده گردید. در شکل ۲ یک ویسکومتر آبلوهد نشان داده شده است.



شکل ۲- ویسکومتر مویینه آبلوهد

کشش بین سطحی آب و نفت و محلولهای پلیمری و نفت توسط تنسیومتر کراس (Kruss Tensiometer) اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری حجم حفرات مدل از روشی که در ادامه آمده، استفاده شده است.

مدل در حالت افقی قرار داده شده و از یک طرف شروع به تزریق با دبی ثابت در آن می‌شود. در دو زمان مشخص از مدل عکس گرفته می‌شود. زمان گرفتن عکسها مشخص است و بنابراین حجم تزریقی در این بازه زمانی هم مشخص می‌باشد. درصد سطحی سیالات تزریقی هم در هر دو حالت توسط نرم افزار Matlab اندازه‌گیری می‌شود. برنامه ای تحت محیط Matlab نوشته شده است که می‌تواند درصد رنگهای مورد نظر در یک عکس را محاسبه کند. با داشتن حجم تزریق در بازه مورد نظر و تفاوت سطوح می‌توان متوسط اندازه عمق حفرات را محاسبه کرد. این روش از روشهای دیگر اندازه‌گیری حجم حفرات دقیقتر می‌باشد. برای اندازه‌گیری تراوایی مدل از قانون داریسی استفاده شده است. فشار ورودی سیال مورد استفاده که در این حالت آب بوده است، توسط ستون آب که به ورودی مدل متصل است، تامین شده و آب را به درون مدل می‌راند. باید توجه داشت که مدل صد در صد اشباع از آب بوده و به طور کاملاً افقی قرار گرفته باشد. میزان آب تولیدی از انتهای مدل در یک بازه زمانی خاص، اندازه‌گیری شده و اینگونه دبی سیال تزریقی بدست می‌آید. برای ثابت نگه داشتن فشار ورودی می‌توان از لوله استوانه‌ای با قطر دهانه زیاد استفاده نمود. در این صورت، با تولید آب از یک طرف مدل، به دلیل کم بودن حجم حفرات مدل، تغییر ارتفاع ایجاد شده قابل صرفنظر کردن خواهد بود. فشار خروجی، فشار اتمسفری است. برای بررسی حرکت سیال در یک محیط متخلخل مخصوصاً هنگامی که از نفت اشباع از گاز استفاده نمی‌شود، اختلاف فشار دو طرف محیط متخلخل تعیین کننده جریان می‌باشد و

## بحث و نتایج

نتایج تستهای انجام شده روی مدل مورد نظر در حالی که به صورت افقی قرار گرفته باشد، در این قسمت به تفصیل بررسی می‌شود.

دو محلول پلیمری مورد استفاده به ترتیب دارای ویسکوزیته‌های ۱/۴۵ و ۱/۸ سانتی‌پواز هستند. در ادامه، محلول دارای ویسکوزیته کمتر با شماره ۱ و محلول دارای ویسکوزیته بالاتر با شماره ۲ مشخص شده‌اند. ویسکوزیته کرویزین حدود ۱/۵ سانتی‌پواز می‌باشد. تراوایی کل میکرومدل حدود ۶۰ داری است و حجم حفرات آن برابر ۱/۱۸ میلی-لیتر می‌باشد. تخلخل این مدل ۵۳/۷٪ می‌باشد.

در محیط متخلخل مورد نظر، میزان بازیافت نهایی و بازیافت در لحظه مشاهده سیال در خروجی (Breakthrough) مدل، با افزایش دبی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده غلبه بیشتر نیروهای ویسکوز بر نیروهای موینه می‌باشد. شایسته توجه است که دلیل زیاد بودن تراوایی مدل، نیروهای موینه ضعیف بوده و مقاومت چندانی در برابر عبور جریان از خود نشان نمی‌دهند، مخصوصاً هنگامی که دبی جریان و در نتیجه نیروهای ویسکوز وارده بر سیال افزایش می‌یابند. تفاوت موجود بین نیروهای موینه وارده از طرف لایه‌های موازی دارای تراوایی متفاوت باعث می‌شود که سیال در لایه دارای تراوایی بیشتر راحتتر حرکت کند و بنابراین میزان بازیافت از آن لایه بیشتر از لایه کم تراواتر باشد.

سه حالت مورد بررسی شامل بازیافت سیلابزنی با آب، بازیافت سیلابزنی با محلول پلیمری پس از بازیافت نهایی سیلابزنی با آب و بازیافت سیلابزنی با محلول پلیمری به تنهایی می‌باشد. با افزایش دبی، بازیافت نهایی و بازیافت در هنگام مشاهده سیال در خروجی، در هر سه حالت، افزایش می‌یابند. جدول ۱ میزان بازیافت نهایی و بازیافت در هنگام مشاهده سیال تزریقی در خروجی (Breakthrough) را برای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد.

نکته دیگری که در مورد تغییر دبی و اثر آن بر بازیافت، جلب توجه می‌کند این است که با افزایش دبی، سیستم با تزریق حجم حفرات (Pore Volume) بیشتری از سیال و در زمان کمتری به حد بازیافت نهایی می‌رسد. مقادیر بازیافتهای نهایی با یکدیگر متفاوتند و در این قسمت فقط زمان رسیدن به بازیافت نهایی مطرح شده است. در دبی‌های کم، اثر نیروهای ویسکوز ضعیفتر است بنابراین سیال مسیرهایی را که مقاومت کمتری در برابر حرکتش ایجاد می‌کنند انتخاب کرده و از آنها به سمت خروجی حرکت می‌کند. بنابراین در این حالت حجم کمتری از حفرات مدل را تحت تاثیر قرار می‌دهند. پس با وجود اینکه دبی تزریق کمتر است سیال سریعتر و با تزریق حجم حفرات کمتری به انتهای مدل و بازیافت نهایی می‌رسد. جدول ۲ نشان دهنده زمانهای رسیدن به بازیافت نهایی برای حالت تزریق آب و سپس تزریق محلول پلیمری می‌باشد و جدول ۳ حالتی را نشان می‌دهد که در آن از ابتدا محلول پلیمری تزریق شده است.

با افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی میزان بازیافت نهایی و بازیافت در هنگام مشاهده سیال تزریقی در خروجی (Breakthrough) در مدل‌های دارای تراوایی بالا افزایش می‌یابد. دلیل این امر به این صورت بیان می‌شود که با افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی که در این مورد با افزودن پلیمر به آب تزریقی انجام می‌شود، نسبت قابلیت حرکت سیال تزریقی به نفت موجود در محیط کمتر شده و به این وسیله محلول تزریقی پیستون وار تر حرکت نموده و نفت بیشتری را به سمت خروجی خواهد راند. دلیل دیگر این است که هنگامی که سیال تزریقی دارای ویسکوزیته بالا (محلول پلیمری) از نواحی دارای تراوایی بالاتر عبور کرد، بدلیل ته نشینی و جذب ملکولهای پلیمر روی سطح مدل، تراوایی این نواحی پایین آمده و به خاطر اثر انحراف (Diversion) سیال تزریقی بعدی به سمت مناطق شسته نشده رانده می‌شود و اینگونه باعث افزایش میزان بازیافت می‌شود.

جدول ۱- بازیافت نهایی و بازیافت در هنگام B.T سیال، سیلابزنی با آب و سپس سیلابزنی با محلول پلیمری شماره ۱.

دبی	بازیافت نهایی سیلابزنی با آب	بازیافت نهایی سیلابزنی با آب	بازیافت نهایی سیلابزنی با محلول پلیمری ۱
۰/۲ میلیلیتر بر ساعت	۵۲/۶۷٪	۵۷/۸۵٪	۶۳/۴۰٪
۰/۴ میلیلیتر بر ساعت	۶۴/۸۳٪	۷۲/۲۴٪	۷۴/۲۸٪
۰/۸ میلیلیتر بر ساعت	۷۱/۹۳٪	۷۸/۰۸٪	۷۸/۱۸٪

جدول ۲- زمان رسیدن به بازیافت نهایی بر حسب حجم حفرات تزریقی، تزریق آب و سپس تزریق محلول پلیمری شماره ۱.

دبی	زمان رسیدن به بازیافت نهایی در سیلابزنی با آب (حجم حفرات تزریقی)	زمان رسیدن به بازیافت نهایی در سیلابزنی با محلول پلیمری (کل حجم حفرات تزریقی)
۰/۲ میلیلیتر بر ساعت	۰/۶۲	۱/۲۷
۰/۴ میلیلیتر بر ساعت	۰/۷	۱/۴۶
۰/۸ میلیلیتر بر ساعت	۰/۹	۱/۵۲

جدول ۳- زمانهای رسیدن به بازیافت نهایی بر حسب حجم حفرات تزریقی، تزریق محلول پلیمری شماره ۱.

دبی	زمان رسیدن به بازیافت نهایی در سیلابزنی با محلول پلیمری
۰/۴ میلیلیتر بر ساعت	۰/۹۶
۰/۸ میلیلیتر بر ساعت	۱/۸

کمتر از حالت اولیه خواهد شد. با این وجود بازیافت افزایش می یابد. به این معنی که کمی افزایش در ویسکوزیته سیال تزریقی می تواند روی بازیافت نفت تاثیر داشته باشد. جداول (۵)، (۶) و (۷) در دبی های مختلف میزان تفاوت بازیافت بین سیلابزنی با آب اولیه و سپس سیلابزنی با محلول پلیمری ثانویه را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش دبی تفاوت بازیافت نهایی دو حالت مورد نظر کاهش می یابد و این به معنی غلبه نیروهای ویسکوز است که در نمونه های دارای تراوایی بالا نقش عمده ای ایفا می کنند.

مقایسه دیگر بین دو حالت خاص می باشد. یکی هنگامی که در ابتدا سیلابزنی با آب تا بازیافت نهایی و سپس سیلابزنی با محلول پلیمری بعد از آن تا بازیافت نهایی را شاهدیم و دیگری هنگامی که از ابتدا تا بازیافت نهایی محلول پلیمری در مدل تزریق شده باشد. نتایج نشان می دهند که بازیافت نهایی در حالت دوم خیلی بیشتر از حالت اول است. دلیل قابل ذکر در این مورد می تواند رقیق شدن

در سیلابزنی محلولهای پلیمری و در دراز مدت این اثر خود را به خوبی نشان می دهد. چون مولکولهای پلیمر برای ته نشینی و برای ساخت یک لایه روی دیواره محیط متخلخل، مخصوصا هنگامی که تراوایی محیط زیاد باشد، نیاز به زمان کافی دارند. هر چه تراوایی مدل بیشتر باشد این اثر خود را کمتر نشان می دهد. تاثیر ویسکوزیته سیال تزریقی بر میزان بازیافت نهایی در جدول ۴ برای یک دبی خاص، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، به ازای کاهش اندکی در ویسکوزیته سیال تزریقی شاهد افزایش بازیافت هستیم.

سیلابزنی با پلیمر پس از زمانی که مدل توسط تزریق آب به بازیافت نهایی خود رسیده است، باعث افزایش بازیافت نفت می شود. محلولهای پلیمری مورد استفاده ویسکوزیته قابل توجهی ندارند و با توجه به اینکه پس از شسته شدن مدل با آب (سیلابزنی با آب) درصد بیشتری از حجم حفرات با آب اشغال شده است، محلول پلیمری تزریقی با اختلاط با آب موجود در مدل رقیقتر شده و ویسکوزیته اش

جدول ۴- افزایش بازیافت نفت به دلیل افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی، دبی ۰/۴ میلی لیتر در ساعت.

بازده در ۰/۴ میلیلیتر بر ساعت ویسکوزیته سانتی پواز	۱	آب
	۱/۴۵	۰/۸۳/۲۰
	۱/۸	۰/۸۷/۶۲

جدول ۵- تفاوت بازیافت نهایی سیلابزنی با آب و سیلابزنی با محلول پلیمری بعد از آن در دبی ۰/۲ میلی لیتر بر ساعت

بازیافت نهایی محلول پلیمری شماره ۱	بازیافت نهایی آب	دبی
۰/۶۳/۴۰	۰/۵۷/۸۵	۰/۲ میلیلیتر بر ساعت

جدول ۶- تفاوت بازیافت نهایی سیلابزنی با آب و سیلابزنی با محلول پلیمری بعد از آن در دبی ۰/۴ میلی لیتر بر ساعت

بازیافت نهایی محلول پلیمری شماره ۱	بازیافت نهایی آب	دبی
۰/۷۴/۲۸	۰/۷۲/۲۴	۰/۴ میلیلیتر بر ساعت

جدول ۷- تفاوت بازیافت نهایی سیلابزنی با آب و سیلابزنی با محلول پلیمری بعد از آن در دبی ۰/۸ میلی لیتر بر ساعت

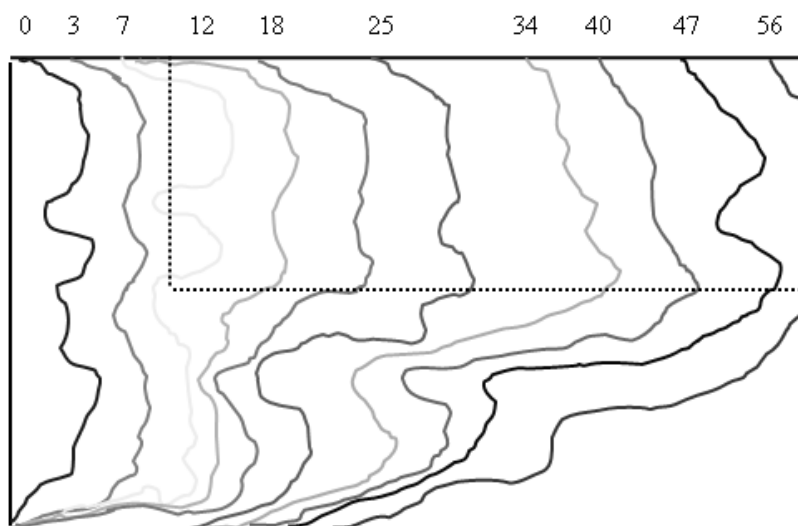
بازیافت نهایی محلول پلیمری شماره ۱	بازیافت نهایی آب	دبی
۰/۷۸/۱۸	۰/۷۸/۰۸	۰/۸ میلیلیتر بر ساعت

جدول ۸- مقایسه بازیافت نهایی دو حالت، تزریق آب و سپس محلول پلیمری تا بازیافت نهایی و تزریق محلول پلیمری به تنهایی تا بازیافت نهایی

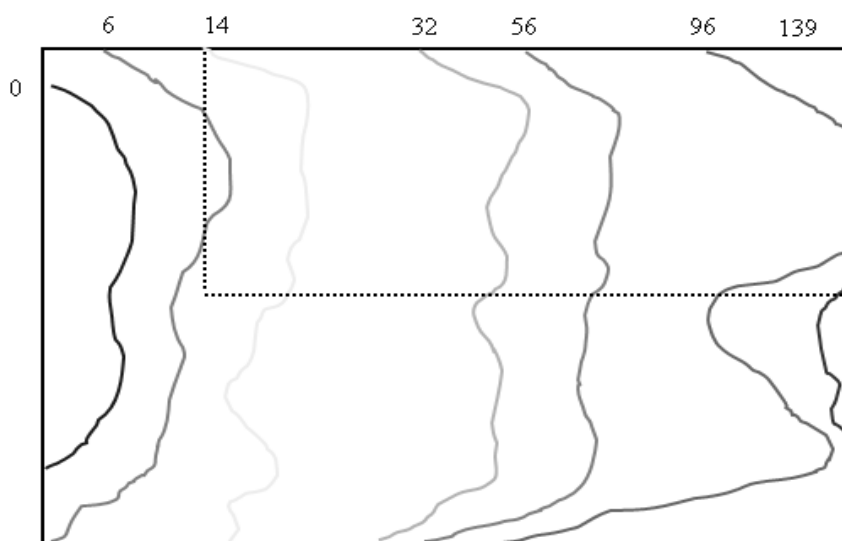
بازیافت نهایی محلول پلیمری شماره ۱ (%)	بازیافت نهایی تزریق آب و سپس تزریق محلول پلیمری شماره ۱ (%)	دبی ( میلیلیتر بر ساعت)
۸۰/۶۵	۶۳/۴۰	۰/۲
۸۳/۲۰	۷۴/۲۸	۰/۴
۸۴/۰۰	۷۸/۱۷	۰/۸

محلول پلیمری پیستون وار تر حرکت می‌کند که منجر به ازدیاد برداشت می‌شود. مورد دیگری که در این شکلها به چشم می‌آید، زمان مشاهده سیال تزریقی در خروجی (Breakthrough) می‌باشد. با وجود اینکه دبی تزریق هر دو نمونه یکسان است، تقریباً دو برابر زمان مورد نیاز برای مشاهده آب در خروجی (Breakthrough) برای مشاهده محلول پلیمری در خروجی (Breakthrough) زمان نیاز می‌باشد.

محلول پلیمری مورد استفاده در حالت اول با آب موجود در مدل (باقیمانده از سیلابزنی با آب قبلی) باشد که باعث می‌شود ویسکوزیته محلول پلیمری کاهش یابد. این موضوع در جدول ۸ آورده شده است. شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده خطوط جریان یک محلول پلیمری و آب در حین تزریق در محیط متخلخل هستند. با توجه به این دو شکل می‌توان به راحتی تفاوت نحوه حرکت دو سیال با ویسکوزیته‌های مختلف در محیط متخلخل را تشخیص داد. همانطور که مشاهده می‌شود



شکل ۴- خطوط جریانی آب در مدل افقی (اعداد نشان داده شده زمان بر حسب دقیقه هستند) دبی جریان ۰/۸ میلی لیتر بر ساعت



شکل ۵- خطوط جریانی محلول پلیمری شماره ۱ در مدل افقی (اعداد نشان داده شده زمان بر حسب دقیقه هستند) دبی جریان ۰/۸ میلی لیتر بر ساعت

## نتایج

۵- زمان رسیدن به بازیافت نهایی در کمترین دبی تزریق، یعنی  $0/2$  میلیلیتر بر ساعت، برای سیالات مختلف (آب و سپس محلول پلیمری، محلول پلیمری به تنهایی) کمترین و در نتیجه بهترین بوده است.

۶- در بازه بررسی شده ویسکوزیته سیال تزریقی، بهترین میزان بازیافت مربوط به سیال با بیشترین ویسکوزیته یعنی  $1/8$  سانتی پواز بوده است. در تمامی حالات تزریق، محلول پلیمری پس از تزریق آب در سیستم، باعث افزایش بازیافت نفت شده است. در نهایت، تفاوت اندکی در ویسکوزیته‌های سیالات تزریقی نیز باعث افزایش بازیافت خواهد بود. بیشترین مقدار افزایش ویسکوزیته در این آزمایشات  $80/$  بوده است که جوابهای قابل قبولی ارائه داده است.

۱- در آزمایشات جابجایی نفت توسط محلول پلیمری و آب شاهد افزایش میزان نفت تولیدی در حدود  $15/$  نفت در جای اولیه به خاطر افزایش دبی هستیم.

۲- در آزمایشات جابجایی نفت توسط محلول پلیمری و آب به خاطر افزایش ویسکوزیته سیالات تزریقی حدود  $1/$  تا  $17/$  متغیر است.

۳- سیلابزنی با محلول پلیمری پس از سیلابزنی با آب باعث افزایش برداشت نفت تا  $6/$  حجم نفت در جای اولیه می شود.

۴- در بازه‌های بررسی شده برای متغیرهای مختلف، بیشترین دبی تزریق سیالات مختلف (آب در هنگام خروج سیال از محیط، آب در حالت بازیافت نهایی و پلیمر در حالت بازیافت نهایی) یعنی  $8/0$  میلیلیتر بر ساعت، بیشترین بازیافت را داشته است.

## منابع:

- Asghari K. 2004: Water Permeability Reduction under Flow-Induced Polymer Adsorption, SPE 89855.
- Bondor P.L., Hirasaki G.J., Tham M.J. 1972: Mathematical Simulation of Polymer Flooding in Complex Reservoirs, SPE 3524.
- Demin W., Jiecheng C., Junzheng W., Gang W. 2002: Experiences Learned after Production more than 300 million Barrels of Oil by Polymer Flooding in Daqing Oil Field, SPE 77693.
- Green D.W., Willhite G.P. 1998: Enhanced oil Recovery, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, SPR Textbook Series Vol. 6.
- Littmann W. 1988: Polymer Flooding, Developments in Petroleum Science, Elsevier Science, Publishers BV: Amsterdam, Vol. 24.
- Treiber L.E., Yang S.H. 1986: The Nature of Polymer Plugging and a Well-bore Treatment to Minimize It, SPE 14948.
- Zaitoun A., Chauveteau G. 1998: Effect of Pore Structure and Residual Oil on Polymer Bridging Adsorption, SPE 39674.
- Zheng C.G., Gall B.L., Gao H.W., Miller A. E., Bryant R. S. 1998: Effects of Polymer Adsorption and Flow Behavior on Two-Phase Flow in Porous Media, SPE 39632.