

## مطالعه و بررسی فشار سیال منفذی و فشار شکست سازندهای مخزنی؛ (مطالعه‌ی موردی: گروه دهرم در ناحیه‌ی فارس)

رز شریف‌زادگان\*، ابراهیم روهانی<sup>۱</sup>، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران • |

### چکیده

هدف این مطالعه بررسی فشار سیال منفذی و فشار شکست سازندهای مخزنی گروه دهرم در ناحیه‌ی فارس است. با توجه به جدا کردن دو لایه‌ی بالایی و پایینی چاه به‌وسیله‌ی میان لایه‌ها و اختلاف فشارهای شکست و سیال سازند، حفاری چاه‌ها در بعضی مخازن گازی با شرایط مختلف انجام می‌شود. قرارگیری این دو بخش در یک فاز در چاه‌های اکتشافی باعث مشکلات عدیده‌ی حفاری و هزینه‌های سرسام‌آور شده است. همچنین در برخی از موارد جدا کردن آنها سبب از دست رفتن یک جداری و عدم دست‌یابی به اهداف عمیق‌تر گردیده است. تحلیل فشار مخازن مختلف کمک زیادی به انتخاب صحیح محل پاشنه‌ی جداری و در نتیجه کاهش هزینه‌ی حفاری می‌کند. در این راستا فشار سیال سازندهای قسمت بالایی و پایینی چاه و همچنین فشار شکست در اعماق مختلف بخش مخزنی دو چاه اکتشافی در ناحیه‌ی فارس مطالعه شده و اختلاف این دو فشار (در چاه‌های نمونه) تخمین زده شد تا کمکی جهت کاهش هزینه‌های حفاری باشد. نتایج پژوهش نشان داد که بر اساس اطلاعات حفاری چاه‌های A و B در گروه دهرم در مجموع به‌دلیل اختلاف گرادیان شکست سازندهای دهرم در مخازن مختلف، انتخاب وزن گل حفاری و نقطه‌ی جداره‌گذاری سناریوهای متفاوتی وجود دارد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۱۲/۰۴

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۵/۱۱

### واژگان کلیدی:

وزن گل، فشار شکست سازند، هرزروی، فشار سیال منفذی (فشار سازند)

### مقدمه

گل نیازمند داده‌های فراوان و ساخت مدل MEM است. بهرامی و همکاران در مطالعه‌ی فشار شکست سازندهای آغاجاری، میشان و سروک را با استفاده از دستگاه سه‌محوره‌ی مکعبی بررسی کردند. برای مدل‌سازی شرایط مخزن در آزمایشگاه، از یک دستگاه سلول سه‌محوره‌ی واقعی که می‌تواند تنش‌های گوناگون  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  را به‌نمونه‌ی مکعبی وارد کند استفاده شد که بخش تزریق سیال به درون گمانه، کنترل آن و همچنین ثبت داده بر عهده‌ی یک دستگاه خودکار MTS 816 بود. نتایج این پژوهش حاکی از آنست که فشار شکست در سازند آغاجاری در محدوده‌ی ۳۹۰-۴۱۰ بار است. با توجه به اینکه فشار شکست در عمق ۹۰۰-۸۰۰ متر در سازند آغاجاری ۳۹۰-۳۶۴ بار به‌دست آمده است. بنابراین انجام عملیات شکست هیدرولیکی در این سازند با محدوده‌ی فشاری مذکور، بدون خطر شکستن سازند میشان و ورود آب ناشی از آن به مخزن آغاجاری امکان‌پذیر است.

ماتسونگا و همکاران<sup>۲</sup> آزمایش شکست هیدرولیکی را در مکعب‌های بارگذاری شده‌ی گرانیت، ماربل و آندزیت به‌طول ۲۰ سانتی‌متر با سیال شکست آب و نفت انجام دادند. آنها با استفاده از گیرنده‌های صوتی برای آنالیز مکانیزم شکست به این نتیجه رسیدند که شروع و گسترش شکست هیدرولیکی متأثر از

چاه اکتشافی می‌تواند وسیله‌ای برای کسب اطلاعات زمین‌شناسی و آگاهی از وضعیت نفت و گاز در هر منطقه باشد. بنابراین با حفر چاه اکتشافی و پس از انجام مراحل نخستین، ناحیه‌هایی با پتانسیل ذخیره کردن نفت و گاز تعیین می‌گردد.

توانایی سازندها برای تحمل فشار گل با وزن مخصوص و در عمق معین در یک چاه، به فشار منفذی درون فضای متخلخل سازند بستگی دارد. اگر فشار سیال درون چاه بیشتر از فشار شکست سازند باشد سازند می‌شکند و گل درون چاه هرز می‌رود. افزایش هرزروی ممکن است منجر به قطع گل برگشتی و از دست دادن ستون کامل یا بخشی از گل شود. در سازندهای با فشار زیاد وجود مقداری هرزروی گل نه تنها خطرناک نیست بلکه حاشیه‌ی امنیتی برای ادامه حفاری فراهم می‌کند. در چنین وضعیتی اگر هرزروی شدید شده و ستون گل از دست برود وضعیت خطرناکی ایجاد می‌شود؛ زیرا به‌طور قطع هنگامی که سطح گل در چاه پائین برود با افت فشار هیدرواستاتیک و در اثر فشار زیاد مخزن فوران رخ خواهد داد.

در این راستا و جهت بررسی فشار شکست سازندهای طی سال‌های اخیر مطالعات زیادی انجام شده است. تحقیقات آزمایشگاهی روی عملیات شکست هیدرولیک در چاه‌های ایران معمولاً با دستگاه سه‌محوره‌ی استوانه‌ای که فشار شکست سازند را در برابر تنش نشان می‌دهد انجام شده و برقراری ارتباط بین این عامل و پنجره‌ی

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (rshpetroleum@yahoo.com)

هیدرولیکی را در سنگ شکاف دار طبیعی انجام دادند. نتیجه‌ی این بررسی نشان داد که در سازندهای شکاف دار طبیعی، سیال تزریقی می‌تواند در شکاف‌های موجود جریان یافته یا باعث ایجاد یک شکست جدید شود. آزمایش‌ها روی بلوک‌های شکاف دار انجام و از یک مدل عددی استفاده شده است. در نرخ جریان کم، تزریق همیشه منجر به جریان سیال در شکاف‌های طبیعی می‌شود. در نرخ جریان بیشتر، شکست‌های جدید می‌تواند گسترش یابد. نرخ جریان یا گرانیوی زیاد باعث ایجاد شکست می‌گردد؛ در حالی که نرخ جریان کم، شبکه شکست را باز کرده و فشار شکست کمتر خواهد شد [۳].

گو و همکاران جهت بررسی اثرات تنش اصلی حداقل و نرخ تزریق شکست هیدرولیکی، آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را در بلوک‌های ژئیس با ابعاد  $30.5 \times 30.5 \times 30.5$  و  $30.5 \times 58.4 \times 61.0$  میلی‌متر انجام داده و نتیجه گرفتند که با افزایش تنش اصلی کمینه، نرخ گسترش شکست کاهش می‌یابد. نرخ تزریق زیاد سبب افت فشار سریع شده و شکست‌های طولانی تری ایجاد می‌کند. با افزایش نرخ تزریق، فشار شکست افزایش یافته و معمولاً بیشتر از آنچه نظریه می‌تواند پیش‌بینی کند برآورد می‌شود [۴].

بهلولی و دپاتر اثر آزمایشگاهی رئولوژی سیال و تنش محصورکننده بر شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. با استفاده از سیالات تزریق متفاوت و با تمرکز روی ساز و کارهای شروع و انتشار شکست، آزمایش شکست هیدرولیکی در تنش‌های محصورکننده مختلف انجام و در آن از سیستم سلول سه‌محوره استفاده شد. جهت پی‌بردن به تمایل شکست روی ماسه‌های فشرده، یک سری متغیرهای مطالعه شده شامل تنش محصورکننده، نوع سیال تزریقی و هندسه‌ی بخش تزریقی استفاده شد [۵].

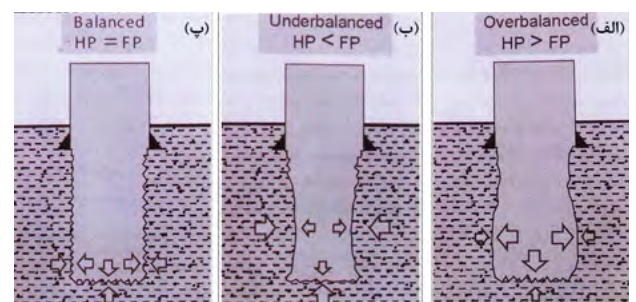
ژانگ و چن گسترش شکست هیدرولیکی را بررسی کرده و بر اساس مکانیزم شکست و تئوری شکست هیدرولیکی، مدلی برای مسیر گسترش شکست در طول شکست ارائه کردند که محاسبات، تفاوت تنش و تغییر مسیر گسترش شکست را نشان می‌دهد. شکست جدید به تدریج جهت خود را تغییر می‌دهد تا در جهت پیشینه‌ی تنش افقی قرار گیرد. تفاوت تنش‌ها تأثیر آشکاری بر جهت شکست دارند. مسیرهای پیش‌بینی شده در تطابق با آزمایش‌ها در مقیاس سه‌محوره است [۶].

جهت کاهش هزینه‌ها و خطرات احتمالی حفاری، راهکارهایی مثل بررسی فشار شکست سازند، انتخاب وزن گل مناسب و نصب پاشنه‌ی جداری در محل مناسب اهمیت زیادی دارند که هدف پژوهش حاضر بررسی این متغیرها در گروه دهرم (ناحیه‌ی فارس) است. در حالتی که اختلاف فشار مثبت باشد (فشار گل از فشار سازند بیشتر باشد)، احتمال فوران چاه بسیار کم است (حالت فراتعادلی) و هرزروی گل رخ می‌دهد. در مقابل، هنگامی که اختلاف فشار منفی باشد (فشار گل از فشار سازند کمتر باشد)، چاه به جریان

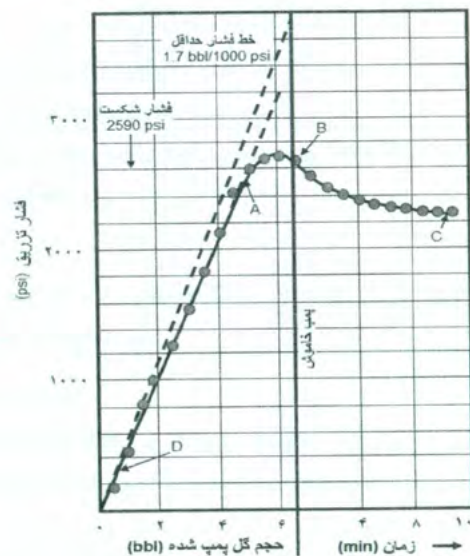
نفوذپذیری و گرانیوی سیال است [۱].

ژنگ و رثوجیرس<sup>۳</sup> تأثیر نرخ تزریق بر رفتار شکست هیدرولیکی یک سازند ماسه‌سنگی را در آزمایشگاه بررسی کردند. سه آزمایش شکست هیدرولیکی کنترل شده با استفاده از نرخ‌های تزریق متفاوت انجام شد. این آزمایش‌ها نشان داد که نرخ تزریق بیشتر، فشار شکست کمتری دارد و مدل‌های الاستیک و پرولاستیک قادر به پیش‌بینی فشار شکست نیستند. در آزمایش‌های انجام شده با استفاده از نرخ‌های جریان ثابت، شکست هیدرولیکی مشابه رفتار میدانی کنترل شد. جهت مقایسه‌ی نتایج مشاهده شده با سایر نرخ‌های فشار ثابت، با استفاده از نقاط متوسط ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ فشار به ترتیب در آزمایش‌ها محاسبه شد. مقدار فشار در نرخ‌های تزریق متفاوت، ثابت نیست و در نرخ تزریق بیشتر، تغییرات افزایش می‌یابد. ضمن اینکه نرخ فشار بیشتر، سبب فشار شکست کمتر می‌شود [۲].

دپاتر<sup>۴</sup> و بیوگلسدایک<sup>۵</sup> آزمایش و شبیه‌سازی عددی شکست



شکل ۱ | الف) حالت فراتعادلی (هرزروی گل) ب) حالت فروتعادلی ( فوران چاه) پ) حالت تعادلی (عدم هرزروی گل و جلوگیری از فوران چاه)



شکل ۷ - ۳۸: تست Leak-off

تصدیق کننده است. در واقع برنامه ریزی ابتدایی چاه باید بر اساس داده‌های شکست سازندی حاصل از یک روش پیش‌بینی کننده باشد. البته در میدین اکتشافی که اطلاعات کمی در مورد رژیم فشاری وجود دارد جهت حصول اطمینان از وزن گل پیشنهادی، پس از سیمان کاری محل جداری، باید مقاومت شکست پیش‌بینی شده‌ی سازندهای زیر جایگاه جداره گذاری توسط آزمایش فشار تأیید شود. این امر باید قبل از ادامه‌ی حفاری و گذار به مرحله‌ی بعدی برنامه ریزی شده برای عمق جداره گذاری انجام شود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها در این زمینه آزمایش عدم نشستی<sup>۸</sup> است که با آن می‌توان فشار شکست سازند را پیش‌بینی کرد و حد فشاری ممکن برای حفاری سازند را به دست آورد. نتایج این آزمایش برای محاسبه‌ی فشار شکست لایه‌ی بعدی و همچنین تخمین کیفیت سیمان قابل استفاده است.

روش کار از این قرار است که با پمپاژ گل، اعمال مقادیر فشار اندک روی چاه جداری گذاری شده آغاز گردیده و آرام آرام فشار افزایش می‌یابد تا زمانی که فشار به حدی برسد که سیال درون چاه شروع به وارد شدن به درون سازند کند. فشاری را که در آن تزریق سیال به درون سازند آغاز می‌شود فشار نشستی گویند.

مراحل آزمایش عدم نشستی بدین شرح است که ابتدا فشارسنج‌ها، خطوط و حتی جداری باید از نظر دقت بررسی شوند و سپس آزمایش به ترتیب زیر اجرا گردد:

- حفاری کفشک، سیمان و ۱۰-۵ فوت از سازند زیر کفشک
- گردش گل و برقراری تعادل بین وزن دو طرف
- بالا کشیدن مت، کفشک و اتصال خطوط لوله‌ی آزمایش (خط دهش) به پمپ تراک (تمیز کاری تمامی خطوط سطحی) و سپس آزمایش فشار خطوط
- بستن Ram بالایی
- آغاز پمپاژ گل با نرخ و فشار کم و همزمان افزایش فشار با افزایش نرخ و ترسیم تغییرات فشار در برابر حجم گل پمپ شده باید توجه کرد که جهت حصول نتیجه‌ی مطلوب از آزمایش عدم نشستی و امکان رسم نمودار مناسب لازم است که پمپاژ با نرخ کم و به صورت پیوسته انجام شود تا فرصت کافی برای نقطه‌یابی و رسم نمودار باشد. نمودار به صورت حجم سیال پمپ شده بر حسب بشکه در برابر تغییرات فشار بر حسب Psi رسم می‌شود (معمولاً با نرخ ۰/۵ بشکه در دقیقه زمانی کافی برای رسم نمودار است).

- قطع پمپاژ به محض مشاهده‌ی انحراف از رفتار خطی در نمودار
- اگر طی این فرآیند مقداری از گل در سازند گم شده باشد گل جایگزین باید طوری به چاه پمپ شود که مقدار دقیق آن قابل محاسبه باشد. به طور کلی می‌توان گفت که تفسیر نمودار رسم شده، آزمایش عدم نشستی به سه نمودار زیر است که تقریباً تمامی

خواهد افتاد (حالت فروتعدالی). بهترین حالت زمانی اتفاق می‌افتد که فشار گل برابر با فشار سازند باشد (حفاری تعادلی)، در این حالت با تنظیم وزن گل، فشار هیدروستاتیکی معادل با فشار سازند ایجاد می‌شود؛ به خصوص در سازندهایی که در آنها احتمال جریان وجود دارد. این وضعیت ممکن است هر لحظه به یکی از دو سوی تعادل میل کند که همیشه یک سوی آن جریان چاه است. ضمن اینکه با توجه به ECD که حین حفاری داریم در واقع، حفاری تعادلی با وجود ECD، به نوعی نشان‌دهنده‌ی جریان چاه است. پس وضعیت آرمانی عبارتست از اینکه همیشه نسبت به فشار روزنه‌ی تا حدی غلبه داشته باشیم که در عمل خود را به صورت مقداری هرزروی نشان می‌دهد (شکل ۱-۷).

با توجه به جداسازی لایه‌های بالایی و پایینی چاه توسط میان‌لایه‌ی نار و اختلاف فشارهای شکست و سیال سازند، حفاری چاه‌ها در بعضی مخازن گازی با شرایط مختلف انجام می‌شود. در چاه‌های اکتشافی قرارگیری این دو بخش در یک فاز باعث مشکلات عدیده‌ی حفاری و هزینه‌های سرسام‌آور شده است. همچنین گاهی جداسازی این دو لایه باعث از دست رفتن یک جداری و عدم دستیابی به اعماق بیشتر شده است. تحلیل دقیق مخازن متفاوت کمک زیادی به انتخاب صحیح محل پاشنه‌ی جداری و در نتیجه کاهش هزینه‌ی حفاری و نیز امکان دستیابی به اهداف پالئوژئیک پایینی خواهد کرد.

در این مقاله با بررسی فشار سیال سازندهای قسمت‌های بالایی و پایینی چاه، فشار شکست سازندهای مربوط به هر قسمت و مقدار اختلاف این فشارها در مخازن فارس، وزن مناسب گل حفاری در سازندها تخمین زده شده است. نتایج این محاسبات می‌تواند سبب کاهش هزینه‌های حفاری گردد. در این مقاله سازندهای گروه دهرم در میدین گازی A- و B ناحیه‌ی فارس مطالعه و بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند مورد استفاده شرکت‌های نفتی قرار گیرد. تمامی کارشناسان بر اساس پیش‌فرض‌های ذهنی، رابطه‌ی مشکلات حفاری و اشتباهات داده‌های زمین‌شناسی را بررسی می‌کنند. اما امید است انجام این پژوهش به روشن شدن این ارتباط به صورت علمی و آگاهانه در چاه‌های اکتشافی کمک کند.

## ۱- روش‌های تخمین فشار شکست

هنگام برنامه ریزی و حفاری یک چاه عمیق که با فشارهای سازندی ناهنجار مواجه است دانش نخستین مربوط به تغییر فشار شکست سازند نسبت به تغییر عمق، به اندازه‌ی اطلاع از چگونگی تغییرات فشار منفذی با تغییر عمق حائز اهمیت است. فنون تخمین فشار شکست سازند مثل فنونی که برای تخمین فشار منفذی استفاده می‌شوند دربرگیرنده‌ی روش‌های پیش‌بینی کننده و روش‌های

حفراری ممکن است منجر به اختلاف چگالی گل در چاه شود. در نتیجه احتمال بروز خطا در فشار شکست به وجود می‌آید که می‌توان آنرا توسط آزمایش عدم نشستی مشخص نمود [۹]. اندازه‌گیری و بررسی حجم گل خارج شده از چاه حین آزاد شدن فشار، پس از کامل شدن آزمایش عدم نشستی نیز بسیار مفید است. در صورتی که هرزروی گل تنها طی فرآیند فیلتراسیون اتفاق افتاده باشد حجم بازیابی شده باید تقریباً برابر با کل حجم تزریق شده باشد.

بسیاری از کاربرها ترجیح می‌دهند سازند را تا نقطه‌ی شکست آزمایش نکنند؛ زیرا چنین آزمایشی به احتمال زیاد مقاومت شکست سازند را کاهش می‌دهد. البته علت اصلی کاهش مقاومت شکست سازند تنش‌های ناشی از فشارهای تراکمی سنگ‌های اطراف است. قدرت کششی اغلب سنگ‌ها نیز به دلیل ناچیز بودن قابل صرف نظر است؛ در مقابل، شکاف‌ها و شکست‌های ناشی از رخدادهای طبیعی نیز وجود دارد. زمانی که فشار دیواره‌ی چاه آزاد شود شکست بسته می‌شود. در واقع همان فشار شکست برای غلبه بر تنش تراکمی و بسته نگه‌داشتن شکستگی مورد نیاز است.

### ۱-۳- متغیر سنجی

فرمول‌های زیر جهت به دست آوردن فشار گل، فشار سازند، فشار شکست سازند و چگالی در چاه‌های A و B استفاده می‌شود.

$$(1) \quad P = 0.0519 \times MW(ppg) \times \text{depth}(ft) \quad (\text{نمودار فشار گل})$$

با استفاده از این فرمول فشار گل بررسی و نمودار آن رسم شده است. ضریب ثابت ۰/۰۵۱۹ در مقادیر وزن گل حاصل اعمال می‌گردد [۱۰]. در گزارش‌های حفاری، وزن گل بر حسب pcf است که قبل از اعمال فرمول-۱ وزن گل باید به مقیاس ppg تبدیل شود. عدد حاصل از این فرمول فشار گل خواهد بود.

$$(2) \quad P = 0.11 \times 3.281 \times (\text{TOP} - \text{gauge depth}) + \text{فشار مخزن} = \text{نمودار فشار سازند}$$

با استفاده از فرمول-۲ فشار سازند محاسبه می‌گردد. گرادیان گاز که عددی ثابت است (۰/۱۱) در عدد ثابت ۳/۲۸۱ (ضریب تبدیل متر به فوت) ضرب شده است؛ حاصل در اختلاف عمق ثبت شده و ارتفاع شروع سازند ضرب شده و عدد نهایی با فشار مخزن جمع می‌گردد.

$$(3) \quad P = 0.433 \times \text{لاگ چگالی} \times \text{depth}(ft) = \text{نمودار چگالی (P}_g) \quad (\text{۳})$$

فرمول-۳ که به چگالی معروف است با استفاده از ضریب ۰/۴۳۳ در عددهای لاگ چگالی (بر حسب فوت)، مقدار چگالی را تعیین می‌کند.

سازندها از این سه الگو تبعیت می‌کنند:

(الف) سازندهایی که متراکم نشده‌اند و تخلخل آنها زیاد است. در این سازندها گل در فشارهای کم نیز نفوذ می‌کند و به محض خاموش شدن پمپ فشار می‌افتد.

(ب) سازندهای متراکم با تخلخل زیاد<sup>۹</sup>

(ج) سازندهای متراکم با تخلخل کم<sup>۱۰</sup>

### ۱-۱- پیش‌بینی فشار شکست

تخمین فشار شکست سازندی که قبل از حفاری و جداره‌گذاری در چاه انجام می‌شوند بر اساس روابط تجربی است. با توجه به تاثیر فشار منفذی سازند بر فشار شکست سازند، باید قبل از استفاده از رابطه‌ی فشار شکستی سازند، یکی از روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی استفاده شود. در این مقاله با توجه به دوردست بودن اطلاعات ساخت فشار از آزمایش سازندی در محل مورد مطالعه، برای فشار منفذی از نتایج آن استفاده خواهیم کرد. روابط و معادلات فشار شکست متداول عبارتند از: رابطه‌ی Wil- و Hubbert، رابطه‌ی dis، رابطه‌ی Kelly و Mattews، رابطه‌ی Pennebaker، رابطه‌ی Ea-ton، رابطه‌ی Christman، رابطه‌ی MacPherson و Berry. روش کار تمامی این معادلات بر اساس روابط ریاضیاتی پیچیده و استفاده از داده‌های لاگ‌های چاه‌پیمایی است. در این مقاله فشار شکست سازند از روش ارزیابی اطلاعات ناحیه‌ای محاسبه شده است.

### ۱-۲- تأیید فشار شکست

بعد از آنکه هر رشته در محل سیمان‌کشی، جداره‌گذاری شد یک آزمایش فشار که Leak Off Test نام دارد انجام گردید. برای تأیید توانایی تحمل فشار دیواره‌ی چاه توسط جداره‌گذاری، سیمان و سازندهای پایین‌تر از محل جداره‌گذاری ضروری است فشار حفاری امن در عمق بعدی نصب جداره‌گذاری معین گردد [۸]. معمولاً Leak Off Test با بستن فضای حلقوی و سپس پمپاژ از طریق رشته انجام می‌پذیرد. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که به فشار شکست برسیم یا چاه شروع به گرفتن و جذب کل گل کرده و سبب از بین رفتن روند افزایشی فشار گردد. در آن زمان پمپ متوقف شده و فشار حداقل به مدت ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود تا سرعت افت فشار تعیین گردد. با این روش، نشستی جداره‌گذاری ارزیابی می‌شود. آزمایش‌های مذکور می‌توانند به صورت دوره‌ای و بعد از حفاری در سازندهایی که ممکن است گرادیان شکست کمتری داشته باشند انجام گیرند. همچنین ضروری است گردش گل تا زمان یکنواخت شدن چگالی آن در طول چاه، قبل از آغاز Leak Off Test انجام گردد که این امر از طریق خارج کردن Kelly و مشاهده‌ی ستون استاتیک سیال در رشته‌ی حفاری و فضای حلقوی انجام می‌شود. وجود خرده‌های حفاری<sup>۱۱</sup> در فضای حلقوی یا تکه‌هایی از گل سنگین در لوله‌ی



در این راستا وزن گل در اعماق مختلف از گزارش‌های روزانه‌ی حفاری استخراج و فشار گل محاسبه گردید. همچنین با استفاده از داده‌های آزمایش چاه‌ها، فشار سازند از رابطه‌ای که قبلاً ذکر شده به دست آمده و نمودار آن رسم شده است.

### ۳- نتایج

در این بخش با استفاده از فرمول‌های ذکر شده در قسمت قبل، فشار گل، هرزروی، چگالی و فشار شکست در دو چاه نمونه‌ی A-B بررسی شده است. هدف حفاری ارزیابی پتانسیل هیدروکربنی در افق‌های دالان بالایی و نار بوده که نمودار شماتیک چاه در بخش‌های مرتبط با این افق‌ها در ادامه مشاهده می‌شود.

#### ۳-۱- چاه-A

هدف از حفاری چاه-A آزمایش سازندهای کنگان و دالان به‌عنوان سازندهای مخزنی حاوی گاز بوده است. جهت دسترسی به سازندهای مخزنی پس از اتمام حفاری حفارات سطحی و میانی، جداری  $9\frac{5}{8}$ " در عمق ۳۰۳۶ متری در Massive Anhydrate سازند دشتک رانده و سیمان کاری گردید. طی حفاری حفره‌ی  $8\frac{3}{8}$ " به‌علت مانده‌گذاری، حفاری در حفره‌ی انحرافی ادامه یافت و آستری  $7\frac{1}{2}$ " در عمق ۳۳۳۵ متری در انتهای کنگان رانده و سیمان کاری شد. سپس آستری  $5\frac{1}{2}$ " در عمق ۳۶۶۷ متری در میان‌لایه‌ی دالان بالایی رانده، نصب و سیمانکاری گردید. آزمایش‌های سازند دالان پایینی و نار در حفره‌ی باز تا عمق ۴۲۲۰ متری در سازند دالان پایینی انجام شد و آزمایش‌های دالان بالایی و کنگان با مشبک کاری صورت گرفت.

#### ۳-۲- چاه-B

سازندهای مخزنی چاه-B سازندهای کنگان و دالان بوده‌اند. در زمان حفاری حفره‌ی  $8\frac{3}{8}$ " به‌دلیل مانده‌گذاری، چاه در عمق ۴۰۱۹ متری کج شده و حفاری ادامه یافت. آستری  $7\frac{1}{2}$ " در عمق ۴۲۸۷ متری در بخش پایینی سازند کنگان رانده و نصب شد و پس از حفاری حفره‌ی  $5\frac{1}{2}$ " آستری  $5\frac{1}{2}$ " در عمق ۴۸۹۱ متری رانده و نصب گردید. انتهای حفره‌ی  $5\frac{1}{2}$ " توسط مته‌ی  $4\frac{1}{8}$ " به‌سازی شد و حفاری چاه در سازندهای دالان پایینی خاتمه یافت. شکل-۵ نسبت فشار گل به عمق را در این دو چاه نشان می‌دهد.

شکل-۵ نسبت فشار گل به عمق را در این دو چاه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقاطی که با وجود ثابت بودن روند فشار گل، هرزروی افزایش یافته در واقع تحمل فشار کاسته شده یا به‌عبارتی فشار شکست سازند کاهش یافته است. افزایش هرزروی ذکر شده ممکن است به‌دلیل ورود به ناحیه‌ی مخزن نفت و گاز باشد؛ چراکه مخازن نفتی و گازی محیط متخلخل و پر از سیالی دارند که مقاومت آنها در برابر فشار گل نسبت به طبقات

$$(۴) \quad (psi) + 400 = \text{فشار سازند} = \text{فشار شکست سازند (تخمین عملیاتی)}$$

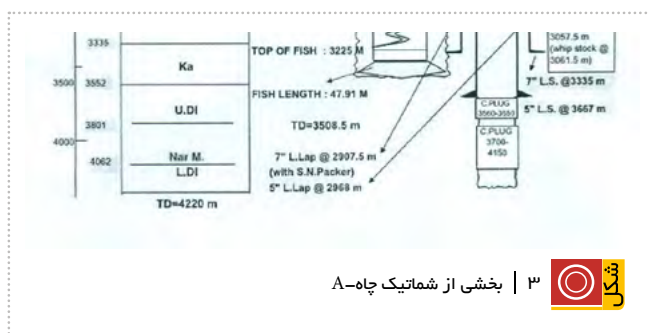
بر اساس نظر کارشناسان، فشار سازند (فشار سیال منفذی) به‌اضافه‌ی ۴۰۰ Psi می‌شود تا فشار شکست سازند حاصل آید. البته مقدار حاصل برای فشار شکست سازند در واقع تخمین عملیاتی این متغیر است.

$$(۵) \quad P = \frac{P_s - P}{3} + P \quad \text{فشار شکست سازند: فرمول هوپرت}^{11}$$

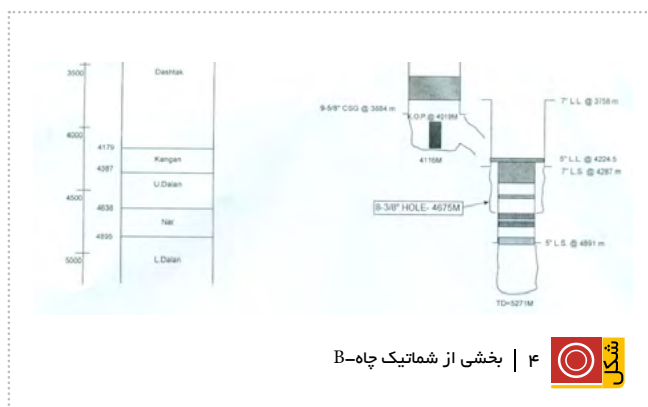
بر اساس فرمول هوپرت نیز می‌توان فشار شکست سازند را محاسبه کرد. در این فرمول اختلاف فشار سازند (فشار سیال منفذی) با چگالی بر ۳ تقسیم شده و حاصل آن با مقدار فشار سازند (فشار سیال منفذی) که از فرمول-۴ محاسبه شده جمع می‌گردد؛ حاصل، فشار شکست سازند را تعیین می‌کند.

### ۲- روش کار

در این مقاله برای بررسی دو چاه اکتشافی در ناحیه‌ی فارس، از داده‌های موجود در بخش حفاری و مهندسی نفت، نتایج آزمایش چاه‌ها، گزارش‌های روزانه‌ی حفاری و داده‌های چگالی سنگ (وزن گل، هرزروی، فشار گل، چگالی، فشار سازند و فشار شکست سازند) در اعماق مختلف بخش مخزنی استفاده شد. با بررسی روش‌های ذکر شده در این مقاله سعی گردید توسط روش ارزیابی عملیاتی، فشار شکست سازند محاسبه شود.



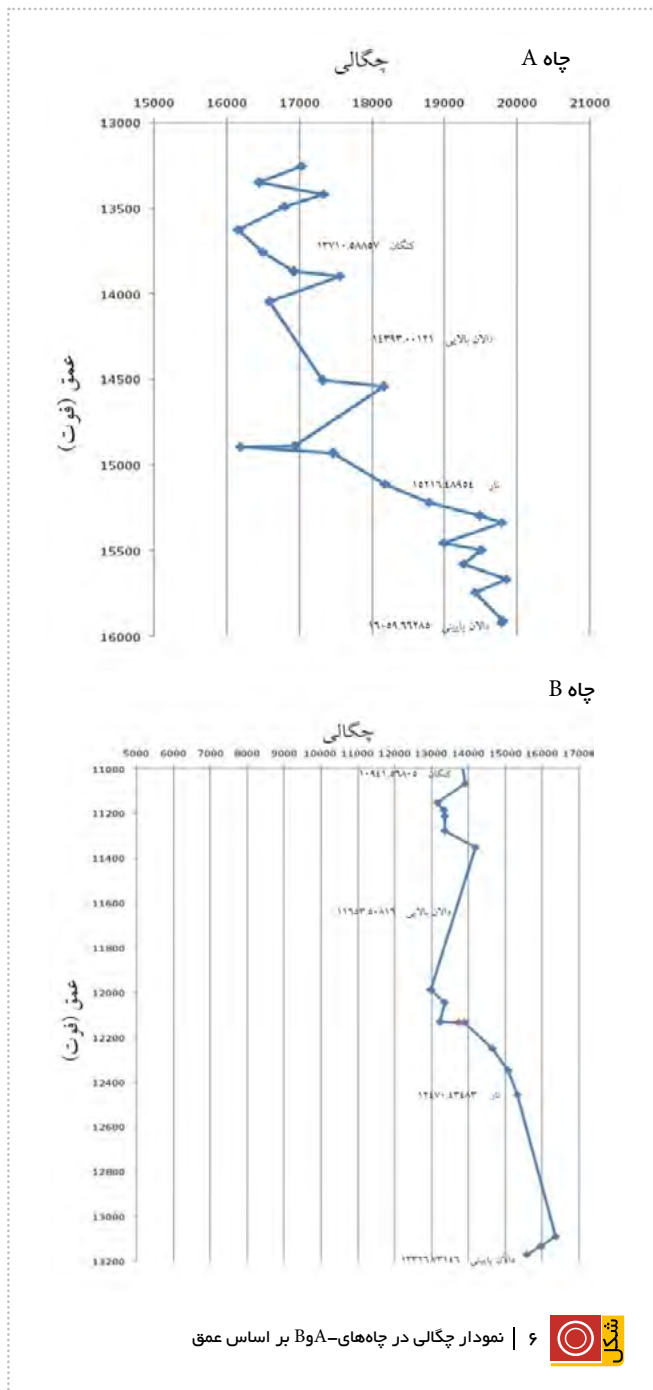
شکل ۳ | بخشی از شماتیک چاه-A



شکل ۴ | بخشی از شماتیک چاه-B

منفذی بر اساس فرمول‌های ۲۵- محاسبه شده‌اند. هر دو نمودار نشان‌دهنده‌ی آنست که با تعمیق چاه، مقادیر فشار منفذی و فشار شکست به یکدیگر نزدیک‌تر شده و نوعی هم‌گرایی را نشان می‌دهند.

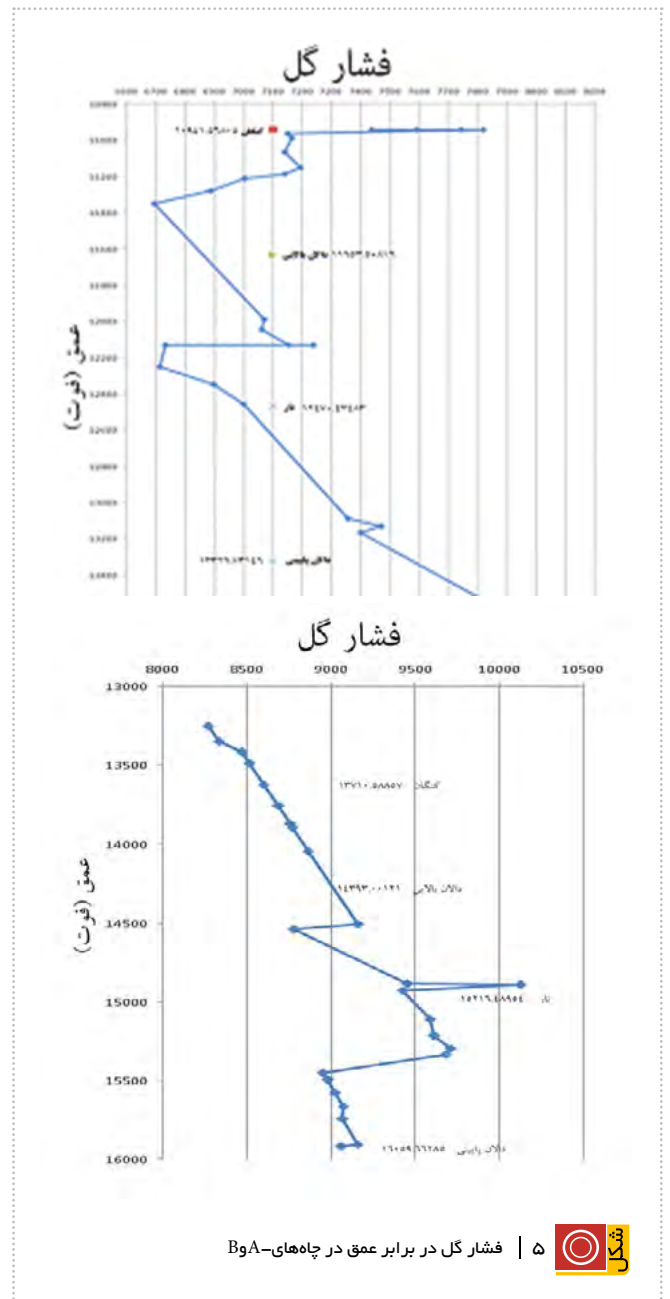
شکل ۸- خروجی نرم‌افزار TDAS (نرم‌افزار تخصصی طراحی جداری شرکت شلمبرژر) بر اساس داده‌های چاه‌های A و B و نتایج آزمایش‌های بهره‌دهی گروه دهرم است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود حداقل فاصله پنجره‌ی ایمن گل حفاری، بین خطوط سبز (فشار شکست) و خطوط قرمز (فشار منفذی) قرار دارد. وزن گل استفاده



شکل ۶ | نمودار چگالی در چاه‌های A و B بر اساس عمق

بالایی کمتر است. فشار سیال منفذی با فشار گلی که این مناطق با آنها حفاری شده‌اند در اعماق مختلف مقایسه گردید. با توجه به هرزروی، در نقطه‌ای که تفاوت فشار گل حفاری و فشار سازند بیشتر بوده هرزروی بیشتر و در نقاطی که این تفاوت کمتر بوده هرزروی کاهش یافته است. شکل ۶- تغییرات چگالی سازند در چاه‌های A و B را بر حسب تغییرات عمق نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تغییرات چگالی چاه A نسبت به تغییر عمق نسبت به چاه B نوسان بیشتری دارد.

شکل ۷- تغییرات فشار شکست سازند و فشار منفذی بر حسب عمق را در چاه‌های A و B نشان می‌دهد. مقادیر فشار شکست و



شکل ۷ | فشار گل در برابر عمق در چاه‌های A و B

سبز مشخص شده‌اند. در هر دو چاه تقریباً تنها یک مورد تجاوز از این مقادیر مشاهده می‌شود.

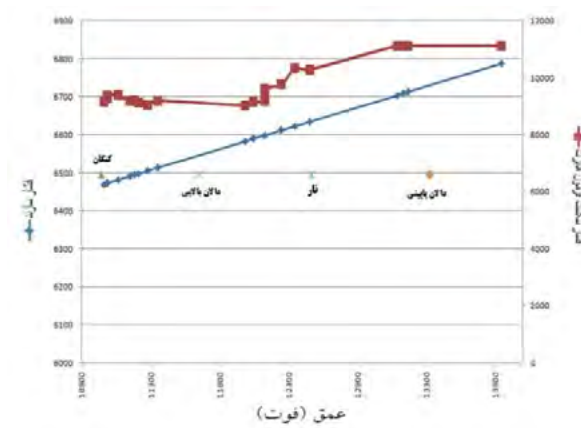
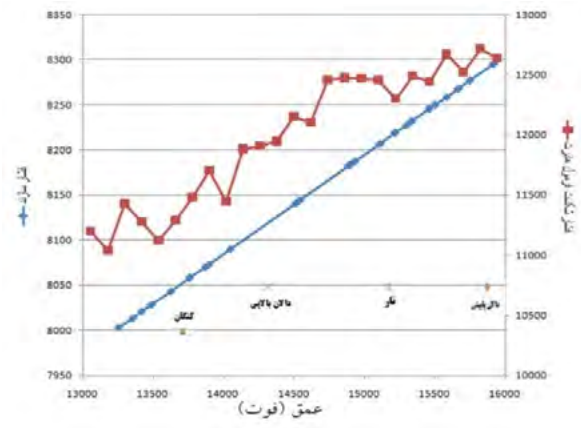
### بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری چاه‌های اکتشافی میدان A و B داده‌های مربوط به انتخاب وزن گل و عمق جداره گذاری به شرح زیر به دست آمد:

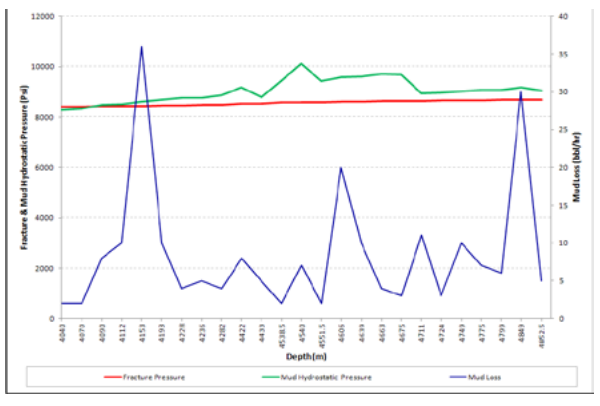
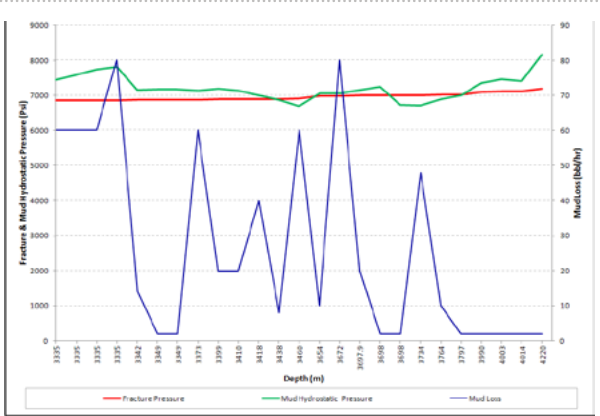
حفاری چاه اکتشافی میدان A، نحوه‌ی جداره گذاری، اتفاقات درون مخزن و مشکلات حفاری از جمله هرزروی در سازندهای کنگان و دالان نشان می‌دهد که به دلیل اختلاف گرادیان شکست سازندهای یاد شده لازم است اولین جداری تولیدی ابتدای سازند کنگان و اولین آستری تولیدی در ابتدای سازند دالان نصب گردد. به دلیل کم بودن گرادیان شکست بخش دالان بالایی، ادامه‌ی حفاری در یک بخش از کنگان تا میان لایه‌ی نار با مشکلات عدیده مواجه می‌شود. بنابراین با توجه به اطلاعات یاد شده توصیه می‌گردد قسمت‌های دالان بالایی و دالان پایینی کنگان در بخش‌های جداگانه حفاری گردد و وزن گل حفاری متناسب با گرادیان شکست این سازندها انتخاب شود. در غیر این صورت حفاری چاه اکتشافی میدان A سبب هرزروی گل درون سازند خواهد شد.

شده بارنگ آبی مشخص شده که در هر دو مورد در این پنجره قرار گرفته است.

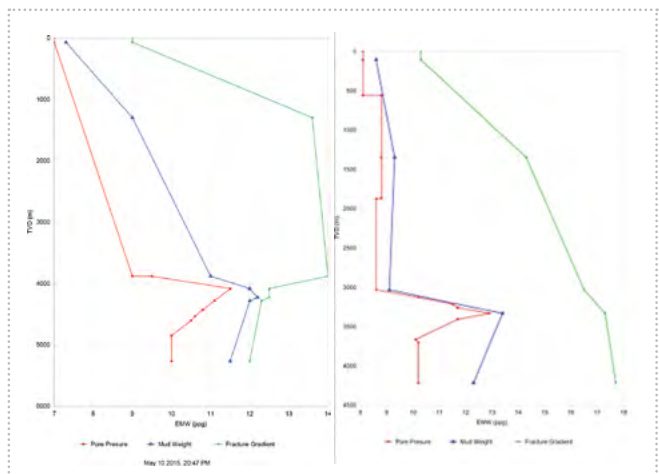
شکل ۹- مقدار هرزروی را بر حسب عمق در چاه‌های A و B نشان می‌دهد. مقادیر فشارهای شکست و هیدرواستاتیک با خطوط قرمز و



شکل ۷ | نمودار تلفیقی فشار شکست- فشار سازند- عمق در چاه‌های A و B



شکل ۹ | نمودار تلفیقی فشار شکست- هرزروی - وزن گل، بر اساس عمق در چاه‌های A و B



شکل ۸ | نمودار تلفیقی فشار شکست- فشار سازند- وزن گل، بر اساس عمق در چاه‌های A و B

در چاه‌های اکتشافی به دلیل عدم وجود اطلاعات واقعی، تخمین فشار شکست سازند و فشار سیال سازند (فشار سازند) به سختی انجام می‌شود و ممکن است در همه‌ی موارد محاسبات انجام شده به واقعیت نزدیک نباشد [۱۱]. اما در چاه‌های توصیفی و توسعه‌ای اطلاعات موجود به گونه‌ای است که مهندسان حفاری به‌طور دقیق‌تری می‌توانند فشار شکست سازند و فشار سیال سازند را محاسبه و ارزیابی کنند.

■ حفاری چاه اکتشافی میدان-A، نحوه‌ی جداره‌گذاری در بالا و درون مخزن و مشکلات حفاری (از جمله هرزروی در سازندهای کنگان و دالان نشان می‌دهد) که به دلیل اختلاف در گرادیان شکست سازندهای یاد شده باید نخستین جداری تولیدی در ابتدای سازند دالان نصب شود.

■ بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری چاه اکتشافی میدان-B مشخص شد که بخش‌های دالان بالایی، نار و دالان پایینی قابل حفاری در یک فاز هستند.

■ در نقاطی با هرزروی زیاد، گل حفاری آسیب بیشتری به سازند وارد کرده و با وجود انجام عملیات اسیدکاری احتمالاً سازند پتانسیل اصلی خود را در تولید نشان نخواهد داد.

بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری چاه اکتشافی میدان-B مشخص شد که حفاری دالان بالایی-میان‌لایه‌ی نار و دالان پایینی در یک بخش امکان‌پذیر است. بدان معنا که پس از نصب جداری در بالای دالان بالایی در ادامه‌ی حفاری در دالان پایینی (بالای فراقون) نیازی به نصب جداره‌ی جدید نیست. اگرچه ممکن است جداسازی این سازندها در کاهش مشکلات حفاری یا بهره‌برداری بهینه مفید واقع شود.

مقایسه‌ی اطلاعات حفاری چاه‌های A- و B در گروه دهرم نشان می‌دهد که در مجموع به دلیل اختلاف گرادیان شکست سازندهای دهرم در مخازن مختلف، انتخاب وزن گل حفاری و نقطه‌ی جداره‌گذاری سناریوهای متفاوتی خواهند داشت.

تعریف سناریوهای مناسب نیازمند اطلاعات و بررسی‌های مفصل میداین حفاری شده بود که در قالب این مقاله نمی‌گنجد. قابل ذکر است که برای حفاری گروه دهرم و دستیابی به این مخزن معمولاً نخستین جداری تولیدی را ابتدای سازند کنگان و نخستین آستری تولیدی را انتهای کنگان یا انتهای نار نصب می‌کنند. بدیهی است در طراحی چاه مهندسان حفاری می‌کوشند با کمترین جداره‌گذاری و کاهش هزینه در ایمن‌ترین شرایط عملیاتی محاسبه و برنامه‌ریزی کنند.

## پانویس‌ها

- |                              |                  |  |
|------------------------------|------------------|--|
| 1. ebrahim.roohani@gmail.com | 5. Bioglesdeik   | 9. Consolidated permeable formation    |
| 2. Matsunaga et al           | 6. ou            | 10. Consolidated impermeable formation |
| 3. Zeng & Roegiers           | 7. Jang & Chen   | 11. Cuttings                           |
| 4. Depater                   | 8. Leak-off test | 12. Hubert                             |

## منابع

- [1] Matsunaga I., Kobayashi H., Sasaki S. and Ishida T., "Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring", Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Abstr., Vol. 30, No. 7, pp. 909-912, 2001.
- [2] Zeng Z. and Roegiers J., "Modeling of packer influence on hydraulic fracture initiation in laboratory tests", Rock Mechanics in the National Interest, Proc. 38th US Rock Mech. symp. 2002.
- [3] De pater C. J. and Beugelsdijk L. J. L., "Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock" presented at Alaska Rocks, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics. 2005.
- [4] Guo F., Morgenstem N. R., and Scott J. D; "An experimental investigation into hydraulic fracture propagation" Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Abstr., Vol. 30, No.3, 177-188. 2005.
- [5] Bohlooli B, De pater C. J., "Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: influence of fluid rheology and confining stress", J.Petroleum Science and Engineering .USA. No. 53, 2006.
- [6] Zhang. G, Chen M., "Dynamic fracture propagation in hydraulic re-frecturing", J. Petroleum Science and Engineering .USA. No. 70. 2010.
- [۷] محمد جواد سرباز حسینی، علی برزنونی، مهندسی گل، انتشارات آوا، سال ۱۳۹۱
- [8] Adam T, Bourgoyne Jr, Martin E, Chenevert F.S, Young Jr, Applied Drilling Engineering - Chapter (2), Drilling Fluid, 1986.
- [9] Formation Pore Pressure and Fracture Resistance, willistone 2009.
- [۱۰] سامانه‌ی اطلاعات چاه‌های نمونه‌ای از آرشیو حفاری و آزمایش شرکت ملی نفت ایران
- [11] Bob Bruce and Glenn Bowers,"Pore pressure terminology." The Leading Edge, 2002, 21.