



## مدل سازی عملیات فراز آوری با گاز با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک برای پیش بینی نرخ تولید نفت یک چاه

احسان خامه‌چی<sup>۱</sup>، محمدرضا مهدیانی<sup>۲</sup>، محمد نوروزی<sup>۳</sup>، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یکی از متداول‌ترین شیوه‌های فراز آوری مصنوعی، روش فراز آوری با گاز است. در این روش نرخ تولید نفت تابعی از متغیرهای چاه، مخزن و شرایط تولید است و معمولاً با آنالیز گره‌ای که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است محاسبه می‌شود. به‌طور کلی ویژگی‌ها و متغیرهای چاه‌ها و مخازن مختلف با یکدیگر متفاوت است؛ علاوه بر این متغیرهای یک چاه یا مخزن خاص نیز در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین ساخت مدلی که بتواند نرخ تولید نفت در عملیات فراز آوری با گاز را در مسائل مختلف با سرعت و دقت پیش‌بینی کند ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی نرخ تولید نفت ارائه شده است. مقایسه پیش‌بینی این مدل با آنالیز گره‌ای، دقت زیاد مدل را نشان می‌دهد (خطای میانگین نسبی ۱/۵۳ درصد و بیشینه خطای نسبی ۵ درصد). البته سرعت مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به مراتب از آنالیز گره‌ای بیشتر است.

واژگان کلیدی برنامه‌ریزی ژنتیک، فراز آوری با گاز، مدل‌سازی، نرخ تولید نفت

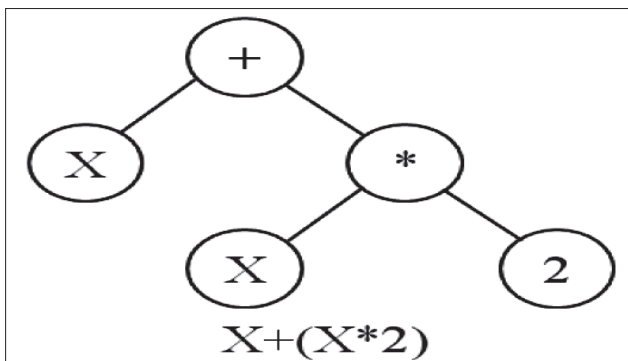
واژگان کلیدی

### مقدمه

آنتونکو<sup>۵</sup> مدلی برای فراز آوری مصنوعی ساخت که بیش از آنکه بر یک فرآیند تمرکز داشته باشد نوع فراز آوری مصنوعی را مورد توجه قرار می‌داد [۷]. در سال ۲۰۱۰ کویت<sup>۶</sup> مدلی برای فراز آوری با گاز ارائه داد که معادلات غیرخطی را به خطی تبدیل می‌کرد [۸]. مدل او در موارد مختلف نیاز به تغییراتی برای هماهنگی با مورد داشت. در سال ۲۰۱۲ لو<sup>۷</sup> با استفاده از روش عمومی خطی کاهش یافته<sup>۸</sup> مدلی برای فراز آوری با گاز ارائه داد و سپس در مسائل

با ادامه تولید از یک مخزن هیدروکربوری، فشار مخزن افت کرده و تولید نفت تا جایی کاهش می‌یابد که تولید صرفه اقتصادی ندارد. در این شرایط یکی از متداول‌ترین روش‌های افزایش تولید، عملیات فراز آوری با گاز است. در این عملیات گاز به چاه تزریق و در نفت حل شده و سبب کاهش چگالی ستون نفت موجود در چاه و متعاقباً افزایش تولید می‌شود [۲۱]. آگاهی از میزان افزایش نرخ تولید نفت حین عملیات و تأثیر متغیرهای مختلف مانند فشار تزریق، فشار جداکننده و نرخ تزریق، قبل از شروع عملیات فراز آوری با گاز بسیار حیاتی است. نرخ تولید نفت معمولاً با آنالیز نودال به‌دست می‌آید که پرهزینه و زمان‌بر است و دقت آن نیز به معادلات حالت<sup>۳</sup> استفاده شده در آن بستگی دارد [۳-۵]. همواره تلاش‌هایی برای یافتن روش‌های سریع‌تر و ارزان‌تر جهت محاسبه نرخ تولید نفت در حال انجام است. در ادامه مهم‌ترین این مطالعات به‌صورت خلاصه بررسی خواهد شد.

در سال ۲۰۰۶ زانگ<sup>۴</sup> با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدلی برای مدیریت مخزن و تولید ارائه کرد [۶]. در سال ۲۰۰۸



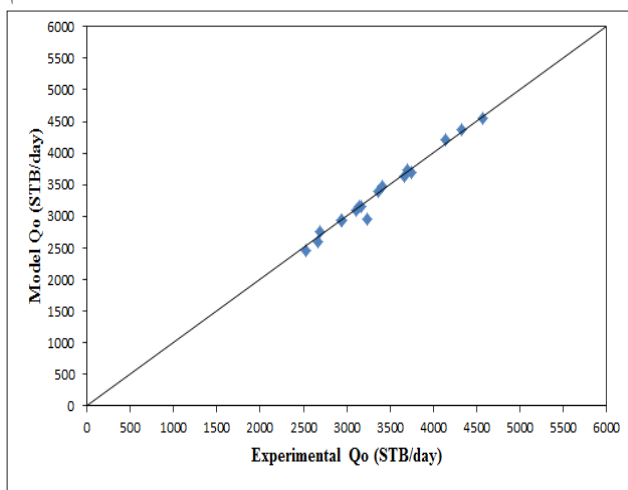
۱ | نمونه‌ای از یک ساختار درختی که در برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده می‌شود [۱۶]

تخمین نرخ تولید نفت بر اساس متغیرهای مخزنی، چاه و تولیدی در یک چاه تحت فرازآوری استفاده می‌شود.

### ۱- برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۱</sup> بسطی از الگوریتم‌های تکاملی است که الگوریتم ژنتیک را به منظور مقاصد و کاربردهای مدل‌سازی توسعه می‌دهد [۱۱]. این رویه بر اساس یک ساختار درختی کار می‌کند که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان آنرا به راحتی در مسائل مختلفی مانند طراحی چاه [۱۲]، خواص شیمیایی [۱۳]، توسعه کوانتومی در علوم کامپیوتر [۱۴] و مدل‌سازی معادلات [۱۵] به کار برد. از آنجا که در شکل درخت محدودیتی وجود ندارد استفاده از درخت این امکان را به مدل می‌دهد که به راحتی به اشکال مختلف تبدیل شده و بهترین شکل را به دست آورد. این مزیت، برنامه‌ریزی ژنتیک را نسبت به سایر الگوریتم‌های ساخت مدل مانند رگرسیون، شبکه‌های عصبی و غیره سرآمد می‌کند. مزیت دیگر برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به سایر روش‌های ساخت مدل آنست که این روش مانند الگوریتم ژنتیک به خوبی کل فضا را برای یافتن بهترین مدل جستجو می‌کند. این الگوریتم برخلاف اغلب روش‌های دیگر از یک جمعیت برای ساخت مدل استفاده می‌کند که خود باعث جستجوی بهتر برای ایجاد مدل می‌شود.

در آغاز عملیات یک جمعیت به صورت تصادفی ساخته می‌شود. سپس هر درخت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تعدادی از درختان برای تکرار بعد انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از جهش و تقاطع جمعیت انتخابی گسترش می‌یابد. بر خلاف مدل‌های الگوریتم



۲ | رسم مقادیر داده شده توسط مدل بر حسب مقادیر آزمایشگاهی برای داده‌های مورد نیاز جهت ساخت مدل

بهینه‌سازی از آن استفاده کرد [۹]. در همین سال لی<sup>۹</sup> با استفاده از روش کریجینگ یک مدل برای مخزن و چاه پیشنهاد داد [۱۰]. او با استفاده از این مدل مقدار تولید نفت پیشینه را ارائه کرد.

در مرور تحقیقات گذشته کمتر مشاهده می‌شود که تمرکز کاری بر ساخت مدل در فرازآوری با گاز قرار گرفته باشد. مدل‌های پیشین اغلب به صورت کلی به مدل‌های مخزنی و بهره‌برداری پرداخته‌اند؛ علاوه بر این در بیشتر این مدل‌ها از روش‌های عددی و رگرسیون استفاده شده است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ژنتیک جهت

۱ | محدوده متغیرهای داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل

| Parameter (unit) | Min   | Max   |
|------------------|-------|-------|
| °API             | 20    | 25    |
| PI (STB/day/psi) | 2.05  | 3     |
| $P_R$ (psi)      | 4000  | 4890  |
| WC               | 1     | 5     |
| $ID_i$ (in)      | 2.992 | 3.958 |
| $r_w$ (ft)       | 4.126 | 6.276 |
| D (ft)           | 10560 | 11950 |
| $P_{wh}$ (psi)   | 420   | 600   |
| $D_i$ (ft)       | 7105  | 9870  |
| $\gamma_{gi}$    | 0.7   | 0.83  |
| $Q_g$            | 3.6   | 7.425 |

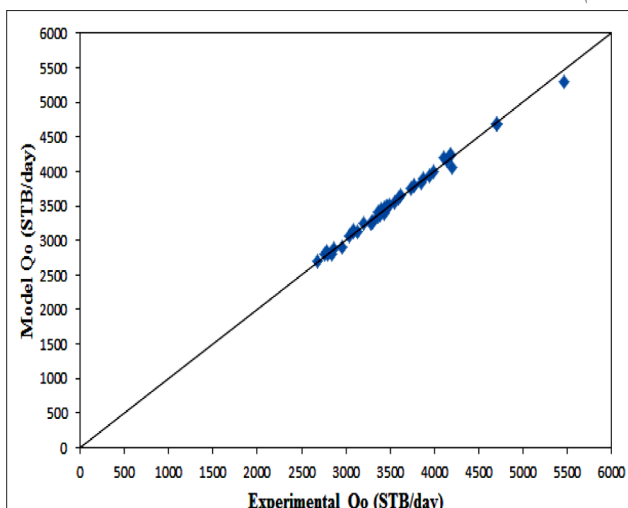
۲ | مقادیر متغیرهای برنامه‌ریزی ژنتیک

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| Population Type      | Double Vector      |
| Population Size      | 20                 |
| Fitness Scaling      | Rank               |
| Selection Function   | Stochastic Uniform |
| Elite Count          | 4                  |
| Crossover Fraction   | 0.8                |
| Mutation Function    | Uniform            |
| Crossover Function   | Scattered          |
| Migration            | Forward            |
| Hybrid Function      | None               |
| Max Generation       | 500                |
| Max Stall Generation | 150                |
| Function Tolerance   | 1.00E-06           |



میادین جنوب ایران جمع آوری گردید. سپس ۴۲ چاه به صورت تصادفی انتخاب و ۱۸ چاه دیگر جهت آزمایش مدل کنار گذاشته شدند. جدول ۱- محدوده متغیرهای که برای ساخت (یا آموزش) مدل استفاده شده‌اند را نشان می‌دهد.

در این محدوده می‌توان انتظار داشت که مدل خوب کار کند و البته برون‌یابی در مدل می‌تواند به جواب‌های غیر واقعی منجر گردد. حال باید با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک مدلی مناسب برای پیش‌بینی نرخ تولید ساخته شود. ابتدا جمعیتی از درخت‌ها به صورت اتفاقی تولید می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد در حقیقت هر درخت نماینده یک معادله یا مدل است. در این درخت‌ها مقادیر گره‌ها چهار عمل اصلی ( $+$ ,  $-$ ,  $\times$ ,  $/$ ) و متغیرهای موجود در ترمینال‌ها،  $D_i$ ،  $D$ ،  $API^\circ$ ،  $\gamma_{gi}$  و  $WC$ ،  $r_w$ ،  $Q_g$ ،  $P_{wh}$ ،  $P_R$  هستند. سپس مقدار خطایی که معادله نظیر درخت‌ها در پیش‌بینی نرخ تولید به ازای متغیرهای هر چاه دارد برای هر چاه محاسبه شد و مقدار میانگین خطا در چاه‌های مختلف به دست آمد. هدف برنامه‌ریزی ژنتیک یافتن درختی است که خطای متوسط آن در پیش‌بینی نرخ تولید چاه‌های مختلف کمینه باشد. پس از ارزیابی درخت‌های تولید شده در مرحله نخست، درخت‌هایی که بیشترین دقت را دارند انتخاب می‌شوند. آنگاه جمعیت این درخت‌ها به کمک عملیات جهش و تقاطع زیاد شده و دوباره درخت‌های مناسب‌تر انتخاب می‌گردند. برنامه‌ریزی ژنتیک آنقدر مدل را تغییر می‌دهد تا متوسط خطاهای نسبی کمتر از یک مقدار از پیش تعریف شده گردد یا تغییرات آن از یک مقدار معین کوچک‌تر شود. در این زمان الگوریتم پایان یافته و ساخت مدل به اتمام رسیده است. مدل نهایی مطابق رابطه ۱- است:



شکل ۳ رسم مقادیر داده شده توسط مدل بر حسب مقادیر آزمایشگاهی برای داده‌های مورد نیاز جهت آزمایش مدل

ژنتیک که از آرایه‌ها برای نشان دادن متغیرها استفاده می‌شود، برنامه‌ریزی ژنتیک برای نمایش متغیرها از ساختار درختی بهره می‌برد [۱۶] (شکل-۱).

## ۲- ساخت مدل

در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک یک مدل جدید برای تخمین نرخ تولید نفت در یک چاه تحت فراز آوری با گاز ساخته شده است. ابتدا داده‌های مورد نیاز ۶۰ عدد از چاه‌های

| محدوده داده‌های مورد نیاز برای آزمایش مدل |       |       |
|---|-------|-------|
| Parameter (unit)                          | Min   | Max   |
| $^\circ API$                              | 20    | 24    |
| PI (STB/day/psi)                          | 2     | 3     |
| $P_R$ (psi)                               | 4180  | 4880  |
| WC  | 1     | 5     |
| $ID_i$ (in)                               | 2.992 | 3.958 |
| $r_w$ (ft)                                | 4.126 | 6.276 |
| D (ft)                                    | 10760 | 12000 |
| $P_{wh}$ (psi)                            | 420   | 580   |
| $D_i$ (ft)                                | 7150  | 9760  |
| $\gamma_{gi}$                             | 0.7   | 0.9   |
| $Q_g$                                     | 3.855 | 8.9   |

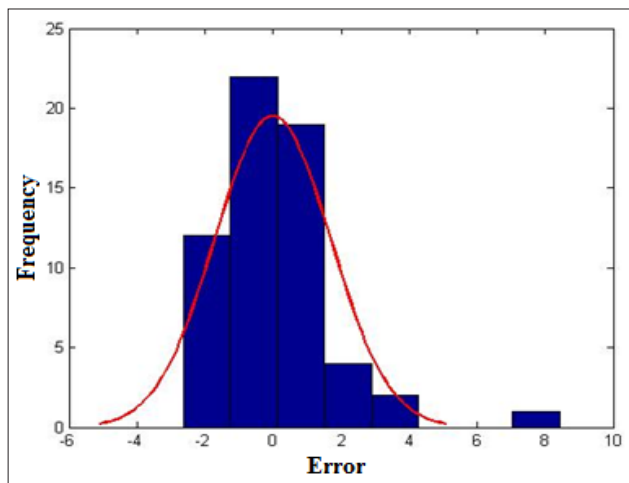
| محدوده کل داده‌ها |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| Parameter (unit)  | Min   | Max   |
| $^\circ API$      | 20    | 25    |
| PI (STB/day/psi)  | 2     | 3     |
| $P_R$ (psi)       | 4000  | 4890  |
| WC                | 1     | 5     |
| $ID_i$ (in)       | 2.992 | 3.958 |
| $r_w$ (ft)        | 4.126 | 6.276 |
| D (ft)            | 10560 | 12000 |
| $P_{wh}$ (psi)    | 420   | 600   |
| $D_i$ (ft)        | 7105  | 9870  |
| $\gamma_{gi}$     | 0.7   | 0.9   |
| $Q_g$             | 3.6   | 8.9   |

محدوده مورد اشاره در جدول-۳ ارائه شده است. با این وجود آزمایش مدل نشان داده که این مدل در محدوده جدید نیز به خوبی عمل می کند. کاربرد مطلوب مدل برای داده های آزمایش را می توان در شکل-۳ مشاهده کرد. در این شکل باز هم نقاط مجاور خط  $X=Y$  هستند. بنابراین می توان محدوده داده ها را برای کاربرد مدل به محدوده کل داده ها گسترش داد. محدوده کل داده ها در جدول-۴ ارائه شده است. در این شکل مقایسه تخمین مدل این مقاله نسبت به داده های دقیق رسم شده است.

توزیع خطای داده های تخمینی در شکل-۵ ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود این نمودار نسبت به خط صفر متقارن است. بنابراین تعداد نقاط با تخمین کمتر از واقعیت با تعداد نقاطی که بیشتر از مقدار آزمایشگاهی تخمین زده شده اند برابر می کند. بیشترین خطا نزدیک به خط صفر، بیشینه پیش بینی کمتر از ۲ درصد و بیشینه پیش بینی بیشتر از ۴ درصد است (علاوه بر اینکه خطای یکی از نقاط ۸ درصد است). این خطاها ممکن است در اثر خطای انسانی در داده گیری اتفاق افتاده باشد که باز هم نشان دهنده که مدل مذکور می تواند پیش بینی خوبی ارائه دهد. خلاصه ای از ویژگی های آماری این مدل در جدول-۵ ارائه شده است.

### نتیجه گیری

مدل برنامه ریزی ژنتیک توانایی پیش بینی نرخ تولید نفت در یک چاه تحت فراز آوری با گاز با دقت زیاد و قابل قبولی نسبت به داده های



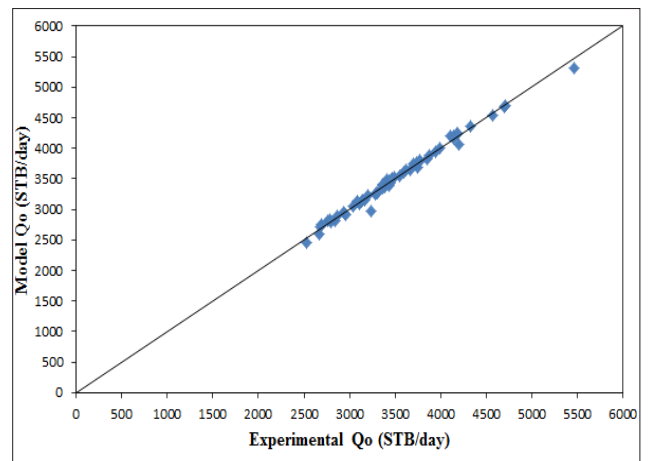
۵ هیستوگرام توزیع خطای مدل برای داده های مورد نیاز جهت آزمایش مدل

$$Q_o = 3358.744 \times PI - 3.8158 \times P_{wh} - 0.062662 \times D \times PI \times PI + 0.021045 \times PI \times D \times r_w + 31.6433 \times API - 572.3572 \times r_w + 8.219 \times ID_i / \gamma_i \times API + 2.9556 \times P_{wh} \times WC / API - 38.1693 \times Q_g - 6628.0585 - 122.0731 \times WC + 0.14377 \times D_i + 0 \times WC + 573.4708 \times ID_i - 0.48639 \times D + 2.0094 \times P_R \quad (1)$$

مقادیر استفاده شده برای متغیرهای برنامه ریزی ژنتیک این پژوهش را می توان در جدول-۲ مشاهده کرد.

شکل-۲ نشان دهنده مقایسه داده های مدل نسبت به داده های آزمایشگاهی است. خط  $x=y$  نقاطی را نشان می دهد که در آنها پیش بینی مدل با داده های آزمایشگاهی هم سان است. هر چه این نقاط از خط  $x=y$  دور می شوند خطای آنها افزایش می یابد. همان طور که در شکل-۲ مشاهده می شود تمام نقاط به این خط نزدیک هستند.

پس از آنکه ساخت مدل به پایان رسید باید آنرا با داده هایی که از آنها در ساخت استفاده نشده آزمایش کرد. محدوده این متغیرها تقریباً مانند محدوده استفاده شده داده های موجود برای ساخت مدل است (این محدوده برای برخی از متغیرها کمی متفاوت می باشد).



۴ رسم مقادیر داده شده توسط مدل بر حسب مقادیر آزمایشگاهی برای کل داده ها

|              | Test     | Train    | All      |
|--------------|----------|----------|----------|
| no of Points | 18       | 42       | 60       |
| Average      | 1.530507 | 1.010633 | 1.166595 |
| Median       | 0.847769 | 0.943919 | 0.943919 |
| Max          | 8.419733 | 3.477608 | 8.419733 |



مورد نیاز برای محاسبه نرخ تولید نفت توسط شبیه‌ساز بوده و دقت مدل نیز مناسب به نظر می‌رسد. در بهینه‌سازی عملیات فراز آوری با گاز که نیازمند تعداد زیادی محاسبات برای تابع هدف است، این مدل بسیار اقتصادی‌تر از به کارگیری یک شبیه‌ساز به عنوان تابع هدف می‌باشد. ■

آزمایش میدانی دارد. از این مدل می‌توان جهت برآورد نرخ تولید نفت در چاه‌های مختلف با متغیرهای متفاوت، در کمترین زمان و با کمترین هزینه استفاده کرد. علاوه بر این تعداد متغیرهایی که مدل برای تخمین نرخ تولید نفت از آنها بهره می‌برد به مراتب کمتر از تعداد متغیرهای

## پانویس‌ها

<sup>1</sup>mmahdiany@yahoo.com

<sup>2</sup>ashkanrz@yahoo.com

<sup>3</sup>Equation of State (EOS)

<sup>4</sup>Zang

<sup>5</sup>Antonenko

<sup>6</sup>Couët

<sup>7</sup>Lu

<sup>8</sup>Generalized Reduced-Gradient

<sup>9</sup>Li

<sup>10</sup>genetic programming

## منابع

- [1] Economides, M. J., Hill, A. D., & Ehlig-Economides, C. (1993). *Petroleum Production Systems*. New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [2] Gud, B., Lyons, W. C., & Ghalambor, A. (2007). *Petroleum Production Engineering A computer-Assisted Approach*. Elsevier Science & Technology Books.
- [3] I. Guerrero-Sarabia, Y. F. (2013, February). Genetic algorithm for solving a gas lift optimization problem. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- [4] Tapabrata Ray, R. S. (2007). Genetic algorithm for solving a gas lift optimization problem. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 59 (1-2), 84-96.
- [5] Shahaboddin Ayatollahi, M. N. (2004). Intermittent gas lift in Aghajari oil field, a mathematical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 42 (2-4), 245-255.
- [6] Zang, G., Graf, T., & Al-Kinani, A. (2006). Proxy Modeling in Production Optimization. SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition. Vienna, Austria: Society of Petroleum Engineers.
- [7] Antonenko, D., Pav, V., Surtaev, V., & Sevastyanova, K. (2008). Selecting an Optimal Field Development Strategy for the Vankor Oilfield Using an Integrated-Asset-Modeling Approach. Europec/EAGE Conference and Exhibition. Rome, Italy: Society of Petroleum Engineers.
- [8] Couët, B., Djikpesse, H., & Tonkin, T. (2010). Production Enhancement through Integrated Asset Modeling Optimization. SPE Production and Operations Conference and Exhibition. Tunis, Tunisia: Society of Petroleum Engineers.
- [9] Lu, Q., & Fleming, G. (2012). Gas Lift Optimization Using Proxy Functions in Reservoir Simulation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 109-119.
- [10] L., J., Zhang, H., & Houeto, F. (2012). A Grid-Free Method to Enhance Reservoir-Well Coupling. North Africa Technical Conference and Exhibition. Cairo, Egypt: Society of Petroleum Engineers.
- [11] Reeves, C. R. (1997). Genetic algorithm for the operations research. *J. Comput*, 9, 231-250.
- [12] Shokir, E. M.-M., Emera, M. K., Eid, S. M., & Abd Wally. (2004). A new optimization model for 3D well design. *Oil Gas SciTechnol.*, 59, 255-256.
- [13] Shokir, E. M.-M. (2008). Dewpoint pressure model for gas condensate reservoirs based on genetic programming. *Energy Fuels*, 22, 3194-3200.
- [14] Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Evolution*. MIT Press.
- [15] Sakamoto, E., & Iba, H. (2001). Inferring a system of differential equations for a gene regulatory network by using genetic programming. *Evolutionary Computation CEC2001*, IEEE Press., (pp. 720-726). Seoul, Korea.
- [16] Dmour, E. M.-M. (2009). Genetic Programming (GP)-Based Model for the Viscosity of Pure and Hydrocarbon Gas Mixtures. *Energy & Fuels*, 23, 3632-3636