

یادداشت پژوهشی

بهینه‌یابی هم‌زمان فرآیند ازدیاد برداشت گاز و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن گاز طبیعی

حسین زنگنه، سعید جمشیدی* و محمد سلطانیه

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۶

چکیده

با افزایش غلظت گاز دی‌اکسید کربن در جو کره زمین اخیراً روش‌های زودبازده کاهش انتشار این گاز مانند تزریق دی‌اکسید کربن با مقاصد ازدیاد برداشت و ذخیره‌سازی زیرزمینی مطرح شده است. اگرچه استفاده از دی‌اکسید کربن جهت ازدیاد برداشت نفت سابقه طولانی دارد، اما به دلیل ضریب برداشت بالای مخازن گازی و احتمال اختلاط دو گاز، تزریق این گاز در مخازن گازی به طور همه جانبه مطالعه نشده است. در این مقاله فرآیند تزریق دی‌اکسید کربن با هدف ازدیاد برداشت گاز و ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسید کربن (EGR/CCS) در یکی از مخازن گازی جنوب ایران بررسی شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف به روش طراحی آزمایش بهینه، پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند انتخاب گردیده و در پایان شرایط بهینه پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن میزان سود خالص به عنوان تابع هدف محاسبه شده است. مطالعات در این مقاله نشان می‌دهد که تزریق دی‌اکسید کربن در مخازن گازی چنانچه در شرایط بهینه (الگوی تزریق و شرایط عملیاتی مناسب و در حالت دی‌اکسید کربن خالص) انجام گیرد، نه تنها باعث تولید مقادیر زیادی از گاز باقی‌مانده مخزن (ازدیاد برداشت گاز) می‌گردد، بلکه می‌تواند موجبات ذخیره‌سازی و جلوگیری از انتشار مقادیر عظیم این گاز گلخانه‌ای گردد. در نهایت فرآیند ازدیاد برداشت گاز/ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن به علت افزایش ضریب برداشت مخزن و درآمدهای حاصل از مکانیزم توسعه پاک (CDM) و همچنین کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، می‌تواند مزیت‌های اقتصادی و زیست محیطی فراوانی داشته باشد.

کلمات کلیدی: مخازن گازی، دی‌اکسید کربن، ازدیاد برداشت گاز، ذخیره‌سازی، بهینه‌یابی

مقدمه

از ۲۸۰ ppm به ۳۸۰ ppm رسیده است [۱]. انتشار دی‌اکسید کربن عمدتاً ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد [۲]. مصرف سوخت‌های فسیلی در سراسر دنیا باعث تولید سالانه ۲۷ میلیارد تن دی‌اکسید کربن می‌گردد که آثار سوء شدیدی بر آب و هوا دارد [۳]. این در حالی است که در ایران،

بررسی بر روی یخ‌های قطب جنوب نشان می‌دهد که با افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی میزان غلظت دی‌اکسید کربن در جو طی ۲۰۰ سال اخیر

فرآیند ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در سفره‌های آب زیرزمینی انجام داد [۸]. در نهایت قمیان، در سال ۲۰۰۸ مطالعات جامعی با عنوان بررسی شبیه‌سازی مخزن برای فرآیندهای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن و ازدیاد برداشت نفت با شیوه طراحی آزمایش و با به کارگیری از روش سطوح پاسخ^۴ انجام داد [۹]. از مجموع مطالعات انجام گرفته توسط این افراد نتایج زیر حاصل می‌شود:

- جداسازی و به‌دام‌اندازی دی‌اکسیدکربن از لحاظ اقتصادی به صرفه و فرآیندی کلیدی در کاهش انتشار این گاز توسط صنایع است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که با فرآیند به‌دام‌اندازی دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۵۰ می‌توان از انتشار سالانه بیش از ۴ گیگاتن از این گاز گلخانه‌ای در جو زمین جلوگیری کرد.

- در منابع خالص دی‌اکسیدکربن می‌توان با متصل کردن فرآیند به‌دام‌اندازی به فرآیند ازدیاد برداشت هیدروکربن، هزینه تزریق را تأمین کرد و حتی باعث ایجاد درآمد شد [۲].

یکی از روش‌هایی که برای اقتصادی‌تر کردن فرآیند تزریق دی‌اکسیدکربن انجام می‌گیرد، پیوند این عملیات با فرآیند ازدیاد برداشت هیدروکربن می‌باشد. اگرچه از سال ۱۹۷۷ میلادی دی‌اکسیدکربن در مخازن نفتی با مقاصد ازدیاد برداشت نفت تزریق می‌شده است، اما به علت ضریب برداشت بالای مخازن گازی و احتمال اختلاط سریع دو گاز، فرآیند تزریق این گاز در مخازن گازی با هدف ازدیاد برداشت به طور همه جانبه مطالعه نشده است. در این مقاله سعی شده است که فرآیند تزریق دی‌اکسیدکربن در مخازن گازی با هدف ازدیاد برداشت گاز و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن مطالعه گردد. این مطالعه بر روی یک بخش از یکی از

از احتراق سوخت‌های فسیلی در کلیه بخش‌ها در سال ۱۳۷۷، ۲۷۱/۷ میلیون تن دی‌اکسیدکربن تولید شده و این رقم در سال ۱۳۸۷ به ۴۵۳/۷ میلیون تن افزایش یافته است [۴].

با توجه به رشد روزافزون انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو، نیاز به راهکارهایی برای کنترل و کاهش انتشار این گازها، بیش از پیش احساس می‌شود [۵]. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ویژه دی‌اکسیدکربن، تزریق آنها در ساختارهای زمین‌شناسی است. این فرآیند به عنوان یک برنامه زودبازده مطرح می‌باشد و می‌تواند باعث کاهش حجم زیادی از انتشار در جو گردد. در این روش دی‌اکسیدکربن از منابع انتشار گرفته شده، توسط خط لوله به محل تزریق منتقل می‌گردد و توسط چاه‌های تزریقی در سازندهای زیرزمینی ذخیره می‌شود [۶]. ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در ساختارهای زیرزمینی به دو دسته به دام‌اندازی فیزیکی و ژئوشیمیایی تقسیم می‌شود [۲ و ۷]. به‌دام‌اندازی فیزیکی شامل روش‌های ساختاری، چینه‌ای و هیدرودینامیکی می‌باشد و در روش ساختاری این گاز درون یک سازند زمین‌شناسی دارای پوش سنگ به دام می‌افتد.

تزریق دی‌اکسیدکربن به عنوان گاز گلخانه‌ای و با دیدگاه زیست محیطی در سازندهای زمین‌شناسی در دهه ۱۹۷۰ مطرح گردید اما تا اوایل دهه ۱۹۹۰ مطالعات ناچیزی در این مورد انجام گرفت. در سال ۱۹۹۶، اولین پروژه بزرگ مقیاس ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در دریای شمال بهره‌برداری شد. کاکیزی^۱، در سال ۲۰۰۳ مطالعاتی را در بهینه‌یابی هم‌زمان میزان نفت برداشتی و دی‌اکسیدکربن ذخیره شده در مخازن نفتی انجام داد و به این نتیجه رسید که با بهینه‌سازی عملیات تزریق متناوب آب و گاز^۲ می‌توان تا ۸۰٪ نفت در جای اولیه مخزن^۳ را برداشت کرد و در این فرآیند زمان شروع تزریق از اهمیت زیادی برخوردار است [۱]. کومار در سال ۲۰۰۷، بهینه‌یابی را بر روی مکان تزریق، در

1. Cakici

2. Water Alternative Gas (WAG)

3. Initial Oil in Place (IOIP)

4. Response Surface Method (RSM)

برخوردار است [۱۲].

- همچنین دی‌اکسیدکربن دارای خواصی می‌باشد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای ازدیاد برداشت مخازن گازی تبدیل می‌کند. این خواص عبارتند از: - چگالی دی‌اکسیدکربن فوق اشباع در شرایط مخزن ۲ تا ۶ برابر بیشتر از متان است که باعث نشست دی‌اکسیدکربن در لایه‌های پایینی مخزن و جابجایی بهتر متان می‌گردد. - انحلال‌پذیری بالای دی‌اکسیدکربن در آب سازند باعث به تعویق افتادن زمان میان‌شکن دی‌اکسیدکربن می‌گردد. - ضریب تحرک‌پذیری پایین‌تر این گاز نسبت به متان، باعث پایداری بیشتر فرآیند جابجایی می‌گردد [۱۲].

معرفی میدان و مدل شبیه‌سازی

برای انجام این مطالعه یک بخش از یکی از میداین گازی جنوب ایران انتخاب شده است. میزان گاز درجای این میدان ۴۲/۰۷۸ میلیارد متر مکعب و حجم گاز قابل استحصال آن ۳۸/۹۶۵ میلیارد متر مکعب می‌باشد. مدل این بخش گازی که توسط شبیه‌ساز ترکیبی^۳ Eclipse300 شبیه‌سازی شده است، شامل ۲۰×۲۰×۲۰ بلوک است که به صورت Block-Centered قرار گرفته‌اند. این بخش دارای ذخیره درجای ۱۰/۰۱۴۱ میلیارد مترمکعب است. در جدول ۱ می‌توان خواص استاتیک این مخزن را مشاهده کرد و جدول ۲ ترکیب سیال این میدان را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص استاتیک مخزن

پارامتر	واحد	مقدار
طول و عرض مخزن	m	۳۸۰۰×۳۸۰۰
ضخامت مخزن	m	۱۵۰
تخلخل میانگین	%	۹/۸۱۰
تراوایی میانگین در راستای X و Y	md	۲/۴۲۶
تراوایی میانگین در راستای Z	md	۱/۸۱۲
دمای میانگین مخزن	°C	۷۴
فشار اولیه مخزن	bar	۲۱۰/۱
عمق سطح آب و گاز	m	۱۶۹۰/۱۷

1. Net Present Value (NPV)

2. Initial Gas in Place (IGIP)

3. Compositional Simulator

میداین گازی جنوب ایران انجام شده است و در آن پس از انتخاب پارامترهای مؤثر بر فرآیند، در نهایت مقدار بهینه هر پارامتر برای ماکزیمم کردن تابع ارزش خالص تولید^۱ شناسایی شده است.

استفاده از دی‌اکسیدکربن برای ازدیاد برداشت

هیدروکربن

یکی از روش‌هایی که برای اقتصادی کردن فرآیند ذخیره دی‌اکسیدکربن انجام می‌گیرد پیوند این فرآیند با عملیات ازدیاد برداشت نفت یا گاز است. در این فرآیند میزان زیادی دی‌اکسیدکربن در مخزن تزریق می‌شود که باعث ازدیاد برداشت نفت و یا گاز شده و کاملاً عملیات را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند. در مقایسه با مخازن نفتی، مخازن گازی دارای چند نکته حائز اهمیت برای طرح‌های ذخیره‌سازی هستند، از جمله:

- در مخازن گازی محاسبه حجم ذخیره و ظرفیت تزریق نسبتاً آسان است و می‌توان پارامترهای میدانی را به سادگی از اطلاعات تولیدی بدست آورد و با برون‌یابی نمودارهای تولیدی آن‌ها را با خطای ناچیز به آینده تعمیم داد [۱۰].

- مخازن گازی نسبت به مخازن نفتی از ظرفیت تزریق بالاتری برخوردار هستند و حجم بیشتری از گاز را می‌توان در آنها تزریق کرد زیرا اولاً این مخازن دارای ضریب برداشت بالاتری (حدود ۶۵٪ گاز درجای اولیه^۲) نسبت به مخازن نفتی (حدود ۳۵٪ - نفت درجای اولیه) هستند و ثانیاً میزان چگالی سیال آنها پایین‌تر و ضریب تراکم‌پذیری آنها بالاتر است، لذا حجم آزاد بیشتری را می‌توانند در اختیار گاز جایگزین قرار دهند [۱۱].

- با تولید از مخازن گازی فشار مخزن دچار افت می‌شود و باعث غیراقتصادی شدن فرآیند تولید می‌گردد. تزریق در این شرایط باعث حفظ فشار شده و تولید را بالا می‌برد. این امر در مخازن گاز میعانی برای جلوگیری از رسیدن به نقطه شبنم دوم و تشکیل میعانات گازی در مخزن از اهمیت خاصی

جدول ۲- ترکیب سیال مخزن

جزء	درصد جزء در ترکیب	جرم مولکولی (مول/گرم)
N ₂	۹/۶۹۹	-
CH ₄	۸۵/۱۴۱	-
C ₂ H ₆	۱/۶۵۸	-
C ₃ H ₈	۰/۹۴۳	-
C ₄₊	۲/۰۸۳	۷۳/۷۲
C ₈₊	۰/۳۸۸	۱۱۷/۲۷
C ₁₁₊	۰/۰۸۸	۱۶۳/۰۷

تعریف تابع هدف مسئله

در هر عملیات بهینه‌یابی اولین و مهم‌ترین بخش انتخاب تابع هدف می‌باشد. در مسئله‌ای که در این مطالعه مطرح است. از آن جایی که در مسئله ذخیره دی‌اکسیدکربن، هزینه تزریق و سود حاصل از ازدیاد برداشت گاز مطرح است، تابع هدف به صورت تابع درآمد یا همان ارزش خالص تولید انتخاب شده است که رابطه آن به صورت معادله ۱ است.

$$NPV = CDMR.(FGIT_FNGIT) + NGP.(FGPT - FCPT) + CONP.FCONPT - CSC.FGIT - GSC.FCPT - WSC.FWPT \quad (1)$$

که در این رابطه CDMR، درآمد حاصل از مکانیزم توسعه پاک^۱، FGIT، میزان تزریق تجمعی گاز، FNGIT، میزان تزریق تجمعی گاز متان، NGP، قیمت فروش گاز طبیعی، FGPT، میزان تجمعی تولید گاز، FCPT، میزان تولید تجمعی گاز دی‌اکسیدکربن، CONP، قیمت فروش میعانات گازی، FCONPT، میزان تولید تجمعی میعانات گازی، CSC، هزینه ذخیره دی‌اکسیدکربن، GSC، هزینه جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز خروجی، WSC، هزینه جداسازی آب و FWPT، میزان تولید تجمعی آب را نشان می‌دهد و NPV بیان‌گر ارزش خالص تولید است.

میزان هزینه ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن تا حد زیادی به نوع پروژه تزریق، محل تزریق، نوع میدان (دریایی یا خشکی)، عمق سازند بستگی دارد، اما به طور میانگین در حدود ۰/۶ تا ۸/۳ دلار

به ازای هر تن دی‌اکسیدکربن است [۲]. قیمت جهانی گاز طبیعی با توجه به ارزش گرمایی آن محاسبه می‌شود. گاز طبیعی در سال ۲۰۱۱ نوسان قیمتی بین ۳ تا ۴/۵ دلار آمریکا در هر هزار فوت مکعب داشته است و اگر گاز مخزن را گاز طبیعی در نظر بگیریم، به طور میانگین قیمت ۳/۵ دلار آمریکا برای هر هزار فوت مکعب گاز مناسب است. قیمت نفت خام نیز در این سال حدود ۹۰ تا ۱۱۰ دلار آمریکا بوده است، لذا در تابع هدف میانگین قیمت میعانات ۱۰۰ دلار آمریکا به ازای هر بشکه در نظر گرفته شده است. هزینه جداسازی دی‌اکسیدکربن نیز در حدود ۸۰ دلار به ازای هر تن دی‌اکسیدکربن است [۱۳]. لازم به ذکر است که در معادله ۱ نرخ کاهش ارزش پول^۲ نیز ۱۰٪ اعمال شده است. در جدول ۳ مقدار پارامترهای استفاده شده در تابع هدف آمده است.

سناریوهای تزریق

در این مطالعه جهت بررسی فرآیند تزریق دی‌اکسیدکربن در مخازن گازی در بدو کار سه سناریو برای فرآیند تزریق و تولید بررسی شده است. هدف از این کار این است که بتوانیم سناریوی مناسب جهت انجام مؤثر عملیات ازدیاد برداشت گاز/ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن را مشخص کرده و برای بهینه کردن آن اقدام کنیم.

1. Clean Development Mechanism (CDM)

2. Discount Rate

جدول ۳- پارامترهای تابع هدف

پارامتر	واحد	مقدار
قیمت گاز پایه	US\$/ (m ³ ST) (US\$/MSCF)	۱۲/۶۱ (۳/۵)
قیمت میعانات گازی	US\$/ (m ³ ST) (US\$/bbl)	۶۴۱/۵۰ (۱۰۰)
هزینه ذخیره دی‌اکسیدکربن	US\$/tCO ₂	۵
هزینه جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز پایه	US\$/tCO ₂	۸۰
هزینه جداسازی آب از میعانات	US\$/ (m ³ ST) (US\$/bbl)	۹/۶۲ (۱/۵)
درآمد حاصل از مکانیزم توسعه پاک	US\$/tCO ₂	۱۰

تولید شده نسبت به سناریوی ۱ بیشتر است و ثانیاً میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده نسبت به سناریوی ۲ بسیار کمتر می‌باشد. این امر در حالی است که میزان ارزش خالص تولید این سناریو در نهایت از هر دو سناریوی قبلی بالاتر می‌باشد.

در مرحله بعد این مطالعه، بر روی ۷ پارامتر قابل کنترل مخزن شامل دبی چاه تولیدی، مکان تکمیل در ستون چاه تولیدی، دبی چاه تزریقی، مکان چاه تزریقی (شامل ۲ پارامتر X و Y چاه)، مکان تکمیل در ستون چاه تزریقی و ترکیب گاز تزریقی آنالیز حساسیت انجام شده است. از آن جایی که انجام آنالیز حساسیت بر روی این تعداد پارامتر به تعداد زیادی اجرای شبیه‌ساز نیاز دارد، لذا برای اجرای این هدف از روش طراحی آزمایش^۲ با الگوریتم بهینه- D،^۳ که تنها به ۳۴ اجرای شبیه‌ساز احتیاج دارد، استفاده شده است [۱۴ و ۱۵]. شکل ۲، نمودار احتمال نرمال اثرات پارامترها (با تابع هدف ارزش خالص تولید) را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که از این ۷ پارامتر، به ترتیب ۵ پارامتر دبی تزریق، ترکیب گاز تزریقی، مکان چاه تزریقی (شامل ۲ پارامتر X و Y چاه) و دبی چاه تولیدی دارای اثراتی بر تابع هدف هستند و دو پارامتر دیگر (مکان تکمیل در ستون چاه تولیدی و تزریقی) اثرات ناچیز و قابل چشم‌پوشی بر پارامتر دارند.

بررسی سناریوهای مختلف می‌تواند دیدی مناسب را نسبت به فرآیند ایجاد کرده و مکانیزم‌های اساسی را در فرآیند تزریق مشخص کند. برای این منظور سه سناریو در نظر گرفته شده است و در هر کدام از این سناریوها میزان ارزش خالص تولید و دی‌اکسیدکربن ذخیره و تولید شده مقایسه می‌گردد. این سه سناریو عبارتند از:

- تولید از مخزن با مکانیزم تخلیه، بدون تزریق دی‌اکسیدکربن (سناریوی ۱)

- تزریق دی‌اکسیدکربن از ابتدای شروع تولید (سناریوی ۲)

- تزریق دی‌اکسیدکربن پس از تخلیه مخزن (سناریوی ۳)

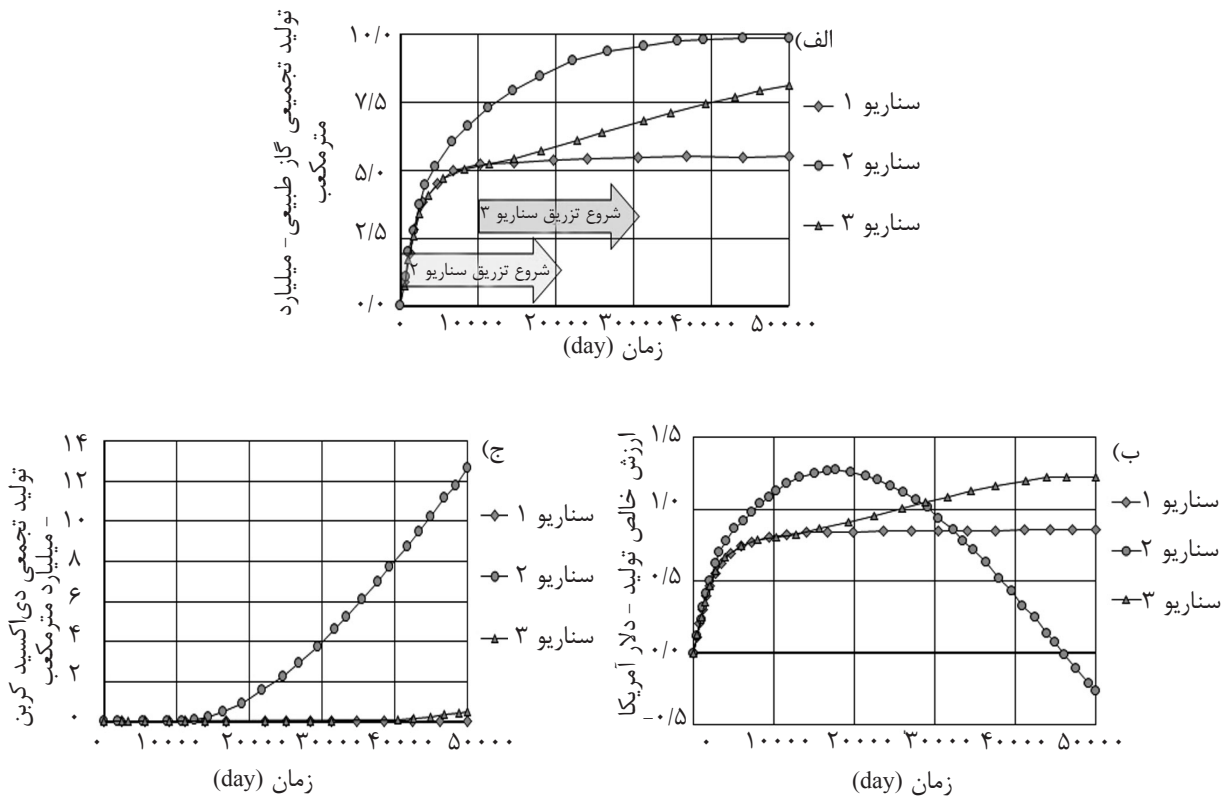
سناریوی اول شامل حالت پایه می‌باشد که در آن تزریق دی‌اکسیدکربن انجام نمی‌گیرد و برای مقایسه با دو سناریوی دیگر مطالعه می‌شود. در سناریوی دوم هم‌زمان با شروع تولید از چاه تزریقی نیز دی‌اکسیدکربن با هدف حفظ فشار مخزن و تولید گاز بیشتر انجام می‌گیرد و در نهایت در سناریوی سوم، ابتدا از مخزن گاز تولید می‌شود تا مخزن تخلیه شده و به فشار ترک^۱ برسد و سپس دی‌اکسیدکربن با هدف ازدیاد برداشت گاز در مخزن تزریق می‌گردد. شکل ۱، نتایج حاصل از بررسی این سناریوها را نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل ۱ می‌توان تشخیص داد که سناریوی ۳ مناسب‌ترین سناریو برای فرآیند تزریق می‌باشد زیرا در این سناریو، اولاً میزان گاز طبیعی

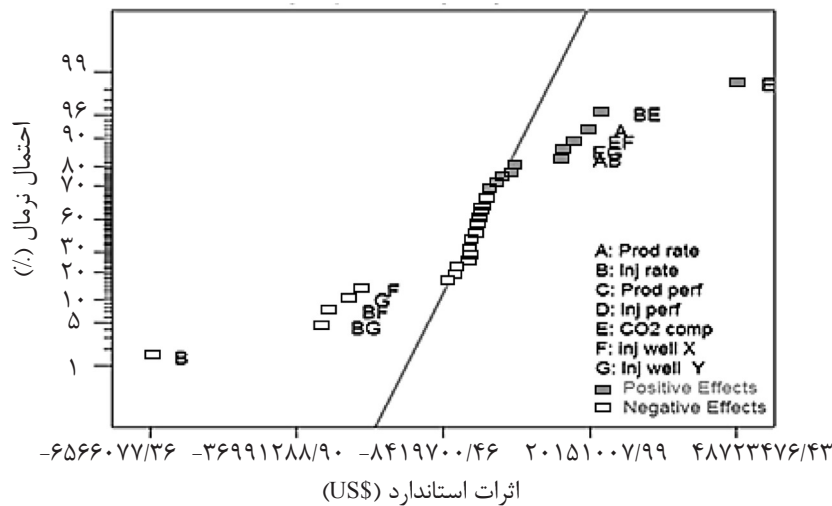
1. Abandonment Pressure

2. Design of Experiment (DOE)

2 D-optimal Algorithm



شکل ۱- (الف) تولید تجمعی گاز طبیعی بر حسب زمان، (ب) ارزش خالص تولید بر حسب زمان، (ج) تولید تجمعی دی‌اکسید کربن بر حسب زمان در سناریوهای مختلف



شکل ۲- درصد احتمال نرمال اثرات استاندارد پارامترهای بررسی شده

کروموزوم تولید می‌گردد. همچنین نسبت انتخاب در آن برابر ۰/۴، نسبت جهش ۰/۱۵ و محدوده تغییرات 10^{-12} انتخاب شده است. در جدول ۴ حدود پارامترهای تحت بهینه‌یابی و مقدار بهینه شده آن آمده است و شکل ۳، نمودار هزینه کروموزوم برانده را بر حسب شماره نسل نمایش می‌دهد.

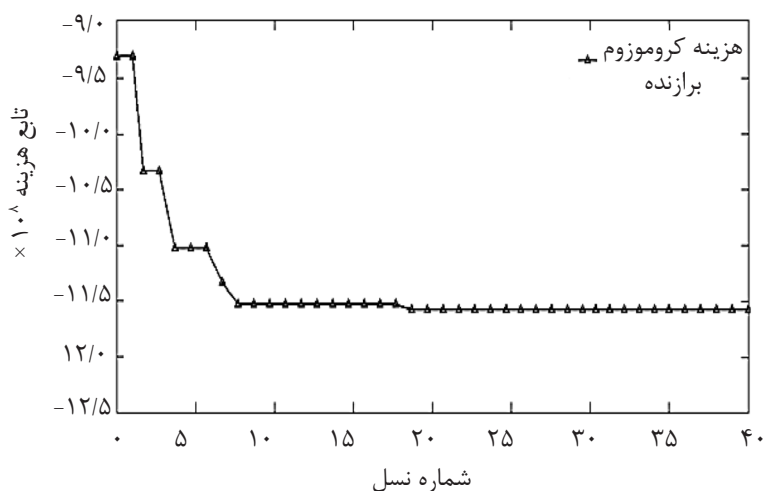
پس از انتخاب پارامترهای مؤثر بر فرآیند با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ عملیات بهینه‌یابی پارامترها صورت گرفته است. برای این منظور از یک الگوریتم ژنتیک مبنای ۲، استفاده شده است و قبل از آن نیز پارامترهای تحت بهینه‌یابی گسسته‌سازی شده است. در این الگوریتم تعداد بیت به ازای هر کروموزوم برابر ۲۱ می‌باشد و در هر نسل تعداد ۲۰

1. Genetic Algorithm (GA)

جدول ۴- پارامترهای تابع هدف

پارامتر	دبی تولید	دبی تزریق	دی‌اکسیدکربن	چاه تزریقی X	چاه تزریقی Y
واحد	Sm ³ /day	Sm ³ /day	%	-	-
تعداد بیت	۵	۵	۳	۴	۴
شرایط بهینه [†]	۳۷۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۲۰

[†] مقدار بهینه ارزش خالص تولید = ۱,۱۶۹,۰۴۶,۵۰۰ دلار آمریکا



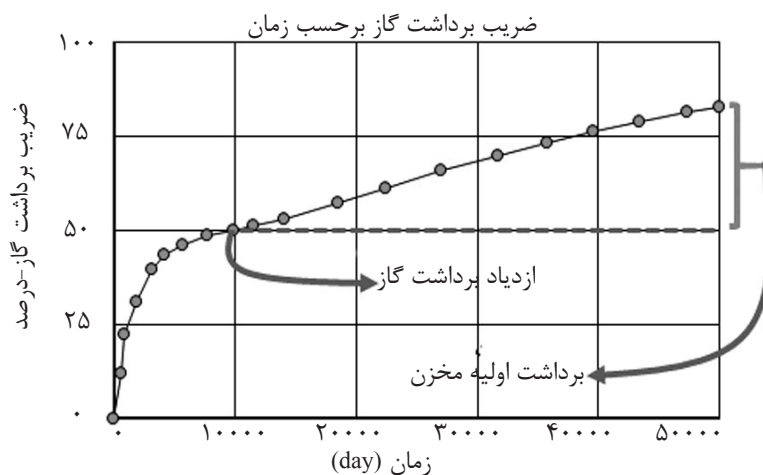
شکل ۳- هزینه کروموزوم برازنده بر حسب شماره نسل

دی‌اکسیدکربن در شرایط عملیاتی بهینه (پس از تخلیه اولیه مخزن) می‌تواند ضریب برداشت گاز از این مخزن را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد. در شکل ۵ نیز می‌توان میزان تولید تجمعی گاز دی‌اکسیدکربن و گاز طبیعی و همچنین حجم دی‌اکسیدکربن ذخیره شده در مخزن را مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل مشخص است میزان گاز دی‌اکسیدکربن تولید شده بسیار کمتر از دی‌اکسیدکربن ذخیره شده در مخزن می‌باشد که نشان از موفقیت عملیات دارد. در نهایت شکل ۶ نمودار ارزش خالص تولید را بر حسب زمان برای شرایط بهینه و یک شرایط غیربهینه انتخابی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورتی که پارامترها در موقعیت بهینه خود تنظیم نباشند، میزان ارزش خالص تولید پس از مدتی دچار افت شدید می‌گردد و این امر نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌یابی در مسئله نشان می‌دهد.

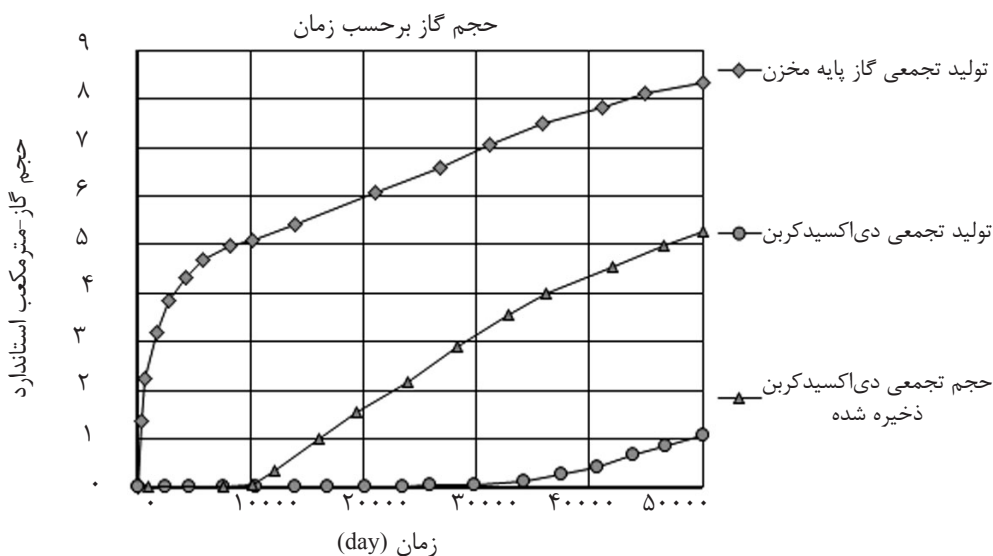
با توجه به شرایط بهینه به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و محل چاه‌های تزریقی می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که تزریق در حالت دی‌اکسیدکربن خالص با الگوی تزریق پنج نقطه‌ای با چاه تزریقی مرکزی بهترین نتایج را برای عملیات تزریق در بر دارد و همچنین میزان دبی تزریق باید کمتر از دبی تولید باشد که سبب میان‌شکن سریع گاز تزریقی در چاه تولیدی نشود و میزان اختلاط دو گاز به مینیمم مقدار خود برسد.

نتایج

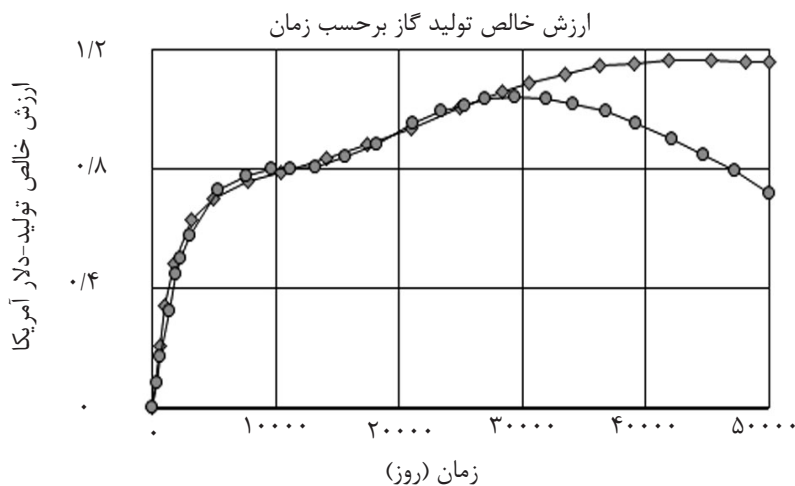
پس از یافتن شرایط بهینه برای عملیات تزریق دی‌اکسیدکربن در مخزن می‌توان نتایج شبیه‌ساز را در شرایط بهینه مشاهده کرد و با توجه به آنها تفسیراتی را برای عملیات ارائه نمود. شکل ۴، نمودار ضریب برداشت گاز را بر حسب زمان نمایش می‌دهد که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که تزریق



شکل ۴- ضریب برداشت گاز بر حسب زمان



شکل ۵- تولید تجمعی دی اکسیدکربن و گاز طبیعی تولید شده و میزان دی اکسیدکربن ذخیره شده بر حسب زمان



شکل ۶- ارزش خالص تولید بر حسب زمان برای شرایط بهینه و غیربهینه

نتیجه‌گیری

از مجموعه مطالعات انجام شده در این مقاله نتایج زیر قابل استنتاج است:

- انجام فرآیند تزریق دی‌اکسیدکربن در مخازن گازی تخلیه شده با هدف ازدیاد برداشت گاز و ذخیره دی‌اکسیدکربن، فرآیندی موفق است و می‌تواند باعث بیش تولید مقدار زیادی گاز از مخزن شود. همچنین به دلیل استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن برای افزایش برداشت این فرآیند باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده که از دیدگاه محیط زیستی مطلوب می‌باشد.

- پیوند دو فرآیند ذخیره گاز دی‌اکسیدکربن و ازدیاد برداشت گاز، عملیات ذخیره‌سازی گاز گلخانه‌ای را از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌کند و باعث ایجاد درآمد اضافی ناشی از ازدیاد برداشت گاز می‌گردد. همچنین اگر چنین فرآیندی به یک نیروگاه تولید برق با سوخت گاز متصل گردد می‌تواند باعث ایجاد واحدی با مصرف گاز مخزن و بدون تولید دی‌اکسیدکربن تبدیل گردد.

- برای تزریق دی‌اکسیدکربن بهترین و مؤثرترین سناریو، تزریق گاز پس از تخلیه اولیه مخزن با مقاصد ازدیاد برداشت است.

- در فرآیند ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن/ازدیاد برداشت گاز پارامترهایی مانند مکان چاه تزریقی، شرایط عملیاتی تزریق تولید (دبی) و غلظت گاز تزریقی از اهمیت بالایی برخوردار هستند و باید در انتخاب آنها دقت نمود.

- در فرآیند تزریق گاز دی‌اکسیدکربن به منظور ازدیاد برداشت گاز، بهینه‌یابی پارامترهای مؤثر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در صورت مناسب نبودن این پارامترها به علت اختلاط شدید گاز مخزن با دی‌اکسیدکربن مقدار ارزش خالص تولید به علت هزینه‌های بالای جداسازی به شدت کاهش می‌یابد. برای یک مخزن بدون ناهمگونی‌هایی از نوع شکاف و گسل الگوی تزریق پنج نقطه‌ای با دی‌اکسیدکربن خالص گزینه‌ای مناسب است. در این حالت باید میزان دبی تزریق کمتر از دبی تولید باشد تا دی‌اکسیدکربن دیرتر وارد چرخه تولید گردد.

تشکر و قدردانی

در پایان از مسئولان شرکت نفت مناطق مرکزی به خاطر حمایت مالی و تأمین مدل مخزن تشکر می‌گردد.

مراجع

- [1]. Cakici M. D., "Co-optimization of oil recovery and carbon dioxide storage", Graduate Thesis, Stanford University, pp. 1-2 and 51-52, 2003.
- [2]. IPCC Special Report, "Carbon dioxide capture and storage", Cambridge University Press, New York, pp. 19, 197-202 and 208, 2005.
- [3]. Gupta A., "Capacity and constraints for carbon dioxide sequestration in aquifers and depleted oil/gas reservoirs in carbonate environment", SPE 135595, 2010.
- [4]. گروه مدیریت انرژی، ترازنامه هیدروکربنی کشور سال ۱۳۸۷، مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ص ۵۱۱، ۱۳۸۸.
- [5]. Oldenburg C. M., Bryant S. L., and Nicot J. P., "Certification framework based on effective trapping for geologic carbon sequestration", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 3, 2009.
- [6]. Faiz M. M., Saghafi A., Barclay S. A., Stalker L., Sherwood N. R., and Whitford D. J., "Evaluating geological

sequestration of CO₂ in bituminous coals: The southern sydney basin", Australia as a Natural Analogue, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 1, 2007.

[7]. Lu H., Lin C. K., Lin W., Liou T., Chen W., and Chang P., "A natural analogue for CO₂ mineral sequestration in miocene basalt in the kuanhsi-chutung area, northwestern taiwan", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 5, pp. 1329-1338, 2011.

[8]. Kumar D., "Optimization of well settings to maximize residually trapped CO₂ in geologic carbon sequestration", MS Thesis, Stanford University, pp. 57-58, 2007.

[9]. Ghomian Y., "Reservoir simulation studies for coupled CO₂ sequestration and enhanced oil recovery", PhD Thesis, The University of Texas at Austin, pp. 209-214, 2008.

[10]. Scharf C. and Clemens T., "CO₂-sequestration potential in austrian oil and gas fields", SPE 100176, 2006.

[11]. Mamora D. D. and Seo J. G., "Enhanced gas recovery by carbon dioxide sequestration in depleted gas reservoir", SPE 77347, 2002.

[12]. Al-Hashami A., Ren S. R., Tohidi B., "CO₂ injection for enhanced gas recovery and geo-storage: reservoir simulation and economics", SPE 94129, 2005.

[13]. "Strawman document for CO₂ Capture and storage (CC&S) technology roadmap", 1st Canadian CC&S Technology Roadmap Workshop, pp. 29, 2003.

[14]. Montgomery D. C., "Design and analysis of experiments", John Wiley and Song Publication, 5th Edition, pp. 2-3, 170, 249, 253, 1997.

[15]. Kleijnen J. P. C., "Design and analysis of simulation experiments", Springer Publication, pp. 19-22, 52, 2008.