

# تعیین بازه مطلوب مؤلفه‌های مخزنی در مخازن زغال سنگ حاوی متان برای عملیات ازدیاد برداشت با تزریق گاز دی‌اکسید کربن

نادیا اسفندیاری\*، محمد قاسمی پور

گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

پیام‌نگار: esfandiari\_n@miau.ac.ir

## چکیده

عوامل بسیاری بر روی بازدهی عملیات ازدیاد برداشت در مخازن زغال سنگ حاوی متان تأثیر می‌گذارند. برخی از مهم‌ترین این مؤلفه‌ها در این تحقیق مطالعه شد. بهترین بازه این مؤلفه‌ها برای انجام عملیات ازدیاد برداشت با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مخازن اکلپیس به دست آمد. پس از انتخاب داده‌های مورد نظر برای تجزیه حساسیت‌سنجی، مدل‌های مربوطه با شرایط مختلف تعریف و سپس نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی بررسی و تحلیل شد. شاخص‌های تحلیل تجزیه حساسیت‌سنجی عبارتند از میزان گاز دی‌اکسید کربن تولیدشده و همچنین نرخ این تولید به علاوه میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده در مخزن که از جنبه زیست‌محیطی برای صنعت نفت و گاز اهمیت دارد. برطبق نتایج تجزیه حساسیت‌سنجی می‌توان گفت که مؤلفه‌های تراوایی و تخلخل سامانه شکاف اگر از حد خاصی پایین‌تر روند عملیات ازدیاد برداشت را با شکست روبه‌رو می‌سازند. این در حالی است که سه مؤلفه دیگر یعنی فشار مخزن، فشار لانگمیور و ضریب یانگ تنها بازدهی عملیات ازدیاد برداشت را دستخوش تغییر می‌کنند.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۱

شماره صفحات: ۶ تا ۱۹

**کلیدواژه‌ها:** مخازن زغال سنگ،

متان، ازدیاد برداشت، مؤلفه‌های

مخزن، دی‌اکسید کربن

## ۱. مقدمه

عملیات واجذب گاز از سنگ مخزن انجام شود. مؤلفه‌های تأثیرگذار در استخراج متان از مخازن زغال سنگ عبارتند از: تخلخل، تراوایی در مخازن زغال سنگ، جذب سطحی، فشار مخزن، فشار لانگمیور و ضریب یانگ.

تخلخل به‌عنوان یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در پیش‌بینی رفتار زغال سنگ شناخته می‌شود. در واقع، در این نوع مخازن دو نوع تخلخل در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از تخلخل ماتریکس و تخلخل سامانه شکاف [۱].

برعکس مخازن متعارف، گاز موجود در مخازن زغال سنگ در محل تولید به‌صورت جذب سطحی ذخیره می‌شوند. در مخازن متعارف گازی، گاز در محیط متخلخل فشرده شده، به‌راحتی با کم کردن فشار در چاه تولیدی به جریان در می‌آید، درحالی‌که تقریباً همه گاز درون مخازن گاز متان موجود در لایه‌های زغالی روی سنگ مخزن جذب سطحی شده‌اند. بنابراین، برای تولید از این مخازن باید

\* مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مرودشت، گروه مهندسی شیمی

ونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با یک مطالعه آزمایشگاهی - شبیه‌سازی دریافتند که عدد نفوذپذیری به‌دست آمده برای نمونه‌های انترایست (بالاترین درجه زغال سنگ) کمتر از این میزان در زغال سنگ‌های بیتومنه است [۷]. تزریق دی‌اکسید کربن به مخزن زغال سنگ الگوسازی شد. این کار برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و بهبود تولید گاز انجام می‌شود. تأثیر فشار اولیه و تغییر تراوایی بر روی تولید گاز از مخزن بررسی شد [۸]. صیاف‌زاده و همکارانش در سال ۲۰۱۵ تأثیر تغییر ترکیب سیال تزریقی (نیتروژن و دی‌اکسید کربن) را مطالعه کردند [۹]. ژو و همکارانش شاخص‌های کنترل‌گر رفتار مخزن و روند تولید زغال سنگ را بررسی کردند [۱۰].

وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در یک مطالعه آزمایشگاهی عملیات ازدیاد برداشت از زغال سنگ با تزریق دی‌اکسید کربن خالص و نیتروژن خالص را مقایسه کردند [۱۱]. میری و همکارانش در سال ۲۰۱۱ ظرفیت‌های موجود برای تولید گاز متان را از مخزن زغال سنگ ایران بررسی و اذعان کردند که به‌طور کلی این مخازن در ناحیه البرز، کرمان و طبس وجود دارند. آنها به نقل از مطالعات دیگر بیان کردند که حدود ۱۱ تا ۱۴ میلیارد تن از این نوع مخازن در کشور وجود دارد [۱۲].

دوروکان و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک مطالعه جامع آزمایشگاهی بر روی تراوایی نسبی آب و گاز انجام دادند. آنها در این تحقیق زغال سنگ‌های موجود در کشورهای اروپایی را مطالعه کردند. نمودارهای رسم‌شده از نتایج برای تراوایی نسبی آب-گاز به خوبی نشان می‌دهند که مخازن مختلف اشکال تراوایی نسبی متفاوتی از خود به نمایش می‌گذارند که این موضوع به ناهمگونی‌های متفاوت در این مخازن نسبت داده شد. اگرچه این نکته باید در نظر گرفته شود که در این مطالعه از هلیوم به‌عنوان فاز گازی استفاده شد و از این رو آنها جذب گاز و موارد مربوط به آن را در محاسبات لحاظ نکردند؛ درحالی‌که در شرایط واقعی گازهایی مانند متان و دی‌اکسید کربن وجود دارند که با جذب روی سنگ، بر تراوایی مطلق و نسبی سیالات تأثیر می‌گذارند. در پایان آنها ادعا کردند که فشار لایه‌های بالایی اگرچه تأثیر چشمگیری بر تراوایی مطلق سنگ دارد، تراوایی نسبی را با شدت کمتری دچار دگرگونی می‌کند [۱۳].

در بسیاری از مطالعات انجام شده بر تأثیر مؤلفه‌های مخزنی بر فرایند تولید در مخازن زغال سنگ، از تراوایی به‌عنوان مهمترین مؤلفه یاد شده‌است. به‌طور کلی تراوایی یک مخزن زغال سنگ، توجه‌پذیری یا به‌صرفه نبودن تولید از یک مخزن را مشخص می‌کند؛ به این دلیل که سامانه شکاف طبیعی مخزن یا شکاف‌های آبکافتی به‌وجود آمده باید توانایی مهیا کردن مجرای مناسب برای دبی‌های تولید اقتصادی را داشته باشند.

یکی از مهمترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ، مدول یانگ است که تعریف کیفی این مؤلفه مخزنی عبارت است از میزان تغییر شکل سنگ در مقابل استرس‌های مفید که با شدت‌های مختلف روی سنگ اعمال فشار می‌کنند. ویژگی‌های کشسانی سنگ مخزن به‌صورت مستقیم بر تراوایی سنگ تأثیر می‌گذارد [۱].

ازدیاد برداشت از مخازن زغال سنگ در سال ۱۹۸۰ در آزمایشگاه و از راه شبیه‌سازی آغاز شد. یک تحقیق آزمایشگاهی روی نمونه آپلاچیان نشان داد که متان موجود در نمونه می‌تواند با دی‌اکسید کربن جایگزین شود. در این آزمایش، ضریب بازیابی مخزن از ۴۳٪ در تولید طبیعی تا ۷۹٪ در شرایط تزریق دی‌اکسید کربن بالا رفت [۲]. در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر روی نمونه زغال سنگ بیتومنه لایه زغالی پیتسبورگ، نتایج مشابهی به‌دست آمد. نتیجه‌ها نشان داد که با تزریق دی‌اکسید کربن یا ترکیبی از دی‌اکسید کربن و نیتروژن، می‌توان تا حد مناسبی متان را واجذب و تولید کرد [۳].

یک مطالعه شبیه‌سازی عددی بر ازدیاد برداشت از طریق تزریق گاز دی‌اکسید کربن در مخازن زغال سنگ حاوی متان انجام شد. در آن از ۵ نمونه تعریف‌شده، ۴ مورد حفاری عمودی و ۱ مورد حفاری افقی بررسی شد. زغال سنگی با درجه متوسط آزادی بهترین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت را نشان داد، که دلیل آن سرعت بالای میان‌شکنی گاز دی‌اکسید کربن، ذخیره نهایی بالای این گاز و میزان چشمگیر افزایش تولید است. به‌علاوه، محققان مربوطه اذعان داشتند که حفاری عمودی بهترین بازدهی عملیات را دارد و ترکیب مولی سیال تزریقی از اهمیت بالایی برخوردار است [۴]. کومار و همکارانش در یک مطالعه آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۲، رفتار تراوایی زغال سنگ را در عملیات ازدیاد برداشت بررسی کردند [۵]. امینیان بیان کرد که در طی تولید گاز و آگیری از لایه‌های زغالی، خواص پتروفیزیکی با تغییر فشار داخل خلل تغییر می‌کند [۶].

## ۲. الگوسازی

## ۲-۱ تعیین بازه مؤلفه‌ها برای تجزیه حساسیت‌سنجی

برای انجام این تحقیق از یک الگوی مصنوعی استفاده شد. به این دلیل که هدف اصلی این مطالعه ارائه دامنه‌ای از مؤلفه‌های مورد بررسی است که برای اجرای روش ازدیاد برداشت متان از مخازن زغال سنگ به کمک تزریق گاز دی‌اکسید کربن بازدهی مطلوبی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه زغال سنگ از ظرفیت بالاتری برای جذب دی‌اکسید کربن نسبت به متان برخوردار است، تزریق این گاز موجب واجدب گاز متان می‌شود. بنابراین تزریق گاز دی‌اکسید کربن موجب افزایش تولید متان از طریق بالا بردن نرخ واجدب متان می‌شود. دی‌اکسید کربن، درون زغال سنگ مانند پیستون حرکت می‌کند. گاز متان در زغال سنگ به‌طور کامل با تزریق دی‌اکسید کربن جا به جا می‌شود. به‌لحاظ ریزبینی، جذب دی‌اکسید کربن تأثیر بیشتری در تورم ماتریس نسبت به سایر گازها دارد [۲۰ و ۱۹]. از این‌رو در ابتدا تمامی داده‌های گزارش شده برای این مؤلفه‌ها که در مقالات و تحقیقات پیشین ارائه شده بودند جمع‌آوری و تمام این دامنه برای تجزیه حساسیت‌سنجی مطالعه شد.

در مطالعات شبیه‌سازی مخازن نفتی اولین مرحله تعریف یک الگو پایه است که در مراحل بعدی شبیه‌سازی یعنی در تجزیه حساسیت‌سنجی، الگوهای بعدی بر اساس مؤلفه‌های مورد بررسی تعریف می‌شوند. از این‌رو، در این مطالعه در ابتدا یک الگوی پایه معرفی شد. همین‌طور که پیش از این ذکر شد این الگو یک الگوی مصنوعی است که با داده‌های واقعی گزارش شده در مطالعات و تحقیقات پیشین تعریف شده است. یکی از مهمترین ویژگی‌های یک الگوی شبیه‌سازی مخزنی سامانه‌گریدبندی آن است. الگوی پایه تعریف شده، همچنین تمام الگوهای این مطالعه دارای سامانه‌گریدبندی ۱۰۱ در ۱۰۱ در ۲ هستند. دلیل این انتخاب این است که در مطالعات پیشین از الگوهایی شبیه به این الگو استفاده شده است. همچنین در پنج الگو از هفت الگوی بررسی شده در نرم‌افزار اکلپیس از شرکت شلمبرژر برای مخازن زغال سنگ از سامانه‌گریدبندی مشابهی استفاده شده است. طول گریدها در محورهای افقی یعنی در محور X و Y برابر با ۱/۷۵ متر در گریدهای میانی و همچنین برابر با ۰/۸۷۵ متر در گریدهای مرزی یعنی در هر گرید در مرزهای مخزن از هر طرف است. در محور Z طول گریدها برابر با ۶ متر که

الگوی جنبش‌شناختی هم‌زمان با الگوی انتقال برای شبیه‌سازی سیلاب‌زنی یک مخزن زغال سنگ بررسی شد. شرایط بهینه تولید از این الگو حاصل شد [۱۴]. الگویی برای بررسی ازدیاد برداشت متان از مخازن زغال سنگ مطالعه شد. در این الگو از معادله حالت پنگ رابینسون و نفوذ استفان ماکسول استفاده شد. نتایج نشان داد که تزریق مخلوط گاز می‌تواند در ازدیاد برداشت متان مؤثر باشد. ترکیب بهینه گاز تزریقی شامل ۷۵ درصد نیتروژن و ۲۵ درصد دی‌اکسید کربن بود که باعث ازدیاد برداشت ۲۵ درصدی متان شد [۱۵].

مازوتی و همکارانش مروری بر بهبود بازیافت متان در مخازن زغال سنگ داشتند. بازیافت متان از زغال سنگ با تزریق دی‌اکسید کربن در شرایط بسیار بحرانی انجام پذیر است. در این فرایند متان تولید و دی‌اکسید کربن جذب می‌شود. این فرایند بهبود بازیافت متان نامیده می‌شود که یکی از روش‌های به‌دام انداختن و ذخیره دی‌اکسید کربن نیز به‌شمار می‌آید [۱۶]. شبیه‌سازی و مطالعه آزمایشگاهی فرایند ازدیاد برداشت مخزن زغال سنگ بر روی نمونه زغال سنگی از چین انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار تزریق، متان بیشتری تولید شد. پراکندگی در شکاف‌ها و نرخ انتقال جرم بین ماتریکس و شکاف مهمترین تأثیر را در نرخ تولید متان دارد [۱۷]. الگویی برای بهینه‌سازی طراحی جداسازی گاز متان از مخزن زغال سنگ با فرایند غشایی چند مرحله مطالعه شد. با الگوی پیشنهادی مساحت غشای مورد نیاز، تعداد مراحل، میزان مصرف آب، سوخت، دیگر موارد و قیمت فرایند قابل پیش‌بینی خواهد بود [۱۸].

با توجه به سازوکار خاص بیان‌شده برای مخازن زغال سنگ حاوی متان، برای عملیات تولید و بسیار مهم‌تر از آن برای عملیات ازدیاد برداشت از این مخازن، باید تأثیر مؤلفه‌های مخزنی روی عملیات به‌وضوح مشخص باشند تا بالاترین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت انجام شود. اگرچه محققان در سرتاسر جهان تحقیقات گسترده‌ای روی بیشتر این مؤلفه‌ها انجام داده‌اند، اما هنوز بازه‌های مطلوب و مشخص برای تضمین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت از مؤلفه‌های مخزنی ارائه نشده است. از این‌رو در این تحقیق یک بازه از برخی از تأثیرگذارترین مؤلفه‌های مخازن زغال سنگ ارائه می‌شود که بازدهی مطلوب عملیات ازدیاد برداشت را تضمین می‌کند.

شود در چه بازه‌ای از این مؤلفه‌ها در مخازن زغال سنگ می‌توان انتظار بازدهی بالایی را برای انجام عملیات ازدیاد برداشت از طریق تزریق گاز دی‌اکسید کربن داشت.

جدول ۱. دامنه انتخاب شده از مؤلفه‌ها برای تجزیه حساسیت‌سنجی.

مؤلفه‌ها	داده‌ها
فشار (بار)	۴/۵
	۴۳
	۷۶/۵
نفوذپذیری (میلی داریسی)	۰/۰۰۴
	۳/۶۵
	۱۰۰۰
تخلخل	۰/۰۰۰۵
	۰/۰۰۵
	۰/۰۰۶
مدول یانگ (بار)	۲۱۰۰
	۳۳۰۰۰
	۶۱۰۰۰
فشار لانگمویر (بار)	۴/۷۸ تا ۷/۶۷
	۱۹/۰۳ تا ۴۶/۸۸۵
	۳۸/۲۸ تا ۶۱/۰۹

## ۲-۲ تجزیه‌های حساسیت‌سنجی

تأثیر مؤلفه‌های مورد مطالعه بر روی موفقیت عملیات ازدیاد برداشت بررسی می‌شود. در پایان پیشنهاد می‌شود که عملیات ازدیاد برداشت در چه بازه‌ای از مؤلفه‌های بررسی شده انجام شود.

## ۲-۳ تراوایی شکاف

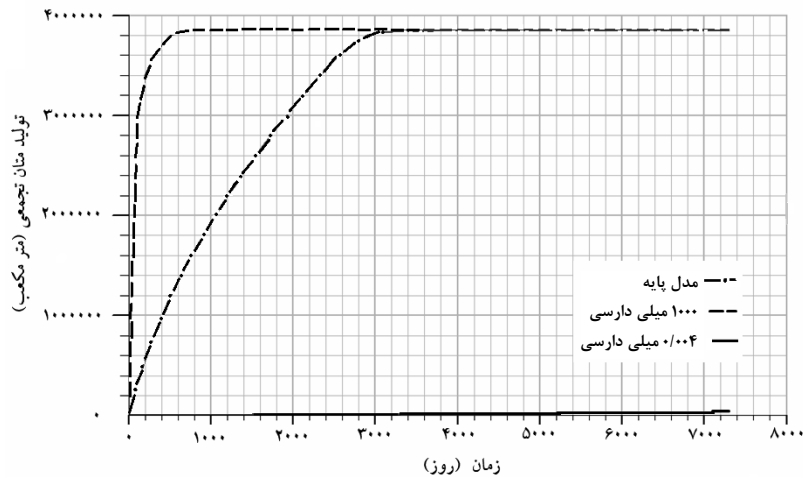
نخستین مؤلفه‌ای که بررسی می‌شود، تراوایی شکاف است. تولید تجمعی گاز متان برای سه حالت تراوایی (بازه پایین، الگوی پایه و بازه بالا) در شکل (۱) آورده شده است. نتایج در شکل (۱) به خوبی نشان می‌دهد که در صورتی که تراوایی شکاف‌ها در اندازه‌های بسیار پایین قرار داشته باشد نه تنها برداشت اولیه انجام نخواهد گرفت بلکه عملیات ازدیاد برداشت نیز با شکست روبه‌رو خواهد شد.

در مجموع ۱۲ متر بود، در نظر گرفته شده است. تراوایی مخزن در هر سه محور برابر با ۳/۶۵ میلی داریسی و تخلخل شکاف برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ برای گاز دی‌اکسید کربن و گاز متان به ترتیب ۰/۰۰۰۰۱۷۲۸ و ۰/۰۰۰۰۰۸۶۴ سانتی‌متر مربع در ثانیه تعریف شد. در الگوی پایه، فشار لانگمویر برای گاز متان برابر با ۴۵/۸۸۵ بار و برای گاز دی‌اکسید کربن برابر با ۱۹/۰۳ بار در نظر گرفته شد. این نکته حائز اهمیت است که فشار لانگمویر در نظر گرفته شده برای الگوی پایه در واقع فشار متوسط در بازه گزارش شده در مطالعات پیشین است.

دمای اولیه مخزن برای الگوی پایه و همچنین تمام الگوهای تجزیه حساسیت‌سنجی برابر با ۴۵ درجه سلسیوس و فشار اولیه مخزن برای الگوی پایه برابر با ۴۳ بار در نظر گرفته شد. تنها گاز موجود در سامانه شکاف‌ها و همچنین ماتریکس در حالت اولیه گاز متان است. این به این معنی است که اشباع گاز که ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده، در ماتریکس تنها و تنها شامل گاز متان است. این نکته باید ذکر شود که این فرض برای ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شود که در بیشتر مطالعات نیز چنین فرضی موجود است.

از آنجایی که در شبیه‌سازی مخازن زغال سنگ، آب اولیه موجود در سامانه شکاف‌ها تنها شروع تولید گاز را به تأخیر انداخته و در واقع در روند تولید پس از مرحله آبدایی مخزن تأثیری در پروفیل تولید گاز نداشته، در این مطالعه یک مخزن زغال سنگ خشک یعنی بدون آب اولیه در نظر گرفته شد. این نکته نیز حائز اهمیت است که تأثیر آب اولیه بر تراوایی سنگ مخزن که باعث افت تراوایی می‌شود با در نظر گرفتن داده‌های گزارش شده در مطالعات پیشین در محاسبات لحاظ شده است. علاوه بر این، برخی از مخازن زغال سنگ گزارش شده در تحقیقات پیشین، مخازن خشک یعنی بدون آب اولیه هم در سامانه شکاف و هم در سامانه ماتریکس بوده‌اند بنابراین فرض خشک بودن مخزن در این مطالعه با آن مخازن مطابقت دارد. این فرض همچنین با برخی از الگوهای ارائه شده به وسیله نرم‌افزار اکلپس از مخازن زغال سنگ تطابق دارد. بنابراین در الگوی پایه و همچنین الگوهای تجزیه حساسیت‌سنجی در این مطالعه سامانه شکاف و همچنین سامانه ماتریکس از آب اولیه خالی هستند.

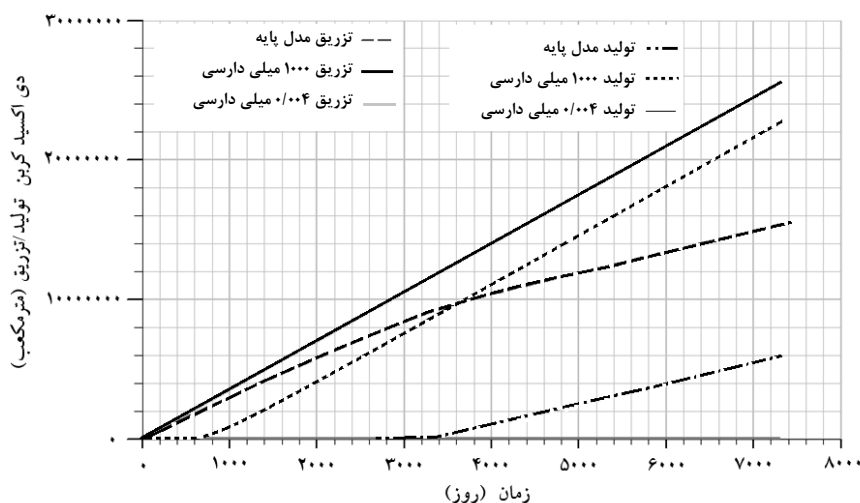
از میان داده‌های جمع‌آوری شده، بازه‌های انتهایی و ابتدایی و همچنین داده‌هایی از میانه این بازه‌ها انتخاب شد. در واقع دلیل این انتخاب داده‌ها برای مؤلفه‌های مورد مطالعه این است که بررسی



شکل ۱. مقایسه تولید تجمعی گاز متان در تراوایی‌های مختلف.

ذخیره‌سازی در پایان عملیات بیشتر باشد، از نظر زیست‌محیطی، عملیات موفق‌تری اجرا شده‌است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که الگوی با تراوایی ۰/۰۰۴ میلی داریسی تقریباً هیچ تزریقی و در نتیجه آن، تولید گاز دی‌اکسید کربن را نشان نمی‌دهد و از نو این الگو از بحث ما خارج می‌شود؛ اما نکته قابل توجه این است که با وجود میزان بسیار بیشتر تزریق تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در الگوی ۱۰۰۰ میلی داریسی نسبت به الگوی پایه، تولید تجمعی این گاز در این الگو با فاصله بیشتری از الگوی پایه است. همین گونه که دیده می‌شود، میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره‌شده در مخزن در الگوی تراوایی ۱۰۰۰ میلی داریسی بسیار کمتر از الگوی پایه است.

نکته قابل بحث در این شکل تولید تجمعی گاز متان در حالت تراوایی ۱۰۰۰ میلی داریسی است؛ همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، کل گاز متان موجود در این مخزن در حالت تراوایی ۱۰۰۰ میلی داریسی ظرف مدت حدود دو سال تخلیه می‌شود، این در حالی است که برای الگوی پایه این مدت حدود ۳۰۰۰ روز طول می‌کشد؛ بنابراین از این نظر، نمودار تراوایی ۱۰۰۰ میلی داریسی شرایط مطلوبی را به ما نشان می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین اهداف پروژه‌های ازدیاد برداشت با تزریق گاز دی‌اکسید کربن در انواع مخازن نفتی و گازی، ذخیره‌سازی این گاز برای کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای است. از این رو هرچه میزان این



شکل ۲. مقایسه تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در تراوایی‌های مختلف.

میزان زیاد گاز دی‌اکسید کربن تزریق شده به سامانه، میزان بسیار کمی تولید شده است. اگرچه میزان نهایی گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده در مخزن با الگوی پایه تفاوت چندانی ندارد؛ اما در الگوی پایه از حدود ۱۶۰۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز تزریق شده حدود ۶۰۰۰۰۰۰ متر مکعب از طریق چاه تولیدی از مخزن خارج شده است که این به نوبه خود مشکل جداسازی گازها را در سطح برای ما ایجاد می‌کند. درحالی‌که از حدود ۱۰۰۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن تزریق شده در الگو با فشار بالا تنها ۴۰۰۰۰۰ متر مکعب تولید شده است (شکل (۳)). این امر را می‌توان به فشار بالای این الگو و این نکته که این فشار از میان‌شکنی زود هنگام گاز دی‌اکسید کربن جلوگیری می‌کند، ربط داد. در واقع، در این الگو بیشتر گاز تزریقی به‌جای هجوم به سمت چاه تولیدی وارد نقاط مختلف مخزن می‌شود؛ بنابراین الگویی با فشار بالاتر مخزن از دیدگاه مهندسی، اقتصاد عملیات از جنبه زیست‌محیطی و همچنین میزان گاز متان تولید شده نسبت به الگوی پایه برتری دارد. بنابراین در چنین شرایطی عملیات ازدیاد برداشت با موفقیت بسیار انجام می‌شود.

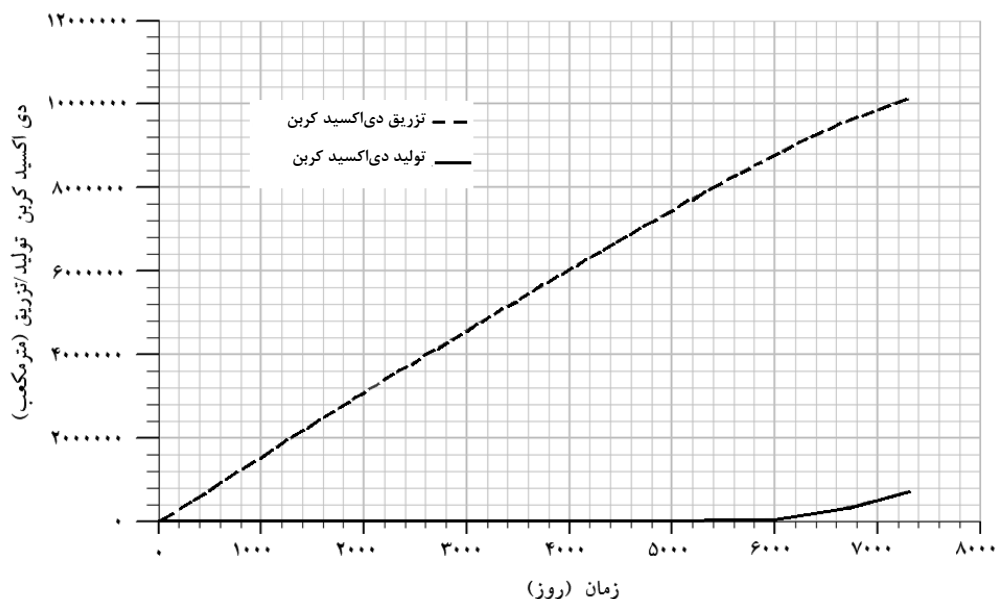
بنابراین، نتیجه‌ای که از شکل ۲ گرفته می‌شود، این است که تراوایی بسیار بالای مخزن برای ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن در مخازن زغال سنگ مناسب نیست. این موضوع به‌دلیل میان‌شکنی سریعتر گاز دی‌اکسید کربن تزریق شده به مخزن و در نتیجه آن خروج مستقیم میزان عظیمی از گاز تزریق شده است. با توجه به موارد یاد شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که در شرایط الگوی پایه یعنی تراوایی میانه از سامانه شکاف می‌توان عملیات ازدیاد برداشت موفق تری را انتظار داشت.

## ۲-۴ فشار مخزن

میزان گاز متان اولیه موجود در مخازن زغال سنگ در سطوح مختلفی از فشار اولیه مخزن متفاوت است. بنابراین برای ارزیابی عملکرد مخزن در سطوح مختلفی از این مؤلفه در تجزیه حساسیت‌سنجی، لازم است در ابتدا میزان گاز اولیه موجود در سامانه برای هر یک از الگوها حساب شود و بر اساس آن ضریب بازیابی را برای هر یک از داده‌ها به‌طور مجزا به‌دست آورد.

## ۲-۵ بازه بالای فشار مخزن

در بررسی الگو از جنبه زیست‌محیطی، در فشار مخزن ۷۶/۵ از



شکل ۳. نمودار تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در فشار مخزن ۷۶/۵ بار.



## ۲-۶ بازه پایین فشار مخزن

پس از بررسی الگو در فشار مخزن پائین دیده شد که در فشار مخزن ۴/۵ بار، گاز متان موجود در سامانه در ابتدای عملیات از ۳۸۵۰۰۰۰ در الگوی پایه به ۷۰۰۰۰۰ متر مکعب نزول پیدا خواهد کرد؛ بنابراین می توان گفت، فشار اولیه مخزن در حد بسیار چشمگیری روی میزان گاز متان موجود در سامانه در ابتدای عملیات تأثیر می گذارد. طبق یافته های این بخش از این مطالعه می توان ادعا کرد که هرچه فشار اولیه مخزن بالاتر باشد میزان گاز بیشتری در حالت اولیه در سامانه موجود است.

در این الگو بیشتر از ۱۸۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی اکسید کربن به مخزن تزریق می شود؛ همین طور که انتظار می رود، در چنین الگویی که میان شکنی گاز تزریقی سریعتر حاصل می شود، میزان بسیار زیادی از گاز تزریقی از راه چاه تولیدی از مخزن خارج می شود و در نتیجه آن، چالش بزرگی در جداسازی گازها در روی سطح به وجود می آورد. در این الگو تقریباً ۹۵۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی اکسید کربن در انتهای عملیات در مخزن ذخیره می شود.

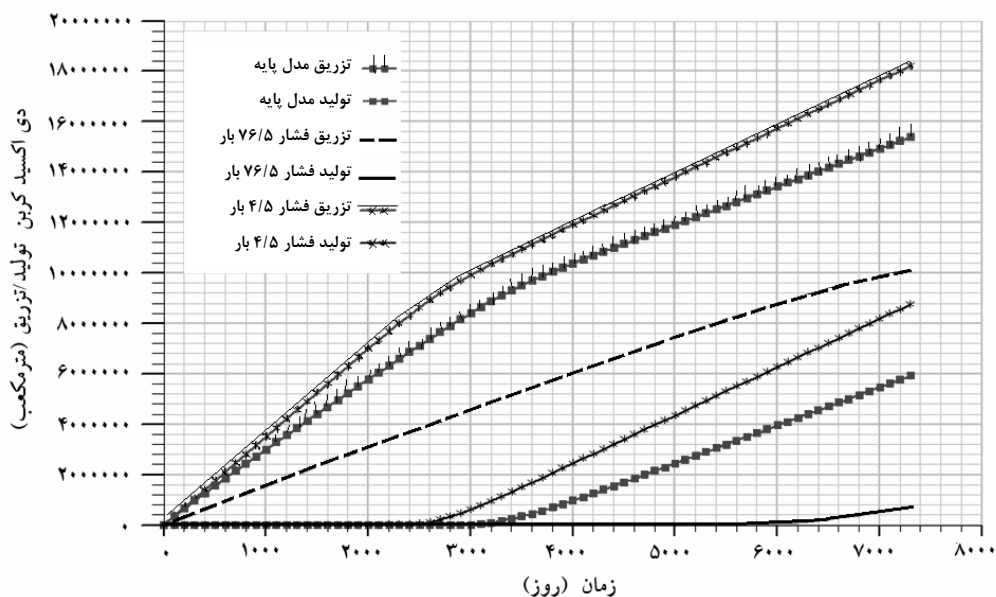
اکنون که الگوهای فشار به تنهایی بررسی شدند، برای انجام مقایسه واضح تر میان این الگوها، نمودارهای مربوط به تولید جمعی گاز متان و همچنین تولید و تزریق جمعی گاز دی اکسید کربن آورده شده اند. شکل (۴) مقایسه ای میان نمودارهای تزریق و تولید جمعی گاز دی اکسید کربن انجام می دهد. اختلاف این دو میزان که

## Archive of SID

در واقع میزان ذخیره نهایی گاز دی اکسید کربن در سامانه را نشان می دهد برای الگوی با فشار بالا، الگوی پایه و الگوی با فشار پایین به ترتیب عبارت است از ۹۴۲۰۰۰۰، ۹۴۷۵۰۰۰ و ۹۴۶۵۰۰۰ متر مکعب. بنابراین، در ارزیابی جنبه محیط زیستی الگوهای فشار از نظر میزان نهایی ذخیره گاز دی اکسید کربن، این الگوها تفاوت بسیار اندکی دارند؛ اما از نظر میزان گاز دی اکسید کربن تولید شده، بهترین نتیجه در الگو با فشار بالا مشاهده شد. بر اساس مباحث مطرح شده در تجزیه حساسیت سنجی مؤلفه فشار مخزن، می توان به این نتیجه رسید که اگرچه الگو با فشار بالاتر نتایج مطلوب تری را از نظر میزان گاز متان تولیدی و گاز دی اکسید کربن ذخیره شده و تولیدی در مخزن نشان می دهد، در کل بازه بررسی شده فشار، عملیات ازدیاد برداشت از موفقیت نسبتاً مطلوبی برخوردار بوده، این مؤلفه موجب شکست عملیات ازدیاد برداشت از نظر مهندسی نفت نمی شود.

## ۲-۷ فشار لانگمیور

فشار لانگمیور قابلیت سنگ زغال سنگ را برای جذب سطحی گاز بیان می کند؛ بنابراین بسیار واضح است که تغییر این مؤلفه به صورت مستقیم روی میزان گاز موجود در سامانه در حالت اولیه تأثیر می گذارد.



شکل ۴. مقایسه تزریق و تولید جمعی گاز دی اکسید کربن در فشارهای مختلف.

اعمال نفوذ می‌کند. اما اگر فشار مخزن از فشار لانگمیور کمتر باشد، هر تغییری در فشار مخزن نه تنها میزان گاز فشرده شده درون شکاف‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه میزان گاز جذب شده روی سطح سنگ را نیز دستخوش تغییر می‌کند. با دانستن این موضوع باید توجه شود که در بازه بالای فشار لانگمیور (۶۱/۰۹ بار)، فشار مخزن در نظر گرفته شده (۴۳ بار) کمتر از این عدد است و دلیل میزان کمتر گاز موجود در سامانه در شرایط اولیه در الگوی پیشین این است که ظرفیت زغال سنگ برای جذب گاز پر نشده است. اما در الگوی حاضر (فشار لانگمیور ۷/۶۷ بار) با توجه به فشار اولیه مخزن (۴۳ بار) ظرفیت زغال سنگ برای جذب گاز پر شده و علاوه بر آن میزان چشمگیری از گاز نیز درون کلیت‌ها فشرده شده است.

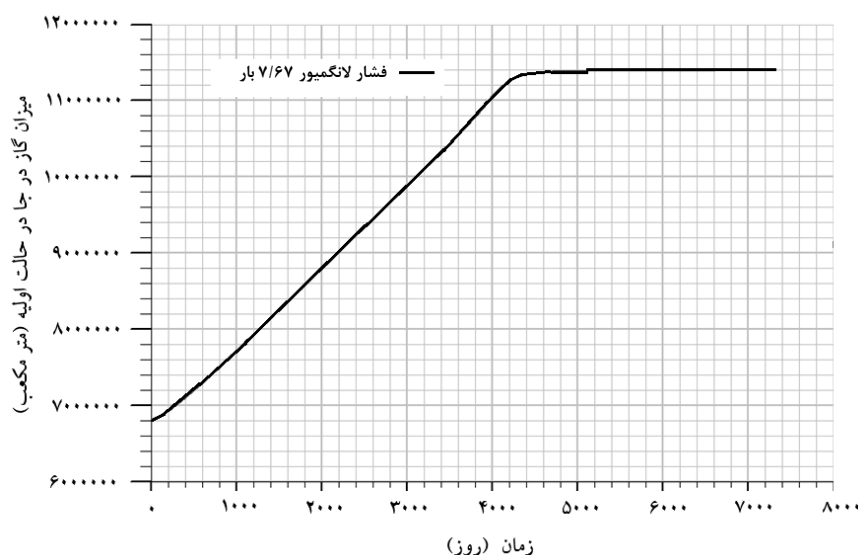
با توجه به شکل (۵)، اگر فشار لانگمیور مخزن زغال سنگ در نظر گرفته شده از ۴۶/۸۸۵ بار در الگوی پایه به ۷/۶۷ بار تغییر نماید، میزان گاز موجود در سامانه در حالت اولیه از ۳۸۵۰۰۰۰ به ۶۸۰۰۰۰۰ متر مکعب صعود می‌نماید. علاوه بر این، همین موضوع باعث می‌شود که میزان گاز موجود در سامانه تا ۱۱۴۰۰۰۰۰ متر مکعب در مراحل پایانی عملیات بالا رود. با یک مقایسه با نمودارهای ارائه شده در بالا به خوبی می‌توان درک کرد که شرایط الگوی حاضر برای نگهداری میزان عظیمی از گاز درون مخزن از تمام شرایط بحث شده پیشین با فاصله بهتر است.

## ۲-۸ بازه بالای فشار لانگمیور

در صورتی که فشار لانگمیور مخزن زغال سنگ در نظر گرفته شده از ۴۶/۸۸۵ به ۶۱/۰۹ بار تغییر نماید، میزان گاز موجود در سامانه در حالت اولیه از ۳۸۵۰۰۰۰ به ۳۳۳۰۰۰۰ متر مکعب کاهش می‌یابد. این نکته با مفهوم فشار لانگمیور در تطابق کامل است، به این دلیل که هر چه این فشار بالاتر رود توانایی سنگ زغال سنگ برای جذب گاز کمتر می‌شود. همچنین در بررسی میزان گاز ذخیره شده در مخزن در الگوی با فشار لانگمیور بالا، این نکته برداشت می‌شود که فشار بالاتر لانگمیور ظرفیت جذب به وسیله سنگ را کاهش می‌دهد و از این رو میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده در مخزن کاهش می‌یابد که در این الگو برابر با ۷۷۰۰۰۰۰ متر مکعب است.

## ۲-۹ بازه پایین فشار لانگمیور

پس از بررسی بالاترین عدد گزارش شده از فشار لانگمیور در مقاله‌ها و مطالعه‌های پیشین (۶۱/۰۹ بار)، اکنون تأثیر پایین‌ترین سطح گزارش شده از این مؤلفه (۷/۶۷ بار) بر عملیات ازدیاد برداشت بررسی می‌شود. در مورد مفهوم بسیار مهم رابطه میان فشار مخزن و فشار لانگمیور، نکته مهم این است که در صورتی که فشار مخزن از فشار لانگمیور بالاتر باشد سنگ زغال سنگ تمام ظرفیت جذب سطحی خود را با گاز پر کرده است. در چنین شرایطی افزایش یا کاهش فشار مخزن بر میزان گاز جذب شده روی سطح سنگ تأثیر نمی‌گذارد، بلکه تنها روی میزان گاز فشرده شده درون سامانه شکاف



شکل ۵. نمودار میزان کلی گاز موجود در سامانه با فشار لانگمیور پایین (۷/۶۷ بار).



## Archive of SID

تزریق بیشتری را می‌توان انتظار داشت و هم میزان گاز دی‌اکسید کربن بیشتری در سامانه ذخیره خواهد شد؛ بنابراین الگو با فشار لانگمیور پایین هم از نظر میزان گاز متان تولیدشده و هم از نظر میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده مطلوب‌ترین شرایط را ایجاد می‌کند.

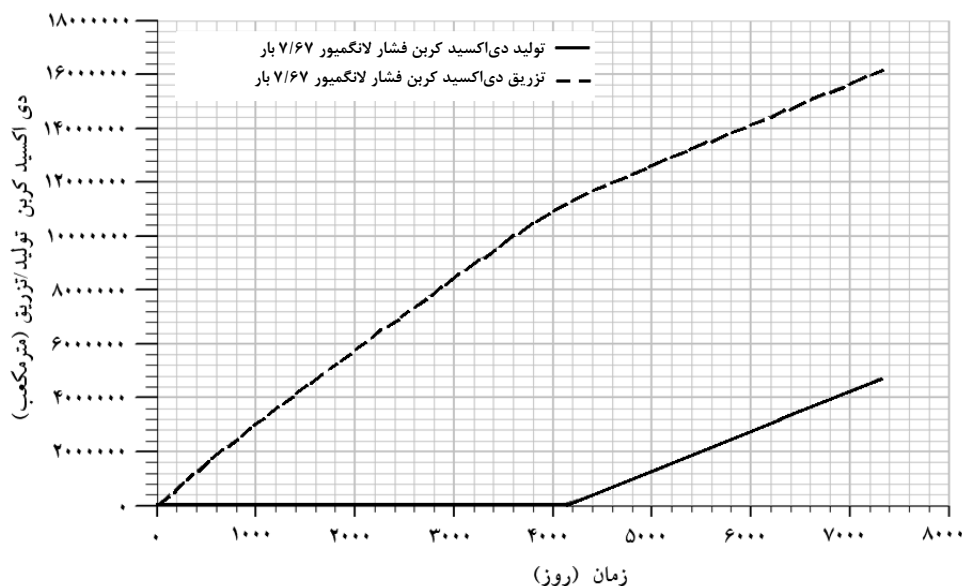
اما نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که حتی در بالاترین فشار لانگمیور گزارش شده که در این مطالعه نیز لحاظ شده، عملیات ازدیاد برداشت با شکست روبه‌رو نشده است اما بهره‌وری اقتصادی و محیط زیستی ضعیف‌تری را عرضه می‌کند؛ پس این مؤلفه (فشار لانگمیور) در بازه مشاهده‌شده در مخازن مختلف در جهان، نمی‌تواند موجب شکست عملیات ازدیاد برداشت از مخازن زغال سنگ گردد، اما تا حد چشمگیری می‌تواند روی نتیجه این عملیات تأثیر بگذارد.

### ۲-۱۰ تخلخل شکاف

نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که در عملیات ازدیاد برداشت از مخزن علاوه بر ویژگی شاخص تولید، ویژگی شاخص تزریق نیز بسیار حائز اهمیت است. بنابراین مؤلفه‌هایی که بر این دو ویژگی تأثیر می‌گذارند، مطابق آن بازدهی عملیات ازدیاد برداشت را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند.

اکنون باید این الگو را از نظر قابلیت میزان ذخیره گاز دی‌اکسید کربن نیز بررسی کرد. از این‌رو، میزان تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در این الگو در شکل (۶) آمده است. نتیجه بسیار قابل ملاحظه‌ای که از شکل (۶) حاصل می‌شود این است که از میزان عظیم گاز دی‌اکسید کربن تزریق شده تا روز ۴۰۰۰ که برابر با حدود ۱۱۴۰۰۰۰۰ متر مکعب است، تقریباً هیچ‌میزان از چاه تولیدی خارج نمی‌شود و تمامی آن در مخزن ذخیره می‌شود. دلیل این امر ظرفیت بالای زغال سنگ برای جذب گاز با توجه به فشار پایین لانگمیور در این الگو است. از بررسی الگوی با فشار لانگمیور پائین می‌توان استنتاج کرد که این الگو هم از نظر میزان گاز متان تولید شده و هم از نظر میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده بهترین الگوی بررسی شده تا به اینجا است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که، در یک مخزن زغال سنگ هرچه میزان فشار لانگمیور مخزن کمتر باشد، میزان گاز اولیه و همین‌طور میزان گازی که در طول عملیات ازدیاد برداشت در مخزن ذخیره می‌شود بیشتر خواهد بود. این موضوع بیان می‌کند که هرچه عدد این مؤلفه در یک مخزن زغال سنگ کمتر باشد عملیات ازدیاد برداشت با موفقیت بیشتری انجام می‌شود. بنابراین هرچه فشار لانگمیور یک مخزن کمتر باشد هم شاخص



شکل ۶. نمودار تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن با فشار لانگمیور پایین (۷/۶۷ بار).

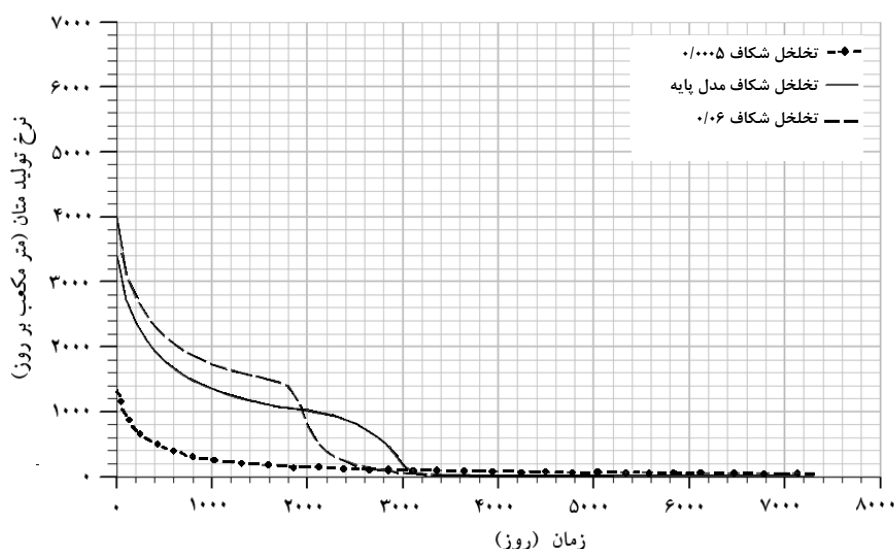
برداشت در مخزن باقی می‌ماند. بنابراین نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که بهترین بازه از مؤلفه تخلخل سامانه شکاف برای اطمینان از اجرای یک عملیات ازدیاد برداشت موفق از مخازن زغال سنگ حاوی متان، بازه‌ای میانه از داده‌های گزارش شده در مطالعات پیشین از مخازن مختلف در جهان است. به این دلیل که در یک مخزن با تخلخل شکاف پایین دراصل عملیات ازدیاد برداشت به سبب شاخص پایین تزریق اجرایی نیست؛ همچنین در یک مخزن با تخلخل سامانه شکاف بسیار بالا به دلیل میان‌شکنی سریع قابلیت ذخیره میزان کمتری از گاز دی‌اکسید کربن تزریق شده مشاهده می‌شود.

## ۲-۱۱ مدول یانگ

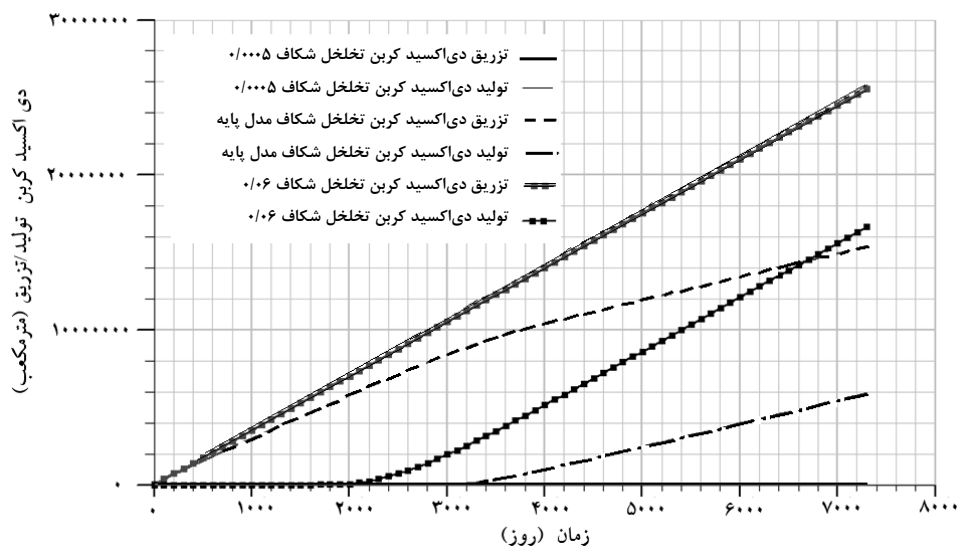
این مؤلفه که از ویژگی‌های کشسانی (مکانیکی) سنگ به‌شمار می‌رود؛ تغییر شکل سنگ را بر اثر تغییر الگوی استرس در طول عمر مخزن کنترل می‌کند. در واقع، بالا بودن میزان این مؤلفه در مخزن به معنی مقاومت بیشتر در برابر استرس وارد شده بر مخزن است. همچنین از مفهوم این مؤلفه این نتیجه گرفته می‌شود که هرچه میزان مدول یانگ کمتر باشد سنگ زغال سنگ، نرم‌تر است و با بالا رفتن استرس مفید روی مخزن (در نتیجه افت فشار مخزن در طول تولید) عرض شکاف‌ها کاهش بیشتری را نشان خواهد داد.

در مقایسه دو الگوی دیگر باید گفت که الگوی با تخلخل شکاف بالاتر (۰/۰۶) از همان ابتدای عملیات برتری نسبی خود را نشان می‌دهد (شکل (۷)). دلیل این برتری را می‌توان خروج راحت‌تر گاز متان از سامانه شکاف دانست. علاوه بر این موضوع، باید به این نکته نیز دقت شود که وقتی تخلخل شکاف در یک مخزن بالاتر باشد میزان گاز اولیه موجود در سامانه شکاف نیز مطابق با آن بیشتر است؛ بنابراین برتری اولیه الگوی با تخلخل شکاف بالاتر ناشی از این دو دلیل است. پس از تخلیه سامانه شکاف از گاز متان، یعنی زمانی که اثر عملیات ازدیاد برداشت در مخزن لمس شده است، باز هم الگوی با تخلخل شکاف بالاتر نسبت به الگوی پایه، نرخ تولید مطلوب‌تری را برای گاز متان ارائه می‌کند که دلیل این امر را می‌توان به تأثیر مثبت این مؤلفه بر شاخص تزریق نسبت داد.

برای بررسی این فرضیه باید نمودارهای مربوط به تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن را تجزیه کرد (شکل (۸)). اما نکته جالب توجه در این شکل این است که در الگوی با تخلخل شکاف بالاتر اگرچه میزان عظیمی گاز دی‌اکسید کربن قابلیت تزریق به سامانه را پیدا کرده است اما درصد قابل ملاحظه‌ای از این میزان از چاه تولیدی خارج شده است و در نتیجه آن در الگوی با تخلخل شکاف بالاتر ۸۹۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن در مخزن ذخیره شده است. در حالی که در الگوی پایه با تخلخل حدود ۹۵۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن در نتیجه عملیات ازدیاد



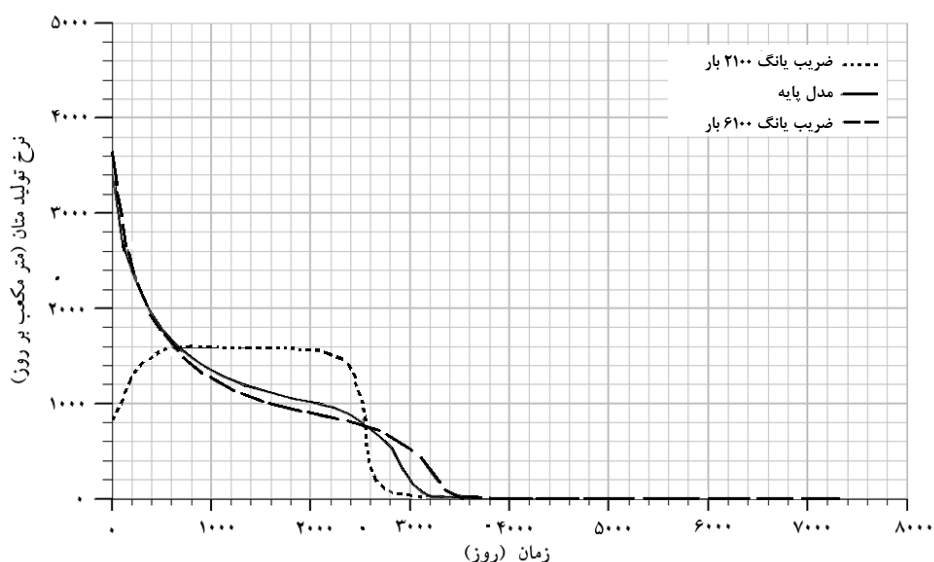
شکل ۷. نمودار مقایسه نرخ تولید گاز متان در مقادیر مختلف تخلخل شکاف.



شکل ۸. نمودار تزریق و تولید تجمعی گاز دی اکسید کربن در مقادیر مختلف تخلخل شکاف.

زغال سنگ در برابر استرس خارجی، عرض شکافها در نزدیکی چاه تولیدی کوچک می شود و از این رو تراوایی سامانه شکاف را تا حد چشمگیری کاهش می دهد، اما پس از ورود گاز دی اکسید کربن به سامانه در عملیات ازدیاد برداشت این مشکل برطرف می شود تا حدی که این نرخ از دو الگوی دیگر نیز پیشی می گیرد. دلیل برتری این نرخ تولید پس از اعمال تأثیر عملیات ازدیاد برداشت در این الگو این است که با توجه به نرم بودن سنگ زغال سنگ، میزان گاز دی اکسید کربن بیشتری می تواند به آسانی وارد سامانه شود.

نکته بسیار جالب توجهی که در شکل (۹) مشاهده می شود رفتار نمودار نرخ تولید گاز متان در مدول ضریب یانگ پایین (۲۱۰۰ بار) است. همین گونه که مشاهده می شود، برای نخستین بار در همه الگوهای بررسی شده در این تحقیق، نرخ تولید گاز متان در آغاز عملیات زیاد می شود و پس از یک دوره در اوج بودن، تنزل می یابد. دلیل این رفتار را باید در مفهوم ضریب یانگ یافت؛ اتفاقی که در این الگو (ضریب یانگ ۲۱۰۰ بار) می افتد این است که در ابتدای تولید به محض باز شدن چاه تولیدی به دلیل مقاومت پایین سنگ

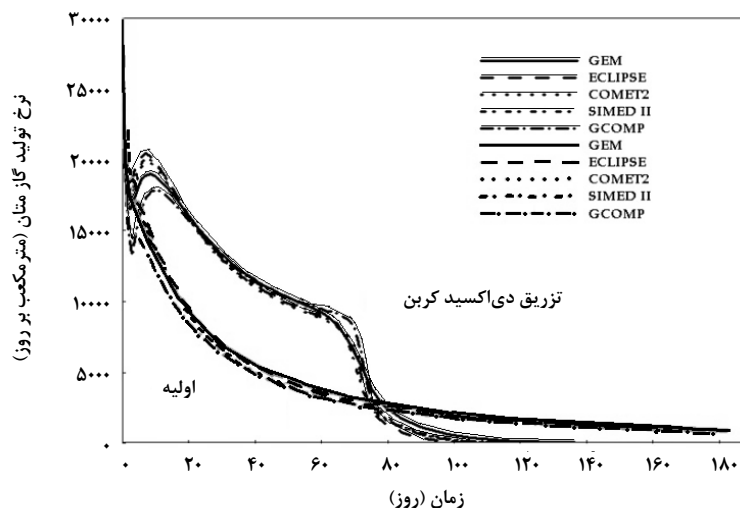


شکل ۹. مقایسه نرخ تولید گاز متان در مقادیر مختلف ضریب یانگ.

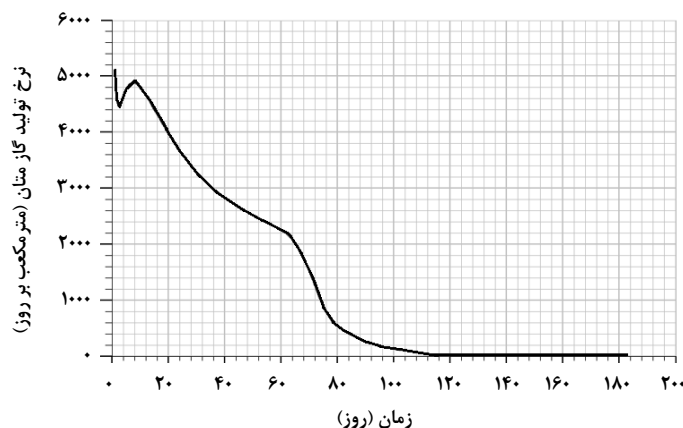
## ۲-۱۲ صحت‌سنجی الگو

برای صحت‌سنجی الگوی پایه که بر اساس آن تجزیه‌های حساسیت‌سنجی انجام شد از نتایج به‌دست آمده در مقاله لا و همکارانش استفاده شد [۲۱]. برای این هدف تغییراتی در الگوی پایه ایجاد شد تا داده‌ها قایل قیاس باشد. این موارد شامل، تعداد روز عملیات، کنترل‌گرهای چاه‌ها و نمودارهای تراوایی نسبی است. همین‌طور که در شکل (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود، در حالت تزریق گاز دی‌اکسید کربن، نرخ تولید گاز متان الگوی پایه و تحقیق لا و همکارانش، روند یکسانی را نشان می‌دهد، اگرچه مقیاس (بزرگی) مخزن در تحقیق لا و همکارانش با الگوی پایه تفاوت داشت، برای حفظ اساس الگوی پایه تغییری در این مؤلفه اعمال نشد.

درحالی‌که هرچه میزان ضریب یانگ در مخزن زغال سنگ بیشتر شود، یعنی سنگ مقاومت کشسانی بیشتری داشته باشد، نرخ تزریق گاز دی‌اکسید کربن افت بیشتری نشان خواهد داد. اگرچه بر اساس تجزیه حساسیت‌سنجی بر مدول یانگ دیده شد که الگوی پایه‌ترین عدد (۲۱۰۰ بار) این مؤلفه مطلوب‌ترین نتیجه عملیات ازدیاد برداشت را ارائه می‌دهد، اما بالا بودن این مؤلفه در یک مخزن زغال سنگ حاوی گاز متان، نمی‌تواند تا حدی روی عملیات ازدیاد برداشت تأثیر بگذارد که این عملیات را با شکست مواجه نماید. بنابراین، عملیات ازدیاد برداشت در سرتاسر بازه گزارش شده از این مؤلفه در مخازن زغال سنگ جهان، اگر شرایط دیگر مخزن محدودیتی را بر این عملیات اعمال نکند، می‌تواند با موفقیت انجام شود.



شکل ۱۰. نمودار نرخ تولید گاز متان در مقاله لا و همکارانش [۲۱].



شکل ۱۱. نمودار نرخ تولید گاز متان در الگوی پایه.

این مؤلفه بیانگر این موضوع است که در تمام طول بازه این مؤلفه در مخازن مختلف در جهان، امکان انجام عملیات ازدیاد برداشت وجود دارد و این مؤلفه نمی‌تواند به‌تنهایی عملیات را با شکست روبه‌رو کند. اگرچه طبق نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت هرچه ضریب یانگ عدد کمتری (۲۱۰۰ بار) باشد، عملیات ازدیاد برداشت موفق‌تری را می‌توان انتظار داشت.

### مراجع

- [1] Wallace, C. S., "A Suggestion for a Fast Multiplier", IEEE Transaction on Electronic Computers, (1964).
- [2] Fulton, P. F., Parente, C. A., Rogers, B. A., Shah, N. B., Reznik, A. A., "A Laboratory Investigation of Enhanced Recovery of Methane from Coal Beds by Carbon Dioxide Injection", Paper SPE 8930. Presented at the SPE/DOE Symposium on Unconventional Gas Recovery, Pittsburgh, Pennsylvania, May 18–21, (1980).
- [3] Reznik, A. A., Singh, P. K., Foley, W. L., "An analysis of the effect of CO<sub>2</sub> injection on the recovery of in situ methane from bituminous coal: An experimental simulation", Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 24, No. 5, pp. 521-528, (1984).
- [4] Balan, H. O., Gumrah, F., "Enhanced Coalbed Methane Recovery with Respect to Physical Properties of Coal and Operational Parameters", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 48, No. 8, pp. 56-61, (2009).
- [5] Kumar, H., Elsworth, D., Liu J., Pone D., Mathews, J. P., "Optimizing enhanced coalbed methane recovery for unhindered production and CO<sub>2</sub> injectivity", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.11, pp. 86-97, (2012).
- [6] Wang, K., Zang, J., Feng, Y., Wu, Y., "Effects of moisture on diffusion kinetics in Chinese coals during methane desorption", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 21, pp. 1005-1014, (2014).
- [7] Dhir, R., Dern, P. R., Mavor, M. J., "Evaluation of coalbed methane reservoirs", Journal of Petroleum Engineering, pp. 1424-1518, (1991).
- [8] Liu, J., Li, G., Zhang, Y., "Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> Flooding of Coalbed Methane Considering the Fluid-Solid Coupling Effect", Pone, Vol. 11, No. 3, pp. 1-16, (2016).
- [9] Sayyafzadeh, M., Keshavarz, A., Mohd Alias, A. R., Dong, K. A., Manser, M., "Investigation of varying-composition gas injection for coalbed methane recovery enhancement: A simulation-based study", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 27, pp. 1205-1212, (2015).

### ۲. نتیجه‌گیری کلی

نتیجه این تحقیق نشان‌داد که در چه شرایطی از مؤلفه‌های مخزنی می‌توان انتظار عملیات ازدیاد برداشت موفق داشت. نتایج مقایسه میان عملیات ازدیاد برداشت از مخازن زغال سنگ حاوی گاز متان با تزریق گاز دی‌اکسید کربن و عملیات برداشت اولیه نشان می‌دهد که در عملیات ازدیاد برداشت نه‌تنها میزان گاز متان تولید جمعی بالاتر می‌رود بلکه نرخ تولید این گاز نیز تحت تأثیر تزریق گاز دی‌اکسید کربن تا حد قابل ملاحظه‌ای بالا می‌رود. الگوی پایه با تراویبی ۴/۶۵ داری از نظر تراویبی بهترین نتیجه را نشان می‌دهد، اما همین‌طور که این تجزیه نشان می‌دهد، اگر تراویبی سامانه شکاف مخزن بسیار پایین باشد (۰/۰۰۴ میلی داری)، عملیات ازدیاد برداشت با شکست روبه‌رو می‌شود. تجزیه حساسیت‌سنجی بر روی فشار مخزن این نکته را آشکار می‌کند که این مؤلفه نمی‌تواند به‌تنهایی عملیات ازدیاد برداشت را با شکست روبه‌رو کند. بدین معنی که در بازه فشار مشاهده‌شده در مخزن‌های زغال سنگ موجود در جهان، اگر دیگر مؤلفه‌های مخزنی برای انجام عملیات ازدیاد برداشت مناسب باشند، مؤلفه فشار مخزن نمی‌تواند عملکرد عملیات ازدیاد برداشت را تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه این نکته نیز باید ذکر شود که هرچه میزان این مؤلفه در مخزن بیشتر (۷۶/۵ بار) باشد، عملیات ازدیاد برداشت از نظر نرخ تولید و همچنین میزان گاز دی‌اکسید کربن خارج‌شده از مخزن، مطلوب‌تر انجام می‌شود. مؤلفه سومی که در این مطالعه بررسی شد؛ فشار لانگمیور است. نخستین نکته درباره این مؤلفه این است که بالا رفتن میزان این مؤلفه در مخزن، سبب افت در میزان گاز اولیه موجود در سامانه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که هرچه این مؤلفه در مخزن زغال سنگ کاهش یابد، عملیات ازدیاد برداشت با موفقیت بیشتری انجام می‌شود. در واقع در پایین‌ترین فشار لانگمیور موجود (۷/۶۷ بار)، بهترین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت از نظر میزان گاز متان تولیدشده و همچنین گاز دی‌اکسید کربن ذخیره‌شده در مخزن انجام می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در مورد مؤلفه تخلخل شکاف بیانگر این مسأله است که هرچه تخلخل سامانه بیشتر (۰/۰۶) باشد، انتظار عملیات ازدیاد برداشت مطلوب‌تری از نظر میزان گاز متان تولید شده می‌رود. مؤلفه ضریب یانگ آخرین مؤلفه بررسی‌شده در این مطالعه است. تجزیه حساسیت‌سنجی برای

- [10] Xu, H., Tang, D., Zhao, J., Tao, S., Li, S., Fang, Y., "Geologic controls of the production of coalbed methane in the Hancheng area, southeastern Ordos Basin", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 26, pp. 156-162, (2015).
- [11] Wang, L., Wang, Z., Li, K., Chen, H., "Comparison of enhanced coalbed methane recovery by pure N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> injection: Experimental observation and numerical simulation", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 23, pp. 363-372, (2015).
- [12] Miri B., Gerami, S., Masihi, M., "Production Potential of Coalbed Methane (CBM) in IRAN", *The 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish, Iran*, pp. 21-24, (1390).
- [13] Durucan, S., Ahsan, M., Syed, A., Shi, J., Korre, A., "Two phase relative permeability of gas and water in coal for enhanced coalbed methane recovery and CO<sub>2</sub> storage", *Energy Procedia* Vol. 37, pp. 6730-6737, (2013).
- [14] Sentharamaiahannan, G., Gates, I., Prasad, V., "Modeling, estimation and optimization in coreflooding experiment for coalbed methane production", *Chemical Engineering Science*, Vol. 141, pp. 75-85, (2016).
- [15] Sun, X., Zhang, Y., Li, K., Gai, Z., "A new mathematical simulation model for gas injection enhanced coalbed methane recovery", *Fuel*, Vol. 183, pp. 178-188, (2016).
- [16] Mazzotti, M., Pini, R., Storti, G., "Enhanced coalbed methane recovery", *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 619-627, (2009).
- [17] Yin, G., Deng, B., Li, M., Zhang, D., Wang, W., Li, W., Shang, D., "Impact of injection pressure on CO<sub>2</sub>-enhanced coalbed methane recovery considering mass transfer between coal fracture and matrix", *Fuel*, Vol. 196, pp. 288-297, (2017).
- [18] Kim, M., Kim J., "Optimization model for the design and feasibility analysis of membrane-based gas separation systems for CO<sub>2</sub> enhanced coal bed methane (CO<sub>2</sub>-ECBM) application", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 132, pp. 853-864, (2018).
- [19] Zhang, Y., Gong, B., Li, J., Li, H., "Discrete Fracture Modeling of 3D Heterogeneous Enhanced Coalbed Methane Recovery with Prismatic Meshing", *Energies*, Vol. 8, pp. 6153-6176, (2015).
- [20] Rahimzade, A., Mohammadi, A. H., Kamari, A., "An Overview on Coal Bed Methane (CBM) Reservoirs: Production and Recovery Advancements", *Advances in Energy Research*, Vol. 23, pp. 1-27, (2016).
- [21] Law, D.H.S., Van der Meer, L.G.H., Gunter, W.D., "Numerical Simulator Comparison Study for Enhanced Coalbed Methane Recovery Processes, Part I: Pure Carbon Dioxide Injection", *Society of Petroleum Engineers, SPE 75669*, pp. 1-14, (2002).