ارزیابی روش های ازدیاد برداشت نفت (EOR) در مخازن کربناته شکافدار

ابوذر میرزایی پیامن [۱،*] ، سرور صلواتی[۲]، سید حمید کریمی [۳] و محسن مسیحی[٤]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی شریف، Mirzaei۱۹۸٦@gmail.com

۲- دانشجوی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی اکتشاف نفت، دانشگاه صنعت نفت

٤- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

روش های تولید نفت از میادین نفتی عمدتا به سه دسته تولید اولیه (Primary recovery)، تولید ثانویه (Secondary recovery) و ازدیاد برداشت (Tertiary recovery or EOR) تقسیم بندی میشوند. روش های ازدیاد برداشت نیز خود به پنج دسته کلی کنترل تحرک پذیری (Mobility control)، حرارتی (Thermal)، شیمیایی (Chemical)، امتزاجی (Miscible) و میکروبی (MEOR) تقسیم می شوند. هر کدام از روش های یاد شده ازدیاد برداشت نفت، برای برخی میادین با خصوصیات خاص مناسب می باشد. افزون بر این برخی روش های ازدیاد برداشت همراه با مسائل زیست محیطی نیز هستند. به عنوان مثال در روش تزریق بخار به مخازن نفتی، مشکلاتی همچون آلودگی های حاصله از تولید بخار در سطح و نیز دفع میعانات آبی همراه نفت در چاه تولیدی وجود دارد.

با توجه به اینکه ۹۰٪ مخازن نفتی ایران از نوع مخازن کربناته و اکثر آنها شکاف دار می باشند، در این مقاله پس از بررسی مشکلات زیست محیطی همراه روش های EOR (که اکثرا مربوط به روش های حرارتی است) به بررسی امکان سنجی کاربرد روش های ازدیاد برداشت نفت در مخازن کربناته شکاف دار پرداخته می شود. در پایان مناسب ترین روش های ازدیاد برداشت که مناسب مخازن کربناته شکافدار هستند ارایه می گردد.

۱- مقدمه

روش های تولید نفت از مخازن نفتی عمدتا به سه دسته تولید اولیه، تولید ثانویه و تولید ثالثیه تقسیم می شوند. در تولید اولیه یا تولید طبیعی، از انرژی طبیعی خود مخزن برای تولید نفت استفاده و از هیچ منبع انرژی خارجی استفاده نمی شود. مکانیسم های این نوع تولید عبارتند از: انبساط سیال نفتی، انبساط سنگ و آب همراه، رانش گاز محلول، رانش آبران، رانش کلاهک گازی و ریزش ثقلی. میانگین ضریب بازیافت در این شیوه تولید، کم و برای مخازن ایران حدود ۲۰ درصد است.

Archive of SID

www.SID.ir

بازیافت ثانویه ناشی از افزایش انرژی طبیعی مخزن از طریق تزریق آب یا گاز، به منظور جابه جایی و حرکت نفت به سمت چاه تولیدی است. در این نوع بازیافت، تزریق گاز به درون کلاهک گازی به منظور تثبیت فشار و انبساط کلاهک و یا به درون ستون نفت چاه ها به منظور جابه جایی غیر امتزاجی نفت صورت می گیرد. در این نوع تولید هیچ گونه تغییری در خواص فیزیکی سیالات و سنگ مخزن صورت نمی گیرد.

روش های تولید ثالثیه که به آن ها ازدیاد برداشت نفت (enhance oil recovery) یا به اختصار EOR نیز گفته میشود، به آن دسته از روش های تولید اطلاق میشود که پس از تولید اولیه و تولید ثانویه اعمال شده و هدف از آن ها تولید نفتی است که تا کنون توسط روش های پیشین تولید نشده است. دراین روش انرژی یا مواد خارجی به مخزن اعمال می‌شود و درنتیجه‌ی آن تغییرات اساسی فیزیکی و شیمیایی درخصوصیات سنگ و سیال مخزن پدید می‌آید. Willhite روش های ثالثیه را به پنج دسته تقسیم کرده که عبارتند از [۱]:

۱- تزریق آب و کنترل تحرک پذیری
۲- روش های حرارتی: تزریق بخار، تزریق آب گرم، احتراق درجا و ...
۳- روش های شیمیایی: تزریق پلیمر، تزریق سرفکتانت، تزریق آلکالین و ...
٤- روش های امتزاجی: تزریق گاز طبیعی، نیتروژن، دی اکسیدکربن و ...
٥- روش های میکروبی

طی یک تقسیم بندی دیگر روش های ثالثیه به دو دسته حرارتی و غیر حرارتی تقسیم بندی می شوند.

۲- روش های EOR و مسائل زیست محیطی همراه

به نظر نگارنده عمده مشکلات زیست محیطی روش های EOR از مخازن نفتی، مربوط به روش های حرارتی همچون تزریق بخار آب، آب گرم و احتراق در جا است. البته این ادعا به معنی ایمن بودن زیست محیطی سایر روش ها نیست چرا که برای نمونه در روشی همچون MEOR یا ازدیاد برداشت میکروبی، گاز های تولیدی حاصله از گسترش میکروب در مخزن (در برخی موارد هیدروژن سولفوره، H_2S) در صورتیکه همراه نفت تولید شوند در برخی حالات بسیار خطرناک هستند. در ادامه به توضیح بیشتر این روش ها پرداخته می شود.

روش تزریق بخار یکی از روش های EOR از مخازن نفت سنگین است. در این شیوه با افزایش حرارت نفت مخزن، ویسکوزیته نفت کاهش یافته و به جابه جایی و تولید نفت کمک می شود. علی رغم اینکه این روش

Archive of SID

www.SID.ir

ویسکوزیته نفت را به مقدار قابل توجهی کاهش می دهد، اما مسائل زیست محیطی همراه به مقداری از ارزش آن می کاهد. برای تولید بخار آب در سطح نیاز به سوزاندن سوخت های فسیلی است که نسبت بالای بخار به نفت یا SOR مستلزم صرف انرژی زیادی است. این میزان زیاد مصرف و سوزاندن سوخت های فسیلی سبب انتشار گازهای گلخانه ای خطرناک در محل چاه تزریقی می شود. علاوه بر این در چاه تولیدی نیز همراه نفت متحرک شده، میعانات آبی حاصل از چگال شدن بخار آب تزریقی در مخزن وجود دارد که جداسازی و دفع این آب ها علاوه بر صرف هزینه مسائل زیست محیطی خاص خود را به دنبال دارد.

در تزریق آب گرم به مخزن نیز برای تولید حرارت مورد نیاز، نیاز به سوزاندن سوخت های فسیلی است که سبب انتشار گاز های گلخانه ای و سمی در هوا می شود.در روش احتراق درجا نیز به دلیل تولید گازهای احتراقی در درون مخزن و تولید آنها در چاه تولیدی، بحث آلودگی های حاصله و خطرات زیست محیطی به میان می آید.

تنها روش EOR که نه تنها برای محیط زیست خطرناک نبوده و حتی به کاهش آلودگی های هوا نیز کمک میکند تزریق CO_2 به مخازن نفتی است. در این روش که مناسب کشورهای صنعتی است، CO_2 موجود در هوا جذب و به مخزن تزریق می شود.

۳- روش های EOR در مخازن کربناته شکافدار

نفت موجود در مخازن شکافدار به دو بخش متمایز تقسیم می شود که شامل شکاف ها و بلوک های ماتریسی است. در مبحث تولید از مخازن شکافدار، مشکل اصلی تولید نفت از بلوک های ماتریسی است که برعکس شکاف ها که دارای تراوایی بالا و تخلخل پایین هستند، دارای تراوایی پایین و تخلخل بالا می باشند.

همچنین باید توجه کرد که راندمان روش های EOR در مخازن شکافدار متفاوت با مخازن غیرشکافدار معمولی است. شکاف ها در برخی روش ها و تحت شرایط خاصی، سبب افزایش راندمان و در برخی نیز کاهش راندمان را به دنبال دارند. برای سخن گفتن پیرامون راندمان روش های EOR در مخازن شکافدار، ابتدا لازم است تا عوامل تاثیرگذار بر روی ضریب بازیابی (recovery factor) را معرفی نمود. در مخازن شکافدار، ضریب بازیابی تابعی از پارامترهای مختلفی همچون تخلخل، تراوایی، ویسکوزیته، نسبت تحرک پذیری، اشباع آب، تر شوندگی (آب دوست یا نفت دوست)، توزیع شکاف، سایز بلاک ها، مکانیسم های رانش و استراتژی مدیریت مخزن (همچون بهینه سازی دبی تزریق و تولید و روش EOR) است [۲]. برای روشن شدن موضوع تاثیر یکی از پارامترهای یادشده را بحث می کنیم. اگر مخازن نفتی آب دوست باشند جابه جایی نفت توسط گاز بسیار بالاتر از جابه جایی توسط

Archive of SID

www.SID.ir

آب است به گونه ای که درصد تولید نفت با گاز در میادین تست شده به ۷۸ درصد نیز رسیده ولی این عدد در تولید نفت با آب از ۵۰ یا ۵۵ درصد فراتر نمی رود [۳].

۳-۱- تزریق آب در مخازن کربناته شکافدار

بیشتر مخازن کربناته، از نوع شکافدار و نفت دوست هستند. اگر این مخازن کربناته به صورت جزیی شکافدر باشند می توان از تزریق آب استفاده کرد. در چنین شرایطی از چاه های جهت دار استفاده می کنند تا جهت جریان آب عمود بر شکاف ها باشد. تزریق آب در مخازن کربناته که شدیدا شکاف خورده و نفت دوست هستند، موثر و کاربردی نیست [۴]. دلیل این امر حرکت آب تزریقی در شکاف ها و عدم ورود به حفرات ماتریس است. یکی از روش های بازیافت نفت از مخازن کربناته به شدت شکاف خورده نفت دوست، استفاده از مواد فعال سطح به منظور تغییر "تر شوندگی" سنگ مخزن از نفت دوست به آب دوست از طریق آشام جریان متقابل و ریزش ثقلی است. روش دیگر برای کاربردی نمودن تزریق آب در این مخازن، کاستن "نیروی کشش سطحی" بین آب تزریقی و نفت درجا از طریق افزودنی های حلال در آب است. اکثر افزودنی های یاد شده هنگامی موثر هستند که آب مخزن دارای میزان نمک کمی باشد. نویری (۲۰۰۸) بیان می کند که آب های مخازن نفتی ایران دارای نمک اشباع شده در حد بیش از ۳۰۰۰۰۰ PPM هستند که این امر کاربرد این افزودنی ها را برای این مخازن غیر ممکن می سازد. از سایر مشکلات همراه این روش، تخلخل پایین مخازن ایران (جذب بالای افزودنی ها و کاهش اثر آن ها) و گران قیمت بودن افزودنی ها است.

۳-۲- تزریق بخار در مخازن کربناته شکافدار

در روش هایی حرارتی همچون تزریق آب گرم یا بخار به درون شکاف ها، مقدار قابل توجهی از نفت می تواند از المان های ماتریس تولید شود. در اینجا حرارت سریعا در شکاف ها از بین رفته و رسانایی گرمایی به ماتریس نقش مهمی را در گرم کردن ماتریس و در نتیجه تولید نفت ایفا می کند. علاوه بر این، در دمای تزریقی بخار به مخازن کربناته، سنگ کربناته تجزیه شده و مقدار قابل توجهی از CO_2 آزاد می شود که سبب بهبود جابه جایی و تولید نفت می شود.

K.D.Dreher و همکارانش (۱۹۸۶) با انجام آزمایش های تزریق بخار به مغزه ها دریافتند که بازیافت نفت از هر دوی مغزه های هوموژن و مغزه های شکافدار با افزایش دمای بخار افزایش می یابد. در این آزمایش ها مقدار نفت بازیافتی در ۲۰۰ درجه فارنهایت ۳۰ درصد نفت درجا بود. همچنین به ازای تزریق هر ۱ مول از آب در دمای بخار،

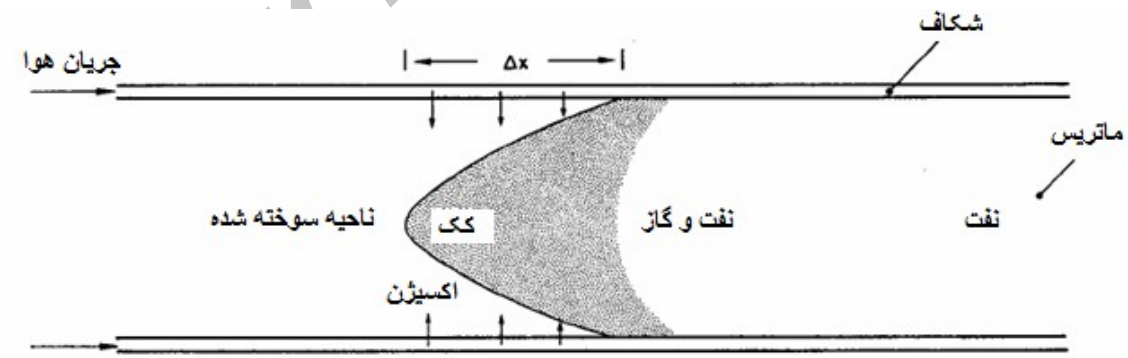
Archive of SID

www.SID.ir

۱ مول گاز CO_2 در خروجی مغزه تولید شد. K.D.Dreher در ادامه پارامتر های موثر بر دبی تولیدی نفت و نسبت آب به نفت تولیدی را سایز گرید بلاک های ماتریس، دبی تزریق بخار، اشباع ها و توزیع های اولیه و مقدار CO_2 تولیدی می داند [۵]. پژوهشگران مختلفی نشان داده اند که برای حجم مشخصی از مخزن و سایز گرید بلاک ها، یک دبی تزریق بهینه وجود داشته و رسانایی گرمایی از شکاف ها به ماتریس فاکتور کنترل کننده است [۵،۶]. همچنین علیرضا مولایی و همکارانش (۲۰۰۷) بازیافت نفت از ماتریس مستقل از گراویته نفت بوده و سبب جذابیت یکسان تزریق گاز در مخازن شکافدار نفت سبک و نفت سنگین می شود [۷].

۳-۳- احتراق درجا در مخازن کربناته شکافدار

در اوایل، اجرای میدانی روش احتراق درجا در مخازن کربناته شکافدار، به دلیل راه گزینی (Channeling) هوای تزریقی از درون شکاف ها و Breakthrough زود هنگام آن، به شکست انجامید [۸]. در سال های بعد Schulte و همکارانش (۱۹۸۲) کاربرد روش احتراق در جا در مخازن شکافدار (همچون مخازن خاورمیانه: کشورهای ایران و عمان) را به صورت آزمایشگاهی تست کرده و به دلیل راه گزینی هوای تزریقی از درون شکاف ها و کنار گذاشتن نفت درجا، کاربرد موفقیت آمیز این روش را در مخازن شکافدار غیرمحتمل دانستند [۹]. بعد ها Schulte و همکارانش نشان دادند که احتراق درجا برای مخازن شکافدار مناسب، و همراه درصد بازیافت بالایی در نواحی جاروب شده است. در آزمایشات انجام شده توسط این پژوهشگران Breakthrough اکسیژن در صورتی اتفاق می افتد که دبی هوای تزریقی از دبی بحرانی تزریق فراتر رود. این دبی بحرانی توسط مقدار بازشدگی شکاف ها کنترل می شود[۱۰]. (شکل-۱)



شکل-۱: شماتیک توزیع نفت و کک مصرفی در احتراق درجای مخازن شکافدار

۳-٤- تزریق امتزاجی گاز در مخازن کربناته شکافدار

Archive of SID

www.SID.ir

در مخازن شکافدار، طی تزریق سیالات امتزاج پذیر با نفت در فرایندهای EOR، بازیافت نفت و انتقال سیالات تزریقی توسط خواص ماتریس و شکاف کنترل می شود. در چنین سیستم هایی انتقال بین شکاف و ماتریس به خاطر نفوذ و انتقال جرم مهمترین مکانیسم تولید نفت است [۱۱].

اولین مطالب منتشر شده پیرامون استفاده از روشهای تزریق امتزاجی در مخازن شکافدار مربوط به سال ۱۳۴۸ (۱۹۶۹) به بعد است [۱۲]. با ورود مفهوم شکاف ها در مخزن، فرایند جابه جایی دیگر تنها به خصوصیات سیال وابسته نیست بلکه جئومتری شکاف- ماتریس، سایز و برهم کنش و سایز پدیده های فیزیکی نیز نقش مهمی را ایفا می کنند [۱۳]. تزریق امتزاجی گاز در صورتیکه به صورت صحیح انجام شود سبب از بین رفتن نیروهای کشش سطحی و در نتیجه افزایش ۱۰۰ درصدی راندمان میکروسکوپیک می شود. چرا که در چنین شرایطی میزان نفت باقیمانده در فضای خالی (S_{or}) به صفر می رسد. بدیهی است این نوع EOR بهترین روش ممکن می تواند باشد. به دلیل فراوانی ذخایر گازی در ایران (ایران با داشتن ۱۸ درصد از کل ذخایر گاز جهان پس از روسیه، دارای رتبه دوم می باشد) و قیمت ارزان آن در ایران محدودیت تامین گاز برای روش های تزریق گاز وجود ندارد.

۳-۵- تزریق غیر امتزاجی گاز در مخازن کربناته شکافدار

نمونه ای از کاربرد این روش در مخازن کربناته شکافدار منطقه، تزریق غیر امتزاجی گاز CO_2 به میدان Bati Raman، بزرگترین میدان ترکیه است که در سال ۱۳۶۵ صورت گرفت و در آن زمان بزرگترین پروژه تزریق غیرامتزاجی CO_2 در دنیا بود [۱۴]. همچنین به دلیل وجود مخازن عظیم CO_2 در آمریکا از سالها قبل تزریق CO_2 در این کشور به صورت امتزاجی و غیر امتزاجی انجام می شود. CO_2 به دلیل خواص ترمودینامیکی خاص در فشار حدودا ۱۷,۵ در نفت قابل امتزاج است که درصد بازیافت نفت را تا حدود ۸۰٪ بالا می برد. به دلیل اثرات گلخانه ای گاز CO_2 و افزایش دمای کره زمین در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ۶۵٪ گاز تزریقی به مخازن آمریکا را CO_2 تشکیل می دهد. ۴۷٪ گاز تزریقی در روش تزریق همزمان آب و گاز را CO_2 تشکیل می دهد. بر اساس آمارهای موجود کشور ما سیزدهمین تولید کننده CO_2 جهان می باشد که بررسی چگونگی جمع آوری CO_2 و تزریق آن به مخازن نفتی کمک زیادی به کاهش مقدار CO_2 در کشور خواهد کرد (جدول-۱).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول-۱: کشورهای منتشر کننده بیشترین گاز CO_2

ردیف	کشور	انتشار سالانه CO_2، هزار تن	درصد کل انتشار، درصد
۱	آمریکا	۶۰۴۹۴۳۵	۲۲,۲
۲	چین و تایوان	۵۰۱۰۱۷۰	۱۸,۴
۳	روسیه	۱۵۲۴۹۹۳	۵,۶
۴	هند	۱۳۴۲۹۶۲	۴,۹
۵	ژاپن	۱۲۵۷۹۶۳	۴,۶
۶	آلمان	۸۶۰۵۲۲	۳,۱
۷	کانادا	۶۳۹۴۰۳	۲,۳
۸	انگلیس	۵۸۷۵۶۱	۲,۲
۹	کره جنوبی	۴۶۵۶۴۳	۱,۷
۱۰	ایتالیا	۴۴۹۹۴۸	۱,۷
۱۱	مکزیک	۴۳۸۰۲۲	۱,۶
۱۲	آفریقای جنوبی	۴۳۷۰۳۲	۱,۶
۱۳	ایران	۴۳۳۵۷۱	۱,۶

Archive of SID

۳-۶- تزریق مواد شیمیایی در مخازن کربناته شکافدار

به دلیل راندمان پایین تزریق آب در اغلب مخازن شکافدار که به دلیل ناهمگنی های زمین شناسی و نیز نفت دوست بودن سنگ ها است، می توان از تزریق مواد شیمیایی به منظور تغییر ترشوندگی سنگ مخزن استفاده کرد. این روش

www.SID.ir

یکی از کاراترین روش های EOR برای مخازن شکافدار است، ولی مقدار قابل توجهی از نفت درون مخزن باقی می ماند [۱۵].

نتیجه گیری

در این مقاله مشکلات زیست محیطی همراه روش های EOR مورد بررسی قرار گرفت. عمده مشکلات زیست محیطی روش های EOR، مربوط به روش های حرارتی همچون تزریق بخار آب، آب گرم و احتراق در جا است. افزون بر این روش های مختلف EOR و کاربرد آن ها در مخازن کربناته شکافدار مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می رسد که روش تزریق گاز CO_2 به صورت امتزاجی بهترین روش شناخته شده فعلی برای اعمال در مخازن شکافدار باشد. با تزریق CO_2 به مخازن علاوه بر افزایش برداشت می توان میزان CO_2 موجود در اتمسفر را تا میزان چشمگیری کاهش داد. علاوه بر این مشکل زیست محیطی خاصی همراه روش تزریق امتزاجی گاز وجود ندارد، در حالیکه سایر روش های EOR (همچون روش های حرارتی) با آلودگی محیط زیست همراهند.

منابع

۱. Don W. Green and G. Paul Willhite: "Enhanced Oil Recovery", SPE Textbook Series Vol. ۶, Second Printing ۲۰۰۳

۲. Jack Allan and S. Qing Sun: “Controls on Recover Factor in Fractured Reservoirs :Lessons Learned From ۱۰۰ Fractured Fields”, SPE ۸۴۵۹۰.

۳. عیسی نویری و ولی احمد سجادیان: "مطالعه مناسبترین روش ازدیاد برداشت در مخازن کربناته شکافدار ایران با الگوبرداری از میدان هفتگل و چند میدان شکافدار موفق جهان و بررسی موردی ازدیاد برداشت در یک مخزن در جنوب غرب ایران"، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، پاییز ۱۳۸۷، تبریز

۴. R.Gupta et al.: "Parametric Study to Enhance Oil Recovery Rate From Fractured Oil-Wet Carbonate Reservoirs", SPE ۱۱۶۴۸۵.

۵. K.D.Dreher et al.: "Heat Flow During Steam Injection Into a Fractured Carbonate Reservoir", SPE ۱۴۹۰۲.

۶. Babadagli Tayfun: "Optimum Steam Injection Strategies for Naturally Fractured Reservoirs", Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. ۱۸, pp. ۳۷۵-۴۰۵, ۲۰۰۰.

۷. Alireza Mollaei et al.: “Investigation of Steam Flooding in Naturally Fractured Reservoirs”, IPTC ۱۱۰۸۷.

۸. Craig, F.F. Jr. and Parrish, D.R.: “A Multi-Pilot Evaluation of the COFCAW Process,” Journal of Petroleum Technology, June ۱۹۷۴, ۶۵۹-۶۶۶.

۹. Schulte , W.M et al.: "In situ Combustion in Naturally Fractured Reservoirs", SPE ۱۰۷۰.

۱۰. Schulte, W.M et al.: “In situ Combustion in Naturally Fractured Heavy Oil Reservoirs”, SPE ۱۰۷۲۳.

Archive of SID

www.SID.ir

۱۱. *J.J. Trivedi and T. Babadagli: "Efficiency of Miscible Displacement in Fractured Porous Media", SPE ۱۰۰۴۱۱.*

۱۲. *Thompson J.L and Mungan N.: "A Laboratory Study of Gravity Drainage in Fractured System Under Miscibility Conditions", SPEJ, ۱۹۶۹, ۳۴۷.*

۱۳. *Knut Ulberg et al.: "Miscible Gas Injection in Fractured Reservoirs", SPE ۷۵۱۳۶.*

۱۴. *A. Spivak, Allan Spivak: "Simulation of Immiscible CO_2 Injection in a Fractured Carbonate Reservoir, Bati Raman Field, Turky", SPE ۱۸۷۶۵.*

۱۵. *Nariman Fathi Najafabadi et al.: "Chemical Flooding of Fractured Carbonates Using Wettability Modifiers", SPE ۱۱۳۳۶۹.*

Archive of SID

www.SID.ir