

ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن گاز شیلی و تولید همزمان گاز هیدروکربوری از این مخازن

فروزان صادقی* امین دریا سفر، دانشجوی دکتری مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت ■ خلیل شهبازی، استاد دانشگاه صنعت نفت

چکیده

به دلیل تخلیه‌ی منابع متعارف انرژی، تقاضا برای منابع غیرمتعارف رو به افزایش است. مخازن گاز شیلی از جمله منابع غیرمتعارف مهمی هستند که اخیراً مورد استفاده قرار گرفته و توسعه داده شده‌اند. فرآیند تزریق CO_2 می‌تواند منجر به افزایش بازیافت گاز شیلی (ESGR^1) به کمک جذب رقابتی بین CO_2 و متان شده و همچنین باعث به تله افتادن CO_2 به منظور کاهش انتشار آن در محیط‌زیست شود. این مقاله، یک مطالعه‌ی مروری مهم از جدیدترین مطالعات در مورد استفاده از CO_2 برای ESGR و همچنین مطالعات آزمایشگاهی و میدانی از جذب و ذخیره‌ی CO_2 در مخازن گاز شیلی را ارائه می‌دهد. این تحقیق شامل مکانسیم‌ها و مولفه‌های درگیر و همچنین چالش‌های موجود در انجام CO_2 - ESGR است. ارزیابی امکان‌سنجی بهبود بازیافت گاز به وسیله‌ی CO_2 در مقیاس میدانی، به دلیل تراوایی کم و ساختار پیچیده‌ی حفرات در مخازن شیلی و همچنین میان‌شکنی سریع CO_2 در چاه‌های تولیدی، مسئله‌ی پیچیده‌ای است که مستلزم مطالعات آزمایشگاهی گسترده و همچنین مدل‌سازی و شبیه‌سازی این فرآیند می‌باشد. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم بر CO_2 - ESGR به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که می‌تواند در بهینه‌سازی روند دستیابی به حداکثر ذخیره‌سازی CO_2 و تولید گاز شیلی به‌طور همزمان، مفید باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۵/۱۷

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۷/۲۱

واژگان کلیدی:

ذخیره‌سازی CO_2 ، افزایش بازیافت گاز، مخازن شیلی، بهینه‌سازی، مدل‌سازی.

مقدمه

که گاز شیلی بسیار کارآمدتر و تمیزتر از سوخت‌های رایجی مثل نفت و ذغال‌سنگ است و می‌تواند کمکی به خلاص شدن از شر اتکا به گازهای متعارف و نفت بکند و باعث تغییر ساختار انرژی جهانی شود. [۲]

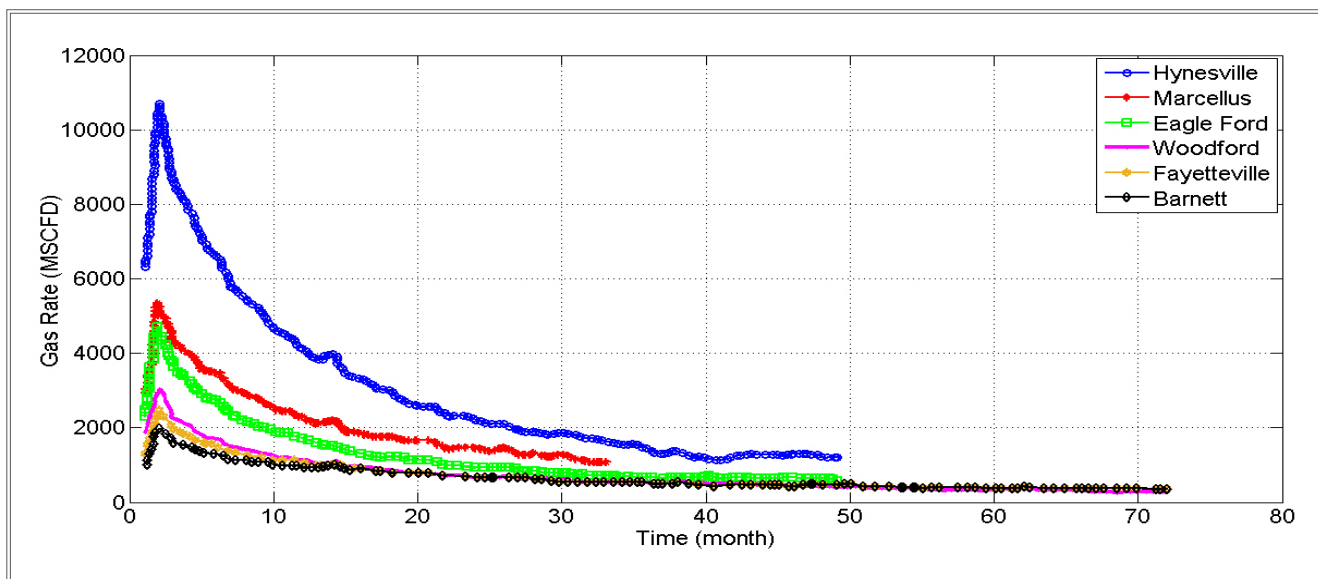
تولید گاز شیلی از این‌گونه مخازن به دلیل پیشرفت در تکنولوژی شکاف هیدرولیکی و حفاری افقی موفقیت‌آمیز بوده است. از طرفی، مخازن گاز شیلی رایج، افت دبی تولیدی بالایی (حدود ۶۳ درصد در سال) را نشان می‌دهند. [۳]

بیلی و همکاران [۴] دبی تولیدی گاز از مخازن مختلف گاز شیلی را گزارش دادند که در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تمام مخازن شیلی بعد از مدت زمانی از تولیدشان، افت دبی را تجربه می‌کنند. دینامیک تولید و ذخیره‌ی گاز در این سنگ‌ها به دلیل وجود کروژن پیچیده است. [۵] کروژن غنی از گاز، تخلخل کمی در حد نانو داشته و به همین دلیل، سطح آن بر واحد حجم خیلی بالا است. بنابراین جذب گاز روی سطوح کروژن، نقش اساسی ایفا می‌کند. جذب گاز و تراوایی کم مخازن شیلی دلایل اصلی بازیافت کم در این‌گونه مخازن هستند.

شیل‌ها، سنگ‌های رسوبی جدا شونده‌ی ریزدانه‌ای هستند که به‌وسیله‌ی تراکم موادی به اندازه‌ی رس از جمله مواد آلی و معدنی تشکیل شده‌اند. [۱] سازندهای شیلی از جمله منابع گازهای طبیعی بوده که شامل ۴ نوع حفره هستند: حفرات ساختاری ماتریس، حفرات آلی کروژن، شکاف‌های طبیعی و شکاف‌های هیدرولیکی القائی. به دلیل تراوایی کم مخازن گاز شیلی و همچنین ظرفیت آنها برای ذخیره‌ی CO_2 برای میلیون‌ها سال، این مخازن غیرمتعارف برای ذخیره‌ی دائمی CO_2 بسیار مناسب و کارآمد شناخته شده‌اند. گاز شیلی که از متان، اتان، پروپان، بوتان و... تشکیل شده است، در سازندهای شیلی ریزدانه‌ی غنی از مواد آلی، یافت می‌شوند. به‌طور کلی گاز موجود در مخازن گاز شیلی در ۳ فاز مختلف یافت می‌شود:

- ۱- به شکل گاز آزاد در حفرات ماتریس و شکاف
 - ۲- به عنوان فاز جذب شده روی سطوح کروژن و رس
 - ۳- به شکل گاز حل شده درون کروژن
- آزادسازی گاز حل شده از کروژن، فرآیند بسیار آهسته‌ای بوده و با آزادسازی و دفع ساده متفاوت است. این عقیده وجود دارد

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (sadeghi_f86@yahoo.com)



۱ | دبی گاز تولیدی از مخازن گاز شیلی مختلف در ایالات متحده [۴]

باز یافت شده درون ماتریس کروژن می‌تواند به‌وسیله‌ی جایگزینی آن با گاز با تمایل جذب بالاتری مانند CO_2 ، تولید شود. [۵] تزریق CO_2 پتانسیل بالایی در تقویت باز یافت گاز از سازندهای شیلی دارد که این کار از طریق جذب رقابتی بین CO_2 و متان صورت می‌پذیرد. تزریق CO_2 مخزن شیلی را مجدداً تحت فشار قرار می‌دهد و با یک جذب رقابتی می‌تواند متان را از سطوح ماتریس شیل که تمایل بیشتری به جذب CO_2 نسبت به متان دارد جابه‌جا کند و سپس به‌وسیله‌ی مکانیسم‌های همرفتی و نفوذ از شکاف‌های القائی و طبیعی به درون ماتریس‌های آلی جریان یابد. [۶]

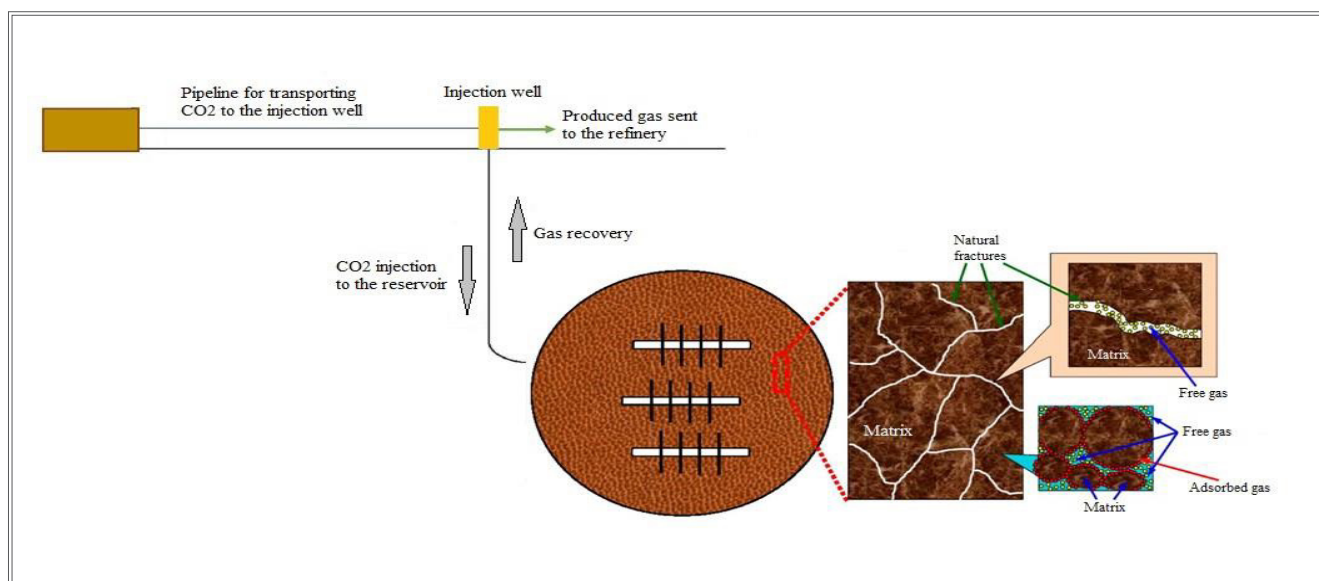
تزریق CO_2 به سازندهای شیلی، هر دو مزیت ذخیره‌ی زمین‌شناسی CO_2 و بهبود تولید گاز شیلی را به‌صورت همزمان دارد. اگرچه استفاده از CO_2 برای بهبود باز یافت گاز از سازندهای شیلی و همچنین ذخیره‌ی آن در مخازن شیلی موضوعی جذاب است و در فاز آزمایشگاهی و تحقیقاتی به‌خوبی مطالعه شده‌است، اما موارد کمی از تزریق CO_2 در مخازن شیلی در فاز میدانی بررسی و گزارش شده است.

۲- افزایش باز یافت گاز جذب شده از مخازن گاز شیلی با CO_2

استفاده از CO_2 برای تقویت باز یافت گاز (EGR) یا تقویت باز یافت نفت (EOR) در صنایع نفت و گاز، موضوع جدیدی نیست. اخیراً به‌دلیل نگرانی‌های مربوط به مسئله‌ی گرم شدن کره‌ی زمین، استفاده از CO_2 برای باز یافت هیدروکربن، به‌دلیل پتانسیل همزمان ذخیره‌ی CO_2 در مقیاس بزرگ در سازندهای زمین‌شناسی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. مخازن گاز شیلی، یکی از پتانسیل‌های مهم برای ذخیره‌ی CO_2 با ظرفیت بالا هستند. پتانسیل آنها در تحقیقات زیادی گزارش و برآورد شده است.

تو و کلارنز [۸] ظرفیت ذخیره‌ی شیل مارسلوس در ایالات متحده را برآورد کردند و دریافتند که ظرفیت ذخیره تا سال ۲۰۳۰ بین ۱۰/۴ و ۱۸/۴ Gt است.

کنگ و همکاران [۷] توانایی نمونه‌های شیلی در ذخیره‌ی CO_2 را به‌وسیله‌ی انجام آزمایشاتی روی مغزه نشان دادند. آنها گزارش کردند که ذخیره‌ی گاز CO_2 مزیت دوچندانی دارد زیرا که مواد آلی به‌عنوان یک غربال عمل می‌کنند و به CO_2 اجازه می‌دهند تا در حفرات ریز قرار گیرند، در حالی که سایر گازها نمی‌توانند به این حفرات برسند. وجود ذخایر گاز شیلی بزرگ در سرتاسر جهان و همچنین افت دبی بالای این مخازن، محققان را به بررسی روش‌های مختلف بهبود



شکل ۲ | شماییک تزریق CO₂ به سازند شیلی برای بازیافت گاز جذب شده

متان در شیل‌های کربناته در حوضه‌ی پارانا در برزیل از ۰/۱۴ تا ۰/۸۱ mmol/g برای CO₂ و ۰/۰۳ تا ۰/۴۷ mmol/g برای متان است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تزریق CO₂ به شیل‌ها به‌منظور تقویت بازیافت نفت/گاز، باعث افزایش حجم و دبی متان بازیافتی می‌شود. [۱۵]

ژنگ [۱۶] آزمایشات سیلاب‌زنی مغزه را انجام داد و نشان داد که بازیافت گاز شیلی به‌میزان ۷ درصد می‌تواند از طریق تزریق CO₂ انجام شود.

کلانتری دهقان‌ی و محقق [۱۷] جنبه‌های تکنیکی ذخیره‌ی CO₂ و تقویت بازیافت گاز شیلی در مخزن شیلی تخلیه شده را مورد آنالیز قرار دادند. آنها نشان دادند که نسبت بازیافت گاز شیلی می‌تواند تا حدود ۱۴ درصد برای یک مخزن تک چاه بهبود پیدا کند.

پاتک و همکاران [۱۸] شبیه‌سازی دینامیک مولکولی روی سیستم کروژن-متان- CO₂ انجام دادند تا اثر تزریق CO₂ روی رفتار گاز شیلی غنی از مواد آلی را مورد بررسی قرار دهند. نتایج، حاکی از آن است که CO₂ و متان در ماتریس کروژن جذب می‌شوند و آن را از لحاظ حجمی، متورم می‌کنند. از طرفی تورم کروژن به‌وسیله‌ی متان بیشتر از CO₂ است. در مقیاس میدانی، زمانی که CO₂ به حجمی کمتر یا مساوی با حجم گاز درجا تزریق می‌شود، انقباض اساسی در کروژن محتمل خواهد بود. این موضوع به‌دلیل انقباض زیاد کروژن، زمانی که قسمتی از متان با مول مساوی با CO₂ جایگزین می‌شود، به‌وجود می‌آید. تغییر در حجم کروژن روی مسیره‌های جریان‌ی در سطح مشترک کانی و کروژن اثر می‌گذارد. در موارد تزریق CO₂

چودک و همکاران [۹] ظرفیت ذخیره‌ی این سازند شیلی را به‌کمک شبیه‌سازی عددی ارزیابی کردند و دریافتند که ماکزیمم ظرفیت تئوری برای ذخیره‌ی CO₂ حدود ۱/۶ میلیون تن بر کیلومتر مربع است. CO₂ معمولاً به شکل فوق بحرانی خود، تزریق و استفاده می‌شود. حفرات ریزساختار سازند شیلی، به‌وسیله‌ی CO₂ فوق بحرانی، تغییر پیدا کرده و متان می‌تواند آسان‌تر جریان پیدا کند. [۱۰] در سطوح زیرین زمین نیز، CO₂ با اجزای مختلف سنگ مثل کوارتز، سیلیکات، رس‌ها، کربناته‌ها و غیره واکنش می‌دهد.

تحقیقات نشان می‌دهد که گاز طبیعی در حفرات، به‌صورت فاز آزاد بوده ولی روی فاز جامد شیل‌ها به‌شکل جذب شده، می‌باشند. گاز به‌صورت جذب شده، حدود ۶۰-۲۰ درصد از کل گاز ذخیره شده در این مخازن را شامل می‌شود. [۱۱] گزارش شده است که شیل‌ها تمایل به جذب CO₂ بیشتری در مقایسه با متان و مخلوطی از هر دو دارند و CO₂ را بیشتر از متان جذب می‌کنند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای تقویت بازیافت متان از سازندهای شیلی، CO₂ تزریق شود. (شکل ۲)

نوتال و همکاران [۱۲] نشان دادند که جذب CO₂ به‌میزان ۵/۳ برابر بیشتر از جذب متان در همان فشار است. این ضریب بر مبنای آنالیز شیل‌های سیاه دوونین کنتاکی به‌دست آمده است.

لیو و همکاران [۱۳] نیز یک شبیه‌سازی مخزنی انجام دادند و اظهار کردند که پتانسیل CO₂ برای جابه‌جایی متان وابسته به نسبت مولکولی ۵ به ۱ است.

وینگر و همکاران [۱۴] نیز دریافتند که ظرفیت‌های جذب CO₂

درون کروژن ایفا می‌کند، اما نفوذ در مقایسه با جریان همرفتی، در مواردی که تراوایی ماتریس بزرگتر از ۱۰ میلی‌دارسی است، قابل صرف‌نظر کردن است. [۲۰] تزریق هاف اند پاف گاز دی‌اکسیدکربن روش مناسب‌تری نسبت به ایجاد شکاف‌های القائی برای بهبود تولید از این نوع مخازن است.

در فرآیند هاف اند پاف فشار نزدیک دهانه‌ی چاه به‌وسیله‌ی تزریق گاز افزایش می‌یابد، بنابراین باز یافت سریع‌تری می‌تواند حاصل شود. هرگونه میعاناتی که در نزدیکی دهانه‌ی چاه تشکیل شده باشد قادر به تبخیر مجدد بوده و در طول فرآیند پاف تولید خواهد شد. شنگ [۲۱] اولین بار این روش را برای تقویت باز یافت میعانات از مخازن گاز میعانی شیلی ارائه داد.

شنگ و همکاران [۲۲] همچنین عملکرد تزریق گاز هاف اند پاف را در مخزن گاز میعانی شیلی ایگل فورد به روش شبیه‌سازی بررسی کردند. اثر پارامترهای مختلف روی این روش تزریق گاز شامل زمان هاف اند پاف، ترکیب گاز، اشباع اولیه‌ی آب و فشار تزریق، مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج حاکی از آن است که زمان‌های هاف و پاف باید مساوی باشند و به‌خاطر تراکم‌پذیری نمونه‌ی گاز میعانی، زمان مورد نیاز برای هاف اند پاف باید بیشتر از مخزن نفتی شیلی باشد. حتی اگر گاز تزریقی مشابه باشد، اشباع آب اولیه‌ی بالاتر منجر به کاهش بازده حاصل از تزریق گاز هاف اند پاف می‌شود. اثر ترکیب گاز وابسته به امتزاج‌پذیری گاز با خروج مایع از آن و تزریق‌پذیری گاز است. این اثر برای مخازن گاز میعانی پیچیده‌تر از مخازن نفت شیلی است. به‌علاوه فشار تزریق ماکزیمم باید بالاتر از فشار نقطه‌ی شبنم باشد تا مایع خارج شده بتواند تبخیر مجدد شود. منگ و همکاران [۲۳] اثربخشی سیلاب‌زنی گاز متان و تزریق متان هاف اند پاف را به درون مخزن گاز میعانی شیلی مقایسه کردند. آنها دریافتند که در دوره‌ی زمانی یکسان، ضریب باز یافت برای هاف اند پاف ۲۵ درصد و برای سیلاب‌زنی گاز، ۱۹ درصد است.

وان و مو [۲۴] با استفاده از شبیه‌ساز عددی برای مخزن شیلی ایگل فورد، اثر تزریق CO_۲ به روش هاف اند پاف را بر روی کاهش تجمع میعانات اطراف شکاف‌های هیدرولیکی القائی بررسی کردند. در این مطالعه، سناریوی گاز میعانی غنی و فقیر مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی این مطالعه نشان می‌دهد که مایع خارج شده از گاز با افزایش CO_۲ اضافه شده به سیال مخزن کاهش می‌یابد و همچنین نشان می‌دهد که CO_۲ برای باز یابی گاز میعانی غنی، کارآمدتر و مطلوب‌تر است.

کنترل شده، انقباض کروژن منجر به باز شدن مسیرهای جدید جریانی می‌شود که خود باعث بهبود باز یافت از مخازن شیلی می‌شود. به‌منظور داشتن تصویری کامل از برهم‌کنش CO_۲ با شیل‌ها، ضروری است که برهم‌کنش ماتریس کانی با CO_۲ و همچنین تغییرات همراهی در حجم ماتریس کانی مورد مطالعه قرار گیرد.

لوک و همکاران [۱۹] اولین هاف اند پاف^۲ تزریقی CO_۲ در سازند شیلی کاتانوگا در کشور مورگان را به‌منظور کشف و بررسی پتانسیل ذخیره‌ی CO_۲ و تقویت باز یافت گاز از این سازند مورد ارزیابی قرار دادند. بدین‌منظور یک مدل مخزنی بر مبنای داده‌ی میکرو لرزه‌ای به‌کمک آنها توسعه داده شد. آنها نشان دادند که به‌وسیله‌ی تزریق CO_۲ اضافی با یک فشار سرچاهی بالاتر، دوره‌ی بیشتری از دبی جریان گاز افزایشی می‌تواند حاصل شود.

بازده تزریق CO_۲ برای باز یافت گاز شیلی در مطالعات مختلفی بررسی شده است. با این وجود، استفاده از این تکنولوژی در فاز میدانی، گاهی با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود و میزان باز یافت از یک سازند به سازند دیگری تغییر می‌کند. این موضوع ممکن است به‌دلیل میان‌شکنی سریع CO_۲ در چاه‌های تولیدی متان به‌خاطر فرآیند اختلاط گاز-گاز باشد.

در این فرآیند، CO_۲ تزریق شده راهش را به چاه تولیدی پیدا می‌کند، بنابراین گاز تولیدی به‌طور قابل توجهی افت می‌یابد و دبی تولیدی CO_۲ به طرز چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. به‌منظور ایجاد انگیزه‌ی زیست‌محیطی و اقتصادی بیشتر برای صنایع در جهت استفاده از CO_۲ برای تقویت باز یافت گاز شیلی، هدف و مطلوب ما افزایش ظرفیت ذخیره‌ی CO_۲ و بازده تولید گاز شیلی است. بر همین اساس، به‌کارگیری و استفاده از بهینه‌سازی امری ضروری است. میان‌شکنی CO_۲ در چاه تولیدی و کاهش نشت CO_۲ و همچنین نوسان‌های زیاد فشاری ناشی از تزریق CO_۲، محدودیت‌هایی هستند که باید در بهینه‌سازی تقویت باز یافت گاز شیلی به‌کمک CO_۲ لحاظ شوند. یکی از اصلی‌ترین مخازن گازی شیلی، مخازن گاز میعانی شیلی هستند. در مخازن گاز میعانی شیلی با شکاف‌های هیدرولیکی القائی به‌دلیل افت فشار شدیدتر در شکاف‌ها نسبت به ماتریس، میعانات در ابتدا در شکاف‌های القائی تشکیل می‌شوند.

بنابراین تراوایی گاز نسبی و باز یافت، کاهش پیدا خواهد کرد که دلیل آن وجود میعانات غیرمتحرک است. به‌خاطر فرآیند آشام، میعانات تشکیل شده‌ی درون ماتریس، جریان پیدا می‌کنند. میعانات در ماتریس شیل نیز به‌وسیله‌ی نفوذ^۳ و فشار، به درون شکاف جریان می‌یابند. نتایج نشان داد که نفوذ، نقش اساسی در جریان سیال

۳- بهینه‌سازی عملکرد بهبود بازیافت گاز شیلی با CO₂

ذخیره کند و همچنین با دبی تزریق CO₂ به میزان ۰/۰۳ kg/s به مدت ۵۰ سال، توانسته است گاز بیشتری (حدود ۶/۷۴ درصد) از سازند، تولید کند.

سناریوهای مختلفی از جمله فواصل مختلف چاه برای تزریق فشار ثابت و تزریق دبی ثابت، برای یافتن سناریوی مطلوب مورد آزمایش قرار گرفتند. [۲۹] نتایج نشان داد که برای حالت تزریق دبی ثابت، برای فاصله‌ی چاه ۳۹۰ متر، به منظور ذخیره‌ی CO₂ به میزان ۱۰۶*۹۶/۰۸ و تولید کلی متان ۱۰۶*۴/۲۵۲ kg، میزان بهینه‌ی تزریق ۰/۰۶۰۹ kg/s است.

در این مورد، میان‌شکنی CO₂ تنها محدودیت بوده و فاصله‌ی طولانی‌تر چاه باعث دستیابی به نتایج بهتری می‌شود. برای حالت تزریق فشار ثابت، میزان بهینه‌ی دبی تزریق CO₂، ۰/۰۳۱۷۹ kg/s و فاصله‌ی چاه ۳۶۰ متر بود. به‌طور کلی عملکرد سیستم برای هر دو تولید گازی شیلی و ذخیره‌ی CO₂ به‌صورت همزمان، برای حالت تزریق فشار ثابت بهتر بود. [۲۹] به‌منظور هرچه اقتصادی کردن فرآیند تقویت بازیافت گاز شیلی با CO₂، استراتژی‌های عملیاتی متفاوتی باید انجام شود و این فرآیند نیازمند مدیریت و شبیه‌سازی مناسب مخزن است.

به‌وسیله‌ی مدل‌سازی و شبیه‌سازی مخزن، اثر پارامترهای مختلف روی فرآیند و همچنین تخمین بهبود بازیافت گاز شیلی می‌تواند با هزینه‌ی کمتری انجام شود. در قسمت بعد، مدل‌های رایج و پراهمیتی که برای شبیه‌سازی مخازن گاز شیلی در نظر گرفته می‌شوند، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۴- مدل‌سازی مخازن گاز شیلی

شبیه‌سازی مخازن گاز شیلی بر مبنای دو نوع مدل تخلخل دوگانه و سه‌گانه است.

وارن و روت [۳۰] از دو محیط برای مخازن شکاف‌دار در مدل تخلخل دوگانه استفاده کردند. در این مدل، ماتریس به‌عنوان منبع یا سینک است در حالی که شکاف‌ها مسیر اصلی جریان را فراهم می‌آورند. بعد از دفع متان، متان مستقیماً به درون شکاف‌ها نفوذ می‌کند و این به‌دلیل تقسیم فضای حفرات به دو سیستم متخلخل برای سیستم تخلخل دوگانه است.

بنابراین انتقال سیال بین شکاف‌ها و ماتریس به‌وسیله‌ی این مدل، بیشتر از مقداری که در واقعیت چاه است، پیش‌بینی می‌شود. به‌خاطر غلبه بر این موضوع، مدل تخلخل سه‌گانه پیشنهاد شد که شامل شکاف‌ها بوده و سیستم حفرات ماتریس به دو نوع ناحیه‌ی متخلخل

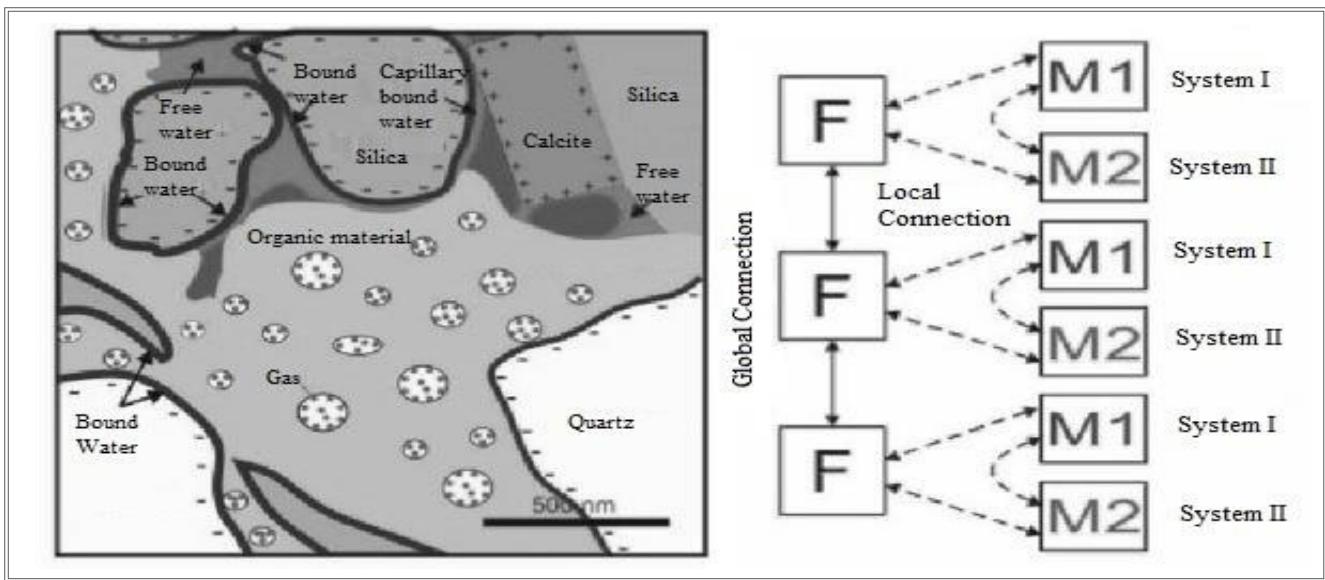
عملکرد تزریق CO₂ در مخزن گاز شیلی تابعی از چندین پارامتر از جمله: زمان، حجم تزریق، تخلخل مخزن، ضخامت و تراوایی، هدایت شکاف، نیم‌طول شکاف و ارتفاع شکاف است. [۲۵] این پارامترها به دو محدودیت ذکر شده در قسمت‌های قبل مرتبط هستند که این محدودیت‌ها: نوسان بزرگ فشاری و میان‌شکنی سریع CO₂ در چاه تولیدی هستند. این مسائل باید در بهینه‌سازی تقویت بازیافت گاز شیلی با CO₂ در نظر گرفته شوند که با کنترل تزریق/تولید و مدیریت خوب مخزن قابل حل است. مطالعات زیادی روی بهینه‌سازی تولید گاز شیلی و همچنین آنالیز حساسیت روی پارامترهای موثر بر این فرآیند تمرکز داشته‌اند.

نصیر و همکاران [۲۶] فرآیند شکاف در سازندهای گاز شیلی و متراکم را به کمک یک مدل زمین‌شناسی ترکیبی شکاف برشی و شکاف کششی، بهینه‌سازی و پیش‌بینی کردند.

لی و السوورت [۲۷] اثر بازیافت گاز و جذب CO₂ را با تهیه‌ی یک مدل مخزنی همگن بررسی کردند. CO₂ به‌عنوان یک سیال تقویت بازیافت گاز مورد استفاده قرار گرفته شد و تراوایی مخزن گاز شیلی، بسته شدن ژئومکانیکی و شکاف در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که تولید گاز شیلی می‌تواند ۲/۳، ۱۴/۳ و ۲۸/۵ درصد به ترتیب برای فشارهای تزریق CO₂، ۰، ۴ و ۸ Mpa بهبود پیدا کند که ظرفیت جذب در هر سه سناریوی تزریق، ۱۰^۴ m^۳ تزریق CO₂ فوق بحرانی بود.

بیلیکی و همکاران [۲۸] پتانسیل سازندهای شیلی شکاف‌دار تخلیه شده را برای ذخیره‌ی CO₂ مورد بررسی قرار دادند. آنها ظرفیت هیدروکربن مخازن شیلی شکاف‌دار تخلیه شده (HDFS^۴) را با ناحیه‌ای که از سفره‌های آب شور استفاده می‌کنند، مقایسه کردند. آنها همچنین یک مدل بهینه را برای این مقایسه به‌کار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های CCTS^۵ (جذب، انتقال و ذخیره‌ی CO₂) برای HDFS نیازمند خطوط لوله‌ی کمتری بوده، متمرکزتر و همچنین ارزان‌تر (۶/۸-۶/۴ درصد) از سفره‌های آب شور هستند و از نظر اقتصادی نیز جذاب‌تر هستند.

لیو و همکاران [۲۹] با ایجاد یک مدل عددی سه‌بعدی، تاثیر پارامترهای عملیاتی از جمله حالت‌های تزریق و دبی تزریق CO₂ را روی تقویت بازیافت گاز شیلی، برای حوضه‌ی اردوس چین بررسی کردند. یک چارچوب بهینه‌سازی برای دستیابی به حداکثر ذخیره‌سازی CO₂ و تولید گاز شیلی به‌صورت همزمان نیز ارائه شد. آنها نشان دادند که سازند شیلی مورد بررسی می‌تواند CO₂ به وزن ۱۰۷*۹/۴۶۷ kg را



۳ | مدل تخلخل سه‌گانه استفاده شده برای شبیه‌سازی مخازن گاز شیلی

مخازن گاز شیلی توضیح داده شده است.

استفاده از مدلی مناسب برای جذب گاز، به نحوی که بتواند باز یافت اولیه و بهبود یافته‌ی گاز شیلی را مدل‌سازی کند، موضوعی اساسی و مهم است. برای گازهای چند جزئی، مدل لانگمویر به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$\psi_i = \frac{P_g B_i m_{iL} \gamma_i}{1 + P_g \sum_i B_i \gamma_i} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

که در آن P_g : فشار گاز، m_{iL} : جرم ذخیره‌ی کل برای جزء i در فشار نامحدود، B_i : ثابت لانگمویر جزء i و γ_i : کسر مولی بدون بعد جزء i در فاز آب-گاز آزاد است.

برای مخلوط‌های چند جزئی که به شکل مخلوط تک جزئی رفتار نمی‌کنند باید قانون فیک و نفوذ نودسن لحاظ شود. دو مکانیسم اصلی انتقال برای مخازن گاز شیلی، نفوذ و جریان همرفتی است که به ترتیب به وسیله‌ی تفاوت در غلظت و افت فشار حاصل می‌شود. [۳۳]

عدد نودسن به عنوان نسبت متوسط پویس آزاد گاز، λ و قطر حفره، d ، تعریف می‌شود:

$$Kn = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p d} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

که در آن k_B : ثابت بولتزمن با مقدار عددی $(1.38 \times 10^{-23})/K$ ، T : دمای سازند (K) ، P : فشار سازند (Pa) ، d : بیانگر مقیاس طول فیزیکی نماینده قطر برخورد گاز است.

با تراوایی‌های متفاوت تقسیم شده است. [۳۱] این مدل با نام مدل تراوایی دو گانه-تخلخل سه‌گانه نیز شناخته می‌شود.

ژو و همکاران [۳۲] عملکرد تزریق CO_2 برای ذخیره‌سازی و تقویت باز یافت گاز در حوضه‌ی سیجوان چین را با استفاده از مدل تراوایی دو گانه-تخلخل سه‌گانه بررسی کردند. نفوذ گاز دوتایی، جذب رقابتی و اثرات جذب و دفع در این مدل در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهد که باز یافت گاز شیلی به‌طور چشمگیری به‌وسیله‌ی تزریق CO_2 می‌تواند تقویت شود. آنها همچنین نتیجه گرفتند که هر دوی زمان تولید و فشار به‌طور توأمان بین باز یافت گاز شیلی و جذب CO_2 ، عواملی ضروری هستند.

در مدل تخلخل سه‌گانه، سه سیستم تخلخلی در نظر گرفته شده است. (شکل ۳) سیستم تخلخل ۱ مختص حفرات آلی یا همان کروژن است که هر دوی گاز آزاد و جذب شده را شامل می‌شود.

سایز متوسط حفرات آلی کمتر از 10^3 نانومتر هستند و تخلخلی در حدود ۲۰-۵۰ درصد دارند که ۴۰-۶۰ درصد تخلخل کل شیل را تشکیل می‌دهند. [۳۳] شکاف‌های طبیعی و حفرات غیر آلی به عنوان سیستم تخلخل ۲ در نظر گرفته می‌شوند که به عنوان کانال‌هایی برای اتصال ماتریس شیل و شکاف‌های القایی عمل می‌کنند و گاز آزاد را در خود نگه می‌دارند. این سیستم دارای اندازه‌ی منافذ ۱-۲ میکرومتر است. شکاف‌های القایی که به‌وسیله‌ی شکاف هیدرولیکی تولید شده‌اند، به عنوان سیستم تخلخل ۳ هستند.

گاز از طریق این سیستم تخلخلی به دهانه‌ی چاه منتقل می‌شود. در قسمت بعد، مهمترین معادلات حاکم بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی

$$\frac{\partial(\phi_i C_{fi})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\phi_i D_{kh} \frac{\partial C_{fi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_i D_{kh} \frac{\partial C_{fi}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (\phi_i C_{fi} \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_i C_{fi} \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial y}) + \sigma D_{kh} (C_{fi} - C_{fi})$$

$$k_i = k_{\infty} \times (1 + \frac{b_{ki}}{p}) \quad \text{رابطه‌ی (۹)}$$

ضریب کلینکنبرگ به شکل زیر تعریف می‌شود: [۳۵]

$$b_{ki} = 1.07 \times 10^{-3} \times (\frac{k_{\infty}}{S_g \times \phi_i})^{0.53} \quad \text{رابطه‌ی (۱۰)}$$

که در آن ϕ_i : تخلخل، D_{ki} و D_k به ترتیب ضریب نفوذ نودسن برای حفرات غیرآلی و آلی، P : فشار، μ : ویسکوزیته، K : تراوایی با اثر کلینکنبرگ، σ : ضریب شکل، k_{∞} : تراوایی مطلق سیستم، b_k : ضریب کلینکنبرگ و S_g : نسبت حجم حفرات غیرآلی به شکاف‌های طبیعی است.

شکاف‌های القایی سیستم تخلخلی ۳ دارای عدد نودسن کمتر از ۰/۰۰۱ هستند. بنابراین جریان در بازه‌ی جریان غیرلغزشی قرار می‌گیرد. بر این مبنا، معادله حاکم آن:

$$\frac{\partial(\phi_i C_{fi})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\phi_i C_{fi} \frac{k_{fi}}{\mu_{fi}} \frac{\partial p_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_i C_{fi} \frac{k_{fi}}{\mu_{fi}} \frac{\partial p_i}{\partial y}) + \phi_i \sigma D_{kh} (C_{fi} - C_{fi}) \quad \text{رابطه‌ی (۱۱)}$$

که ϕ_f : تخلخل شکاف‌های القایی یا همان سیستم تخلخلی ۳، C : غلظت گاز در این سیستم، C_f : غلظت گاز در سیستم متخلخل ۲، k_f : تراوایی سیستم که با افت فشار تغییر می‌کند و σ : ضریب شکل شکاف القایی است. برای تراوایی نسبی فازهای مایع و گاز می‌توان از مدل استون بهبودیافته [۳۶] و برای تعیین مقدار فشار موئینه از تابع ون گنوجتن [۳۷] استفاده کرد. برای حالت تزریق CO_2 به درون یک سفره‌ی آب شور عمیق، فازهای سیال شامل آب ذاتی و CO_2 هستند در حالی که فازهای جامد شامل آبد (ماسه‌سنگ) و شیل‌های قرار گرفته روی آن هستند. در این نوع مدل‌سازی، ابتدا قانون بقای جرم و قانون بقای مومنتم (قانون داریسی) برای هر فاز سیال و قانون بقای انرژی برای فازهای جامد و سیال نوشته می‌شود. [۳۸ و ۳۹]

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad \text{رابطه‌ی (۱۲)}$$

معادله‌ی بالا رابطه‌ی تعادل بین استرس‌ها است. در این معادله، σ : تنسور استرس و b : بردار نیروهای جسم که بر فاز جامد وارد می‌شود، هستند. هرگونه تغییر در دما و فشار منجر به تغییر شکل سنگ و تغییر تخلخل آن می‌شود. با فرض کشسان بودن محیط [۴۰]، قانون بقای جرم و کشش به شکل زیر تعریف می‌شوند:

شیل‌ها تراوایی کمی در حدود 10^{-21} دارند. مدل dusty-gas مناسب‌تر از قانون فیک است چراکه فیک یک مدل جریانی است که به محیط با K بزرگ‌تر از 10^{-12} محدود می‌شود. مدل dusty-gas به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} \frac{Y_i N_{Dj} - Y_j N_{Di}}{D_{ij}} - \frac{N_{Di}}{D_{ik}} = \frac{p_i \nabla Y_i}{ZRT} + (1 + \frac{kp}{\mu_k D_{ik}}) \frac{Y_i \nabla p_i}{ZRT} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

که D_{ij} : نفوذ موثر گاز جزء i در j است، N_{Di} : شار مولی جزء i ، D_{ik} : نفوذ نودسن جزء i است.

مدل dusty-gas برهم‌کنش مولکولی با دیواره‌ی حفرات از طریق نودسن را لحاظ می‌کند و برای شیل‌های با تراوایی کم مناسب‌تر از مدل فیک است.

حفرات آلی هر دو شکل گاز آزاد و جذب شده را در خود نگه می‌دارند. فضای حفرات خیلی کوچک بوده و جریان گاز در این حفرات رژیم جریانی لغزشی است. بنابراین از همرفت می‌توان صرف‌نظر کرد و نفوذ توده‌ای به‌وسیله‌ی نودسن و نفوذ سطحی برای سیستم تخلخل لحاظ می‌شود. بر این اساس، معادله‌ی حاکم بر این سیستم تخلخل به شکل زیر است: [۳۲ و ۳۴]

$$\frac{\partial(\phi_{kads} C_{adsi})}{\partial t} + \frac{\partial(\phi_{kf} C_{fi})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\phi_{kads} D_{si} \frac{\partial C_{adsi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_{kads} D_{si} \frac{\partial C_{adsi}}{\partial y}) \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (\phi_{kf} D_{ki} \frac{\partial C_{fi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_{kf} D_{ki} \frac{\partial C_{fi}}{\partial y})$$

$$D_{si} \approx \frac{v_i^* L_i}{4} \exp(-\frac{E_i}{RT}) \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

$$D_{ki} = \frac{\phi_{kads} d_i}{\tau_i} \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_i}} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

که C_{fi} و C_{adsi} به ترتیب غلظت‌های گاز جذب شده و آزاد، ϕ_{kf} و ϕ_{kads} : به ترتیب تخلخل کروژن آلی و حجم فضای خالی درون کروژن، D_{si} : ضریب نفوذ سطحی، D_{ki} : ضریب نفوذ نودسن، E : انرژی فعال‌سازی مولکولی، R : ثابت جهانی گازها، T : دما، M : وزن مولکولی گاز، d : قطر مولکولی، L : فاصله‌ای است که مولکول‌های گاز جذب شده حرکت می‌کنند، v^T : سرعت جنبش ناگهانی و τ : پیچ‌وخم و انحنای مسیر است.

برای سیستم تخلخل ۲ می‌توان از نفوذ سطحی صرف‌نظر کرد زیرا حجم فضای خالی این سیستم تخلخلی بزرگ‌تر از سیستم تخلخلی ۱ است و بنابراین گاز به حالت آزاد اهمیت بیشتری از گاز جذب شده دارد. برای این سیستم باید اثر کلینکنبرگ در معادلات حاکم لحاظ شود. این موضوع به‌دلیل عدد نودسن بالا در حفرات غیرآلی و شکاف‌های طبیعی است. بر این اساس، نفوذ گاز در سیستم تخلخلی ۲ به این شکل توصیف می‌شود:

نیم طول شکاف، ارتفاع شکاف و غیره است که نیاز به مطالعات جامع و عمیق در آینده دارد.

نتایج

در دهه‌ی گذشته، استفاده از CO_۲ برای تقویت بازیافت گاز شیلی مورد توجه قرار گرفته است که این روش می‌تواند نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد انتشار CO_۲ و همچنین تقاضای جهانی برای انرژی را به‌طور همزمان مرتفع سازد. از طرفی میان‌شکنی سریع CO_۲، پیچیدگی ساختار حفرات، تراوایی کم مخازن گاز شیلی و آشفتگی فشاری بسیار شدید فرآیند تزریق CO_۲ در این مخازن غیرمتعارف، توسعه‌ی بیشتر آن را به تاخیر انداخته است.

در این مقاله، جدیدترین کارهای آزمایشگاهی و میدانی CO_۲-ESGR و جذب CO_۲ در مخازن گاز شیلی شرح داده شده است. نتایج مثبت فوق‌العاده‌ای از مطالعات انجام شده به‌دست آمده است که اعتبار این روش بازیافت را آشکار می‌سازد. علاوه بر این موارد، معادلات حاکم بر عملکرد تزریق CO_۲ در مخازن گاز شیلی به تفصیل بررسی شده است که می‌تواند برای تفسیرهای معتبر و واقعی مورد استفاده قرار گیرد و همچنین یک چارچوب بهینه‌سازی برای دستیابی به بالاترین عملکرد این فناوری را ارائه دهد. اطلاعات ارائه شده تنها یک مشوق برای سرمایه‌گذاری است و سایر جنبه‌های این فرآیند باید به‌صورت جامع‌تری مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات بعدی باید بر روی تست‌های میدانی و انواع حالات و روش‌های تولید که اساساً برای مخازن شیلی و متراکم انجام می‌شود، متمرکز شود چراکه فرآیند تولید از این مخازن به لحاظ اقتصادی بسیار حساس است. ■

$$\nabla \cdot j_s = -\frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_s] \quad \text{رابطه‌ی (۱۳)}$$

$$j_s = (1-\phi_s)\rho_s \frac{du}{dt} \quad \text{رابطه‌ی (۱۴)}$$

$$\rho_s = \rho_{s0} \exp[c(p-p_0) - \alpha(T-T_0)] \quad \text{رابطه‌ی (۱۵)}$$

$$\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} \sigma - \frac{\nu}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})I - \left(\frac{1-2\nu}{E}\right) \Delta p - \alpha \Delta T I \quad \text{رابطه‌ی (۱۶)}$$

در معادلات بالا، j_s : شار فاز جامد، u : بردار جابه‌جایی، C : تراکم‌پذیری هم‌دم، α : انبساط هم‌فشار، ε : کشش، E : مدول یانگ، ν : نسبت پواسون، σ : استرس، I : ماتریس یکه است. توجه شود که Δp ، فشار اضافی سیال بوده و ΔT تفاوت دمایی بین دمای CO_۲ در جای اولیه و تزریقی است. با ادغام دو معادله‌ی ۱۳ و ۱۴، معادله‌ی زیر حاصل می‌شود که بیانگر تغییرات تخلخل است: [۴۱]

$$\frac{D\phi}{Dt} = \left(\frac{1-\phi}{\rho_s}\right) \frac{D\rho_s}{Dt} + (1-\phi) \nabla \cdot \frac{du}{dt} \quad \text{رابطه‌ی (۱۷)}$$

یک چارچوب بهینه‌سازی، برای تقویت عملکرد استفاده از CO_۲ به‌منظور بهبود بازیافت گاز شیلی و همچنین جذب و ذخیره‌ی CO_۲ در سازندهای شیلی موردنیاز است. این مهم، به یک شبیه‌سازی اساسی نیاز دارد. بنابراین تعریف بهترین مدل مخزنی، معادلات حاکم و شماتیک تزریق بسیار مهم هستند. عملکرد تزریق CO_۲ برای ESGR در مخازن گاز شیلی تابع پیچیده‌ای از چندین پارامتر از جمله خصوصیات مخزنی، خواص CO_۲ و سایر سیالات، زمان تزریق، دبی تزریق، حالت تزریق، فشار تزریق، فاصله‌ی چاه، هدایت شکاف،

پانویس‌ها

1. Enhance Shale Gas Recovery
2. Huff & Puff
3. Diffusion

4. Hydrocarbon Depleted Fractured Shale
5. CO₂ Capture, Transport and Storage

منابع

- [1]. Zou, C., Zhu, R., Chen, Z.Q., Ogg, J.G., Wu, S., Dong, D., Qiu, Z., Wang, Y., Wang, L., Lin, S., Cui, J., Su, L., Yang, Z., Organic-matter-rich shales of China. *Earth-Sci. Rev.* 189, 2019: p. 51-78.
- [2]. Jenner, S., Lamadrid, A.J., Shale gas vs. coal: policy implications from environmental impact comparisons of shale gas, conventional gas, and coal on air, water, and land in the United States. *Energy Policy* 2013. 53(1): p. 442-453.
- [3]. Sandrea, R., Evaluating production potential of mature US oil, gas shale plays. *Oil Gas J.*, 2012. 110: p. 58-67.
- [4]. Baihly, J.D.e.a., Shale Gas Production Decline Trend Comparison over Time and Basins—Revisited. *Unconventional Resources Technology Conference.*, 2015.
- [5]. Chandler, D.L., Realistic molecular model of kerogen's nanostructure. URL <http://phys.org/news/2016-02-nanopores-oil-gas-kerogen.html>; 2016.
- [6]. Huang, L., Ning, Z., Wang, Q., Zhang, W., Cheng, Z., Wu, X., Qin, H., Effect of organic type and moisture on CO₂/CH₄ competitive adsorption in kerogen with implications for CO₂ sequestration and enhanced CH₄ recovery. *App. Energy*, 2018. 210: p. 28-43.
- [7]. Kang, S.M., Fathi, E., Ambrose, R.J., Akkutlu, I.Y., Sigal, R.F., Carbon dioxide storage capacity of organic-rich shales. *Spe J.*, 2011. 16(04): p. 842-855.
- [8]. Tao, Z., Clarens, A., Estimating the carbon sequestration capacity of shale formations using methane production rates. *Environ. Sci. Technol.*, 2013. 47(19): p. 11318-11325.

■ ادامه منابع در (دبیرخانه) موجود است.