

توسعه مدل ریاضی جدید برای تخمین گرادیان شکست با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی بیان ژن در یکی از میادین خلیج فارس

احمد گنجی^۱، عزت‌اله کاظم‌زاده^{۲*} و حامد نظری^۱

۱- دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

ارزیابی دقیق فشار شکست و فشار منفذی از پارامترهای کلیدی برای برنامه‌ریزی عملیات حفاری به‌شمار می‌آید. تخمین صحیح فشارهای زیرزمینی نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌های چاه دارد. تخمین نادرست گرادیان شکست عملیات حفاری را با خطر مواجه می‌نماید و باعث ایجاد مشکلات جدی در حفاری چاه می‌گردد که از جمله این مشکلات می‌توان به هرزروی سیال حفاری و فوران چاه اشاره کرد. در این مقاله به منظور پیش‌بینی گرادیان شکست سازند از الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای توسعه یک مدل ریاضی استفاده شده است. پارامترهای گرادیان فشار منفذی، گرادیان فشار روباره و ضریب پواسون متغیرهای مستقل مدل به‌شمار می‌آیند. ناحیه مورد مطالعه شامل سازندهای هیدروکربوری کنگان و دالان بالایی در یکی از میادین خشکی نزدیک خلیج فارس است که با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی دو چاه به‌طور جداگانه برای هر یک از این سازندها مدلی ارائه گردید. مجموعه داده‌های مورد استفاده برای توسعه مدل‌های ریاضی مذکور شامل بیش از ۴۳۰۰ داده چاه‌پیمایی از یک چاه در سازندهای کنگان و دالان بالایی است. اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی حاصل با استفاده از ۶۰۰۰ داده از چاه دیگری در همان سازند انجام گردیده است. تحلیل آماری نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل‌ها برای پیش‌بینی گرادیان شکست این سازند است بنابراین می‌توان از آنها برای تخمین فشار شکست استفاده نمود.

کلمات کلیدی: فشار شکست، فشار منفذی، عملیات حفاری، برنامه‌ریزی بیان ژن (جپ)، آنالیز آماری

*مسئول مکاتبات

kazemzadehe@ripi.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2017.2524.2173)

مقدمه

این سازندها عموماً دارای خصوصیات متفاوتی از نظر سنگ‌شناسی، خواص مکانیکی، فشار منفذی و نوع سیالات منفذی هستند. تغییر این خصوصیات باید در برنامه چاه لحاظ گردد. یک سازند ممکن است دارای رژیم‌های فشاری مختلفی باشد. در سازندهای دارای فشار نرمال^۷ می‌توان به آسانی فشار منفذی را براساس فشار هیدرواستاتیک پیش‌بینی کرد اما در سازندهای دارای فشار غیرنرمال^۸ تعیین و تخمین مقدار فشار منفذی بسیار سخت است ولی آگاهی داشتن از فشار منفذی در حین عملیات حفاری در این‌گونه سازندها دارای اهمیت فراوان است [۳]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای تعیین فشار منفذی با استفاده از روش‌های غیرمستقیم از روی داده‌های لرزه‌ای و سرعت صوت و نمودارهای چاه‌پیمایی و روش مستقیم آزمایش‌نشتی^۹ صورت گرفته است [۳].

هوبرت و ویلیس روشی را برای تعیین فشار شکست سازند ارائه کردند. براساس روش آنها برای ایجاد شکست در سازند باید فشار اعمال شده به سازند از مجموع حداقل تنش اصلی و فشار سازند بیشتر باشد (با فرض تنش عمودی به‌عنوان بزرگ‌ترین مولفه تنش اصلی) [۴]. متیوس و کلی با استفاده از روابط تجربی و با فرض گرادیان فشار روباره برابر 1 psi/ft نتایج مطالعات خود را برای تخمین فشار شکست در مخازن ماسه‌سنگی ناحیه گالف کوئست منتشر کردند [۵]. ایتون روش هوبرت و ویلیس را تصحیح کرد. او فرض کرد که تنش روباره و نسبت پواسون با عمق متغیر است و ضریب پواسون را به‌عنوان عامل کنترل‌کننده فشار شکست معرفی نمود [۶].

تخمین گرادیان شکست^۱ و فشار منفذی^۲ یکی از فاکتورهای کلیدی در عملیات حفاری و تکمیل چاه‌های نفت و گاز محسوب می‌شود. تخمین این فشارها پارامتر مهمی در عملیات حفاری است و از لحاظ ایمنی و اقتصادی بر پایداری چاه تاثیر قابل توجهی دارد. بنابراین آگاهی دقیق از این فشارها در برنامه‌ریزی چاه ضروری است. در هنگام حفاری برای جلوگیری از مشکلاتی مانند هرزروی سیال یا فوران باید فشار سیال حفاری درون چاه در محدوده معینی حفظ گردد که به این محدوده پنجره گل^۳ اطلاق می‌گردد. حد پایین فشار گل درون چاه براساس فشار منفذی تعیین می‌شود و حد بالای فشار گل مورد نیاز با توجه به فشار شکست سازند به‌دست می‌آید. به منظور جلوگیری از بروز مشکل در حین حفاری نیاز است که وزن سیال حفاری با توجه به مقدار دقیق فشار سازندی انتخاب شود. تمامی سازندهای نفوذپذیر در طول حفاری چاه، دارای فشار منفذی هستند که مقدار فشار آنها ممکن است به عمق، محل و نزدیکی به سازه‌های دیگر بستگی داشته باشد. اگر فشار داخل چاه از فشار سازند کمتر باشد مشکلاتی مانند سیلان^۴ و فوران چاه را به دنبال خواهد داشت. از سویی دیگر کم بودن فشار سیال حفاری درون چاه می‌تواند ناپایداری مکانیکی دیواره‌های چاه را تشدید نماید که به فروریختن چاه^۵ منجر می‌شود. بالا بودن فشار درون‌چاهی نیز می‌تواند گیر دیفرانسیلی رشته حفاری، شکست سازند، هرزروی کامل سیال حفاری، فوران سطحی و فوران زیرسطحی^۶ را در پی داشته باشد [۱ و ۲]. گیرکردن لوله و هرزروی سیالات حفاری دو مورد از پرهزینه‌ترین مشکلات حفاری هستند. آمارها نشان می‌دهد که این اتفاقات غیرمنتظره ممکن است بین ۱۰ الی ۲۰٪ هزینه‌های عملیات حفاری یک چاه را شامل شود. یک چاه در طی حفاری باید از میان سازندهای مختلفی عبور نماید.

1. Fracture Gradient
2. Pore Pressure
3. Mud Window
4. Kick
5. Hole Collapse
6. Underground Blowout
7. Normal Pressure
8. Abnormal Pressure
9. Leak-off Test (LOT)

اموری نماید که توسط انسان‌ها انجام می‌گردد. یکی از کاربردهای هوش مصنوعی یافتن راه‌حل برای مسائل با فیزیک بسیار پیچیده و غیرخطی است. از این رو در بسیاری از حوزه‌های مهندسی علوم کاربرد پیدا کرده است. هوش مصنوعی مبحث نسبتاً جدیدی در میان علوم مختلف محسوب می‌شود. مفهوم و عنوان هوش مصنوعی برای اولین بار بعد از جنگ جهانی دوم بیان گردید، اما در طی این سال‌های نه چندان طولانی حوزه هوش مصنوعی گستردگی و توسعه زیادی یافته و زیرشاخه‌های متعددی پیدا نموده است. یکی از زیرشاخه‌های مهم هوش مصنوعی الگوریتم‌های تکاملی^۲ است که در این مقاله برای پیش‌بینی و ارائه مدل‌های شاکست سازند مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان شاخه‌ای از هوش مصنوعی از تکامل زیستی برای حل مسائل الهام می‌گیرند. الگوریتم‌های تکاملی خود شامل چندین زیرمجموعه مختلف است که همگی بر اصول تکامل زیستی استوار هستند. الگوریتم ژنتیک^۳ یکی از روش‌های الگوریتم تکاملی است و یک تکامل ساده بیولوژیکی به شمار می‌آید. در علم رایانه الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو برای یافتن راه‌حل تقریبی به منظور بهینه‌سازی است. مسائل جستجو نوع خاصی از الگوریتم تکاملی هستند که از تکنیک‌های تکامل زیستی مانند، وراثت و جهش^۴ برای حل مسئله استفاده می‌نمایند. الگوریتم ژنتیک اغلب انتخاب خوبی برای پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون محسوب می‌شود. به‌طور کلی الگوریتم ژنتیک از یک تکنیک ژنتیکی به‌عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند و در آن برای پیدا کردن بهترین راه‌حل مسئله توسط اصلاح ژنتیکی جمعیت از جواب‌ها در نسل‌های متوالی تلاش می‌شود.

اندرسون و همکاران مدلی را براساس رابطه تنش/ کرنش برای یک محیط متخلخل الاستیک توسعه دادند. تمامی تلاش‌های قبلی براساس این فرض بود که ضریب خصوصیات سازند تابعی از عمق است. آنها معادله‌ای را برای پیش‌بینی گرادیان فشار شکست سازند به‌صورت تابعی از عمق، فشار روباره، فشار منفذی، ضریب پواسون و ضریب بایوت بیان کردند [۷]. صدیق و نشاوی روشی با استفاده از شبکه‌های عصبی مدلی را برای پیش‌بینی گرادیان فشار شکست سازند پیشنهاد کردند. اطلاعات ورودی آنها شامل داده‌های چندین میدان واقعی بود که نتایج به‌دست آمده از این مدل با روابط تجربی مقایسه شد. نتیجه نشان داد که این روش تحت هر شرایطی نسبت به روش‌های در دسترس قابل اعتمادتر است. در این تحقیق در مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده ۹۰٪ داده‌ها به‌عنوان آموزش و ۱۰٪ بقیه به‌عنوان آزمایش در نظر گرفته شده است و همه داده‌ها بین ۰ و ۱ برای آموزش و آزمایش نرمال‌سازی شده‌اند. درصد خطای حاصله از پیش‌بینی گرادیان فشار شکست سازند حدود ۱٪ بوده است [۸]. نشاوی و ملاله با استفاده از شبکه عصبی گرادیان فشار شکست سازند را برای یکی از میدان‌های خاورمیانه محاسبه کردند [۹]. هالومون و همکاران یک روش جدید برای تخمین گرادیان شکست با اصلاح روابط متیوس- کلی و نسبت تنش ایتون ارائه دادند و آنها در مقاله خود از داده‌های نمودارگیری و آزمایش نشتی و بعضی روابط استفاده کردند [۱۰].

هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی بیان ژن (جپ)

در سال‌های اخیر به‌دلیل توسعه علوم رایانه و ریاضی، شاهد پیشرفت سریع ماشین‌های هوشمند در زندگی بشری هستیم. هوش مصنوعی^۱ به‌عنوان شاخه‌ای از علوم رایانه تلاش دارد که با ایجاد ماشین‌های هوشمند، ماشین‌ها را قادر به انجام

1. Artificial Intelligence (AI)

2. Evolutionary Algorithm (EA)

3. Genetic Algorithms (GA)

4. Mutation

آمده از این روش بهره‌وری بالا و نتایج عالی آن را نشان می‌دهد. به‌طور کلی سه روش GA، GP و GEP متعلق به یک خانواده هستند و تفاوت آنها در ماهیت جواب‌ها است. در GA جواب‌ها رشته‌های سمبولیک با اندازه ثابت است (کروموزوم‌ها)، در GP جواب‌ها ورودی‌های غیرخطی با سائزها و اشکال متفاوت هستند (درخت تفکیک^۱). در GEP جواب‌ها همچنان ورودی‌های غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت است (درخت بیان^۲) اما ورودی‌های پیچیده به‌صورت رشته‌های ساده با اندازه ثابت کدگذاری می‌شوند [۱۴]. مراحل اصلی جپ در شکل ۱ نمایش داده شده است. این فرآیند با تولید یک نسل تصادفی از کروموزوم‌ها و تعداد خاصی از جواب‌ها یا برنامه‌ها به‌عنوان جمعیت اولیه آغاز می‌گردد. برای مدل‌سازی ریاضی در ابتدا جمعیت اولیه‌ای از مدل‌ها ایجاد شده و سپس این کروموزوم‌ها به‌صورت درخت تجزیه نمایش داده می‌شود و برآزندگی تمامی مدل‌ها تخمین زده می‌شود. سپس برنامه‌ها براساس مقدار برآزش خود انتخاب می‌شوند تا با اصلاح و تکثیر، نسل تازه‌ای را با ویژگی‌های جدید به وجود بیاورند. این فرآیند تا زمانی که یک راه‌حل مناسب یافت شود، برای تعداد مشخصی از نسل‌ها تکرار می‌گردد [۱۴].

روش مطالعه و تحقیق

اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه مربوط به یکی از میادین اکتشافی هیدروکربوری واقع در خشکی در حاشیه خلیج فارس است. به‌طور کلی محدوده مطالعه شده در این میدان شامل سازندهای کنگان و دالان بالایی است.

در الگوریتم ژنتیک ابتدا به‌طور تصادفی چندین جواب^۱ برای مسئله تولید خواهد شد که این مجموعه جواب‌ها، جمعیت اولیه^۲ نامیده می‌شود. هر جواب به‌عنوان یک کروموزوم^۳ در نظر گرفته می‌شود. پس از ارزیابی برآزندگی^۴ جمعیت اولیه، برای ایجاد و بازتولید کروموزوم‌های بهتر با استفاده از عملگرهای ژنتیکی کروموزوم‌ها با هم ترکیب شده و جهش در آنها ایجاد می‌گردد و در نهایت نیز جمعیت فعلی با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها حاصل شده، ترکیب می‌شود [۱۱].

برنامه‌ریزی ژنتیک^۵ زیر مجموعه دیگری از الگوریتم‌های تکاملی است. این روش یک تکنیک رگرسیون جدید با قابلیت بسیار بالا به‌صورت تکامل خودکار برنامه‌ها است. برنامه‌ریزی ژنتیک اواخر دهه ۸۰ میلادی پس از انجام آزمایش‌های بر روی رگرسیون نمادین توسط کوزا^۶ ابداع گردید [۱۲]. کاندیدا فررا الگوریتم جدیدی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک ابداع نمود. برنامه‌ریزی با بیان ژن تکنیک جدیدی برای ایجاد برنامه‌های کامپیوتری است که براساس مدل‌های آموزش دیده و برنامه‌ریزی ژنتیکی است. به‌طور کلی جپ یک الگوریتم تکاملی برای غلبه بر بسیاری از محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیکی است [۱۳]. به بیان ساده‌تر برنامه‌ریزی با بیان ژن یا به اختصار GEP^۷ یک الگوریتم یادگیری است که به‌طور ویژه رابطه بین متغیرها در مجموعه‌هایی از داده‌ها را فرا می‌گیرد و مدل‌هایی را بین این متغیرها ایجاد می‌نماید. از جمله نقاط قوت آن می‌توان به سرعت و توانایی بالا در مدل‌سازی‌های پیچیده اشاره کرد از این‌رو می‌توان از آن به‌عنوان قوی‌ترین الگوریتم یادگیری یاد کرد [۱۴]. GEP یک الگوریتم تکاملی جدید و بسیار قوی است که در یافتن تابع و کشف مدل‌های رگرسیون غیرخطی توانایی بالایی دارد. ضرایب آماری به‌دست

1. Individual

2. Initial Population

3. Chromosome

4. Fitness

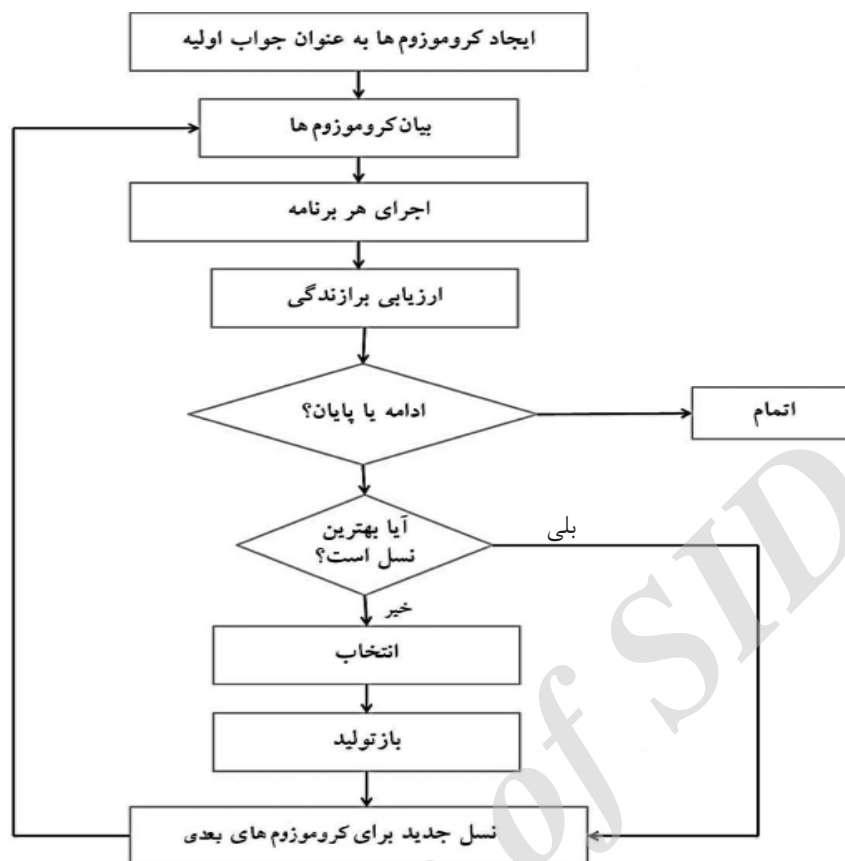
5. Genetic Programming (GP)

6. Koza

7. Gene Expression Programming (GEP)

8. Parse Trees

9. Expression Tree(ET)



شکل ۱ مراحل اساسی GEP [۱۴]

ضریب پواسون^۴ محاسبه شد.

روش ایتون از رایج‌ترین روش‌ها در تعیین مقدار فشار منفذی است. برای تعیین مقدار فشار منفذی ابتدا باید تغییرات پارامترهای مختلف پتروفیزیکی وابسته به تخلخل مانند زمان عبور امواج صوتی برشی و تراکمی، چگالی و غیره در شیل و لایه‌های شیلی دارای فشار نرمال در برابر عمق بررسی و سپس خط روند طبیعی براساس این لایه‌ها تعیین شود. مدل ایتون برای تعیین فشار منفذی با استفاده از نمودار چاه‌پیمایی صوتی به صورت رابطه ۱ است [۱۵-۱۷]:

$$P_p = \sigma_{ob} - (\sigma_{ob} - P_{np}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^x \quad (1)$$

که در معادله فوق P_p گرادیان فشار منفذی برحسب σ_{ob} ، psi/ft، گرادیان فشار روباره برحسب

1. Mud Cake
2. Geolog®
3. Overburden Pressure Gradient
4. Poisson Ratio

سازندهای مذکور جز گروه دهرم بوده و از لحاظ زمین‌شناسی و لیتولوژی منطقه دارای سنگ آهک، انیدریت، دولومیت و ایلیت هستند. داده‌های این مطالعه از نمودارهای پتروفیزیکی و خلاصه گزارش‌های حفاری دو حلقه چاه جهت‌دار حفاری شده در این سازندها (با نام‌های فرضی چاه A و B) به دست آمده است. به منظور استفاده از داده‌ها چاه‌پیمایی ابتدا باید این داده‌ها نسبت به اثرات محیطی داخل چاه مانند ریزش دیواره، شوری گل حفاری و اثر کیک گل^۱ تصحیح شوند. بدین منظور تاثیرات محیطی مذکور توسط نرم‌افزار ژئولاگ^۲ انجام گردید. بعد از اطمینان از تصحیحات لازم توسط نرم‌افزار، در مرحله بعدی داده‌های خروجی از نرم‌افزار ژئولاگ در یک فایل صفحه گسترده قرار گرفت. سپس بر مبنای رابطه تجربی فشار شکست ایتون و فرمول‌های معتبر دیگر، پارامترهای مورد نیاز روش ایتون (یعنی فشار روباره^۳، فشار منفذی و

برابر با ۰/۰۰۱۳۷ است [۱۵-۱۹]:

رابطه ۴ برای محاسبه ضریب پواسون براساس سرعت امواجی صوتی تراکمی و برشی به کار برده می‌شود [۲۰ و ۲۱]:

$$\mu = \frac{1 - 2 \left(\frac{V_s}{V_c} \right)^2}{2 \left(1 - \frac{V_s}{V_c} \right)^2} \quad (4)$$

در رابطه فوق پارامتر μ ضریب پواسون (بدون بعد)، V_c سرعت امواج تراکمی برحسب $\mu\text{s/ft}$ و V_s سرعت امواج برشی برحسب $\mu\text{s/ft}$ است. پس از محاسبه گرادیان فشار منفذی و روباره و ضریب پواسون از رابطه ۵ مقدار گرادیان شکست سازند براساس مدل ایتون به‌دست می‌آید [۱۵ و ۲۱].

$$G_f = \frac{\mu}{1 - \mu} (\sigma_{ob} - P_p) + P_p \quad (5)$$

در رابطه بالا پارامتر G_f نمایانگر گرادیان فشار شکست برحسب psi/ft است.

در این بررسی اطلاعات دو چاه حفر شده در سازندهای کنگان و دالان بالایی به کار گرفته شد. برای توسعه مدل‌ها از نرم‌افزار جین‌اکس پروتولز^۱ استفاده شده است. نرم‌افزار مذکور یک بسته نرم‌افزاری مبتنی بر الگوریتم چپ است. برای به‌دست آوردن مدل پارامتر گرادیان شکست به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای گرادیان فشار منفذی، گرادیان فشار روباره و ضریب پواسون به‌عنوان متغیرهای مستقل به نرم‌افزار جین‌اکس پروتولز وارد شدند. به‌کمک نرم‌افزار مذکور به تفکیک سازند براساس داده‌های چاه A مدل ریاضی برای پیش‌بینی گرادیان شکست سازند به‌دست آمد (روابط ۶ و ۷). در نرم‌افزار مذکور فرآیند آموزش با استفاده از ۷۵٪ داده‌های چاه A و فرآیند آزمایش نیز با ۲۵٪ باقی‌مانده انجام شد.

مدل ریاضی گرادیان شکست برای سازند کنگان:

$$G_f = \mu + \left[\frac{P_p^{2/3}}{\sigma_{ob}^2 (\mu + \sigma_{ob})} \right] + \left[\exp(-7 / 798 \times \mu^{1/3}) \times (\sqrt{\mu} + (\sigma_{ob} + P_p)) \right] - (\sigma_{ob}^3 \times (P_p - \sigma_{ob})^3)^3 \quad (6)$$

P_{np} (psi/ft) گرادیان هیدرواستاتیکی نرمال برحسب Δt_n (psi/ft) زمان عبور صوت از شیل در شرایط فشار نرمال حاصل از سیر نرمال گراف سرعت عبور براساس عمق برحسب Δt $\mu\text{s/ft}$ زمان عبور صوتی امواج تراکمی برحسب $\mu\text{s/ft}$ و X مقدار ثابت نمایی که برابر ۰/۵ است [۱۳-۱۵]. فشار هیدرواستاتیک نرمال با توجه به شوری و نوع سیال سازندی متفاوت است. با توجه به مطالعات انجام شده در خاورمیانه و شوری آب منطقه، مقدار گرادیان فشار هیدرواستاتیک نرمال psi/ft ۰/۴۶۴ در نظر گرفته شده است [۱۷ و ۱۸]. مقدار گرادیان فشار روباره در عمق مورد نظر نیز براساس رابطه ۲ قابل محاسبه می‌باشد.

$$\sigma_{ob} = 0.433 \times \rho_b \quad (2)$$

در رابطه ۲ ρ_b نشان‌دهنده چگالی توده‌ای سنگ و برحسب g/cm^3 است. مقدار گرادیان فشار روباره در ناحیه مورد مطالعه حدود psi/ft ۱ تخمین زده شد. سیر تغییرات زمان عبور نرمال صوت نسبت به عمق را می‌توان به‌صورت رابطه ۳ بیان کرد [۱۵ و ۱۷]:

$$\Delta t_n = \Delta t_m + (\Delta t_{ml} - \Delta t_m) e^{-cz} \quad (3)$$

در رابطه ۳ Δt_n زمان عبور نرمال صوت برحسب $\mu\text{s/ft}$ ، Δt_m زمان عبور صوت امواج تراکمی در ماتریکس شیل با تخلخل صفر برحسب $\mu\text{s/ft}$ ، Δt_{ml} زمان عبور صوت در سطح برحسب $\mu\text{s/ft}$ ، c ثابت تجربی و Z عمق برحسب (m) می‌باشد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده در خاورمیانه و حوزه خلیج فارس در مخازن کربناته، سرعت در سطح در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ m/s و زمان عبور صوت در سطح Δt_{ml} به‌طور میانگین $\mu\text{s/ft}$ ۱۸۵ در نظر گرفته شده و مقدار زمان سیر Δt_{ml} براساس معیارهای بررسی حالت و همکاران حدود $\mu\text{s/ft}$ ۵۰ در نظر گرفته شد. ثابت c با برازش نمودار خط روند نرمال زمان عبور امواج صوتی به‌دست می‌آید [۱۵ و ۱۸]. مقدار ثابت با توجه به مطالعات ایتون

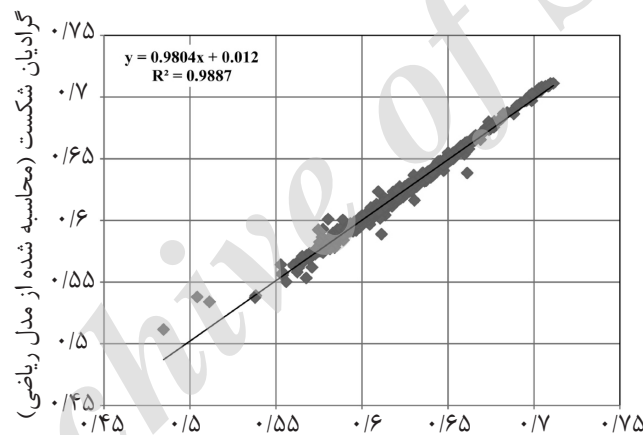
نتایج و بحث

داده‌های مورد استفاده برای توسعه مدل‌ها شامل ۴۳۰۰ داده از چاه A در دو سازند هیدروکربوری کنگان و دالان بالایی است. اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی به‌دست آمده با استفاده از حدود ۶۰۰۰ داده چاه‌پیمایی از چاه B در مجاورت چاه A در همان سازند انجام شد. شکل‌های ۶ و ۷ اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست آمده با استفاده از داده‌های چاه B در مقایسه با مقادیر محاسبه شده از مدل ایتون را نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی اختلاف بین گرادیان شکست پیش‌بینی شده از مدل ایتون با مقادیر به‌دست آمده از مدل‌های ریاضی به تفکیک سازند برای چاه B مقایسه گردیده است.

مدل ریاضی گرادیان شکست برای سازند دالان بالایی:

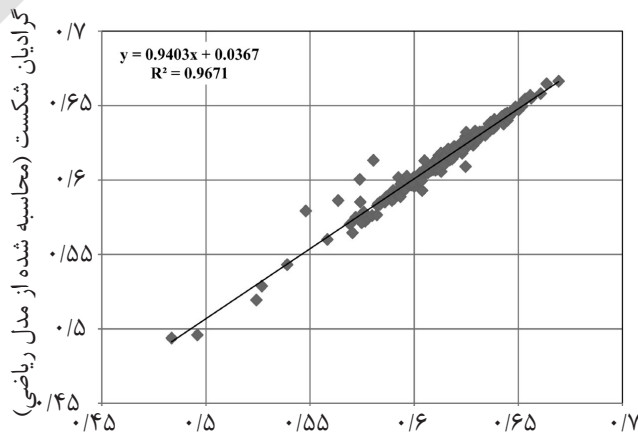
$$G_f = \mu + \frac{\mu^2 \times (\sigma_{ob} - \mu)}{\sigma_{ob}} + \sqrt{(\mu^3 + 6.09) \times (\sigma_{ob} \times P_p)} - (\log(\sigma_{ob} \sqrt{P_p}) + 1.66 \times \sigma_{ob} \times \mu) \quad (7)$$

در اشکال ۲ تا ۵ نمودارهای مربوط به مقایسه مقادیر گرادیان شکست پیش‌بینی شده توسعه مدل‌های ریاضی با مقادیر روش ایتون در مرحله آموزش و آزمایش برای دوسازند کنگان و دالان بالایی در چاه A نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز نتایج آماری مربوط به گرادیان شکست دو سازند کنگان و دالان بالایی برای چاه A بیان گردیده است.



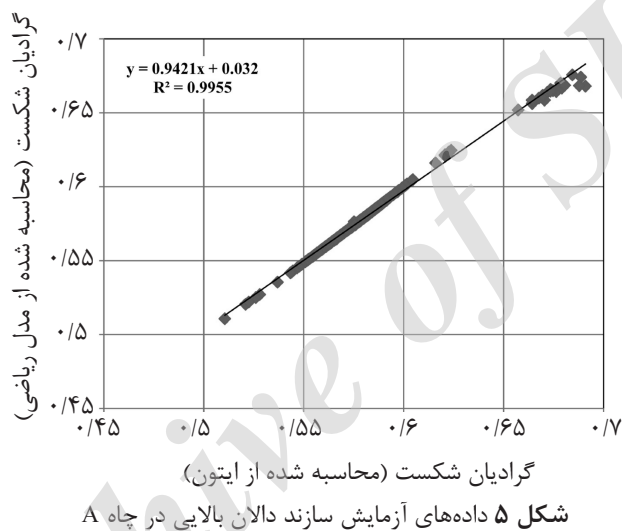
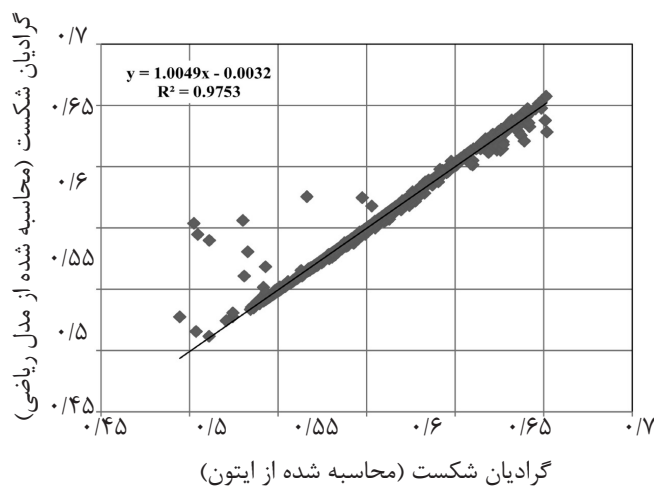
گرادیان شکست (محاسبه شده از ایتون)

شکل ۲ داده‌های آموزش در سازند کنگان در چاه A



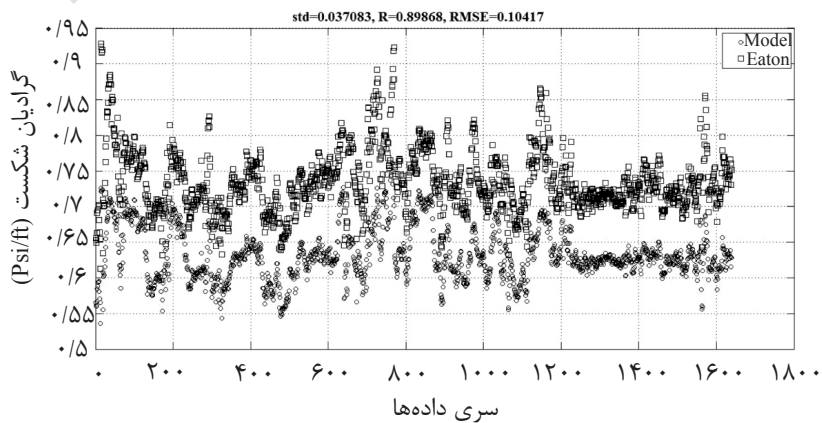
گرادیان شکست (محاسبه شده از ایتون)

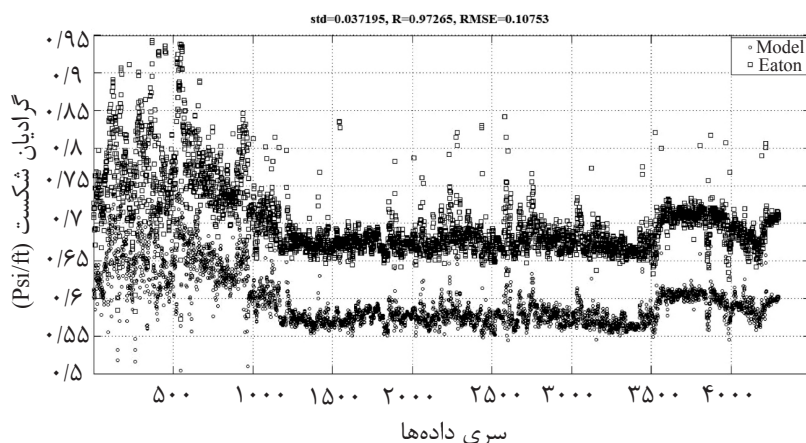
شکل ۳ داده‌های آزمایش سازند کنگان در چاه A



جدول ۱ شاخص‌های آماری در فاز آموزش و آزمایش در چاه A برای پیش‌بینی گرادیان شکست

RMSE		R ²		نام سازند
آزمایش	آموزش	آزمایش	آموزش	
۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۹۶۷	۰/۹۸۸	کنگان
۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۹۹۵	۰/۹۷۵	دالان بالایی





شکل ۷ اعتبارسنجی مدل ریاضی سازند دالان بالایی با استفاده از داده‌های چاه B

بالایی انحراف معیار $0/037$ ، ضریب همبستگی $0/972$ و ضریب تعیین $0/946$ به دست آمد. به علاوه سیر تغییرات در مدل‌های مذکور با ایتون نیز تا حدودی بسیار زیادی همپوشانی دارد.

۳- از نتایج این تحقیق می‌توان برای برنامه‌ریزی و طراحی چاه‌های نفت و گاز در توسعه میدان مورد نظر استفاده کرد.

۴- در این تحقیق روشی جدید و کاربردی برای پیش‌بینی گرادیان شکست سازند به کار برده شد که می‌توان از آن برای مدل‌سازی بسیاری دیگر از مسائل پیچیده در حوزه صنعت نفت و گاز به‌ویژه در حوزه بالادستی استفاده شود. روش چپ محدودیتی در تعداد پارامترهای ورودی ندارند که این ویژگی مثبت بسیار مهمی در مقایسه با سایر روش‌ها به‌شمار می‌آید.

علائم و نشانه‌ها

Δt_m : زمان عبور صوت امواج تراکمی برحسب $(\mu s/ft)$

Δt_n : زمان عبور صوت در شیل برحسب $(\mu s/ft)$

Δt_{ml} : زمان عبور صوت در سطح برحسب $(\mu s/ft)$

V_s : سرعت امواج برشی برحسب $(\mu s/ft)$

V_c : سرعت امواج تراکمی برحسب $(\mu s/ft)$

μ : ضریب پواسون (بدون بعد)

در سازند کنگان مقدار انحراف معیار $0/037$ ، ضریب همبستگی $0/898$ و ضریب تعیین $0/807$ به دست آمد و همچنین سازند دالان بالایی دارای انحراف معیار $0/037$ ، ضریب همبستگی $0/972$ و ضریب تعیین $0/946$ است. آنالیز آماری و شکل‌های مذکور نشان‌دهنده هم‌پوشانی بسیار خوب بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریاضی و مقادیر محاسبه شده از مدل ایتون است که این امر حاکی از مناسب بودن مدل‌ها برای تعیین گرادیان شکست در این سازند است.

نتیجه‌گیری

۱- در این مطالعه با استفاده از ۴۳۰۰ داده از چاه A در سازندهای کنگان و دالان بالایی به‌طور جداگانه مدل‌های ریاضی برای تعیین گرادیان شکست سازند با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (چپ) توسعه پیدا نمود. نتایج نشان می‌دهد که در چاه A ضریب تعیین برای مراحل آموزش و آزمایش در سازند کنگان به ترتیب $0/988$ و $0/967$ و برای دالان بالایی نیز $0/975$ و $0/995$ است.

۲- برای اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از ۶۰۰۰ داده از چاه B مقدار اختلاف گرادیان شکست محاسبه شده با روش ایتون و مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌ها مقایسه شد که در سازند کنگان انحراف معیار $0/037$ ، ضریب همبستگی $0/898$ و ضریب تعیین $0/807$ و همچنین در سازند دالان

1. Standard Deviation (STV)
2. Correlation of Coefficient (R)
3. Determination of Coefficient (R²)

σ_{ob} : گرادیان فشار روباره برحسب (psi/ft)	G_f : گرادیان فشار شکست برحسب (psi/ft)
ρ_b : چگالی توده‌ای سنگ برحسب (g/cm ³)	Z : عمق برحسب (m)
	P_p : گرادیان فشار منفذی برحسب (psi/ft)

مراجع

- [1]. Rabia H., "Well Engineering & Construction," U.K, 2002.
- [2]. Hossain M. E. and Al-Majed A. A., "Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering," Wiley-Scrivener, 1st ed., Massachusetts, U.S.A, PP.251-319, 2015, DOI: 10.1002/9781119100300.
- [3]. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S., "Applied Drilling Engineering," First Printing, SPE, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, 1986.
- [4]. Hubbert M. K. and Willis D. G., "Mechanics of hydraulic fracturing," Journal of Petroleum Technology, pp.153-168, 1957.
- [5]. Mathews W. R. and Kelly J., "How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs," Journal Oil and Gas, Feb.20, 1967.
- [6]. Eaton B. A., "Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations," JPT, 1353-60, Trans., AIME, 1969.
- [7]. Anderson, R. A., Ingram, D. S. and Zanier, A. M., "Determining fracture pressure gradients from well logs," Journal of Petroleum Technology, SPE 4135 paper presented, Vol. 25, Issue 11, 1973
- [8]. Sadiq T. and Nashawi I. S., "Using neural networks for prediction formation fracture gradient," SPE/Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary, Alberta, Canada, 2000.
- [9]. Nashawi I. S. and Malallah A., "Predicting the formation fracture gradient of middle east reservoirs using non-parametric optimal transformation," SPE, Society of Petroleum Engineers, Middle East Oil & Gas Conference International Exhibition Manama, Bahrain, 12–15 March, 2005
- [10]. Halomoan B. T., Corina A. N., Arimbawa G. V., Aristya R., Purwito S. and Hardama A. F., "A new approaching method to estimate fracture gradient by correcting mathews-kelly and eaton stress ratio," Elsevier, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 7, pp. 261-267, 2015.
- [11]. Whitley D., "A genetic algorithm tutorial: statistics and computing," pp. 65–85, DOI: 10.1007/BF00175354, 1994.
- [12]. Koza J. R., "Survey of genetic algorithms and genetic programming," International Conference in San Francisco, USA, Nov. 7-9, 1995.
- [13]. Ferreira C., "Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems," Complex Systems, Vol.13, pp. 87–129, 2001.
- [14]. Ferreira C., "Gene expression programming (mathematical modeling by an artificial intelligence)," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (Second, revised and extended edition), pp. 55-56, 2006.
- [15]. Azadpour M. and Shadmanaamen N., "Prediction and modeling the mud weight window using well-logging data at one of the Iranian South gas field," Journal of Petroleum Research, Vol. 26 , No. 87-2, pp.157-166, 2014.

- [16]. Eaton B. A., "The equation for geopressure prediction from well logs," Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers, AIME, 1975.
- [17]. Azadpour M., Manaman N. S., Kadkhodaie-Ilkhchi A. and Sadghipour M. R., "Pore pressure prediction and modeling using well-Logging data in one of the gas fields in South of Iran," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 128, pp. 15-23 pp.16-18, April 2015.
- [18]. Atashbari V. and Tingay M. R., "Pore pressure prediction in carbonate reservoirs," SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, 2012.
- [19]. Zhang J., "Pore pressure prediction from well logs: methods, modifications, and new approaches," Earth-Science Reviews, Vol. 108, pp. 50-63, 2011.
- [20]. Holt R., Fjaer E. and Rzayev E., "P-and S-wave velocities in shales: experiments and a model," 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS), Gulf Rocks, 2004.
- [21]. Hughes B., "Formation pressure evaluation," Houston, USA, 1993.

Archive of SID