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

نادیا اسفندیاری*، محمد قاسمی‌پور

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 این‌تحقیق مطالعه شد. بهترین بازهٔ این مؤلفه‌ها برای انجام عملیات ازدیاد برداشت با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مخازن اکلیپس به‌دست آمد. پس از انتخاب داده‌های مورد نظر برای تجزیهٔ حساسیت‌سنجی، مدل‌های مربوطه با شرایط مختلف تعریف و سپس نتایج به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی بررسی و تحلیل شد. شاخص‌های تحلیل تجزیهٔ حساسیت‌سنجی عبارتند از میزان گاز دی‌اکسید کربن تولیدشده و همچنین نرخ این تولید به‌علاوهٔ میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره‌شده در مخزن که از جنبهٔ زیست‌محیطی برای صنعت نفت و گاز اهمیت دارد. برطبق نتایج تجزیهٔ حساسیت‌سنجی می‌توان گفت که مؤلفه‌های تراوایی و تخلخل سامانهٔ شکاف اگر از حد خاصی پایین‌تر روند عملیات ازدیاد برداشت را با شکست روبه‌رو می‌سازند. این در حالی است که سه مؤلفهٔ 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

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 کم‌کردن فشار در چاه تولیدی به جریان در می‌آید، درحالی‌که تقریباً همهٔ گاز درون مخازن گاز متان موجود در لایه‌های زغالی روی سنگ مخزن جذب سطحی شده‌اند. بنابراین، برای تولید از این مخازن باید 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 لانگمویر 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 سامانهٔ شکاف[۱].

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

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، توجیه‌پذیری یا به‌صرفه نبودن تولید از یک مخزن را مشخص می‌کند؛ به این دلیل که سامانهٔ 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 مؤلفهٔ 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 نمونهٔ آپالاچیان 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 مطالعهٔ آزمایشگاهی دیگر روی نمونهٔ زغال سنگ بیتومنه لایهٔ 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 مطالعهٔ شبیه‌سازی عددی بر ازدیاد برداشت از طریق تزریق گاز دی‌اکسید کربن در مخازن زغال سنگ حاوی متان انجام شد. در آن از ۵ نمونهٔ تعریف‌شده، ۴ مورد حفاری عمودی و ۱ مورد حفاری افقی بررسی شد. زغال سنگی با درجهٔ متوسط آزادی بهترین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت را نشان داد، که دلیل آن سرعت بالای میان‌شکنی گاز دی‌اکسید کربن، ذخیرهٔ 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 مطالعهٔ 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 آبگیری از لایه‌های زغالی، خواص پتروفیزیکی با تغییر فشار داخل خلل تغییر می‌کند[۶].

ونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با یک مطالعهٔ آزمایشگاهی- شبیه‌سازی دریافتند که عدد نفوذپذیری به‌دست آمده برای نمونه‌های انترایست (بالاترین درجهٔ 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 مطالعهٔ آزمایشگاهی عملیات ازدیاد برداشت از زغال سنگ با تزریق دی‌اکسیدکربن خالص و نیتروژن خالص را مقایسه کردند[۱۱]. میری و همکارانش در سال ۲۰۱۱ ظرفیت‌های موجود برای تولید گاز متان را از مخازن زغال سنگ ایران بررسی و اذعان کردند که به‌طور کلی این مخازن در ناحیهٔ البرز، کرمان و طبس وجوددارند. آنها به نقل از مطالعات دیگر بیان‌کردند که حدود ۱۱ تا ۱۴ میلیارد تن از این نوع مخازن در کشور وجود دارد[۱۲].

دوروکان و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک مطالعهٔ جامع آزمایشگاهی بر روی تراوایی نسبی آب و گاز انجام دادند. آنها در این‌تحقیق زغال سنگ‌های موجود در کشورهای اروپایی را مطالعه کردند. نمودارهای رسم‌شده از نتایج برای تراوایی نسبی آب- گاز به‌خوبی 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 این‌رو آنها جذب گاز و موارد مربوط به آن را در محاسبات لحاظ نکردند؛ درحالی‌که در شرایط واقعی گازهایی مانند متان و دی‌اکسیدکربن وجود داردند که با جذب روی سنگ، بر تراوایی مطلق و نسبی سیالات تأثیر می‌گذارند. درپایان 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].

الگوی جنبش‌شناختی هم‌زمان با الگوی انتقال برای شبیه‌سازی سیلاب‌زنی یک مخزن زغال سنگ بررسی شد. شرایط بهینهٔ تولید از این الگو حاصل شد[۱۴]. الگویی برای بررسی ازدیاد برداشت متان از مخازن زغال سنگ مطالعه شد. در این الگو از معادلهٔ حالت پنگ رابینسون و نفوذ استفان ماکسول استفاده شد. نتایج نشان داد که تزریق مخلوط گاز می‌تواند در ازدیاد برداشت متان مؤثر باشد. ترکیب بهینهٔ 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 ذخیرهٔ دی‌اکسید کربن نیز به‌شمار می‌آید[۱۶]. شبیه‌سازی و مطالعهٔ آزمایشگاهی فرایند ازدیاد برداشت مخزن زغال سنگ بر روی نمونهٔ 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 بازه‌ای مطلوب و مشخص برای تضمین بازدهی عملیات ازدیاد برداشت از مؤلفه‌های مخزنی ارائه نشده‌است. 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.

۲. الگوسازی

۲-۱ تعیین بازه مؤلفه‌ها برای تجزیهٔ حساسیت‌سنجی

برای انجام این‌تحقیق از یک الگوی مصنوعی استفاده شد. به این دلیل که هدف اصلی این مطالعه ارائهٔ دامنه‌ای از مؤلفه‌های مورد بررسی است که برای اجرای روش ازدیاد برداشت متان از مخازن زغال سنگ به‌کمک 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 واجذب گاز متان می‌شود. بنابراین تزریق گاز دی‌اکسید کربن موجب افزایش تولید متان از طریق بالا بردن نرخ واجذب متان می‌شود. دی‌اکسید کربن، درون زغال سنگ مانند پیستون حرکت می‌کند. گاز متان در زغال سنگ به‌طور کامل با تزریق دی‌اکسید کربن جا به‌جا می‌شود. به‌لحاظ ریزبینی، جذب دی‌اکسید کربن تأثیر بیشتری در تورم ماتریس نسبت به سایر گازها دارد[۲۰و۱۹]. از این‌رو در ابتدا تمامی داده‌های گزارش‌شده برای این مؤلفه‌ها که در مقالات و تحقیقات پیشین ارائه شده بودند جمع‌آوری و تمام این دامنه برای تجزیهٔ حساسیت‌سنجی مطالعه شد.

در مطالعات شبیه‌سازی مخازن نفتی اولین مرحلهٔ تعریف یک الگو پایه است که در مراحل بعدی شبیه‌سازی یعنی در تجزیهٔ 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 شده‌است. یکی از مهمترین ویژگی های یک الگوی شبیه‌سازی مخزنی سامانهٔ گریدبندی آن است. الگوی پایه تعریف شده، همچنین تمام الگوهای این مطالعه دارای سامانهٔ گریدبندی ۱۰۱در۱۰۱در۲ هستند. دلیل این انتخاب این است که در مطالعات پیشین از الگو هایی شبیه به این الگو استفاده شده‌است. همچنین در پنج الگو از هفت الگوی بررسی شده در نرم‌افزار اکلیپس از شرکت شلمبرژر برای مخازن زغال سنگ از سامانهٔ گریدبندی مشابه‌ای استفاده شده‌است. 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 درگریدهای مرزی یعنی در هر گرید در مرزهای مخزن از هر طرف است. در محور Z طول گریدها برابر با ۶ متر که

در مجموع ۱۲ متر بود، در نظر گرفته شده است. تراوایی مخزن در هر سه محور برابر با ۳/۶۵ میلی دارسی و تخلخل شکاف برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ برای گاز دی‌اکسید کربن و گاز متان به‌ترتیب ۰/۰۰۰۰۱۷۲۸ و ۰/۰۰۰۰۰۸۶۴ سانتی‌متر مربع در ثانیه تعریف شد. در الگوی پایه، فشار لانگمیور 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 لانگمیور در نظر گرفته شده برای الگوی پایه در واقع فشار متوسط در بازه گزارش شده در مطالعات پیشین است.

دمای اولیهٔ مخزن برای الگوی پایه و همچنین تمام الگوهای تجزیهٔ حساسیت‌سنجی برابر با ۴۵ درجهٔ سلسیوس و فشار اولیهٔ مخزن برای الگوی پایه برابر با ۴۳ بار در نظر گرفته‌شد. تنها گاز موجود در سامانهٔ 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 اولیهٔ موجود در سامانهٔ شکاف‌ها تنها شروع تولید گاز را به تأخیر انداخته و در واقع در روند تولید پس از مرحلهٔ آبزدایی 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 شده‌است. علاوه بر این، برخی از مخازن زغال سنگ گزارش‌شده در تحقیقات پیشین، مخازن خشک یعنی بدون آب اولیه هم در سامانهٔ شکاف و هم در سامانهٔ ماتریکس بوده‌اند بنابراین فرض خشک‌بودن مخزن در این مطالعه با آن مخازن مطابقت دارد. این فرض همچنین با برخی از الگوهای ارائه شده به‌وسیلهٔ نرم‌افزار اکلیپس از مخازن زغال سنگ تطابق دارد. بنابراین در الگوی پایه و همچنین الگوهای تجزیهٔ حساسیت‌سنجی در این مطالعه سامانهٔ شکاف و همچنین سامانهٔ ماتریکس از آب اولیه خالی هستند.

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

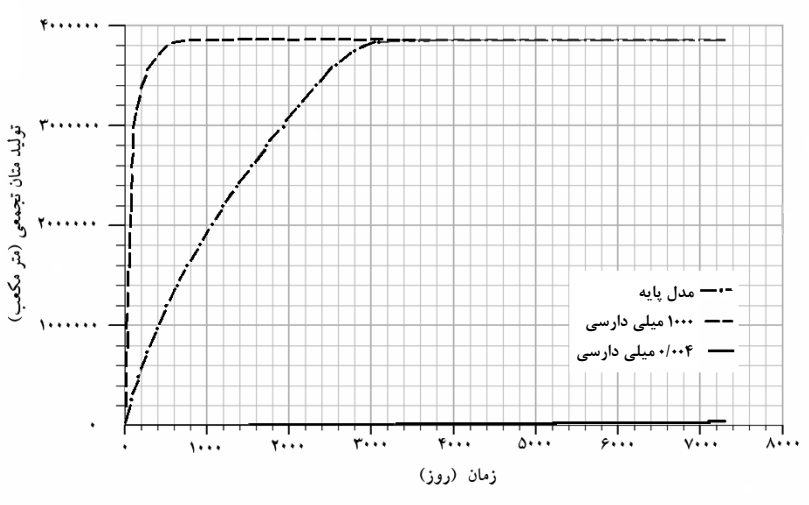
مؤلفه‌ها	داده‌ها
فشار (بار)	۴/۵
	۴۳
	۷۶/۵
نفوذپذیری (میلی دارسی)	۰/۰۰۴
	۳/۶۵
	۱۰۰۰
تخلخل	۰/۰۰۰۵
	۰/۰۰۵
	۰/۰۶
مدول یانگ (بار)	۲۱۰۰
	۳۳۰۰۰
	۶۱۰۰۰
فشار لانگمویر (بار)	۴/۷۸ تا ۷/۶۷
	۱۹/۰۳ تا ۴۶/۸۸۵
	۳۸/۲۸ تا ۶۱/۰۹

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

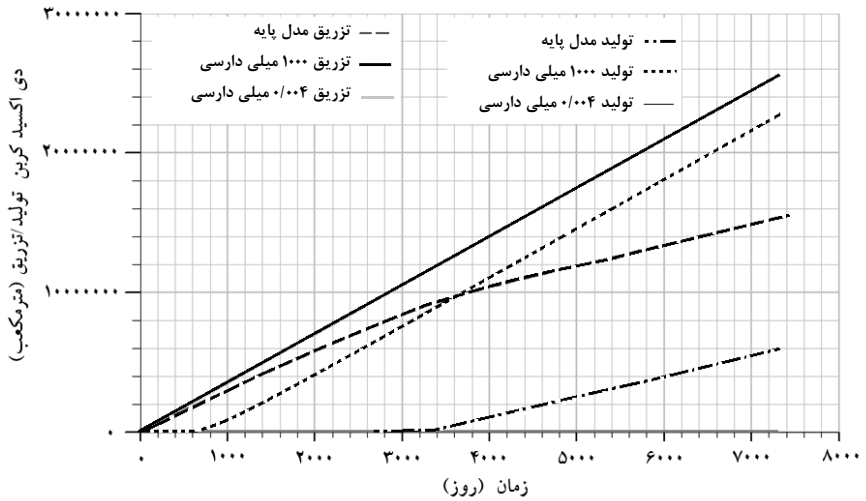
نخستین مؤلفه‌ای که بررسی می‌شود، تراوایی شکاف است. تولید تجمعی گاز متان برای سه حالت تراوایی (بازه پایین، الگوی پایه و بازه بالا) در شکل (۱) آورده شده‌است. نتایج در شکل (۱) به خوبی نشان می‌دهد که در صورتی‌که تراوایی شکاف‌ها در اندازه‌های بسیار پایین قرار داشته باشد نه‌تنها برداشت اولیه انجام نخواهد گرفت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



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

نکتهٔ قابل بحث در این شکل تولید تجمعی گاز متان در حالت تراوایی ۱۰۰۰ میلی دارسی است؛ همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، کل گاز متان موجود در این مخزن درحالت تراوایی ۱۰۰۰ میلی دارسی ظرف مدت حدود دو سال تخلیه می‌شود، این در حالی است که برای الگوی پایه این مدت حدود ۳۰۰۰ روز طول می‌کشد؛ بنابراین از این‌نظر، نمودار تراوایی ۱۰۰۰ میلی‌دارسی 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 این‌رو هرچه میزان این 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 دارسی تقریباً هیچ تزریقی و در نتیجهٔ آن، تولید گاز دی‌اکسید کربن را نشان نمی‌دهد و از نو این الگو از بحث ما خارج می‌شود؛ اما نکتهٔ قابل توجه این است که باوجود میزان بسیار بیشتر تزریق تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در الگوی ۱۰۰۰ میلی دارسی نسبت به الگوی پایه، تولید تجمعی این گاز در این الگو با فاصلهٔ بیشتری از الگوی پایه است. همین گونه که دیده می شود، میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیره‌شده در مخزن در الگوی تراوایی ۱۰۰۰ میلی‌دارسی بسیار کمتر از الگوی پایه است.



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

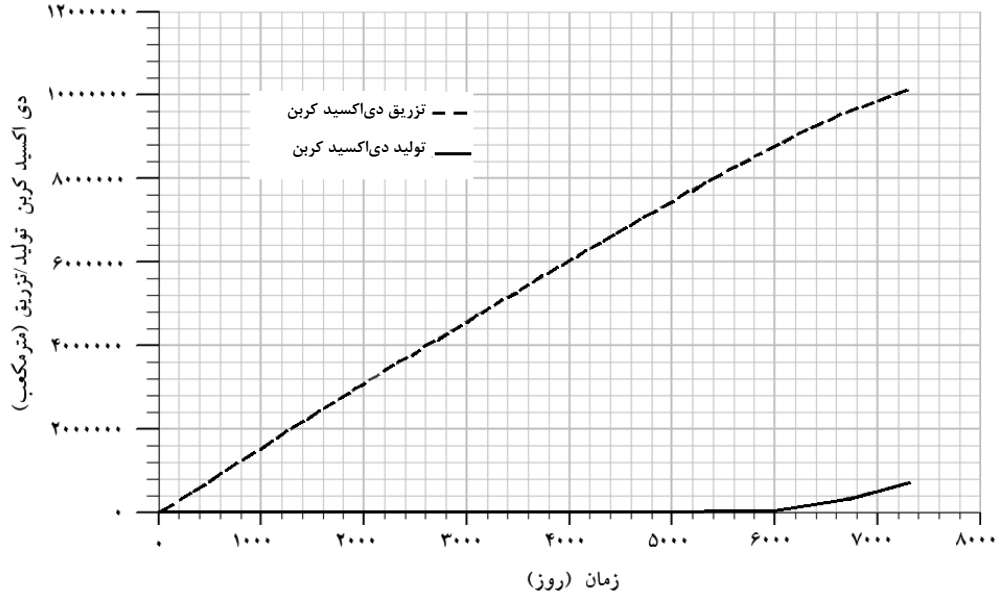
بنابراین، نتیجه‌ای که از شکل ۲ گرفته می‌شود، این است که تراوایی بسیار بالای مخزن برای ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن در مخازن زغال سنگ مناسب نیست. این موضوع به‌دلیل میان‌شکنی سریعتر گاز دی‌اکسید کربن تزریق‌شده به مخزن و در نتیجهٔ آن خروج مستقیم میزان عظیمی از گاز تزریق شده است. با توجه‌به موارد یاد شده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

۲-۴ فشار مخزن

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

۲-۵ بازه بالای فشار مخزن

در بررسی الگو از جنبهٔ زیست‌محیطی، در فشار مخزن ۷۶/۵ از میزان زیاد گاز دی‌اکسید کربن تزریق‌شده 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 نوبهٔ 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 شده‌است (شکل (۳)). این امر را می‌توان به فشار بالای این الگو و این نکته که این فشار از میان‌شکنی زودهنگام 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 جنبهٔ 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.



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

۲-۶ بازه پایین فشار مخزن

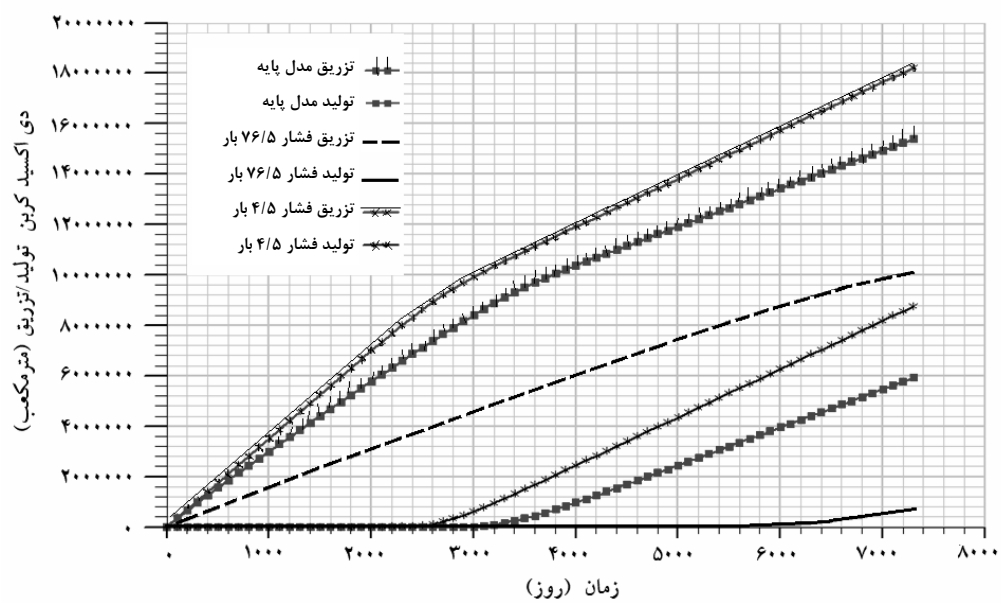
پس از بررسی الگو در فشار مخزن پائین دیده شد که در فشار مخزن ۴/۵ بار، گاز متان موجود در سامانه در ابتدای عملیات از ۳۸۵۰۰۰۰ در الگوی پایه به ۷۰۰۰۰۰ متر مکعب نزول پیدا خواهد کرد؛ بنابراین می‌توان گفت، فشار اولیهٔ مخزن در حد بسیار چشمگیری روی میزان گاز متان موجود در سامانه در ابتدای عملیات تأثیر می‌گذارد.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

در این الگو بیشتر از ۱۸۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز دی‌اکسید کربن به مخزن تزریق می‌شود؛ همین‌طور که انتظار می‌رود، در چنین الگویی که میان‌شکنی گاز تزریقی سریعتر حاصل می‌شود، میزان بسیار زیادی از گاز تزریقی از راه چاه تولیدی از مخزن خارج می‌شود و در نتیجهٔ آن، چالش بزرگی در جداسازی گازها در روی سطح به‌وجود می‌آورد. در این الگو تقریباً ۹۵۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن در انتهای عملیات در مخزن ذخیره می‌شود.

اکنون که الگو های فشار به‌تنهایی بررسی شدند، برای انجام مقایسهٔ واضح‌تر میان این الگوها، نمودارهای مربوط به تولید تجمعی گاز متان و همچنین تولید و تزریق تجمعی گاز دی‌اکسید کربن آورده شده‌اند. شکل (۴) مقایسه‌ای میان نمودارهای تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن انجام می‌دهد. اختلاف این دو میزان که در واقع میزان ذخیرهٔ نهایی گاز دی‌اکسید کربن در سامانه را نشان می‌دهد برای الگوی با فشار بالا، الگوی پایه و الگوی با فشار پایین به‌ترتیب عبارت است از ۹۴۲۰۰۰۰، ۹۴۷۵۰۰۰ و ۹۴۶۵۰۰۰ مترمکعب. بنابراین، در ارزیابی جنبهٔ محیط زیستی الگوهای فشار از نظر میزان نهایی ذخیرهٔ گاز دی‌اکسید کربن، این الگوها تفاوت بسیار اندکی دارند؛ اما از نظر میزان گاز دی‌اکسید کربن تولیدشده، بهترین نتیجه در الگو با فشار بالا مشاهده شد. بر اساس مباحث مطرح شده در تجزیهٔ حساسیت‌سنجی مؤلفهٔ فشار مخزن، می‌توان به این‌نتیجه رسید که اگرچه الگو با فشار بالاتر نتایج مطلوب‌تری را از نظر میزان گاز متان تولیدی و گاز دی‌اکسید کربن ذخیره شده و تولیدی در مخزن نشان می‌دهد، 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 نمی‌شود.

۲-۷ فشار لانگمیور

فشار لانگمیور قابلیت سنگ زغال سنگ را برای جذب سطحی گاز بیان می‌کند؛ بنابراین بسیار واضح است که تغییر این مؤلفه به‌صورت مستقیم روی میزان گاز موجود در سامانه در حالت اولیه تأثیر می‌گذارد.



شکل ۴. مقایسه تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در فشارهای مختلف.

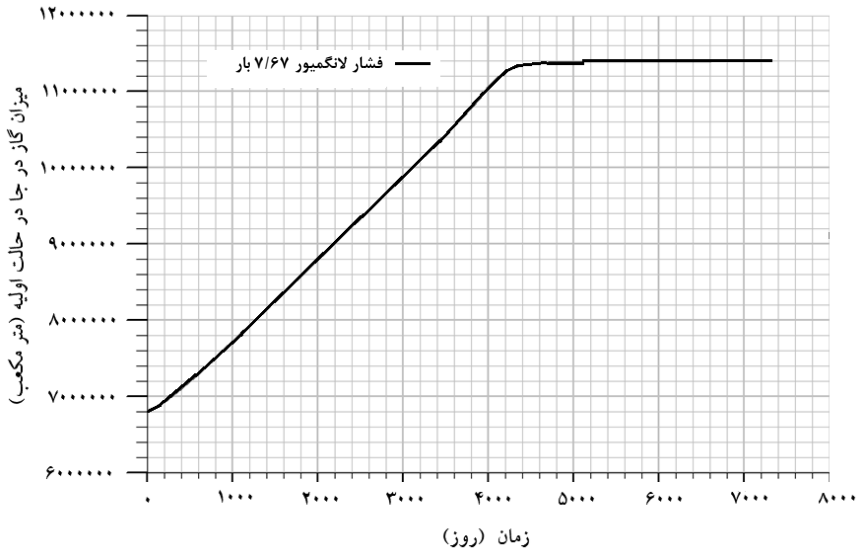
۲-۸ بازه بالای فشار لانگمیور

در صورتی‌که 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 هرچه این فشار بالاتر رود توانایی سنگ زغال سنگ برای جذب گاز کمتر می‌شود. همچنین در بررسی میزان گاز ذخیره‌شده در مخزن در الگوی با فشار لانگمیور بالا، این نکته برداشت می‌شود که فشار بالاتر لانگمیور ظرفیت جذب به‌وسیلهٔ سنگ را کاهش می‌دهد و از این‌رو 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 رابطهٔ میان فشار مخزن و فشار لانگمیور، نکتهٔ مهم این است که در صورتی‌که فشار مخزن از فشار لانگمیور بالاتر باشد سنگ زغال سنگ تمام ظرفیت جذب سطحی خود را با گاز پر کرده‌است. در چنین شرایطی افزایش یا کاهش فشار مخزن بر میزان گاز جذب‌شده روی سطح سنگ تأثیر نمی‌گذارد، بلکه تنها روی میزان گاز فشرده‌شدهٔ درون سامانهٔ شکاف اعمال نفوذ می‌کند. اما اگر فشار مخزن از فشار لانگمیور کمتر باشد، هر تغییری در فشار مخزن نه‌تنها میزان گاز فشرده‌شدهٔ درون شکاف‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه میزان گاز جذب‌شده 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 گرفته‌شده (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 توجه‌به فشار اولیهٔ مخزن (۴۳ بار) ظرفیت زغال سنگ برای جذب گاز پر شده و علاوه بر آن میزان چشمگیری از گاز نیز درون کلیت‌ها فشرده شده‌است.

با توجه‌به شکل (۵)، اگر فشار لانگمیور مخزن زغال سنگ در نظر گرفته‌شده 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، همین‌موضوع باعث می‌شود که میزان گاز موجود در سامانه تا ۱۱۴۰۰۰۰۰ متر مکعب در مراحل پایانی عملیات بالا رود. با یک‌مقایسه با نمودارهای ارائه‌شده در بالا به‌خوبی می‌توان درک کرد که شرایط الگوی حاضر برای نگهداری میزان عظیمی از گاز درون مخزن از تمام شرایط بحث شدهٔ پیشین با فاصله بهتر است.



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

اکنون باید این الگو را از نظر قابلیت میـزان ذخیـرۀ گـاز دی‌اکسـید کربن نیز بررسی کرد. از این‌رو، میزان تزریـق و تولیـد تجمعـی گـاز دی‌اکسید کربن در این الگو در شکل (۶) آمده‌اسـت. نتیجـۀ بسـیار قابل ملاحظه‌ای که از شکل (۶) حاصل مـی‌شـود ایـن اسـت کـه از میزان عظیم گاز دی‌اکسید کربن تزریق‌شده تا روز ۴۰۰۰ کـه برابـر بـا حـدود ۱۱۴۰۰۰۰۰ متـر مکعـب اسـت، تقریبـاً هـیچ‌میـزان از چاه تولیدی خارج نمی‌شود و تمامی آن در مخزن ذخیره مـی‌شـود. دلیل این امر ظرفیت بالای زغال سنگ برای جذب گاز بـا توجـه‌بـه فشار پایین لانگمیور در این الگو اسـت. از بررسـی الگـوی بـا فشـار لانگمیور پائین می‌توان استنتاج کرد که این الگو هم از نظـر میـزان گاز متان تولید شده و هم از نظر میزان گاز دی‌اکسید کربن ذخیـره شده بهترین الگوی بررسی شده تا به اینجا است.

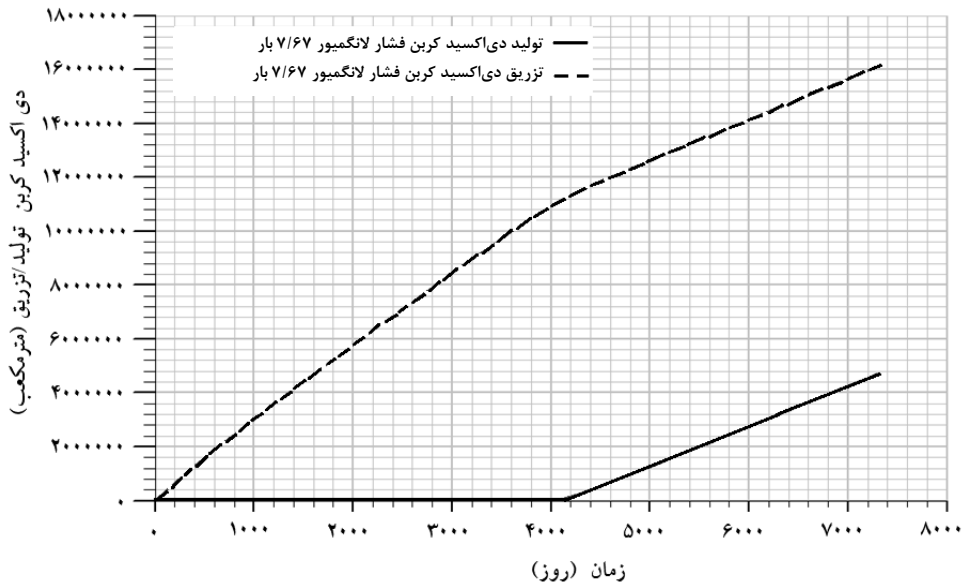
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که، در یک مخزن زغال سـنگ هرچـه میزان فشار لانگمیور مخزن کمتر باشد، میزان گاز اولیه و همین‌طور میزان گازی که در طول عملیات ازدیاد برداشـت در مخـزن ذخیـره می‌شود بیشتر خواهد بود. این موضوع بیان می کند که هرچـه عـدد این مؤلفه در یک مخزن زغال سـنگ کمتـر باشـد عملیـات ازدیـاد برداشت با موفقیت بیشتری انجام می‌شود.

بنابراین هرچه فشار لانگمیور یک مخزن کمتـر باشـد هـم شـاخص تزریق بیشتری را می‌توان انتظار داشت و هم میزان گاز دی‌اکسیـد کربن بیشتری در سامانه ذخیره خواهـد شـد؛ بنـابراین الگو با فشـار لانگمیور پاییـن هم از نظر میـزان گاز متـان تولیدشده و هم از نظر میزان گاز دی‌اکسید کـربن ذخیـره شـده مطلـوب‌تـرین شـرایط را ایجاد می‌کند.

اما نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که حتـی در بـالاترین فشار لانگمیور گزارش شـده کـه در ایـن مطالعـه نیـز لحـاظ شـده، عملیات ازدیاد برداشت با شکست روبه‌رو نشـده اسـت امـا بهـره‌وری اقتصادی و محیط زیستی ضعیف‌تری را عرضـه مـی‌کنـد؛ پـس ایـن مؤلفه (فشار لانگمیور) در بازه مشاهده‌شـده در مخـازن مختلـف در جهـان، نمـی‌توانـد موجـب شکسـت عملیـات ازدیـاد برداشـت از مخازن زغال سنگ گرد، اما تا حد چشمگیری می‌توانـد روی نتیجـۀ این عملیات تأثیر بگذارد.

۲-۱۰ تخلخل شکاف

نکته‌ای که باید به آن توجه‌شود ایـن اسـت کـه در عملیـات ازدیـاد برداشت از مخزن علاوه بر ویژگی شـاخص تولیـد، ویژگـی شـاخص 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.



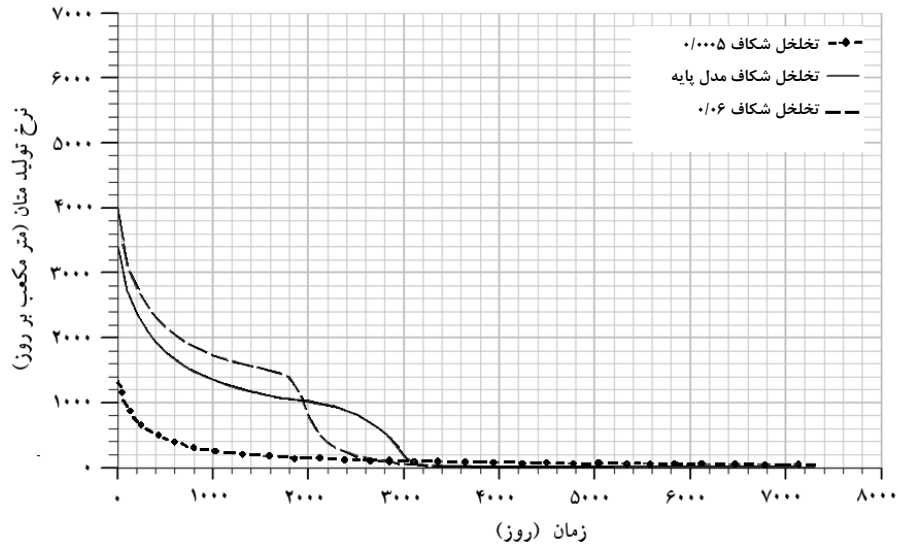
شکل ۶. نمودار تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن با فشار لانگمیور پایین (۷/۶۷ بار).

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 سامانهٔ شکاف دانست. علاوه بر این موضوع، باید به این نکته نیز دقت شود که وقتی تخلخل شکاف در یک مخزن بالاتر باشد میزان گاز اولیهٔ موجود در سامانهٔ شکاف نیز مطابق با آن بیشتر است؛ بنابراین برتری اولیهٔ الگوی با تخلخل شکاف بالاتر ناشی از این دو دلیل است. پس از تخلیهٔ سامانهٔ شکاف از گاز متان، یعنی زمانی‌که اثر عملیات ازدیاد برداشت در مخزن لمس شده است، باز هم الگوی با تخلخل شکاف بالاتر نسبت‌به الگوی پایه، نرخ تولید مطلوب‌تری را برای گاز متان ارائه می کند که دلیل این امر را می‌توان به تأثیر مثبت این مؤلفه بر شاخص تزریق نسبت داد.

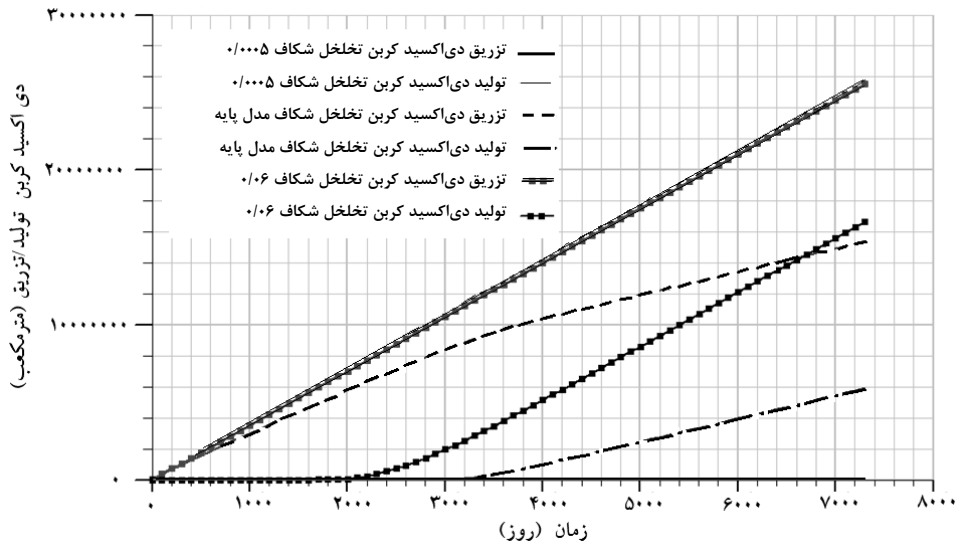
برای بررسی این فرضیه باید نمودارهای مربوط به تزریق و تولید تجمعی گاز دی‌اکسید کربن را تجزیه کرد (شکل (۸)). اما نکتهٔ جالب توجه در این شکل این است که در الگوی با تخلخل شکاف بالاتر اگرچه میزان عظیمی گاز دی‌اکسید کربن قابلیت تزریق به سامانه را پیدا کرده است اما درصد قابل ملاحظه‌ای از این میزان از چاه تولیدی خارج شده است و در نتیجهٔ آن در الگوی با تخلخل شکاف بالاتر ۸۹۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن در مخزن ذخیره شده‌است. در حالی‌که در الگوی پایه با تخلخل حدود ۹۵۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن در نتیجهٔ عملیات ازدیاد برداشت در مخزن باقی می‌ماند. بنابراین نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که بهترین بازه از مؤلفهٔ تخلخل سامانهٔ شکاف برای اطمینان از اجرای یک عملیات ازدیاد برداشت موفق از مخازن زغال سنگ حاوی متان، بازه‌ای میانه از داده‌های گزارش‌شده در مطالعات پیشین از مخازن مختلف در جهان است. به این‌دلیل که در یک‌مخزن با تخلخل شکاف پایین دراصل عملیات ازدیاد برداشت به‌سبب شاخص پایین تزریق اجرایی نیست؛ همچنین در یک مخزن با تخلخل سامانهٔ شکاف بسیار بالا به‌دلیل میان‌شکنی سریع قابلیت ذخیرهٔ 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. درواقع، بالا بودن میزان این مؤلفه در مخزن به‌معنی 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 نتیجهٔ افت فشار مخزن در طول تولید) عرض شکاف‌ها کاهش بیشتری را نشان خواهدداد.

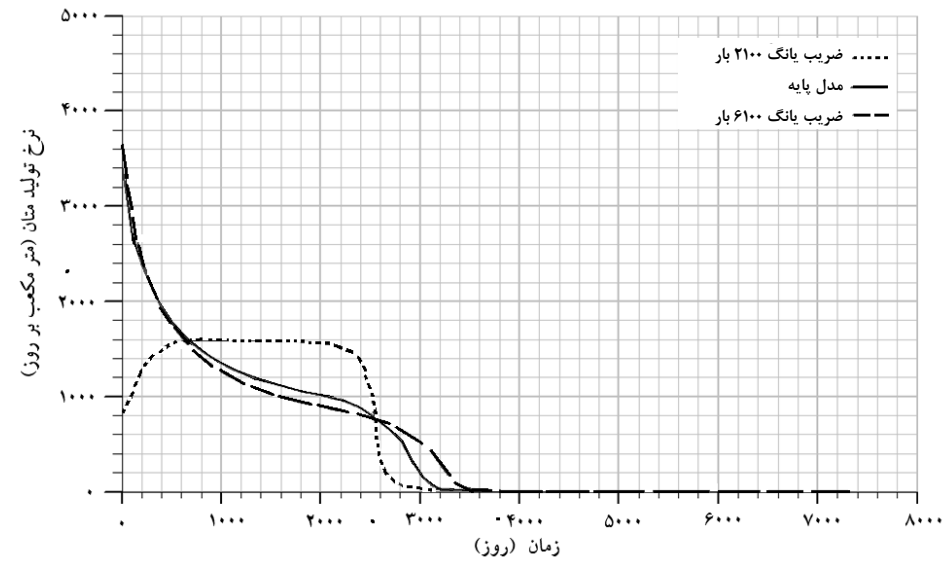


شکل ۷. نمودار مقایسهٔ نرخ تولید گاز متان در مقادیر مختلف تخلخل شکاف.



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

نکتهٔ بسیار جالب توجهی که در شکل (۹) مشاهده می‌شود رفتار نمودار نرخ تولید گاز متان در مدول ضریب یانگ پایین (۲۱۰۰ بار) است. همین گونه که مشاهده می‌شود، برای نخستین‌بار در همهٔ الگوهای بررسی شده در این تحقیق، نرخ تولید گاز متان در آغاز عملیات زیاد می‌شود و پس از یک‌دوره در اوج بودن، تنزل می‌یابد. دلیل این رفتار را باید در مفهوم ضریب یانگ یافت؛ اتفاقی که در این الگو (ضریب یانگ ۲۱۰۰ بار) می‌افتد این است که در ابتدای تولید به‌محض باز شدن چاه تولیدی به‌دلیل مقاومت پایین سنگ زغال سنگ در برابر استرس خارجی، عرض شکاف‌ها در نزدیکی چاه تولیدی کوچک می‌شود و از این‌رو تراوایی سامانهٔ شکاف را تا حد چشمگیری کاهش می‌دهد، اما پس از ورود گاز دی‌اکسید کربن به سامانه در عملیات ازدیاد برداشت این مشکل برطرف می‌شود تا حدی که این نرخ از دو الگوی دیگر نیز پیشی می‌گیرد. 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 دی‌اکسید کربن بیشتری می‌تواند به‌آسانی وارد سامانه شود.

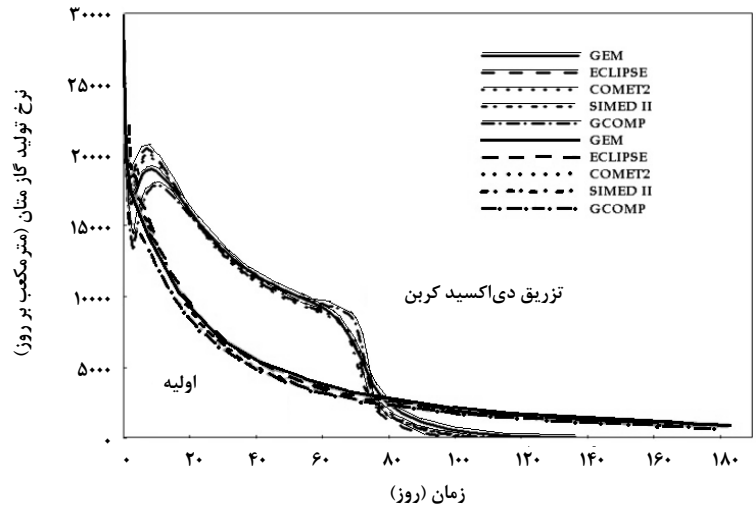


شکل ۹. مقایسهٔ نرخ تولید گاز متان در مقادیر مختلف ضریب یانگ.

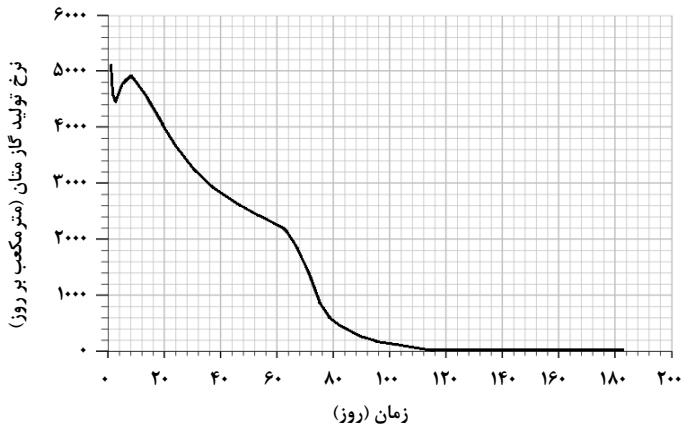
درحالی‌که هرچه میزان ضریب یانگ در مخزن زغال سنگ بیشتر شود، یعنی سنگ مقاومت کشسانی بیشتری داشته باشد، نرخ تزریق گاز دی‌اکسید کربن افت بیشتری نشان خواهد داد.اگرچه بر اساس تجزیهٔ حساسیت سنجی بر مدول یانگ دیده شد که الگوی با پایین‌ترین عدد (۲۱۰۰ بار) این مؤلفه مطلوب‌ترین نتیجهٔ عملیات ازدیاد برداشت را ارائه می‌دهد، اما بالا بودن این مؤلفه در یک مخزن زغال سنگ حاوی گاز متان، نمی تواند 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.

۲-۱۲ صحت‌سنجی الگو

برای صحت‌سنجی الگوی پایه که بر اساس آن تجزیه‌های حساسیت‌سنجی انجام شد از نتایج به‌دست آمده در مقالهٔ لا و همکارانش استفاده‌شد[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.



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



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

۳. نتیجه‌گیری کلی

نتیجهٔ این‌تحقیق نشان‌داد که در چه شرایطی از مؤلفه‌های مخزنی می‌توان انتظار عملیات ازدیاد برداشت موفقی 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 تجمعی بالاتر می‌رود بلکه نرخ تولید این گاز نیز تحت تأثیر تزریق گاز دی‌اکسید کربن تا حد قابل ملاحظه‌ای بالا می‌رود. الگوی پایه با تراویی ۳/۶۵ دارسی از نظر تراوایی بهترین نتیجه را نشان می‌دهد، اما همین‌طور که این تجزیه نشان می‌دهد، اگر تراوایی سامانهٔ شکاف مخزن بسیار پایین باشد (۰/۰۰۴ میلی دارسی)، عملیات ازدیاد برداشت با شکست روبه‌رو می‌شود. تجزیهٔ 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 دیگرمؤلفه‌های مخزنی برای انجام عملیات ازدیاد برداشت مناسب باشند، مؤلفهٔ فشار مخزن نمی تواند 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. مؤلفهٔ سومی که در این‌مطالعه بررسی شد؛ فشار لانگمیور است. انخستین نکته دربارهٔ این مؤلفه این است که بالارفتن میزان این مؤلفه در مخزن، سبب افت در میزان گاز اولیهٔ 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 مؤلفهٔ 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. مؤلفهٔ ضریب یانگ آخرین مؤلفهٔ بررسی‌شده در این مطالعه است. تجزیهٔ حساسیت‌سنجی برای 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 انتظارداشت.

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_2 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_2 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_2 Flooding of Coalbed Methane Considering the Fluid-Solid Couling 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).

[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 N2 and CO_2 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_2 storage", Energy Procedia Vol. 37, pp. 6730–6737, (2013).

[14] Senthamaraikhannan, G., Gates, I., Prasad, V., "Modeling, estimation and optimization in coreflooding experiment for coalbed methane production", Chemical Enginearing 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_2-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 separion systems for CO_2 enhanced coal bed methane (CO_2-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 Hetrogeneous 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).