

بهینه‌سازی چندهدفه با تلفیق روش‌های طراحی آزمایش، الگوریتم ازدحام ذرات و منطق فازی: مطالعه موردی برای ازدیاد برداشت به کمک تزریق پلیمر

محمدصابر کرم‌بیگی

پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۷

چکیده

روش‌های بهینه‌سازی که در آنها تنها به یک معیار توجه نمی‌توانند راه‌حل جامعی را برای مسئله ارائه نمایند زیرا نمی‌توانند تهاجر بین اهداف مختلف فنی و اقتصادی را که معمولاً با یکدیگر در تضادند، در نظر بگیرند. در این پژوهش، یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه با تلفیق روش‌های طراحی آزمایش، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و منطق فازی توسعه داده شد که می‌تواند مسائل بهینه‌سازی چندمنظوره را با در نظر گرفتن هم‌زمان اهداف مختلف حل نماید. توانمندی این الگوریتم، در یک مطالعه موردی تزریق پلیمر ارزیابی شد که در آن متغیرهای موثر (طول دوره سیلاب‌زنی، غلظت پلیمر طول دوره تزریق پلیمر و جذب پلیمر) بر عملیات ازدیاد برداشت تزریق پلیمر به یک مخزن ماسه‌سنگی با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای فنی (تولید تجمعی نفت) و اقتصادی (ارزش فعلی خالص) بهینه‌سازی شدند. نتایج بهینه‌سازی این الگوریتم چندمعیاره با نتایج یک سناریوی پایه و همچنین یک روش بهینه‌سازی تک‌هدفه (الگوریتم ازدحام ذرات) مقایسه شد. در مقایسه با سناریوی پایه، تولید تجمعی نفت بیش از ۵۸٪ و ارزش فعلی خالص از ۶/۹ به ۱۳/۱ میلیون دلار افزایش یافتند. تولید تجمعی نفت بهینه در الگوریتم تک‌هدفه مبتنی بر معیار فنی، نسبت به الگوریتم دوهدفه چند هزار بشکه افزایش پیدا کرد ولی از طرف دیگر شاخص اقتصادی آن شدیداً دچار افت گردید (کاهش ارزش فعلی خالص از ۱۳/۱ به ۱۱/۵ میلیون دلار). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندمعیاره منجر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر برای پیاده‌سازی عملیات خواهد شد.

کلمات کلیدی: تزریق پلیمر، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ازدحام ذرات، منطق فازی، روش ازدیاد برداشت شیمیایی نفت

مقدمه

در حال حاضر، حداکثر ۳۰ تا ۵۰٪ نفت با استفاده از انواع روش‌های تولید اولیه (شامل مکانیسم‌های رانش طبیعی) و ثانویه (سیلاب‌زنی یا تزریق گاز) استحصال می‌شود و حجم قابل توجهی از نفت درجا بعد از این مراحل در مخزن به‌جای می‌ماند که هدف خوبی برای مرحله ثالثیه یا روش‌های ازدیاد برداشت است [۱]. در این مرحله، بهبود تولید در گرو استفاده از روش‌هایی است که قادرند با افزایش عدد موینگی^۱ (N_c) از طریق اعمال نیروهای گرانشی^۲ و یا غلبه بر نیروهای موینگی^۳، مطابق رابطه ۱ نفت به دام‌افتاده را آزاد نمایند:

$$N_c = \frac{\mu v}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن، μ گرانشی سیال تزریقی، v سرعت سیال و σ کشش بین‌سطحی است [۲]. فرآیندهای ازدیاد برداشت در چهار دسته حرارتی، حلال^۴ (منظور گاز امتزاجی)، شیمیایی و سایر روش‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. در این بین، دسته روش‌های شیمیایی از کارایی بالایی برخوردارند. شاید به جرات بتوان گفت که پرکاربردترین ماده شیمیایی در بین تکنیک‌های مختلف این دسته، پلیمر است. پلیمرها با سازوکارهای مختلفی باعث نظارت بر پایداری تولید^۵ یا ازدیاد برداشت نفت می‌شوند که به‌طور کلی عبارتند از: بهبود خاصیت جارویی ماکروسکوپی^۶ جبهه تزریق در ابعاد سطحی و حجمی از طریق کاهش تحرک‌پذیری^۷ سیال تزریقی و امکان‌پذیر ساختن هدایت سیال تزریقی به نواحی با نفوذپذیری پایین از طریق مسدودسازی مناطق پرتراوا [۴].

پتانسیل بالای پلیمر به منظور ازدیاد برداشت نفت در مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مختلف به اثبات رسیده است [۵] اما موفقیت‌آمیز بودن اجرای عملیات در مقیاس میدانی مستلزم شناسایی دقیق پارامترهای تاثیرگذار و انتخاب بهترین مقادیر برای آنها است زیرا برخی محدودیت‌ها همواره کارایی عملیات را تحت تاثیر قرار می‌دهند؛ همچون:

پیچیدگی فرآیند ازدیاد برداشت شیمیایی، شرایط دشوار مخازن از نظر دما و شوری، قیمت پلیمر و مسایل زیست محیطی [۶]. از روش تزریق پلیمر در مخازن مختلف از جمله نفت سنگین استفاده شده است. به‌طور مثال، وو و همکاران سیلاب زنی پلیمر را در یکی از میدانی‌های نفت سنگین چین (Z70) بررسی کردند. نفت این میدان دارای گرانشی cp ۱۶۵ و دمای مخزن ۹۳°C بود. بعد از عملیات سیلاب زنی پلیمر، برش آب از ۸۳٪ به ۷۴٪ کاهش پیدا کرد، در حالی که نرخ تولید نفت به دو برابر میزان اولیه خود افزایش یافت [۷]. تاکنون روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی تکنیک‌های ازدیاد برداشت شیمیایی نفت پیشنهاد شده است؛ از قبیل روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی [۸]، حساسیت‌سنجی پارامترهای تاثیرگذار [۹]، مدل‌های جایگزین^۸ [۱۰] و طراحی آزمایش [۱۱]. در بیشتر این روش‌ها، به مسئله بهینه‌سازی به‌صورت تک‌هدفه پرداخته شده است. به‌طور مثال، تنها به بیشینه‌سازی درصد بازیافت نهایی نفت توجه شده است بدون اینکه مسایل اقتصادی لحاظ گردند. در این صورت، پیاده‌سازی عملیات با ریسک زیادی مواجه خواهد شد. دست‌یابی به مناسب‌ترین چیدمان (مقادیر بهینه) فاکتورهای موثر و ارائه بهترین راه‌حل هنگامی که نحو مطلوب انجام می‌شود که جنبه‌های مختلف مسئله به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود. به‌عبارت دیگر، فرآیند به‌صورت چند معیاره بهینه‌سازی گردد. پژوهش‌هایی که در آنها فرآیند ازدیاد برداشت شیمیایی به‌صورت چندهدفه بهینه‌سازی شده باشد، بسیار محدود هستند. به‌طور مشخص، اکاوانگ و همکاران یک الگوریتم بهینه‌سازی دومنظوره براساس روش Pareto optimization ارائه کردند که قادر بود به‌صورت هم‌زمان راه‌حل بهینه را

1. Capillary Number

2. Viscous Forces

3. Capillary Forces

4. Solvent

5. Production Surveillance

6. Macroscopic Sweep Efficiency

7. Mobility

8. Surrogate-based Optimization

الگوریتم، برازندگی^۵ هر ذره توسط تابع هدف ارزیابی می‌شود. یک تابع هدف، در واقع معادله ریاضی بین ورودی‌های یک فرآیند و پاسخ (خروجی) آن فرآیند است. چنان‌چه قرار باشد یک هدف بیشینه گردد، ذره‌ای برآزش بالاتری دارد که مقدار پاسخ آن بیشتر باشد و برعکس. وجود تابع (یا توابع) هدف دقیق از الزامات مهم پیاده‌سازی مطلوب بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی^۶ است.

برازندگی هر ذره در گام موجود با بهترین مقدار برازشی که تاکنون آن ذره از تمامی گام‌های گذشته (موسوم به pbest) داشته است، مقایسه و چنان‌چه بهتر از آن باشد مقدار pbest به‌روز رسانی می‌شود. همچنین بهترین برازش بین مقادیر pbest موجود در هر گام به‌عنوان gbest آن گام نام‌گذاری می‌گردد که آن هم در صورت وجود مقدار برازش بالاتر در گام‌های بعدی، روزآمدسازی می‌شود. در گام بعدی، تمامی ذرات به موقعیت‌های جدید در فضای نمونه با استفاده از معادله ۲ انتقال می‌یابد:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

همچنین بردار سرعت هر ذره نیز با استفاده از معادله ۳ به‌روز می‌شود:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + C_1 \phi_1(pbest_i - x_i(t)) + C_2 \phi_2(gbest - x_i(t)) \quad (3)$$

که در آن، ω فاکتور وزنی اینرسی، C_1 و C_2 ضرایب شتاب ذره، ϕ_1 و ϕ_2 وزن‌های تصادفی برگرفته از بازه (۰ و ۱) هستند. جابه‌جایی ذرات به موقعیت‌های جدید و به‌روزرسانی مقادیر pbest و gbest برای هر گام تا جایی ادامه می‌یابد که معیار توقف الگوریتم فرا رسد که معمولاً تعداد مشخصی از گام‌ها است. در نهایت، مقادیر متغیرهای متناظر با آخرین gbest، جواب مسئله است [۱۶].

بر مبنای اهداف تولید تجمعی نفت و کارایی پلیمر ارائه نماید [۱۲]. منظور از بهینه‌سازی چندهدفه این است که بتوان تهاثر^۱ بین معیارهای مختلف را که معمولاً دارای تضاد منافع نیز هستند، ملاحظه کرد [۱۳]. در این راستا، بیشتر شاخص‌های فنی و اقتصادی در تقابل با یکدیگر قرار دارند و نمی‌توان تصمیمات بهینه را بدون در نظر گرفتن هم‌زمان آنها برای حل مسایل پیچیده بهینه‌سازی نظیر اجرای فرآیندهای ازدحام برداشت اخذ نمود. در این تحقیق یک گردش کار ترکیبی^۲ متشکل از روش‌های طراحی آزمایش، الگوریتم ازدحام ذرات و منطق فازی توسعه داده شده است تا فرآیند تزریق پلیمر به‌صورت چندمعیاره (فنی و اقتصادی) بهینه‌سازی شود. این مقاله، به نحوه پیاده‌سازی این روش بهینه‌سازی چندهدفه در یک مطالعه موردی می‌پردازد. همچنین نتایج آن با یک الگوریتم بهینه‌سازی تک‌منظوره (ازدحام ذرات) نیز مقایسه می‌شود.

پیش زمینه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

یکی از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جستجوی مستقیم تصادفی^۳ در جمعیت آماری، الگوریتم ازدحام ذرات است که برای نخستین بار توسط کندی و ابرهات ارائه شد [۱۴]. آنها از زندگی اجتماعی حیوانات نظیر دسته پرندگان، ماهی‌ها یا زنبور عسل برای حل مسایل بهینه‌سازی علوم پایه و مهندسی الهام گرفتند. این الگوریتم در عین سادگی (در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک) می‌تواند مسایل پیچیده را با موفقیت حل نماید [۱۵]. در این الگوریتم، ابتدا جمعیتی از راه‌حل‌های ممکن به‌صورت اتفاقی ایجاد می‌شود که مجموع آنها یک ازدحام از ذرات^۴ را تشکیل می‌دهد. هر ذره موقعیت و سرعت مختص به خود را دارد که مشخص کننده مکان آن ذره در فضای جستجو است. در هر گام از اجرای

1. Trade-off
2. Hybrid Workflow
3. Stochastic Search Method
4. Swarm of Particles
5. Fitness
6. Evolutionary Algorithms

منطق فازی

در سال ۱۹۶۵ میلادی، زاده ایده منطق فازی را ارائه نمود که برپایه مجموعه‌های فازی استوار بود. منطق فازی امکان وارد نمودن تفکر انسانی را در محاسبات ریاضی فراهم کرد. منطق فازی در حوزه‌هایی که قطعیت بالا و مرزهای شفافی ندارند، بسیار کارآمد است. در منطق ارسطویی، یک عضو یا به یک مجموعه تعلق دارد یا ندارد. اما در منطق فازی برای هر عضو، یک درجه عضویت^۱ در بازه [۰ و ۱] تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر، منطق ارسطویی تفکر سیاه و سفید است؛ در حالی که منطق فازی تفکر خاکستری است. با یک مثال می‌توان این مفهوم را بهتر درک کرد. اگر مجموعه مخازن نامتعارف^۲ را این‌گونه تعریف کنیم که دارای نفوذپذیری کمتر از ۰/۱۰ mD هستند. بر مبنای تفکر ارسطویی، مخزنی که دارای تراوایی ۰/۰۹ mD است به این مجموعه تعلق قطعی دارد (درجه عضویت واحد) ولی مخزن دیگری با تراوایی ۰/۱۱ mD به این مجموعه اصلاً تعلق ندارد (درجه عضویت صفر) و مخزنی متعارف است. اما در حقیقت مخزن دوم واقعاً متعارف به‌شمار می‌آید؟ تفکر فازی این مشکل را حل نموده است. بر مبنای آن، مخزن دوم نیز تا حد بسیار زیادی نامتعارف است فقط میزان تعلق آن در مقایسه با مخزن اول کمتر است (کمتر از واحد برای مخزن دوم در مقایسه با درجه عضویت واحد برای مخزن اول). زیرا تراوایی مخزن دوم (۰/۱۱ mD) به مقادیر تراوایی شاخص و مخزن اول (۰/۱۰ و ۰/۰۹ mD) بسیار نزدیک است. نکته جالب‌تر این است که یک مخزن دارای تراوایی ۱۰ mD نیز بر طبق این تفکر می‌تواند به مجموعه مخازن نامتعارف متعلق باشد اما درجه عضویت آن بسیار بسیار کم است (نزدیک به صفر اما غیر صفر). در نتیجه، همه مقادیر مختلف می‌توانند به یک مجموعه مشخص متعلق باشند فقط فرق آنها در مقدار متفاوت درجه عضویت آنها است. به عبارت دیگر، منطق فازی امکان وارد نمودن قیدهای کلامی همچون بسیار زیاد یا بسیار بسیار کم را در ریاضی فراهم آورده است که نقطه ضعف همیشگی منطق ارسطویی به شمار می‌رفت. در یک

جمله، منطق فازی امکان تغییر تدریجی از عضویت به عدم عضویت را فراهم می‌نماید.

روش تحقیق

در این مطالعه، فرآیند تزریق پلیمر در یک گردش کاری تلفیقی شامل مراحل مدل‌سازی آماری و سپس بهینه‌سازی چندمنظوره بهینه‌سازی گردید تا بیشترین کارایی فنی و اقتصادی را ارائه نماید. چهار فاکتور ورودی فرآیند عبارت بودند از: طول دوره سیلاب‌زنی، غلظت پلیمر، طول دوره تزریق پلیمر و جذب پلیمر که محدوده تغییرات آنها در جدول ۱ ارائه شده است [۱۷]. لازم به ذکر است که فاکتور جذب پلیمر در واقع پارامتر بدون بعد AD41 در شبیه‌ساز UTCHEM است [۱۸] که مقادیر این متغیر در بازه ۱ تا ۴ معادل مقدار جذب در بازه ۱۰/۴۵ تا ۴۱/۱۷ mg/g است. همچنین پاسخ‌های فرآیند شامل تولید تجمعی نفت^۳ (هدف فنی) و ارزش فعلی خالص (هدف اقتصادی) بودند و اهداف بهینه‌سازی در این تحقیق، بهینه‌سازی هم‌زمان شاخص‌های مذکور بود. مدل‌سازی آماری با استفاده از روش Historical Data به‌عنوان یکی از تکنیک‌های روش سطح پاسخ^۴ انجام شد تا ارتباط ریاضی بین متغیرهای فرآیند با پاسخ‌های آن مشخص شود. در این روش، مقداردهی (سطوح) فاکتورها در هر آزمایش و پاسخ متناظر آن می‌تواند به‌طور مستقیم به یک الگوی خالی طرح آزمایش^۵ وارد شود [۱۹]. برای این منظور، ابتدا چیدمان‌های مختلف از مقادیر چهار متغیر ورودی فرآیند (جدول ۱) در قالب ۳۰ آزمایش به‌عنوان الگوی خالی طرح آزمایش در نظر گرفته شدند. پاسخ‌های متناظر هر آزمایش شامل تولید تجمعی نفت توسط شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم‌افزار UTCHEM و ارزش فعلی خالص بر مبنای قیمت نفت ۵۰ دلار و با استفاده از محاسبات اقتصادی استخراج شد که پارامترهای آن در جدول ۲ ارائه شده است [۱۷].

1. Membership Degree

2. Unconventional

3. Cumulative Oil Production

4. Response Surface Methodology

5. Blank Design Layout

جدول ۱ پارامترهای موثر بر فرآیند تزریق پلیمر، دامنه تغییرات و سطوح جدول طراحی آزمایش

متغیر	واحد	سطح - α (حد پایین دامنه)	سطح -۱	سطح ۰	سطح +۱	سطح + α (حد بالای دامنه)
طول دوره سیلاب‌زنی	روز	۰/۸۷۵	۶۱	۱۵۳/۵	۲۴۶	۳۰۶/۱۲۵
غلظت پلیمر	(% wt)	۰/۰۱۸۷۵	۰/۱	۰/۲۲۵	۰/۳۵	۰/۴۳۱۲۵
طول دوره تزریق پلیمر	روز	۳/۷۵	۱۵۰	۳۷۵	۶۰۰	۷۴۶/۲۵
جذب پلیمر	-	۰/۰۲۵	۱	۲/۵	۴	۴/۹۷۵

جدول ۲ پارامترهای اقتصادی در نظر گرفته شده برای ارزیابی اقتصادی فرآیند تزریق پلیمر [۱۷]

نوع هزینه	متغیر	واحد	مقدار
سرمایه‌گذاری اولیه	تجهیزات	دلار	۱۰۰۰۰۰
عملیاتی	هزینه‌های سیلاب‌زنی	USD/month	۱۰۰۰۰
	هزینه‌های تزریق مواد شیمیایی	USD/bbl	۰/۲۰
	هزینه‌های جداسازی آب و فرآورش نفت	VSD/bbl	۰/۲۰
	هزینه‌های سرباره	درصد مستقیم از هزینه‌های عملیاتی	۱۰
کالا	قیمت پلیمر	USD/bbl	۱
عمومی	نرخ تورم / نرخ تعدیل قیمت‌ها	درصد (هر یک از متغیرها)	۳
	نرخ‌های تنزیل / نرخ سرمایه‌گذاری مجدد	درصد (هر یک از متغیرها)	۱۰

معیار به‌دست آید. توابع فعلی برای محاسبه مقادیر pbest مربوط به هر ذره و gbest مربوط به کل جمعیت در گام فعلی در بهینه‌سازی چندمنظوره قابل استفاده نیستند زیرا حل چنین مسایلی مستلزم در نظر گرفته شدن هر دو معیار به‌صورت هم‌زمان است [۲۱]. راهکار پژوهش حاضر، ترکیب نمودن توابع هدف با یکدیگر و ایجاد یک تابع هدف یگانه^۳ است. برای این منظور از منطق فازی استفاده شد. ابتدا توابع هدف موجود فازی‌سازی^۴ گردیدند و توابع عضویت فازی (μ_f) مطابق معادله ۴ ایجاد شد:

$$\mu_f(F_k) = \begin{cases} 0 & F_k < F_k^{\min} \\ \frac{F_k - F_k^{\min}}{F_k^{\max} - F_k^{\min}} & F_k^{\min} < F_k < F_k^{\max} \\ 1 & F_k > F_k^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن، k اندیس مربوط به معیارهای بهینه‌سازی (عدد ۱ برای معیار فنی و ۲ برای معیار اقتصادی)، F_k پاسخ متناظر به معیار k ام، F_k^{\max} و F_k^{\min} مقادیر بیشینه و کمینه هر تابع هدف هستند.

1. Analysis of Variance (ANOVA)
2. Objective Functions
3. Unique
4. Fuzzification

جدول طراحی آزمایش و پاسخ‌های به‌دست آمده به نرم‌افزار Design Expert تغذیه شد و مدل‌های ریاضی به داده‌ها برازش گردید. در ادامه، آنالیز واریانس^۱ روی مدل‌های برازش شده انجام شد تا کیفیت آنها ارزیابی و در صورت لزوم ارتقا داده شود. مدل‌های نهایی به‌دست آمده به‌عنوان توابع هدف^۲ در مرحله بعدی گردش کاری یعنی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم گردش کاری، از یک الگوریتم ترکیبی برای بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. ابتدا و در گام اول الگوریتم، جمعیتی متشکل از ۲۵ ذره در فضای نمونه به‌صورت تصادفی به‌کمک مولفه‌های موقعیت و سرعت خود مکان‌یابی شدند. لازم به ذکر است که پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات، این‌گونه انتخاب شدند: فاکتور وزنی اینرسی (w) برابر ۰/۷۲۹۸ قرار گرفت و برای ضرایب شتاب ذره (C_1 و C_2) مقدار ۱/۴۹۶۱۸ در نظر گرفته شد. در این صورت الگوریتم رفتار همگرایی بهتری دارد [۲۰]. سپس، توابع هدف مربوط به معیارهای فنی و اقتصادی (به‌دست آمده از مرحله مدل‌سازی آماری) به‌کار گرفته شد تا مقدار برازش هر ذره به‌صورت جداگانه به‌ازای هر

جواب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه خواهد بود.

مطالعه موردی

مخزن تحت مطالعه دارای ابعاد طولی و عرضی حدود ۷۲۰ ft در ۷۲۰ ft از نوع ماسه‌سنگی معمولی (غیر شکاف‌دار) فوق اشباع^۱ (فشار اولیه ۱۸۰۰ psi) و محتوی نفت سنگین با حجم در جای حدود ۲ میلیون bbl می‌باشد. به دلیل طراحی بهره‌بردار آن، این مخزن یک دوره کوتاه سیلاب‌زنی را پشت سر گذاشته و متعاقب آن پلیمر به‌عنوان روش ازدیاد برداشت به مخزن تزریق گشته است و در نتیجه فاقد سناریوی طبیعی تولید بوده است. روش تزریق پلیمر در مخازن نفت سنگین به‌عنوان یکی از روش‌های تولید سرد شناخته می‌شود که کارآمدی آن در مطالعات مختلف آزمایشگاهی، شبیه‌سازی و میدانی به اثبات رسیده است [۲۲]. الگوی تزریق به‌صورت 5-spot شامل ۴ حلقه چاه تزریقی در اطراف و ۱ حلقه چاه تولیدی در مرکز بود. فاصله چاه‌های تزریقی از یکدیگر حدود ۳۶۰ ft و فاصله آنها از چاه تولیدی ۲۵۵ ft بود. نرخ تزریق ۳۷۵ bbl/day برای هر چاه تزریقی بود و تولید از مخزن با فشار ثابت ۱۳۰۰ psi انجام شد [۱۷]. اطلاعات بیشتر در خصوص مشخصات مخزن در جدول ۳ ارائه شده است.

هر تابع عضویت، دربرگیرنده محدوده‌ای فازی از جواب قابل قبول است. حال چنانچه تابعی جدید به‌صورت معادله ۵ تعریف کنیم که حداقل مقدار توابع عضویت فازی ایجاد شده برای ذره نام باشد، می‌توانیم تابع یگانه جایگزین توابع هدف را درست کنیم:

$$k_i = \min \{ \mu_f (F_1), \mu_f (F_2) \} \quad (5)$$

که در آن، k_i معیار رضایت‌مندی^۱ است. در اینجا، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به دنبال بیشینه ساختن این معیار است که در این صورت، مقدار این تابع در طول اجرای الگوریتم به سمت واحد پیش می‌رود و به تبع آن توابع عضویت فازی نیز بهبود می‌یابند. بعد از تبدیل توابع هدف از حالت فازی به غیرفازی، می‌توان جواب مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره را ارائه نمود. در این صورت، مقادیر $pbest_i$ برای هر ذره به‌دست می‌آید و مقدار $gbest$ کل جمعیت در گام فعلی براساس معادله ۶ محاسبه می‌شود:

$$gbest = \text{Max} \{ pbest_i \} \quad (6)$$

سپس در گام بعدی، یک جمعیت جدید با به‌روزرسانی مولفه‌های موقعیت و بردار سرعت ذرات ایجاد و مقادیر $pbest$ آنها و $gbest$ جمعیت محاسبه و در صورت لزوم روزآمدسازی می‌شود تا گردش کاری مذکور تمامی گام‌های خود را (در اینجا ۶۰ گام) طی نماید. در نهایت، مقادیر فاکتورهای (ورودی‌های) متناظر با آخرین مقدار پارامتر $gbest$ به‌عنوان

جدول ۳ مشخصات کلی مدل شبیه‌سازی مخزن و خواص سنگ و سیال آن

مقدار	واحد	متغیر
۳۶ و ۱۵، ۱۵	-	سلول‌ها در جهت X، Y و Z
۳۲/۸-۱۳۱/۲	ft	اندازه سلول‌ها در جهت X و Y
۲/۲۳-۵/۶۸	ft	اندازه سلول‌ها در جهت Z
۴	درصد	اشباع آب اولیه
۲۰۰-۱۷۰۰۰	mD	نفوذپذیری سنگ مخزن
۰/۶	-	نقطه انتهایی نمودار نفوذپذیری نسبی آب
۰/۹۳	-	نقطه انتهایی نمودار نفوذپذیری نسبی نفت
۲/۵	-	توان منحنی نمودار نفوذپذیری نسبی آب
۸-۴	-	توان منحنی نمودار نفوذپذیری نسبی نفت
۶۲		دمای مخزن
۰/۴۸	cP	گرانروی آب در دمای مخزن
۱۷	cP	گرانروی نفت در دمای مخزن

نتایج و بحث

توابع هدف بود. برای تحقق این مهم، ۳۰ آزمایش طراحی شده هر یک شامل چیدمانی از فاکتورهای ورودی و پاسخ‌های متناظر آنها در جدول ۴ آورده شده است. جدول مذکور در نرم‌افزار طراحی آزمایش وارد شد تا داده‌ها از نظر آماری آنالیز گردند.

با استفاده از یک گردش کار تلفیقی، روش ازدیاد برداشت تزریق پلیمر به صورت چندمنظوره بهینه‌سازی گردید. مرحله نخست این گردش کاری، مدل‌سازی آماری فرآیند به منظور به دست آوردن

جدول ۴ آزمایش‌های طراحی شده و مقادیر پاسخ‌های متناظر آنها

شماره آزمایش	متغیر ۱: دوره سیلاب‌زنی (day)	متغیر ۲: غلظت پلیمر (%wt)	متغیر ۳: دوره تزریق پلیمر (day)	متغیر ۴: جذب پلیمر (بدون بعد)	پاسخ ۱: تولید تجمعی (bbl)	پاسخ ۲: ارزش فعلی خالص (MM \$)
۱	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۲	۱۵۳/۵	۰/۰۱۹	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۳۷۱۸۲۰	۴/۰۹۲
۳	۶۱/۰	۰/۳۵۰	۶۰۰/۰	۱/۰۰	۶۴۹۸۲۰	۱۲/۵۸۷
۴	۲۴۶/۰	۰/۱۰۰	۱۵۰/۰	۴/۰۰	۳۴۷۲۴۰	۴/۱۰۶
۵	۳۰۶/۱	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۷۵۸۰	۷/۴۳۶
۶	۱۵۳/۵	۰/۴۳۱	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۷۹۵۰۰	۱۰/۰۸۱
۷	۰/۹	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۱۳۳۰	۱۰/۷۶۲
۸	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۹	۲۴۶/۰	۰/۳۵۰	۶۰۰/۰	۱/۰۰	۶۵۳۸۱۰	۱۰/۸۱۹
۱۰	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳/۸	۲/۵۰	۲۹۰۱۲۰	۳/۴۳۹
۱۱	۶۱/۰	۰/۱۰۰	۶۰۰/۰	۴/۰۰	۴۶۶۳۰۰	۸/۵۷۹
۱۲	۲۴۶/۰	۰/۱۰۰	۶۰۰/۰	۱/۰۰	۴۷۵۳۱۰	۶/۹۶۱
۱۳	۶۱/۰	۰/۱۰۰	۱۵۰/۰	۴/۰۰	۳۴۳۶۱۰	۵/۸۵۴
۱۴	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۷۴۶/۳	۲/۵۰	۶۲۲۳۴۰	۱۰/۸۳۷
۱۵	۲۴۶/۰	۰/۱۰۰	۶۰۰/۰	۴/۰۰	۴۶۸۴۵۰	۶/۷۷۶
۱۶	۶۱/۰	۰/۱۰۰	۶۰۰/۰	۱/۰۰	۴۷۱۹۹۰	۸/۷۳۶
۱۷	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۰/۰۳	۵۱۰۷۸۰	۸/۶۴۰
۱۸	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۱۹	۲۴۶/۰	۰/۳۵۰	۱۵۰/۰	۴/۰۰	۴۱۸۱۰۰	۵/۶۹۴
۲۰	۶۱/۰	۰/۳۵۰	۱۵۰/۰	۱/۰۰	۴۲۰۶۷۰	۷/۵۸۹
۲۱	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۲۲	۲۴۶/۰	۰/۳۵۰	۱۵۰/۰	۱/۰۰	۴۲۶۷۲۰	۵/۹۰۷
۲۳	۲۴۶/۰	۰/۳۵۰	۶۰۰/۰	۴/۰۰	۶۵۰۷۰۰	۱۰/۷۲۶
۲۴	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۲۵	۶۱/۰	۰/۳۵۰	۱۵۰/۰	۴/۰۰	۴۱۴۲۷۰	۷/۴۳۳
۲۶	۲۴۶/۰	۰/۱۰۰	۱۵۰/۰	۱/۰۰	۳۵۸۱۰۰	۴/۳۷۵
۲۷	۶۱/۰	۰/۱۰۰	۱۵۰/۰	۱/۰۰	۳۵۳۱۵۰	۶/۰۹۰
۲۸	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۲/۵۰	۵۰۶۰۳۰	۸/۵۱۶
۲۹	۶۱/۰	۰/۳۵۰	۶۰۰/۰	۴/۰۰	۶۴۸/۲۷۰	۱۲/۵۳۶
۳۰	۱۵۳/۵	۰/۲۲۵	۳۷۵/۰	۴/۹۸	۵۰۰۴۶۰	۸/۳۶۰

که نسبت سیگنال به نویز^۵ بزرگ‌تر از عدد ۴ گردد که مقادیر به‌دست آمده برای هر دو مدل در این محدوده قرار داشت. در نتیجه، مجموع پارامترهای آماری ارائه شده در جدول ۵ بیان‌گر دقت و اعتبار بالای مدل‌های برازش شده هستند که با اطمینان می‌توان از آنها به‌عنوان توابع هدف در بخش بعدی گردش کار استفاده کرد. معادله‌های ۷ و ۸ مدل‌های توان دوم یا همان توابع هدف را نشان می‌دهند:

$$\begin{aligned} COP = & 2.22 \times 10^5 - 12.21A + 7.06 \times 10^5 B + 421.56C \\ & - 7694.46D + 12.16AB - 0.02AC - 2.82AD + 984.2BC \\ & + 4423.33BD + 3.37CD + 0.14A^2 - 1.23 \times 10^6 B^2 - 0.33C^2 + 740.54D^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} NPV = & 3.76 - 0.02A + 18.00B + 0.01C - 0.14D + \\ & 2.32 \times 10^{-4} AB - 8.14 \times 10^{-7} AC - 7.16 \times 10^{-5} AD + 0.02BC + \\ & 0.11BD + 7.16 \times 10^{-5} CD + 2.82 \times 10^{-5} A^2 - 31.85B^2 - 9.46C^2 + 9.54D^2 \end{aligned} \quad (8)$$

در این معادله‌ها، COP تولید تجمعی نفت، NPV ارزش فعلی خالص و عبارت‌های A تا D معرف فاکتورهای ورودی فرآیند هستند.

با داشتن توابع هدف، می‌توان مرحله دوم گردش کار را آغاز نمود که بهینه‌سازی چندهدفه است. برای این منظور، ۲۵ ذره در یک جمعیت ایجاد شد که به‌صورت اتفاقی در فضای نمونه پراکنده شدند.

بر مجموعه داده‌های ورودی-خروجی، مدل‌های مختلفی برازش شد که بهترین آنها معادلات درجه دوم بود. سپس آنالیز واریانس روی بهترین مدل‌ها انجام شد تا دقت آنها سنجیده شود که نتایج آن در جدول ۵ قابل مشاهده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که مدل‌های برازش شده با حد اطمینان ۹۹/۹٪ معتبر است زیرا پارامتر $\text{prob} > F$ مدل‌ها کمتر از ۰/۰۰۰۱ به‌دست آمد؛ افزون بر این که نتایج آزمون F-test (پارامتر F value) نیز مناسب بود. همچنین مقادیر سه پارامتر ضریب پیوستگی (R-squared)، فرم اصلاح شده آن (Adjusted R-squared) و صورت پیش‌بینی کننده آن (Predicted R-squared) برای هر دو مدل نزدیک به واحد بودند که اعتبار بسیار قابل قبول مدل‌های برازش شده را نشان می‌دهد. در ادامه، ضریب واریانس^۱ یا CV میزان تکرارپذیری نتایج مدل را می‌سنجد که طبق تعریف به نسبت انحراف استاندارد به میانگین داده‌ها اطلاق می‌شود. مقادیر زیر ۱۰٪ برای مدل‌های معتبر مطلوب است که در هر دو مدل توان دوم مقدار CV از این شاخص کمتر بود. به‌علاوه، مغایرت^۲ پاسخ پیش‌بینی شده نسبت به خطای وابسته^۳ توسط پارامتر دقت بسنده^۴ ارزیابی می‌شود. هنگامی از کافی بودن دقت مدل، اطمینان حاصل می‌شود

جدول ۵ آنالیز واریانس مدل‌های توان دوم برازش شده

پارامتر آماری	مدل مربوط به پاسخ ۱: تولید تجمعی نفت	مدل مربوط به پاسخ ۲: ارزش فعلی خالص
Model F value	۱۶۰/۰۲	۱۲۹/۸۲
Model prob>F	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
R-squared	۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۱۸
Adjusted R-squared	۰/۹۸۷۱	۰/۹۸۴۲
Predicted R-squared	۰/۹۶۵۹	۰/۹۵۷۹
CV%	۲/۳۹	۳/۷۷
Adequate precision	۴۳/۱۷۵	۴۲/۰۷۱

1. Coefficient of Variance
2. Contrast
3. Associate Error
4. Adequate Precision
5. Noise

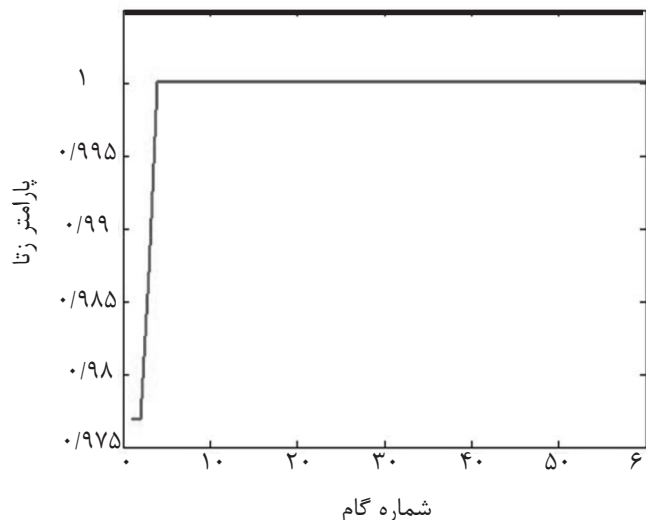
موقعیت یابی و مقادیر مذکور برای آنها محاسبه شد. روند بهبود تابع یگانه هدف (تابع g) در شکل ۱ قابل مشاهده است.

معیار توقف الگوریتم ازدحام ذرات پیشروی الگوریتم تا ۶۰ جمعیت مشخص شده بود. پارامتر g_{best} جمعیت شصتم بهترین جواب مسئله بود که مقادیر متغیرهای ورودی متناظر آن به عنوان مقادیر بهینه آن متغیرها و در واقع جواب مسئله بودند. شکل ۲ روند تغییرات اهداف مسئله را نشان می‌دهد که در هنگام پیشروی الگوریتم چگونه به بهترین مقدار خود نزدیک می‌شوند.

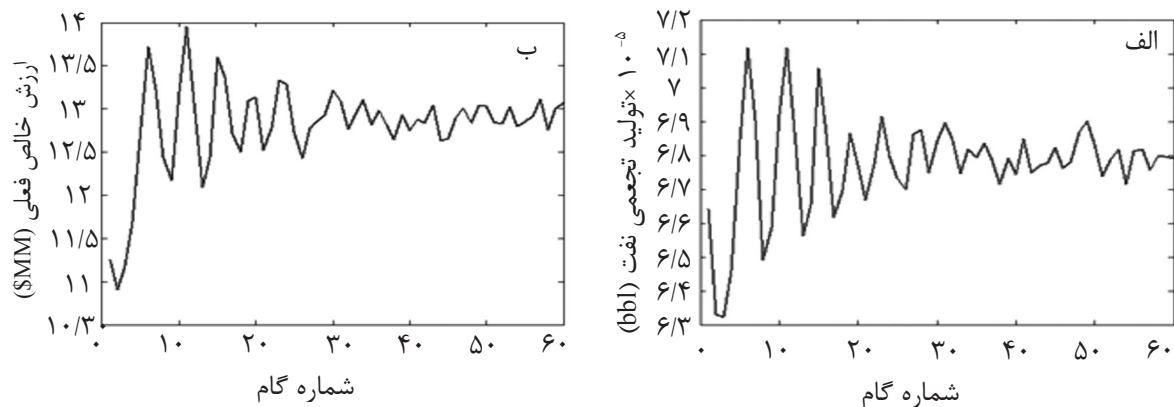
مقادیر بهینه فاکتورهای فرآیند در جدول ۶ نشان داده شده است. طراحی بهینه عملیات این گونه است: قبل از تزریق پلیمر، مخزن به مدت ۶۸ روز تحت سیلاب زنی باشد. سپس پلیمر (با فاکتور جذب ثابت ۲) با غلظت $0.34/0$ درصد وزنی به مخزن به مدت ۶۷۱ روز تزریق شود. در این صورت تولید تجمعی نفت از 426100 bbl در سناریوی پایه^۱ تا 675812 bbl در سناریو بهینه افزایش خواهد یافت در حالی که ارزش فعلی خالص نیز از $6/9$ به $13/1$ میلیون دلار رشد خواهد کرد.

بازه تغییرات فاکتورهای اول تا سوم در فضای نمونه‌گیری، حد پایین و بالای آنها در جدول ۱ بود اما فاکتور چهارم یعنی جذب پلیمر در مقدار ۲ ثابت نگه داشته شد زیرا از یک سو هر پلیمر دارای میزان مشخصی جذب در یک مخزن تحت مطالعه است که قابل تغییر نیست و از سوی دیگر در سناریوی پایه این مقدار ثابت در نظر گرفته شد که جهت مقایسه نتایج سناریوی بهینه با سناریوی پایه، مقدار جذب برابر ۲ و به صورت ثابت در نظر گرفته شد. مقدار بهینه هر متغیر در بازه‌های مذکور به گونه‌ای تعیین شد تا بتواند تولید تجمعی نفت و ارزش فعلی خالص را هم‌زمان بیشینه نماید. بعد از اینکه تمامی ذرات در این جمعیت مکان‌یابی شدند، برازش هر ذره برای هدف فنی براساس معادله ۷ و برای شاخص اقتصادی بر مبنای معادله ۸ محاسبه شد. سپس با استفاده از معادله‌های ۴ تا ۶، مقدار تابع یگانه هدف برگرفته شده از فازی‌سازی توابع هدف فنی و اقتصادی برای هر ذره و برای جمعیت در گام فعلی محاسبه شد تا براساس آن مقادیر p_{best} هر ذره و g_{best} در این جمعیت مشخص شود.

سپس در گام (جمعیت) بعدی ذرات جدید



شکل ۱ روند تغییرات تابع یگانه هدف از شروع تا پایان الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات



شکل ۲ روند تغییرات اهداف برای رسیدن به مقادیر بهینه در الگوریتم بهینه‌سازی؛ (الف) تولید تجمعی نفت و (ب) ارزش خالص فعلی

جدول ۶ سناریوهای بهینه فرآیند تزریق پلیمر و سناریوی پایه

سناریوی پایه	بهینه‌سازی تک‌هدفه: تنها معیار اقتصادی	بهینه‌سازی تک‌هدفه: تنها معیار فنی	سناریو بهینه: هر دو شاخص فنی و اقتصادی	واحد	متغیر
۱۲۳	۴۹	۲۰۸	۶۸	روز	دوره سیلاب‌زنی
۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۴	(/wt)	غلظت پلیمر
۲۸۴	۵۶۲	۶۹۳	۶۷۱	روز	دوره تزریق پلیمر
۲	۲	۲	۲	-	جذب پلیمر
۴۲۶۱۰۰	۶۴۲۵۵۱	۶۷۷۶۳۷	۶۷۵۸۱۲	bbbl	تولید تجمعی نفت
۶/۹	۱۲/۷	۱۱/۵	۱۳/۱	میلیون دلار	ارزش فعلی خالص

بکشانند و ریسک موفقیت پروژه را بالا ببرند.

درخصوص زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده در این مقاله باید گفت که کد ارائه شده در کمتر از چند ثانیه به اجرا درمی‌آید که این سرعت اجرای برنامه یکی از مزیت‌های این الگوریتم است. به علاوه، درخصوص پایداری الگوریتم توسعه داده شده، بیان این نکته ضروری است که مقایسه‌ای ساده بین جواب‌های ارائه شده توسط این الگوریتم و الگوریتم مشابه ژنتیک-فازی نشان داد که الگوریتم فعلی پاسخ‌های پایدارتری را ارائه می‌نماید. یکی از محدودیت‌های الگوریتم این مقاله، حساسیت الگوریتم به توابع هدف است. چنانچه توابع هدف از کیفیت (منظور دقت) بالایی برخوردار نباشند، یا معیار رضایت‌مندی به سمت مقادیر بهینه خود حرکت نمی‌نماید.

همچنین مقایسه نتایج الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات - منطق فازی با الگوریتم تک‌هدفه ازدحام ذرات (که در آن معیار فنی یا اقتصادی به صورت جداگانه در نظر گرفته شد) جالب بود. اگر تنها به معیار فنی توجه شود، گرچه تولید تجمعی نفت تا ۶۷۷۶۳۷ bbl افزایش خواهد یافت که ۱۸۲۵ bbl بیشتر از نتایج الگوریتم چندهدفه خواهد بود اما ارزش فعلی خالص ۱/۶ میلیون دلار کاهش خواهد یافت که معادل ۱۲/۲٪ افت سود اقتصادی است. از سوی دیگر، توجه به شاخص اقتصادی باعث می‌شود سود پروژه در مقایسه با سناریوی بهینه خیلی تفاوتی نداشته باشد (۲/۲٪ اختلاف) اما تولید تجمعی به میزان حدود ۳۳ Mbbl کاهش خواهد یافت. در نتیجه، این پژوهش نشان می‌دهد که عدم توجه به جنبه‌های فنی و اقتصادی به صورت هم‌زمان در یک پروژه می‌تواند تصمیم‌گیری برای انتخاب پارامترهای موثر در عملیات را به چالش

و منطق فازی یک ابزار بهینه‌سازی چندهدفه با کارایی مناسب را ارائه کرد زیرا از یک طرف تولید تجمعی نفت از 426100 bbl در سناریوی پایه به 675812 bbl در راه‌حل بهینه پیشنهادشده توسط الگوریتم چندمنظوره افزایش یافت و از طرف دیگر، به ارزش فعلی خالص مقدار $6/2$ میلیون دلار افزوده شد.

۴- هنگامی که فقط معیار فنی ملاک قرار گیرد، تولید تجمعی نفت از 675812 bbl در سناریو بهینه الگوریتم چندهدفه مذکور به 677637 bbl در بهترین سناریو الگوریتم بهینه‌سازی تک‌منظوره ارتقا می‌یابد، ولی پروژه با کاهش شدید بهره‌دهی اقتصادی مواجه می‌شود، به طوری ارزش فعلی خالص آن از $13/1$ به $11/5$ میلیون دلار کاهش می‌یابد. در نتیجه، نتایج این پژوهش لزوم استفاده از الگوریتم‌هایی که به‌طور هم‌زمان چندین شاخص را لحاظ می‌کنند، برای اتخاذ تصمیمات جامع‌تر نشان داد. به عبارت دیگر، تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی یک عملیات موفق از دید برداشت در گرو توجه همه‌جانبه به مسایل مختلف است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای چنین مقاصدی از کارایی بهتری برخوردارند.

تشکر و قدردانی

از پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز جهت حمایت در چاپ این مقاله قدردانی می‌شود.

علایم و نشانه‌ها

μ : معیار رضایت‌مندی

μ : گرانروی

(F_p) : توابع عضویت فازی

σ : کشش بین سطحی

φ_1 و φ_2 : وزن‌های تصادفی

ω : فاکتور وزنی اینرسی

در نهایت، پیشنهاد می‌شود که نتایج ارائه شده با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات - منطق فازی در این مقاله با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه که از روش‌هایی همچون معیار جامع بهره‌می‌برند، مقایسه گردد.

نتیجه‌گیری

پیاده‌سازی موفق روش‌های ازدیاد برداشت جهت تحقق اهداف فنی و اقتصادی نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای موثر با استفاده از الگوریتم‌هایی دارد که در آنها نگاه چندهدفی حاکم باشد. بر مبنای نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، موارد زیر به‌عنوان جمع‌بندی نهایی ارائه می‌شوند:

۱- در این مقاله یک روش بهینه‌سازی چندهدفه توسعه داده شد که الگوریتم آن به‌صورت دو مرحله‌ای و ترکیبی از بخش مدل‌سازی با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ جهت استخراج توابع هدف و بخش بهینه‌سازی با تلفیق روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و منطق فازی بود. این الگوریتم در یک مطالعه موردی تزریق پلیمر ارزیابی شد. در این عملیات چهار پارامتر طول دوره سیلاب‌زنی، غلظت پلیمر، مدت زمان تزریق پلیمر و جذب پلیمر به‌عنوان متغیرهای مستقل بودند و شاخص فنی تولید تجمعی نفت و معیار اقتصادی ارزش فعلی خالص پاسخ‌های فرآیند در نظر گرفته شدند.

۲- در مرحله مدل‌سازی، توابع هدف به‌دست آمده برای هر دو معیار فنی و اقتصادی با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ دارای ضرایب همبستگی معمولی، همبستگی اصلاح شده و همبستگی پیش‌بینی‌کننده بالای $0/99$ ، $0/98$ و $0/95$ بودند که مقدار این پارامترهای آماری بیان‌گر قابلیت بالای این روش در توسعه معادلات معتبر به‌عنوان توابع هدف مورد نیاز برای انجام مرحله بهینه‌سازی بود.

۳- در گام بهینه‌سازی، تلفیق روش‌های ازدحام ذرات

N_c : عدد مویبندی	C_1 و C_2 : ضرایب شتاب ذره
$pbest$: بهترین برازش ذره در یک جمعیت	F_k : توابع هدف
v : سرعت حرکت سیال	$gbest$: بهترین برازش ذرات در یک جمعیت
$v_i(t)$: سرعت حرکت ذره در فضای نمونه	i : اندیس مربوط به ذره
$x_i(t)$: موقعیت ذره در فضای نمونه	k : اندیس مربوط به هدف فنی یا اقتصادی

مراجع

- [1]. Muggeridge A., Cockin A., Webb K., Frampton H., Collins I., Moulds T. and Salino P., "Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits," Philosophical Transactions, Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, pp. 372, pp.1-25, 2014.
- [۲]. حقگو م. و جعفری آ.، "بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای شکاف بر بازده جاروب نفت حین تزریق نانوسیال"، پژوهش نفت، شماره ۳-۹۶، صفحات ۱۶۴-۱۵۰، ۱۳۹۶.
- [3]. Lake L. W., Johns R., Rossen B. and Pope G., "Fundamentals of enhanced oil recovery," ed., Society of Petroleum Engineers, p. 496, 2014.
- [4]. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., "Status of polymer-flooding technology," Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 54, pp. 116-126, 2015.
- [5]. Seright R. S., "Potential for polymer flooding reservoirs with viscous oils," SPE Reservoir Evaluation and Engineering, Vol. 13, pp. 730-740, 2010.
- [6]. Stoll W. M., Al Shureqi H., Finol J., Al-Harthy S. A. A., Oyemade S., De Kruijff A., Van Wunnik J., Arkesteijn F., Bouwmeester R. and Faber M. J., "Alkaline/surfactant/polymer flood: From the laboratory to the field," SPE Reservoir Evaluation and Engineering, Vol. 14, pp. 702-712, 2011.
- [7]. Wu X., Song S., Xiong C., Guo Z., Xu H., Jiang P., Zhang J., Zhang Y., Chen J., Tian X. and Shao L., "A New polymer flooding technology for improving heavy oil reservoir recovery-from lab study to field application- case study of high temperature heavy oil field Z70," SPE Paper 174511, Presented at SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, June 9-11, Calgary, Alberta, Canada, 2015.
- [8]. AlSofi A. M. and Blunt M. J., "Polymer flooding design and optimization under economic uncertainty," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 124, pp. 46-59, 2014.
- [9]. Anderson G. A., Delshad M., King C. B., Mohammadi H. and Pope G. A., "Optimization of chemical flooding in a mixed-wet dolomite reservoir," SPE Paper 100082, Presented at SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, April 22-26, 2006.
- [10]. Zerpa L. E., Queipo N. V., Pintos S. and Salager J. L., "An optimization methodology of alkaline-surfactant-polymer flooding processes using field scale numerical simulation and multiple surrogates," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 47, pp. 197-208, 2005.
- [11]. Prasanphanich J., Kalaei M. H., Delshad M. and Sepehrnoori K., "Chemical flooding optimisation using the experimental design approach and response surface methodology," International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 5, pp. 368-384, 2012.

- [12]. Ekkawong P., Han J., Olalotiti-Lawal F. and Datta-Gupta A., "Multiobjective design and optimization of polymer flood performance," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 153, pp. 47-58, 2017.
- [13]. Reddy M. J. and Kumar D. N., "An efficient multi-objective optimization algorithm based on swarm intelligence for engineering design," *Engineering Optimization*, Vol. 39, pp. 49-68, 2007.
- [14]. Kennedy J. and Eberhart R., "Particle swarm optimization," Presented at IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, November 27-December 1, 1995.
- [۱۵] کسروی ج، صفرزاده م. و ولیزاده ا، "استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات به همراه کنترل گر تناسبی در فرآیند بهینه‌سازی مسیر حفاری چاه- مطالعه موردی"، پژوهش نفت، شماره ۵-۹۵، صفحات ۱۴۰-۱۲۹، ۱۳۹۵.
- [16]. Isebor O. J. and Durlofsky L. J., "Biobjective optimization for general oil field development," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 123-138, 2014.
- [17]. Sangvaree T., "Chemical flooding optimization using the experimental design and response surface method," M.Sc. Dissertation, Department of Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, 2008.
- [18]. UTCHEM-9.0. "Volume I: User's guide," Center for Petroleum and Geoscience Engineering, The University of Texas at Austin, p. 151, 2000.
- [19]. Jeirani Z., Mohamed Jan B., Si Ali B., Mohd Noor I., See C.H. and Saphanuchart W., "Prediction of water and oil percolation thresholds of a microemulsion by modeling of dynamic viscosity using response surface methodology," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, pp. 554-560, 2013.
- [20]. Van den Bergh F. and Engelbrecht A. P., "A study of particle swarm optimization particle trajectories," *Information Sciences*, Vol. 176, pp. 937-971, 2006.
- [21]. Ahmadi M. H., Ahmadi M. A. and Feidt M., "Performance optimization of a solar-driven multi-step irreversible Brayton cycle based on a multi-objective genetic algorithm," *Oil and Gas Science and Technology*, Vol. 71, No. 1, p. 14, 2016.
- [22]. Shah A., Fishwick R., Wood J., Leeke G., Rigby S. and Greaves M., "A review of novel techniques for heavy oil and bitumen extraction and upgrading," *Energy & Environmental Science*, Vol. 3, pp. 700-714, 2010.



Petroleum Research

Petroleum Research 2018 (August-September), Vol. 28, No. 99. 45-50

DOI: 10.22078/pr.2018.2475.2146

Multi-objective Optimization using Integration of Experimental Design Methods, Particle Swarm Optimization, and Fuzzy Logic, Case Study: Polymer Injection for Enhanced Oil Recovery

Mohammad Saber Karambeigi

IOR Research Institute, Tehran, Iran

ms.karambeigi@nioc.ir

DOI: 10.22078/pr.2018.3092.2426

Received: January/02/2018

Accepted: March/18/2018

Abstract

Single-criterion techniques in which just a single objective is considered cannot offer the perfect solution because they cannot take into account the trade-off between conflicting technical and economic conditions. In this study, a multi-criteria algorithm was developed based on experimental design methods, particle swarm optimization, and fuzzy logic. It was able to solve the optimization problem via considering different objectives simultaneously, finding the optimum values of effective factors. To evaluate the efficiency of the workflow, a case study was done in which influential parameters (water flooding duration, polymer concentration, duration of polymer injection, and polymer adsorption) for the design of an enhanced oil recovery operation of polymer flooding in a sandstone reservoir were optimized considering technical (cumulative oil production) and economic (net present value) objectives. The results were compared to the results of the base-case scenario as well as a single objective algorithm (particle swarm optimization). Compared to the base-case scenario, cumulative oil production increased more than 58% and net present value rose from \$ 6.9 to 13.1 MM as well. Although the optimum scenario proposed by single-criterion optimization algorithm based on technical objective produced more oil compared to the best solution of the multi-purpose algorithm, a severe reduction was observed in the economic objective simultaneously. Finally, the results of this study demonstrate that multi-objective algorithms are more applicable to precise and realistic decision-making.

Keywords: Polymer Flooding, Multi-objective Optimization, Particle Swarm Optimization, Fuzzy Logic, Chemical Enhanced Oil Recovery.

INTRODUCTION

Nowadays, the efficiency of primary and secondary mechanisms for producing oil reaches up to 50%; in addition, an immense amount of oil remains intact in the reservoir which is a suitable goal for enhanced oil recovery (EOR) processes [1]. EOR methods can be categorized into four main groups: thermal, solvent, chemical, and other techniques [2].

Polymers are the most applicable chemicals used in chemical EOR (CEOR) approaches. They help the enhancement of oil recovery via different mechanisms such as the improvement of macroscopic sweep efficiency and plugging of high permeable zones [3].

Outstanding performance of polymers has been proved in a wide range of experimental and simulation studies. However, successful application of polymer flooding depends on the detection, control and optimization of influential parameters because the efficacy of the process is threatened by some restrictions such as complexity of the CEOR process, harsh conditions of the reservoirs (high temperature and high salinity), polymer price, and environmental considerations [4]. To optimize this process, different methodologies have been proposed such as simulation-based approaches [5], sensitivity of effective parameters [6], surrogate-based optimization

[7], and experimental design [8]. Almost, a single objective (e.g. technical indexes) has been considered in aforementioned approaches. In this case, field projects are implemented in high risk atmosphere. Useful optimization of polymer injection is done when different objectives are considered at the same time. In other words, multi-objective optimization methods have higher priorities than single-attribute ones. A Multi-purpose optimization approach defines as a methodology by which the trade-off between conflicting objectives can be handled. Moreover, limited studies are available in the literature in which such approaches have been developed to optimize the relevant processes. For example, a multi-objective optimization approach based on Pareto optimization algorithm has been presented by Ekkawong et al [9]. In this paper, a hybrid workflow composed of experimental design, particle swarm optimization, and fuzzy logic methodologies is proposed to optimize polymer flooding in terms of technical and economic objectives.

METHODOLOGY

Four input parameters were as follows: the period of water flooding, polymer concentration, the period of polymer injection, and polymer adsorption. The range of influential parameters is presented in Table 1.

Table 1: Effective parameters in the polymer injection process.

Variable	Unit	Level -a(Lower Limit)	Level -1	Level 0	Level 1	Level +a(Upper Limit)
Waterflooding Period	Day	0.875	61	153.5	246	306.125
Polymer concentration	%wt	0.01875	0.1	0.225	0.35	0.43125
Polymer Injection Time	Day	3.75	150	375	600	746.25
Polymer Adsorption	-	0.025	1	2.5	4	4.975

Moreover, cumulative oil production and net present value (NPV) were considered as the responses of the process. In the first stage of the hybrid workflow, statistical modeling was done using design of experiments (historical data method). For this purpose, 30 runs were designed, each of which contained a combination of inputs. Thereafter, cumulative oil production and net present value were calculated using UTCHEM simulator and economic calculation based on \$50 as the price of oil respectively [10].

Corresponding responses were then fed into Design Expert software and different models were fitted to the data, finding the best relationships between inputs and outputs in terms of mathematical equations to be used as fitness functions in the stage of production. In the second stage, a multi-objective optimization method was employed. To this end, 25 particles in a population were placed in the sampling space according to their random position and velocity characteristics. Then, fitness functions were applied to calculate the fitness value of each particle technically and economically. These equations cannot be used to calculate pbest (the best position of each particle) and gbest (the best position of the population) because both objectives must be considered simultaneously. For this purpose, fuzzy logic was coupled with particle swarm optimization by which two objective functions are combined to produce a unique objective function. First, fuzzification was implemented on the fitness functions and fuzzy equations were produced according to Eq. 1:

$$\mu_f(F_k) = \begin{cases} 0 & F_k < F_k^{\min} \\ \frac{F_k - F_k^{\min}}{F_k^{\max} - F_k^{\min}} & F_k^{\min} < F_k < F_k^{\max} \\ 1 & F_k > F_k^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

In which k stands for indexes (1 for technical and 2 for economic indexes), F_k is the corresponding response to k^{th} index, and F_k^{\max} and F_k^{\min} are the maximum and minimum values of fitness functions, respectively. The ζ_i as satisfaction (unique or Zeta) function was then produced when the minimum fuzzy function was taken into account:

$$\zeta_i = \min \{ \mu_f(F_1), \mu_f(F_2) \}_i \quad (2)$$

Here, the optimization algorithm tried to maximize ζ_i . The function value reached unity, and consequently, fuzzy objective functions improved. In such conditions, $pbest_i$ was calculated for each particle, and gbest of the population was calculated accordingly:

$$gbest = \text{Max} \{ pbest_i \} \quad (3)$$

Next, the position and velocity of the particles were updated, and they were placed in the new population. The values of pbest and gbest were updated if required, and finally the last gbest was the solution of the multi-objective problem.

CASE STUDY

It was an undersaturated (initial pressure of 1800 psi) sandstone reservoir with the dimensions of 720 ft × 720 ft. The reservoir was a heavy oil type with 2 MM bbl of original oil in place. It has passed a short period of water flooding in early production stage, and consequently polymer flooding has been started. Injection pattern was 5-spot. Moreover, injection rate was 375 bbl/day, and production scenario was constant pressure of 1300 psi. Further information can be found in Table 2.

RESULTS AND DISCUSSION

In this paper, CEOR method of polymer flooding was optimized using a multi-attribute optimization algorithm.

Table 2: General properties of reservoir model.

Variable	Unit	Value
Cells in x, y and z directions	-	15, 15 and 36
Grid-block size in X and Y directions	ft	32.8-131.2
Grid-block size in Z direction	ft	2.23-5.68
Initial water saturation	%	4
Permeability	mD	200-17000
End point of water relative permeability	-	0.6
End point of oil relative permeability	-	0.93
Power of relative permeability curve for water phase	-	2.5
Power of relative permeability curve for oil phase	-	4-8
Reservoir temperature	°C	62
Water viscosity in reservoir conditions	cp	0.48
Oil viscosity in reservoir conditions	cp	17

The first stage of the hybrid workflow was statistical modeling to find objective functions. The best equations were quadratic types for both responses. In addition, the analysis of variance (ANOVA) is presented in Table 3. It demonstrates that fitted models were significant in confidence limit of 99.9 % because $\text{prob}>F$ of two models were less than 0.0001. Moreover, R^2 (R-squared), R_{adj}^2 (adjusted R-squared) and R_{pred}^2 (predicted R-squared) were next to the unity. Other parameters of ANOVA table were favorable for both responses. Therefore, developed second-order equations could be used as the objective functions.

In the next stage of the workflow, particle swarm optimization and fuzzy logic were coupled to develop a multi-purpose optimization approach.

In the first population, 30 particles were placed

randomly in the sampling area. It should be noted that three inputs varied between their lower and upper limits (Table 1) while polymer concentration as the last factor was set to a constant value (value 2) because each polymer has its own concentration in a determined reservoir. Using objective functions (calculated in the previous stage) as well as Equations 1 to 3, fitness functions of each particle were determined, and thereafter, p_{best} and g_{best} values were calculated. In the next population, position of the particles was updated, and new values of p_{best} and g_{best} were then determined. The algorithm progressed until it reached the stopping criterion which was 60 populations. The trend of satisfaction function is demonstrated in Figure 1.

Table 3: Analysis of variance for fitted equations.

Parameter	Model 1 for cumulative oil production	Model 2 for net present value
Model F value	160.02	129.82
Model $\text{prob}>F$	< 0.0001	< 0.0001
R-squared	0.9933	0.9918
Adjusted R-squared	0.9871	0.9842
Predicted R-squared	0.9659	0.9579
CV%	2.39	3.77
Adequate precision	43.175	42.071

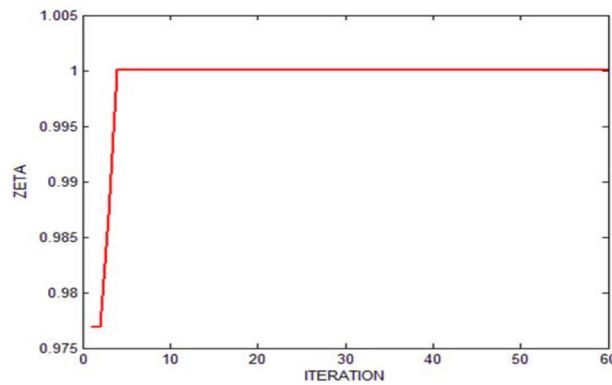


Figure 1. The trend of the variation of satisfactory (Zeta) function.

The parameter of gbest of the 60th population was the solution of the problem. Figure 2 shows how two responses were optimized while algorithm went from population 1 to 60.

The best (optimum) scenario was as follows: water flooding should be done for 68 days before the start of polymer injection. Then, a polymer slug (adsorption of 2) with the concentration of 0.34 %wt. should be injected for 671 days. In this case, cumulative oil production has been increased from 426100 (in base-case scenario) to

675812 bbl while NPV has been improved from 6.9 to \$13.1 MM.

Comparing this multi-objective algorithm with a simple-objective particle swarm optimization revealed that when just the technical objective was considered cumulative oil production increased 1825 bbl while NPV decreased \$1.6 MM. Therefore, successful plans of operation must take into account all conflicting objectives rather than a single goal.

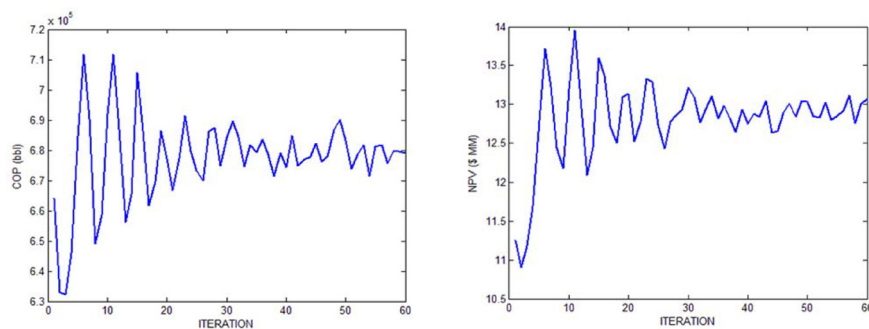


Figure 2: The progress trends of the objectives (left: cumulative oil production and right: NPV).

CONCLUSION

According to the results of this paper, the following conclusions can be drawn:

1- In this paper, a multi-objective optimization methodology was developed which was composed of two main stages: the former was the statistical modeling to find objective functions

using design of experiments and the latter was a hybrid optimization approach in which fuzzy logic and particle swarm algorithm were coupled.

2- In the modeling stage, historical data (as the method of the design of experiments) demonstrated favorable results because developed R-squared, adjusted R-squared, and

predicted R- squared were more than 0.99, 0.98 and 0.95 respectively.

3- By considering technical and economic objectives simultaneously, hybrid workflow provided a multi-attribute solution. The optimum scenario boosted oil production from 426100 to 675812 bbl while net present value increased \$6.2 MM.

REFERENCES

- [1]. Muggerridge A., Cockin A., Webb K., Frampton H., Collins I., Moulds T. and Salino P., "Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits," Philosophical Transactions, Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, pp. 372, pp.1-25, 2014.
- [2]. Lake L. W., Johns R., Rossen B. and Pope G., "Fundamentals of enhanced oil recovery," ed., Society of Petroleum Engineers, pp. 496, 2014.
- [3]. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., "Status of polymer-flooding technology," Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 54, pp. 116-126, 2015.
- [4]. Stoll W. M., Al Shureqi H., Finol J., Al-Harthy S. A. A., Oyemade S., De Kruijff A., Van Wunnik J., Arkesteijn F., Bouwmeester R. and Faber M. J., "Alkaline/surfactant/polymer flood: From the laboratory to the field," SPE Reservoir Evaluation and Engineering, Vol. 14, pp. 702-712, 2011.
- [5]. AlSofi A. M. and Blunt M. J., "Polymer flooding design and optimization under economic uncertainty," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 124, pp. 46-59, 2014.
- [6]. Anderson G. A., Delshad M., King C. B., Mohammadi H. and Pope G. A., "Optimization of chemical flooding in a mixed-wet dolomite reservoir," SPE Paper 100082, Presented at SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, April 22-26, 2006.
- [7]. Zerpa L. E., Queipo N. V., Pintos S. and Salager J. L., "An optimization methodology of alkaline-surfactant-polymer flooding processes using field scale numerical simulation and multiple surrogates," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 47, pp. 197-208, 2005.
- [8]. Prasanphanich J., Kalaei M. H., Delshad M. and Sepehrnoori K., "Chemical flooding optimisation using the experimental design approach and response surface methodology," International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 5, pp. 368-384, 2012.
- [9]. Ekkawong P., Han J., Olalotiti-Lawal F. and Datta-Gupta A., "Multiobjective design and optimization of polymer flood performance," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 153, pp. 47-58, 2017.
- [10]. Sangvaree T., "Chemical flooding optimization using the experimental design and response surface method," M.Sc. Thesis, Department of Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, pp, 2008.