

مطالعه‌ی شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر تولید نفت سنگین

از مخزن ترک‌دار کوه موند^۱ به روش ریزش ثقلی

به کمک تزریق بخار (SAGD)^۲

مهدی جعفری (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

منوچهر حقیقی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

یکی از مدرن‌ترین روش‌های بازیابی حرارتی برای تولید نفت سنگین، روش ریزش ثقلی به کمک بخار (SAGD) است. هدف از این مطالعه، بررسی امکان کاربرد و اجرای این روش برای مخزن ترک‌دار کوه موند است. مطالعه‌ی شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار STARS ۹۳/۰۰ انجام گرفت. مدل سه‌بعدی مناسب با توجه به اطلاعات مرتبط و در دسترس از مخزن کوه موند و مخازن مشابه، و با به‌کارگیری سیستم نفوذپذیری دوگانه^۳، طراحی و ساخته شد. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید نفت سنگین در این روش عبارت‌اند از: کیفیت و دبی بخار تزریقی، موقعیت چاه‌ها و فاصله‌ی بین آنها، خواص نفت، تخلخل و نفوذپذیری ماتریس و فاصله‌ی ترک‌ها. نتیجه‌ی این نوع تزریق، کاهش گرانشی^۴ و افزایش تحرک نفت است. پس از انجام مطالعات شبیه‌سازی، این نتیجه حاصل شد که بازیابی حرارتی به کمک روش (SAGD) روی مخزن ترک‌دار کوه موند قابل اجراست.

مقدمه

نمونه‌های بدون ترک، در مقایسه با نمونه‌های ترک‌دار، می‌شود و بازیابی نفت برای ترک‌های باریک و افقی، در مقایسه با ترک‌های بزرگ و قائم، بیشتر می‌شود. محققان دیگر راه حل تحلیلی تزریق بخار درون مخازن ترک‌دار توسط ریزش ثقلی را که یکی از سازوکارهای مهم تولید نفت است ارائه دادند.^[۱] چن و همکاران مدل تخلخل دوگانه‌ی را برای شبیه‌سازی اثرات گرمایی در مخازن ترک‌دار طبیعی اجرا و توسعه دادند.^[۵] شبیه‌سازی‌های آنها سه‌بعدی، سه‌فازی و ترکیبی بود. بلوک‌های ماتریس را به شبکه‌های دوبعدی تقسیم کرده و اثرات ثقلی سیال‌ها، فشار موئینگی و انتقال جرم و انرژی بین بلوک‌های ماتریس و ترک را مد نظر قرار دادند. و بالاخره شبیه‌سازی‌های گرمایی با نفوذپذیری دوگانه / تخلخل دوگانه معرفی و مطرح شدند.^[۶] باکلس نیز سازوکارهای گوناگون سیلاب‌زنی بخار در مخازن همگون را مورد بررسی و بحث قرار داد.^[۷] میزان تحرک در اثر افزایش دمای بخار و در نظرگیری جابه‌جایی آن به‌عنوان سازوکارهای ابتدایی بیان شده‌اند. شکست نفت در دماهای بالا، انبساط گرمایی نفت و تأثیر دما بر نفوذپذیری نسبی نفت و آب در ناحیه‌ی آب جلو جبهه‌ی بخار، از جمله سازوکارهای سیلاب‌زنی بخار هستند. باکلس علت اندک بودن اشباع نفت باقی‌مانده بعد از سیلاب‌زنی بخار در فضاهای خالی را که

روشن‌ترین روش‌های بازیابی حرارتی یکی از روش‌های بازیابی حرارتی است که برای تولید نفت سنگین مناسب است. برای سیلاب‌زنی در سیستم‌های ترک‌دار طرح بخارزنی در ترک‌ها برای مخازن کربناته انجام شده^[۱] و مشاهده شده که بدون راه‌یابی بخار یا گرما، میزان تولید نفت افزایش می‌یابد. در ضمن مشاهده‌ی تولید CO₂ نیز به علت تجزیه‌ی سنگ‌های کربناته توسط بخار است و باعث بهبود کارایی فرایند می‌شود. محققان بعضی از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های مخزن را برای آب گرم و سیلاب بخار در سنگ‌های کربناته‌ی ترک‌دار انجام دادند و بازیابی زیاد نفت ماتریس‌ها را مشاهده کردند.^[۱۱] زمانی که آب یا بخار درون ترک‌ها تزریق می‌شود، CO₂ تولید می‌شود و انبساط نفت و کاهش گرانشی که از سازوکارهای بازیابی در ازدیاد برداشت‌اند، اتفاق می‌افتد. سیلاب‌زنی آب و تزریق بخار در نمونه‌های کربناته ترک‌دار و ماسه‌ی سنگی ترک‌دار نشان داد که فرایند آشام مهم‌ترین سازوکار بازیابی در سنگ ترک‌دار است^[۱۲] و انبساط گرمایی و کاهش گرانشی از مهم‌ترین سازوکارهای بازیابی در نمونه‌های کربناته‌ی ترک‌دار است. همچنین تغییر اشباع در قطعه‌ی انتهایی نمونه‌های ماسه‌ی سنگی ترک‌دار باعث کاهش اشباع نفت باقی‌مانده (افزایش بازیابی نفت) در

چاه‌های افقی به منظور افزایش سطح تماس چاه‌ها با مخزن استفاده می‌شود. در ضمن از چاه‌های افقی طولانی می‌توان برای تولید نفت با دبی‌های بیشتر و اقتصادی به کمک رانش نیروی ثقلی نیز استفاده کرد. در این روش که چاه‌های تزریق بخار در بالای چاه‌های تولید نفت قرار دارند بخار تزریق می‌شود و در چاه‌های افقی جریان پیدا می‌کند و ناحیه‌ی بخار ایجاد می‌شود که با گذشت زمان و تداوم تزریق بخار گسترش و انتشار می‌یابد تا به مرزهای کناری و سطح بالائی مخزن برسد. اساس این فرایند، کاهش گرانشی نفت سنگین است، که در نتیجه‌ی آن گرمای بخار به روش انتقال هدایتی به سنگ مخزن و نفت سرد و سنگین منتقل می‌شود و باعث افزایش دمای نفت و در نتیجه کاهش گرانشی آن و افزایش تحرک نفت می‌شود و در نهایت این نفت به سمت چاه‌های تولیدی که در سطوح پائین مخزن قرار دارند، جریان می‌یابد.^[۱۰] البته از آنجا که مخزن ترک دارد، این انتقال و حرکت، به سرعت انجام می‌شود. در حین جریان نفت به سمت چاه‌های تولیدی، دبی نفت با گذشت زمان، مرتباً زیاد می‌شود ولی زمانی که ناحیه‌ی بخار به مرزها می‌رسد افت دبی تولید حاصل می‌شود و ارتفاع قابل دسترسی که باعث ریزش می‌شود نیز کاهش می‌یابد. افزایش نفوذپذیری باعث ازدیاد دبی نفت تولیدی می‌شود اما این امر منجر به کاهش ضخامت لایه‌ی نفتی گرم شده می‌شود. همچنین افزایش نفوذپذیری گرمایی باعث افزایش ضخامت لایه‌ی نفتی گرم شده و افزایش دبی تولید می‌شود. جبهه‌ی پیشروی بستگی به نفوذپذیری گرمایی مخزن و سرعت در قسمت جلویی جبهه‌ی پیشروی دارد. معادله‌ی ذیل برای محاسبه دبی ریزش ارائه شده است:^[۱۱]

$$Q = 2L \sqrt{(2.K.g.\alpha.\phi. S.h./M.v.s)}$$

$$\sqrt{(M.v.s)} = \int (\frac{1}{v} - \frac{1}{v_r}).(dT/(T-T_R)) \quad (1)$$

g: شتاب ثقل

h: ارتفاع اتاقک بخار (m)

K: نفوذپذیری مؤثر (m²)

L: طول چاه افقی (m)

M: پارامتر بدون بعد که به کمک خصوصیات دما و گرانشی نفت به دست می‌آید.

Q: دبی نفت در چاه تولیدی (m³/s)

α: نفوذپذیری گرمایی مخزن (m².s⁻¹)

μ: گرانشی نفت مخزن (Pa.s)

φ: تخلخل کسری^۶ سنگ مخزن

S: اشباع نفت که کم‌تر از اشباع نفت باقی مانده در اتاقک بخار است.

v: گرانشی سینماتیکی نفت در دمای T°C (m²/s)

بخار در آنها مایع شده‌اند، بیان کرد. شفرد نیز تقطیر هیدروکربن‌های سبک در طی سیلاب‌زنی بخار در نمونه‌های بدون ترک را آزمایش کرد.^[۸] برای ۵۰٪ تقطیر نفت، مقدار ۱۹/۵۰٪ بازیابی به خاطر تقطیر افزایش یافت. کارایی جابه‌جایی بخار با آب سرد و گرم نیز مقایسه شد و بازیابی برای نفت خام مورد آزمایش، در سیلاب‌زنی بخار بیش از ۹۰٪ و برای سیلاب‌زنی آب گرم ۷۰٪ و برای سیلاب‌زنی آب سرد ۶۰٪ بود. برخلاف مخازن همگون، تزریق بخار نمی‌تواند محیط متخلخل در سیستم ترک‌ها را جاروب کند، اما قابلیت انتقال و هدایت برای ترک‌ها زیاد است. بنابراین سازوکارهای فوق‌الذکر به طور جزئی در سیستم ترک‌ها عمل می‌کنند. مینلند، سازوکارهای بازیابی نفت در مخازن ترک‌دار در طی تزریق بخار را مرور کرده است.^[۹] انبساط گرمایی و تولید گاز به عنوان دو سازوکار اصلی در دماهای بالا، توضیح داده شده است.

۱. انبساط گرمایی: سیال و کانی‌های سنگ با افزایش دما منبسط می‌شوند. انبساط جزئی حدود ۰/۰۵٪/°F توسط انبساط سیال و کاهش تخلخل به وجود می‌آید که باعث خروج سیال از ماتریس به داخل ترک می‌شود. به علاوه سازوکار گرم شدن در مخازن ترک‌دار اغلب از نوع انتقال هدایتی، و برای سیستم همگون از نوع انتقال همرفتی توسط بخار میعانی است.

۲. فرایند آشام: برای مخازن آب‌دوست باعث ورود آب موجود در شبکه‌ی ترک به داخل بلوک‌های ماتریس از بین باریک‌ترین فضاها خالی می‌شود. این فرایند مربوط به سیستم سنگ/نفت/آب نمک ممکن است با دما، و با توجه به ترکیب نفت افزایش یا کاهش یابد.

۳. ریزش ثقلی: آب و گاز در ترک‌ها توسط نیروهای ثقلی به اطراف ماتریس منتقل می‌شود و آنها را محاصره می‌کند. ارتفاع هیدروستاتیکی جزئی بین آب در ترک و نفت با ۳۵ API تنها ۰/۰۶۵ Psi/Ft و برای گاز در ترک ۰/۳ Psi/Ft می‌باشد. بنابراین ریزش ثقلی یک سازوکار بازیابی با پتانسیل بالا در ترک‌های پر شده از گاز و تشکیلات ضخیم است.

۴. تولید گاز: در طی تزریق بخار، تولید CO₂ مشاهده شده است.^[۱۱] همچنین ترکیبات هیدروکربن سبک در طی تزریق بخار تولید می‌شود. با افزایش دمای مخزن، حجم گاز تولیدی افزایش می‌یابد و نفت از ماتریس به سمت ترک‌ها جابه‌جا می‌شود.

۵. رانش گاز محلول: اگر منحنی برش دوفازی^۵ نفت خام منحنی بخار را قطع کند، این سازوکار (رانش گاز محلول) انجام می‌شود. محققان اظهار داشته‌اند که گاز اولیه اشباع در مخازن ممکن است در دماهای بالا انبساط یابد و رفتاری شبیه به مخزن با سازوکار فعال رانش گاز محلول داشته باشد.^[۹] در روش SAGD از

v_R : گرانروی سینماتیکی نفت در دمای $TR^\circ C$ (m^2/s)

v_S : گرانروی سینماتیکی نفت در دمای $TS^\circ C$ (m^2/s)

این معادله برای هر دسته از واحدهای ابعاد، ثابت است. البته باید یادآور شویم که گسترش ناحیه‌ی بخار به سمت بالا، بی‌نظم اما کاملاً سریع است، تا اینکه آن ناحیه به بالای مخزن برسد. حرکت روبه بالای مرز مشترک به صورت انگشتی است که باعث ایجاد جریان نفت به صورت پیچ خورده می‌شود، اما به طور خیلی پایدار به سمت کناره‌ها و پائین حرکت می‌کند.^[۱۳] اگر نفت تولیدی سریعاً از چاه تولید افقی انتقال داده شود، ناحیه‌ی بخار به سمت پائین حرکت می‌کند و بخار به صورت کنار گذر شده در مخزن می‌ماند. غالباً تنها نیروی رانش قابل دسترسی برای جابه‌جائی نفت به اطراف چاه، نیروی ثقلی است و تحرک نفت نیز به خاطر نزدیکی به ناحیه‌ی بخار است. این فرایند در چاه‌های تولیدی قائم بی‌اثر است که علت آن جریان‌های نسبتاً اندکی است که ممکن است تحت این شرایط حاصل شود. از این نظریه نتیجه می‌شود که به طور محسوسی مقدار دبی تولیدی در مراحل اولیه به عدد بدون بعد اضافی B_p وابسته است.

$$B_p = \sqrt{(K.g.h / (\alpha). S.m.v.s)} \quad (2)$$

این رابطه به نسبت سهولت جریان نفت رانده شده توسط نیروی ثقلی به جریان گرما بستگی دارد و برای مقادیر بزرگ B_p نفت تمایل به جریان در لایه‌های نازک دارد و مقادیر دبی سریعاً به سمت مقادیر به دست آمده توسط معادله‌ی ۱ میل می‌کند. در مقادیر کوچک B_p ، برای انباشت و تجمع گرمای کافی و مناسب، زمان قابل توجهی مورد نیاز است و دبی‌های اولیه می‌توانند کم‌تر باشند.^[۱۴] انتقال هدایتی گرما بر سیستم حاکم است که به صورت یک فرایند ریزش ثقلی گرمائی آرام و تدریجی برای بازیابی نفت سنگین از مخازن ترک‌دار با بلوک‌های ماتریس و با نفوذپذیری اندک صورت می‌گیرد. مدل‌های رضایت‌بخشی برای پیش‌گویی و انجام این فرایند برای شبیه‌سازی آن در دسترس نیست. سازوکار انتقال هدایتی عمق نفوذ وسیعی ندارد و گرانروی نفت به تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در ضمن، بخار از قسمت پائین ترک‌ها وارد محیط متخلخل می‌شود. جبهه‌ی پیشروی گرما از سمت پائین بلوک به طرف بالا منتشر می‌شود. دمای هر نقطه با شیب تند به دلیل گرمای بخار در مدت زمان کوتاهی افزایش می‌یابد، که این امر به فاصله و اختلاف زمانی که جبهه‌ی بخار به آن می‌رسد بستگی دارد. این فرایند با گرم شدن نفت در لایه‌ی باریک جلوی مرز مشترک نفت-بخار و با کاهش گرانروی نفت به مقدار کم و سپس با ریزش نفت-بخار به اختلاف چگالی نفت گرم شده نسبت به بخار-صورت می‌گیرد. در تئوری SAGD ریزش

نفت گرم شده در قسمت جلویی جبهه‌ی پیشروی بخار، پایدار است. در مخازن ترک‌دار فرایند گرمایی^۷ سریع‌تر از تخلیه‌ی ماتریس^۸ عمل می‌کند. میزان دبی ریزش برای ورود بخار به داخل بلوک، قبل از اینکه بلوک به طور کامل توسط انتقال هدایتی گرم شود، اندک است. بعد از اینکه دمای بلوک تقریباً با دمای بخار برابر شد، سیستم حاکم بر آن ریزش نفت از بالا به سمت پائین در دمای ثابت است. برای مخازن ترک‌دار طبیعی با تزریق بخار جریان گرما سریع‌تر از جریان سیال است. این زمانی است که ریزش ثقلی سازوکار غالب برای بازیابی باشد. تحت این شرایط از انتقال همرفتی گرما صرف نظر می‌شود و جریان گرما توسط انتقال هدایتی، پدیده‌ی غالب است. دبی‌های ریزش به گرانروی نفت خام و دمای بخار و خصوصیات مخزن بستگی دارد.

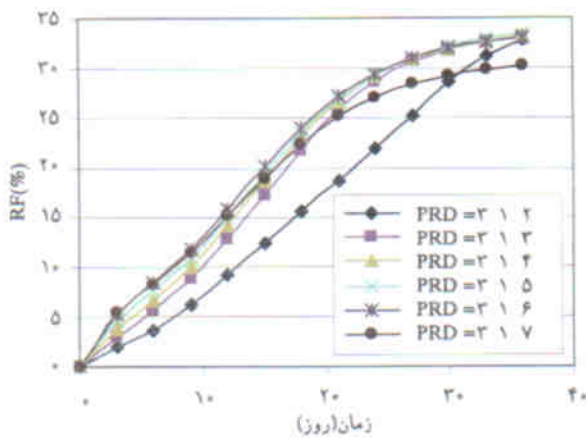
روش تحقیق

مطالعات شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار STARS۹۳/۰۰ بر روی مخزن ترک‌دار کوه موند صورت گرفت. مدل مورد آزمایش به صورت ۱۰۵ بلوک مکعبی (۵ بلوک در جهت X و ۱ بلوک در جهت Y و ۲۱ بلوک در جهت Z) به طول ۹ فوت و به حجم $76545 Ft^3$ و با سیستم «نفوذپذیری دوگانه» انتخاب شد. در این بخش از تحقیقات تصمیم گرفته شد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید نفت سنگین به روش SAGD مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند. این عوامل مهم شامل: دبی بخار تزریقی، موقعیت چاه‌های تزریق و تولید، فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید، خواص نفت (چگالی و گرانروی)، کیفیت بخار تزریقی، تخلخل ماتریس، فاصله‌ی ترک‌ها از یکدیگر و نفوذپذیری ماتریس هستند. با توجه به نمونه‌های گرفته شده از مخزن کوه موند، خصوصیات فیزیکی سنگ مخزن از قبیل تخلخل، اشباع نفت و آب، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری سنگ‌ها و هدایت حرارتی آنها و طول و عرض ترک‌ها و نیز خواص سیال مخزن از قبیل وزن مولکولی، چگالی مولی، تراکم‌پذیری، انبساط حرارتی نفت، فشار و دمای بحرانی، گرانروی دماهای متفاوت و درجه‌ی API و فشار و دمای مخزن اندازه‌گیری شده‌اند، سپس مطالعات شبیه‌سازی بر روی مدل فوق‌الذکر انجام شد.

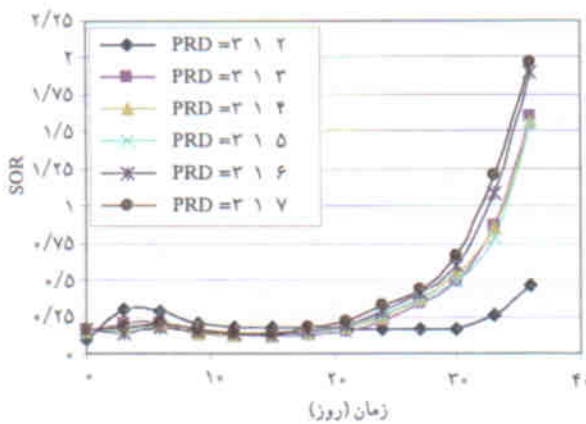
نتایج و بحث

با انجام آزمایشات و مطالعات شبیه‌سازی مخزن کوه موند برای سازند سروک به کمک نرم‌افزار STARS۹۳/۰۰ و مدل فوق‌الذکر نتایج ذیل به دست آمده است:^[۱۵]

۱. میزان دبی بخار تزریقی از مهم‌ترین عوامل تولید نفت در روش



شکل ۳. بررسی اثر موقعیت چاه‌ها بر بازیابی تجمعی نفت تولیدی.



شکل ۴. بررسی اثر موقعیت چاه‌ها بر نسبت بخار به نفت.

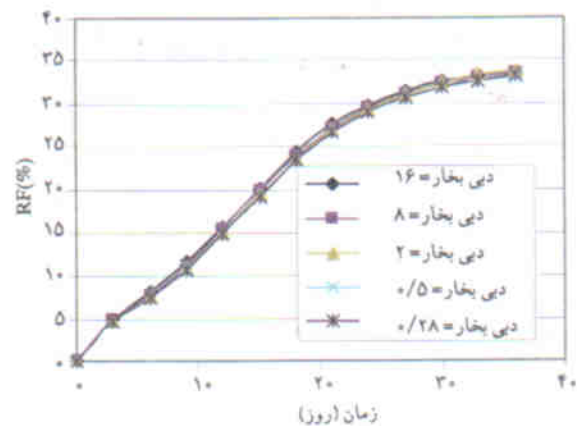
این فرایند گرانیروی و چگالی از اهمیت زیادی برخوردارند. در این مخزن یک سری اطلاعات مربوط به گرانیروی برحسب دما در دست بود. بنابراین گرانیروی مورد بررسی قرار نگرفت و از آنجا که چگالی نفت در گزارش‌های ارائه شده بین API ۱۲-۸ است، تغییرات چگالی مورد مطالعه قرار گرفت. در مدل مورد بحث آزمایشات به ازاء مقادیر ۰/۲، ۰/۵، ۱/۱۲، ۱/۱۵، ۱/۱۹، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۳، ۱/۵، ۱/۸، ۱/۱۲، ۱/۱۵، ۱/۱۹ انجام شد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ نتیجه شد که در تمام حالات اختلاف قابل ملاحظه‌ای در مقادیر ضریب بازیابی و نسبت بخار به نفت SOR و دبی نفت و مقدار نفت و آب تولیدی دیده نمی‌شود.

۴. کیفیت بخار تزریقی به‌طور مسلم بر تولید نفت سنگین تأثیر چشمگیری دارد. زیرا هم مقدار گرمای منتقل شده و هم گسترش ناحیه بخار را تعیین می‌کند. مدل مورد بحث به ازاء مقادیر کیفیت بخار ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۰، ۰/۹۵ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ نتیجه شد که هر چه کیفیت بخار بالاتر باشد، مقادیر ضریب بازیابی و نفت تولیدی حداکثر و مقادیر SOR و آب

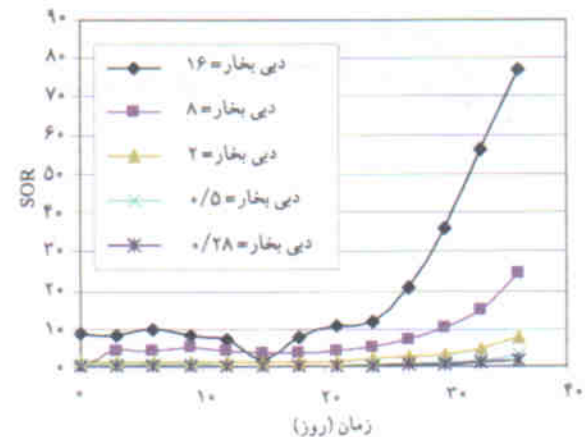
است. زیرا دبی بخار هم میزان گرمای انتقال یافته به نفت و گسترش ناحیه‌ی بخار را تعیین می‌کند و هم این دبی در جابه‌جایی نفت تأثیر دارد. در مدل مورد بحث، دبی بخار تزریقی به ازاء مقادیر ۰/۱۵، ۰/۲۸، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۲، ۰/۸، ۰/۲۸ (معادل آب) مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ نتیجه شد که دبی بهینه‌ی بخار تزریقی برای این مدل معادل ۰/۲۸ است.

۲. موقعیت چاه‌های تزریق و تولید از عوامل مؤثر بر تولید به‌روش SAGD است. از آنجا که گسترش ناحیه‌ی بخار و میزان اتلاف گرمای بخار از سنگ‌های مخزن و قابلیت بازیابی تمام نفت گرم شده و ریزش کرده را تعیین می‌کند. در مدل الف هر دو در وسط مدل و چاه تولید در پائین چاه تزریق؛ در مدل ب هر دو در کنار مدل و چاه تولید در پائین چاه تزریق؛ و در مدل ج هر دو در کنار مدل، ولی چاه تولید در بالای چاه تزریق قرار داده شدند. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ نتیجه شد که حالت الف بهترین حالت است.

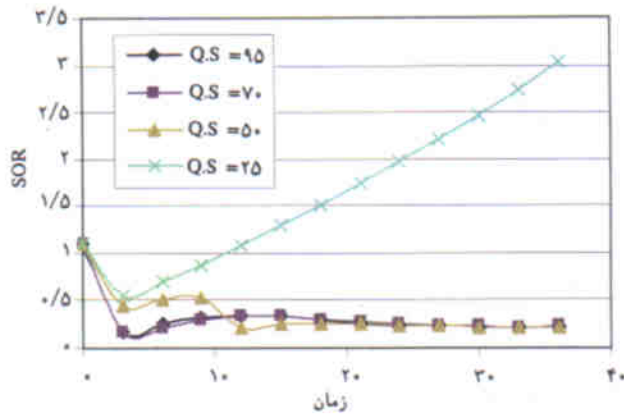
۳. خواص نفت یکی دیگر از عوامل مهم در روش SAGD است. در



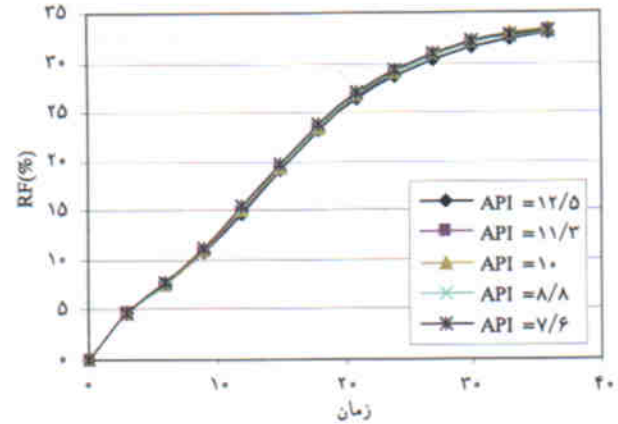
شکل ۱. بررسی اثر دبی تزریق بخار بر بازیابی تجمعی نفت تولیدی.



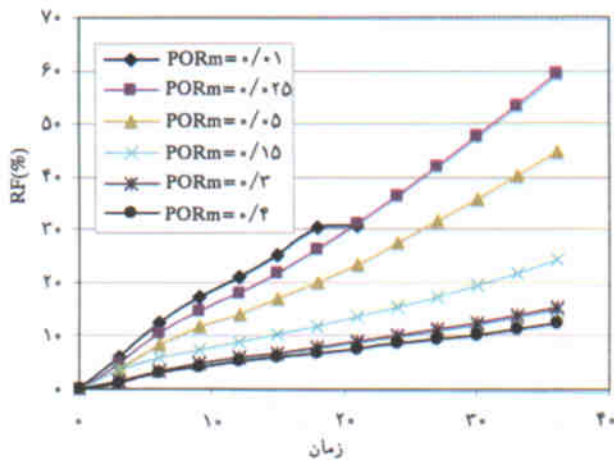
شکل ۲. بررسی اثر دبی تزریق بخار بر نسبت بخار به نفت.



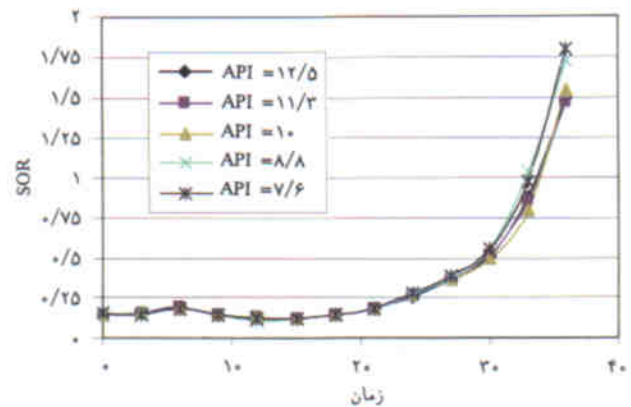
شکل ۸. بررسی اثر کیفیت بخار تزریقی بر نسبت بخار به نفت.



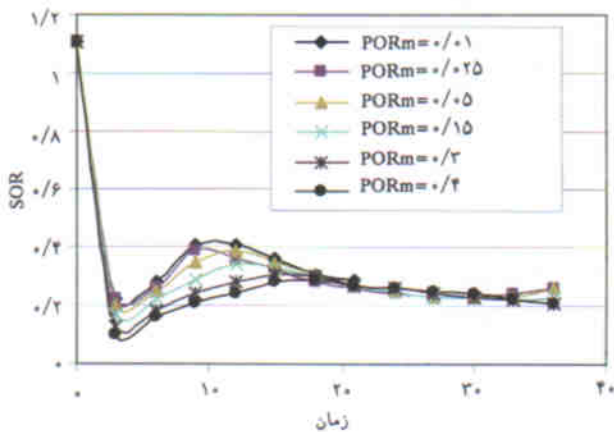
شکل ۵. بررسی اثر API نفت بر بازیابی تجمعی نفت تولیدی.



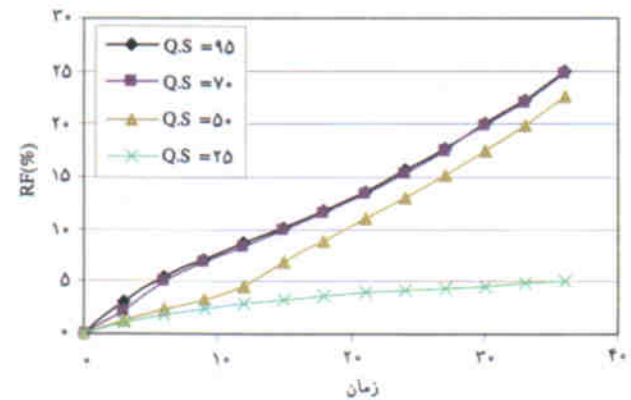
شکل ۹. بررسی اثر تخلخل ماتریس بر بازیابی تجمعی نفت تولیدی.



شکل ۶. بررسی اثر API بر نسبت بخار به نفت.



شکل ۱۰. بررسی اثر تخلخل ماتریس بر نسبت بخار به نفت.

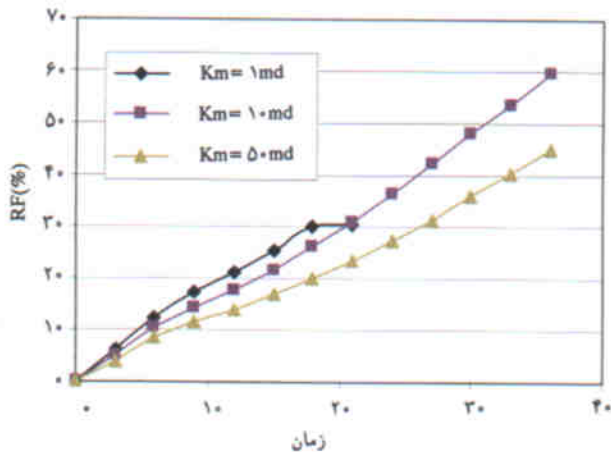


شکل ۷. بررسی اثر کیفیت بخار تزریقی بر بازیابی تجمعی نفت تولیدی.

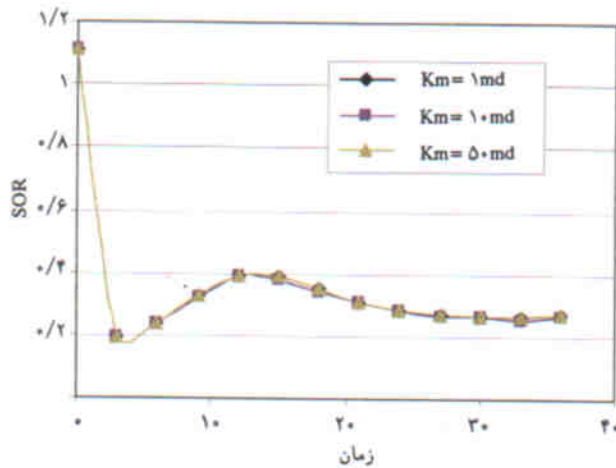
مدل مورد بحث، میزان تخلخل ۰/۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳۰، ۰/۴۰ به کار گرفته شد و با توجه به شکل های ۹ و ۱۰ نتیجه شد که هر قدر تخلخل ماتریس بالاتر رود مقادیر ضریب بازیابی کمینه می شود ولی مقادیر نفت و آب تولیدی بیشینه می شوند.

تولیدی حداقل می شوند. نتیجه‌ی دیگر اینکه کیفیت بهینه‌ی بخار ۷۰٪ است و بیش از آن غیراقتصادی است.

۵. تخلخل ماتریس از عوامل مهم در روش SAGD برای تولید نفت سنگین است. و تعیین کننده‌ی مقدار نفت درجا و مقدار گرمای مورد نیاز برای گرم کردن این مقدار نفت است. در آزمایش بر روی



شکل ۱۳. بررسی اثر تراوایی ماتریس بر بازایی تجمعی نفت تولیدی.



شکل ۱۴. بررسی اثر تراوایی بر نسبت بخار به نفت.

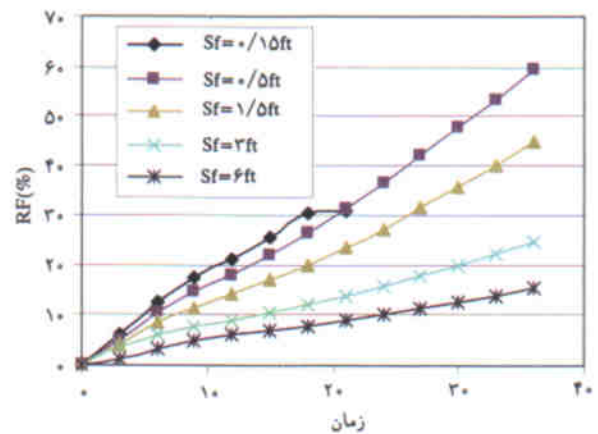
قرار گرفت و با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتیجه شد که تفاوت زیادی در این محدوده از تغییرات نفوذپذیری ماتریس در مقادیر ضریب بازایی و SOR و مقادیر نفت و آب تولیدی مشاهده نمی‌شود، ولی به مقدار اندک برای ۵۰ میلی داری مقادیر ضریب بازایی و نفت تولیدی بیشتر می‌شود.

نتیجه‌گیری

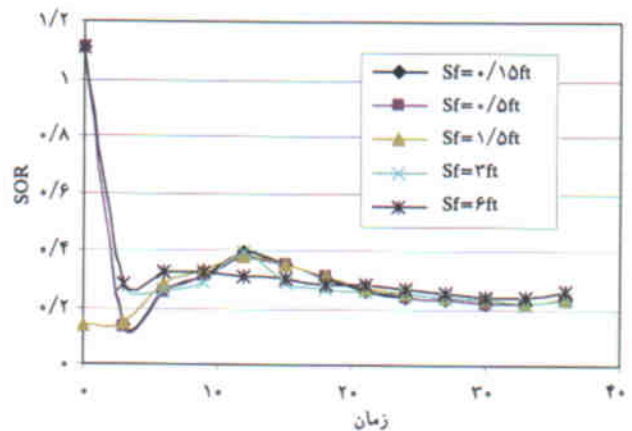
۱. روش SAGD برای مدل مورد بحث قابل کاربرد و اجراست.
۲. دبی بهینه بخار تزریقی برای این مدل ۲۸ bbl/day است.
۳. موقعیت صحیح چاه‌های تولید و تزریق در وسط مدل و چاه تولید در پائین چاه تزریق است.
۴. چگالی نفت در محدوده API ۱۹/۸ - ۶/۲ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازایی و نفت تولیدی و SOR ندارد.
۵. کیفیت بهینه بخار تزریقی ۷٪ است.

۶. فاصله‌ی ترک‌ها از یکدیگر از مواردی بود که در تولید نفت سنگین در روش SAGD تأثیر دارد. این بدین علت است که هم میزان نفوذ بخار و به تبع آن گرم شدن سریع‌تر و بیشتر ماتریس (به علت این که بلوک‌های ماتریس به سرعت تحت محاصره قرار می‌گیرند) و هم مقدار ریزش ثقلی به علت نفوذپذیری بالا در ترک‌ها تعیین می‌شوند. در این مقادیر ۰/۱۵، ۰/۵، ۱/۵، ۳ و ۶ فوت مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتیجه شد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای در این محدوده از فاصله‌ها در نتایج دیده نمی‌شود. البته به مقدار اندک برای ۰/۱۵ فوت مقادیر ضریب بازایی و نفت تولیدی بیشتر می‌شوند.

۷. نفوذپذیری ماتریس یکی از عوامل مهم در تولید نفت به روش SAGD است. زیرا هم گسترش ناحیه‌ی بخار و نفوذ در ماتریس و هم ریزش ثقلی نفت در ماتریس را تعیین می‌کند. مدل مورد بحث به ازاء مقادیر نفوذپذیری ۱، ۱۰، ۵۰ میلی داری مورد آزمایش



شکل ۱۱. بررسی اثر فاصله بین ترک‌ها بر بازایی تجمعی نفت تولیدی.



شکل ۱۲. بررسی اثر فاصله بین ترک‌ها بر نسبت بخار به نفت.

۳۶۵°F و فشار سطح ۱۴/۷Psi و فشار مخزن ۱۴۰۰Psi و تخلخل ماتریس و ترک به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۰۵، کیفیت بهینه‌ی بخار تزریقی ۷۰٪، دبی بخار تزریقی ۰/۲۸، اشباع اولیه‌ی ماتریس و ترک ۰/۳۲ و چاه‌های تولید و تزریق در وسط مدل و چاه تزریق در بالای چاه تولید است. بعد از ۱۲ ماه، مقدار ضریب بازیابی تجمعی به ۲۱/۸٪ و مجموع نفت تولیدی ۳۶۱bbbl و مقدار SOR نیز بین ۱/۱۱-۱/۱۹ و دبی تولید نیز بین ۱/۴۶bbbl/day-۰/۲۵۱ است.

۶. تخلخل ماتریس نقش مهمی بر بازیابی و نفت تولیدی دارد.
 ۷. فاصله‌ی ترک‌ها در محدوده‌ی ۶-۱۵ فوت نقش چندانی بر بازیابی و نفت تولیدی ندارد.
 ۸. نفوذپذیری ماتریس در محدوده‌ی ۵-۱ میلی داریسی تأثیر چندانی بر بازیابی و نفت تولیدی ندارد.
 با توجه به شرایط مخزن مقادیر بهینه به شرح ذیل ارائه می‌شود:
 دمای سطح ۶۰°F و دمای مخزن ۱۴۰°F و دمای بخار تزریقی

پانوش

1. Kuh-E-mond
 2. Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD)
 3. dual permeability
 4. viscosity
 5. envelope two phase
 6. fractional porosity
 7. heating process
 8. matrix drainage
۷. Buckles, R.S. "Steam stimulation heavy oil recovery at cold lake, alberta", SPE 7794, (1979).
8. Shepherd, D.W., "Steam stimulation recovery of cold lake bitumen", 1st UNITAR Conference, Edmonton, Alberta (June 4-12, 1979), reported in, the Future of Heavy Crude Oils and Tar Sands, NewYork: Mc Graw-Hill, pp 349-360 (1981).
9. Mainland, G.G. and Lo, H.Y., "Technological basis for commercial in-situ recovery of cold lake crude" 11th word pet. cong., London, Session RDT3(1), (1983).
10. Denbina, E.S., Boberg, T.C. and Rotter, M.B., "Evaluation of key reservoir drive mechanism in the early cycles of steam stimulation at cold lake", SPE 16737, Dallas (1986).
11. Butler, R.M., "Thermal recovery of oil and bitume", Prentice-Hall, nglewood Cliffs, NewJersey (1991).
12. Butler, R.M., "A new approach to the modelling of steam-assisted-gravity-drainage", *J. can. Pet. Tech* pp 42-51 (May-June 1985).
13. Griffin, P.J. and Trofimen Koff, P.N., "Laboratory studies of the steam-assisted-gravity-drainage process", *AOSTRA J. of Research*, 2(4), pp 197-203, (1986).
14. Chung, K.H. and Butler, R.M., "A theoretical and experimental study of steam-assisted-gravity-drainage process", in R.F. Meyers and Wiggin (Editors), The Fourth UNITAR/UNDP International conference on Heavy Crude and Tar sands, 4: Insitu Recovery, AOSTRA, Edmonton, pp 191-210 (1989).
۱۵. جعفری، مهدی. «شبیه‌سازی تولید نفت سنگین از مخزن ترک‌دار موند به روش SAGD»، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (شهریور ماه ۱۳۷۹).

منابع

1. Butler, R.M. "Steam-assisted-gravity-drainage", University of Calgary, Alberta, *Canada 9th annual Heavy and Oil Sands technical Symposium* (March 11, 1992).
2. Van Poolen, H.K. and Associates, Inc. "Fundamental of enhanced oil recovery", Tulsa, Oklahoma, (1980).
3. Butler R.m., McNab, G.s. and Lo, H.y., "Theoretical studies on the gravity-drain of heavy oil during steam heating", *can. chem. eng.*, 59: pp 455-460 (August 1981).
4. Butler, R.M. and Stephens, D.J., "The gravity-drainage of steam-heated heavy oil to parallel horizontal wells", *J.can pet Tech.*, pp 90-96 (April-June 1981).
5. Janisch, A., "Oil sands and heavy oil: can they ease the energy Shortage", 1st UNITAR Conference, Edmonton, Alberta (June 4-12, 1979), reported in, the future of heavy Crude Oils and Tar Sands, New Yourk: Mc Graw-Hill, pp 33-41 (1981).
6. Berry, V.J.Jr and Parrish, D.R., "A theoretical analysis of heat flow in reverse combustion", *Trans. AIME*, 219: pp 124-131 (1960).