



مطالعه آزمایشگاهی فرآیند تزریق متناوب آب و مخلوط گاز هیدروکربوری - دی اکسید کربن در یکی از مخازن نفتی ایران و شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام شده

محمد حسین بخشوری، وحید تقی‌خانی، دانشگاه صنعتی شریف

علی علیزاده، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

هم‌اکنون تزریق گاز یکی از پرکاربردترین روش‌های ازدیاد برداشت به شمار می‌رود. به طور معمول جهت افزایش سطح تماس سیالات تزریقی، گاز به طور متناوب با آب تزریق می‌شود که این فرآیند تزریق متناوب آب و گاز (WAG) نام دارد و به صورت گسترده در میدین نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پژوهش، آزمایش‌های انجام شده روی مغزه‌ها در شرایط مخزن با استفاده از دستگاه سیلاب‌زنی مغزه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های تزریق در ترکیب درصد مختلف متان در گاز تزریقی و سه نسبت تزریق ۰/۵، ۱ و ۲ انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که می‌توان نسبت تزریق بهینه را ۱:۱ انتخاب کرد. علاوه بر این با افزایش ترکیب درصد دی‌اکسید کربن در گاز تزریقی بازیافت نفت افزایش پیدا می‌کند که البته با توجه به هزینه‌بر بودن جداسازی دی‌اکسید کربن تولیدی از نیروگاه‌ها، با وجود زیاد بودن بازیافت نفت، این حالت از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. متان نیز با توجه به بازیافت کم و فشار امتزاجی زیاد شرایط مساعدی برای تأمین فشار عملیاتی تزریق نخواهد داشت. لذا با استفاده از ترکیب این دو گاز هم می‌توان از خاصیت مطلوب زیاد بودن بازیافت نفت در تزریق دی‌اکسید کربن و هم از در دسترس بودن گاز متان در سرچاه بهره برد. مدل شبیه‌ساز نیز در شرایط فوق قرار گرفته که نتایج آن تا حد قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: تزریق متناوب آب و گاز، مخلوط گاز هیدروکربوری و دی‌اکسید کربن، متان، شبیه‌سازی، مطالعه آزمایشگاهی

مقدمه

دینامیکی عوامل تأثیرگذار بر بازده میکروسکوپی هستند [۱]. شایان ذکر است که اشباع نفت باقیمانده در نواحی جاروب شده توسط گاز نسبتاً پایین است [۱]. این در حالی است که نسبت تراوایی که کنترل کننده جاروب حجمی بین فاز جابجاکننده و جابجاشونده است در مواقعی که گرانیوی فاز تزریقی کم باشد، بیشتر از یک و غیر قابل قبول خواهد بود. بازده میکروسکوپی تزریق گاز با جاروب مناسب ماکروسکوپی آب ترکیب شده و سبب افزایش تولید نفت در مقایسه با روش سیلاب‌زنی آب می‌گردد. علاوه بر آن بر اساس اعلام وزارت نفت ایران در سال ۱۳۸۶، طی سال‌های اخیر با توجه به الزامات جهانی، بازار نفت، شرایط داخلی و سهم نفت در اقتصاد کشور، اتخاذ استراتژی مناسب برای توسعه صنعت نفت کشور در سرلوحه برنامه‌های وزارت نفت قرار گرفته و لذا مطالعه و توسعه روش‌های ازدیاد برداشت بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

۱- فرآیند کنترل پویایی

بازیافت کلی در هر فرآیند ازدیاد برداشت به همان اندازه که

بیش از نیمی از نفت مخازن کشف شده پس از انجام فرآیندهای بازیافت اولیه و ثانویه در مخازن باقی می‌ماند. نفت باقیمانده در صورت استخراج می‌تواند برای سالیان متمادی به عنوان منبع انرژی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه بازیافت کامل نفت باقیمانده در مخزن بسیار مشکل است؛ ولی روش‌هایی برای افزایش بازیافت پیشنهاد شده که یکی از آنها تزریق گاز است.

به طور کلی هدف هر فرآیند ازدیاد برداشتی افزایش عدد موئینگی^۳ و ارائه نسبت پویایی^۴ کمتر از یک است. عدد موئینگی به صورت نسبت نیروهای ویسکوز بر نیروهای موئینگی و نسبت پویایی به صورت نسبت پویایی سیال جابجاکننده به پویایی سیال جابجاشونده تعریف می‌شود. بازیافت کلی هر روش ازدیاد برداشت به بازده جاروب میکروسکوپی و ماکروسکوپی آن بستگی دارد. این در حالی است که تفاوت چگالی سیالات و ناهمگنی سنگ عواملی هستند که بر بازدهی ماکروسکوپی مؤثرند و کشش سطحی و زاویه تماس

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

نخواهد شد [۳]. مهم ترین عامل در انتخاب گاز تزریقی، افزایش ضریب بازیافت آنست. باید توجه داشت که میزان گاز تزریقی تابعی از حجم فضای خالی در دسترس می باشد. دلیل محبوبیت فرآیند تزریق متناوب آب و گاز، افزایش تعداد پروژه های موفق WAG در میدین نفتی است [۴].

۲-۱- تقسیم بندی فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

برای شناخت کاربردها و جهت درک و طراحی بهینه فرآیند WAG در مقیاس مخزن، نیازمند تقسیم بندی مناسب و کارآمد هستیم. اگرچه Claudle & Dyes تزریق هم زمان آب و گاز را جهت کنترل پویایی پیشنهاد کردند [۵] ولی مطالعات انجام شده در مقیاس مخزن نشان می دهد که تزریق جدا از هم سیالات مؤثرتر خواهد بود. دلیل این امر، می تواند بهبود تزریق پذیری^۹ هنگام تزریق تنها یک سیال باشد. در حالت کلی این فرآیند به سه دسته کلی تقسیم می شود: فرآیند تزریق امتزاج پذیر، غیرامتزاجی و هیبریدی (مختلط).

۲-۲- پارامترهای مؤثر در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

مطالعات انجام شده در مورد فرآیند تزریق متناوب آب و گاز، نشان می دهد که این فرآیند در مخازن کربناته با تراوایی بسیار کم تا مخازن ماسه ای با تراوایی بسیار زیاد مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر این فرآیند عبارتند از: همگنی یا ناهمگنی^{۱۰} سنگ مخزن، خواص سنگ و سیال مخزن، تشکیل آسفالتین، ترکیب گاز تزریقی، الگوی تزریق، نسبت آب به گاز تزریقی، تراوایی نسبی و انتشار جریان. توجه به این نکته بسیار مهم است که تزریق پیوسته گاز را می توان با نسبت WAG صفر به یک معادل دانست.

نوع ترکیب گاز بیشتر از کاربرد آن به محل مخزن بستگی دارد. در دسترس بودن گاز مهم تر از محدودیت های طراحی فرآیند تزریق است. در تزریق دی اکسید کربن با محدودیت عمق و خوردگی تجهیزات روبرو هستیم. در میدین فراساحل، در دسترس بودن گاز هیدروکربنی استفاده از آن را جهت فرآیند تزریق، امکان پذیر می سازد. به عنوان مثال می توان از میدان Ekofisk نام برد که استفاده از فرآیند تزریق متناوب آب و گاز هیدروکربنی در آن بسیار مناسب بوده است [۷]. این در حالی است که در آزمایشگاه فرآیند تزریق متناوب آب و دی اکسید کربن برای این مخزن، نسبت به تزریق متناوب

به جاروب میکروسکوپیست بستگی دارد به جاروب ماکروسکوپیست نیز وابسته است. در کل نسبت پویایی کنترل کننده جاروب سطحی^۷ است. این در حالی است که جاروب عمودی^۸ مخزن توسط اختلاف چگالی سیال مخزن و سیال تزریقی کنترل می شود. جهت افزایش کارایی فرآیند تزریق گاز، جهت افزایش چند برابری گر انرژی سیال تزریقی می توان از افزایش های مثل پلیمرها استفاده کرد (برای مثال گر انرژی دی اکسید کربن را می توان از ۲ تا ۱۰۰ برابر افزایش داد). روش های دیگری نیز مانند اصلاح توده تزریقی پیشنهاد شده اند؛ مثل تزریق گاز مایع طبیعی به جای آب در مخازن نفت و یسکوز که به طور معمول بازیافت پایینی دارند. باید توجه داشت در حال حاضر چنین روش هایی در آزمایشگاه قابل انجام بوده و جهت انجام آنها در مقیاس مخزن باید این روش ها از لحاظ امکان انجام، شرایط اقتصادی، ایمنی و محیط زیستی مورد تحلیل قرار گیرند [۲].

۲-۲- فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

یکی از روش های جدید ازدیاد برداشت نفت، تزریق متناوب آب و گاز است. مطالعات انجام شده نشان می دهد که میزان متداول افزایش بازیافت نفت از یک مخزن توسط این روش بین ۵ تا ۱۰ درصد نفت در جای مخزن می باشد [۳]. در فرآیند تزریق سیال به مخزن جهت حصول نفت بیشتر، می توان گازهای مورد استفاده را به سه دسته تقسیم کرد: دی اکسید کربن، گازهای هیدروکربنی و گازهای غیرهیدروکربنی (به غیر از دی اکسید کربن). فرآیند تهیه دی اکسید کربن جهت تزریق به چاه، فرآیندی پرهزینه بوده و علاوه بر آن مشکلات عملیاتی چون خوردگی تأسیسات را نیز در پی دارد. ولی این گاز به دلیل فشار امتزاجی کم، قابل امتزاج با نفت بوده و از نظر کارایی و میزان افزایش بازده گازی مناسب است. از آنجا که گازهای هیدروکربنی در سرچاه پس از عبور از دستگاه های جداکننده مستقیماً در دسترس هستند نیز این روش مناسب ارزیابی می شود. علاوه بر این دی اکسید کربن فاقد مشکل خوردگی تأسیسات نیز هست. در این حالت می توان از ترکیب های مختلف گاز استفاده کرد. تاکنون گازهای غیرهیدروکربنی مانند نیتروژن یا گازهای حاصل از سوخت نیروگاه ها چندان برای تزریق استفاده نشده اند؛ ولی در صورت وجود منابع نیتروژن، می توان از این گاز نیز استفاده کرد؛ چرا که نیتروژن گازی بی اثر است که تقریباً هیچ واکنشی با نفت نداشته و باعث پدید آمدن ناخالصی در نفت



بیشتر از بازیافت تزریق گاز هیدروکربنی است. ولی توجه به بعد اقتصادی مسئله استفاده از دی‌اکسیدکربن را در برخی از مخازن محدود می‌کند.

توجه به این نکته ضروری است که به دلیل زیاد بودن فشار امتزاجی متان، باید فشار بسیار زیادی توسط کمپرسور تأمین شود که این امر نیز نیازمند هزینه فراوان است؛ لذا با افزودن مقداری گاز دی‌اکسیدکربن به گاز هیدروکربنی تزریقی که منجر به کاهش فشار امتزاجی می‌گردد، این مسئله نیز قابل حل است.

۴- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌ها بر روی نمونه مغزه به صورت جابجایی دینامیک انجام شده و مخلوط گاز هیدروکربنی (متان) و دی‌اکسیدکربن به عنوان گاز تزریقی مورد استفاده قرار گرفته است. فاز نفتی مورد استفاده از نمونه نفت خام میدان نفت شهر بوده و آب نمک تزریقی، آب و NaCl با غلظت ۵۰۰۰ ppm می‌باشد. این در حالی است که تعدادی پیش‌آزمایش نیز انجام شد که در آن از نیتروژن به عنوان گاز تزریقی و از کروسین به عنوان نفت استفاده شد. تمامی آزمایش‌های تزریق متناوب آب و گاز در این تجربه به صورت غیر امتزاجی بوده است. پیکره اصلی آزمایش‌ها به صورت زیر است:

- دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد و فشار ۸۰ psi
- مغزه ماسه‌سنگ ۱۰ سانتی‌متری + نمونه نفت خام نفت شهر + آب نمک (NaCl) با غلظت ۵۰۰۰ ppm
- تزریق غیرامتزاجی متان-تزریق متناوب آب و گاز
- تزریق غیرامتزاجی دی‌اکسیدکربن-تزریق متناوب آب و گاز
- تزریق غیرامتزاجی مخلوط متان و دی‌اکسیدکربن-تزریق متناوب آب و گاز

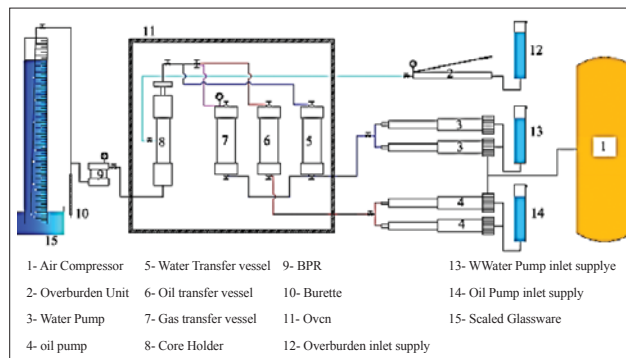
۴-۱- دستگاه سیلاب‌زنی

برای ایجاد شرایط مشابه شرایط مخزن از دستگاه سیلاب‌زنی فشار بالا استفاده شد. این دستگاه دارای قابلیت ایجاد و کنترل فشار و دما به طور پیوسته در طول آزمایش است. علاوه بر این قادر است اختلاف فشار دو سر نمونه مغزه، نرخ جریان ورودی و میزان سیال تزریقی را نیز ثبت کند. تصویری ساده از دستگاه مورد استفاده در شکل ۱- نشان داده شده است. این دستگاه از دو جفت پمپ تزریقی Quizix ۵۲۰۰ فشار بالا که قبلاً کالیبره شده‌اند تشکیل شده است. یک جفت از این

آب و گاز هیدروکربنی بازده بهتری داشته است [۸]. نسبت آب به گاز تزریقی بهینه، بستگی به ترشوندگی سنگ دارد. در هر حال نسبت ۱:۱ پر استفاده‌ترین حالت تزریق متناوب آب و گاز در صنعت است که هم‌اکنون استفاده می‌شود. زیاد بودن نسبت آب به گاز تزریقی تأثیر به‌سزایی در بازیافت مخازن نفتی آب‌دوست دارد. نسبت آب به گاز بهینه در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز به اندازه توده گاز تزریقی بستگی دارد. با تزریق توده‌هایی به اندازه ۶۰ درصد فضای خالی در دسترس (۰/۶PV)، بازده بسیار زیاد خواهد بود. این در حالی است که تزریق توده به اندازه ۲۰ درصد فضای خالی در دسترس (۰/۲PV)، بسیار اقتصادی‌تر است [۹]. برای سنگ‌های نفت‌دوست نسبت آب به گاز ۱:۰ (تزریق پیوسته گاز) و برای سنگ‌های نسبتاً نفت‌دوست ۱:۱ نسبت آب و گاز ۱:۱، جهت تزریق متناوب آب و گاز توصیه می‌شود [۹].

۳- اهمیت استفاده از مخلوط گاز هیدروکربنی و دی‌اکسیدکربن به عنوان گاز تزریقی

اگرچه در حال حاضر تزریق دی‌اکسیدکربن جهت بهبود ضریب بازیافت نفت روش مهم و پرکاربردی است ولی وجود گازهای هیدروکربنی حاصل از مخزن در محل بهره‌برداری، استفاده از این گازها را اقتصادی‌تر می‌کند. این امر در میداین فراساحلی که انتقال دی‌اکسیدکربن از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست بیشتر کاربرد دارد. لذا در دسترس بودن گاز هیدروکربنی و خوردگی زیاد دی‌اکسیدکربن در تجهیزات ذخیره‌سازی گاز و بهره‌برداری از مخزن، استفاده از گاز هیدروکربنی یا مخلوط آن با دی‌اکسیدکربن را (جهت افزایش بازیافت نفت) منطقی‌تر خواهد کرد. این در حالی است که بازیافت تزریق دی‌اکسیدکربن در کارهای آزمایشگاهی



نمای کلی دستگاه سه‌فازی (دستگاه سیلاب‌زنی)

تراوایی سنگ مغزه، سیلاب‌زنی نفت جهت دست یافتن به اشباع آب ذاتی^{۱۴} و انجام آزمایش‌های مطلوب تشکیل شده‌اند. پس از شستن و خشک کردن نمونه سنگ مغزه، جهت یافتن فضاهای خالی و تخلخل و تراوایی آن، نمونه توسط آب نمک اشباع می‌شود. سپس مغزه با تزریق نفت در نرخ‌های جریان کم (۰/۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه) و با اعمال حجم فضاهای مرده لوله‌ها و حجم داخل مغزه نگهدار در محاسبات، به اشباع آب ذاتی می‌رسد.

۴-۲-۱- اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی

قبل از آغاز اندازه‌گیری تراوایی، مغزه باید از آب نمک تزریقی اشباع شده باشد. برای این منظور از هر دو سوی مغزه نگهدار توسط پمپ خلاء به مدت ۲ ساعت و در کل ۴ ساعت خلاء ایجاد شده و مغزه به راحتی توسط آب نمک اشباع می‌گردد. مقدار خلاء ایجاد شده توسط پمپ خلاء برای آزمایش‌های انجام شده در حدود ۱۰ psi بوده است. پس از اشباع مغزه از آب، با توجه به در دست بودن حجم کلی مغزه و مقدار آب وارد شده به آن جهت اشباع کامل، می‌توان با تقسیم حجم آب ورودی به مغزه بر حجم کل مغزه، مقدار تخلخل مؤثر مغزه را اندازه‌گیری کرد.

اندازه‌گیری تراوایی بدین ترتیب است که ابتدا سیلندر تزریق از آب نمک ۵۰۰۰۰ ppm پر شده و با نرخ‌های جریان مختلف داخل مغزه تزریق می‌شود. تزریق آب نمک در نرخ‌های جریان مختلف (۰/۰۵ تا ۰/۴ میلی‌لیتر بر دقیقه) تا جایی ادامه پیدا می‌کند که افت فشار اندازه‌گیری شده به ثبات رسیده و تغییری در مقدار آن مشاهده نشود. افت فشار در هر نرخ جریان تزریقی اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. نرخ‌های جریان مختلف و افت فشارهای منتسب به آنها با استفاده از قانون داریسی جهت محاسبه تراوایی به کار می‌روند:

$$K = \frac{q_{ul}}{A \Delta p} \quad (1)$$

۴-۲-۲- تعیین اشباع آب ذاتی

سیلندر تزریق، از نمونه نفت‌خام پر شده و توسط پمپ به درون مغزه تزریق می‌گردد. حدود ۲ تا ۳ روز زمان جهت دست یافتن به مقدار دقیق اشباع آب ذاتی مورد نیاز است؛ لذا این مرحله وقت‌گیرترین مرحله کار آزمایشگاهی است.

ابتدا مغزه در شرایط دما و فشار مخزن توسط نفت تا ۲PV

پمپ‌ها جهت تزریق نفت و جفت دیگر بسته به نوع آزمایش جهت تزریق آب یا گاز با نرخ‌های جریان مورد نیاز استفاده می‌شوند. تزریق این پمپ‌ها به زیر پیستون متحرک استوانه تزریق^{۱۵} انجام می‌گردد. قبل از شروع آزمایش این استوانه‌های تزریق بسته به شرایط آزمایش باید از نفت، گاز یا آب جهت تزریق به مغزه پر شوند.

لوله‌ها با قطر $\frac{1}{8}$ اینچ و خطوط انتقال جریان سیال از جنس فولاد زنگ‌نزن است. جریان از داخل این خطوط وارد یک پخش‌کننده و از آنجا وارد مغزه شده و جریان خروجی از مغزه به یک شیر فشار شکن^{۱۶} وارد می‌گردد. این در حقیقت همان فشار خروجی سیستم است. برای نگهداری سنگ مغزه و اعمال جریان سیال تحت شرایط مورد نظر از یک غلاف لاستیکی استفاده شده است؛ به این ترتیب که نمونه سنگ داخل این غلاف قرار می‌گیرد و غلاف داخل نگهدارنده قرار داده شده و به نحوی که ورودی و خروجی نگهدارنده بر دو سر مغزه منطبق باشد بسته می‌شود. سیال مورد نظر برای ایجاد فشار سرباره در این آزمایش‌ها آب بوده و فشاری برابر با ۷۵۰ psi را تأمین می‌کند. لازم به ذکر است سیستم تأمین فشار سرباره توسط پمپ دستی ایجاد شده است. قطر داخلی این غلاف معادل قطر خارجی مغزه و حدوداً برابر ۳۸ میلی‌متر است. شکل ۲- مغزه و غلاف لاستیکی را نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- مراحل انجام کار

تمامی آزمایش‌ها از مراحل شستشو و خشک کردن مغزه، اشباع توسط آب نمک، تعیین حجم خالی مغزه و تخلخل، تعیین



شکل ۲ | مغزه و غلاف لاستیکی



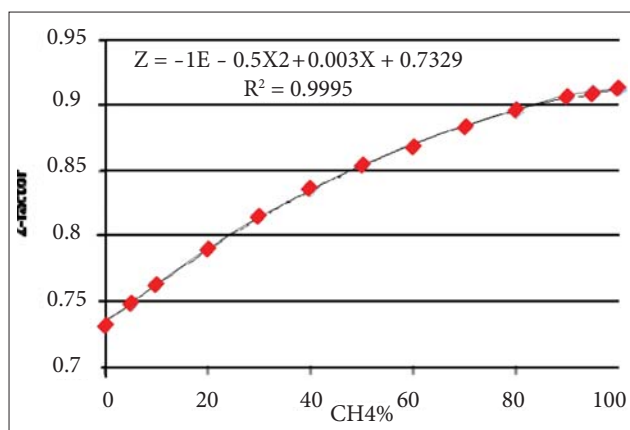
مراحل زیر پیش رو خواهند بود:

■ اندازه لخته‌های تزریقی حدود ۱۰ درصد حجم فضاهای خالی است؛ بدین معنی که در نسبت آب به گاز برابر یک، حجم لخته تزریقی گاز با حجم لخته آب تزریقی برابر می‌باشد. در نسبت‌های دیگر مانند نسبت آب به گاز برابر دو، حجم هر لخته آب تزریقی دو برابر حجم لخته گاز تزریقی است. به عبارت دیگر هر لخته آب ۲۰ درصد و هر لخته گاز ۱۰ درصد حجم فضاهای خالی مغزه می‌باشد.

■ تزریق گاز و آب هر دو باید در فشار ثابت و یکسانی انجام پذیرد. ثابت و یکسان بودن فشار در تزریق بسیار حائز اهمیت است. برای نیل به این هدف تزریق به سیلندر آب و گاز توسط پمپ مشترک انجام می‌گیرد و ورودی سیلندرها با شیر یک‌طرفه به همدیگر متصل می‌شوند.

■ پس از ثابت شدن فشار در سیلندر گاز و آب، تزریق انجام می‌شود.

| واحد | مقدار | پارامتر |
|-------------------|------------|------------------------------|
| °F | ۱۱۶ | دمای مخزن |
| SCF/STB | ۶۵۵/۸۷ | نسبت گاز محلول در نفت |
| Rbbl/STB | ۱/۳۶۱۸ | ضریب حجمی نفت |
| psig | ۱۰۷۳ | فشار اشباع (نقطه حباب) |
| cp | ۰/۴۸۷۷ | گرانروی سیال مخزن |
| g/cc | ۰/۶۸۸۷ | چگالی نفت مخزن در فشار اشباع |
| °API | ۴۱/۴۶ | درجه سبکی نفت |
| psi ^{-۱} | ۰/۰۰۰۰۱۰۰۹ | ضریب انبساط حجمی |



شکل ۳ ضریب تراکم‌پذیری بر حسب ترکیب در صد متان موجود در گاز تزریقی

سیلاب‌زنی می‌شود. در آغاز کار جهت جلوگیری از نفوذ سریع نفت تزریقی در مغزه، تزریق نفت با نرخ جریان ۰/۰۲ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام می‌پذیرد و پس از مشاهده تولید نفت، نرخ جریان تزریق نفت تا حدود ۲ میلی‌لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد. حجم نفت و آب نمک تولیدی در اثر تزریق اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. پس از تزریق حدود ۲PV و زمانی که دیگر آبی تولید نگردد تزریق متوقف شده و در نهایت با استفاده از موازنه جرم، اشباع آب ذاتی مغزه محاسبه می‌شود.

۴-۲-۳- محاسبه نرخ جریان بحرانی تزریق

برای اطمینان از وجود جریان آرام در مغزه، حداکثر نرخ جریان تزریقی آب با استفاده از عدد رینولدز در محیط متخلخل تعیین گردید:

$$N_{Re} = \frac{10p V \sqrt{K}}{\phi^{2.2} \mu} \quad (2)$$

با توجه به اینکه برای جریان آرام در محیط متخلخل عدد رینولدز باید کمتر از یک باشد خواهیم داشت:

$$V_c = \frac{0.1 \phi^{2.2} \mu}{\rho \sqrt{K}} \quad (3)$$

و بنابراین:

$$Q_c = \frac{0.07854 \phi^{2.2} \mu d^2}{\rho \sqrt{K}} \quad (4)$$

در معادلات فوق K تراوایی مغزه (سانتی‌متر مربع)، V_c و Q_c و نرخ جریان و سرعت بحرانی و سرعت پیشروی سیال (به ترتیب با واحدهای میلی‌لیتر بر ثانیه و سانتی‌متر بر ثانیه)، μ ویسکوزیته (پویز) و p و d به ترتیب قطر مغزه و چگالی سیال تزریقی (سانتی‌متر و گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشند [۱۰]. تخلخل سنگ مورد آزمایش حدود ۲۷ درصد و تراوایی ۵/۵ میلی‌داریسی بود و بر اساس آن نرخ جریان بحرانی تزریق معادل ۱۰۸ میلی‌لیتر بر دقیقه خواهد بود. لذا به منظور حصول اطمینان، نرخ جریان تزریق ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه انتخاب شد.

۴-۲-۴- مراحل تزریق متناوب آب و گاز

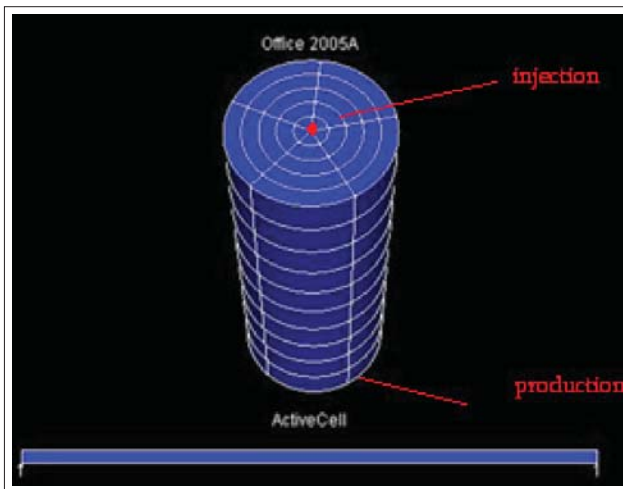
پس از حصول اطمینان از نرخ جریان تزریقی بحرانی و انتخاب نرخ جریان تزریق مناسب، در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

$$\frac{P_{mix}}{Z_{mix} n_{mix}} = \frac{P_{CH_4}}{Z_{CH_4} n_{CH_4}} \quad (6)$$

در این رابطه فشار، تعداد مول و ضریب تراکم پذیری متان خالص مشخص است. فشار مخلوط چیزی است که بسته به نیاز توسط کاربر تعیین و ثابت می شود. ضریب تراکم پذیری مخلوط از نمودار شکل ۳- و تعداد مول های آن از رابطه ۶- محاسبه می گردد. با محاسبه تعداد مول های مخلوط و تقسیم مول های متان بر آن، ترکیب درصد متان در شرایط فشار و دمای مورد نظر تعیین می شود. این روش درصد متان را بر اساس فشار تعیین می کند؛ لذا جهت دست یافتن به ترکیب درصد مورد نظر باید از روش حدس و خطا در فشار مربوط به متان خالص استفاده شود. با تعیین فشار مورد نظر برای متان خالص و پر کردن سیلندر با متان تا آن فشار و مشخص بودن فشار مخلوط که قبلاً تعیین و ثابت شده، دی اکسید کربن وارد سیلندر شده و فشار مخلوط تا فشار مورد نظر افزایش می یابد. در این حالت ترکیب درصد درون سیلندر ترکیب درصد مورد نظر خواهد بود.

۵- ساخت مدل شبیه ساز

جهت مدل سازی نتایج آزمایشگاهی در مقیاس مغزه، ابتدا تعریف سیال مخزن و مغزه و سپس شبیه سازی آزمایش ها انجام می شود. برای تعریف سیال از نرم افزار PVTi و برای شبیه سازی فرآیند WAG از ECLIPSE300 استفاده شده است. بر اساس آخرین اطلاعات کسب شده مشخصات فیزیکی سیال مخزن در میدان نفت شهر در جدول ۱ ارائه شده است.



شبکه بندی و محل چاه های مغزه مورد آزمایش

- آب، نفت و گاز تولیدی اندازه گیری و ثبت می شوند.
- بازیافت نفت در هر لخته تزریقی محاسبه می شود.
- بازیافت نهایی نفت محاسبه می شود.

۴-۲-۵- تعیین ترکیب درصد گاز تزریقی

جهت تعیین ترکیب درصد متان و دی اکسید کربن در گاز تزریقی از رابطه گازهای حقیقی استفاده شد و ضریب تراکم پذیری برای حالات مخلوط با استفاده از نرم افزار CMG محاسبه و رسم گردید شکل ۳- نمودار ذکر شده و معادله آنرا نشان می دهد. برای این کار ابتدا فشاری برای تزریق متان خالص به استوانه تزریق تعیین کرده و با توجه به مشخص بودن حجم استوانه، تعداد مول های متان موجود در سیلندر را با استفاده از رابطه ۵- محاسبه می شود:

$$P_{CH_4} V_{cylinder} = Z_{CH_4} n_{CH_4} RT \quad (5)$$

حال با توجه به اینکه دما ثابت در نظر گرفته می شود. برای محاسبه تعداد مول های مخلوط از رابطه ۶- استفاده می شود:

| نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه ساز | پارامتر |
|---------------------------------|-------------------------------|
| ۲۷ | تخلخل (درصد) |
| ماسه ای محکم | نوع مغزه |
| ۵/۵۵ | تراوایی متوسط (md) |
| ۱۰ | طول (cm) |
| ۳/۸۱ | قطر (cm) |
| ۱۰ | فاصله چاه ها (cm) |
| ۴۱/۴۶ | درجه سبکی نفت API |
| ۳۰ | اشباع آب (درصد) |
| ۱۱۶ | دما (فارنهایت) |
| ۸۰۰ | فشار شیر فشار شکن BPR (psi) |
| ۰/۵ | نرخ تزریق آب (ثابت) (cc/min) |
| ۰/۵ | نرخ تزریق گاز (ثابت) (cc/min) |
| ۲ | حجم هر slug در نسبت ۱:۱ (cc) |



نمونه مغزه‌های متعدد، امکان استفاده از مغزه‌های جدید وجود نداشت و لذا پس از هر آزمایش، اقدامات لازم جهت شستشو و آماده‌سازی مغزه برای آزمایش‌های دیگر انجام می‌شد. همچنین لازم به ذکر است زمان شستشوی مغزه در تولوئن و الکل در دمای بالا حدوداً ۲۰ ساعت بوده است. مشکل عمده‌ای که در این روند وجود دارد امکان تغییر ترشوندگی نمونه سنگ در هر بار آزمایش است. ضمن اینکه برای اطمینان هر چه بیشتر، هر آزمایش سه بار تکرار شده و نتایج میانگین گزارش شده‌اند.

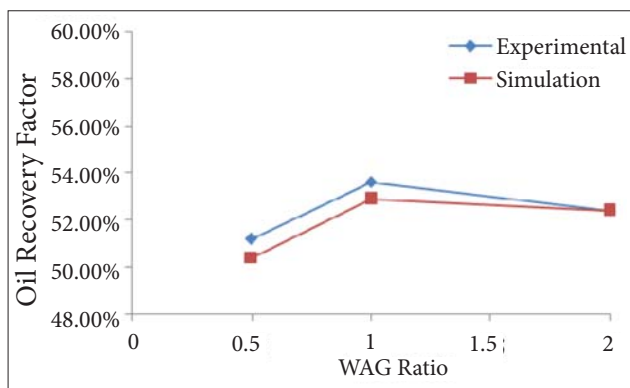
۶-۱- تأثیر تغییر نسبت تزریق

آزمایش‌های این بخش در نرخ جریان تزریقی ثابت برابر ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام شده‌اند. جهت بررسی تأثیر تغییر نسبت تزریق، ترکیب درصد گاز تزریقی و نرخ جریان ثابت در نظر گرفته می‌شوند. گاز تزریقی شامل ۵۰ درصد مولی دی‌اکسید کربن و ۵۰ درصد مولی متان است. آزمایش‌ها در سه نسبت مختلف آب به گاز ۱، ۲ و ۵/۰ انجام

۶-۲ نتایج آزمایشگاهی و بحث

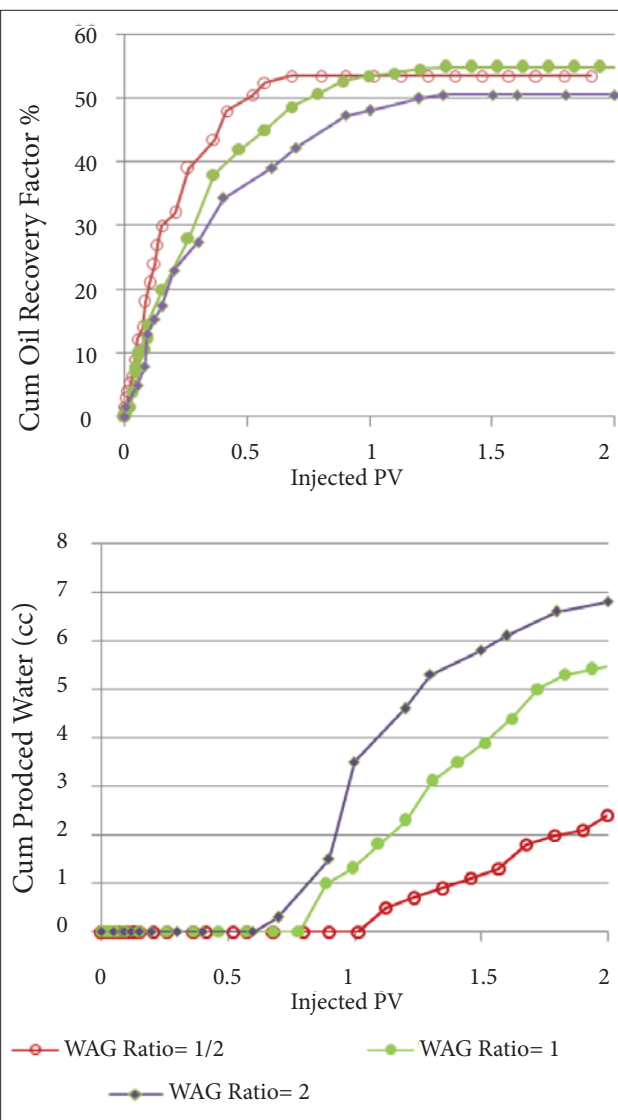
اشاره به این نکته ضروری می‌نماید که به دلیل در دسترس نبودن

| تأثیر تغییر نسبت تزریق بر بازیافت نفت | | | |
|---------------------------------------|------|------|---|
| مقادیر در نسبت‌های مختلف | | | پارامتر |
| ۲ | ۱ | ۱۰۲ | نسبت تزریق (آب به نفت) |
| ۲۹ | ۳۰ | ۳۰ | اشباع آب ذاتی (%) |
| ۰/۶۶ | ۱ | ۱/۳۳ | گاز تزریقی (PV) |
| ۱/۳۳ | ۱ | ۰/۶۶ | آب تزریقی (PV) |
| ۰/۶۶ | ۰/۵۰ | ۰/۲۲ | WOR تجمعی (cm ³ /cm ³) |
| ۵۱/۸ | ۵۲/۹ | ۵۰/۴ | بازیافت نفت (آزمایشگاهی) (%) |
| ۵۲/۴ | ۵۳/۶ | ۵۱/۲ | بازیافت نفت (شبیه سازی) (%) |



شکل ۶ | بازیافت نفت و نسبت آب به گاز

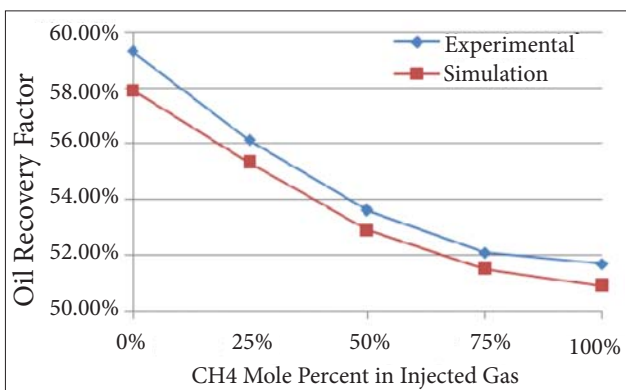
با توجه به در دسترس بودن تراوایی (۵/۵ میلی‌داریسی)، تخلخل (۲۷ درصد) و اشباع آب در نمونه مغزه، مدل‌سازی مغزه انجام می‌شود (جدول-۲). جهت مدل‌سازی ابتدا مغزه شبکه‌بندی شد و سپس اطلاعات جدول اشباع به عنوان ورودی در برنامه استفاده گردید. مغزه به صورت نمونه استوانه‌ای به تعداد ۵×۵×۱۰ شبکه (در جهت شعاعی و زاویه‌ای تعداد ۵ و در جهت طولی تعداد ۱۰ شبکه) مدل‌سازی شد (شکل-۴).



شکل ۵ | تأثیر تغییر نسبت تزریق بر بازیافت نفت و آب تولیدی

شده‌اند و بازیافت نفت در هر حالت تزریق ثبت شده است. شکل-۵ نتایج کلی حاصل از این بخش آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت تزریق از یک به دو و با کاهش آن از یک به نیم بازیافت نفت کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در جاروب‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی سیالات تزریقی دانست. برای نسبت‌های بالای تزریق آب به گاز، فرآیند تزریق متناوب آب و گاز بازده جاروب میکروسکوپی پایینی خواهد داشت که این مطلب سبب کاهش بازیافت نهایی نفت می‌گردد. علاوه بر این، کاهش نسبت تزریق نیز باعث کم‌شدن جاروب ماکروسکوپی می‌شود. لذا با چنین توصیفی باید نسبت تزریق آب به گاز در نسبت خاصی بهینه شود. در این آزمایش‌ها نسبت ۱:۱ بازده بیشتری داشته و لذا به عنوان نسبت بهینه در نظر گرفته می‌شود. قابل ذکر است در صنعت نسبت تزریق ۱:۱ به عنوان پرکاربردترین نسبت تزریق متناوب آب و گاز شناخته شده است. هم‌چنین با افزایش نسبت تزریق آب به گاز، آب به دلیل افزایش حجمش در داخل مغزه، زودتر به زمان میان‌شکافت می‌رسد. جدول-۳ نتایج کلی حاصل از تغییر نسبت تزریق را نشان می‌دهد.

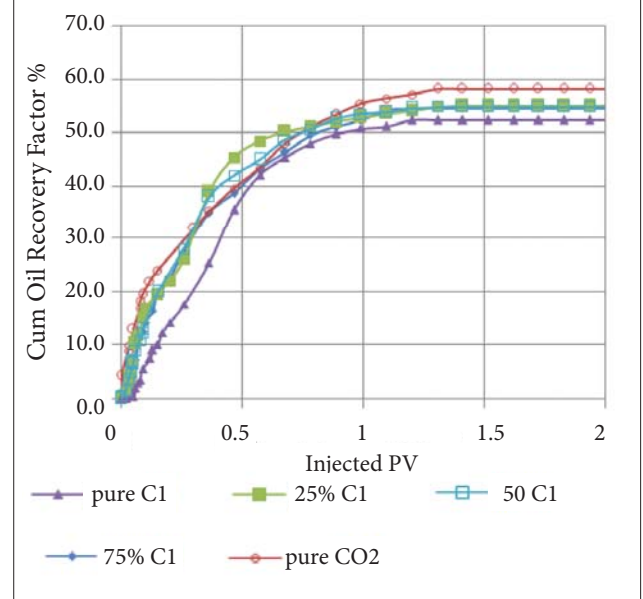
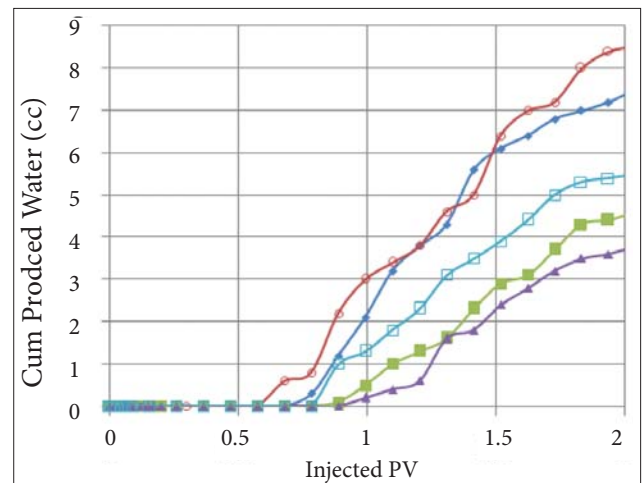
شکل-۶ به وضوح نشان می‌دهد که در نسبت تزریق ۱:۱، بازده بیشتر از نسبت‌های دیگر مورد آزمایش بوده است. در نسبت تزریق آب به گاز ۲، میان‌شکافت زودتر از نسبت‌های دیگر مشاهده می‌شود و با کاهش نسبت آب به گاز، در نسبت‌های کم و به دلیل کاهش حجم آب تزریقی، میان‌شکافت آب دیرتر رویت می‌شود. با افزایش مقدار گاز تزریقی (نسبت ۵/۱) اشباع گاز در مغزه افزایش یافته و پدیده کانالیزه شدن اتفاق می‌افتد. لذا با وجود زیاد بودن بازیافت نفت در زمان‌های اولیه تزریق (حجم‌های ابتدایی) در مقایسه با نسبت



شکل ۸ | بازیافت نفت بر حسب ترکیب در صد متان گاز تزریقی

شکل ۴ | تاثیر تغییر ترکیب گاز تزریقی بر بازیافت نفت

| مقادیر در ترکیب‌های مختلف گاز | | | | | پارامتر |
|-------------------------------|------|------|------|------|------------------------------|
| ۰ | ۲۵ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۰۰ | درصد متان در گاز تزریقی |
| ۳۰ | ۲۹ | ۳۰ | ۲۹ | ۲۹ | اشباع آب ذاتی (%) |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | گاز تزریقی (PV) |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | آب تزریقی (PV) |
| ۰/۷۶ | ۰/۶۵ | ۰/۵ | ۰/۴۱ | ۰/۳۵ | WOR تجمعی (cm3/cm3) |
| ۵۷/۹ | ۵۵/۳ | ۵۲/۹ | ۵۱/۵ | ۵۰/۹ | بازیافت نفت (آزمایشگاهی) (%) |
| ۵۹/۳ | ۵۶/۱ | ۵۳/۶ | ۵۲/۱ | ۵۱/۷ | بازیافت نفت (شبیه‌سازی) (%) |



شکل ۷ | تاثیر تغییر ترکیب گاز تزریقی بر بازیافت نفت و آب تولیدی

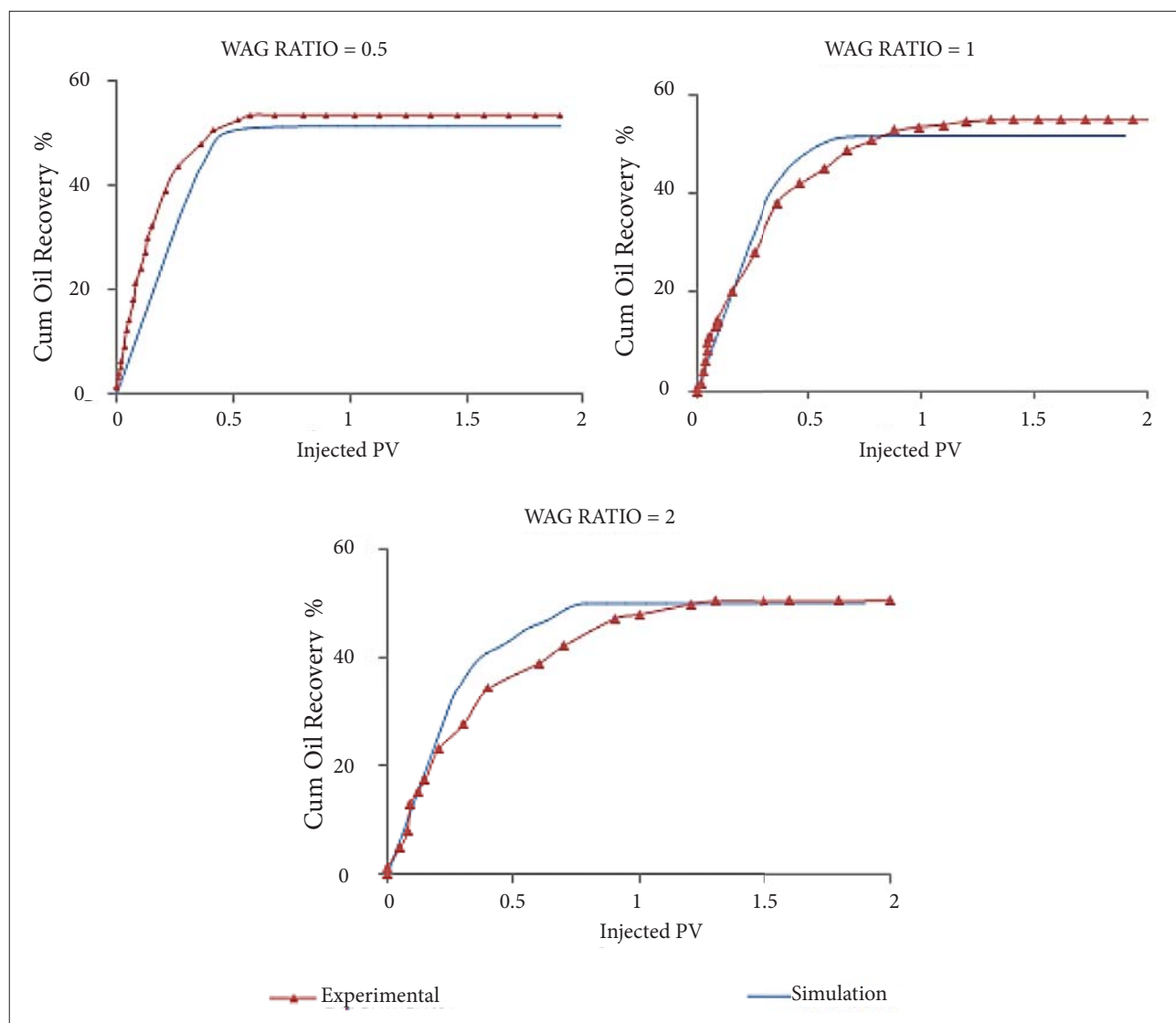


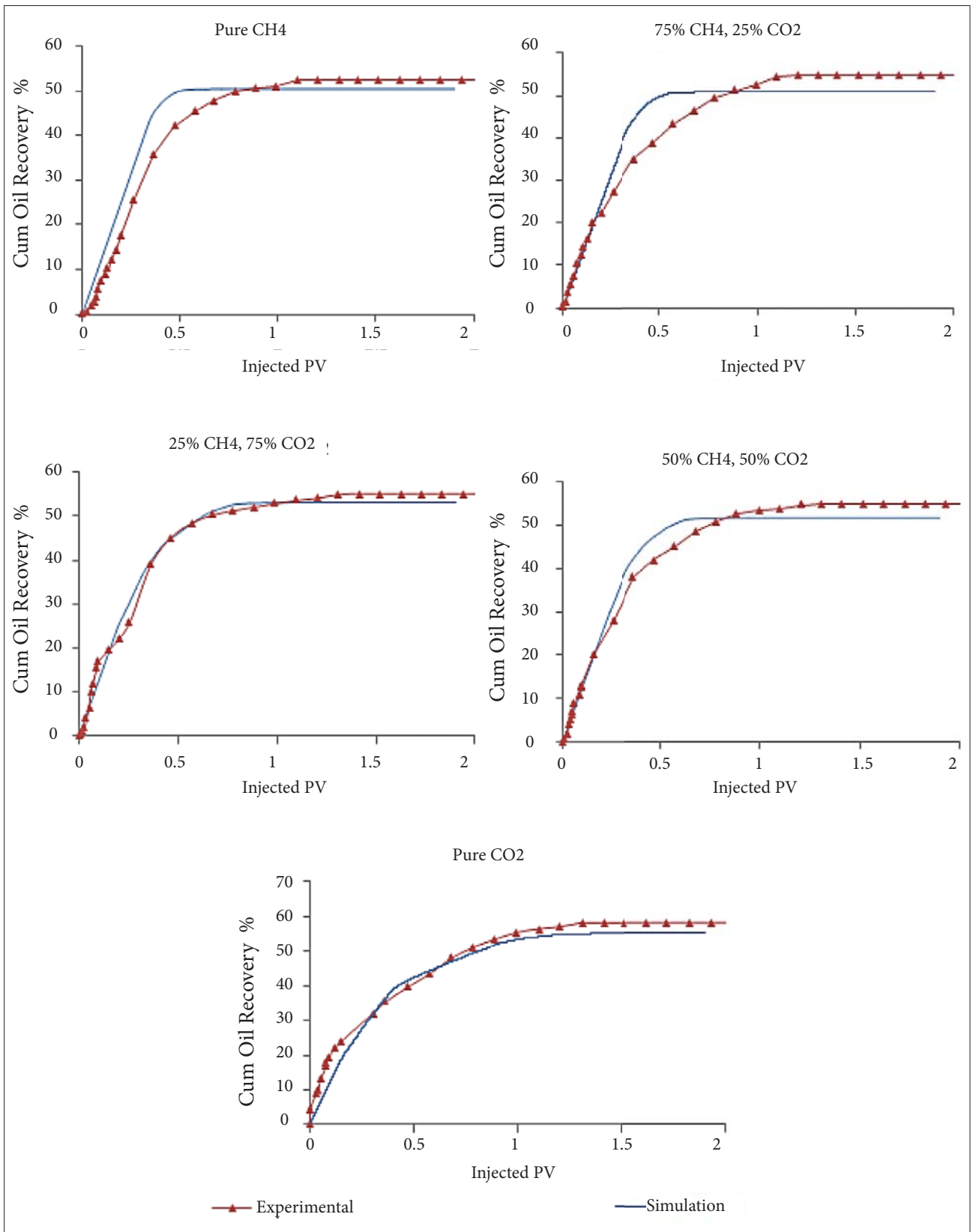
۱:۱، بازیافت نهایی نفت کمتر می شود.

۲-۶- تأثیر تغییر ترکیب گاز تزریقی

این بخش از آزمایش ها جهت بررسی اثر تغییر ترکیب گاز تزریقی بر بازیافت نفت طراحی شده است. گاز تزریقی مورد استفاده ترکیبات مختلف متان (به عنوان گاز هیدروکربنی) و دی اکسید کربن می باشد. نمودارهای شکل ۷-۷ تولید نفت و آب را با تغییر ترکیب گاز تزریقی نشان می دهد. جدول ۴-۴ نیز نتایج کلی حاصل از آزمایش را نشان می دهد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش ها به وضوح مشاهده می شود که با افزایش ترکیب درصد متان موجود در گاز تزریقی بازیافت نفت کاهش می یابد. البته توجه به این نکته الزامی است که کاهش بازیافت روند خطی ندارد. با توجه به نمودار شکل ۸-۸ بازده تزریق متناوب آب و گاز حین تزریق دی اکسید کربن بیشترین و حین تزریق متان کمترین بازیافت را در پی دارد. با توجه به اینکه دی اکسید کربن در آب محلول است لذا حجم آب موجود در مغزه با افزایش مقدار دی اکسید کربن تزریقی افزایش می یابد. (آب منبسط می شود). لذا آب تجمعی تولیدی با افزایش







امتزاجی متان فشار عملیاتی بسیار بالایی برای کمپرسور نیاز است تا بازیافت مورد نظر حاصل شود. لذا افزودن درصدی دی اکسید کربن به متان جهت پایین آوردن فشار مورد نیاز عملیاتی کمپرسور، می تواند از عوامل دیگر ارجحیت استفاده از این مخلوط باشد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی این مورد با جزئیات بیشتر در شکل های - ۹ و ۱۰ نشان داده شده اند. جدول - ۵ نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی بازیافت نفت در نسبت تزریق ۱:۱ و درصد گاز تزریقی ۵۰ درصدی دی اکسید کربن و ۵۰ درصدی متان را نشان می دهد.

نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایش های تزریق متناوب آب و گاز بر روی نمونه مغزه تهیه شده انجام گردید. آزمایش ها با ترکیبات مختلف متان و دی اکسید کربن، نمونه نفتی شهر و نمونه مغزه ماسه سنگ انجام شد. این آزمایش ها جهت بررسی اثر تغییرات ترکیب گاز تزریقی و نسبت تزریق آب به گاز تزریقی بر بازیافت نفت در شرایط غیر امتزاجی انجام

مقدار دی اکسید کربن در گاز تزریقی افزایش می یابد.

در هر ترکیب ثابت متان و دی اکسید کربن در PV های تزریقی زیاد، تولید جمعی آب با نرخ کمتری افزایش می یابد. زیرا پس از افزایش حجم گاز تزریقی در مغزه در PV های زیاد، پدیده کانالیزه شدن بین گاز و آب اتفاق افتاده و گاز با حجم بیشتری تولید شده و باعث کاهش نسبی حجم آب تولیدی می گردد.

با توجه به اینکه با وجود زیاد بودن بازیافت نفت، مقدار آب تولیدی در هنگام تزریق دی اکسید کربن مقدار قابل توجهی است، هزینه های جداسازی آب از نفت را افزایش می دهد. از سوی دیگر تزریق متان با وجود تولید آب کمتر نفت بازیافتی کمتری نیز دارد که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. لذا استفاده از ترکیبات دی اکسید کربن و گاز متان به عنوان گاز تزریقی که هم نسبت به تزریق دی اکسید کربن به تنهایی، تولید آب کمتری دارد و هم نسبت به تزریق متان به تنهایی، بازیافت بیشتری دارند توصیه می شود. علاوه بر این با توجه به وجود متان در میدان و سرچاه و بالا بودن فشار

۵ | مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی بازیافت نفت در نسبت تزریق ۱:۱ و درصد گاز تزریقی ۵۰ درصد دی اکسید کربن و ۵۰ درصد متان

| نتایج شبیه سازی | | | | نتایج آزمایشگاهی | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| ضریب بازیافت نفت % | PV تزریقی | ضریب بازیافت نفت % | PV تزریقی | ضریب بازیافت نفت % | PV تزریقی | ضریب بازیافت نفت % | PV تزریقی |
| ۵۳/۶ | ۰/۷ | ۱/۲ | ۰/۰۱ | ۴۷/۰ | ۰/۷ | ۰/۵ | ۰/۰۱ |
| ۵۳/۶ | ۰/۸ | ۲/۵ | ۰/۰۲ | ۵۰/۳ | ۰/۸ | ۱/۶ | ۰/۰۲ |
| ۵۳/۶ | ۰/۹ | ۳/۸ | ۰/۰۳ | ۵۱/۴ | ۰/۹ | ۳/۸ | ۰/۰۳ |
| ۵۳/۶ | ۱ | ۵/۰ | ۰/۰۴ | ۵۲/۰ | ۱ | ۶/۰ | ۰/۰۴ |
| ۵۳/۶ | ۱/۱ | ۶/۳ | ۰/۰۵ | ۵۲/۵ | ۱/۱ | ۸/۰ | ۰/۰۵ |
| ۵۳/۶ | ۱/۲ | ۷/۵ | ۰/۰۶ | ۵۲/۹ | ۱/۲ | ۹/۷ | ۰/۰۶ |
| ۵۳/۶ | ۱/۳ | ۸/۸۵ | ۰/۰۷ | ۵۲/۹ | ۱/۳ | ۱۱/۰ | ۰/۰۷ |
| ۵۳/۶ | ۱/۴ | ۱۰/۱ | ۰/۰۸ | ۵۲/۹ | ۱/۴ | ۱۳/۰ | ۰/۰۸ |
| ۵۳/۶ | ۱/۵ | ۱۱/۴ | ۰/۰۹ | ۵۲/۹ | ۱/۵ | ۱۴/۰ | ۰/۰۹ |
| ۵۳/۶ | ۱/۶ | ۱۲/۶ | ۰/۱ | ۵۲/۹ | ۱/۶ | ۱۴/۵ | ۰/۱ |
| ۵۳/۶ | ۱/۷ | ۲۵/۳۳ | ۰/۲ | ۵۲/۹ | ۱/۷ | ۲۰/۰ | ۰/۲ |
| ۵۳/۶ | ۱/۸ | ۳۶/۹۸ | ۰/۳ | ۵۲/۹ | ۱/۸ | ۲۸/۰ | ۰/۳ |
| ۵۳/۶ | ۱/۹ | ۴۶/۳۹ | ۰/۴ | ۵۲/۹ | ۱/۹ | ۳۸/۰ | ۰/۴ |
| ۵۳/۶ | ۲/۰ | ۵۰/۴ | ۰/۵ | ۵۲/۹ | ۲/۰ | ۴۲/۰ | ۰/۵ |
| | | ۵۲/۸ | ۰/۶ | | | ۴۵/۰ | ۰/۶ |

- شده است. ترکیبات مختلف متان و دی اکسید کربن به عنوان گاز تزریقی و تغییر نسبت تزریق از ۰/۵ تا ۲ جهت یافتن نسبت تزریق بهینه مورد استفاد قرار گرفت. با توجه به انطباق قابل قبول نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی، آنالیز حساسیت روی متغیرها انجام شد.
- نتیجه گیری های کلی حاصل از آزمایش ها و شبیه سازی های انجام شده به شرح زیر می باشد:
- افزایش نسبت تزریق آب به گاز در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز روند یکسانی در بازیافت نخواهد داشت. به عبارت دیگر بسته به نوع سنگ و سیال تزریقی همواره یک نسبت تزریق بهینه پدید می آید. در آزمایش های گروه دوم نسبت تزریق بهینه برابر یک و در آزمایش های گروه نخست این نسبت برابر دو بود.
 - با افزایش ترکیب درصد متان در گاز تزریقی (با ترکیب دی اکسید کربن + متان) بازیافت نفت کاهش می یابد.
 - بیشترین بازیافت در آزمایش ها در تزریق با نسبت یک و گاز تزریقی با ترکیب دی اکسید کربن خالص مشاهده گردید.
- پیشنهادها**
- استفاده از مغزه های با طول کم (۱۰ سانتی متر) جهت بررسی پارامترهای مهم تا حدی مناسب بوده ولی در آینده جهت حصول نتایج بهتر و واقعی تر می توان از مغزه هایی با طول بیشتر استفاده کرد.
 - آزمایش ها بر روی نفت زنده انجام گیرد.
 - تأثیر تغییر شوری آب نمک بر بازیافت نفت بررسی شود.
 - تأثیر تغییر ترکیب یونی آب نمک تزریقی بر بازیافت مورد بررسی قرار گیرد.
 - در ترکیب گاز تزریقی به جای متان از گاز طبیعی (که هزینه کمتری دارد) استفاده شود.

پانویس ها

¹alizadeh2627@aut.ac.ir

²Water-Alternating-Gas

³capillary number

⁴mobility ratio

⁵volumetric sweep

⁶viscosity

⁷areal sweep

⁸vertical sweep

⁹injectivity

¹⁰heterogeneity

¹¹partially oil wet

¹²transfer vessel

¹³back pressure regulator

¹⁴connate water

منابع

- [1] Hinderaker, L., Utseth, R. H., Hustad, O. S., Kvanvik, B. A., and Paulsen, J. E., "RUTH – A comprehensive Norwegian R&D program on IOR", SPE 36844, 1996, Presented at the SPE European Petroleum Conference held in Milan, Italy, Oct 22-24,
- [2] Moritis, G., "Impact of production and development RD&D ranked", Production Editor, Oil and Gas Journal, 1995, Oct. 30, Vol 93, Issue 44,
- [3] Christensen J.R., Stenby E.H, Skauge A., "Review of WAG field experience" SPE 71203, Spe reservoir evaluation and Engineering, 2001, volume 4, pages 97-106,
- [4] Enick, R M, Beckman, E J, Shi, C, Huang, Z, Xu, J, Kilic, S, "Direct thickeners for CO₂", SPE 59325, presented at the 2000 SPE/DOE Improved oil recovery symposium held in Tulsa, OK, April, 3-5,
- [5] B. H. Caudle, A. B. Dyes, "Improving Miscible Displacement by Gas-Water Injection", SPE 911-G, Published in Petroleum Transactions, AIME, Vol. 213, 1958, pages 281-283. Paper presented at 32nd Annual Fall Meeting of Society of Petroleum Engineers in Dallas, Tex., Oct. 6-9, 1957.
- [6] Ramachandran K.P, Gyani O.N, "Immiscible Hydrocarbon WAG: Laboratory to Field" SPE 128848, SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 2010, Mumbai, India,
- [7] Vladimir Alvarado, Eduardo Manrique, "Enhanced Oil Recovery: An Update Review" energies, 2010, DOI:10.3390/en3091529, pages 1529-1575
- [8] Jensen, T B, Harpole, K J, Osthus, A, "EOR Screening for Ekofisk", SPE 65124, presented at the 2000 SPE European Petroleum Conference held in Paris, France, 24- 25 October,
- [9] Jafari Mahdi, Badakhshan Amir, Taghikhani Vahid, Rashtchian Davood, Ghotbi Cirous, "Experimental Study and Simulation of Different EOR Techniques in a Non-Fractured Carbonate Core from an Iranian Off-shore Oil Reservoir" Iran. J. Chem. Chem. Eng., Vol. 27, No.2,