نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۰، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۶۳ تا ۷۷
Vol.11, No. 30, 2016, pp.63-77

بهینه‌سازی تخمین پارامترهای رابطه آرچی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در یک مخزن کربناته در جنوب غرب ایران

سمیه طبسی [۱]؛ ابوالقاسم کامکار روحانی [۲*]؛ مجتبی محمدو خراسانی [۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود somayehtabasi@yahoo.com
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود kamkarr@yahoo.com
۳- مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران khorasani.geo@gmail.com

(دریافت ۱۹ مرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۴ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

اساسی‌ترین رابطه محاسبه اشباع از آب در مخازن هیدروکربوری رابطه آرچی است. این رابطه سه پارامتر سیمان‌شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a) دارد که پارامترهای آرچی نامیده می‌شوند. تغییر اندک در هر یک از این ضرایب باعث تغییرات قابل توجه در محاسبه اشباع از آب و در نتیجه حجم هیدروکربور مخزن می‌شود. در این مقاله روش الگوریتم ژنتیک برای محاسبه پارامترهای رابطه آرچی در یک چاه اکتشافی در یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته جنوب غرب ایران به کار گرفته شده است. نتایج اجرای این روش مقادیر ۲/۳۵۴، ۲/۲۵۷ و ۰/۹۰۲ را به ترتیب برای سه پارامتر سیمان‌شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a)، نشان می‌دهد. مقدار خطای الگوریتم ژنتیک در فرآیند محاسبه این مقادیر برابر ۰/۱۶۴۱ است. مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده با استفاده از این روش با مقادیر اشباع‌شدگی واقعی، ضریب همبستگی ٪ ۶۲ را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی

اشباع‌شدگی، هیدروکربور، ضرایب آرچی، الگوریتم ژنتیک، مخزن کربناته

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

پارامتری که مقدار هیدروکربور موجود در مخزن را مشخص می‌کند، اشباع‌شدگی[1] است. اشباع‌شدگی از هیدروکربور، عبارت است از نسبت حجمی فضاهای خالی موجود در مخزن که توسط هیدروکربور پر شده است:

$$S_h = \frac{V_h}{V_v} \times 100 \quad (۱)$$

که در آن، V_h حجم هیدروکربور، V_v حجم فضای خالی و S_h اشباع‌شدگی از هیدروکربور است.

برای تعیین اشباع‌شدگی از آب به‌طور عمده دو روش وجود دارد: ۱- اندازه‌گیری از طریق مغزه‌ها ۲- محاسبه با استفاده از لاگ‌ها و روابط تجربی[۱]. رایج‌ترین رابطه محاسبه اشباع‌شدگی از آب در مخازن هیدروکربوری با استفاده از مقاومت ویژه الکتریکی سازند، تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی آب سازند، رابطه آرچی (رابطه ۲) است که در سال ۱۹۴۲ توسط آرچی معرفی شد[۲].

$$S_w = \left(\frac{aR_w}{R_t \varphi^m}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (۲)$$

سه پارامتر سیمان‌شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a)، ضرایب یا پارامترهای آرچی نامیده می‌شوند. رابطه آرچی حساسیت زیادی نسبت به تغییرات این پارامترها دارد به‌طوری که تغییر اندکی در هر یک از این ضرایب موجب ایجاد خطای قابل ملاحظه در محاسبه اشباع‌شدگی از آب می‌شود[۳].

تنها راه مطمئن برای اندازه‌گیری پارامترهای آرچی، از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. اگرچه تا به امروز روش‌های زیادی برای تخمین این پارامترها ارائه شده است اما روش دقیق و قابل اعتمادی برای تعیین این پارامترها در همه شرایط وجود ندارد. استفاده از روابط تجربی یکی از قدیمی‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های محاسبه پارامترهای آرچی است که هنوز هم در برخی موارد استفاده می‌شود. اما چون این روابط مربوط به مخزن خاصی که اندازه‌گیری‌ها در آن انجام گرفته است می‌باشند، پاسخ حاصل در شرایط سایر مخازن با ابهامات زیادی همراه است[۵-۳].

بیشتر مطالعات و تحقیقاتی که در زمینه تعیین ضرایب آرچی انجام شده است، بر تأثیر پارامترهای مختلف مانند بافت و ساختار سنگ، فشار طبقات فوقانی، حضور کانی‌های رسی و غیره تمرکز دارند. تغییرات رفتار پارامترهای آرچی به عوامل زیادی بستگی داشته و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. در واقع رفتار هر یک از ضرایب و روابط میان آن‌ها یک مسئله پیچیده و مبهم است.

به دلیل حساسیت رابطه آرچی به تغییرات هر کدام از پارامترها و با توجه به گسترش روز افزون روش‌های هوشمند، لازم است که کاربرد و توانایی این روش‌های نوین را در تعیین ضرایب آرچی ارزیابی کرد و نتایج این روش، با نتایج آزمایشگاهی موجود و روش‌های متداول دیگر مقایسه شود.

در مسائل مهندسی، بهینه‌سازی عبارت است از اکسترمم سازی یک تابع هدف به وسیله یک الگوریتم خاص که تحت قیود محدودکننده‌ی جواب‌های مسئله مورد بررسی، انجام می‌گیرد. در اکتشافات هیدروکربوری به‌دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، تأثیر پارامترهای مختلف پتروفیزیکی و عدم قطعیت آن‌ها از یک سو و محدودیت‌های اقتصادی و زمانی از سوی دیگر، استفاده از روش‌های محاسباتی و عددی هوشمند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای حل مسائل توصیه می‌شود.

الگوریتم ژنتیک[2] که یکی از زیر شاخه‌های الگوریتم‌های تکاملی است، روش بهینه‌سازی است که بر پایه تکامل بیولوژیک و انتخاب بهترین‌ها در طبیعت، به حل مسائل ساده تا پیچیده می‌پردازد[۶]. این الگوریتم، با مجموعه‌هایی از جواب‌های تصادفی (کروموزوم‌ها) که به آن‌ها جمعیت تصادفی گفته می‌شود، آغاز می‌شود. از این جواب‌ها برای ساخت جمعیت جدید بعدی استفاده می‌شود، به امید آن که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت‌های قبل باشند. این فرآیند آن قدر تکرار می‌شود تا شرایط خاتمه برای دست‌یابی به بهترین راه حل، محقق شود[۷].

الگوریتم ژنتیک از روش‌های نوین، در علوم مهندسی است که در صنعت نفت موارد کاربرد فراوانی دارد. انتخاب طرح و الگوی اکتشاف می‌تواند در شرایط زمانی و مکانی متفاوت و با توجه به وضعیت و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، اقلیمی و فرهنگی، شرایط عملیاتی و نیز اهداف اکتشافی نظیر اهداف ساختمانی و یا چینه‌ای، و در نهایت نوع مطالعات نظیر مطالعات اولیه، تکمیلی و مخزنی متفاوت باشد. بهینه‌سازی طراحی عملیات اکتشافی با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجب ثبت داده‌هایی با کیفیت مناسب و کمترین هزینه می‌شود[۸]. در توسعه میادین نفتی، تصمیم‌گیری در مور تعداد چاه‌های اکتشافی و موقعیت آن‌ها با چالش‌هایی همراه است. با استفاده از روش ژنتیک الگوریتم، می‌توان این پارامترها را طوری تعیین کرد که بیشترین مقدار نفت و یا بیشترین مقدار سود اقتصادی از مخزن حاصل شود[۹، ۱۰].

بهینه‌سازی تولید و رفع اشکال در نقاط حساس سیستم تولیدی مخازن هیدروکربوری با استفاده از ژنتیک الگوریتم بهترین راه حل به منظور مدل‌سازی میزان تولید و حفظ سقف تولید مخزن و پرهیز از سرمایه‌گذاری‌های عظیم جهت انجام عملیات اکتشاف و حفر چاه‌های جدید است[۱۱].

ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی مخزن نظیر تخلخل، نفوذپذیری، اشباع سیالات و تغییرات لیتولوژیکی نقش مهمی در شناخت ویژگی‌های مخزن دارد. چون هزینه‌های حفاری چاه بسیار بالاست و تعداد چاه‌ها در محدوده مخزن محدود هستند، تخمین این پارامترها در مناطق دور از چاه با استفاده از ژنتیک الگوریتم اهمیت بسیاری در مدیریت، تولید، توسعه و تخمین مخازن هیدروکربوری دارد[۱۲].

فاکتورهای زیادی بر تغییرات رفتار سیال در محیط متخلخل مخزن هیدروکربوری تأثیر می‌گذارند. به دلیل مبهم بودن مسیر جریان سیال در مخزن، استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل مخزن نتایج مطلوبی ارائه داده است[۱۳].

هدف از وارون‌سازی لرزه‌ای، تخمین توزیع سرعت لایه‌های زیرسطحی برای بررسی بهتر مخزن از نظر سنگ‌شناسی، تخلخل و ماهیت سیال مخزنی است. مانسان و شونر (۲۰۰۲) از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب پارامترهای مناسب در معکوس‌سازی انعکاسات لرزه‌ای، برای تعیین توزیع سرعت لایه-های زیر سطحی استفاده کردند[۱۴].

در مسائل معکوس‌سازی داده‌های میدان پتانسیل، با افزایش تعداد داده‌ها و پارامترهای مدل، مشکلات زیادی در رابطه با وارون‌سازی ماتریس‌ها و پایداری مدل نهایی به‌وجود می‌آید. انتخاب صحیح پارامترهای مدل، مهم‌ترین مسئله در معکوس‌سازی داده‌های میدان پتانسیل است. استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای انتخاب پارامترهای بهینه در معکوس‌سازی داده‌های میدان پتانسیل، موجب دستیابی به یک مدل پایدار می‌شود[۱۵].

حیدری و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامتر سیمان‌شدگی (m) با استفاده از فاکتور مقاومت ویژه سازند و تخلخل در یک مخزن کربناته، استفاده کردند[۱۶]. برای تعیین فاکتور مقاومت ویژه سازند، نمونه، با محلول‌هایی با شوری‌های مختلف اشباع می‌شود و هر بار مقدار مقاومت ویژه آب شور (R_w) و مقاومت ویژه نمونه (R_o) اندازه‌گیری می‌شود. با رسم R_w در مقابل R_o، خطی به‌دست می‌آید که شیب آن نشانگر فاکتور سازندی است. چنین عملیات آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی در مقایسه با استفاده از داده‌های لاگ‌های چاه‌پیمایی است. از طرفی دیگر تعیین پارامترهای رابطه آرچی باید به‌صورت همزمان انجام می‌شود و از لحاظ ساختاری و فیزیکی تعیین جداگانه این فاکتورها صحیح نیست و باعث ایجاد خطا در محاسبه اشباع‌شدگی از آب می‌شود.

عباسی گودرزی و همکاران (۲۰۱۲)، از روش الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامترهای رابطه آرچی در دو مخزن هیدروکربوری، با استفاده از تعداد بسیار محدودی داده، استفاده کردند[۱۷]. در دو مخزن مورد مطالعه توسط عباسی گودرزی و همکاران، مقادیر پارامترهای آرچی محاسبه شده با استفاده از روش ژنتیک الگوریتم با مقادیر حاصل از روش‌های متداول اندازه‌گیری پارامترهای آرچی اختلاف زیادی دارند. علاوه بر این، جنبه‌های زمین‌شناسی و لیتولوژیکی تغییرات پارامترهای آرچی و جنس سنگ مخزن در نظر گرفته نشده است. در حالی که در مطالعات اکتشافی مخازن هیدروکربوری، پرداختن به مسائل زمین‌شناسی و چگونگی تغییر پارامترهای مخزن با تغییرات زمین‌شناسی و لیتولوژیکی مخزن یک اصل مهم است.

چون اغلب مخازن هیدروکربوری ایران از جنس کربناته می-باشند به نظر می‌رسد که بررسی عملکرد قانون آرچی در محاسبه اشباع‌شدگی از آب در مخازن کربناته امری ضروری است. در این مقاله روش الگوریتم ژنتیک برای محاسبه پارامترهای آرچی در یک مخزن کربناته در جنوب غربی ایران استفاده شده است. داده‌های ورودی به مسئله، مقادیر اشباع-شدگی آب، مقاومت ویژه سازند، مقاومت ویژه آب سازند و تخلخل حاصل از لاگ‌های محاسباتی و برداشت شده می‌باشند.

۲- توصیف پارامترهای آرچی

۲-۱- پارامتر سیمان‌شدگی (m)

پارامتر سیمان‌شدگی، پارامتر پیچیده‌ای است که به شکل هندسی خلل و فرج بستگی دارد. عواملی چون مقدار تخلخل کل و ثانویه، هندسه فضای متخلخل و چگونگی توزیع تخلخل و حضور رس می‌توانند در تعیین این پارامتر تأثیرگذار باشند[۱۸]. در مطالعات آزمایشگاهی، از طریق تهیه نمونه‌های مغزه در طول سازند با مقادیر تخلخل متفاوت و به‌طور کامل اشباع از آب، با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازندی (F) در برابر تخلخل ($\log F - \log \phi$)، مقدار m از شیب خط حاصل، مطابق رابطه (۳) به‌دست می‌آید[۱۹].

$$\log F = \log a - m \log \phi \qquad (۳)$$

جدول ۱ فهرستی از روابط تجربی که برای توصیف پارامتر سیمان‌شدگی در کربنات‌ها معرفی شده‌اند را، ارائه می‌دهد. مقدار پارامتر سیمان‌شدگی به میزان استحکام و تراکم ماسه‌سنگ بستگی دارد. آرچی، مقدار این پارامتر را برابر ۱/۳ برای ماسه سنگ‌های سست و بدون شیل و برای ماسه سنگ‌های متراکم برابر ۱/۸ تا ۲ قرار داد[۲]. در کربنات‌ها، محدوده تغییرات مقدار پارامتر m به نوع تخلخل و رخساره سنگی بستگی دارد. در یک مطالعه توسط فوک و مان

با فرض این که در نمونه‌های مغزه، مواد جامد دارای رسانایی الکتریکی وجود نداشته باشد پارامتر a برابر ۱ قرار گرفت و دامنه m بین ۲ تا بیش از ۵/۵ به‌دست آمد[۲۰]. دوبویز و همکاران برای سنگ‌های آهکی اُالیتی مقدار m را برابر ۱/۳۶ پیش‌بینی کردند[۲۱].

جدول ۱: روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف برای توصیف پارامتر سیمان‌شدگی در کربنات‌ها

منبع	رابطه	کاربرد
[۲۲]	$m = 0.019\phi^{-1} + 1.87$	کربنات‌های با تخلخل کم
[۲۳]	$m = 2.02 - \frac{0.035}{\phi + 0.042}$	
[۲۴]	$m = 2.29 - 0.44\phi_{int}$ $m = e^{\phi_{moldic}} + 0.7$	سنگ‌های کربناته با تخلخل بین ذره‌ای (ϕ_{int}) و تخلخل قالبی (ϕ_{moldic})
[۵]	$m = \frac{\log[\phi_s^3 + \phi_s^2(1-\phi_t) + (\phi_t - \phi_s)}{\log(\phi_t)}$	سنگ‌های کربناته شکسته
[۴]	$m = \frac{(2\log\phi_s)}{(\log\phi_t)}$	کربنات‌های با تخلخل حفره‌ای (ϕ_s تخلخل صوتی و ϕ_t تخلخل کل)
[۳]	$m = 2.14(\frac{\phi_{sv}}{\phi_t}) + 1.76$	سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای (ϕ_{sv} تخلخل ثانویه و ϕ_t تخلخل کل)

۲-۲- توان اشباع (n)

توان اشباع، میزان تقابل و واکنش بین سیال و سطح جامد داخل فضای متخلخل سنگ را اندازه‌گیری می‌کند[۲۵]. به همین دلیل عواملی نظیر قابلیت ترشوندگی[۳] یا توزیع سیال، حضور رس و جذب آب در مسیر منافذ توسط آن، کشش سطحی بین آب و نفت و فشار و دما بر تغییرات توان اشباع تأثیر دارند [۲۹-۲۶].

در آزمایشگاه، توان اشباع n روی یک نمونه تمیز و خشک به کمک اندازه‌گیری اشباع‌شدگی از آب (S_w) و اندیس مقاومت ویژه الکتریکی (I_R) و رسم آن روی یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی بر اساس رابطه ۴ به‌دست می‌آید.

$$\log I_R = \log 1 - n\log S_w \Rightarrow \log I_R = -n\log S_w \quad (۴)$$

مقدار پارامتر n به سیالی (آب یا نفت) که سطح دانه‌ها را پوشانده است بستگی دارد. در نمونه آب‌تر، مقدار n به مراتب کمتر از نمونه نفت‌تر است. بنابراین تعیین شرایط مخزن، برای اندازه‌گیری مقدار واقعی n در آزمایشگاه الزامی است[۱۸].

مطالعات نشان می‌دهد که محدوده تغییرات توان اشباع بین ۱ تا ۳ است. به‌طوری که برای اشباع‌شدگی از آب کم ($S_w < 30\%$)، مقدار n بین ۲/۵-۱/۵ و برای اشباع‌شدگی از آب بالا ($S_w > 30\%$)، مقدار ۴-۲/۵ در نظر گرفته شده است[۳۰].

۲-۳- پارامتر پیچاپیچی (a)

تأثیر هندسه و پیچاپیچی منافذ بر روی مقاومت ویژه سنگ توسط این پارامتر مشخص می‌شود. فاکتور پیچاپیچی، مقدار مستقل و ثابتی ندارد و با پارامترهای زیادی از قبیل تخلخل، هندسه اتصالات منافذ، میزان دانه‌بندی نرم و ریز، میزان فشردگی و فاکتور سازندی تغییر می‌کند[۳۱].

آرچی مقدار پارامتر پیچاپیچی را در ماسه‌سنگ‌های تمیز فاقد شیل، برابر ۰/۶۲ در نظر گرفت[۲]. برای سنگ آهک‌های اُالیتی مقدار فاکتور پیچاپیچی توسط دوبیز و همکاران برابر ۹/۵ محاسبه شد[۲۱].

۳- روش‌های تعیین پارامترهای آرچی

روش‌های مختلفی که برای اندازه‌گیری و تعیین پارامترهای آرچی به کار می‌روند عبارتند از روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های محاسباتی.

در روش‌های آزمایشگاهی، با انجام آنالیز بر روی نمونه‌های مغزه، مقادیر پارامترها با صرف هزینه و زمان زیاد اندازه‌گیری

می‌شوند. اما، مغزه‌گیری کامل از چاه همیشه امکان‌پذیر نیست و حجم مغزه برای انجام آزمایشات مختلف کافی نیست. اطلاعات حاصل از خرده‌های حفاری به‌دلیل خرد شدن زیاد سنگ‌ها توسط مته حفاری و ریزش دیواره‌های چاه و مخلوط شدن سازندها با یکدیگر، زیاد قابل اعتماد نیستند. چون مغزه‌ها از محیط با فشار و دمای زیاد مخزن به محیط آزمایشگاهی منتقل می‌شوند، پارامترهای اندازه‌گیری شده از مغزه‌های حفاری با مقادیر برجای این پارامترها اختلاف دارند[۳۲].

در روش‌های محاسباتی، اغلب از روش‌های آماری استفاده می‌شود. در این روش‌ها، با رسم منحنی‌های همبستگی پارامترهای مختلف، مقادیر پارامترهای آرچی محاسبه می‌شوند. نتایج داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از نمونه‌های مغزه روی نمودارهای لگاریتمی-لگاریتمی رسم می‌شوند. با برازش فاکتور سازندی (F) در مقابل تخلخل (φ)، با توجه به رابطه ۳ مقدار ضریب سیمان‌شدگی (m) و برازش داده‌های اندیس مقاومت ویژه (I_R) در مقابل اشباع‌شدگی از آب (S_w)، با توجه به رابطه ۴، مقدار توان اشباع (n)، به‌دست می‌آید. در این روش‌ها، تعیین مقادیر دو پارامتر m و n، به‌صورت جداگانه صورت می‌گیرد در حالی که از لحاظ ساختاری و فیزیکی و چون این پارامترها به‌صورت پیچیده‌ای به هم وابسته‌اند، این جدایش صحیح نیست و باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود[۳۳ و ۳۴].

۴- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش ارزشمند برای حل مسائل بهینه‌سازی، براساس سیر تکامل تدریجی بیولوژیکی است. در این روش که در سال ۱۹۷۰ توسط John Holland [۶] معرفی شد، جمعیتی از افراد، برای رسیدن به جواب بهینه در تکرارهای مختلف تصحیح می‌شوند. هر فرد، آرایه‌ای از متغیرهای مسئله بوده و تابعی از این متغیرها به‌عنوان تابع هدف برای مینیمم شدن، تعریف می‌شود. جمعیت اولیه با یک تابع تصادفی تولید می‌شود و توابع دیگری، فرزندان نسل‌های بعدی را تولید می‌کنند. به‌طور کلی سه روش عمده برای تولید فرزندان نسل‌های بعدی وجود دارد:

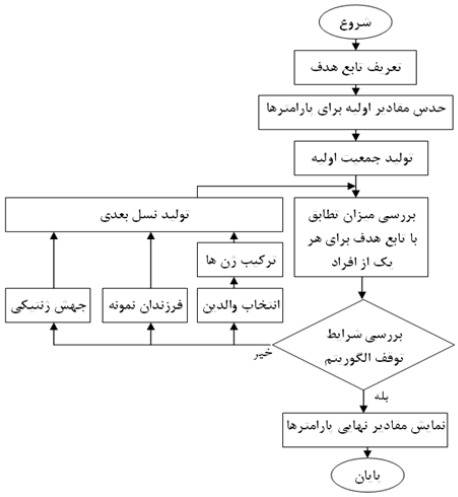
۱- ترکیب ژنتیکی والدین: اکثر فرزندان با انتخاب مناسب دو فرد از جامعه و ترکیب ژنتیکی آن‌ها تحت قوانین مشخص تولید می‌شوند. مجموعه قوانین انتخاب والدین و ترکیب ژنتیکی آن‌ها با توابع تصادفی ویژه‌ای مشخص می‌شود. این توابع تأثیر شگرفی در میزان انتقال ویژگی‌های وراثتی و در نتیجه سرعت همگرایی مسئله دارند.

۲- فرزندان نمونه: در هر مرحله از تولید نسل، درصد مشخصی از افراد جامعه که بیشترین تطابق با تابع هدف را دارند، به‌عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و مستقیماً به مرحله بعد وارد می‌شوند. این کار به همگرائی مسئله کمک می‌کند.

۳- جهش ژنتیکی: درصدی از فرزندان با تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های یکی از والدین تولید می‌شوند. این مدل از تولید نسل باعث تنوع گونه‌های ژنتیکی شده و امکان جستجوی برخی پاسخ‌های احتمالی مسئله را در طیف وسیع‌تری فراهم می‌سازد.

شرایط ویژه‌ای برای توقف الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود که در مسائل مختلف، متفاوت است. معمولی‌ترین مبنا برای پایان یافتن الگوریتم‌ها، مشخص کردن ماکزیمم تعداد نسل‌هاست. یک استراتژی دیگر، توقف برنامه هنگام رسیدن جمعیت به همگرایی است. یعنی وقتی مجموع انحراف معیارهای اعضاء جمعیت، پس از طی تعداد مشخصی از مراحل از یک مقدار معلوم کمتر شود، الگوریتم می‌تواند پایان یابد. عدم بهبود انحراف معیار در طی چند نسل نیز یک مبنای دیگر برای پایان دادن به برنامه است. بسته به نوع تابع هدف، هر یک از موارد بالا می‌توانند به عنوان شرط پایان یافتن الگوریتم استفاده شوند.

شکل ۱ خلاصه ای از مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، الگوریتم ژنتیک حرکت خود را از نسلی به نسل دیگر طی می‌کند. والدین را انتخاب و فرزندان را تولید می‌نماید تا آن که به یک شرط پایان دهنده برسد. الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله، مجموعه بزرگی از پاسخ‌های ممکن را تولید می‌کند. هر یک از این پاسخ‌ها با استفاده از یک تابع برازش[۴]، ارزیابی می‌شود. سپس تعدادی از بهترین پاسخ‌ها باعث تولید و تکامل پاسخ‌های جدید می‌شوند. بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می‌کند که به پاسخ مطلوب دست یابد. مقدار تابع هدف برای هر نسل محاسبه شده و در صورت احقاق یکی از معیارهای توقف الگوریتم، مقدار نهایی تابع هدف تعیین می‌شود[۳۵].



شکل ۱: چرخه عملکرد الگوریتم ژنتیک

۵- روش کار

مخزن هیدروکربوری مورد مطالعه، در سازند آسماری با سن الیگوسن، به‌عنوان کم عمق‌ترین افق تولید نفت در جنوب غربی ایران واقع شده و با سازند گچساران پوشیده شده است. ماهیت کربناته سازند آسماری که حاوی آهک و دولومیت است باعث شده که به لحاظ مقاومت ویژه الکتریکی دارای مقادیر به مراتب بالاتری نسبت به رو لایه گچساران باشد. بنابر مطالعات انجام گرفته، در مخزن مورد مطالعه، ماسه سنگ حضوری بسیار ضعیف و قابل اغماض دارد و شیل که اغلب به‌صورت لایه‌های نازک در بخش انتهایی مخزن وجود دارد، غالباً گسترش چندانی نداشته و فاقد تداوم لایه‌ها در مخزن است. در مخازن کربناته به‌دلیل بافت، شکل و نحوه توزیع حفرات، ضرایب آرچی نمی‌توانند مقادیر ثابتی داشته باشند.

شکل‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب میزان حساسیت اشباع‌شدگی را به تغییرات پارامترهای m و n نشان می‌دهند. با ترسیم مقادیر خطا در محاسبه اشباع‌شدگی در مقابل مقادیر m و n در نمودار شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که با تغییر مقدار ضرایب سیمان شدگی و توان اشباع، مقدار اشباع‌شدگی از آب به‌دست آمده با مقدار واقعی فاصله زیادی گرفته و موجب افزایش خطا می‌شود. بنابراین باید در تعیین این پارامترها، نهایت دقت را به‌کار برد.

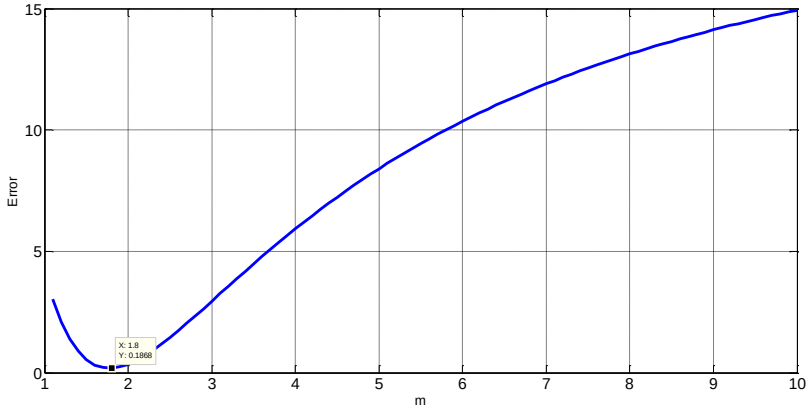
الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه کردن مقدار پارامترهای رابطه آرچی در کل ستون نفت چاه مورد مطالعه که در فاصله عمقی ۲۷۲۹ تا ۲۸۳۷ متر قرار دارد، به کار گرفته شد. برای اجرای الگوریتم ژنتیک در این مقاله، از نرم‌افزار متلب (Matlab 2012) استفاده شده است و کدهای اجرای الگوریتم در پیوست الف ارائه شده‌اند.

برای تعریف تابع برازش، معادله آرچی به صورت زیر نوشته شد:

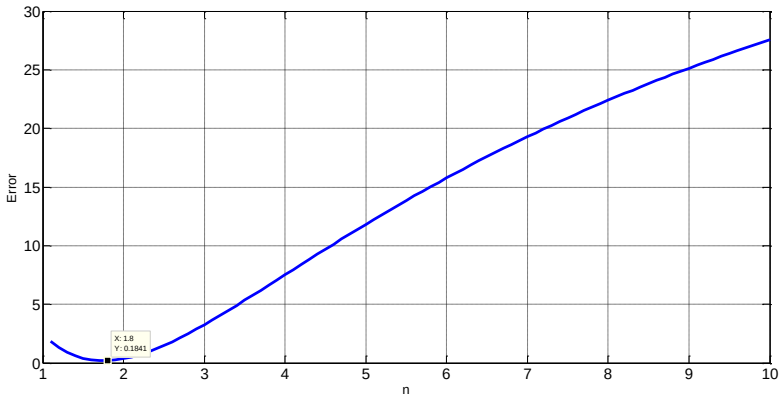
$$\mathrm{Fit} = S_w - \left(\frac{aR_w}{R_t\varphi^m}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{رابطه ۹}$$

تابع هدف، یک تابع خطاست که با این ایده تعریف شده است که تابع برازش را به حداقل میزان ممکن برساند. این تابع به‌صورت مجموع مجذور تفاضل بین اختلاف مقادیر اشباع‌شدگی از آب ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و مقادیر اشباع‌شدگی از آب نمونه برداری شده (SSE)[5] تعریف می‌شود. هر چه میزان تابع هدف به صفر نزدیک‌تر باشد نسل ایجاد شده مرغوب‌تر بوده و به جواب مسئله نزدیک‌تر خواهد بود. در این صورت پارامترهای تولید شده، بهترین جواب برای رابطه آرچی خواهند بود. الگوریتم، در ابتدا یک جمعیت تصادفی تولید می‌کند. بدیهی است که مقادیر اختصاص داده شده برای افراد به وسیله تعریف حدود معقول برای آن‌ها کنترل می‌شود تا از بازهٔ اصلی خود خیلی دور نشوند.

به‌طور معمول، اندازه جمعیت در الگوریتم ژنتیک، بیش از ۱۰ برابر تعداد متغیرهای مسئله انتخاب می‌شود. در این مقاله این جمعیت برابر ۱۰۰ فرض شده است. جمعیت اولیه نیز با یک توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود. انتخاب والدین نیز به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود. ژن‌های فرزندان از ژن‌های هر یک از والدین به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. در هر مرحله ٪۵ از افرادی که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را داشته باشند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و به‌طور مستقیم به مرحله بعد می‌روند. جهش ژنتیکی نیز بر روی ٪۳ از افراد و با یک تابع توزیع نرمال استاندارد محقق می‌شود.



شکل ۲: میزان حساسیت اشباع‌شدگی از آب به تغییرات پارامتر *m*



شکل ۳: میزان حساسیت اشباع‌شدگی از آب به تغییرات پارامتر n

برای رسیدن به پاسخ دقیق‌تر، مقدار دامنه تغییرات مجاز در تغییرات تجمعی تابع هدف برابر $۱۰^{-۱۰}$ انتخاب شده است که مقدار بسیار کوچکی برای این کمیت است. انتخاب این مقدار کوچک برای دامنه تغییرات مجاز، باعث توقف دیرتر الگوریتم و طولانی شدن مراحل اجرای آن می‌شود ولی در نهایت، به جواب دقیق‌تری می‌انجامد.

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، سنگ مخزن در این چاه از سنگ آهک بدون شکستگی تشکیل شده است. مقادیر R_t ،S_w و φ بر اساس لاگ‌های محاسباتی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در چاه مورد مطالعه، در طول ستون نفت در بیش از ۱۲۰ نقطه در دسترس می‌باشند و به‌صورت بردارهایی به الگوریتم معرفی می‌شوند.

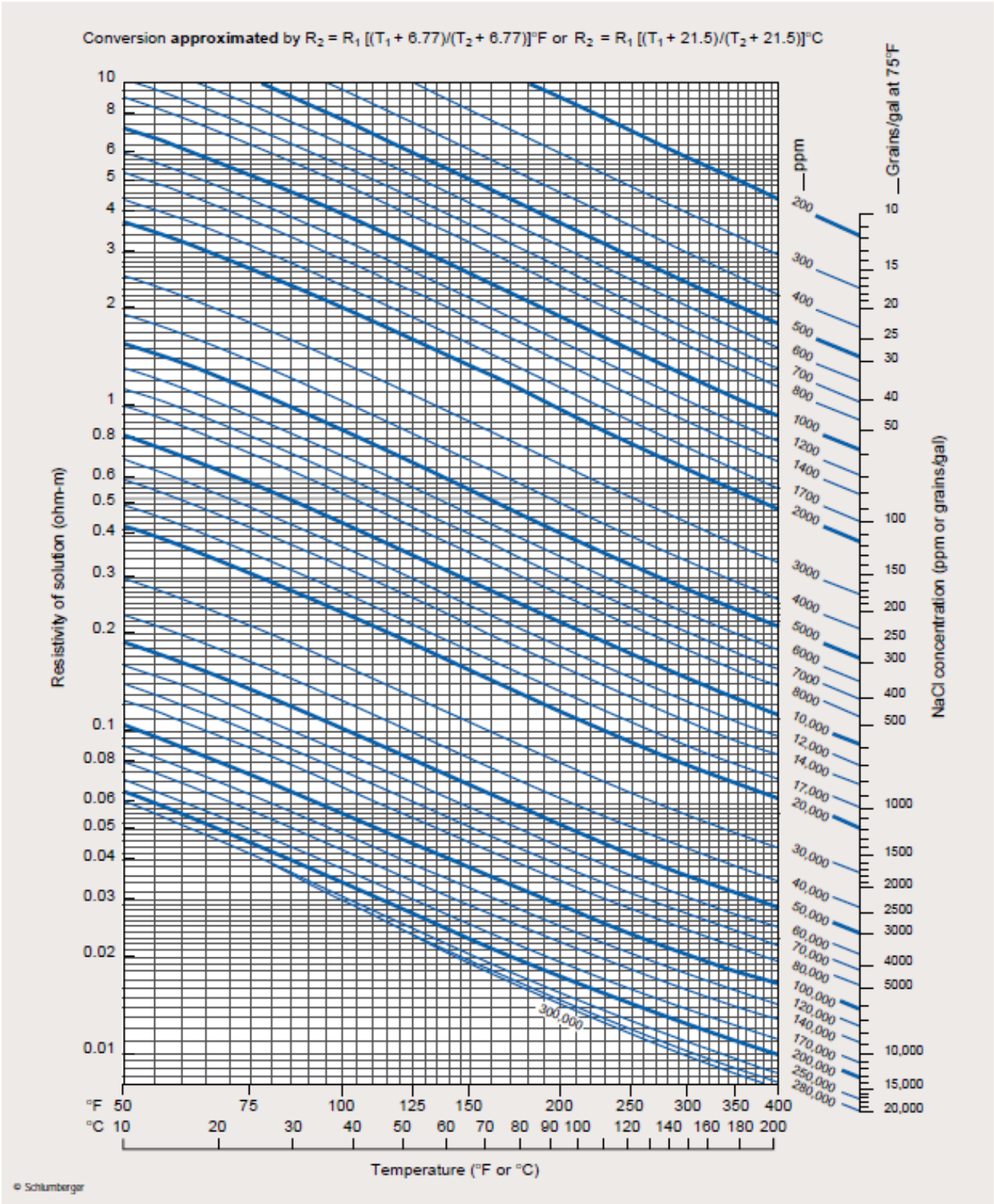
R_w به میزان شوری و دما بستگی دارد. میزان شوری آب مغزه‌ها و دمای مخزن از گزارش ارزیابی پتروفیزیکی چاه مورد مطالعه، در دسترس می‌باشند. با استفاده از نمودارهای تفسیر لاگ شلومبرژه[۲۲] (شکل ۴) با مشخص کردن نقطه تقاطع شوری آب مغزه در محور عمودی سمت راست و دمای مخزن در محور افقی، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی آب مخزن روی محور عمودی سمت چپ، محاسبه شد.

پس از تعیین برازش تمام افراد، عملگرهای انتخاب، ادغام و جهش به‌کار گرفته شده و ساختار جدید ایجاد می‌شود. با تکرار این مراحل، پاسخ بهینه به‌دست می‌آید. به‌طور کلی الگوریتم ژنتیک دارای ماهیت تصادفی است. اغلب مراحل این روش مانند تولید جمعیت اولیه، انتخاب والدین، تولید فرزندان و غیره بر اساس توابع تصادفی هستند. در اینجا برای رسیدن به جواب دقیق‌تر، این الگوریتم سه بار اجرا شده و پارامترهای آرچی حاصل شده‌اند.

جدول ۲ پارامترهای بدست آمده در هر بار اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. مقدار خطا (SSE)، نشان دهنده بهترین مقدار تابع برازش است که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$SSE = \sum_{i=۱}^{n} (x_{real(i)} - x_{calculated(i)})^۲ \quad (۱۰)$$

$x_{real(i)}$ و $x_{calculated}$ به ترتیب i-مین مقدار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشند.



شکل ۴: نمودار تعیین مقاومت ویژه آب بر اساس میزان شوری آن و دمای مخزن [۲۲]

جدول۲: پارامترهای آرچی در سه بار اجرای الگوریتم ژنتیک

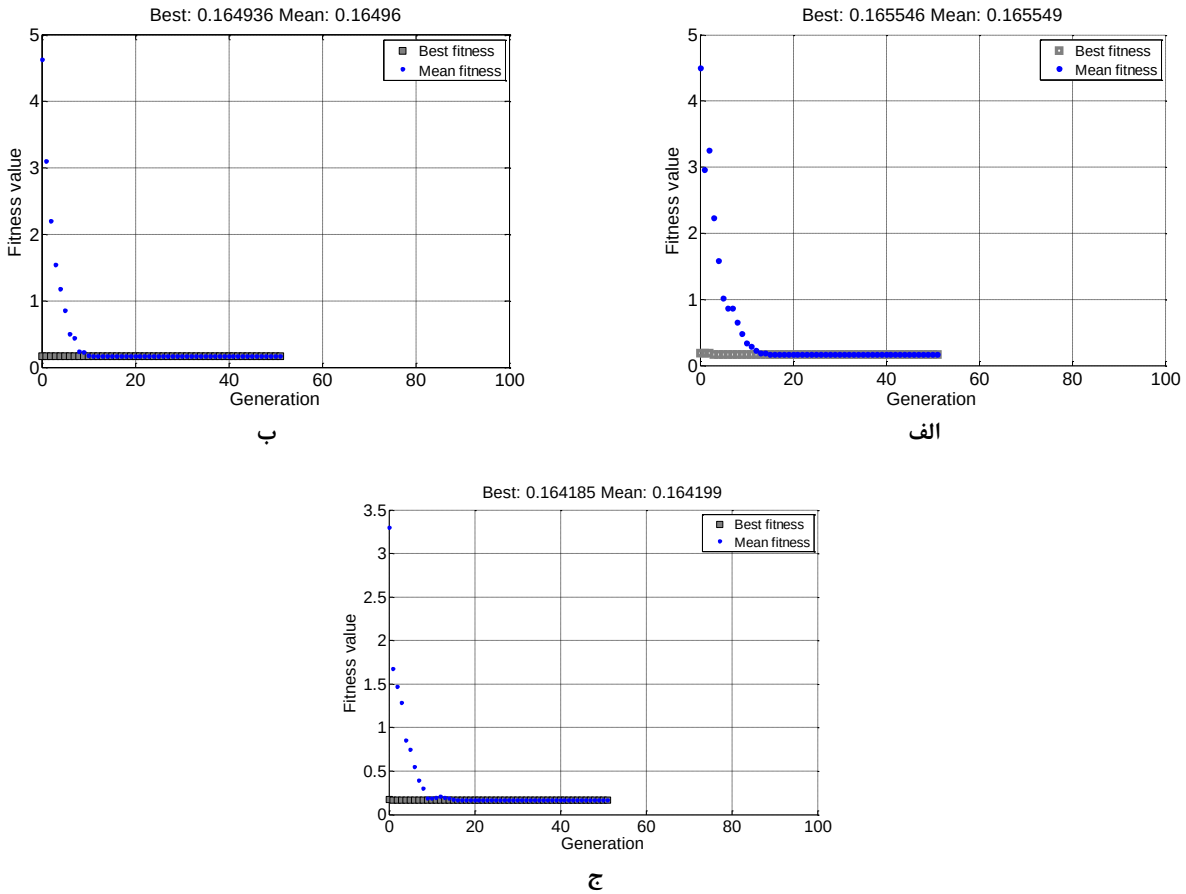
پارامترهای آرچی	I	II	III
m	۲/۷۸۵	۲/۵۸۲	۲/۳۵۴
n	۲/۶۲	۲/۴۴۹	۲/۲۵۷
a	۰/۹۹۱	۰/۹۴۹	۰/۹۰۲
error	۰/۱۶۵۵	۰/۱۶۴۹	۰/۱۶۴۱

در مخزن مورد مطالعه مقادیر واقعی مربوط به پارامتر m بین ۱/۶ تا ۲/۴۶ و پارامتر n بین ۱/۶ تا ۲/۶ تغییر می‌کنند[۳۶]. مقدار خطا، نشان‌دهنده اختلاف مقدار اشباع‌شدگی از آب محاسبه شده با استفاده از مقادیر پارامترهای آرچی تخمین زده شده توسط الگوریتم ژنتیک، با اشباع‌شدگی از آب واقعی مخزن است.

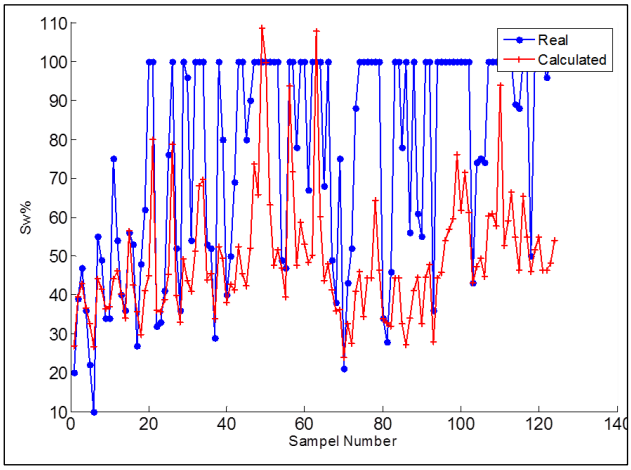
شکل‌های ۵ الف، ب و ج سیر تکاملی تابع برازش در فرآیندهای تولید نسل به‌ترتیب برای اولین، دومین و سومین مرتبه اجرای الگوریتم و مجموعه پاسخ‌های حاصل از آن‌ها را نشان می‌دهند.

همان‌طور که نمودارهای سیر تکاملی تابع برازش شده نشان می‌دهند، بهترین مقدار تابع برازش در اولین مرتبه اجرا برابر ۰/۱۶۵۵، در دومین مرتبه اجرای همان الگوریتم برابر ۰/۱۶۴۹ و در سومین مرتبه اجرای الگوریتم مذکور برابر ۰/۱۶۴۱ است. با در دست داشتن مقادیر بهینه برای پارامترهای آرچی، می‌توان مقدار اشباع‌شدگی را در طول ستون هیدروکربور چاه مورد مطالعه محاسبه کرد.

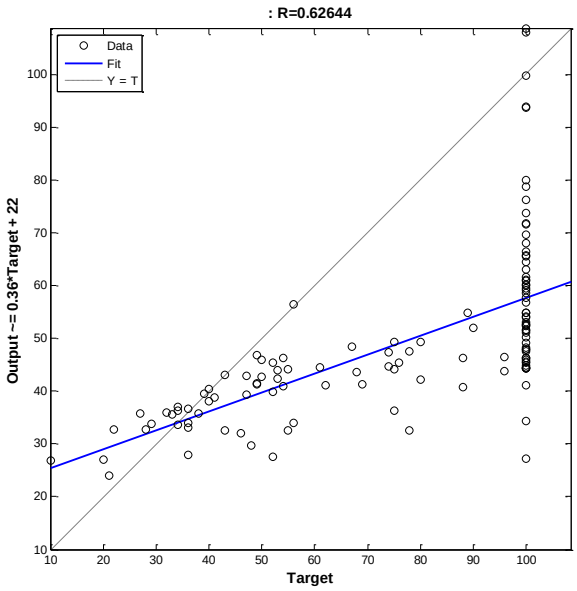
شکل ۶ مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از تخمین پارامترهای آرچی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از اطلاعات لاگ اشباع‌شدگی در چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۷ میزان همبستگی این دو سری داده را نشان می‌دهد.



شکل ۵: الف- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه اول پاسخ‌ها، ب- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه دوم پاسخ، ج- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه سوم پاسخ.



شکل ۶: نمودار مقایسه اشباع‌شدگی آب حاصل از لاگ چاه‌پیمایی و اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده



شکل ۷: کراس پلات اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده نسبت به اشباع‌شدگی حاصل از لاگ چاه‌پیمایی در چاه مورد مطالعه

۶- بحث و نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین پارامترها در مخازن هیدروکربوری، تعیین اشباع‌شدگی از آب است. رایج‌ترین رابطه محاسبه اشباع‌شدگی از آب، رابطه آرچی است. بنابراین تعیین پارامترهای آرچی یعنی فاکتورهای سیمان‌شدگی، توان اشباع و پیچاپیچی اهمیت زیادی دارد. تاکنون روش‌های زیادی برای تخمین پارامترهای رابطه آرچی در محیط‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها اغلب مبتنی بر روش‌های گرادیان بوده که برای مسائل پیچیده، غیرخطی و دارای عوامل نامشخص و تا حدودی مبهم، مناسب نیستند.

روش‌های آماری توانایی محاسبه هر کدام از پارامترهای آرچی را با دقت بالا دارند، ولی به دلیل محاسبه این پارامترها به‌صورت مجزا، خطای تخمین در محاسبه اشباع‌شدگی از آب که هدف اصلی در به‌دست آوردن پارامترهای آرچی است، افزایش می‌یابد.

روش‌هایی که به‌طور معمول برای تعیین پارامترهای آرچی ارائه شده‌اند، شامل فرضیات و شرایطی (مانند تمیز بودن و غیر شیلی بودن سازندهای مورد مطالعه) هستند که در صورت اقناع آن‌ها، نتایج صحیح بوده و در غیر این صورت خطای قابل توجهی دارند. همچنین روش‌ها و معادلاتی که از آن‌ها برای تعیین پارامترهای آرچی استفاده می‌شود، شامل ضرایب و عباراتی هستند که به نقطه اندازه‌گیری و سنگ‌شناسی مخزن وابسته است. به‌طور کلی، این ضرایب، ناشناخته‌اند و باید با تحلیل نمونه‌های سنگی مخزن تعیین شوند.

در این مقاله روش هوشمند الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تخمین پارامترهای رابطه آرچی استفاده شده است. چاه اکتشافی مورد مطالعه در یک مخزن کربناته قرار گرفته است. در سازندهای کربناته به دلیل توزیع پراکنده و نامنظم حفرات و تغییرات اندازه و شکل آن‌ها و همچنین احتمال حضور رس، تعیین پارامترهای آرچی قابل بحث است. به‌دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و طبیعت غیر خطی مسائل حاکم بر سازندهای کربناته، الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده باید در انجام محاسبات، توانایی جلوگیری از رسیدن به جواب‌های محلی به جای جواب بهینه را داشته باشد. استفاده از الگوریتم‌های تصادفی[6] نظیر الگوریتم ژنتیک می‌تواند از رسیدن و توقف الگوریتم در یک مقدار محلی جلوگیری کند.

مقدار سه پارامتر سیمان‌شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a)، در مرحله اول اجرای الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب برابر ۲/۷۸۵، ۲/۶۲ و ۰/۹۹۱، در دومین مرحله اجرا به‌ترتیب برابر ۲/۵۸۲، ۲/۴۴۹ و ۰/۹۴۹ و در سومین مرحله اجرای الگوریتم به‌ترتیب برابر ۲/۳۵۴، ۲/۲۵۷ و ۰/۹۰۲ حاصل شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار تخمین زده شده برای پارامترهای آرچی در مرحله سوم الگوریتم ژنتیک، در محدوده تغییر مقادیر واقعی این پارامترها که از آنالیزهای آزمایشگاهی حاصل شده است، قرار دارند. مقادیر اشباع‌شدگی حاصل از تخمین پارامترهای آرچی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مقادیر واقعی اشباع‌شدگی، همبستگی ٪ ۶۲ را نشان می‌دهند. این میزان همبستگی، نتیجه کاربرد قانون آرچی برای تخمین اشباع‌شدگی در یک مخزن کربناته است. باید به این مسئله توجه کردکه قانون آرچی برای ماسه‌سنگ‌های تمیز تعریف شده است و برای افزایش میزان دقت در تخمین اشباع‌شدگی از آب در مخازن کربناته لازم است که اصلاحاتی در این قانون انجام شود.

مقدار خطای الگوریتم ژنتیک در سه مرتبه اجرای این الگوریتم روی داده‌های ورودی، از ۰/۱۶۵۵ در اولین مرتبه‌ی اجرا به مقدار ۰/۱۶۴۱ در سومین مرتبه‌ی اجرا کاهش یافته است. همان‌طور که در نمودارهای سیر تکاملی تابع برازندگی در شکل ۵ مشخص است، در نسل‌های ابتدایی به علت دور بودن از جواب بهینه، روند کاهش مقدار خطا بسیار سریع‌تر است. حال آنکه در نسل‌های انتهایی به سبب نزدیک شدن به جواب بهینه، روند کاهش خطا کندتر می‌شود.

با توجه به نتایج این مقاله می‌توان به مزایای روش الگوریتم ژنتیک در تعیین پارامترهای آرچی در مخازن کربناته به صورت زیر اشاره کرد:

- محاسبه هم‌زمان پارامترهای آرچی که باعث افزایش دقت، سرعت و صحت تخمین این پارامترها می‌شود.
- استفاده از الگوریتم ژنتیک در تعیین ضرایب آرچی به کمک لاگ‌های پتروفیزیکی، محاسبه این ضرایب را در هر قسمتی از یک چاه که لاگ‌های مناسب برای ورودی الگوریتم موجود باشد، امکان‌پذیر می‌سازد. در واقع. این ویژگی باعث محاسبه بهتر و دقیق‌تر اشباع از آب در اعماق مختلف چاه می‌شود.
- این روش، در مقایسه با روش‌های متداول آماری، سرعت و دقت بالایی را نشان می‌دهد. با کاربرد این روش و طراحی دقیق الگوریتم در مرحله اجرا و کاربرد، از فرمول‌ها و روابطی که نیاز به تعیین پارامترهای خاصی دارند و همچنین انجام تصحیحات لازم برای تحقق فرض‌ها و شرایط مخزن بی‌نیاز می‌شویم.

پس از بررسی نتایج این مقاله، برای مطالعات آینده در زمینه تخمین پارامترهای رابطه آرچی توسط روش الگوریتم ژنتیک در مخازن کربناته می‌توان پشنهاد کرد که:

- چون سنگ‌های کربناته، برخلاف ماسه‌سنگ‌ها، تنوع زیاد لیتولوژیکی از نظر نوع بافت و شکل منافذ دارند و چون ضرایب آرچی نیز تحت تأثیر عوامل لیتولوژیکی به ویژه نوع منافذ هستند؛ در نتیجه ضرایب آرچی باید برای انواع گونه‌های سنگی در یک مخزن کربناته محاسبه شوند.
- قانون آرچی تنها برای ماسه سنگ‌های تمیز، قابل استفاده است و ماسه سنگ‌های غیر تمیز یا شیلی و سازندهای حفره‌ای مانند کربنات‌ها ممکن است از قانون آرچی پیروی نکنند. بنابراین باید اصلاحاتی در رابطه آرچی صورت گیرد و مدل کامل‌تری برای تخمین میزان اشباع‌شدگی از آب در مخازن کربناته ارائه شود که قادر باشد با توجه به خصوصیات سنگ‌های کربناته رابطه بین تغییرات اشباع‌شدگی از آب و پارامترهای مخزن را به خوبی بیان کند و تخمین قابل قبولی از اشباع‌شدگی از آب مخزن حاصل شود.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران برای فراهم آوردن امکانات این پژوهش، کمال تشکر را داشته باشند.

مراجع

[1]. Bhatt, A.; 2002; "*Reservoir properties from well logs using neural networks*"; Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 157 pp.

[2]. Archie G.E.; 1942; "*The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*"; Trans. Americ. Mineral.Met., 146, 54-62.

[3]. Lucia, F.J.; 2007; "*Carbonate Reservoir Characterization, An Integrated Approach*"; Second Edition, Springer, 336 pp.

[4]. Nugent, W.H.; Coates, G.R. and Peebler, R.P.; 1978; "*A new approach to carbonate analysis*"; 19th SPWLA Symposium.

[5]. Rasmus, J.C.; 1983; "*A variable cementation exponent, m, for fractured carbonates*"; Log Anal. 24, 13–23.

[6]. Holland, J. H; 1975; "*Adaption in natural and artificial systems*"; University of Michigan Press, Ann Arbor, USA, 183 pp.

[7]- Parker, P.B; 1999; "*Genetic Algorithms and Their Use in Geophysical Problems*"; Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 202 pp.

[8]- Mohammad Hoseini Dokht, R.; Talebi Kenari, M., 2012, "*Optimizing the seismic plan in Pardis project using algorithm genetics*"; Ekteshaf and Tolid Journal, No. 83.

[9]- Froud, T.; 2011, "*Optimizing the place of the well using algorithm genetics*"; The first symposiom in new techniques in oil and gas technology, Iran.

[10]- Saberi, A.; 2011; "*Optimizing the place and the number of the wells in an oil fiel, using algorithm genetics*"; The first symposiom in new techniques in oil and gas technology, Iran.

[11]. Soleng, H.H.; 1999; "*Oil reservoir production forecasting with uncertainty estimation using genetic algorithms*"; Proc. of the Congress on Evolutionary Computation, vol. 2, pp. 1217– 1223.

[12]. Romero, C.E.; Carter, J.N.; Zimmerman, R.W.; Gringarten, A.C.; 2000; "*A modified genetic algorithm for reservoir characterization*"; Proc. of the 2000 SPE Seventh International Oil and Gas Conference and Exhibition, Beijing, China.

[13]. Yu, T.;Lee, S.; 2002; "*Evolving cellular automata to model fluid flow in porous media*"; Proc of the 2002 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware. IEEE Press, pp. 210–218.

[14]. Mansanne´, F.; Schoenauer, M.; 2002; "*An automatic geophysical inversion procedure using a genetic algorithm. In: Wong, P., Aminzadeh, F., Nikravesh, M. (Eds.), Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling, Studies in Fuzziness and Soft Computing*"; vol. 80. Physica-Verlag, pp. 331–353.

[15]. Boschetti, F.; 1995; "*Application of Genetic Algorithms to the Inversion of Geophysical Data*". PhD thesis in Mathematical Geophysics. University of Western Australia, Perth.

[16]. Heydari, H.; Moghadasi, J. and Motafakkerfard, R.; 2013; "*A New Approach to Measuring Cementation Factor by Using an Intelligent System*"; Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 39-53.

[17]. Abbasi Godarzi, A.; Delavar, M. and Nabian, N.; 2012; "*A new approach in estimation of Archi's parameters: Application of genetic algorithm in case studies Permian Glerito and Permian Clearfork reservoirs*", First international conference of oil, gas, petrochemical and power plant, Iran.

[18]- Rezaie, M.; Chehrazi, A.; 2011; "*The principle of acquisition and processing of well logs*"; Tehran university publisher.

[19]. Joseph, R.; Hrarst, P.; Nelson, H. and Paillet, F. L.; 1999; "*Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists and enjeenes*"; 2nd ed., Wiley, pp 423-428.

[20]. Focke, J.W. and Munn, D.; 1987; "*Cementation exponents in middle eastern carbonate reservoirs*"; SPE Form. Eval. 2, 155–167.

[21]. Dubois, M.K.; Byrnes, A.P. and Watney, W.L.; 2001; "*Field development and renewed reservoir characterization for Co_2 flooding of the Hall-Gurney Field, Central Kansas*"; AAPG Annual Convention in Denver, Colorado.

[22]. Shlumberger; 2009; "*Log Interpretation Charts*"; 151p.

[23]. Borai, A.M.; 1987; "*A new correlation for the cementation factor in low-porosity carbonates*"; SPE Form. Eval. 2, 495–499.

[24]. Ragland D.A; 2002; "*Trends in cementation exponents (m) for carbonate pore systems*"; Petrophysics. 43:434-446.

[25]. Ransom, R.C.; 1984; "*A Contribution Toward a Better Understanding Of The Modified Archie Formation Resistivity Factor Relationship, The Log Analysis*"; pp. 7-12, March-April.

[26]- Anderson, W.G.; 1986; "*Wettability Literature Survey – Part 3: Effect of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media*"; JPT pp. 1371-78.

[27]- Sondena, E.; Brattell, F.; Kolltvelt, K.; and Normann, H.P.; 1991; "*The Effect of Reservoir Conditions and Wettability on Electrical Resistivity*"; Paper SPE 22991, SPE Asia Pacific, Nov. 4-7.

[28]- Rasmus, J.C.; 1986; "*A Summary of the Effects of Various Pore Geometries and Their Wettabilities on Measured and In-Situ values of Cementation and Saturation Exponents*"; Trans. SPWLA Section PP.

[29]- Mahamood, S.M.; Maerefat, N.L. and Chang, M.M.; 1991; "*Laboratory Measurement of Electrical Resistivity at Reservoir Conditions*"; SPEFE, pp. 291-300, Sep.

[30]- Wyllie, M. R. J. and Gregory, G. R.; 1953; "*Reservoir Engineering - General - Formation factor of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation*"; Petrol. Trans. AIME, 198, 103-110.

[31]- Attia, M.A.; 2005; "*Effects of petrophysical rock properties on tortuosity factor*"; J. Pet. Sci. Eng. 48, 185–198.

[32]- Ellis, D.V. and Singer, J.M.; 2008; "*Well logging for earth scientists*"; 2nd Edition, Springer, 692 pp.

[33]- Hamada, G.M. and Al-Awad, M.N.; 2001; "*Evaluating Uncertainty in Archie's Water Saturation Equation Parameters Determination Methods*"; Paper SPE 68083, SPE Middle East Oil Show held in Bahrain, March 17-20.

[34]- Maute, R.E.; Lyle W.D. and Sprunt, E.S.; 1992; "*Improved Data-Analysis Method Determines Archie Parameters From Core Data*", Paper SPE 19399 or JPT pp. 103-107, January.

[35]- Matlab user's Guide; 2007; Matlab CD- ROM, by the Mathworks, Inc.

[36]- National Iranian Oil Company; 2012; "*Well Reports of an Iranian Carbonate Hydrocarbon Reservoir*", National Iranian Oil Company.

پیوست الف-

الف-۱: فایل فیتنس

```
function F=fitns(x)

load data.mat

n=x(1);
m=x(2);
a=x(3);

Rw=10;
H=data(:,4);
RT=data(:,3);
Phi=data(:,2);
Sw=data(:,1);


Sw_fit=(Rw.*a./(RT.*Phi.^m)).^(1/n);

F=sum( (Sw_fit-Sw).^2 );
```

الف-۲: فایل main

```
clc
clear
close all

data=xlsread('data.xls');
save data data

Lb=[1 1 0.9];
Ub=[5 5 1.1];
options = gaoptimset('CrossoverFcn',@crossoverheuristic
,'Generations',100,'PopulationSize',100,'StallGenLimit',1
00,'StallTimeLimit',100,'MutationFcn',@mutationadaptfeasi
ble)
[paramtrs,error]=ga(@fitns,3,[],[],[],[],Lb,Ub,[],options
);


error

n=paramtrs(1)
m=paramtrs(2)
a=paramtrs(3)
```

```
Rw=0.024;
H=data(:,4);
RT=data(:,3);
Phi=data(:,2);
Sw=data(:,1);


Sw_fit=(Rw.*a./(RT.*Phi.^m)).^(1/n);


plot(Sw);
hold on
plot(Sw_fit,'red');
```

[1] - Saturation
[2] - Genetic algorithm
[3] -Wettability
[4] - Best Fitness Function
[5] - Sum of Squares of Errors
[6] - Stochastic algorithms