

# پیش بینی و مدل سازی پنجره ایمن وزن گل حفاری بر اساس اطلاعات چاه پیمایی در یکی از میادین گازی جنوب ایران

مرتضی آزادپور\* و نوید شادمنامن

گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۳

## چکیده

گرادیان فشار شکست و فشار منفذی از جمله پارامترهای کلیدی در بحث مدل های مکانیکی زمین به شمار می روند. اطلاع از مقدار این فشارهای تحت الارضی می تواند کمک شایانی در برنامه ریزی ایمن، صرفه جویی اقتصادی و مدل سازی کارآمد مخزن داشته باشد. هدف اصلی این مطالعه، تعیین پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از اطلاعات چاه پیمایی به منظور جلوگیری از شکست سازند و هرزروی گل در یکی از میادین گازی جنوب ایران است. حد بالای پنجره ایمن گل حفاری به فشار شکست سازند و حد پایین پنجره به فشار منفذی یا فشار سازند معروف است. در این مطالعه، از رابطه ایتون (Eaton) به منظور تخمین فشار منفذی استفاده شده است. سپس با بهره گیری از نسبت پواسون و فشار منفذی تخمین زده شده، مقدار فشار شکست محاسبه و پنجره ایمن گل حفاری تعیین می شود. در نهایت مدل فشار منفذی و فشار شکست سازند، به کمک نرم افزار (Petrel) و بر اساس مدل سازی زمین آماری برای کل میدان تهیه شده است. اعتبار مدل به دست آمده توسط اطلاعات یکی از چاه ها که در مدل سازی استفاده نشده بود، مورد ارزیابی قرار گرفت که حاکی از مناسب بودن مدل تخمین زده شده به منظور برنامه ریزی حفاری است.

**کلمات کلیدی:** پنجره ایمن گل حفاری، فشار شکست، فشار منفذی، نسبت پواسون، مدل سازی زمین آماری

## مقدمه

مقادیر فشار منفذی و فشار شکست سازند که حد بالا و پایین پنجره ایمن سیال حفاری را تشکیل می دهند، منجر به انتخاب مناسب نقاط تعبیه لوله جدار، طراحی بهینه لوله های جدار، تعیین بهترین مسیر حفاری، جلوگیری از ناپایداری دیواره چاه، جلوگیری از هرزروی سیال حفاری و خطرات ناشی از فوران چاه می شود.

ارزیابی دقیق مقادیر فشارهای تحت الارضی اساس برنامه ریزی در حفاری چاه است. درک درستی از

\*مسئول مکاتبات

m.azadpour@aut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

است. از این رو چگالی معادل گردش گل<sup>۱</sup> به صورت زیر بیان می‌شود:

$$ECD = MW + \frac{\sum APL}{0.052 \cdot TVD} \quad (1)$$

در رابطه بالا، ECD چگالی معادل گردش گل (ppg)، MW وزن گل حفاری (ppg)، APL افت فشار فضای حلقوی<sup>۲</sup> (psi) و TVD عمق عمودی (ft) است [۲]. لازم به ذکر است چگالی گل حفاری در طول گردش گل ثابت نمی‌ماند به عنوان مثال وزن خرده‌های حمل شده در فضای حلقوی باعث افزایش اثر چگالی گل حفاری می‌شود. از طرف دیگر ورود گاز یا هوا از طریق سازند به درون سیال حفاری می‌تواند باعث کاهش چگالی گل حفاری شود. در طول عملیات حفاری بعد از هر ۳۰ فوت حفاری نیاز به اضافه کردن یک لوله حفاری است. برای این کار، رشته حفاری بایست چند متر بالا آورده شود که این می‌تواند باعث مکیده شدن گاز به زیر مجموعه ته چاهی شود. از طرف دیگر در این زمان رشته حفاری در سطح زمین از هوا پر می‌شود. زمانی که گل به داخل رشته حفاری پمپ می‌شود، با گاز یا هوا مخلوط شده و در نتیجه چگالی گل حفاری کاهش می‌یابد [۳].

فشار وارده بر دیواره چاه بیشتر در بازه بین فشار منفذی و فشار شکست قرار داده می‌شود که این بازه تحت عنوان پنجره ایمن گل حفاری شناخته می‌شود. در برخی موارد فشار اعمالی به دیواره چاه را خارج از این بازه انتخاب می‌کنند. مثلاً در سازندهای هرزپذیر و دارای نفوذپذیری زیاد، وزن گل را زیر فشار منفذی انتخاب می‌کنند تا از خطرات ناشی از هرزروی جلوگیری شود. به طور کلی، اگر

فشار منفذی<sup>۱</sup> به فشار سیال درون حفرات سنگ گفته می‌شود که از کمیت‌های مهم در بحث اکتشاف و حفاری منابع هیدروکربنی است و می‌توان آن را از طریق محاسبه تفاضل فشار مؤثر<sup>۳</sup> (فشار وارده بر ساختار سنگ) از فشار روباره<sup>۴</sup> (فشار ناشی از وزن لایه‌ها و سیال درون آن‌ها در قسمت‌های بالایی عمق) به دست آورد. این رابطه به عنوان رابطه ترزاقی شناخته شده است. بر اساس اصل ترزاقی، فشار روباره که ناشی از مجموع وزن ماتریکس سنگ و سیال درون حفرات سنگ است، به فشار مؤثر (تنش ماتریکس) و فشار منفذی سازند تقسیم می‌شود. در واقع در هر عمق، بخشی از فشار روباره (فشار لیتواستاتیک) توسط فشار منفذی و بخش باقیمانده توسط تماس بین ذرات (فشار مؤثر) مقابله می‌شود [۱].

فشار شکست<sup>۴</sup> به حد بالایی تحمل سنگ‌های تشکیل‌دهنده دیواره چاه در مقابل فشار وارده به آن گفته می‌شود. فشار وارد شونده بر دیواره چاه متشکل از عوامل مختلفی از جمله چگالی گل، ارتفاع عمودی ستون گل، خرده‌های حمل شده، افت فشار ناشی از راندن و خارج کردن<sup>۵</sup> لوله حفاری و ورود سیالات دیگر مانند گاز، هوا، نفت یا آب است. این فشار بر حسب واحد psi یا psi/ft نشان داده می‌شود.

در شرایط ایستا، فشار گل حفاری به شکل هیدرواستاتیک و ناشی از چگالی و ارتفاع عمودی ستون سیال است. در زمان گردش گل حفاری، به دلیل اصطکاک بین گل با اجزای سیستم گردش شامل لوله‌های سطحی، رشته حفاری، جت‌نازل‌ها<sup>۶</sup> و فضای حلقوی، نیاز به اعمال فشار توسط پمپ است. فشار تولیدشده توسط پمپ معمولاً معادل مجموع افت فشار ناشی از اصطکاک در هر یک از بخش‌های فوق است. از آنجا که فشار جبرانی مربوط به اصطکاک فضای حلقوی در ارتباط با سازندهای اطراف قرار می‌گیرد، فشار اعمالی به دیواره چاه در حالت گردش گل کمی بیشتر از حالت استاتیک

1. Pore Pressurer
2. Effective Pressure
3. Overburden Pressure
4. Fracture Pressure
5. Surge & Swab
6. Static
7. Jet Nozzles
8. Equivalent Circulating Density
9. Annular Pressure Loss

بر اساس نتایج مطالعات گذشته بر روی سازندهای کربناته، در لایه‌های کربناته با میان لایه‌های شیلی یا همان آهک‌های آرژیلیتی استفاده از روش ایتون قابل تعمیم است [۵ و ۶]. همچنین در قسمت‌هایی از لایه‌های کربناته که دارای سیستم شکستگی بالایی می‌باشند و از این جهت دارای تراوایی و تخلخل مناسب هستند، چگالی سیال در فضای منفذی این لایه‌ها در ارتباط با فشار تخمین زده شده در لایه‌های مجاور قرار می‌گیرد [۷].

در واقع روش ایتون، نسخه اصلاح شده روش عمق معادل هاتمن و جانسون است که در سال ۱۹۶۵ ارائه شد [۸]. هر دو روش استناد به این فرض دارند که فشار روباره (S) وابسته به فشار منفذی (P) و تنش مؤثر عمودی ( $\sigma$ ) است که توسط رابطه ترزاقی ارائه شد [۱]:

$$P = S - \sigma \quad (2)$$

تعیین فشار شکست در تحلیل پایداری چاه و طراحی شکست هیدرولیکی مخزن به منظور افزایش ضریب ایمنی و نرخ تولید چاه بسیار مهم و تأثیرگذار است. آزمایش نشست سازند<sup>۲</sup> دقیق ترین روش در اندازه‌گیری مستقیم فشار شکست سازند است. در میدانی که این آزمایش صورت نگرفته، می‌توان از روش‌های تحلیلی و تجربی برای تعیین فشار شکست سازند استفاده کرد. یکی از این روش‌ها استفاده از رابطه فشار شکست ایتون است که این رابطه از پارامترهای فشار منفذی، فشار روباره و نسبت پواسون استفاده می‌کند. فشار محاسبه شده، حد بالایی پنجره ایمن گل محسوب می‌شود به طوری که فشار گل حفاری درون چاه نباید از این مقدار تجاوز کند.

پس از تعیین فشارهای منفذی و شکست سازند که بیانگر حدود پنجره ایمن گل حفاری هستند، نتایج کار با وزن گل به کار رفته در زمان حفاری ارزیابی می‌شود.

فشار وارده بر دیواره چاه کم‌تر از فشار سازند باشد، این اجازه به سیالات سازند داده می‌شود که به درون چاه شارش کنند و اگر فشار وارده بر دیواره چاه بیشتر از فشار سازند باشد، امکان ایجاد درز و شکاف در سنگ دیواره چاه و در نتیجه هرزروی سیال حفاری به درون سازند وجود دارد. گاه‌گاهی دیده شده که هرزروی به صورت کامل<sup>۱</sup> صورت گرفته و باعث از دست داد کامل چاه شده است. حفاری در هر دو حالت، با مشکل روبرو می‌شود که برای عملیات و شرکت‌های حفاری امری خطرناک است.

## روش کار

به منظور تعیین حد بالا و پایین پنجره ایمن گل حفاری می‌بایست مقادیر فشار منفذی و فشار شکست سازند که بیانگر این حدود هستند، تخمین زده شوند. در تخمین فشار منفذی، از ویژگی‌های سازند مانند فشردگی، تخلخل و حرکت سیال استفاده می‌شود. هرگونه تغییر در فشار منفذی طبیعی در یک ناحیه زمین‌شناسی منجر به تغییر در برخی از این ویژگی‌ها می‌شود. بنابراین، هر نوع پارامتر قابل اندازه‌گیری که به نحوی بتواند این تغییرات را نشان دهد، می‌تواند به منظور ارزیابی کمی فشار منفذی سازند مورد استفاده قرار گیرد [۴].

روش ایتون از معتبرترین روش‌های تعیین مقدار فشار منفذی است. ایتون در مطالعه خود بر روی لایه‌های شیلی، عدم تحکیم کافی لایه‌ها را به عنوان عامل ایجاد فشار غیر نرمال در نظر گرفت. در این روش، از یک مقدار نمایی مشخص شده برای منطقه، در فرمول تجربی استفاده می‌شود. مطالعات ایتون منجر به ارائه چهار فرمول جهت پیش‌بینی فشار منفذی بر اساس داده‌های چاه پیمایی و حفاری، از قبیل نمودارهای مقاومت، هدایت الکتریکی، زمان سیر موج سونیک و d-exponent (ضریب نمایی مربوط به حفاری سازند) گردید.

1. Completely Lost

2. Leak-off Test

## زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه و پردازش داده‌ها

نمودارهای پتروفیزیکی و داده‌هایی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مربوط به یکی از میادین گازی جنوب ایران می‌باشند. به طور عمده بازه‌های مخزنی در این میدان شامل سازندهای کنگان و بخش بالایی سازند دالان می‌شوند. در نام‌گذاری عربی، سازند کنگان و دالان در مجموع تحت عنوان سازند خوف شناخته می‌شوند. سازند خوف به پنج لایه K1 تا K5 تقسیم می‌شود که در آن، لایه‌های K1 و K2 معادل کنگان و لایه‌های K3 و K4 معادل دالان بالایی هستند. K5 معادل دالان پایینی و بخش نار است. از نظر زمین‌شناسی، لایه‌های مخزنی در سازندهای دالان و کنگان دارای سن پرمین بالایی تا تریاس پایینی می‌باشند و از دیدگاه سنگ‌شناسی شامل سنگ آهک، انیدریت، دولومیت و ایلیت هستند.

فشارهای ثبت‌شده در منطقه توسط آزمایش<sup>۱</sup> MDT اندازه‌گیری شده است. در تمام چاه‌های منطقه، نمودارهای معمول چاه‌پیمایی شامل نمودار چگالی، زمان عبور امواج تراکمی، گاما و تخلخل ثبت شده است. همچنین در تعدادی از چاه‌ها، علاوه بر اطلاعات بالا، نمودار زمان عبور امواج برشی نیز موجود است. لازم به ذکر است که عمق مشترک نمودارهای چاه‌پیمایی ثبت‌شده شامل سطح بالایی K1 تا سطح بالایی نار است. در این مطالعه از اطلاعات نمودار چاه‌پیمایی ۱۰ چاه با پراکندگی نسبتاً زیاد استفاده شده است که از این تعداد تنها ۳ چاه علاوه بر اطلاعات چاه‌پیمایی دارای اطلاعات نتایج فشار MDT و اطلاعات وزن گل حفاری نیز بوده‌اند.

اطلاعات حاصل از نمودارهای چاه‌پیمایی موجود برای تعیین فشار منفذی بر اساس روش ایتون مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور استفاده از اطلاعات چاه‌پیمایی، ابتدا می‌بایست این اطلاعات را نسبت به اثرات محیطی مانند اثر ریزش دیواره چاه، دمای

سازند، شوری گل و اثر کیک گل دیواره چاه، تصحیح کرد. عوامل ذکرشده، در قرائت دستگاه اندازه‌گیری تأثیرگذار هستند. به منظور تصحیح اثرات محیطی از مازول تصحیح نرم‌افزار ژئولاگ استفاده شد. همچنین به منظور بررسی اثر گاز بر روی نمودار زمان عبور صوت، نتایج مطالعات اندرسون مبنای کار قرار گرفت [۹]. بر این اساس، اثر گاز بر روی نمودارهای زمان عبور امواج تراکمی با افزایش اشباع گاز افزایش می‌یابد اما این موضوع در مورد امواج برشی ناچیز است. از این رو، به منظور اطمینان از تصحیح اثر گاز، نمودار زمان عبور امواج برشی در مقابل زمان عبور امواج تراکمی در دو ناحیه آبی و گازی با خصوصیات سنگ‌شناسی یکسان رسم شد. انطباق خط روند در هر دو محیط، بیانگر عدم نیاز به تصحیح گاز در نمودار زمان عبور امواج تراکمی است (شکل ۱-الف). همچنین، به منظور حذف اثر تغییرات محلی شدید و هموارسازی داده‌ها، از روش میانگین‌گیری RMS<sup>۲</sup> استفاده شد. به عنوان مثال شکل ۱-ب کاربرد این تصحیح را برای داده‌های زمان عبور امواج تراکمی نشان می‌دهد.

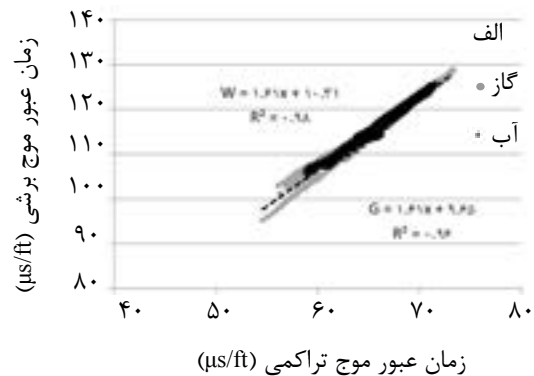
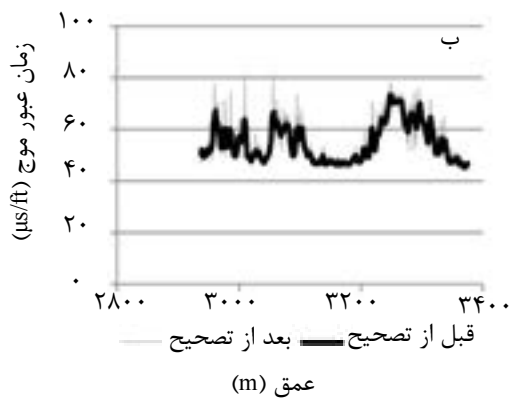
## نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد، روش ایتون از رایج‌ترین روش‌ها در تعیین مقدار فشار منفذی است. به منظور تعیین مقدار فشار منفذی به کمک روش ایتون، ابتدا باید تغییرات پارامترهای مختلف پتروفیزیکی وابسته به تخلخل مانند زمان عبور صوت، چگالی و غیره در شیل یا لایه‌های شیلی مثل آهک‌های آرژیلیتی دارای فشار نرمال، در عمق تحقیق بررسی و سپس خط روند طبیعی بر اساس این لایه‌ها تعیین شود. در زیر رابطه ایتون بر اساس زمان سیر موج سونیک نشان داده شده است [۱۰].

$$P = S - \left[ (S - P_s) \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

1. Modular Formation Dynamics Tester

2. Root Mean Square



شکل ۱ الف) بررسی اثر گاز در ناحیه آبی و گازی. ب) تصحیح داده‌های زمان عبور امواج تراکمی قبل و بعد از تصحیح.

در رابطه بالا  $P_n$  فشار هیدرواستاتیک نرمال،  $P$  مقدار فشار منفذی واقعی در هر عمق و  $S$  مقدار فشار روباره در عمق تحقیق است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = 0.433 \times \rho_b \times Z \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $S$  فشار روباره بر حسب  $\rho_b$  چگالی توده‌ای سنگ بر حسب  $gr/cm^3$  و  $Z$  عمق بر حسب متر است. از آنجا که نمودار چگالی در چاه مورد مطالعه تنها در ناحیه مخزنی گرفته شده، لذا مقدار چگالی در نواحی دیگر به طور میانگین  $2/31 gr/cm^3$  در نظر گرفته شد. بر اساس رابطه فوق، مقدار گرادیان فشار روباره در ناحیه مورد مطالعه حدود  $1 psi/ft$  تخمین زده شد.

در رابطه بالا  $P_n$  فشار هیدرواستاتیک نرمال،  $P$  مقدار فشار منفذی واقعی در هر عمق و  $S$  مقدار فشار روباره در عمق تحقیق است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = 0.433 \times \rho_b \times Z \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $S$  فشار روباره بر حسب  $\rho_b$  چگالی توده‌ای سنگ بر حسب  $gr/cm^3$  و  $Z$  عمق بر حسب متر است. از آنجا که نمودار چگالی در چاه مورد مطالعه تنها در ناحیه مخزنی گرفته شده، لذا مقدار چگالی در نواحی دیگر به طور میانگین  $2/31 gr/cm^3$  در نظر گرفته شد. بر اساس رابطه فوق، مقدار گرادیان فشار روباره در ناحیه مورد مطالعه حدود  $1 psi/ft$  تخمین زده شد.

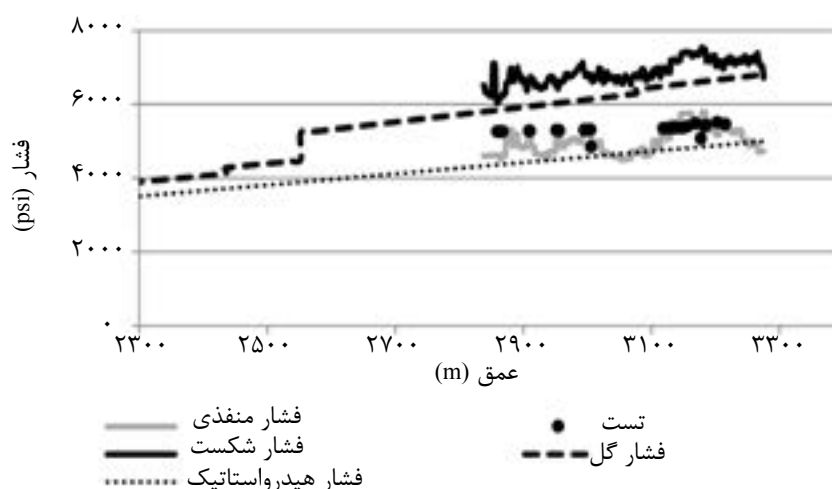
بر اساس اطلاعات حفاری، فشار گل مورد استفاده تا عمق حدود  $2600 m$  در شرایط نزدیک به فشار هیدرواستاتیک نرمال است (شکل ۲)، از این رو می‌توان گفت که لایه‌های شیلی بالاتر از این عمق دارای فشار نرمال هستند و می‌تواند جهت برآزش نمودار روند نرمال در رابطه ایتون مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین لایه‌های شیلی با فشار نرمال در بازه  $1000$  تا  $2600 m$  که دارای اطلاعات چاه‌پیمایی نیز می‌باشند، جهت فرمول ایتون و برآزش نمودار خط روند نرمال انتخاب شده است. این لایه‌ها شامل بخش‌های شیلی لایه‌های: احمدی (سرروک)، هوار (داریان)، خلیج (گدوان)، سورمه پایینی، نیریز و سودیر بالایی (دشتک) است. این لایه‌ها در شکل ۲ با نقاط مشکی مشخص شده‌اند. خط روند نرمال با توجه به معادله ۵ و منطبق بر نقاط شیلی دارای فشار نرمال در بالای عمق  $2600 m$  رسم شد (شکل ۳).

فشار هیدرواستاتیک نرمال با توجه به درصد شوری و نوع سیال سازند متفاوت است. ایتون بازه مقدار گرادیان فشار هیدرواستاتیک را بین  $0/433 - 0/465 psi/ft$  در نظر گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده در خاورمیانه و شوری آب منطقه، مقدار گرادیان فشار هیدرواستاتیک نرمال  $0/464 psi/ft$  در نظر گرفته شد [۱۱].

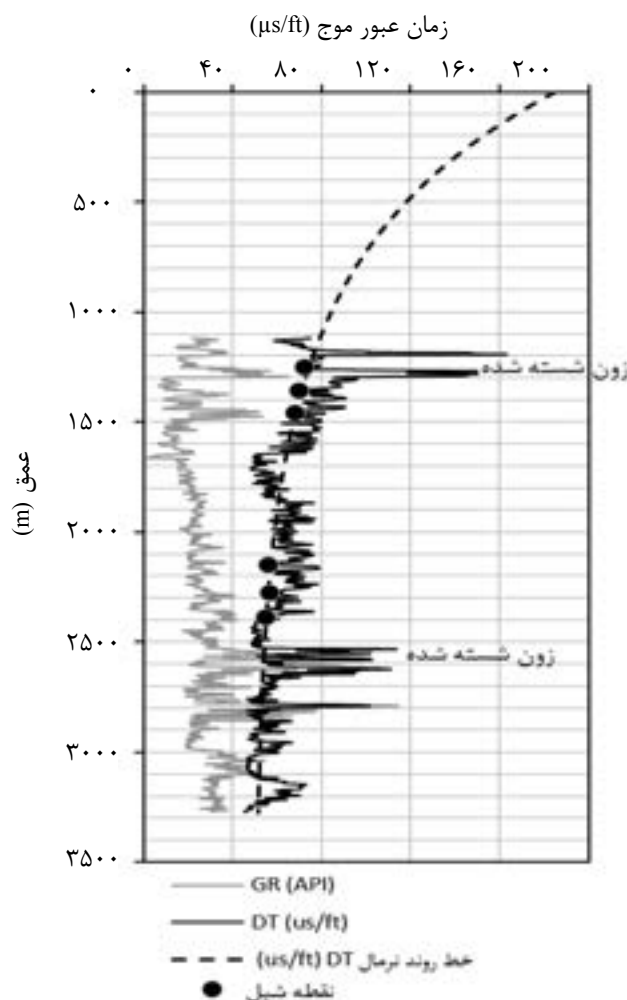
نسبت  $\left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_m}\right)$  در معادله ۳ مقدار زمان عبور صوت در شرایط نرمال به مقدار اندازه‌گیری شده آن در هر عمق را نشان می‌دهد. تعیین خط روند نرمال در روش ایتون اهمیت بسزایی دارد. شکل کلی معادله خط روند نرمال زمان عبور صوت نسبت به عمق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۲]:

$$\Delta t_n = \Delta t_m + (\Delta t_{m1} - \Delta t_m) e^{-cz} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $\Delta t_n$  زمان سیر نرمال امواج سونیک،



شکل ۲ مقایسه بین پنجره ایمن تخمین زده شده توسط روابط ایتون و فشار گل مورد استفاده در حفاری چاه. فشار گل حفاری مورد استفاده در محدوده پنجره ایمن گل حفاری (محدوده بین فشار منفذی و فشار شکست) قرار گرفته است.



شکل ۳ برازش خط روند نرمال زمان عبور امواج سونیک بر لایه های شیلی دارای فشار نرمال.

تنها مجهول باقی مانده برای محاسبه فشار منفذی طبق رابطه ایتون، ثابت نمایی  $x$  است. ایتون در مطالعه خود مقدار  $x$  را ۳ در نظر گرفت ولی این

رابطه زیر معادله خط روند نرمال موج سونیک را نشان می دهد.

$$\Delta t_n = 50 + (185 - 50) e^{-0.00137z} \quad (۶)$$

به تعیین فشار منفذی و نسبت پواسون در کلیه چاه‌های مورد مطالعه است.

مقدار فشار منفذی، بر اساس معادله (۳) برای کلیه چاه‌ها بر حسب عمق محاسبه شده است. به منظور تعیین نسبت پواسون نیاز به اطلاعات سرعت امواج تراکمی و برشی است. اطلاعات نمودار سرعت امواج برشی تنها در سه چاه منطقه موجود است. به همین منظور، با استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از الگوریتم تغذیه پیش‌رونده در نرم‌افزار MATLAB، تخمین سرعت امواج برشی در ۷ چاه باقیمانده انجام شد. داده‌های ورودی به شبکه، شامل نمودارهای GR، NPHI، DT، RHOB می‌باشند و از تعداد ۲۰ نرون در آموزش شبکه استفاده شد. در استفاده از شبکه عصبی برای تخمین سرعت امواج برشی، از هر سه چاه دارای نمودار سرعت امواج برشی در فرآیند آموزش (۷۰٪)، اعتبارسازی (۱۵٪) و آزمایش (۱۵٪) شبکه استفاده شد و شبکه با ضریب همبستگی  $R = 96\%$  ساخته شد. پس از طراحی و آموزش شبکه عصبی، نمودار سرعت امواج برشی در هر چاه تعیین و با استفاده از معادله ۸ مقدار ضریب پواسون در تمامی چاه‌ها محاسبه شد.

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (A)$$

که در آن،  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت امواج تراکمی و سرعت امواج برشی هستند. در نهایت مدل‌های پتروفیزیکی فشار منفذی و نسبت پواسون، به کمک نرم‌افزار Petrel و بر اساس مدل‌سازی زمین‌آمار برای کل میدان تهیه و با توجه به معادله (۷) مدل فشار شکست در میدان مورد مطالعه به دست آمد (شکل ۴). اعتبارسنجی مدل به دست آمده توسط اطلاعات چاه B که در مدل‌سازی استفاده نشده بود، حاکی از مناسب بودن مدل تخمین زده شده جهت برنامه‌ریزی حفاری است (شکل ۵).

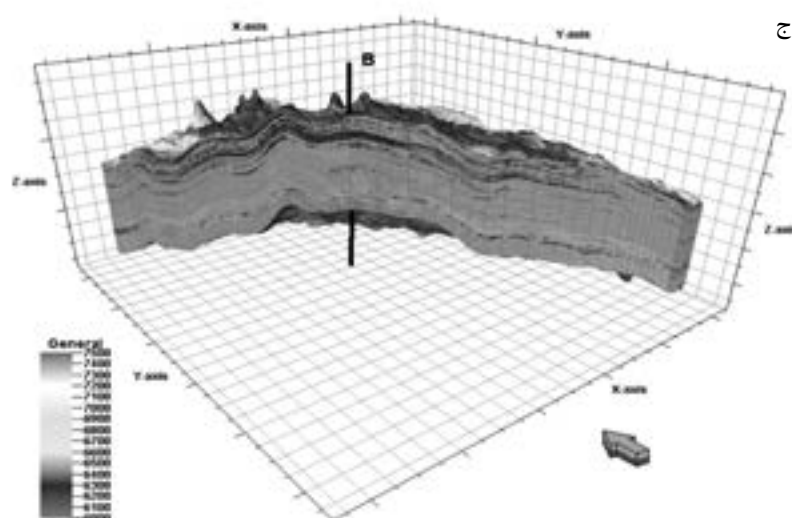
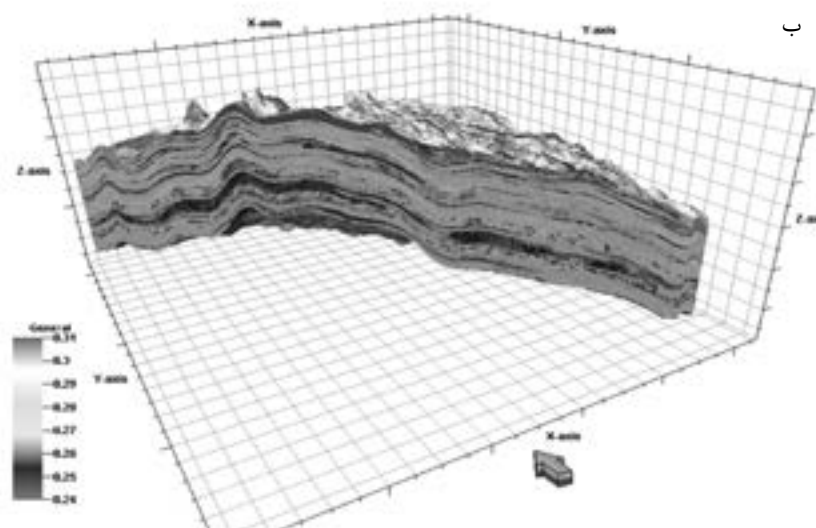
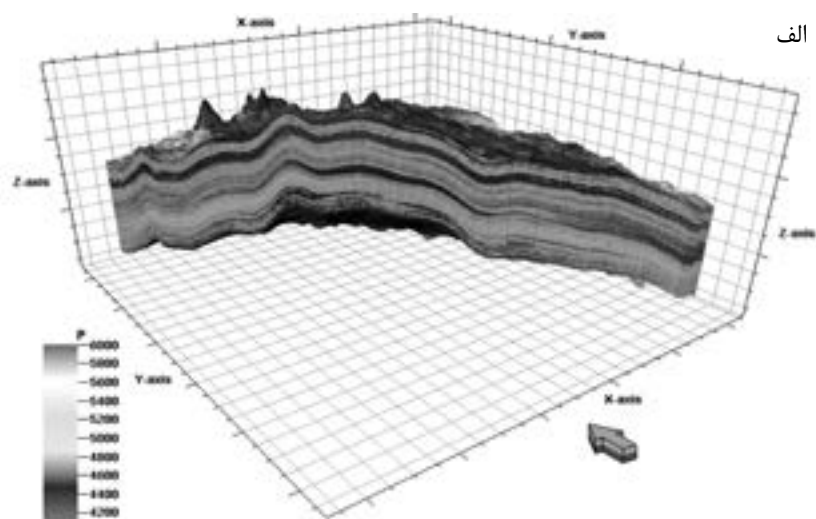
مقدار با توجه به سنگ‌شناسی و نوع مخزن نیاز به تعدیل دارد. به طور مثال، کونرتاس در تعیین فشار منفذی حوضه رسوبی غرب کانادا که دارای ترکیب سنگ‌شناسی ماسه و شیل بود از ثابت نمایی ۱ برای مقدار  $x$  استفاده کردند [۶]. همچنین کدیاروف در تعیین فشار منفذی سنگ‌های کربناته قزاقستان از مقدار  $0.3-0.1$  به عنوان ثابت  $x$  استفاده کردند [۵]. با تصحیح نمودار فشار منفذی به دست آمده بر اساس مقادیر فشار اندازه‌گیری شده MDT، مقدار بهینه ثابت نمایی  $x$  حدود  $0.5$  تعیین شد. با توجه به روابط بالا، نمودار فشار منفذی بر حسب عمق در چاه‌های مورد مطالعه تعیین شد. نتایج حاصل از تخمین فشار توسط رابطه ایتون در چاه A در شکل (۳) نشان داده شده است.

به منظور تعیین فشار شکست بر اساس اطلاعات چاه پیمایی، از رابطه فشار شکست ایتون استفاده شد. این رابطه از پارامترهای فشار منفذی، فشار روباره و نسبت پواسون استفاده می‌کند. فشار محاسبه‌شده، حد بالایی پنجره ایمن گل محسوب می‌شود به طوری که فشار گل حفاری درون چاه نباید از این مقدار تجاوز کند. رابطه ایتون در تعیین فشار شکست به صورت زیر است:

$$F = (S - P) \left( \frac{v}{1 - v} \right) + P \quad (Y)$$

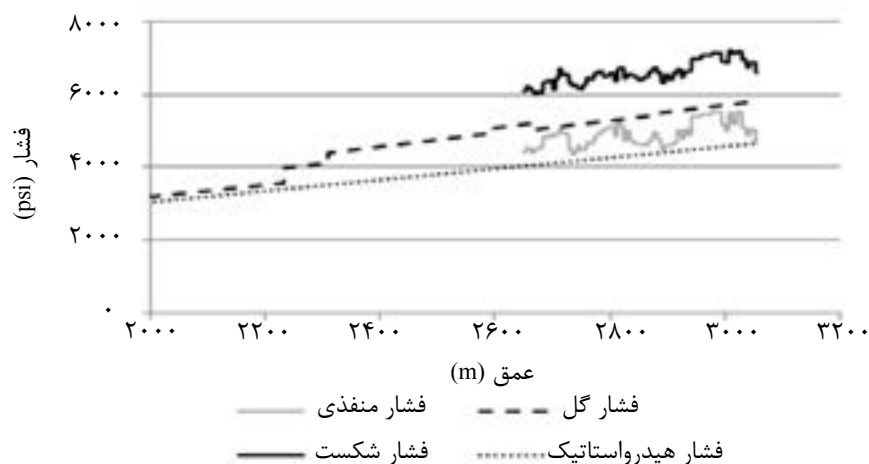
که در آن،  $F$  فشار شکست،  $S$  فشار روباره،  $P$  فشار منفذی و  $v$  نسبت پواسون است که به کمک اطلاعات سرعت امواج تراکمی و برشی محاسبه می‌شود. پس از تعیین فشار شکست، نتایج به دست آمده با فشار گل حفاری مورد استفاده در حفاری چاه A مورد بررسی قرار گرفت. قرار گرفتن فشار گل حفاری مورد استفاده درون پنجره ایمن گل حفاری که محدوده بین فشار منفذی و فشار شکست است (شکل ۳)، حاکی از مناسب بودن تخمین انجام شده است.

جهت مدل‌سازی پنجره ایمن وزن گل حفاری در میدان مورد مطالعه، مطابق معادله (۷) نیاز



شکل ۴ مدل‌های پتروفیزیکی ساخته‌شده توسط نرم‌افزار پترل. الف) مدل فشار منفذی، ب) مدل نسبت پواسون و ج) مدل فشار شکست سازند که بر اساس رابطه ایتون در نرم‌افزار پترل تهیه شده است.





شکل ۵ مقایسه پنجره فشار گل حفاری تخمین زده شده از مدل (ناحیه بین فشار منفذی و فشار شکست) و مقدار فشار گل مورد استفاده در زمان حفاری چاه مورد نظر.

گفت نمودار زمان عبور صوت از بهترین نمودارهای درون چاهی در برآورد فشار منفذی و فشار شکست است. همچنین نمودار سرعت امواج برشی که از مهم ترین نمودارهای درون چاهی جهت محاسبه نسبت پواسون و در نتیجه فشار شکست است را می توان به کمک دیگر نمودارها و روش شبکه های عصبی مصنوعی با تقریب قابل قبولی تخمین زد. تغییرات فشار منفذی، نسبت پواسون و فشار شکست در زون های مختلف میدان مورد مطالعه احتمالاً به دلیل تغییر تخلخل، نوع سیال و چگالی آن ناحیه است. از نتایج این تحقیق می توان در تعیین دقیق پنجره ایمن گل حفاری به منظور طراحی وزن گل بهینه و کاهش خطر حفاری و همچنین انتخاب محل مناسب جهت نصب لوله های جداری در عملیات حفاری در فازهای توسعه میدان استفاده کرد.

#### تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است از واحد پژوهش و توسعه شرکت نفت و گاز پارس (POGC) که اجازه انتشار این مقاله را داده اند سپاسگزاری نمایم. همچنین از کارشناس زمین شناسی شرکت پتروپارس که در مشاوره این تحقیق ما را یاری نموده اند، کمال تشکر را داریم.

#### نتیجه گیری

در این مطالعه، تعیین پارامترهای فشار منفذی، نسبت پواسون و فشار شکست در یکی از میداین گازی جنوب ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین فشار منفذی از رابطه ایتون استفاده شد که این رابطه با ضریب نمایی حدود  $0/5$  تطابق خوبی را با اطلاعات فشار اندازه گیری شده MDT در منطقه مورد مطالعه نشان داد. بر اساس اطلاعات سرعت امواج تراکمی و برشی، مقدار نسبت پواسون تعیین شد و در برخی از چاه ها که فاقد اطلاعات سرعت امواج برشی بودند، این نمودار با استفاده از روش شبکه های عصبی مصنوعی با تقریب قابل قبولی تخمین زده شد. با توجه به فشار منفذی برآورد شده و نسبت پواسون در چاه های منطقه، مدل های پتروفیزیکی فشار منفذی و نسبت پواسون برای کل میدان، به کمک نرم افزار Petrel و بر اساس مدل سازی زمین آماری تهیه گردید و در نهایت، با توجه به رابطه فشار شکست ایتون مدل فشار شکست در میدان مورد مطالعه به دست آمد. ناحیه بین فشار منفذی و فشار شکست محاسبه شده که بیانگر پنجره ایمن فشار گل حفاری است، دارای تطابق خوبی با وزن گل حفاری مورد استفاده در زمان حفاری سازند است. به طور کلی می توان

## علائم و نشانه‌ها

$P_n$ : فشار هیدرواستاتیک (psi)	$c$ : ثابت تجربی معادله خط روند نرمال
$\rho_b$ : چگالی توده‌ای سنگ ( $\text{gr/cm}^3$ )	$\Delta T_m$ : زمان سیر امواج سونیک در ماتریکس شیل ( $\mu\text{s/ft}$ )
$S$ : فشار روباره (psi)	$\Delta T_{ml}$ : زمان سیر امواج سونیک در سطح ( $\mu\text{s/ft}$ )
$\sigma$ : تنش مؤثر عمودی (psi)	$\Delta T_n$ : زمان سیر امواج سونیک در شرایط نرمال ( $\mu\text{s/ft}$ )
$V_p$ : سرعت امواج تراکمی ( $\text{ft/sec}$ )	$\Delta T_o$ : زمان سیر اندازه‌گیری شده امواج سونیک ( $\mu\text{s/ft}$ )
$V_s$ : سرعت امواج برشی ( $\text{ft/sec}$ )	$F$ : فشار شکست (psi)
$x$ : ضریب نمایشی ایتون	$v$ : نسبت پواسون
$Z$ : عمق (m)	$P$ : فشار منفذی (psi)

## منابع

- [1]. Terzaghi K., "Theoretical soil mechanics", 4<sup>th</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2]. Aberdeen Drilling School Ltd., "Well control for the rig-site drilling team", well control training center, 2001.
- [3]. Skalle P., "Pressure control during oil well drilling", 6<sup>th</sup> ed., Ventus Publishing, 2009.
- [4]. Hughes B., "Formation pressure evaluation", 80824 Rev. B, Baker Hughes INTEQ, 1996.
- [5]. Kadyrov T. and Tutuncu A., "Sonic log-derived pore pressure prediction in a west kazakhstan dolomite Field", 74<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012.
- [6]. Contreras O., Tutuncu A. N., Aguilera R. and Harland G., "A case study for pore pressure prediction in an abnormally sub-pressured western Canada sedimentary basin", 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, ARMA, 2011.
- [7]. Knowledge Systems, "Did you know topic: pore pressure estimation in carbonate environments", <http://ks.wholeheatcreative.com/vault-archive.aspx>, 2007.
- [8]. Hottmann C. and Johnson R., "Estimation of formation pressures from log-derived shale properties", Journal of Petroleum Technology, Vol. 17, pp. 717-722, 1965.
- [9]. Anderson R., "Fluid and frequency effects on sonic velocities", SPWLA 25<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, 1984.
- [10]. Eaton B. A., "The equation for geopressure prediction from well logs," Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers, AIME, 1975.
- [11]. Atashbari V. and Tingay M. R., "Pore pressure prediction in carbonate reservoirs," SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, 2012.
- [12]. Zhang J., "Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches," Earth-Science Reviews, Vol. 108, pp. 50-63, 2011.
- [13]. Holt R., Fjaer E. and Rzayev E., "P- and S-wave velocities in shales: experiments and a model," 6<sup>th</sup> North America Rock Mechanics Symposium (NARMS), Gulf Rocks 2004.