

## شبیه‌سازی تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن و تاثیر ناخالصی‌ها در دی‌اکسید کربن تزریقی به منظور افزایش بازیافت نفت

امین احمدی<sup>۱\*</sup>، افشین حسن‌زاده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر ■ محمد امین غلام‌زاده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

### چکیده

مخزن هیدروکربوری ساختاری است متخلخل و نفوذپذیر در زیر زمین که انباشتی طبیعی از هیدروکربورها را به صورت مایع و یا گاز در خود جای داده و به کمک سنگ‌های غیر تراوا از محیط اطراف مجزا گردیده است. مخازن ایران با افت طبیعی فشار مخزن و افت دبی تولیدی از چاه، تولید آنها رفته‌رفته کم شده تا جایی که دیگر تولید طبیعی از مخزن مقرر به صرفه نخواهد بود. این نقطه زمانی اتفاق می‌افتد که بازیابی نفت از مخزن به نسبت پایان یافته است. این بازیابی برای مخازن ایران حدود ۲۰ درصد است. بنابراین برای برداشت نفت‌های باقیمانده در مخزن نیازمند استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت و تکنیک‌های پیشرفته هستیم. به طور کلی ازدیاد برداشت از مخازن نفتی شامل روش‌هایی می‌شود که برای بهبود جابجایی و تولید به کار برده می‌شود. بدین منظور از گازهای دی‌اکسید کربن، نیتروژن، گازهای هیدروکربوری و یا مخلوطی از آنها و یا به همراه آب استفاده می‌شود که مکانیسم همه آنها بر اساس انتقال جرم بین فاز نفت و گاز می‌باشد. هدف از این مطالعه مقایسه و ارزیابی سناریوهای مختلف تزریقی همانند تخلیه طبیعی، تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن و همچنین تاثیر ناخالصی‌ها همانند متان، سولفید هیدروژن و نیتروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی در فرایند تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن بر روی میزان افزایش یا کاهش ضریب بازیافت در یکی از مخازن نفتی ایران می‌باشد. برای این منظور سناریوهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار اکلیپس ۳۰۰ شبیه‌سازی شد و پارامترهای مختلف همانند دبی تزریق و درصد گاز تزریقی بررسی گردید و در پایان، نتایج این سناریوها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد گاز نیتروژن و متان در گاز دی‌اکسید کربن تزریقی سبب افزایش بازیافت نفت می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۰۸

### واژگان کلیدی:

تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن، ازدیاد برداشت نفت، تاثیر ناخالصی‌ها، تخلیه طبیعی، تزریق CO<sub>2</sub>

### مقدمه

کوچک شدن ناحیه دوفازی شده در حالی که ناخالصی‌هایی مانند H<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> سبب کاهش دانسیته دی‌اکسید کربن تزریقی شده و باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه دوفازی می‌شوند به طوری که در مقایسه با دی‌اکسید کربن خالص فشار بحرانی زیاد شده اما دمای بحرانی کاهش می‌یابد و از این رو فشار لازم برای رسیدن به امتزاج‌پذیری نفت و گاز تزریقی افزایش می‌یابد. به طور کلی ناخالصی در گاز تزریقی امکان تشکیل رسوب آسفالتین را افزایش می‌دهد. [۲] هاشمی و هلالی زاده در سال (۲۰۱۱) نشان دادند که تزریق همزمان آب و گاز دی‌اکسید کربن نسبت به تزریق دی‌اکسید کربن و تخلیه طبیعی دارای بازیافت نفت بیشتری بوده و همچنین افت فشار در این سناریو کمتر می‌باشد. [۳] صادقی و همکارانش در سال (۲۰۱۶) با شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بر روی یکی از مخازن نفتی ایران عنوان کردند که تزریق گاز متان در حالت غیر امتزاجی باعث افزایش ضریب بازیافت نفت شده و قادر است تولید نفت را در مقایسه با تخلیه طبیعی و دی‌اکسید کربن افزایش دهد. ولی نسبت به تزریق آب بازدهی کمتری دارد [۴]. تویسی و همکارانش در سال (۲۰۱۶) مطالعاتی بر روی تزریق گاز، تزریق متناوب آب و گاز در یکی از میدین نفتی ایران با استفاده از یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انجام دادند. آنها چندین سناریو را در شبیه‌ساز بررسی کردند بدین صورت که در ابتدا گاز دی‌اکسید کربن را به صورت پیوسته تزریق و سپس متان و ترکیبی از گاز دی‌اکسید کربن و آب را تزریق کردند که این تزریق دی‌اکسید کربن در مقادیر مختلفی نیز بود که از نظر گزارشات آنها بهترین سناریو در واقع سناریوی تزریق متناوب آب و گاز بود [۵]. هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی پدیده تخلیه طبیعی و امکان‌سنجی

هنگامی که استخراج نفت از مخزن شروع می‌گردد، فشار مخزن رو به کاهش می‌گذارد، مگر آنکه نفت استخراجی با جریان سیال دیگری جایگزین شود. بنابراین برای تولید و به حرکت در آوردن نفت‌های تولید نشده مخزن نیازمند روش‌های ازدیاد برداشت می‌باشیم. روش ازدیاد برداشت از طریق تزریق دی‌اکسید کربن، یک تکنولوژی کاملاً شناخته شده می‌باشد و استفاده از این روش دارای توجیه اقتصادی بوده و در ایالات متحده آمریکا نیز در سطح وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. گاز دی‌اکسید کربن هم بصورت امتزاجی و هم بصورت غیرامتزاجی می‌تواند تزریق گردد. دی‌اکسید کربن مورد نظر برای تزریق را می‌توان از گازهای متصاعد شده از کارخانجات صنعتی، واحدهای پایین دستی نفت مانند پالایشگاه‌های گاز، تأسیسات پتروشیمی و کارخانه‌های کود شیمیایی تأمین نمود. با وجود سهولت تولید گاز دی‌اکسید کربن، کنترل عملیات در زیر زمین بسیار مهم است. امروزه استفاده از تکنیک‌های جدید، مانند عکس‌برداری مغناطیسی، ابزاری مفید و گرانبها برای کنترل تزریق است. در هنگام تزریق قسمتی از دی‌اکسید کربن تزریق شده توسط سیالات موجود در مخزن جذب شده و اندکی از آن به صورت گاز آزاد در مخزن باقی می‌ماند. به دلیل تاثیری که دی‌اکسید کربن جذب شده بر مجموعه سنگ و سیال مخزن دارد، تولید نفت افزایش می‌یابد. [۱] ناخالصی‌ها در جریان گاز دی‌اکسید کربن تزریقی سبب تغییر رفتار فازی حاکم بر خصوصیات فیزیکی گاز دی‌اکسید کربن می‌شود. با توجه به مقدار و نوع ناخالصی موجود پهنای نمودار (فشار-دما) تغییر کرده و سبب افزایش یا کاهش ناحیه دوفازی در فرآیند تزریق گاز می‌شود. ناخالصی‌هایی مانند SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S سبب افزایش دانسیته گاز تزریقی و

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Ahmadi.amin68@yahoo.com)

اثر اندازه گرید یک آنالیز حساسیت‌سنجی بر روی تعداد گریدها انجام گرفت که در نهایت، پس از اجرای مدل کارترین با  $21 \times 15 \times 16$  شبکه با اندازه های  $350 \times 350 \times 50$  فوتی مورد استفاده قرار گرفت. تخلخل شکاف برای تمام لایه‌ها  $0.06$  درصد تعریف گردید. نفوذپذیری افقی و عمودی شکاف نیز به ترتیب  $300$  و  $120$  میلی‌داریسی به مدل داده شد. در مدل تخلخل دوگانه طول بلوک نقش بسیار مهمی در بازدهی نفت و حرکت سطوح تماس دارد. از آنجایی که اطلاعات کافی در مورد سیستم ترک‌خوردگی و نحوه توزیع آن در مخزن موجود نبود، فاصله بین شکاف‌ها بر اساس شبیه‌سازی‌هایی که در گذشته انجام شده بود  $70$  فوت به مدل داده شد. خصوصیات کلی مخزنی که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۱ آمده است.

### پیش‌بینی فرآیند تخلیه طبیعی<sup>۱</sup>

در این تحقیق شبیه‌سازی در فوریه ۲۰۱۷ شروع شده است که فرآیند تخلیه طبیعی برای مدل به مدت ۲۰ سال شبیه‌سازی شد. دبی تولید از هر چاه  $2500$  بشکه در روز می‌باشد. در این حالت از مخزن به وسیله نیروی طبیعی و مکانیسم‌های حاکم بر آن شامل: رانش کلاهک گازی، رانش گاز محلول، انبساط نفت و رانش لایه آبدی تولید می‌شود با توجه به محدودیت اعمال شده در مدل برای کنترل نسبت گاز به نفت و برش آب تولید از مدل انجام می‌شود. بازیافت نهایی نفت همچنان که در شکل ۴ نشان داده شده است،  $15/13$  درصد می‌باشد. در شکل ۵ دبی تولیدی روزانه نفت که در ابتدا  $10000$  هزار بشکه در روز بود به تدریج کاهش یافته بعد از ۱۲ سال به زیر  $500$  بشکه در روز می‌رسد. در سال  $2036$  دبی تولید مخزن به صفر می‌رسد. افت فشار در سناریوی تخلیه طبیعی حدود  $2905$  Psia می‌باشد. این میزان افت فشار قطعاً بر مخزن اثرات بدی داشته و باعث هدررفت نفت می‌گردد.

### تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن

فرایند متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن به منظور تثبیت فشار و افزایش بازیافت نفت، به مدت ۲۰ سال، انجام شد و سناریوهای مختلفی همانند دبی

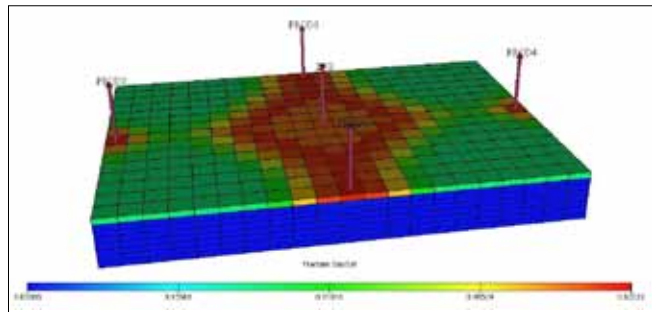
جدول ۱ | مشخصات لایه‌های تولیدی استفاده شده در شبیه‌سازی

ویژگی	مقدار	واحد
فشار مخزن	4820	psi
دمای مخزن	225	F
تخلخل ماتریس	0.13	%
نفوذپذیری افقی ماتریس	2.3	md
نفوذپذیری عمودی ماتریس	0.92	md
فشار نقطه حباب	2359	psi
ستیع مخزن	11000	ft ss
شعاع چاه	0.5	ft
تخلخل شکاف	0.006	%
نفوذپذیری افقی شکاف	300	md
نفوذپذیری عمودی شکاف	120	md
فاصله بین شکاف‌ها	70	ft

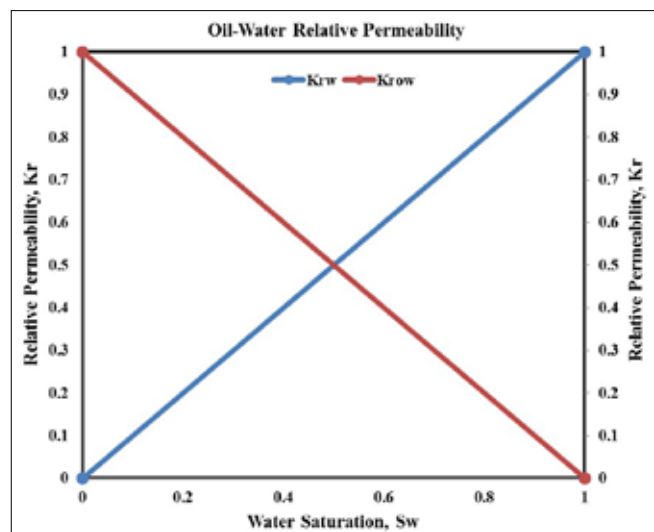
تزریق متناوب آب و گاز دی‌اکسید کربن در یکی از مخازن نفتی ایران توسط نرم‌افزار Eclipse 300 می‌باشد. همچنین بعد از آن به مطالعه تأثیر ناخالصی‌ها همانند نیتروژن، متان و سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی بروی میزان افزایش یا کاهش ضریب بازیافت نفت پرداخته می‌شود.

### مشخصات مدل شبیه‌ساز

اطلاعات یکی از میادین کربناته جنوب غربی ایران در این مطالعه استفاده شد. این مخزن دارای نفت خام با درجه API  $32/5$ ، فشار نقطه حباب  $2359$  پام، فشار اولیه  $4820$  پام، دمای  $225^\circ\text{F}$ ، ضریب حجمی نفت آن در فشار نقطه حباب  $1/44$  (Rbbl/STB) در عمق مینای  $11187$ ft زیر سطح دریاست. در این مطالعه از اطلاعات بخش شمال غربی مخزن که  $4$  چاه فعال دارد، برای تهیه مدل مصنوعی استفاده شد. در مراحل ابتدایی تحقیق بدون در نظر گرفتن پدیده اثر بین بلوکی از مدل تخلخل دوگانه استفاده شده که تأثیری در تطابق نتایج با مدل واقعی ندارد اما مدل تراوایی دوگانه با توجه به ماهیت ارتباط بین بلوک‌های ماتریس در آن، نتایج نزدیک‌تری به واقعیت دارد و به همین خاطر ضریب هندسی با روش گیلمان-کازمی محاسبه شده است. پس از اجرای مدل مختلف برای حذف



شکل ۱ | مدل استاتیک مخزن مصنوعی مورد مطالعه



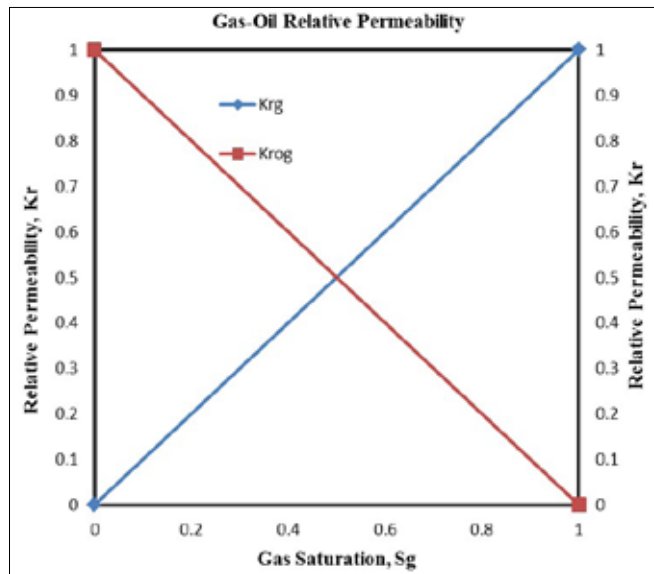
شکل ۲ | نمودار نفوذپذیری نسبی آب-نفت برای شکاف، استفاده شده در شبیه‌سازی.

به درون مخزن تزریق شد. یکی از مهمترین عواملی که در بازدهی یک پروژه تزریق متناوب آب و گاز تاثیر دارد، دبی تزریق گاز و آب است. عدم محاسبه دقیق نرخ بهینه تزریق می‌تواند سبب ایجاد مشکلاتی مانند پدیده انگشتی شدن<sup>۲</sup>، عدم جابه‌جایی و میان‌شکنی<sup>۳</sup> سریع گاز و آب شود که این عوامل به نوبه خود سبب کاهش میزان بازیافت نفت و کاهش بازدهی تزریق متناوب آب و گاز می‌شود. به این دلیل اولین پارامتر مورد بررسی در این قسمت، دبی تزریق است. در فرایند تزریق متناوب آب و گاز فشار تزریق ۵۵۰۰ Psia و دبی تولیدی از تمام چاه‌ها ۱۰۰۰۰ Stb/d در نظر گرفته شد. سپس آب و گاز دی‌اکسید کربن خالص به مخزن تزریق شد که در این سناریو دبی‌های تزریق مختلفی برای گاز دی‌اکسید کربن و آب نیز در نظر گرفته شد (جدول ۲). سیکل تزریق گاز دی‌اکسید کربن و آب در تزریق تناوبی به ترتیب ۱ سال و ۱ سال و کل دوره تزریق ۲۰ سال می‌باشد. همچنین شکل‌های ۶- و ۷ به ترتیب، نمودارهای ضریب بازیافت نفت، تولید انباشتی نفت، را در سناریوهای مختلف تزریق گاز متناوب آب و گاز رانسان می‌دهد. بر اساس جدول ۱- بهترین سناریوی تزریق متناوب آب و گاز، سناریوی است که در آن دبی تزریق آب ۶۰۰۰ stb/d و تزریق گاز دی‌اکسید کربن ۷۰۰۰ Mscf/d، در نظر گرفته شده است، به طوری که در این سناریو، ضریب بازیافت نفت در پایان سناریو معادل ۳۰/۴۲ درصد محاسبه گردید (شکل ۶). در سناریوی‌های تزریق ۱ تا ۵ به دلیل اینکه مخزن با دبی ثابت ۱۰۰۰۰ Stb/d در حال تولید می‌باشد. بنابراین مقدار ضریب بازیافت برای همه سناریوها در چندین سال اول تقریباً یکسان و بروی یک خط قرار می‌گیرند، ولی به دلیل اینکه در دبی‌های تزریق کم، فشار مخزن زودتر به فشار ته‌چاهی چاه تولیدی می‌رسد، بنابراین ضریب بازیافت نفت کمتر شده و نمودارها به همین دلیل بعد از مدتی از هم فاصله می‌گیرند.

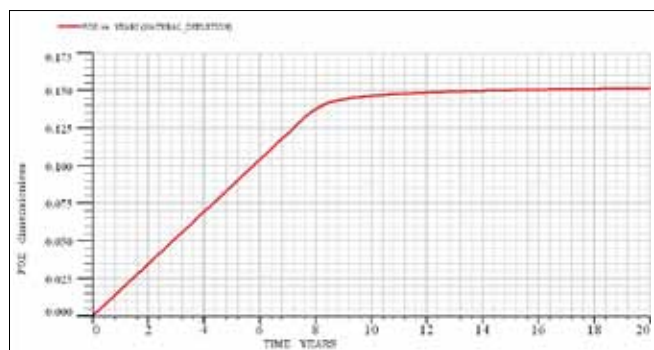
### تزریق دی‌اکسید کربن همراه با متان در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

در این فرآیند موقعیت و مکان چاه‌های تولیدی و تزریقی همانند تزریق متناوب آب و گاز هنگامی که دی‌اکسید کربن خالص می‌باشد در نظر گرفته شد، سپس به منظور ارزیابی و تاثیر حضور متان در دی‌اکسید کربن تزریقی، مقدار متان در دی‌اکسید کربن از ۱۰ تا ۹۰ درصد تغییر و به مدل

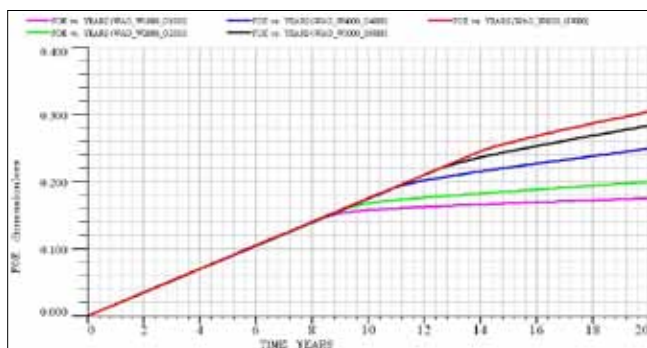
گاز دی‌اکسید کربن تزریقی و آب تزریقی مورد بررسی قرار گرفت و بازیافت نفت در این سناریوها با هم مقایسه شدند تا از این طریق سناریوی بهینه تزریق متناوب آب و گاز به دست آید. به منظور بررسی اثر تزریق متناوب آب و گاز، در مدل ساخته شده یک چاه تزریقی حفر گردید و گاز و آب از طریق لایه نفتی



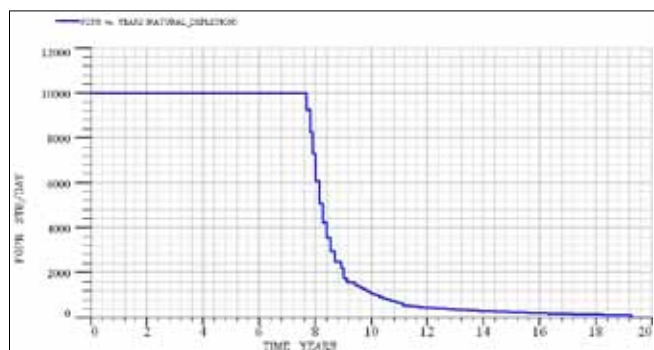
شکل ۳ | نمودار نفوذپذیری نسبی گاز-نفت برای شکاف، استفاده شده در شبیه‌سازی.



شکل ۴ | نمودار بازیافت نفت در فرآیند تخلیه طبیعی



شکل ۶ | نمودار ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف تزریق متناوب آب و گاز با دبی‌های مختلف

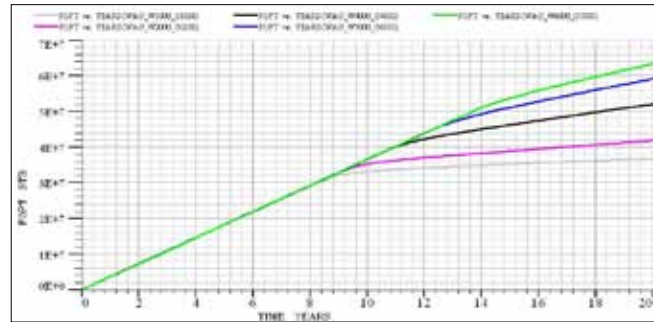


شکل ۵ | نمودار نرخ تولید روزانه در فرآیند تخلیه طبیعی

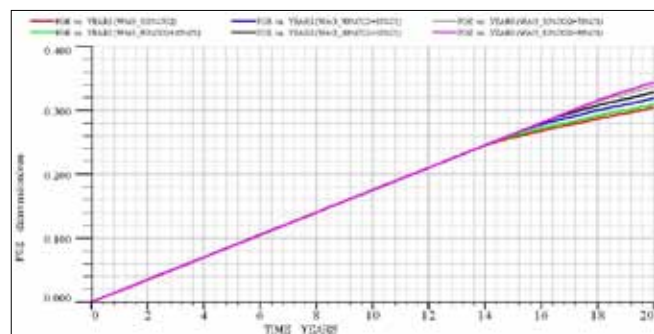
در هر سناریو به مدت ۲۰ سال تزریق شد. در تمامی این سناریوها فشار ته‌چاهی<sup>۴</sup> چاه تزریقی ۵۵۰۰ Psia و دبی تولیدی از تمام چاه‌ها ۱۰۰۰۰ Stb/d در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی مدل در تزریق گاز دی‌اکسید کربن با ترکیب‌های مختلف در جدول-۳ آمده است. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب، نمودارهای ضریب بازیافت نفت و تولید انباشتی نفت، را در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با متان در فرایند تزریق متناوب آب و گاز را نشان می‌دهد.

### تزریق دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

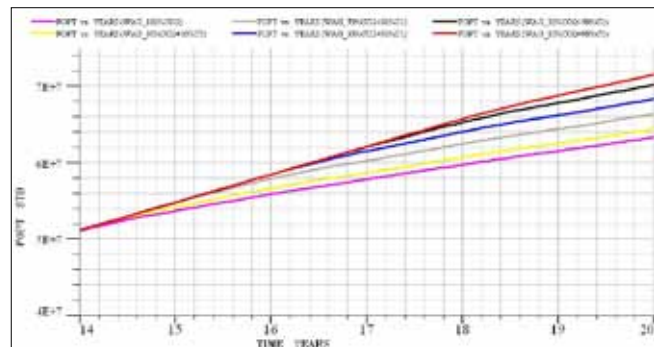
به منظور آنالیز و بررسی تاثیر سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز بر میزان بازیافت نفت همانند سناریوی قبل مقدار سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی تغییر داده شد و سپس نتایج بررسی گردید که این نتایج در جدول-۴ آمده است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب، نمودارهای ضریب بازیافت نفت، درصد اشباع نفت باقی مانده، تولید روزانه نفت در سناریوهای مختلف گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز را نشان می‌دهد. بر اساس جدول-۴ وجود سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی، سبب کاهش ضریب بازیافت و تولید انباشتی نفت می‌گردد. همانطور که در شکل-۱۲ نشان داده شده است، هرچه مقدار سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی بیشتر می‌شود، ضریب بازیافت نفت به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که حضور سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی باعث کاهش طول پلاتوی تولید نسبت به سناریوی تزریق متناوب آب و گاز با دی‌اکسید کربن خالص می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده هنگام تزریق متناوب آب و گاز باید از حضور سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی اجتناب گردد. بر اساس شکل-۱۲ افزایش سولفید هیدروژن سبب



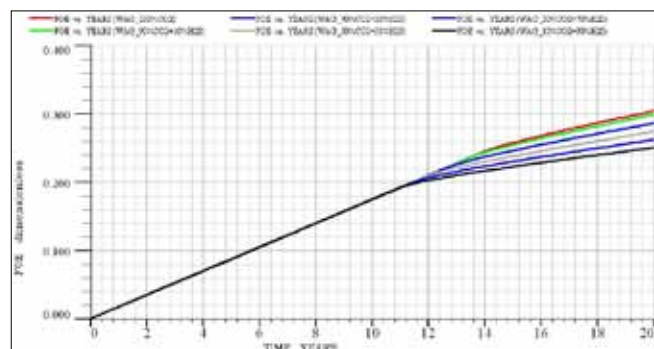
شکل ۷ | نمودار تولید انباشتی نفت در سناریوهای مختلف تزریق متناوب آب و گاز با دبی‌های مختلف



شکل ۸ | نمودار ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با متان در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۹ | نمودار تولید انباشتی نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با متان در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۱۰ | نمودار ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

### ۲ نتایج عملکرد مخزن در تزریق متناوب آب و گاز

سناریو	دبی تزریق	Recovery Factor %	Cumulative oil production Stb	Reservoir Pressure 020- years Psia	Field Oil Saturation %
1	1000 1000	17.51	68.3E+7	1931	68.89
2	2000 2000	19.95	4.18E+7	1943	67.01
3	4000 4000	24.92	5.20E+7	1952	63.08
4	6000 5000	28.37	5.91E+7	1962	60.36
5	7000 6000	30.42	6.33E+7	1970	58.73
6	8000 8000	32.31	6.64E+7	1987	56.75

کاهش نفت در جای مخزن شده که نشان‌دهنده تاثیر مثبت حضور سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی می‌باشد.

### تزریق دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز

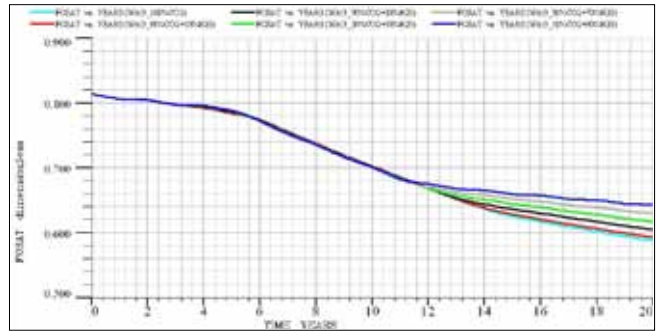
در این سناریو از تزریق همانند دو سناریوی قبل مقدار نیتروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی تغییر داده شد و سپس نتایج بررسی گردید که این نتایج در جدول ۵- آمده است. شکل‌های ۱۴- تا ۱۷- به ترتیب، نمودارهای فشار مخزن، ضریب بازیافت نفت، تولید انباشتی نفت و برش آب را در سناریوهای مختلف گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز نشان می‌دهد. با افزایش مقدار نیتروژن افت فشار مخزن کمتر می‌شود زیرا نیتروژن با سیال مخزن ترکیب شده و فضاهای خالی را بیشتر از سایر گازها پر می‌کند که در نتیجه، باعث افزایش فشار مخزن می‌شود. همانطور که جدول ۵- و شکل‌های ۱۶- و ۱۷- تأیید می‌کنند با افزایش مقدار نیتروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی، ضریب بازیافت نفت و تولید انباشتی بیشتر می‌شود. ولی هنگامی که مقدار نیتروژن بیشتر از ۷۰ درصد می‌شود، ضریب بازیافت نفت و تولید انباشتی نفت افزایش قابل توجهی نمی‌کند. بنابراین سناریوی بهینه برای این فرایند، سناریوی است که مقدار نیتروژن ۷۰ و دی‌اکسید کربن ۳۰ درصد باشد.

### مقایسه سناریوها

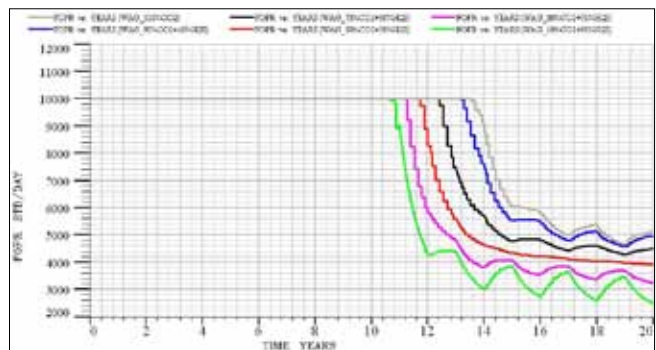
به منظور مقایسه سناریوها، بهترین سناریوهای هر بخش شامل سناریو تزریق آب با دبی تزریق ۶۰۰۰ stb/d و تزریق گاز دی‌اکسید کربن ۷۰۰۰ Mscf/d، بهترین سناریوی تزریق دی‌اکسید کربن همراه بامتان (۹۰% CO<sub>2</sub> + ۱۰% C<sub>1</sub>) در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز، دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن (۹۰% CO<sub>2</sub> + ۱۰% H<sub>2</sub>S)، دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن (۳۰% CO<sub>2</sub> + ۷۰% N<sub>2</sub>) در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز انتخاب شد و پارامترهای مهمی در این ۵ سناریو مقایسه شدند؛ از جمله، ضریب بازیافت

۳ | نتایج عملکرد مخزن در تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با متان در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

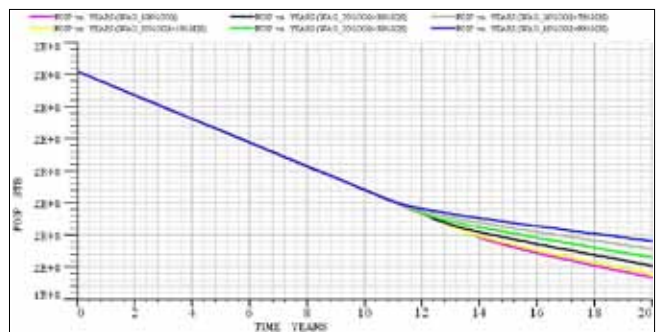
Field Oil Saturation %	Reservoir Pressure 020- years Psia	Cumulative oil production Stb	Recovery Factor %	نام سناریو
58.73	1970	6.33E+7	30.42	WAG_100%CO2
58.25	1973	6.43E+7	30.92	WAG_90%CO210%+C1
57.33	1979	6.63E+7	31.89	WAG_70%CO230%+C1
56.44	1986	6.83E+7	32.83	WAG_50%CO250%+C1
55.60	1993	7.02E+7	33.71	WAG_30%CO270%+C1
54.99	2003	7.15E+7	34.34	WAG_10%CO290%+C1



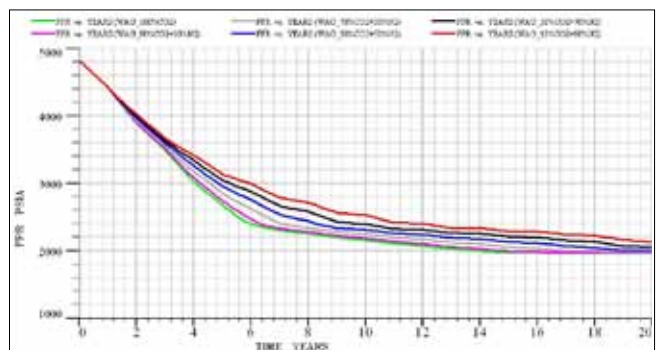
شکل ۱۱ | نمودار درصد اشباع نفت باقی‌مانده در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۱۲ | نمودار تولید روزانه نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

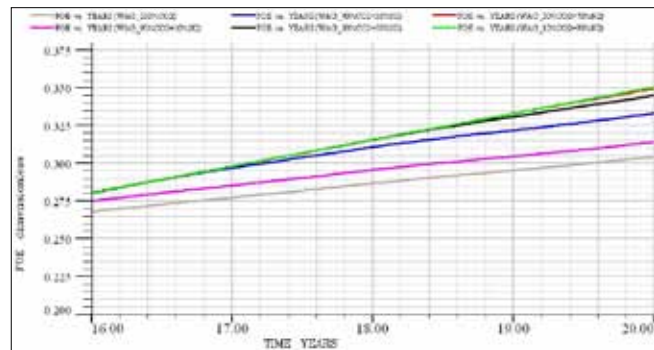


شکل ۱۳ | نمودار نفت در جای مخزن در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

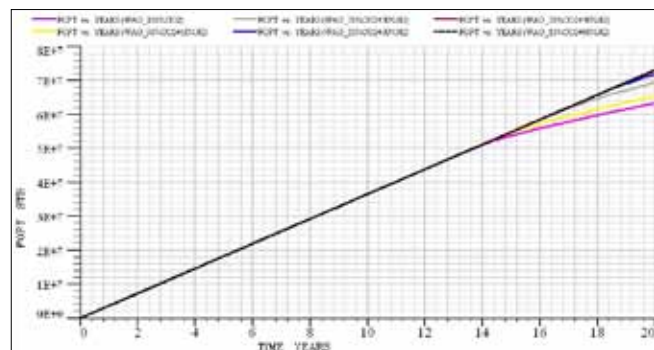


شکل ۱۴ | نمودار فشار مخزن در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

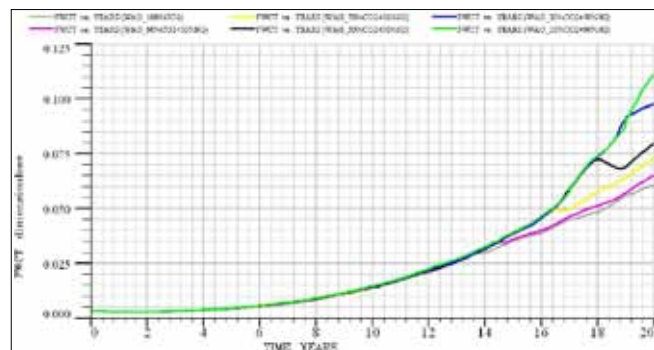
نفت، تولید انباشتی نفت خام، فشار مخزن و تولید روزانه نفت خام. در شکل-۱۸ ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، سناریوی تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز نسبت به بقیه سناریوها بالاترین ضریب بازیافت نفت را داراست. بنابراین وجود نیتروژن در دی‌اکسید کربن تزریقی، در فرایند تزریق متناوب آب و گاز مفید می‌باشد به طوری که قادر است ضریب بازیافت نفت را ۴/۵۳ درصد نسبت به فرایند تزریق متناوب آب و گاز با دی‌اکسید کربن خالص افزایش دهد. در شکل-۱۹ تولید انباشتی نفت در سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، سناریوی تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن نسبت به حالات دیگر دارای بیشترین تولید نفت می‌باشد. شکل-۲۰ روند تغییرات فشار نفت در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. اختلاف فشار بین سناریوی تخلیه طبیعی و بهترین سناریوی تزریق با کمترین افت فشار یعنی سناریوی تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز در پایان سال ۲۰۳۷ میلادی حدود ۱۳۷psia می‌باشد. شبیه‌سازی در بازه ۲۰ سال به پایان می‌رسد و به فشار ترک مخزن نزدیک می‌شود. نمودار دبی تولیدی روزانه نفت برای هر سناریوهای مختلف در شکل-۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌باشد، سناریوی تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز منجر به افزایش تقریباً یکساله طول پلاتوی تولید شده است که این افزایش پلاتوی تولید موجب بهبود بازیافت نفت و افزایش تولید نفت می‌گردد.



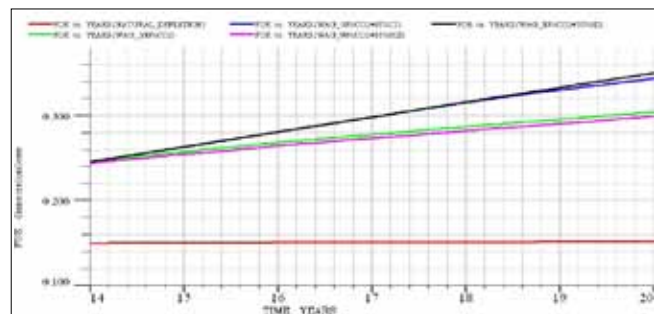
شکل ۱۵ | نمودار ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۱۶ | نمودار تولید انباشتی نفت در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۱۷ | نمودار برش آب در سناریوهای مختلف تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز



شکل ۱۸ | مقایسه ضریب بازیافت نفت در سناریوهای مختلف

### نتیجه‌گیری

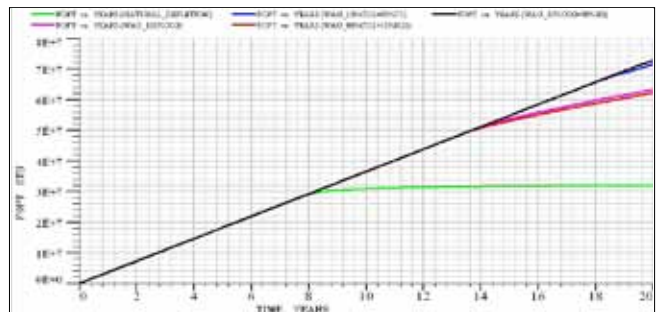
نتایج پیش‌بینی عملکرد مخزن نشان می‌دهد بهترین سناریو، سناریوی تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز بوده که در آن، ضریب بازیافت نفت ۴/۵۳ درصد نسبت به فرایند تزریق متناوب آب

شکل ۱۹ | نتایج عملکرد مخزن در تزریق گاز دی‌اکسید کربن همراه با سولفید هیدروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

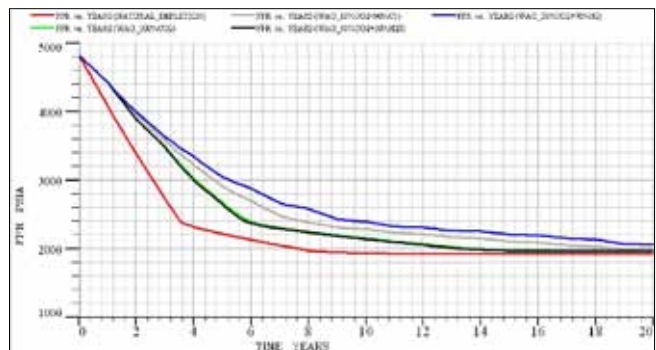
Field Oil Saturation %	Reservoir Pressure 020- years Psia	Cumulative oil production Stb	Recovery Factor %	نام سناریو
58.73	1970	6.33E+7	30.42	WAG_100%CO2
59.25	1967	6.22E+7	29.90	WAG_90%CO210%+C1
60.45	1962	5.96E+7	28.66	WAG_70%CO230%+C1
61.67	1957	5.71E+7	27.42	WAG_50%CO250%+C1
62.94	1952	5.46E+7	26.20	WAG_30%CO270%+C1
64.33	1947	5.22E+7	25.03	WAG_10%CO290%+C1

و گاز با دی اکسید کربن خالص افزایش می دهد.

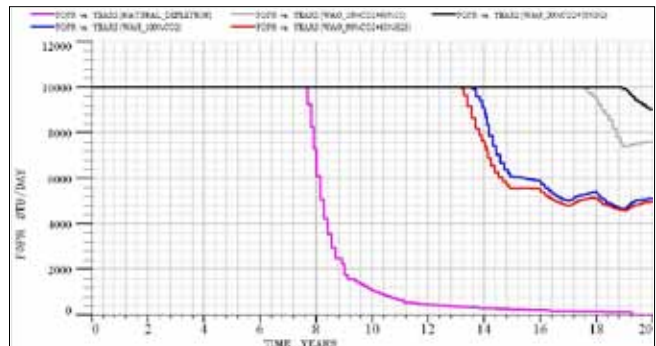
- فرایند تزریق متناوب آب و گاز باعث افزایش طول بازه ی تولید و علاوه بر آن، کاهش افت فشار مخزن نسبت به سناریوی تخلیه طبیعی می شود.
- حضور متان در دی اکسید کربن تزریقی در فرایند تزریق متناوب آب و گاز سبب افزایش ضریب بازیافت نفت می گردد و هر چه میزان متان در دی اکسید کربن تزریقی بیشتر می شود، ضریب بازیافت نفت نیز افزایش می یابد.
- با افزایش میزان سولفید هیدروژن در دی اکسید کربن تزریقی در فرایند تزریق متناوب آب و گاز، ضریب بازیافت نفت و تولید انباشتی نفت کاهش می یابد و هر چه میزان سولفید هیدروژن در دی اکسید کربن تزریقی بیشتر می شود، طول پلاتوی تولید نسبت به فرایند تزریق متناوب آب و گاز با دی اکسید کربن خالص کمتر می شود. بنابراین هنگام تزریق دی اکسید کربن باید از حضور سولفید هیدروژن در آن اجتناب گردد.
- با افزایش مقدار نیتروژن در دی اکسید کربن تزریقی، ضریب بازیافت نفت افزایش و افت فشار مخزن نیز کمتر می شود. ولی این افزایش هنگامی که مقدار نیتروژن بیشتر از ۷۰ درصد می شود با شیب کمی اتفاق می افتد. ■



شکل ۱۹ | مقایسه تولید انباشتی نفت در سناریوهای مختلف



شکل ۲۰ | مقایسه فشار مخزن در سناریوهای مختلف



شکل ۲۱ | مقایسه فشار مخزن در سناریوهای مختلف

۵ | نتایج عملکرد مخزن در تزریق گاز دی اکسید کربن همراه با نیتروژن در فرایند تزریق متناوب آب و گاز

Field Oil Saturation %	Reservoir Pressure 020- years Psia	Cumulative oil production Stb	Recovery Factor %	نام سناریو
58.73	1970	6.33E+7	30.42	WAG_100%CO2
57.79	1976	6.53E+7	31.40	WAG_90%CO210%+C1
55.99	1990	E+7 6.93	33.28	WAG_70%CO230%+C1
54.81	2007	7.18E+7	34.48	WAG_50%CO250%+C1
54.39	2052	7.28E+7	34.95	WAG_30%CO270%+C1
54.41	2120	7.30E+7	35.05	WAG_10%CO290%+C1

## پانویس ها

1. Natural depletion
2. Fingering
3. Breakthrough
4. Bottom Hole Pressure
5. Water Alternative Gas

## منابع

- [۱] "روش های ازدیادبرداشت از مخازن نفت و گاز"، انتشارات قانن، فصل چهارم، ۱۳۹۶، احمدی، امین، [۱]
- [۲] محمودرضا مرادی، علی وطنی، ۱۳۸۵، تاثیر ناخالصی های گاز همراه نفت تزریقی به مخزن در ازدیاد برداشت نفت، اولین کنگره مهندسی نفت ایران.
- [3] Hashemi, A., Helalizadeh, A. " 2011, Investigation and Evaluation CO2 Injection for Enhanced oil Recovery in oil Reservoirs " 3rd National Conference of Modern Researches in Chemistry Chemical Engineering, Mahshar, Iran.