

بررسی مکانیسم نفوذ ملکولی طی تزریق CO_2 و گاز هیدروکربنی در بلوک منفرد و مدل سکتوری مخزن شکافدار

احد فریدونی، مهدی عصاره* و نورالله کثیری بیده‌ندی
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۳۱

چکیده

تزریق گاز یکی از روش‌های معمول در ازدیاد برداشت از مخازن شکافدار است. بخش عمده‌ای از مخازن هیدروکربوری ایران شکافدار هستند. مکانیسم‌های تولیدی در مخازن شکافدار با مخازن معمولی متفاوت است. یکی از مکانیسم‌های تولیدی در مخازن شکافدار تحت تزریق گاز، نفوذ مولکولی است که در کنار ریزش ثقلی می‌تواند باز یافت نفت را افزایش دهد. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی، تأثیر نفوذ مولکولی در باز یافت نفت طی تزریق CO_2 و گاز هیدروکربوری رقیق، ابتدا در مقیاس بلوک ماتریس منفرد و سپس در سکتور مدل مربوط به یکی از مخازن جنوب غربی ایران بررسی شده است. ابتدا تأثیر نفوذپذیری ماتریس، اختلاف نفوذپذیری ماتریس و شکاف، تخلخل، فشار موئینگی گاز-نفت، ارتفاع ماتریس و ترکیب گاز تزریقی بر نفوذ مولکولی در بلوک ماتریس منفرد و سپس تأثیر نفوذ مولکولی در باز یافت نفت از سکتور مدل مخزنی در تزریق CO_2 و گاز رقیق بررسی شد. نتایج نشان داد که نفوذ مولکولی با افزایش سرعت انتقال جرم بین ماتریس و شکاف در تزریق گاز امتزاجی (گاز رقیق و CO_2) میزان باز یافت نفت را افزایش می‌دهد. هرچه نفوذپذیری ماتریس کمتر و فشار موئینگی گاز-نفت درون ماتریس بیشتر باشد، بازده جابجایی نفت در طی مکانیسم ریزش ثقلی کمتر می‌شود و تأثیر نفوذ مولکولی در باز یافت نهایی افزایش می‌یابد. در تزریق گاز در سکتور مخزن، در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با به تأخیر انداختن زمان میان شکنی گاز از طریق جابجایی اجزاء به درون ماتریس و در نتیجه حفظ فشار مخزن میزان باز یافت نهایی را در تزریق CO_2 حدود ۲٪ و در تزریق گاز رقیق ۵٪ افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: مخازن شکافدار، تزریق گاز، نفوذ مولکولی، بلوک ماتریس منفرد، ریزش ثقلی

مقدمه

مخازن کربناته بیش از ۶۰٪ از نفت جهان را در خود ذخیره دارند و تقریباً نیمی از پروژه‌های تزریق گاز در سراسر جهان در این مخازن انجام شده است [۱]، [۲]. بیشتر مخازن کربناته، شکافدار طبیعی هستند و از نظر تخلخل و نفوذپذیری بسیار ناهمگن می‌باشند [۳]. مشخصه معمول مخازن شکافدار به این صورت است که بلوک‌های ماتریس با تخلخل و نفوذپذیری کم توسط یک شبکه‌ای از شکاف‌های با نفوذپذیری بالا و تخلخل پایین احاطه شده است. شکاف‌ها مسیرهایی برای جریان سیال مخزن و ماتریس‌ها نیز محلی برای ذخیره آن فراهم می‌کنند [۴، ۵]. شکاف‌های با نفوذپذیری بالا در اطراف بلوک ماتریس، مسیر اصلی مهاجرت هیدروکربن به چاه تولیدی را فراهم می‌کنند و مکانیسم تولیدی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

چهار مکانیسم بازیافت اساسی در مخازن شکافدار طبیعی، بسته به سیال جابجا کننده و مشخصات و شرایط مخزن وجود دارد. این مکانیسم‌ها شامل ریزش ثقلی^۱، آشام خود به خودی^۲، جابجایی ویسکوز^۳ و نفوذ مولکولی^۴ می‌شود [۶]. اهمیت نسبی این مکانیسم‌ها بستگی به عوامل متعددی از جمله نفوذپذیری ماتریس، چگالی شکاف‌ها، خواص سیالات، نرخ تزریق و فشار و دمای مخزن دارد [۷]. جابه‌جایی ویسکوز به‌طور مستقیم به بازیافت نفت کمکی نمی‌کند به این دلیل که سیال تزریقی از طریق شکاف‌های با نفوذپذیری بالا که شامل تنها درصد کمی از حجم منافذ هستند، جابه‌جا می‌شود. در مخازن کربناته آب‌دوست، که آب به‌عنوان سیال جابه‌جا کننده در مخزن است، یکی از مکانیسم‌های اصلی بازیافت، آشام آب خود به خودی خواهد بود [۳]. حدود ۸۰٪ از تمام مخازن کربناته دارای ترشوندگی خنثی تا ترجیحاً نفت دوست هستند، که شرایط نامطلوبی برای آشام خودبه‌خود آب فراهم می‌کنند [۸].

در چنین مواردی اغلب گاز به‌عنوان سیال جابجا کننده (تزریقی) استفاده می‌شود. در بازیافت نفت از مخازن شکافدار که تحت تزریق گاز قرار گرفته‌اند، عملکرد ناحیه مورد هجوم گاز بسیار مهم است. در این ناحیه، شکاف‌ها مملو از گاز هستند و ماتریس مورد هجوم گاز قرار گرفته است. آزمایش‌ها و مفاهیم تئوری نشان می‌دهد که در این ناحیه نفت درون ماتریس به سمت پایین جریان ۲ می‌یابد [۹-۱۱]. ریزش ثقلی ناشی از اختلاف چگالی نفت و گاز می‌تواند در این ناحیه مکانیسم غالب باشد در صورتی که بلوک‌های بزرگ و با نفوذپذیری بالای ماتریس مخزن توسط گاز درون شکاف‌ها احاطه شده باشد. زمانی که مخزن متشکل از بلوک‌های ماتریس با اندازه کوچک با فشار موینگی بالا و نفوذپذیری کم باشد، پراکندگی ناشی از نفوذ مولکولی مکانیسم غالب می‌شود و ریزش ثقلی بازدهی کمی خواهد داشت [۱۲]. گاز موجود در شبکه شکاف‌ها با نفت درون ماتریس در تعادل نیست و به دلیل اختلاف غلظت در شرایط امتزاجی، نفوذ مولکولی تمایل به متعادل کردن ترکیبات سیالات در ماتریس و شکاف را دارد [۱۳]. این امر منجر به انتقال جرم نفت از ماتریس به شبکه شکاف‌ها می‌شود. نفوذ در نواحی از محیط متخلخل که در آن سیالات دارای سرعت بالایی هستند (مانند شکاف‌ها)، اغلب نقش مهمی بازی نمی‌کند چراکه زمان مشخصه برای نفوذ، نسبتاً بزرگ است. باین‌حال، در نواحی متخلخلی که در آن سرعت جریان کم است (مانند بلوک‌های ماتریس) نفوذ می‌تواند انتقال جرم غالب نسبت به جریان ویسکوز باشد [۱۴، ۱۵]. به همین منظور تعدادی آزمایش در مقیاس مغزه توسط محققان مختلف جهت بررسی اهمیت نفوذ مولکولی انجام شد [۱۶-۲۱]. براساس نتایج این آزمایش‌ها تعدادی از محققان به بررسی فرآیند نفوذ به کمک

1. Gravity Drainage
2. Spontaneous Imbibition
3. Viscous Displacement
4. Molecular Diffusion

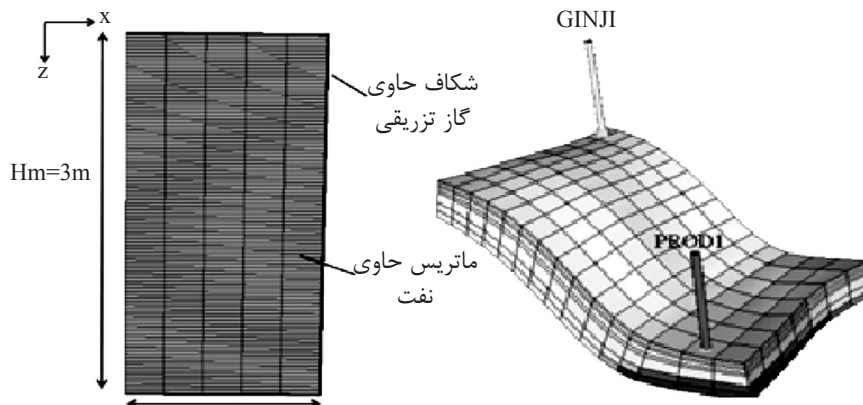
مطالعه قرار گرفت. در انتها نیز به بررسی تأثیر مکانیسم نفوذ مولکولی در یک مدل سکتوری از این مخزن پرداخته شده و نتایج آن ارائه گردیده است.

روش کار

توصیف مدل

مدل مخزنی مورد استفاده در این مطالعه دارای دو لایه تولیدی است که ضخامت لایه نفتی این دو ناحیه در ابتدای تولید تقریباً به طور متوسط 400 m می‌باشد. سطح تماس نفت-آب (WOC) در این سکتور در عمق 2200 m قرار دارد و نفت مخزن زیراشباع می‌باشد یعنی سکتور فاقد کلاهدک گازی اولیه است. دو لایه این میدان از جنس سنگ آهک بوده و حاوی شکاف هستند. در نتیجه برای مدل‌سازی مخزن از مدل تخلخل دوگانه استفاده شده است. دمای مخزن 75°C و فشار حباب نفت در این دما $159/5 \text{ bar}$ می‌باشد. فشار اولیه در عمق مینای مخزن (925 m) برابر 250 bar است. شکل ۱ ترسیم شماتیکی از سکتور مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. این سکتور دارای $15 \times 7 \times 16$ بلوک به ترتیب در جهات X، Y و Z می‌باشد. ۸ بلوک اول در جهت عمودی ماتریس‌ها و ۸ بلوک بعدی شکاف هستند. جدول ۱ ابعاد و شبکه‌بندی مدل و همچنین مقادیر تخلخل و نفوذپذیری ماتریس و شکاف را به طور خلاصه ارائه می‌دهد.

شبه‌سازی دینامیک جریان سیال پرداختند [۱۳]، ۲۲ و ۲۳]. در این پژوهش با توجه به اهمیت مخازن شکاف‌دار در ایران و پتانسیل تزریق گاز در این مخازن به‌عنوان روش‌های ازدیاد برداشت و با در نظر گرفتن این نکته که کشورمان ایران دارنده دومین ذخایر گازی جهان است می‌توان پیش‌بینی کرد که چنین پروژه‌هایی از نظر اقتصادی مناسب باشد. از طرفی ماتریس‌های مخازن ایران دارای نفوذپذیری بسیار پایینی هستند و پیش‌بینی می‌شود که بحث نفوذ مولکولی در آن‌ها مهم و تأثیرگذار باشد. لذا هدف از این مطالعه بررسی کمی اثر نفوذ مولکولی در کنار ریزش ثقلی بر میزان بازیافت نفت در مخازن شکاف‌دار طی تزریق گاز است بطوریکه با شناسایی و بررسی پارامترهای مؤثر بتوان پیش‌بینی دقیق‌تری از این فرآیند در مخزن به دست آید. برای این منظور با استفاده از شبه‌سازی ترکیبی نرم‌افزار اکلیپس ۳۰۰ و با به‌کارگیری داده‌های سنگ و سیال مربوط به یکی از مخازن شکاف‌دار در جنوب غربی ایران تأثیر نفوذ مولکولی طی تزریق گازهای امتزاجی CO_2 و یک نمونه گاز هیدروکربوری در بلوک ماتریس منفرد بررسی شده است و پس از مطالعه مکانیسم جابجایی توسط این دو گاز، تأثیر پارامترهای مهم سنگ و سیال مخزنی بر بازیافت نفت از بلوک ماتریس و اهمیت نفوذ مولکولی مورد



شکل ۱ سمت راست: سکتور مدل مخزنی مورد استفاده و محل قرارگیری چاه‌های تزریقی و تولیدی در آن. سمت چپ: سطح مقطع یک بلوک شامل ماتریس و شکاف

جدول ۱ خواص ماتریس و شکاف مدل مخزنی.

پارامتر	مقدار متوسط	بازه تغییرات
تخلخل ماتریس، کسر	۰/۰۳	$۰/۰۹۷۸ \leq \phi_m \leq ۰/۰۰۱۹$
تخلخل شکاف، کسری	۰/۰۳۷۵	$۰/۰۹۷۸ \leq \phi_f \leq ۰/۰۰۱۹$
نفوذپذیری ماتریس در جهت X و Y،	۰/۰۷۴	$۰/۰۰۳۷ \leq (k_{x,m}) = (k_{y,m}) \leq ۱/۰۷۵۱$
نفوذپذیری ماتریس در جهت Z،	۰/۰۵۱۶۹	$۰/۰۰۲۶۰ \leq (k_{z,m}) \leq ۰/۷۵۲۵۰$
نفوذپذیری شکاف در جهت X و Y،	۶۵۴/۶۶	$۴۲/۷۲۳ \leq (k_{x,f}) = (k_{y,f}) \leq ۱/۰۷۵۱$
نفوذپذیری شکاف در جهت Z،	۱۳۰/۹۳	$۸/۵۴۴۷ \leq (k_{z,f}) \leq ۸۹۱/۳۹$
عمق مخزن، m	۱۱۹۳/۵	$۵۲۹/۱۱ \leq Depth \leq ۲۲۹۸/۹$
نسبت نفوذپذیری عمودی به افقی ماتریس	-	$(K_h/K_v)_m = ۱/۴۲$
نسبت نفوذپذیری عمودی به افقی شکاف	-	$(K_h/K_v)_f = ۵$

بلوک ماتریس منفرد

یک بلوک ماتریس منفرد مکعبی شکل با ابعاد $۳ \times ۳ \times ۳ \text{ m}^3$ که شکاف‌هایی با بازشدگی $۸۷/۱ \text{ mm}$ اطراف آن را احاطه کرده به عنوان نماینده مخزن برای بررسی انتقال جرم بین ماتریس و شکاف در نظر گرفته شد. تخلخل و نفوذپذیری ماتریس از مقادیر میانگین داده‌های مربوط به مدل در جدول ۱ مقداردهی می‌شود. مدل‌سازی بلوک ماتریس توسط مدل تک تخلخلی انجام شده است. اشباع نفت درون ماتریس $۰/۸۸$ و اشباع آب همزاد $۰/۱۲$ (میانگین اشباع در سکتور مدل مخزن) می‌باشد. در این مدل نفوذپذیری بالای شکاف موجب می‌شود اثر نیروی ویسکوز ناشی از تزریق در مقابل نیروهای گراویتی و موئینگی ناچیز باشد. در واقع هدف مدل کردن یک بلوک ماتریس است که در آن افت فشار جانبی وجود ندارد و این بلوک در مخزن در یک شرایط مرزی بدون جریان، دور از چاه تزریقی و چاه تولیدی قرار گرفته است (مشابه مخازنی که تحت تزریق گاز برای حفظ فشار مخزن هستند).

از آنجایی که بلوک ماتریس به صورت متقارن است، تنها نصف آن مدل می‌شود. یک مدل دوبعدی با ابعاد $۱ \times ۱ \times ۱۰$ در دو جهت X و Z برای بلوک ماتریس در نظر گرفته شده که دو شکاف موازی در بالا و

پایین و یک شکاف عمودی در سمت راست آن قرار دارد شکل ۱. سمت چپ تزریق گاز از شکاف بالا و تولید نیز از شکاف پایین انجام می‌شود. برای شبکه شکاف‌ها از منحنی نفوذپذیری نسبی خطی استفاده شده که مقدار اشباع‌های باقی‌مانده در آن صفر در نظر گرفته می‌شود. فشار موئینگی نیز در شکاف‌ها صفر است. برای پیش‌بینی رفتار فازی سیالات مخزن از معادله حالت پنگ-رابینسون سه پارامتری (به همراه ضریب انتقال حجم) استفاده شده است. برای محاسبه گرانشی سیالات از رابطه لورنز-بری-کلارک^۱ استفاده می‌شود. CO_2 و گاز هیدروکربوری با ترکیب داده شده در جدول ۲ به عنوان گاز تزریقی به کار رفته‌اند. ضریب بازیافت از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$RF = \left(1 - \frac{\text{OIP}(\text{now})}{\text{OIP}(\text{initial})} \right) \quad (۱)$$

که $\text{OIP}(\text{now})$ مقدار نفت در جای باقی‌مانده در ماتریس و $\text{OIP}(\text{initial})$ مقدار نفت در جای اولیه است. با توجه به امتزاجی بودن جابجایی گازهای تزریقی، فشار موئینگی بین گاز و نفت از رابطه زیر اصلاح می‌گردد:

$$P_{cgo} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \right) P_{cgo,lab} \quad (۲)$$

1. Lorenz-Bray-Clark Correlation
2. Oil in Place (OIP)

جدول ۲ ترکیب گاز رقیق تزریقی.

اجزا	CO ₂	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	IC ₄	nC ₄	IC ₅	nC ₅	C ₆	C ₇₊
ترکیب	۰/۰۹۷۱	۰/۰۵۹۱	۷۰/۳۹۳۵	۱۲/۶۷۷۸	۸/۷۶۹۷	۱/۳۳۴۶	۳/۵۹۴۸	۱/۱۵۸۴	۱/۳۰۹۲	۰/۶۰۵۹	۰

ضریب بازیافت در تزریق CO₂ و گاز رقیق به ترتیب ۹/۲۸٪ و ۵٪ بیشتر از حالت بدون نفوذ می‌شود. یکی دیگر از اثرات مهم تزریق امتزاجی، کاهش گرانیوی نفت است. براساس نتایج تغییرات گرانیوی نفت در شکل ۴ برای یک سلول در مرکز ماتریس، زمانی که جبهه جابه‌جایی به این سلول می‌رسد، گرانیوی نفت با انحلال CO₂ و گاز رقیق در نفت و تورم آن شروع به کاهش می‌کند و یک ناحیه با گرانیوی کاهش یافته ایجاد می‌کند که می‌تواند سرعت بازیافت از طریق ریزش ثقلی را افزایش دهد. با عبور جبهه از این نقطه و قرار گرفتن آن در پشت جبهه جابجایی، مشاهده می‌شود که گرانیوی نفت در این سلول در تزریق گاز رقیق (قسمت همچنان کاهش می‌یابد در حالی که در تزریق CO₂ افزایش یافته است که علت آن تبخیر و استخراج اجزای میانی و سنگین‌تر نفت توسط CO₂ است که گرانیوی نفت باقی‌مانده در این قسمت را افزایش می‌دهد در حالی که گاز رقیق همچنان با انحلال در نفت باقی‌مانده گرانیوی را کاهش داده و با افزایش تحرک‌پذیری نفت باقی‌مانده در پشت جبهه امکان تولید بیشتر نفت را فراهم می‌کند. ثابت ماندن اشباع گاز در سلول در کنار کاهش گرانیوی نفت در تزریق CO₂ نشان می‌دهد که CO₂ اجزای نفت را استخراج و تبخیر می‌کند و باعث افزایش گرانیوی آن می‌گردد. نفوذ مولکولی در این مرحله باعث افزایش سرعت انتقال جرم بین ماتریس و شکاف می‌شود. تشکیل سریع‌تر اشباع گاز در سلول مطابق شکل ۴ دلیلی بر این موضوع است. نفوذ مولکولی در تزریق CO₂ اجزای تبخیر شده طی تماس گاز با نفت را از ماتریس به درون شکاف منتقل کرده و باعث تولید آن می‌شود.

که در آن $P_{ego,lab}$ فشار موئینگی به دست آمده از آزمایشگاه و داده ورودی مدل، σ_{ref} کشش سطحی گاز-نفت در آزمایشگاه که در اینجا برابر ۶/۱ mN/m است و σ کشش سطحی محاسبه شده توسط شبیه‌ساز می‌باشد. ضریب نفوذ اجزا در فاز گاز و نفت از رابطه تجربی توسعه داده شده سیگموند^[۱۳] محاسبه و مقادیر آن در جدول ۳ ارائه شده است.

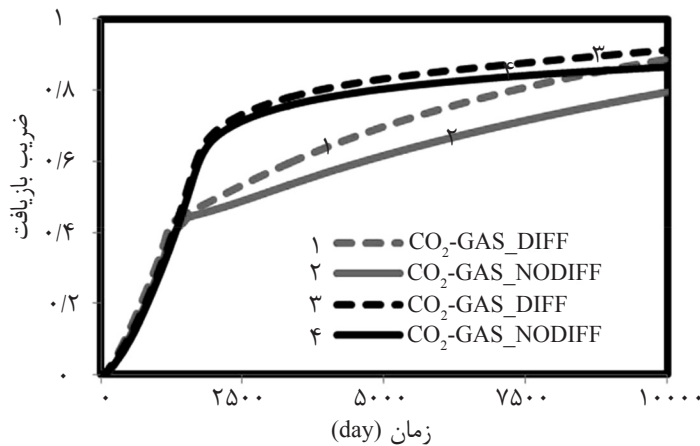
نتایج و بحث

مکانیسم بازیافت نفت در بلوک ماتریس منفرد

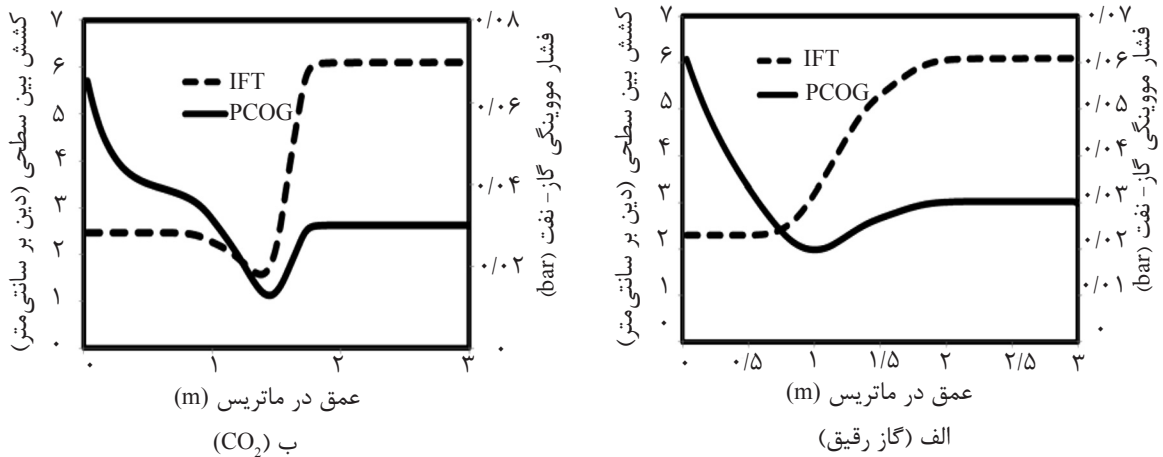
فشار سیستم برابر فشار حباب ($P = 5/159 \text{ bar}$) و دبی تزریق گاز برابر $Q_{inj} = 5 \text{ SM}^3/\text{D}$ قرار داده می‌شود. چگالی نفت و گازهای تزریقی CO₂ و گاز رقیق در دمای مخزن و فشار سیستم، به ترتیب برابر ۷۷۱/۶۵۹، ۴۷۳/۳۳۲ و ۱۸۰/۰۹۲ (kg/m³) است. شکل ۲ تولید در تزریق CO₂ و گاز رقیق دارای دو دوره می‌باشد؛ دوره کوتاه اول که با نرخ بازیافت بالا مشخص می‌شود و دوره‌ی طولانی‌تر دوم که سرعت بازیافت کمتر است. در دوره تولیدی اول ریزش ثقلی مکانیسم غالب است که با کاهش کشش سطحی گاز-نفت در جبهه جابجایی و غلبه بر فشار موئینگی آستانه باعث بازیافت نفت از ماتریس می‌شود. شکل ۳ کاهش کشش سطحی و در نتیجه آن فشار موئینگی آستانه را در جبهه جابه‌جایی نشان می‌دهد. در پشت جبهه به دلیل افزایش اشباع گاز مقدار فشار موئینگی افزایش می‌یابد. از آنجا که چگالی گاز رقیق کمتر از CO₂ است، قدرت ریزش ثقلی در تزریق این گاز مقداری بیشتر بوده و همراه با کاهش کشش سطحی میزان بازیافت بیشتری دارد. نفوذ مولکولی در این دوره تأثیر چندانی در بازیافت ندارد. اما در دوره تولیدی دوم نفوذ مولکولی اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد و با گذشت زمان اثر آن بیشتر می‌شود به طوری که تا انتها شبیه‌سازی

جدول ۳ ضرایب نفوذ اجزا در فاز گاز و نفت.

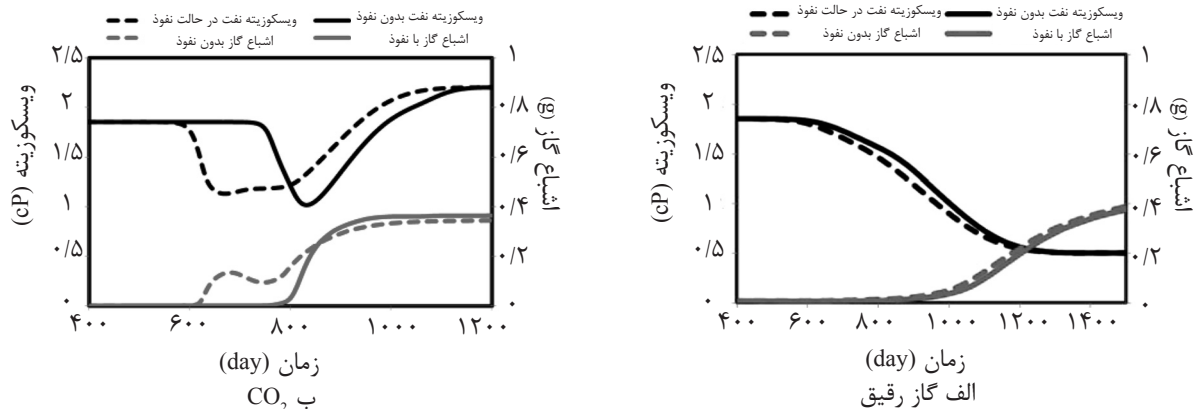
Component	D _l (cm ² /s)		D _g (cm ² /s)	
	p=۱۰۰ bar	p=۱۵۹/۵ bar	p=۱۰۰ bar	p=۱۵۹/۵ bar
CO ₂	۱/۵×۱۰ ^{-۵}	۳/۲۴×۱۰ ^{-۷}	۱/۷۸×۱۰ ^{-۳}	۳/۰۸×۱۰ ^{-۵}
N ₂	۲/۱۲×۱۰ ^{-۵}	۴/۵۷×۱۰ ^{-۷}	۲/۳۳×۱۰ ^{-۳}	۴/۰۲×۱۰ ^{-۵}
C ₁	۲/۰۰×۱۰ ^{-۵}	۳/۸۲×۱۰ ^{-۷}	۱/۶×۱۰ ^{-۳}	۲/۷۱×۱۰ ^{-۵}
C ₂	۱/۵۳×۱۰ ^{-۵}	۳/۳×۱۰ ^{-۷}	۱/۲۷×۱۰ ^{-۳}	۲/۶۹×۱۰ ^{-۵}
C ₃	۱/۲×۱۰ ^{-۵}	۲/۹۵×۱۰ ^{-۷}	۱/۶۳×۱۰ ^{-۳}	۲/۳۵×۱۰ ^{-۵}
IC ₄	۱/۰۲×۱۰ ^{-۵}	۲/۲×۱۰ ^{-۷}	۱/۱۵×۱۰ ^{-۳}	۱/۹۹×۱۰ ^{-۵}
NC ₄	۱/۰/۵×۱۰ ^{-۵}	۲/۱۸×۱۰ ^{-۷}	۱/۱۴×۱۰ ^{-۳}	۱/۹۷×۱۰ ^{-۵}
IC ₅	۸/۶۷×۱۰ ^{-۵}	۱/۹×۱۰ ^{-۷}	۱/۰۱×۱۰ ^{-۳}	۱/۷۵×۱۰ ^{-۵}
NC ₅	۸/۹۶×۱۰ ^{-۵}	۱/۸۹×۱۰ ^{-۷}	۹/۸۸×۱۰ ^{-۴}	۱/۷۱×۱۰ ^{-۵}
C ₆	۷/۴۷×۱۰ ^{-۵}	۱/۶۸×۱۰ ^{-۷}	۸/۶۲×۱۰ ^{-۴}	۱/۴۹×۱۰ ^{-۵}
C ₇₊	۸/۶۷×۱۰ ^{-۵}	۲/۰۴×۱۰ ^{-۷}	۳/۹۸×۱۰ ^{-۴}	۱/۸۹×۱۰ ^{-۵}



شکل ۲ ضریب باز یافت نفت بر حسب زمان با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون آن در تزریق CO₂ و گاز رقیق در فشار ۱۵۹/۵ بار.



شکل ۳ تغییرات کشش سطحی و فشار موئینگی در طول ماتریس دز زمان ۸۰۰ روز گذشته از شبیه سازی.



شکل ۴ تغییرات گرانی و اشباع گاز در یک سلول در مرکز ماتریس.

دیگر اختلاف بین آن‌ها، میزان اهمیت نیروی ویسکوز (جابجایی ناشی از افت فشار در سیستم) را تعیین می‌کند. اگر سیال تزریقی همواره در داخل شکاف‌ها حرکت کند، نیروی ویسکوز را می‌توان در ماتریس‌های با نفوذپذیری کم در مقایسه با نفوذپذیری شکاف، نادیده گرفت. برای بررسی این ادعا سه نسبت مختلف ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۱۰۰۰۰ بین نفوذپذیری شکاف و ماتریس (kf/km) در نظر گرفته شده است. در هر یک از این موارد، مقدار نفوذپذیری ماتریس ثابت بوده و تنها نفوذپذیری شکاف افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت نفوذپذیری شکاف به ماتریس میزان اهمیت نفوذ مولکولی کمتر می‌شود و با توجه به افت فشاری که در سیستم برای نسبت ۲۰۰۰ مشاهده گردید، مشخص می‌شود که هر چه این اختلاف کمتر می‌شود جابجایی ویسکوز غالب‌تر شده و موجب بازیافت سریع نفت ماتریس می‌گردد. در واقع هر چه اختلاف نفوذپذیری شکاف و ماتریس کمتر باشد گاز تزریقی بجای حرکت از شکاف‌ها تمایل بیشتری برای جریان یافتن مستقیم به درون ماتریس و برخورد با نفت و در نتیجه جابجایی امتزاجی دارد که سرعت این مکانیسم نسبت به ریزش ثقلی در کنار نفوذ بیشتر بوده و تأثیر نفوذ مولکولی کمتر می‌شود.

از طرف دیگر ورود گاز به ماتریس از اطراف و در راستای شکاف‌ها نیز امکان‌پذیر می‌شود، در نتیجه اثرات کاهش کشش سطحی و در ادامه جابه‌جایی موئینگی-گراویتی بیشتر خواهد شد و بازیافت نهایی را به‌ویژه زمانی که بازدهی نیروی گراویتی کمتر است، افزایش می‌دهد.

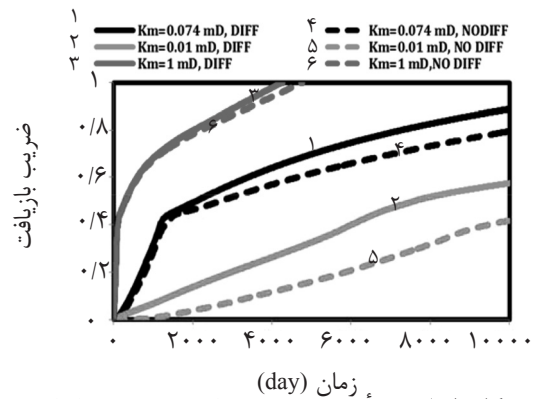
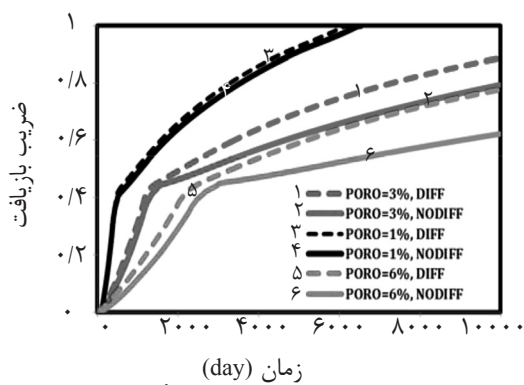
بررسی اثر پارامترها

نفوذپذیری ماتریس

برای بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس با توجه به بازه تغییرات آن در سکتور مخزنی سه مقدار ۰/۰۱، ۰/۰۷۴ و ۱ mD در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵ سمت راست با افزایش نفوذپذیری ماتریس، بازدهی ریزش ثقلی افزایش می‌یابد و هرچه نفوذپذیری ماتریس کمتر می‌شود، سرعت بازیافت از طریق این مکانیسم کمتر خواهد شد. بنابراین در نفوذپذیری‌های کمتر به دلیل کاهش سرعت جابجایی جبهه و بازدهی کم ریزش ثقلی میزان مشارکت و زمان برای اثرگذاری نفوذ مولکولی بیشتر می‌شود و تأثیر بیشتری بر بازیافت نهایی خواهد داشت. به عبارت دیگر هرچه نفوذپذیری ماتریس کمتر باشد، شروع تأثیرگذاری نفوذ مولکولی بر بازیافت سریع‌تر خواهد بود. این روند در تزریق هر دو گاز کربن دی‌کسید و گاز رقیق مشابه است.

اختلاف نفوذپذیری شکاف و ماتریس

نسبت بین نفوذپذیری ماتریس و شکاف به عبارت



شکل ۵ راست: تأثیر نفوذپذیری ماتریس بر روی بازیافت نفت در یک بلوک ماتریس منفرد در تزریق CO₂. چپ: تأثیر تخلخل بلوک ماتریس بر روی بازیافت نفت طی تزریق CO₂.

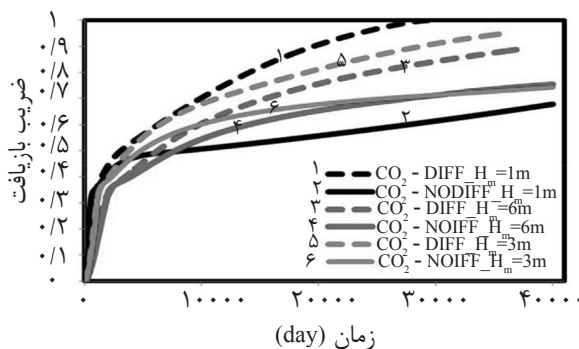
ارتفاع ماتریس، میزان بازیافت نهایی نفت در حالت بدون نفوذ افزایش می‌یابد. اگرچه به دلیل افزایش میزان نفت در جای موجود در ماتریس سرعت بازیافت کمتر شده است. مطابق این شکل با افزایش ارتفاع ماتریس اثر نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی کمتر شده است و بازیافت نفت دیرتر تحت تأثیر نفوذ قرار می‌گیرد که ناشی از افزایش سرعت بازیافت به دلیل ریزش ثقلی می‌باشد. مطابق شکل، هر چه ماتریس کوچک‌تر باشد بازیافت نهایی بیشتر تحت تأثیر نفوذ قرار می‌گیرد و اختلاف بازیافت با در نظر گرفتن نفوذ و بدون آن بیشتر شده است. در واقع در ماتریس‌های کوچک به دلیل به تعادل رسیدن سریع نیروهای موئینگی و گراویتی، مقدار بیشتری از نفت در سیستم به دلیل موئینگی باقی می‌ماند که با فعال شدن نفوذ مولکولی می‌توان این نفت باقی‌مانده در سیستم را تا حد زیادی بازیافت کرد به طوری که افزایش بازیافت ناشی از نفوذ برای بلوک‌های ماتریس کوچک‌تر و نزدیک به ارتفاع آستانه موئینگی بیشتر است.

تخلخل ماتریس

برای بررسی اثر تخلخل سه مقدار ۱، ۳ و ۶٪ مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش تخلخل ضریب نفوذ مؤثر اجزا درون محیط متخلخل افزایش پیدا می‌کند که از طریق رابطه سیگموند مجدداً محاسبه می‌شود. از طرفی میزان نفت در جای موجود در واحد حجم سنگ نیز با افزایش تخلخل افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که میزان نفت بیشتری در واحد حجم سنگ می‌تواند تحت تأثیر نفوذ قرار بگیرد. از طرفی دیگر با افزایش تخلخل سرعت واقعی حرکت سیالات درون ماتریس کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۵ سمت چپ با افزایش تخلخل، میزان تأثیر نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی افزایش خواهد یافت و اثر آن تشدید می‌شود. این روند در تزریق هر دو گاز وجود دارد.

ارتفاع ماتریس

برای مطالعه اثر ارتفاع ماتریس سه مقدار ۱، ۳، ۶ m برای ارتفاع ماتریس در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده در شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۶ تأثیر ارتفاع بلوک ماتریس بر روی بازیافت نفت در تزریق CO₂.

فشار موئینگی ماتریس

در این قسمت تأثیر فشار موئینگی نفت-گاز برای سه مدل مختلف فشار موئینگی که منحنی های آن در شکل ۷ (الف) برای گونه های سنگی مختلف موجود در مخزن ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق این شکل برای مدل یک تا مدل سوم، به ترتیب فشار موئینگی افزایش پیدا می کند. با افزایش فشار موئینگی گاز-نفت در ماتریس، میزان بازیافت طی تزریق گاز کاهش می یابد. با افزایش فشار موئینگی مطابق شکل ۷ (ب) مشاهده می شود که اختلاف بازیافت بین حالت نفوذ و بدون آن بیشتر می شود و نفوذ مولکولی سریع تر بازیافت نفت را تحت تأثیر قرار می دهد. با افزایش فشار موئینگی، فاز ترکنده (نفت) تمایل بیشتری به ماندن در ماتریس دارد، در نتیجه بازدهی ریزش ثقلی کاهش می یابد و سرعت بازیافت و حرکت جبهه جابجایی کندتر می شود، بنابراین در چنین شرایطی نفوذ زودتر وارد عمل شده و تأثیر بیشتری در بازیافت نهایی خواهد داشت.

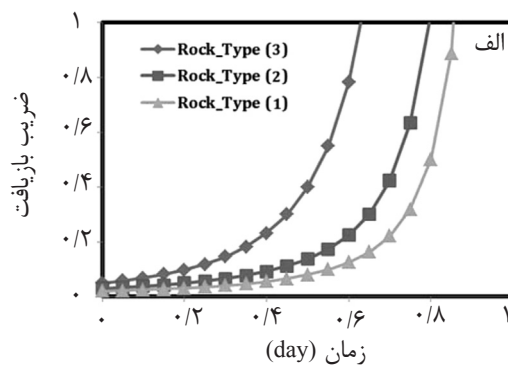
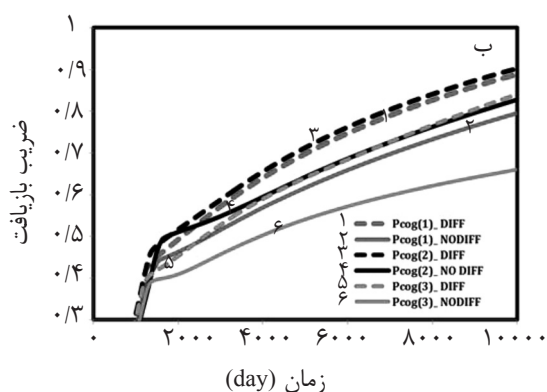
ترکیب گاز تزریقی

ترکیب گاز تزریقی می تواند در مخزن طی مخلوط شدن با گاز موجود در کلاهک گازی تغییر کند. از طرفی به دلیل ارزش اقتصادی گازهای هیدروکربوری (گاز رقیق) ممکن است این گازها را با گازهای غیر هیدروکربوری و با ارزش اقتصادی کمتر مخلوط کرده و سپس تزریق کنند. خالص سازی CO₂ نیز ممکن است هزینه بر باشد و این گاز همراه با گازهای دیگر حاصل از احتراق مانند نیتروژن تزریق شود. مطابق شکل ۸ (الف) دو ترکیب با درصد مولی مختلف از CO₂ و نیتروژن به عنوان گاز تزریقی در نظر گرفته شده است. با مقایسه نمودارهای بازیافت نفت برحسب زمان برای این دو ترکیب گاز با منحنی بازیافت تزریق CO₂ خالص مشاهده می شود که هر چه میزان نیتروژن موجود در گاز تزریقی بیشتر می شود میزان بازیافت به شدت کاهش می یابد که ناشی از کاهش امتزاج پذیری گاز تزریقی است.

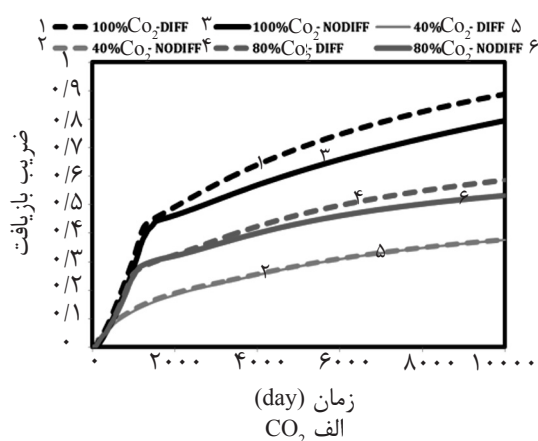
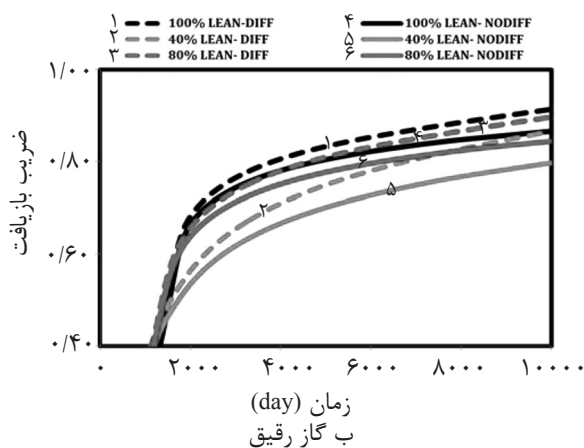
چراکه حداقل فشار امتزاجی نیتروژن در این شرایط، بیشتر از CO₂ است و طی ترکیب نیتروژن با CO₂ توانایی تبخیر و استخراج اجزای میانی نفت به شدت توسط مخلوط گاز تزریقی کاهش می یابد. از طرف دیگر با افزایش درصد مولی نیتروژن در گاز تزریقی اهمیت نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی کاهش یافته است. در قسمت (ب) شکل ۸ تأثیر ترکیب گاز رقیق با CO₂ ارائه شده است. برای بررسی اثر ترکیب CO₂ با گاز رقیق دو مخلوط ۴۰ و ۸۰٪ مولی از گاز رقیق با CO₂ در نظر گرفته شد. مطابق شکل با افزایش درصد گاز رقیق در مخلوط گاز تزریقی، میزان بازیافت نهایی افزایش یافته است که می تواند به دلیل افزایش قدرت امتزاج پذیری گاز تزریقی (با توجه به حداقل فشار امتزاجی این دو گاز) و افزایش بازدهی ریزش ثقلی (به دلیل افزایش اختلاف چگالی گاز تزریقی با نفت) باشد. از طرفی برخلاف این روند، با افزایش درصد گاز رقیق در مخلوط میزان تأثیر نفوذ مولکولی کمتر شده است. دلیل امر را می توان ناشی از کاهش توانایی تبخیر اجزای میانی سبک و متوسط نفت توسط مخلوط تزریقی باشد که در تزریق CO₂ نقش مهمی دارد. پس از تبخیر اجزا توسط CO₂ و وارد شدن این اجزاء در فاز گاز در درون ماتریس در پشت جبهه جابجایی، زمینه برای تأثیرگذاری نفوذ فراهم می شود و این اجزای تبخیر شده از طریق نفوذ به سمت شکاف تخلیه می شوند. توضیح دیگر برای این موضوع می تواند ضریب نفوذ بالاتر برای دی اکسید کربن باشد.

سکتور مدل مخزن

برای رسیدن به یک ارزیابی کامل از یک فرآیند تزریق گاز در یک مخزن شکافدار، شبیه سازی کامل در مقیاس میدان نیز مورد نیاز است. با توجه به تأثیرگذاری پارامترهایی عملیاتی مختلف در تولید از یک مخزن و برای تمرکز بر اثر مکانیسم نفوذ در شرایط مشخص طی تزریق گاز، تنها یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی در رأس های قطری مدل سکتور مطابق شکل ۱ سمت راست در نظر گرفته شد.



شکل ۷ الف) منحنی‌های فشار موئینگی گاز-نفت؛ (ب) تأثیر فشار موئینگی نفت-گاز درون ماتریس بر بازیافت نفت در تزریق CO₂.



شکل ۸ تأثیر ترکیب گاز تزریقی بر میزان بازیافت نفت از بلوک ماتریس.

دبی تولیدی چاه به مقدار حداقل به این مقدار رسیده است. در تولید طبیعی در زمان‌های اولیه، شبکه شکافها و تخلیه آنها کنترل کننده تولید سیالات مخزنی هستند بنابراین طی تخلیه سیال درون شبکه شکافها، فشار مخزن به سرعت افت می‌کند. بعد از حدود ۲۰۰ روز از تولید، میزان افت فشار رفتار پایدارتری از خود نشان می‌دهد که نشان‌دهندهی کنترل جریان از طرف ماتریس‌ها می‌باشد. نسبت گاز به نفت تولیدی^۱ (GOR) نیز تقریباً با وجود کاهش فشار مخزن و افتادن فشار به زیر نقطه حباب به دلیل حرکت گاز جدا شده از نفت در مخزن از طریق شبکه شکافهای با نفوذپذیری زیاد به سمت بالای مخزن به جای حرکت به سمت چاه تولیدی در این دوره تقریباً

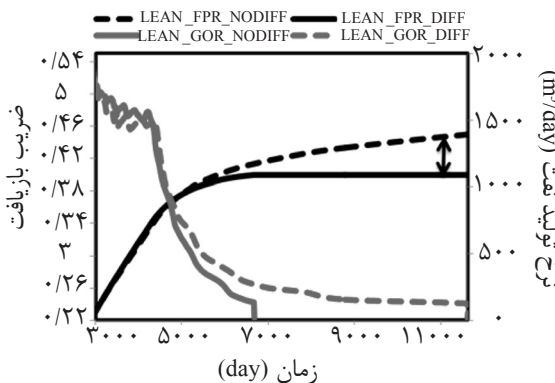
چاه تزریقی در بخش فوقانی (چهار لایه بالایی) و چاه تولیدی در بخش تحتانی (چهار لایه پایینی) مخزن تکمیل شده‌اند. چاه تولیدی با دبی اولیه ۴۰۰۰ mg/day از مخزن که دارای فشار اولیه متوسط ۳۰۰ bar است، شروع به تولید می‌کند. بعد از تشکیل کلاهک گازی با حجم تقریباً ۰/۲۵ حجم خالی کل مخزن و تقریباً بعد از ۳۰۰۰ روز از شروع تولید، تزریق گاز با دبی ثابت آغاز می‌شود. شرایط عملیاتی چاه تولیدی در زمان شروع تزریق، فشار ته چاهی ۱۰۰ بار و محدودیت اقتصادی آن حداقل دبی تولید ۳۰ mg/day، نسبت گاز به نفت تولیدی ۲۰۰۰ m³/m³ و برش آب تولیدی^۱ ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

ضریب بازیافت نهایی در تولید طبیعی از مخزن و بدون در نظر گرفتن تزریق گاز ۲۷٪ می‌باشد که بعد از حدود ۶۵۰۰ روز از شروع تولید با رسیدن

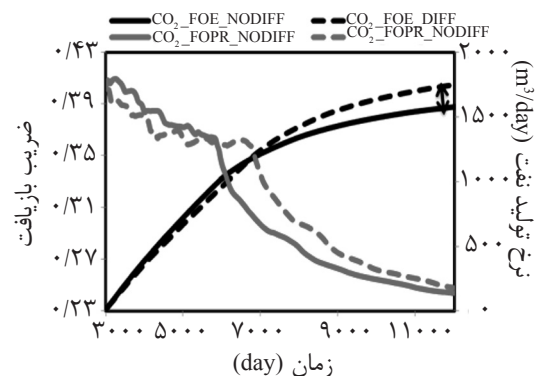
1. Water Cut
2. Gas Oil Ratio

ثابت هست. در زمان شروع تزریق گاز میزان نفت بازیافتی از مخزن تقریباً ۲۳٪ و فشار متوسط مخزن تقریباً ۱۰۰ bar می‌باشد. کنترل چاه تزریقی بر روی دبی تزریقی ۱۰ MMscf/d (۲/۲۸۳ Msm³/d) است. کنترل چاه تولیدی نیز بر روی فشار ته چاهی ۱۰۰ bar می‌باشد. در واقع هدف در سناریو تزریق گاز ثابت نگه داشتن فشار مخزن تا حد ممکن است بگونه‌ای که فرایند تزریق برای تثبیت فشار در مخزن اجرا شود. ضرایب نفوذ برای اجزا در فازهای گاز و نفت نیز در فشار ۱۰۰ بار محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج مربوط به تزریق CO₂ نشان می‌دهد که ضریب بازیافت نهایی با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی (۰/۴۰/۹۴) نسبت به حالت بدون نفوذ (۰/۳۸/۷۶)، حدود ۲/۱۸٪ بیشتر است. ضریب بازیافت نهایی با رسیدن نسبت گاز به نفت تولیدی به مقدار حداکثر خود یعنی ۲۰۰۰ m³/m³ به دست آمده است. علت اختلاف ۲/۱۸٪ در بازیافت نهایی با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی را می‌توان با توجه به تغییرات نسبت گاز به نفت و فشار متوسط مخزن توجیه کرد. فشار مخزن با شروع تزریق در هر دو حالت با نفوذ و بدون آن افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار دبی تولیدی با شیب کمی کاهش و نسبت گاز به نفت نیز تقریباً ثابت می‌ماند. این دوره تا ۵۸۰۰ روز ادامه می‌یابد تا اینکه گاز تزریقی در این زمان شروع به میان شکنی در چاه تولیدی می‌کند و نسبت گاز به نفت سریع شروع به افزایش کرده و در مقابل دبی نفت تولیدی با شیب تندی کاهش می‌یابد. فشار متوسط مخزن نیز با میان شکنی گاز شروع به کاهش می‌کند چراکه گاز تزریقی

دیگر بجای حفظ فشار مخزن مسیری برای خروج و رهایی از فشار تزریق یافته است. مطابق شکل مشخص است که زمان میان شکنی در حالت نفوذ دیرتر از حالت بدون نفوذ اتفاق می‌افتد که علت آن نفوذ بخشی از گاز تزریقی به علت اختلاف غلظت به درون ماتریس بجای حرکت در شبکه شکافها است. میان شکنی سریع‌تر در حالت بدون نفوذ موجب افت فشار بیشتر در سیستم و کاهش دبی تولیدی و در نتیجه کاهش ضریب بازیافت نهایی نسبت به حالت تزریق با در نظر گرفتن نفوذ می‌شود. در تزریق گاز رقیق اختلاف ضریب بازیافت نهایی با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی (۰/۳۹/۹۶) و بدون آن (۰/۴۴/۹۷) در حدود ۵٪ است که نسبت به تزریق CO₂ تأثیر نفوذ مولکولی بیشتر است. بعد از ۶۲۹۰ روز در حالت بدون نفوذ، گاز تزریقی شروع به میان شکنی در چاه تولیدی می‌کند و نسبت گاز به نفت شروع به افزایش می‌کند و در مقابل دبی نفت تولیدی با شیب تندی کاهش و فشار متوسط مخزن نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد؛ کاهش می‌یابد. در تزریق گاز رقیق زمان میان شکنی در حالت نفوذ کمی دیرتر از حالت بدون نفوذ است اما نکته مهم‌تر افزایش تدریجی این نسبت به حالت بدون نفوذ است که باعث می‌شود تا زمان طولانی‌تری تولید از نظر اقتصادی به صرفه باشد و در نتیجه ضریب بازیافت نهایی نسبت به حالت بدون نفوذ بیشتر شود. مطابق شکل ۹ نیز مقایسه بین ضریب بازیافت نهایی برای دو گاز تزریقی و تولید طبیعی را نشان می‌دهد که گاز رقیق بیشترین ضریب بازیافت را نسبت به CO₂ و تولید طبیعی نشان دارد.



ب) نسبت گاز به نفت تولیدی (GOR) و تغییرات فشار متوسط مخزن (FPR) در حالت فعال بودن نفوذ آن



الف) ضریب بازیافت (FOE) و تغییرات دبی تولید نفت (FOPR) در حالت فعال بودن نفوذ و بدون آن

شکل ۹ نتایج مربوط به تزریق در سکتور مخزن.

نتیجه گیری

براساس این مطالعه بر روی تأثیر نفوذ مولکولی در بازیافت نفت از مخازن شکافدار نتایج زیر را می توان بیان کرد:

- نفوذ مولکولی با افزایش سرعت انتقال جرم بین ماتریس و شکاف در تزریق گاز امتزاجی (گاز رقیق و CO_2) میزان بازیافت نفت را همراه با کاهش کشش سطحی و کاهش فشار موئینگی در جبهه جابجایی، تورم نفت و کاهش گرانیوی افزایش می دهد. در تزریق CO_2 نفوذ مولکولی نقش مهمی در جابه جایی و انتقال اجزای تبخیر شده مربوط به نفت باقی مانده در پشت جبهه جابه جایی، از ماتریس به شکاف ایفا می کند.

- با کاهش سرعت جابجایی و بازیافت نفت طی ریزش ثقلی با کاهش نفوذپذیری ماتریس، افزایش فشار موئینگی گاز-نفت درون ماتریس، کاهش ارتفاع ماتریس و افزایش تخلخل آن، میزان تأثیر نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی افزایش می یابد.

- اضافه کردن نیتروژن به CO_2 به عنوان گاز تزریقی علاوه بر اینکه میزان بازیافت نهایی را کاهش می دهد، اثر نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی را نیز کمتر می کند. از طرفی هر چه درصد CO_2 در ترکیب گاز رقیق تزریقی بیشتر می شود به دلیل قدرت بالای استخراج و تبخیر اجزای نفت توسط CO_2 تأثیر نفوذ مولکولی در بازیافت نهایی بیشتر می شود، اما به دلیل کاهش امتزاج پذیری میزان بازیافت نهایی کاهش می یابد.

- نفوذ مولکولی در تزریق گاز امتزاجی در مخزن، با به تعویق انداختن زمان میان شکنی گاز از طریق نفوذ به درون ماتریس و حفظ فشار مخزن، میزان

بازیافت نهایی را افزایش می دهد.

- برای مدل سازی دقیق تر اثر نفوذ مولکولی در بازیافت در مدل مخزنی می توان تابع انتقال بین ماتریس و شکاف را با توجه بازیافت نفت از بلوک ماتریس منفرد بهبود بخشید.

علائم و نشانه ها

σ_{ref} : کشش سطحی نفت-گاز در آزمایشگاه
(dyne/cm)

ϕ_f : تخلخل شکاف

GOR : نسبت گاز به نفت تولیدی (m^3/m^3)

ϕ_m : تخلخل ماتریس

OIP : نفت درجا (m^3)

Q : دبی، (m^3/day)

k_h : نفوذپذیری افقی (mD)

$FOPR$: دبی تولیدی از میدان (m^3/day)

k_x, k_y, k_z : نفوذپذیری در جهت x, y, z (mD)

WOC : سطح تماس آب و نفت (m)

k_v : نفوذپذیری عمودی (mD)

FOE ,
ضریب بازیافت
 RF

D_g : ضریب نفوذ گاز (cm^2/s)

D_l : ضریب نفوذ نفت، (cm^2/s)

H_m : ارتفاع بلوک (m)

k_r : تراوایی تسبی

FPR : فشار متوسط میدان (bar)

μ : گرانیوی

$P_{ego, lab}$: فشار موئینگی گاز-نفت در آزمایشگاه (bar)

σ_{ref} : کشش سطحی نفت-گاز در آزمایشگاه
(dyne/cm)

IFT : کشش سطحی (dyne/cm)

مراجع

- [1]. Akbar M., Vissapragada B., Dhahi A., and Alghamdi A. H., "A Snapshot of carbonate reservoir evaluation", Schlumberger-oil Field Review, Vol. 12, pp. 20-21, 2000.
- [2]. Alvarado V. and Manrique E., "Enhanced oil recovery: an update review", Energies, Vol. 3, pp. 1529-1575, 2010.
- [3]. FERNØ M. A., "Enhanced oil recovery in fractured reservoirs", Introduction to Enhanced Oil Recovery (EOR) Processes and Bioremediation of Oil-Contaminated Sites: InTech, 2012.
- [4]. Firoozabadi A., "Recovery mechanisms in fractured reservoirs and field performance", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 39, pp. 13-17, 2000.
- [5]. Jahediesfanjani H. and Civan F., "Improving performance of the naturally fractured carbonate reservoirs by means of the various stimulation and completion techniques", Presented at the International Oil Conference and Exhibition in Mexico, Cancun, Mexico, 2006.
- [6]. Haugen K. B. and Firoozabadi A., "Measuring molecular and thermal diffusion coefficients in multicomponent mixtures by the beam deflection technique", Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 2006.
- [7]. Shojaei H. and Jessen K., "Diffusion and matrix-fracture interactions during gas injection in fractured reservoirs", Presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 2014.
- [8]. Golabi E., Seyedeyn A., Ayatollahi S., Hosseini N., and Akhlaghi N., "Experimental study of wettability alteration of limestone rock from oil wet to water wet by applying various surfactants", Presented at the SPE Heavy Oil Conference Canada, Calgary, Alberta, Canada, 2012.
- [9]. Labastie A., "Capillary continuity between blocks of a fractured reservoir", Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 1990.
- [10]. Horie T., Firoozabadi A., and Ishimoto K., "Laboratory studies of capillary interaction in fracture/matrix systems", SPE Reservoir Engineering, Vol. 5, pp. 353-360, 1990.
- [11]. Firoozabadi A. and Ishimoto K., "Reinfiltration in fractured porous media: part 1 - one dimensional model", SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, pp. 35-44, 1994.
- [12]. Karimaie H., Lindeberg E. G. B., Torsaeter O., and Darvish G. R., "Experimental Investigation of Secondary and Tertiary Gas Injection In Fractured Carbonate rock", Presented at the EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition, London, U.K., 2007.
- [13]. Da Silva F. V. and Belery P., "Molecular diffusion in naturally fractured reservoirs: a decisive recovery mechanism", Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 1989.
- [14]. Perkins T. K. and Johnston O. C., "A review of diffusion and dispersion in porous media", Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 3, pp. 70-84, 1963.
- [15]. Shojaei H., Rastegar R., and Jessen K., "Mixing and mass transfer in multicontact miscible displacements", Transport in Porous Media, Vol. 94, pp. 837-857, Sep 2012.
- [16]. Le Gallo Y., Le Romancer J. F., Bourbiaux B., and Fernandes G., "Mass transfer in fractured reservoirs during

gas injection: experimental and numerical modeling”, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 1997.

[17]. Morel D., Bourbiaux B., Latil M., and Thiebot B., “*Diffusion effects in gasflooded light-oil fractured reservoirs*”, SPE Advanced Technology Series, Vol. 1, pp. 100-109, 1993.

[18]. Le Romancer J. F. X. and Fernandes G., “*Mechanism of oil recovery by gas diffusion in fractured reservoir in presence of water*”, presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 1994.

[19]. Hatiboglu C. U. and Babadagli T., “*Experimental analysis of primary and secondary oil recovery from matrix by counter-current diffusion and spontaneous imbibition*”, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2004.

[20]. Torabi F. and Asghari K., “*Effect of connate water saturation, Oil viscosity and matrix permeability on rate of gravity drainage during immiscible and miscible displacement tests in matrix-fracture experimental model*”, Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 49, pp. 61-68, Nov. 2010.

[21]. Moortgat J., Firoozabadi A., Li Z., and Espósito R., “*A Detailed experimental and numerical study of gravitational effects on CO₂ enhanced recovery*”, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, 2010.

[22]. Coats K. H., “*Implicit compositional simulation of single-porosity and dual-porosity reservoirs*”, Presented at the SPE Symposium on Reservoir Simulation, Houston, Texas, 1989.

[23]. Uleberg K. and Høier L., “*Miscible gas injection in fractured reservoirs*”, Presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 2002.

[24]. Schlumberger, “*ECLIPSE 300 reservoir engineering software*”, ed, 2012.