





دانشکده مهندسی معدن، نفت، ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف

تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین پنجره گل به کمک نمودارهای پتروفیزیکی در افق‌های

کربناته - شیلی، واقع در یکی از میدان‌های هیدروکربوری جنوب ایران

نگارنده:

علی میانجی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علی کدخدائی

استاد مشاور صنعتی:

مهندس بی‌تا ارباب

تیر ماه ۱۳۹۶

تقدیم بہ

مادر م، دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود، وجودش برایم ہمہ

مهر و پدر م کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم.

مشکر و قدردانی

بامشکر از دکتر کامکار روحانی و دکتر که خدایی و خانم مهندس ارباب که در انجام این
پایان نامه بنده رایاری فرمودند و همچنین از همکاری امور توسعه و پژوهش شرکت فلات
قاره ایران در دسترسی به داده ها و اطلاعات مورد نیاز در انجام این پایان نامه که امکان
انجام آن با حمایت آن ها میسر گردید.

ضمناً بر خود وظیفه می دانم از رهنمودهای مهندس یعقوب محمدی مسئول عملیات بخش
زمین شناسی شرکت تاسیسات دریایی و همکار عزیزانی که در طول پروژه بنده را همراهی
کردند، مشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب علی میانجی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین پنجره گل به کمک نمودارهای پتروفیزیکی درافق های کربناته-شیلی، واقع در یکی از میدان های هیدروکربوری جنوب ایران تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علی کدخدائی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « *Shahrood University of Technology* » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هرزروی سیال حفاری یکی از پرهزینه‌ترین و مشکل‌آفرین‌ترین مسائل حفاری است. هزینه‌های گزاف در اثر سیال اضافی مصرف شده و نیز هزینه کارکرد بی‌بهره دکل حفاری بالغ بر میلیون‌ها دلار می‌باشد؛ که این پدیده در صورت عدم رعایت پنجره گل ایمن و نبود برنامه مناسب برای حفاری می‌تواند رخ دهد. هرزروی وقتی که در سازند مخزنی اتفاق بیافتد بسیار مشکل‌سازتر است چراکه آسیب‌های وارده به مخزن در بعضی موارد غیرقابل جبران است. در این پژوهش، پایداری دیواره چاه در یکی از میدان‌های هیدروکربنی جنوب ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سعی شده تا نتایج تحلیل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر باشد. برای این مهم نخست به تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی رانده شده در چاه پرداخته شده تا بتوان یک دید جامع از جنس سنگ دیواره داشت. برای صحت‌سنجی، نتایج تفسیر نمودارها با گزارشات مغزه شرکت نفت فلات قاره تطابق داده شد که نشان از یک نتیجه مطلوب بود. در ادامه به کمک نمودار صوتی و ترکیبی از سایر نمودارهای پتروفیزیکی، پارامترهای ژئومکانیکی مانند مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی و ... محاسبه شد. از طرفی با توجه به نبود بعضی از داده‌ها مثل جهت تنش‌های افقی و کرنش‌های تکتونیکی منطقه به‌ترتیب از داده‌های چاه مجاور و رابطه پوروالاستیک که به کمک حل معادله دو مجهولی به‌دست آمد، استفاده شد و در آخر پنجره گل ایمن برای چاه مورد مطالعه ارائه شد. در عمق‌های ۲۳۱۴/۹۶ و ۲۴۰۰ متری، تأثیر وجود شیل بر پنجره گل کاملاً مشهود می‌باشد که در این پژوهش نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در طول این پژوهش مشاهده شد که متأسفانه چاه مورد مطالعه به‌علت وزن بالای گل و عدم رعایت پنجره گل ایمن، دچار شکست کششی شده و پدیده هرزروی گل رخ داده است. عدم توانایی در کنترل مشکل به‌وجود آمده باعث از دست رفتن ۵۳۸ متر از حفاری و انجام حفاری کج از عمق ۲۴۰۰ متر بالای کفشک لوله جداری $9 \frac{5}{8}$ اینچ شده بود. نتیجه بررسی‌ها بر روی روش‌های کنترل چاه و ارائه یک مشکل عملیاتی و ارزیابی اقتصادی بودن روش پیشنهادی نشان داد که این روش یک روش مناسب برای گذر از لایه‌های پرفشار و کم‌فشار که در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند می‌تواند باشد ضمناً در

صورت موفقیت هزینه لاینر هم حذف خواهد شد. یکی دیگر از نتایج مهم در این پژوهش کوچک

شدن پهنای پنجره گل در افق شیلی و بزرگ شدن آن در دیواره‌های آهکی است.

کلمات کلیدی: ناپایداری چاه، افق‌های کربناته-شیلی، هزینه حفاری، مدل‌سازی اقتصادی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

میانجی، ع. ، کامکار روحانی، ا. ، کدخدایی، ع. ، ارباب، ب. ، رسول نژاد، ع. ، (۱۳۹۵)، مقایسه

هزینه های اجرای روش های مقابله با عدم پایداری دیواره چاه، دومین کنفرانس ملی ژئومکانیک

نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران.

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
بررسی عوامل ناپایداری دیواره چاه و پیامدهای ناشی از آن.....	۱
۲-۱ ناپایداری چاه.....	۴
۲-۲-۱ عوامل مکانیکی.....	۵
۴-۱ اهداف تحقیق.....	۱۰
۵-۱ ضرورت تحقیق.....	۱۰
۶-۱ سابقه تحقیق.....	۱۱
۷-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۱
فصل دوم.....	۱۳
مبانی تحلیل ژئومکانیکی.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ خواص مکانیکی سنگ.....	۱۵
۳-۲ محاسبه خواص مربوط به شکست سنگ.....	۱۵
۱-۳-۲ روابط تجربی برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری.....	۱۶
۲-۳-۲ محاسبه زاویه اصطکاک داخلی.....	۱۸
۳-۳-۲ محاسبه چسبندگی.....	۱۹
۴-۲ روابط تجربی برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی.....	۲۰

- ۵-۲ خواص استاتیکی سنگ ۲۲
- ۶-۲ خواص دینامیکی سنگ ۲۳
- ۷-۲ معیارهای شکست سنگ ۲۴
- ۱-۷-۲ معیار کلمب ۲۴
- ۲-۷-۲ معیار موهر ۲۶
- ۳-۷-۲ معیار موهر-کلمب ۲۶
- ۴-۷-۲ معیار موگی - کلمب ۲۷
- ۵-۷-۲ معیار لید اصلاح شده ۲۸
- ۸-۲ جهت و مقدار تنشهای برجا ۲۹
- ۹-۲ روشهای محاسبه تنشهای افقی ۳۰
- ۱-۹-۲ تعیین تنش افقی حداقل ۳۰
- ۱۰-۲ تخمین تنش افقی حداکثر ۳۲
- ۱-۱۰-۲ آزمایش شکست هیدرولیکی ۳۳
- ۲-۱۰-۲ کاربرد روابط تجربی (رابطه پوروالاستیک) ۳۴
- ۳-۱۰-۲ شکست فشاری ۳۴
- ۴-۱۰-۲ چندضلعی تنش ۳۵
- ۵-۱۰-۲ شکستگیهای کششی ۳۵
- ۱۱-۲ تعیین جهت تنشهای برجا ۳۶
- ۲-۱۱-۲ شکست هیدرولیکی ۳۶

۳-۱۱-۲	ناهمسانی سرعت موج برشی	۳۶
۴-۱۱-۲	تعیین جهت WOB	۳۷
۵-۱۱-۲	نمودار تصویری FMI	۳۷
۶-۱۱-۲	نقشه تنش‌های جهانی	۳۹
۱۲-۲	مکانیزمهای فیزیکی مشاهده شده در حین ناپایداری دیواره چاه	۳۹
۱-۱۲-۲	شکست کششی	۴۰
۲-۱۲-۲	شکست برشی	۴۰
۱۳-۲	تحلیل پایداری چاه	۴۰
۱۷-۲	گل حفاری	۴۹
۱-۱۷-۲	سیستم گردش گل	۴۹
۵۱	فصل سوم	
۵۱	زمین‌شناسی و معرفی ابزار مورد استفاده	
۵۱	جهت تحلیل پایداری چاه	
۱-۳	مقدمه	۵۲
۲-۳	زمینشناسی خلیج فارس	۵۲
۳-۳	زمینشناسی میدان مورد مطالعه	۵۳
۴-۳	سازندهای مخزنی مورد مطالعه	۵۵
۱-۴-۳	سازند داریان (در کشورهای عربی معروف به شعیبا)	۵۶
۲-۴-۳	سازند گدوان (معادل در کشورهای عربی، زبیر)	۵۷

۵۸	۳-۴-۳ سازند فهلپان (معادل در کشورهای عربی، یاماما)
۵۹	۵-۳ معرفی ابزارهای پتروفیزیکی مورد استفاده
۵۹	۱-۵-۳ ابزار نوترون
۵۹	۲-۵-۳ ابزار چگالی
۶۰	۳-۵-۳ ابزار پرتو گاما
۶۰	۴-۵-۳ ابزار کالیپر
۶۱	۵-۵-۳ ابزار الکتریکی
۶۱	۶-۵-۳ ابزار PEF
۶۲	۷-۵-۳ ابزارهای صوتی
۶۳	۸-۵-۳ ابزار DSI
۶۶	۶-۳ خواص رئولوژی گل حفاری
۶۷	ارزیابی پتروفیزیکی و تحلیل پایداری چاه در بازه عمقی مورد مطالعه
۶۸	۱-۴ مقدمه
۶۹	۲-۴ معرفی چاه مورد مطالعه
۷۰	۳-۴ تفسیر نگارهای پتروفیزیکی
۷۰	۱-۳-۴ تفسیر نمودارهای سازند داریان (شعبا)
۷۳	۲-۳-۴ نتایج تفسیر سازند گدوان
۷۶	۳-۳-۴ نتایج تفسیر سازند رتاوی
۷۸	۴-۳-۴ نتایج تفسیر سازند یاماما (فهلپان)

- ۴-۴ مقایسه جنس سنگ حاصل از تفسیر نگارهای چاه پیمایی با گزارشات مغزه ۸۱
- ۱-۴-۴ گزارشات مغزه ۸۱
- ۲-۴-۴ گزارشات مغزه‌های سازند داریان، جهت تطابق جنس سنگ ۸۲
- ۳-۴-۴ گزارشات مغزه‌های سازند گدوان، جهت تطابق جنس سنگ ۸۳
- ۴-۴-۴ گزارشات مغزه‌های سازند یاماما (فهلان)، جهت تطابق جنس سنگ ۸۳
- ۵-۴ تحلیل ژئومکانیکی چاه و تعیین وزن گل بهینه چاه ۸۴
- ۱-۵-۴ محاسبه تنشهای روباره ۸۵
- ۱-۱-۵-۴ روش برونمایی ۸۶
- ۲-۱-۵-۴ روش آموکو ۸۷
- ۳-۱-۵-۴ روش گاردنر ۸۷
- ۴-۱-۵-۴ روش میانگینگیری ۸۸
- ۲-۵-۴ محاسبه فشار منفذی ۸۹
- ۳-۵-۴ محاسبه خواص الاستیکی سنگ ۹۲
- ۴-۵-۴ محاسبه مقادیر استاتیکی ۹۳
- ۱-۴-۵-۴ محاسبه مقادیر استاتیک مدول یانگ ۹۳
- ۱-۱-۴-۵-۴ روش همبستگی مورال ۹۳
- ۱-۱-۴-۵-۴ روش تصحیح شده همبستگی مورال ۹۴
- ۲-۱-۴-۵-۴ روش همبستگی جان فولر ۹۵
- ۲-۱-۴-۵-۴ محاسبه مقادیر استاتیک پواسون ۹۶

۹۸	 محاسبه مقادیر استاتیک مدول برشی و مدول بالک
۱۰۰	 محاسبه خواص مکانیکی سازند
۱۰۰	 محاسبه ضریب بایوت به روش تخلخل کریف
۱۰۱	 محاسبه مقاومت فشاری به روش مدول برشی دینامیکی پلامب
۱۰۴	 محاسبه چسبندگی
۱۰۵	 محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ به کمک نمودار گاما
۱۰۶	 مقاومت کششی سنگ
۱۰۷	 تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا
۱۰۸	 روشهای محاسبه تنشهای برجا و تعیین جهت تنش برجا
۱۰۹	 محاسبه تنشهای افقی
۱۰۹	 مدل پوروالاستیک
۱۱۲	 تعیین وزن گل در افقهای مورد مطالعه
۱۱۸	 ارزیابی شرایط ناپایداری چاه مورد مطالعه:
۱۱۹	 شرح ناپایداری ایجاد شده در میدان مطالعاتی فراساحلی
۱۲۲	 بررسی روشهای پایدار نگه داشتن چاه
۱۲۶	 ارائه یک روش عملیاتی برای گذر از توالی لایه‌های پرفشار:
۱۲۹	 ارزیابی اقتصادی روش پیشنهادی
۱۳۱	 نتایج و پیشنهادات
۱۳۲	 ۱-۵ نتایج

۲-۵ پیشنهادات ۱۳۴

پیوست ۱: تعیین وزن مخصوص و گرانروی گل حفاری ۱۳۶

ویسکوزیته یا گرانروی (قیف مارش) ۱۳۶

منابع: ۱۳۸

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) مقایسه هزینه‌های مشکلات چاه [Amoco, 2005] ۸
- شکل (۱-۲) معیار شکست کلمپ: (a) شکست برشی در صفحه $a - b$ ، (b) نمودار مقاومت بر حسب تنشهای نرمال و برشی (Al-Ajmi, 2006,) ۲۵
- شکل (۲-۲) معیار شکست موهر [Al-Ajmi, 2006] ۲۶
- شکل (۳-۲) ابزار تصویر ساز FMI [Schroeder] ۳۸
- شکل (۲-۲) وضعیت ناپیوستگی‌ها در چاه و تصویر به‌دست آمده از آن بر روی نمودار تصویری ۳۹
- شکل (۳-۲) سیستم گردش گل [Applied Engineering Drilling, 1983] ۵۰
- شکل ۱-۳ موقعیت زمینشناسی و تکنیکی منطقه [IOOC Report, 2014] ۵۴
- شکل ۲-۳ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی [IOOC Report, 2014] ۵۴
- شکل (۳-۳) نمای کلی از توالی سازندها و ستون چینهشناسی [IOOC Report, 2014] ۵۵
- شکل (۴-۳) چینهشناسی منطقه [IOOC Report, 2014] ۵۷
- شکل ۴-۳ ابزار صوتی تک قطبی ۶۳
- شکل ۵-۳ ابزار صوتی دو قطبی [Drillscan Company presentation, 2016] ۶۳
- شکل (۶-۳) طرز کار ابزار [Drillscan Company presentation, 2016] ۶۴
- شکل (۱-۴) شماتیک سه‌بعدی از چاه مورد مطالعه با مقادیر نمودار کالیپر ۶۹
- شکل (۲-۴) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند داریان ۷۱
- شکل (۳-۴) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند داریان ۷۲
- شکل (۵-۴) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند گدوان (عضو آهکی خلیج) ۷۴
- شکل (۶-۴) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند گدوان ۷۶
- شکل (۷-۴) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند رتاوی ۷۷
- شکل (۸-۴) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند رتاوی ۷۸
- شکل (۹-۴) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند یاماما (فهلان) ۷۹
- شکل (۱۰-۴) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند یاماما (فهلان) ۸۰
- شکل (۱۱-۴) مراحل انجام تحلیل ناپایداری چاه ۸۵
- شکل (۱۲-۴) نمایی از تنشهای روباره [Amoco, 2005] ۸۵

۸۷.....	شکل (۴-۱۳) محاسبه تنش روباره به کمک روش برونابی [Techlog, (2015.3)].
۸۸.....	شکل (۴-۱۴) نتایج محاسبات وزن روباره
۹۱.....	شکل (۴-۱۵) فشار منفذی
۹۲.....	شکل (۴-۱۶) خواص الاستیکی
۹۴.....	شکل (۴-۱۷) مقادیر مدول یانگ به روش همبستگی مورال
۹۵.....	شکل (۴-۱۸) مقادیر مدول یانگ به روش تصحیح شده همبستگی مورال
۹۹.....	شکل (۴-۲۲) مقادیر مدول برشی و مدول بالک
۱۰۱.....	شکل (۴-۲۳) مقادیر ضریب بایوت در طول چاه
۱۰۲.....	شکل (۴-۲۴) مقادیر مقاومت فشاری به روش مدول برشی دینامیکی پلامب
۱۰۳.....	شکل (۴-۲۵) مقادیر مقاومت فشاری به روش مدول استاتیکی یانگ پلامب
۱۰۴.....	شکل (۴-۲۶) چسبندگی سنگ
۱۰۵.....	شکل (۴-۲۷) نحوه محاسبه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و نتیجه حاصل شده
۱۰۶.....	شکل (۴-۲۸) مقادیر مقاومت کششی سنگ
۱۰۹.....	شکل (۴-۲۹) پارامترهای لازم چاه مجاور برای محاسبه تنشهای ماکزیمم و مینیمم منطقه
۱۱۱.....	شکل (۴-۳۰) مقادیر تنشهای قائم و افقی ماکزیمم و مینیمم در طول چاه
۱۱۳.....	شکل (۴-۳۱) پنجره گل با دو معیار شکست متفاوت
۱۱۴.....	شکل (۴-۳۲) پنجره ایمن گل با معیار شکست موهر کلمب
۱۱۶.....	شکل (۴-۳۳) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۴۰۰ متر - بدون ریزش و آهکی
۱۱۷.....	شکل (۴-۳۴) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۳۱۴.۹۶ متری - حاوی شیل و ریزشی
۱۱۸.....	شکل (۴-۳۵) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۸۰۰.۰۵ متری - بدون ریزش و شیل
۱۲۱.....	شکل (۴-۳۶) نمودار شماتیک دوبعدی از چاه مورد مطالعه
۱۲۶.....	شکل (۴-۳۷) نتایج تحلیل و تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در مورد ریزش چاه
۱۳۱.....	شکل (۴-۳۸) مقایسه هزینه سیمانکاری و گل حفاری بر حسب زمان
۱۳۶.....	شکل پ-۱: وزنگیری گل حفاری با ترازوی مخصوص
۱۳۷.....	شکل پ-۲: قیف مارش
۱۳۷.....	شکل پ-۳: وزن گل حفاری واقعی در چاه مورد مطالعه

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۱) عوامل ناپایداری چاه	۵
جدول (۲-۱) نتایج و تبعات ناپایداری چاه	۷
جدول (۱-۳) هزینه‌های تحمیلی بر اثر ناپایداری چاه [Amoco, 2005; Detourney & Chen, 2005]	۷
جدول (۱-۲) معرفی برخی از روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری در سنگ‌های کربناته [Zoback, 2007]	۱۶
جدول (۲-۲) معرفی برخی از مهمترین روابط ارائه شده برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی	۱۹
جدول (۳-۲) معرفی برخی از مهمترین روابط ارائه شده برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی [Zoback, 2007]	۲۱
جدول (۴-۲) روابط تجربی تخمین تنش اصلی حداقل [Zoback, 2007]	۳۲
جدول (۵-۲) روشهای تحلیل پایداری چاه	۴۱
جدول (۶-۲) روابط مربوط به تخمین موج برشی	۴۸
جدول (۱-۴) مغزه‌های گرفته شده در چاه مورد مطالعه [IOOC Report, 2014]	۷۰
جدول (۲-۴) مغزه‌های گرفته‌شده در چاه مورد مطالعه [IOOC Report, 2014]	۸۱
جدول (۳-۴) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند داریان [IOOC Report, 2014]	۸۲
جدول (۴-۴) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند گدوان به انضمام عضو خلیج [IOOC Report, 2014]	۸۳
جدول (۵-۴) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند یاماما (فهلین) [IOOC Report, 2014]	۸۴
جدول (۶-۴) روابط محاسبه مقادیر استاتیکی مدول یانگ برای سه گروه تخلخل	۹۴

- جدول (۴-۶) فهرستی از پارامترهای ورودی برای تعیین پنجره گل ۱۱۲
- جدول (۴-۸) بازه عمقی زون پرفشار ۱۱۹
- جدول (۴-۹) وزن گل حفاریشده در طول حفره 8 1/2 اینچ [IOOC, (2011), GWL Report] ۱۲۰
- جدول (۴-۱۰) تأثیر گل بر پایداری چاه در شرایط متفاوت ۱۲۳
- جدول (۴-۱۱) معرفی مواد صنعتی لازم جهت پایدارسازی چاه در صورت ایجاد شکست کششی... ۱۲۵
- جدول (۴-۱۲) هزینههای سیمانکاری و گل حفاری چاه مورد مطالعه [میانجی و همکاران، ۱۳۹۵] ۱۲۷
- جدول (۴-۱۳) نتایج سیمانکاری و تست FIT [SAED, (2016)] ۱۲۹

فصل اول

بررسی عوامل نمایداری دیواره چاه و

پیامدهای ناشی از آن

۱-۱ مقدمه

عدم پایداری چاه یکی از مشکلات مهم و پیش رو صنعت نفت نه تنها در ایران بلکه در کل جهان است. این مسئله به دو علت می‌تواند قابل توجه باشد: علت اول ناپایداری چاه هزینه‌های زیاد به شرکت‌های عملیاتی در میدان‌های هیدروکربنی تحمیل می‌کند. گیر کردن^۱ لوله‌ها و گم شدن^۲ سیال حفاری و ... برخی از تبعات ناپایداری است. علت دوم که می‌تواند توجه بسیاری از متخصصان حوزه نفت را به ویژه در میادین مشترک به خود جلب کند، رسیدن به مرحله‌ای از حفاری است که می‌تواند موجب تولید شود. طبیعی است که هر چه ناپایدارتر باشد زمان رسیدن به مخزن بیشتر و تولید دیر اتفاق خواهد افتاد. حال با توجه به این که در ایران ۲۸ میدان مشترک وجود دارد آذینلی حسوند، [۱۳۹۲]. اهمیت علت دوم بیشتر می‌تواند چشم‌گیر باشد موضوع این پژوهش، یک موضوع عملیاتی و استراتژیکی است.

امروزه در جهان، اهمیت نفت و منابع هیدروکربنی بسیار زیاد است. به‌طوری‌که در طول تاریخ همواره جنگ بر سر انرژی یکی از مهم‌ترین درگیری‌ها در بین ملت‌ها بوده است. در دسترس بودن منابع هیدروکربنی و یا عدم دسترسی به آن تعیین کننده پیروز جنگ‌ها بوده است. با توجه به جنگ جهانی دوم که از سال ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ به‌طول انجامید، یکی از علل شکست خوردن نازی‌ها در دوران خود یکی از بزرگترین ابر قدرت‌های نظامی بودند، عدم دسترسی به منابع هیدروکربنی با اتمام سوخت مواجه شدند. در مقابل آن روسیه علاوه بر منابع هیدروکربنی خود، منابع نفتی باکو را نیز در اختیار داشت. به همین علت این امکان باعث شد تا آلمان را در نبرد استالینگراد شکست دهند.

با توجه به ارزش این منابع خدادادی و نظر به برداشت کشورهای همسایه از میادین مشترک، از سال‌های اخیر به طور کامل سیاست‌های وزارت نفت، بر روی میادین مشترک متمرکز شد.

¹ Stuck

² Loss

حفر چاه به عنوان عاملی جهت دسترسی به مخزن نفتی و تولید نفت می باشد. با توجه به آن که چاه معمولاً با شیب و آزیموت های متفاوت بوده و از میان لایه های با خواص متفاوت می گذرد؛ لذا فرآیند حفاری پر مخاطره می باشد. از دست دادن چاه به واسطه ایجاد ناپایداری نیز منجر به هزینه های هنگفت و توقف در عملیات تولید می گردد. لذا تحلیل و پیش بینی پایداری چاه از اهمیت ویژه برخوردار است. از جمله پارامترهای مؤثر در ناپایداری چاه می توان به مسیر حفر چاه، جهت و بزرگی تنش های برجا، خصوصیات مکانیک سنگی، فشار منفذی و فشار گل اشاره نمود. اگر چه حفاری فروتعادلی^۱ یک راه حل برای کاهش صدمات وارده به سازند است، اما طراحی نادرست آن می تواند صدماتی را به سازند وارد کند که از حفاری فراتعادلی^۲ بیشتر باشد. یکی از پارامترهای مهم تعیین کننده برای روش حفاری تحت تعادل میزان پایداری دیواره چاه است؛ لذا تعیین وضعیت پایداری سازند کمک زیادی به طراحی و حفاری چاه های قائم و افقی می کند.

عموماً میدان های نفتی از طریق سکوه های نفتی که به طور چشم گیری بر توسعه هزینه های نفتی تأثیرگذار هستند، استخراج می گردند. تعداد سکوه های نفتی با استفاده از چاه های غیر عمودی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. چاه های افقی و غیر عمودی میزان فضای استخراج نفت از یک نقطه را افزایش می دهد. این امر موجب تولید بیشتر نفت و متعاقباً منجر به کاهش تعداد سکوه های نفتی استخراجی می گردد. در بعضی موارد، چاه های زاویه دار حفر شده دارای فاصله انحراف افقی قابل توجهی از منطقه حفاری می باشند. در واقع از این مسئله عمدتاً جهت دسترسی به قسمت های گسترده ای از مخزن از یک نقطه، که منجر به کاهش تعداد سکوه های نفتی می شود، استفاده می گردد. علاوه بر این از چاه های زاویه دار در مواقعی که امکان دسترسی از طریق چاه های عمودی وجود ندارد، استفاده می گردد. با این حال حفر چاه های غیر عمودی مسائل و مشکلات جدیدتری را به همراه خود به وجود می آورد، از قبیل انتقال قطعات کنده شده توسط مته، جادهی و نصب لوله جداری^۳ و سیمان-

¹ Under Balance Drilling

² Over Balance Drilling

³ Casing

کاری و اصطکاک رشته‌های حفاری. همچنین افزایش زاویه چاه‌های نفتی در بعضی مواقع منجر به افزایش ناپایداری در حین حفاری چاه می‌گردد [علی طاهری فرد، ۱۳۹۱].

در این فصل، سعی بر این شده که به‌طور کلی عوامل مؤثر بر ناپایداری چاه و پیامدهای آن مورد بررسی قرار گیرد که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱ ناپایداری چاه

عواملی که باعث ناپایداری در چاه می‌شوند: عامل شیمیایی، عامل مکانیکی و همچنین تأثیر هر دو عامل شیمیایی و مکانیکی بر دیواره چاه می‌تواند، پایداری چاه را متأثر سازد. عوامل شیمیایی تحت تأثیر شدید گل حفاری هستند و در واقع وابسته به دو عامل ۱- نوع گل نامناسب ۲- باز دارنده‌های ناکافی هستند. البته در اکثر موارد ناپایداری چاه ناشی از تأثیر هر دو عامل شیمیایی و فیزیکی (مکانیکی) است [Amoco, 2005].

پس به‌طور کلی عوامل مؤثر بر ناپایداری دیواره چاه در دو گروه طبقه‌بندی می‌شود:

- عوامل شیمیایی
- عوامل مکانیکی

۱-۲-۱ عوامل شیمیایی

عامل شیمیایی غالباً در سازندهای شیلی مشاهده شده و شدیداً تحت تأثیر سیال حفاری هستند. شیل یکی از پیچیده‌ترین سنگ‌ها است. معمولاً دارای مقدار زیادی کانی‌های رسی و غیر قابل نفوذ است اگرچه کاملاً متخلخل است. واکنش رس موجود در شیل با سیالات نامناسب حفاری، باعث انبساط و ایجاد تنش‌های هیدرولیکی و تغییر خواص آن در طول زمان خواهد شد. از این‌رو واکنش شیمیایی شیل با سیالات حفاری پایه آبی باعث به وجود آمدن مشکلات جدی در امر پایداری دیواره چاه می‌شود. تغییر در فشار منفذی اثر شدیدی بر پایداری چاه در حین حفاری شیل دارد. زیرا همان‌طور که اشاره شد، شیل نفوذپذیری پایینی دارد و جریان یون‌ها و آب در آن بسیار کند می‌باشد، در

حین حفاری تغییر فشار منفذی عمده‌ای در نزدیک دیواره چاه رخ می‌دهد و گرادیان فشار منفذی القایی بزرگی در این منطقه کوچک به وجود می‌آید [Yongfeng Kang, et al., 2009].

از طرفی بر اساس شرایط موجود و نوع لیتولوژی ممکن است باعث بزرگ‌تر شدن قطر چاه شود و حفره‌ای ایجاد کند و یا اینکه اگر سنگ سالم باقی بماند باعث کاهش قطر چاه گردد. شسته شدن سازندهای نمکی ممکن است باعث ایجاد حفره‌های بزرگی در اطراف چاه شود و به شدت گل حفاری را آلوده کند و در این حالت، گل حفاری باید کامل عوض شود.

به هر حال این خاصیت رفتار شیمیایی شیل، منجر به ریزش دیواره چاه در طول زمان بر اثر تبادل یونی از طریق غشای نیمه تراوای بین شیل و سیال حفاری و دیگر افزودنی‌های شیمیایی می‌شود. اما با طراحی درست سیال حفاری قادر به جلوگیری ناپایداری چاه خواهیم بود.

۱-۲-۲ عوامل مکانیکی

اصلی‌ترین عواملی که منجر به ناپایداری چاه، خصوصاً در سازندهای غیر شیلی می‌شود، عوامل فیزیکی هستند که به طور کلی وابسته به وزن سیال حفاری، روش حفاری و شرایط طبیعی و محیطی سازند می‌باشند. عوامل عمده اثرگذار بر پایداری چاه توسط مهندسين در دو دسته قابل کنترل و غیر قابل کنترل گروه‌بندی شده‌اند که در جدول (۱-۱) آورده شده‌اند.

جدول (۱-۱) عوامل ناپایداری چاه

عوامل قابل کنترل		عوامل غیرقابل کنترل	
مسیر چاه	نوع سیال حفاری	تخلخل و نفوذپذیری	تنش‌های برجا
ابعاد چاه	ارتعاشات رشته حفاری	توزیع تخلخل و ابعاد دانه‌ها	فشار منفذی
دمای ته چاهی	وزن سیال حفاری	شکاف‌های طبیعی	ویژگی سنگ
فشار ته چاهی	زمان بدون پوشش بودن دیوار چاه	خواص گرمایی سنگ	سیال سازند
مکان چاه	نرخ گردش سیال حفاری	دمای سازند	مقاومت سنگ

۱-۲-۲-۱ عوامل غیر قابل کنترل

در واقع عوامل طبیعی جزئی از خواص سازند به حساب می‌آیند. بنابراین تغییر آن‌ها غیرممکن بوده و باید اثر این عوامل بر پایداری چاه به دقت بررسی شود. به عنوان مثال اگر لایه‌ای ضعیف و سست سطح مقطع چاه را با زاویه‌ای نامناسب قطع کند، مشکل ناپایداری چاه ممکن است شدیدتر شود. یا اگر افق بسیار شکاف‌دار باشد، خصوصاً در مجاورت گل‌ها باعث سقوط حجم قابل توجهی از سنگ به داخل چاه شده و یا فشار حفره‌ای بالا ممکن است منجر به ریزش و یا همگرایی چاه شود [McLellan & Hawkes, 2002].

۱-۲-۲-۲ عوامل قابل کنترل

این عوامل برخلاف عوامل قبلی، عوامل قابل تغییر و مهندسی می‌باشند که برای داشتن یک حفاری موفق، خصوصاً در شرایط حفاری باید این عوامل را به دقت تحلیل و بررسی کرد و بهترین حالت متناسب با عوامل طبیعی و غیر قابل کنترل را انتخاب کرد. به عنوان مثال جهت و آزمون متناسب با جهت و مقدار تنش‌های برجای اصلی در چاه، یک عامل بسیار مؤثر برای کاهش ریزش و شکست در دیوار است [McLellan & Hawkes, 2002].

۱-۳ پیامدهای ناپایداری دیواره چاه

ناپایدار شدن دیواره چاه ممکن است مشکلات بعدی را موجب شود. ناپایداری دیواره به صورت شکاف خوردن، می‌تواند باعث هرزروی و در حالت ریزش منجر به ایجاد حفره و گشاد شدن چاه و یا به هم آمدن و بسته شدن چاه شود. در بعضی حالت‌ها ناپایداری در چاه باعث چسبیدن لوله‌ها و بعضی وقت‌ها منجر به از دست رفتن بخش فاقد لوله جداری^۱ می‌شود [McLellan & Hawkes, 2002]. به طور کلی ناپایداری دیواره چاه در حین حفاری باعث گشاد شدن^۲، ناتوانی در نصب لوله جداری، از دست رفتن تجهیزات حفاری، نمودارگیری و سیمان‌کاری ضعیف، فوران چاه و به طور کلی افزایش

^۱ Openhole

^۲ Washout

هزینه‌ها خواهد شد [Birchwood et al., 2005]. جدول (۲-۱) تبعات ناپایداری چاه‌های نفتی را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۱) نتایج و تبعات ناپایداری چاه

تبعات غیرمستقیم	تبعات مستقیم
بالا رفتن گشتاور و نیروی کشش	قطر شدن چاه به دلیل شکست دیواره چاه
گیر کردن رشته حفاری	کوچک شدن قطر چاه به دلیل وجود جریان پلاستیک
افزایش فشار گردش سیال حفاری	ایجاد اشکال در انتقال مواد جامد در سطح
گسیختگی رشته حفاری	کیفیت نمودارگیری و سیمان کاری ضعیف

به‌طور کلی ناپایداری دیواره چاه نگرانی‌های عمده‌ای را در صنعت نفت و گاز به دلیل پرهزینه بودن و احتمال به خطر انداختن پرسنل مشغول به عملیات به وجود می‌آورد [Helstrup et al, 2004].

فقط زیان مالی حاصل از ناپایداری دیواره چاه در سازندهای شیلی سالانه ۱/۳ میلیارد دلار برآورد شده است [Tare & Mody, 1999]. هزینه‌های اضافی مربوط به مشکلات ناپایداری برای تعدادی از شرکت‌های معتبر نفتی در جدول (۳-۱) لحاظ شده است [Birchwood et al, 2005].

جدول (۳-۱) هزینه‌های تحمیلی بر اثر ناپایداری چاه [Amoco, 2005; Detourney & Chen, 2005].

نام شرکت	هزینه‌های سالانه تحمیلی بر اثر عدم ناپایداری چاه
شرکت BP	۱-۶ میلیارد دلار
شرکت Shell	۶/۰ میلیارد دلار
شرکت Exxon mobil	بیش از ۱۰ درصد هزینه کلی مربوط به چاه
شرکت Amoco	۶۰۰ میلیون تا ۱ میلیارد دلار در سال

در نتیجه پایداری دیواره چاه یکی از اساسی‌ترین مسائل در صنعت نفت و گاز است. همان‌طور که اشاره شد مشکلات مربوط به ناپایداری دیواره چاه هزینه‌های اضافی مربوط به عملیات حفاری را به دنبال داشته و همچنین اثر شدیدی بر جدول برنامه‌ریزی عملیات خواهد داشت. در شکل (۱-۱)، تفاوت هزینه‌های تحمیلی بر شرکت‌ها در حالت‌های مختلف یک چاه مشاهده می‌شود؛ که توسط شرکت آموکو جمع این هزینه‌ها برآورد شده است. در نتیجه بسیاری از شرکت‌های نفتی در مرحله طراحی چاه، عملیات مربوط به تحلیل پایداری دیواره را در اولویت قرار داده‌اند [Detourney & Chen, 2005].



شکل (۱-۱) مقایسه هزینه‌های مشکلات چاه [Amoco, 2005].

از علائم ناپایداری دیواره در حین حفاری پوسته پوسته شدن دیواره، کاهش سرعت حفاری، چسبیدن لوله‌ها، گشاد شدگی غیر طبیعی چاه، نیاز به تمیز کاری مفرط و غیر طبیعی برای رسیدن به ته چاه، ریزش کامل دیواره چاه، ایجاد شکاف، هرزروی سیال حفاری و حتی فوران داخلی چاه می‌باشد [Pawel et al., 1998]. روش معمول برای آگاه شدن از ناپایداری دیواره چاه عدم توازن میان سیال حفاری پمپ شده به داخل چاه و سیال برگشتی است. به‌طوری‌که اگر برگشت سیال حفاری کمتر از مقدار پمپ شده باشد نشانه هرزروی به داخل سازند و اگر برگشت سیال بیش از مقدار پمپ شده به داخل چاه باشد، هجوم سیال سازند به داخل چاه خواهد بود [Helstrup et al., 2004].

شکست مکانیکی دیواره چاه، نتیجه فعل و انفعال بین تنش‌ها در دیواره چاه و مقاومت سنگ است. بنابراین ابزار اساسی تحلیل پایداری دیواره چاه، تحلیل تنش‌ها و انتخاب معیار شکست مناسب می‌باشد [Moos et al., 2003].

ابتدایی‌ترین شرایط برای پایداری چاه، تعادل میان تمرکز تنش در دیواره چاه و استحکام و مقاومت سنگ می‌باشد [Tare & Mody, 1999]. به‌طور کلی باید گفت ناپایداری دیواره چاه نتیجه عکس‌العمل سنگ دیواره چاه به تمرکز تنش القایی ناشی از عملیات حفاری می‌باشد. اگر مقاومت سنگ بیش از مقدار تنش القایی باشد، چاه پایدار خواهد بود، اگر بالعکس شود سنگ تسلیم خواهد شد و احتمال به وجود آوردن ناپایداری در چاه وجود دارد. آیا این ناپایداری باعث به وجود آوردن مشکلات جدی خواهد شد یا نه؟ به عوامل زیادی بستگی دارد که مهمترین آن‌ها عبارتند از [McLellan & Hawkes, 2002]:

- رفتار بعد از شکست سنگ
- حجم سنگ جدا شده و فرو ریخته
- حساسیت عملیات حفاری به گشادشدگی یا مچاله شدن¹ چاه
- ظرفیت تمیز کاری چاه (خواص سیال و سرعت گردش سیال حفاری)

بنابراین اولین مرحله تحلیل پایداری چاه شامل تعریف و تفسیر مشکلات مشاهده شده در میدان است. شناخت مکانیزم و طبقه‌بندی درست انواع ناپایداری در چاه مهمترین مسئله برای هر تحلیل دیگری می‌باشد. به‌طور کلی ناپایداری‌های مشاهده شده در چاه در حین عملیات حفاری به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- گشادشدگی
- تنگ‌شدگی چاه
- ایجاد زون پلاستیک دگرگون شده یا آسیب دیده
- هرزروی سیال حفاری¹

¹ Collapse

سه نوع اول به منطقه نزدیک دیواره چاه مربوط می‌شود و غالب اوقات آن‌ها را با نام ریزش می‌شناسند. در حالی که نوع آخر به هجوم گل به داخل میدان منجر شده و در نتیجه به شکاف القایی کششی یا شکاف‌های طبیعی از قبل موجود مربوط می‌شوند [Tare & Mody, 1999].

۴-۱ اهداف تحقیق

پایداری چاه یک مسئله مهم در صنعت نفت، نه تنها در بخش حفاری بلکه در مرحله تولید نیز به حساب می‌آید. به همین دلیل برای انجام یک تحلیل درست از پایداری چاه باید در مرحله اول یک تفسیر پتروفیزیکی صحیح از دیواره چاه داشت تا بتوان پس از ساخت مدل ژئومکانیکی در آخر یک پنجره گل ایمن را برای حفاری پایدار تعریف کرد. به همین جهت هدف در این پژوهش تعیین پنجره گل ایمن در افق‌های کربناته-شیلی به کمک نمودارهای پتروفیزیکی است. در مراحل بعد دلیل بزرگ و کوچک شدن پنجره گل از دیدگاه لیتولوژی دیواره چاه بررسی شده است.

همچنین یکی از اهداف مهم در این پژوهش، همان طور که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد، هزینه‌های تحمیلی از ناپایداری چاه به شرکت‌های پیمانکار و کارفرمای نفتی که یک مسئله مهم به حساب می‌آید، می‌باشد. در مطالعه موردی در افق‌های پایین‌تر یک ناپایداری قابل توجه مشاهده شد. پس از انجام پژوهش‌های میدانی بر روی چندین میدان نفتی، یک روش عملیاتی برای مقابله با ناپایداری چاه ارائه شد. پس از جمع آوری داده‌های لازم از میدان‌های نفتی و شرکت‌های سرویس چاه، مدل‌سازی اقتصادی جهت مقرون به صرفه بودن هزینه‌های روش پیشنهادی انجام شد.

۵-۱ ضرورت تحقیق

بررسی مشکلات پیش‌آمده در اثر ناپایداری چاه در چند میدان غربی و جنوبی ایران و خارج از کشور، برای مثال، در سال ۲۰۱۰ در اثر فوران چاه در خلیج مکزیک به علت افت فشار هیدرواستاتیکی حاصل

¹ Drilling Fluid Loss

از گل حفاری، ۱۱ نفر جان خود را از دست دادند و فوران ۸۷ روز طول کشید و ۲۱۰ میلیون بشکه نفت هدر رفت. که از نمونه‌های بارز، عدم رعایت پنجره گل ایمن است. از طرفی احتمال دارد در بخش مخزنی، حفاری به صورت فراتعادلی که در ایران مرسوم است، انجام شود. در این حالت ممکن است حتی با افزایش کم وزن گل، شکست کششی رخ دهد و به مخزن آسیب برسد که در مرحله تولید، اثر منفی بر فشار چاه دارد. بنابراین بررسی ناپایداری چاه و میزان گل حفاری ضروری می‌باشد.

۱-۶ سابقه تحقیق

از سال ۱۹۸۶ تا به امروز پژوهشگران زیادی بر روی پایداری چاه و عوامل مؤثر بر پایداری چاه کار کرده‌اند. عواملی چون آزمون، زاویه حفاری، وزن گل و خواص سنگ بر آن تاثیرگذار بوده است. در فصل ۲ به صورت کامل پیشینه پژوهشی در مورد پایداری چاه آورده شده است.

قبل از ساخت یک مدل ژئومکانیکی، نیاز است خواص مکانیکی سنگ، مدول الاستیسیته، فشار منفذی و ... محاسبه گردد. با توجه به اینکه برای محاسبه مدول الاستیسیته جهت آزمایشات مکانیک سنگی داده‌های کافی در دسترس نمی‌باشد. برای داشتن مدلی از سرشت دیواره چاه و مخزن، داده‌های صوتی سرعت موج برشی و تراکمی و سایر ابزارهای پتروفیزیکی مورد نیاز است. در اغلب پژوهش‌ها به کمک روابط تجربی سرعت موج برشی از روی سرعت موج تراکمی محاسبه می‌شود. پیشینه پژوهشی روابط تجربی در جدول (۲-۶)، در فصل دوم به طور کامل آورده شده است.

۱-۷ ساختار پایان نامه

فصل اول به معرفی کلیات موضوع پرداخته شده است. در فصل دوم به مبانی ژئومکانیک و پیشینه پژوهشی آن و همچنین به معرفی موج برشی و روابط آن اختصاص داده شد. زمین‌شناسی، ابزار و داده‌ها در فصل سوم معرفی شده‌اند. فصل چهارم روش کار بیان به تفصیل شده است. همچنین لازم

به ذکر است که در ابتدای هر فصل یک مقدمه برای معرفی فصل گنجانده شده است. در فصل پنجم نیز نتایج و پیشنهادات این پژوهش آورده شده است.

فصل دوم

مہانی تحلیل ژئومکانیکی

رفتار غیرمنتظره و یا ناشناخته سنگ اغلب سبب مشکلات حفاری می‌شود. که منجر به اتلاف هزینه و زمان و در برخی اوقات، از دست دادن بخشی و یا کل چاه می‌شود. پایداری چاه یک مسئله مهم در صنعت نفت است. در نتیجه، مهمترین دغدغه یک مهندس حفار نگاه داشتن چاه در شرایط پایدار و جلوگیری از فروریزش دیواره چاه است که سبب توجه ویژه به برنامه سیال حفاری و برنامه طراحی لوله جداری و روش‌های عملیاتی در حفر یک چاه می‌شود. ناپایداری چاه، یک مشکل عمده برای چاه‌های افقی و چاه‌های حفاری امتداد جانبی^۱ (ER) مخصوصاً چاه‌های با بخش‌های جانبی^۲ که بدون لوله جداری^۳ باقی می‌مانند. در بعضی از موارد بخش زاویه‌سازی^۴ در سنگ‌های شیلی بسیار مشکل‌زا است. روش‌های حفاری جدید مانند حفاری فرو تعادلی (UBD) و حفاری با فشار بالای جت^۵ و چاه‌های افقی Re-entry و شاخه‌های جانبی چندگانه از یک چاه عمودی و یا افقی، روش‌های مقابله با ناپایداری چاه را دشوارتر می‌کند. برای حفاری، مطلوب است از روش‌های منسجم پیش‌گویانه^۶ که کمک به بهینه‌سازی وزن گل و خصوصیات حرکتی^۷ گل می‌کند، به کار برده شود [Pasic, 2007].

بنابراین تحلیل پایداری یک چاه، نیازمند داشتن اطلاعات متعددی از چاه مورد مطالعه و دانستن مفاهیم لازم برای تحلیل جامع از چاه مورد مطالعه است. در طول این فصل، نخست به معرفی مفاهیم لازم که در طول پژوهش از آن‌ها استفاده شده، پرداخته شده است. سپس تاریخچه پژوهشی آن‌ها بیان شده و مورد نقد و بررسی قرار گرفته شده است.

¹ Extended reach well

² Multi lateral well

³ open hole

⁴ Buildup

⁵ High pressure jet drilling

⁶ Integrated predictive methods

⁷ Rheology

۲-۲ خواص مکانیکی سنگ

به منظور طراحی مناسب عملیات حفاری آشنایی به خواص مکانیکی (الاستیک) سازند لازم است. خواص الاستیک سنگ برای بیان مقاومت سنگ در برابر تنش‌ها بدون اینکه تغییر شکل دائم رخ دهد، تعریف می‌شوند. تمام مواد جامد، از جمله سنگ‌ها در ارتباط بین کشش و فشار از قانون هوک تبعیت می‌کنند. پارامترهای الاستیک سنگ شامل مدول یانگ^۱، ضریب پواسون^۲، مدول برشی^۳، مدول حجمی^۴ و ضریب تراکم‌پذیری^۵ است [Birchwood et al., 2005].

این پارامترها را می‌توان از طریق آزمایش‌های فشاری تک محوره و سه محوره روی نمونه مغزه و یا از طریق نمودارهای الکتریکی، به‌خصوص داده‌های صوتی به‌دست آورد [Flacao, et al., 2000]. مقادیر اندازه‌گیری شده به روش اول را استاتیک و روش دوم را دینامیک گویند. بین مقادیر اندازه‌گیری شده به روش استاتیک با روش دینامیک اختلاف وجود دارد. اما با این وجود، روش دینامیک به دلیل صرفه جویی در زمان و هزینه‌ها، با وجود دقت پایین‌تر آن نسبت به روش استاتیک در میدان نفتی مرسوم شده است به همین علت اغلب داده‌های استاتیک در دسترس نیستند. البته لازم به ذکر است روش استاتیکی معایبی از جمله این که در آزمایشگاه نمی‌توان شرایط کامل مخزن را ایجاد کرد و در آن حالت پارامترهای لازم را محاسبه کرد. از طرفی به خاطر ایجاد شکستگی‌های القایی در مغزه نمی‌توان به طور یقین به اطلاعات حاصله از آزمایش مغزه اکتفا نمود.

۳-۲ محاسبه خواص مربوط به شکست سنگ

خواص مربوط به شکست سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی است.

¹ Young modulus

² Poisson Ratio

³ Shear modulus

⁴ Bulk modulus

⁵ Compressibility

۲-۳-۱ روابط تجربی برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری

مقاومت تراکمی تک محوره سنگ، یکی از معیارهای رایج در ارزیابی مقاومت سنگ بکر می‌باشد. بررسی‌های مبتنی بر آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه، از روش‌های اصلی و رایج تخمین مقاومت تراکمی تک محوری محسوب می‌شود. در بیشتر چاه‌های حفر شده، در بسیاری از بازه‌های چاه که این اطلاعات مورد نیاز هستند، مغزه‌ها موجود نمی‌باشند به همین منظور در چند دهه گذشته، روابط تجربی متعددی برای محاسبه مقاومت فشاری یا تراکمی تک محوره (UCS) بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری، چگالی و تخلخل، در جنس سنگ‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه سنگ مخزن در میدان مورد مطالعه از جنس کربناته می‌باشد در جدول (۲-۱) برخی از مهم‌ترین روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری در سنگ‌های کربناته آورده شده است.

جدول (۲-۱) معرفی برخی از روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری در سنگ‌های کربناته [Zoback, 2007].

شماره رابطه	منطقه توسعه رابطه	مقاومت تراکمی تک محوره UCS (MPa)	توضیحات	مرجع
۱	-	$(7682/\Delta t)^{1.82}/145$	-	[Zoback, 2007]
۲	-	$10^{(2.44+109.14/\Delta)} / 145$	-	[Zoback, 2007]
۳	آمریکا	$\frac{1}{5.15(\Delta t_c - 23.87)^2} + 2$ 145.0377	سنگ آهک، ماسه سنگ و شیل	[Onyia, 1988]
۴	-	$2.45V_p^{1.82}$	سنگ آهک	[Chang et al., 2006]
۵	-	$9.95V_p^{1.21}$	سنگ‌های کربناته و مافیک	[Kahraman, 2001]
۶	-	$31.5V_p - 63.7$	سنگ آهک	[Yasar & Erdogan, 2004]

[Kilik & Teymen, 2008]	سنگ آهک، ماسه سنگ، تراورتن، دیوریت، کوارتزیت، مارن، بازالت، آندزیت، توف	$2.304V_p^{2.4315}$ $R^2 = 0.97$	-	۷
[Zoback, 2007]	سنگ آهک با (10<UCS<300 MPa)	$0.4067E^{0.51}$	-	۸
[Zoback, 2007]	دولومیت با (60<UCS<100 MPa)	$2.4E^{0.34}$	-	۹
[Lacy, 1997]	-	$0.278E_s^2 + 2.458E_s$	خلیج مکزیک	۱۰
[Bradford et al., 1988]	سنگ‌های نرم	$2.28 + 4.0189E_s$	-	۱۱
[Smorodinov et al., 1970]	سنگ‌های کربناته	$\frac{2590 \exp(-0.9\phi)}{145.0377}$	-	۱۲
[Onyia, 1988]	سنگ آهک، ماسه‌سنگ و شیل	$\frac{3.2205 + \frac{102.51}{\phi}}{145.0377}$	آمریکا	۱۳
_____	سنگ آهک	$258 \exp(-9\phi)$	-	۱۴
[Ameen et al., 2009]	سنگ آهک	$89.432 \exp(0.0546\phi)$ $R^2 = 0.33$	عربستان	۱۵
[Zoback, 2007]	مقاومت سنگ با تخلخل صفر درصد C (250<C<	$C(1 - D\phi)^2$	روسیه	۱۶
[Zoback, 2007]	تخلخل کم تا متوسط (0.05 < ϕ < 0.2) و مقاومت بالا (30 < UCS < 150 Mpa)	$143.8 \exp(-6.95\phi)$	خاورمیانه	۱۷
[Zoback, 2007]	تخلخل کم تا متوسط (0 < ϕ < 0.2) و مقاومت بالا (10 < UCS < 300 Mpa)	$135.9 \exp(-4.8\phi)$	-	۱۸
[Smorodinov et al., 1970]	سنگ‌های کربناته	$\frac{0.88 \exp(2.85\rho)}{145.0377}$	-	۱۹

در روابط فوق $\Delta t(\mu s/ft)$ زمان سیر موج فشاری، $V_p(Km/s)$ سرعت موج فشاری، $E(MPa)$ مدول یانگ، $E_s(GPa)$ مدول یانگ استاتیکی، ϕ درصد تخلخل و $\rho(Kg/m^3)$ چگالی می‌باشد.

۲-۳-۲ محاسبه زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی، یکی از پارامترهای مهم مکانیک سنگ می‌باشد که مقاوت سنگ را محاسبه می‌کند. به‌طور کلی، با افزایش میزان شیل در سازند، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که زاویه اصطکاک داخلی در پیش‌بینی تولید ماسه از مخزن مفید می‌باشد. به همین منظور روابط تجربی متعددی برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری، تخلخل و میزان شیل موجود ارائه شده است؛ که در جدول (۲-۲) به برخی از مهم‌ترین روابط ارائه شده برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی توسط پژوهشگران اشاره شده است.

جدول (۲-۲) معرفی برخی از مهمترین روابط ارائه شده برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی.

شماره رابطه	نام پژوهشگر	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	توضیحات	مرجع
۱	وینگارتن و پرکنیز (۱۹۹۲)	57.8-105n	n تخلخل (کسر)	[Vingarten & Perkins, 1992]
۲	امین و همکاران (۲۰۰۹)	49.03-12.6n	سنگ آهک	[Ameen et al., 2009]
۳	لال (۱۹۹۹)	$\sin^{-1}\left(\frac{V_p - 1000}{V_p + 1000}\right)$	کاربرد برای شیل	[Zoback, 2007]
۴	در زویاک ۱	$18.532(V_p^{0.5148})$	-	[Zoback, 2007]
۵	در زویاک ۲	$\tan^{-1}\left(\frac{(GR - GR_{sand})\mu_{shale}(GR_{shale} - GR)\mu_{sand}}{GR_{shale} - GR_{sand}}\right)$	-	[Zoback, 2007]
۶	در زویاک ۳	$70 - 0.417GR$	کاربرد برای شیل‌های با $(60 < GR < 120)$	[Zoback, 2007]

در روابط فوق n تخلخل (کسر)، V_p (Km/S) سرعت موج فشاری، GR (API) مقدار نمودار اشعه گاما در عمق مورد نظر GR_{sand} اشعه گاما ماسه، GR_{shale} اشعه گاما شیل، μ_{sand} ضریب اصطکاک داخلی ماسه و μ_{shale} ضریب اصطکاک داخلی شیل است.

۳-۳-۲ محاسبه چسبندگی

رابطه‌ای تجربی را برای تخمین چسبندگی با استفاده از سرعت موج فشاری در شیل‌های خلیج

مکزیک ارائه داد [Lal, 1999]:

$$C = \frac{5(V_p - 1)}{\sqrt{V_p}} \quad (۱-۲)$$

رابطه ۱-۲ که در آن C (MPa) مقاومت چسبندگی و V_p (Km /s) سرعت موج فشاری می باشد.

۴-۲ روابط تجربی برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی

بررسی های مبتنی بر آزمون های مکانیک سنگ بر روی مغزه از روش های متداول برآورد مدول الاستیسیته استاتیکی محسوب می شود. در چند دهه ی گذشته، روابط تجربی متعددی برای برآورد مدول الاستیسیته استاتیکی بر مبنای مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیسیته دینامیکی و پارامترهای فیزیکی سنگ (سرعت موج فشاری و تخلخل) در سنگ های مختلف ارائه شده است.

جدول (۲-۳) معرفی برخی از مهمترین روابط ارائه شده برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی [Zoback, 2007].

شماره رابطه	منطقه توسعه رابطه	مدول الاستیسیته استاتیکی	توضیحات	مرجع
۱	-	$\frac{E_s}{E_d} = 0.81 + (2 \times 10^{-4} \times P)$	ماسه سنگ	[Montmayeur & Graves, 1986]
۲	جهانی	$E_s = aE_d^b$	$0.097 < a < 0.152$ $1.288 < b < 1.485$	[Heerden, 1987]
۳	جهانی	$E_s = 0.74E_d - 0.82$ $R^2 = 0.84$	انواع سنگ های رسوبی	[Eissa & Kazi, 1988]
۴	جهانی	$\log_{10} E_s = 0.02 + 0.7 \log_{10} (\rho E_d)$ $R^2 = 0.96$	انواع سنگ های رسوبی	[Eissa & Kazi, 1988]
۵	جهانی	$E_s = 0.956E_d^{0.69}$	-	[Morales & Marcinew, 1993]
۶	خلیج مکزیک	$E_s = 0.018E_d^2 + 0.422E_d$	ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل، دولومیت و سیلتستون	[Lacy, 1997]
۷	خلیج مکزیک	$E_s = 0.265V_d^{2.04}$	ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل، دولومیت و سیلتستون	[Lacy, 1997]
۸	-	$E_s = 1.153E_d - 15.2$	سنگ های سخت $E_s > 15GPa$	[Wang & Nur, 2000]
۹	-	$E_s = 0.4145E_d - 1.0593$	سنگ های نرم	[Wang & Nur, 2000]
۱۰	دریای شمال	$E_s = 0.076V_p^{3.23}$	شیل	[Horsrud, 2001]
۱۱	ایران	$E_s = 0.103\sigma_c^{1.086}$	گل سنگ	[Lashkaripour, 2002]
۱۲	خلیج مکزیک	$E_s = 0.0158E_d^{2.74}$	شیل	[Ohen, 2003]
۱۳	عربستان	$E_s = 0.541E_d + 12.852$ $R^2 = 0.6$	سنگ آهک	[Ameen et al., 2009]
۱۴	جهانی	$E_s = aE_d + b$	$0.41 < a < 1.15$ $0.152 < b < 1.81$	[mavko et al., 2009]

در روابط فوق E_s (GPa) مدول الاستیکی استاتیکی، E_d (GPa) مدول الاستیکی دینامیکی، ρ چگالی، P (psi) تنش انحرافی، V_p (km/s) سرعت موج فشاری، σ_c (Mpa) مقاومت تراکمی تک محوری و n_e تخلخل مؤثر می‌باشد.

۲-۵ خواص استاتیکی سنگ

برای اکثر مدل‌های رایج در دسترس، پارامتر مقاومت بحرانی سنگ به صورت مقاومت کششی و برشی سازند مطرح شده است. مقاومت برشی به صورت معمول از طریق معیار شکست موهر-کولمب تعریف می‌شود و به وسیله پوش شکست دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توصیف می‌شود. پارامترهای استاتیک را از طریق یک زنجیره آزمایش سه محوره فشاری می‌توان به دست آورد. خواص الاستیک سنگ مطابق روابط زیر به دست می‌آید:

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_{ax}} \quad (۲-۲)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۳-۲)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۴-۲)$$

که در این روابط:

E : مدول الاستیسیته

K : مدول بالک

G : مدول برشی

ϵ_{ax} : کرنش در جهت محور X

σ_x : تنش محوری در جهت محور X

ν : ضریب پواسون

۲-۶ خواص دینامیکی سنگ

برای کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و عملیات مغزه‌گیری، تکنیک‌هایی براساس نمودارهای گرفته‌شده از چاه برای تعیین خواص الاستیک سنگ بسط داده شده‌اند. خصوصاً از نمودارهای صوتی^۱ برای این منظور استفاده می‌شود. اگر بتوان به صورت قابل قبول چگالی و سرعت امواج برشی و فشاری را در سنگ‌ها به‌دست آورد، با استفاده از این داده‌ها می‌توان خواص الاستیک سنگ را به‌دست آورد. سرعت امواج صوتی در محیط‌های الاستیک را به کمک ضرایب الاستیک بیان می‌کنند. برای تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$E_d = \left[\frac{9K_p V_p^2}{3k + \rho V_p^2} \right] \quad (۵-۲)$$

$$K_d = \rho \left[C - \frac{4}{3} V_s^2 \right] \quad (۶-۲)$$

$$G_d = \rho V_p^2 \quad (۷-۲)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۸-۲)$$

که در آن E_d ، K_d ، G_d و ν_d به ترتیب مدول الاستیسیته دینامیکی، مدول بالک دینامیکی، مدول برشی دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی می‌باشند و V_p ، V_s و ρ نیز به ترتیب سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری و چگالی سازند است [Jose L. Falcao, et al., 2000]. یکی از مهمترین روش‌های محاسبه ضریب پواسون استفاده از امواج صوتی می‌باشد؛ که در این پژوهش تمامی پارامترهای به‌دست آمده از ترکیبی از داده‌های چاه پیمایی حاصل شده و نتایج آن در فصل چهارم به تفصیل آورده شده است. بنابراین از ذکر روابط تجربی به دلیل محدودیت در این پژوهش خودداری می‌شود.

^۱ Sonic log

۷-۲ معیارهای شکست سنگ

معیار شکست یک فرمول یا یک رابطه ریاضی است که با در نظر گرفتن شرایط کشش و یا فشار اعمالی، حد نهایی مقاومت سنگ را بیان می‌کند. براین اساس می‌توان پایداری سنگ را ارزیابی کرد. در مبحث آزمایش سه محوری با استفاده از تست‌های مختلف می‌توان به یک پوشش شکستگی رسید؛ که اساس تعریف معیار شکست نیز همین است. چون ما بی‌نهایت موقعیت تنش داریم. یعنی هریک از سه تنش اصلی ما می‌تواند هر مقدار داشته باشد؛ پس آیا باید برای هر موقعیت تنش یک آزمایش انجام داد تا بتوان شکست سنگ را پیش بینی کرد؟ خب این کار تقریباً غیرممکن است و در ظرف هزینه و زمان نمی‌گنجد. بنابراین باید یک رابطه ریاضی تعریف کرد که با توجه به جنس سنگ، هر نوع تنش اعمالی را مورد بررسی قرار دهد و در نهایت شکست یا عدم شکست سنگ را تحت این تنش‌ها اعلام کند. هر معیار شکست، کاربردها و محدودیت‌های خاص خود را دارد. به علاوه پارامترهای مربوط به هر معیار شکست باید از طریق آزمایش‌های مرسوم سه محوری یا دیگر آزمایش‌ها به دست آیند.

در ادامه به معرفی چند معیار شکست معروف می‌پردازیم.

۱-۷-۲ معیار کلمب

در سال ۱۷۷۶، کلمب ساده‌ترین و با ارزش‌ترین معیار را معرفی کرد. او اظهار داشت که شکست در سنگ هنگامی رخ می‌دهد که در یک صفحه به‌خصوص (صفحه a-b در شکل ۱-۲-a) تنش برشی τ افزایش یافته و مقدار آن بر چسبندگی ذاتی سنگ و نیز نیروی اصطکاکی، که مقابل حرکت در طول سطح شکست مقاومت می‌کند، غلبه کند. معیار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (9-2)$$

در رابطه (۹-۲)، σ_n تنش نرمال است که بر روی صفحه شکست وارد می‌شود (سطح a-b

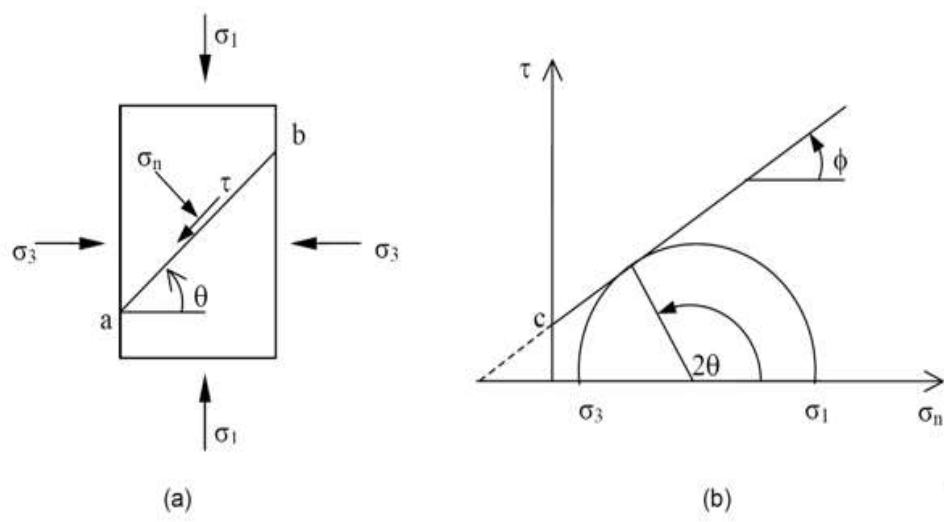
در شکل ۱-۲-a)، c نیروی چسبندگی سنگ و ϕ زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. شکل (۱-۲-b)،

نمودار مقاومت تنش‌های نرمال و برشی را نشان می‌دهد. مقدار σ_2 در این معیار وارد نشده است، بنابراین برای سادگی، این معیار شکست فرض می‌کند که σ_2 هیچ اثری بر شکست ندارد. این معیار فقط می‌تواند در وضعیتی که $\sigma_2 = \sigma_3$ است، تفسیر شود. بنابراین معیار شکست کلمب را می‌توان برحسب تنش اصلی حداکثر σ_1 و تنش اصلی حداقل σ_3 به صورت زیر نشان داد:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \quad (۱۰-۲)$$

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \quad (۱۱-۲)$$

در اینجا θ زاویه بین عمود بر صفحه با جهت تنش اصلی حداکثر می‌باشد (شکل (۱-۲)).



شکل (۱-۲) معیار شکست کلمپ: (a) شکست برشی در صفحه $a - b$ ، (b) نمودار مقاومت برحسب تنش‌های نرمال و

برشی (Al-Ajmi, 2006).

رابطه بین θ و ϕ به صورت زیر است:

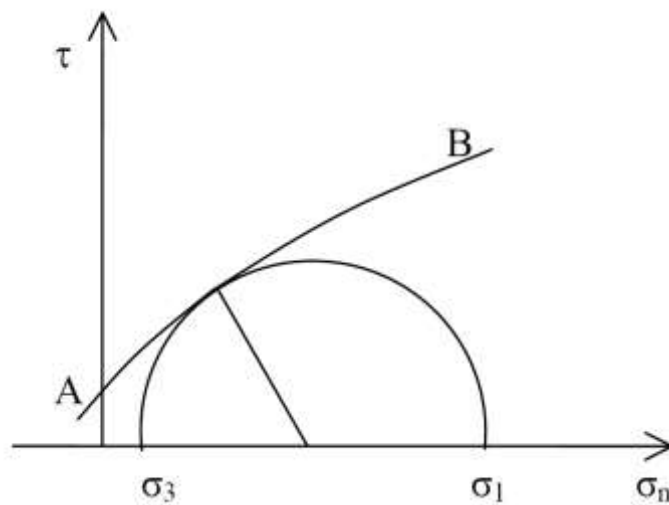
$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (۱۲-۲)$$

۲-۷-۲ معیار موهر

معیار موهر بیان داشت که در شکست، تنش‌های نرمال و برشی در صفحه شکست از معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$\tau = f(\sigma_n) \quad (۱۳-۲)$$

f تابعی است که به صورت تجربی محاسبه می‌شود. رابطه ۱۱-۲ توسط یک منحنی در نمودار $\sigma - \tau$ ، مانند AB در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. با فرض خطی بودن پوش موهر، معیار موهر و کلمب با هم مطابقت خواهند داشت و معادله ۱۲-۲ به صورت خطی در خواهد آمد.



شکل (۲-۲) معیار شکست موهر [Al-Ajmi, 2006].

۲-۷-۳ معیار موهر-کلمب

معیار موهر-کلمب یکی از پرکاربردترین معیارهای شکست است که به دلیل سادگی آن برای ارزیابی شکست دیواره چاه استفاده می‌شود. در واقع این معیار ترکیب معیارهای موهر و کلمب است.

معیار موهر - کلمب از مقاومت فشاری محصور نشده و زاویه اصطکاک داخلی برای ارزیابی شکست سنگ استفاده می‌کند و می‌تواند براساس تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر بیان شود.

$$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3 \quad (۱۴-۲)$$

که q پارامتر وابسته به زاویه اصطکاک داخلی و σ_c مقاومت فشاری محصور نشده سنگ می‌باشد. پارامترهای q و σ_c به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$q = \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۱۵-۲)$$

$$\sigma_c = 2c \tan(45 + \frac{\varphi}{2}) = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۱۶-۲)$$

همچنین می‌توان معیار موهر-کلمب را بر اساس تنش برشی حداکثر، τ_{max} و تنش موثر متوسط، σ_m بیان کرد.

$$\tau_{max} = c \cos \varphi + \sigma_m \sin \varphi \quad (۱۷-۲)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (۱۸-۲)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (۱۹-۲)$$

۴-۷-۲ معیار موگی - کلمب

همانند معیار موهر - کلمب سازوکار برشی را با استفاده از رابطه خطی تنش برشی و تنش نرمال توصیف می‌کند. معیار موهر-کلمب برای شرایط چاه محافظه کارانه تر است؛ به دلیل این که اثر تنش متوسط را در نظر نمی‌گیرد. معیار موگی-کلمب در سال ۲۰۰۴ توسط الاعجمی و همکاران پیشنهاد شد که به صورت رابطه (۲۰-۲) تعریف می‌شود:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_m \quad (۲۰-۲)$$

که a و b ثابت مواد هستند و وابسته به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ می‌باشند.

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi, b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (21-2)$$

این معیار اثر تنش متوسط را در نظر می‌گیرد و پیش بینی واقع گرایانه‌تری از پایداری چاه برای ما ارائه می‌دهد. در صورتی که $\sigma_1 = \sigma_2$ یا $\sigma_3 = \sigma_2$ معیار شکست موگی - کلمب به معیار موهر - کلمب کاهش می‌یابد.

۲-۷-۵ معیار لید اصلاح شده

معیار لید یک معیار شکست سه‌بعدی می‌باشد که برای مواد دارای اصطکاک و بدون چسبندگی موثر توسعه یافته است و پوش شکست آن به صورت منحنی است. معیار لید اصلاح شده همانند معیار موگی - کلمب اثر تنش متوسط را در نظر می‌گیرد.

$$\left[\frac{I_1}{I_3} - 27\right] \left[\frac{I_1}{p_a}\right]^m \quad (22-2)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (23-2)$$

$$I_3 = (\sigma_1)(\sigma_2)(\sigma_3) \quad (24-2)$$

در سال ۱۹۹۹ اوی معیار لید اصلاح شده را با تغییر معیار لید و دونکان پیشنهاد داد که به دوپارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک نیاز داد. معیار لید اصلاح شده به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{(I'_1)^3}{I'_3} = 27 + \eta \quad (25-2)$$

$$I'_1 = (\sigma'_1 + S) + (\sigma'_2 + S) + (\sigma'_3 + S) \quad (26-2)$$

$$I'_3 = (\sigma'_1 + S)(\sigma'_2 + S)(\sigma'_3 + S) \quad (27-2)$$

پارامترهای S و η ثابت مواد هستند که S به چسبندگی سنگ و η به زاویه اصطکاک داخلی سنگ بستگی دارد. این پارامترها می‌توانند به صورت زیر مستقیماً از چسبندگی و زاویه اصطکاک معیار موهر-کلمب به دست آیند:

$$S = \frac{c}{\tan \phi} \quad (28-2)$$

$$\eta = \frac{4 \tan^2 \phi (9 - 7 \sin \phi)}{1 - \sin \phi} \quad (29-2)$$

علاوه بر معیارهای یاد شده، شکست کششی در چاه با استفاده از تنش اصلی حداقل تعریف می‌شود. به عبارت دیگر شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که تنش اصلی موثر حداقل بیشتر از مقاومت کششی سنگ (T)، شود. بنابراین شکست کششی در این شرایط اتفاق می‌افتد. این معیار در کنار معیار شکست برشی به منظور تعیین پنجره ایمن گل در حین حفاری استفاده می‌شود.

$$\sigma_{r-p} \leq -T \quad (30-2)$$

۸-۲ جهت و مقدار تنش‌های برجا

در طی حفاری عوامل متعددی وجود دارند که می‌توانند باعث افزایش پایداری چاه گردند. برای مثال مسیر و جهت حفاری چاه تأثیر زیادی روی پایداری آن دارند.

به طوری که انتخاب جهت حفاری مناسب که در جهت شکستگی‌های طبیعی سازند نباشد، می‌تواند منجر به افزایش پایداری و کاهش هزینه و زمان گردد. تجربیات آزمایشگاهی حاکی از تأثیر ترکیبات مختلف گل بر پایداری چاه است. همه روش‌های تخمین تنش، دارای محدودیت‌هایی هستند. در همه این روش‌ها، تنش به دست آمده، در بردارنده اثر تنش‌های القایی حاصل از حفاری در چاه-هاست، اگر سازند ناهمسانگرد باشد تنش‌ها نیز ناهمسانگرد خواهد بود. وجود این اثرات، گاهی اوقات حتی بیشتر از تنش‌های بر جای قبل از حفاری است، لذا آگاهی به محدوده تنش‌های منطقه در تعیین روند تکتونیکی ناحیه، بسیار حائز اهمیت است [Grandi et al., 2002].

واضح است که ارزیابی مقدار و جهت تنش‌های برجا به منظور مدل کردن شرایط پایداری چاه^۱، وزن روباره^۲ و تعیین فشار منفذی^۳ بسیار ضروری و اساسی می‌باشد. داده‌های لازم برای تعیین تنش-های برجا، وزن روباره و فشار منفذی از روش‌های متفاوت که در فصل‌های آتی ذکر گردیده و داده-های ابزارهای چاه‌پیمایی محاسبه و پایداری چاه سنجیده شده است. انگیزه اصلی برای مشخص کردن جهت و مقدار تنش‌های برجا، تهیه اطلاعات اولیه از تنش‌های برجا برای مهندسين، از قبیل جهت و مقدار تنش‌های برجا و بررسی محتمل‌ترین جهت شکست سنگ از طریق شناسایی تنش برجای حداقل و حداکثر است.

برای تحلیل تنش‌ها به عنوان اولین تقریب فرض می‌شود که یکی از سه تنش اصلی به صورت عمودی و دو تنش دیگر به صورت افقی عمل می‌کنند. با پیروی از این فرض تخمین تنش‌های اصلی به وسیله تئوری الاستیسیته ممکن می‌شود [John A. Hudson & John P. Harrison, 2000].

۹-۲ روش‌های محاسبه تنش‌های افقی

میدان تنش‌های برجا را می‌توان از تفسیر داده‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های برجا که بر روی چاه شده است محاسبه کرد [Economides & Nolte, 2000]. در همین راستا در این بخش، با توجه به میزان اطلاعات موجود در مخزن نفتی مورد مطالعه روش‌های کاربردی برآورد مقادیر و جهت تنش‌های اصلی بیان شده است.

۹-۲-۱ تعیین تنش افقی حداقل

برای حل بسیاری از مسائل ژئومکانیکی اندازه‌گیری تنش افقی حداقل لازم و ضروری می‌باشد. مقادیر این تنش برای بهینه کردن طراحی حفاری و عملیات تکمیل چاه مورد نیاز می‌باشد [Edwards et al., 2002].

¹ Instu-Stress

² Overburden Pressure

³ Pore Pressure

محاسبه مقدار تنش افقی حداقل برای بهینه کردن عملیات تکمیل چاه و طراحی حفاری و همچنین گسترش شکافت هیدرولیکی مورد نیاز می‌باشد. خواننده برای جزئیات بیشتر در مورد هر کدام می‌تواند به منبع اصلی مراجعه کند [Economoides & Nolte, 2000].

تنش افقی حداقل را می‌توان به روش‌های مختلفی که در زیر به آن‌ها اشاره شده است محاسبه کرد:

- آزمایش‌های شکست هیدرولیکی
- کاربرد روابط تجربی

یکی از دقیق‌ترین روش‌های محاسبه تنش افقی حداقل در اعماق چاه روش شکست هیدرولیکی می‌باشد [Haimson & Fairhurst, 1970]. آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را می‌توان برای برآورد تنش افقی حداقل تا حدود عمق ۶ کیلومتر به کاربرد.

در صورتی که عملیات شکست هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه انجام نشده باشد مقدار تنش اصلی حداقل با استفاده از روابط تجربی محاسبه می‌گردد. این روابط برای حالت‌های مختلف گسلش در جدول (۵-۲) بیان شده‌اند [Zoback, 2007].

جدول (۲-۴) روابط تجربی تخمین تنش اصلی حداقل [Zoback, 2007].

نام پژوهشگر	سال	نسبت تنش مؤثر	رابطه S_{hmin}
هابرت و ویلیس	۱۹۵۷	$\frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v} = 0.3$	$0.3(S_v - P_p) + P_p$
ماتیو و کلی	۱۹۶۷	$\frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v} = K_1(Z)$	$K_1(Z)(S_v - P_p) + P_p$
ایتون	۱۹۶۹	$\frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v} = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)$	$\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)(S_v - P_p) + P_p$
برکلز و ون اوکلن	۱۹۸۱	$For Z < 11500ft$	$0.197Z^{1.145} + 0.46(P_p - P_h)$
برکلز و ون اوکلن	۱۹۸۱	$For Z > 11500ft$	$1.167Z - 4596 + 0.46(P_p - P_h)$
زوباک وهالی	۱۹۸۴	$\frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v} = \left(\left(1 + \mu^2\right)^{1/2} + \mu\right)^{-2}$	$\frac{\sigma_{hmin} - P_p}{\sigma_v - P_p} = \left(\left(1 + \mu^2\right)^{1/2} + \mu\right)^{-2}$
هلبروک	۱۹۹۰	$\frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v} = 1 - \varphi$	$(1 - \varphi)(S_v - P_p) + P_p$

۲-۱۰ تخمین تنش افقی حداکثر

تخمین دقیق تنش افقی حداکثر بسیار مشکل می‌باشد، لازم به ذکر است که در بسیاری از مسائل ژئومکانیک از جمله پارامترهای مرتبط با پایداری چاه مانند طراحی مسیر چاه، مکان قرارگیری لوله جداری و محاسبه وزن بهینه گل حفاری اطلاع از مقدار تنش افقی حداکثر حائز اهمیت می‌باشد [Zoback, 2007].

تنش افقی حداکثر را می‌توان به روش‌های مختلفی که در زیر به آن‌ها اشاره شده است محاسبه

کرد:

- آزمایش شکست هیدرولیکی
- کاربرد روابط تجربی (رابطه پوروالاستیک)

- شکست فشاری
- چند ضلعی تنش (WOB)
- شکست کششی

۲-۱۰-۱ آزمایش شکست هیدرولیکی

عملیات شکست هیدرولیکی برای تخمین تنش افقی حداکثر معمولاً در چاه‌های سطحی (حدود ۳ کیلومتر) که میزان تنش و دما کم هستند به کار می‌رود [Hubbert & Willis, 1957; Haimson &]. [fairhurst, 1970; Baumgartner & Rumnel, 1990; Zoback, 2007]

با انجام آزمایش شکست هیدرولیکی و با در اختیار داشتن مقادیر تنش اصلی کوچک‌تر، فشار منفذی مخزن و فشار شکست سازند یا فشار شکست آبی، تنش اصلی حداکثر را می‌توان بر اساس میزان نشت سیال به داخل سازند از روابط ذیل محاسبه کرد [Amadei & Stephansson, 1997;]. [Economides & Nolte, 2000; Zoback, 2007]

در حالت عدم نشت سیال به داخل سازند از رابطه زیر:

$$S_{Hmax} = T_0 + 3S_{hmin} - P_p - P_{bp} \quad (۳۱-۲)$$

در حالت نشت اندک سیال به داخل سازند از رابطه زیر:

$$S_{Hmax} = T_0 + 3S_{hmin} - 2P_{bp} \quad (۳۲-۲)$$

و در حالت نشت سیال از رابطه (۳۳-۲) می‌توان استفاده نمود.

$$S_{Hmax} = T_0 + 3S_{hmin} - 2\eta P_p - 2(1-\eta)P_{bp} \quad (۳۳-۲)$$

در روابط فوق η ، ضریب پوروالاستیک می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود و T_0 مقاومت کششی سنگ بوده و می‌توان آن را معادل صفر در نظر گرفت.

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (۳۴-۲)$$

به‌طور معمول مقداری برابر با ۰/۲۵ برای η در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱۰-۲ کاربرد روابط تجربی (رابطه پوروالاستیک)

محاسبه مقدار تنش افقی حداکثر از روش شکست هیدرولیکی بسیار دشوار می‌باشد به همین دلیل بیشتر از روابط تجربی برای تعیین تنش افقی ماکزیمم استفاده می‌شود. در مناطق فعال تکتونیکی، تنش و کرنش‌های تکتونیکی با جابجایی صفحات تکتونیکی افزایش می‌یابند. با در نظر گرفتن کرنش-های افقی و اثرات آن و اعمال قانون هوک، می‌توان تنش افقی حداکثر را از رابطه زیر محاسبه نمود [Zoback, 2007].

$$\sigma_h = \alpha P + \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_f) + \frac{E\nu}{1-\nu^2}\epsilon_h + \frac{E}{1-\nu^2}\epsilon_H \quad (2-35)$$

که در آن S_h تنش افقی حداکثر، S_v تنش روباره، ν ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار سیال حفاری، E مدول الاستیسیته (Gpa)، ϵ_h و ϵ_H کرنش‌های تکتونیکی می‌باشند و به ترتیب در جهات تنش افقی حداکثر و حداکثر می‌باشد.

۲-۱۰-۳ شکست فشاری

مقدار تنش افقی حداکثر را غالباً از روش‌های غیرمستقیم مانند آنالیز شکست‌های فشاری چاه (WOB) برآورد می‌کنند [Rahim et al., 2003].

در سال ۱۹۸۸ بارتون و زوباک با استفاده از شکست‌های ناشی از حفاری و فشاری رابطه‌ای را برای تعیین تنش افقی ماکزیمم ارائه کردند که به قرار زیر می‌باشد [Barton & Zoback, 1988]:

$$S_{Hmax} = \frac{UCS + 2P_p + \Delta P - Shmin(1 + 2\cos 2\theta_b)}{1 - 2\cos 2\theta_b} \quad (2-36)$$

در این رابطه ΔP (MPa) اختلاف بین فشار چاه (وزن گل) و فشار منفذی، θ_b (deg) نیز زاویه شکست است.

۲-۱۰-۴ چندضلعی تنش

با استفاده از نظریه گسلش اندرسون می‌توان مقادیر تنش افقی مینم و ماکزیمم را به صورت نسبی برآورد کرد. با استفاده از تئوری گسلش کولمب مقادیر نسبی تنش‌ها محدودتر می‌شوند [Economides & Nolte, 2000].

گسلش نرمال

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_V - P_p}{S_{hmin} - P_p} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu \right]^2 \quad (۳۷-۲)$$

گسلش امتداد لغز

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{Hmax} - P_p}{S_{hmin} - P_p} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu \right]^2 \quad (۳۸-۲)$$

گسلش معکوس

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{Hmax} - P_p}{S_V - P_p} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu \right]^2 \quad (۳۹-۲)$$

۲-۱۰-۵ شکستگی‌های کششی

با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مقادیر تنش اصلی حداقل، آزمایش نشت، ضریب اصطکاکی پوسته و همچنین مشاهدات گسیختگی‌های دیواره چاه می‌توان مقادیر تنش‌های برجای را محاسبه کرد. به همین منظور برای تعیین مقدار تنش افقی حداکثر می‌توان از تئوری گسلش اندرسون استفاده نمود. بر اساس این تئوری، شکستگی‌های کششی در دیواره چاه به علت بالا بودن اختلاف بین تنش‌های افقی ایجاد می‌شوند. با استفاده از رابطه (۳۷-۲) و ضریب اصطکاک $\mu = 0.6$ رابطه زیر به منظور محاسبه تنش افقی حداکثر به دست می‌آید [Economides & Nolte, 2000]:

$$S_{Hmax} = 3S_{hmin} - 2P_p + 0.1(S_{hmin} - P_p) \quad (۴۰-۲)$$

۲-۱۱ تعیین جهت تنش‌های برجا

حالت تنش در اعماق زمین یکی از پارامترهای اصلی و تأثیرگذار در هندسه شکستگی‌ها می‌باشد، تانسور تنش در اعماق زمین دارای سه مولفه تنش عمود بر هم شامل تنش اصلی حداکثر، تنش اصلی متوسط و تنش اصلی حداقل می‌باشد. در ادامه روش‌های مختلف تعیین جهت تنش‌های برجا به اختصار معرفی شده است.

روش‌های تعیین جهت تنش برجا به شرح ذیل می‌باشند.

- نقشه تنش‌های جهانی
- آنیزوتروپی سرعت موج برشی
- آزمایش مغزه
- تعیین جهت *WBO*

۲-۱۱-۱ نقشه‌های زمین‌شناسی

با استفاده از ساختارهای گسلی که بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی مشخص شده‌اند می‌توان جهت تنش‌های حاکم بر میدان مورد مطالعه را به دست آورد [Economides & Nolte, 2000].

۲-۱۱-۲ شکست هیدرولیکی

جهت شکستگی ایجاد شده در یک عملیات شکست هیدرولیکی با توجه به رژیم تنش حاکم بر میدان مورد نظر متفاوت است. در رژیم تنش امتدادلغز و نرمال در یک صفحه عمودی و در راستای عمود بر جهت تنش اصلی حداقل و در گسل‌های معکوس، شکست در یک صفحه افقی گسترش پیدا می‌کند.

۲-۱۱-۳ ناهمسانی سرعت موج برشی

امواج برشی دارای خواص پلاریزه می‌باشند به همین دلیل نسبت به اختلاف ناشی از خصوصیات الاستیسیته سنگ‌های موجود در مسیر حرکت حساس هستند و در صورت وجود ناخالصی پلاریزه شده و در جهت‌های مختلف با سرعت‌های متفاوتی حرکت خواهد کرد. ناهمسانگرد (آنیزوتروپی) ناشی از

تنش‌های برجا در جهت‌های متفاوت منجر به ایجاد پلاریزاسیون موج برشی و تغییر سرعت آن می‌شود [Economides & Nolte, 2000].

۲-۱۱-۴ تعیین جهت WOB

با استفاده از جهت شکستگی‌های کششی و گسیختگی‌های دیواره چاه می‌توان جهت تنش‌های اصلی افقی بر جا را نیز تعیین کرد، شکستگی‌های کششی (القایی) زمانی رخ می‌دهد که فشار گل حفاری مجموع مقاومت کششی سنگ و تنش بر جای حداقل بیشتر باشد و گسیختگی‌ها (شعاعی) وقتی تشکیل می‌شوند که فشار گل حفاری از مقدار مورد نیاز برای نگهداری دیواره کمتر باشد. شکستگی‌های کششی و گسیختگی‌ها به ترتیب موازی تنش افقی ماکزیمم و تنش افقی مینیمم می‌باشند [Fairhurst, 2003, Cornet et al., 2003].

برخی از ابزارهای تعیین جهت WOB به شرح زیر است:

- قطرسنجی چهار بازویی توجیه شده مغناطیسی
- ابزار قطرسنجی با تفکیک بالا
- ابزار قطرسنجی با تفکیک بالا استراتی گرافیکی
- FM'I
- ابزار قطرسنجی پایه نفتی
- UBI
- OBMI

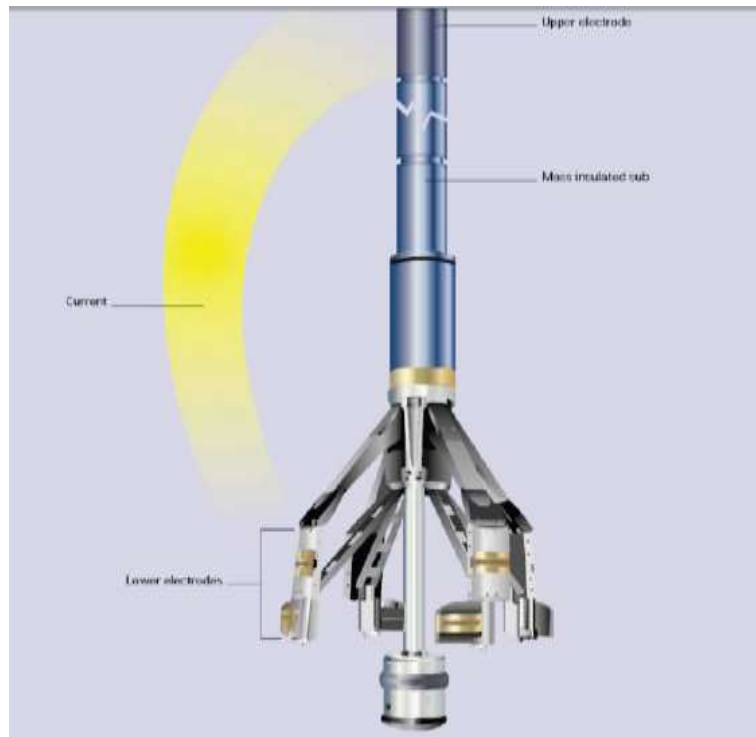
۲-۱۱-۵ نمودار تصویری FMI

از جمله ابزارهای تصویربرداری الکتریکی FMI می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴-۲) مشاهده می‌شود این ابزار دارای چهار بازوی کالیپر ۷ عمودی می‌باشد که در انتهای هر بازو به گروهی از پدها و فلپ‌ها متصل شده است. معمولاً هر پد یا فلپ ۸ دارای ۲۴ عدد سنسور مقاومتی ۹ می‌باشد [Ekstrom

¹Formation Micro Imager

et al., 1987]. ابزار FMI اطلاعاتی درباره هندسه و شکل مقطع چاه به انضمام اطلاعات تصویری

مقاومتی ثبت می‌کند [Bell, 1996].

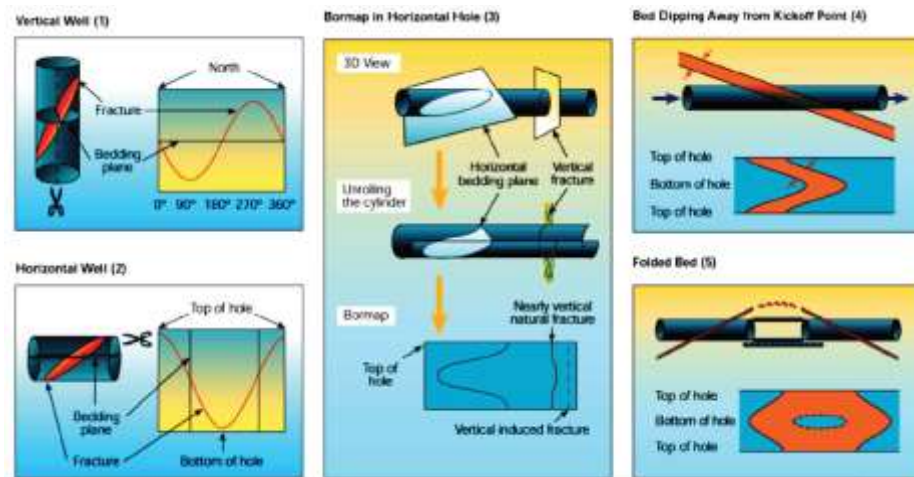


شکل (۲-۳) ابزار تصویر ساز FMI [Schroeder, 2002].

نمودار تصویری FMI یکی از پرکاربردترین نمودارهای مورد استفاده در چاه‌های نفت و گاز است. نمودارهای تصویری FMI، تصویری استوانه‌ای شکل و مجازی با قدرت تفکیک بالا در حد میلی‌متر از دیواره چاه را ارائه می‌دهند؛ که قادرند ساختارهای کوچک‌مقیاس را نشان دهند. نمودارهای تصویری بر پایه اختلاف در مقاومت الکتریکی سنگ‌ها استوار است. در تصاویر نمودار FMI ناپیوستگی‌ها به صورت خطوط تیره رنگ مشخص (پر شده با کلسیت یا انیدریت متراکم و پر شده با گل حفاری یا کانی‌های پیریت یا رس) پدیدار می‌شوند [Voggenauer, 2008].

همان‌طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. ساختارهای صفحه‌ای، مانند شکستگی و لایه‌بندی، که تقاطع آن‌ها با چاه به صورت غیر قائم باشد، در استوانه چاه به شکل بیضی دیده می‌شود. در صورتی که چاه در امتداد محورش بریده و باز شود یعنی همان شکلی که در نمودار FMI نشان داده

شده است، لایه بندی یا شکستگی به صورت یک موج سینوسی پدیدار می‌شود [Ekstrom et al., 1987]. از نمودار FMI می‌توان برای تفسیر هندسه شکستگی‌های طبیعی، ریزش‌های متقارن دیواره چاه (WBOs) و شکستگی‌های ناشی از حفاری بهره برد [Barton et al., 1995].



شکل (۲-۲) وضعیت ناپیوستگی‌ها در چاه و تصویر به‌دست آمده از آن بر روی نمودار تصویری

[Schroeder, 2002] FMI

۲-۱۱-۶ نقشه تنش‌های جهانی

در صورتی که برای تعیین جهت تنش‌های برجا هیچگونه اطلاعاتی در دسترس نباشد می‌توان با استفاده از نقشه تنش‌های جهان، جهت و اندازه تنش‌های برجا منطقه مورد نظر را تعیین کرد. این اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده غالباً بر پایه تحلیل‌های ژئوفیزیکی و لرزه‌نگاری در چاه‌های نفت و گاز، استوار می‌باشند [Haimson & Herrick, 1989].

۲-۱۲ مکانیزم‌های فیزیکی مشاهده شده در حین ناپایداری دیواره چاه

مکانیزم‌هایی که به‌صورت شکست در دیواره مشاهده می‌شوند در دو دسته شکست کششی و برشی گروه‌بندی می‌شوند.

۲-۱۲-۱ شکست کششی

دلیل اصلی این نوع شکست وزن بالای سیال حفاری است و نوع شکست کششی تحت شرایطی است که تنش کششی ایجاد شده از استحکام سنگ تجاوز کند. این نوع شکستگی به دلیل وزن بالای سیال حفاری ایجاد می‌شود. در نتیجه بیشتر در شرایط حفاری فراتعادلی مشاهده می‌شود و ممکن است منجر به هرزروی سیال شود. هرزروی سیال حفاری هنگامی شدید خواهد بود که وزن سیال حفاری از مجموع فشار شکست و گرادیان شکستگی (تنش افقی) بیشتر شود و در شرایطی هرزروی سیال حفاری جزئی خواهد بود که وزن بالای سیال حفاری تنها از فشار شکستگی تجاوز نکند. گسیختگی کششی غالباً به صورت عمودی رخ می‌دهد، اما به صورت‌های دیگری نیز ممکن است رخ دهد [Birchwood et al., 2005].

۲-۱۲-۲ شکست برشی

غالباً به دلیل وزن پایین سیال حفاری رخ می‌دهد. این نوع از شکست وقتی که تنش برشی بر دیواره چاه از مجموع مقاومت چسبندگی و مقاومت نیروی اصطکاک داخلی بین اجزای سنگ بیشتر شود. جهت این شکاف‌ها به موازات تنش افقی حداقل می‌باشند [Birchwood et al., 2005]. در نهایت به طور کلی شکست برشی در سازندهای شکننده منجر به ریزش دیواره و افزایش قطر چاه می‌شود و در سازندهای پلاستیک مثل نمک منجر به تغییر شکل پلاستیک و کاهش قطر چاه می‌شود.

۲-۱۳ تحلیل پایداری چاه

تحلیل پایداری دیواره چاه یک فاکتور بحرانی در انتخاب روش حفاری مناسب است. نیاز به تحلیل پایداری در حین مرحله طراحی، به دلیل ملاحظات اقتصادی و افزایش روزافزون عملیات حفاری به صورت افقی و شیب‌دار (کج) می‌باشد [Shibany & Afzalian, 2003].

یک تحلیل پایداری چاه براساس توزیع جدید تنش‌ها، کرنش‌ها و فشار منفذی در سنگ‌های اطراف دیواره چاه بعد از عملیات حفاری است. مطالعه و تفسیر دقیق مقدار کمیت‌های نامبرده اجازه ارزیابی پایداری چاه و ایجاد تغییرات لازم را برای پایدار نگه داشتن دیواره خواهد داد [Parra et al., 2003].

در جدول زیر به مقایسه اجمالی دو مدل رایج برای تحلیل پایداری چاه پرداخته شده است که توضیحات بیش‌تر را در ادامه ملاحظه می‌فرمایید.

جدول (۲-۵) روش‌های تحلیل پایداری چاه

نام روش	معایب	مزایا
مدل الاستیک خطی	۱. به علت سادگی مدل از واقعیت فاصله دارد.	۱. نیاز به داده کمتر ۲. به علت سادگی مدل، استفاده از این مدل رایج‌تر است
مدل الاستوپلاستیک	۱. نیاز به داده‌های زیاد که اغلب در دسترس نیستند.	۱. نزدیکی این مدل به واقعیت

تحلیل الاستیک خطی شاید به دلیل سادگی اجرای آن رایج‌ترین مدل باشد. به عبارت دیگر محبوبیت آن به این دلیل می‌باشد که مدل‌های پیچیده‌تر به اطلاعات و داده‌های بیشتری نیاز دارند که در عمل مشخص کردن بیشتر آن‌ها بسیار مشکل و در بعضی موارد غیر ممکن است [Shibany & Afzalian, 2003]. الاستوپلاستیک مدل واقعی‌تری از پایداری مکانیکی ارائه می‌کند؛ زیرا این واقعیت را در نظر می‌گیرد که حتی بعد از تحت تنش قرار گرفتن سنگ تا حد بحرانی لازم نیست که شکست کامل رخ دهد، سنگ از دیواره جدا شود و یا ریزش رخ دهد [McLellan & Hawkes, 2002]. به عبارت دیگر مدل‌هایی که بر اساس الاستیک خطی می‌باشند، به اندازه کافی به این واقعیت توجه نمی‌کنند که در بسیاری از حالت‌ها چاه پایدار خواهد ماند حتی اگر تمرکز تنش در سنگ‌های دیواره چاه از استحکام سازند تجاوز نکند [McLellan & Hawkes, 2002].

بنابراین تحلیل شکست سنگ را می‌توان با روش اجزاء محدود و در مدل‌های پلاستیک بهبود بخشید [Detourney & Chen, 2005].

آغاز ناپایداری غالباً با تولید حجم بحرانی سنگ‌های تسلیم شده در ارتباط است. اگر چه حد دقیق این پارامترها بدون شک متغیر می‌باشد و به فاکتورهایی مانند تمیز کاری و انحراف چاه بستگی دارد [Parra et al., 2003].

برای یک تحلیل مطمئن، شناخت درست موارد زیر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد :

- تنش‌ها و تأثیر آن بر روی سنگ دیواره چاه
- خواص مکانیکی سنگ
- معیارهای شکست

۲-۱۴ پیشینه پژوهشی تحلیل پایداری چاه

مشکلات ناپایداری چاه به علت آگاهی نادرست و ناکافی از خصوصیات سنگ‌ها، ممکن است باعث ایجاد هزینه‌های اضافی و از دست دادن زمان شود. به دلیل اهمیت این موضوع، آنالیز پایداری چاه در مراحل مختلفی از طراحی چاه و یا توسعه میدان انجام می‌شود. به‌طور معمول، آنالیز پایداری دیواره چاه به وسیله تعیین پارامترهای مقاومت سازند و تخمین تنش‌های برجا انجام می‌شود و همه‌ی این پارامترها در یک معیار شکست قرار می‌گیرند و در نهایت فشار گل حفاری لازم برای پایدار کردن دیواره چاه تعیین می‌گردد [Maleki et al., 2014].

زوباک^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مجموعه‌ای از روش‌های تعیین مقدار و جهت تنش‌ها در چاه‌های عمیق را مورد بررسی قرار دادند [Zoback et al., 2003]. این روش‌ها می‌توانند در چاه‌های عمودی و انحرافی مورد استفاده قرار گیرند ولی نتایج این روش‌ها چندان قابل اعتماد نیستند. در سال ۲۰۰۱ برودی^۲ و جرهلث^۳ در نروژ با استفاده از نمودارهای تصویری، مطالعاتی روی تنش‌های برجا

¹ Zoback et al

² Brudy

³ Kjorholt

انجام دادند که استفاده از این روش معتبر بوده و نتایج آن دقیق می‌باشد [Brudy & Kjørholt, 2001]. همچنین آدنوی^۱ و چنورت^۲ در سال ۱۹۸۷ از اولین کسانی بودند که مکانیک مربوط به جامدات را برای تحلیل پایداری دیواره چاه‌های با شیب زیاد به کار بردند. این مطالعه بر اساس مدل کشسان خطی و همسانگرد بودن، تنش‌های اطراف دیواره چاه را محاسبه می‌کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که وقتی چاه از حالت عمودی به افقی تغییر کند احتمال ناپایداری بیشتر می‌شود [Aadnoy & Chenevert, 1987].

این مطالعات اثرات سیال حفاری و تأثیرات آن را روی سنگ در نظر نمی‌گرفت؛ چنان که آدیس^۳ و بارتن^۴ در سال ۱۹۹۰ مطالعات آزمایشگاهی را روی ماسه سنگ‌ها انجام دادند و نتیجه گرفتند که کاربرد مدل الاستیک خطی فشار شکست را کم تخمین می‌زند [Addis & Barton, 1990]. همچنین در سال ۲۰۰۴ آدنوی و بلاینه^۵ مدل الاستو پلاستیک را برای تحلیل دیواره چاه به کار بردند [Aadnoy & Belayneh, 2004].

آزمایشات شکافت بر روی مغزه‌ها نشان داد که مدل کشسان خطی فشار شکست را کم تخمین می‌زند. بنابراین از مدل الاستو پلاستیک که رفتار شکست را نیز توصیف می‌کرد استفاده نمودند. مدل‌های کشسان و الاستو پلاستیک برای مواقعی که در حین حفاری سیالی به سازند نفوذ نکند کاربرد دارد. مدل‌های پوروالاستیک و پورو الاستوپلاستیک تغییرات فشار حفره‌ای را نیز در نظر می‌گیرند. در سال ۱۹۸۶ سانترالی^۶ و همکارانش روی تنش‌های اطراف چاه مطالعه‌ای انجام دادند که روش پورو کشسان را به کار بردند و نتیجه گرفتند که تنش‌های مماسی دیواره چاه کمتر از مقداری هستند که توسط نظریه کشسان خطی به دست می‌آید [Santarelli, 2000].

¹ Aadnoy

² Chenvert

³ Addis

⁴ Barton

⁵ Belayneh

⁶ Santarelli

معیار شکست، جهت پیش‌بینی ریزش دیواره (مچاله شدن) و شکست القاشده به سازند استفاده می‌شود، که دلیل اصلی ناپایداری دیواره چاه می‌باشد. بنابراین اگر این دو، مشکل عمده ناپایداری دیواره چاه باشند، می‌توان به طور دقیق پیش‌بینی شوند.

یک پنجره بهینه گل حفاری می‌تواند برای جلوگیری از هر نوع عامل ناپایداری استفاده شود و به علت اینکه پیش‌بینی شکست دیواره چاه نیازمند دقت زیادی می‌باشد، معیارهای شکست مختلفی برای آنالیز پایداری دیواره چاه توسعه پیدا کرده‌اند که اغلب آن‌ها از اثر تنش اصلی میانی صرف نظر کرده‌اند. اگرچه اغلب این معیارها به کاربرد داشتن در پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی اشاره دارند، ولی به علت در نظر نگرفتن تنش میانی ممکن است قادر به ارائه نتایج درست در تخمین‌ها، تحت شرایط چندمحوره و یا سه‌محوره نباشند.

مور-کولمب یکی از معیارهای شکستی است، که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار، اثر تنش میانی را در نظر نمی‌گیرد و دارای یک معادله خطی می‌باشد و به علت این دو دلیل، قادر به پیش‌بینی دقیقی از مقاومت سنگ و در نهایت تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه، نمی‌باشد [Maleki et al., 2014].

ورنیک^۱ و زوباک به کارآیی پایین معیار شکست مور-کولمب در تعیین فشار ریزش دیواره (حد پایین گل حفاری) اشاره کردند [Maleki et al., 2014]. زو^۲ در سال ۱۹۹۴ اشاره کرد که نتایج به-دست آمده توسط معیار موهر-کولمب بدتر از نتایج حاصل شده به وسیله معیارهای سه محوری می‌باشد [Maleki et al., 2014].

سانگ^۳ و هیمسون^۴ در سال ۱۹۹۷ معیار شکست سه‌بعدی (این معیارها اثر تنش میانی را در نظر می‌گیرند) را برای پیش‌بینی ابعاد ریزش دیواره چاه پیشنهاد کردند. اوی^۵ در سال ۱۹۹۹ بیان

¹ Vernik

² Zhou

³ Song

⁴ Haimson

⁵ Ewy

کرد که معیار مور-کولمب یک روش خیلی قدیمی در پیش‌بینی ریزش دیواره چاه می‌باشد. هوک-بروان یکی دیگر از معیارهای سه‌بعدی می‌باشد که در کارهای معدنی و نفتی کاربرد زیادی دارد و به علت داشتن رفتار غیر خطی در مقایسه با معیار مور-کولمب خیلی دقیق‌تر می‌باشد [Maleki et al., 2014].

آقایان فجیر^۱ و ریستیون^۲ در سال ۲۰۰۲ ثابت کردند که تنش میانی اثر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت سنگ دارد و آن دسته از معیارهای شکستی که نمی‌توانند اثر این تنش را لحاظ کنند، قادر به فراهم آوردن نتایج معقولی نیستند [Maleki et al., 2014].

هنوز خیلی از این معیارهای شکست از لحاظ ریاضی متزلزل می‌باشند و خیلی از پارامترها به آسانی تعیین نمی‌شوند. برای مثال معیار ارائه‌شده توسط موگی در سال ۱۹۷۱ مقادیر تنش‌های حداکثر و میانی را یکسان فرض می‌کند [Maleki et al., 2014]. در معیار ارائه‌شده توسط ویبلس^۳ و کوک^۴ در سال ۱۹۶۸، ثابت اصطکاک بین سطوح شکاف باید مشخص باشد که تعیین آن مشکل می‌باشد [Maleki et al., 2014] و همچنین معیار ارائه‌شده به وسیله آقایان دسای و سلامی در سال ۱۹۸۷ نیاز به تخمین بیش از شش پارامتر دارد [Maleki et al., 2014].

اوی در سال ۱۹۹۹ از معیار لید اصلاح شده برای تحلیل پایداری چاه استفاده کرد و نشان داد که معیارهای مور-کولمب و دراکر-پراگر برای پیش‌بینی حداقل وزن گل که دیواره چاه را نگه دارد، نامناسب می‌باشد [Ewy, 1999].

در سال ۲۰۰۶ العجمی و زیمرمن، معیار شکست موگی-کولمب را برای تحلیل پایداری دیواره چاه به کار بردند و نشان دادند که این معیار شکست در مدل‌سازی دقیق‌تر از معیارهای مور-کولمب و دراکر-پراگر می‌باشد. این معیار شکست نیز اثر تنش میانی را در تقویت سنگ در نظر می‌گیرد [Ajmi & Zimmermar, 2006].

¹ Fjaer

² Ruistuen

³ Wiebols

⁴ Cook

۲-۱۵ امواج صوتی

به‌طور کلی امواج صوتی به سه نوع امواج: ۱- استونلی ۲- برشی ۳- تراکمی تقسیم می‌شوند. به کمک هر کدام از این امواج و ترکیبی از آن‌ها می‌توان خصوصیات لازم سنگ را محاسبه کرد که بر اساس نیاز در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۱۵-۱ سرعت امواج صوتی

سرعت امواج صوتی تحت تأثیر پارامترهای مختلف سنگ می‌باشد. لذا می‌تواند بیان کننده خصوصیات فیزیکی سنگ باشد. از مهمترین تفاوت‌هایی که بین امواج تراکمی و برشی وجود دارد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Rezaee, 2007]:

- موج برشی عمود بر جهت جابجایی ذرات ماده منتشر می‌شود ولی انتشار موج تراکمی موازی با جهت جابجایی ذرات ماده است.
 - سرعت موج تراکمی در یک سازند زمین‌شناسی یکسان بیشتر از سرعت موج برشی است.
 - امواج تراکمی در جامدات، مایعات و گازها قابلیت انتشار دارند، اما امواج برشی فقط در جامدات منتشر می‌شوند.
- به‌طور کلی، سرعت امواج تراکمی و برشی در یک محیط همگن، همسانگرد و کشسان را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد [Mavko et al., 2009].
- توصیف و تحلیل ژئومکانیک و پایداری یک چاه با هدف ارزیابی مقاومت دیواره چاه برای جلوگیری از هرزروی و فوران چاه، نیازمند تعیین خصوصیات سنگ مخزن نظیر مدول‌های حجمی، یانگ، نسبت پواسون و نیز رژیم تنش منطقه و مقدار و جهت تنش‌های زمین می‌باشد. دقت این تخمین‌ها بستگی به نوع اطلاعات در دسترس متفاوت است. تحلیل‌های دقیق مستلزم جمع‌آوری اطلاعات بیشتری می‌باشد که هزینه بیشتری را می‌طلبد.

امواج برشی به همراه امواج فشاری، اطلاعات مفیدی از سرشت مخازن هیدروکربنی نظیر لیتولوژی، نوع سیال منفذی و تفسیر ژئوفیزیکی به دست می‌دهند که در تصمیم‌گیری‌های بعدی اهمیت بسیاری دارد [Zoback, 2007].

از طرف دیگر، رفتار ژئومکانیکی سنگ‌های مخزن نقش مهمی در طراحی و اجرای حفاری، برنامه‌ریزی تولید و همچنین پایداری دیواره چاه‌های نفت و گاز ایفا می‌کنند. در دست داشتن مشخصات زمین‌شناسی و فیزیکی سنگ نظیر چگالی، تخلخل و سرعت امواج فشاری و برشی برای تعیین این پارامترها الزامی است.

در حالتی که اطلاعات سرعت موج برشی به میزان کافی و متناسب با سایر داده‌ها، موجود نباشد مجبور به تخمین سرعت موج برشی از روی روابط تجربی خواهند بود که این روابط از واقعیت قضیه فاصله داشته و خطا خواهد داشت. همان‌طور که در جدول (۲-۶) مشاهده می‌کنید تمامی روابط به-دست آمده یک رابطه تجربی هستند.

بر همین اساس در ادامه به پیشینه پژوهشی تخمین سرعت موج برشی و پژوهش‌های انجام شده در مورد تحلیل پایداری چاه پرداخته شده است.

۲-۱۶ پیشینه پژوهشی تخمین سرعت موج برشی

با توجه به اینکه در همه ابزارهای صوتی، موج برشی دریافت نمی‌شود. در چند دهه اخیر بر اساس بررسی‌های تئوری و مبتنی بر مدل تحلیل‌های رگرسیونی روابط تجربی زیادی برای تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری، تخلخل و داده‌های چگالی سرعت را در سنگ‌های کربناته تخمین زده و روابطی را پیشنهاد نمودند. اشاره‌ای اجمالی از این روابط در جدول (۲-۶)، آورده شده است. خواننده برای اطلاعات تکمیلی به منابع ذکر شده در داخل جدول (۲-۶)، ارجاع داده می‌شود.

جدول (۲-۶) روابط مربوط به تخمین موج برشی

نام پژوهشگر	رابطه تجربی	مرجع
پیکت (۱۹۶۳)	$V_s \left(\frac{Km}{S} \right) = \frac{V_p}{1.9}$	[Pickett, 1963]
کاستاگنا (۱۹۸۵)	$V_s \left(\frac{Km}{S} \right) = 0.826 V_p - 1.172$	[Castagna et al, 1985]
کاستاگنا (۱۹۹۳)	$V_s \left(\frac{Km}{S} \right) = -0.5508 V_p^2 + 1.0168 V_p - 1.0305$	[Castagna et al, 1993]
باستوس (۱۹۹۸)	$V_s \left(\frac{m}{S} \right) = 0.55 V_p + 41.60$	[Bastos et al, 1998]
اسکندری (۲۰۰۳)	$V_s \left(\frac{Km}{S} \right) = -0.1236 V_p^2 + 1.612 V_p - 2.3057$	[Eskandari et al, 2003]
بروچر (۲۰۰۵)	$V_s \left(\frac{Km}{S} \right) = 0.7858 - 1.2344 V_p + 0.7949 V_p^2 - 0.1238 V_p^3 + 0.0064 V_p^4$	[Rajabi et al, 2010]

در مواردی که اطلاعات سرعت موج برشی به میزان کافی و متناسب با سایر داده‌ها موجود نیست. از روابط تجربی برای به‌دست آوردن و تخمین موج برشی استفاده می‌کنند. البته قابل توجه است که همه این روابط به‌طور تجربی به‌دست آمده‌اند و دارای خطا می‌باشند.

در این پژوهش، به دلیل در دست بودن اطلاعات سرعت موج برشی که از طریق اندازه‌گیری مستقیم این موج توسط ابزار ^۱ DSI، به‌دست آمده است از خطاهای حاصل از روش‌های تجربی، تخمین سرعت موج برشی جلوگیری شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد ابزارهای صوتی و معایب ابزار تک قطبی و علت استفاده از ابزار DSI به فصل ۳ رجوع کنید.

^۱ Dipole shear sonic imager

۲-۱۷ گل حفاری

گل یا همان سیال حفاری را باید به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل عملیات حفاری اکتشافی نفت به‌ویژه میادین نفتی با توالی لایه‌های پرفشار و کم‌فشار به شمار آورد؛ چراکه بدون وجود این ماده، حفاری و نهایتاً دستیابی به مواد هیدروکربنی امکان پذیر نخواهد بود. ایفای وظایف مهمی که در عملیات حفاری به عهده سیال حفاری نهاده می‌شود، وجود خواص معین و مطلوبی را در این سیال ضروری می‌سازد. در مراحل مختلف حفاری، خواص گل به خاطر عوامل تحت‌الارضی، نامطلوب می‌شود. بنابراین بی‌جهت نیست که سالانه مبالغ هنگفتی صرف تحقیقات و مطالعات علمی و عملی جهت دست یافتن به سیال حفاری، با شرایط مطلوب، هزینه می‌شود [KMC Oiltools, 2006].

به‌طور کلی گل، بخشی از یک فرآیند حفاری بوده و باید به عنوان مکمل بخش‌های دیگر حفاری به کار رود. انتخاب و کاربرد سیال حفاری، از عوامل کلیدی در موفقیت هر عملیات حفاری می‌باشد. اولین هدف در برنامه‌ریزی یک برنامه گل، انتخاب آن گلی است که حداقل اتلاف زمان^۱ را در عملیات حفاری داشته باشد. به‌طور کلی یک سیال حفاری خوب، ساده و دارای کمترین مقدار مواد افزونه^۲ می‌باشد، زیرا در این شرایط کنترل خواص فیزیکی و شیمیایی آن گل آسان‌تر است. به عبارت بهتر استفاده از گلی مطلوب است که انعطاف‌پذیر باشد و در صورت نیاز، قابلیت تبدیل به انواع دیگر گل را دارا باشد [KMC Oiltools, 2006].

۲-۱۷-۱ سیستم گردش گل

همان‌طور که در شکل (۲-۳)، مشاهده می‌شود. گل حفاری توسط پمپ‌های رفت و برگشتی، به درون لوله ایستا^۳ پمپ می‌شود و به ترتیب با عبور از لوله خرطومی گل^۴ و هرزگرد^۵ وارد کلی^۶ شده و از

¹ Lost Time

² Additive

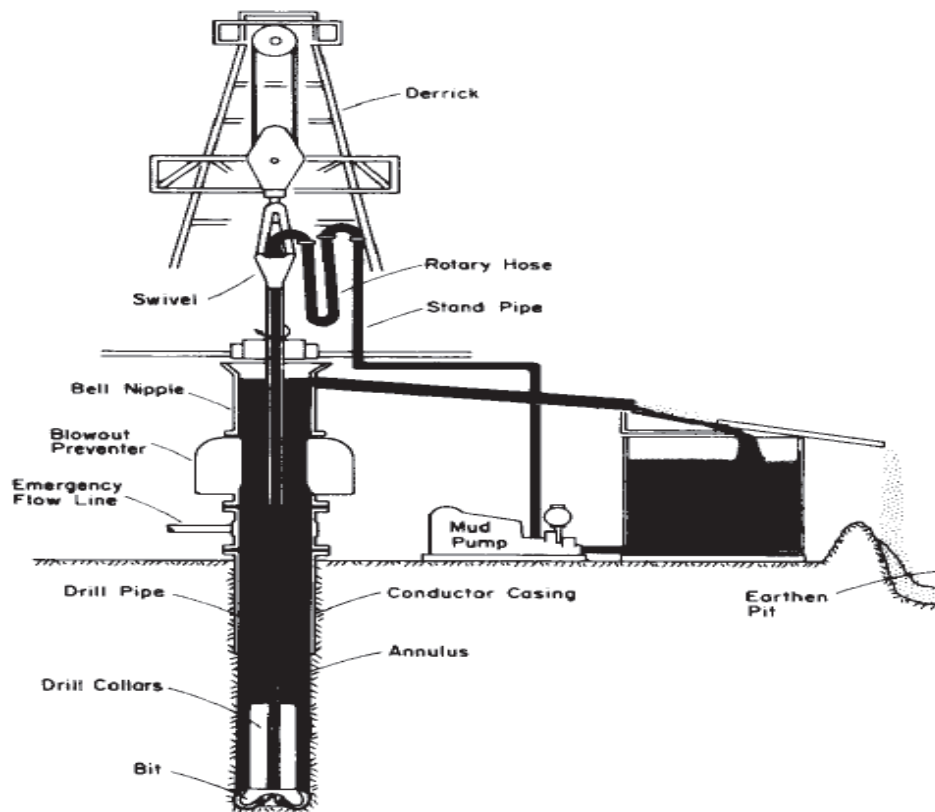
³ Stand Pipe

⁴ Rotary Hose

⁵ Swivel

⁶ Kelly

آن وارد لوله حفاری می‌شود. سپس هنگامی که به انتهای رشته حفاری رسید، از نازل‌های مته خارج شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. سیال حفاری پس از رسیدن به سطح، جهت تصفیه، بسته به شرایط ممکن است از الک لرزان^۱، گاززدا^۲، هیدروسیکلون‌ها^۳ و غیره عبور کرده تا خرده‌های حفاری^۴ و گاز (در صورت وجود) از آن جدا شود و جهت استفاده مجدد مهیا گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید به خاطر هزینه بالای ساخت گل در دکل‌های حفاری سعی دارند تا با تصفیه مجدد گل و بازگرداندن رئولوژی گل به حالت اولیه در هزینه‌های ساخت گل و زمان برای ساخت گل صرفه جویی را انجام دهند [KMC Oiltools, 2006].



شکل (۳-۲) سیستم گردش گل [Applied Engineering Drilling, 1983].

¹ Shale Shaker

² Degasser

³ Hydro cyclone

⁴ Cutting or Drilling Solid

فصل سوم

زمین‌شناسی و معرفی ابزار مورد استفاده

جهت تکمیل پایداری چاه

۳-۱ مقدمه

در این فصل طی معرفی و بررسی زمین‌شناسی خلیج فارس و میدان مورد مطالعه با توجه به اهمیت دانستن جنس سنگ دیواره چاه، جهت تحلیل بهتر عوامل ناپایداری آن برنامه‌های زمین‌شناسی^۱ تهیه شده در این میدان نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه به معرفی ابزارهای پتروفیزیکی رانده شده در چاه که اطلاعات آن موجود است پرداخته شد. وزن گل حفاری نیز یکی از پارامترهایی است که جهت کالیبره نمودن، فشار منفذی تخمین زده شده مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت.

۳-۲ زمین‌شناسی خلیج فارس

خلیج فارس، یک حوضه فورلند مربوط به زمان پلیوسن- پلئستوسن می‌باشد که در نتیجه فروانش صفحه ایرانی- عربی به زیر صفحه ایران و چین‌خوردگی زاگرس به وجود آمده است و مورفولوژی آن به شدت تحت تأثیر مسائل تکتونیکی قرار گرفته است [Alavi, 2004].

مطالعه تغییرات رخساره‌ای و همچنین تغییرات ضخامت سنگ‌های کربونیفر و پرمین ایران مرکزی تا منطقه زاگرس نشان داده است که از زمان پرمین پسین تا کرتاسه پایانی، اقیانوسی بسیار گسترده‌تر از خلیج فارس امروزی به نام نئوتتیس وجود داشته است و منطقه زاگرس و خلیج فارس، بخش کوچکی از این حوضه رسوبی بوده است [آقانباتی، ۱۳۸۵].

خلیج فارس، یک دریای حاشیه‌ای است که به‌طور کامل بر روی فلات قاره قرار دارد. خلیج فارس، دنباله دریای عمان است که در محل تنگه هرمز با آن ارتباط پیدا می‌کند. این خلیج بین بلوک عربی و رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد. آب خلیج فارس شور و علت شوری غیرعادی آن نیز تبخیر شدید آن است. غلظت املاح آن به ۴۵ گرم در لیتر می‌رسد. این خلیج بین عرض‌های جغرافیایی ۲۴ تا ۳۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۷ تا ۴۸ درجه شرقی واقع شده است. خلیج فارس، طولی معادل

¹ Geology Program

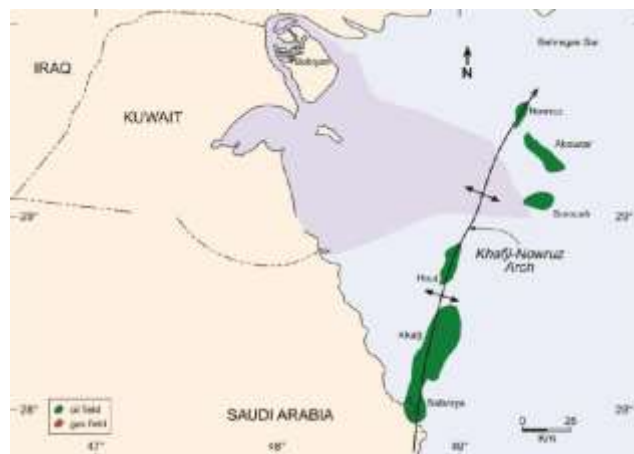
۱۰۰۰ کیلومتر و عرضی معادل ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر داشته و در حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. عمق متوسط آن حدود ۳۵ متر و عمیق‌ترین نقطه آن در سواحل ایرانی تنگه هرمز است که عمقی تا ۱۶۵ متر دارد. ساختمان زمین‌شناسی خلیج فارس، شبیه زاگرس چین خورده بوده و نوع رسوبات و روند آن با زاگرس چین‌خورده تفاوتی ندارد. وسعت خلیج فارس، در گذشته بسیار زیادتر از امروز بوده و رفته‌رفته از وسعت آن کاسته شده است [Kassler, 1973].

۳-۳ زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد نظر در شمال- غرب خلیج فارس، واقع شده است. تاکنون در این میدان ۱۴ حلقه چاه حفاری شده است. تولید میدان از سال ۱۹۶۷ تا سال ۱۹۷۹ ادامه دارد. طبق شکل (۳-۱) ساختار میدان مورد مطالعه تحت تأثیر کمان خفجی- نوروز قرار گرفته است و در قسمت شمال‌شرقی واقع شده است؛ که فرم آن‌ها بر اثر بالاآمدگی نمک شکل گرفته است [IOOC Report, 2014].

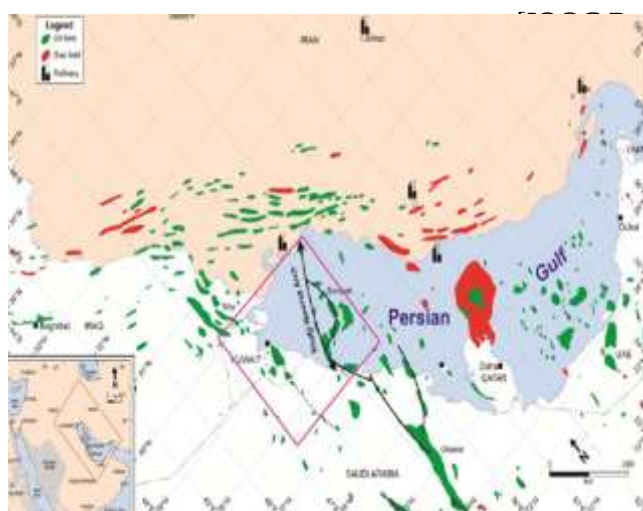
پلانچ این کمان‌ها به آرامی به سوی شمال و شمال‌غرب جهت یافته است و به‌صورت نامتقارن به طرف، پهلوی غربی سرازیر شده‌اند. طبق شکل (۴-۱) در طول این کمان، میادین نفتی تولیدی فراوانی در قسمت فراساحلی ایران و صفحه عربی همچون: نوروز، آرش- دورا، هوت و خنجی- صفانیا اکتشاف شده اس [IOOC Report, 2014].

بیشتر میادین مشابه در این ناحیه، از سازندهای بورغان و غار تولید هیدروکربن می‌کنند. به‌علاوه در چاه مورد مطالعه کربنات‌های کرتاسه پایینی مثل: سولای، یاماما، گدوان و داریان شاهد پتانسیل های مخزنی هستیم. البته به‌طور کامل توانایی تولید از این افق‌ها ثابت نشده است [IOOC Report, 2014].



شکل ۱-۳ موقعیت زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه [IOOC Report, 2014].

از چاه مورد مطالعه ۳۰ مغزه گرفته شده است. فرآیند مغزه‌گیری با احتیاط انجام شده است که مغزه‌ها کاملاً سالم و بدون شکستگی‌های القایی هستند. برای اطلاعات بیشتر از مغزه‌ها به فصل ۴،

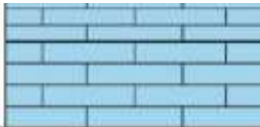
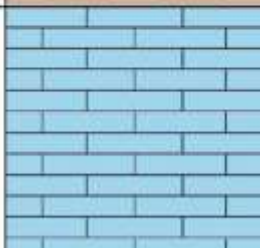
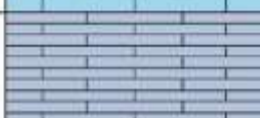


رجوع کنید [IOOC Report, 2014].

شکل ۲-۳ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی [IOOC Report, 2014].

۳-۴ سازندهای مخزنی مورد مطالعه

در قسمتی از چاه مورد مطالعه که قطری برابر ۸/۵ اینچ^۱ دارد، توالی سازندها به صورت زیر می باشد:

Shuaiba		✓ داریان (شعبیا)
Zubair		
Ratawi		✓ گدوان (زبیر)
Yamama		✓ رتاوی
Sulaiy		✓ یاماما

شکل (۳-۳) نمای کلی از توالی سازندها و ستون چینہ شناسی [IOOC Report, 2014].

با توجه به شکل (۳-۳)، ستون چینہ شناسی این قسمت از چاه ملاحظه می شود. داریان بالایی عمقی در حدود ۷۳ متر و داریان پایینی ۹۱ متر دارد. در کل لیتولوژی این سازند عمدتاً آهکی است. از طرفی سازند گدوان بالایی که لیتولوژی شیلی- آهکی دارد و در حدود ۶۱ متر است به کمک یک بخش راهنمای (کلیدی) خلیج^۲ که به طول ۱۷ متر است و لیتولوژی آهکی دارد از گدوان پایینی که به طول ۲۷ متر است و جنس سنگ آهکی شیلی دارد، جدا می شود. در زیر سازند گدوان، سازند رتاوی با جنس سنگ آهکی- شیلی، به طول ۱۹۱ متر قرار گرفته است و زیر این سازند سازند نفتی یاماما به طول ۲۴۶ متر با جنس سنگ آهکی قرار گرفته است. برای اطلاعات بیشتر از جنس سنگ این سازندها به فصل ۴، ارجاع داده می شود [IOOC Report, 2014].

¹ Hole size; 8 1/2 inch

² Key bed: Khalij member

۳-۴-۱ سازند داریان (در کشورهای عربی معروف به شعیبا)

سازند داریان، به سن آپتین که با اوربیتولینا آهکی شناخته می‌شود. یکی از مهم‌ترین مخازن فروافتادگی دزفول و ناحیه خلیج فارس است [IOOC Report, 2014].

برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵ جیم و ویند^۱، این سازند را در کوه - گدوان به ضخامت ۲۸۵ متر بررسی کردند. این سازند عضو گروه خامی است و عمدتاً متشکل از کربناته‌های غنی از اوربیتولین هستند. سازند داریان به دو بخش داریان بالایی و داریان پایینی تقسیم‌بندی می‌شود. سازند داریان در بخش عربی معادل سازند شعیبا می‌باشد که در ناحیه زاگرس واقع در جنوب و جنوب- غربی ایران مطالعات خوبی روی این سازند انجام نشده است [IOOC Report, 2014].

سازند داریان کربناته، در یک پلتفرم کربناته (آپتین پیشین) و همچنین در محیط فلات قاره داخلی^۲ (آپتین پسین) رسوب‌گذاری کرده و تجمع یافته است [IOOC Report, 2014].

شکل پلتفرم سازند داریان متأثر از گسل کازرون- هندیجان است. که در طول آپتین پیشین، سکانس کربناته‌های کم‌عمق (قسمت پایینی سازند داریان) در ناحیه زاگرس گسترش یافته است. به علت فعالیت گسل فوق‌الذکر، پلتفرم کربناته جایگزین فلات قاره داخلی (حوضه رسوبی کژدمی^۳) در شرق فروافتادگی دزفول شده است [IOOC Report, 2014].

به عبارت دیگر، در طول آپتین بیشتر قسمت‌های شرق و غرب به ترتیب در "زاگرس فارس، قطر مرتفع"^۴، ناحیه بالارود "بالا آمدگی رخ داده است [IOOC Report, 2014].

سطح انفصال داریان با لایه بالایی یعنی کژدمی در قسمت فارس داخلی با شاخصه‌های آلئیتی و گلوکونیتی توصیف می‌شوند. داده‌های میکروپالئونولوژی نیز، فقدان آهکی را در مرز بالایی سازند از جنوب فارس داخلی به سمت فارس ساحلی نشان می‌دهد [IOOC Report, 2014].

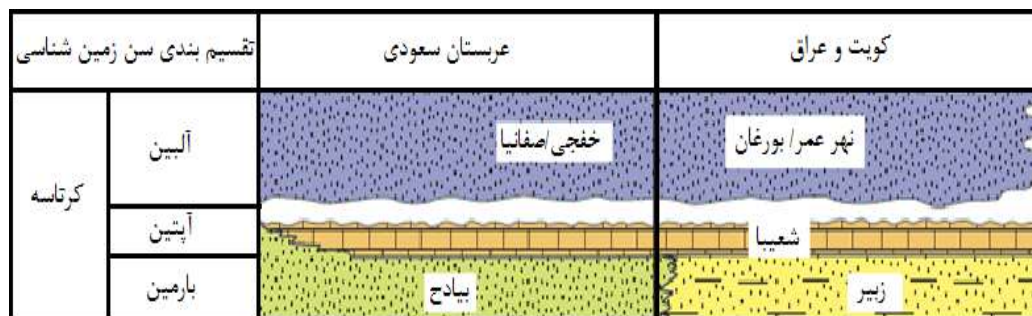
¹ James & Wynd

² Intra-Shelf Basin

³ Kazhdomi Basin

⁴ Fars-Qatar High

با توجه به شکل (۳-۴)، در شرق فارس و ناحیه کویت سطح انفصال بین شعیبا (داریان) و بورغان (کژدمی)، نبود رسوب گذاری دیده می شود. از طرفی در قسمت بالای سازند داریان (شعیبا)، رخساره ها از جنس سنگ شیلی به جنس سنگ ماسه سنگی تغییر می کند [IOOC Report, 2014].



شکل (۳-۴) چینه شناسی منطقه [IOOC Report, 2014].

همان طور که ذکر شد، بین دولایه داریان (شعیبا) فوقانی و بورغان، نبود رسوب گذاری (Hiatus) داریم؛ که بر اساس بررسی انجام شده پیشنهاد شد که بین این دو لایه یک لایه جدید معرفی کنند [IOOC Report, 2014].

۳-۴-۲ سازند گدوان (معادل در کشورهای عربی، زبیر)

برش نمونه این سازند در کوه گدوان واقع شده است. سازند گدوان به ترتیب با یک مرز تدریجی در قسمت زیرین و بالای سازندهای داریان (شعیبا) و فهلین (یاماما) قرار گرفته است. جنس سنگ غالب این سازند مارل و آهک های محیط آبی کم عمق است. قسمت بالایی سازند گدوان به کمک یک لایه راهنما آهکی^۱ از قسمت پایینی گدوان جدا می شود. این عضو یا بخش که در میان لایه گدوان قرار گرفته معروف به عضو خلیج^۲ است. همچنین سن این سازند در بازه بarmen - آپتین تخمین زده شده است؛ که بعدها بر اساس وجود فسیل های فرامنیفر کفزی، آمونیت ها، فرامنیفرهای پلانکتونیک

^۱ Marker Layer

^۲ Khalij member or Dictyoconnus arabicus

و منحنی ایزوتوپ کربن سن این سازند به بارمین تجدید نظر شد. سازند گدوان، در قسمت ایران، شامل سازندهای رتاوی، زیر می‌شود. که در فارس ساحلی این سازند به یک سازند آهکی تغییر می‌کند و حال اینکه در قسمت فراساحلی این سازند یک جنس سنگ ترکیب از مارل- شیل-آهک دارد. در شمال غربی خلیج فارس، گدوان یک سازند نفتی به حساب می‌آید، برای مثال این سازند در میادین اسفندیار، فروزان یک مخزن نفتی است [IOOC Report, 2014].

۳-۴-۳ سازند فهلیان (معادل در کشورهای عربی، یاماما)

در عربستان سعودی برش نمونه در شهر آل یاماما و شامل ۵۸ متر سنگ آهک می‌باشد که آهک‌های متراکم و چگال سولای در زیر و سازند بوئیب در بالا قرار گرفته است؛ که در یک محیط لاگونی کم‌عمق و پلاتفرم باز رسوب کرده‌اند، وجود دارند. در قطر: این سازند با ضخامتی معادل ۱۲۰ متر، شامل سنگ آهک ریز متخلخل خاکستری رنگ به همراه سنگ آهک دانه‌ریز پلوئیدی و مادستون آهکی تبدیل می‌شود. مرز بالایی آن رتاوی و مرز پایینی سولای است. بحرین: شامل وکستون، گل سنگ آهکی و پکستون می‌باشد. این سازند در کشورهای عربی (عربستان، بحرین، قطر) عضو گروه تاماما می‌باشد [IOOC Report, 2014].

یاماما قابل تطابق با سازندهای مانقشین در کویت و سازند حبشن در امارات و سازند سلیل در عمان است. البته در ایران معادل سازند فهلیان (گروه خامی) در قسمت زاگرس است [IOOC Report, 2014].

این سازند نقش یک سازند نفتی در جنوب عراق، کویت، عربستان سعودی، بحرین، قطر و امارات دارد [IOOC Report, 2014]. بالاترین قسمت سازند یاماما^۱ با یک لایه تمیز آهکی که زیر سازند رتاوی با جنس سنگ شیل و آهک آرژیلیتی جدا می‌شود. قمست پایینی آن با دیده شدن اولین آهک‌های آرژیلیتی از سازند سولای جدا می‌شود [IOOC Report, 2014].

¹Top Formation

۵-۳ معرفی ابزارهای پتروفیزیکی مورد استفاده

به‌طور کلی از چاه مورد مطالعه دو دسته داده^۱ در دسترس است، که مجموعه اول به داده‌های فول ست^۲ معروف هستند که شامل مقادیر نمودارهای پتروفیزیکی نوترون، چگالی، اشعه گاما^۳، کالیپر^۴ و نمودارهای الکتریکی هستند. مجموعه دوم داده‌ها شامل مقادیر نمودار صوتی می‌باشند. در ادامه برای آشنایی بیشتر به اختصار هر کدام از ابزارها شرح داده شده است.

۱-۵-۳ ابزار نوترون

نوترون جزو پرتوهای رادیواکتیو و از اجزای هسته می‌باشد و دارای عمق نفوذپذیری زیادی است. این دستگاه هرچه نوترون بیشتری دریافت کند تخلخل کمتری را نشان می‌دهد که واحد آن $\%$ یا V/V می‌باشد. قابل ذکر است که این نمودار تخلخل کل را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان تخلخل سازند، تشخیص جنس سنگ و محیط‌های گازدار استفاده می‌شود.

۲-۵-۳ ابزار چگالی

نمودار آن RHOB است. این نمودار همراه با نمودار نوترون رانده می‌شود. واحد آن gr/c^3 است و بازه آن بین ۲ تا ۳ می‌باشد. مقدار خوانده شده توسط این ابزار به میزان الکترون موجود در هر زون بستگی دارد. هرچه تراکم و چگالی بیشتر باشد RHOB تراکم بیشتر و HPHI تخلخل کمتری را نشان می‌دهد. عوامل موثر در RHOB، تخلخل، نوع سیال و نوع جنس سنگ می‌باشد. اگر NPHI، RHOB روی یکدیگر قرار بگیرند نشانگر وجود لایه آهکی می‌باشد ولی برای اطمینان از نوع جنس سنگ به PEF نیز توجه می‌شود. زیرا اگر $PEF = 1/3$ را بخواند نشانگر جنس سنگ دولومیتی به همراه گاز است. ولی اگر NPHI، RHOB از یکدیگر فاصله داشته باشد جنس سنگ دولومیت یا انیدریت است. ولی برای تفکیک آن‌ها از یکدیگر از منحنی PEF استفاده می‌شود؛ که اگر $PEF = 3/1$ باشد جنس سنگ

¹ Data Set

² Full Set

³ GR Log

⁴ Caliper Log

دولومیتی و اگر $PEF=5$ باشد نشانگر جنس سنگ انیدریت است. از جمله مواردی که روی لاگ Density اثر می‌گذارد، اثرات جنس سنگ و وجود گاز در تخلخل‌ها است. برای اندازه‌گیری جرم مخصوص توده سنگ و ایندکس جذب فتوالکتریک جهت محاسبه میزان تراکم و تعیین نوع جنس سنگ سازند استفاده شده است.

۳-۵-۳ ابزار پرتو گاما

برای اندازه‌گیری میزان تشعشعات گاما، ارزیابی شیل، تشخیص و تعیین لایه‌های قابل نفوذ سازند و توصیف لایه‌های غیر رادیواکتیو استفاده شده است. دستگاه پرتو گاما دارای یک گیرنده است که تمام امواج گاما را در دستگاه ثبت می‌کند. واحد آن API بوده و دامنه آن بین ۰ تا ۱۰۰ می‌باشد. محاسبه میزان شیل با استفاده از این نمودار صورت می‌گیرد، این نمودار تشعشعات طبیعی مواد رادیواکتیو طبقات را اندازه‌گیری می‌نماید و در طبقات رسوبی غالباً مقدار شیل را نشان می‌دهد، به همین دلیل GR را لاگ شیلی نیز می‌نامند. البته باید توجه داشت که وزن گل حفاری و قطر چاه بر روی داده‌های این نمودار تاثیر می‌گذارد. دگرشیبی و وقفه در رسوب‌گذاری را می‌توان با GR تشخیص داد. از محدودیت‌های این ابزار می‌توان به:

(۱) وجود پتاسیم در گل به تنهایی نشان وجود شیل نیست، چون پتاسیم مربوط به فلدسپات و میکا هم می‌باشد.

(۲) وجود باریت در گل سبب کاهش GR می‌شود.

۳-۵-۴ ابزار کالیپر

برای اندازه‌گیری میزان قطر چاه استفاده می‌شود، واحد آن اینچ است بازه آن معمولاً بین ۶ تا ۱۶ است. از کالیپر برای کنترل کیفیت سایر نمودارها و تصحیحات محیطی استفاده می‌شود. اگر روند کالیپر قبل از خط Bitsize (اندازه قطر مته) باشد، آن لایه تراوا است و به دلیل تخلخل بالا کیک گل^۱

¹ Mud cack

تشکیل شده است و نشانگر کم شدن قطر چاه می‌باشد و بالعکس اگر کالیپر بعد از خط Bitsize (اندازه قطر مته) باشد نشانگر ریزش در چاه و افزایش قطر چاه است. در صورتی که ریزش چاه خیلی زیاد باشد، لاگ‌ها از اعتبار و کیفیت لازم برخوردار نخواهند بود و باید قبل از تفسیر تصحیح شوند. این ابزار بر اساس نحوه کارکرد به انواع مکانیکال و صوتی تقسیم‌بندی می‌شوند. امروزه برای جلوگیری از گیرکردن آن، بیشتر از نوع صوتی استفاده می‌شود.

۳-۵-۵ ابزار الکتریکی

این نمودار، مقاومت سنگ را در مقابل جریان الکتریکی می‌سنجد. واحد آن اهم‌متر (ohm.m) است و بازه آن بین ۰/۲ تا ۲۰۰۰ می‌باشد. آنچه در تعیین مقاومت سازند موثر است میزان اشباع آب، تخلخل، شوری و دما می‌باشد. نمودارهای مقاومت در سه حالت MSFL، LLS و LLD هستند که به ترتیب برد کوتاه، متوسط و بلند دارند. زمانی که مقاومت‌های خوانده شده توسط این نمودارها یکسان باشند نشانگر یک زون ناتراوا همچون پوش سنگ^۱ می‌باشند یا زون تراوا با شوری گل حفاری با آب سازندی یکسان می‌باشد. در صورتی که این لاگ‌ها از هم جدا شوند نشانگر بخش تراوا^۲ است. MSFL همیشه بین LLS و LLD قرار می‌گیرد. در صورتی که مقادیر خوانده شده توسط LLS به MSFL نزدیک‌تر باشد، نفوذ گل بیشتر است و Flush zone وجود دارد و چنانچه مقادیر خوانده شده توسط LLS به LLD نزدیک‌تر باشد، نفوذ گل کمتر بوده و Flushing کمتر است. به‌طور کلی این ابزار برای اندازه‌گیری و تعیین هیدروکربن، اشباع آب، قطر تهاجم و مقاومت سیال سازندی استفاده می‌شود.

۳-۵-۶ ابزار PEF

این لاگ PEF یا Litho Density نام دارد که در کنار Density رانده می‌شود و توانایی اندازه‌گیری فتوالکتریک را دارد. بازه این لاگ بین ۱ تا ۶ متغیر است. کاربرد آن نوع جنس سنگ است. تخلخل و سیالات موجود در تخلخل‌ها بر روی نمودار PEF تأثیری ندارد.

^۱ Caprock

^۲ Flash zone

۳-۵-۷ ابزارهای صوتی

ابزارهای صوتی کندشدگی^۱ سرعت صوت در سازند را محاسبه می‌کنند. برای اندازه‌گیری میزان تخلخل سازند و ارزیابی کانی‌های رسی استفاده شده است. یکی از ابزارهای مورد استفاده جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در طی این پژوهش ابزار دو قطبی DSI است. قبل از معرفی این ابزار به نظر لازم است، به محدودیت ابزارهای تک قطبی به دلیل محدودیت ناشی از فیزیک حفره چاه اشاره داشته باشیم. در دهه‌های گذشته از ابزارهای تک قطبی جهت دریافت امواج صوتی استفاده می‌شد که این ابزارهای تک قطبی فقط می‌توانند سرعت‌های برشی را که از سرعت سیال حفره چاه یا فقط در سنگ‌های سخت سریع‌تر می‌باشند ردیابی کنند. به عبارتی این ابزار در کل توانایی ردیابی کندی‌های امواج تراکمی را دارد. از ویژگی‌های امواج تراکمی می‌توان به ارزیابی تخلخل سنگ اشاره نمود. این در حالی است که تکنولوژی دو قطبی اجازه می‌دهد تا مقادیر موج‌های برشی حفره چاه به همان نحو که در سازندهای دارای سنگ‌های سخت ایجاد می‌شود در سازندهای نرم نیز به وجود آیند. با توجه به شکل (۳-۴) همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار ابزار تک قطبی به گونه‌ای طراحی شده است که اثر موج تراکمی در گیرنده‌های تک قطبی بیشتر از اثر موج برشی باشد. این در حالی است که با توجه به شکل (۳-۵) ابزار DSI تکنولوژی جدید دو قطبی را با آخرین و پیشرفته‌ترین تکنولوژی تک قطبی در یک سیستم واحد ترکیب می‌کند و بهترین روش موجود امروزی را برای به-دست آوردن کندی‌های تراکمی^۲ و برشی^۳ و استونلی^۴ ارائه می‌دهد و هر کدام از امواج را به‌صورت مشخص و جدا از هم ردیابی می‌کند.

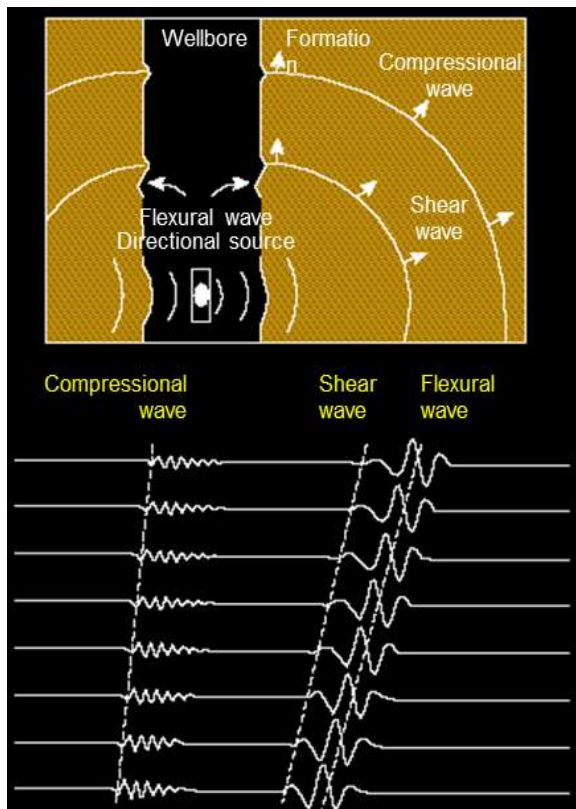
در صورت در اختیار داشتن سرعت امواج برشی و تلفیق آن‌ها با اطلاعات سرعت موج تراکمی، می‌توان خصوصیات فیزیکی سنگ را مورد ارزیابی قرار داد.

^۱ slowness عکس سرعت می‌باشد و معادل است با زمان عبور صوت از سازند که به وسیله ابزارهای صوتی استاندارد اندازه‌گیری می‌شود.

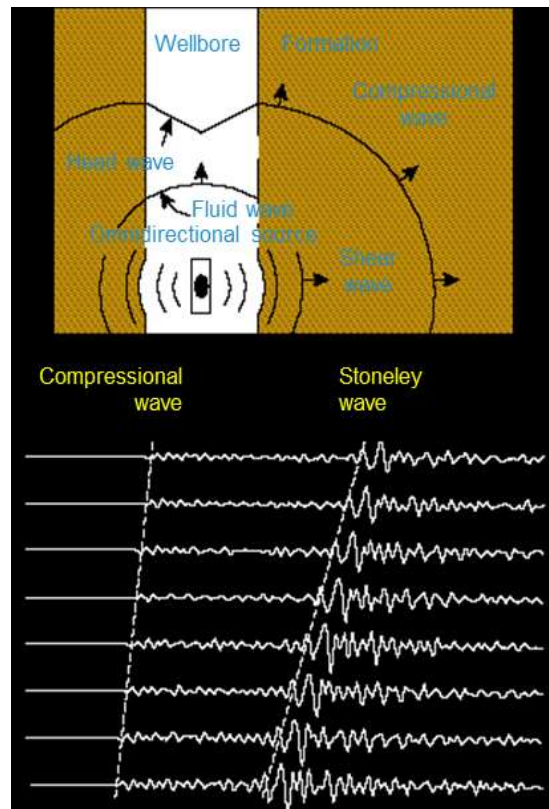
^۲ compressional slownesses

^۳ Shear Slownesses

^۴ Stoneley Slownesses



شکل ۳-۵ ابزار صوتی دو قطبی [Drillscan Company].



شکل ۳-۴ ابزار صوتی تک قطبی

[presentation, 2016]

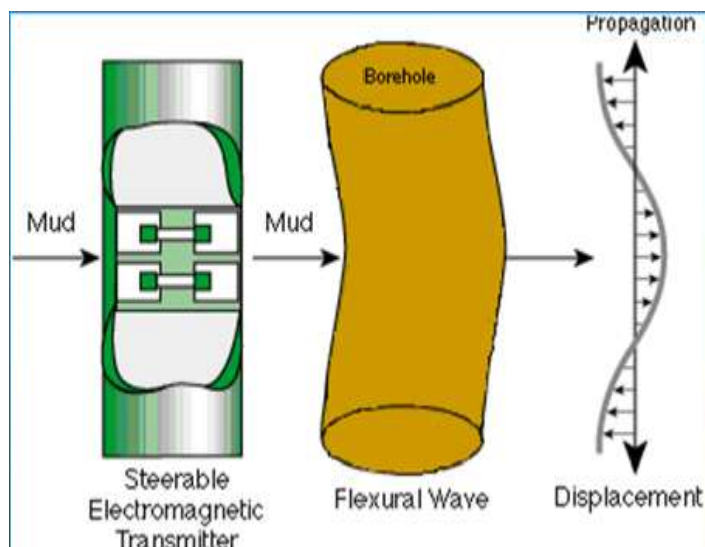
به این علت، جهت افزایش دقت در تخمین سرعت موج برشی و تراکمی از داده‌های ابزار چاه نگار دو قطبی استفاده شده است.

۳-۵-۸ ابزار DSI^1

ابزار دو قطبی از یک منبع جهت‌دار و گیرنده‌ای جهت‌دار استفاده می‌کند. منبع دو قطبی بسیار شبیه یک پیستون عمل می‌کند، یک افزایش فشار روی یک دیواره چاه و یک کاهش فشار روی دیواره دیگر به وجود می‌آورد. این پدیده باعث یک خم کوچک در دیواره چاه می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. مستقیماً امواج برشی و تراکمی را در سازند بر می‌انگیزد. انتشار این موج خمیده هم‌محور با حفره چاه می‌باشد، در حالی که جابجایی آن عمود بر محور چاه و در یک

¹ DSI Tools

راستا با فرستنده می‌باشد. منبع با فرکانس‌های پایین کار می‌کند (معمولاً زیر 4KHZ)؛ که در این فرکانس برانگیختن این امواج بهینه می‌باشد.



شکل (۳-۶) طرز کار ابزار [Drillsan Company presentation, 2016].

در ابزار DSI از یک آرایه شامل هشت ایستگاه گیرنده استفاده می‌شود و اطلاعات ورودی به ایستگاه‌ها به صورت همزمان ثبت شده و توسط یک سیستم تله متری با سرعت بالا به سطح زمین ارسال می‌شوند؛ که این امر باعث بالا رفتن سرعت نمودارگیری توسط این ابزار می‌شود. علاوه بر فرستنده دو قطبی از یک فرستنده تک قطبی نیز در این سوند استفاده می‌شود و اطلاعات ثبت شده توسط واحد پردازشگر MAXIS برداشت و پردازش می‌شوند. این ابزار قابلیت ترکیب با سایر ابزارهای نمودارگیری را دارد. سرعت نمودارگیری ابزار مذکور به خاطر داشتن ترکیب و شکل جدید در حالتی که به تنهایی رانده می‌شود به ۳۶۰۰ فوت بر ساعت می‌رسد. ولی چنانچه با سایر ابزارها ترکیب شود سرعت آن با توجه به ابزارهای همراه آن تنظیم خواهد شد.

عمق تجسس ابزارهای نمودارگیری صوتی به عواملی از قبیل نوع سازند، امواج فشاری و برشی، فاصله بین فرستنده و گیرنده، طول موج مورد نظر و این که آن موج، موج حجمی بوده یا سطحی،

فرکانس منبع انرژی و نوع سیگنال دریافتی بستگی دارد. پارامترهای مهم جهت استفاده در تحلیل پتروفیزیکی که توسط ابزار DSI اندازه گیری می شود عبارتند از:

- نفوذپذیری حاصل از موج استونلی
- $DTCO$ - کندشدگی فشاری بر حسب میکروثانیه بر فوت ($\mu s / ft$)
- $DTSM$ - کندشدگی برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت ($\mu s / ft$)
- نسبت پواسون

به طور معمول همه ابزارهای DSI امروزه این پارامترها را اندازه گیری می کنند. با استفاده از کالیبراسیون این داده ها و روابط مربوطه می توان پارامترهای مکانیکی سنگ از قبیل: نسبت پواسون، مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی را به دست آورد. سرعت امواج برشی و فشاری از معکوس سازی مقادیر کندشدگی برشی و کندشدگی فشاری به دست می آیند.

امواج استونلی مستقیماً تحت تأثیر نفوذپذیری قرار نمی گیرند، بلکه از موبیلیتی یعنی نسبت نفوذپذیری به ویسکوزیته سیال منفذی، به دست می آید. نفوذپذیری بر روی امواج استونلی به سه طریق تأثیر می گذارد. امواج استونلی می تواند در مرزهای با امپدانس تیز¹ مانند شکستگی ها، لیتولوژی یا تغییرات قطر چاه منعکس شود [Drillscan Company presentation, 2016]. به علاوه با افزایش نفوذپذیری سازند سرعت امواج استونلی کاهش می یابد. تأثیر سوم، میرایی امواج استونلی می باشد.

میرایی امواج وقتی رخ می دهد که سیال درون سازند نفوذپذیر محصور شده و انرژی با حرکت نسبی بین سیال منفذی ویسکوز و ماتریکس الاستیک جامد (سازند) هدر رود [Drillscan Company presentation, 2016]. بنابراین میرایی با نفوذپذیری همبستگی داشته ولی متأسفانه مرزهای لیتولوژی یا هندسه متغیر چاه نیز امواج استونلی را میرا می کنند. در نتیجه در این حالت بررسی سایر ابزارها و مغزه سنجی ها برای تمیز علل ایجاد میرایی ضروری می باشد. می توان گفت کاهش امواج استونلی هم

¹ - Sharp impedance

در نتیجه نفوذپذیری سازند با یک دیواره صاف و بدون نقص چاه یا در نتیجه شست‌وشو و شکست دیواره می‌باشد.

۳-۶ خواص رئولوژی گل حفاری

برای تحلیل پایداری و تعیین پنجره گل ایمن در چاه مورد مطالعه، به کمک نرم‌افزار تک لاگ^۱ از داده‌های صوتی و برخی از داده‌های فول‌ست مورد استفاده قرار گرفت. در طی این پژوهش جهت تحلیل پایداری چاه لازم است قبل از تعیین پنجره گل ایمن پارامترهایی همچون فشار منفذی را حساب کرد.

برای رسیدن به یک نتیجه مطلوب و برای تخمین فشار منفذی به کمک داده‌های صوتی لازم است، ضمن تخمین فشار منفذی به کمک این داده‌ها، نتایج را با داده‌های MDT یا وزن گل حفاری کالیبره کرد. با توجه به در دسترس بودن گزارشات روزانه حفاری^۲، مجموعه‌ای از داده‌های وزن گل پس از بررسی و مطالعه جهت کالیبره نمودن با فشار منفذی تخمین زده شده توسط داده‌های صوتی، از این گزارشات استخراج شد [KMC Oiltools, 2006].

روش تعیین وزن مخصوص و گرانیوی گل حفاری در پیوست ۱ آورده شده است.

¹ Techlog

² DDR: Daily Drilling Report

فصل چهارم

ارزیابی پتروفیزیکی و تحلیل پایداری چاه در

بازره عمقی مورد مطالعه

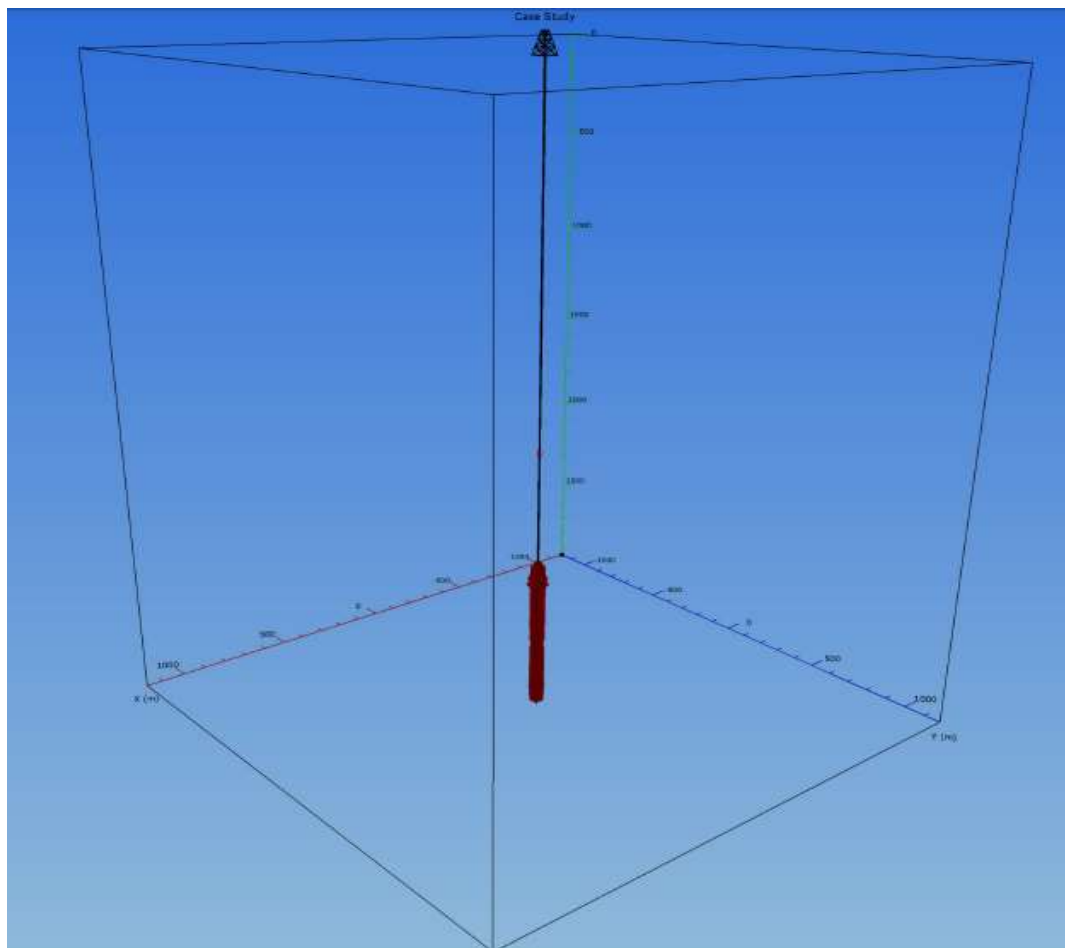
۱-۴ مقدمه

در طی این پژوهش، جهت بررسی پایداری چاه ضمن مطالعه چاه از دیدگاه ژئومکانیکی، سعی بر این شد که از ابعاد پتروفیزیکی، جنس سنگ دیواره چاه نیز مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت با گزارشات مطالعه انجام شده بر روی مغزه‌ها توسط شرکت نفت فلات قاره تطابق جهت صحت‌سنجی تفسیر لاگ‌های پتروفیزیکی انجام گردد. از طرفی با توجه به اینکه چاه مورد مطالعه دست‌خوش ناپایداری چاه و هرزروی گل شده است در طول پژوهش با توجه به نیاز صنعت حفاری، بخشی از زمان مطالعات صرف بررسی روش کنترل چاه مورد مطالعه به منظور جلوگیری از هرزروی و از دست دادن زمان و تحمیل هزینه اضافی بر شرکت‌های حفاری شده است. مراحل انجام کار برای داشتن تحلیل صحیح از پایداری دیواره چاه در پایین آورده شده است.



۲-۴ معرفی چاه مورد مطالعه

همان‌طور که در فصل ۳ گفته شده چاه مورد مطالعه در خلیج فارس، واقع شده است. با توجه به شکل (۱-۴)، چاه به‌صورت قائم و بدون انحراف حفاری شده است. بازه عمقی مورد مطالعه از عمق ۲۲۶۴ متر تا ۲۹۸۸ متر می‌باشد و داده‌های چاه در این اینتروال $8\frac{1}{2}$ ، اینچ می‌باشد. جنس سنگ غالب در این بازه عمقی سنگ کربناته - شیلی است؛ که به آهک آرژیلیتی نیز معروف‌اند. از طرفی یک لایه راهنما در طول حفاری چاه به اسم عضو خلیج با جنس سنگ آهکی و بدون شیل موجود است که در میان یک سازند با جنس سنگ شیلی قرار گرفته است.



شکل (۱-۴) شماتیک سه‌بعدی از چاه مورد مطالعه با مقادیر نمودار کالیپر

در جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود مغزه‌های گرفته شده در طول این چاه در شش بازه عمقی گرفته شده است که از بین آن‌ها چهار بازه عمقی در محدوده مطالعه می‌باشد.

جدول (۴-۱) مغزه‌های گرفته شده در چاه مورد مطالعه [IOOC Report, 2014].

جنس سنگ غالب	عمق	قطر مغزه	سازند
مقدار کمی ماسه سنگ با کربنات	۶۷۲/۳۰	۶۲۵	۴ اینچ عضو غار
شیل و مقدار کمی ماسه سنگ	۲۴۵/۳۰	۲۰۹۸	۴ اینچ بورغان
کربنات، مارل، شیل و کمی ماسه سنگ	۲۴۳/۳۰	۲۲۴۵/۳۰	۴ اینچ داریان (شعبی)
کربنات، مارل	۲۴۹۸/۲۰	۲۷۸۰/۵۰	۴ اینچ عضو خلیج
کربنات، مارل	۲۸۶۰/۲۶	۲۷۳۷	۴ اینچ یاماما
مارل و کربنات آریلیتی	۳۰۷۹/۷۰	۲۹۷۵/۰۵	۲ اینچ سولای

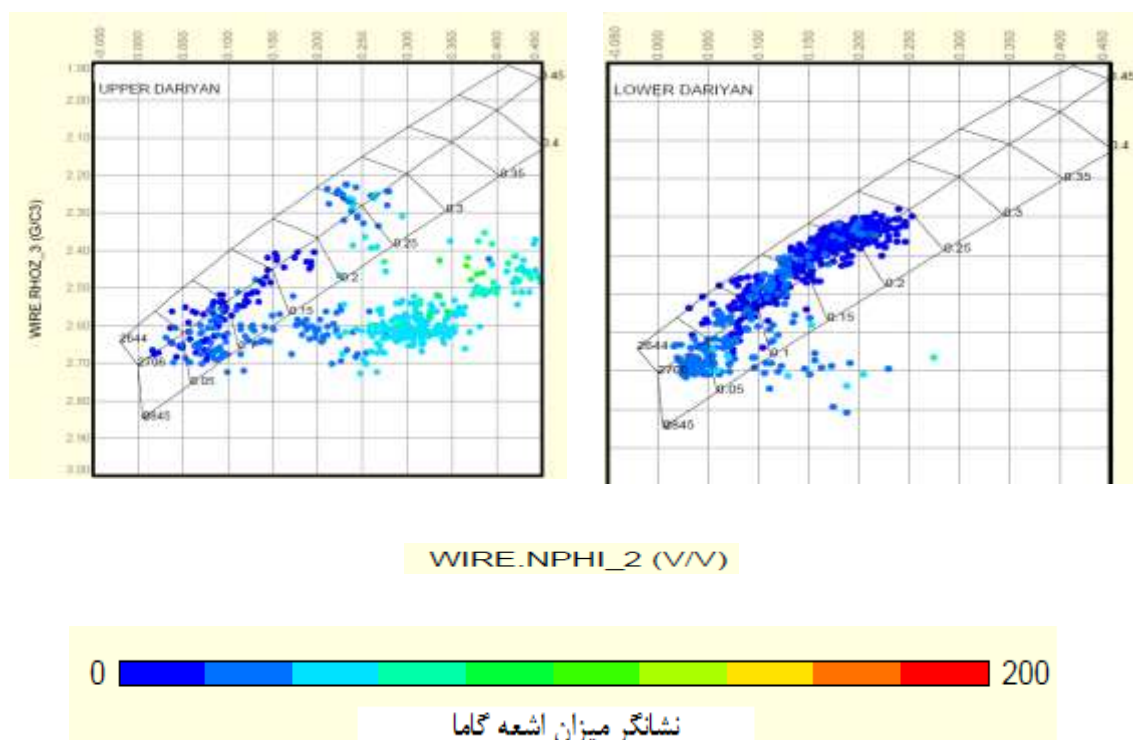
۴-۳ تفسیر نگارهای پتروفیزیکی

با تفسیر و کراس پلات، داده‌های نگارهای پتروفیزیکی از جمله نگارهای گاما، کالیپر، چگالی، فتوالکتریک فاکتور، نوترون، صوتی و مقاومت، جنس سنگ هر قسمت از بازه عمقی مورد مطالعه به اختصاص سازند مورد نظر بررسی شد. لازم به ذکر است که تفسیر لاگ در نرم‌افزار ژئولاگ و کراس پلات نمودارها در نرم‌افزار تک لاگ صورت گرفت. در ادامه به‌صورت مجزا نتایج مربوط به تفسیر نمودارهای هر سازند با نتایج مطالعات مغزه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۳-۱ تفسیر نمودارهای سازند داریان (شعبی)

برای تفسیر جنس سنگ سازند داریان از نگارهای صوتی، گاماری، کالیپر، چگالی، فتوالکتریک فاکتور، نوترون و نگارهای الکتریکی استفاده شده است. قبل از شروع تفسیر نگارهای پتروفیزیکی جهت تعیین جنس سنگ دیواره چاه، برای دید کلی از جنس سنگ سازند از کراس - پلات نمودارهای چگالی و نوترون استفاده گردید. همان‌طور که در شکل (۴-۲)، نشان داده شده است، در

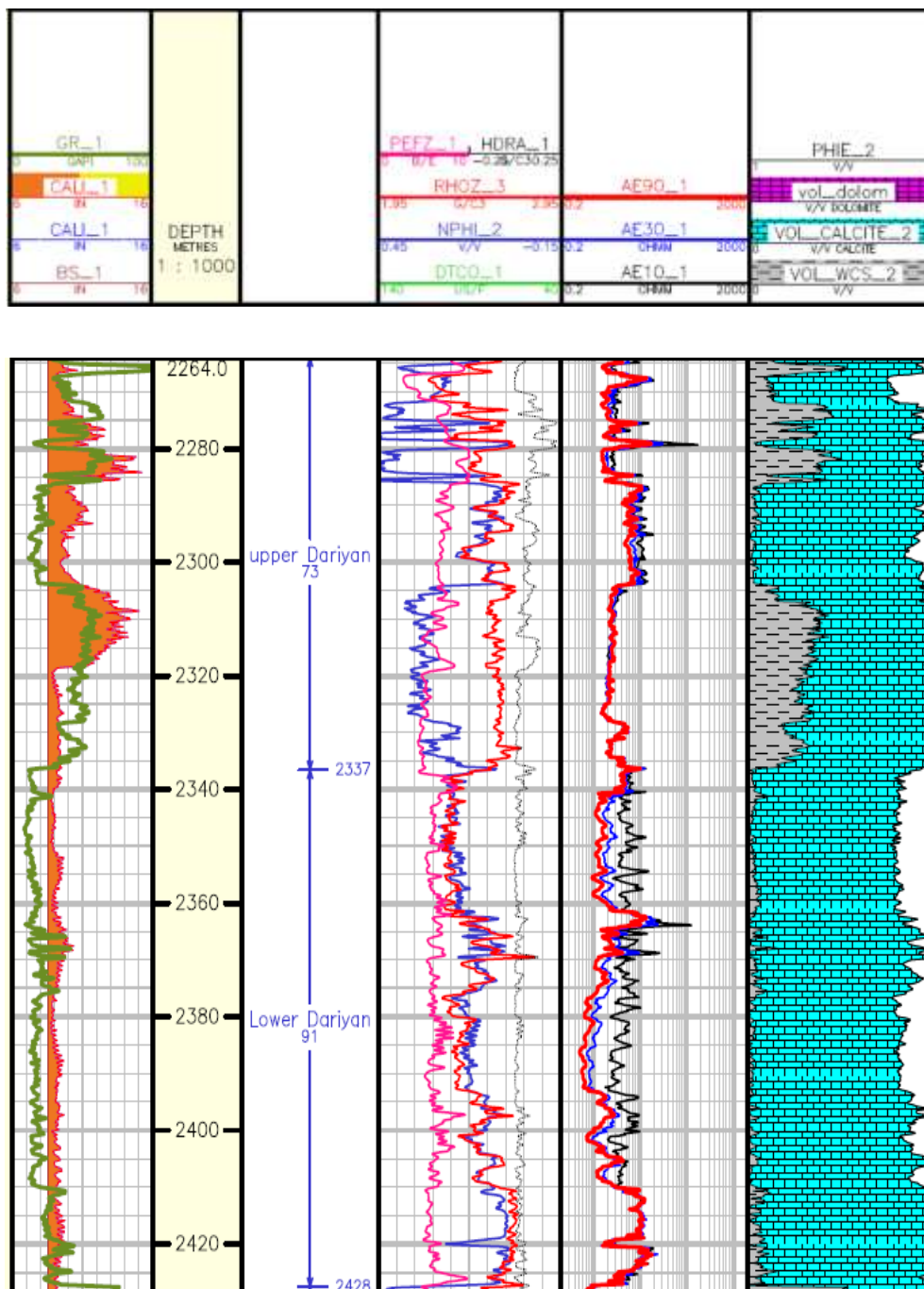
سازند داریان بالایی دو روند مشاهده می‌شود که ضمن افزایش مقادیر نوترون مربوط به نمودار چگالی ثابت است. ولی در روند دیگر ضمن افزایش مقادیر نمودار نوترون مقادیر چگالی نیز افزایش می‌یابد. در این صورت می‌توان به این نتیجه رسید که جنس سنگ کربناته - شیلی است، در آن جنس سنگ غالباً آهکی است و از شیل چشم‌گیری نیز برخوردار است. از طرفی در سازند داریان پایینی با توجه به افزایش مقادیر نمودار چگالی، مقادیر نمودار نوترون نیز به یک نسبت افزایش می‌یابد. این حالت نشانگر وجود یک سازند با جنس سنگ غالب آهکی با مقادیر ناچیز شیل در این بازه عمقی است. با توجه به شکل می‌توان از بعد سوم یعنی رنگ نیز، میزان اشعه گاما و وجود شیل را تشخیص داد.



شکل (۴-۲) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند داریان

برای اطلاع دقیق و کامل از جنس سنگ هر عمق دلخواه به تفسیر نگارهای چاه پیمایی پرداخته شد. در شکل (۴-۳) همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سازند داریان بالایی از بازه عمقی ۲۳۰۰ متر تا

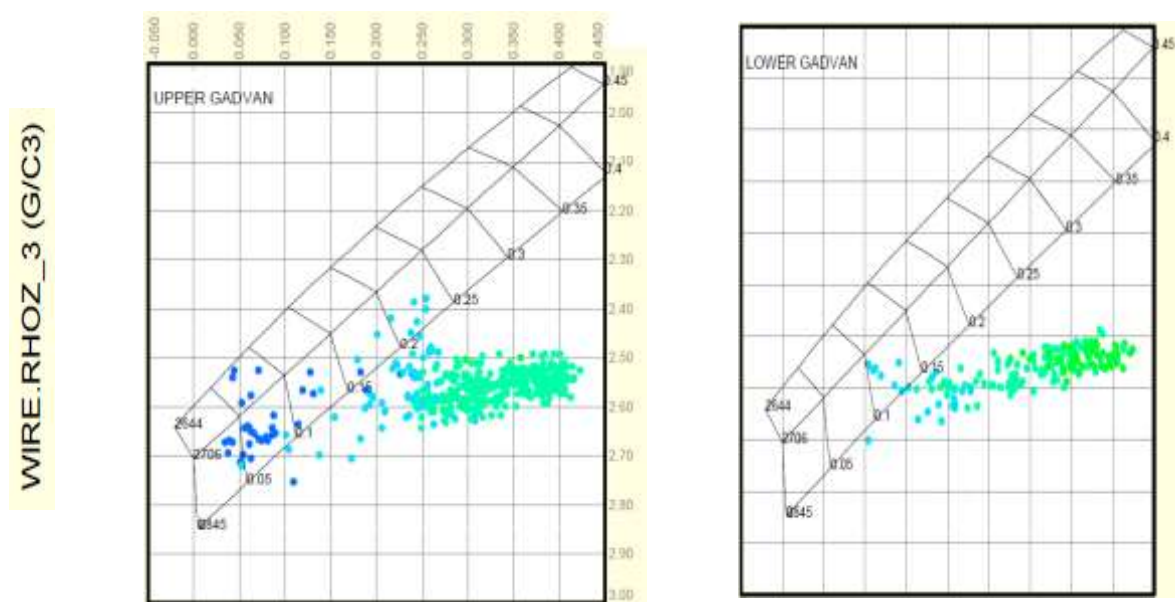
۲۳۳۷ متر جنس سنگ کربناته - شیلی است که در آن میزان آهک بیشتر از میزان شیل است این در حالی که در سازند داریان پایینی در بازه عمقی ۲۳۳۷ - ۲۴۲۸ متر، شیل کمتری نسبت به سازند داریان بالایی دیده می‌شود.



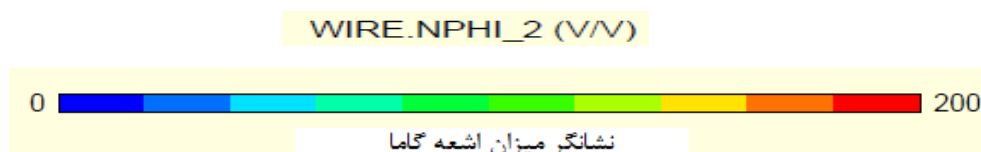
شکل (۳-۴) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند داریان

۲-۳-۴ نتایج تفسیر سازند گدوان

برای تفسیر جنس سنگ سازند گدوان از نگارهای صوتی، گاماری، کالیپر، چگالی، فتوالکتریک فاکتور، نوترون و نگارهای الکتریکی استفاده شده است. قبل از شروع تفسیر نگارهای پتروفیزیکی جهت تعیین جنس سنگ دیواره چاه، برای دید کلی از جنس سنگ سازند از کراس - پلات نمودارهای چگالی و نوترون استفاده گردید. همان طور که در شکل (۴-۴)، ملاحظه می شود. در سازند



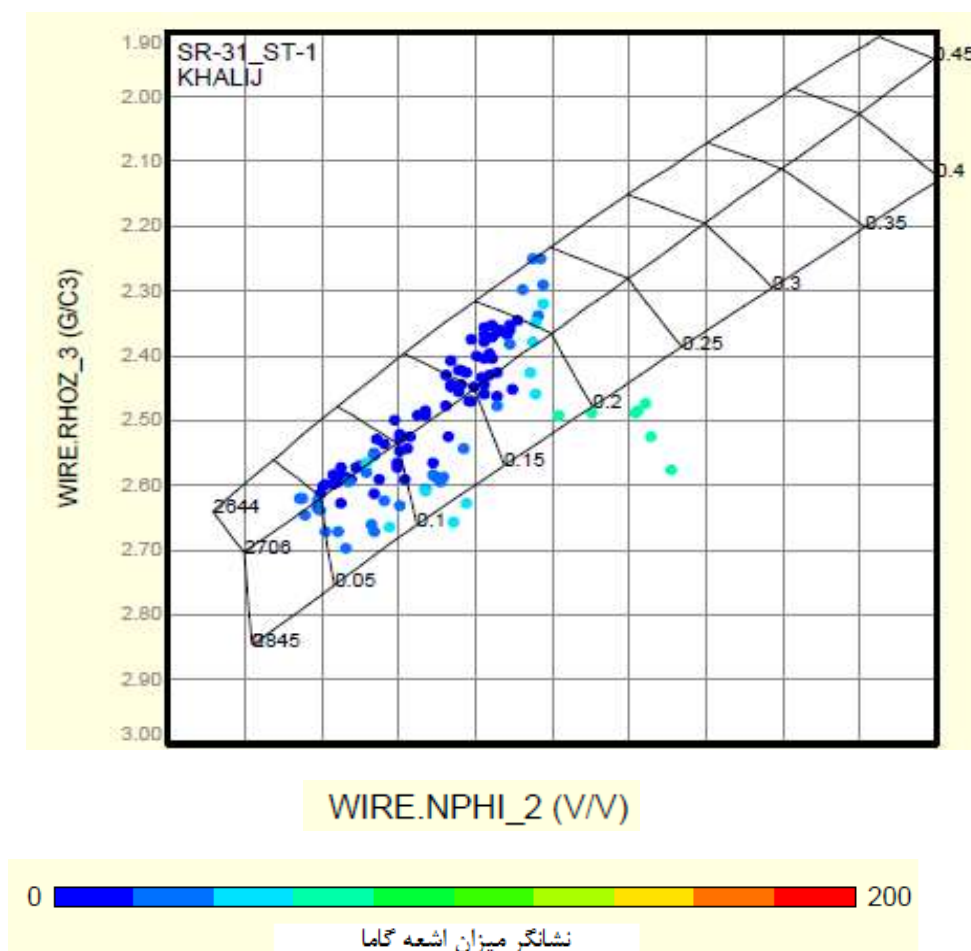
گدوان بالایی و گدوان پایینی ضمن افزایش



شکل (۴-۴) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند گدوان

مقادیر نوترون مقادیر مربوط به نمودار چگالی ثابت است. در این صورت می توان به این نتیجه رسید که جنس سنگ کربناته - شیلی است که در آن جنس سنگ شیل چشم گیر است. با توجه به شکل می توان از بعد سوم یعنی رنگ نیز، میزان اشعه گاما و وجود شیل را تشخیص داد.

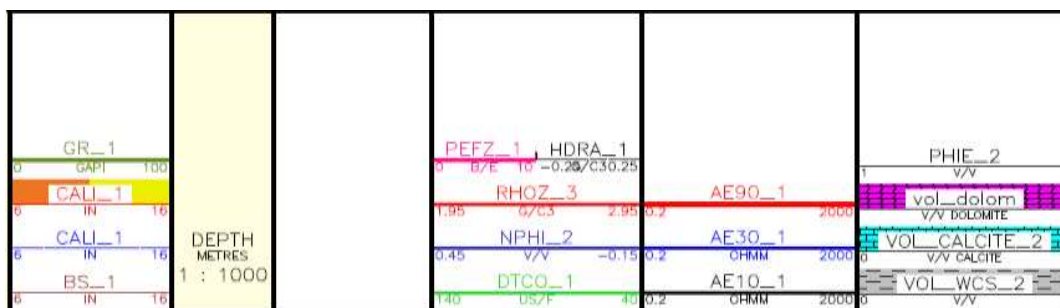
از طرفی با توجه به وجود یک لایه راهنما، عضو خلیج که به عنوان یک شاخص در حفاری‌ها در آن منطقه کاربرد دارد. برای دید کلی از جنس سنگ عضو خلیج از کراس- پلات نمودارهای چگالی و نوترون استفاده گردید. همان‌طور که در شکل (۴-۵)، ملاحظه می‌شود، در عضو خلیج با توجه به افزایش مقادیر نمودار چگالی، مقادیر نمودار نوترون نیز به یک نسبت افزایش می‌یابد؛ که این حالت نشانگر وجود یک سازند با جنس سنگ غالب آهکی در این بازه عمقی است. با توجه به شکل می‌توان از بعد سوم یعنی رنگ نیز، میزان اشعه گاما و عدم وجود شیل را تشخیص داد.

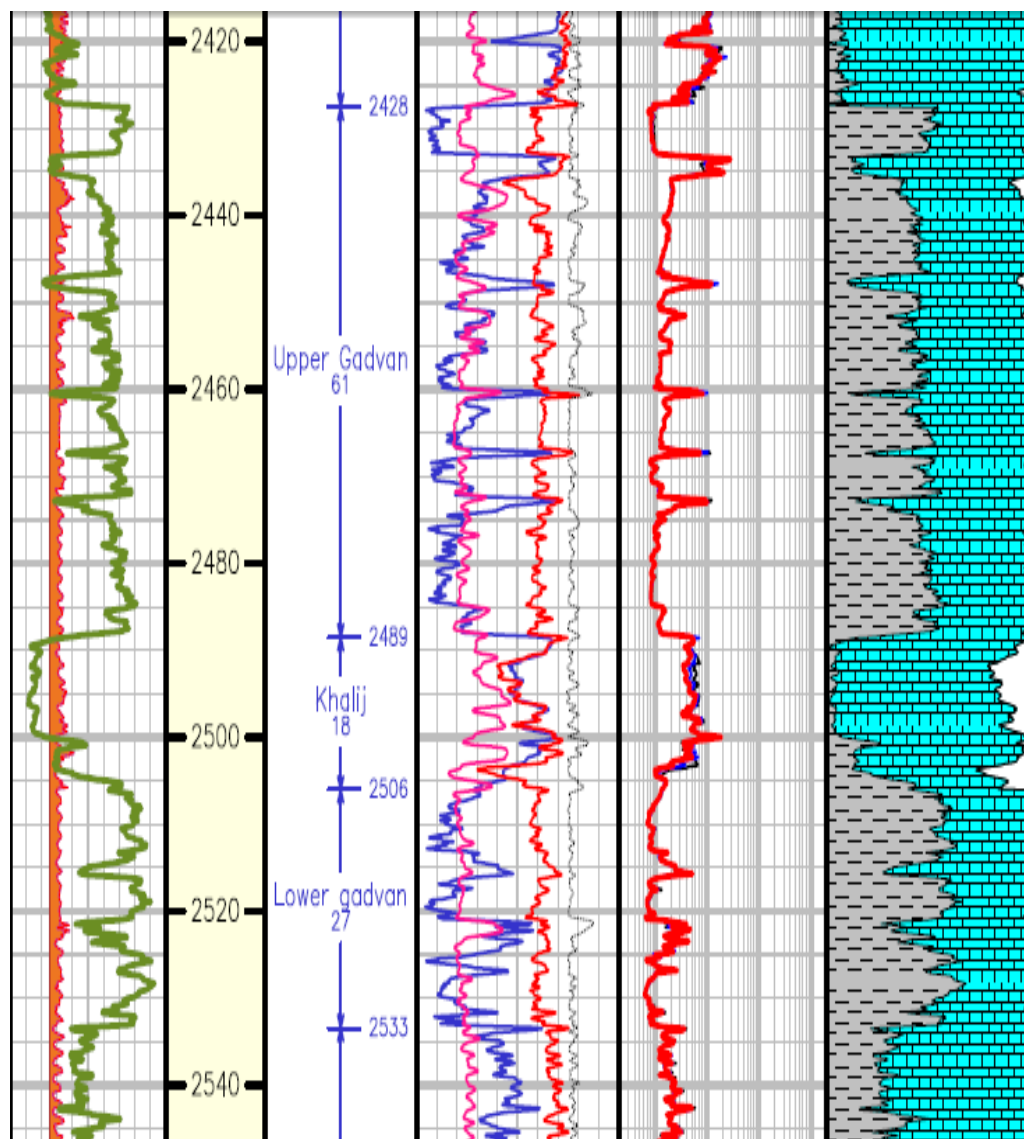


شکل (۴-۵) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند گدوان (عضو آهکی خلیج)

برای اطلاع دقیق و کامل از جنس سنگ هر عمق دلخواه به تفسیر نگارهای چاه پیمایی پرداخته شد. در شکل (۴-۶) همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سازند گدوان بالایی از بازه عمقی ۲۴۲۸ متر تا

۲۴۸۹ متر جنس سنگ غالب شیلی داریم. همچنین در سازند گدوان پایینی در بازه عمقی ۲۵۰۶ متر تا ۲۵۳۳ متر، شرایطی مثل گدوان بالایی دیده می‌شود که شیل چشم‌گیری در این سازند است. این در حالی است که عضو خلیج که جنس سنگ آهکی تمیز دارد در میان گدوان بالایی و گدوان پایینی در بازه عمقی ۲۴۸۹ متر تا ۲۵۰۶ متر، قابل رؤیت است.



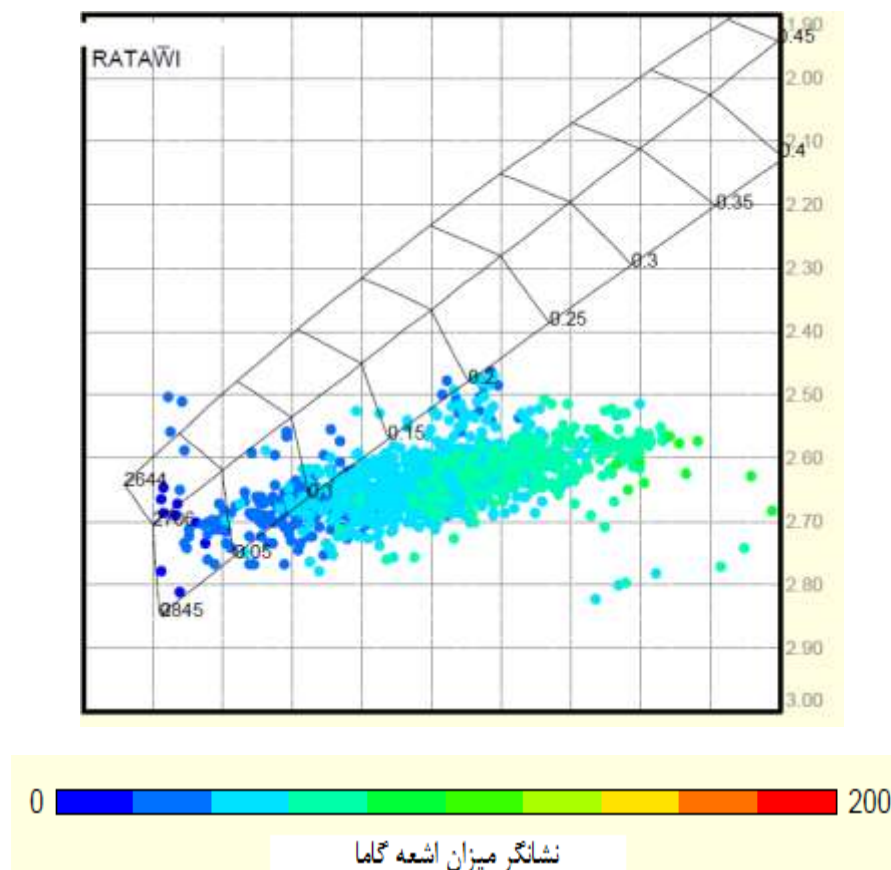


شکل (۴-۶) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند گدوان

۳-۳-۴ نتایج تفسیر سازند رتاوی

برای تفسیر جنس سنگ سازند رتاوی از نگارهای صوتی، گاماری، کالیپر، چگالی، فتوالکتریک فاکتور، نوترون و نگارهای الکتریکی استفاده شده است. قبل از شروع تفسیر نگارهای پتروفیزیکی جهت تعیین جنس سنگ دیواره چاه، برای دید کلی از جنس سنگ سازند از کراس - پلات نمودارهای چگالی و نوترون استفاده گردید. همان طور که در شکل (۴-۷)، ملاحظه می شود در سازند رتاوی دو روند را مشاهده می شود. در یک روند ضمن افزایش مقادیر نوترون مقادیر مربوط به نمودار چگالی

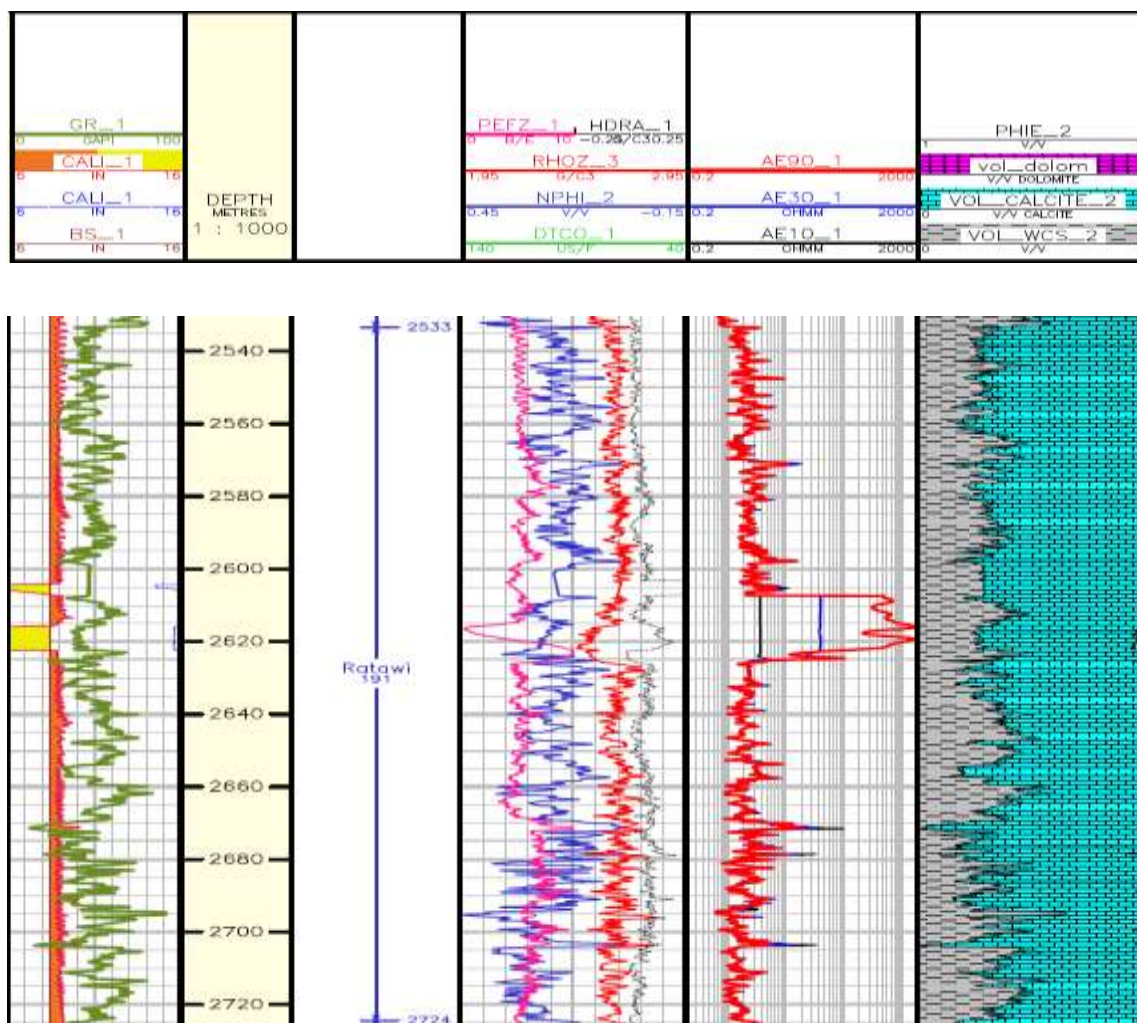
ثابت است؛ ولی در روند دیگر ضمن افزایش مقادیر نمودار نوترون چگالی نیز افزایش می‌یابد. در این صورت می‌توان به این نتیجه رسید که جنس سنگ کربناته - شیلی داریم. که در آن جنس سنگ غالب آهکی است و از شیل چشم‌گیری نیز برخوردار است. با توجه به شکل می‌توان از بعد سوم یعنی رنگ نیز، میزان اشعه گاما و وجود شیل را تشخیص داد.



شکل (۴-۷) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند رتاوی

برای اطلاع دقیق و کامل از جنس سنگ هر عمق دلخواه به تفسیر نگارهای چاه پیمایی پرداخته شد. در شکل (۴-۸) همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سازند رتاوی از بازه عمقی ۲۵۳۳ متر تا ۲۷۲۴ متر جنس سنگ غالب آهکی است که از شیل زیادی نیز برخوردار است. با توجه بیش‌تر به تفسیر این قسمت از چاه، تقریباً در بازه ۲۶۰۸ متر تا ۲۶۲۸ متر با توجه به عدم هم‌پوشانی سه نگار الکتریکی با

بُرد، دور^۱ و متوسط^۲ و کوتاه^۳، این قسمت به عنوان یک بازه عمقی مستعد و یک کاندید برای وجود هیدروکربن می‌تواند انتخاب شود.



شکل (۴-۸) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند رتاوی

۴-۳-۴ نتایج تفسیر سازند یاماما (فهلین)

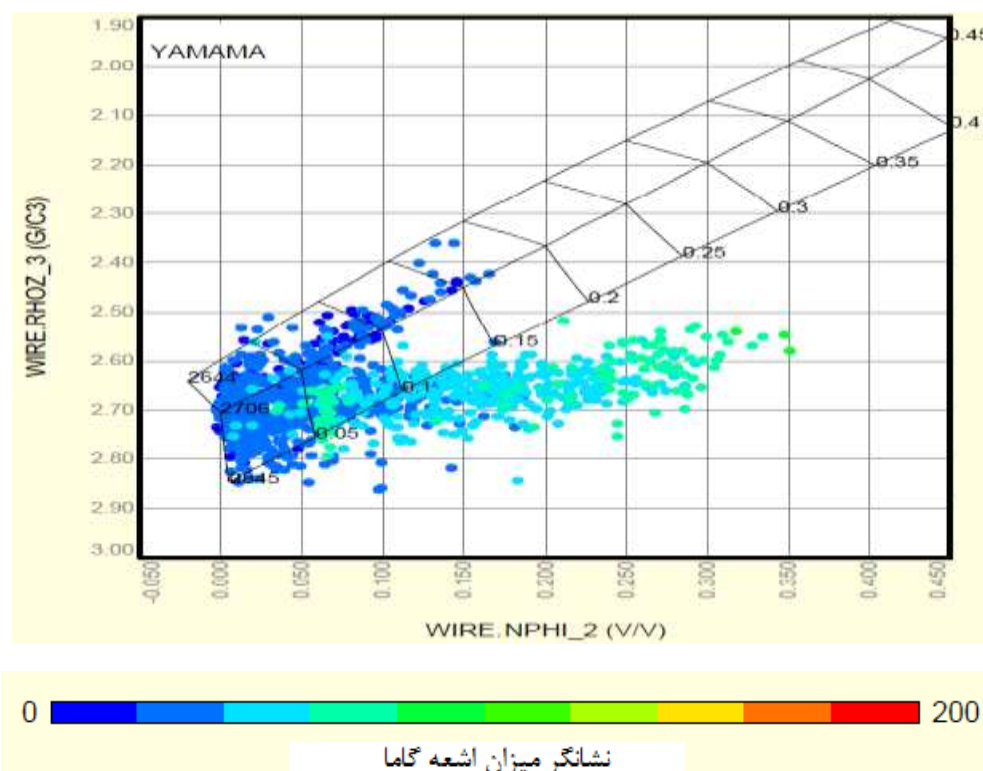
برای تفسیر جنس سنگ سازند یاماما از نگارهای صوتی، گاماری، کالیپر، چگالی، فتوالکتریک فاکتور، نوترون و نگارهای الکتریکی استفاده شده است. قبل از شروع تفسیر نگارهای پتروفیزیکی جهت تعیین جنس سنگ دیواره چاه، برای دید کلی از جنس سنگ سازند از کراس - پلات نمودارهای

^۱ AE90-1

^۲ AE30-1

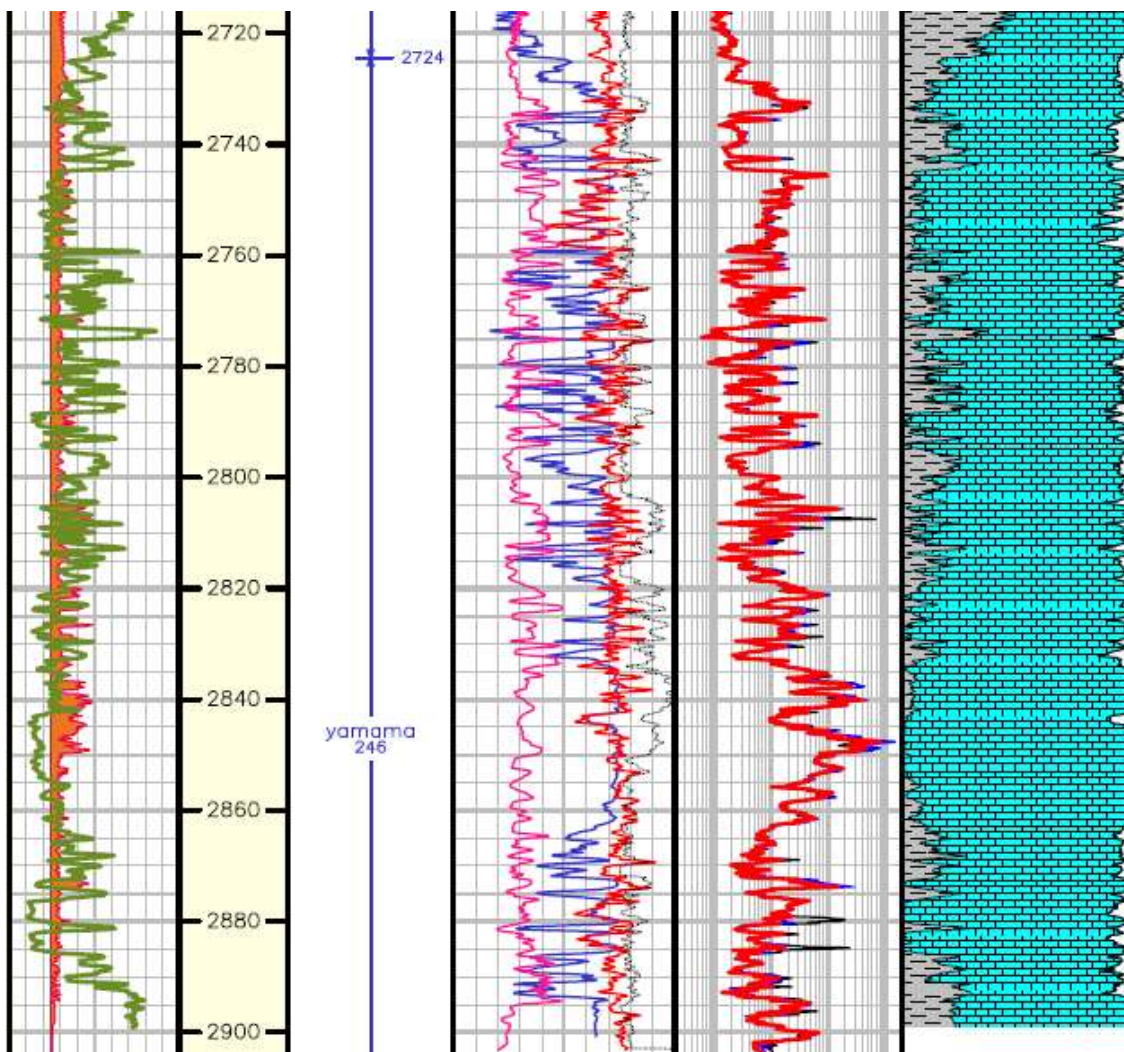
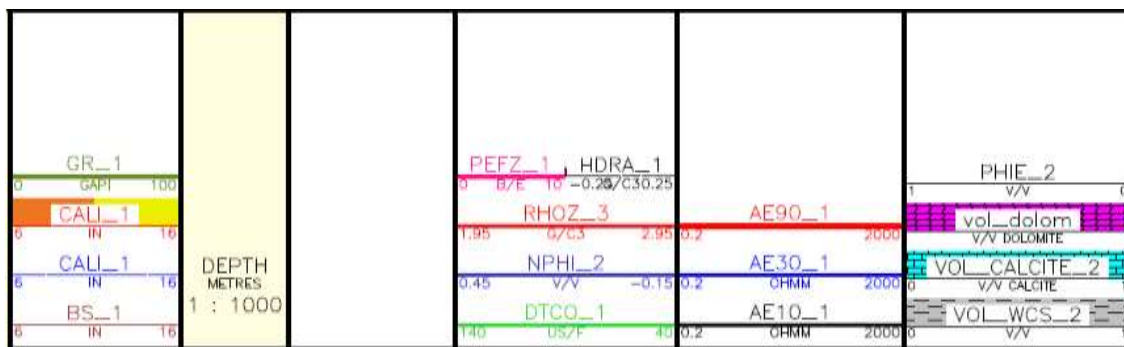
^۳ AE10-1

چگالی و نوترون استفاده گردید. همان‌طور که در شکل (۴-۹)، ملاحظه می‌شود، در سازند یاماما دو روند را مشاهده می‌کنیم، در یک روند ضمن افزایش مقادیر نوترون مقادیر مربوط به نمودار چگالی ثابت است؛ ولی در روند دیگر ضمن افزایش مقادیر نمودار نوترون مقادیر چگالی نیز افزایش می‌یابد. در این صورت می‌توان به این نتیجه رسید که جنس سنگ کربناته - شیلی داریم. که در آن جنس سنگ غالب آهکی است و شیل نیز در این بازه دیده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان از بعد سوم یعنی رنگ نیز، میزان اشعه گاما و وجود شیل یا عدم وجود شیل را تشخیص داد.



شکل (۴-۹) کراس - پلات نمودار نوترون و چگالی در سازند یاماما (فهلپان)

برای اطلاع دقیق و کامل از جنس سنگ هر عمق دلخواه به تفسیر نگارهای چاه پیمایی پرداخته شد. در شکل (۴-۱۰) همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سازند یاماما از باز عمقی ۲۷۲۴ متر تا ۲۹۰۰ متر جنس سنگ غالب آهکی است که شیل کمی هم در این بازه دیده می‌شود.



شکل (۴-۱۰) نتایج تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در سازند یاماما (فهلپان)

۴-۴ مقایسه جنس سنگ حاصل از تفسیر نگارهای چاه پیمایی با گزارشات مغزه

۴-۴-۱ گزارشات مغزه

از چاه مورد مطالعه ۳۰ مغزه گرفته شده است. فرآیند مغزه‌گیری با احتیاط انجام شده و مغزه‌ها کاملاً سالم و بدون شکستگی‌های القایی هستند؛ که از این تعداد سه سازند مورد مطالعه در این پژوهش تحت پوشش مغزه‌ها قرار گرفته است. برای اطلاعات بیشتر از مغزه‌ها به جدول (۴-۲)، رجوع کنید [IOOC Report, 2014].

جدول (۴-۲) مغزه‌های گرفته‌شده در چاه مورد مطالعه [IOOC Report, 2014]

جنس سنگ غالب	عمق	قطر مغزه	سازند
مقدار کمی ماسه سنگ با کربنات	۶۷۲/۳۰	۶۲۵	۴ اینچ عضو غار
شیل و مقدار کمی ماسه سنگ	۲۲۴۵/۳۰	۲۰۹۸	۴ اینچ بورغان
کربنات، مارل، شیل و کمی ماسه سنگ	۲۴۳۰/۳۰	۲۲۴۵/۳۰	۴ اینچ داربان (شعبا)
کربنات، مارن	۲۴۹۸/۲۰	۲۷۸۰/۵۰	۴ اینچ عضو خلیج
کربنات، مارن	۲۸۶۰/۲۶	۲۷۳۷	۴ اینچ یاماما
مارل و کربنات آرزلیتی	۳۰۷۹/۷۰	۲۹۷۵/۰۵	۲ اینچ سولای

مغزه‌های گرفته‌شده در مقیاس، ماکروسکوپی و میکروسکوپی مورد مطالعه قرار گرفتند و پارامترهایی همچون جنس سنگ، بافت سنگ، ساختار رسوبی، نوع تخلخل، ویژگی‌های دیاژنزی ارزیابی شدند. همچنین مطالعات رسوب‌شناسی و پالئونتولوژی، مطالعات بیواستراتیگرافی در بازه عمق‌های مطالعاتی را تأیید می‌کند. همچنین آنالیز شکستگی‌های انجام شده منجر به شناسایی زون‌های اصلی شکستگی‌ها و همچنین ویژگی‌های آن‌ها شد.

۴-۴-۲ گزارشات مغزه‌های سازند داریان، جهت تطابق جنس سنگ

مغزه‌های گرفته‌شده از مرز بالایی سازند داریان در میدان مورد مطالعه در غرب حوضه خلیج

فارس، ۹۷ درصد سالم هستند. در چاه مورد مطالعه ضخامت سازند داریان ۱۸۰ متر است [IOOC Report, 2014].

بر اساس مطالعات سازندی، سازند داریان با توجه به تنوع جنس سنگ و رخساره‌های مهم، به-

طورکلی شامل سه واحد جنس سنگ از مرز پایینی تا مرز بالایی سازند می‌شود؛ که این سه واحد

جنس سنگ به شرح زیر در جدول (۴-۳)، نشان داده شده است:

جدول (۴-۳) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند داریان [IOOC Report, 2014].

سازند	بخش‌های سازند	عمق حدودی	لیتولوژی
داریان	داریان بالایی/مارل میانی	۲۳۲۰.۵ - ۲۲۶۵.۳۰	شیل غالب - آهک و مارن کرم-خاکستری
داریان	داریان بالایی/مارل میانی	۲۳۲۰.۵۰ - ۲۳۴۷.۴۰	مارن لایه‌ای و تیره رنگ
داریان	داریان پایینی/گدوان مارلی	۲۳۴۷.۵۰ - ۲۴۳۰.۳۰	آهک آرژیلیتی - اوربیتولینا خاکستری مایل به کرم رنگ

۳-۴-۴ گزارشات مغزه‌های سازند گدوان، جهت تطابق جنس سنگ

در چاه مورد مطالعه با توجه به جدول (۴-۴)، مغزه‌های گرفته‌شده، در بازه عمقی ۲۴۹۸/۵-۲۴۸۰ است. که قسمت بالایی و پایینی مغزه به‌ترتیب جنس سنگ مارلی (به طول ۶ متر) و جنس سنگ آهکی (به طول ۱۲/۵ متر) دارد.

براساس نمودار گرفته‌شده در عمق کمتر (قسمت بالای مغزه) قرائت گاما بیشتر و چیزی در حدود ۸۰ است، از طرفی در عمق بیشتر (قسمت پایینی مغزه)، قرائت گاما کمتر و چیزی در حدود ۱۵ است. قسمت پایینی مغزه که جنس سنگ آهکی دارد و فسیل غالب آن اوربیتولین است، برخلاف قسمت بالایی که مارلی می‌باشد آثار نفتی در آن مشهود است و این قسمت یک مخزن نفتی است [IOOC Report, 2014].

جدول (۴-۴) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند گدوان به انضمام عضو خلیج [IOOC Report, 2014].

رنگ	جنس سنگ	بازه عمقی مغزه	سازند
مارل خاکستری رنگ و آهک کرمی‌رنگ	مارل و آهک	۲۴۹۸/۵ ۲۴۸۰	گدوان (به انضمام عضو خلیج)

۴-۴-۴ گزارشات مغزه‌های سازند یاماما (فهلپیان)، جهت تطابق جنس سنگ

حین حفاری از این سازند در سه بازه به طول ۵۳ متر مغزه گرفته شده است که جنس سنگ آن -ها را در بازه‌های مشخص در جدول (۴-۵)، می‌توان مشاهده کرد.

جدول (۴-۵) مغزه‌های گرفته‌شده در سازند یاماما (فهلپان) [IOOC Report, 2014].

شماره مغزه	سازند	عمق (متر)		جنس سنگ
اولین مغزه	فهلپان	۲۷۳۷	۲۷۳۶/۲۶	مارل
دومین مغزه	فهلپان	۲۷۳۹	۲۷۶۳/۶۸	کربنات مارلی
سومین مغزه	فهلپان	۲۸۳۳	۲۸۶۰/۲۶	آهک

۴-۵ تحلیل ژئومکانیکی چاه و تعیین وزن گل بهینه چاه

برای آنالیز پایداری چاه نیاز به ساخت مدل ژئومکانیکی زمین^۱ می‌باشد. مدل ژئومکانیکی شامل به‌دست آوردن خواص الاستیک، مکانیکی و تنش‌های برجای منطقه می‌باشد. در شکل (۴-۱۱) مراحل انجام تحلیل پایداری چاه نشان داده شده است. مطابق شکل (۴-۱۱) در ابتدا مرجع عمق و مختصات چاه مشخص می‌شود. در مرحله بعدی با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی تنش روباره و فشار مخزنی تخمین زده می‌شود. با استفاده از روابط تجربی و نگارهای موجود به تخمین خواص الاستیک و مکانیکی سنگ پرداخته می‌شود. با به‌دست آوردن تنش‌های برجای کار ساخت مدل ژئومکانیکی تمام شده و مدل آماده تحلیل پایداری می‌باشد. در این پروژه، هدف تحلیل پایداری در مرحله حفاری می‌باشد. با ساخت مدل ژئومکانیکی می‌توان پایداری دیواره چاه را در حین تولید نیز بررسی نمود که چاه در چه فشاری دچار تولید ماسه می‌شود. برای تحلیل از نرم‌افزار Techlog2015.3 استفاده شده است. در ادامه مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی بررسی می‌شود و نمودارهای مربوط به هر قسمت با توضیحات لازم آورده شده است.

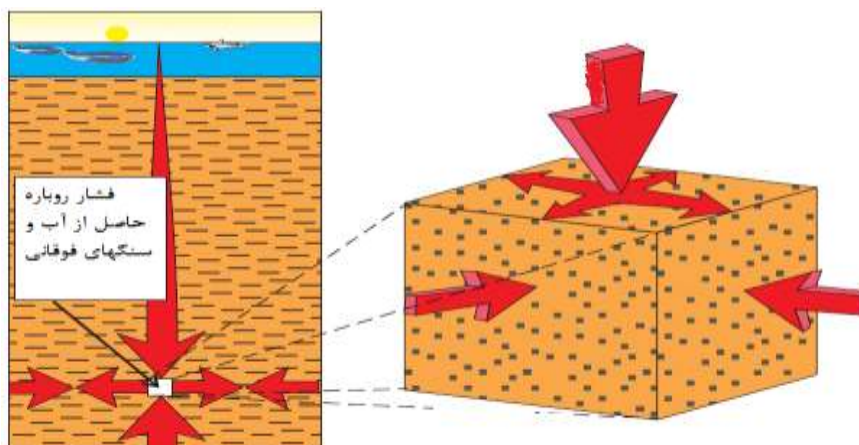
¹ Mechanical Earth Model



شکل (۴-۱۱) مراحل انجام تحلیل ناپایداری چاه

۴-۵-۱ محاسبه تنش‌های روباره

در مخازنی که معمولاً در اعماق زیادی قرار دارند، تنش اصلی حداکثر، معمولاً تنش روباره می‌باشد. برای محاسبه تنش روباره می‌توان از داده‌های چاه نگار چگالی استفاده کرد، در صورت فقدان این اطلاعات، مقدار چگالی را در طول عمق می‌توان توسط خرده‌های حفاری و یا ستون سنگ‌شناسی تخمین زد، همچنین می‌توان از روابط تجربی ارائه شده در این زمینه استفاده کرد. شکل (۴-۱۲)، نمایی از روباره‌ی یک مخزن هیدروکربنی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۲) نمایی از تنش‌های روباره [Amoco, 2005].

مرحله اول برای تحلیل پایداری یک چاه، محاسبه تنش‌های حاصل از وزن روباره است. در اینجا به روش‌های برون‌یابی^۱، آموکو^۲، گاردنر^۳ و میانگین‌گیری^۴ تنش‌های حاصل از وزن روباره را محاسبه کردیم که در ادامه به‌طور اختصار به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

۴-۵-۱-۱ روش برون‌یابی

با توجه به شکل (۴-۱۳)، در این روش، طبق رابطه (۴-۱) تنش روباره از برون‌یابی کردن به کمک روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$\rho_{\text{extrapolation}} = \rho_{\text{mudline}} + A_0 \times (\text{TVD} - \text{AirGap} - \text{WaterDepth})^\alpha \quad (۴-۱)$$

در رابطه (۴-۱)، AirGap، فضای خالی بین سکو دکل حفاری تا سطح آب، Water Depth، عمق آب TVD عمق واقعی قائم چاه، ρ_{mudline} چگالی در سطح زمین یا سطح آب، A_0 و α ، مقادیر ثابت می‌باشند.

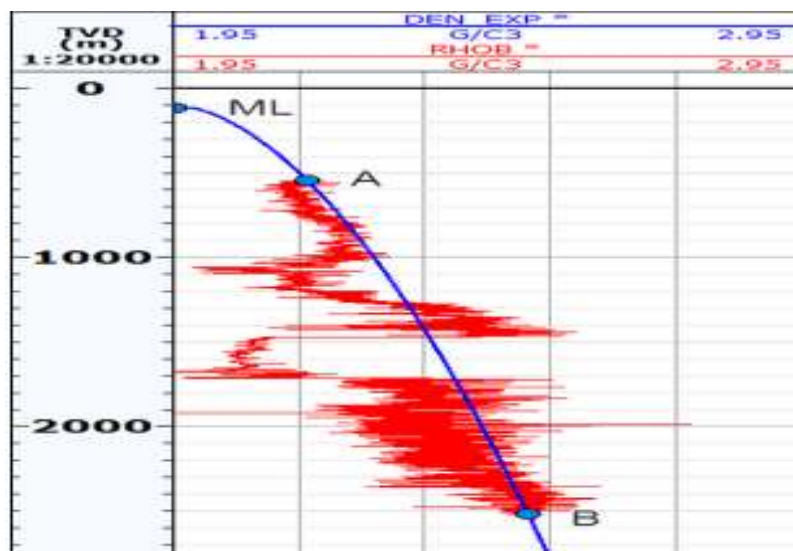
با توجه به شکل (۴-۱۳)، به همین ترتیب می‌توان مقادیر چگالی را به کمک Mudline و دو نقطه جداگانه مثل A و B که به نقاط Shallow Depth و Deep Depth معروف‌اند، محاسبه کرد. لازم به ذکر است که محل این دو نقطه بر اساس داده‌های موجود قابل تغییر است.

¹ Extrapolated Method

² Amoco Method

³ Gardner Method

⁴ Average Method



شکل (۴-۱۳) محاسبه تنش روباره به کمک روش برون‌یابی [Techlog, (2015.3)].

۴-۱-۵-۲ روش آموکو

این روش بر اساس روابط تجربی که بر اساس داده‌های استاتیکی خلیج مکزیک ساخته شده است، چگالی زیر سطح آب دریا را تخمین می‌زند.

$$\rho_{Amoco} = \rho_{mudline} + A_0 \times (TVD - AirGap - WaterDepth) \quad (۴-۲)$$

α (3125) چگالی محاسبه شده که بر حسب ppg به دست می‌آید.

ρ_{Amoco} چگالی بر حسب ppg که در اینجا برابر $(\frac{gr}{cm^3} 1.95317)$

$\rho_{mudline}$

مقدار ثابت (معمولاً ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود).

α

۴-۱-۵-۳ روش گاردنر

در این روش چگالی و وزن روباره از روی داده‌های صوتی تخمین زده می‌شوند؛ که داده‌های ورودی شامل: داده‌های تراکمی و نمودار چگالی است؛ که روابط مربوط به این روش در زیر آمده است.

$$\rho_{Gardner} = \alpha \times V^\beta \quad (۴-۳)$$

ρ_{Gardner}

واحد $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

V

داده صوتی، بر حسب ft/s

$\beta = 0.25$ و $\alpha = 0.23$

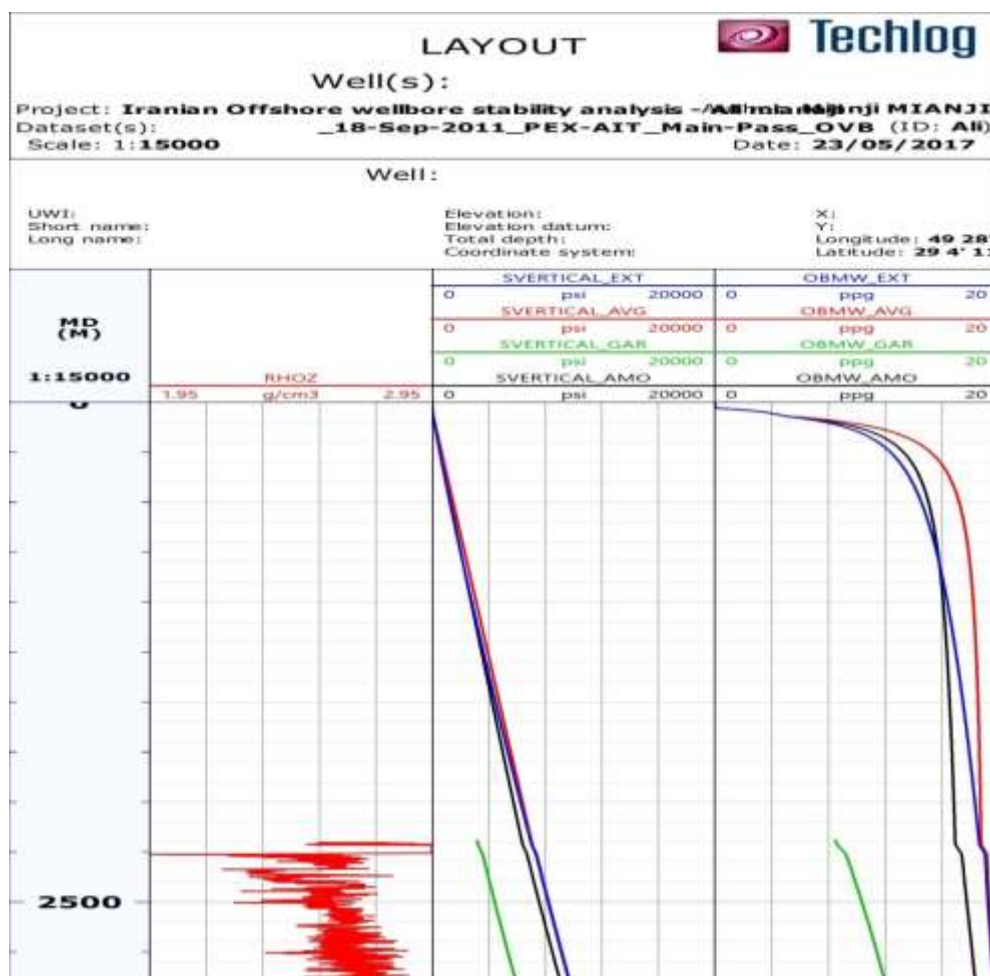
ضرایب ثابت

۴-۱-۵-۴ روش میانگین گیری

بر اساس این روش که ورودی‌های آن داده‌های نمودار چگالی است، میانگینی از این مقدار را بر اساس عمق در طول چاه پلات می‌کند که نشانگر وزن روباره می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد به کمک این چهار روش مختلف وزن روباره حساب شد که در شکل (۴-۴)

(۱۴)، نتایج را مشاهده می‌کنید.



شکل (۴-۱۴) نتایج محاسبات وزن روباره

۴-۵-۲ محاسبه فشار منفذی

فشار منفذی یکی از مهم‌ترین پارامترها برای طراحی یک مدل ژئومکانیکی و طراحی حفاری و یکی از پارامترهای تأثیرگذار برای محاسبه تنش‌های برجا و تحلیل پایداری چاه می‌باشد. فشار منفذی با فشار هیدروستاتیک متفاوت می‌باشد و در مناطق فرافشار حدود ۴۸ تا ۹۵ درصد تنش روباره می‌باشد. اگر فشار منفذی بیشتر یا کمتر از فشار هیدروستاتیک (فشار منفذی نرمال) باشد به ترتیب به آن فرافشار و فروفشار می‌گویند [Zhang, 2011].

فشار منفذی را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم یا با استفاده از لاگ‌های ژئوفیزیکی و داده‌های لرزه-ای به‌دست آورد که هریک به اختصار در ذیل توضیح داده شده‌اند [Reynolds et al., 2006]

فشار منفذی را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم و با استفاده از آزمون‌های ذیل به‌دست آورد:

- آزمون مته حفاری

- FIT^1

- MDT^2

در صورتی که هیچ یک از آزمون‌های فوق در چاه اجرا نشده باشد، فشار منفذی را می‌توان با اندازه-

گیری غیرمستقیم و با استفاده از لاگ‌های ژئوفیزیکی و داده‌های لرزه‌ای تخمین زد:

- نمودار صوتی.

- نمودار مقاومت ویژه الکتریکی^۳.

- با استفاده از وزن گل چاه‌های مجاور.

در صورت استفاده از روش‌های غیر مستقیم، فشار منفذی به‌دست‌آمده باید با اندازه‌گیری‌های

مستقیم فشار منفذی کالیبره شود. ممکن است فشار منفذی با کاربرد گردایان فشار ثابت محاسبه شود

که می‌تواند از اندازه‌گیری‌های فشار تعیین شود [Reynolds et al, 2006].

روش‌های دیگری از جمله روش هاتمن و جانسون، روش ایتون، روش بوورز، روش میلر، روش تاو

برای محاسبه فشار منفذی وجود دارد که به دلیل رعایت اختصار از توضیح درباره آن‌ها خودداری

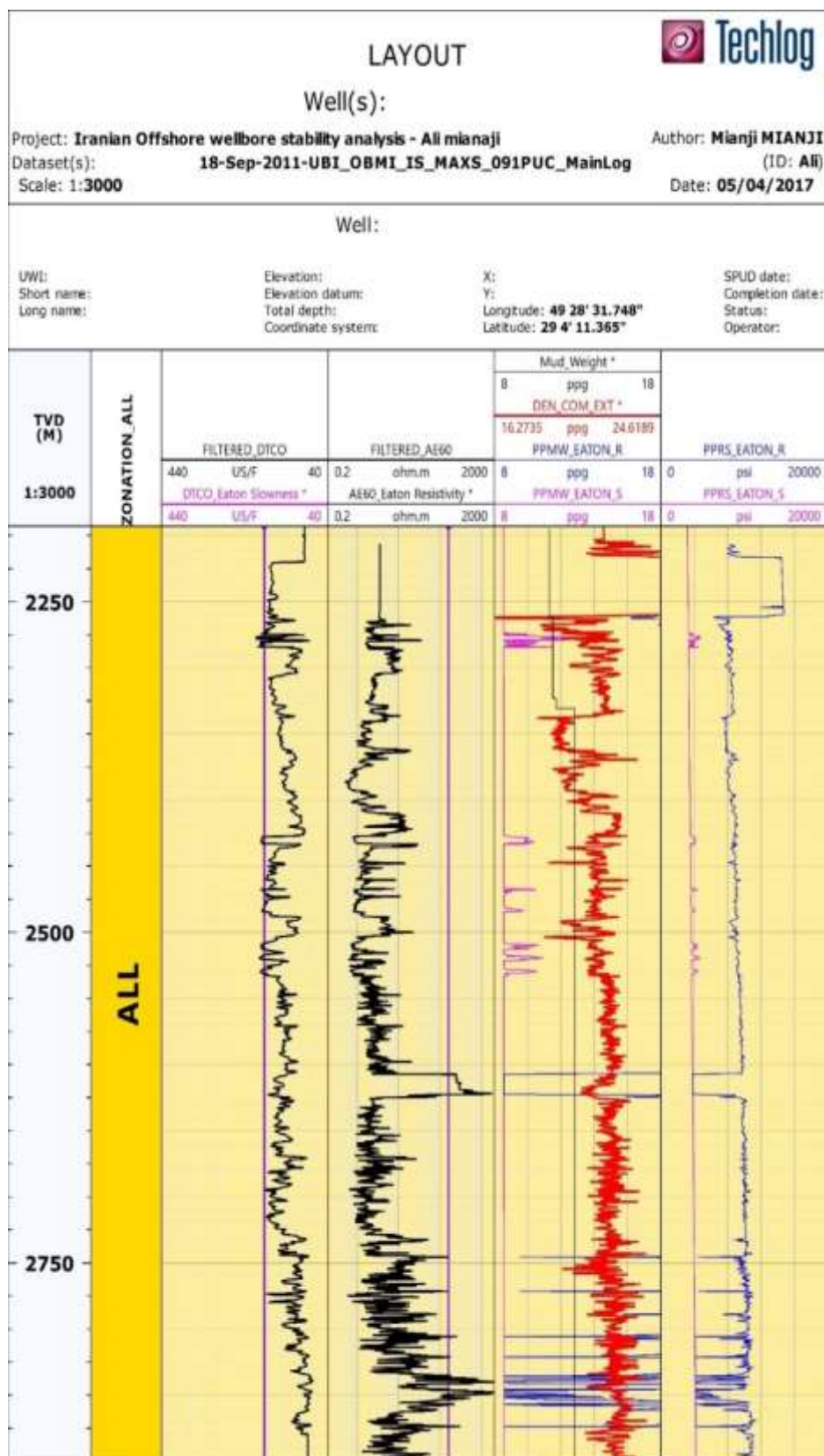
¹ Formation Integrity Test (FIT)

² Modular Formation Dynamics Tester (MDT)

³ Resistivity Log

می‌شود. از این جهت برای مطالعه بیشتر به منابع ژانگ (۲۰۱۱)، لانگ و همکاران (۲۰۱۱) و بوورز (۱۹۹۵) ارجاع داده می‌شود.

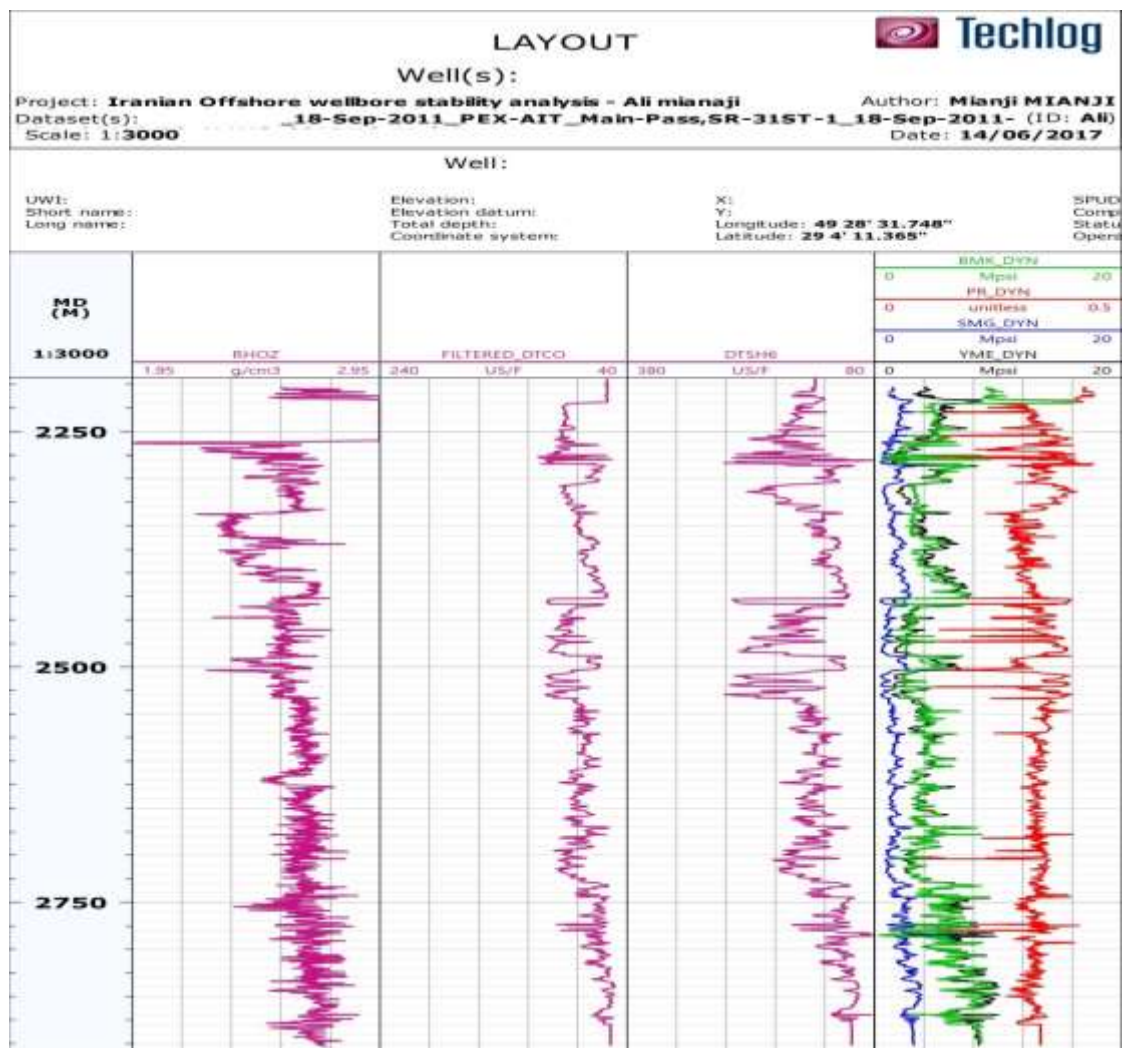
در اینجا با استفاده از روش ایتون به کمک دو نمودار الکتریکی و صوتی با نتایج جدا از هم در طول چاه مقادیر فشار منفذی محاسبه گردید. با توجه به شکل (۴-۱۵)، نتایج حاصل از امواج صوتی برای محاسبه فشار منفذی مناسب‌تر به نظر می‌رسد.



شکل (۱۵-۴) فشار منفذی

۴-۵-۳ محاسبه خواص الاستیکی سنگ

برای محاسبه خواص الاستیکی سنگ در سازندهای مختلف در طول این پژوهش، محیط مطالعاتی در حالت همسانگرد (ایزوتروپیک) در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن خواص الاستیکی دینامیکی از داده‌های صوتی تراکمی و برشی و چگالی استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۴-۱۶) مشاهده می‌شود، خروجی در این قسمت، مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی و نسبت پواسون است؛ که روابط بین داده‌های نمودارهای پتروفیزیکی و خواص الاستیکی سنگ در فصل ۲ آورده شده است.



شکل (۴-۱۶) خواص الاستیکی

۴-۵-۴ محاسبه مقادیر استاتیکی

۱-۴-۵-۴ محاسبه مقادیر استاتیک مدول یانگ

مقادیر استاتیکی مدول یانگ در طول چاه به کمک نرم افزار Techlog را می توان از روش های تصحیح شده همبستگی مورال^۱، همبستگی جان فولر^۲، همبستگی پالمب بردفورد^۳ محاسبه کرد. بر اساس مطالعاتی که بر روی مغزه های ماسه سنگی گرفته شده از میدان نفتی اورست واقع در دریای شمال انجام شد، روابط حاصل شده از روش پالمب بردفورد نشان می دهد که این روابط برای سازندهایی با میانگین تراوایی ۷۰ میلی داری و میانگین تخلخل ۲۲ مناسب است. با توجه به تخلخل و تراوایی پایین در چاه مورد مطالعه این روش پیشنهاد نمی شود (گزارشات شرکت نفت فلات قاره). به ترتیب به سه روش همبستگی مورال، روش تصحیح شده همبستگی مورال و همبستگی جان فولر محاسبه شد. در ادامه به توضیح جداگانه آن ها پرداخته می شود

۱-۴-۵-۴ روش همبستگی مورال

روابط تجربی این روش بر اساس ماسه سنگ های دانه ریز تا دانه درشت در میدان های نفتی آلاسکا، کانادا، ونزوئلا و چندین میدان نفتی دیگر تعمیم داده شده است. کاربرد این روابط برای سه گروه تخلخل که در جدول (۴-۶) آمده است قابل استفاده است. در صورت نیاز می توان تصحیحات منطقه ای را لحاظ کرد.

در شکل (۴-۱۷)، مقادیر ورودی جهت تخمین مدول یانگ استاتیک به رنگ آبی و خروجی به رنگ قرمز قابل مشاهده است.

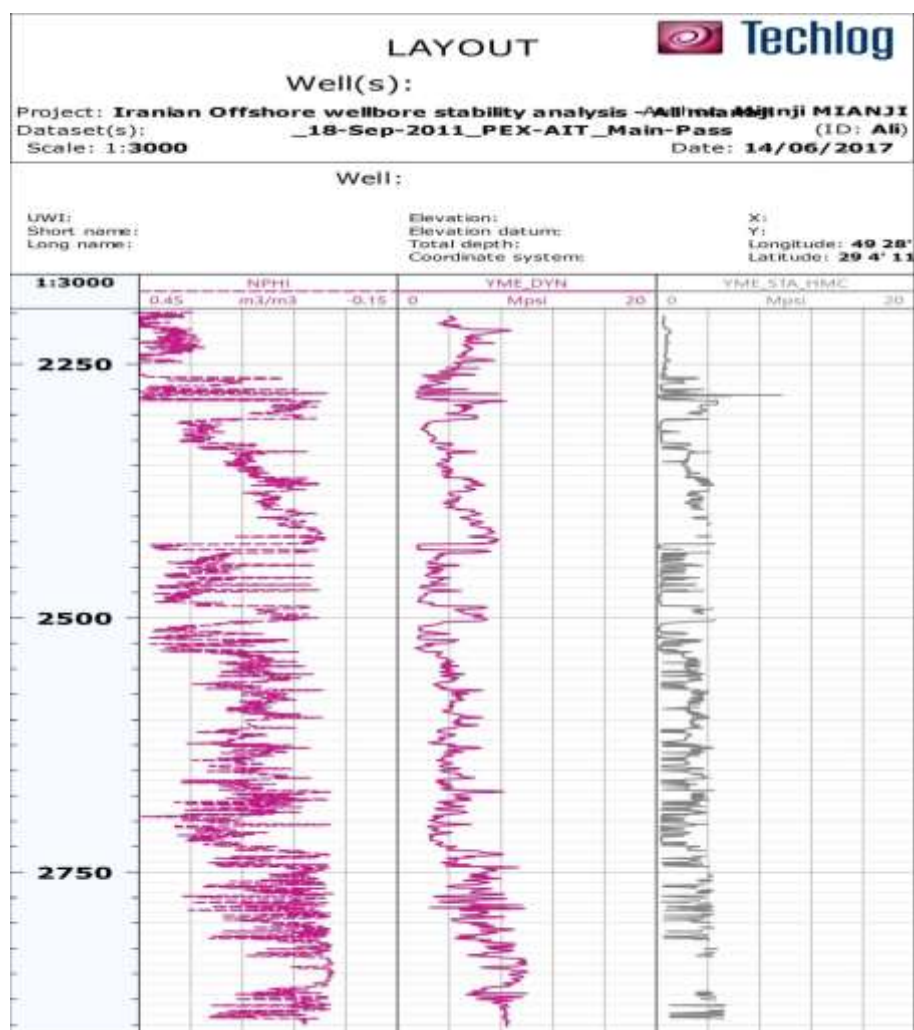
^۱ Modified Morales Correlation (MMC)

^۲ John Fuller Correlation

^۳ Plumb Bradford Correlation

جدول (۴-۶) روابط محاسبه مقادیر استاتیکی مدول یانگ برای سه گروه تخلخل

میزان تخلخل	رابطه مورد استفاده
۰.۱۰-۰.۱۵٪	$\log E_s = 2.137 + 0.6612 \times \log E_d$
۰.۱۵-۰.۲۵٪	$\log E_s = 1.829 + 0.6920 \times \log E_d$
> ۰.۲۵٪	$\log E_s = -0.4575 + 0.9404 \times \log E_d$



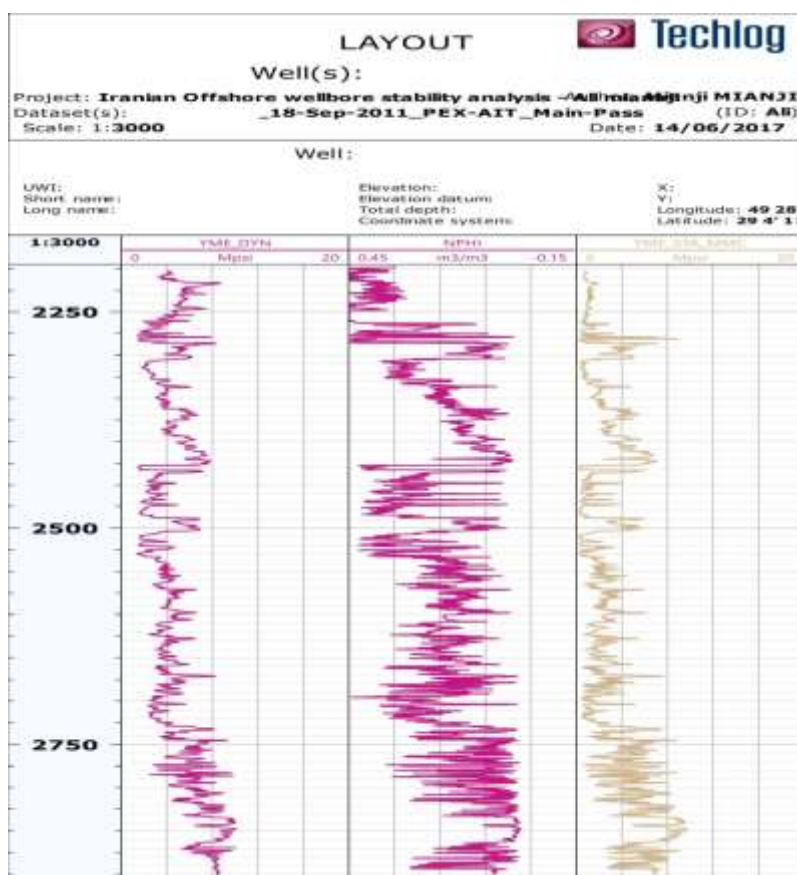
شکل (۴-۱۷) مقادیر مدول یانگ به روش همبستگی مورال

۴-۵-۴-۱-۱ روش تصحیح شده همبستگی مورال

روابط تجربی روش تصحیح شده مثل روش همبستگی مورال می‌باشد که بر اساس مقادیر دینامیک و تخلخل با واحد ft^3/ft^3 مقدار استاتیکی مدول یانگ تخمین زده می‌شود. این روش در سال

۱۹۹۷ توسط تام براتون^۱ تصحیح شد. الگوریتم این مدل برای ماسه‌سنگ‌های دانه درشت بدون رس طراحی، و برای تخمین در میدان‌های حاوی رس و انجام تصحیحات محلی پیشنهاد می‌شود [R.H. Morales, R.P. Marcinew, 1993].

در شکل (۴-۱۸)، مقادیر ورودی جهت تخمین مدول یانگ استاتیک به رنگ آبی و خروجی به رنگ قرمز قابل مشاهده است.



شکل (۴-۱۸) مقادیر مدول یانگ به روش تصحیح شده همبستگی مورال

۴-۵-۱-۲ روش همبستگی جان فولر

مقادیر استاتیکی مدول یانگ تنها از روی مقادیر دینامیکی مدول یانگ تخمین زده می‌شود. این روش با مطالعه در میداین دریای شمال توسط جان فولر پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه

¹ Tom Bratton

محدودیتی به لحاظ وجود رس یا تخلخل در این روش وجود ندارد به نظر می‌رسد نتایج حاصل شده از اعتبار بیشتری نسبت به دو روش قبلی برخوردار باشند.

در شکل (۴-۱۹)، مقادیر ورودی جهت تخمین مدول یانگ استاتیک به رنگ آبی و خروجی به رنگ قرمز قابل مشاهده است.

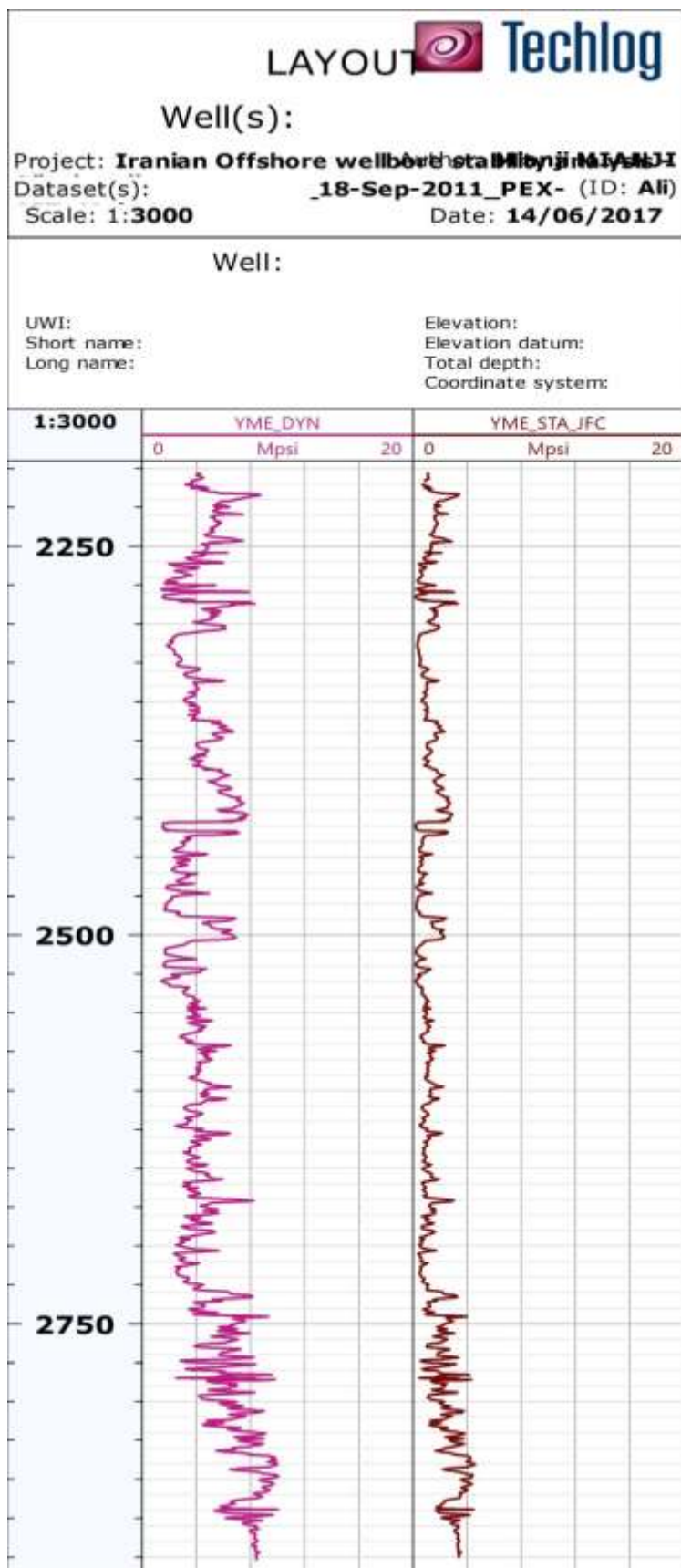
۴-۵-۴-۱-۲ محاسبه مقادیر استاتیک پواسون

همان‌طور که در شکل (۴-۲۰) مشاهده می‌شود، مقادیر پواسون در دو حالت استاتیک و دینامیک برابر است. الگوریتم آن در رابطه (۴-۴) نشان داده شده است. با توجه به این که به صورت پیش فرض مقدار ضریب برابر یک است نتیجه مناسبی با میدان مورد مطالعاتی حاصل نشد. با اعمال تصحیحات محلی ضریب مورد نظر ۰/۷ در نظر گرفته شد، که نتیجه قابل قبول در شکل (۴-۲۱)، نشان داده شده است.

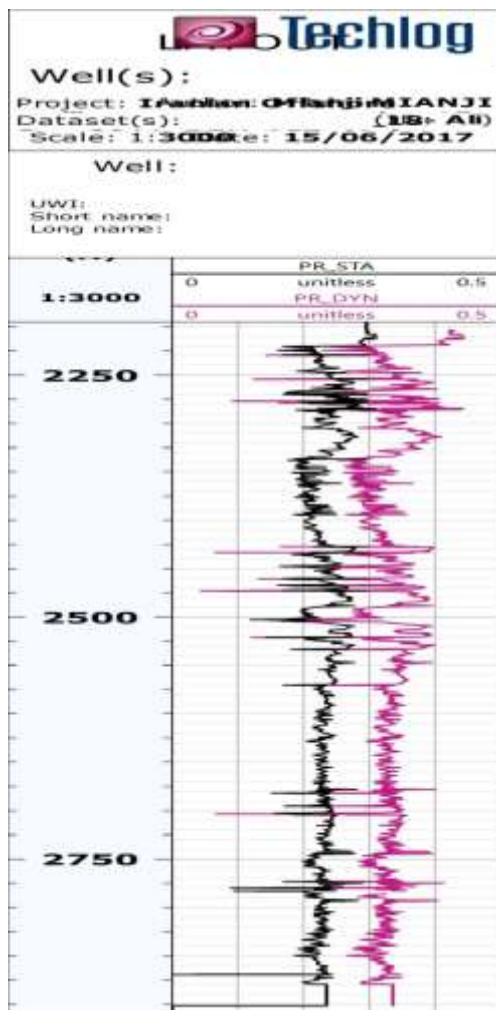
$$PRs = PRd * PR \text{ multiplier} \quad (4-4)$$

ضریب پواسون: PRs
(استاتیک)

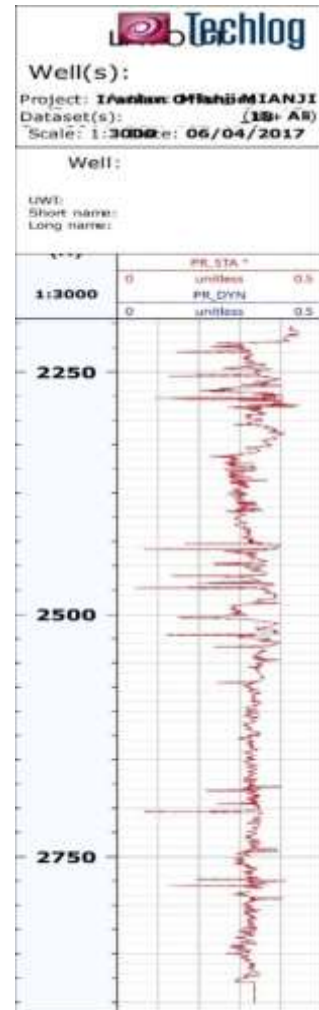
PR Multiplier: عدد ثابت ۱



شکل (۴-۱۹) مقادیر مدول یانگ به روش همبستگی جان فولر



شکل (۴-۲۱) مقادیر تصحیح شده ضریب پواسون



شکل (۴-۲۰) مقادیر تخمین ضریب پواسون

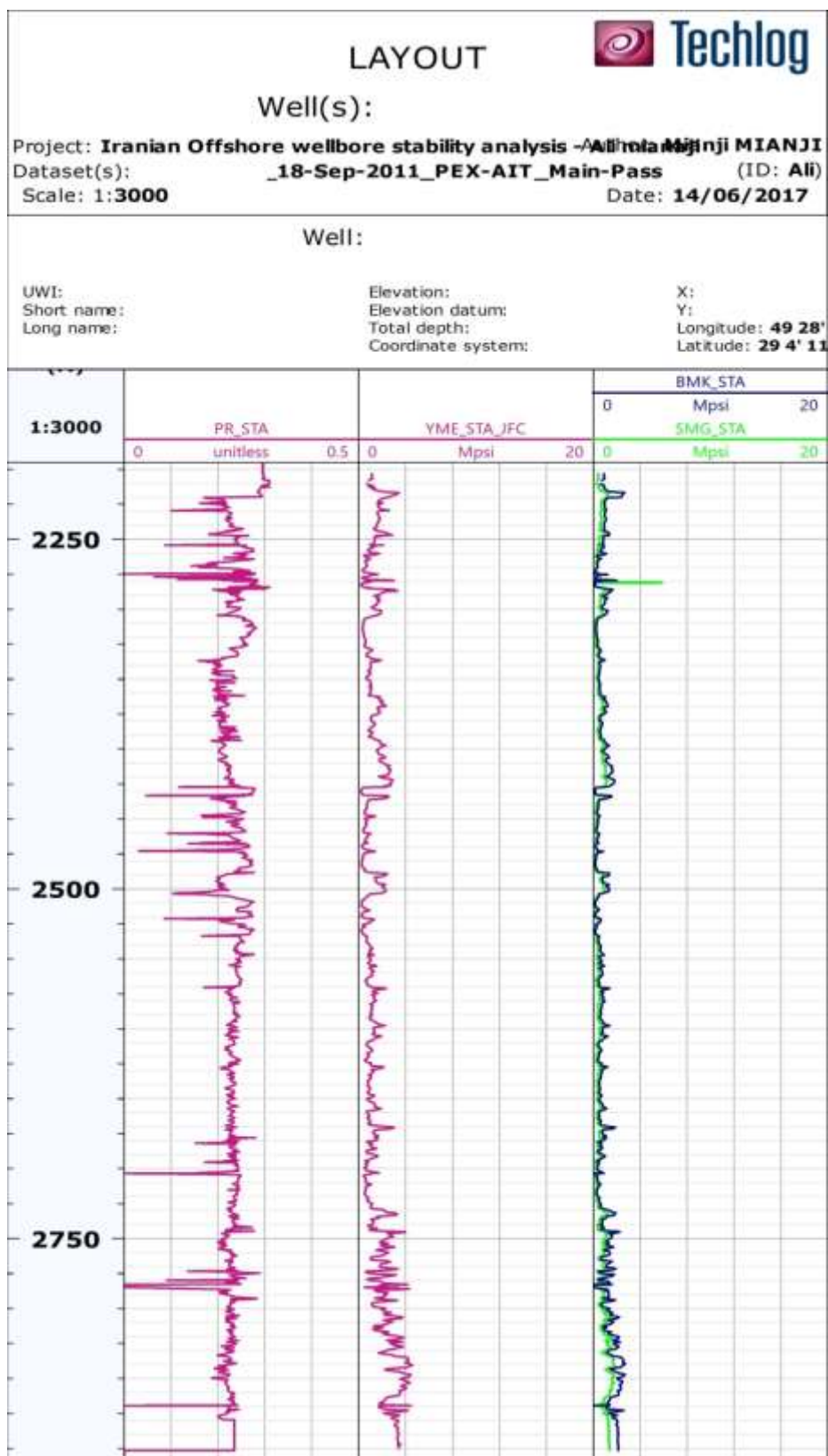
۴-۵-۴-۱-۳ محاسبه مقادیر استاتیک مدول برشی و مدول بالک

به کمک روابط (۴-۵) و (۴-۶)، مقادیر استاتیکی مدول برشی و مدول بالک محاسبه گردید.

نتایج در شکل (۴-۲۲) قابل مشاهده است.

$$G_{sta} = \frac{E_{sta}}{2(1+\nu_{sta})} \quad (۴-۵)$$

$$K_{sta} = \frac{E_{sta}}{3(1-2\nu_{sta})} \quad (۴-۶)$$



شکل (۴-۲۲) مقادیر مدول برشی و مدول بالک

۵-۵-۴ محاسبه خواص مکانیکی سازند

۱-۵-۵-۴ محاسبه ضریب بایوت به روش تخلخل کریف^۱

این روش توسط کریف با فرض این که ساختار مدول بالک یک سنگ را می توان از روی تخلخل مؤثر آن تخمین زد، معرفی شد. طبق رابطه (۷-۴)، می توان ساختار مدول بالک را از روی تخلخل مؤثر و مدول بالک سالیید محاسبه کرد.

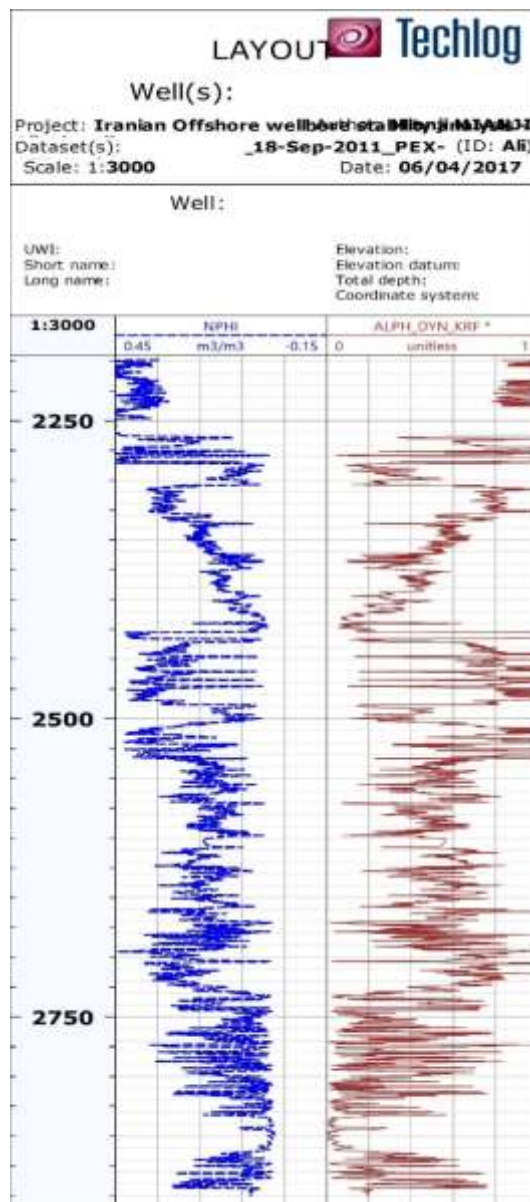
$$K_{skelton} = K_{solid}(1 - \phi)^{\frac{3}{1-\phi}} \quad (۷-۴)$$

مقدار ضریب بایوت نیز از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\alpha = 1 - \frac{K_{skelton}}{K_{solid}} = 1 - (1 - \phi)^{\frac{3}{1-\phi}} \quad (۸-۴)$$

در شکل (۲۳-۴)، مقدار ضریب بایوت نشان داده شده است. با مطالعه مقادیر چاه مجاور با توجه به این که مقدار ضریب بایوت در این میدان ۱ در نظر گرفته شده است. در ادامه به جای مقادیر شکل (۲۳-۴)، ضریب بایوت برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

¹ Krief porosity



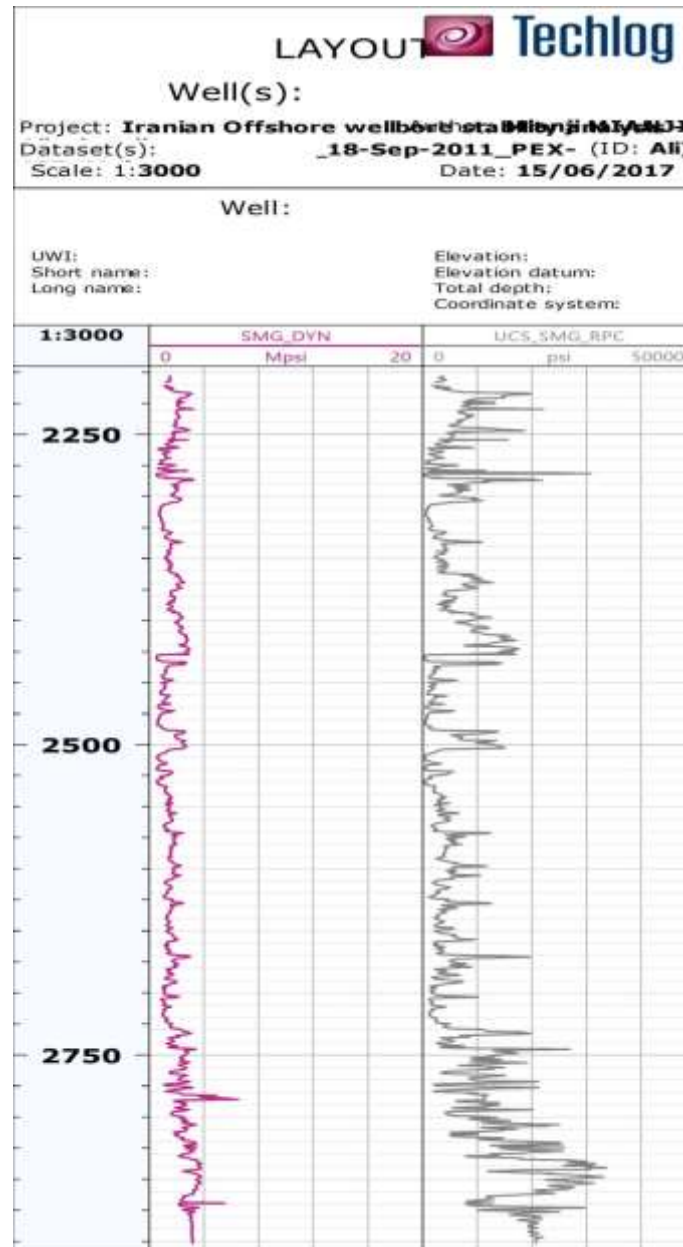
شکل (۴-۲۳) مقادیر ضریب بایوت در طول چاه

۴-۵-۶ محاسبه مقاومت فشاری^۱ به روش مدول برشی دینامیکی پلامب

این روش نخستین بار در سال ۱۹۹۶، توسط گلکار و پلامب معرفی شد و در سال ۲۰۰۲ توسط پلامب تصحیح و بروزرسانی شد. در این روش مقاومت فشاری سنگ از روی مدول برشی دینامیک تعیین می‌شود. این مدل بیشتر برای سنگ‌های دانه درشت و ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون پیشنهاد می‌شود و برای سنگ‌های حاوی رس و کربناته مناسب نیست این در حالی است که از مدل استاتیک آن

^۱ UCS: Unconfined Compressive Strength

می‌توان برای انواع سنگ‌ها استفاده کرد. در شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵)، به ترتیب نتایج حاصل شده بر حسب مدول برشی دینامیک و استاتیکی آورده شده است.



شکل (۴-۲۴) مقادیر مقاومت فشاری به روش مدول برشی دینامیکی پلامب

Well(s):

Project: Iranian Offshore wellbore stimulation study

Dataset(s): **_18-Sep-2011_PEX-** (ID: Ali)

Scale: 1:3000

Date: **15/06/2017**

Well:

LWI:

Short name:

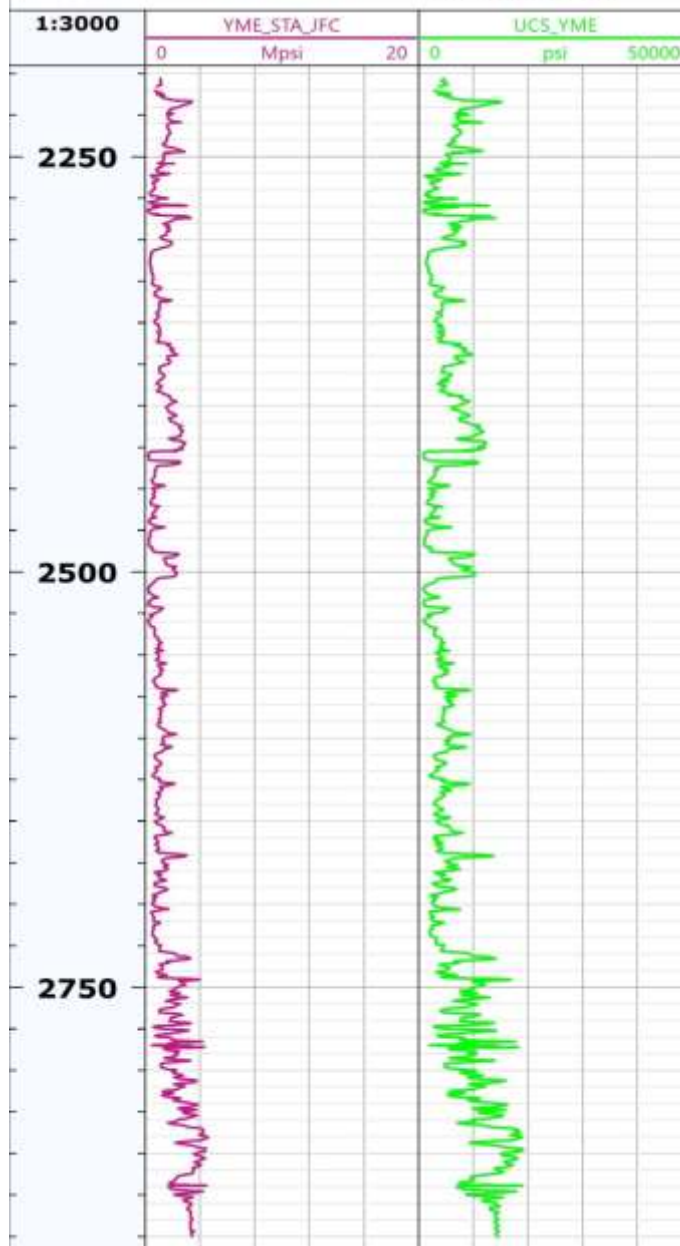
Long name:

Elevation:

Elevation datum:

Total depth:

Coordinate system:

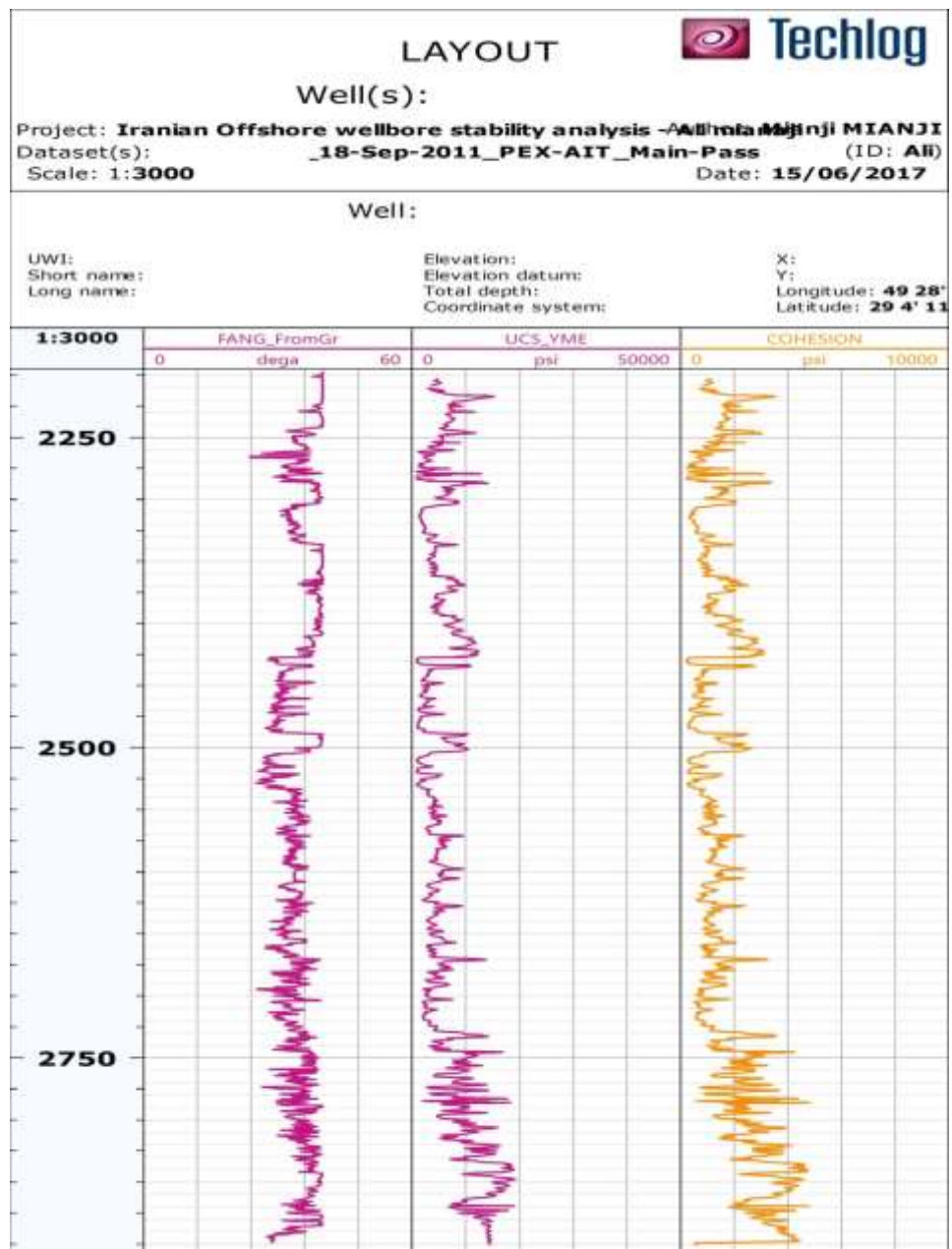


شکل (۴-۲۵) مقادیر مقاومت فشاری به روش مدول استاتیکی یانگ پلامب

۷-۵-۴ محاسبه چسبندگی

با توجه به شکل (۴-۲۶) به کمک مقاومت فشاری تک محوره و زاویه اصطکاک داخلی سنگ

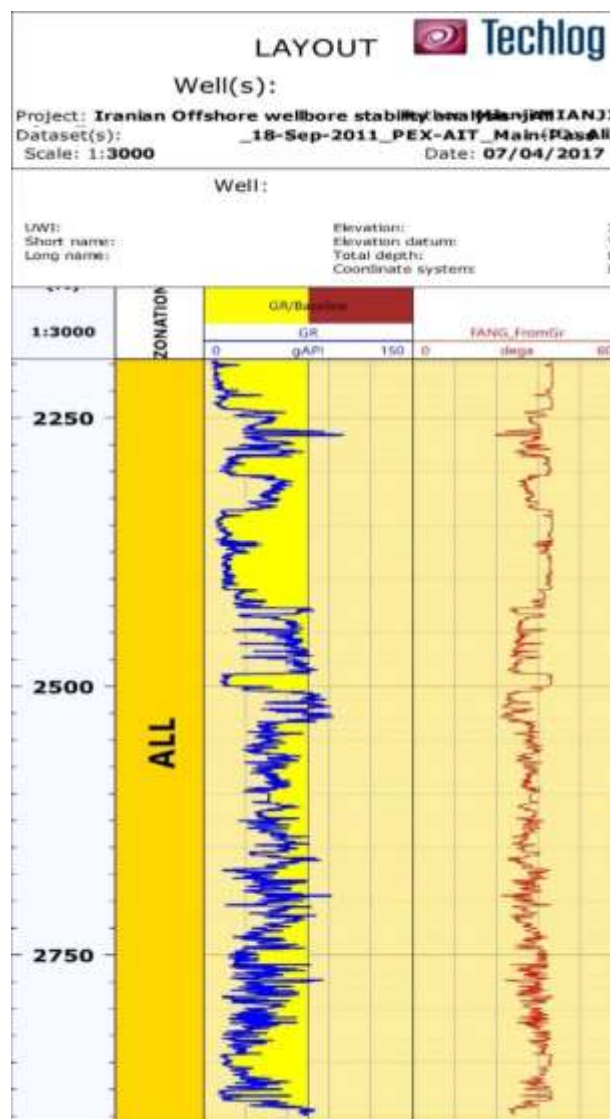
میزان، چسبندگی سنگ محاسبه شد.



شکل (۴-۲۶) چسبندگی سنگ

۸-۵-۴ محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ به کمک نمودار گاما

به کمک مقادیر نمودار اشعه گاما، زاویه اصطکاک سنگ محاسبه می‌شود. در این روش، مقادیر پرتو گاما در مقابل زاویه اصطکاک داخلی پلات می‌شود، در صورتی که اشعه گاما API ۱۲۰ باشد، زاویه اصطکاک متناظر آن ۲۰ و اگر مقدار اشعه گاما API ۴۰ باشد میزان زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ در نظر گرفته می‌شود. نتایج در شکل (۴-۲۷) مشاهده می‌شوند.

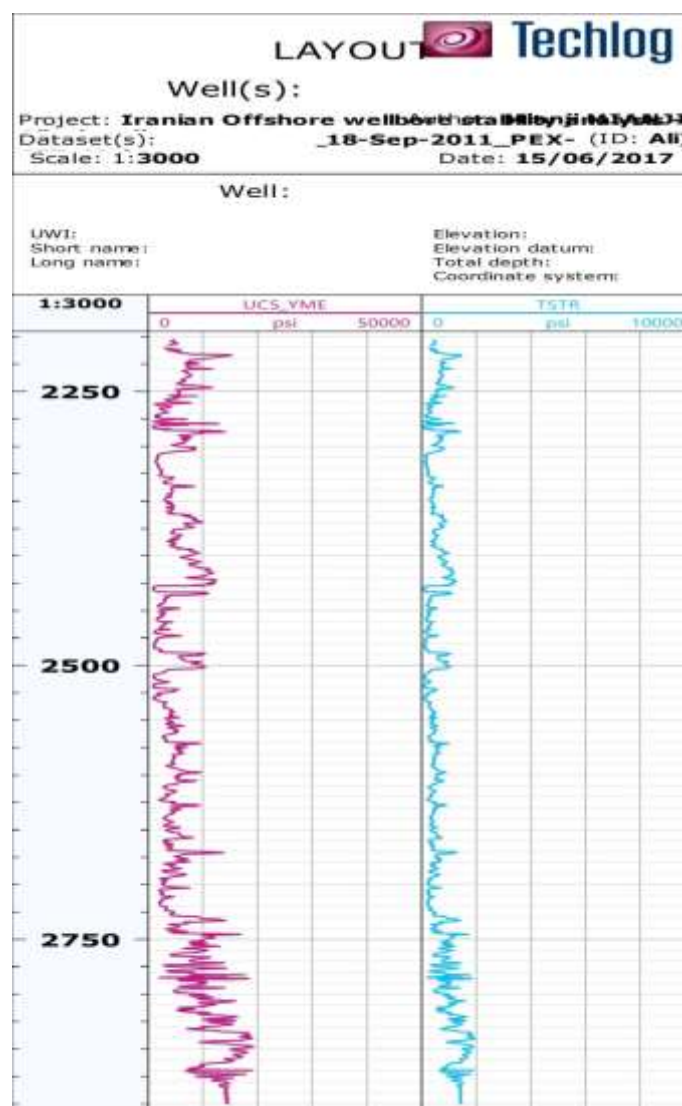


شکل (۴-۲۷) نحوه محاسبه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و نتیجه حاصل شده

۹-۵-۴ مقاومت کششی سنگ

این مدل به کمک رابطه (۹-۴) به طور مستقیم از مقاومت فشاری تک محوره محاسبه می شود. در رابطه زیر، K یک ضریب مربوط به زون مورد مطالعه است که به صورت پیش فرض بر اساس تئوری الاستیک شکننده^۱ گرفت برابر ۰/۱ فرض می شود.

$$TSTR = K \times UCS \quad (۹-۴)$$



شکل (۴-۲۸) مقادیر مقاومت کششی سنگ

¹ Griffith Elastic-brittle theory

۴-۶ تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا

اساساً دانش ژئومکانیک به بررسی و تحلیل رفتار سنگ در برابر تنش‌ها می‌پردازد. محاسبه میدان تنش‌های برجا در مسائل مربوط به زمین‌شناسی مهندسی، مهندسی نفت، مکانیک سنگ و مهندسی معدن کاربردهای فراوانی دارد. تنش‌های برجا در توده‌های سنگی تحت تأثیر عوامل گوناگونی می‌باشد که در بین این عوامل عمق سنگ نسبت به سطح زمین و وضعیت تکتونیکی منطقه نقش عمده‌ای دارند [Fjaer et al., 2008].

تحلیل تنش، بخش بسیار مهم هر مطالعه ژئومکانیکی است. لازم به ذکر است، معمولاً جهت انتشار شکستگی‌ها در عملیات شکست هیدرولیکی عمود بر جهت تنش حداقل می‌باشد. آگاهی از مقدار و جهت تنش‌های برجا در یک مخزن، مسأله اساسی در اکتشاف و تولید نفت و به ویژه یک پارامتر کلیدی در موارد ذکرشده در ذیل می‌باشد [Torres et al., 2003; Tingay et al., 2009; Rajabi et al., 2010]. [Carnegie et al., 2000].

- برقراری پایداری چاه در طول مدت حفاری.
- ماکزیمم کردن نرخ نفوذ مته حفاری.
- بهترین مسیر حفاری چاه به منظور حداقل کردن ناپایداری چاه.
- تعیین فشار بهینه گل حفاری در طول حفر چاه.
- طراحی لوله جداری.
- بهینه‌سازی انگیزش شکست هیدرولیکی.
- بهینه‌سازی بازیابی نفت.
- زهکشی مخزن و الگوی حرکت سیال.
- مدیریت مخازن.

حالت تنش‌های برجای کنونی به وسیله‌ی تعیین تانسور تنش توصیف می‌شوند. لازم به ذکر است معمولاً یکی از تنش‌های اصلی در حوضه‌های رسوبی^۱ به صورت عمودی فرض می‌شود. به طور کلی تانسور تنش توسط چهار پارامتر تعیین می‌شوند [Taingery et al., 2009; Rjabi et al. 2010; Bell, 1996].

- تنش قائم^۲ (وزن روباره).
- تنش افقی حداقل^۳.
- تنش افقی حداکثر^۴.
- جهت یکی از تنش‌ها که معمولاً جهت تنش افقی حداکثر می‌باشد.

۴-۶-۱ روش‌های محاسبه تنش‌های برجا و تعیین جهت تنش برجا

میدان تنش‌های برجا را می‌توان از تفسیر داده‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های برجا که بر روی چاه شده است محاسبه کرد [Economids & Nolte, 2000].

طی این پژوهش، تنش‌های برجا یا همان تنش‌های ماکزیمم و مینیمم اصلی منطقه و ضرایب بایوت و همچنین جهت تنش افقی ماکزیمم و مینیمم از نتایج تحلیل پایداری چاه مجاور گرفته شد؛ که در شکل (۴-۲۹) ملاحظه می‌کنید. طبق شکل جهت تنش افقی مینیمم افقی ۱۰۰ درجه و جهت تنش افقی ماکزیمم ۱۰ درجه می‌باشد. با استفاده از داده‌های شکل (۴-۲۹) و روابط پوروالاستیک در دو عمق ۱۶۹۱/۴۵ و ۱۷۸۱/۳۷ دو معادله دو مجهولی برای یافتن تنش‌های اصلی منطقه ساخته شده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۰۰۰۵ و ۰/۰۰۱۵ برای کرنش افقی مینیمم و ماکزیمم منطقه به دست آمد [IOOC Report, 2015].

سیستم گسلش منطقه نرمال - امتداد لغز می‌باشد و جهت تنش افقی مینیمم NW-SE است

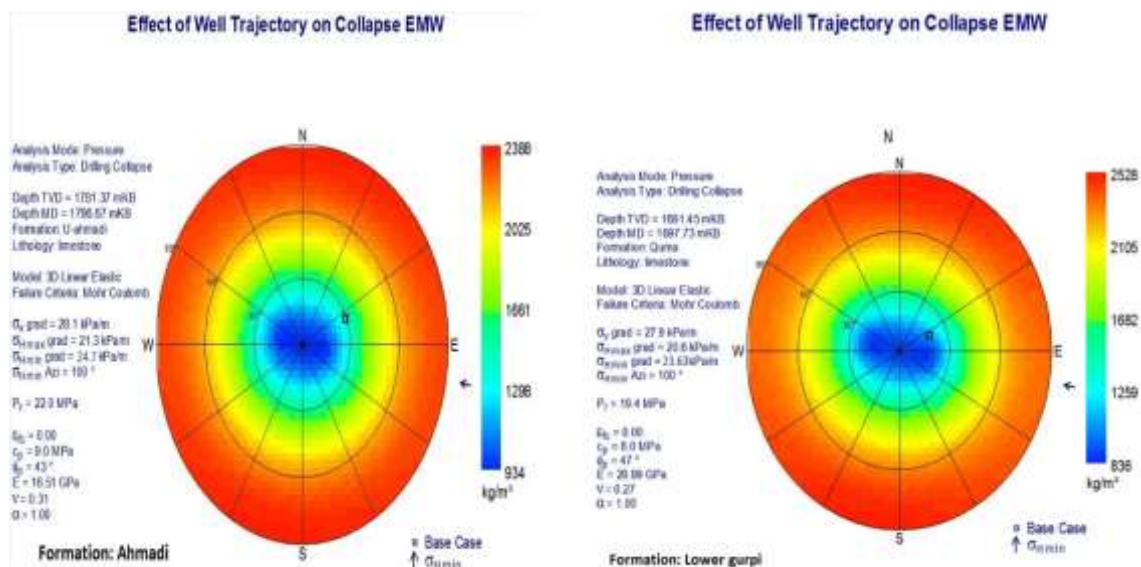
[IOOC Report, 2015].

¹ sedimentary basins

² Vertical Stress (Sv)

³ Minimum Horizontal Stress (Shmin)

⁴ Maximum Horizontal Stress (SHmax)



شکل (۴-۲۹) پارامترهای لازم چاه مجاور برای محاسبه تنش‌های ماکزیمم و مینیمم منطقه

۴-۱-۶-۱ محاسبه تنش‌های افقی

داده‌های لازم برای محاسبه تنش‌های افقی به کمک مدل پوروالاستیک شامل، مقادیر ضریب پواسون (استاتیک)، مدول یانگ (استاتیک)، تنش قائم، فشار منفذی، ضریب بایوت و تنش‌های ماکزیمم و مینیمم اصلی منطقه است. در ادامه به نحوه محاسبه تنش‌های افقی پرداخته خواهد شد.

۴-۱-۶-۲ مدل پوروالاستیک^۱

این مدل یکی از روش‌های مرسوم برای محاسبه تنش‌های افقی می‌باشد. تغییر شکل در سنگ-های سازندهای پوروالاستیسیت به اثر تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم است. مدل پوروالاستیکی بیان می‌کند که به کمک مدول یانگ استاتیکی، ضریب پواسون، بایوت، فشار روباره و فشار منفذی نمی‌توان به صورت مستقیم تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم دقیق را محاسبه کرد؛ بلکه نتایج به دست آمده را می‌توان کالیبره نمود.

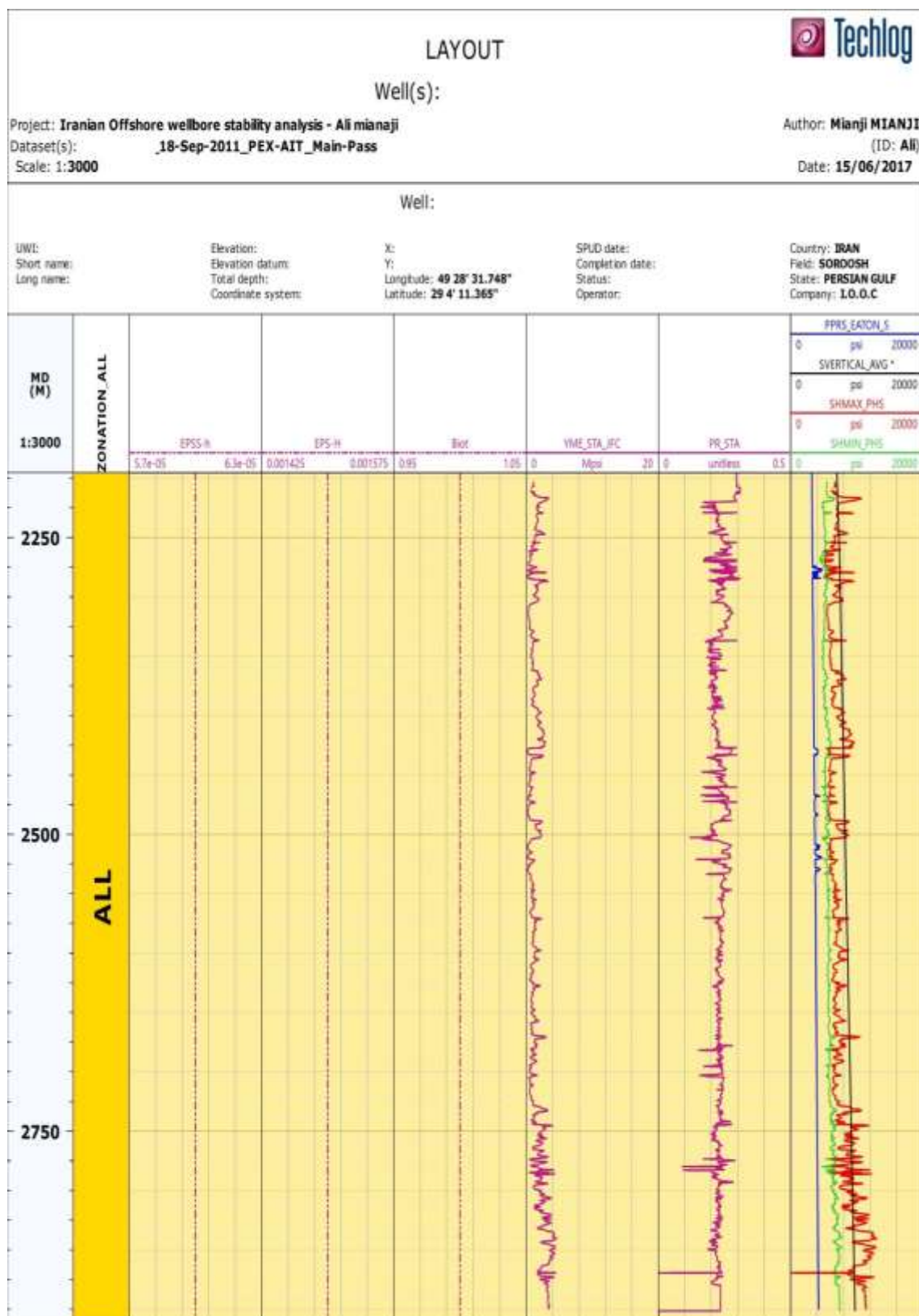
¹ Poro-Elastic Horizontal Strain Model

الگوریتم در این روش به این صورت می‌باشد که در صورت وجود سیال اشباع، محیط الاستیک خطی و ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود؛ حال این‌که در محیط آنیزوتروپیک تنش‌های ماکزیمم و مینیمم را می‌توان از روابط زیر به‌دست آورد:

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \sigma_v - \frac{v}{1-v} \alpha p_p + \alpha p_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_h + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_H \quad (۱۰-۴)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v} \sigma_v - \frac{v}{1-v} \alpha p_p + \alpha p_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_H + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_h \quad (۴-۱۱)$$

این روابط بیشتر برای سنگ‌هایی با مقاومت بالا (مدول یانگ بالا) که مناطق تکتونیکی فعالی دارند قابل استفاده است. برای محاسبه تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم در این مدل لازم است نسبت پواسون و مدول یانگ، ضریب بایوت، تنش روباره، فشار منفذی که در مراحل قبلی محاسبه شد و حداقل تنش‌های مینیمم و ماکزیمم واقع در میدان نفتی مورد مطالعه را وارد کرد.



شکل (۴-۳۰) مقادیر تنش‌های قائم و افقی ماکزیمم و مینیمم در طول چاه

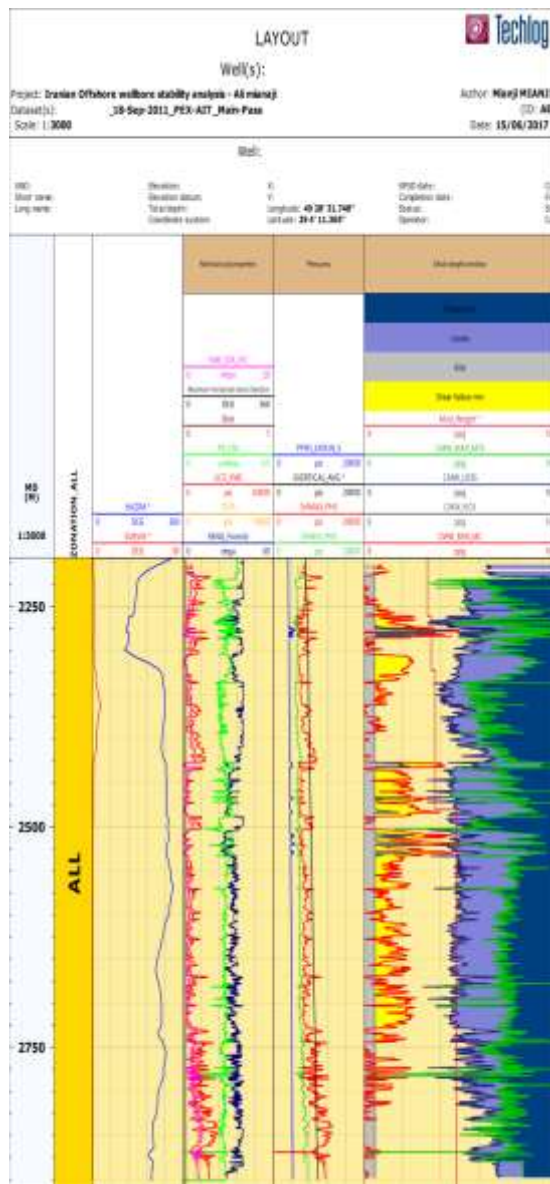
۷-۴ تعیین وزن گل در افق‌های مورد مطالعه

با توجه به جدول (۴-۶)، پارامترهای مورد نیاز جهت تعیین وزن گل ایمن در سازندهای مورد مطالعه به همراه خروجی‌ها نشان داده شده است. نتایج در اینجا با استفاده از سه معیار شکست حساب شده است. به منظور پایداری چاه، فشار گل نباید بیشتر از مقاومت کششی باشد که شکاف ایجاد کند و نباید کمتر از مقاومت فشاری سنگ باشد که باعث فروپاشی شود. فشار زیاد گل حفاری باعث شکست کششی (شکاف) می‌شود که از آن به عنوان حد بالای پنجره گل یاد می‌شود. فشار پایین باعث شکست برشی (فروپاشی) می‌شود که از آن به عنوان حد پایین گل یاد می‌شود. خاطر نشان می‌شود که افزایش مقاومت سنگ باعث عریض‌تر شدن پهنای پنجره ایمن گل می‌شود. به علاوه نامتقارن بودن بیشتر، باعث افزایش اختلاف تنش‌ها شده و در نتیجه پهنای پنجره ایمن گل را کاهش می‌دهد. یعنی حد کششی کاهش و حد فشاری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر شکست فشاری در فشار بالاتر و شکست کششی در فشار پایین‌تری اتفاق می‌افتد.

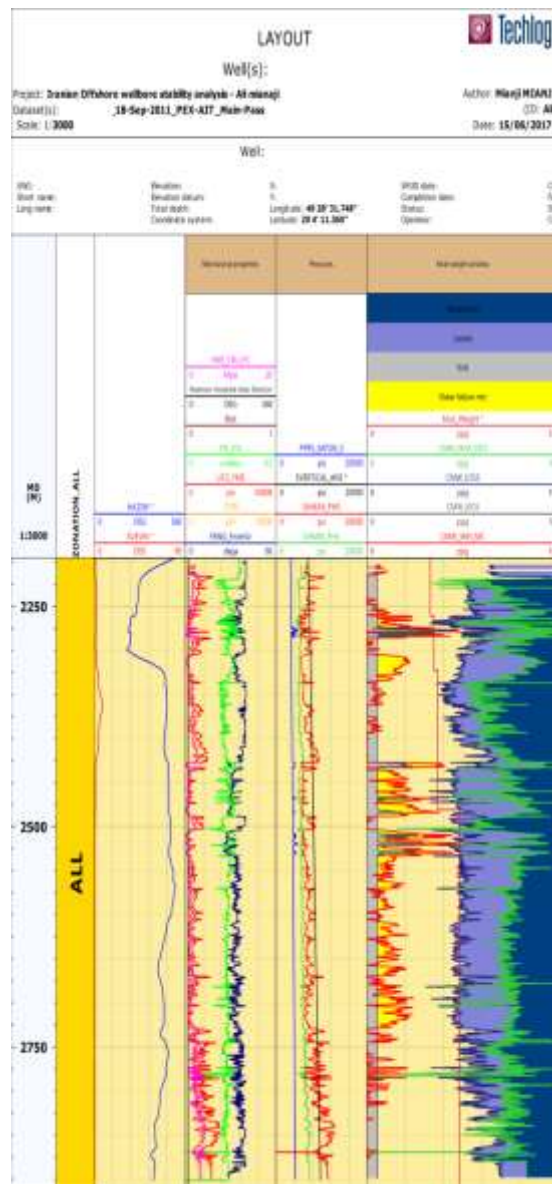
جدول (۴-۶) فهرستی از پارامترهای ورودی برای تعیین پنجره گل

واحد	پارامترهای خروجی	واحد	پارامترهای ورودی
ppg	Kick Pressure(CMW-Kick) وزن گل بحرانی کیک	درجه	زاویه چاه
ppg	Mud loss وزن گل بحرانی برای پدیده لاس	درجه	آزیموت چاه
ppg	CMW_MIN_MC Shear Failure Min Pressure حداقل وزن گل بحرانی برای شکست برشی	بدون واحد	ضریب بایوت
ppg	CMW_MAX_MTS Breakdown Pressure وزن گل بحرانی برای ماکزیمم شکست کششی	بدون واحد	نسبت پواسون
—	—	PSI	مقاومت فشاری تک محوره
—	—	PSI	مقاومت کششی
—	—	درجه	مقاومت اصطکاک داخلی سنگ
—	—	PSI	فشار منفذی
—	—	ppg	تنش روباره
—	—	PSI	تنش افقی مینیمم
—	—	PSI	تنش افقی ماکزیمم
—	—	ppg	وزن گل (جهت کالیبره کردن)
—	—	Mpsi	مدول یانگ (استاتیک)

در نهایت در شکل (۴-۳۱)، پنجره گل مربوطه رسم می‌شود. که در ادامه به توضیحات جهت تحلیل پنجره گل ایمن به‌دست آمده پرداخته می‌شود.



نتایج حاصل از معیار موگی کلمب

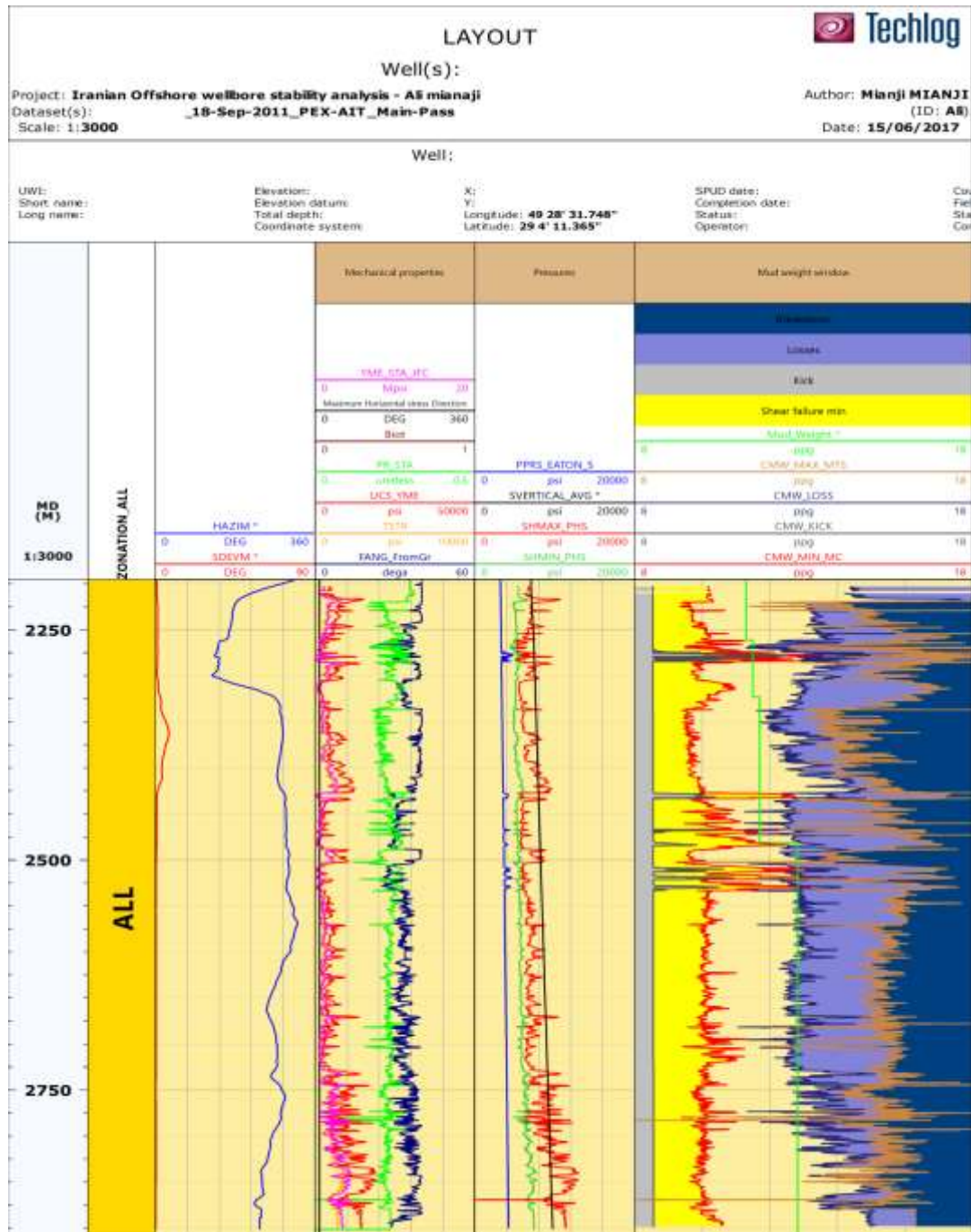


نتایج حاصل از معیار لید اصلاح شده

شکل (۴-۳۱) پنجره گل با دو معیار شکست متفاوت

پنجره گل در نرم‌افزار Techlog از سه معیار شکست به‌دست آمد. با توجه به اینکه معیار موهر کلمب نسبت به دو معیار لید اصلاح شده و موگی-کلمب برای شرایط چاه محافظه کارانه‌تر عمل

شکست ملاحظه می شود.



شکل (۴-۳۲) پنجره ایمن گل با معیار شکست موهر کلمب

CMW_MIN_MC: حداقل وزن گل مورد نیاز برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه. در صورتی که

وزن گل کمتر از این مقدار شود، چاه دچار ریزش می شود.

CMW_KICK : وزن گل مورد نیاز برای جلوگیری از ورود سیال به داخل چاه که در واقع همان

فشار منفذی می باشد.

CMW_LOSS : وزن گلی که در آن هرزروی سیال حفاری صورت می گیرد که معمولاً برابر تنش

اصلی بر جای حداقل می باشد.

CMW_MAX_MTS : حداکثر وزن گل مجاز برای جلوگیری از شکست و شکاف در چاه که با

استفاده از معیار کششی و مقاومت کششی سنگ به دست می آید.

MW_Actual : وزن گل استفاده شده در چاه می باشد؛ که از گزارشات روزانه حفاری ۱ استخراج

شده است.

برای تحلیل بهتر در آزمون ها و زاویه های متفاوت برای چند عمق مختلف در طول چاه که در

ادامه توضیح داده خواهد شد از نمودار قطبی استفاده شد. در این نمودار وزن گل مورد نیاز برای

جلوگیری از فروپاشی چاه در جهات مختلف نشان داده شده است. مقادیر آزمون روی محیط دایره از

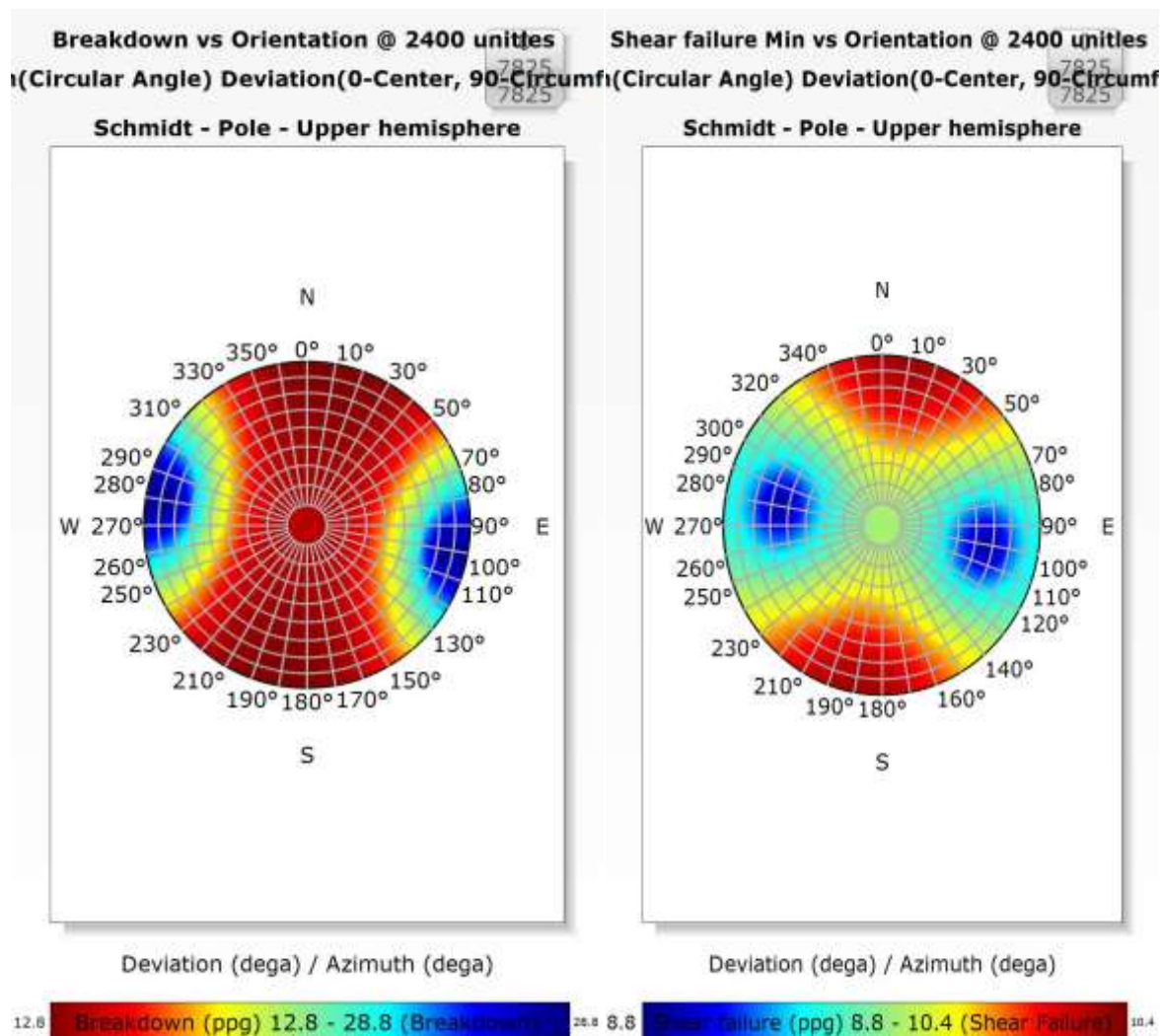
۰ تا ۳۶۰ درجه تغییر می کنند در حالی که زاویه انحراف از مرکز دایره و در جهت شعاع، مقادیری بین

۰ تا ۹۰ درجه را اتخاذ کرده است؛ مقادیر وزن گل فروپاشی در هر آزمون و زاویه انحراف به دست

آورده شده اند و با توجه به مختصات و مقدار، به صورت رنگ بندی مشخص شده اند.

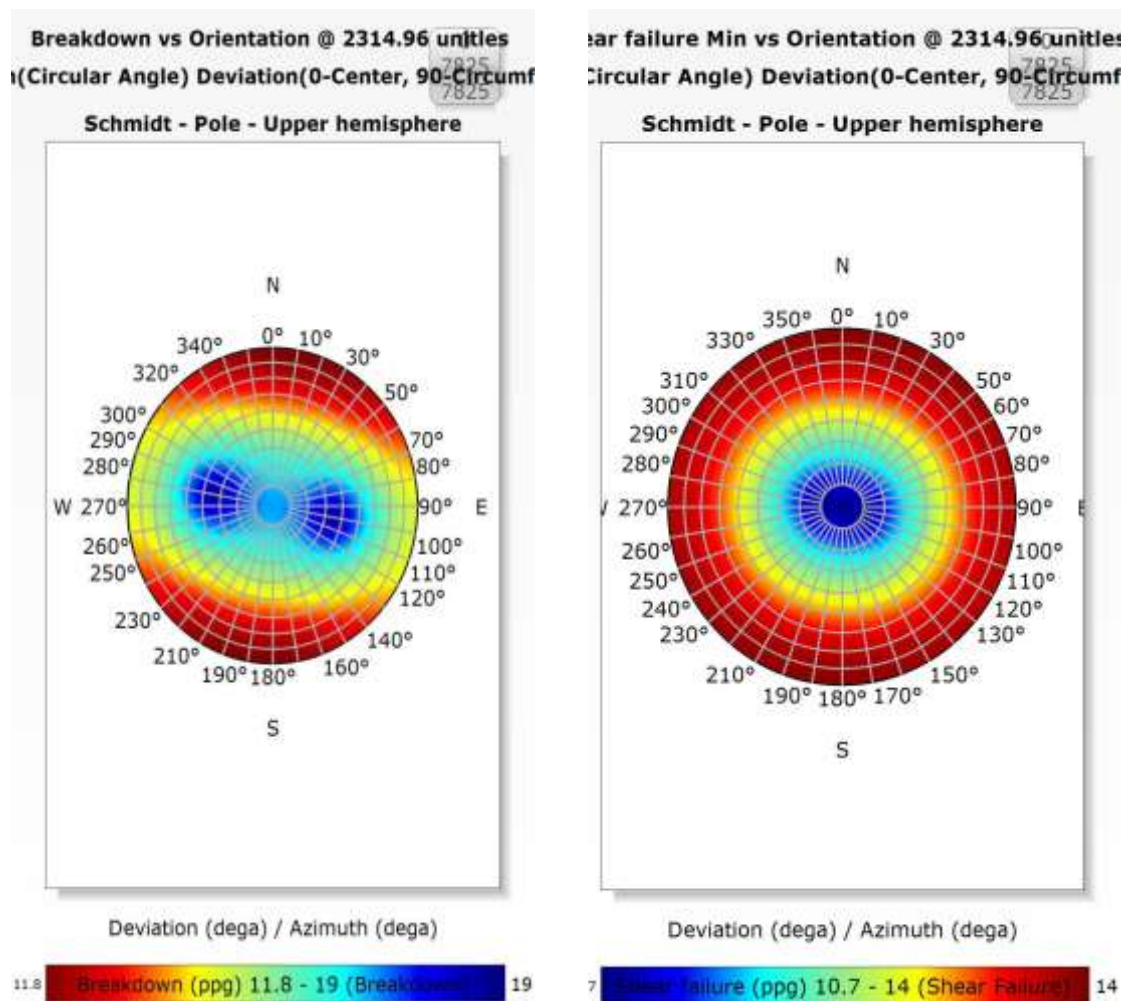
با توجه به اینکه تفسیر پتروفیزیکی در این چاه صورت گرفته است، دو حالت افق های شیل دار و

بدون شیل برای تحلیل پایداری چاه در نظر گرفته شده است.



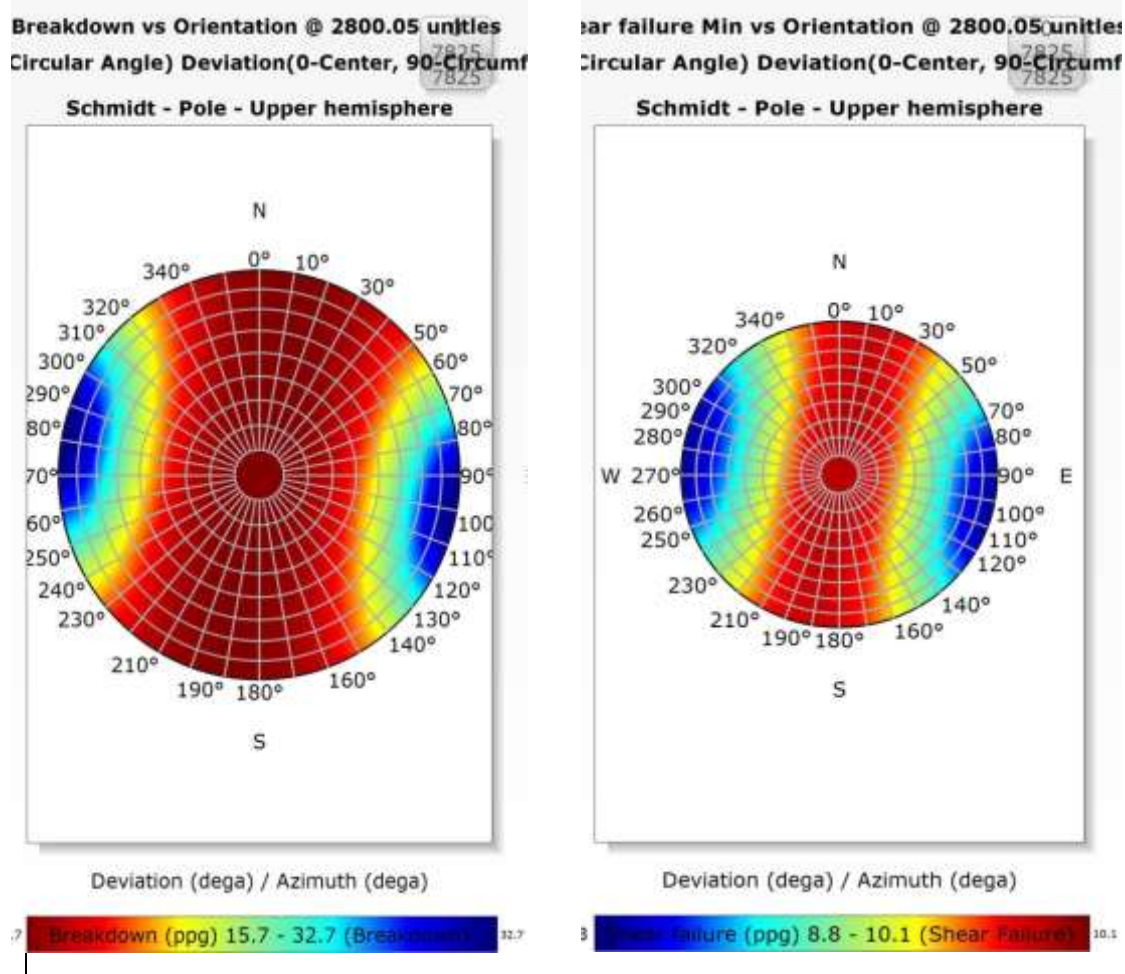
شکل (۳۳-۴) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۴۰۰ متر - بدون ریزش و آهکی

همان‌طور که در شکل (۳۳-۴) ملاحظه می‌شود وزن گل فروپاشی در عمق ۲۴۰۰ متر بین PPG ۸/۸ تا PPG ۱۰/۴ می‌باشد. با تغییر رنگ از آبی به قرمز، وزن گل مورد نیاز برای جلوگیری از فروپاشی چاه افزایش می‌یابد. در حالت برشی وزن گل بین PPG ۱۲/۸ تا PPG ۲۸/۸ می‌باشد. با توجه به شکل (۳۳-۴)، کمترین وزن گل مجاز PPG ۸/۸ و بیشترین مقدار وزن گل مجاز PPG ۲۸/۸ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به سیستم گسلش منطقه که نرمال - امتداد لغز می‌باشد و در این عمق چاه در جهت تنش افقی مینیمم پایداری بیشتری خواهد داشت؛ که این امر در شکل مشهود می‌باشد.



شکل (۴-۳۴) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۳۱۴.۹۶ متری - حاوی شیل و ریزی

در شکل (۴-۳۴) نیز وزن فروپاشی گل در دو حالت شکست برشی و کششی ملاحظه می‌شود. با توجه به شکل (۴-۳۴)، کمترین وزن گل مجاز $10/7$ PPG و بیشترین مقدار 19 PPG می‌باشد. این در حالی است که با توجه به سیستم گسلش منطقه که نرمال - امتداد لغز می‌باشد و در این عمق چاه در جهت تنش افقی مینیمم پایداری بیشتری خواهد داشت؛ که این امر در شکل مشهود می‌باشد. نکته قابل توجه در شکل (۴-۳۵) تأثیر وجود شیل در تعیین پنجره گل ایمن می‌باشد. به عبارتی، در حالتی که شیل وجود دارد پنجره گل نسبت به حالت قبلی کوچک‌تر می‌شود.



شکل (۴-۳۵) تحلیل پایداری چاه مربوط به عمق ۲۸۰۰/۰۵ متری- بدون ریزش و شیل

در شکل (۴-۳۵)، با توجه به اینکه در عمق ۲۸۰۰/۰۵ متری تنش‌های افقی ماکزیمم و تنش قائم یکی می‌باشند؛ در صورتی که چاه در این عمق به حالت قائم و در راستای آزمون تنش‌های افقی ماکزیمم و تنش قائم حفاری شود، ناپایدار خواهد بود. از طرفی در این عمق حداقل و حداکثر وزن گل مجاز برای حفاری به ترتیب $PPG\ 8/8$ و $PPG\ 32/7$ برآورد شده است.

۴-۸ ارزیابی شرایط ناپایداری چاه مورد مطالعه:

در این بخش برای ارزیابی صحیح ناپایداری چاه مورد مطالعه در افق‌های پایین‌تر، ابتدا شرح ناپایداری، سپس روش‌های معمول جهت پایدارسازی چاه بررسی می‌شود. در آخر یک روش استفاده

شده در یکی از میادین غربی ایران ارائه گشته و در آخر این روش با توجه به اهمیت هزینه‌ها در صنعت حفاری ارزیابی اقتصادی می‌شود.

۴-۸-۱ شرح ناپایداری ایجاد شده در میدان مطالعاتی فراساحلی

چاه مورد مطالعه، در یکی از میادین فراساحلی ایران واقع در خلیج فارس، تا عمق ۲۹۶۸ متری پایدار بوده است و هیچ هرزروی^۱ و یا برگشت اضافی گل حفاری^۲ در چاه مشاهده نمی‌گردید. پس از ادامه حفاری تا عمق ۲۹۶۸.۵ متر فوران گاز مشاهده می‌شود. که احتمالاً طبق گزارشات زمین-شناسی با توجه جدول (۴-۸)، ناپایداری ایجاد شده مربوط به زون پرفشار است [IOOC Report, (2011) & (2014)].

جدول (۴-۸) بازه عمقی زون پرفشار

ویژگی	بازه عمقی	سازند
وجود زون پرفشار ^۳	۲۹۶۵-۲۹۶۹	قسمت فوقانی سولای ^۴

با توجه به جدول (۴-۹)، وزن گل در زیر کفشک لوله جداری^۵ ۵/۸ اینچ مربوط به حفره ۸ ۱/۲ اینچ به‌طور کامل نوشته شده است، همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود میزان وزن گل پایه روغنی مربوط به هر سازند و بازه عمقی نوشته شده است.

^۱ No Loss

^۲ No Gain

^۳ High Pressure Zone

^۴ Near Top of Sulay

^۵ Casing Shoe

جدول (۴-۹) وزن گل حفاری شده در طول حفره ۸ ۱/۲ اینچ [IOOC, (2011), GWL Report].

ویسگوزیته	وزن گل	بازه عمقی	نام سازند
۷۴	PCF ۸۶	۲۳۲۲-۲۲۶۰ متر	داریان بالایی
۶۷	PCF ۸۷.۵	۲۳۴۸-۲۳۲۲ متر	داریان پایینی
۶۲	PCF ۸۸.۵	۲۳۷۵-۲۳۴۸ متر	داریان پایینی
۶۱	PCF ۸۹	۲۴۰۴-۲۳۷۵ متر	داریان پایینی
۶۰	PCF ۸۸.۵	۲۴۳۱-۲۴۰۴ متر	داریان پایینی
۶۳	PCF ۸۹.۵	۲۴۸۰-۲۴۳۱ متر	گدوان بالایی
۶۱	PCF ۹۰.۵	۲۷۳۶-۲۴۸۰ متر	عضو خلیج - گدوان پایینی - رتاوی - یاماما فوقانی
۶۷	PCF ۹۱.۵	۲۷۶۳-۲۷۳۶ متر	یاماما
۶۹	PCF ۹۲	۲۹۶۸-۲۷۶۳ متر	یاماما
۸۶	PCF ۱۱۰	۲۹۷۰-۲۹۶۸ متر	یاماما

پس از این اتفاق جهت کنترل فوران چاه، تصمیم اتخاذ شده مبنی بر افزایش وزن گل از PCF^۱ ۹۲ به PCF ۱۱۰ بوده است. در حالی که این گل سنگین با آهنگ^۲ ۴۰ تا ۶۰ بشکه بر ساعت^۳ به چاه تزریق می‌شد. وزن گل بالا منجر به شکست کششی در چاه گردید؛ که پیرو آن هرزروی با آهنگ ۴۰ تا ۶۰ بشکه بر ساعت را داشتیم و وقتی پمپاژ گل به صورت کامل قطع شد، ۱۰ تا ۱۲ بشکه بر ساعت برگشت اضافی گل حفاری مشاهده شد [IOOC Report, (2014) & (2011)].

با مطالعه گزارشات روزانه حفاری، اینطور به نظر می‌رسد که افزایش ناگهانی وزن گل حفاری از ۹۲ به PCF ۱۱۰ باعث شکست در لایه پرفشار شده است؛ که این امر سبب شده است به‌طور همزمان در لایه پرفشار فوران و در لایه کم فشار هرزروی گل را داشته باشیم؛ که این پدیده برای پرسنل مشغول به کار بر روی دکل بسیار خطرناک است. بدین سان با اعمال تغییرات به مدت ۷ روز،

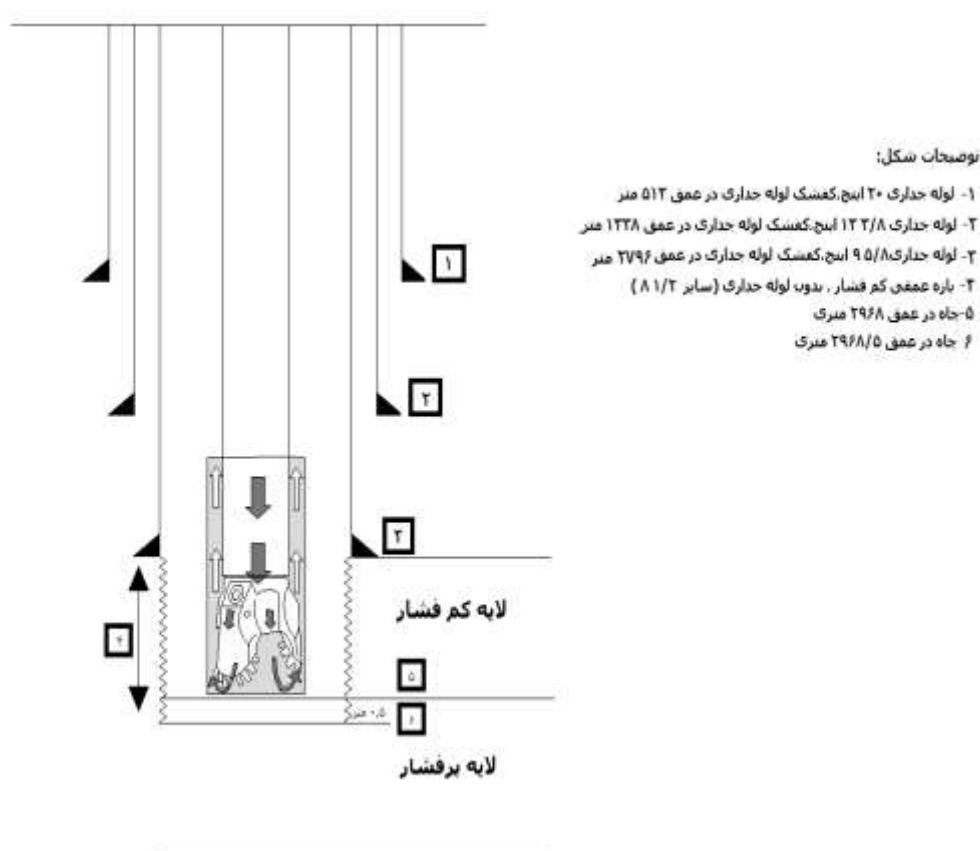
¹ Per Cubic Feet

² Rate

³ Barrel Per Hour(BPH)

بر روی پارامترهای وزن گل^۱، GPM^۲ و سیمان کاری چاه نیز توانایی فایق آمدن بر این مشکل را نداشتند [IOOC Report, (2011)].

با توجه به شکل (۴-۳۶)، برای جلوگیری از خطرات بیشتر برای پرسنل و تحمیل هزینه‌های اضافی بر شرکت، متأسفانه مجبور به سیمان کاری و بستن چاه از زیر کفشک لوله جداری 9 5/8 اینچ یعنی در عمق ۲۴۰۰ متر و ادامه حفاری سایید ترک^۳ شدند که این امر سبب از دست رفتن ۵۳۸ متر از حفاری شد [IOOC Report, (2011)].



شکل (۴-۳۶) نمودار شماتیک دوبعدی از چاه مورد مطالعه

¹ Mud Weight

² Gallon Per Minute

³ Side Track

۹-۴ بررسی روش‌های پایدار نگه داشتن چاه

همان‌طور که در فصل‌های قبل نیز اشاره شد یکی از پارامترهایی که به کمک آن می‌توان پایداری چاه را کنترل کرد، گل حفاری می‌باشد. به این منظور هر تغییر احتمالی در گل باید به خوبی برنامه‌ریزی شود، برنامه گل با کسب همه اطلاعات زمین‌شناسی از محل چاه آغاز می‌شود که شامل فشار خلل و فرج^۱ و نمودار گرادیان شکست^۲، ویژگی‌های سازند، موقعیت طبقات نمکی انحلال‌پذیر و وجود لایه‌های شیلی و مارلی و برخی دیگر از اطلاعات مورد نیاز مهندسی می‌باشد. در مرحله بعد، برنامه‌های جداره‌گذاری^۳ و گل باید با هم ترکیب شوند، به این معنی که راه حل بعضی از مشکلات، حبس آن‌ها پشت لوله جداری است. این مسئله مخصوصاً زمانی درست از آب در می‌آید که دو مشکل، هم‌زمان دارای راه حل‌هایی در تقابل با هم باشند. برای مثال هرزروی شدید گل^۴ در سازندی وجود دارد و در همین سازند ماسه‌سنگ‌های پرفشار نیز توامان موجود می‌باشند که باعث به وجود آمدن یک تناقض و تعارض می‌شود که نمی‌توان آن را تنها از طریق گل برطرف کرد. برای مقابله با این سازند پرفشار، باید وزن گل را بالا برد که این بالا بردن وزن گل باعث شکست سازند و هرزروی می‌شود. در جدول (۹-۴)، به‌طور کامل تأثیر گل مناسب بر برنامه حفاری را می‌توان ملاحظه کرد.

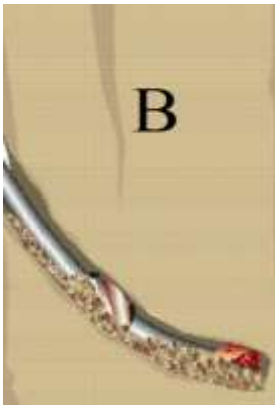
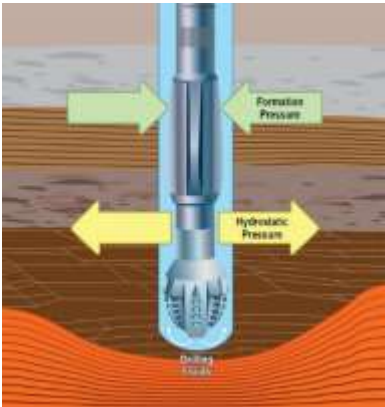
^۱ Pore Pressure

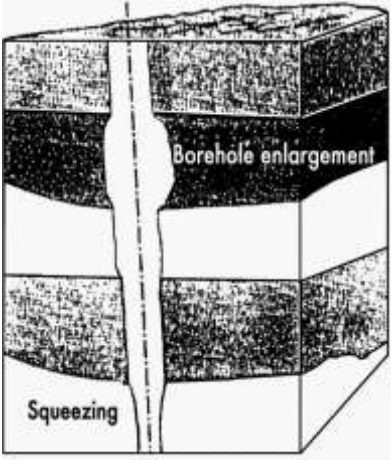
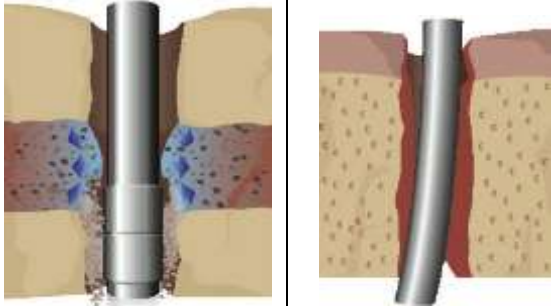
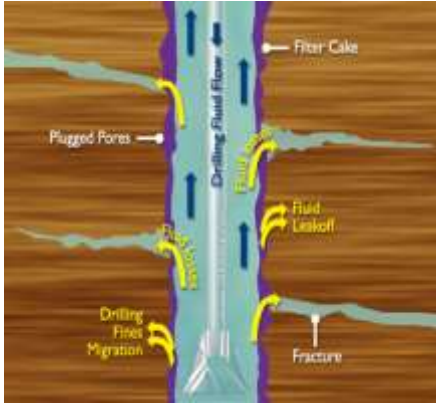
^۲ Fracture Gradient Profile

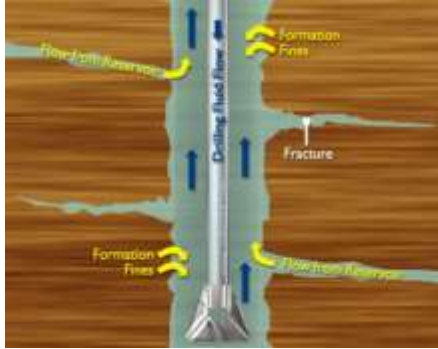
^۳ Casing Operation

^۴ Complete Lost

جدول (۴-۱۰) تأثیر گل بر پایداری چاه در شرایط متفاوت

شکل	توضیحات و عواقب	روش‌های پایداری سازی چاه
	مهمترین عوامل مؤثر در انتقال کنده‌ها به سطح زمین، سرعت گل در فضای حلقوی، وزن گل و گرانشی گل است. در صورتی که فرآیند ترخیص خرده‌های حفاری از ته چاه بخوبی انجام نشود با توجه به شکل، باعث گیر کردن لوله‌های حفاری در چاه می‌گردد. که یکی از حالت‌های ناپایداری چاه به حساب می‌آید.	تمیز کردن ته چاه و انتقال کنده‌های حفاری
	دیواره‌سازی یک امر مهم در پایداری سازی چاه به شمار می‌آید. افزودن بنتونیت به منظور ایجاد محیطی یکنواخت از ذرات جامد و پرهیز از کلوخه‌ای شدن این ذرات، بخش کلوئیدی گل را تقویت کرده و توانایی گل را در نشان دادن اندودی غیرقابل نفوذ بر دیواره چاه را بالا می‌برد.	به کمک خواص گل و روش‌های تجربی
	از خواص فیزیکی گل به ایجاد یک فشار ستون سیال در چاه می‌توان اشاره کرد. مقدار این فشار بستگی به وزن گل و عمق چاه دارد. با تنظیم مناسب وزن گل به وسیله مواد وزن‌افزا، می‌توان مقدار فشار ستون سیال را طوری تنظیم کرد که درست مساوی فشار سازند باشد و بتوان آنرا کنترل کرد.	کنترل فشارهای زیرزمینی

پایدارسازی به کمک خواص گل و روش- های تجربی	وجود لایه های نمکی	انحلال لایه نمکی در گل حفاری می تواند موجب افزایش قطر چاه شود که خود منبع مشکلات دیگر و مستلزم هزینه اضافی خواهد شد. مصرف بیش از حد گل حفاری، هزینه های اضافی سیمان کاری، امکان گیر کردن رشته حفاری است. راه حلی که جهت غلبه بر این مشکل پیشنهاد می شود آماده کردن و استفاده از نوعی گل حفاری است که ترکیب اصلی آن را آب نمک تشکیل می دهد به عبارتی اشباع از نمک است.	
	لایه های شیلی	بعضی از طبقات که باید حفاری گردند حاوی شیل هستند که خود دارای بنتونیت و انواع دیگر رس است. بنتونیت و رس های مشابه، خاصیت جذب آب و انبساط دارند که این امر موجب لجن شدن داخل چاه می شود. افزودن کلسیم، افزایش GPM، افزودن نشاسته، استفاده از گل پایه روغنی.	
	گم شدن گل حفاری	از معایب این پدیده می توان به افزایش زمان حفاری، عدم دسترسی به اطلاعات کافی از تشکیلات یا سنگی که حفاری می شود، افت فشار هیدرواستاتیکی و امکان چسبیدن لوله حفاری در این محدوده، افزایش هزینه حفاری. برای مقابله روش های پیشنهادی در ادامه فصل توضیح داده شده است.	

	فوران چاه	این پدیده هنگامی اتفاق خواهد افتاد که فشار طبقات زیادتر از فشار هیدرواستاتیکی گل حفاری موجود در بین طبقات با فشار زیاد به داخل چاه فوران کند و به چاه صدمه زند. البته در صورت ایجاد شکست کششی در چاه می توان انتظار پدیده فوران را نیز کشید.	
--	-----------	--	--

برای جلوگیری از گم شدن گل حفاری در سازند، می توان دو حالت برای جلوگیری از هرزروی گل در نظر گرفت، در صورت هرزروی در لایه های مخزنی و یا غیر مخزنی با توجه به جدول (۴-۹) از موادی با ترکیبات خاص استفاده می شود.

جدول (۴-۱۱) معرفی مواد صنعتی لازم جهت پایدارسازی چاه در صورت ایجاد شکست کششی

نوع سازند	موارد استفاده	توضیحات
مخزنی	۱- استفاده از LCM^۱ هایی که در صورت رسوب در مخزن با اسید حل می- شوند. مثل لایم استون های دانه ای ۲- در صورتی که هرزروی شدید و غیرقابل کنترل داشته باشیم. بالاجبار باید از سیمان استفاده شود. که نوع سیمان با توجه به داشتن قابلیت حل شدن باید سیمان منیزی می^۲ باشد.	
غیرمخزنی	۵- استفاده از هر نوع LCM ۶- در صورتی که هرزروی شدید و غیرقابل کنترل باشد از سیمان برای پلاگ کردن و جلوگیری از گم شدن بیش از حد گل استفاده می شود.	LCM های مورد استفاده: ۱- پشم شتر^۳ ۲- پوست گردو^۴ ۳- میکا^۵ ۴- کوئیک سیل^۶

^۱ LCM: Loss Control Mud

^۲ Magneset Cement

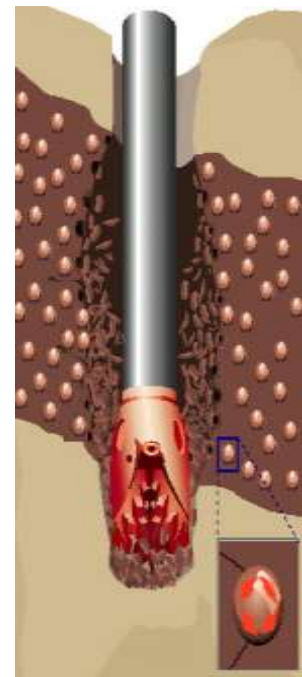
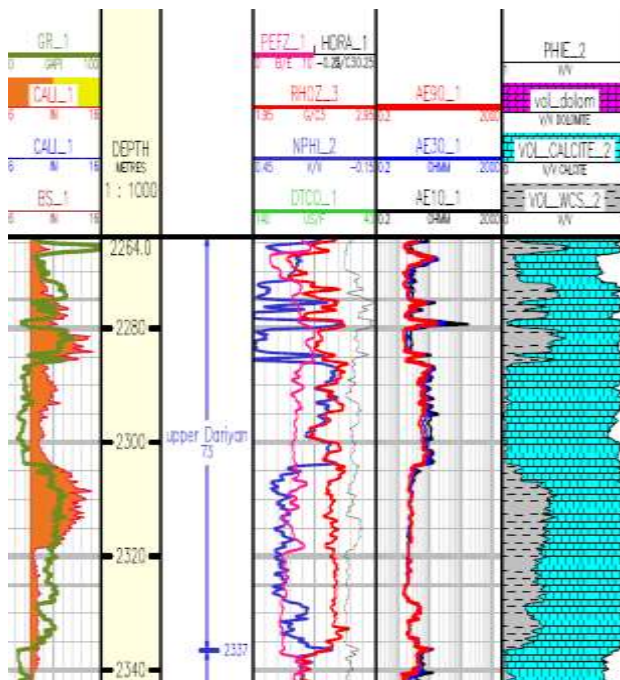
^۳ Fiber Lock

^۴ Walnut Shell

^۵ Mica

^۶ Kwick Seal

با تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی، اندازه مته و نمودار کالیپر می‌توان تأثیر وجود شیل در میدان مورد مطالعه در افق‌های فوقانی سازند داریان را مشاهده کرد. در شکل (۴-۳۷)، شاهد ریزش شیل و ناپایداری چاه هستیم.



شکل (۴-۳۷) نتایج تحلیل و تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در مورد ریزش چاه

۴-۱۰ ارائه یک روش عملیاتی برای گذر از توالی لایه‌های پرفشار:

در چاه مورد مطالعه، حین مطالعه گزارشات مربوط به چاه، متوجه وجود ناپایداری در چاه شدیم به‌طوری که به سبب وجود این ناپایداری مقدار زیادی گل پایه روغنی از دست رفته بود و همچنین به علت وجود فوران و هرزروی گل به‌صورت هم‌زمان مشکل چاه دو چندان شده بود [IOOC Report, (2011)].

بنابراین در طول انجام پروژه بر آن شدیم که یک روش عملیاتی که در یکی از میادین غرب کشور جهت مقابله با ناپایداری‌های چاه انجام می‌شود را ارائه دهیم. در ادامه هزینه‌های گل حفاری پایه

روغنی با هزینه روش پیشنهادی یعنی مقاومسازی دیواره چاه به کمک تزریق سیمان به دیواره چاه، جهت مقابله با ناپایداری چاه در جدول (۴-۱۱) ملاحظه می‌شود.

جدول (۴-۱۲) هزینه‌های سیمان‌کاری و گل حفاری چاه مورد مطالعه [میانجی و همکاران، ۱۳۹۵].

هزینه سیمانکاری		هزینه گل حفاری ^۱ پایه روغنی با وزن ۱۰۲ PCF		
هزینه پمپ تراک	در حالت آماده باش ^۲	افزونه‌های گل	حجم	هزینه
	روزانه ۱۳۰۰ یورو		وزن	
	در حالت کار کرد ^۳			
	روزانه ۲۰۰۰ یورو			
میانگین هزینه هر بشکه سیمان	قیمت هر بشکه سیمان ۸۵ یورو توجه: در هر سیمان کاری ۱۲۰ بشکه سیمان مصرف می شود.	گازوئیل	۵۲۷۵۶/۲ لیتر	هر لیتر ۴۲۰۰۰
هزینه هر بشکه جدا کننده ^۵ شامل محلول اشباع شده نمک با وزن PCFY۵	هر بشکه ۱۱۰۰۰۰ تومان توجه: در هر سیمان کاری ۵۲ بشکه جداکننده استفاده شده است.	کلسیم کلراید	۰/۱ تن	هر تن ۳۰۰۰۰۰
هزینه کل سیمان کاری: (۳۰۰۰*۱۳۰۰)+(۳۰۰۰*۲۰۰۰)+(۱۲۰*۳۰۰۰*۸۵)+(۱۱۰۰۰۰*۵۲)= تومان ۴۶۲۲۰۰۰۰		FLC ^۶	۲۹ کیسه	هر کیسه ۱۰۰۰۰
توجه: قیمت هر یورو ۳۰۰۰ تومان در نظر گرفته شده است		ویسکوسیفر ^۷	۳ کیسه	هر کیسه ۵۰۰۰۰
		املیسیفایر	اولیه	هر درام ۱۰۰۰۰۰
			ثانویه	هر درام ۱۰۰۰۰۰
		باریت لایمستون	۵۰/۳ کیسه بزرگ ^۸	هر کیسه بزرگ ۴۵۰۰۰۰
			هزینه نهایی ۶۰۰ بشکه گل حفاری: تومان ۱۳۷۳۴۷۴۰۰	

^۱ با توجه به اینکه لایه حفاری شده یک لایه مخزنی است، به همین علت جهت افزایش وزن گل علی‌الخصوص گل پایه روغنی، از این نوع ترکیب مواد استفاده می‌شود.

^۲ Stand By

^۳ Working

^۴ واحد تمام قیمت‌ها، تومان است.

^۵ Spacer

^۶ Fluid Loss Control

^۷ Viscosifier

^۸ Big Bag

به سبب پیچیدگی میدان مورد مطالعه و وجود توالی لایه‌های پرفشار و کم فشار، تدابیری جهت حفاری لایه‌های کم فشاری که در فاصله کمی از آن‌ها در اعماق زمین لایه‌های پرفشار قرار دارند در نظر گرفته شده است [میانجی و همکاران، ۱۳۹۵].

در میدان یاد شده در بین سازند آسماری، یک عضو پر فشار به نام آپرکولینا^۱ قرار دارد. برای گذر از لایه پرفشار آپرکولینا، لایه کم فشار فوقانی باید جهت استحکام بخشی بالایی تحت تزریق سیمان قرار می‌گرفت. سپس بعد از مقاوم سازی دیواره چاه تست FIT از سازند مقاوم‌سازی شده گرفته می‌شد. در صورتی که پس از اعمال فشار آرمانی لایه شکسته نمی‌شد لایه مورد نظر یک لایه مقاوم‌سازی شده جهت ادامه حفاری بود [میانجی و همکاران، ۱۳۹۵].

وزن گل در لایه کم فشار برابر ۹۲ PCF است. که فشار هیدرواستاتیکی حاصل از آن در رابطه (۳-۴) محاسبه شده است. برای گذر از لایه پرفشار زیرین لازم است وزنی برابر ۱۳۰ PCF داشته باشیم که مقدار فشار هیدرواستاتیکی حاصل از آن در رابطه (۳-۵) محاسبه شده است. بدیهی است در صورتی که وزن گل در چاه ۹۲ PCF باشد مقدار فشار اعمالی توسط تست FIT باید حاصل اختلاف فشار اعمالی این دو وزن گل برای تست سازند کم فشار اعمال شود [SAED, 2016].

$$P = \frac{92}{144} * 2968 * 3.281 = 6221.5 \text{ (PSI)} \quad (4-12)$$

$$P = \frac{130}{144} * 2968 * 3.281 = 8791.25 \text{ (PSI)} \quad (4-13)$$

$$\Delta P = 8791.25 - 6221.5 = 2569.75 \text{ (PSI)} \quad (4-14)$$

۴-۱۱ ارزیابی اقتصادی روش پیشنهادی

اقتصاد یک علم اجتماعی است که از عمر آن بیش از چند قرن نگذشته است. مسئله اصلی اقتصاد، تخصیص منابع بهینه به همراه ارضاء نیازهای بشری است. اقتصاددانان در جهان هستی به علت اینکه نیازهای بشری نامحدودند و منابع محدود است، به دنبال بهترین راه برای تخصیص منابع

¹ Upper Culina

هستند؛ که این مهم با هزینه به بهترین وجه تبیین می‌شود. بیشتر اوقات در اقتصاد هزینه در پروژه‌های اقتصادی مطرح می‌گردد و هدف اصلی از طرح آن نیز بررسی تخصیص بهینه منابع موجود است [قنادان، ۱۳۸۶].

با توجه به جدول (۴-۱۲)، داده‌های مورد استفاده جهت مقایسه هزینه‌های سیمان‌کاری و گل حفاری برای ارزیابی مقرون به صرفه بودن عملیات مقاوم‌سازی برای جلوگیری از عدم پایداری دیواره چاه، از پنج بازه عمقی که حفاری در آن صورت گرفته، گردآوری شده است که شامل ۹ تست FIT و ۷ بار سیمان‌کاری می‌باشد که با استفاده از توابع هزینه‌های خصوصی مدل‌سازی انجام گرفته است [SAED, 2016].

جدول (۴-۱۳) نتایج سیمان‌کاری و تست FIT [SAED, (2016)].

تعداد دفعات عملیات	زمان انجام عملیات	عمق	عملیات
۱	یک روز	۲۷۹۷	FIT Test
۱	یک روز	۲۸۱۲	FIT Test
۱	دو روز	۲۸۱۲-۲۸۴۰	CMT
۱	یک روز	۲۸۱۲-۲۸۴۰	FIT Test
۲	چهار روز	۲۸۴۰-۲۸۵۶	CMT
۲	دو روز	۲۸۵۶	FIT Test
۴	هشت روز	۲۸۵۶-۲۸۸۶	CMT
۴	چهار روز	۲۸۸۶	FIT Test

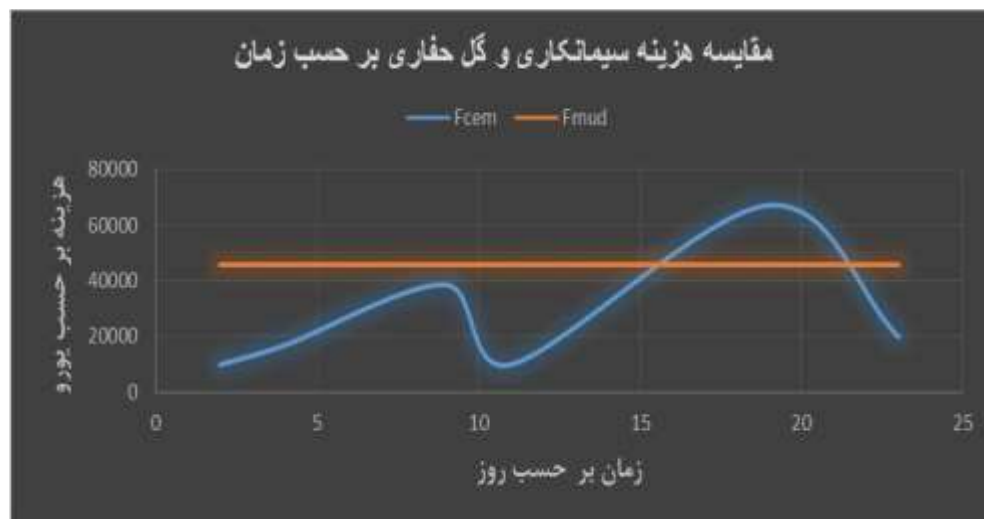
برای تعریف تابع هزینه خصوصی، یک قانون کلی که باعث شود که یک تابع هزینه منحصر به فرد تعریف شود، وجود ندارد، بلکه تنها یک روند کلی وجود دارد. بنابراین ممکن است که افراد مختلف، برای یک مسأله واحد، توابع هزینه متفاوتی تعریف کنند. در واقع فرد باید در مورد نحوه تعریف تابع هزینه، به خوبی فکر کند و یک تابع هزینه مناسب برای مسئله بیابد.

$$F_t = \sum_{i=1}^n (85 B_{\text{cement}}^t + \text{Pomp}_t + \text{FIT}_t) \quad (14-4)$$

$$F_{t \text{ mud}} = \sum_{i=1}^n (f1 + f2 + \dots) \quad (15-4)$$

که F_t هزینه سیمان کاری در زمان t ، B_{cement}^t و Pomp_t و FIT_t به ترتیب، هزینه هر بار سیمان کاری، هزینه پمپ تراک و هزینه تست FIT می باشند. همچنین $F_{t \text{ mud}}$ هزینه گل است که مجموع هزینه چند محصول (گازوئیل، CaCl_2 ، FLC ، باریت و ...) است که مقدار گل پایه روغنی با وزن PCF ۱۰۲ است.

با توجه به داده های سیمان کاری و گل حفاری، توابع هزینه بر اساس زمان تخمین زده شد. بیان این نکته ضروری است که هزینه گل حفاری در کوتاه مدت تقریباً ثابت فرض شد و تنها عاملی که می تواند این هزینه را تغییر دهد، هرزروی گل است. هرزروی گل باعث تشدید هزینه ها شده و کل سیال مورد استفاده در عملیات حفاری را از بین می برد. با توجه به مطالب بالا و توابع، نمودار زیر برای یک ماه حفاری استخراج شد [علی میانجی و همکاران، ۱۳۹۵]



شکل (۳۸-۴) مقایسه هزینه سیمان کاری و گل حفاری بر حسب زمان

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱ نتایج

۱- سازند داریان از دو قسمت داریان بالایی و داریان پایینی تشکیل شده است به طوری که داریان بالایی جنس سنگ شیلی- آهکی و داریان پایینی جنس سنگ غالب آهکی دارد. با توجه به اندازه مته و نمودار کالیپر در افق‌های بالایی این سازند که شیلی هستند، ریزش در دیواره چاه مشاهده می‌شود. در حالی که این ریزش در افق‌های پایین‌تر مشاهده نمی‌شود. همچنین پنجره گل در افق شیلی کوچک‌تر شده و در بازه $10/9 \text{ ppg}$ تا $12/06 \text{ ppg}$ است. در حالی که در افق‌های آهکی همین سازند، حد پایین و بالای پنجره گل به ترتیب در بازه $9/5 \text{ ppg}$ تا $14/5 \text{ ppg}$ است.

۲- سازند گدوان جنس سنگ غالب آهکی - شیلی دارد که متشکل از گدوان بالایی و پایینی است. عضو آهکی خلیج، با جنس سنگ متفاوت آهکی به عنوان لایه راهنما در بین بخش بالایی و پایینی قرار گرفته است. با توجه به تفسیر انجام شده و مقادیر نمودار کالیپر، ریزش در این سازند مشاهده نمی‌شود. بزرگترین پنجره گل متعلق به عضو آهکی خلیج است که $9/5 \text{ ppg}$ تا $14/2 \text{ ppg}$ است؛ در حالی که طبق نتایج باید در لایه‌های شیلی، وزن گل را با احتیاط کم یا زیاد کرد. زیرا پنجره گل کوچک است و وزن گل از $11/7 \text{ ppg}$ تا $12/3 \text{ ppg}$ متغیر است.

۳- سازند رتاوی دارای جنس سنگ آهکی با شیل زیاد است. از طرفی در بازه 2608 تا 2628 متری با توجه به عدم همپوشانی سه نگار الکتریکی با بُرد دور، متوسط و کوتاه، این قسمت به عنوان یک بازه عمقی مستعد و یک کاندید برای وجود هیدروکربن است. همچنین در این سازند ریزش قابل توجه مشاهده نمی‌شود. پنجره گل در این سازند از 10 ppg تا $12/8 \text{ ppg}$ است. پنجره گل تقریباً در کل سازند ثابت است.

۴- سازند فهلین اغلب دارای لیتوژی آهکی با مقدار کمی شیل است. در طول سازند فهلین با مطالعه مقادیر نمودار کالیپر و با در نظر داشتن اندازه مته حفاری، ریزش در دیواره چاه مشاهده نمی‌شود. پنجره گل در سازند داریان نسبت به سازند رتاوی بزرگتر است، حد پایین و بالای آن به ترتیب $9/8 \text{ ppg}$ و $15/4 \text{ ppg}$ است.

۵- نتایج مربوط به فشار منفذی که از نمودار الکتریکی حاصل شده بود بسیار بیشتر از مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده با نمودار صوتی است. فشار تخمین زده شده توسط نمودار الکتریکی در طول چاه از ۱۰۰۰۰ psi تا ۱۴۵۰۰ psi تغییر می کرد. در حالی که نتیجه حاصل از نمودار صوتی به واقعیت نزدیک تر بود و در طول چاه از ۳۲۲۲ psi تا ۴۵۰۰ psi تغییر می یافت.

۶- با روش استاتیکی، ضمن این که پارامترهای ژئومکانیکی فقط به صورت نقطه ای محاسبه می شوند و اغلب اوقات مغزه های گرفته شده از چاه، تحت تأثیر تنش های القایی ناشی از مغزه قرار می گیرند؛ همین عامل باعث می شود پارامترهای محاسبه شده از اعتبار کافی برخوردار نشوند. این در حالی است که برخلاف آن در روش دینامیکی این پارامترها را به صورت یک پروفیل در طول چاه می توان محاسبه کرد.

۷- مطالعات در میادین غربی (واقع در خشکی) و جنوب (میادین فراساحلی) ایران نشان داد در بسیاری از چاه ها عدم رعایت حد بالای پنجره گل موجب شکست کششی و هرزروی گل شده است. مشکل اساسی پس از هرزروی گل، چسبیدن لوله حفاری به دیواره چاه به علت تفاوت فشار در دیواره چاه است. همچنین در صورت هرزروی بیش از حد سیال حفاری، چاه در مرحله تولید نیز مشکل خواهد شد.

۵-۲ پیشنهادات

۱- در نتیجه مقایسه داده‌های MDT با نتایج حاصل از داده‌های نمودارهای صوتی و الکتریکی برای تخمین فشار منفذی، پیشنهاد می‌گردد در صورت وجود داده‌های نمودار صوتی و الکتریکی از داده‌های سرعت موج تراکمی به کمک روابط ایتون برای تخمین فشار منفذی استفاده گردد.

۲- پژوهش‌های میدانی در واحدهای عملیات و ناظر عملیات، چند میدان نفتی نشان داد، سیمان‌کاری دیواره چاه و انجام تست FIT، به منظور اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ، یکی از بهترین روش‌ها برای جداسازی دو لایه کم‌فشار و پرفشار است که به‌صورت متوالی قرار دارند. در این صورت از هزینه‌های نصب لاینر در چاه کاسته می‌شود و مانند مطالعه موردی دیواره چاه دچار شکست کششی نمی‌شود.

۳- کمترین مقدار هزینه در سیمان‌کاری در روش ذکر شده، زمان گرفتن تست FIT می‌باشد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که روش سیمان‌کاری با دقت بیشتر انجام شود چون در صورت هرزروی گل، زمان و هزینه زیادی از دست می‌رود. همچنین در اعمال تست FIT برای انتخاب فشار مورد نظر دقت صورت گیرد.

۴- با توجه به نمودار کالیپر و اندازه مته در بخشی از دیواره چاه در بازه عمقی ۲۳۰۰ تا ۲۳۲۰ متری، که به علت وجود شیل، ریزش در دیواره چاه مشاهده شده بود، حفاری سریع در این بخش برای جلوگیری از جذب بیش از حد آب (Water loss) و استفاده از ماده‌های پلیمری همچون زانتانگام و نشاسته می‌تواند جهت پایدارسازی دیواره چاه مؤثر باشد.

۵- از روش‌های تجربی عملیاتی نیز می‌توان به افزایش RPM در مقابل کاهش وزن روی مته (WOB) اشاره کرد. این روش‌های تجربی عملیاتی به صورت توأم با انتخاب مناسب مته جهت حفاری در شیل یعنی مته Rock Bit پیشنهاد می‌شود. در صورتی که افزایش وزن روی مته را به جای افزایش RPM داشته باشیم، حتی می‌تواند باعث گیرکردن لوله‌ها (Stuck) در شیل‌ها شود.

۶- در چاه مطالعاتی افزایش ناگهانی وزن گل برای پیشگیری از فوران، موجب شکست کششی و هرزروی به‌طور کامل (Complete loss) شد. به این ترتیب در مرحله اول افزایش وزن گل جهت جلوگیری از فوران روش مناسبی به حساب نمی‌آید. در این شرایط پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از فوران چاه به جای حفاری با وزن گل بالا به‌صورت فراتعادلی از حفاری فروتعادلی استفاده شود. به عبارتی در صورتی که با لایه پرفشار در افق پایین‌تر مواجه هستیم، افزایش GPM جهت افزایش فشار ته چاه برای جلوگیری از فوران و استفاده از جریان درون چاه جهت تمیزکاری چاه می‌توان استفاده نمود.

پیوست ۱: تعیین وزن مخصوص و گرانیروی گل حفاری

وزن مخصوص

همان‌طور که در شکل پ-۱ ملاحظه می‌شود یک ترازوی گل شامل: یک پایه، بازوی مدرج، یک فنجان، یک سرپوش، شاخص نوک تیز و وزنه مخصوص که می‌توان وزن مخصوص مایعات را با آن اندازه‌گیری نمود، می‌باشد. ترازو می‌بایست به‌طور مستمر تمیز شده و بعد از چندین آزمایش به وسیله آب مقطر دقت آن را آزمایش کرد [KMC Oiltools, 2006].



شکل پ-۱: وزن‌گیری گل حفاری با ترازوی مخصوص

ویسکوزیته یا گرانیروی (قیف مارش)

قیف مخصوص اندازه‌گیری گرانیروی (شکل پ-۲): قطر آن در بالا شش اینچ (۱۵/۲۴ سانتیمتر) و درازا در حدود دوازده اینچ (۳۰/۴۸ سانتیمتر) است؛ که نصف دایره بالایی قیف به وسیله توری فلزی (۱۰۰ سوراخ در هر اینچ مربع) *TEN-MESH* پوشانده شده است. این وسیله به‌طور مقایسه‌ای گرانیروی

را نشان می‌دهد و مشخص‌کننده گرانیروی واقعی گل نیست. نتایج به‌دست آمده به مقدار وسیعی تحت تأثیر سرعت ماسیدن و وزن مخصوص گل (شکل پ-۳) قرار می‌گیرد [KMC Oiltools, 2006].



شکل پ-۲: قیف مارش



شکل پ-۳: وزن گل حفاری واقعی در چاه مورد مطالعه

منابع:

- آقائباتی ، سید علی (۱۳۸۵) زمین شناسی ایران ، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور .
- زینلی حسنونند م.، هاشمی ا.، شکراله زاده س.، فراهانی ماستری ن.، (۱۳۹۲)، عوامل موثر بر مهاجرت سیال و تولید بهینه از میادین مشترک به همراه تخمین میزان گاز مهاجرت کرده در میدان پارس جنوبی، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۳(۱۰۳)، ۴۴-۴۹.
- کریمی، ا. ، طباطبایی نژاد، س. ع. و خاقانی جوقانی، ش. (۱۳۹۳)، اولین همایش ملی توسعه میادین نفت و گاز تهران دانشگاه صنعتی شریف.
- طاهری فرد ع.، اخوان م.، برامکی ح.، قاسم نژاد م.، نوراحمدی م.، (۱۳۹۱)، نقش میادین فراساحل در عرضه نفت و گاز جهان، ماهنامه اکتشاف و تولید، ۹۸، ۱۴-۲۰.
- قنادان، م. (۱۳۸۶)، کلیات علم اقتصاد، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- میانجی، ع. ، کامکار روحانی، ا. ، کدخدایی، ع. ، ارباب، ب.، رسول نژاد، ع. ، (۱۳۹۵)، دومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران
- Aadnoy, B.S. & Chenevert, M.E., (1987), *Stability of highly inclined boreholes.*, SPE Drill. Eng., pp. 364– 374.
- Aadnoy, B. & Belayneh, M., (2004), *Elasto-plastic fracturing model for wellbore stability using non-penetrating fluids.*, Journal of Petroleum Science and Engineerin 45:179-192.
- Addis, M.A. & Barton, N.R., (1990) *Laboratory studies on the stability of vertical and deviated boreholes.*, Tech. Conf. and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans.
- Al-Ajmi, A.M., (2006), *Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure Criterion*, University of KTH, Oklahoma, PhD. Thesis.
- Al-Ajmi AM., & Zimmerman RW., (2006), *Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criteria.*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43(8): 1200–1211.
- Amoco, (2005), *Wellbore Stability, Drilling Hand Book*, Austin Texas.

- Alavi, M., (2004). *Regional stratigraphy the Zagros Fold-Thrust belt of IRAN and its proforeland Evolution.*
- *Applied Drilling Engineering.*, (1983), Society of Petroleum Engineers, First printin United States Of America
- Baker Hughes., (2006), *Drilling fluids Reference Manual.*
- Barton, C. A., Zoback, M. D. & Moos, D. (1995). *Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 23, 683–686.
- Baumgartner, J. & Rumnel, F. (1990). *Hydraulic fracturing in situ stress measurements to 3Km, depth in the KTB pilot hole VB. A summary of A preliminary data evaluation. In KTB Report, 69-90, 353-400.*
- Bell, J. S. (1996). *Petro Geoscience In situ stresses in sedimentary rocks (part 1): measurement techniques. Geoscience Canada* 23, 85-100.
- Birchwood, R., Noeth, S., & Hooyman, P., (2005), *Wellbore Stability Model for Marine Sediments Containing Gas Hydrates.*, Schlumberger Data and Consulting Services, Houston, Texas.
- Bradford, I.D.R, Fuller, J. & Walsgrove T.R., (1998), *Benefits of assessing the solids production elastoplastic modeling, Society of Petroleum Engineers, Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim: Norway.*
- Brudy, M. & Kjorholt, H., (2001), *Stress orientation on the Norwegian continental shelf derived from borehole failures observed in high-resolution borehole imaging logs., Tectonophysics, 337: 65–84.*
- Carnegie, A., Thomas, M., Efrink, M. S., Hamawi, M., Akbar, M. & Burton, M. (2000). *An advanced method of determining in situ reservoir stresses: wireline conveyed micro-fracturing SPE 78486, At 10th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference.*
- Cornet, F. H., Doan, M. L. & Fontbonne, F. (2003). *Electrical imaging and hydraulic testing for a complete stress determination. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 1225-1241.
- Dehghan Shibany B., Afzalian A., (2003), *A Fuzzy Logic System for Fault Diagnosis in Electrical Power Substations.*, 5th Conference on Intelligent Systems, Ferdousi University of Mashhad
- Detournay, C. & Chen, X., (2005), *Factors governing mud filtration and impact on wellbore stability.*, 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- Drillscan Company presentation, (2016), *introduce new tools for drillscane, PetroPars Company, Tehran: Farhang blvd.*

- Ekstrom, M. P., Dahan, D. & Rossi, D. (1987). *Formation Imaging with Microelectrical Scanning Arrays*. Log Analyst, No. 3, 28 Jun, 294-306.
- Economides, M. J. & Nolte, K. G. (2000). *Reservoir stimulation*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Edwards, S. T., Bratton, T. R. & Standifird, W. B. (2002). *Accidental geomechanics-capturing in-situ stress from mud losses encountered while drilling*. SPE/ISRM 78205, In Rock Mechanics Conference, Texas.
- Ewy R. (1999), *Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion.*, SPE Drill Completion,14:85–91.
- Fairhurst, C. (2003). *Stress estimation in rock: a brief history and review*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 957-973.
- Falcao Jose L., Carlos F. Fonseca, Petrobras S.A, (2000), *Underbalanced Horizontal Drilling: A Field Study of Wellbore Stability in Brazil.*, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 16-18.
- Ghazban, F., 2007. *Petroleum Geology of the Persian Gulf*. Tehran University & National Iranian Oil.
- Grandi, S., . Rao, R., & Toksoz, M. N., (2002), *Geomechanical modeling of in-situ stresses around aBorehole.*, Earth Resources Laboratory Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology Cambridge.
- Haimson, B. & Fairhurst, C. (1970). *In situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing*. In 11th Symposium on Rock Mechanics, Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 559-584.
- Haimson, B. & Herrick, C. G. (1989). *Borehole breakouts and in situ stress*. 12th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, Houston,Texas.
- Helstrup, A., Chen, Z., & Rahman, S., (2004), *Time-dependent wellbore instability and ballooning in naturally fractured formations.*, School of Petroleum Engineering, University of New South Wales, Sydney: Australia.
- Hubbert, M. & Willis, D. (1957). *Mechanical of hydraulic fracturing*. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 210, 153-168.
- Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2011), *Geology Well Logging (GWL)*.
- Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2011), *Daily Drilling Report (DDR)*, Rig Name: DD5, Persian Gulf: Iran.
- Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2014), *Reservoir Geological Report Of Dariyan Formation*, Tehran: Iran.

- *Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2014), Reservoir Geological Report Of Gadvan Formation, Tehran: Iran.*
- *Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2014), Reservoir Geological Report Of Yamama Formation, Tehran: Iran*
- *Iranian Offshore Oil Company(IOOC), (2015), Wellbore Stability Analysis Report, Tehran: Iran.*
- *John A. Hudson, John P. Harrison, (2000), Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles., Mining Technology & Engineering Elsevier Science Ltd.*
- *Jose L. Falcao, Carlos F. Fonseca & Petrobras S.A, (2000), Underbalanced Horizontal Drilling: A Field Study of Wellbore Stability in Brazil., SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, pp, 16-18.*
- *Kassler, P., (1973). The Structural and Geomorphic evolution of the Persian Gulf In the Purser, B. H(ed)., The Persian Gulf Holocene carbonate sedimentation and diagenesis in a epicontinental sea, New York, Springer-Verlag 471p.*
- *KMC Oiltools, (2006), Drilling fluid engineering manual.*
- *Maleki, S., Gholami, R., Rasouli, V. & Moradzadeh, A. (2014), Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice., Earth Sci. Rev., 136: 36-58.*
- *Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. (2009). The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media: Cambridge University Press, 524.*
- *McLellan, P.J. & Hawkes, C.D, (2002), Comparison of Methods for Modeling Borehole Instability and Its Consequences.*
- *Moos, D., Peska, P, Finkbeiner, T., & Zoback, M. (2003), Comprehensive wellbore stability analysis utilizing Quantitative Risk Assessment., GeoMechanics International, , USA, Stanford University, Stanford: USA.*
- *Morales R.H. & Marcinew R.P. (1993), Fracturing of High-Permeability Formation: Mechanical Properties Correlations, Annual Technical Conference And Exhibition, Houston: Texas.*
- *Onyia, E. C. (1988). Relationships between formation strength, drilling strength and electric log properties. SPE 18166.*
- *Parra, J.G., Celis, E., & De Gennaro S., (2003), Wellbore Stability Simulations for Underbalanced Drilling Operations in Highly Depleted Reservoirs, SPE Drilling & Completion, 18(02).*
- *Pasic, B., (2007), Wellbore instability: causes And consequences, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, pp, 87-92.*

- Pawel, A., Nawrocki, M., Dusseault, B., Rolf, K., (1998), *Use of uniaxial compression test results in stress modelling around openings in nonlinear geomaterials.*, Porous Media Research Institute, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1 Saga Petroleum, Sandvika N-1301, Norway.
- Rahim, Z., Al-Qahtani, Y., Bartok, K. M., Hilarides, W. K. & Norman, W. D. (2003). *The role of geomechanical earth modeling in the unconsolidated pre- khuff field completion design for Saudi Arabian gas wells.* At SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Colorado.
- Rahman, M. M., Rahman, M. K. & Rahman, S. S. (2002). *Multivariate fracture treatment optimization for enhanced gas production from tight reservoirs.* In SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada.
- Reynolds, S. D., Mildren, S. D., Hillis, R. R. & Meyer, J. J. (2006). *Constraining stress magnitudes using petroleum exploration data in the Cooper–Eromanga Basins, Australia.* Tectonophysics 415, 123-140.
- Rezaee, M. R., Kadkhodaie Ilkhchi, A. & Barabadi, A. (2007). *Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia.* Journal of Petroleum Science and Engineering 55, 201-212.
- Santarelli, F.J., Brown, E.T. & Maury, V., (2000), *Analysis of borehole stresses using pressure*, International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences & Geomechanics, 23(6),PP,445-449.
- SAED, (2016), *Daily Drilling Report (DDR)*.
- Serra, O., (2008), *The Well Logging Handbook.*, Journal of African Earth Sciences, 53 (3), pp,137.
- Tare, U.A. & Mody, F.K., (1999), *Novel Approach to Borehole Stability Modeling for ERD and Deepwater Drilling.*, SPE Mid-Continent Operations Symposium, pp, 28-31.
- The Thechlog,[Computer Software], (2015.3), :Schlumberger.
- Tingay, M. R. P., Hillis, R. R., Morley, C. K., King, R. C., Swarbrick, E. & Damit, A. R. (2009), *Present-day stress and neotectonics of Brunei: implications for petroleum exploration and production.* American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 93, 75-100.
- Torres, M. E., Gonzalez, A. J. & Last, N. C. (2003). *In-situ stress state eastern Cordillera Colombia.* SPE 81074. In SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, West Indies.
- Voggenauer, M. (2008). *Electrical borhole imaging using startrak high definition tools.* SPE Technical meeting 30th July.

- Yongfeng Kang, Mengjiao Yu, Stefan Miska, Nicholas E. Takach, (2009), *Wellbore Stability: A Critical Review and Introduction to DEM.*, SPE, University of Tulsa Society of Petroleum Engineers.
- Zhang, J. (2011). *Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches.* *Earth-Science Reviews* 108, 50-63.
- Zoback, M. D. (2007). *Reservoir geomechanics.* New York, USA: Cambridge University Press, 449.
- Zoback, M.D., Barton C.A, Burdy M. Castillo, Finkbeiner T., Grollmund B.R. Moos D.B., Peska P. Ward C.D. & Wiprut D.J., (2003), *Determination of stress orientation and magnitude in deep wells,* *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(7), pp, 1049–1076.

Abstract

Fluid loss, the leakage of the liquid phase of drilling fluid, is one of the main issues that is encountered in drilling operations, and it is often quite challenging to deal with. It often imposes great expenses to the operation process. Factors such as non-optimal safe mud window, lack of appropriate drilling plans, not optimal designing of the process parameters and wellbore instability might contribute to the occurrence of fluid loss during the operation. This phenomenon of fluid loss might cost millions of dollars due to not only the excessive fluid consumed during the drilling operation but also the inefficient function of the drilling rig. In this study, wellbore instability, as one of the contributing parameters to fluid loss, is analyzed and its influence on the phenomenon is evaluated using data obtained from a hydrocarbon field located in south of Iran. For this purpose, first, petrophysical logs acquired from the well are thoroughly studied and interpreted in order to attain a comprehensive view of the well lithology. The analysis and interpretation of the petrophysical logs are validated by the associated core reports from Offshore Oil Company. The results have indicated a good agreement between interpretation results of the petrophysical logs and core reports. Thereafter, using acoustic and other petrophysical logs, geomechanical parameters such as Young's modulus, bulk modulus and shear modulus have been determined. It is worth mentioning that due to the lack of some required information including the horizontal stress and principal horizontal strain, data from the nearby wells and also poro-elastic equation was also used in the calculations. After considering all the assumptions and determining all the necessary information, the safe mud window is presented for the examined well. Furthermore, because of the significant effects of the shale on the mud window observed at the depths of 2314.96 and 2400 meters, such behaviors have also been investigated in the current research. It has also been found that the well considered in this study suffers from the tensile failure and mud loss phenomenon largely due to the excess mud weight and negligence of safe mud window which consequently has led to the increase of operational costs. Finally, an effective methodology to control well conditions and to keep optimal functionality and to prevent any unnecessary future expenditures, which might occur, is studied.

Key words: Well instability, Carbonate-shale horizons, Drilling cost, Economic model



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Exploration

***Borehole stability analysis and mud window determination in carbonate - shale reservoir
in one of the hydrocarbon fields in south of Iran using petrophysical logs***

By: Ali miyanaji

Supervisors:
Dr. Abolghasim Kamkar Rouhani
Dr. Ali Kadkhodaie

Industrial Advisor:
Bitra Arbab

July 2017