

## مطالعه‌ی پارامترهای موثر بر ازدیاد برداشت نفت ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن به یکی از مخازن شکافدار ایران

رضا مقبلی و مجتبی رحیمی<sup>\*</sup>، گروه مهندسی نفت دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

### چکیده

دی‌اکسید کربن، گازی گلخانه‌ای است که در پدیده‌ی گرم شدن کره‌ی زمین بیشترین تاثیر را دارد و یکی از روش‌های کاهش ورود آن به اتمسفر، تزریق آن به مخازن نفتی، به خصوص مخازن شکافدار است. در این پژوهش شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت ازدیاد برداشت نفت توسط تزریق دی‌اکسید کربن به مخزن شکافدار انجام شد. بدین منظور داده‌های یکی از میادین نفتی ایران برای شبیه‌سازی ترکیبی توسط نرم‌افزار اکلیپس ۳۰۰ استفاده شد. پس از آن که اثبات شد که در مخازن شکافدار، نادیده گرفتن نفوذ مولکولی موجب ایجاد خطای بالایی در تخمین ضریب بازیافت می‌شود، پدیده‌ی نفوذ مولکولی برای سایر حالت‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. آنالیز حساسیت ضریب بازیافت برای پارامترهای فشار مخزن، نرخ تزریق دی‌اکسید کربن، تخلخل ماتریس، ارتفاع بلوک ماتریس و نفوذپذیری ماتریس انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نفوذ مولکولی اثر قابل توجهی بر بازیافت نفت توسط دی‌اکسید کربن از مخازن شکافدار دارد به طوری که این مکانیسم موجب بازیافت بیش از ۸۰ درصد نفت ماتریس مخزن مورد مطالعه شد. بازیافت نهایی نفت در اثر تزریق دی‌اکسید کربن به مخزن شکافدار برای مخازن دارای فشار بالاتر، بیشتر است. همچنین نرخ بازیافت نفت از نرخ تزریق دی‌اکسید کربن تاثیر می‌پذیرد که به دلیل اهمیت انتقال جرم تبخیر نفت/نفوذ گاز می‌باشد. بلوک ماتریس مرتفع‌تر منجر به فرآیند ریزش ثقلی قابل توجه‌تر و افزایش ضریب بازیافت نفت می‌شود. همچنین بلوک دارای نفوذپذیری بیشتر هم موجب کنترل نرخ بازیافت نفت و افزایش آن و هم موجب افزایش ضریب بازیافت نهایی می‌شود. در این پژوهش، تغییر تخلخل بر ضریب بازیافت بی‌اثر بود.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۲/۱۴

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۹/۱۵

### واژگان کلیدی:

مخازن شکافدار، دی‌اکسید کربن، نفوذ مولکولی، ریزش ثقلی، آنالیز حساسیت.

### مقدمه

کاهش می‌یابد. از طرف دیگر وجود شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز به سمت بالا و تشکیل یک کلاهک گازی ثانویه می‌شود (جداسازی ثقلی) و بنابراین این مورد باعث افزایش بازیافت می‌شود. همچنین می‌توان گفت که مکانیزم‌های همرفت<sup>۱</sup> و نفوذ<sup>۲</sup> در تمام مخازن شکافدار طبیعی وجود دارند. پدیده‌ی همرفت همانند یک همزن در مخزن شکافدار عمل می‌کند و نفوذ باعث تولید همرفت می‌شود. [۱۹ و ۹]

در این مطالعه فرآیند تزریق گاز به مخزن شکافدار با استفاده از داده‌های یک میدان نفتی در ایران شبیه‌سازی شد. از نرم‌افزار Eclipse ۳۰۰ برای تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد و تاثیر پارامترهای مختلف شامل نرخ تزریق دی‌اکسید کربن، فشار مخزن، تخلخل ماتریس، نفوذپذیری ماتریس و اندازه‌ی بلوک ماتریس بر ازدیاد برداشت به صورت آنالیز حساسیت در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

در این سال‌ها پروژه‌های زیادی درباره‌ی ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت طراحی و اجرا شده است که پروژه‌ی تزریق گازهای غیرهیدروکربنی به چاه‌های نفت را شاید بتوان طریقی برشمرد. پروژه‌ای که در سال‌های اخیر از سوی کارشناسان صنعت نفت با استقبال زیادی روبرو شده است. [۲۰] تزریق گاز دی‌اکسید کربن به عنوان یک روش ازدیاد برداشت مطرح است که اگر از منابع غیرطبیعی تامین شود، از آلودگی زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند و از سوی دیگر با ایجاد تورم در نفت و کاهش گرانی آن، بازده برداشت را افزایش می‌دهد. [۱۸]

تجربه‌های علمی نشان‌دهنده‌ی این مطلب هستند که در بیش از ۹۰ درصد از چاه‌هایی که در یک مخزن شکافدار طبیعی حفر شده‌اند، میزان بازیافت نفت بسیار کمتر از چاه‌هایی است که در مخازن معمولی حفاری شده‌اند، زیرا شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز با سرعت بالاتری به سمت چاه تولیدی شده و بنابراین با کاهش مقدار گاز قابل حرکت در مخزن، جریان نفت

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (rahimi@iaukhsh.ac.ir)

## ۱- مبانی نظری

مهم‌ترین وجه تمایز مخازن شکافدار و مخازن معمولی در مکانیزم تولید آنها می‌باشد زیرا وجود شکاف‌ها در مخازن شکافدار طبیعی باعث ایجاد انواع گوناگونی از تولید در مقایسه با مخازن معمولی (بدون شکاف) می‌شود. مخازن شکافدار دارای دو سیستم مجزا با ویژگی‌های متفاوت هستند:

سیستم ماتریس که دارای تخلخل بالا و تراوایی پایین است و سیستم شکاف که دارای تخلخل پایین و تراوایی بالا است. [۱۹] مکانیزم‌های تولید از مخازن شکافدار طبیعی عبارتند از: تولید از طریق پدیده‌ی همرفت، تولید از طریق پدیده‌ی نفوذ، تولید از طریق گاز محلول و تولید از طریق ریزش ثقیلی و جذب (آشام).

از دید تاریخی، نخستین بار، برنارد (۱۹۰۰) در یادداشت‌های آزمایشگاهی خود، ضمن گرم کردن یک مایع، به پدیده‌ی همرفت حرارتی اشاره کرده است. بعدها، در سال ۱۹۱۶، ریلی<sup>۳</sup> از نقطه‌نظر ریاضی، شرایطی را که در آن چنین مکانیزمی وارد عمل می‌شود، بیان کرد. [۱۹] مکانیزم همرفت در اثر وجود چگالی معکوس در ناحیه‌ی نفتی انجام می‌شود.

تغییرات درجه حرارت با عمق مخزن و آزاد شدن ترکیبات سبک نفت در سطح تماس نفت و گاز، دو عامل موثر جهت ایجاد گرادیان چگالی معکوس هستند. از عوارض این پدیده ایجاد خواص فیزیکی نسبتاً ثابت در مخزن و کاهش فشار اشباع ناحیه‌ی ستون نفتی است. [۱۷]

یکی دیگر از مکانیزم‌های دخیل در بازیافت نفت از مخازن شکافدار، مکانیزم انتشار مولکولی بین گاز و نفت شکاف و ماتریس است. [۲۱] در طول تزریق سیالات برای ازدیاد برداشت نفت، بازیافت نفت و انتقال مواد تزریق شده توسط خواص شکاف و ماتریس در مخازن شکافدار طبیعی کنترل می‌شود.

برای این مخازن، انتقال بین ماتریس و شکاف در اثر نفوذ مولکولی بخش قابل توجهی از بازیافت را به خود اختصاص می‌دهد.

بازده اختلاط یا انحلال گاز یا حلال تزریقی با فاز نفتی با ضریب نفوذ متقابل<sup>۴</sup> یا ضریب نفوذ موثر برای ماتریس، مشخصه‌سازی می‌شود. فرآیند جابجایی مولکولی به دلیل اختلاف غلظت در یک محیط همگن، مشابه قانون فوریه (انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما)، توسط فیک<sup>۵</sup> در سال ۱۸۵۵ میلادی از طریق رابطه‌ی ۱ تعریف شده است: [۵]

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (۱)$$

در این رابطه، D ضریب نفوذ، معرف سرعت نفوذ مولکول A در مولکول B وقتی که در تماس با یکدیگر قرار گیرند، است. J شار نفوذ، x بعد طول و c غلظت است.

بر این اساس بعد ضریب نفوذ سطح در واحد زمان خواهد بود. وجود فضای متخلخل به دلیل وجود نواحی تماس متفاوت دو سیال، نفوذ مولکول را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، حرکت مولکول‌ها در فاصله‌ی مشخصی از

اگرچه مکانیزم آشام مویینه نقش مهمی را در بازیافت نفت از مخازن معمولی ایفا می‌کند، اما می‌توان آن را یکی از موثرترین مکانیزم‌ها در مخازن شکافدار نیز دانست.

این مکانیزم که تحت تاثیر گرادیان‌های فشارهای مویینه در فضای متخلخل رخ می‌دهد، باعث می‌شود که سیال تر به درون سنگ کشیده شود و به طور هم‌زمان سیال غیرتر در جهت مخالف از سنگ خارج شود. در صورتی که ماتریس، آب‌دوست باشد (دارای فشار مویینه‌ی مثبت باشد) و همچنین آب به مقدار کافی موجود باشد، آشام مویینه یک مکانیزم کارساز خواهد بود.

در سیستم‌های نفت-گاز، نفت، فاز تر است و تمایل دارد به داخل ماتریس کشیده شود. بنابراین زمانی که ماتریس به طور کامل توسط شکاف‌های پر شده با گاز احاطه شده باشد، هیچ تولید نفتی از بلوک‌های ماتریس توسط این مکانیزم انجام نخواهد شد. [۶]

مکانیزم رانش گازی نقش مهمی را در بازیافت نفت و تاریخچه‌ی تولید

## ۳- توصیف مدل

یک بلوک ماتریس منفرد که توسط شکافها احاطه شده است برای مطالعه‌ی تبادل سیال ماتریس/شکاف تحت مکانیسم بازیافت گرانش/مویبندی استفاده شده است. بلوک ماتریس در ابتدا با نفت پر شده و شکافها در ابتدا با گاز تزریقی پر شده‌اند.

فشار مویبندی صفر و نفوذپذیری بالا (۱۰ داری) در شکافها بدین معنی است که نیروهای ویسکوز در مقایسه با نیروهای گرانش و مویبندی ناچیز هستند. یک حجم منفذی بسیار بزرگ برای شکاف تعریف می‌شود تا اثرات چاه‌های تولیدی و تزریقی مدل حذف شود. بلوک ماتریس همواره با گاز تزریقی احاطه شده است و نفت تولید شده از بلوک ماتریس همواره به سیستم شکاف وارد می‌شود.

خواص پتروفیزیکی مربوط به یکی از میادین نفتی ایران و ترکیب جزئی سیال اولیه از کتاب سعیدی (۱۹۸۷) اقتباس شده است. ابعاد و پارامترهای ماتریس و شکاف در جدول ۲ ارائه شده است. به دلیل تقارن ماتریس-بلوک تنها نیمی از بلوک ماتریس مدل شده است. گرید دوبعدی کارترین استفاده شده و بلوک ماتریس توسط دو شکاف افقی در بالا و پایین و یک شکاف عمودی در سمت راست بلوک ماتریس احاطه شده است.

گذشته و آینده‌ی اکثر مخازن بازی می‌کند. این امر مخصوصاً در مورد مخازن شکافدار صادق است. دلیل این امر نیز آن است که نرخ افت فشار در اکثر مخازن شکافدار تنها در حد چند بار در سال می‌باشد، چون در مخازن شکافدار به دلیل کوچک بودن بلوک‌های ماتریس در مقایسه با ضخامت ستون نفتی، گاز جدا شده تنها پس از طی مسافتی کوتاه به سیستم شکافها می‌رسد.

گازی که به این صورت از بلوک‌های ماتریس خارج شده است می‌تواند به راحتی از طریق سیستم شکافهای موجود خود را به کلاهدک گازی برساند. علاوه بر این تغییرات فشار بین دهانه‌ی چاه و شعاع تخلیه‌ی آن معمولاً کم بوده و محدود به فواصل کوتاه است، در حالی که در مخازن ماسه‌سنگی این مقدار می‌تواند بسیار بزرگ باشد. [۱۹]

## ۲- پیشینه‌ی پژوهش

برخی از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی ازدیاد برداشت مخازن شکافدار توسط تزریق دی‌اکسیدکربن در جدول ۱ خلاصه شده است.

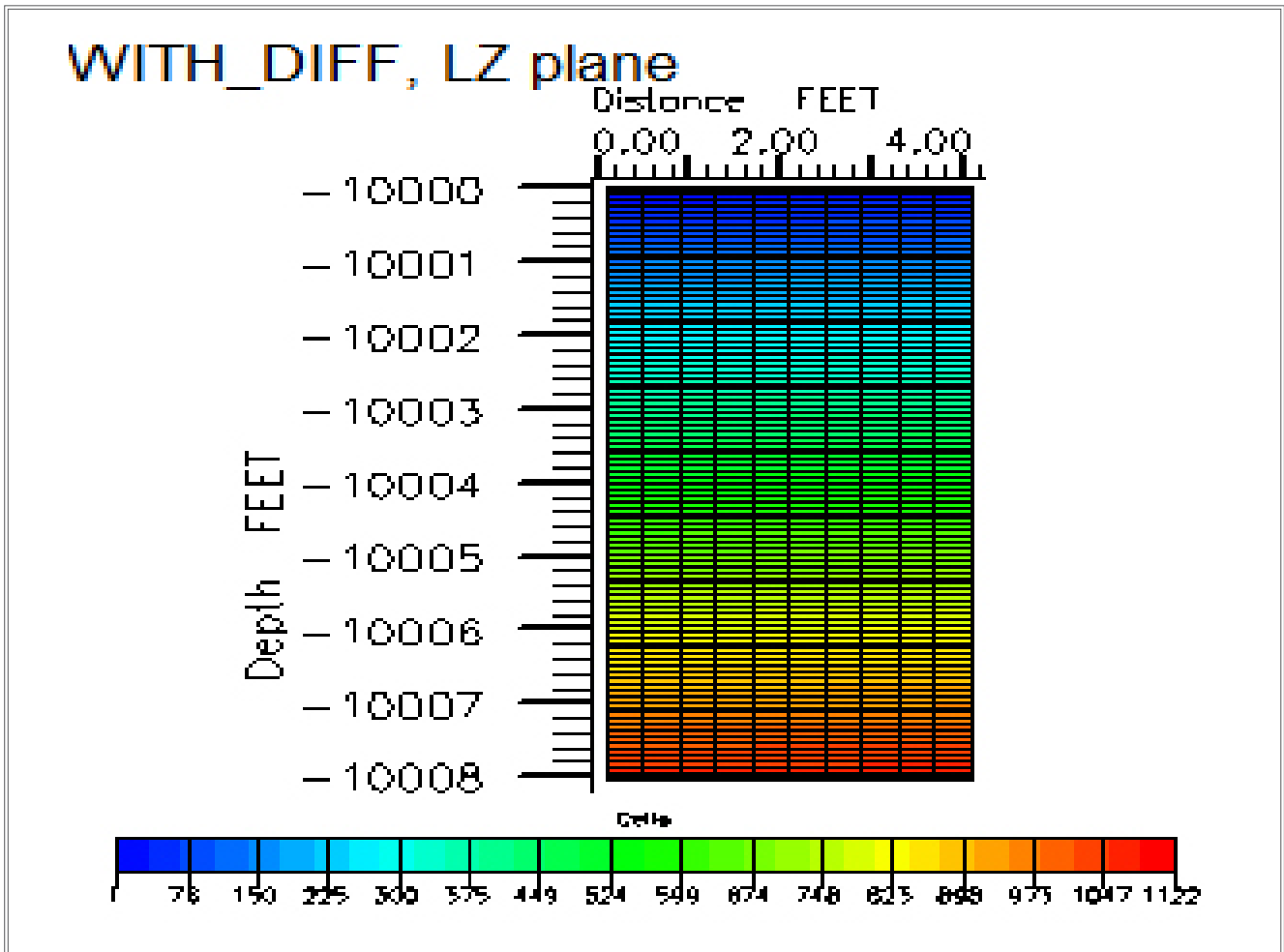
۱ | پیشینه‌ی پژوهش



نام پژوهشگر	روش	نتایج
لی و همکارانش (۲۰۰۰)	تزریق آزمایشگاهی دی‌اکسیدکربن در مغزه‌های دارای شکاف مصنوعی بعد از سیلاب‌زنی آب	ریزش ثقلی مکانیزم اصلی بازیافت است. بازیافت نفت اولیه در آغاز تزریق با کاهش نفوذپذیری سنگ و افزایش اشباع آب اولیه، افت می‌کند.
درویش و همکاران (۲۰۰۶)	شبیه‌سازی تاثیر تزریق دی‌اکسیدکربن به مغزه‌های استوانه‌ای دارای شکاف	مکانیزم کلیدی تولید نفت بلوک ماتریس، نفوذ مولکولی است و ریزش ثقلی نقش کمتری ایفا می‌کند.
هویتی و فیروزآبادی (۲۰۰۶)	بررسی نفوذ در محیط شکافدار با مدل‌سازی عددی	نفوذ مقدار بازیافت نفت را افزایش داده است.
مورتگات و همکاران (۲۰۰۹)	شبیه‌سازی آزمایش تزریق دی‌اکسیدکربن با استفاده از روش المان محدود	نفوذ، مکانیزم مهمی در بازیافت به‌شمار می‌رود.
کاظمی و جامی‌الاحمدی (۲۰۰۹)	بررسی ریزش دی‌اکسیدکربن از مغزه با شکاف مصنوعی همراه با تاثیر نفوذ	ضریب نفوذی که باید به آن توجه داشت، ضریب نفوذ گاز است.
ار و همکارانش (۲۰۱۰)	بررسی برهم‌کنش در مقیاس میکرو برای تزریق دی‌اکسیدکربن به سیستم شکافدار مصنوعی	برای جابجایی امتزاج‌ناپذیر دی‌اکسیدکربن، با افزایش دبی تزریق، نفت به تله افتاده در ماتریس کاهش می‌یابد و برای جابجایی امتزاج‌پذیر نیز با افزایش دبی تزریق، بازیافت نفت سریع‌تر است.
شجاعی و حسن (۲۰۱۴)	مدل‌سازی نفوذ دی‌اکسیدکربن با استفاده از قانون تعمیم‌یافته‌ی فیک که اثر درآگ (ضرایب نفوذ غیر قطری) را در نظر می‌گیرد	با تزریق گاز در مخازن شکافدار نفوذ مولکولی بازیافت نفت را به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد.
فانگ و همکارانش (۲۰۱۷)	بررسی اثر همرفت و نفوذ در شکافها روی انتقال جرم ماتریس-شکاف و بازیافت نهایی، بررسی اثر نرخ تزریق و نفوذپذیری شکاف بر بازده انتقال جرم نفوذ - همرفت	همرفت و نفوذ در شکاف، انتقال ماده بین شکاف و ماتریس را طی تزریق دی‌اکسیدکربن ارتقا می‌بخشد.

دمای مخزن ۱۱۰ درجه‌ی فارنهایت است. ضریب بازیافت نفت بر اساس اشباع نفت میانگین کلی در بلوک ماتریس محاسبه می‌شود. فشار موینگی و نفوذپذیری نسبی ماتریس از کتاب سعیدی (۱۹۸۷) اقتباس شده. فشار موینگی شکاف نیز نادیده گرفته شده است. شبکه‌ی گرید انتخابی ۱۱ در ۱ در ۱۰۲ (NxNy x Nz) می‌باشد.  $i=1-10$  و  $k=2-101$  نشان‌دهنده‌ی نیمه‌ی ماتریس در مدل است. شکل ۱ ابعاد مدل در مختصات xz و گریدهای آن را نشان می‌دهد.

برای اجرای تمام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار اکلیپس ۳۰۰ استفاده شده است. خواص مولفه‌ای معادله‌ی حالت و برهم‌کنش دوتایی (BIP) نیز به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. ترکیب جزئی ۱۱ مولفه‌ای نفت مخزن برای معادله‌ی حالت SRK و ضرایب نفوذ مولکولی موثر گاز و نفت در دو فشار مختلف ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ psi (در آنالیز حساسیت نیز این دو فشار بررسی خواهد شد) در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱ | ابعاد ماتریس و شکاف و گریدهای مدل مرجع

جدول ۲ | ابعاد و خواص ثابت شکاف و ماتریس

خاصیت	عرض ماتریس	طول ماتریس	عرض شکاف عمودی	عرض شکاف افقی	نفوذپذیری شکاف	تخلخل شکاف
مقدار	۸ فوت	۸ فوت	۰/۰۱ فوت	۰/۰۱ فوت	۱۰ داریسی	۱۰۰ درصد

۳ | خواص سیال برای SRK یازده جزئی

Parachor	ZC	Vshift	ضریب بی‌مرکزی	فشار بحرانی، پام	دمای بحرانی، R	جرم مولکولی	اجزا
۵۹/۱۰	۰/۲۹۱۷۸	۰-/۰۰۱	۰/۰۳۷	۴۹۲/۸۴	۲۲۷/۱۶	۲۸/۰۱	N <sub>۲</sub>
۸۰/۰۰	۰/۲۷۴۳۳	۰/۲۱۷	۰/۲۲۵	۱۰۶۹/۵۱	۵۴۷/۴۲	۴۴/۰۱	CO <sub>۲</sub>
۸۰/۱۰	۰/۲۸۲۹۲	۰/۱۰۲	۰/۰۹۰	۱۲۹۹/۹۷	۶۷۲/۱۲	۳۴/۰۸	H <sub>۲</sub> S
۷۱/۰۰	۰/۲۸۶۲	۰-/۰۰۲	۰/۰۱۱	۶۶۷/۰۳	۳۴۳/۰۱	۱۶/۰۴	C <sub>۱</sub>
۱۱۱/۰۰	۰/۲۷۹۲۴	۰/۰۵۹	۰/۰۹۹	۷۰۶/۶۲	۵۴۹/۵۸	۳۰/۰۷	C <sub>۲</sub>
۱۵۱/۰۰	۰/۲۷۶۳	۰/۰۹۱	۰/۱۵۲	۶۱۶/۱۲	۶۶۵/۶۹	۴۴/۱۰	C <sub>۳</sub>
۲۱۶/۰۵	۰/۲۷۴۰۳	۰/۰۹۸	۰/۲۱۴	۵۲۷/۸۸	۸۴۰/۶۶	۷۰/۴۳	C <sub>۴</sub> -C <sub>۶</sub>
۳۸۴/۳۵	۰/۲۹۸۲۶	۰/۰۹۹	۰/۳۵۳	۴۱۱/۹۵	۱۱۴۷/۷۳	۱۳۶/۸۲	C <sub>۷</sub> -C <sub>۱۴</sub>
۶۵۷/۶۰	۰/۲۹۸۲۶	۰/۱۳۱	۰/۶۰۵	۲۸۳/۷۴	۱۳۹۵/۶۱	۲۳۹/۶۸	C <sub>۱۵</sub> -C <sub>۲۱</sub>
۸۵۵/۵۱	۰/۲۹۸۲۶	۰/۱۳۰	۰/۸۱۸	۲۲۵/۵۵	۱۵۴۶/۴۳	۳۴۱/۳۱	C <sub>۲۲</sub> -C <sub>۲۹</sub>
۱۰۶۲/۷۵	۰/۲۹۸۲۶	۰/۰۹۱۰۳	۱/۰۶۵۷۶	۱۸۴/۶۰	۱۶۹۲/۳۳	۴۸۷/۱۰	C <sub>۳۰</sub> +

۴ | ضرایب برهم‌کنش دوتایی SRK یازده جزئی

C30+	C21-C29	C15-C21	C14-C7	C6-C4	C3	C2	C1	H2S	CO2	N2	
										-	N <sub>۲</sub>
									-	۰	CO <sub>۲</sub>
								-	۰/۱۲۰۰	۰	H <sub>۲</sub> S
							-	۰/۰۸۰۰	۰/۱۰۵۰	۰/۰۲۵۰	C <sub>۱</sub>
						-	۰	۰/۰۷۰۰	۰/۱۳۰۰	۰/۰۱۰۰	C <sub>۲</sub>
					-	۰	۰	۰/۰۷۰۰	۰/۱۲۵۰	۰/۰۹۰۰	C <sub>۳</sub>
				-	۰	۰	۰	۰/۰۵۴۴	۰/۱۱۵۴	۰/۱۰۴۰	C <sub>۴</sub> -C <sub>۶</sub>
			-	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۰۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۱۰۰	C <sub>۷</sub> -C <sub>۱۴</sub>
		-	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۰۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۱۰۰	C <sub>۱۵</sub> -C <sub>۲۱</sub>
	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۰۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۱۰۰	C <sub>۲۲</sub> -C <sub>۲۹</sub>
-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۰۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۱۰۰	C <sub>۳۰</sub> +

۵ ترکیب جزئی نفت معادله‌ی حالت ۱۱ جزئی در فشارهای اشباع و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف

۱۵۰۰ Psi			۱۰۰۰ Psi			اجزا
Dio (E-06 cm <sup>2</sup> /s)	Dig (E-04 cm <sup>2</sup> /s)	ترکیب جزئی (کسر مولی)	Dio (E-06 cm <sup>2</sup> /s)	Dig (E-04 cm <sup>2</sup> /s)	ترکیب جزئی (کسر مولی)	
۳۲/۶	۱۴/۹	۰/۰۰۱۱	۳۶/۳	۲۳/۴	۰/۰۰۰۴	N <sub>۲</sub>
۲۲/۰	۱۰/۹	۰/۰۰۴۳	۲۴/۴	۱۷/۲	۰/۰۰۳۹	CO <sub>۲</sub>
۲۲/۵	۱۰/۸	۰/۰۱۲۸	۲۴/۹	۱۷/۰	۰/۰۱۳۳	H <sub>۲</sub> S
۲۸/۳	۹/۹۰	۰/۳۱۱۳	۳۴/۲	۱۵/۷	۰/۲۲۱۱	C <sub>۱</sub>
۲۲/۱	۱۰/۳	۰/۰۴۹۶	۲۴/۶	۱۶/۲	۰/۰۴۹۴	C <sub>۲</sub>
۱۶/۹	۸/۱۴	۰/۰۴۹۹	۱۸/۷	۱۲/۸	۰/۰۵۴۲	C <sub>۳</sub>
۱۲/۳	۶/۲۳	۰/۱۲۵۱	۱۳/۴	۹/۷۷	۰/۱۴۲۸	C <sub>۴</sub> -C <sub>۶</sub>
۱۰/۱	۴/۲۰	۰/۳۲۵۷	۱۰/۷	۶/۵۷	۰/۳۷۶۱	C <sub>۷</sub> -C <sub>۱۴</sub>
۶/۲۰	۲/۹۳	۰/۰۸۶۴	۶/۸۲	۴/۶۰	۰/۰۹۹۸	C <sub>۱۵</sub> -C <sub>۲۱</sub>
۴/۶۸	۲/۳۵	۰/۰۲۵۹	۵/۱۷	۳/۶۹	۰/۰۲۹۹	C <sub>۲۲</sub> -C <sub>۲۹</sub>
۳/۷۴	۱/۹۲	۰/۰۰۷۹	۴/۱۳	۳/۰۰	۰/۰۰۹۲	C <sub>۳۰</sub> +

۶ مقادیر پارامترهای مرجع آنالیز حساسیت

پارامتر	فشار مخزن	نرخ تزریق	تخلخل ماتریس	نفوذپذیری ماتریس	ارتفاع بلوک ماتریس
مقدار مرجع	۱۰۰۰ Psi	۳ Mscf/D	۰/۱ (کسر)	۰/۸ میلی‌داریسی	۸ فوت

شکل ۲ نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدلی که در آن نفوذ مولکولی نادیده گرفته می‌شود، ضریب بازیافت نهایی حدود ۴۴ درصد است، در صورتی که در مدلی که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته می‌شود، ضریب بازیافت نهایی حدود ۸۲ درصد است. بنابراین نادیده گرفتن اثر نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی مخازن شکافدار در تخمین ضریب بازیافت و سایر پارامترهای تولید، خطای چشمگیری ایجاد می‌کند.

از این‌رو، در آنالیز حساسیت پارامترهای مدنظر این پژوهش، شامل ارتفاع بلوک، تخلخل ماتریس، نفوذپذیری ماتریس، فشار مخزن و نرخ تزریق دی‌اکسید کربن، اثر نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

پارامترهای حالت مرجع در جدول ۶ آمده است. مقادیر آنها در آنالیز حساسیت به طور مجزا تغییر داده خواهند شد تا نتیجه‌ی اثر آنها بر درصد بازیافت نفت بررسی شود.

۴- یافته‌ها و تحلیل آن

۴-۱- نفوذ مولکولی و اثر آن بر بازیافت نفت در مخزن شکافدار

با تنظیم فشار مخزن در ۱۰۰۰ psi و نرخ تزریق دی‌اکسید کربن در ۳ Mscf/D مدل یک‌بار با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بار دیگر با چشم‌پوشی از آن اجرا شده است.

## ۴-۲- حساسیت به فشار مخزن

در این قسمت اثر تغییر فشار بر میزان بازیافت نفت از سیستم بلوک منفرد با در نظر گرفتن اثر نفوذ مولکولی بررسی شده است. سایر پارامترهای مدل بدون تغییر باقی مانده‌اند. شکل ۳ این نتیجه را برای فشار ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ پام نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار، ضریب بازیافت نهایی و نرخ بازیافت، هر دو افزایش می‌یابد، به طوری که برای فشار مخزن ۱۰۰۰ پام مقدار ضریب بازیافت نهایی برابر  $82/23\%$  درصد و برای فشار مخزن ۱۵۰۰ پام مقدار ضریب بازیافت نهایی برابر  $83/75\%$  درصد است که افزایش  $1/52\%$  درصدی را نشان می‌دهد.

این افزایش ضریب بازیافت بدین صورت تحلیل می‌شود که افزایش فشار باعث می‌شود که مکانیزم تبخیر بهبود یابد و نفت توسط نفوذ مولکولی گاز از بلوک ماتریس منتقل شود. البته حساسیت ضریب بازیافت به فشار در مدل استفاده شده، بسیار کم است.

## ۴-۳- حساسیت به نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن

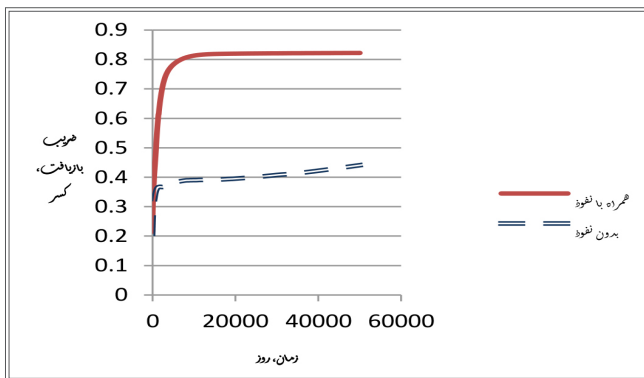
در دسترس بودن دی‌اکسیدکربن در شکاف‌هایی که ماتریس را احاطه کرده‌اند، تاثیر قابل توجهی بر انتقال جرم کلی ماتریس/شکاف دارد که در نهایت بر نرخ بازیافت نفت تاثیر می‌گذارد.

در شبیه‌سازی‌های این بخش دو نرخ تزریق برای دی‌اکسیدکربن شامل نرخ تزریق  $3\text{ MSCF/D}$  و نرخ تزریق  $0/3\text{ MSCF/D}$  در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نتایج اثر این نرخ‌های تزریق را بر ضریب بازیافت نفت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب بازیافت نهایی برای هر دو نرخ یکسان خواهد بود اما نرخ بازیافت در نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن  $0/3\text{ MSCF/D}$  کمتر از نرخ بازیافت در نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن  $3\text{ MSCF/D}$  است.

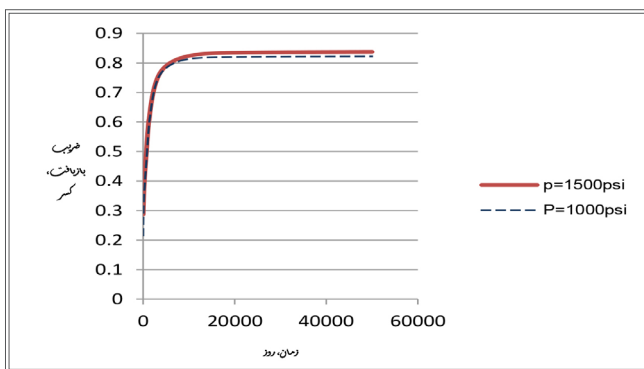
بنابراین نرخ بازیافت نفت در نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن بالاتر، بیشتر خواهد بود، هر چند ضریب بازیافت نهایی تغییری نمی‌کند. این نتیجه این‌گونه تحلیل می‌شود که فقدان دی‌اکسیدکربن آماده‌ی مصرف در شکاف، سرعت مکانیزم تبخیر و انتقال جرم نفوذی را کاهش می‌دهد.

البته واضح است که توزیع، حرکت و ترکیب جزئی واقعی گاز در شکاف‌های مخازن شکافدار طبیعی به سادگی مدل در نظر گرفته شده در این پژوهش نیست، ما فقط پتانسیل اثر منفی نرخ پایین تزریق دی‌اکسیدکربن را در نظر گرفته‌ایم، منظور شرایطی است که در آن شکاف به طور پیوسته با دی‌اکسیدکربن تازه پر نمی‌شود.

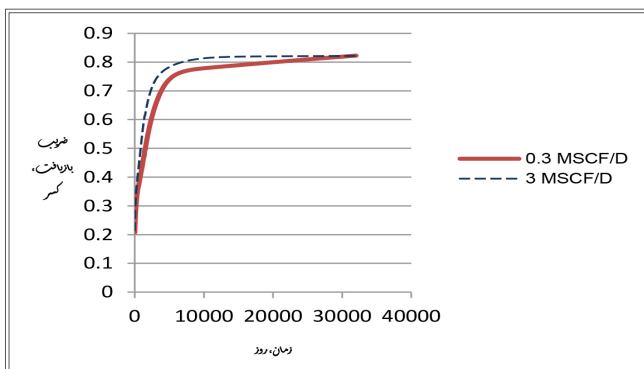
مدل‌سازی غلظت دی‌اکسیدکربن در سیستم شکاف نیاز به مطالعات بیشتری دارد، زیرا کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن هم اثر نفوذ-تبخیر را کاهش می‌دهد و هم باعث کاهش اثر فرآیندهای مویبگی-ریزش ثقلی می‌شود.



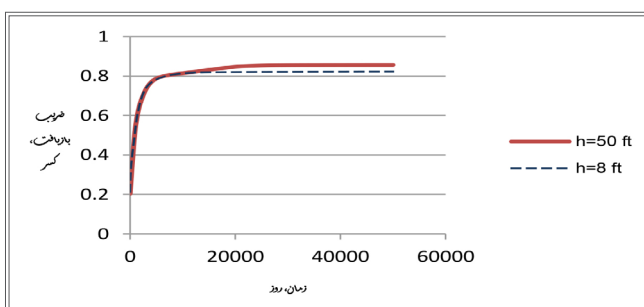
شکل ۲ | اثر نفوذ مولکولی بر بازیافت نفت سیستم بلوک منفرد



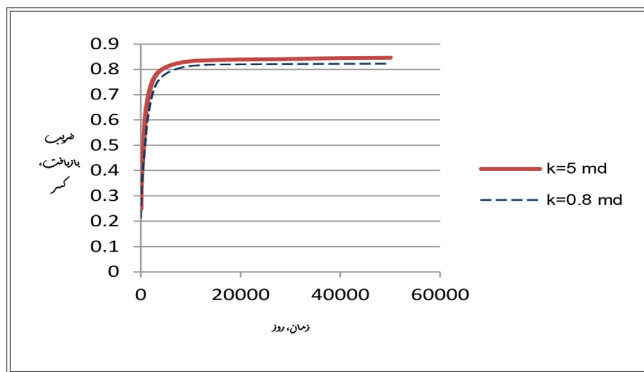
شکل ۳ | اثر فشار مخزن بر ضریب بازیافت نفت در سیستم بلوک منفرد



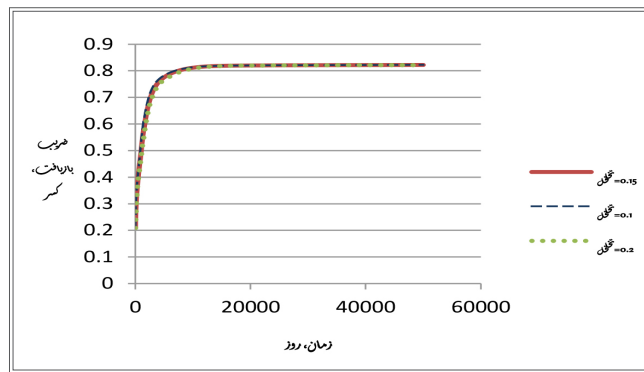
شکل ۴ | اثر نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن بر ضریب بازیافت نفت در سیستم بلوک منفرد



شکل ۵ | اثر ارتفاع بلوک ماتریس بر ضریب بازیافت نفت در سیستم بلوک منفرد



شکل ۷ | اثر نفوذپذیری ماتریس بر ضریب بازیافت نفت در سیستم بلوک منفرد



شکل ۸ | اثر تخلخل بر ضریب بازیافت نفت در سیستم بلوک منفرد

گرفته شده است تا عدم تاثیر تخلخل بر نتایج ضریب بازیافت در حالت سوم نیز بررسی شود و مورد تایید قرار گیرد که مبادا این عدم تاثیر فقط در دو مقدار تخلخل خاص رخ داده باشد.

این مشاهده بر اساس فرضیات مدل این پژوهش منطقی به نظر می‌رسد، زیرا در این پژوهش وابستگی ضریب نفوذ مولکولی به ساختار محیط متخلخل و تخلخل ماتریس نادیده گرفته شده است. اما مطالعات مختلف قبلی نشان داده‌اند که ضریب نفوذ مولکولی در محیط متخلخل به ضریب پیچایی و تخلخل محیط بستگی دارد. [۱۱]

#### ۴-۶- حساسیت به نفوذپذیری ماتریس

نفوذپذیری ماتریس نرخ بازیافت از بلوک ماتریس را کنترل می‌کند و نسبت بین نفوذپذیری ماتریس و نفوذپذیری شکاف تعیین می‌کند که جابجایی ویسکوز اهمیت دارد یا خیر.

اگر سیال تزریقی اساساً در شکاف جریان یابد، آنگاه نیروی ویسکوز در بلوک ماتریس دارای نفوذپذیری پایین قابل چشم‌پوشی است. در این قسمت اثر نفوذپذیری ماتریس بر ضریب بازیافت نفت با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای مقادیر نفوذپذیری ماتریس ۰/۸ میلی‌داری و ۵ میلی‌داری در فشار ۱۰۰۰ پام، نرخ تزریق ۳ MSCF/D، تخلخل ۰/۱ و ارتفاع بلوک ۸ فوت (حالت مرجع) بررسی شده است.

شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی اثر نفوذپذیری ماتریس بر ضریب بازیافت نفت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در نفوذپذیری ماتریس بالاتر، نرخ بازیافت نفت و ضریب بازیافت نهایی هر دو بهبود می‌یابد.

مقدار ضریب بازیافت نهایی در نفوذپذیری ماتریس ۵ میلی‌داری نسبت به نفوذپذیری ماتریس ۰/۸ میلی‌داری، ۲/۳۵ درصد بیشتر است.

#### ۴-۴- حساسیت به ارتفاع بلوک

برای بررسی اثر ارتفاع بلوک ماتریس بر بازیافت نفت، دو حالت ارتفاع بلوک ۸ فوت و ارتفاع بلوک ۵۰ فوت در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها نسبت به حالت مرجع بدون تغییر باقی مانده‌اند. شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی را برای دو ارتفاع بلوک مختلف ۸ و ۵۰ فوت نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بلوک‌های ماتریس با ارتفاع کمتر میزان ضریب بازیافت نهایی نفت، کمتر است. این مشاهده را می‌توان بدین صورت تحلیل کرد که در ارتفاع بلوک کمتر، نفتی که توسط تعادل موینگی-گراننش به تله افتاده است، نمی‌تواند بازیافت شود اما در ارتفاع بلوک بالاتر، مکانیسم ریزش ثقیل باعث بازیافت نفت بیشتر می‌شود.

به طوری که در مدلی با ارتفاع بلوک ۵۰ فوت میزان ضریب بازیافت نفت نسبت به مدل با ارتفاع بلوک ۸ فوت به اندازه‌ی ۳/۴۵ درصد بیشتر است.

#### ۴-۵- حساسیت به تخلخل ماتریس

به منظور بررسی اثر میزان تخلخل بلوک ماتریس در مدل مخزن شکافدار دارای سیستم بلوک منفرد، سه مقدار برای تخلخل شامل تخلخل ۰/۱، تخلخل ۰/۱۵ و تخلخل ۰/۲۰ در نظر گرفته شده است.

سایر پارامترها مشابه پارامترهای ورودی ذکر شده برای مدل حالت مرجع است. باید توجه داشت که اگرچه تخلخل تغییر می‌کند، اما مقدار اولیه‌ی اشباع نفت و گاز در شکاف و ماتریس، در دو حالت مشابه است.

شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی درصد ضریب بازیافت نفت را برای تخلخل‌های گفته شده، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تخلخل بر مقدار درصد ضریب بازیافت نهایی و همچنین نرخ بازیافت نفت تاثیر محسوسی ندارد و مقادیر درصد بازیافت نفت برای مقادیر تخلخل مختلف تقریباً یکسان است.

در این قسمت برخلاف سایر شبیه‌سازی‌ها سه مقدار برای تخلخل در نظر



## نتیجه گیری و پیشنهاد

۸۰ درصد نفت ماتریس در مطالعه‌ی موردی شد. این اثر به دلیل ورود سریع‌تر دی‌اکسیدکربن از شکاف به ماتریس، اثر آن بر ریزش ثقلی-مویبندی و مکانیسم بازیافت تبخیر نفت/نفوذ مولکولی گاز می‌باشد.

۲- بازیافت نهایی نفت در اثر تزریق دی‌اکسیدکربن به مخزن شکافدار برای مخازن دارای فشار بالاتر، بیشتر خواهد بود.

۳- نرخ بازیافت نفت از نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن تاثیر می‌پذیرد که به دلیل اهمیت انتقال جرم تبخیر نفت/نفوذ گاز می‌باشد.

۴- بلوک ماتریس مرتفع‌تر منجر به فرآیند ریزش ثقلی قابل توجه‌تر و افزایش ضریب بازیافت نفت می‌شود و بلوک دارای نفوذپذیری بیشتر هم موجب کنترل نرخ بازیافت نفت و افزایش آن و هم موجب افزایش ضریب بازیافت نهایی می‌شود.

۵- در این پژوهش، تغییر تخلخل بر ضریب بازیافت بی‌اثر بود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تاثیر غلظت دی‌اکسیدکربن در شکاف، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، وابستگی ضریب نفوذ مولکولی به ساختار محیط متخلخل در پژوهش‌های آتی مورد توجه و بررسی قرار گیرد. ■

در این پژوهش شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت ازدیاد برداشت نفت توسط تزریق دی‌اکسیدکربن به مخزن شکافدار برای انتخاب پارامترهای بهینه انجام شد. بدین منظور داده‌های مربوط به یکی از میداین نفتی ایران برای شبیه‌سازی ترکیبی توسط نرم‌افزار اکلپس ۳۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها برای حالت دارای اثر نفوذ مولکولی و حالت بدون نفوذ مولکولی انجام شد.

پس از آن که اثبات شد که در مخازن شکافدار، نادیده گرفتن نفوذ مولکولی موجب ایجاد خطای بالایی در تخمین ضریب بازیافت می‌شود، برای سایر حالت‌های شبیه‌سازی پدیده‌ی نفوذ مولکولی در نظر گرفته شد. سپس آنالیز حساسیت ضریب بازیافت برای پارامترهای فشار مخزن، نرخ تزریق دی‌اکسیدکربن، تخلخل ماتریس، ارتفاع بلوک ماتریس و نفوذپذیری ماتریس انجام شد.

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به این صورت برشمرد:

۱- نفوذ مولکولی اثر قابل توجهی بر بازیافت نفت توسط دی‌اکسیدکربن از مخازن شکافدار دارد به طوری که این مکانیسم موجب بازیافت بیش از

## پانویس‌ها

1. Convection
2. Diffusion
3. Rayleigh
4. Mutual Diffusion coefficient

5. Fick
6. Threshold height
7. Single block

## منابع

- [1]. Chordia, M., Trivedi, J., "Diffusion in naturally fractured reservoirs: a review". SPE Asia Oil & Gas Conference & Exhibition held in Brisbane, Queensland, Australia, 18-20 October, 2010.
- [2]. Darvish, G.R., Lindeberg, E., Holt, T., and Utne, S.A. "Reservoir - condition laboratory experiments of CO2 injection into fractured cores", SPE99650, 2006.
- [3]. Er, V., Babadagli, T and Zhenghe X. "Pore-Scale Investigation of the Matrix-Fracture Interaction during CO2 Injection in Naturally Fractured Oil Reservoir". Energy Fuels 2010, 24: pp. 1421-1430.
- [4]. Fang, X., Yue, X., Fang, W., Lu, S., Geng, Z., "EOR Simulation of Convection and Diffusion in Fracture During CO2 Injection in Tight Oil Reservoir", SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, 8-10 May, Abu Dhabi, UAE, 2017.
- [5]. Fick A., "On Liquid Diffusion", Pogg. Ann. Phys. Chem, 1855, pp 59-86.
- [6]. Haugen A., "Fluid Flow in Fractured Carbonates", University of Bergen, Norway, PhD thesis, 2010.
- [7]. Hoteit, H. and Firoozabadi, A. "Numerical modeling of diffusion in fractured media for gas injection and recycling schemes", SPE103292, 2006.
- [8]. Karimaie, H. "Aspects of Water and Gas Injection in Fractured Reservoir". PhD Dissertation, NTNU, Trondheim, Norway, 2007.
- [9]. Kazemi, A. & Jamialahmadi, M., "The Effect Of Oil And Gas Molecular Diffusion In Production of Fractured Reservoir During Gravity Drainage Mechanism By CO2 Injection", SPE, 2009.
- [10]. Li, H., Putra, E., Schechter, D.S. and Grigg, R.B. "Experimental Investigation of CO2 Gravity Drainage in a Fractured System". Paper SPE 64510 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 16-18 October, 2000.
- [11]. Mason E.A., Malinauskas A.P., "Gas Transport In Porous Media", The Dusty- Gas Model, 1983, pp 20-24.
- [12]. Moortgat, J., Firoozabadi, A., and Morravej, M. "A new approach to compositional modeling of CO2 injection in fractured media compared to experimental data", SPE124918, 2009.
- [13]. Saidi A. M., "Engineering of Fractured Reservoirs (Fundamental and Practical Aspects)", Total, 1987.
- [14]. Schlumberger, "ECLIPSE\* reservoir simulation software Reference", 2010.
- [15]. Shojaei, H., Jessen, K., "Diffusion and Matrix-Fracture Interactions during Gas Injection in Fractured Reservoirs", SPE Improved Oil Recovery Symposium, Oklahoma, USA, 2014, 12-16 April.
- [16]. Pruess K., "A Practical Method for modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media", Society of Petroleum Engineers Journal , 25(1), 1985.

■ ادامه منابع در (دبیرخانه) موجود است.