

استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات به همراه کنترل گر تناسبی در فرآیند بهینه‌سازی مسیر حفاری چاه - مطالعه موردی

جواد کسروی^۱، محمدمین صفرزاده^{۲*} و ایوب ولی‌زاده^۱

۱- شرکت نفت و گاز پارس، حفاری، تهران، ایران

۲- شرکت مشاوران انرژی تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۲

چکیده

یکی از مشکلات هزینه‌بر در مهندسی حفاری، ایجاد ناپایداری در چاه‌های نفت و گاز است. این پدیده تحت تاثیر عواملی همچون آزیموت، زاویه انحراف، تنش درجا، وزن گل و خصوصیات مقاومتی سنگ قرار می‌گیرد. از این میان آزیموت، زاویه انحراف و وزن گل از پارامترهای قابل کنترل می‌باشند. در این مقاله الگوریتم جدیدی به منظور تعیین مقدار بهینه فشار گل و نیز مسیر مناسب چاه ارائه شده است. الگوریتم ازدحام ذرات، به‌عنوان موتور بهینه‌ساز به همراه یک کنترل گر تناسبی برای نیل به شرایط بهینه مذکور، مورد استفاده قرار گرفت. زون تسلیم نرمالیزه به‌عنوان شاخص ناپایداری در نظر گرفته شد و به منظور تعیین خطای بین شاخص زون تسلیم نرمالیزه شیب‌سازی شده و تنظیم شده از یک کنترل گر تناسبی استفاده شد. با اعمال الگوریتم ارائه شده در یک چاه انحرافی حفاری شده در جنوب غرب ایران مقدار بهینه آزیموت نزدیک جهت تنش افقی ماکزیمم (۳۵۸/۳°) و مقدار بهینه زاویه انحراف ۶۷/۴° به‌دست آمد. فشار گل بهینه متناسب برابر ۳۷/۷۵ MPa می‌باشد.

کلمات کلیدی: شاخص زون تسلیم نرمالیزه، ناپایداری چاه، الگوریتم ازدحام ذرات، مسیریابی چاه، بهینه‌سازی.

مقدمه

ناپایداری منجر به اتلاف زمان و تحمیل هزینه ۶۰۰ میلیارد دلاری در سال (به‌طور مستقیم و غیر مستقیم) در کل دنیا می‌شود [۲]. هنگامی که چاهی حفر می‌گردد فضای خالی درون توده سنگ ایجاد می‌شود و تنش وارد شده به این فضا به دیواره چاه منتقل می‌شود که موجب تمرکز تنش و افزایش ناپایداری می‌شود. تمرکز ایجاد شده تحت تاثیر تنش‌های اصلی میدان قرار دارد و عواملی چون

از بررسی پایداری چاه به منظور تخمین واکنش مکانیکی سنگ در حین عملیات حفاری استفاده می‌شود. این بررسی موجب شناخت نواحی مشکل‌ساز و در نهایت منجر به بهبود عملیات حفاری می‌شود [۱]. در صورت عدم توجه، عامل

و جریان چند فازی از زون تسلیم نرمالیزه استفاده کردند [۱۲]. گشتاسبی در سال ۲۰۱۲ از زون تسلیم نرمالیزه برای بدست آوردن فشار گل بهینه در چند آزیموت و زاویه انحراف خاص استفاده کرد. نتایج نشان داد که جهت بهینه حفاری موازی یا نزدیک به جهت تنش افقی ماکزیمم است [۱۳]. خاکسار منشاد و همکاران در سال ۲۰۱۳ از چهار معیار شکست مور-کولمب، موگی-کولمب، ترسکا و لده برای بدست آوردن مسیر چاه و فشار گل بهینه استفاده کردند. آنها عنوان کردند فشار گل بهینه به دست آمده از معیار شکست مور-کولمب و ترسکا بیشتر از معیار شکست موگی-کولمب و لده است [۱۴]. امروزه فرآیندهای بهینه‌سازی الگوریتم تکاملی در بخش‌های مختلف صنعت نفت به کار گرفته می‌شود [۱۵، ۱۶] بدیهی است با توجه به طولانی بودن زمان شبیه‌سازی، استفاده از روش‌های با کارایی بالاتر همانند الگوریتم ازدحام ذرات توصیه می‌گردد. در این مقاله الگوریتم ازدحام ذرات به همراه کنترل‌گر تناسبی برای بهینه‌سازی مسیر چاه مورد استفاده قرار گرفت. کد بهینه‌ساز و کنترل‌گر توسط نرم‌افزار MATLAB و کد مدل ژئومکانیکی چاه توسط نرم‌افزار FLAC3D نوشته شده است. زون تسلیم نرمالیزه به‌عنوان شاخص ناپایداری مورد استفاده قرار گرفت.

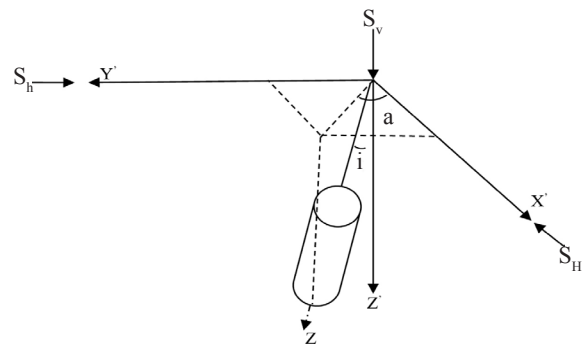
روش حل مسئله

همان‌طور که در بالا اشاره شد، ناپایداری در چاه از جمله مهم‌ترین چالش‌ها در حین طراحی مسیر چاه است. الگوریتم ارائه شده در این مطالعه، ترکیبی از بهینه‌ساز ازدحام ذرات و کنترل‌گر تناسبی است. در این الگوریتم ابتدا یک جمعیت اولیه ذرات (هر ذره متشکل از آزیموت و زاویه انحراف است) برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شود (شکل ۱). سپس مسیرهای انتخاب شده به کنترل‌گر تناسبی وارد می‌شوند.

آزیموت، زاویه انحراف، خواص سنگ و فشار گل در کاهش یا مهار این عامل ناپایداری نقش مهمی را ایفا می‌کنند. باید به این نکته توجه نمود که از یک طرف استفاده از فشار گل بالا موجب جلوگیری از ریزش دیواره می‌شود و از طرف دیگر سبب کاهش سرعت حفاری و صدمه دیدن سازند می‌شود [۳]. لذا به منظور جلوگیری از آسیب‌های احتمالی، تعیین و اعمال فشار گل بهینه لازم و ضروری می‌باشد.

اثر آزیموت و زاویه انحراف بر وزن گل توسط یو و لیو در سال ۱۹۹۲ مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه آنها نشان داد که پایداری چاه شدیداً تحت تاثیر فشار منفذی است. همچنین رابطه ای معکوس بین وزن گل و زاویه انحراف را گزارش نمودند [۴]. مطالعه‌ای موردی توسط فو و وایت فیل در سال ۱۹۹۸ برای به دست آوردن فشار منفذی در یک چاه با زاویه انحراف زیاد انجام شد. نتایج نشان داد که برای انتخاب وزن گل ایمن باید زاویه انحراف، تنش درجا، فشار منفذی و خصوصیات سنگ را در نظر گرفت [۵]. آوال و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روشی تحلیلی براساس مدل پروالاستیک مسیر چاه را بهینه کردند [۶]. در مطالعه‌ای مشابه توسط کلیمنتوس و همکاران در سال ۱۹۹۸ ضریب بایوت به عنوان مسبب میزان خطا معرفی کردند [۷]. مسیر بهینه حفاری به فعال و غیرفعال بودن منطقه از لحاظ تکتونیک و همچنین به مقادیر نسبی تنش‌های اصلی (نرمال، معکوس و امتدادلغز) در منطقه مورد نظر بستگی دارد. تحقیقات مشابهی در زمینه مسیر یابی چاه در حالت الاستیک نیز انجام شده است [۸، ۹، ۱۰]. زارع رئیس آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از یک مدل تحلیلی و معیار شکست موگی-کولمب، مسیر چاه و فشار گل را بهینه نمودند [۱۱]. به دلیل دقیق نبودن روش‌های تحلیلی در حل مسائل پایداری چاه از روش‌های عددی نیز استفاده می‌شود. هاوکس و همکاران در سال ۲۰۰۲ برای مدل‌سازی ناپایداری

شبیه‌سازی شده و تنظیم شده ناچیز و قابل اغماض باشد. پارامتر شاخص برای تعیین ریسک ناپایداری زون تسلیم نرمالیزه می‌باشد. مفهوم شاخص زون تسلیم نرمالیزه از تئوری الاستوپلاستیک گرفته شده است. در تئوری الاستوپلاستیک فرض بر این است هنگامی که سنگ به حداکثر مقاومت فشاری خود رسید تسلیم می‌شود ولی به درون چاه ریزش نمی‌کند. از سوی دیگر، یک زون تضعیف شده (که به آن زون پلاستیک نیز گفته می‌شود) به وجود می‌آید که توزیع تنش نسبت به حالت قبل از تسلیم سنگ متفاوت است (شکل ۳). به دلیل اینکه زون تسلیم مستعد ریزش ناشی از فشارهای ناگهانی ناشی از عملیات‌های لوله بالا و لوله پایین است، بزرگ‌تر شدن این زون احتمال ناپایداری را افزایش خواهد داد [۱۷]. شاخص زون تسلیم نرمالیزه بدین صورت تعریف می‌شود: مساحت زون تسلیم یافته بعد از اعمال فشار گل به مساحت زون مورد نظر قبل از اعمال فشار گل (شکل ۴). تجربیات نشان داده است که لحظه آغاز ناپایداری وقتی است که زون تسلیم نرمالیزه بزرگتر از یک شود [۱۸، ۱۹، ۲۰]. برای استفاده از این شاخص باید اولاً فرض شود که قبل از رسیدن به ماکزیمم مقاومت فشاری، سنگ به صورت الاستیک عمل می‌کند و بعد از رسیدن به ماکزیمم مقاومت فشاری سنگ، تنش موجود تا تنش پس‌ماند در سنگ کاهش می‌یابد (طبق شکل ۳). همچنین معیار شکست سنگ مور-کولمب نیز در نظر گرفته شود. به دلیل ساده و کاربردی بودن کنترل‌گر تناسبی و نحوه عملکرد این کنترل‌گر در صنعت به خصوص در سیستم‌های الکتریکی، از کنترل‌گر تناسبی استفاده شد. همان‌گونه که اشاره گردید در فرآیند کنترل تفاوت بین مقدار شاخص زون تسلیم نرمالیزه شبیه‌سازی شده و تنظیم شده ($NYZA=1$) به کنترل‌گر تناسبی باز می‌گردد و این کنترل‌گر با تغییر متغیر ورودی (فشار گل)، سعی در کاهش خطا بین دو مقدار شاخص شبیه‌سازی شده و تنظیم شده را دارد.

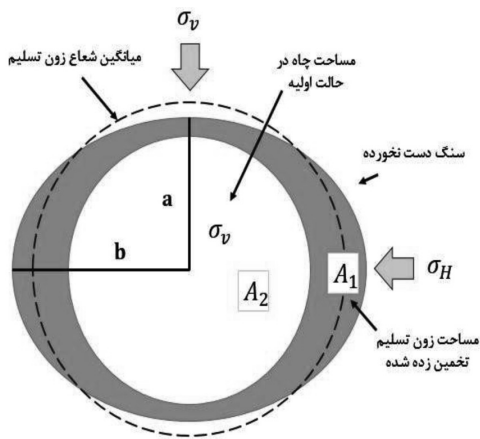


شکل ۱ آزمون و زاویه انحراف

در این مرحله ابتدا با حدس اولیه فشار گل، شاخص زون تسلیم نرمالیزه محاسبه شده و با توجه به تفاوت آن با نقطه تنظیم شاخص زون تسلیم نرمالیزه، تغییرات فشار گل اعمال می‌شود تا این شاخص به نقطه تنظیم اعمال شده نزدیک شود. این تغییرات تا زمانی اعمال می‌شود که خطای بین شاخص شبیه‌سازی شده و تنظیم شده به مقدار $0/05$ برسد. فشار گل به دست آمده، فشار گل مناسب برای مسیر حفاری وارد شده به کنترل‌گر است. این کنترل‌گر برای هر کدام از ذرات موجود در جمعیت اعمال شده و فشار گل مناسب برای هر مسیر مشخص می‌شود. بعد از مشخص شدن تابع هدف (فشار گل مناسب) هر ذره، با توجه به کم‌ترین فشار گل در جمعیت‌های قبل و همچنین کم‌ترین فشار گل در جمعیت فعلی سرعت مورد نظر هر ذره مشخص شده و مکان جدید هر ذره با توجه به این سرعت تعیین می‌شود. با توجه به مسیرهای مختلف، این الگوریتم تا زمانی اجرا می‌شود که کم‌ترین فشار گل به دست آید. شماتیک این روش در شکل ۲ آورده شده است.

پایاده‌سازی کنترل‌گر

سیستم‌های کنونی که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای یک یا چند ورودی و خروجی هستند. بعضی مواقع در این سیستم‌ها، هدف کنترل یک یا چند خروجی است. کنترل‌گر نیز براساس تغییر در ورودی سیستم، خروجی مورد نظر را در سطح مشخص نگه می‌دارد. پروسه تغییر متغیر ورودی تا زمانی انجام می‌شود که تفاوت بین خروجی



$NYZA = A_1 / A_2$
 $a =$ شعاع بزرگ بیضی زون تسلیم
 $b =$ شعاع کوچک بیضی زون تسلیم

شکل ۴ مفهوم شاخص زون تسلیم نرمالیزه [۱۲]

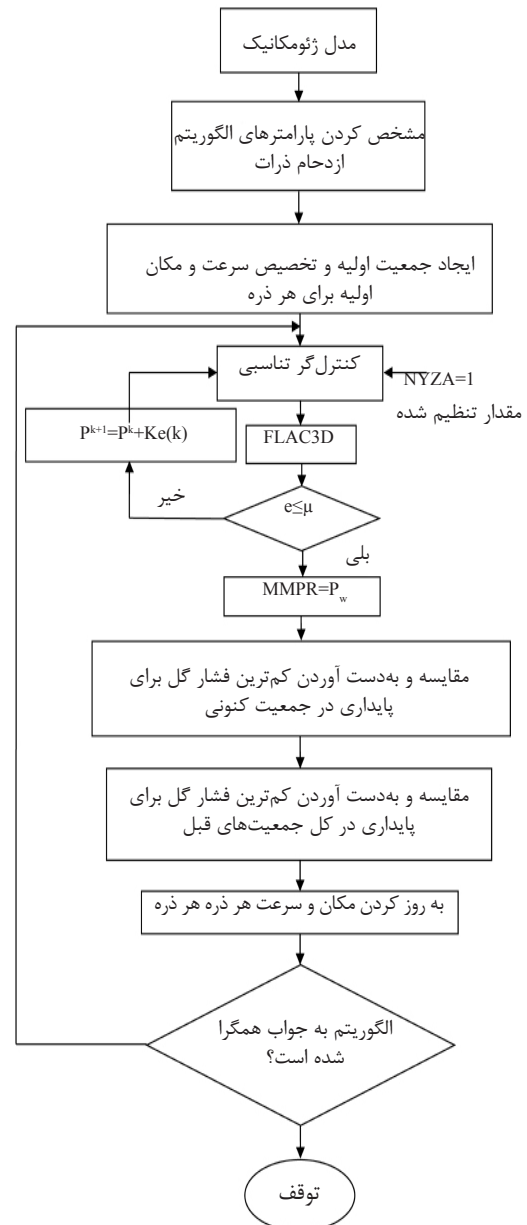
این تکرار تا جایی ادامه می‌یابد که خطا (μ) به 0.005 برسد. فرآیند تکرار این کنترل‌گر را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$P_w^{k+1} = P_w^k + K_p e(k) \quad (1)$$

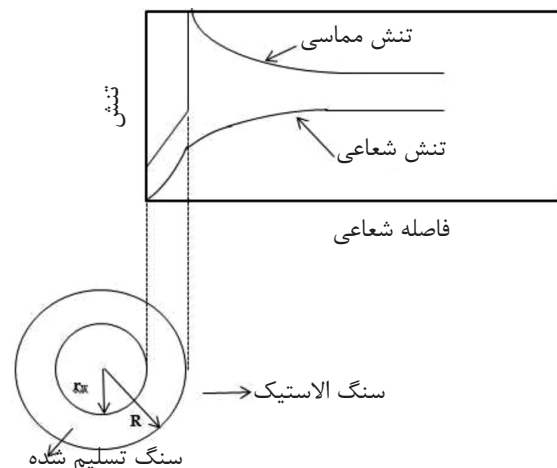
$$e(k) = NYZA_{set}^k - NYZA_{sim}^k \quad (2)$$

که در اینجا P_w^{k+1} بیان‌کننده فشار گل در تکرار $k+1$ ، P_w^k فشار گل در تکرار k است. $NYZA_{sim}^k$ بیان‌کننده زون تسلیم نرمالیزه شبیه‌سازی شده و $NYZA_{set}^k$ مقدار شاخص زون تسلیم نرمالیزه تنظیم شده را نشان می‌دهد (برابر یک). K_p در اینجا ضریب خطا است که در کنترل‌گر استفاده می‌شود. بدلیل اینکه در این سیستم، کنترل‌گر با استفاده از یک ورودی و یک خروجی تنظیم می‌شود. برای به‌دست آوردن این ضریب می‌توان با استفاده از چند بار سعی و خطا این ضریب را مشخص کرد. در صورتی که خطای شاخص زون تسلیم نرمالیزه شبیه‌سازی شده و تنظیم شده بیشتر از 0.2 باشد مقدار K_p برابر 500 و در صورتی که خطا کمتر از 0.2 باشد عدد 300 انتخاب می‌شود. تئوری کنترل‌گر مورد استفاده برای تخمین شاخص زون تسلیم نرمالیزه به‌صورت زیر انجام شد:

- ۱- حدس اولیه یک فشار گل برای انجام شبیه‌سازی
- ۲- به‌دست آوردن شاخص $NYZA_{sim}$ با استفاده از نرم افزار FLAC3D



شکل ۲ شماتیک الگوریتم ازدحام ذرات- کنترل‌گر تناسبی برای بهینه‌سازی مسیر حفاری چاه



شکل ۳ توزیع تنش در زون پلاستیک [۱۳]

برای بهینه‌سازی از دسته پرنندگان گرفته شده است [۲۲]. شکل ۶ اصول این الگوریتم را بیان می‌نماید. برای به‌دست آوردن مکان بهینه، از سه بردار سرعت ذره، بهترین مکان ذره و مکان بهترین همسایه استفاده می‌شود. ذره باید در جهت بردارهای نامبرده و به مقدار کسری از اندازه بردارها تغییر مسیر داده تا مکان بعدی ذره مشخص شود. اصول این الگوریتم در رابطه ۳ نشان داده شده است. در این رابطه $\omega v_{i,d}$ نشان‌دهنده تاثیر سرعت فعلی ذره، $\phi_p r_p (P_{i,d} - x_{i,d})$ نشان‌دهنده تاثیر مکان بهترین همسایه و $\phi_g r_g (G_d - x_{i,d})$ نشان‌دهنده تاثیر بهترین مکان ذره تاکنون است [۲۳].

$$v_{i+1,d} = \omega v_{i,d} + \phi_p r_p (P_{i,d} - x_{i,d}) + \phi_g r_g (G_d - x_{i,d}) \quad (3)$$

الگوریتم ارائه شده ترکیبی از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات و کنترل‌گر تناسبی است که به‌صورت زیر انجام می‌شود:

۱- مشخص کردن پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات: این پارامترها شامل تعداد ذرات، تعداد متغیر، فاکتورهای یادگیری الگوریتم (ϕ_p, ϕ_g)، ضریب اینرسی (ω) و شرایط توقف الگوریتم است.

با توجه به کم بودن تعداد متغیر در این الگوریتم که موجب کاهش پیچیدگی می‌شود، عدم تغییر تابع هدف در ۹ مرحله به‌عنوان شرط توقف این الگوریتم در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در مرحله اول سرعت هر ذره به‌صورت تصادفی ($v_{i,d}$) انتخاب می‌شود ولی بعد از مرحله دوم، از رابطه ۳ سرعت هر ذره محاسبه می‌شود.

۳- محاسبه خطا توسط معادله ۲. در صورتی که $e(k) > \mu$ باشد فشار گل جدید توسط معادله ۱ محاسبه می‌شود.

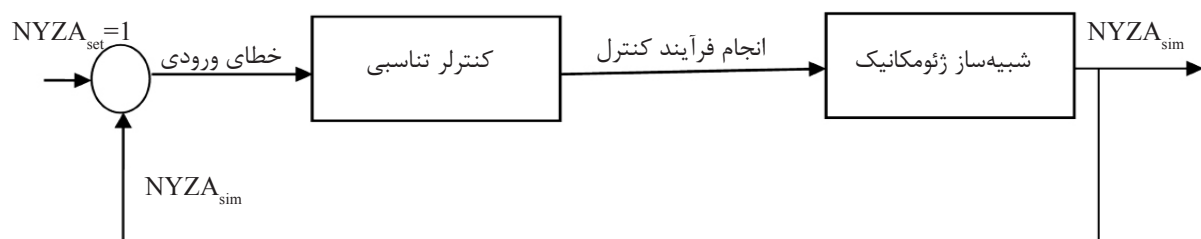
۴- تا زمانی که $e(k) > \mu$ باشد فشار گل جدید محاسبه و جایگزین می‌شود.

۵- اگر $e(k) \leq \mu$ باشد فشار گل بهینه در آن شرایط، برابر P_w به‌دست آمده در آخرین تکرار است.

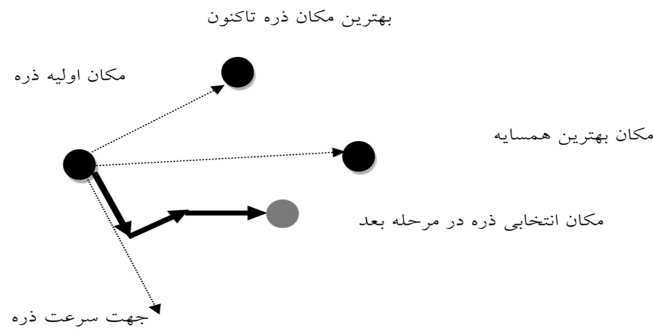
شماتیک این الگوریتم کنترلی برای تخمین فشار گل بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی

به‌دلیل رابطه غیرخطی بین متغیرهای زیرسطحی و متغیرهای چاه، یافتن مقادیر بهینه این متغیرها یکی از مسائل چالش برانگیز می‌باشد. برای بهینه‌سازی یک مسئله روش‌های گوناگونی وجود دارد که با توجه به شرایط مسئله و تابع هدف، می‌بایست روش مناسب انتخاب شود. به‌دلیل رابطه پیچیده بین تابع هدف (فشار گل) و متغیرهای مسئله (آزیموت و زاویه انحراف) از حل تحلیلی نمی‌توان شرایط بهینه را مشخص کرد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی با ارائه یک نظام اصولی و سیستماتیک راه را برای کاوش سناریوهای مختلف و پیدا کردن شرایط بهینه هموار می‌کنند [۲۱]. در این میان الگوریتم ازدحام ذرات با استفاده از ابزار مناسب سعی در حل مسائل پیچیده دارد. در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. هر ذره از جمعیت نمایانگر یک مجموعه جواب از مسئله است. ایده این الگوریتم



شکل ۵ الگوریتم کنترل‌گر تناسبی برای به‌دست آوردن فشار گل بهینه در یک مسیر حفاری خاص



شکل ۶ اصول الگوریتم ازدحام ذرات

۶- انتخاب دو عدد تصادفی r_p و r_g در بازه $[0, 1]$ برای هر ذره. انتخاب به صورت تصادفی و با استفاده از یک توزیع نرمال انجام می‌شود.

انتخاب تصادفی این اعداد باعث می‌شود در هر مرحله که تصادفی انتخاب می‌شوند تاثیر متفاوتی روی بهترین ذره در جمعیت کنونی و بهترین ذره در کل جمعیت برای پیدا کردن جواب بگذارند. انتخاب تصادفی این ضرایب موجب جلوگیری از بدام افتادن در بهینه محلی می‌شود.

۷- به روز کردن سرعت هر ذره با استفاده از رابطه ۳

۸- به روز کردن مکان هر ذره با استفاده از رابطه ۴

$$v_i = \omega v_i + c_1 r_1 (p_{best} - x_i) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i) \quad (4)$$

۹- تکرار مراحل ۲ تا ۸ تا موقعی که تابع هدف بهترین ذره (تابع هدف متناسب با ذره مرحله ۵) تا ۹ مرحله تغییر نکند.

۱۰- انتخاب ذره مرحله ۵ به عنوان مناسب‌ترین مسیر برای حفاری و فشار کل بهینه متناسب با این مسیر انتخاب صحیح پارامترهای ω ، φ_p و φ_g موجب افزایش بازدهی الگوریتم می‌شود. اگر پارامترهای ω ، φ_p ، φ_g تحت شرایط معادله ۴ انتخاب شوند همگرا شدن جواب‌ها به شرایط بهینه را می‌توان تضمین نمود [۲۴].

منظور از همگرا شدن به جواب، رسیدن به حالتی است که فشار کل (تابع هدف) متناسب با پایدارترین مسیر طی ۹ مرحله بدون تغییر باقی بماند. مقادیر مناسب پارامترهای ذکر شده با استفاده از شرایط معادله ۴ انتخاب شده‌اند و در جدول ۱ آورده شده‌اند.

۲- انتخاب مکان برای هر ذره از جمعیت $(x_{i,d})$: هر ذره متشکل از دو متغیر آزیموت و زاویه انحراف است که این مقادیر در مرحله اول به صورت تصادفی و در محدوده مورد نظر انتخاب می‌شود ولی بعد از مرحله دوم، از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. محدوده برای آزیموت بین ۰ تا $360^\circ C$ و برای زاویه انحراف بین ۰ تا $90^\circ C$ در نظر گرفته شده است.

۳- پیدا کردن فشار کل حداقل (تابع هدف) برای هر ذره با استفاده از الگوریتم کنترل‌گر: در این مرحله برای هر ذره یک فشار گل حدس زده می‌شود. با استفاده از کنترل‌گر فشار مناسب تعیین می‌شود. هر ذره نشان‌دهنده یک مسیر حفاری است به عبارت دیگر هر ذره دارای یک آزیموت و یک زاویه انحراف است.

۴- مشخص کردن بهترین ذره در جمعیت کنونی $(P_{i,d})$ (پایدارترین مسیر حفاری در جمعیت کنونی): برای بدست آوردن بهترین ذره در جمعیت کنونی کافیست ذره‌ای که دارای کم‌ترین فشار گل متناسب با شاخص زون تسلیم نرمالیزه برابر یک است انتخاب شود. فشار کل متناسب با شاخص زون تسلیم نرمالیزه برابر یک در مرحله قبل برای هر ذره توسط کنترل‌گر به دست آمده است.

۵- مشخص کردن بهترین ذره در کل جمعیت‌های قبل (G_p) (پایدارترین مسیر حفاری در جمعیت‌های قبل): در این مرحله نیز مانند مرحله قبل، ذره‌ای که دارای کم‌ترین فشار کل متناسب با شاخص زون تسلیم نرمالیزه برابر یک برای جمعیت‌های قبل انتخاب می‌شود.

اطلاعات ورودی چاه مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است رژیم تنش فعال در منطقه از نوع گسل معکوس است ($SH > Sh > Sv$).

نتایج

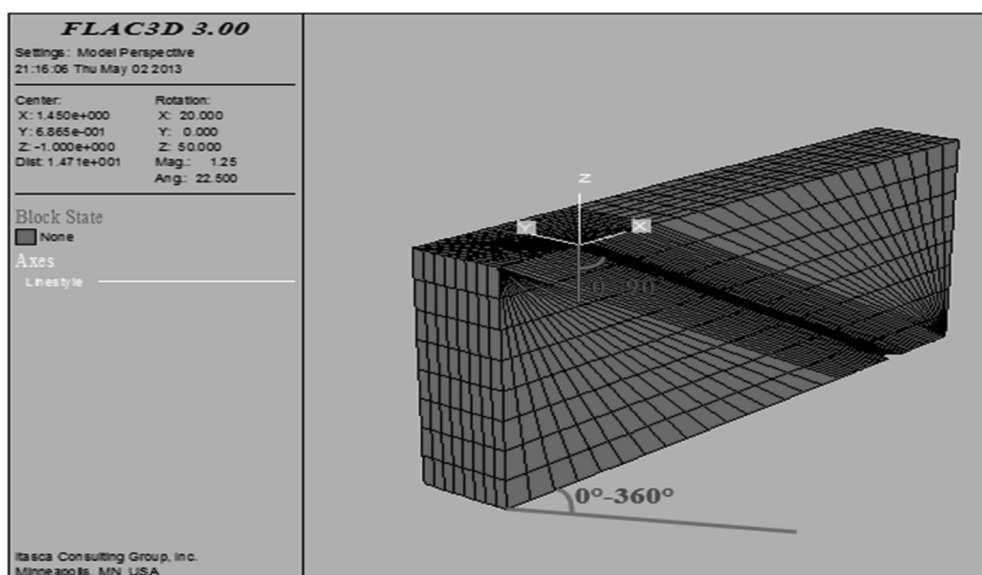
به منظور به‌دست آوردن فشار کل لازم جهت پایداری مسیر کنونی (آزیموت 90° و زاویه انحراف 30°) و بررسی کنترل‌گر، عملکرد آن در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به این شکل، افزایش فشار گل موجب کاهش شاخص زون تسلیم نرمالیزه و این شاخص در فشار کل $38/86 \text{ MPa}$ ($22/82$ پوند بر فوت مکعب) برابر ۱ شد. با مقایسه فشار کل به‌دست آمده از ترکیب کنترل‌گر و شبیه‌ساز ژئومکانیک و فشار گل استفاده شده در این چاه در شرایط واقعی (76 پوند بر فوت مکعب)، می‌توان به این نتیجه رسید که روش مورد نظر از صحت کافی برخوردار است. بنابراین می‌توان از این روش برای پیدا کردن مسیر بهینه چاه استفاده کرد. شرایط حاکم بر چاه ۲۹۱ میدان اهواز حالت فرا تعادلی (شاخص زون تسلیم نرمالیزه کمتر از ۱) داشت که موجب کاهش ریسک ناپایداری می‌شود. هر چه چاه به حالت فرو تعادلی نزدیک‌تر شود باعث افزایش مساحت زون تسلیم و افزایش ریسک ناپایداری می‌شود.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای انتخاب شده برای الگوریتم ازدحام ذرات - کنترل‌گر تناسبی

پارامتر	مقدار
ω	۰/۸
φ_g	۱/۲
φ_p	۱/۵
K_p	۳۰۰/۵۰۰
μ	۰/۰۰۵

توصیف مدل

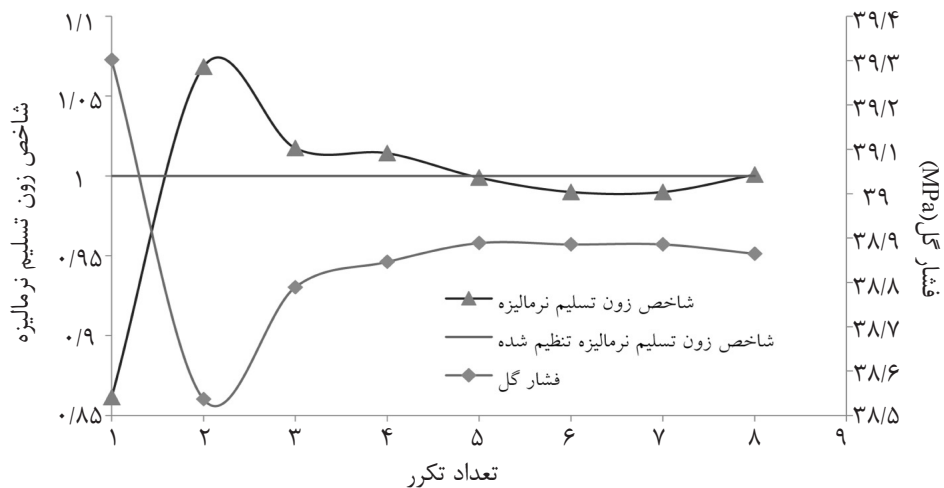
برای تخمین پایداری چاه در هنگام گردش گل حفاری از روش تفاضل محدود در چاه شماره ۲۹۱ میدان نفتی اهواز استفاده شد. این میدان یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جهان است که دارای مساحت 520 کیلومتر مربع است. چاه انحرافی مورد نظر در مخزن بنگستان و در سازند ایلام (کربناته) این میدان حفاری شده است. در این تحقیق ابعاد مدل مورد نظر $12 \text{ radius} \times 12 \text{ radius} \times 2 \text{ m}$ که شعاع چاه مورد نظر $0/077$ متر در نظر گرفته شد. تغییرات آزیموت و زاویه انحراف در شکل ۷ نشان داده شده است. برای توصیف بهتر رفتار سنگ اطراف چاه از رفتار الاستوپلاستیک استفاده شد. همچنین از معیار مور-کولمب به عنوان معیار شکست برای بررسی اثر آزیموت و زاویه انحراف در پایداری چاه استفاده شد.



شکل ۷ شماتیک سه‌بعدی چاه

جدول ۲ اطلاعات ژئومکانیکی چاه انحرافی

مقدار	پارامتر
۰	مقاومت کششی
۷/۶ MPa	چسبندگی
۴۳ درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۰/۲۹	نسبت پواسون
۳۵/۴ MPa	فشار منفذی
۷۹/۲ MPa	تنش قائم
۹۲/۳ MPa	تنش افقی ماکزیمم
۸۴/۶ MPa	تنش افقی مینیمم
۹۰ درجه	آزیموت
۳۰ درجه	زاویه انحراف
۱۱۱۵۲ فوت	عمق
۷۶ پوند بر فوت مکعب	دانسیته گل



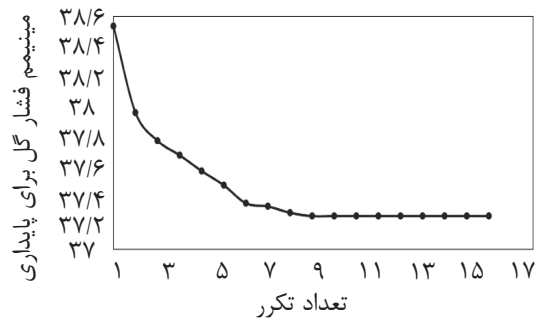
شکل ۸ عملکرد کنترل گر تناسبی

و شاخص زون تسلیم نرمالیزه در یافتن فشار گل در مسیر کنونی چاه (آزیموت 90° و زاویه انحراف 30°)، از این روش به همراه الگوریتم ازدحام ذرات برای پیدا کردن مسیر بهینه حفاری استفاده شد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارائه شده نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست الگوریتم مذکور بعد از ۱۰ تکرار، پایدارترین مسیر حفاری را مشخص نمود. بهینه ترین فشار گل $37/75$ MPa مربوط به آزیموت $358/3^\circ$ و زاویه انحراف $67/4^\circ$ به دست آمد.

صالحی و همکاران در سال ۲۰۰۷ نشان دادند این امکان وجود دارد که در حالت فروتعدادلی (شاخص زون تسلیم نرمالیزه بزرگتر از ۱) بتوان حفاری را ادامه داد [۲۵]. ولی با توجه به نبود اطلاعات نمودار کالیبر در چاه مورد مطالعه آنها، نمی توان از پایداری کامل دیواره چاه با قاطعیت اظهار نظر کرد و هیچ تضمینی برای عدم ریزش وجود ندارد هر چند حفاری در چاه مورد نظر آنها بدون مشکل خاصی انجام شده بود.

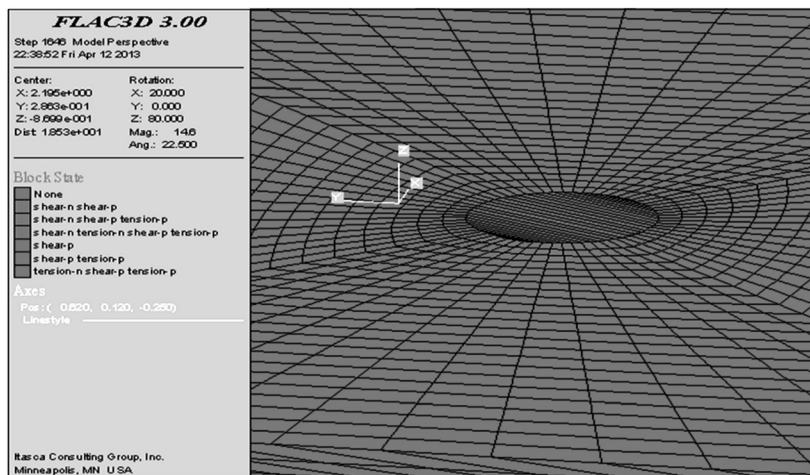
بعد از اطمینان از عملکرد مناسب کنترل گر تناسبی

($0.47(358/3)$ ٪ خطا دارد که نشان می‌دهد الگوریتم استفاده شده دارای دقت مناسب می‌باشد. شکل ۱۰ زون تسلیم را نمایش می‌دهد همان‌طور که از شکل مشخص است در جهت محور X(جهت تنش افقی ماکزیمم) شکست ترکیبی از تنش کششی و برشی است در حالی که در جهت محور Y(جهت تنش مینیمم) شکست از نوع برشی است. منحنی‌های تراز جابه‌جایی دیواره چاه در بهترین مسیر پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است که برای پایداری چاه مقدار جابه‌جایی بیشینه باید در یک دامنه قابل قبولی باشد. ماکزیمم جابه‌جایی در مسیر مذکور 0.278 mm است که قابل اغماض بوده و این مقدار اندک بیشینه جابه‌جایی گواهی بر مناسب بودن فشار گل در این مسیر است.

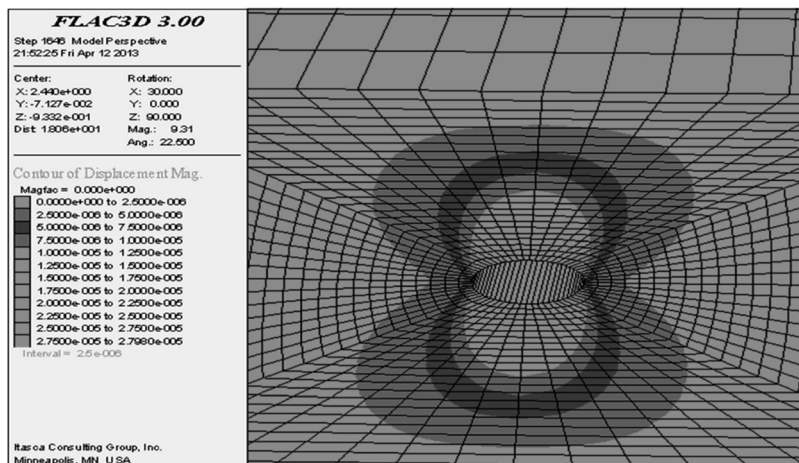


شکل ۹ عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات- کنترل‌گر تناسبی

شایان ذکر است که فشار گل بهینه کلی حدود $1/1$ MPa از فشار گل بهینه مسیر کنونی چاه کمتر است. براساس یافته‌های زارع رئیس آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۲ در رژیم تنش گسل معکوس، بهترین آزمون برای حفاری چاه در جهت تنش افقی ماکزیمم (0° یا 360°) است [۱۱]. آزمون به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی



شکل ۱۰ زون تسلیم اطراف چاه در مسیر بهینه



شکل ۱۱ جابه‌جایی اطراف چاه در مسیر بهینه

نتیجه گیری

بودن این حالت نسبت به مسیر حفاری شده است. از لحاظ اقتصادی، روش تحلیلی و الگوریتم پیشنهادی فقط در مدت زمان اجرای برنامه تفاوت دارد. اگرچه اجرای این برنامه نسبت به حالت تحلیلی طولانی است ولی از ایجاد ناپایداری دیواره چاه که موجب صرفه جویی می شود جلوگیری می کند. شایان ذکر است که شکست در جهت تنش ماکزیمم از نوع ترکیبی از شکست برشی و کششی و در جهت تنش مینیمم فقط از نوع برشی است.

علائم و اختصارات

$NYZA$: زون تسلیم نرمالیزه

$NYZA_{set}$: زون تسلیم نرمالیزه تنظیم شده

$NYZA_{sim}$: زون تسلیم نرمالیزه شبیه سازی شده

P_w : فشار گل

K_p : ثابت کنترل گر تناسبی

e : خطای بین زون تسلیم نرمالیزه تنظیم شده

و شبیه سازی شده

r_p, r_g : اعداد تصادفی بین صفر و یک

v_i : سرعت در مرحله i ام

ω : ثابت اینرسی

φ_p, φ_g : ثابت های شتاب

P_i : مکان بهترین ذره در جمعیت کنونی

G : مکان بهترین ذره در کل جمعیت های قبل

x_i : مکان ذره

μ : تفرانس خطا

S_H : تنش افقی ماکزیمم

S_h : تنش افقی مینیمم

S_v : تنش عمودی

$MMPR$: فشار گل مینیمم لازم برای جلوگیری از

ریزش دیواره

در این مقاله الگوریتمی به منظور بهینه سازی مسیر چاه و یافتن پایدارترین شرایط در چاه ارائه شد. الگوریتم مذکور ترکیبی از یک کنترل گر تناسبی و یک الگوریتم ازدحام ذرات است و برای بهینه سازی از دو نرم افزار MATLAB و FLAC3D استفاده شده است که تمام اطلاعات بین دو نرم افزار به صورت کاملاً اتوماتیک اجرا و عمل بهینه سازی انجام می شود. انتخاب درست الگوریتم ازدحام ذرات و کنترل گر تناسبی نقش بسیار مهمی در بهینه سازی دارد. کنترل گر تناسبی به صورت سعی و خطا و پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات با استفاده از معادله ۴ انتخاب شد. لازم به ذکر است که زون تسلیم نرمالیزه به عنوان شاخص ناپایداری انتخاب شد. کمترین فشار گل مناسب برای پایداری در مسیر کنونی با استفاده از شاخص زون نرمالیزه برابر $38/86$ MPa ($72/82$ پوند بر فوت مکعب) به دست آمده است که نشان می دهد فشار گل شبیه سازی شده در این چاه نسبت به فشار گل استفاده شده در حالت واقعی (76 پوند بر فوت مکعب) تفاوت چندانی نمی کند که نشان دهنده عملکرد مناسب و قابل اطمینان کنترل گر تناسبی به همراه شاخص زون تسلیم نرمالیزه است. براساس آنالیز پایداری و استفاده از این الگوریتم، در رژیم تنش مورد نظر (رژیم تنش گسل معکوس) مسیر کنونی، مسیر مناسب به لحاظ پایداری نیست. مقدار بهینه آزیموت نزدیک جهت تنش افقی ماکزیمم یعنی $358/30$ و مقدار بهینه زاویه انحراف $67/40$ به دست آمده است. فشار گل بهینه متناسب با این مسیر برابر $37/75$ MPa است که با توجه به فشار گل ($38/86$ MPa) مورد استفاده در مسیر کنونی (آزیموت 90° و زاویه انحراف 30°)، گواهی بر پایدارتر

مراجع

- [1] Aslannejad M, Manshad A. and Jalalifar H., "Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability," American Journal of Oil and Chemical Technologies, doi: 10.142266/ajoct18-2, 2013.
- [2]. Chen X. and Haberfield C., "Wellbore stability analysis guidelines for practical well design," SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, Adelaide, Australia. doi: 10.2118/36972-MS, 1996.
- [3]. Xianjie Y., Seehong O. and James E., "Quantifying the effect of rock strength criteria on minimum drilling mud weight prediction using polyaxial rock strength test data," Int. J. Geomech., 6(4), pp. 260–268, 2006.
- [4]. Yew CH. and Gefei L., "Pore fluid and wellbore stabilities," SPE Conference, Beijing, China. doi: 10.2118/22381-MS, 1992.
- [5]. Fuh GH., Whitfill D. L. and Schuh P. R., "Use of borehole stability analysis for successful drilling of high-angle hole," IADC/SPE drilling conference, Dallas, Texas. doi: 10.2118/17235-MS, 1988.
- [6]. Awal M. R., Khan M. S. and Mohiuddin M. A., "A new approach to borehole trajectory optimization for increased hole stability," SPE Middle East Oil Show, Bahrain. doi: 10.2118/68092-MS, 2001.
- [7]. Klimentos T., Harouka A., Mtawaa B. and Saner S., "Experimental determination of the biot elastic constant: applications in formation evaluation (sonic porosity, rock strength, earth stresses, and sanding predictions)," SPE Reservoir Evaluation & Engineering. doi: 10.2118/30593-PA, 1998.
- [8]. Zhou S., Hillis R. and Sandiford M., "On the mechanical stability of inclined wellbores," SPE Drilling & Completion," doi: 10.2118/28176-PA, 1996.
- [9]. Karstad E. and Aadnoy B. S., "Optimization of borehole stability using 3D stress optimization," SPE Annual Technical Conference, Dallas, Texas. doi: 10.2118/97149-MS, 2005.
- [10]. Al-Ajmi A., Adel M. and Zimmerman R. W., "A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability," Journal of Petroleum Science and Engineering. doi: 10.1016/j.petrol.2009.05.018, 2009.
- [11]. Zare-Reisabadi M. R., "Determination of optimal well trajectory during drilling and production based on borehole stability," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 56(0): 77-87, 2012.
- [12]. Hawkes C. D. and McLellan P. J., "Coupled modeling of borehole instability and multiphase flow for under balanced drilling," IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas. doi: 10.2118/74447-MS, 2002.
- [13]. Goshtasbi K., Elyasi A. and Naeimipour, "A 3D numerical stability analysis of multi-lateral well junctions," Arab J Geosci. doi: 10.1007/s12517-012-0558-x, 2012.
- [14]. Manshad A., "Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods," Journal of Petroleum Exploration and Production Technology: 1-11, 2014.
- [15]. Safarzadeh M. A., Motealleh M. and Moghaddasi J., "A novel, streamline-based injection efficiency enhancement method using multi-objective genetic algorithm," Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, Springer Heidelberg, DOI 10.1007/s13202-014-0116-z, 2014.
- [16]. Safarzadeh M. A. and Motahhari S. M., "CO-optimization of carbon dioxide storage and enhanced oil recovery in oil reservoirs using multi objective genetic algorithm (NSGA-II)," Journal of Petroleum Science, Springer Heidelberg, DOI 10.1007/s12182-014-0362, 2014.

- [17]. Hawkes C. D. and McLellan P. J. "Modeling of yielded zone enlargement around a wellbore," SPE Conference Paper, Montral, Canada 1996.
- [18]. McLellan P. J. and Wang Y., "Predicting the effects of pore pressure penetration on the extent of wellbore instability: application of a versatile poro-elastoplastic model," SPE Conference Paper, Delft, Netherlands. doi: 10.2118/28053-MS, 1994.
- [19]. Hawkes C. D. and McLellan P. J., "A new model for predicting time-dependant failure of shales: Theory and Application," SPE Annual Technical Meeting, Calgary, Alberta. doi: 10.2118/97-131, 1997.
- [20]. McLellan P. J., Hawkes C. D. and Read R. S., "Sand production prediction for horizontal wells in gas storage reservoirs," SPE/CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary, Alberta. doi: 10.2118/65510-MS, 2000.
- [21]. Goldberg D. E., "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning," Addison-Wesley, Ontario, 1989.
- [22]. Eberhart R. and Kennedy I., "A new optimizer using particle swarm theory," Symposium on Micro Machine and Human Science, 4(12), 39-43, 1995.
- [23]. Onwunalu J. E. and Durlofsky L. J., "Application of a particle swarm optimization algorithm for determining optimum well location and type," Comput. Geosci. Doi: 10.1007/s10596-009-9142-1, 2010.
- [24]. Engelbrecht A., "Computational Intelligence," John Wiley & Sons, London, 2007.
- [25]. salehi S., "Wellbore Stability analysis in UBD Wells of Iranian fields," SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Bahrain, Society of Petroleum Engineers, 2007.