بهینه‌سازی مکان چاه‌های تولید و تزریق با استفاده از الگوریتم ژنتیک موازی در یک مورد مطالعاتی

محبوبه باغبان، مهدی عصاره+*، محمدتقی صادقی*

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت، گاز

چکیده: *به دلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل‌های شبیه‌سازی مخازن نفتی، نیاز به یافتن یک روش بهینه‌سازی که بتواند در کنار کاهش هزینه‌های محاسب از دقت و سرعت خوبی برخوردار باشد، احساس می‌شود. در این راستا، در این پژوهش، از الگویتم ژنتیک موازی برای سرعت بخشیدن به بهینه‌ساز به منظور جلوگیری از افزایش بار محاسبه‌ای مسئله مکانیابی و طولانی شدن زمان اجرا، استفاده گردیده است. این الگوریتم به جای یک جمعیت از کروموزوم (یعنی همان متغییرهای بهینه‌سازی) با چند جمعیت کار می‌کند، که با همدیگر تبادل کروموزوم می‌کنند. مدل ریاضی ارایه شده در مسئله تک هدفه می‌باشد، که حداکثر کردن مقدار ارزش فعلی پروژه در انتخاب مکان چاه‌ها می‌باشد. قیمت نفت و هزینه جداسازی آب و گاز در این تابع اقتصادی در نظر گرفته شده است. در ارزیابی تابع هدف، هسته‌های یک رایانه، یا چند رایانه شبکه شده، هرکدام به صورت موازی، محاسبه برازندگی کروموزم‌های جمعیت‌های موازی را عهده دار هستند. پس از محاسبه تابع هدف یا برازندگی کروموزوم‌های همه جمعیت‌ها (که در هر جمعیت عملگرهای رایج ژنتیک فعالیت می‌کند)، مهاجرت بین جمعیت‌ها صورت می‌گیرد. برای صحت سنجی پیاده‌سازی این روش یک مورد مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل پیشنهادی مکان چاه‌های عمودی، در یک مخزن نفتی، صحت‌سنجی شده است. در نتیجه بهینه‌سازی، چاه‌ها به حالت پنج نقطه، چهار چاه تزریقی در گوشه‌ها، و یک چاه تولیدی در مرکز مدل، مکان‌یابی می‌گردند و علاوه‌بر کاهش زمان بهینه‌سازی، تعداد اجراهای شبیه‌ساز در حالت پردازش موازی به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. در این پژوهش عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک و ژنتیک موازی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی بر روی مدل مخزنی یکسان نشان داده می‌شود. زمان اجرای بهینه‌سازی بین ژنتیک و ژنتیک موازی به ترتیب ۷۱۰۰ ثانیه و ۱۸۰۰ ثانیه است. همان‌گونه که مشخص است استفاده از PGA باعث افزایش چهار برابری زمان اجرا در مخزن نفتی مورد مطالعه شده است.*

واژگان کلیدی: *مکان‌یابی چاه نفت، الگوریتم ژنتیک موازی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، توسعه میادین نفتی.*

KEYWORDS: *Well Placement for Oil Production Well, Parallel Genetic Algorithm, Optimization, Simulation, Oil Field Development*

مقدمه

تولید از مخازن طی سال‌ها سبب می‌شود که فشار مخزن افت کرده و میزان تولید کم شود، بنابراین مهندسان مخزن سعی می‌کنند

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: assarehm@iust.ac.ir

که با توسعه میدان میزان تولید را افزایش دهند. توسعه میادین به وسیله حفر چاه های جدید به طور کلی به دو صورت انجام می‌گیرد: یکی استفاده از روش حدس و خطا، که گروهی از افراد متخصص در این زمینه و آشنا با مخزن مورد نظر، پارامترهایی را که در بهینه‌سازی دخالت دارند را آنقدر تغییر می‌دهند که به هدف مورد نظر در بهینه‌سازی دست یابند، مسلما استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر بوده و هزینه‌های زیادی را برای مدیران مخزن در پی خواهد داشت. برای بهبود آن، متغیرهای مورد مطالعه به یک برنامه داده شده و برنامه با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی به بهینه‌سازی اقدام می‌کند، این روش هزینه‌ها را پایین آورده و نتیجه‌های بهتری را به‌دست می‌آورد. هدف اصلی دست‌یابی به مجموعه اهدافی مانند: بیشینه کردن مقدار هیدروکربن یا افزایش ذخیره، افزایش بازیافت، تولید و پیش‌بینی نفت وگاز، کمینه کردن سرمایه‌گذاری‌ها و هزینه‌های عملیاتی و سرانجام، به بیشینه رساندن سود کلی می‌باشد [۳-۱].

در ریاضیات بهینه‌سازی را فرایندی تعریف می‌کنند که در آن از روش انتخاب و طراحی ساختارهای داده‌ای، الگوریتم‌ها و دستورالعمل‌های مناسب به تولید برنامه‌های کارآمدتر کوچک‌تر یا سریع‌تر دست پیدا کرد. در مفهوم مدیریت کارآمد مخزن، بهینه‌سازی تولید، رسیدن به بیشینه مقدار یا کمینه میزان تابع هدف مشخصی است. این تابع می‌تواند میزان بهره‌برداری نفت یا ارزش خالص فعلی در طول مدت زمان معین باشد که به وسیله پیدا کردن مجموعه بهینه از مقدارهای کنترلی از قبیل مکان های چاه یا فشار ته چاه مشخص می‌شود [۴]. عملکرد بهینه‌ی مخزن وابسته به مکان چاه‌ها می‌باشد و از آن جا که اولین گام برای برداشت از هر مخزن نفتی، حفر چاه‌های جدید است، بهینه‌سازی مسیر و موقعیت مکانی چاه‌های تولیدی از مقدمه‌های لازم در روند توسعه و بهره‌وری میادین نفتی و منافع اقتصادی به شمار می‌رود. از این رو یکی از مهم‌ترین برنامه‌های توسعه‌ی مخازن، یافتن نقطه‌های بهینه برای حفر چاه‌های جدید است که افزون بر افزایش نرخ تولید، باعث افزایش میزان ضریب بازیافت مخازن نیز می‌شود و می‌تواند سود اقتصادی به‌دست آمده از تولید نفت را بیشینه کند. این چاه‌های جدید می‌توانند شامل چاه‌های توسعه‌ای جدید برای جاروب کردن نفت‌های باقی‌مانده در مخزن، چاه‌های تزریق آب و گاز و حتی چاه‌های مورد استفاده در عملیات ازدیاد برداشت شوند. مکان، فاصله، چگونگی قرارگیری و تعداد چاه‌ها از جمله عامل‌های مهم در میزان برداشت و تخلیه‌یک میدان نفتی می‌باشد که به عامل‌ها و پارامترهای پیچیده متعددی با عدم قطعیت‌های فراوان بستگی دارد. بنابراین در چنین شرایطی یک جواب عمومی قطعی برای مسئله وجود ندارد. پژوهش‌های زیادی توسط پژوهشگران گوناگون در این زمینه صورت پذیرفته و الگوریتم‌ها و روش‌های گوناگون بهینه‌سازی به کار گرفته شده است. در این راستا، باید به جستجوی راهی پرداخت که بتواند این بهینه‌سازی را آسان‌تر کند. از دهه ۱۹۹۰ میلادی کار بر روی این موضوع جدی‌تر دنبال شد. پژوهش‌های زیادی در زمینه بهینه‌سازی مکان چاه‌ها انجام شده است.

بنگرت[۱] و *همکاران* در سال ۲۰۰۶ میلادی، طی مطالعه‌ای ضریب کارایی و اعتبار ۴ الگوریتم بهینه‌سازی گوناگون را برای بهینه‌سازی مکان چاه‌ها در چند مسئله‌ی گوناگون تک چاه و چند چاه مقایسه و آنالیز کردند [۵]. *آنوانالو*[۲] در سال ۲۰۰۶ میلادی، یک پروکسی آماری مبتنی بر آنالیز خوشه ای برای بهینه‌سازی چاه‌های انشعابی، به کار برد [۶]. *ازدگان* و *هورن*[۳] در سال ۲۰۰۶ میلادی، بهینه‌سازی مکان چاه‌های کوپل شده با تطبیق تاریخچه‌ی برگشتی را برای رسیدگی به مقدارهای دارای عدم قطعیت وابسته به زمان، پیشنهاد دادند [۷]. در همین سال *بنگرت* و *همکاران*[۴] با استفاده از روش تقریب تصادفی آشفتگی همزمان، به حل این مسئله پرداختند [۸]. آن‌ها، عملکرد الگوریتم‌های تقریب همزمان تصادفی و آشفتگی[۵]، گرادیان تفاضل محدود[۶]، شبیه‌سازی بازپخت[۷]، الگوریتم ژنتیک[۸] و روش‌های سیمپلکس نلدر—مید در طول بهینه‌سازی مکان چاه در دو مخزن دوبعدی ساختگی، مقایسه کردند. در سال ۲۰۰۷ میلادی *وانگ*[۹] و *همکارانش* بهینه‌سازی مکان چاه را برای تولید بهینه از مخزن با روشی مبتنی بر گرادیان تابع هدف انجام دادند [۹]. *مروج* و *خالد عزیز*[۱۰] در سال ۲۰۰۸ میلادی، برای جلوگیری از ایجاد چاه‌های نامناسب در طول فرایند تولید مثل، الگوریتم ژنتیک را سفارشی سازی کردند [۱۰]. در سال ۲۰۰۹ میلادی *ابو خمیس* و *خالد عزیز*[۱۱] به بررسی بهینه‌سازی مکان و طراحی چاه در یک میدان واقعی پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ میلادی، *فروزانفر* و *رینولدز*[۱۲]،

(۱) Bangerth
(۲) Onwunalu
(۳) Ozdogan and Horne
(۴) Bengerth
(۵) SPSA
(۶) FDG
(۷) SA
(۸) GA
(۹) Wang
(۱۰) Moravvej and Khalid Aziz
(۱۱) AboKhamis.Ahmad and Aziz. Khaled
(۱۲) Forouzanfar and Reynolds

یک روش دو مرحله ای مبتنی بر مشتق با استفاده از پیوسته سازی متغیرهای گسسته در تابع هدف بهبود یافته ارایه دادند [۱۲].

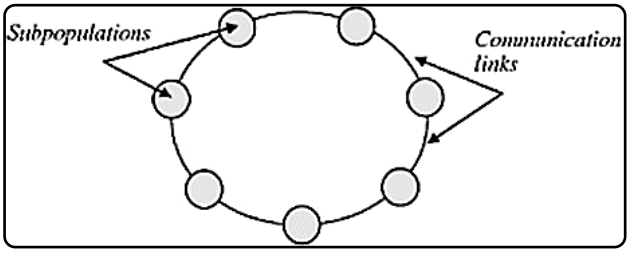
در سال ۲۰۱۰ میلادی *آنوانالو* و *دورلوفسکی*[۱] در مطالعه‌ای که برای بهینه‌سازی نوع و مکان چاه‌ها انجام دادند از الگوریتم ازدحام ذره‌ها[۲] استفاده نمودند [۱۳]. در سال ۲۰۱۱ میلادی، *افشاری* و *همکاران*، الگوریتم جستجوی هارمونی توسعه یافته[۳] را برای حل مسئله بهینه‌سازی مکان چاه در مخازن نفتی به کار بردند. آن‌ها از روش مطالعه چندین مورد، عملکرد این الگوریتم را با جستجوی هارمونی کلاسیک، بهینه‌سازی ازدحام ذره‌ها، شبیه‌سازی تبریدی و الگوریتم ژنتیک، مقایسه کردند، و دیدند که الگوریتم هیبرید شبیه‌سازی گداخت (IHS) نتیجه‌های بهتری را نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌داد [۱۴]. *بلوت*، *دورلوفسکی*[۴] و *همکاران* در سال ۲۰۱۱ میلادی، یک رویکرد مشترک را که بهینه‌سازی کنترل چاه را در جستجوی مکان بهینه چاه پیاده می‌کرد، را پیشنهاد دادند. آن‌ها مسئله مکان یابی چاه را با استفاده از روش‌های جستجوی مستقیم و همگون مبتنی بر جستجوی الگو حل کردند [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ میلادی، *فروزانفر* و *رینولدز*[۵] برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی مکان و مسیر چاه‌ها از روش بهینه‌سازی بدون نیاز به مشتقات[۶] استفاده نمودند [۱۶]. *لیل آبادی* و *فاضل عبدالآبادی* در سال ۲۰۱۵ میلادی، از الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) برای بهینه‌سازی مکان و مسیر چاه‌ها استفاده نمودند [۱۷]. در سال ۲۰۱۵ میلادی، *ال دوساری* و *نصرآبادی*، یک الگوریتم بهینه‌سازی امپریالیستی برای بهینه‌سازی مکان چاه ارایه دادند. در مطالعاتی که در سال ۲۰۱۵ میلادی توسط *پیشوایی* و *همکاران* صورت گرفت، الگوریتم تکامل تفاضلی[۷] برای تعیین محل بهینه‌ی چاه‌ها به کار گرفته شد[۱۸]. در سال ۲۰۱۵ میلادی، *خادمی* و *کریم آقایی* برای بهینه‌سازی موقعیت چاه، از روش درونیاب کریجینگ استفاده کردند [۱۹]. در سال ۲۰۱۵ میلادی، *پیشوایی* و *همکاران*[۸] از الگوریتم تکامل تفاضلی و الگوریتم ژنتیک برای کار خود برای بهینه‌سازی مکان وتعداد چاه‌ها استفاده کردند [۲۰]. در سال ۲۰۱۶ میلادی، *دینگ*[۹] و *همکاران* برای بهینه‌سازی مکان، نوع و مسیر چاه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذره‌های اصلاح شده را پیشنهاد دادند [۲۱]. در سال ۲۰۱۷ میلادی، *اخلاقی*[۱۰] و *همکاران* بهینه‌سازی مکان چاه‌های تزریق گاز در یک مخزن کربناته شکاف دار را با استفاده از یک هوش مصنوعی بررسی کردند [۲۲]. در سال ۲۰۱۹ میلادی، *جانیگا*[۱۱] و *همکاران* از الگوریتم‌های تجمع ذره‌ها و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مکان چاه‌ها استفاده کردند [۲۳]. در سال ۲۰۲۰ میلادی، *دینگ*[۱۲] و *همکاران* الگوریتم ازدحام ذره‌ها را برای بررسی بهینه‌سازی مکان چاه‌ها به کار گرفتند [۲۴].

الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری قوی برای حل مسائل مهندسی نفت و یکی از پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی مکان چاه‌های نفت می‌باشد. در روش استفاده از الگوریتم ژنتیک به دلیل جستجوی تصادفی، تابع هدف باید به دفعات ارزیابی شود که این مسئله در مکانیابی چاه‌ها به معنای تعداد دفعه‌های بالای شبیه‌سازی، افزایش بار محاسبه‌ای مسئله مکانیابی و طولانی شدن زمان اجرا است. پردازش موازی این امکان را را فراهم می‌سازد، که با تقسیم یک مسئله‌ی بزرگ به چندین بخش کوچک و استفاده از پردازنده‌های چندگانه برای حل وظایف به طور همزمان تسریع بالاتری در انجام محاسبه‌ها و اجرای برنامه‌ها محقق شود. موازی سازی الگوریتم ژنتیک می‌تواند کاستی‌های آن را برطرف نماید. بهره‌گیری از روش یادشده به کاهش تعداد شبیه‌سازی‌ها و افزایش سرعت همگرایی منجر خواهد شد. در زمینه پیاده‌سازی ژنتیک موازی برای مکان یابی چاه‌ها، پژوهش‌های چشمگیری وجود ندارد. چالش موجود در این زمینه که ما تمرکز خود را بر روی آن نهاده‌ایم بحث موازی سازی فرایند بهینه‌سازی موازی برای جستجوی بهتر و افزایش سرعت برای مکان‌یابی می‌باشد. نو آوری این مطالعه نیز به کارگیری الگوریتم ژنتیک موازی در بهینه سازی مکان چاه می‌باشد.

پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک موازی

نوع الگوریتم ژنتیک موازی به کار برده شده در این پژوهش، مدل دانه درشت[۱۳] (مدل جزیره‌ای، مدل چندجمعیتی، مدل توزیع شده) می‌باشد. ویژگی مهم این مدل استفاده از چندین زیر جامعه بزرگ و مهاجرت بین این جوامع[۱۴] است. این مدل رایج ترین مدل الگوریتم‌های ژنتیک (در کاربردهای گوناگون مهندسی) می‌باشد. در

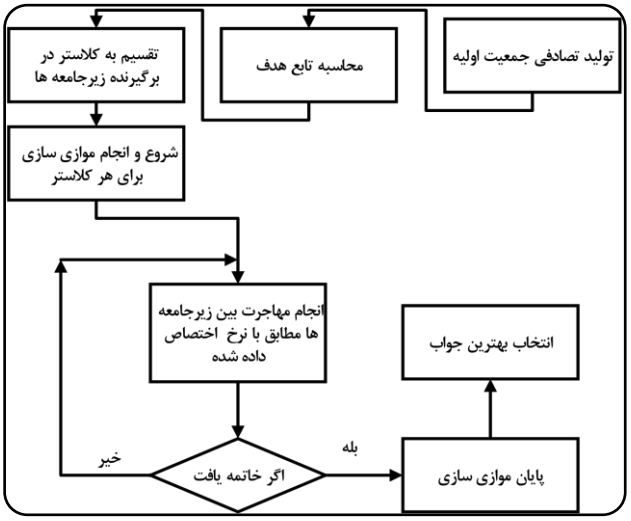
(۱) Onwunalu and Durlofsky
(۲) PSO
(۳) IHS
(۴) Bellout and Durlofsky
(۵) Forouzanfar and Reynolds
(۶) DFO
(۷) DE
(۸) Pishvaie
(۹) Ding
(۱۰) Akhlaghi
(۱۱) Janiga
(۱۲) Ding
(۱۳) Coarse grained
(۱۴) Migration



شکل ۱ - مدل جزیره با هفت گره در توپولوژی حلقوی، زیر جمعیت‌ها (Subpopulation) و لینک‌های ارتباطی (Communication links) [۲۵]

این روش زیر جامعه‌ها مستقلا تکامل می‌یابند و با نرخ ثابتی، افرادی را معاوضه می‌کنند که به آن مهاجرت می‌گویند. این مدل جزو مدل دانه درشت به نام‌های مدل ناحیه‌ای یا مدل multi-deme و مدل جزیره‌ای نیز نامیده می‌شود. این مدل از تعدادی زیرجمعیت یا "دیم[۱]" تشکیل یافته، که بصورت ناهمگام تقریبا مستقل از یکدیگر کار می‌کنند.

همه زیرجمعیت‌ها الگوریتم‌های ژنتیک استاندارد را روی بخش‌های خودشان از جمعیت کل اجرا می کنند. با میزانی از فرکانس مهاجرت، این زیرجمعیت‌ها افراد را بین یک‌دیگر روی یک توپولوژی ارتباطی مبادله می‌کنند. اندازه‌ی دیم‌های (دسته جمعیت یا زیر جمعیت) کوچک‌تر به کار گرفته شده در الگوریتم ژنتیک، از فاکتور های موثر در بهینه سازی می‌باشد. مدل جزیره به عنوان یکی از مشهورترین مدل‌های موازی مطرح است که البته این شهرت به دلیل سادگی پیاده‌سازی آن روی شبکه‌های محلی با ایستگاه‌های کاری است که هر ایستگاه بجای یک دیم به‌کار می‌رود. باوجود مشکل‌های موجود بر سر راه الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی، آن‌ها از محبوب‌ترین نوع الگوریتم ژنتیک موازی به شمار می‌روند. شکل ۱ تصویری شماتیی از این مدل را نشان می‌دهد. پارامترهای زیادی بر کارایی و همگرایی این مدل اثر می‌گذارند که باید به دقت انتخاب شوند. این پارامترها عبارتند از: توپولوژی که ارتباط بین زیر جامعه‌ها را مشخص می کند، نرخ مهاجرت که تعداد افراد مهاجر را مشخص می‌کند و بازه مهاجرت که برتکرار مهاجرت‌ها اثر می‌گذارد. نشان داده شده است، که یکی از برتری‌های روش الگوریتم ژنتیک موازی چندجمعیتی (الگوریتم به کار برده شده در این پژوهش) که بین آن‌ها تبادل افراد صورت می‌گیرد نسبت به روش الگوریتم ژنتیک ساده (سریالی) یا روش چندجمعیتی ایزوله



شکل ۲ - فلوچارت الگوریتم ژنتیک موازی

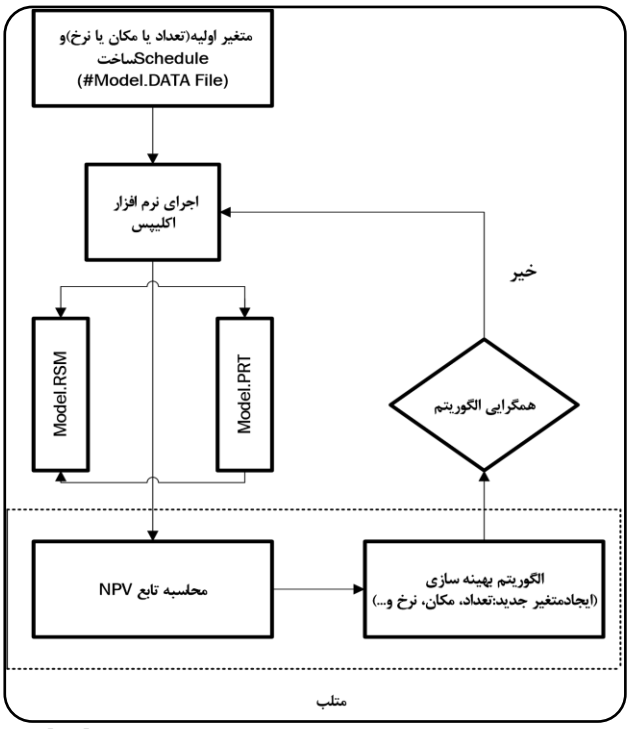
و بدون مهاجرت، این است که از کیفیت جواب بهتری برخوردار است، چرا که دوره‌ها و نسل‌های پسین آن از یک نقطه‌ی شروع بهتری آغاز می‌شود [۱۵]. فلوچارت الگوریتم ژنتیک موازی[۲] به کار گرفته شده در این مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.

اولین کاری که در برای انجام این پژوهش صورت گرفته است، کوپل کردن نرم افزار متلب با شبیه‌ساز اکلیپس برای به دست آوردن میزان ارزش افزوده فعلی[۳]، همان تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش، می‌باشد که فلوچارت چگونگی کوپل کردن این دو نرم افزار در شکل ۳ نشان داده شده است.

مطابق با فلوچارت بالا، نخست متغیر اولیه (حدس اولیه) که در این‌جا ممکن است تعداد یا مکان چاه و یا نرخ تولید و... باشد، ایجاد شده (جمعیت اولیه متشکل از کروموزوم‌ها) و فایل برنامه تولید ساخته می‌شود، پس از آن نرم افزار اکلیپس فراخوانی شده و فایل داده شبیه‌سازی مورد نظر که مسیر آن مشخص شده است، اجرا می‌شود. در این گام ورودی‌های مورد نیاز تابع NPV (RSM فایل) ایجاد شده و میزان NPV که همان میزان ارزش خالص فعلی می‌باشد، در محیط متلب محاسبه می‌شود. تابع هدف استفاده شده در این مطالعه یک NPV می‌باشد که سعی می‌کند تا درآمد خالص از تولید میدان را به دست آورد. فرمول استفاده شده برای به دست آوردن این مقدار بر اساس نرخ های تولیدی است.

$$\mathrm{NPV} = -\left(\sum_{n=1}^{N_t}\left[\frac{\sum_{j=1}^{Nprd}\left(r_o q_{o,j}^n - r_w q_{w,j}^n + r_g q_{g,j}^n\right) - \sum_{i=1}^{Ninj}\left(r_{winj} q_{winj,i}^n\right)}{(1+b)^{\frac{t^n}{365}}}\right]\Delta t^n - C\right) \qquad (۱)$$

(۱) deme
(۲) PGA
(۳) NPV



شکل ۳ - فلوچارت ارتباط بین متلب و شبیه‌ساز اکلیپس [۱۹]

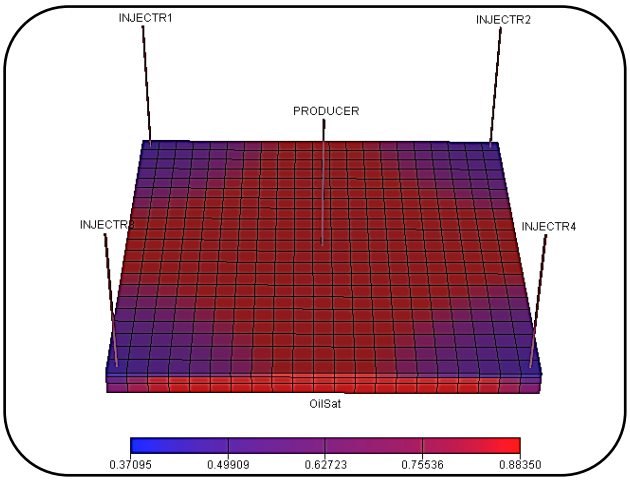
$$C^{capex} = \sum_{w=1}^{N^{well}} \left(C_w^{top} + C^{junc} + L_w^{main} C^{drill} \right) \qquad (۲)$$

که Nt تعداد گام‌های زمانی به کار رفته در شبیه‌سازی مخزن، Δt^n اندازه‌ی گام‌های زمانی n امین زمان شبیه‌سازی می‌باشد. Nprd و Ninj تعداد چاه‌های تزریق و تولید می‌باشد. q_o و q_g و q_w داده‌های تولید. b مقدار بهره و r_o ،r_g و r_w داده‌های مربوط به قیمت نفت و گاز و هزینه‌ی تزریق آب است.

این مقدار به الگوریتم بهینه‌سازی داده می‌شود. اگر شرط توقف الگوریتم برقرار بود که مقدار(یا مقدارهای) بهینه به دست آمده اجرا و بهینه‌سازی اتمام می‌شود، در غیراینصورت این روند تا رسیدن به مقدار بهینه و همگرا شدن الگوریتم تکرار می‌شود. برای بررسی مطلوبیت اعضا نیاز است که مدل با شبیه‌ساز اجرا شود و ورودی‌های مورد نیاز از شبیه‌ساز گرفته شود بنابراین در فرایند بهینه‌سازی در مرحله‌ای که نیاز است افراد یک جمعیت سنجیده شوند لازم است که ویژگی‌های این افراد به شبیه‌ساز داده شود و براساس نتیجه‌های شبیه‌ساز مطلوبیت هرکدام بررسی شود. در الگوریتم ژنتیک موازی به‌صورت ایده‌آل هر انجام‌دهنده[۱] روی یک هسته مجزا اجرا می‌شود. هر انجام‌دهنده یک برنامه با فضای کاری مختص خودش می‌باشد. این انجام دهنده معمولا نمی‌داند چه عملیاتی در سایر انجام‌دهنده‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های سنگ و سیال مخزن نفتی [۲۶]

ویژگی‌ها	مقدار	واحد
اندازه‌ها	۲۱×۲۱×۳	درجه
φ	۰/۳	-
ρ_w (at 14.7psi)	۶۴/۷۹	lb/ft^3
ρ_o (at 14.7psi)	۴۹/۱	lb/ft^3
ρ_g (at 14.7psi)	۰/۰۶۰۵۴	lb/ft^3
C_o (at P_{int})	3.00E-6	۱/psi
C_w (at P_{int})	3.13E-6	۱/psi
ارتفاع مبنا	۸۴۰۰	ft
فشار مبنا	۴۸۰۰	ft
ارتفاع از WOC	۸۵۰۰	ft



شکل ۴ - نمای سه‌بعدی مدل مورد مطالعه

اتفاق می‌افتد. هر انجام دهنده به متغیر numlabs که شامل تعداد انجام دهنده‌ها است، دسترسی دارد.

مدل مورد مطالعه

در این پژوهش از مدلی برپایه داده‌های مقاله [۲۶] استفاده شده است که یک مخزن نفتی با ۵ چاه به صورت پنج نقطه[۲] می‌باشد (یک چاه تولیدی در وسط و چهار چاه تزریقی در گوشه‌ها). تعداد درجه‌های آن به ۲۱×۲۱×۳ تغییر داده شده است. ویژگی‌های سنگ و سیال این مخزن در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۴ نمای سه بعدی از این مخزن آورده شده است.

دو حالت برای آن در نظر گرفته شده است. یکی حالتی که چاه تولیدی در مرکز درجه بلاک‌ها قرار دارد و چهار چاه تزریقی

(۱) worker

(۲) five spot

جدول ۲ - پارامترهای مربوط به محاسبه‌ی تابع هدف

مقدار	توضیح	متغیر
۷۰ دلار	قیمت هر بشکه نفت	ro
۱ دلار	هزینه جداسازی آب برای هر بشکه	rw
۵ دلار	قیمت گاز برای ۱۰۰۰مترمکعب	rg
۱۲ میلیون دلار	هزینه ثابت چاه‌ها	$C^{top}(C^{capex})$
۱۵۰۰ دلار	هزینه حفر چاه برای هر ۱۰۰ فوت	C^{drill}
به دست آمده از شبیه‌ساز	تعداد چاه‌ها	N^{well}
به دست آمده از شبیه‌ساز [STB/DAY]	نفت تولیدی در بازه زمانی مورد نظر	$q_{o,prod}$
به دست آمده از شبیه‌ساز [STB/DAY]	گاز تولیدی در بازه زمانی مورد نظر	$q_{w,prod}$
به دست آمده از شبیه‌ساز [Mscf/DAY]	آب تولیدی در بازه زمانی مورد نظر	$q_{g.prod}$
۱۰٪	نرخ تنزیل	b
Life cycle	زمان	t

مکان‌یابی می‌گردند و حالتی که چهار چاه تزریقی در گوشه‌ها قرار دارند و چاه تولیدی مکان‌یابی می‌شود. تعداد جمعیت ده تایی برای آن در نظر گرفته شده است، که شامل چهار زیرجامعه می‌شوند که بین آن‌ها تبادل کروموزوم صورت می‌گیرد. در واقع بهترین کروموزوم هر زیرجامعه در صورتی که از بدترین کروموزوم زیرجامعه‌ی پسین، برازندگی بیشتری داشته باشد، به آن زیرجامعه انتقال می‌یابد و یک کروموزوم دیگر جایگزین آن می‌شد. فاصله مهاجرت و نرخ مهاجرت بین دیم‌ها یا همان زیر جمعیت ها به ترتیب ۲۵ و ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است.

نتیجه‌ها و بحث

مخزن به صورت Life Cycle در نظر گرفته شده است، یعنی تا تخلیه کامل پیش می‌رود. کمینه فاصله بین چاه‌ها باید به اندازه یک درجه بلاک باشد. مختصات چاه‌ها باید عدد صحیح باشد و همه چاه‌ها باید در سلول شبیه‌سازی فعال، به بلوک متصل باشند باشند. کنترل چاه‌ها بر روی نرخ تولید نفت قرار داده شده است که حد بالای آن [STB/DAY] ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. کمینه فشار ته‌چاهی در نظر گرفته شده برای آن نیز [PSIA] ۱۰۰۰ می‌باشد. کمینه تولید نفت [STB/DAY] ۵۰ است. اگر نرخ تولید نفت کم‌تر از

جدول ۳ - پارامترهای ژنتیک به کار گرفته شده

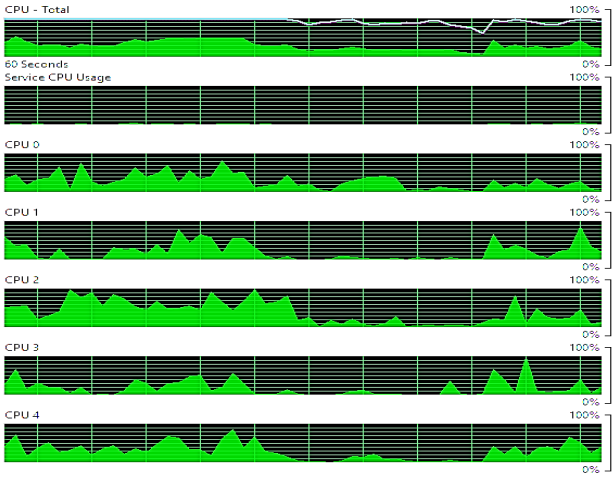
پارامترهای الگوریتم ژنتیک	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰
بیشینه تعداد نسل	۱۰۰
احتمال ازدواج	[۰/۹]
احتمال جهش	[۰/۰۵]
ساختار داده	Binary, Integer

جدول ۴ - پارامترهای ژنتیک موازی به کار گرفته شده

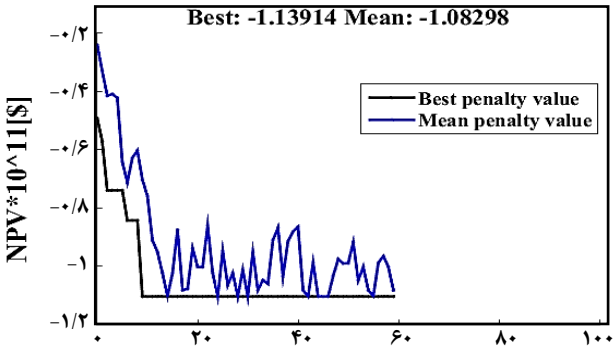
پارامترهای الگوریتم ژنتیک موازی	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰
تعداد زیر جمعیت	۴
بازه مهاجرت	۲۵
کسر مهاجرت	۰/۲۵
تعداد کارگران	۶
ساختار داده	Binary, Integer

کمینه مقدار مشخص شده شود چاه بسته یا متوقف می‌شود. بیشینه برش آب در نظر گرفته شده ۰/۳ می‌باشد که در صورت فراتر رفتن از این مقدار چاه بسته یا متوقف می‌شود. جدول ۲ پارامترهای مربوط به محاسبه تابع هدف را در این مثال نشان می‌دهد.

بهینه‌سازی بر روی آن، هم به صورت تک متغیره و هم چهارمتغیره صورت گرفته شده است. در واقع در حالت اول، یعنی تک متغیره، مکان چاه‌های تزریقی در گوشه‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود و مکان چاه تولیدی بهینه می‌شود. در حالت دوم یعنی چهار متغیره مکان چاه تولیدی در مرکز ثابت می‌شود و مکان چاه‌های تزریقی بهینه می‌شود. از آن‌جا که مخزن یک مدل ۳×۲۱×۲۱ درجه می‌باشد، در حالت تک متغیره چاه تولیدی در درجه مرکزی یعنی درجه (۱۱و۱۱) (در حالت بهینه) قرار می‌گیرد و در حالت چهار متغیره چهار چاه تزریقی در گوشه‌ها (در حالت بهینه) یعنی در درجه‌های (۱،۱) و (۲۱،۱) و (۱،۲۱) و (۲۱،۲۱) مکان‌یابی می‌شوند. از آن جا که الگوی پنج‌گانه برای آن در نظر گرفته شده است، این خود صحت کار را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه یکی از اهداف این پژوهش مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک GA و ژنتیک موازی PGA می‌باشد، مکان‌یابی برای مدل مورد استفاده به وسیله هر دو الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مربوط به GA و PGA که برای بهینه‌سازی این مخزن به کار گرفته شده است در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.



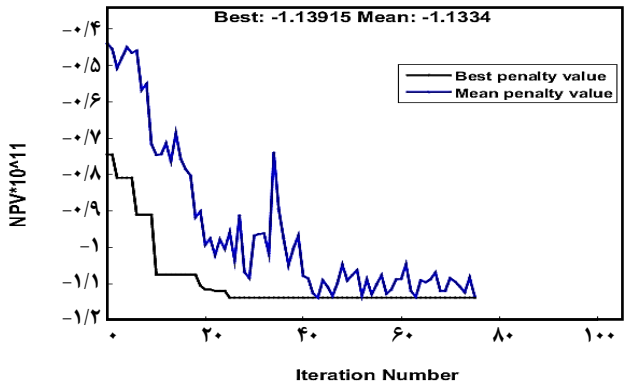
شکل ۵ – اجرای همزمان برنامه بر روی پردازنده‌های گوناگون در هنگام بهینه‌سازی



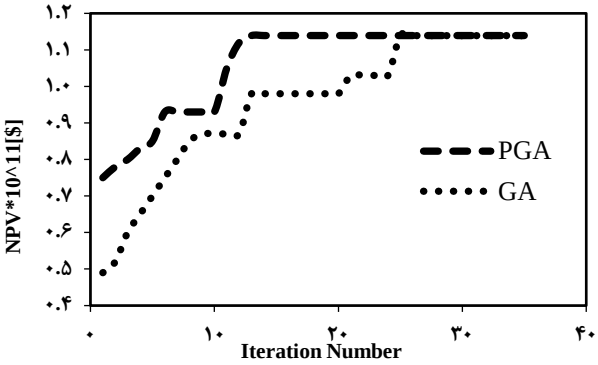
شکل ۶ – تابع هدف مکان‌یابی تک چاه تولیدی نفت با استفاده از ژنتیک موازی به همراه میانگین برازندگی کروموزوم‌های جمعیت در بهینه‌سازی

در پژوهش صورت گرفته پوشه‌ای در یک مسیر مشخص ایجاد شده، و در آن به تعداد انجام‌دهنده‌ها، که در این‌جا ۶ کارگر (worker) در نظر گرفته شده است، فولدری دارای دیتا فایل اکلیپس ایجاد شده است، به طوری که پس از پیاده‌سازی پردازش موازی، در هر کدام از این فولدرها برنامه به صورت مجزا و همزمان اجرا می‌شود و نتیجه‌های مربوط به اجرای هر فولدر در درون همان فولدر ریخته می‌شود. هر کدام از این کارگرها (دیتا فایل‌ها) بر روی هسته‌های گوناگون به طور همزمان اجرا می‌گردند. مطابق شکل ۵، برنامه به طور همزمان بر روی پردازنده‌های گوناگون در حال اجرا می‌باشد که این خود باعث می‌شود که حافظه کم‌تری از CPU اشغال شود.

در حالت استفاده از الگوریتم ژنتیک موازی، نمودار تابع ارزش خالص فعلی در مقابل تعداد تکرار برای هر دو حالت تک متغیره



شکل ۷ – مکان‌یابی چهار چاه تزریقی آب با استفاده از ژنتیک موازی به همراه میانگین برازندگی کروموزوم‌های جمعیت در بهینه‌سازی



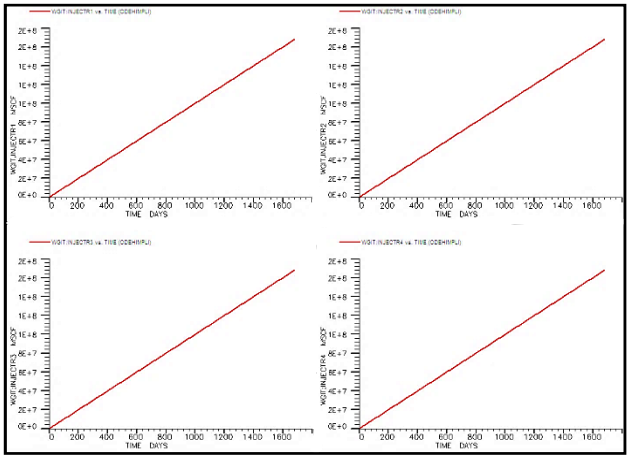
شکل ۸ – مقایسه NPV در مقابل تعداد تکرار بین GA و PGA

و چهارمتغیره در ۱۰ادامه (در شکل ۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل برای حالت تک متغیره پس از ۵۹ تکرار کلی به میزان ارزش افزوده ۱/۱۳۹۱ × ۱۰^{۱۱} دلار، و در حالت چهارمتغیره پس از ۷۵ تکرار کلی، به همان ارزش افزوده دست می‌یابد.

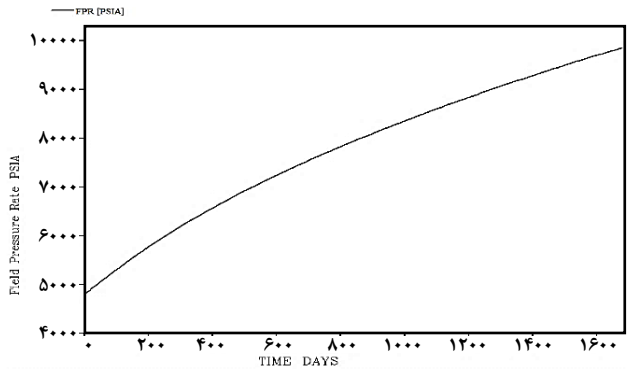
نتیجه‌های به دست آمده برای تابع هدف از الگوریتم ژنتیک موازی برای حالت چهارمتغیره (مکان‌یابی چهار چاه تزریقی) شکل ۷ و مقایسه‌ی آن با حالت ژنتیک سریالی نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است، همان‌گونه که مشخص است در حالت ژنتیک موازی سریع‌تر و در تعداد تکرارهای پایین‌تر و اندکی تفاوت در NPV (۱/۱۳۹۱ × ۱۰^{۱۱} دلار) به جواب بهینه دست می‌یابیم. دیده می‌شود که روش PGA[1] نسبت به روش GA[2] در یک NPV ثابت به اجراهای شبیه‌ساز کمتری نیاز دارد و سریع‌تر به جواب بهینه دست می‌یابد. در این شکل می‌توان نمودار را به سه ناحیه کلی تقسیم کرد، در ناحیه اول بزرگ‌ترین جهش‌ها اتفاق می‌افتد، در این ناحیه پس از تعداد کمی تکرار (در مقابل کل تکرارها)

(۱) Parallel Genetic Algorithm

(۲) Genetic Algorithm



شکل ۹ – نمودار کل تزریق گاز برای هرکدام از چهار چاه تزریقی

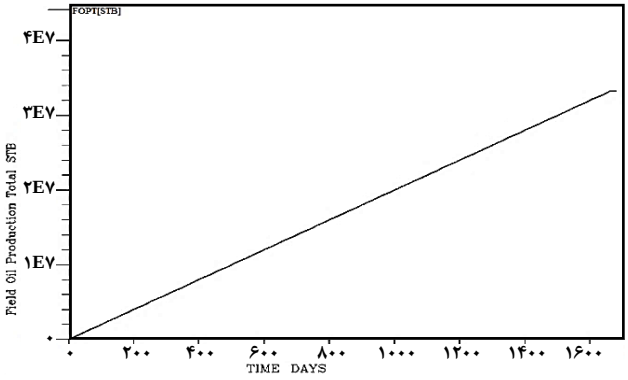


شکل ۱۰ – فشار در مقابل زمان در مخزن پس از بهینه شدن

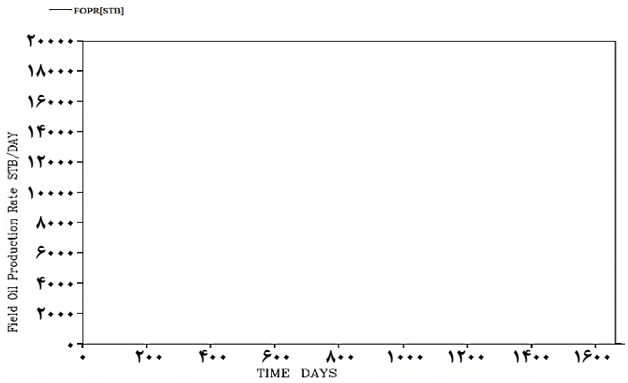
جهش بسیار بزرگی دیده می‌شود. در ناحیه دوم که ناحیه شبه یکنواخت نامیده می‌شود، نمودار به سمت یکنواخت شدن و رسیدن به جواب بهینه پیش می‌رود. آخرین مرحله، که مرحله یکنواخت نامیده می‌شود، نمودار به حالت یکنواخت یا جواب نهایی می‌رسد، در این ناحیه گاهی ممکن است جهش‌های بسیار کوچکی رخ دهد.

زمان اجرای بهینه‌سازی بین GA و PGA به ترتیب ۷۱۰۰ ثانیه و ۱۸۰۰ ثانیه است. همان‌گونه که مشخص است استفاده از PGA باعث افزایش چهار برابری زمان اجرا در مخزن نفتی مورد مطالعه شده است. در اجرای بهینه، در طول اجرای شبیه‌ساز هیچ کدام از چاه‌های تزریقی بسته نشده است و تزریق تا آخر ادامه یافته است، چون در این صورت چاه‌ها از الگوی پنج‌گانه خارج می‌شوند و از مرزها فاصله می‌گیرند و نتیجه‌های مورد نظر به دست نمی‌آید. شکل ۹ گویای این مطلب است.

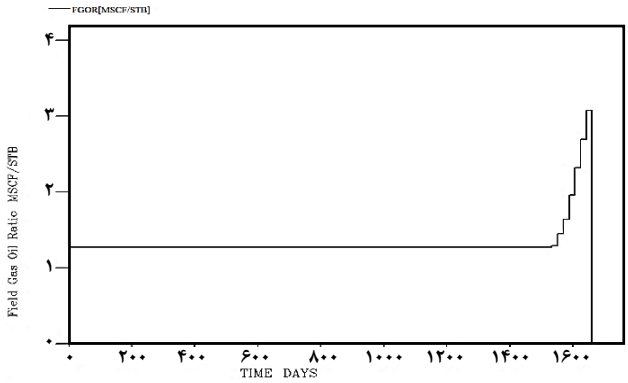
نمودارهای مربوط به توزیع فشار، کل نفت تولیدی، نرخ تولید نفت، برش آب و نسبت گاز به نفت تولیدی برای مخزن مورد مطالعه پس از انجام بهینه‌سازی بر روی آن به ترتیب در شکل ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ – کل نفت تولیدی در مقابل زمان در مخزن پس از بهینه شدن



شکل ۱۲ – نرخ تولید نفت در مقابل زمان در مخزن پس از بهینه شدن



شکل ۱۳ – نسبت گاز به نفت تولیدی در مقابل زمان در مخزن پس از بهینه شدن

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک موازی برای بهینه سازی مکان یابی چاه های نفتی در یک مورد مطالعه‌ای ساده و با جواب بهینه مشخص پیاده‌سازی شد تا از صحت، دقت و سرعت آن اطمینان به‌دست آید. در مخزن نفتی مورد مطالعه که‌یک مخزن نفتی با ۵ چاه به صورت پنج نقطه می‌باشد (یک چاه تولیدی در وسط و

چهار چاه تزریقی در گوشه‌ها) ابتدا مکان‌یابی ۴ چاه تزریقی و در مرحله پسین مکان‌یابی تک چاه تولیدی انجام شد، که در حالت اول چهار چاه تزریقی در چهار گوشه مخزن و در حالت دوم تک چاه تولیدی در مرکز سلول های شبیه‌سازی مکان‌دهی شدند که این صحت‌سنجی انجام شده، درستی روند کار الگوریتم ژنتیک و انجام پردازش موازی بر روی آن را تایید می‌نماید.

طبق نتیجه‌های به دست آمده از این پژوهش، دیده می‌شود که روش PGA یا همان ژنتیک موازی نسبت به روش GA در یک NPV ثابت به اجراهای شبیه‌ساز کمتری نیاز دارد و سریع‌تر به جواب بهینه دست می‌یابد. استفاده از PGA باعث افزایش چهار برابری زمان اجرا در مخزن نفتی مورد مطالعه شده است.

دیده شد که به کارگیری GA برای مسئله بزرگ، برای تعیین راه حل بهینه ممکن است زمان چشمگیری را اتخاذ کند، طبق نتیجه‌ها الگوریتم PGA بسیار سریع‌تر از GA می‌باشد، زمان CPU را کاهش می‌دهد، و تعداد تکرارهای کم‌تری نسبت به آن دارد، بدون آن که باعث کاهش عملکرد شود، بلکه در بسیاری از موارد عملکرد بهتری هم نسبت به GA نشان می‌دهد. در نتیجه PGA می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای GA به‌خصوص در مسائل بزرگ باشد. این افزایش سرعت بدون لطمه خوردن به دقت پاسخ بهینه سازی به دست می‌آید.

قدردانی

نویسندگان از همکاری و پشتیبانی شرکت نفت فلات قاره کمال تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

مراجع

[1] Boukouvala F., Misener R., Floudas C.A., European Journal of Operational Research, Global Optimization Advances in Mixed-Integer Nonlinear Programming, Minlp, and Constrained Derivative-Free Optimization, *CDFO*, **252(3):** 701-727 (2016).

[2] Khor C.S., Elkamel A., Production Systems Optimization Methods for Petroleum Fields, Science, Technology and Sustainability in the Middle East and North Africa, (GTSD-MENA), **3(1):** (2007).

[3] Mian M.A., "Project Economics and Decision Analysis: Deterministic Models", PennWell Books, (2011).

[4] Isebor O.J., "Constrained Production Optimization with an Emphasis on Derivative-Free Methods", Thesis, Stanford University Stanford, CA, (2009).

[5] Bangerth W., Klie H., Wheeler M., Stoffa P., Sen M.J., Computational Geoscience, "On Optimization Algorithms for the Reservoir Oil Well Placement Problem", **10(3):** 303-319 (2006).

[6] Onwunalu J., "Optimization of Nonconventional Well Placement Using Genetic Algorithms and Statistical Proxy", MS Report, Stanford University (2006).

[7] Moravvej Farshi M., "Improving Genetic Algorithms for Optimum Well Placement", Ph.D.Thesis, Stanford University (2008).

[8] Bangerth W., Klie H., Wheeler M., Stoffa P., Sen M., On Optimization Algorithms for the Reservoir Oil Well Placement Problem, *Computational Geosciences*, **10(3):** 319-330 (2006).

[9] Wang C., Li G., Reynolds A.C., Optimal Well Placement for Production Optimization, Society of Petroleum Engineers, (2007).

[10] Farshi M.M., "Improving Genetic Algorithms for Optimum Well Placement", Thesis, Stanford University Stanford, CA, (2008).

[11] Abukhamsin A.Y., Thesis, "Optimization of Well Design and Location in a Real Field", Stanford University, CA. (2009).

[12] Forouzanfar F., Li G., Reynolds A.C., A Two-Stage Well Placement Optimization Method Based on Adjoint Gradient , *Society of Petroleum Engineers*, (2010).

[13] Onwunalu J.E., Durlofsky L.J., Application of a Particle Swarm Optimization Algorithm for Determining Optimum Well Location and Type, *Computational Geosciences*, **14(1):** 183-198 (2010).

[14] Afshari S., Aminshahidy, B., Pishvaie, M., "Well Placement Optimization Using Differential Evolution Algorithm", Chemical and Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, IRAN, (2015).

[15] Bellout M.C., Ciaurri D.E., Durlofsky L.J., Foss B., Kleppe J., Joint Optimization of Oil Well Placement and Controls, *Computational Geosciences*, **16(4):** 1061-1079 (2012).

[16] Forouzanfar F. and Reynolds A.C.,. Well-Placement Optimization Using a Derivative-Free Method, Journal of Petroleum Science and Engineering, **109:** 96-116 (2013).

[17] Nozohour-leilabady B., Fazelabdolabadi,B., On the Application of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Optimization of Well Placements in Fractured Reservoirs; Efficiency Comparison with the Particle Swarm Optimization (PSO) Methodology, *Department of Petroleum Engineering, International Campus of the University of Tehran*, Kish Island, Iran, (2015).

[18] Al Dossary M.A., Nasrabadi H., Well Placement Optimization Using Imperialist Competitive Algorithm, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **147:** 237-248 (2016).

[19] Khademi G., Karimaghaee P., Hybrid FDG Optimization Method and Kriging Interpolator to Optimize Well Locations, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **6(2):** 191-200 (2016).

[20] Afshari S., Aminshahidy B., Pishvaie M.R., Well Placement Optimization Using Differential Evolution Algorithm, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, **34(2):** 109-116 (2015).

[21] Ding S., Jiang H., Li J., Liu G., Mi L., Optimization of Well Location, Type and Trajectory by a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for the Punq-S3 Model, *Journal of Industrial and Inteligent Information*, **4(1):** (2016).

[22] Akhlaghi N., Kharrat R., Rezaei F., Optimizing the Location of the Gas Injection Well During Gas Assisted Gravity Drainage in a Fractured Carbonate Reservoir Using Artificial Intelligence, *Theoritical Foundations of Chemical Engineering*, **51(1):** 65-69 (2017).

[23] Janiga D., Czarnota R., Stopa J., Wojnarowski P.J., Self-Adapt Reservoir Clusterization Method to Enhance Robustness of Well Placement Optimization, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **173:** 37-52 (2019).

[24] Ding S., Lu R., Xi Y., Liu G., Ma J.J., Efficient Well Placement Optimization Coupling Hybrid Objective Function with Particle Swarm Optimization Algorithm, *Applied Soft Computing*, **95:** 106511 (2020).

[25] Eklund S.E., , A Massively Parallel Architecture for Distributed Genetic Algorithms, *Journal of Parallel Computing*, **30(5-6):** 647-567 (2004).

[26] Odeh A.,., Comparison of Solutions to a Three-Dimensional Black-Oil Reservoir Simulation Problem, *Journal of Petroleum Technology*, **33(1):** 13-25 (1981).