

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

محمد امین صفرزاده\*<sup>+</sup>، مهديا مطهري

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 دی اکسید 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 روش‌های ازدیاد برداشت برای پاسخگویی به این تقاضا، تزریق گاز کربن دی اکسید دارای اهمیت است. از این رو به کارگیری روشی برای بهینه سازی همزمان بیشترین ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در مخزن و افزایش تولید نفت در اثر این تزریق ضروری است. در گذشته به دلیل نبود روش‌های مناسب بهینه سازی، بیشتر مسئله‌های بهینه‌سازی چند هدفه به عنوان مسئله‌های بهینه سازی تک هدفه مورد بررسی قرار می‌گرفت. 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 به کارگیری الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب در یکی از مخازن نفتی، گزینه‌های مناسب برای تزریق گاز کربن دی اکسید با در نظر گرفتن بهینه سازی همزمان ذخیره سازی گاز و ازدیاد برداشت نفت ارائه 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، الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه.

**KEY WORDS:** Greenhouse gas effect, gas injection, CO<sub>2</sub> EOR, CO<sub>2</sub> Storage, Non-dominated genetic algorithm.

## مقدمه

مهمترین دلیل افزایش غلظت گاز کربن دی اکسید در جو، استفاده‌ی بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی به منظور تولید انرژی است. این اتفاق که از دیدگاه کارشناسان محیط زیست به معنای ایجاد تغییرهای آب و هوایی در زمین بود، توجه افکار عمومی جهان را

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

\*عهده دار مکاتبات

آدرس دیگر: تهران، مشاوران انرژی تهران

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 بهینه‌سازی 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* در سال ۲۰۰۸ میلادی بررسی اقتصادی جامعی را با استفاده از شبیه سازی ترکیبی در ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز انجام دادند. هدف آنها به دست آوردن نوع و کمترین میزان مشوق‌های مالی برای شرکت‌های نفتی در امریکا بود به طوری که ذخیره سازی گاز در این میدان‌های نفتی عملی شود. *رواگنانی و همکاران* در سال ۲۰۰۹ میلادی مدل اقتصادی - عملیاتی را برای ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید (به دست آمده از صنایع واقع در شمال برزیل) همزمان با ازدیاد برداشت در یک مخزن نفتی ارائه نمودند. شبیه سازی براساس موازنه‌ی جرم، انرژی، آنتروپی و بر پایه‌ی تحلیل‌های اقتصادی انجام پذیرفت. *جهانگیری و همکاران* در سال ۲۰۱۰ میلادی تأثیر استراتژی‌ها و زمان‌های 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*<sup>(۳)</sup> در سال ۲۰۱۲ میلادی به بهینه‌سازی فرایند ازدیاد برداشت نفت و ذخیره سازی گاز پرداخت. وی با استفاده از روش

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<sup>(۱)</sup> 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 آب و هوایی<sup>(۲)</sup> اعلام نموده است غلظت دی‌اکسید کربن در سال ۲۱۰۰ به مقدار ۵۷۰ppm خواهد رسید که به معنای افزایش متوسط دمای جهانی به میزان ۱٫۹°C و نیز افزایش متوسط سطح آب دریاها به میزان ۳۸ متر خواهد بود [۴-۲]. به منظور کاهش غلظت کربن دی اکسید روش‌های بسیاری مانند ذخیره سازی در اعماق اقیانوس‌ها و ذخیره‌سازی زیرزمینی در آبد 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، آبد 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 آبد 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 اوپل تزریق می‌شود [۲].

از سوی دیگر، تجربه‌های ارزشمندی در زمینه‌ی 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 گرانیروی نفت در جا، انحلال پذیری بالای گاز کربن دی اکسید در نفت، کاهش دانسیته‌ی نفت، تبخیر اجزای میانی نفت، کاهش کشش سطحی نفت - کربن دی اکسید، کاهش کشش سطحی نفت - آب، کنترل فشار در نزدیکی چاه‌های تولیدی می‌باشند. اولین تزریق تجاری

(۱) Kyoto protocol

(۲) International Panel on Climate Change (IPCC)

(۳) Shengnan Chen

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 در نظر گرفتن 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 بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌شود. در این مقاله از روش طراحی آزمایش D-Optimal استفاده می‌شود. در این حالت ماتریس طراحی بهینه شامل n آزمایش است و میزان دترمینان  $X'X$  (تابع ضریب‌های مدل) در میزان بیشینه‌ی خود قرار دارد. این تعداد اجراء، بیشترین منطقه‌ی ممکن را در ناحیه آزمایش تحت بررسی قرار می‌دهد [۹،۱۰].

#### فرایند بهینه‌سازی چند هدفه

با اندکی تأمل در بیشتر مسئله‌های علمی تصمیم‌گیری می‌توان دریافت که اهداف یا معیارهای چندگانه‌ای مورد نظر می‌باشد و در گذشته به دلیل نبود روش‌های مناسب حل، بیشتر مسائل بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی چند هدفه به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize or Maximize } F_m(x) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1) \\ & \text{Subject to } \quad g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \\ & \quad \quad \quad h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \\ & \quad \quad \quad x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

یک جواب  $X$ ، برداری از  $n$  متغیر تصمیم می‌باشد

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (2)$$

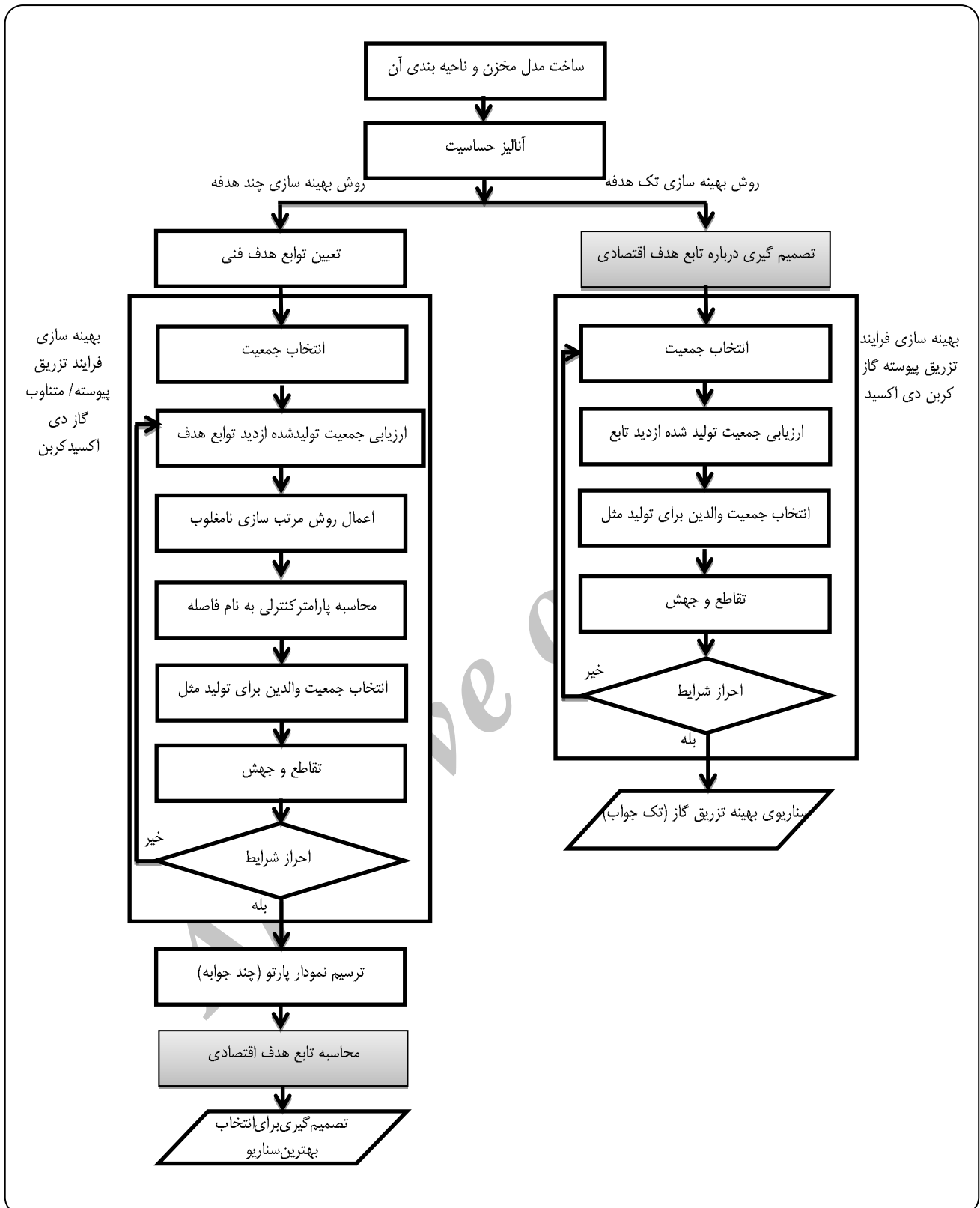
بهینه‌سازی هیبریدی میزان نرخ تزریق، نسبت حجمی گاز به آب و حجم هر دوره‌ی تزریق در فرایند تزریق متناوب آب و گاز را بهینه نمود. اتخاذ قوانین بازدارنده به عنوان گزینه‌ی مؤثر در زمینه‌ی ذخیره‌سازی یاد می‌شود. در سال ۲۰۰۰ میلادی مقدار مالیات در نظر گرفته شده برای هر تن گاز کربن دی‌اکسید ۱۵۰ دلار بود. میزان 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 در نتیجه 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 دی‌اکسید می‌توان به عنوان گاز جایگزین و با برتری مهم کاهش آلودگی نام برد. این درحالی است که پیش بینی می‌شود تولید گازهای گلخانه‌ای 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 دی‌اکسید 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 بازه‌ی 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 ذخیره‌سازی و تولید نفت در تابع هدف فنی و تعیین تابع هدف اقتصادی بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده،



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

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:

$$(۳) \text{تابع هدف} = W_1 \times$$

+ فرایند ازدیاد برداشت { (هزینه / درآمد) یا (حجم تولید نفت) }  
( حجم گاز باقی مانده در مخزن )  $W_2 \times$  {  
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:

$$(۴) \text{ObjFun} = w_1 \times \frac{N_p^*}{\text{OIP}} + w_2 \times \frac{V_{\text{CO}_2}^R}{V^R}$$

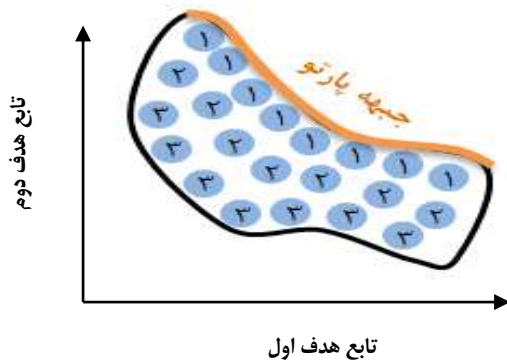
که در آن  $(w_1 \leq w_1 \leq 1)$  و  $(w_2 = 1 - w_1)$  وزن‌ها،  $V_{\text{CO}_2}^R$  حجم ذخیره شده کربن دی اکسید در مخزن،  $V^R$  حجم فضای متخلخل در مخزن، OIP حجم نفت درجا در ابتدای تزریق کربن دی اکسید و  $N_p^*$  میزان نفت خالص تولیدی بعد از تزریق کربن-دی‌اکسید است. جهانگیری و همکاران<sup>(۳)</sup> 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 و کاهش 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:

عبارت‌های  $g_i(x)$  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  $(D)$  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<sup>(۲)</sup>  $(S)$  یا فضای جستجو نامیده می‌شود. در معادله‌ی یاد شده تعداد  $M$  تابع هدف وجود دارد که در هر تابع 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 شده‌اند و پژوهشگران زیادی تلاش نموده‌اند 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 می‌دهد. اگرچه این ایده در اصل ساده است اما پرسشی نه چندان ساده را مطرح می‌نماید 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 شده‌ای 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 - پارتو متفاوتی نمی‌شوند. پاسخ به این سوال که

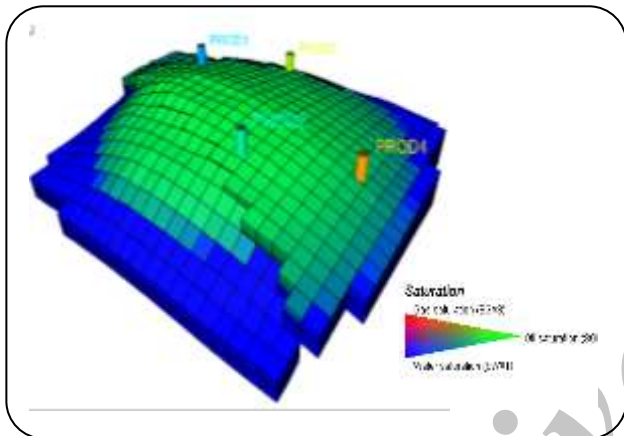
(۱) Decision Variable Space

(۳) Jahangiri et al.

(۲) Feasible Region



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



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

پارامتر فاصله جمعیت<sup>(۱)</sup> برای هر عضو در هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه می‌باشد. در ادامه جمعیت والدین برای تولید مثل انتخاب و مراحل جهش و تقاطع صورت می‌پذیرد. سرانجام جبهه پارتو شکل می‌گیرد و هر جواب موجود در آن جوابی بهینه است [۱۵، ۱۶].

### توصیف مدل مخزن و پارامترهای اقتصادی

مدل مورد استفاده دارای چهار چاه تولیدی می‌باشد. میزان اشباع سیال‌های گوناگون و چاه‌های تولیدی موجود در شکل ۳ نشان داده شده است. فشار مخزن در ابتدای شروع

$$NPV = \sum_{YEAR=1}^{YEAR=20} [(RE - CO) \times DF] \quad (5)$$

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

$$RE_{SEQUESTRATION}$$

$$CO = CO_{OIL} \times INC_{OIL} + CO_{WATERT} \times INC_{WATER} + CO_{REINJ} \times$$

$$INC_{REINJ} + CO_{GAS\_ING} \times INC_{GAS\_INJ} + CO_{WAT\_INJ} \times$$

$$INC_{WAT\_INJ} + CAPEX$$

$RE_{OIL}$ : 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

$INC_{WAT\_INJ}$ ,  $INC_{GAS\_INJ}$ ,  $INC_{REINJ}$ ,  $INC_{OIL}$ : 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 می‌پذیرد. طبق تعریف، طبق  $A$  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 می‌شوند. اعضای قرار گرفته در دسته اول، یک مجموعه کاملاً غیر مغلوب را نسبت به دیگر اعضای جمعیت تشکیل می‌دهند (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 می‌یابد. 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 ذخیره سازی شده می‌باشد.

(۱) Crowding Distance

جدول ۱- 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 جهت X	تعداد بلوک	اشباع اولیه ی نفت
$10^{-9} \times 1,3$ فوت مکعب	۴۴ فوت	۴۵۲ فوت	۴۳۶ فوت		۳۰٪

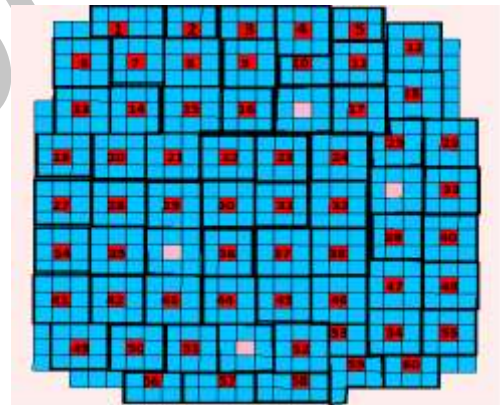
جدول ۲- پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در فرایند بهینه سازی.

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

از ویژگی‌های مخزن در جدول آورده شده است. مخزن در ابتدای تولید در حالت فوق اشباع<sup>(۱)</sup> 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 می‌تواند 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 مکان‌های بهینه‌ی چاه‌های تزریقی ۴۰، ۵۳، ۵۳ 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.



مکان چاه‌های تولیدی (ثابت)      مکان‌های 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.

### 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 جدول ۳

سناریو ۳۳۳۲psi و عمق متوسط بالاترین لایه ۸۰۲۶ فوت می‌باشد. تراوایی مخزن در جهت‌های X و Y یکسان و برابر ۲۵۲ میلی داریسی، و در جهت Z در حدود ۶/۵ میلی داریسی است. مدل شامل ۷۲۰۰ بلوک و میزان متوسط تخلخل آن ۱۶/۲۵ می‌باشد. برخی دیگر

(۱) Undersaturated

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

پارامتر	ابتدا ی بازه	انتهای بازه
تعداد چاه های تزریقی (Z)	۱	۳
مکان چاه های تزریقی (A,B,C)	۱	۶۰
ابتدای بازه ی مشبک کاری برای چاه های تزریقی (D,E,F) و تولیدی موجود (K,L,M,N) [بلوک]	۱	۷
طول بازه ی مشبک کاری برای چاه های تزریقی (G,H,I) 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 ۴- پاسخ های مورد بررسی در مخزن مورد مطالعه.

تابع هدف	الگوریتم بهینه سازی	پارامتر های موثر با تاثیر مثبت	پارامتر های موثر با 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	-

لحاظ شوند مدل به طول و مکان مشبک کاری حساس است و زمانی که تابع پاسخ ارزش خالص فعلی در نظر گرفته می شود 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 نتیجه های به دست آمده از اجرای الگوریتم بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه با لحاظ کردن ویژگی های الگوریتم ژنتیک مورد استفاده که در جدول های ۵ و ۶ 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 پیوسته ی گاز ۱۲۸ ساعت می باشد. 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 به طور معمول از پارامترهای اقتصادی در هم مقیاس کردن تابع های 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 می شوند.

آورده شده است. تعداد ۳۵۷ آزمایش طراحی و تجزیه نتیجه ها به صورت خودکار (لینک نرم افزارهای Design Expert، Matlab و Eclipse 300) 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. نتیجه ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

مکان چاه های 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 چاه های 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 نرخ های تزریق و تعداد چاه های تزریقی حساس می باشد. همان گونه که دیده می شود عامل هایی که بر میزان گاز ذخیره سازی شده تأثیر مثبت دارند دارای تأثیر منفی بر میزان نهایی نفت تولیدی است. نتیجه های به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می دهد زمانی که میزان نفت تولیدی و حجم گاز کربن دی اکسید ذخیره شده به صورت تابع های پاسخ جداگانه



جدول ۵ - ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه مورد استفاده در بهینه‌یابی فرایند تزریق پیوسته کربن دی‌اکسید.

چند هدفه		تک هدفه		مشخصه
متناب آب و گاز	پیوسته گاز	پیوسته گاز	پیوسته گاز	نوع تزریق
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	تعداد نسل
۵۵	۵۰	۵۰	۵۰	تعداد جمعیت
۲۹	۲۵	۲۵	۲۵	تعداد پارامتر
۰٫۴	۰٫۴	-	-	ضریب پارتو
۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	ضریب Crossover
۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	ضریب Migration
۱۰ <sup>-۴</sup>	۱۰ <sup>-۴</sup>	۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۰ <sup>-۶</sup>	تابع هدف Tolerance

جدول ۶ - پارامترهای مورد بررسی به همراه بازه‌ی تغییر آنها در الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه.

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

\* مختص فرایند تزریق متناب آب و گاز کربن دی‌اکسید، ۵ حالت نسبت تزریق (گاز:آب) به ترتیب عبارتند از: ۱:۱، ۲:۱، ۱:۱، ۱:۲، ۱:۳، ۱:۴

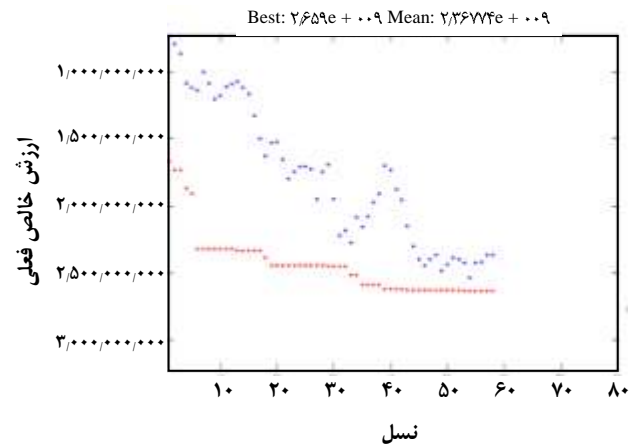
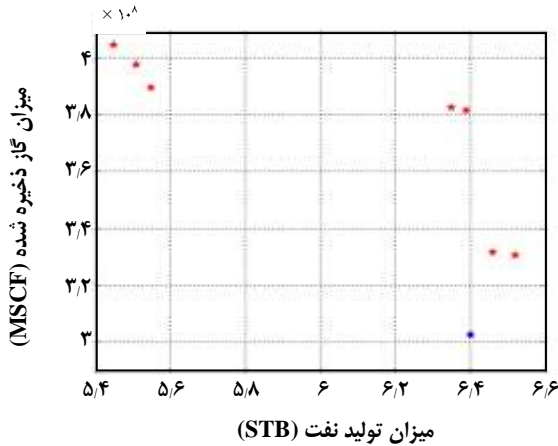
آبی است. در صورت تغییر در مقدارهای پارامترهای اقتصادی کل فرایند بهینه‌سازی باید دوباره انجام شود.

#### بهینه‌سازی تزریق پیوسته گاز دی‌اکسید کربن با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه

برای استفاده از روش بهینه‌سازی 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.

روند فرایند بهینه‌سازی تک هدفه با افزایش تعداد نسل در شکل ۵ نشان داده شده است.

به دلیل کمتر بودن مقدار متوسط تغییرهای تابع هدف از ۱۰<sup>-۶</sup> در نسل‌های آخر، سرانجام بهینه‌سازی 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 گرفته‌اند و چاه تزریقی ۱ به طور کامل در ناحیه



شکل ۶ - 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.

این مقایسه‌ها در شرایط یکسان و زمانی که هیچ محدودیت عملیاتی - 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 به صورت 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 این که 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 به طور 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.

شکل ۵- فرایند بهینه سازی تابع ارزش خالص فعلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک 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 مستقیماً 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.

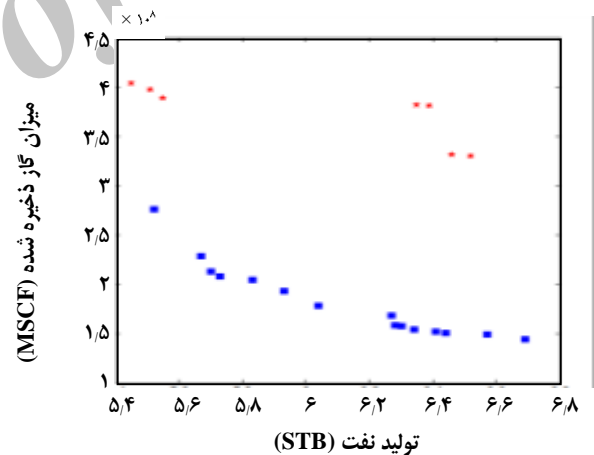
نکته قابل توجه برتری جواب‌های بهینه ی گروه سوم نسبت به جواب بهینه سازی تک هدفه است. بر این اساس در گروه سوم تولید نفت در حدود یک میلیون و دویست هزار بشکه و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید ۲۹ میلیارد فوت مکعب افزایش یافته است.

جدول ۷ - مقدارهای پارامترهای کنترلی برای روش‌های گوناگون تزریق.

گروه	مؤقتیت چاه‌های تزریقی			ابتدایی مشبک کاری چاه تزریقی			طول مشبک کاری چاه‌های تزریقی			ابتدایی مشبک کاری چاه تولیدی			طول مشبک کاری چاه‌های تزریقی			مقدارهای پارامترهای کنترلی برای روش‌های گوناگون تزریق			تعداد چاه تزریقی	نسبت گاز به آب	
	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 ۱	چاه تولیدی ۲	چاه تولیدی ۳	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳	چاه تزریقی ۱	چاه تزریقی ۲	چاه تزریقی ۳			
تک هدفه - پیوسته	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
چند هدفه - پیوسته	۱	۵۵	۵۳	۴۰	۷	۷	۴	۷	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
تک هدفه - پیوسته	۲	۴۸	۵۴	۳۳	۷	۷	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
چند هدفه - متناوب	۱	۴۸	۳۳	۲۶	۶	۶	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
تک هدفه - متناوب	۲	۱۴	۳۱	۵۲	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴

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 دلار سود 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،



شکل ۷ - 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

- 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 روش های بهینه سازی تک هدفه کوتاهتر و در نتیجه تصمیم گیری سریعتر خواهد بود.

### فهرست نمادها

$V_{CO_2}^R$	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
$N_p^*$	میزان نفت خالص تولیدی بعد از تزریق کربن دی اکسید
RE <sub>OIL</sub>	درآمد ناشی از فروش نفت
RE <sub>GAS</sub>	درآمد ناشی از فروش گاز
RE <sub>SEQUESTRATION</sub>	درآمد ناشی از ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید
CO <sub>OIL</sub>	هزینه ناشی از جداسازی نفت
CO <sub>WATER</sub>	هزینه ناشی از جداسازی آب
CO <sub>REINJ</sub>	هزینه ناشی از تزریق مجدد گاز کربن دی اکسید
CO <sub>INJECTION</sub>	هزینه ناشی از تزریق گاز
DF	ضریب کاهش ارزش پول
CAPEX	سرمایه اولیه مورد نیاز مانند هزینه حفر چاه
INR <sub>GAS</sub> , INR <sub>OIL</sub>	ضریب تورم قیمت نفت و گاز
INC <sub>WAT<sub>INJ</sub></sub> , INC <sub>GAS<sub>INJ</sub></sub> , INC <sub>REINJ</sub> , INC <sub>OIL</sub>	ضریب تورم هزینه های جداسازی آب، نفت، بازگردانی و تزریق گاز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۱۳

جواب بهینه به دست آمده از گروه ۱ با ۲/۲۹ میلیارد دلار سود بیشتر نسبت به روش تک هدفه همراه خواهد بود. همان گونه 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 زمان هایی که قیمت نفت بالاست و یا مالیاتی بر انتشار گاز در نظر گرفته نشده مناسب می باشد.

### نتیجه گیری

- در مخزن مورد بررسی با استفاده از روش بهینه سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مرتب سازی نا مغلوب، قدرت تصمیم گیری در شرایط گوناگون اقتصادی از جمله نوسان های 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 جذابیت های آن خواهد افزود.
- با مقایسه روش بهینه سازی چند هدفه نشان داده شد جواب های 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.
- نتیجه ها نشان داد تزریق متناوب آب و گاز دارای عملکرد بهتری نسبت به تزریق پیوسته ی گاز در از دید برداشت نفت می باشد در حالی که مقدار ذخیره سازی به صورت محسوسی کاهش می یابد (کاهش ۵۴ میلیارد بشکه در بهترین حالت نسبت به فرایند تزریق پیوسته ی گاز کربن دی اکسید).

### 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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., Arora J.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) ۱۱ : ۳ تا ۲۳ (۱۳۹۱).