

## وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مهدي سعادت دستنایي، مجيدنبی بیدهندي؛  
دانشگاه تهران، موسسه ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین،

دریافت ۹۶/۰۲/۲۳ پذیرش ۹۶/۰۴/۰۷

### چکیده

تعیین خواص پتروفیزیکی مخزن در تولید و صیانت از مخازن هیدروکربوری نقش به‌سزایی دارد. روش‌های تعیین این خواص متنوع است و مدل‌هایی که این خواص را تعیین می‌کنند روز به روز در حال تکامل هستند. مدل BISQ مدل جدیدی است که دقت آن در تعیین خواص لرزه‌ای سنگ مخزن با توجه به مقادیر پتروفیزیکی آن، توسط محققان مختلف تأیید شده است. از طرفی به این دلیل که این مدل یک مدل غیرخطی است وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی مخزن دخیل در این مدل با روش‌های مرسوم امکان‌پذیر نیست از این رو، در این جا از یک روش بهینه‌سازی سراسری برای تعیین خواص پتروفیزیکی مخزن استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک ترکیبی (HGA) با اعمال مفاهیم خود انطباقی بر الگوریتم ژنتیک حقیقی قدرت جست‌جو و کیفیت پاسخ‌های این الگوریتم را بهبود می‌بخشد. در این مقاله روش وارون‌سازی معرفی شده برای تعیین خواص پتروفیزیکی داده‌های مصنوعی ایجاد شده با مدل BISQ و همچنین داده‌های یک چاه به‌کار رفته است و نتایج آن بررسی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مدل BISQ، وارون‌سازی سراسری، الگوریتم ژنتیک.

### مقدمه

در وارون‌سازی ژئوفیزیکی هدف یافتن مدلی از زمین است که توضیح‌دهندهٔ مشاهدات ژئوفیزیکی باشد. در وارون‌سازی بر مبنای مدل<sup>۱</sup> با استفاده از اپراتور مدل‌سازی پیش‌رو<sup>۲</sup> به‌وسیلهٔ تعیین پارامترهای مدل می‌توان داده مصنوعی ایجاد کرد و در قالب یک تابع هدف این داده مصنوعی ایجاد شده را با داده ژئوفیزیکی مشاهده‌ای مقایسه کرد، که این قیاس از طریق بهینه‌سازی تابع هدف انجام می‌گیرد. این تابع وابسته به پارامترهای مدل است و در مسائل وارون ژئوفیزیکی معمولاً این وابستگی غیرخطی است [۵]. در وارون‌سازی پارامترهای مخزنی را مدل‌های استفاده شده که درجهٔ بالایی از غیرخطی بودن دارند که در این شرایط باید روش متناسب با مسئله در نظر گرفته شود [۹]. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی چنین توابعی ارائه شده است که شامل روش‌های بهینه‌سازی محلی و روش‌های بهینه‌سازی سراسری هستند. در روش‌های بهینه‌سازی محلی از شیب تابع هدف برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود و جواب در یک فرایند تکراری با توجه به شیب تابع هدف به‌روز می‌شود از این رو، این روش‌ها فقط در صورتی به نتیجه مطلوب می‌رسند که

\*نویسنده مسئول mahdi.saadat@ut.ac.ir

1. Model-based inversion  
2. Forward modeling operator

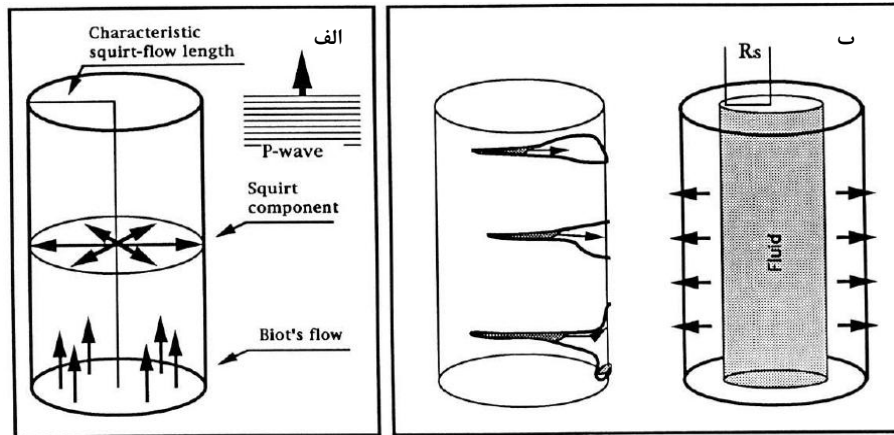
مدل اولیه نزدیک به مدل بهینه باشد. اما روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند شبیه ساز تبرید<sup>۱</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> علاوه بر قابلیت میل به سمت جواب بهینه قابلیت فرار از نقاط بهینه محلی را دارند [۵]. الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی سراسری است که اصول آن مبنی بر تئوری تکامل داروین و اصول وراثتی مندل بنا شده است. در این روش یک جمعیت از مدل‌های ممکن از فضای مدل به‌طور اتفاقی انتخاب شده و در تکامل این جمعیت در هر نسل سعی می‌شود به‌وسیلهٔ اپراتورهای ژنتیکی انتخاب<sup>۳</sup>، هم‌گذری<sup>۴</sup> و جهش<sup>۵</sup> برازش جمعیت بهبود یابد [۹]. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سراسری در ژئوفیزیک مانند دیگر رشته‌ها با توجه به پیشرفت‌های روزافزون این روش‌ها و قدرت محاسباتی کامپیوترها افزایش یافته است کورمک<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۹) [۶] با استفاده از الگوریتم ژنتیک توانستند خواص مخزنی را وارون‌سازی کنند. بکرش<sup>۷</sup> (۲۰۰۶) [۱] از الگوریتم وارون‌سازی تصادفی و با رویکرد بیزین<sup>۸</sup> برای تخمین تداخل و اشباع سیال کمک گرفت. نی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۰۴) [۷] با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک نیچه (NGA) به وارون‌سازی وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی مخزن پرداختند. هم‌چنین فنگ<sup>۱۰</sup> و یانگ<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵) [۵] از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی به‌منظور تخمین خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن استفاده کردند.

### مدل<sup>۱۲</sup> BISQ

مدل‌های پتروفیزیکی حلقه‌ای برای ایجاد ارتباط بین خواص مخزنی و مشاهدات ژئوفیزیکی هستند. چنین مدل‌هایی با استفاده از پارامترهای الاستیک و پتروفیزیکی سنگ به پیش‌بینی خواص لرزه‌ای مانند سرعت امواج و ضریب کیفیت سنگ می‌پردازند. این مدل‌ها از این رو مهم هستند که می‌توانند نقش اپراتور مدل‌سازی پیش‌رو را در فرایند وارون‌سازی خواص مخزنی ایفا کنند، به این صورت که پارامترهای مورد نظر در فرایند وارون‌سازی را در این مدل‌ها تخمین زده و نتیجه پیش‌بینی شده به‌وسیلهٔ مدل، با داده مشاهده‌ای از برداشت‌های ژئوفیزیکی مقایسه می‌شود. لذا هرچه مدل دقیق‌تر باشد نتایج به‌دست آمده برای پارامترهای مورد نظر نیز به واقعیت نزدیک‌تر است [۵]. مدل BISQ از ترکیب دو مدل BIOT و Squirt flow حاصل شده است. در مدل Biot سیال موجود در فضای خالی به‌وسیله اصطکاک حاصل از ویسکوزیته و جفت‌شدگی داخلی، در حرکت نوسانی فاز جامد شرکت می‌کند. یک مکانیسم متفاوت جریان سیال در حین انتشار موج صوتی وابسته به فواره زدن سیال موجود در فضای خالی از شکاف‌ها به بیرون است که به‌دلیل تغییر شکل شکاف‌ها به‌وسیلهٔ عبور موج لرزه‌ای است (شکل ۱ الف). محققان مختلف تأیید کرده‌اند که این دو مکانیسم از یک‌دیگر مستقل هستند. وقتی این دو مکانیسم هم‌زمان در سنگ رخ بدهند بر یک‌دیگر و بر انتشار انرژی لرزه‌ای و جذب آن اثر گذار هستند. مکانیسمی که اثر هر دو فرایند را در نظر می‌گیرد مدل BISQ است [۲]. مکانیسم Biot را با یک مدل مهم دیگر از برهم کنش سیال-جامد یعنی مکانیسم squirt-flow ترکیب

1. Simulated-annealing
2. Genetic algorithm
3. Selection
4. Crossover
5. Mutation
6. McCormack
7. Bachrach
8. Beysian
9. Nie
10. Fang
11. Yang
12. Biot-Squirt flow

کردند، و مدل BISQ را ارائه دادند. در واقع تفاوت مدل BISQ و مدل Biot در لحاظ تغییرات فشار سیال ناشی از مکانیسم squirt flow در مدل BISQ میباشد (دوورکین و نور ۱۹۹۳ [۲]) در عمل ان‌ها از این مدل برای ارتباط دادن تراوایی به تضعیف و به‌دست آوردن هم‌بستگی کیفی بهتری با داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل Biot استفاده کردند.



شکل ۱. تصویر مکانیکی از یک استوانه نوعی استفاده شده در مدل BISQ الف) مؤلفه‌های تضعیف Biot و Squirt flow در یک استوانه اشباع که موج  $p$  موازی با محور استوانه منتشر می‌شود، ب) اشباع جزئی شعاع استوانه کاملاً اشباع را می‌کاهد [۳]

در قدم بعد دوورکین<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۴) [۳] هردو مکانیسم را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفتند و پیشنهاد کردند که مدل BISQ در محیط متخلخل با اشباع جزئی ارتباط بین پارامترهای مخزن (تخلخل، اشباع اب، تراوایی) و خواص الاستیک (سرعت، تضعیف و امیدانس) برقرار می‌کند و سپس ضریب طول ویژه جریان فواره‌ای ( $R$ ) را اصلاح کرده و مدل BISQ را برای محیط‌های با اشباع جزئی توسعه می‌دهند (شکل ۱ ب). محققان مختلفی در توسعه این مدل برای محیط‌های مختلف تلاش کرده‌اند که در این‌جا از مدل ارائه شده نی و همکاران (۲۰۰۴) [۷] استفاده می‌شود که موج برشی را نیز در نظر می‌گیرد و مطابق با این مدل سرعت موج تراکمی سریع ( $V_{p1}$ )، سرعت موج تراکمی کند ( $V_{p2}$ )، سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و عکس ضریب کیفیت موج تراکمی سریع ( $Q_{p1}^{-1}$ ) و موج تراکمی کند ( $Q_{p2}^{-1}$ ) و موج برشی ( $Q_s^{-1}$ ) به دیگر خواص الاستیک، خواص مخزنی و خواص موج بدین‌صورت مرتبط می‌شوند:

$$V_{p1,2} = \frac{1}{\text{Re}(X_{1,2})}, \quad (1)$$

$$V_s = \frac{\sqrt{G}}{\text{Re}(\sqrt{\rho_x})}, \quad (2)$$

$$Q_{p1,2}^{-1} = \frac{2\text{Im}(X_{1,2})}{\text{Re}(X_{1,2})}, \quad (3)$$

$$Q_s^{-1} = \frac{2\text{Im}(\sqrt{\rho_x})}{\text{Re}(\sqrt{\rho_x})} \quad (4)$$

که مقادیر مفروض در این روابط عبارتند از:

$$X = \sqrt{\frac{-B}{2A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}}$$

$$A = \frac{\varphi F_{sq} M}{\rho_2^2}, \quad B = \frac{F_{sq} \left( 2\alpha - \varphi - \varphi \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \left( M + F_{sq} \frac{a^2}{\varphi} \right) \left( 1 + \frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega c}{\omega} \right)}{\rho_2}, \quad C = \frac{\rho_1}{\rho_2} + \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} + 1 \right) \left( \frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega c}{\omega} \right)$$

$$F_{sq} = FS_q, \quad S_q = 1 - \frac{2J_1(\gamma R)}{\gamma R J_0(\gamma R)}$$

$$R = R_0 \sqrt{S_1}, \quad S_q = S_{q0} S_1$$

$$\rho_x = (1 - \varphi) \rho_s + (1 - \theta) \varphi \rho_f, \quad \theta = \left( \frac{\rho_a + \varphi}{\varphi} + i \frac{\varphi \eta}{\omega \rho_f k} \right)$$

$$\rho_1 = (1 - \varphi) \rho_s, \quad \rho_2 = \varphi \rho_f$$

$$\omega_c = \frac{\varphi \eta}{k \rho_f}, \quad \alpha = 1 - \frac{k}{k_s}$$

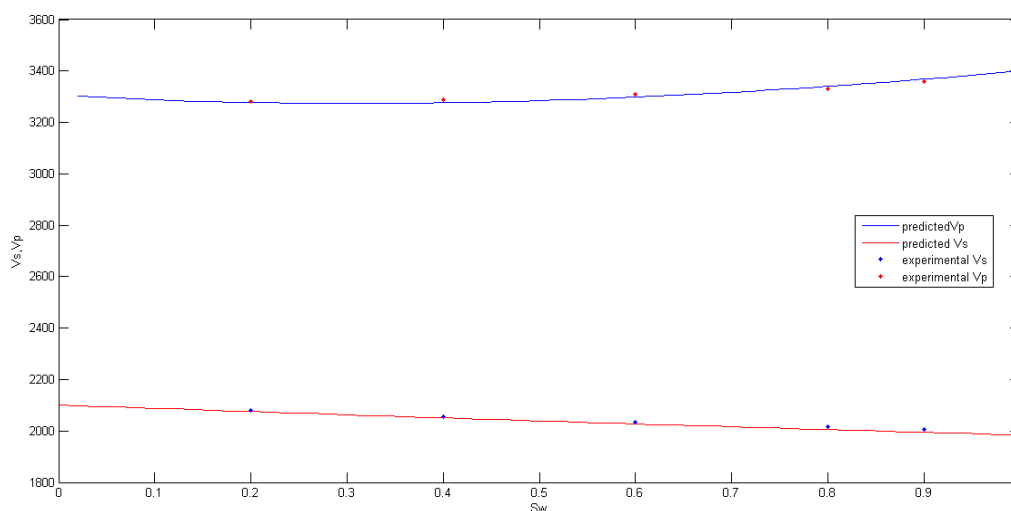
$$M = 2G \frac{1-v}{1+v}, \quad F = \left( \frac{1}{K_f} + \frac{a-\varphi}{\varphi K_s} \right)^{-1}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{F} \left( \frac{\varphi + \rho_a / \rho_f}{\varphi} + i \frac{\omega c}{\omega} \right)}$$

$$K_f = S_1 K_1 + (1 - S_1) K_g, \quad \rho_f = S_1 \rho_1 + (1 - S_1) \rho_g$$

که  $k$ ,  $k_s$ ,  $k_l$ ,  $k_g$  (مگاپاسکال) به ترتیب مدول‌های بالک فاز گاز، مایع، جامد و مدول بالک اسکلت خشک هستند.  $G$  مدول برشی اسکلت (مگاپاسکال) در شرایط خشک و  $p_a$ ,  $p_l$ ,  $p_g$ ,  $p_s$  ( $\text{Kg/m}^3$ ) نیز به ترتیب چگالی‌های جفت‌شدگی اضافی، گاز، مایع و جامد هستند. در اینجا  $v$  نسبت پواسون و  $\eta$ ،  $k$ ،  $R_0$ ،  $\phi$ ،  $S_1$  هم ویسکوسیته (Pa.s)، تراوایی (دارسی)، طول ویژه جریان فواره‌ای ( $m$ )، تخلخل و و اشباع اب هستند. در آخر باید گفت که  $\omega$ ،  $\omega_c$  نیز فرکانس زاویه‌ای و فرکانس زاویه‌ای ویژه Biot بر حسب هرتز هستند [۸].

به منظور بررسی کارایی این مدل از داده‌های آزمایشگاهی فنگ و یانگ (۲۰۱۵) [۵] برای مقایسه سرعت‌های پیش‌بینی شده با مدل و سرعت‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری استفاده شد که نتایج در شکل ۲ مؤثر بودن این مدل را تأیید می‌کند.



شکل ۲. مقایسه بین مقادیر سرعت پیش‌بینی شده با مدل BISQ و سرعت‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بر حسب درصد اشباع اب. خط قرمز: مدل پیش‌بینی شده  $V_s$ . خط آبی: مقادیر پیش‌بینی شده  $V_p$ . نقاط آبی: مقادیر به‌دست آمده  $V_p$  از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی. نقاط قرمز: مقادیر به‌دست آمده  $V_s$  از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی.

### مسئله بهینه‌سازی

اختلاف بین مقادیر سرعت مشاهده شده از داده و سرعت‌های پیش‌بینی شده با مدل در قالب مجموع نرم مرتبه دو چند بردار بدین‌صورت تعیین شده است که مقادیر خطا با داده‌های مشاهده‌ای به‌هم‌نگار شده‌اند:

$$F(p) = \sqrt{\sum \left( \left( \frac{V_p^* - V_p(P)}{V_p} \right)^2 + \left( \frac{V_s^* - V_s(P)}{V_s^*} \right)^2 + \left( \frac{\rho^* - \rho(P)}{\rho^*} \right)^2 \right)} \quad (5)$$

که در آن  $P = (\Phi, S_1, k)$  بردار پارامترهای وارون‌سازی است و  $V_P^* = (V_{p1}^*, V_{p2}^*, \dots, V_{pn}^*)$  و  $V_s^* = (V_{s1}^*, \dots, V_{sn}^*)$  و  $\rho^* = (\rho_1^*, \rho_2^*, \dots, \rho_n^*)$  به‌ترتیب بردار سرعت‌های مشاهده‌ای موج  $p$  و  $s$  و بردار چگالی هستند. و  $V_P = (V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn})$  و  $V_s = (V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sn})$  و  $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$  نیز به‌ترتیب بردارهای سرعت موج  $P$  و  $S$  و بردار چگالی پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل هستند. باید توجه داشت که تابع خطای فوق برای بهینه شدن مقادیر پارامترهای مدل در فرایند وارون‌سازی باید کمینه شود اما از آن‌جا که الگوریتم ژنتیک اصولاً یک فرایند بیشینه‌سازی است این تابع را بدین‌صورت تغییر شکل می‌دهیم که بین صفر و یک متغیر است و سعی در بیشینه‌سازی آن داریم:

$$G(P) = \frac{1}{1+F(p)} \quad (6)$$

### الگوریتم ژنتیک استفاده شده

در این‌جا از یک الگوریتم ژنتیک حقیقی<sup>۱</sup> به‌عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است که در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک دودویی<sup>۲</sup> یا الگوریتم‌های با دیگر انواع رمزگذاری هزینه رمزگذاری و رمزگشایی در هر محاسبه تابع برازش متحمل نمی‌شوند و هم‌چنین اثرات ناشی از گسسته‌سازی فضای مدل نیز در آن‌ها رخ نمی‌دهد از طرفی الگوریتم‌های حقیقی معمولاً دچار هم‌گرایی پیش از موعد می‌شوند که در این‌جا با استفاده از مفاهیم خود انطباقی<sup>۳</sup> در تعیین تابع برازش و اپراتورهای انتخاب و هم‌گذاری سعی در اجتناب از هم‌گرایی پیش از موعد شده است [۵]. که در ادامه بخش‌های مختلف الگوریتم توضیح داده می‌شوند.

#### ۱. مفهوم تابع برازش خودانطباقی

در ابتدای الگوریتم جمعیتی از مدل‌ها که به‌طور تصادفی در محدوده فضای مدل انتخاب شده‌اند برازششان محاسبه می‌شود سپس بردار مدل با بیش‌ترین برازش مشخص شده و فاصله نسبی هر بردار مدل ( کروموزوم) دیگر با آن بدین‌صورت محاسبه می‌شود:

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_1^{(i)} - x_2^{(i)}}{u^{(i)} - l^{(i)}} \right)^2} \quad (7)$$

که در آن  $X_1 = (X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, \dots, X_1^{(n)})$  و  $X_2 = (X_2^{(1)}, X_2^{(2)}, \dots, X_2^{(n)})$  دو عضو از جمعیت است و  $u$  و  $l$  نیز بردار کران‌های بالا و پایین هستند. با توجه به مقدار فاصله نسبی یک تابع جریمه تعریف می‌شود که برای هر کروموزوم در برازش آن ضرب می‌شود:

1. Real coded Genetic algorithm  
2. Binary Genetic Algorithm (BGA)  
3. Self adaptive

$$g(d) = \frac{1}{1 + \exp(-a(d-c))} \quad (۸)$$

که  $a$  و  $c$  دو پارامتر قابل تنظیم هستند و  $c$  مربوط به بیشترین فاصله ممکن در فضای مدل است و معمولاً  $d_{max}$   $c=0.5$  در نظر گرفته می‌شود. برای این بررسی  $a=5$  و  $c=0.5$  در نظر گرفته شده است. استفاده از یک معیار فاصله به تنوع جمعیت کمک کرده و از جمع شدن مدل‌ها در یک گوشه از فضای مدل جلوگیری می‌کند. سپس اپراتور انتخاب باید مدل‌های والد را بر اساس برازششان از استخر جفت‌گیری انتخاب کند تا با ترکیب آن‌ها مدل‌های فرزند ایجاد شود. البته زیرا وقتی یک مدل برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد جمعیت سعی در هم‌گرایی سریع به سمت آن دارد، شرطی مبنی بر این که بیش از 0.1 کل جمعیت نتواند مدل یک‌سانی بگیرد نیز اعمال شده است.

### ۲. اپراتور هم‌گذری<sup>۱</sup>

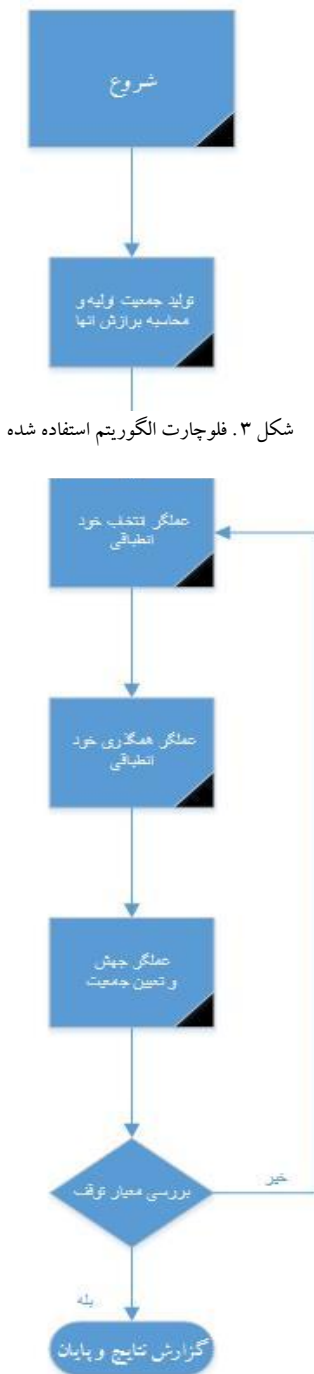
این اپراتور وظیفه ترکیب مدل‌های انتخاب شده به منظور ایجاد مدل‌های جدید را بر عهده دارد. در اینجا از اپراتور  $BLX-\alpha-\beta$  [۴] که مخصوص الگوریتم‌های ژنتیک پیوسته است استفاده شده است. به این صورت که فاصله دو مدل انتخاب شده محاسبه می‌شود و سپس از بین دو مدل یک مدل که کمترین پارامترها را داراست و یک مدل که بیشترین پارامترها را داراست انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد فضای ایجاد مدل جدید از طریق اضافه کردن حاصل ضرب نرخ گسترش ( $\alpha$ ) در اختلاف کران بالا و پایین به مدل شامل بیشترین پارامترها و کم کردن همان مقدار از مدل شامل کمترین پارامترها افزایش می‌آید و یک مدل تصادفی در این بازه انتخاب می‌شود.  $t$  و  $s$  فضای جستجوی نسبی  $(2\theta + \gamma)$  را تعیین می‌کنند و برای مقادیر  $t=1$  و  $s=0.25$  فضای جستجوی نسبی هم به اندازه کافی بزرگ است که از گیر افتادن در نقاط بهینه محلی جلوگیری کند و به میزانی هم بزرگ نیست که

الگوریتم کاملاً تصادفی شود. که بیان ریاضیاتی عبارات بدین صورت است:

$$\begin{aligned} a^{(i)} &= |x_1^{(i)} - x_2^{(i)}| \\ b^{(i)} &= u^{(i)} - l^{(i)} \\ \gamma^{(i)} &= a^{(i)} / b^{(i)} \\ \theta^{(i)} &= \frac{1 - (\gamma^{(i)})^s}{2 + (\gamma^{(i)})^t} \end{aligned}$$

$$\alpha^{(i)} = \theta^{(i)} / \gamma^{(i)} \quad [x_{min}^{(i)} - \alpha^{(i)}b^{(i)}, x_{max}^{(i)} + \alpha^{(i)}b^{(i)}] \quad (۹)$$

هم‌چنین در این مرحله نرخ هم‌گذری خود انطباقی از حاصل ضرب نرخ هم‌گذری ثابت در فاصله نسبی فرزند تازه متولد شده تا بهترین مدل جمعیت به دست می‌آید و سپس یک عدد تصادفی از توزیعی یک‌نواخت تولید شده و با نرخ هم‌گذری خود انطباقی



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم استفاده شده

مقایسه می‌شود، اگر نرخ هم‌گذری خودانطباقی بزرگ‌تر باشد مدل جدید پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت مدل رد می‌شود. پس با استفاده از این اپراتور هم‌گذری هم‌تنوع در جمعیت حفظ شده و هم فضای جست‌جو گسترش پیدا می‌کند.

### ۳. اپراتور جهش

وظیفه اصلی اپراتور جهش حفظ تنوع در جمعیت به منظور جلوگیری از هم‌گرایی پیش از موعد جمعیت است و امکان جست‌جو در اطراف مدل‌ها را فراهم می‌کند. در این‌جا از جهش یک‌نواخت استفاده شده است که در آن پس از انتخاب مدل، پارامترهای مدل حول مقادیر فعلی بطور تصادفی تغییر می‌کنند. می‌توان فضای مدل برای این تغییر را با استفاده از ضریبی در اختلاف کران بالا و پایین فضای مدل در نظر گرفت.

وقتی مطابق با نرخ هم‌گذری و نرخ جهش تعداد مورد نظری از مدل‌ها ایجاد شد، همه مدل‌های نسل قبل و مدل‌های تازه تولید شده بر اساس برازششان مرتب شده و به اندازه جمعیت از آن‌ها در استخراج جفت‌گیری برای نسل بعد باقی می‌ماند. در مرحله آخر بررسی می‌شود که آیا شرط توقف الگوریتم پذیرفته می‌شود یا خیر که این شرط را می‌توان بر مبنای مقدار برازش بین داده مشاهده‌ای و داده مصنوعی، تعداد نسل‌های بدون افزایش برازش، تعداد نسل‌ها یا ترکیبی از این شرط‌ها قرار داد. در این مقاله ترکیبی از موارد توقف ذکر شده استفاده شده است. فلوچارت این روش مطابق شکل ۳ است. این الگوریتم در نرم افزار برنامه‌نویسی MATLAB کد نویسی شد و بر داده‌های مورد نظر اعمال شد.

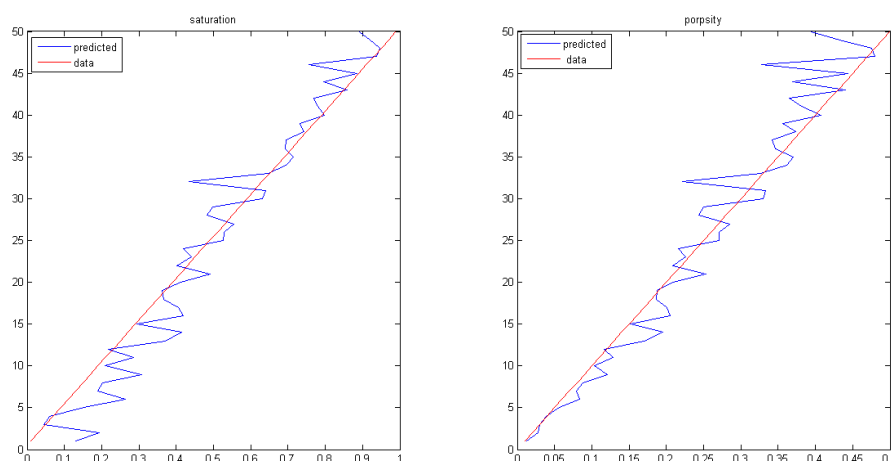
## نتایج

### ۱. بررسی داده مصنوعی

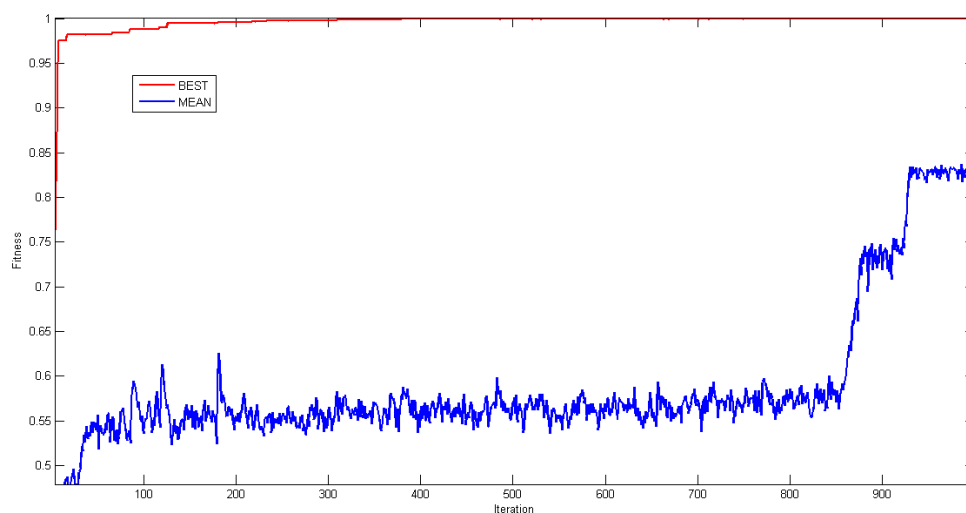
توسط مدل BISQ و با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۱ یک مدل سرعت برای موج  $p$  و  $s$  و چگالی به دست آمد. در این مدل سایر پارامترها ثابت بوده و تخلخل از ۱٪ تا ۵۰٪ و هم‌چنین درصد اشباع آب نیز به‌طور هم‌زمان با تخلخل از ۱٪ تا ۹۹٪ تغییر می‌کند و تراوایی مقدار ثابت 5 md اختیار شد تا مدل به‌عنوان تابعی از تخلخل و درصد اشباع سیال در نظر گرفته شود. سپس خروجی‌های این مدل یعنی سرعت امواج  $p$  و  $s$  و چگالی به‌عنوان ورودی الگوریتم معرفی شده اتخاذ شده‌اند و سعی در تخمین مقادیر تخلخل و درصد اشباع بوده است، که نتایج حاصل و مقایسه آن‌ها با مقادیر واقعی در شکل ۴ توسط الگوریتم معرفی شده آورده شده است و در شکل ۵ نمودار هم‌گرایی الگوریتم برحسب تکرار رسم شده است که تابع برازش تقریباً به عدد ۱ رسیده است. کران پایین برای سایر مجهولات صفر و کران بالا برای درصد اشباع سیال یک و برای تخلخل ۰/۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است سایر پارامترهای دیگر مطابق جدول ۱ به اپراتور مدل‌سازی پیش‌رو معرفی شده‌اند. حداکثر تعداد نسل‌ها در این‌جا ۱۰۰۰ نسل و جمعیت موجود در هر نسل ۵۰۰ مدل در نظر گرفته شد. چنان‌که در شکل مشخص است روند پیش‌بینی مقادیر تخلخل و درصد اشباع آب با روند مفروض آن‌ها در مدل هم‌خوانی دارد و با افزایش تعداد نسل‌ها می‌توان به دقت‌های بیش‌تری نیز دست یافت که البته زمان محاسبات را نیز افزایش می‌دهد.

جدول ۱ داده‌های مربوط به مدل مصنوعی

$\rho_l = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k = 9.32 \text{ (Gpa)}$
$\rho_g = 150 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_s = 40 \text{ (Gpa)}$
$\rho_s = 2550 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$G = 8.3 \text{ (Gpa)}$
$\rho_a = 420 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\nu = 0.16$
$k_l = 2.25 \text{ (Gpa)}$	$\eta = 0.001 \text{ (pa.s)}$
$k_g = 0.11 \text{ (Mpa)}$	$f = 100 \text{ (Hz)}$
$R = 0.002 \text{ (m)}$	$k = 5 \text{ (md)}$



شکل ۴. مقایسه پارامترهای مدل BISQ دخیل در وارون‌سازی. در شکل سمت راست خط قرمز مقادیر تخلخل استفاده شده در ایجاد مدل مصنوعی و خط آبی مقادیر تخلخل حاصل از وارون‌سازی. در شکل سمت چپ خط قرمز مقادیر درصد اشباع آب استفاده شده در ایجاد مدل مصنوعی و خط آبی مقادیر درصد اشباع آب حاصل از وارون‌سازی



شکل ۵. نمودار هم‌گرایی بهینه‌سازی تابع هدف مربوط به شکل ۴ با استفاده از الگوریتم ژنتیک معرفی شده. نمودار آبی رنگ مربوط به میانگین برآزش کل مدل‌ها و نمودار قرمز رنگ مربوط به برآزش بهترین مدل در هر نسل است

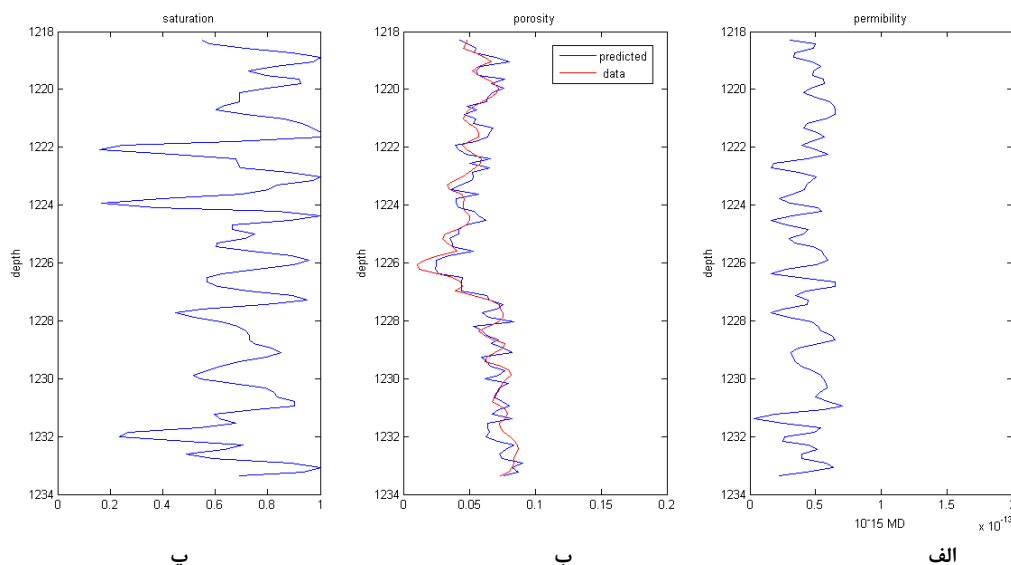
## ۲. بررسی داده واقعی

در این‌جا از نمودارهای چاه‌نگاری  $V_p$ ،  $V_s$  و چگالی به‌عنوان ورودی الگوریتم استفاده شده است و سایر پارامترهای دخیل در اپراتور مدل‌سازی پیش‌رو BISQ از داده‌های آزمایشگاهی مطابق با جدول ۲ تعیین شده‌اند البته لازم به ذکر است که در این‌جا پارامترهایی مانند مدول بالک، نسبت پواسون و مدول برشی نیز با توجه به مقادیر ورودی الگوریتم محاسبه می‌شوند. کران‌ها مطابق نمونه قبل است. پس از تعیین پارامترهای مدل که شامل تخلخل، تراوایی و درصد اشباع آب هستند نتایج بعد از عبور از یک فیلتر میان‌گذر در شکل ۶ نمایش داده شده است و هم‌چنین مقدار پیش‌بینی شده تخلخل با مقدار تخلخل حاصل از نگار چگالی به‌عنوان مرجع مقایسه شده است که تطبیق مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده با الگوریتم و مقادیر حاصل از چاه‌نگاری

مشاهده می‌شود. برای این مدل تعداد مجهولات ۳۰۰ و حداکثر تعداد نسل‌ها ۳۰۰۰ نسل و جمعیت موجود در هر نسل ۲۰۰۰ مدل در نظر گرفته شد.

**جدول ۲. داده‌های مربوط به مدل واقعی**

$\rho_1 = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$R = 0.002 \text{ (m)}$
$\rho_g = 150 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_s = ۳۸ \text{ (Gpa)}$
$\rho_s = 2۶50 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$f = 100 \text{ (Hz)}$
$\rho_a = 420 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_g = 0.11 \text{ (Mpa)}$
$k_1 = 2.۱۹ \text{ (Gpa)}$	$\eta = 0.001 \text{ (pa.s)}$



شکل ۶. الف) نتایج وارون‌سازی پارامترهای تراوایی، ب) تخلخل، پ) اشباع آب. در پنل مربوط به تخلخل چون مقادیر تخلخل از لاگ دانسیته نیز به دست آمده است با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه شده است که هم‌خوانی خوبی نشان می‌دهند

**نتیجه‌گیری**

اگرچه دقت مدل پتروفیزیکی استفاده شده در فرایند وارون‌سازی خواص مخزنی در پیش‌بینی دقیق این پارامترها اثر غیر قابل انکاری دارد اما به دلیل پیچیدگی و وابستگی غیرخطی تابع هدف به پارامترهای مدل در چنین مدل‌هایی، روش وارون‌سازی به کار گرفته شده باید قادر باشد به جواب بهینه تابع هدف دست یابد. در روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند الگوریتم ژنتیک این مهم مستلزم حفظ تنوع جمعیت در حین جستجو و پیش‌گیری از هم‌گرایی پیش از موعد این الگوریتم است. در این تحقیق با روش‌های توضیح داده شده سعی در تنوع بخشیدن به جمعیت در عین هم‌گرایی به سمت هدف بوده است. این‌گونه فرایندها در هر نسل یک جواب برای مسئله دارند و با افزایش تعداد نسل‌ها جواب الگوریتم به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌شود که البته افزایش زمان محاسبات را نیز در بر دارد. نکته حائز اهمیت دیگر تعریف تابع هدف است که در این‌جا از جمع اختلاف‌برداری سه کمیت سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و چگالی در داده با مقادیر محاسبه شده از مدل بوده است. در واقع طی یک فرایند سه تابع بهینه می‌شوند که نوعی بهینه‌سازی چند هدفه است و می‌توان به هر یک از این توابع نیز وزن متفاوتی اعمال کرد. از آن‌جا

که این کمیت‌ها از داده‌های لرزه‌ای قبل از بر انبارش نیز قابل استحصال هستند می‌توان این الگوریتم را بر چنین داده‌ای اعمال کرد و توزیع دو و سه‌بعدی کمیت‌های پتروفیزیکی مخزن را به‌دست آورد.

### منابع

1. Bachrach R., "Joint estimation of porosity and saturation using stochastic rock-physics modeling: Geophysics", 71, no. 5, O (2006) 53-O63.
2. Dvorkin J., A. Nur, "Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms: Geophysics", 58 (1993) 524-533.
3. Dvorkin J., R. C. Nolen-Hoeksema, and A. Nur, "The squirt-flow mechanism: Macroscopic description": Geophysics, 59 (1994) 428-438.
4. Eshelman L. J., Schaffer J. D., "Real-coded genetic algorithms and interval: Schemata, Foundations of Genetic Algorithms", Morgan Kaufmann Publishers Inc. (1993) 187-202.
5. Fang Z., Yang D., "Inversion of reservoir porosity, saturation, and permeability based on a robust hybrid genetic algorithm", Geophysics, VOL. 80, NO.5 (2015) R265-R280.
6. McCormack M. D., Stoisits R. F., MacAllister D. J., Crawford K. D., "Applications of genetic algorithms in exploration and production", The Leading Edge, 18 (1999) 716-718.
7. Nie J. X., Yang D. H., Yang H. Z., "Inversion of reservoir parameters based on the BISQ model in partially saturated porous medium", Chinese Journal of Geophysics, 47 (2004a) 1241-1246.
8. Nie J. X., Ba J., Yang D. H., Yan X. F., Yuan Z. Y., Qiao H. P., "BISQ model based on a Kelvin-Voigt viscoelastic frame in a partially saturated porous medium", Applied Geophysics, 9 (2012) 213-222.
9. Sen M. K., Stoffa P. L., "Global optimization methods in geophysical inversion", (Second edition), Cambridge University Press (2013).