بهینه سازی همزمان ذخیره سازی زیرزمینی گاز و ازدیاد برداشت نفت در فرایند تزریق گاز کربن دی‌اکسید با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه

محمد امین صفرزاده*+•، مهدیا مطهری

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مطالعات مخازن و توسعه میادین

چکیده: *انتشار بی وقفه ی گازهای گلخانه‌ای یکی از نگرانی‌های مهم جامعه‌ی جهانی است. نیمی از افزایش غلظت کربن دی‌اکسید تنها در ۵۰ سال اخیر اتفاق افتاده است، ترکیبی که به لحاظ وزنی بیشترین درصد گازهای گلخانه‌ای منتشر شده را تشکیل می‌دهد. مخازن هیدروکربوری به دلیل داشتن پوش سنگ، محل مناسبی برای دفع گاز کربن دی اکسید است. از سوی دیگر، به دلیل افزایش تقاضای جهانی نفت خام، افزایش عمر مخازن و لزوم اتخاذ روش های ازدیاد برداشت برای پاسخگویی به این تقاضا، تزریق گاز کربن دی اکسید دارای اهمیت است. از این‌رو به‌کارگیری روشی برای بهینه سازی همزمان بیشترین ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در مخزن و افزایش تولید نفت در اثر این تزریق ضروری است. درگذشته به دلیل نبود روش‌های مناسب بهینه سازی، بیشتر مسئله‌های بهینه‌سازی چند هدفه به عنوان مسئله‌های بهینه سازی تک هدفه مورد بررسی قرارمی‌گرفت. امروزه، با توسعه الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه، امکان افزایش قدرت تصمیم‌گیری و کاهش ریسک برای کارشناسان و مدیران مخازن هیدروکربنی فراهم شده است. در این پژوهش با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب در یکی از مخازن نفتی، گزینه‌های مناسب برای تزریق گاز کربن دی اکسید با درنظرگرفتن بهینه سازی همزمان ذخیره سازی گاز و ازدیاد برداشت نفت ارایه شده است. در این روش هیچ ادغامی میان هدف‌ها صورت نمی‌پذیرد و ضمن بهینه‌سازی مستقیم هر یک از آنها، چندین سناریوی بهینه طرح می‌شود. از برتری‌های این روش بهینه سازی، امکان اصلاح سناریوی تولید با توجه به تغییر در مقدارهای پارامترهای اقتصادی است.*

واژه‌های کلیدی: *گازهای گلخانه‌ای، تزریق گاز، ذخیره سازی گاز، ازدیاد برداشت نفت، الگوریتم های بهینه‌سازی چند هدفه.*

KEY WORDS: *Greenhouse gas effect, gas injection, CO_2 EOR, CO_2 Storage, Non-dominated genetic algorithm.*

مقدمه

مهمترین دلیل افزایش غلظت گاز کربن دی اکسید در جـو، استفاده‌ی بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی به منظور تولید انـرژی اسـت. این اتفاق که از دیدگاه کارشناسان محیط زیست به معنـای ایجـاد تغییرهای آب و هوایی در زمین بود، توجه افکار عمومی جهـان را

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: safarzadehma@ripi.ir ; ma.safarzadeh@tehranenergy.com

آدرس دیگر: تهران، مشاوران انرژی تهران

به خود معطوف ساخت و منجر به برگزاری گردهمایی‌های بسیاری در راستای بررسی و تبیین قوانین کاهش تولید کربن دی‌اکسید در کشورهای گوناگون شد [۱]. از این میان، پروتکل کیوتو[۱] طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ میلادی، کشورهای توسعه یافته را ملزم به کاهش متوسط ۵/۲ درصدی تولید گازهای گلخانه‌ای و رساندن آن به میزان تولید کربن دی‌اکسید در سال ۱۹۹۰ میلادی نمود. مجمع بین المللی بررسی تغییرهای آ ب و هوایی[۲] اعلام نموده است غلظت دی‌اکسیدکربن در سال ۲۱۰۰ به مقدار ۵۷۰ppm خواهد رسید که به معنای افزایش متوسط دمای جهانی به میزان ۱/۹°Cو نیز افزایش متوسط سطح آب دریاها به میزان ۳۸ متر خواهد بود [۴ ـ ۲]. به منظور کاهش غلظت کربن دی اکسید روش‌های بسیاری مانند ذخیره سازی در اعماق اقیانوس‌ها و ذخیره‌سازی زیرزمینی در آبده مخازن نفتی و گازی برای کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای پیشنهاد شده است. روش‌های ذخیره سازی زیر زمینی گاز کربن دی اکسید شامل ذخیره‌سازی در مخازن تخلیه شده نفت و گاز، آبده است[۱]. برای اولین بار در ابتدای دهه‌ی ۹۰ میلادی با تکیه بر مطالعه‌های گروه‌های مستقل، فرایند ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در نروژ در مقیاس گسترده انجام شد. پروژه‌ی اسلیپنر اولین فرایند ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در آبده است که به صورت کاملاً تجاری انجام شد. از سال ۱۹۹۶ میلادی سالانه حدود یک میلیون تن گاز کربن دی اکسید در میدان اسلیپنر نروژ واقع در دریای شمال توسط شرکت استات اویل تزریق می‌شود [۲].

از سوی دیگر، تجربه‌های ارزشمندی در زمینه ی تزریق گاز کربن دی اکسید در میدان‌های نفتی به منظور ازدیاد برداشت نفت به دست آمده است. در این چارچوب تزریق گاز کربن دی اکسید در مخازن نفتی نسبت به مخازن گازی دارای اولویت است. مکانیسم‌های اصلی در روش تزریق گاز کربن دی اکسید که مرتبط با رفتار فازی کربن دی اکسید هستند عبارتند از کاهش گرانروی نفت در جا، انحلال پذیری بالای گاز کربن دی اکسید در نفت، کاهش دانسیته‌ی نفت، تبخیر اجزای میانی نفت، کاهش کشش سطحی نفت ـ کربن دی اکسید ، کاهش کشش سطحی نفت ـ آب، کنترل فشار در نزدیکی چاه‌های تولیدی می‌باشند. اولین تزریق تجاری گاز کربن دی اکسید در سال ۱۹۷۲ میلادی در تگزاس امریکا توسط شرکت چورون انجام شد [۶، ۵]. پژوهشگران بسیاری در زمینه‌ی بهبود ازدیاد برداشت نفت فعالیت داشتند. از جمله *مروجی* که در سال ۲۰۰۸ میلادی به بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی مکان چاه پرداخت.

تفاوت‌های بنیادینی بین فرایند ازدیاد برداشت و فرایند همزمان ازدیاد برداشت نفت – ذخیره سازی گاز وجود دارد. در فرایندهای ازدیاد برداشت هدف افزایش میزان تولید نفت در ازای کمترین میزان گاز کربن دی اکسید تزریقی است و باید هزینه‌ی مربوط به خرید یا جداسازی گاز کربن دی اکسید پرداخت شود. اما در عملیات همزمان ازدیاد برداشت و ذخیره سازی، هدف اصلی افزایش میزان نفت تولیدی و ظرفیت ذخیره سازی کربن دی اکسید است به صورتی که سرانجام و در انتهای عمر مخزن حجم زیادی از آن را گاز کربن دی اکسید اشغال کرده باشد. پارامترهایی که می‌بایست برای انجام عملیات‌های ذخیره سازی و ازدیاد برداشت در مخازن نفتی مورد مطالعه قرار گیرد عبارتند از عمق مخزن، دانسیته نفت، ظرفیت ذخیره سازی، حجم نفت و آب درجا و ضخامت مخزن [۷]. *قمیان* و *همکاران* درسال ۲۰۰۸ میلادی بررسی اقتصادی جامعی را با استفاده از شبیه سازی ترکیبی در ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز انجام داند. هدف آنها به دست آوردن نوع و کمترین میزان مشوق‌های مالی برای شرکت‌های نفتی در آمریکا بود به‌طوری که ذخیره سازی گاز در این میدان‌های نفتی عملی شود. *رواگنانی* و *همکاران* در سال ۲۰۰۹ میلادی مدل اقتصادی ـ عملیاتی را برای ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید (به دست آمده از صنایع واقع درشمال برزیل) همزمان با ازدیاد برداشت در یک مخزن نفتی ارایه نمودند. شبیه سازی براساس موازنه‌ی جرم، انرژی، آنتروپی و بر پایه ی تحلیل‌هایاقتصادی انجام پذیرفت. *جهانگیری وهمکاران* در سال ۲۰۱۰ میلای تأثیر استراتژی‌ها و زمان های تزریق گوناگون بر میزان بازیافت نفت و گاز ذخیره سازی شده را در یک مخزن ساختگی سه بعدی و ناهمگن بررسی نمودند. آنها از الگوریتم‌های گوناگون تکاملی بدین منظور استفاده نمودند. *چن*[۳] در سال ۲۰۱۲ میلادی به بهینه سازی فرایند ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز پرداخت. وی با استفاده از روش

(۱)Kyoto protocol

(۲)International Panel on Climate Change (IPCC)

(۳)Shengnan Chen

بهینه سازی هیبریدی میزان نرخ تزریق، نسبت حجمی گاز به آب و حجم هر دوره‌ی تزریق در فرایند تزریق متناوب آب و گاز را بهینه نمود. اتخاذ قوانین بازدارنده به عنوان گزینه‌ای مؤثر در زمینه‌ی ذخیره‌سازی یاد می‌شود. در سال ۲۰۰۰ میلادی مقدار مالیات در نظر گرفته شده برای هر تن گاز کربن دی اکسید ۱۵۰ دلاربود. میزان مالیات در برخی کشورها به ۷۰۰ حدود دلار به ازای هر تن نیز می‌رسد [۷].

با نگاهی به آمار تولید در کشور می‌توان دریافت برخی از میدان‌های قدیمی نفت به مرحله غیر اقتصادی از منظر تولید نزدیک شده‌اند. میدان‌های موجود در خشکی سالانه میزان کاهش تولیدی در حدود ۹ تا ۱۱ درصد را تجربه می‌نمایند درنتیجه استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت ثانویه/ثالثیه در میدان‌های نفتی کشور است. با توجه به افزایش میزان مصرف خانگی و نیاز بازارهای جهانی به گاز طبیعی، شاید استفاده از گاز طبیعی در فرایندهای ازدیاد برداشت غیر منطقی به نظر برسد. از گاز کربن دی اکسید می‌توان به عنوان گاز جایگزین و با برتری مهم کاهش آلودگی نام برد. این درحالی است که پیش بینی می‌شود تولید گازهای گلخانه ای در ایران در حدود ۱۱ درصد در طول ۱۰ سال آینده افزایش یابد[۸].

بیان مسئله و روش حل آن

بیشترین کردن همزمان حجم گاز کربن دی اکسید ذخیره شده در مخزن و افزایش تولید نفت در اثر تزریق، مسئله اصلی این پژوهش است. برای پاسخگویی به این مسئله فرایند بهینه‌سازی زیر باید انجام شود.

پس از ساخت مدل مخزن، به منظور جلوگیری از تداخل ناحیه تحت تأثیر هر چاه با یکدیگر، ناحیه‌ی مربوط به هر چاه به صورت فرضی مرزبندی می‌شود. سپس آنالیز حساسیت به منظور شناخت مؤثرترین پارامترها انجام می‌شود. هدف از شناخت این پارامترها، بررسی تأثیر انتخاب تابع هدف بر انتخاب پارامترها و همچنین تعیین بازه ی مناسب برای مقداردهی به پارامترها در طول فرایند بهینه‌یابی است. در این مقاله از دو روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در رویکرد معمول (قسمت راست شکل ۱) پس از تعیین ضریب‌ها دو تابع ذخیره سازی و تولید نفت در تابع هدف فنی و تعیین تابع هدف اقتصادی بر اساس نظر تصمیم گیرنده، با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک سناریوی بهینه انتخاب می‌شود. در رویکرد جدید که در قسمت چپ شکل ۱ نشان داده شده، تابع هدف فنی بدون در نظر گرفتن ضریب‌هایی برای دو تابع ذخیره‌سازی و تولید نفت، تعیین می‌شود. پس از آن با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب که نوعی الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه است، نمودار پارتو ترسیم می‌شود. این نمودار نشان‌دهنده چند سناریوی بهینه بدون درنظرگرفتن پارامترهای اقتصادی است. با محاسبه تابع هدف اقتصادی در این مرحله می‌توان فرایند بهینه تزریق را در شرایط گوناگون برای دو حالت تزریق پیوسته گاز و تزریق متناوب آب و گاز مشخص کرد.

آنالیز حساسیت

همان‌گونه که اشاره شد از تجزیه حساسیت به منظور انتخاب پارامترهای ورودی مناسب در فرایند بهینه سازی چند هدفه استفاده می‌شود. در این مقاله از روش طراحی آزمایش D-Optimal استفاده می‌شود. دراین حالت ماتریس طراحی بهینه شامل n آزمایش است و میزان دترمینان X'X (X تابع ضریب‌های مدل) درمیزان بیشینه ی خود قرار دارد. این تعداد اجرا، بیشترین منطقه‌ی ممکن را در ناحیه آزمایش تحت بررسی قرار می‌دهد[۹،۱۰].

فرایند بهینه سازی چند هدفه

با اندکی تأمل در بیشتر مسئله‌های علمی تصمیم گیری می‌توان دریافت که اهداف یا معیارهای چندگانه ای مورد نظر می‌باشد و در گذشته به دلیل نبود روش‌های مناسب حل، بیشتر مسائل بهینه سازی چند هدفه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه مورد بررسی قرار می‌گرفت[۱۱،۱۲]. لیکن باید اشاره نمود که تفاوت‌های بنیادین در ماهیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه و تک هدفه وجود دارد. شکل عمومی مسئله‌های بهینه سازی چند هدفه به صورت زیر است:

$$\text{Minimize or Maximize} \quad F_m(x) \qquad m = 1, 2, \dots, M \qquad (۱)$$

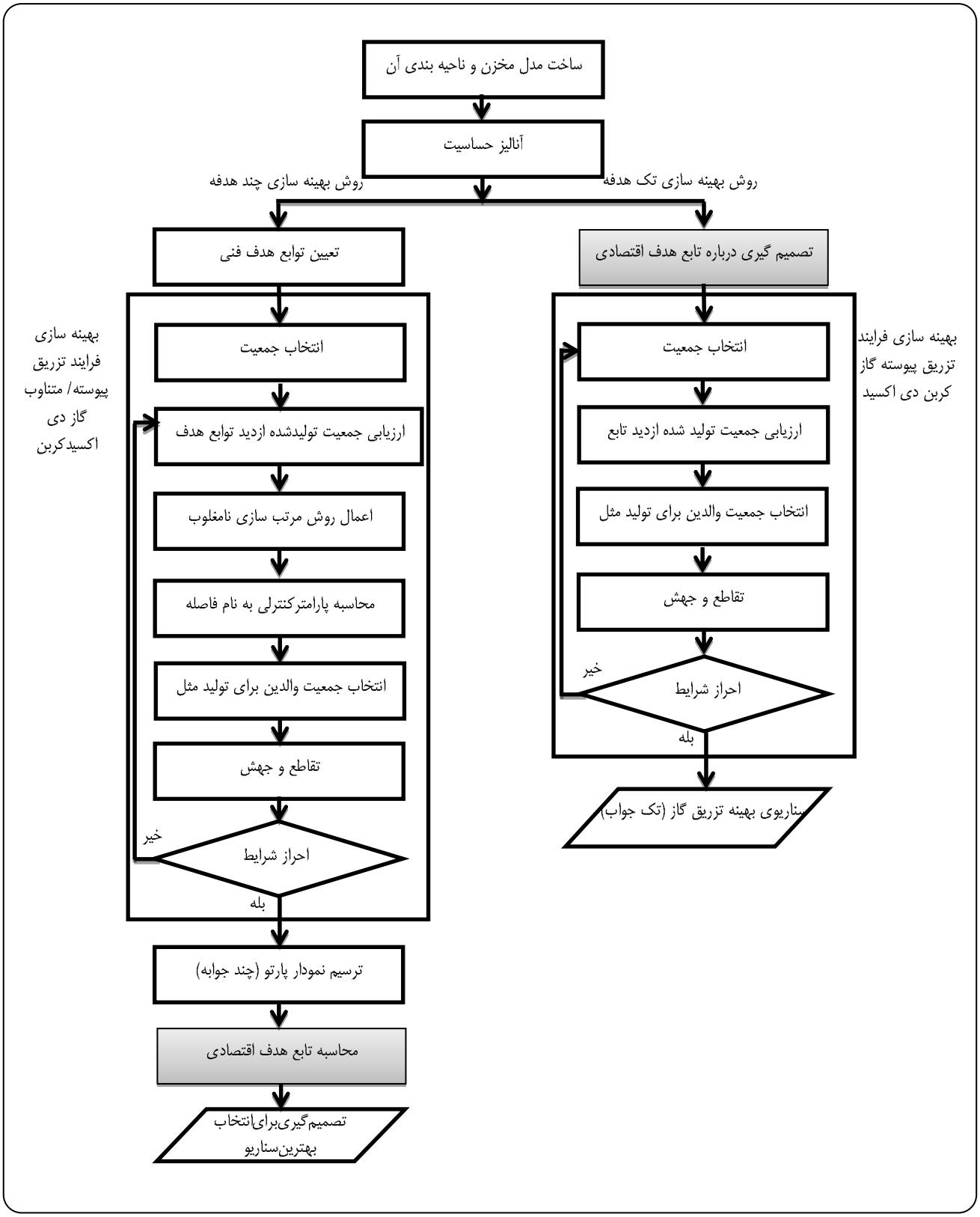
$$\text{ject to} \quad g_i(x) \geq 0, \qquad j = 1, 2, 3, \dots, J$$

$$h_k(x) = 0, \qquad k = 1, 2, 3, \dots, K$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \qquad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

یک جواب X، برداری از n متغیر تصمیم می‌باشد

$$X = \left(x_1, x_2, \dots, x_{_}\right)^T \qquad (۲)$$



شکل ۱ـ الگوریتم مورد استفاده برای بهینه سازی همزمان بیشترین ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید و افزایش تولید نفت در فرایند تزریق گاز.

عبارت‌های $g_l(x)$ و $h_k(x)$ تابع‌های محدودیت نامیده می‌شوند. مجموعه‌ی محدودیت‌های اخیر، حدود متغیرها نامیده می‌شود که هر متغیر تصمیم را محدود به گرفتن مقداری بین یک حد پایینی x_i^L و یک حد بالایی x_i^U می‌نماید. این حدود، فضای متغیر تصمیم (D)[۱] را شکل می‌دهند. یک جواب x که تمام J+K محدودیت و همه 2n حدود متغیر را برآورده نسازد یک جواب غیرموجه نامیده می‌شود. مجموعه جواب‌های موجه منطقه موجه[۲] (S) یا فضای جستجو نامیده می‌شود. در معادله‌ی یاد شده تعداد M تابع هدف وجود دارد که در هرتابع میزان کمینه یا بیشینه مورد نظر است. روش‌های کلاسیک حل مسائل بهینه یابی چند هدفه با تبدیل به مسایل بهینه‌سازی تک هدفه از حدود چهار دهه‌ی پیش مطرح شده‌اند. در طول این دوره الگوریتم‌های زیادی مطرح شده اند و پژوهشگران زیادی تلاش نموده اند تا این الگوریتم‌ها را مبتنی بر ملاحظه‌های گوناگون تقسیم بندی نمایند. در روش مجموع وزنی کاربر با ضرب کردن هر یک از هدف‌ها در وزن پیشنهادی خود، آنها را به یک هدف واحد تبدیل می‌کند. در برخورد با هدف‌های چند گانه این روش ساده ترین راه حلی است که به ذهن می‌رسد. برای مثال اگر تابع هدف عبارت از دو تابع شماره یک (ازدیاد برداشت نفت) و تابع شماره دو (افزایش ذخیره‌سازی گاز) باشد، روش کلاسیک با بیشینه نمودن مجموع وزنی این توابع، بهینه سازی را انجام می دهد. اگرچه این ایده در اصل ساده است اما پرسشی نه چندان ساده را مطرح می نماید که کاربر چه مقدارهایی را برای وزن‌ها در نظر گیرد. روشن است که پاسخ یگانه برای این سوال وجود ندارد. به طور معمول وزن یک هدف متناسب با اهمیت نسبی هدف در مسئله انتخاب می‌شود. در بیشتر مسائل بهینه یابی غیر خطی یک مجموعه یکنواخت توزیع شده ای از بردارهای وزنی، لزوماً منجر به یافتن مجموعه یکنواخت توزیع شده‌ای از جواب‌های بهینه پارتو نمی‌شود. از آنجا که این نگاشت به‌طور معمول ناشناخته است مشکل است بتوان برای به‌دست آوردن یک جواب بهینه‌ی پارتو در منطقه‌ی دلخواهی از فضای هدف بردار وزنی متناسب با آن را انتخاب نمود. همچنین بردارهای وزنی متفاوت لزوماً منجر به جواب‌های بهینه ـ پارتو متفاوتی نمی‌شوند. پاسخ به این سوال که چه بردارهای وزنی منجر به یک جواب بهینه یکسان شوند در مسئله‌های غیر خطی نامشخص است[۱۳،۱۴].

تعریف تابع هدف در رویکرد معمول

بیشتر توابع هدف تعریف شده و مورد استفاده در بررسی‌های جداگانه و همزمان فرایندهای ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید تا به امروز به صورت تک هدفی ارایه شده است. شکل کلی این توابع به صورت زیر می‌باشد :

تابع هدف=$W_1\times$ { (هزینه / درآمد) یا (حجم تولید نفت) } + فرایند ازدیاد برداشت

$W_2\times$ { (حجم گاز باقی مانده در مخزن) } فرایند ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن {(هزینه / درآمد) یا

W_1 : ضریب در نظر گرفته شده برای ازدیاد برداشت نفت (مبین اهمیت ازدیاد برداشت نفت)

W_2 : ضریب در نظر گرفته شده برای ذخیره‌سازی گاز کربن دی‌اکسید (مبین اهمیت ذخیره سازی گاز)

در بیشتر موردها ضریب‌های در نظر گرفته شده ۰٫۵ می‌باشد. به عنوان نمونه، *کوسک* در سال ۲۰۰۴ میلادی تابع هدفی را به‌صورت ترکیبی از میزان بازیافت نفت بی بعد و میزان ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید بی بعد تعریف کرد:

$$\text{ObjFun} = w_1 \times \frac{N_p^*}{OIP} + w_2 \times \frac{V_{CO_2}^R}{V^R} \qquad (۴)$$

که در آن $(w_1 0 \le w_1 \le 1)$ و $(w_2 = 1 - w_1)$ وزن‌ها، $V_{CO_2}^R$ حجم ذخیره شده کربن دی اکسید در مخزن، V^R حجم فضای متخلخل در مخزن، OIP حجم نفت درجا در ابتدای تزریق کربن دی اکسید و N_p^* میزان نفت خالص تولیدی بعد از تزریق کربن-دی‌اکسید است. *جهانگیری و همکاران*[۳] در سال ۲۰۱۰ میلادی تابع هدفی را به منظور انجام همزمان ازدیاد برداشت نفت / ذخیره سازی گاز ارایه دادند و ضریب‌ها را نیز همانند مطالعه‌های گذشته ۰٫۵ در نظر گرفتند.

تمام توابع هدفی که تاکنون پارامترهای مهم اقتصادی همانند تورم، مالیات وکاهش ارزش پول را پوشش می‌دهند نیز به همین فرمت ارایه شده‌اند. در این پژوهش تابع تک هدفه با فرمت شبیه به معادله (۳) به منظور مقایسه با تابع‌های چند هدفی ارایه شد :

(۱) Decision Variable Space

(۲) Feasible Region

(۳) Jahangiri et al.

$$NPV = \sum_{YEAR=1}^{YEAR=20} \left[(RE - CO) \times DF \right] \quad (۵)$$

$$RE = RE_{OIL} \times INR_{OIL} + RE_{GAS} \times INR_{GAS} + RE_{SEQUESTRATION}$$

$$CO = CO_{OIL} \times INC_{OIL} + CO_{WATERT} \times INC_{WATER} + CO_{REINJ} \times INC_{REINJ} + CO_{GAS_ING} \times INC_{GAS_INJ} + CO_{WAT_INJ} \times INC_{WAT_{INJ}} + CAPEX$$

RE_{OIL} : درآمد ناشی از فروش نفت

RE_{GAS} : درآمد ناشی از فروش گاز

$RE_{SEQUESTRATION}$: درآمد ناشی از ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید

CO_{OIL}: هزینه ناشی از جدا سازی نفت

CO_{WATER}: هزینه ناشی از جداسازی آب

CO_{REINJ}: هزینه ناشی از تزریق مجدد گاز دی اکسید کربن

$CO_{INJECTION}$: هزینه ناشی از تزریق گاز

DF: ضریب کاهش ارزش پول

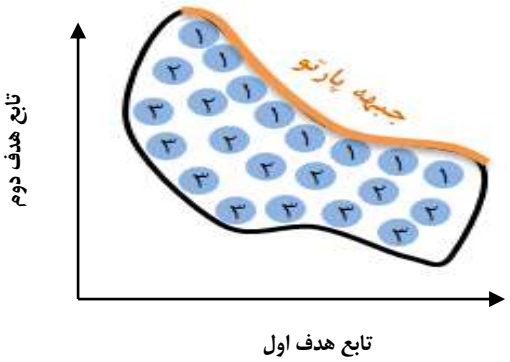
CAPEX: سرمایه اولیه مورد نیاز مانند هزینه حفر چاه

INR_{GAS}, INR_{OIL} ضریب تورم قیمت نفت و گاز

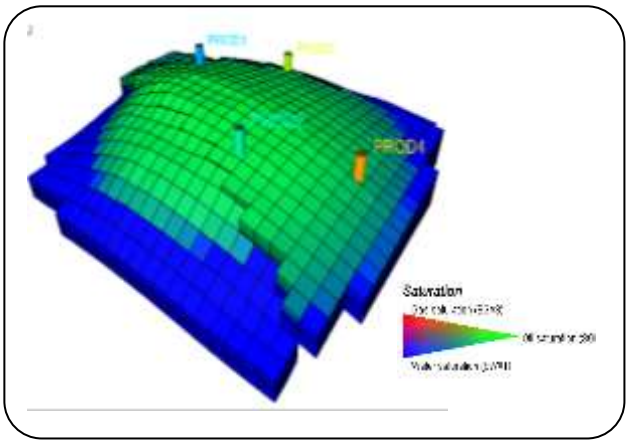
$INC_{WAT_{INJ}}, INC_{GAS_{INJ}}, INC_{RE_{INJ}}, INC_{OIL}$: ضریب تورم هزینه های جداسازی آب، نفت، بازگردانی و تزریق گاز

الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب(NSGA-II)

در این روش، در ابتدا جمعیت اولیه همانند معمول بر مبنای مقیاس و قیدهای مسئله ایجاد و از دید توابع هدف تعریف شده ارزیابی خواهد شد. در مرحله‌ی بعد مرتب سازی نامغلوب صورت می پذیرد. طبق تعریف، A بر C غلبه دارد اگر در هیچ تابعی بدتر از C نباشد و حداقل در یک تابع بهتر از آن باشد. اعضای جمعیت به چند دسته تقسیم می شوند. اعضای قرار گرفته در دسته اول، یک مجموعه کاملاً غیر مغلوب را نسبت به دیگر اعضای جمعیت تشکیل می دهند(شکل ۲) .اعضای موجود در دسته دوم نیز بر همین مبنا تنها توسط اعضای دسته اول مغلوب شده و این روند به همین صورت در دسته‌های دیگر ادامه می یابد. به تمام اعضای موجود در هر دسته، یک رتبه بر مبنای شماره دسته اختصاص داده شود.هدف بهینه سازی چند هدفه یافتن مجموعه جواب‌های پارتو (نامغلوب) مسئله مورد نظر است. دو هدف در نظر گرفته شده در فرایند بهینه سازی چند هدفه به روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب، میزان نفت تولیدی و میزان گاز ذخیره‌سازی شده می‌باشد.



شکل ۲ـ مفهوم غلبگی و جبهه پارتو در روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب



شکل ۳ـ نمایی از چاه‌های تولیدی میدان و توزیع اشباع سیالات موجود در مخزن.

پارامتر فاصله جمعیت[۱] برای هر عضو در هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه می باشد. در ادامه جمعیت والدین برای تولید مثل انتخاب و مراحل جهش و تقاطع صورت می پذیرد. سرانجام جبهه پارتو شکل می گیرد و هر جواب موجود در آن جوابی بهینه است [۱۵، ۱۶].

توصیف مدل مخزن و پارامترهای اقتصادی

مدل مورد استفاده دارای چهار چاه تولیدی می باشد. میزان اشباع سیال‌های گوناگون و چاه‌های تولیدی موجود در شکل۳ نشان داده شده است. فشار مخزن در ابتدای شروع

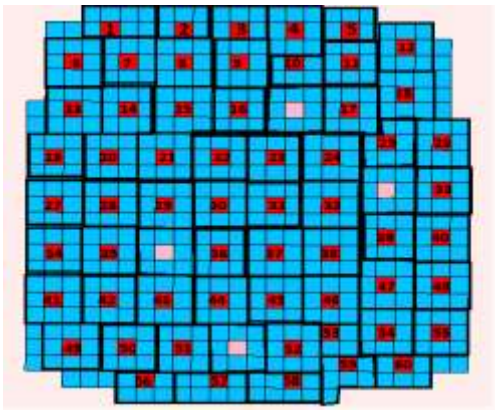
(۱)Crowding Distance

جدول ۱ـ ویژگی‌های مخزن مورد مطالعه.

فضای تخلخل	متوسط اندازه‌ی ابعاد بلوک در جهت z	متوسط اندازه‌ی ابعاد بلوک در جهت y	متوسط اندازه‌ی ابعاد بلوک در جهتx	تعداد بلوک	اشباع اولیه ی نفت
$۱/۳ \times ۱۰^{۹}$ فوت مکعب	۴۴ فوت	۴۵۲ فوت	۴۳۶ فوت		٪۳۰

جدول ۲ـ پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در فرایند بهینه سازی.

پارامتر	مقدار ($)	پارامتر	مقدار ($)
درآمد فروش نفت به ازای هر بشکه	۸۰	هزینه جداسازی و بازگردانی گاز دی اکسید کربن به ازای هر ۱۰۰۰ فوت مکعب	۲۵
درآمد فروش گاز به ازای هر ۱۰۰۰ فوت مکعب	۴	هزینه تزریق گاز به ازای هر ۱۰۰۰ فوت مکعب	۵
درآمد ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن به ازای هر تن	۸	هزینه تزریق آب به ازای هر بشکه	۵
نرخ کاهش ارزش پول	۰/۱۲	هزینه حفر هر حلقه چاه	۵ میلیون
هزینه جداسازی نفت به ازای هر بشکه	۲	ضریب تورم قیمت نفت و گاز	۰/۱۰
هزینه جداسازی آب به ازای هر بشکه	۵	ضریب تورم هزینه های جداسازی آب، نفت، بازگردانی و تزریق گاز و آب	۰/۰۵



مکان چاه‌های تولیدی (ثابت)
مکان های احتمالی چاه‌های تزریقی

شکل ۴- موقعیت‌های احتمالی اولین چاه تزریقی، پس از مشخص شدن مکان اولین چاه تزریقی به صورت خودکار آن مکان حذف و مکان چاه دوم در دیگر مکان‌ها انتخاب می‌شود.

سناریو ۳۳۳۲psi و عمق متوسط بالاترین لایه ۸۰۲۶ فوت می‌باشد. تراوایی مخزن در جهت‌های x و y یکسان و برابر ۲۵۲میلی دارسی، و در جهت z در حدود ۶/۵ میلی دارسی است. مدل شامل ۷۲۰۰ بلوک و میزان متوسط تخلخل آن ۱۶/۲۵ می باشد. برخی دیگر از یژگی‌های مخزن در جدول۱آورده شده است. مخزن در ابتدای تولید در حالت فوق اشباع[۱] قرار دارد.

به منظور جلوگیری از تداخل ناحیه تحت تأثیر هر چاه با یکدیگر و هوشمند سازی الگوریتم، مرزبندی ناحیه‌ی مربوط به هر چاه به صورت فرضی انجام شد (شکل ۴). چاه‌های تزریقی فقط در نقاط تیره رنگ می تواند حفر شوند. امکان تزریق چاه در ۶۰ موقعیت وجود خواهد داشت. با توجه به تعداد چاه‌های تزریقی، از حفر چند چاه در یک محل جلوگیری خواهد شد. به عنوان مثال اگر مکان های بهینه‌ی چاه‌های تزریقی ۵۳،۵۳،۴۰ باشد، چاه تزریقی اول در موقعیت ۵۳ حفر خواهد شد و این موقعیت از فضای جستجو حذف خواهد شد پس چاه دوم در موقعیت ۵۴ و سرانجام چاه سوم در موقعیت ۴۰ حفر خواهد شد.

مقدارهای مورد استفاده برای محاسبه تابع هدف اقتصادی در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

تجزیه حساسیت در مخزن مورد مطالعه با استفاده از روش D-Optimal

به منظور تجزیه پارامترهای گوناگون از نرم افزار Design Expert استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی در جدول۳

(۱)Undersaturated

جدول ۳ـ پارامترهای مورد استفاده به منظور تجزیه حساسیت در مخزن.

پارامتر	ابتدا ی بازه	انتهای بازه
تعداد چاه های تزریقی(Z)	۱	۳
مکان چاه‌های تزریقی(A,B,C)	۱	۶۰
ابتدای بازه‌ی مشبک کاری برای چاه‌های تزریقی(D,E,F) و تولیدی موجود(K,L,M,N) [بلوک]	۱	۷
طول بازه‌ی مشبک کاری برای چاه‌های تزریقی(G,H,J) و تولیدی موجود(O,P,Q,R)[بلوک]	۳	۵
نرخ تزریق گاز کربن دی اکسید (S,T,U)[MSCF/Day]	۳۰۰۰	۱۹۰۰۰
نرخ تولید نفت(V,W,X,Y)[STB/Day]	۱۵۰۰	۷۰۰۰
خلوص کربن دی اکسید تزریقی(A') [درصد]	۹۰	۱۰۰

جدول ۴ـ پاسخ‌های مورد بررسی در مخزن مورد مطالعه.

تابع هدف	الگوریتم بهینه سازی	پارامتر های موثربا تاثیر مثبت	پارامتر های موثربا تاثیر منفی
ارزش خالص فعلی	تک هدفه	A-W	Z-S-T
میزان نفت تولیدی نهایی	چند هدفه	M	B-V-A-S-Z-W
میزان کل گاز کربن دی اکسید ذخیره شده در مخزن	چند هدفه	T-U-S-Z	-

آورده شده است. تعداد ۳۵۷ آزمایش طراحی و تجزیه نتیجه‌ها به صورت خودکار (لینک نرم‌افزارهایDesign Expert، Eclipse 300 و Matlab) انجام پذیرفت.

مخزن مورد نظر به مدت ۱۰ سال تولید داشته است. تأثیر پارامترها بر توابع گوناگون در فرایند تزریق گاز کربن دی اکسید به مدت ۲۰ سال بعد بررسی شد. بر این اساس پارامترهای مؤثر بر روی سه تابع هدف شناسایی شد. نتیجه‌ها در جدول۴ نشان داده شده است.

مکان چاه‌های تزریقی و نرخ تولید نفت دارای تأثیر مثبت و تعداد چاه تزریقی، نرخ تزریق کربن دی اکسید دارای اثر منفی بر میزان تابع ارزش خالص فعلی هستند. میزان تولید نفت با افزایش طول مشبک کاری افزایش می یابد در حالی که افزایش تعداد چاه‌های تزریقی ، نرخ تولید نفت و تزریق دی اکسید کربن تأثیر منفی بر آن دارند. مکان چاه های تزریقی نیز بر میزان نفت تولیدی تأثیر گذار خواهد بود. میزان گاز کربن دی اکسید ذخیره شده در مخزن به نرخ‌های تزریق و تعداد چاه‌های تزریقی حساس می‌باشد. همان‌گونه که دیده می شود عامل‌هایی که بر میزان گاز ذخیره سازی شده تأثیر مثبت دارند دارای تأثیر منفی بر میزان نهایی نفت تولیدی است. نتیجه‌های به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد زمانی که میزان نفت تولیدی و حجم گاز کربن دی اکسید ذخیره شده به صورت تابع‌های پاسخ جداگانه لحاظ شوند مدل به طول و مکان مشبک کاری حساس است و زمانی که تابع پاسخ ارزش خالص فعلی در نظر گرفته می‌شود مدل حساسیتی به مکان و طول مشبک کاری نشان نمی دهد. در واقع تعریف کردن یک تابع تک هدفه در روبه رو شدن با چند تابع هدف، سبب حذف برخی پارامترهای مؤثر می شود. در ادامه نتیجه‌های به دست آمده از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه با لحاظ کردن ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک مورد استفاده که در جدول‌های ۵ و۶ نشان داده شده، ارایه می شود.

بهینه سازی تزریق پیوسته گاز کربن دی اکسید با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه

مدت زمان لازم برای بهینه سازی فرایند ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک تک هدفه در حالت تزریق پیوسته‌ی گاز ۱۲۸ ساعت می‌باشد. مخزن برای مدت ده سال به صورت طبیعی تولید داشته است. سناریوهای تزریق از ابتدای سال یازدهم آغاز شده و برای بیست سال ادامه خواهد یافت و در این زمان پارامترهای عملیاتی مؤثر، بهینه خواهند شد. ترکیب اهداف در الگوریتم ژنتیک تک هدفه الزامی است و به‌طور معمول از پارامترهای اقتصادی در هم مقیاس کردن تابع‌های هدف استفاده می شود. این پارامترها تنها یک بار و قبل از شروع فرایند بهینه سازی تک هدفه به صورت ارزش خالص فعلی تأثیر داده می‌شوند.

جدول ۵ ـ ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه مورد استفاده در بهینه یابی فرایند تزریق پیوسته کربن دی اکسید.

مشخصه	تک هدفه	چند هدفه	
نوع تزریق	پیوسته گاز	پیوسته گاز	متناوب آب و گاز
تعداد نسل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد جمعیت	۵۰	۵۰	۵۵
تعداد پارامتر	۲۵	۲۵	۲۹
ضریب پارتو	–	۰/۴	۰/۴
ضریب Crossover	۰/۸	۰/۸	۰/۸
ضریب Migration	۰/۲	۰/۲	۰/۲
تابع هدف Tolerance	$۱۰^{-۶}$	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۴}$

جدول ۶ ـ پارامترهای مورد بررسی به همراه بازه ی تغییر آنها در الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه.

پارامتر (تعداد)	ابتدای بازه	انتهای بازه
مکان چاه تزریقی اول (۱)	۱	۶۰
مکان چاه تزریقی دوم (۱)	۱	۵۹
مکان چاه تزریقی سوم (۱)	۱	۵۸
ابتدای بازه مشبک کاری چاه‌های تزریقی (۳)	۱	۷
طول بازه مشبک کاری چاه‌های تزریقی (۳)	۳	۵
ابتدای بازه مشبک کاری چاه‌های تولیدی (۴)	۱	۷
طول بازه مشبک کاری چاه‌های تولیدی (۴)	۳	۵
نرخ تزریق گاز در چاه‌های تزریقی (۳)	۳۰۰۰	۱۹۰۰۰
نرخ تولید نفت در چاه‌های تولیدی (۴)	۱۵۰۰	۷۰۰۰
تعداد چاه‌های تزریقی (۱)	۱	۳
نسبت آب به گاز تزریقی × (۱)	۱	۵
نرخ تزریق آب در چاه تزریقی×(۳)	۳۰۰۰	۱۹۰۰۰

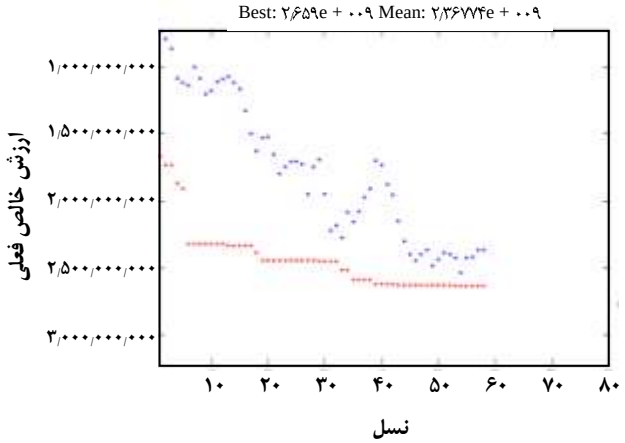
× مختص فرایند تزریق متناوب آب و گاز کربن دی اکسید ، ۵ حالت نسبت تزریق (گاز:آب) به ترتیب عبارتند از: ۱:۱، ۱:۲، ۱:۱، ۲:۱، ۳:۱، ۱:۳

روند فرایند بهینه‌سازی تک هدفه با افزایش تعداد نسل در شکل۵ نشان داده شده است.

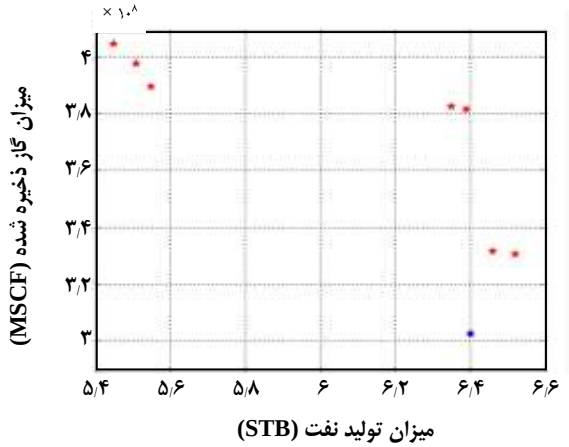
به دلیل کمتر بودن مقدار متوسط تغییرهای تابع هدف از $۱۰^{-۶}$ در نسل‌های آخر، سرانجام بهینه سازی در نسل ۵۸ (مقدار ارزش خالص فعلی برابر ۲/۶۵ میلیارد دلار) متوقف شد. مقدارهای پارامترهای کنترلی متناظر با این ارزش خالص فعلی در جدول ۷ نشان داده شده است. چاه‌های تزریقی ۲ و ۳ به تقریب در ناحیه نفتی قرار گرفته اند و چاه تزریقی ۱ به طور کامل در ناحیه آبی است. در صورت تغییر در مقدارهای پارامترهای اقتصادی کل فرایند بهینه سازی باید دوباره انجام شود.

بهینه سازی تزریق پیوسته گاز دی اکسید کربن با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه

برای استفاده از روش بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب، دو تابع هدف مقدار تولید نفت و مقدار گاز ذخیره شده تعریف شد. این اهداف مستقل از اقتصاد قضیه انتخاب شده‌اند (تابع فنی) و بر خلاف روش تک هدفه نیازی به هم مقیاس کردن آنها نیست.



شکل ۵ـ فرایند بهینه سازی تابع ارزش خالص فعلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه.



شکل ۶ ـ نمودار جبهه پارتو حاصل از بهینه سازی چند هدفه در فرایند تزریق پیوسته گاز دی اکسید کربن و مقایسه با حالت بهینه سازی تک هدفه.

هدف‌ها در نظر گرفته شده، مستقل از نوسان‌های قیمتی بهینه می‌شوند. به عبارت دیگر به جای بهینه نمودن غیر مستقیم هدف‌ها در روش تک هدفه (به کمک ارزش خالص فعلی) در این حالت هدف‌ها مستقیما بهینه می شوند. ویژگی‌های روش در جدول ۵ آورده شده است

شکل ۶ مقدارهای هفت سناریوی تزریق پیوسته بهینه شده را نشان می دهد. همچنین در این شکل موقعیت متناظر با جواب به دست آمده از بهینه سازی تک هدفه نشان داده شده است. مقدارهای پارامترهای کنترلی متناظر با این سه گروه در جدول ۷ آورده شده است. در این روش، سناریوهای تزریق گاز بهینه شده در سه گروه قرار می‌گیرند. در این تقسیم بندی، گروه اول شامل جواب‌های بهینه‌ای است که بیشینه شدن میزان گاز ذخیره سازی شده مد نظر است و البته تا آنجا که ممکن بوده میزان نفت نیز بهینه شده است. در گروه سوم جواب‌های بهینه‌ای مد نظر است که دارای بیشینه‌ی نفت تولیدی است. گروه دوم ایده ال ترین حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و اقتصادی است و بیشینه بودن هر دو هدف مورد توجه است. یادآوری این نکته الزامی است که تمام این نقاط از دیدگاه فرایند بهینه سازی چند هدفه بهینه‌اند اما آنچه که این روش را جدا می‌سازد افزایش توان تصمیم‌گیری با توجه به شرایط گوناگون اقتصادی و عملیاتی است.

نکته قابل توجه برتری جواب‌های بهینه ی گروه سوم نسبت به جواب بهینه سازی تک هدفه است. بر این اساس در گروه سوم تولید نفت در حدود یک میلیون و دویست هزار بشکه و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید ۲۹ میلیارد فوت مکعب افزایش یافته است.

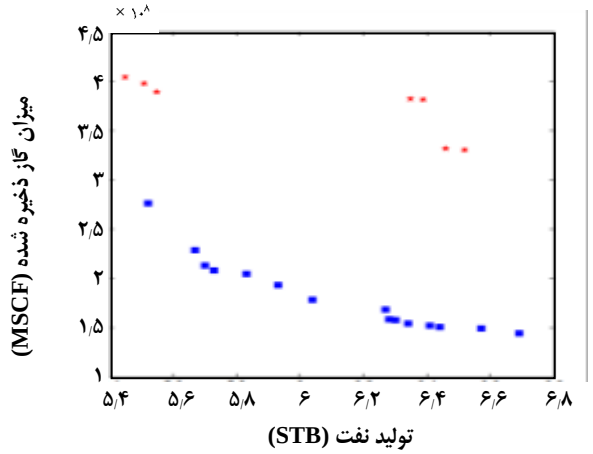
این مقایسه‌ها در شرایط یکسان و زمانی که هیچ محدودیت عملیاتی ـ اقتصادی وجود ندارد انجام می شود. با توجه به اینکه در بهینه سازی چند هدفه میزان تولید نفت و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید به‌صورت مستقیم بهینه می شوند می توان انواع سناریوهای اقتصادی را بررسی نمود و در هر سناریو بهترین حالت را از میان جواب‌های موجود انتخاب کرد. رسیدن به جواب‌های بهینه به دست آمده از روش بهینه سازی چند هدفه با استفاده از روش تک هدفه در عمل غیر ممکن خواهد بود. اول این‌که می‌بایست برای وزن‌های گوناگون چندین بار بهینه سازی تک هدفه اجرا شود که در میدان‌های واقعی هزینه بر و زمان‌بر می‌باشد. مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به جواب‌های بهینه پارتو در روش چند هدفه ۱۴۴ ساعت می باشد. برای ایجاد این جواب‌ها با استفاده از روش تک هدفه با این فرض که وزن هر تابع مشخص است در حدود ۹۰۰ ساعت زمان مورد نیاز است. دوم این که وزن هایی که منجر به ایجاد جواب‌های بهینه شود نا مشخص می باشد.

بهینه سازی تزریق متناوب گاز دی اکسید کربن و آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه

فرایند تزریق متناوب آب و گاز به دلیل برتری‌های یگانه آن روشی به‌طور کامل به صرفه در زمینه ی ازدیاد برداشت نفت می‌باشد. شکل ۷ مقایسه ی میان نتیجه‌های به دست آمده از نوع تزریق پیوسته و متناوب در بهینه سازی چند هدفه را نشان می دهد. مقدارهای پارامترهای کنترلی متناظر با این سه گروه در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷ ـ مقدارهای پارامترهای کنترلی برای روش‌هایگوناگون تزریق.

روش بهینه سازی – نوع فرایند	گروه	موقعیت چاه های تزریقی			ابتدای مشبک کاری چاه تزریقی			طول مشبک کاری چاه‌تزریقی			ابتدای مشبک کاری چاه تولیدی				طول مشبک کاری‌چاه تولیدی				نرخ تزریق گاز×۱۰۰۰ (MSCF)			نرخ تولید نفت×۵۰۰ (STB)				نرخ تزریق آب×۱۰۰۰ (STB)			تعداد چاه‌تزریقی	نسبت گاز به آب
		چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳	چاه تولیدی ۱	چاه تولیدی ۲	چاه تولیدی ۳	چاه تولیدی ۴	چاه تولیدی ۱	چاه تولیدی ۲	چاه تولیدی ۳	چاه تولیدی ۴	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳	چاه تولیدی ۱	چاه تولیدی ۲	چاه تولیدی ۳	چاه تولیدی ۴	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳		
تک هدفه – پیوسته	–	۴۸	۵۲	۳۹	۱	۲	۷	۴	۵	۳	۶	۳	۷	۳	۵	۳	۴	۵	۱۳	۱۷	۱۲	۱۴	۱۴	۱۰	۹	–	–	–	۳	–
چند هدفه – پیوسته	۱	۵۵	۵۳	۴۰	۷	۷	۴	۵	۵	۴	۶	۴	۳	۶	۴	۴	۴	۴	۱۹	۱۸	۱۸	۱۲	۱۴	۱۴	۱۰	–	–	–	۳	–
	۲	۴۸	۵۴	۳۳	۷	۳	۳	۴	۴	۴	۶	۳	۲	۵	۵	۴	۴	۴	۱۷	۱۸	۱۸	۱۲	۱۴	۱۳	۷	–	–	–	۳	–
	۳	۳۳	۴۶	۲۶	۶	۶	۳	۵	۵	۴	۴	۶	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۱۵	۱۷	۱۴	۱۳	۱۴	۱۱	۷	–	–	–	۳	–
چند هدفه – متناوب	۱	۴۸	۳۳	۵۱	۴	۴	۶	۴	۴	۴	۵	۴	۴	۶	۴	۵	۴	۴	۱۷	۱۸	۱۶	۱۲	۱۳	۹	۱۲	۱۱	۸	۱۸	۳	۵
	۲	۱۴	۳۱	۵۲	۳	۴	۵	۵	۴	۴	۶	۴	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۱۱	۱۵	۱۱	۱۳	۱۳	۱۱	۱۰	۱۰	۹	۱۴	۳	۲
	۳	۱۴	۳۱	۵۸	۲	۴	۵	۵	۴	۴	۶	۴	۶	۶	۳	۴	۵	۴	۱۰	۹	۱۱	۱۴	۱۴	۱۱	۱۱	۱۰	۱۵	۱۴	۳	۲



شکل ۷ ـ مقایسه‌ی توابع هدف (میزان ازدیاد برداشت و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید) فرایندهای تزریق پیوسته و متناوب با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه.

مقایسه کلی دو روش تزریق متناوب و پیوسته نشان می‌دهد تزریق متناوب دارای عملکرد بهتری در ازدیاد برداشت نفت می‌باشد درحالی که مقدار ذخیره سازی به صورت محسوسی کاهش یافته است.

بررسی سناریو ها در شرایط گوناگون اقتصادی

از ویژگی‌های یگانه بهینه‌سازی چند هدفه اعمال پارامترهای اقتصادی پس از انجام فرایند بهینه سازی است. وارد نمودن این پارامترها قبل از انجام فرایند بهینه سازی در روش تک هدفه نقیصه ای است که منجر به انجام دوباره فرایند بهینه سازی در صورت تغییر مقدارهای پارامترهای اقتصادی خواهد شد. جدول ۸ نتیجه‌های به دست آمده از یک بار اجرای هر دو روش بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه را نشان می دهد. یکی از پارامترهای اقتصادی مهم برای انتخاب جواب بهینه، مالیات انتشار گاز کربن دی اکسید است. در شرایطی که مالیات در نظر گرفته نشود جواب بهینه گروه سوم تزریق پیوسته گاز مناسب است و در حدود ۶۰ میلیون دلارسود بیشتری را نسبت به روش تک هدفه ایجاد می کند. در این حالت فرایند بهینه سازی چند هدفه افزایش میزان تولید نفت را مورد توجه قرار داده و با توجه به صفر بودن مقدار مالیات برای انتشار گاز دی اکسید کربن میزان ذخیره سازی اهمیت کمتری دارد.

با در نظر گرفتن مقدار مالیات ۳۰۰ دلار برای هر تن گاز کربن دی اکسید ، جواب گروه ۳ دیگر مناسب نیست. در این حالت هر دو هدف مؤثر بوده و جواب بهینه ی گروه دوم در مقایسه با روش تک هدفه دارای ۱/۰۳ میلیارد دلار سود بیشتر است. در آخرین سناریو و با مقدار مالیات ۶۰۰ دلار به ازای هر تن،

جواب بهینه به دست آمده از گروه ۱ با ۲/۲۹ میلیارد دلار سود بیشتر نسبت به روش تک هدفه همراه خواهد بود. همان‌گونه که مشاهده می شود فرایند تزریق متناوب با هدف ذخیره سازی با اعمال هر مقدار مالیات انتشار گاز دارای سود چندانی نیست. به دلیل تزریق آب، فضا برای نگهداری گاز کربن دی اکسید کاهش می یابد و این موضوع منجر به تولید نفت بیشتر خواهد شد. استفاده از فرایند تزریق متناوب آب و گاز در زمان‌هایی که قیمت نفت بالاست و یا مالیاتی بر انتشار گاز در نظر گرفته نشده مناسب می‌باشد.

نتیجه گیری

- در مخزن مورد بررسی با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مرتب سازی نا مغلوب، قدرت تصمیم گیری در شرایط گوناگون اقتصادی از جمله نوسان‌های مالیات انتشار گاز کربن دی اکسید را افزایش می یابد. با افزایش نرخ مالیات بر انتشار گاز کربن دی اکسید، ذخیره سازی اهمیت بیشتری خواهد داشت و بر جذابیت‌های آن خواهد افزود.
- با مقایسه روش بهینه سازی چند هدفه نشان داده شد جواب‌های بهینه ی گروه سوم (گروهی که در آن میزان بیشتر تولید نفت مد نظر است) نسبت به جواب بهینه سازی تک هدفه دارای برتری بیشتری است .بر این اساس در گروه سوم تولید نفت در حدود یک میلیون و دویست هزار بشکه و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید ۲۹ میلیارد فوت مکعب افزایش یافته است.
- نتیجه‌ها نشان داد تزریق متناوب آب و گاز دارای عملکرد بهتری نسبت به تزریق پیوسته ی گاز در ازدیاد برداشت نفت می‌باشد در حالی که مقدار ذخیره سازی به صورت محسوسی کاهش می‌یابد (کاهش ۵۴ میلیارد بشکه در بهترین حالت نسبت به فرایند تزریق پیوسته‌ی گاز کربن دی اکسید).
- با توجه به افزایش بازیافت نفت در حدود ۱۶ درصد می‌توان با تزریق گاز کربن دی اکسید در این مخزن ضریب بازیافت نفت به مقدار چشمگیری افزایش داد.
- در راستای افزایش قدرت تصمیم سازی، زمان بهینه سازی با استفاده از روش های بهینه سازی چند هدفه در مقایسه با روش‌های بهینه سازی تک هدفه کوتاه‌تر و درنتیجه تصمیم گیری سریع‌تر خواهد بود.

فهرست نمادها

V_{CO2}^{R}	حجم ذخیره شده کربن دی اکسید در مخزن
V^{R}	حجم فضای متخلخل در مخزن
OIP	حجم نفت درجا در ابتدای تزریق کربن دی اکسید
N_p^*	میزان نفت خالص تولیدی بعد از تزریق کربن دی اکسید
RE_{OIL}	درآمد ناشی از فروش نفت
RE_{GAS}	درآمد ناشی از فروش گاز
$RE_{SEQUESTRATION}$	درآمد ناشی از ذخیره‌سازی گاز کربن دی‌اکسید
CO_{OIL}	هزینه ناشی از جداسازی نفت
CO_{WATER}	هزینه ناشی از جداسازی آب
CO_{REINJ}	هزینه ناشی از تزریق مجدد گاز کربن دی‌اکسید
$CO_{INJECTION}$	هزینه ناشی از تزریق گاز
DF	ضریب کاهش ارزش پول
CAPEX	سرمایه اولیه مورد نیاز مانند هزینه حفر چاه
INR_{GAS} , INR_{OIL}	ضریب تورم قیمت نفت و گاز
$INC_{WAT_{INJ}}$, $INC_{GAS_{INJ}}$, INC_{REINJ}, INC_{OIL}	ضریب تورم هزینه‌های جداسازی آب، نفت، بازگردانی و تزریق گاز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۷

مراجع

[1] Asghari K., Al-Dliwe A., "Optimization of Carbon Dioxide Sequestration and Improved Oil Recovery in Oil Reservoirs", S4S 0A2, University of Regina Apache Canada (2004).

[2] Yann Le Gallo, Philippe Couillens, Taoufik Manai, CO_2 Sequestration in Depleted Oil or Gas Reservoirs, "SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production", Kuala Lumpur, Malaysia, SPE 74104 (2002).

[3] Javaheri M., Abedi J., Hassanzadeh H., Onset of Convection in CO_2 Sequestration in Deep Inclined Saline Aquifers, *Canadian International Petroleum Conference/SPE Gas Technology Symposium*, 17-19 June (2008).

[4] Guang Yang, "Uncertainty Analysis of Carbon Sequestration in an Inclined Deep Saline Aquifer", University of Wyoming (2012).

[5] Dorothee Rebscher, Curtis M.Oldenburg, "Sequestration of Carbon Dioxide with Enhanced Gas Recovery Case Study Altmark", North German Basin, *LBNL-59033* (2005).

[6] "Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery Report: Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution", US Department of Energy, (2010).

[7] Yousef Ghomian, "Reservoir Simulation Studies for Coupled CO_2 Sequestration and Enhanced Oil Recovery", M.Sc. Thesis, University of Texas at Austin (2008).

[8] Mohammad Soltanieh, Amir Mohammad Eslami, Adnan Moradian, Feasibility Study of Carbon Dioxide Capture from Power Plants and other Major Stationary Sources and Storage in Iranian Oil Fields for Enhanced Oil Recovery (EOR), *Energy Procedia*, **1** (1): 3663–3668 (2009).

[9] Fabian Triefenbach, "Design of Experiments: The D-Optimal Approach an Implementation as a Computer Algorithm", South Westphalia University of Applied Sciences (2008).

[10] Azeez Adeyinka Lawal, "Applications of Sensitivity Analysis in Petroleum Engineering", The University of Texas (2007).

[11] Abdullah Konaka, David W. Coit, Alice E. Smith,Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms: A Tutorial, *Reliability Engineering and System Safety*, **91**: 992–1007 (2006).

[12] Ivo F. Sbalzariniy, Sibylle M ulleryand Petros Koumoutsakosyz, "Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms", Center for Turbulence Research (2000).

[13] Marler R.T., AroraJ.S., Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering, *Struct Multidisc Optim Springer-Verlag*, **26**: 369-395 (2004).

[14] Xie Qingsheng, Li Shaobo, Yang Guanci, "Studies on Fast Pareto Genetic Algorithm Based on Fast Fitness identification and External Population Updating Scheme", Chinese Academy of Science (2005).

[15] Kalyanmoy Deb, "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms", John Wiley, ISBN: 978-0-471-87339-6 (2001).

[۱۶] عبدی دویران، سمیرا؛ تشنه لب، محمد؛ علیاری شوره دلی، مهدی؛ گل احمدی، حمید؛ طراحی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به کمک الگوریتم جغرافیای زیستی و الگوریتم تکاملی تفاضلی، سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق، (۳)**۳** : ۱۱ تا ۲۳ (۱۳۹۱).