بررسی عوامل موثر بر اختلاط در فرایند جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی در یک مخزن ذخیره‌سازی زیر زمینی گاز طبیعی

حامد نامدار*، دانشگاه صنعتی سهند تبریز • امیرعباس عسکری، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

در برنامه عملیاتی مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی، مسئله اساسی گاز پایه است چراکه گاز پایه بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری را در در بر می‌گیرد. تراکم‌پذیری دلیل اصلی استفاده از گاز پایه می‌باشد. از آنجایی که همه‌ی گازها قابلیت تراکم‌پذیری دارند پس می‌توان در راستای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بخشی از گاز پایه را با یک گاز ارزان‌تر مانند گازهای خنثی جایگزین کرد. به‌عنوان مثال، طبق گزارش موسسه انرژی آمریکا هزینه جداسازی و انتقال هر هزار فوت مکعب نیتروژن و دی‌اکسید کربن به ترتیب ۰/۸ و ۱ دلار می‌باشد در حالی که قیمت هر هزار فوت مکعب گاز طبیعی ۳/۳۵ دلار است. مسئله مهم در این فرایند این است که از گازی استفاده شود که اختلاط بین گاز پایه جایگزین شده و گاز طبیعی به حداقل ممکن برسد تا باعث تحت تأثیر قرارگرفتن کیفیت گاز طبیعی تولیدی نگردد. لذا در این مقاله با هدف امکان‌سنجی جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی، با کمک نرم‌افزار Petrasim به بررسی استفاده از گاز N_2 و CO_2 به‌عنوان جایگزین گاز پایه و پارامترهای اثرگذار مخزنی بر روی اختلاط پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که سناریو جایگزینی باید به نحوی انتخاب شود که به گاز خنثی امکان جدایش ثقلی در جهت کاهش اختلاط داده شود. لذا بهتر است از سناریوی تزریق غیر هم‌زمان با تولید جهت جایگزینی استفاده شود. استفاده از گاز CO_2 به‌عنوان گاز پایه، به دلایل ضریب نفوذ کمتر، چگالی بالاتر و داشتن رفتار فوق بحرانی در شرایط فشاری و دمایی مخازن و کمک به جدایش ثقلی بیشتر، بالاتر بودن ویسکوزیته و در نتیجه، پایدارتر بودن سطح مشترک متان-گاز خنثی در هنگام تولید و قابلیت انحلال CO_2 در آب در مقایسه با گاز N_2 موجب اختلاط کمتری می‌شود. اختلاط دارای رابطه مستقیم با دما و رابطه عکس با فشار مخزن می‌باشد. افزایش تراوایی موجب افزایش اختلاط و افزایش تخلخل موجب کاهش آن می‌شود. با توجه به نتایج می‌توان گفت که طرح جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی باید در مخازنی صورت گیرد که از نظر شرایط دمایی و فشاری به شرایط بحرانی گاز CO_2 نزدیک‌تر بوده و دارای تراوایی خیلی بالا و تخلخل پایین نباشد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۱۱/۰۱
تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۱۱/۱۰
تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۲/۱۰

واژگان کلیدی:
ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، جایگزینی گاز پایه، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، اختلاط

مقدمه

گاز موجود در یک مخزن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز(UGS)، از دو قسمت تشکیل می‌شود: گاز عملیاتی که طی یک فرایند چرخشی به مخزن تزریق و از آن تولید می‌شود و گاز پایه که هنگامی که گاز عملیاتی تزریق و تولید می‌شود، منقبض و منبسط شده اما خودش تولید نمی‌شود و در داخل مخزن به منظور تأمین فشار برای تحویل‌دهی گاز عملیاتی باقی می‌ماند. بسته به نوع مخزن، گاز پایه ممکن است ۱۵ تا ۷۵ درصد کل موجودی UGS و در حدود یک سوم تا نصف هزینه‌های سرمایه‌گذاری را در ایجاد مخازن ذخیره‌سازی جدید در بر بگیرد[۱]. درنتیجه، بیشترین سهم را در مبلغ سرمایه‌گذاری در مخازن UGS دارد. به‌منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌توان بخشی از گاز پایه را با یک گاز ارزان‌تر از گاز طبیعی مانند CO_2 جایگزین کرد و از این طریق مانع باقی ماندن گاز طبیعی در مخزن ذخیره‌سازی هنگام متروکه شدن آن، افزایش بازیافت گاز طبیعی مخزن [۲] و همچنین کاهش گازهای گلخانه‌ای جو شد[۳]. طبق گزارش موسسه انرژی آمریکا هزینه جداسازی و انتقال هر هزار فوت مکعب نیتروژن و دی اکسید کربن به ترتیب ۰/۸ و ۱ دلار می‌باشد در حالی که قیمت هر هزار فوت مکعب گاز طبیعی ۳/۳۵ دلار است[۴]. به دلیل این جایگزینی ممکن است مشکلاتی ناشی از اختلاط[۱] گاز پایه و گاز طبیعی ایجاد شود که باعث تحت تأثیر قرار گرفتن کیفیت گاز طبیعی تولیدی شده و لذا باید مورد بررسی و کنترل قرار گیرد[۵]. در این مقاله با هدف بررسی جایگزینی گاز پایه مخزن ذخیره سازی زیرزمینی گاز با دو گاز خنثی نیتروژن و دی‌اکسید کربن و مقایسه آنها، یک مطالعه شبیه‌سازی صورت گرفته است. همچنین، با توجه به اینکه اختلاط گاز پایه محلی و گاز پایه جایگزین شده ناشی از همرفت، پراکندگی و نفوذ مولکولی، متاثر از خواص مخزن و نوع گاز می باشد، در ادامه، به بررسی اثر پارامترهای مخزنی بر روی جایگزینی و اختلاط حین آن پرداخته می‌شود. به منظور مدل کردن فرآیند جایگزینی گاز خنثی با گاز پایه، از ماژول EOS7C شبیه‌ساز ترکیبی TOUGH2 نرم‌افزار Petrasim استفاده شد. این ماژول ۵ جز (آب‌تازه، آب‌نمک،

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (h_namdar@sut.ac.ir)

گاز میعان‌ناپذیر[۲] (NCG)، ردیاب[۳] و متان) را با قابلیت در نظر گرفتن تغییرات حرارتی به‌کار می‌برد. گاز میعان‌ناپذیر می‌تواند به وسیله کاربر، دی‌اکسیدکربن، نیتروژن یا هوا انتخاب شود. انتخاب این گازها اجازه می‌دهد که ماژول قابلیت به‌کارگیری در فرایندهای شبیه‌سازی ذخیره‌سازی گاز شامل استفاده از گاز پایه خنثی را داشته باشد. در این نرم‌افزار همرفت فازهای گاز و مایع براساس توسعه چندفازی قانون دارسی می‌باشد. نفوذ مولکولی در فازهای گاز و مایع هم براساس قانون فیک مدل‌سازی شده است. همچنین انحلال اجزای گاز در مایع وابسته به دما و فشار توسط ثابت هنری کنترل می‌شود. این ماژول قابلیت مدل کردن رانش آب و جابه‌جایی گاز–مایع که ممکن است در مخازن گازی حضور داشته باشند را داراست [۶].

۱- مشخصات میدان مورد مطالعه

اطلاعات موردنیاز جهت مطالعه از منبع شماره ۶ اقتباس شده است. سازند مورد مطالعه از یک میدان گازی می‌باشد که از سال ۱۹۳۶ شروع به تولید کرده و دارای ساختار گنبدی شکل با وسعت ۱۲ در ۱۵ کیلومتر است. از سال۱۹۳۶ میدان مورد نظر $۹/۳\times۱۰^{۱۰}$ متر مکعب گاز طبیعی (در شرایط استاندارد) از ۳۶۵ چاه تولید کرده است. تولیدی‌ترین سازند میدان موردنظر به‌منظور بررسی جایگزینی گاز خنثی با گاز پایه مخزن در فرایند ذخیره سازی زیرزمینی گاز انتخاب شده است که در عمق متوسط ۱۱۵۰ تا ۱۳۱۰ متری با ضخامت خالص ۱۵ تا ۱۰۰ متر می‌باشد. فشار و دمای اولیه مخزن حدود ۱۲۶ بار و ۶۵ درجه سانتی‌گراد است. دیگر خصوصیات کلی مخزن در جدول–۱ نشان داده شده است [۷].

مرز غربی سازند با حضور سطح آب در عمق ۱۳۲۵ متری کنترل می‌شود. مدل سازند در شکل–۱ نشان داده شده است. مدل موردنظر جهت مطالعه قطاعی به اندازه یک شانزدهم کل میدان بوده و دارای شیب ۰/۷۸ درجه است. همچنین از سمت راست بسته است و کف آن یک سطح آب افقی قرار دارد. قابل ذکر است که در تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، رانش آب با بستن مرزهای پایینی سیستم در نظر گرفته نشده است.

۲- روش انجام کار

جهت انجام مطالعه سه فاز اجرا می شود؛ فاز اول به منظور ایجاد حالت اولیه مخزن با سطح آب، فاز دوم به منظور شبیه‌سازی ۶۰ سال تولید (فاز تخلیه مخزن) و فاز سوم تبدیل مخزن به مخزن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و جایگزینی گاز پایه آن با گاز خنثی. تمام شبیه‌سازی‌ها در شرایط هم‌دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. تزریق گاز خنثی در نقطه ای به ارتفاع ۱۵ متر زیر سطح مخزن تقریباً در Y=۲۰۰۰ m و برداشت متان از قسمت بالایی سمت راست در Y=۶۶۰۰ m صورت می‌گیرد. در تمام شبیه‌سازی‌ها از معادله حالت پینگ رابینسون به‌منظور پیش‌بینی خواص سیالات مخزن استفاده می‌شود. نوع گریدبندی به‌صورت مستطیلی قائم‌الزاویه است. تعداد مش‌ها در جهت X،Y و Z به‌ترتیب ۱،۳۳ و ۲۰ می‌باشد. پس از شبیه‌سازی تاریخچه تولید، در همان ابتدای فاز تغییر مخزن به مخزن ذخیره‌سازی اقدام به جایگزینی گاز پایه مخزن با گاز خنثی می‌شود. دو سناریوی مختلف برای جایگزینی گاز خنثی با گاز پایه مخزن شبیه‌سازی شد که هر دو از سال ۱۹۹۹ شروع شدند. در سناریوی یک، گاز خنثی به مدت ده سال از سال ۱۹۹۹ به مخزن تزریق می‌شود که باعث افزایش فشار مخزن می‌شود. سپس در ادامه‌ی سناریوی یک، گاز متان از مخزن افزایش فشار پیدا کرده به مدت ده سال در دبی معادل دبی متوسط تولیدی بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ (طبق تاریخچه تولید حداکثر قابلیت تولید مخزن در این بازه زمانی ده‌ساله می‌باشد) تولید می‌شود. در سناریوی دو، گاز خنثی هم‌زمان با تولید گاز متان به مخزن تزریق می‌شود (متان با فشار ته‌چاهی ثابت تولید می‌شود). پس از جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی، سناریوهای تزریق و تولید در فصول گرم و سرد سال انجام می‌گیرد. در این مقاله تمرکز صرفاً بر روی چگونگی جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی بوده و از بررسی فرایند تزریق و تولید در فصول گرم و سرد سال با توجه به شناخت این فرایند و مطالعات بسیار صورت گرفته در این رابطه صرفنظر شده است.

۳- نتایج

۳-۱- اثر نوع سناریوی جایگزینی

جهت بررسی اثر نوع و چگونگی انجام سناریوی جایگزینی از گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان گاز خنثی استفاده گردید. در سناریوی یک، متان خالص ۹۹ درصد می‌تواند در یک دبی خیلی بالا به مدت ۵ سال بعد از تزریق دی‌اکسیدکربن تولید شود درحالی که در سناریوی دو، در طول تزریق دی‌اکسید کربن، متان خالص ۹۹ درصد به مدت ده سال قابلیت تولید دارد. اما دبی در سناریو دو کمتر از سناریوی یک است. کل گاز متان تولید شده در سناریوهای یک و دو به‌ترتیب ۵/۲×۱۰۷ MSCF و ۵/۷×۱۰۷ MSCF می‌باشد. شکل–۲ کسر جرمی دی‌اکسید کربن در مخزن را در انتهای سناریوهای یک و دو نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در حالت سناریوی یک، اختلاط به نسبت سناریوی دو کمتر است چرا که به دی‌اکسید کربن اجازه داده می‌شود به دلیل اختلاف فشار و چگالی به سمت پایین حرکت کند. با توجه به اختلاط کمتر در سناریوی یک،

جدول ۱ | خصوصیات مخزن [۷]

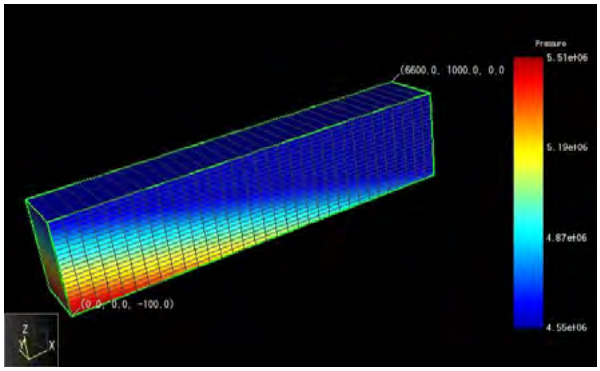
مقدار	خاصیت
تخلخل	۰/۳۵
تراوایی افقی، عمودی	۱۰۰۰ میلی دراسی
تراوایی عمودی	۱۰ میلی دراسی
فشار موئینه	استفاده از مدل Van Genuchten
تراوایی نسبی مایع–گاز	استفاده از مدل Van Genuchten-Mualem
اشباع آب همزاد	۰/۲۷

در ادامه و برای بررسی اثر پارامترهای دیگر بر روی اختلاط، از سناریوی یک استفاده می‌شود.

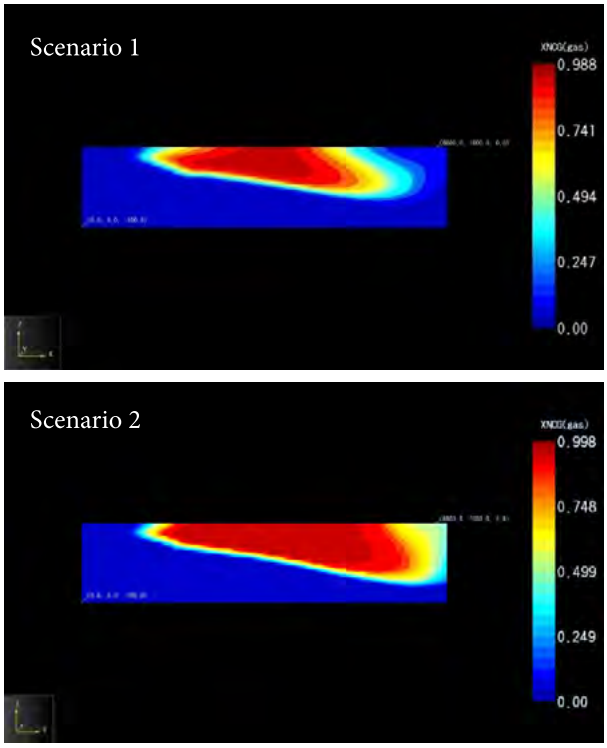
۳-۲- اثر نوع گاز خنثی

بعد از انتخاب نوع سناریوی مناسب، به بررسی انتخاب گاز مناسب جهت کاهش اختلاط پرداخته می‌شود. بدین منظور دو نوع گاز CO_2 و N_2 به‌عنوان گاز خنثی برای جایگزینی با گاز پایه استفاده شد. نتایج این بررسی بر حسب کسر جرمی گازهای خنثی نیتروژن و دی‌اکسید کربن در مخزن در شکل-۳ پس از ده سال تولید نشان داده شده است.

کسر جرمی گاز خنثی در چاه تولیدی نشان‌دهنده میزان اختلاط صورت گرفته است. شکل-۴ میزان اختلاط به واسطه جایگزینی توسط دو گاز



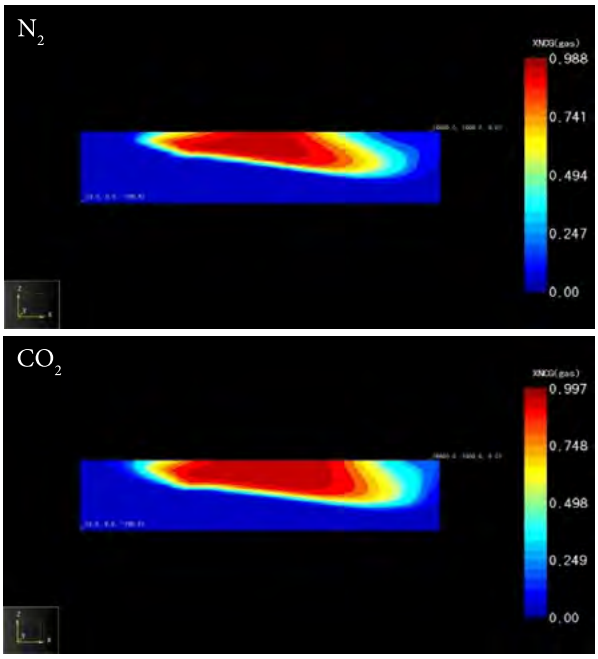
شکل ۱ | مدل سازند مورد مطالعه



شکل ۲ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن در حالت سناریوی یک و دو

نیتروژن و دی‌اکسید کربن بعد از ده سال را نشان می دهد. همانطور که دیده می‌شود در حالت استفاده از دی‌اکسیدکربن به‌عنوان گاز پایه خنثی، اختلاط کمتری رخ می‌دهد که طبق قانون نفوذ گراهام[۴]، این به دلیل وجود رابطه معکوس بین ضریب نفوذ با جرم مولکولی و در نتیجه، بیشتر بودن ضریب نفوذ نیتروژن می باشد. گراهام به‌طور تجربی دریافت که سرعت نفوذ گاز با جذر وزن مولکولی گاز، به‌طور معکوس متناسب است[۸]. فشار و دمای بحرانی دی‌اکسید کربن به ترتیب ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد و ۷۳/۸ بار می‌باشد و در فشار و دمایی که مخازن در آنها قرار دارند، گاز دی‌اکسید کربن به‌صورت فوق بحرانی رفتار می‌کند. چگالی دی‌اکسید کربن در این شرایط تغییرات شدید داشته و چگالی آن به چگالی آب می‌رسد اما گرانروی آن همچنان شبیه گازهاست. این بالا بودن چگالی (۲ تا ۶ برابر بیشتر از متان) خود به جدایش ثقلی و کاهش اختلاط کمک می‌کند[۹].

از طرفی در فشار مخزن به علت بالاتر بودن ویسکوزیته دی‌اکسیدکربن نسبت به نیتروژن، سطح مشترک بین متان و دی‌اکسیدکربن پایدارتر از سطح مشترک بین متان و نیتروژن است که این خود، موجب کاهش اختلاط می شود. همچنین استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان گاز پایه با توجه به چگالی بیشتر و اشغال حجم کمتر، امکان تزریق گاز عملیاتی بیشتری را با اعمال فشار تزریق کمتر نسبت به گاز نیتروژن فراهم می‌کند. از طرفی می‌توان به جنبه‌های محیط زیستی استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن و انتقال آن به زیرزمین نیز اشاره کرد. همچنین پدیده مورد علاقه دیگری که هنگام استفاده از گاز دی‌اکسید کربن به عنوان گاز پایه در مقایسه با گاز نیتروژن دیده شده، انحلال پذیری آن در آب مخزن می‌باشد که علاوه‌بر کاهش اختلاط، موجب کاهش نگرانی‌های ناشی از هزینه‌های عملیاتی ناشی از خوردگی‌های ناشی از

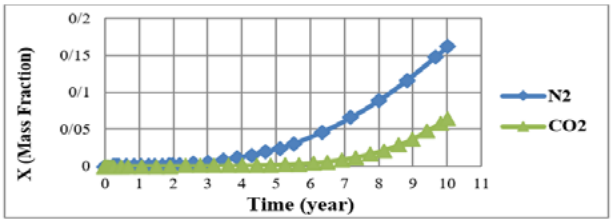


شکل ۳ | کسر جرمی نیتروژن و دی‌اکسید کربن در مخزن پس از ۱۰ سال تولید

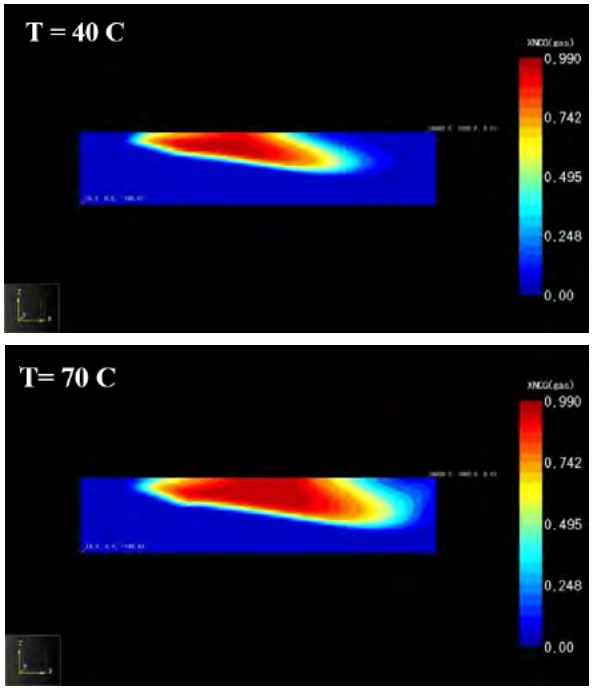
تولید دی‌اکسید کربن می‌شود. در ادامه، به منظور بررسی اثر پارامترهای مخزنی بر روی اختلاط از گاز خنثی دی‌اکسید کربن استفاده می‌کنیم.

۳-۳- اثر دما بر روی اختلاط

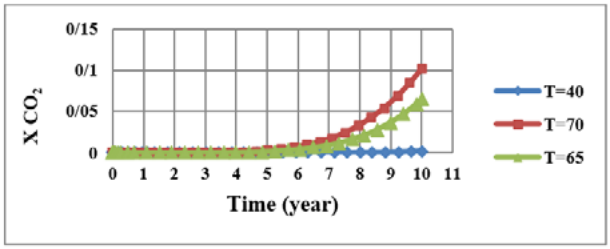
برای بررسی دما بر روی اختلاط، مخزن در سه دمای مختلف در نظر گرفته شده و جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی CO_2 اجرا گردید. نتایج



شکل ۴ | کسر جرمی گاز خنثی در چاه تولیدی



شکل ۵ | کسر جرمی دی اکسید کربن پس از ۱۰ سال تولید در دماهای مختلف



شکل ۶ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن در چاه تولیدی در شرایط دمایی مختلف

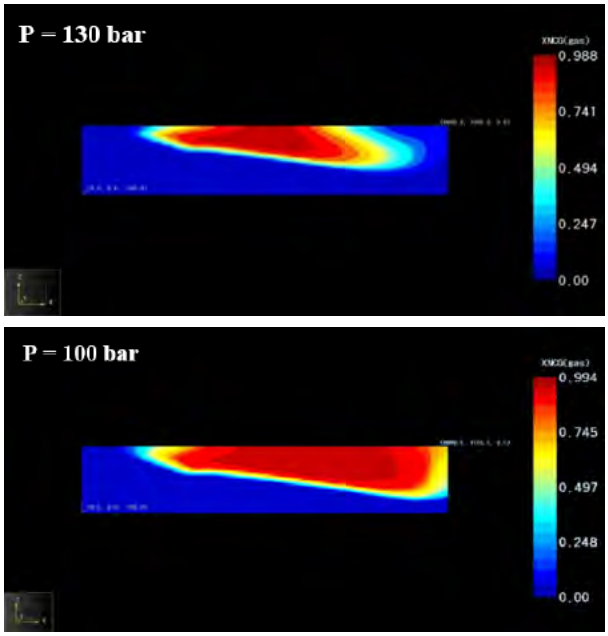
برای دو دمای حداقل و حداکثر ۴۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد در شکل-۵ نشان داده شده است. همانطور دیده می‌شود، اختلاط، رابطه مستقیم با دما دارد(با افزایش دما اختلاط بیشتر می‌شود). در شکل -۶ کسر جرمی CO_2 در چاه تولیدی در دماهای مختلف نشان داده شده است. سیگماند نشان داد که ضریب نفوذ دارای رابطه مستقیم با دماست[۱۰]. از طرفی، در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت دانسیته CO_2 به متان نسبت به بقیه دماها بیشتر است که این خود، به جدایش ثقلی و کاهش اختلاط کمک می‌کند. کاهش شدید اختلاط در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به خاطر قرار گرفتن در محدوده شرایط بحرانی است که دانسیته افزایش شدیدی می‌یابد.

۳-٤- اثر فشار بر روی اختلاط

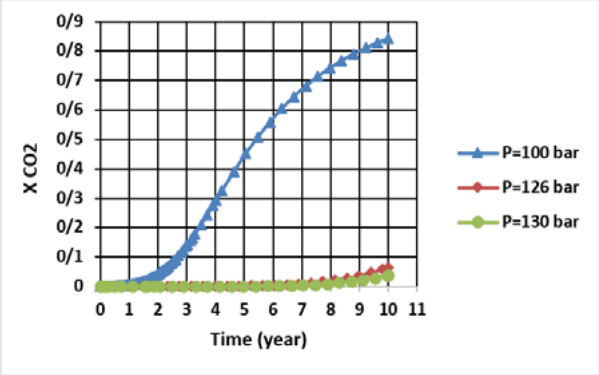
جهت بررسی اثر فشار بر اختلاط، سه فشار در نظر گرفته شد. شکل-۷ کسر جرمی CO_2 را در دو فشار حداقل و حداکثر ۱۲۰ و ۱۳۰ بار پس از ده سال در مخزن تولیدی نشان می‌دهد. شکل-۸ کسر جرمی CO_2 را هنگام تولید در فشارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. با افزایش فشار، کسر جرمی CO_2 و درنتیجه، اختلاط کاهش می‌یابد. سیگماند[۵] نشان داد ضریب نفوذ مولکولی در فشارهای بالاتر کمتر است [۱۰].

جدول ۲ | حالت‌های مختلف تراوایی برای بررسی اثر تراوایی بر روی اختلاط

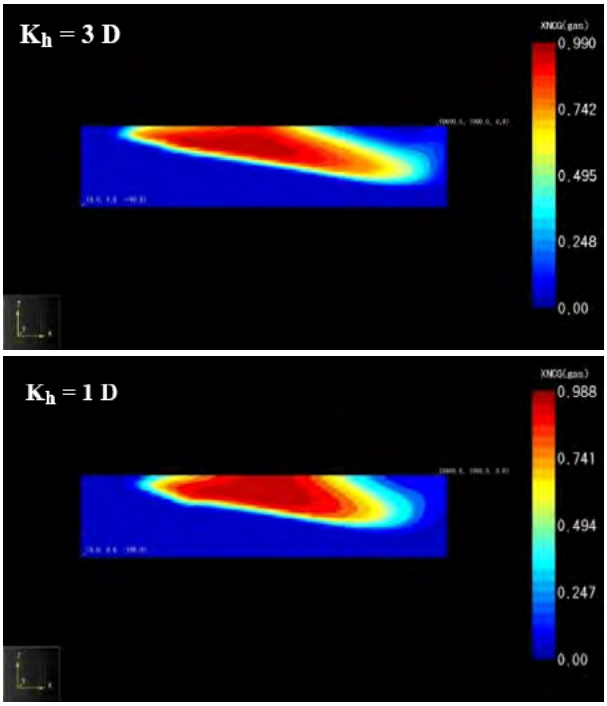
حالت	تراوایی افقی	تراوایی عمودی
۱	۱ دارسی	۱۰ میلی دارسی
۲	۲ دارسی	۲۰ میلی دارسی
۳	۳ دارسی	۳۰ میلی دارسی



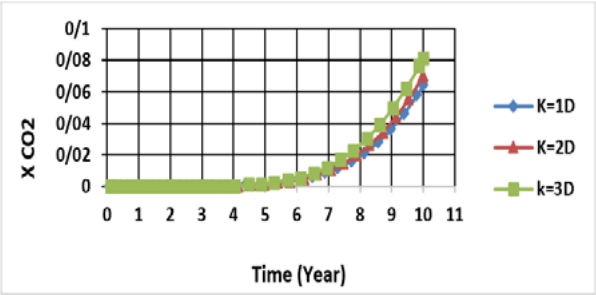
شکل ۷ | کسر جرمی دی اکسید کربن پس از ۱۰ سال تولید در فشارهای مختلف



شکل ۸ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن در چاه تولیدی در فشارهای مختلف



شکل ۹ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن پس از ۱۰ سال تولید در حالت‌های مختلف تراوایی

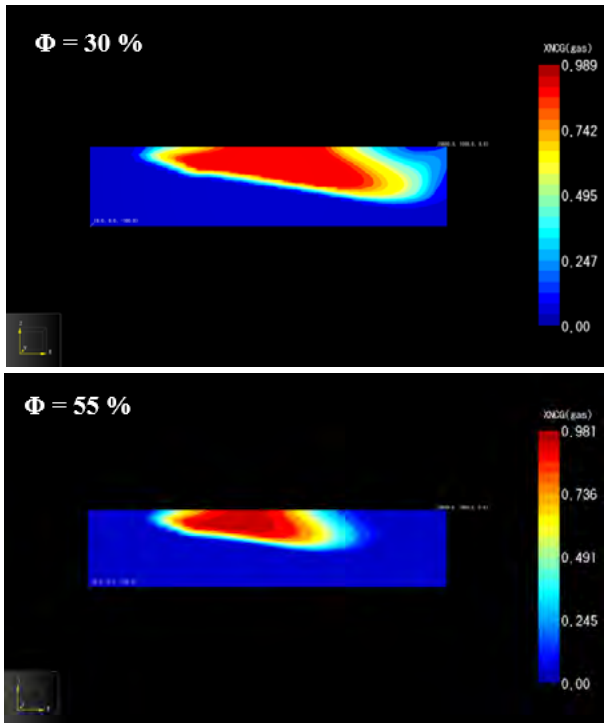


شکل ۱۰ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن در چاه تولیدی در حالت‌های مختلف تراوایی

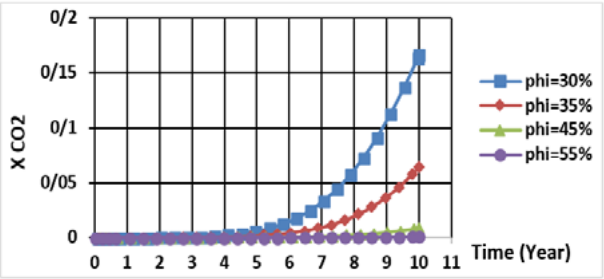
۳-۵ - اثر تراوایی بر روی اختلاط

جهت بررسی اثر تراوایی بر اختلاط، سه تراوایی مختلف منظور شد. در تمام موارد شبیه‌سازی شده، نسبت ۱۰۰ به یک بین تراوایی افقی و عمودی حفظ گردید. جدول-۲ مقادیر مختلف تراوایی در نظر گرفته شده و شکل-۹ کسر جرمی CO2 در مخزن را در دو حالت تراوایی حداقل و حداکثر ۱ و ۳ پس از ده سال تولید نشان می‌دهد.

همچنین شکل-۱۰ کسر جرمی CO_2 را در چاه تولیدی در حالت‌های مختلف تراوایی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل-۱۱ دیده می‌شود، افزایش تراوایی باعث افزایش اختلاط می‌گردد. افزایش تراوایی موجب می‌شود گاز پایه خنثی سریع‌تر حرکت کرده و باعث پدیده انگشتی‌شدن[۶] و میان‌شکنی[۷] زودتر گاز پایه خنثی در چاه تولیدی شود و درنتیجه، اختلاط افزایش یابد.



شکل ۱۱ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن پس از ۱۰ سال تولید در حالت‌های مختلف تخلخل



شکل ۱۲ | کسر جرمی دی‌اکسید کربن در چاه تولیدی در حالت‌های مختلف تخلخل

۳-۶- اثر تخلخل بر روی اختلاط

جهت بررسی اثر تخلخل بر روی میزان اختلاط، چهار تخلخل منظور گردید. شکل-۱۱ نتایج را پس از ده سال تولید در مخزن در دو حالت تخلخل حداقل و حداکثر ۳۰ و ۵۵ درصد نشان می‌دهد. شکل-۱۲ کسر جرمی CO_2 را در چاه تولیدی در حالت‌های مختلف تخلخل نشان می‌دهد. بر این اساس، افزایش تخلخل باعث کاهش اختلاط شده است. علت این پدیده را می‌توان چنین بیان نمود که افزایش تخلخل باعث افزایش فضا و در نتیجه، کاهش انرژی و جنب و جوش مولکول‌ها که موجب اختلاط می‌شوند نیز شده است.

نتیجه‌گیری

۱- در انتخاب نوع سناریو جهت جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی باید به این نکته توجه نمود که سناریو به‌نحوی انتخاب شود که به گاز خنثی امکان جدایش ثقلی در جهت کاهش اختلاط داده شود. لذا بهتر است از سناریوی تزریق غیرهم‌زمان با تولید جهت جایگزینی استفاده شود.

۲- استفاده از CO_2 به‌عنوان گاز پایه خنثی، موجب اختلاط کمتری می شود. دلیل آن، کمتر بودن ضریب نفوذ، بالاتر بودن چگالی، رفتار فوق بحرانی در شرایط فشاری و دمایی مخازن، کمک به جدایش ثقلی بیشتر، بالاتر بودن ویسکوزیته (پایدارتر بودن سطح مشترک متان-گاز خنثی) و انحلال بیشتر در آب در مقایسه با N_2 است.

۳- استفاده از گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان گاز پایه با توجه به چگالی بیشتر و اشغال حجم کمتر، امکان تزریق گاز عملیاتی بیشتری را با اِعمال فشار تزریق کمتر نسبت به گاز نیتروژن فراهم خواهد نمود. از طرفی، می‌توان به جنبه‌های محیط زیستی استفاده از گاز دی‌اکسید کربن و انتقال آن به زیرزمین نیز اشاره کرد.

۴- هرچه دما افزایش یابد، اختلاط بیشتر می‌شود. با کاهش دما، نسبت چگالی CO_2 به متان افزایش یافته که به جدایش ثقلی و کاهش اختلاط کمک می کند. ضریب نفوذ مولکولی نیز با افزایش دما افزایش می‌یابد.

۵- با افزایش فشار، اختلاط به دلیل کاهش ضریب نفوذ مولکولی کاهش می‌یابد. افزایش فشار در دمای ثابت در ابتدا تا یک فشار مشخص موجب افزایش نسبت چگالی بین CO_2 و متان و در نتیجه، جدایش ثقلی و کاهش اختلاط می‌شود. اما در ادامه، افزایش فشار موجب کاهش این نسبت شده و انتظار می‌رود اختلاط افزایش یابد.

۶- با افزایش تراوایی، گاز پایه خنثی سریع‌تر حرکت کرده و باعث پدیده انگشتی شدن و میان‌شکنی زودهنگام می‌شود، لذا موجب افزایش اختلاط می‌شود.

۷- افزایش تخلخل موجب کاهش اختلاط می‌گردد. علت این پدیده را می‌توان بدین صورت بیان نمود که به‌ازای حجم ثابت تزریق گاز دی‌اکسید کربن به مخزن، با افزایش تخلخل فضای بیشتری در دسترس مولکول‌ها قرار می‌گیرد و در نتیجه، انرژی و جنب و جوش آنها که عامل ایجاد اختلاط است، کاهش می‌یابد. لذا اختلاط با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد.

۸- طرح جایگزینی گاز پایه با گاز خنثی باید در مخازنی صورت گیرد که از نظر شرایط دمایی و فشاری به شرایط بحرانی گاز CO_2 نزدیک‌تر بوده و دارای تراوایی خیلی بالا و تخلخل پایین نباشد.

پانویس‌ها

1- Mixing
2- Non-Condensable Gas
3- Tracer
4- Graham
5- Sigmund
6- Fingering
7- Breakthrough

منابع

[1] Foh, M.S., "The use of inert gas as cushion gas in underground storage: practical and economic issues", Conference: Gas supply planning and management, Institute of gas technology, 1991.

[2] Misra, B.R. Foh, S.E. Shikari, Y.A. Berry, R.M. Labaune, F., "The Use of Inert Base Gas in Underground Natural Gas Storage", SPE 17741, 1988.

[3] Oldenburg, C.M., "Carbon Dioxide as Cushion Gas for Natural Gas Storage", Energy & Fuels, Vol. 17, pp. 240–246, 2003.

[4] Jahangiri, H. R., Zhang, D., "Optimization of The Net Present Value Of Carbon Dioxide Sequestration And Enhanced Oil Recovery", SPE 21985-MS, 2011.

[5] Kilincer, N. Gumrah, F., "A Numerical Simulation Study on Mixing of Inert Cushion Gas with Working Gas in an Underground Gas Storage Reservoir", Taylor & Francis Publication, 2010.

[6] "Petrasim manual", Thunderhead Engineering Co., Manhattan, USA, 2013.

[7] Oldenburg, C. M., Pruess, K., and Benson, S. M., "Process Modeling of CO2 Injection into Natural Gas Reservoirs for Carbon Sequestration and Enhanced Gas Recovery" Energy & Fuels, Vol. 15, No. 2, 2001, pp. 293-298, 2001.

[8] Keith J. Laidler and John M. Meiser, "Physical Chemistry" (Benjamin/Cummings 1982), pp.18-19

[9] Van der Meer, B.: "Carbon Dioxide Storage in Natural Gas Reservoirs", Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 60, pp. 527-536, 2005.

[10] Sigmund, P. M., "Prediction of Molecular Diffusion at Reservoir Conditions. Part I, Measurement and Prediction of Binary Dense Gas Diffusion Coefficients", 76-02-05 PETSOC Journal Paper, 1976.