

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن – گرایش مکانیک سنگ

ارزیابی پایداری دیواره چاه و تعیین وزن گل جهت تعیین راستای بهینه چاه
بر اساس مدل سازی سه بعدی ژئومکانیکی در مخزن آسماری میدان لالی

دانشجو:

مهدی علامه

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان زاده

اساتید مشاور

دکتر بهزاد تخمچی

مهندس حسن شجاعی

بهمن ماه ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجددا توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

صدا فرشته بوسه بر آن دست می زند

کز کار خلق یک کره بسته واکند

پاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشد تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در

حل مشکلاتشان یاری شان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم نوحان را مقدم دارد، با او معامله

کند و در این خلوص انباز نکیر و خوش باشد که پروردگار سمیع و بصیر است.

پاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از پیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام

مراحل زندگیم مراقبت قلب بود.

تشکر و قدردانی

اکنون که با یاری و لطف خداوند و دعای خیر خانواده عزیزم، نگارش این پایان نامه به اتمام رسید، بر خود لازم می دانم که از زحمات اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده و جناب آقای دکتر بهزاد تخمچی که در تمامی مراحل این پژوهش با سعه صدر و بردباری نهایت تلاش خود را جهت ارتقا سطح علمی بنده به عمل آورده اند کمال تشکر را داشته باشم. همچنین از زحمات بی شائبه جناب آقای مهندس حسن شجاعی مشاور صنعتی بنده در شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب که نقش بسیار پررنگ و فعالی در تأمین داده های مورد نیاز جهت پیشبرد اهداف پژوهش داشته اند نیز، تقدیر و تشکر به عمل آورم. این پایان نامه با همکاری شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب انجام شده است. ضروری است تا از مدیریت محترم واحد پژوهش و فناوری این شرکت و نیز کارگروه ژئومکانیک و زمین شناسی به دلیل هماهنگی های به عمل آمده در تعریف پروژه و در اختیار قرار دادن داده های مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی به عمل آید.

تهدنامه

اینجانب مهدی علامه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن – مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی پایداری دیواره چاه و تعیین وزن گل جهت تعیین راستای بهینه چاه بر اساس مدلسازی ژئومکانیکی در مخزن آسماری میدان لالی تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 بافت های آن ها) 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

هدف از این پژوهش، ارزیابی پایداری چاه‌های مورد مطالعه در میدان لالی و فراهم‌سازی امکان انتخاب راستای حفاری مناسب و کاهش مشکلات و هزینه‌های مربوط به آن است. برای رسیدن به این هدف، باید وضعیت عواملی از جمله شرایط تنش، عوامل تکتونیکی و پارامترهای ژئومکانیکی و مشخصات فیزیکی سنگ مخزن ارزیابی گردند. در این پایان‌نامه ابتدا مطالعات مربوطه درخصوص ملاحظات ژئومکانیکی ارزیابی پایداری چاه انجام می‌شود. سپس داده‌های مورد نظر در میدان لالی جمع‌آوری و بر اساس آن‌ها مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی چاه‌های مورد نظر ساخته شده است. در ادامه مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی برای بخشی از مخزن آسماری میدان لالی توسعه داده شده است تا به کمک آن ناهمسانگردی توزیع تنش‌های موثر و ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه مورد ارزیابی قرار گیرند. ساخت مدل ساختاری سه‌بعدی، شبکه‌بندی، درشت‌نمایی مقیاس داده‌ها و درنهایت گسترش پارامترهای بدست آمده از مدل های ژئومکانیکی یک‌بعدی در بخشی از مخزن آسماری از جمله مراحل است که برای مدل‌سازی ژئومکانیکی سه‌بعدی انجام شده است. براساس بررسی‌های مدل ژئومکانیکی ساخته شده، علت ناپایداری در چاه‌های مورد مطالعه انتخاب وزن گل نامناسب تشخیص داده شد. زیرا فشار سیال استفاده شده برای حفاری در چاه‌های ناپایدار پایین و نزدیک به فشار گل بحرانی بود. بنابراین با تغییرات اندکی، این فشار از بازه پنجره ایمن گل خارج شده و وضعیت دیواره چاه به گسیختگی نزدیک می‌گردید. بر اساس مدل ژئومکانیکی، عرض پنجره ایمن گل حفاری با حرکت به سمت مرکز مخزن آسماری کاهش می‌یابد. این روند در سایر زون‌های مخزن آسماری مشاهده شد. بنابراین در این مناطق باید وزن گل به دقت انتخاب شود. زون‌های ۷ و ۶ آسماری به ترتیب با میانگین ۲۲.۹۵ و ۳۲.۹۲ مگاپاسکال کمترین عرض پنجره ایمن گل را در مخزن دارند. در ادامه با توجه به نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی، راستای مناسب جهت حفر چاه در مخزن آسماری میدان لالی مشخص می‌شود. از آنجایی که شرایط تنش در میدان لالی که به صورت گسل معکوس تا امتداد لغز بدست آمد، راستای حفاری جهت کاهش ناپایداری، راستای تنش افقی حداکثر معرفی شد.

کلمات کلیدی: مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، پنجره ایمن گل، ناپایداری چاه، معیار شکست، سیستم استنتاج عصبی-فازی، میدان لالی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

فهرست مطالب

و	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ اهداف تحقیق.....
۴	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق.....
۴	۴-۱ روش تحقیق.....
۵	۵-۱ ساختار پایان نامه.....
۷	فصل ۲: مروری بر مبانی تحقیق و معرفی مدل سازی ژئومکانیکی
۸	۱-۲ مقدمه.....
۸	۲-۲ پایداری چاه.....
۹	۳-۲ انواع ناپایداری چاه.....
۹	۱-۳-۲ ناپایداری شیمیایی.....
۹	۲-۳-۲ ناپایداری مکانیکی.....
۱۰	۴-۲ عوامل قابل کنترل.....
۱۱	۱-۴-۲ وزن گل حفاری (فشار گل حفاری).....
۱۲	۲-۴-۲ شیب و امتداد چاه.....
۱۲	۳-۴-۲ لرزش لوله ی حفاری.....

- ۴-۴-۲ دمای سیال حفاری..... ۱۳
- ۵-۲ عوامل غیرقابل کنترل..... ۱۳
- ۱-۵-۲ درزه‌داری و سازند گسل خورده..... ۱۳
- ۲-۵-۲ سازندهای فعال تکتونیکی..... ۱۴
- ۳-۵-۲ سازندهای تحکیم نیافته و دانه‌ای..... ۱۵
- ۶-۲ کاربرد معیارهای شکست در ارزیابی پایداری چاه..... ۱۶
- ۷-۲ روش‌های ارزیابی پایداری چاه..... ۱۷
- ۸-۲ مدل ژئومکانیکی..... ۱۸
- ۱-۸-۲ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی..... ۲۰
- ۲-۸-۲ مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی..... ۲۱
- ۹-۲ مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی..... ۲۲
- ۱-۹-۲ جمع آوری داده‌ها..... ۲۲
- ۲-۹-۲ آزمایش ژئومکانیکی بر روی مغزه..... ۲۴
- ۳-۹-۲ تعیین سرعت موج برشی..... ۲۵
- ۴-۹-۲ تعیین پارامترهای الاستیک سنگ..... ۲۶
- ۵-۹-۲ تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ..... ۲۸
- ۶-۹-۲ وضعیت تنش برجا..... ۲۹
- ۷-۹-۲ مدل ساختاری..... ۳۲
- ۸-۹-۲ شبکه‌بندی مدل ساختاری..... ۳۳
- ۹-۹-۲ درشت‌نمایی مقیاس..... ۳۳
- ۱۰-۹-۲ انتخاب روش مناسب تخمین پارامترهای ژئومکانیکی..... ۳۴
- ۱۱-۹-۲ روش‌های زمین آماری..... ۳۵

۳۷.....	۱۲-۹-۲ وارون سازی داده های لرزه ای.....
۳۸.....	۱۳-۹-۲ روش های مبتنی بر هوش مصنوعی.....
۳۸.....	۱۴-۹-۲ روش های ترکیب اطلاعات.....
۳۹.....	۱۰-۲ جمع بندی.....
۴۱	فصل ۳: پیشینه مطالعات مدل سازی های ژئومکانیکی
۴۲.....	۱-۳ مقدمه.....
۴۲.....	۲-۳ پیشینه مدل ژئومکانیکی.....
۴۳.....	۳-۳ مروری بر مطالعات مدل های ژئومکانیکی.....
۵۴.....	۴-۳ مروری بر مطالعات مدل سازی ژئومکانیکی در ایران.....
۵۶.....	۵-۳ جمع بندی.....
۵۷	فصل ۴: معرفی میدان لالی و ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی
۵۸.....	۱-۴ مقدمه.....
۵۸.....	۲-۴ معرفی میدان لالی.....
۶۰.....	۱-۲-۴ وضعیت ساختمانی میدان لالی.....
۶۱.....	۲-۲-۴ زون بندی میدان مخزن آسماری در میدان لالی.....
۶۴.....	۳-۴ ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی.....
۶۴.....	۴-۴ جمع آوری داده های مورد نیاز.....
۶۵.....	۵-۴ پردازش داده های ورودی.....
۶۷.....	۶-۴ تخمین سرعت موج برشی در سنگ.....
۶۹.....	۱-۶-۴ تخمین موج برشی به کمک سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار.....
۷۹.....	۷-۴ محاسبه خواص الاستیک سنگ.....

- ۸-۴ پارامترهای مقاومتی سنگ..... ۸۰
- ۱-۸-۴ مقاومت فشاری تک محوری..... ۸۱
- ۲-۸-۴ مقاومت کششی سنگ..... ۸۲
- ۳-۸-۴ زاویه اصطکاک داخلی سنگ..... ۸۲
- ۴-۸-۴ چسبندگی سنگ..... ۸۲
- ۹-۴ فشار منفذی..... ۸۵
- ۱۰-۴ وضعیت تنش میدان..... ۸۵
- ۱-۱۰-۴ تنش قائم..... ۸۷
- ۲-۱۰-۴ محاسبه تنش‌های افقی حداقل و حداکثر..... ۸۸
- ۱۱-۴ انتخاب معیار شکست..... ۸۹
- ۱۲-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی..... ۹۰
- ۱۳-۴ جمع‌بندی..... ۱۰۵

فصل ۵: ارزیابی پایداری چاه و تعیین وزن گل بر اساس مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی ۱۰۷

- ۱-۵ مقدمه..... ۱۰۸
- ۲-۵ زمین آمار..... ۱۰۸
- ۳-۵ معرفی نرم‌افزار پترل..... ۱۰۹
- ۴-۵ وارد کردن داده‌های اولیه..... ۱۱۰
- ۵-۵ ساخت مدل ساختاری و شبکه‌بندی..... ۱۱۲
- ۶-۵ درشت‌نمایی داده‌ها در مدل ساخته شده..... ۱۱۶
- ۱-۶-۵ میانگین عددی..... ۱۱۷
- ۲-۶-۵ میانگین هارمونیک..... ۱۱۷
- ۳-۶-۵ میانگین هندسی..... ۱۱۷

- ۷-۵ واریوگرافی و پردازش داده‌ها..... ۱۱۹
- ۸-۵ روش‌های مدل‌سازی ویژگی‌ها..... ۱۲۰
- ۹-۵ مدل‌سازی پارامترها ژئومکانیکی..... ۱۲۱
- ۱۰-۵ تخمین وضعیت تنش میدان لالی..... ۱۲۹
- ۱۱-۵ ارزیابی پایداری دیواره چاه و تعیین وزن گل..... ۱۳۳
- ۱۲-۵ بهینه‌سازی مسیر حفاری در مخزن..... ۱۴۵
- ۱۳-۵ جمع بندی..... ۱۴۷

فصل ۶: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۱۴۹

- ۱-۶ جمع بندی و نتایج..... ۱۵۰
- ۲-۶ پیشنهادات..... ۱۵۳

مراجع ۱۵۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ عوامل موثر در ناپایداری چاه..... ۱۰
- جدول ۲-۲ داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی..... ۲۴
- جدول ۳-۲ روابط تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی..... ۲۸
- جدول ۴-۲ روابط محاسبه مقاومت فشاری تک محوری..... ۲۹
- جدول ۱-۳ برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در نقاط مختلف دنیا..... ۵۱
- جدول ۱-۴ داده‌های جمع‌آوری شده از میدان لالی..... ۶۵
- جدول ۲-۴ روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه سرعت موج برشی..... ۶۸
- جدول ۳-۴ بررسی همبستگی پارامترهای پتروفیزیکی با DTS..... ۷۵
- جدول ۱-۵ عرض پنجره ایمن گل در زون‌های مخزن آسماری میدان لالی..... ۱۴۴
- جدول ۲-۵ خصوصیات ژئومکانیکی استخراج شده برای چاه جدید در سه عمق مختلف..... ۱۴۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ تاثیر وزن گل حفاری بر تنش‌های القایی دیواره چاه..... ۱۲
- شکل ۲-۲ حفاری در سازندهای درزه‌دار و گسل خورده..... ۱۴
- شکل ۳-۲ حفاری در سازندهای فعال تکتونیکی..... ۱۵
- شکل ۴-۲ حفاری در سازندهای نامنسجم..... ۱۶
- شکل ۵-۲ شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری..... ۱۶
- شکل ۶-۲ روش‌های پیش‌بینی ناپایداری چاه..... ۱۸
- شکل ۷-۲ شماتیک مسائل متعدد ژئومکانیکی..... ۲۰
- شکل ۸-۲ داده‌های مورد نیاز در مطالعات ژئومکانیکی..... ۲۳
- شکل ۹-۲ جهت ریزش‌ها و شکستگی‌های کششی القایی..... ۳۲
- شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی لالی..... ۵۹
- شکل ۲-۴ نقشه UGC میدان لالی (چاه‌های حفر شده)..... ۶۰
- شکل ۳-۴ پردازش داده‌های نگار فتوالکتریک در یکی از چاه‌های میدان لالی..... ۶۶
- شکل ۴-۴ مقایسه داده‌های تخمین زده..... ۶۷
- شکل ۵-۴ ساختار یک شبکه FIS در حالت کلی..... ۷۱
- شکل ۶-۴ الف) سیستم استنتاج فازی اگر_آنگاه تاکاگی-سوگنو ب) ساختار ANFIS..... ۷۳
- شکل ۷-۴ همبستگی میان مقدار واقعی داده‌های کنترل و مقدار تخمینی حاصل از شبکه..... ۷۶
- شکل ۸-۴ مقایسه داده‌های آزمون شبکه با مقادیر اندازه‌گیری شده..... ۷۷
- شکل ۹-۴ نگارهای پتروفیزیکی و نگارهای موج فشاری و برشی چاه ۳۰ میدان لالی..... ۷۸
- شکل ۱۰-۴ پارامترهای الاستیک و مقاومتی چاه شماره ۳۰..... ۸۴
- شکل ۱۱-۴ نقشه جهت‌یابی حداکثر تنش افقی در ایران از نقشه جهانی پایگاه داده تنش..... ۸۷
- شکل ۱۲-۴ تخمین چگالی سنگ از سطح زمین تا مخزن..... ۸۸
- شکل ۱۳-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۴ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۹۲
- شکل ۱۴-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۴ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۹۳
- شکل ۱۵-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۶ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۹۴
- شکل ۱۶-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۶ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۹۵
- شکل ۱۷-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۷ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۹۶
- شکل ۱۸-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۷ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۹۶
- شکل ۱۹-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۹ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۹۷
- شکل ۲۰-۴ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه ۲۹ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۹۸

- شکل ۴-۲۱ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۰ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۹۹
- شکل ۴-۲۲ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۰ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۳ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۱ (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۴ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۱ (وضعیت تنش و گل حفاری)..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱ موقعیت مکانی چاه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر در میدان لالی..... ۱۱۱
- شکل ۵-۲ مسیر حفاری و محل برخورد چاه‌های مورد مطالعه با لایه‌های زمین‌شناسی..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳ هندسه مدل ساختاری میدان لالی..... ۱۱۳
- شکل ۵-۴ نمایی از طاق‌دیس آسماری و برخی از چاه‌های میدان..... ۱۱۴
- شکل ۵-۵ لایه‌بندی انجام شده در مدلسازی مخزن آسماری میدان لالی..... ۱۱۵
- شکل ۵-۶ مدل ساختاری مخزن آسماری میدان لالی..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷ فرآیند درشت‌نمایی و گسترش داده‌ها در طول میدان..... ۱۱۶
- شکل ۵-۸ روش‌های میانگین‌گیری (سعیدو همکاران، ۱۳۹۶)..... ۱۱۷
- شکل ۵-۹ مقایسه مدول یانگ درشت‌نمایی شده با داده‌های اولیه در چاه ۳۰..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۰ درشت‌نمایی مدول یانگ در شبکه‌بندی..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۱ مدل سه بعدی ساخته شده برای مدول یانگ استاتیک (GPa)..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۲ مدل سه بعدی ساخته شده برای نسبت پواسون..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۳ مدل سه بعدی ساخته شده برای فشاری منفذی (Mpa)..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۴ مدل سه بعدی ساخته شده برای مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای مقاومت کششی (Mpa)..... ۱۲۴
- شکل ۵-۱۶ مدل سه بعدی ساخته شده برای زاویه اصطکاک داخلی (deg)..... ۱۲۴
- شکل ۵-۱۷ مدل سه بعدی ساخته شده برای چسبندگی ذاتی سنگ (Mpa)..... ۱۲۵
- شکل ۵-۱۸ ارزیابی دقت مدل به کمک مقایسه هیستوگرام داده‌ها (شبیه‌سازی گوسی متوالی)..... ۱۲۶
- شکل ۵-۱۹ ارزیابی دقت مدل به کمک مقایسه هیستوگرام داده‌ها (کریجینگ)..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۰ مقایسه بین مقدار داده‌های واقعی و داده‌های مدلسازی شده در چاه خارج شده..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲۱ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش قائم (Mpa)..... ۱۳۰
- شکل ۵-۲۲ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداقل (Mpa)..... ۱۳۱
- شکل ۵-۲۳ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداکثر (Mpa)..... ۱۳۱
- شکل ۵-۲۴ حالت تنش بدست آمده در میدان لالی..... ۱۳۲
- شکل ۵-۲۵ نواحی پایدار و ناپایدار در مخزن آسماری (گسیختگی کششی)..... ۱۳۴
- شکل ۵-۲۶ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۱ مخزن آسماری..... ۱۳۵
- شکل ۵-۲۷ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۲ مخزن آسماری..... ۱۳۵
- شکل ۵-۲۸ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۳ مخزن آسماری..... ۱۳۶

- شکل ۵-۲۹ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۴ مخزن آسماری..... ۱۳۶
- شکل ۵-۳۰ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۵ مخزن آسماری..... ۱۳۷
- شکل ۵-۳۱ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۶ مخزن آسماری..... ۱۳۷
- شکل ۵-۳۲ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۷ مخزن آسماری..... ۱۳۸
- شکل ۵-۳۳ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه‌بعدی در چاه ۲۴..... ۱۴۰
- شکل ۵-۳۴ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه‌بعدی در چاه ۳۰..... ۱۴۱
- شکل ۵-۳۵ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه‌بعدی در چاه ۲۶..... ۱۴۲
- شکل ۵-۳۶ عرض پنجره ایمن گل حفاری در میدان لالی..... ۱۴۳
- شکل ۵-۳۷ حد پایین فشار گل برای حفاری ایمن در راس‌تاهای مختلف..... ۱۴۶

فصل ۱: کلیات

۱- مقدمه

نقش راهبردی منابع نفت و گاز طبیعی در اقتصاد و تأمین انرژی بشر برکسی پوشیده نیست. با رشد جمعیت و گسترش صنعت، نیاز به بهره‌مندی از این منابع بیش از پیش احساس می‌شود؛ از این‌رو امروزه صنعت نفت به یکی از موثرترین و بزرگ‌ترین صنایع در جهان و به ویژه ایران تبدیل شده است که نقش بسیار کلیدی در تعاملات اقتصادی و سیاسی جهان دارد. بهره‌برداری از منابع هیدروکربنی با چالش‌ها و هزینه‌های بسیار زیادی همراه است که بخش عمده آن مربوط به عملیات حفاری می‌باشد. حفاری چاه به عنوان یکی از فرآیندهای اصلی اکتشاف، ارزیابی و توسعه مخازن نفت و گاز است و همواره به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در صنایع بالادستی مطرح می‌شود. عوامل بسیار زیادی در موفقیت، عدم موقعیت و یا افزایش بازدهی عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز موثر می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به عوامل مهندسی زمین، تجهیزات و فناوری‌های در دسترس، نیروی انسانی مجرب، مدیریت مالی و پشتیبانی (تعمیر و نگهداری) اشاره کرد.

یکی از مسائل مهم برای حفظ پایداری چاه و کاهش ریسک و هزینه‌های حفاری، تعیین وزن بهینه‌ی گل حفاری است. زیرا ناپایداری دیواره چاه در اثر انتخاب وزن گل نامناسب می‌تواند باعث از دست دادن قسمتی از چاه و یا کل آن شود. این موضوع افزایش هزینه‌های عملیات و تاخیر در زمان بهره‌برداری را به دنبال خواهد داشت. از دست رفتن چاه‌ها علاوه بر هدر رفتن وقت و هزینه، بهره‌برداری از حجم عظیمی از منابع هیدروکربنی را با مشکل روبرو می‌سازد. این موضوع آن‌چنان مهم است که می‌تواند اقتصادی بودن طرح توسعه یک میدان را نیز تحت تأثیر خود قرار دهد. بنابراین مهندسان نفت علاوه بر بررسی راه‌های موجود برای افزایش بهره‌وری از منابع هیدروکربنی، به دنبال ارائه راهکارهایی برای کاهش خطرات و هزینه‌های ناشی از عملیات مرتبط با مهندسی نفت هستند. راهکارهایی که بتوانند در هزینه‌های جاری عملیات‌های اکتشافی، حفاری و بهره‌برداری از مخازن صرفه‌جویی کنند و منجر به صیانت از ثروت ملی شوند. این در حالی است که ارائه چنین راهکارهایی بدون شناخت رفتار سنگ مخزن و شرایط حاکم بر زمین امکان‌پذیر نخواهد بود. زیرا دخالت‌های انسانی مانند حفاری، تولید و یا

تزریق باعث برهم خوردن تعادل موجود در ساختار سنگ می‌شود؛ نتایج این تغییرات را می‌توان بوسیله دانش ژئومکانیک^۱ مطالعه کرد (شریفی و همکاران، ۱۳۹۵). امروزه یکی از راه‌های شناخت دقیق محیط مخزن و آگاهی از تغییرات خصوصیات آن در راستاهای مختلف، انجام مدلسازی ژئومکانیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی است.

۱-۲ اهداف تحقیق

به طور کل، هدف اصلی از این پژوهش ارزیابی پایداری چاه‌های مورد مطالعه در میدان لالی و فراهم‌سازی امکان انتخاب راستای مناسب حفاری و کاهش مشکلات و هزینه‌های مربوط به آن است. عوامل بسیار زیادی از جمله شرایط تنش، پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن (مدول یانگ، نسبت پواسون و...)، مشخصات فیزیکی سنگ مخزن (تخلخل، نفوذپذیری، درصد اشباع و...) و عوامل تکتونیکی (درزه‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها و...) بر روی پایداری چاه‌ها موثر هستند. یک مدل جامع ژئومکانیکی وضعیت تنش، فشار منفذی، خواص فیزیکی سنگ مخزن و سازندهای اطراف آن، توصیف و توزیع شکاف‌ها و گسل‌ها، خصوصیات الاستیک و پارامترهای مقاومتی سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوری و مقاوت کششی و زاویه اصطکاک را دربر می‌گیرد. برای مشخص کردن پنجره ایمن گل و فراهم شدن زمینه انتخاب راستای حفاری مناسب باید وضعیت عوامل فوق ارزیابی گردد. زیرا باید وزن گل انتخاب شده برای حفر چاه‌ها، متناسب با شرایط مخزن بوده و از نظر پارامترهای مرتبط مانند خصوصیات سنگ مخزن، خصوصیات سیال، پارامترهای ژئومکانیکی و وضعیت تنش شرایط مناسبی داشته باشد. به همین منظور در این پژوهش از مدلسازی ژئومکانیکی سه‌بعدی در میدان لالی استفاده شده است.

^۱ Geomechanics

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

عملیات حفاری در بسیاری از میادین به دلیل پیچیدگی‌ها و شرایط موجود از دیدگاه فنی و اقتصادی یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. حفاری چاه‌های نفتی بدون شناخت صحیح محیط مخزن، می‌تواند باعث بروز مشکلاتی نظیر ریزش و شکست چاه، هرزروی گل حفاری و گیرکردن لوله‌ها و مته‌های حفاری شود که خسارت بسیار زیاد و در برخی موارد غیرقابل جبرانی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین به دلیل اهمیت موضوع و هزینه‌های بالای حفاری، نیاز است تا وزن گل انتخاب شده برای حفر چاه‌ها، متناسب با شرایط مخزن باشد. یکی از راه‌های کاهش مشکلات پیش‌بینی نشده در عملیات حفاری که می‌تواند اقتصادی بودن پروژه‌ها را تضمین نماید، کاهش زمان‌های توقف تولید است که معمولاً به دلیل ناپایداری های چاه و نداشتن آگاهی از وجود رژیم تنش و فشار منفذی به وجود می‌آید. عوامل تاثیرگذار بر پایداری چاه به دو دسته‌ی قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم می‌شوند که می‌توان مهم‌ترین عوامل قابل کنترل را راستای حفاری، شیب چاه و فشار گل حفاری دانست (عسگری و همکاران، ۱۳۹۶). با این حال تعیین مسیر و فشار گل حفاری چاه، خود می‌توانند تابعی از رژیم تنش‌های برجا و شرایط مخزن باشند. مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی یکی از بهترین روش‌هایی است که می‌تواند در انتخاب عوامل مذکور کمک کند و منجر به کاهش خطرات پیش‌بینی نشده، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های طرح‌های توسعه میادین شود. زیرا این مدل قادر است تا با ارائه یک ارزیابی کمی از تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی در فضای سه‌بعدی، تصویری واضح از این تغییرات را در مخزن یا میدان نفتی نشان دهد و راهگشای حل بسیاری از مشکلات باشد.

۱-۴ روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا مطالعاتی بر روی مبانی و سابقه موضوع، شامل پایداری چاه و مدل‌های ژئومکانیکی صورت گرفته است. با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای عوامل موثر در ایجاد انواع ناپایداری و روش‌های ارزیابی پایداری در چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در خصوص مدل‌های ژئومکانیکی موضوعاتی

مانند تاریخچه مدل ژئومکانیکی، انواع مدل ژئومکانیکی، نحوه ساخت و مزایای استفاده از آن در صنعت نفت و گاز مطالعه و مورد بحث قرار داده شده است. پس از گردآوری داده‌های مورد نیاز در میدان لالی، مدلسازی ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی به ویژه نگارهای صوتی فشاری و برشی، در موقعیت چاه‌های مورد مطالعه انجام شده است. در ادامه از خروجی مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی استفاده می‌شود. ساخت مدل ساختاری سه‌بعدی، شبکه‌بندی، درشت‌نمایی مقیاس داده‌ها و در نهایت گسترش پارامترهای بدست آمده از مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی در بخشی از مخزن آسماری میدان لالی از جمله مراحل است که برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی انجام شده است. پس از ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، وضعیت تنش میدان لالی و خصوصیات سنگ مخزن در بخش‌های مختلف تخمین زده می‌شود. در هر گام از این فرآیند جهت صحت‌سنجی مدل‌های ساخته شده، داده‌های حاصل از آن‌ها با داده‌های واقعی مقایسه شده است. در نهایت پس از اطمینان از صحت مدل‌های ساخته شده، با مشخص کردن ناهمسانگردی تنش در بخشی از مخزن آسماری میدان لالی، وضعیت پایداری چاه‌ها، علت ناپایداری آن‌ها و ریسک حفاری در مخزن ارزیابی می‌شود.

۱- ۵ ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر در شش فصل تهیه و تنظیم شده است.

فصل اول کلیات پایان‌نامه است که به بررسی اهداف، ضرورت تحقیق و روش انجام پژوهش می‌پردازد.

فصل دوم تحت عنوان مروری بر مبانی تحقیق و معرفی مدلسازی ژئومکانیکی، با معرفی و دسته‌بندی

عوامل موثر بر ایجاد ناپایداری در چاه‌های نفتی آغاز شده و در ادامه به معرفی و بررسی معیارهای

شکست، روش‌های ارزیابی پایداری چاه و مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی پرداخته

می‌شود. در پایان این فصل نیز در مورد روش‌های مناسب برای تخمین پارامترهای مورد مطالعه در

فضای سه‌بعدی بحث شده است.

فصل سوم به بررسی تاریخچه مدل‌های ژئومکانیکی می‌پردازد. در این فصل مروری بر مجموعه‌ای از مطالعات در خصوص سابقه و کاربرد مدل‌های ژئومکانیکی سه‌بعدی در صنعت نفت و گاز دنیا و ایران به تفکیک انجام شده است.

فصل چهارم با معرفی میدان لالی و چاه‌های مورد مطالعه در این میدان آغاز می‌شود. در ادامه پس از معرفی داده‌های ورودی در دسترس و شرایط زمین‌شناسی میدان، گام به گام به مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی، از تخمین پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ، فشار منفذی، وضعیت تنش در میدان تا تعیین پنجره ایمن گل حفاری به کمک معیارهای شکست مختلف پرداخته می‌شود.

فصل پنجم با عنوان ارزیابی پایداری چاه و تعیین وزن گل بر اساس مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، به بررسی مراحل ساخت یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی از مخزن آسماری میدان لالی می‌پردازد. در این فصل به بررسی فرآیند ساخت مدل زمین‌شناسی، شبکه‌بندی مدل و در نهایت درشت‌نمایی و گسترش داده‌ها در میدان به عنوان مراحل اصلی ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی پرداخته شده است. پس از ارزیابی وضعیت پایداری چاه‌های مورد مطالعه، نحوه تعیین وزن بهینه گل جهت حفظ پایداری چاه‌ها مورد مطالعه توضیح داده شده است. در نهایت راستای مناسب بر اساس نتایج پنجره ایمن گل جهت حفر چاه در بخشی از مخزن آسماری میدان لالی مشخص می‌گردد.

فصل ششم نیز آخرین فصل از این پایان‌نامه می‌باشد. در این فصل به جمع‌بندی مطالب فصول قبل و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد پرداخته می‌شود.

فصل ۲: مروری بر مبانی تحقیق و معرفی مدل سازی ژئوکامپیک

۲-۱ مقدمه

حفر چاه در صنعت نفت با هدف دسترسی به منابع هیدروکربنی و بهره‌مندی از آن‌ها انجام می‌شود. فرآیند حفاری چاه به دلیل عدم قطعیت در شناخت رفتار زمین، فرآیندی پرمخاطره محسوب می‌شود. در نتیجه، تحلیل و پیش‌بینی پایداری چاه با هدف نگه داشتن چاه در شرایط پایدار به منظور جلوگیری از ریزش دیواره آن، یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه حفاری و در نهایت بهره‌برداری میادین هیدروکربنی است. برای ارزیابی وضعیت پایداری چاه‌های حفاری شده و یا حتی پیش‌بینی پایداری چاه‌هایی که در آینده حفاری خواهند شد، ساخت مدل ژئومکانیکی با هدف درک بهتر پارامترهای موثر در ناپایداری آن‌ها ضروری است (Zoback, 2010). در این فصل پس از مروری بر مباحث مربوط به پایداری چاه، به بررسی مدل‌های ژئومکانیکی، مراحل ساخت آن‌ها و روش‌های تخمین پارامترها در فضای سه‌بعدی پرداخته می‌شود.

۲-۲ پایداری چاه

بدلیل اهمیتی که پایداری چاه در صنعت نفت دارد، تحلیل و بررسی آن در مراحل مختلفی از طراحی چاه و یا توسعه میدان انجام می‌شود. گسیختگی سنگ‌های اطراف چاه می‌تواند باعث بروز مشکلات زیادی از جمله گیرکردن لوله^۱ و هرزروی سیال^۲ در طول حفاری و تولید شود که در نهایت افزایش زمان و هزینه حفاری را به دنبال خواهد داشت. بر اساس تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته، سالانه در سراسر جهان بیش از یک میلیارد دلار برای رفع مشکلات ناشی از ناپایداری‌های رخ داده در چاه هزینه می‌شود (Anantharamu et al., 2011). همچنین بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که حداقل ۱۰ درصد هزینه‌های حفاری، به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی از ناپایداری در چاه‌ها صرف می‌شود (Al-Ajmi, 2006).

¹ Stuck Pipe

² Mud loss

۲-۳ انواع ناپایداری چاه

به صورت کلی دو نوع عامل اصلی ناپایداری در حفاری چاه وجود دارد که تحت عنوان ناپایداری مکانیکی و ناپایداری شیمیایی شناخته می‌شوند. در بعضی مواقع، وقوع هم‌زمان این دو نوع ناپایداری دور از انتظار نیست. در ادامه به بررسی هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱ ناپایداری شیمیایی

عوامل شیمیایی معمولاً به ترکیب سیال حفاری مربوط می‌شوند. مهم‌ترین ناپایداری شیمیایی به دلیل جذب آب در سازندهایی مثل شیل رخ می‌دهد. همچنین امکان دارد به خاطر حل شدن سازندهای نمکی درون آب سیال حفاری، این‌گونه ناپایداری‌ها ایجاد شوند. جذب آب در سازندهای شیلی می‌تواند باعث تورم شیل و در نتیجه کاهش مقاومت سنگ گردد. معمولاً می‌توان مشکلات مربوط به ناپایداری شیمیایی را با تغییر ترکیب سیال حفاری به مقدار زیادی از بین برد و برای جلوگیری از وقوع این حادثه توصیه می‌شود که گل حفاری با پایه نفت جایگزین گل حفاری با پایه آب شود (Al-Ajmi, 2006).

۲-۳-۲ ناپایداری مکانیکی

معمولاً قبل از شروع عملیات حفاری، تنش‌های سنگ‌های اطراف چاه کمتر از مقاومت سنگ است و شرایط شیمیایی در سازند در حالت تعادل می‌باشد. این در حالی است که سازندهای زمین‌شناسی همواره تحت تنش‌هایی ناشی از وزن طبقات فوقانی و نیز تنش‌های تکتونیکی می‌باشند. هنگامی که یک چاه حفاری می‌شود، تنش‌هایی که سنگ‌های حفاری شده تحمل می‌کردند، به سنگ‌های اطراف دیواره چاه وارد می‌شود. در این حالت سیال حفاری فضای حفر شده را پر کرده و تلاش می‌کند تا نقش سنگ‌های حفر شده را در تحمل تنش ایفا کند. حال از یک طرف سنگ‌ها قادر به تحمل تنش برشی و تنش تراکمی هستند و سیال حفاری که در حفره چاه قرار دارد، تنها قادر به تحمل تنش تراکمی است. از طرفی دیگر فشار سیال حفاری نیز عموماً مطابق با تنش‌های برجای سازند نیست. در نتیجه یک توزیع

مجدد تنش تراکمی و برشی در اطراف چاه ایجاد می‌شود. به همین دلیل سیستم تنش برجا در اطراف دیواره چاه دچار تغییر خواهد شد و با افزایش تنش، تمرکز تنش در این نواحی به وجود خواهد آمد. در صورتی که مقدار تنش‌های القایی بیشتر از مقاومت سنگ گردد، ممکن است به گسیختگی سنگ در دیواره چاه منجر شود (Fjaer et al., 2008). عوامل مکانیکی ناپایداری دیواره چاه به دو دسته عوامل غیرقابل کنترل (طبیعی) و قابل کنترل تقسیم می‌شوند. ناپایداری چاه معمولاً در اثر ترکیبی از عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل رخ می‌دهد. در جدول ۱-۲ عوامل موثر در ناپایداری چاه نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ عوامل موثر در ناپایداری چاه (Chen et al., 2002).

عوامل ناپایداری چاه	
عوامل غیرقابل کنترل (طبیعی)	پارامترهای قابل کنترل
وضعیت تنش‌های برجا	نوع سیال حفاری
فشار منفذی	مسیر چاه
خواص شیمیایی	اندازه چاه
شیل	خواص شیمیایی گل حفاری
درزه‌داری و گسل	فشار کف چاه
تخلخل و نفوذپذیری	سرعت گردش سیال
خواص حرارتی سنگ	دمای کف چاه
	زمان بدون پوشش بودن دیوار چاه
	عمق نصب لوله جداری
	ارتعاش رشته حفاری

۲-۴ عوامل قابل کنترل

در فرآیند حفاری با داشتن شناخت کافی از برخی عوامل بوجود آورنده ناپایداری می‌توان تا حد امکان پایداری چاه را کنترل نمود. انتخاب وزن و ترکیب گل مناسب با سازند در هر مقطع حفاری، نصب به موقع لوله‌های جداری با توجه به مقاومت سازند و انتخاب مسیر مناسب حفاری از جمله مهم‌ترین عوامل

قابل کنترلی هستند که می‌توانند امکان وقوع ناپایداری را تا حد زیادی کاهش دهند. در ادامه به تشریح مهم‌ترین عوامل قابل کنترل در ایجاد ناپایداری پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱ وزن گل حفاری (فشار گل حفاری)

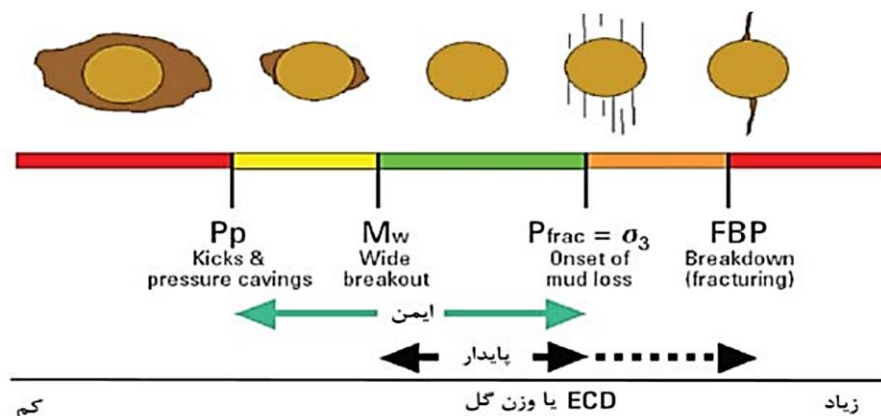
فشار گل حفاری یا فشار ته‌چاهی^۱ در حین عملیات حفاری، همان فشار ناشی از وزن گل حفاری است که در دو حالت استاتیک و دینامیک سنجیده می‌شود. در صورتی که از وزن گل در حالت استاتیک استفاده شود، فشار گل استاتیکی بدست می‌آید که همان فشار ستون سیال است. در صورت استفاده از وزن معادل جریان گل^۲، فشار گل دینامیکی بدست می‌آید که از فشار استاتیک نیز بیشتر است (Pašić et al., 2007). شکل ۱-۲ تاثیر وزن گل حفاری را بر پایداری دیواره چاه نشان می‌دهد. در صورتی که وزن گل زیاد باشد، باعث شکست کششی^۳ و یا به عبارتی ایجاد ترک در دیواره چاه می‌شود. همچنین اگر وزن گل پایین باشد، سبب شکستگی برشی^۴ دیواره چاه می‌شود. بنابراین شکستگی‌های برشی و کششی اصولاً بر اثر دو عامل وزن مخصوص بسیار بالا و یا بسیار پایین گل حفاری پدید می‌آیند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یکی از مهم‌ترین عوامل در کنترل پایداری چاه، تعیین بهینه وزن مخصوص سیال حفاری است.

¹ Bottomhole Pressure

² Equivalent Circulating Density

³ Drilling Induced Tensile Fracture

⁴ Breakout



شکل ۱-۲ تاثیر وزن گل حفاری بر تنش‌های القایی دیواره چاه (Pašić et al., 2007).

در حین حفاری، دیواره چاه به طور موقت توسط فشار سیال حفاری نگه داشته می‌شود. فشار سیال حفاری بیش از فشار منفذی سازند تعیین می‌شود تا از ورود ناخواسته سیال سازند به درون چاه و فوران چاه^۱ جلوگیری شود.

۲-۴-۲ شیب و امتداد چاه

همان‌گونه که اشاره شد همزمان با شروع حفاری در سنگ در فرآیند حفاری یک چاه، تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه افزایش می‌یابد. این تمرکز تنش به میزان انحراف چاه و آزیموت آن (امتداد چاه) و بزرگی و راستای تنش‌های برجا بستگی دارد (Moos et al., 1998). بنابراین موقعیت شیب و امتداد چاه^۲ نسبت به تنش‌های اصلی برجا یک عامل مهم و تاثیرگذار در امکان ایجاد شکست برشی و یا شکست کششی چاه است (McLellan, 1996). با توجه به مشاهدات محققین مختلف، شکست برشی در راستای تنش افقی حداقل ایجاد می‌گردد (Barton et al., 1988).

۳-۴-۲ لرزش لوله‌ی حفاری

گاهی لرزش‌های لوله حفاری در چاه به دیواره چاه آسیب رسانده و موجب ریزش دیواره می‌شود. برای مثال ممکن است لرزش‌های ناشی از لوله حفاری در برخی از موارد سبب گشاد شدن قطر چاه شود.

¹ Blowout

² Wellbore Inclination and Azimuth

طراحی سیستم حفاری مناسب با هندسه چاه، شیب حفاری و نوع سازند ازجمله عواملی هستند که بر این نوع از ریزش تاثیرگذار هستند. سازندهای درزه‌دار، نامنسجم و نرم بیشتر در معرض این نوع از شکستگی هستند (Pašić et al., 2007).

۴-۴-۲ دمای سیال حفاری

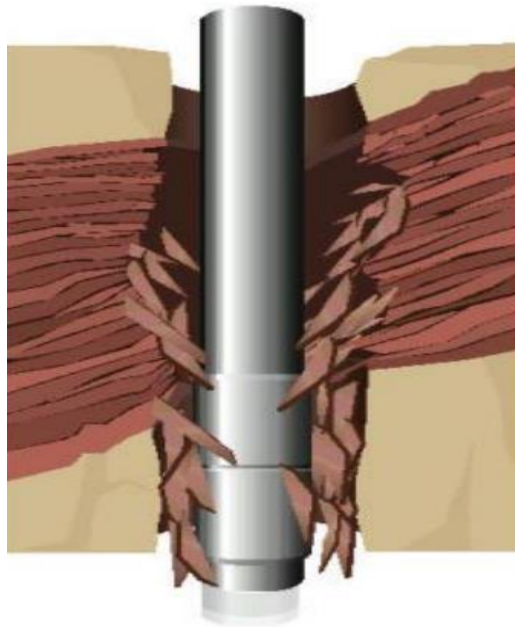
دمای سیال حفاری، سبب افزایش تمرکز گرمایی یا تنش انبساطی می‌شود که این عامل تمرکز تنش را به دنبال دارد و پایداری دیواره چاه را با مشکل رو به رو می‌سازد. کاهش دما نیز می‌تواند در نقطه مقابل موجب کاهش تمرکز تنش شود (McLellan, 1996).

۵-۲ عوامل غیرقابل کنترل

مجموعه‌ای از عوامل مکانیکی که بر فرآیند حفاری تحمیل می‌گردد جز دسته عوامل غیرقابل کنترل قرار می‌گیرند. در این میان می‌توان به مشخصات سازند و شرایط تکتونیکی به عنوان مهم‌ترین عوامل غیرقابل کنترل اشاره نمود. در ادامه برخی از این عوامل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵-۱-۲ درزه‌داری و سازند گسل خورده

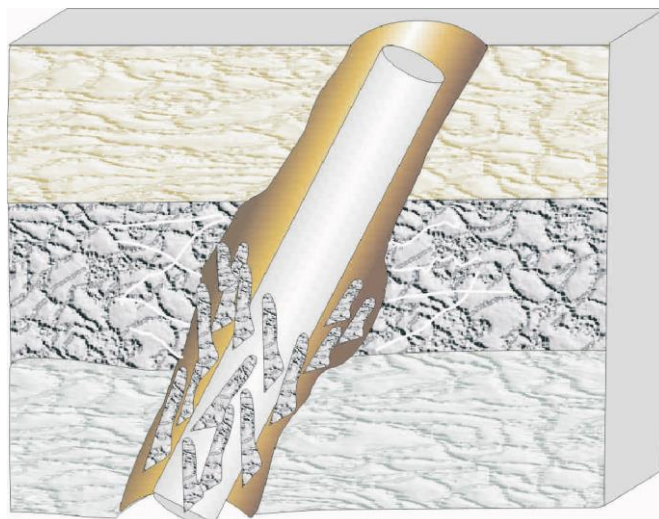
سنگ‌هایی که در نزدیکی صفحات گسل قرار داشته و یا به‌طور طبیعی پردرزه و ترک می‌باشند، اگر در مسیر حفاری قرار بگیرند، با آزاد شدن سطوح تماس به راحتی از هم جدا شده و وارد چاه می‌شوند. حتی اگر قطعات خردشده با سیمان سنگ به یکدیگر چسبیده شده باشد، در اثر حرکات ارتعاشی و لرزش لوله حفاری از هم جدا شده و پشت مته تجمع می‌کنند (شکل ۲-۲). اگر زاویه ورود چاه به لایه‌های ضعیف و یا سطوح لایه‌بندی نامناسب باشد، ریزش چاه می‌تواند خیلی وخیم باشد (Procter & Bowes, 1997). یکی از راه‌های حفظ پایداری چاه در این نوع سازندها، به حداقل رساندن لرزش لوله‌های حفاری است.



شکل ۲-۲ حفاری در سازندهای درزه‌دار و گسل خورده (Procter & Bowes, 1997).

۲-۵-۲ سازندهای فعال تکتونیکی

در زمان حفاری سازندهایی که دارای تنش بالایی هستند، در صورتی که اختلاف بین تنش اطراف چاه و فشار سیال حفاری زیاد باشد، ناپایداری چاه ممکن است پدیدار شود. تنش تکتونیکی در چاههایی رخ می‌دهد که سنگ‌های سازند در این نواحی بخاطر حرکت پوسته زمین تحت تراکم یا کشش قرار گیرند. شرایط غیرطبیعی تنش سبب خرد شدن سنگ‌های شده و در صورت حفر چاه با ورود این خرده‌های حفاری به درون چاه، می‌تواند سبب ایجاد مشکل در فرآیند حفاری شود. شکل ۳-۲ حفاری در سازندهای فعال تکتونیکی را نشان می‌دهد (Pašić et al., 2007).

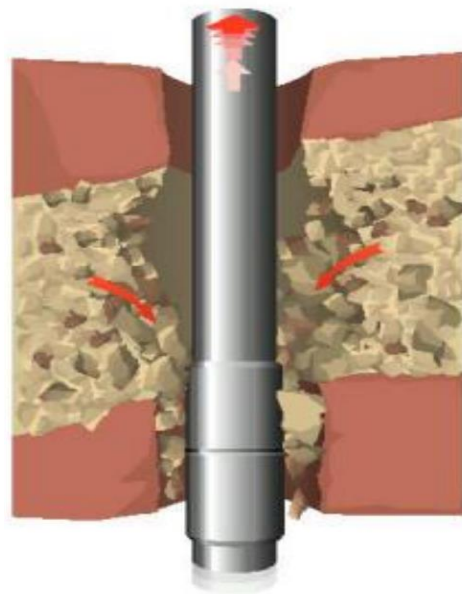


شکل ۳-۲ حفاری در سازندهای فعال تکتونیکی (Pašić, et al., 2007).

۳-۵-۲ سازندهای تحکیم نیافته و دانه‌ای

در سازندهای تحکیم نیافته و دانه‌ای، نیروهای تماس بین ذرات موجب پایداری سازند می‌گردد. عملیات حفاری موجب از بین رفتن بخشی از نیروهای تماسی شده و در نتیجه سازند اطراف چاه به سمت داخل چاه ریزش می‌کند (شکل ۴-۲). این حالت زمانی رخ می‌دهد که کیک گل^۱ کم باشد و یا اصلاً بر روی دیواره چاه تشکیل نشود. همچنین در صورت ضعیف بودن ماتریکس میان دانه‌ها و یا عدم وجود ماتریکس، آب موجود در گل حفاری موجب شسته شدن ماتریکس و ریزش سازند به داخل چاه و یا هرزروی گل حفاری می‌شود. این رخداد ممکن است در زمان بسیار کوتاه و یا پس از گذشت مدت زمانی از حفاری به وقوع بپیوندد. راه مقابله با این شرایط، ایجاد کیک گل مناسب و کافی بر روی دیواره چاه است. این مکانیزم عموماً در سازندهای کم عمق اتفاق می‌افتد و یک کیک گل مناسب و کافی برای پایداری این نوع سازند مورد نیاز است (Procter & Bowes, 1997).

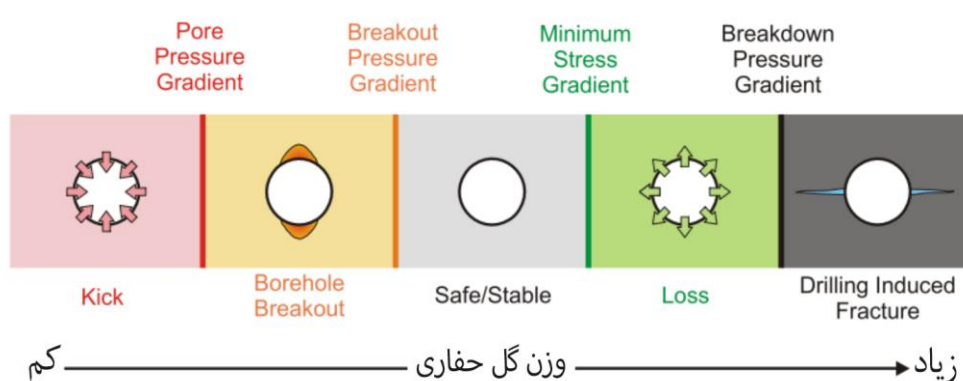
^۱ Mud cake



شکل ۴-۲ حفاری در سازندهای نامنسجم (Procter & Bowes, 1997).

۲-۶ کاربرد معیارهای شکست در ارزیابی پایداری چاه

به صورت کلی برای وقوع ناپایداری در دیواره چاه می‌توان دو مکانیسم شکست برشی و کششی را مشاهده کرد. هنگامی که فشار گل حفاری به دیواره چاه، بیشتر از تنشی باشد که از خارج به دیواره چاه وارد می‌شود، سیال حفاری باعث ایجاد شکست کششی در دیواره چاه می‌گردد. از طرفی دیگر، اگر فشار خارجی بر دیواره چاه از میزان فشار گل حفاری بیشتر باشد، در اثر تمرکز تنش شکست برشی ایجاد خواهد شد (Simangunsong et al., 2006). شکل ۵-۲ مکانیزم شکست برشی، کششی و همچنین مفهوم وزن گل ایمن حفاری را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲ شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری (Rasouli & Le, 2012)

بنابراین برای تامین پایداری دیواره چاه لازم است تا فشار گل حفاری در بازه مناسبی انتخاب شود. برای این منظور می‌توان از معیارهای شکست‌های مختلف از جمله معیار شکست موهر کلمب^۱، موگی کلمب^۲، دراگر پراگر^۳ و هوک براون^۴ استفاده کرد. از این میان می‌توان به معیار موهر کلمب به عنوان یکی از کاربردی‌ترین معیارهای شکست اشاره کرد. این معیار شکست فقط اثر تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل را در نظر می‌گیرد و فرض می‌کند که تنش اصلی میانی در مقاومت سنگ تاثیری ندارد. بنابراین مستقل بودن شکست سنگ از تنش اصلی میانی یک فرض رایج در این معیار می‌باشد. تعدادی از محققین در بررسی معیار شکست موهر کلمب، متوجه شدند که دارای نقص است و امکان دارد نتایج واقع بینانه‌ای را ارائه نکند. بنابراین آن‌ها توصیه کردند که از معیارهای شکستی که اثر تنش میانی را در نظر می‌گیرند (مانند معیار دراگر پراگر و موگی کلمب) استفاده شود (Al-Ajmi, 2006).

۲-۷ روش‌های ارزیابی پایداری چاه

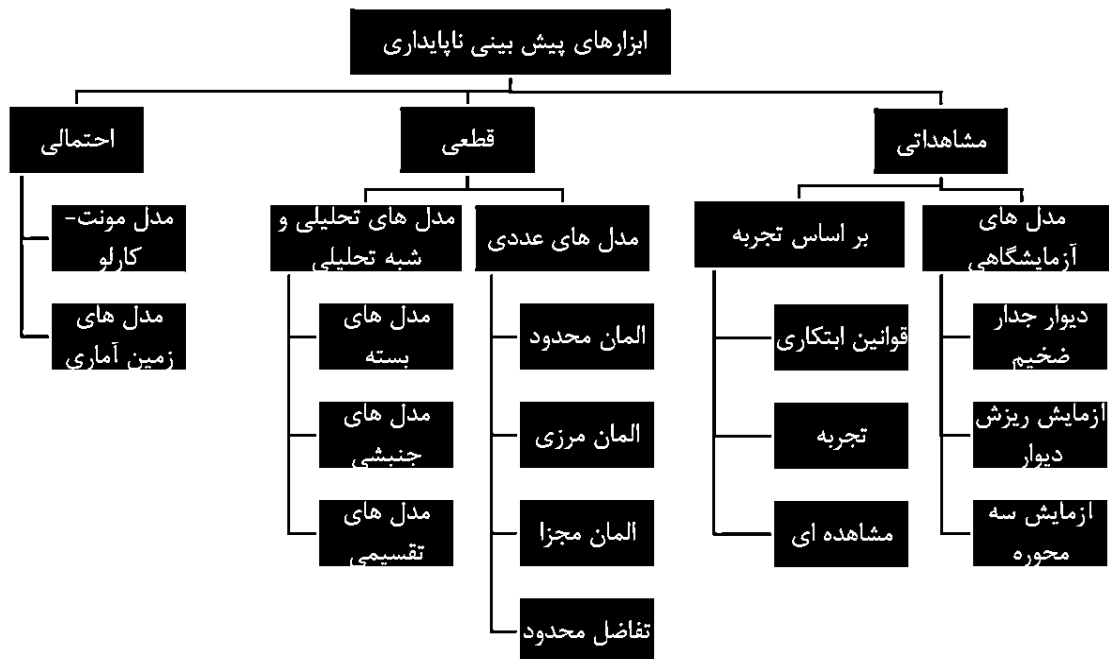
ارزیابی پایداری چاه قبل از شروع حفاری شامل تعیین شرایط ژئومکانیکی منطقه و انتخاب گل حفاری مناسب با توجه به شناخت وضعیت منطقه است. بنابراین در اولین مرحله از تحلیل پایداری، به منظور افزایش کیفیت طراحی و عملیات حفاری، مطالعه کامل ژئومکانیک با هدف شناخت عوامل موثر در ایجاد ناپایداری چاه لازم است. در مرحله دوم، با توجه به آنچه از میزان تاثیر شیل در ناپایداری چاه عنوان شد، شناخت دقیق نواحی شیلی ضروری است (Shakib, et al., 2013). در شکل ۲-۶ یک طبقه بندی از ابزارها و روش‌های کمکی پیش‌بینی ناپایداری نشان داده شده است. بر طبق شکل ذیل، روش‌های پیش‌بینی ناپایداری به سه دسته مشاهداتی، قطعی و احتمالاتی تقسیم بندی شده است. در میان این روش‌ها، محققین بیشتر از مدل‌های عددی و تحلیلی برای پیش‌بینی پایداری چاه استفاده می‌کنند.

¹ Mohr-Coulomb

² Mogi-Coulomb

³ Drucker-Prager

⁴ Hoek-Brown



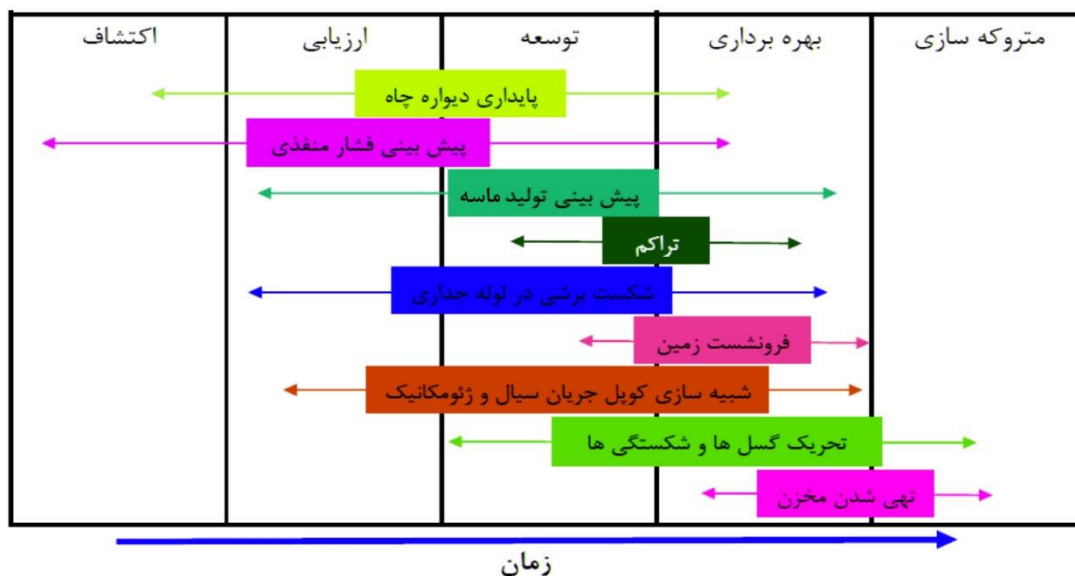
شکل ۲-۶ روش های پیش بینی ناپایداری چاه (McLellan, 1996)

یکی از ابزارهای تحلیلی پایداری چاه، ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی با استفاده از اطلاعات بدست آمده از نگارها می باشد (Tutuncu & Kadyrov, 2012). امروزه مدل ژئومکانیکی یک بعدی و سه بعدی به عنوان ابزاری کارآمد در صنایع بالادستی نفت شناخته می شوند. یکی از خروجی های مدل ژئومکانیکی، پنجره ایمن گل حفاری است که به منظور پیش بینی و ارزیابی پایداری چاه استفاده می شود. با بررسی پنجره ایمن گل و در اختیار داشتن وزن گل در هر عمقی از چاه، می توان وضعیت پایداری آن را پیش بینی کرد. در ادامه به تشریح انواع مدل های ژئومکانیکی و کاربردهای آن ها پرداخته می شود.

۲-۸ مدل ژئومکانیکی

شناخت کافی از فرآیندهای ژئومکانیکی مخزن، از مراحل اولیه اکتشاف تا مراحل پایانی عمر یک مخزن، امری حائز اهمیت و ضروری است، اما در حقیقت شرایط محیطی که در ژئومکانیک مخازن مطالعه می شود، گاهی به قدری می تواند خاص و پیچیده باشد که شبیه سازی آن در پیشرفته ترین آزمایشگاه های جهان بسیار دشوار و حتی ناممکن شود. زیرا وسعت مخازن مورد مطالعه گاهی حتی به چندین کیلومتر مربع هم می رسد که با در نظر گرفتن خصوصیات زمین شناسی از جمله وجود درزه و شکاف، گسل ها،

نفوذپذیری و تخلخل، دانه‌بندی و تنوع جنس‌های مختلف سنگ، پارامترهای مورد مطالعه در محیط مخازن هیدروکربنی را دست‌خوش ناهمسانگردی بسیاری می‌نماید. بر این اساس برای رسیدن به بهترین استراتژی توسعه مخزن، انجام مطالعات و مدل‌سازی ژئومکانیکی مخزن امری حیاتی می‌باشد. (Maleki et al., 2014). در این مدل، مجموعه اطلاعات چاه‌های اولیه از منابع مختلفی بدست می‌آیند، مقطع‌های لرزه‌نگاری، نگارها، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مغزه‌ها و چاه‌آزمایی برای ارزیابی خصوصیات مکانیک سنگی یک چاه، مخزن یا میدان با هم ترکیب می‌شوند. پیچیدگی مدل‌سازی ژئومکانیکی با توجه به فقدان اندازه‌گیری‌های کافی، از عدم دسترسی به اطلاعات مربوطه ناشی می‌شود. مدل ژئومکانیکی شامل خواص مکانیکی سنگ، فشار منفذی و میدان تنش می‌باشد که داده‌های بدست آمده از چاه و میدان را در مختصات منحصر به فرد نقاط برداشت شده، در مدل قرار می‌دهد. سپس براساس الگوهای تعریف شده از سوی کاربر، برای سایر نقاط میدان که اطلاعاتی در دسترس نیست، شروع به تخمین پارامترهای مختلف می‌کند. در نهایت با راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی مدل، ارزش آن بر اساس میزان مطابقت با شرایط واقعی، مشخص خواهد شد (ترابی‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳). این مدل ابزاری کارآمد برای فهمیدن واکنش زمین در قبال عملیات حفاری است. شکل ۲-۷ اهمیت ساخت و کاربردهای آن را نشان می‌دهد که در تمام طول عمر یک مخزن شامل مراحل اکتشاف، ارزیابی، توسعه، برداشت و حتی رهاسازی مخزن نقش ایفا می‌نماید.



شکل ۲-۷ مسائل ژئومکانیکی مطرح در دوره‌های مختلف اکتشاف، توسعه و ترک مخزن (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶)

مدل ژئومکانیکی در سه حالت یک‌بعدی در راستای حفاری چاه، سه‌بعدی در مقیاس مجموعه مخزن و چهاربعدی بر اساس برداشت‌های وابسته به زمان در میادین هیدروکربنی ساخته می‌شود. یک‌بعدی، سه‌بعدی و یا چهاربعدی بودن این مدل بستگی به نیازهای مطالعاتی شخص، گروه یا سازمان دست اندرکار در مطالعه میادین هیدروکربنی دارد. به‌عنوان مثال اگر هدف از مطالعه تنها یک چاه تولیدی باشد، مدل یک‌بعدی ساخته و استفاده می‌شود؛ اگر تحلیل تمامی نقاط و یا بخشی از میدان مورد نظر باشد، مدل سه‌بعدی خواهد بود. همچنین برای ساخت مدل ژئومکانیکی چهاربعدی باید مدل‌سازی ژئومکانیکی سه‌بعدی از یک محدوده مشخص، در برهه‌های زمانی متفاوت از تاریخ اکتشاف تا مراحل مختلف تولید از مخزن صورت پذیرد تا بتوان به تمامی تغییرات ژئومکانیکی محدوده در طول زمان پی برد. در ادامه به معرفی انواع مدل ژئومکانیکی پرداخته می‌شود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۸-۱ مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی

اولین قدم در هر فرآیند وابسته به ژئومکانیک ساخت یک مدل ژئومکانیکی است. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی ساده‌ترین شکل گسترش یک مدل ژئومکانیکی در راستای چاه می‌باشد (et al., 2010). این امر باعث شده است تا عموماً تجزیه و تحلیل پایداری چاه و مدل‌سازی ژئومکانیکی به

صورت یک‌بعدی توسعه یابد (Holland et al., 2010). رویکرد این سطح از تفسیر ژئومکانیکی در مقیاس چاه است و با هدف نمایش ویژگی‌های مکانیکی و حالات تنش در چاه انجام می‌شود. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی بر اساس اطلاعات مختلف آزمایشگاهی و میدانی در جهت کاهش هزینه‌ها و ریسک ساخته می‌شود. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی را می‌توان مقدمه‌ای برای تحلیل و بررسی پارامترهای اساسی توسط مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در مقیاس مخزن و یا میدان دانست.

۲-۸-۲ مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی

مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، در حقیقت نوع توسعه یافته مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی است. در مدل‌های یک‌بعدی، خواص سنگ و سایر پارامترها، در یک جهت که معمولاً راستای حفر چاه است، ساخته می‌شوند؛ اما در مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، با استفاده از درون‌یابی^۱ و برون‌یابی^۲ و به کار بردن روش‌هایی مانند زمین آمار، هوش مصنوعی و ترکیب اطلاعات، داده‌های موجود در راستای چاه در تمامی نقاط میدان گسترش یافته و سراسر آن را پوشش می‌دهند (ترابی‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳). یکی از برتری‌های این مدل نسبت به مدل‌های یک‌بعدی، نمایش تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی در تمامی راستاهای مختلف در فضا می‌باشد. بر این اساس تعیین و بهینه‌سازی محل چاه‌ها، بهینه‌سازی مسیر حفاری چاه‌ها، پنجره ایمن گل، تعیین پارامترهای شکاف هیدرولیکی، انتخاب سرمته حفاری و... را می‌توان به صورت سه‌بعدی مورد تحلیل قرار داد. بنابراین از مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی می‌توان در جهت کاهش هزینه‌ها، ریسک‌ها و مخاطرات بهره برد. مهم‌ترین تحلیل‌ها در مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی شامل مطالعات فشار منفذی، بررسی وضعیت گسل‌ها و شکاف‌ها، یکپارچگی پوش سنگ، سناریوهای ازدیاد برداشت، وضعیت تولید مواد جامد و ماسه، مطالعه رفتار مقاومتی-دمایی و به طور کلی بررسی شرایط کنونی مخزن است. به عبارتی می‌توان مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی را مقدمه‌ای برای تحلیل جامع مخزن معرفی نمود که برای

^۱ Interpolation

^۲ Extrapolation

مدل چهاربعدی ژئومکانیکی به عنوان یک تفسیر و پیش‌نیاز اساسی نیازمند بررسی است (Fischer, 2013 & Henk).

۲-۹ مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی

به صورت کلی می‌توان فرآیند ساخت مدل ژئومکانیکی را شامل ۴ مرحله اصلی دانست که عبارتند از (Rasouli & Archer, 2012):

۱. اولین مرحله برای ساخت مدل ژئومکانیکی جمع‌آوری و بررسی داده‌ها می‌باشد. این اطلاعات شامل مشخص نمودن محدوده مورد نظر، جمع‌آوری و بررسی داده‌های زمین‌شناسی، پتروفیزیکی، ژئوفیزیکی، حفاری و تولید چاه و پیش‌بینی سایر داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی می‌شود.

۲. سپس باید ساختار چین‌شده‌شناسی منطقه مشخص شود.

۳. پس از مشخص شدن سازندها تخمین خصوصیات سنگ انجام می‌گیرد. در این بخش از فرآیند مدلسازی خصوصیات الاستیک (مانند مدول یانگ) و خصوصیات مقاومتی سنگ (مانند مقاومت فشاری تک محوری) تخمین زده می‌شوند. سپس نتایج حاصل از تخمین‌ها باید به کمک نتایج آزمایشگاهی و سه‌محوری کالیبره شوند.

۴. در نهایت باید تانسور تنش و فشار منفذی محاسبه شوند. در این حالت تنش قائم با استفاده از

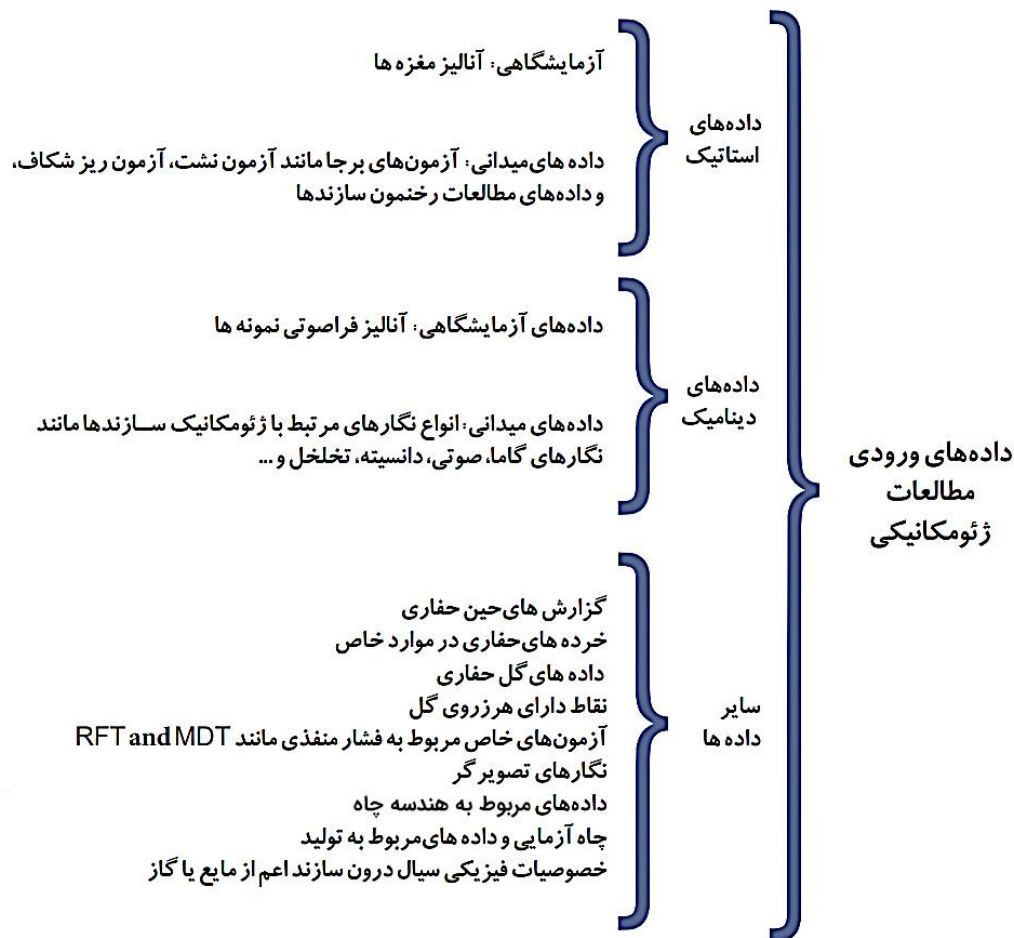
نگار چگالی محاسبه می‌شود. سپس مقادیر تنش‌های افقی تخمین زده می‌شوند.

در ادامه مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی بررسی و تشریح شده است.

۲-۹-۱ جمع‌آوری داده‌ها

اولین قدم برای ساخت مدل ژئومکانیکی، جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های مورد نیاز و در دسترس است. جزئیات و دقت مدل ژئومکانیکی وابسته به میزان دسترسی به داده‌های مورد نیاز می‌باشد. بنابراین گام اول در ساخت مدل ژئومکانیکی را می‌توان به عنوان مهم‌ترین گام این فرآیند در نظر گرفت. داده‌های

مرتبط با مطالعات ژئومکانیکی به دو گروه عمده داده‌های استاتیک (ایستا) و داده‌های دینامیک (پویا) تقسیم می‌شوند. بخش زیادی از داده‌های دیگر نیز وجود دارند که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم می‌توان از طریق آن‌ها به اطلاعات استاتیکی و دینامیکی سازندهای مخزنی یا غیرمخزنی دست پیدا کرد. شکل ۲-۸ خلاصه‌ای از تمامی این داده‌ها را نشان می‌دهد (آشتیانی‌عبدی، ۱۳۸۹).



شکل ۲-۸ داده‌های مورد نیاز در مطالعات ژئومکانیکی (آشتیانی‌عبدی، ۱۳۸۹)

داده‌های استاتیکی عبارتند از اطلاعاتی که با انجام آزمایش‌های فیزیکی-مکانیکی مستقیم در آزمایشگاه، یا به صورت برجا بر روی نمونه سنگ مخزن، بدست آمده و گروه مهمی از پارامترهای مقاومتی سازند مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. همچنین از داده‌های استاتیک معمولاً برای ساخت روابط تجربی جهت تبدیل داده‌های دینامیکی به استاتیکی و تایید نتایج حاصل از نمودارهای پتروفیزیکی استفاده می‌شود (شریفی و همکاران، ۱۳۹۵). قابل ذکر است که استفاده از داده‌های متنوع و با کیفیت در فرآیند

مدلسازی می‌تواند منجر به هر چه دقیق‌تر شدن مدل ژئومکانیکی شود. مجموعه‌ای ایده‌آل داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی بر اساس نوع مقطع در جدول ۲-۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲-۲ داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی (Plumb et al., 2002)

پارامتر	نگارهای مورد نیاز	سایر داده‌ها
چینه‌شناسی	اشعه گاما، چگالی، مقاومت، سرعت امواج فشاری (V_p)	خرده‌های حفاری، چاه پیمایی، چینه‌شناسی
فشار منفذی (PP)	سرعت امواج فشاری (V_p)، نگارهای مقاومت، check-shot survey	اختلاف سرعت در داده‌های لرزه‌نگاری، گزارش‌های روزانه حفاری، Formation Integrity test
تنش قائم (σ_v)	چگالی حجمی	خرده‌های حفاری
تنش افقی حداقل (σ_h)	سرعت امواج فشاری و برشی (V_p) و (V_s)، wireline stress tool	فشار منفذی، تست تزریق، تست تزریق پیشرفته، ریزترک‌ها، گزارش‌های روزانه Step-rate Injection tests حفاری،
تنش افقی حداکثر (σ_H)	نگارهای تصویری، مدل تنش چاه	مقاومت سنگ، مدل تنش چاه، σ_H ، PP
راستای تنش‌ها	نگارهای قطرسنجی، نگارهای تصویری، Oriented Velocity Anisotropy	نقشه‌های ساختاری، داده‌های سه‌بعدی لرزه نگاری
پارامترهای الاستیک: مدول یانگ (E) مدول برشی (G) نسبت پواسون (ν)	نگارهای صوتی (V_p) و (V_s)، چگالی حجمی	آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه، خرده های حفاری
پارامترهای مقاومتی سنگ: مقاومت فشاری تک محوری (UCS) زاویه اصطکاک (ϕ)	نگارهای صوتی (V_p) و (V_s)، چگالی حجمی، چینه‌شناسی	آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه، خرده های حفاری
مکانیسم شکست	نگارهای تصویری، نگارهای قطرسنجی	گزارش‌های روزانه حفاری، چاه پیمایی (عکس‌های دیجیتال)

۲-۹-۲ آزمایش ژئومکانیکی بر روی مغزه

یکی از مهم‌ترین مراحل در ساخت مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی انجام آزمایش‌های ژئومکانیکی بر روی مغزه است. از نتایج این آزمایش‌ها معمولاً به منظور تایید پارامترهای حاصل شده از نگارهای پتروفیزیکی و همچنین توسعه روابط تجربی جهت تبدیل داده‌های دینامیکی به استاتیکی استفاده می‌شود. البته بدست آوردن برخی از این داده‌های آزمایشگاهی کار آسانی نخواهد بود؛ درحقیقت

چالشی که امروزه در صنعت نفت امکان مطالعات و مدلسازی ژئومکانیکی مخازن را تا حدودی ناهموار کرده است، کمبود مغزه از سازندهای مهم تولیدی و غیرتولیدی میادین نفت و گاز است. از طرفی دیگر داده‌های آزمایشگاهی به دلیل پرهزینه بودن، تخریب نمونه پس از انجام آزمایش و ارائه اطلاعات بسیار محدود، نمودار پیوسته‌ای از رفتار ژئومکانیکی زمین را ارائه نمی‌دهد. با توجه به اینکه نمونه‌ها ابزار استخراج داده‌های استاتیکی سازندها هستند، کمبود آن‌ها باعث پدید آمدن رویکردی جدید برای استفاده از داده‌های دینامیکی به‌دست آمده از نگارهای چاه پیمایی و... شده است.

۲-۹-۳ تعیین سرعت موج برشی

در اکثر میادین نفتی و گازی، اطلاعات نگارهای پتروفیزیکی معمولاً از ناحیه پوش سنگ مخزن به پایین برداشت می‌شوند و اطلاعات مربوط به لایه‌های بالادست اغلب در دسترس نیست. همچنین، در برخی مواقع ممکن است یک یا چندین نگار در چاه رانده نشده باشند. سرعت موج برشی یکی از این پارامترها در مطالعات ژئومکانیکی است که متأسفانه به دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود. با توجه به این که سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ از جمله تخلخل، سیال منفذی و... تاثیر می‌پذیرد، از آن برای تعیین نوع سنگ، نوع سیال منفذی و پارامترهای ژئومکانیکی استفاده می‌شود. بنابراین، روش‌های مختلفی برای تعیین آن و یا تخمین آن ارائه شده است.

از راه‌های تعیین سرعت موج برشی می‌توان به اندازه‌گیری آزمایشگاهی و چاه‌پیمایی اشاره کرد. در روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی از مغزه برای تعیین سرعت موج برشی استفاده می‌شود. این روش، روشی استاندارد است که از نتایج آن برای ارزیابی نتایج سایر روش‌ها استفاده می‌شود. یکی از روش‌های دیگر تعیین سرعت موج برشی استفاده از ابزار تصویربرداری صوتی دو قطبی^۱ است. در این روش با بدست آوردن زمان سیر امواج صوتی، سرعت موج برشی را محاسبه می‌کنند. البته معمولاً به دلیل هزینه بالا از این روش‌ها کمتر برای تعیین سرعت موج برشی استفاده می‌شوند. در چنین شرایطی برای تعیین

^۱ Dipole Sonic Imager

سرعت موج برشی از روش‌های تجربی و هوشمند به منظور تخمین آن استفاده می‌کنند. در روش‌های تجربی سرعت موج برشی بر اساس روابط رگرسیونی ساده و یا چندگانه تخمین زده می‌شود. این روابط از همبستگی‌های بین پارامترهای فیزیکی سنگ استفاده می‌کنند. یکی دیگر از روش‌های تخمین سرعت موج برشی استفاده از روش‌های هوشمند است. در این روش از سیستم‌های هوشمند به منظور شناخت الگوهای پنهان بین حجم عظیمی از داده‌ها، استفاده می‌شود. امروزه شاخه‌های مختلف هوش مصنوعی به خصوص شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی و الگوریتم ژنتیک، به عنوان ابزاری قدرتمند در تخمین سرعت موج برشی بکار گرفته می‌شوند (امانی پور و لشکری پور، ۱۳۹۱).

۲-۹-۴ تعیین پارامترهای الاستیک سنگ

پارامترهای الاستیک شامل نسبت پواسون و مدول‌های یانگ، حجمی و برشی است که به دو گروه عمده استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری این پارامترها انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه است. امروزه به دلیل کمبود مغزه‌ها رایج‌ترین روش جایگزین نتایج آزمایشگاهی، تعیین خصوصیات الاستیک با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی می‌باشد. در این رویکرد از طریق اندازه‌گیری زمان سیر امواج برشی و فشاری بر روی مغزه در آزمایشگاه و یا در درون چاه پارامترهای الاستیک بدست می‌آیند (Widarsono et al., 2001). در صورت عدم امکان دسترسی به این داده‌ها، یکی از روش‌های رایج، استفاده از همبستگی و روابط موجود برای محاسبه داده‌های غایب به همراه قبول خطای آن‌ها است (Chardac et al., 2005). استفاده از این روش‌ها با توجه به اینکه نیاز به اطلاعات گسترده و یا آزمایشگاهی ندارند به شدت مورد استفاده قرار گرفته است (Onyia, 1988). عواملی از جمله نوع سنگ، ناهمسانگردی، چگالی، تخلخل، بافت، ترشوندگی، سطح تنش و درجه حرارت از جمله عوامل موثر بر ثابت‌های الاستیک دینامیکی و سرعت موج می‌باشند. مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و نسبت پواسون از جمله پارامترهای ژئومکانیکی هستند که با در اختیار داشتن سرعت موج فشاری و برشی می‌توان محاسبه کرد. اما باید به این نکته توجه داشت که میان مقادیر مدول یانگ

دینامیکی و استاتیکی تفاوت وجود دارد. این موضوع نخستین بار توسط زیسمن^۱ در سال ۱۹۳۳ مطرح گردید (Zisman, 1933). به طور کلی روش‌های دینامیکی نسبت به روش‌های استاتیکی مقادیر بزرگ تری را نشان می‌دهند. اختلاف بین مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی از صفر تا ۳۰٪ تغییر می‌کند (Vutukuri & Lama, 1978). برای محاسبه نسبت پواسون و مدول‌های دینامیکی از روابط زیر استفاده می‌شود (Zoback, 2007):

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۱-۲)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2}(V_p^2 - 2V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۲-۲)$$

$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (۳-۲)$$

$$K_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (۴-۲)$$

ν_{dyn} نسبت پواسون، E_{dyn} ، G_{dyn} و K_{dyn} به ترتیب مدول‌های یانگ، برشی و بالک دینامیکی می‌باشند. به منظور نزدیک شدن به مقدار مدول یانگ استاتیکی که از آزمایش بر روی مغزه بدست می‌آید، از روابط تجربی که ارائه شده است استفاده می‌شود. روابط ذیل نمونه‌هایی از این روابط می‌باشند.

^۱ Zisman

جدول ۳-۲ روابط تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی

$E_{sta} = 0.4145 E_{dyn} - 1.0593$	سنگ‌های کربناته	(Afsari et al, 2009) (۵-۲)
$E_{sta} = 10.7 V_P - 18.7$	سنگ‌های کربناته	(Erdogan & Yasar, 2004) (۶-۲)
$E_s = 0.541 E_d + 12.85$	سنگ‌های کربناته	(Ameen et al, 2009) (۷-۲)
$E_{sta} = 1.263 E_{dyn} - 29.5$	سنگ‌های آذرین	(King, 1983) (۸-۲)
$E_{sta} = 0.74 E_{dyn} - 0.82$	سنگ‌های رسوبی	(Kazi & Eissa, 1988) (۹-۲)
$E_{sta} = 0.956 E_{dyn}^{0.69}$	ماسه سنگ	(Marcinew & Morales, 1993) (۱۰-۲)

هنگام استفاده از هر یک از آن‌ها برای مناطق دیگر، باید دقت کرد که از رابطه‌ای استفاده شود که دارای بیشترین شرایط مشابه با منطقه مورد مطالعه را دارد.

۲-۹-۵ تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ

پارامترهای مقاومتی سنگ که شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی می‌باشند. بهترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ، آزمون‌های آزمایشگاهی است. با استفاده از این آزمون‌ها، به راحتی می‌توان مقادیر این پارامترها را بدست آورد. مهم‌ترین روش جایگزین تعیین پارامترهای مقاومت در صورت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی، استفاده از داده‌های پتروفیزیکی می‌باشد. جدول ۴-۲ تعدادی از روابط رایج برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوری در سنگ‌های آهکی و شیلی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲ روابط تجربی محاسبه مقاومت فشاری تک محوری

$UCS = (7682/\Delta T)^{1.82}/145$	-	(Zoback, 2010) (۱۱-۲)
$UCS = 10^{2.44+109.14/\Delta T}/145$	-	(Zoback, 2010) (۱۲-۲)
$UCS = 276(1-3\phi)^2$	روسیه	(Novik & Rzhevskii, 1971) (۱۳-۲)
$UCS = 228 + 4.1089E_s$	-	(Plumb, 1994) (۱۴-۲)
$UCS = 89.432e^{-0.0546 \phi}$	عربستان	(Ameen et al, 2009) (۱۵-۲)
$UCS = 258 \exp(-9\phi)$	-	(Sarda et al., 1993) (۱۶-۲)
UCS: مقاومت تراکمی تک محوری (Mpa)، Δt: زمان تاخیر امواج تراکمی ($\mu s/ft$)، E: مدول یانگ استاتیکی (Gpa)، ϕ: تخلخل		

۲-۹-۶ وضعیت تنش برجا

سازندهای زمین شناسی به دلیل وزن روباره و تنش های تکتونیکی همواره در شرایط تحت تنش هستند. عامل اصلی تنش در عمق زمین، چگالی یا وزن لایه های فوقانی است (Whitebay & Morita, 1994). با شروع عملیات حفاری چاه در یک سازند، توزیع مجدد تنش ها نزدیک دیواره چاه اتفاق می افتد. بنابراین آگاهی از نحوه توزیع تنش در اطراف یک چاه در تحلیل پایداری آن امری بسیار ضروری است. برای استفاده از تنش برجا در مدل ژئومکانیکی لازم است تا هم بزرگی و هم جهت تنش برجا اندازه گیری شود (Fjaer et al., 2008). تنش های اصلی شامل تنش قائم (σ_v)، تنش افقی حداکثر (σ_H) و حداقل (σ_h) می باشند. امروزه چندین روش مستقیم و غیرمستقیم (روابط تجربی) برای تعیین بزرگی تنش در مخازن نفتی ارائه شده است. از جمله روش های اندازه گیری تنش به صورت مستقیم می توان به شکست هیدرولیکی و تزریق اشاره کرد که معمولاً به دلیل هزینه های زیاد، دشواری پیاده سازی در اعماق زیاد و امکان شکست در برخی موارد، از این آزمون ها به ندرت استفاده می شود. اما با فرض اینکه راستای یکی از تنش ها به صورت قائم باشد، تنش های افقی حداکثر و حداقل را می توان بر اساس نسبت تنش موثر بدست آورد. این نسبت به تنش موثر افقی، تنش موثر قائم، خصوصیات سنگ و میدان تنش

بستگی دارد. با بدست آوردن این نسبت در هر نقطه، می‌توان مقادیر تنش موثر را بسته به جنس سنگ، ضخامت روباره و مقادیر فشار منفذی، تخمین زد (Holland et al, 2010). معمولا در چاه دو نوع شکستگی برشی و القایی ناشی از حفاری رخ می‌دهد. این شکستگی‌ها را به راحتی می‌توان از نگارهای تصویری بدست آمده از چاه مشاهده نمود و از آن‌ها برای تخمین بزرگی و راستای تنش‌ها استفاده نمود (Afsari et al, 2009).

۲-۹-۶-۱ تنش قائم

یکی از تنش‌های اصلی، تنش قائم یا به عبارتی دیگر تنش روباره^۱ می‌باشد که ناشی از وزن طبقات بالایی است. تنش قائم با استفاده از نمودار چگالی محاسبه می‌شود و برای نقاطی که فاقد داده هستند، چگالی معمولا حدود 2.5 gr/cm^3 فرض می‌شود. تنش قائم را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\sigma_v = \int_0^z p(z) \cdot g \cdot dz \quad (\text{Afsari et al., 2009}) \quad (2-17)$$

که در آن ρ چگالی سنگ، z عمق و g شتاب ثقل زمین می‌باشد.

۲-۹-۶-۲ فشار منفذی

فشار سیال موجود در حفره‌های سنگ را فشار منفذی می‌گویند. فشار منفذی یکی از کمیت‌های مهم برای تخمین وضعیت تنش‌های برجا مورد نیاز می‌باشد. اطلاع از مقدار این کمیت در نقاط مختلف میدان، باعث کاهش چشم‌گیر خطرات حفاری و بهبود طراحی چاه، طراحی وزن گل و تعیین نقاط نصب لوله جداری در چاه می‌شود. یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه فشار منفذی، استفاده از رابطه ایتون^۲ می‌باشد که بر اساس مقاومت ویژه یا نگارهای صوتی فشار منفذی را محاسبه می‌کند (Eaton, 1975). معادله نهایی ایتون برای محاسبه فشار منفذی به صورت زیر است:

$$P_p = OBG - [OBG - P_{ng}] \left[\frac{DT}{DT_n} \right]^n \quad (2-18)$$

¹ Overburden Stress

² Eaton

که در آن، P_p فشار منفذی، OBG گرادیان افزایش تنش روباره، P_{ng} فشار منفذی همه جانبه، DT نگار امواج صوتی فشاری، DT_n نرمال شده نگار DT است. ضریب n نیز به خصوصیات زمین‌شناسی منطقه موردنظر بستگی دارد. این روش برای ماسه سنگ‌ها و شیل‌ها کاربرد دارد. اما در سنگ‌های کربناته شکسته و خردشده، به دلیل توزیع نامنظم تخلخل، این روش مفید نمی‌باشد (امانی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۹-۶-۳ تنش‌های افقی حداقل و حداکثر

روش‌های متعددی جهت تخمین مقادیر و جهت تنش‌های افقی در چاه قائم ارائه شده است. آمادی^۱ و استفانسون^۲ آزمایش شکست هیدرولیکی را متداول‌ترین روش اندازه‌گیری برجای تنش معرفی نموده‌اند (Amadei & Stephansson, 1997). در اعماق زیاد که امکان اجرای آزمایش شکست هیدرولیکی وجود ندارد، آزمایش LOT جایگزین می‌شود. اگرچه این آزمایش در صنعت نفت با هدف تعیین حد بالای فشار گل حفاری انجام می‌گیرد، مقادیر بدست آمده از این آزمایش تقریباً برابر با مقادیر تنش اصلی افقی حداقل است. در کنار روش‌های اندازه‌گیری برجا، روش‌های تخمین مقادیر تنش به دلیل کم هزینه بودن و سرعت در محاسبه مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه، مدلسازی شکستگی‌های برشی و کششی ناشی از تنش با استفاده تخمین مقادیر تنش از روابط پوروالاستیک^۳ است. فشار منفذی و تنش قائم، ورودی‌هایی هستند که برای تخمین بزرگی تنش افقی حداقل و حداکثر در این روابط استفاده می‌شوند. در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفتی معمولاً از روش پوروالاستیک برای تعیین دو مولفه تنش افقی استفاده می‌شود (Zoback, 2007).

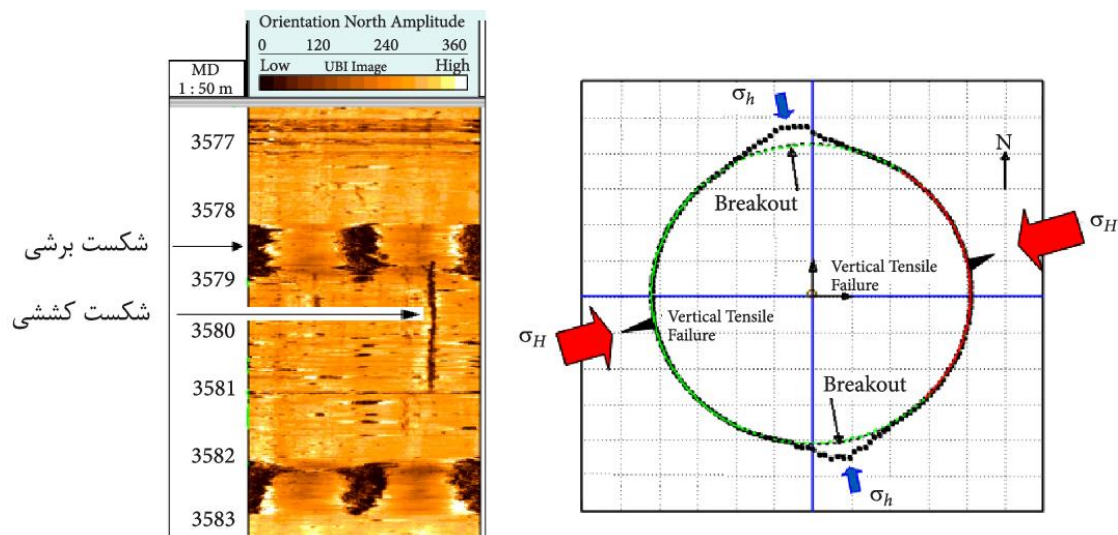
^۱ Amadei

^۲ Stephansson

^۳ Poroelastic

۲-۹-۴ راستای تنش‌های افقی

راستای تنش‌های افقی را می‌توان با استفاده از ریزش‌ها و شکستگی‌های کششی القایی در دیواره چاه ها مشخص نمود (Zoback & Brudy, 1999). در مهندسی نفت، ابزارهای متفاوتی برای تعیین راستای تنش‌های اصلی بکار گرفته می‌شوند که در این میان نگارهای تصویری و قطرسنجی چند بازویی نقش بسزایی دارند. در چاه‌های تقریباً عمودی، جهت گسیختگی‌های برشی در راستای تنش افقی حداقل و شکستگی‌های کششی در راستای تنش افقی حداکثر تشکیل می‌شوند که در شکل ۲-۹ نمایش داده شده‌اند (Zoback et al., 1985).



شکل ۲-۹ جهت ریزش‌ها و شکستگی‌های کششی القایی نسبت به جهت تنش‌های افقی حداقل و حداکثر (Alisamir & Abdideh, 2018).

۲-۹-۷ مدل ساختاری

مبنای مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، مدل ساختاری است که می‌توان آن را بر اساس داده‌های حاصل از لرزه‌نگاری ترسیم کرد (Plumb et al., 2000). بنابراین برای مدل‌سازی سه‌بعدی پارامترهای استاتیکی مخازن، ابتدا باید یک مدل ساختاری از وضعیت گسل‌ها، سرسازندها و سطوح لایه‌بندی ایجاد شود. همچنین برای ساخت این مدل می‌توان از نقشه‌های زمین‌ساختاری و چینه‌شناسی که دارای اطلاعاتی از جمله مختصات و عمق گسل‌ها، افق‌ها و سطوح لایه‌بندی هستند، استفاده کرد (Holden et al., 2003). اگر داده‌های لرزه‌نگاری موجود نباشند و یا نتوان به قدر کافی به آن‌ها اعتماد کرد، می‌توان از

محل تلاقی چاه‌ها با لایه‌های زمین‌شناسی، استفاده کرد (Fernandez-ibanez et al., 2010). مدل ساختاری یک مخزن در واقع یک مدل متداول برای افق‌های زمین‌شناسی و گسل‌ها می‌باشد. این مدل چهارچوب هندسی شبکه سه‌بعدی را شکل داده و مرزهای مدل‌های رخساره‌ای و پتروفیزیکی را برای تعریف خواص سنگ، ایجاد می‌کند (Holden et al., 2003).

۲-۹-۸ شبکه‌بندی مدل ساختاری

مرحله بعدی در مدل‌سازی سه‌بعدی، شبکه‌بندی مدل ساختاری با مقیاس مناسب است. شبکه‌بندی براساس ساختار زمین‌شناسی، افق‌ها و گسل‌ها ساخته می‌شود. در این مرحله، محیط مورد مطالعه به سلول‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود که هر یک از سلول‌ها نشان دهنده مقدار میانگینی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی تمام نقاط در برگرنده خود در فضا می‌باشد. بنابراین مشخصات هر سلول با سایر سلول‌ها متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر تمامی خواص مربوط به هر سلول از جمله خواص پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی در تمام بخش‌های آن یکسان است (Schlumberger, 2009). اگر ابعاد بلوک‌ها بزرگ باشند، نتیجه مطلوبی از مدل‌سازی حاصل نمی‌شود. همچنین در صورتی ابعاد آن‌ها کوچک انتخاب شوند، مدت زمان مدل‌سازی بسیار طولانی خواهد شد. کوچک بودن ابعاد بلوک‌ها می‌تواند منجر به افزایش خطا شود. بنابراین باید ابعاد شبکه‌بندی را به گونه‌ای انتخاب کرد که علاوه بر اینکه نتایج حاصل از آن قابل قبول باشند، زمان اجرای مدل‌سازی هم نیز افزایش پیدا نکند (Deutsch, 2002).

۲-۹-۹ درشت‌نمایی^۱ مقیاس

درک خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌ها در مقیاس‌های مختلف بسیار مهم است. پس از اینکه مدل سه بعدی زمین ساختاری ایجاد و سپس شبکه‌بندی شد، باید داده‌های حاصل از چاه‌ها را در مدل سه‌بعدی وارد کرد. این بخش شامل دو مرحله متوالی می‌باشد. ابتدا باید خصوصیات بدست آمده از چاه وارد مدل

^۱ Upscaling

شوند و سپس در میدان گسترش یابند. معمولاً نگارهای بدست آمده از چاه‌ها و جزییات ژئومکانیکی محاسبه شده بر اساس آن‌ها، وضوح بیشتری نسبت به شبکه‌بندی دارند. نگارها معمولاً با فاصله ۱۵ سانتی‌متر برداشت می‌شوند که در مقایسه با ابعاد شبکه‌بندی که چندین متر است، بسیار کوچک به نظر می‌رسد. بنابراین باید خصوصیات نگارها، به شبکه‌بندی نزدیک هر چاه تعمیم داده شود. مقداری که در شبکه‌بندی قرار دارند، باید به عنوان معرف مقادیر بدست آمده از نگارها باشند. درشت‌نمایی مقیاس این داده‌ها، روش‌های مختلفی دارد که شامل روش نزدیک‌ترین فاصله^۱، میانه^۲، میانگین^۳ و یا بیشترین مقدار تکرار شده^۴ می‌باشد. مرحله دوم این است که مقادیر درشت‌نمایی شده برای شبکه‌بندی نزدیک به هر چاه، برای بخش مورد مطالعه از میدان توسعه یابد. چندین روش برای این منظور وجود دارد که استفاده از هر کدام به نوع و میزان در دسترس بودن داده‌ها و نیز میزان ناهمسانگردی بخش مورد مطالعه از میدان بستگی خواهد داشت. (Fernandez-ibanez et al., 2010).

۹-۱۰ انتخاب روش مناسب تخمین پارامترهای ژئومکانیکی

یکی از مراحل اصلی مدلسازی ژئومکانیکی تخمین خواص پتروفیزیکی و ویژگی‌های سنگ در بخش‌هایی از محیط مورد مطالعه است که اطلاعاتی از آن موجود نیست. همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، برای تخمین و گسترش پارامترهای ژئومکانیکی در سه‌بعد، روش‌های مختلفی از جمله روش‌های زمین‌آمار، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و بکارگیری داده‌های لرزه‌ای به منظور وارون‌سازی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب این روش‌ها داده‌محور^۵ می‌باشد و با توجه به اطلاعات در دسترس از چاه‌ها، شرایط میدان مورد مطالعه و در نظرگیری فرضیات مربوط به هر یک از آن‌ها، روش مناسب برای تخمین و گسترش پارامترها در سه‌بعد انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که هر کدام از این روش‌ها دارای تکنیک‌ها و الگوریتم‌های بسیار زیادی هستند که باید با توجه به نوع پارامترها، پراکندگی و

^۱ Nearest Neighbor

^۲ Median

^۳ Mean

^۴ Most Frequent Values

^۵ Data Driven

دسترسی داده‌ها و همچنین شرایط، هدف و نوع عملیات حفاری انتخاب شوند (پیرایه‌گر و همکاران، ۱۳۸۸).

۲-۹-۱۱ روش‌های زمین آماری

زمین آمار شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که با استفاده از اطلاعات بدست آمده از نقاط نمونه‌برداری شده قادر به تخمین خصوصیت مورد نظر در نقاط نمونه برداری نشده، است. یکی از ابزارهای مطالعات زمین آمار، تابعی آماری به نام واریوگرام^۱ است که امکان تجزیه و تحلیل ساختار مقیاس و شدت تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای را فراهم می‌آورد. اگر واریوگرام به درستی تعیین شود، از آن نه تنها برای تخمین آماری بلکه می‌توان به منظور طراحی و اصلاح شبکه نمونه‌برداری نیز استفاده کرد. بکارگیری روش‌های زمین آمار زمانی امکان‌پذیر است که امکان ساخت واریوگرام به درستی وجود داشته باشد. زیرا روش‌های تحلیل و تخمین داده‌ها بر پایه‌ی زمین آمار همبستگی فضایی داده‌ها را در نظر می‌گیرند. واریوگرام مهم‌ترین ابزار برای نمایش همبستگی‌های فضایی بین داده‌ها و اساس بسیاری از محاسبات زمین آماری است. در صورت برقراری فرضیات و بهره‌مندی از داده‌های مورد نیاز، استفاده از روش‌های زمین آماری می‌تواند گزینه مناسبی باشد. زیرا در این روش علاوه بر تخمین مقدار پارامتر در هر نقطه از فضای مورد نظر با کمترین خطای ممکن، میزان عدم قطعیت یا خطای تخمین را نیز می‌توان بدست آورد (بهزاد و همکاران، ۱۳۸۹). توسعه‌ی گونه‌های مختلف تکنیک‌های درون‌یابی^۲ از جمله کریجینگ^۳ (شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، کریجینگ گسسته و...) باعث انعطاف‌پذیری و دامنه وسیع کاربردی زمین آمار در تجزیه و تحلیل بسیاری از مسائل موجود در علوم محیطی شده است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵). روش‌های مدلسازی خصوصیات و ویژگی‌ها به دو دسته کلی قطعی و تصادفی تقسیم می‌شوند. روش‌های قطعی مدلسازی، روش‌هایی هستند که فقط یک خروجی ارائه می‌دهند. کریجینگ

^۱ Variogram

^۲ Interpolation

^۳ Kriging

یکی از پرکاربردترین روش‌های قطعی در زمینه شبیه‌سازی متغیرهای مخزن است. اما در روش‌های تصادفی برخلاف روش‌های قطعی، تحقق‌های زیادی از شبیه‌سازی‌های زمین آماری ایجاد می‌شود. از روش‌های تصادفی می‌توان به شبیه‌سازی متوالی گوسی اشاره کرد (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه به بررسی روش کریجینگ معمولی و شبیه‌سازی متوالی گوسی پرداخته می‌شود.

۲-۹-۱۱-۱ کریجینگ

مهم‌ترین تخمین‌گر آمار فضایی کریجینگ نام دارد که برپایه متحرک وزن‌دار استوار می‌باشد. کریجینگ در سال ۱۹۵۱ برای اولین بار توسط شخصی به نام کریج^۱ به منظور تخمین رگه‌های طلای معادن در آفریقای جنوبی استفاده شد. بطور کلی درون‌یابی که بر اساس تخمین مدل‌های آمار فضایی صورت می‌گیرد، فرآیندی است که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم بدست آورد (Neuman & Clifton, 1982). به طور کلی کریجینگ، مجموعه‌ای از روش‌های رگرسیون خطی تعمیم داده شده در ابعاد بزرگ است (حسنی‌پاک، ۱۳۹۲).

۲-۹-۱۱-۲ شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS)

روش شبیه‌سازی زمین آماری در سال ۱۹۷۰ توسط ژورنل^۲ مطرح شد و پس از آن در حوزه‌های مختلفی از جمله معدن، نفت و گاز و زمین‌شناسی به‌طور گسترده‌ای با هدف ارزیابی ریسک و عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفت. روش شبیه‌سازی متوالی گوسی یکی از روش‌های معمول و انعطاف‌پذیر می‌باشد که امروزه در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها، استفاده می‌شود. این الگوریتم نیاز به داده‌های استاندارد نرمال جهت انجام شبیه‌سازی دارد. در این روش برای هر گره که عمل شبیه‌سازی در آن انجام می‌شود، یک هیستوگرام محلی تولید می‌شود که از آن یک عدد به‌طور تصادفی به‌عنوان مقدار شبیه‌سازی شده

^۱ Krige

^۲ Journel

استخراج می‌شود. شاید بزرگ‌ترین مشکل برای استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی، انتخاب شعاع جستجو باشد. انتخاب شعاع همسایگی کوچک می‌تواند منجر به شرطی‌سازی ضعیف داده‌ها شود (Vann et al., 2002). این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی است که به طور وسیعی در بخش صنایع نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد و قادر است نتایج قابل قبولی ارائه دهد (امانی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۹-۱۲ وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای

علم لرزه‌نگاری به مطالعه گسترش امواج الاستیک در زمین می‌پردازد و به عنوان یکی از شاخه‌های ژئوفیزیک شناخته می‌شود. در این روش امواج توسط یک منبع به داخل زمین فرستاده می‌شوند تا از لایه‌های متفاوت عبور کرده و قسمتی از آن را به سمت منبع یا نقطه‌ای مشخص منعکس کنند. این امواج به دلیل اختلاف چگالی و سرعت صوت در لایه‌های ژئوفیزیکی انعکاس‌های گوناگونی دارند و توسط ژئوفون‌ها (در خشکی) و هیدروفون‌ها (در دریا) جذب می‌شوند. لرزه‌نگاری به صورت دوبعدی، سه‌بعدی و چهاربعدی می‌تواند انجام شود. هدف کلی از لرزه‌نگاری سه‌بعدی، بدست آوردن قدرت تفکیک بهتر زمین‌شناسی منطقه مورد نظر می‌باشد. خروجی این روش یک حجم از داده‌های لرزه‌ای است (تقی زاده و آبدیده، ۱۳۹۲). از این داده‌ها به صورت مستقیم برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی استفاده می‌شود. نکته مثبت استفاده مستقیم از داده‌های لرزه‌ای برای محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی این است که داده‌های آن‌ها فقط محدود به اطلاعات درون چاهی نمی‌شود. هر چند استفاده از داده‌های لرزه‌ای برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی مشکلاتی از قبیل تاثیرپذیری مستقیم مدل از کیفیت داده‌های لرزه‌ای برداشت شده، محدودیت نوع داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده و طولانی بودن زمان محاسبات تخمین را به دنبال دارد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۴). بدین ترتیب با استفاده از برداشت‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی و ابزار وارون‌سازی لرزه‌ای، می‌توان خواص ژئومکانیکی از چاه را به کل منطقه تعمیم داد و در نهایت یک مکعب سه‌بعدی ژئومکانیکی بدست آورد (شریفی و همکاران، ۱۳۹۵).

۲-۹-۱۳ روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی

روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI)^۱ از جمله روش‌هایی هستند که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفتند. استفاده از این روش‌ها در کنار روش‌های زمین آماری تغییرات شگرفی را در علوم مرتبط با زمین ایجاد کرده است. زیرا این روش‌ها برای حل بسیاری از مسائل پیچیده که اغلب غیردقیق و همراه با عدم قطعیت می‌باشند، برای حل مسئله مورد نظر می‌توانند ترکیبی از روش‌ها را از منابع مختلف بکار گیرند. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند انسان قدرت یادگیری و تحلیل دارند و می‌توانند عملکرد خود را بهبود و در نهایت شرح دهند. شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای به صورت موازی ساخته می‌شوند که این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند (تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵). در میادین و مناطقی که امکان استفاده از روش‌هایی نظیر روش‌های زمین آماری به دلایلی از جمله کافی نبودن داده‌های مورد نیاز، پراکندگی نامناسب داده‌ها، پیچیدگی ساختار زمین شناسی و... وجود نداشته باشد، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به منظور تخمین و گسترش پارامترهای مورد نظر در سه بعد می‌تواند راهگشا باشد. شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۲ از جمله معروف‌ترین روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌باشند. این شبکه‌ها با برقراری ارتباط میان داده‌های ورودی و خروجی، امکان ارائه خروجی برای سایر شرایط را به کمک شبیه‌سازی فراهم می‌کنند.

۲-۹-۱۴ روش‌های ترکیب اطلاعات

ترکیب اطلاعات^۳ مفهومی است که از زمان طرح رسمی آن در مجامع علمی، چیزی حدود نیم قرن می‌گذرد. به کمک روش‌های ترکیب اطلاعات می‌توان از چندین روش به طور همزمان برای تخمین ویژگی‌ها و خصوصیات میدان مورد نظر در سه بعد استفاده کرد. هدف اصلی ترکیب اطلاعات مدیریت عدم قطعیت و ارتقا صحت تصمیمات است. به طور کلی ترکیب اطلاعات، برای کمک به کارشناسان رشته‌های مختلف جهت تصمیم‌گیری با کمک منابع اطلاعاتی چندگانه توسعه یافته‌اند. هدف اصلی این تکنیک‌ها، افزایش

^۱ Artificial intelligence

^۲ Artificial neural network

^۳ Data fusion

قطعیت، اطمینان و کاهش ریسک و خطا در تصمیم گیری و عوارض ناشی از آن است. اولین کاربرد ترکیب اطلاعات در مباحث نظامی بوده است؛ اما در حال حاضر از ترکیب اطلاعات چند سنجنده‌ها در شاخه رباتیک، ارزیابی‌های غیرمخرب، بازشناخت الگو، علوم پزشکی، تحقیقات دفاعی و امور بازرگانی به وفور استفاده می‌شود. روش‌های ترکیب اطلاعات که به تصمیم‌گیری چند متغیره (در فضاهای با بعد بالا) کمک موثری می‌کنند و کاربردهای متنوعی در حوزه علوم زمین می‌توانند داشته باشند (تخم‌چی، ۱۳۹۵).

۲-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به بیان تعریف کلیات پایداری در چاه پرداخته و در ادامه انواع ناپایداری در چاه به دو دسته شیمیایی و مکانیکی تقسیم‌بندی شد (جدول ۲-۱). سپس عوامل غیرقابل کنترل و قابل کنترل مکانیکی موثر بر پایداری چاه به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، کلیاتی در مورد انواع گسیختگی، اهمیت پیش‌بینی ناپایداری پیش از حفاری، روش‌های پیش‌بینی ناپایداری و نهایتاً فرآیند ساخت مدل ژئومکانیکی مطرح گردید. با توجه به آنچه که در این فصل مطرح شد می‌توان نتیجه گرفت:

- ناپایداری چاه تابع عوامل متعدد و مختلفی است که هر یک به سهم خود می‌تواند از درجه اهمیت بالایی برخوردار باشد.
- شرایط تکتونیکی و ناهمسانگردی تنش نیز به عنوان عوامل غیرقابل کنترل، نقش اساسی در تعیین فشار گل حفاری خواهند داشت.
- بدست آوردن فشار مناسب گل حفاری یا پنجره گل ایمن، گامی اساسی در تعیین پایداری دیواره چاه خواهد بود. در این راستا می‌توان از معیارهای شکست مختلف جهت بدست آوردن فشار مناسب گل و تعیین تنش‌ها استفاده نمود.
- با توجه به اینکه مدل‌های یک‌بعدی به خوبی تغییرات پارامترها را در راستای حفاری چاه نمایش می‌دهند، ابزار مناسبی برای ارزیابی و تحلیل پایداری چاه می‌باشند. اما این مدل‌ها قادر

به نمایش ناهمسانگردی تغییرات افقی در میدان نمی‌باشند و جهت شناخت و بررسی کلی وضعیت میدان در راستاهای مختلف باید از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شود.

- در صورت برقراری فرضیات و بهره‌مندی از داده‌های مورد نیاز، استفاده از روش‌های زمین‌آماري می‌تواند گزینه بسیار مناسبی باشد. زیرا در این روش علاوه بر تخمین مقدار پارامتر در هر نقطه از فضای مورد نظر با کمترین خطای ممکن، میزان عدم قطعیت یا خطای تخمین را نیز می‌توان بدست آورد.
- مدل ژئومکانیکی زمین می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند در تحلیل پایداری چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری به خدمت گرفته شود.

فصل ۳: پیشینه مطالعات مداخلتی برای زنان کانیکی

۳- ۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت نفت شاهد پیشرفت‌های خوبی در زمینه مطالعات ژئومکانیکی بوده است. اما با وجود این پیشرفت‌ها، مطالعات ژئومکانیکی هنوز به عنوان یک مرحله اصلی در مطالعات مهندسی مخازن نفت و گاز شناخته نشده است و حلقه مفقوده بسیاری از مطالعات و فرآیندهای اجرایی می‌باشد. عدم توجه کافی به پیشرفت‌های جدید علمی در زمینه ژئومکانیک می‌تواند خسارت‌های زیادی را برای کشور در برداشته باشد. از طرفی دیگر محیط زمین یک محیط بسیار پویاست که هر منطقه از آن ویژگی‌های متفاوت و تغییرات زیادی دارد. به همین دلیل تقریباً هر پژوهشی که در این زمینه صورت گیرد با نتایج جدید و راهگشایی همراه خواهد بود که می‌تواند سهم قابل توجهی در پیشبرد اهداف مطالعات ژئومکانیکی داشته باشد. در ادامه مجموعه‌ای از مطالعات انجام شده در این زمینه، بررسی خواهند شد. همچنین به دلیل اینکه در این پژوهش به طور خاص به موضوع مدلسازی ژئومکانیکی سه‌بعدی پرداخته می‌شود، مجموعه‌ای از مطالعات موجود در این رابطه نیز مرور خواهد شد.

۳- ۲ پیشینه مدل ژئومکانیکی

مفهوم مدل ژئومکانیکی یکی از نتایج مطالعه علت ناپایداری در چاه‌های میدان کاسیانا^۱ کلمبیا است. در سال ۱۹۹۰ شرکت بریتیش پترولیوم^۲ با چندین مورد ناپایداری شدید در این میدان مواجه شد که روش‌های مرسوم رفع ناپایداری چاه قادر به برطرف نمودن آن‌ها نبود (Addis et al., 1993). به همین دلیل تیمی از مهندسين زمین از چندین شرکت مختلف برای حل این مشکل ایجاد شد. آن‌ها پس از گذشت یک سال زمان، توانستند حفاری در این میدان را بهبود بخشند. شرکت شلومبرگر^۳ به واسطه‌ی تجربه‌ای که در این مطالعات بدست آورد، ترغیب به توسعه مفهوم مدل ژئومکانیکی شد (Akbar Ali et al., 2003). در این فرآیند، گردآوری و پردازش داده‌ها در یک قالب گرافیکی تاثیر پارامترهای

¹ Cusiana

² British Petroleum

³ Schlumberger

ژئومکانیکی را در ایجاد ناپایداری‌ها مشخص کرد. این داده‌ها، تغییرات فیزیکی و زمین‌شناسی و اطلاعات کمی و کیفی نمودارهای گل، پتروفیزیکی و گزارشات حفاری را شامل می‌شد. به این ترتیب، مدل تهیه شده علاوه بر اینکه تمام داده‌های فیزیکی و ژئومکانیکی مرتبط با وضعیت مخزن، لایه‌های پوشاننده و لایه‌های نزدیک به مرز را در بر می‌گرفت، اطلاعات ناقصی را که برای ساخت مدل ژئومکانیکی مورد نیاز بود، مشخص می‌کرد. در نهایت مدلی که بر اساس داده‌های میدان ایجاد شده بود، با مفهوم مدل ژئومکانیکی ارائه گردید. با مطالعه میدان کاسیانا چند اصل اساسی مربوط به ساخت مدل ژئومکانیکی مشخص شد که عبارتند از (Akbar Ali et al., 2003):

۱. جهت ساخت مدل تمام داده‌هایی که در دسترس هستند باید برای تکمیل و توسعه مدل بکار روند.

۲. باید پیچیدگی تمام داده‌ها، ارزش هر کدام و زمان در دسترس قرار گرفتن آن‌ها مشخص شود.

۳. سه نوع داده مکانیسم شکست، حالات تنش و خصوصیات مکانیکی در ساخت مدل ژئومکانیکی بسیار مهم و کلیدی می‌باشند.

۴. برای اجرای موفق عملیات حفاری بر اساس مدل ژئومکانیکی، داده‌های جدیدی که بدست می‌آیند برای بروزرسانی مدل، مدیریت صحیح داده‌ها و برقراری ارتباطی خوب در میان آن‌ها بکار برده شوند.

عملیات اجرایی احداث چاه‌ها، با استفاده از مدل ژئومکانیکی در این میدان تقریباً بدون برخورد به مشکل خاصی به پایان رسید.

۳-۳ مروری بر مطالعات مدل‌های ژئومکانیکی

تاکنون برای تعداد زیادی از میدان‌های سرتاسر دنیا مدل‌های ژئومکانیکی ساخته شده است. با وجود آن که ساخت هر کدام از آن‌ها برای اهداف متفاوتی انجام گرفته است، اما یکی از اهداف اصلی و مهم در همه این مطالعات کاهش خطرات و زمان ناشی از ناپایداری چاه‌ها بوده است (Plumb et al., 2000).

البته برخلاف اینکه هدف اولیه از ساخت مدل‌های ژئومکانیکی، بررسی و رفع مشکلات مربوط به ناپایداری چاه بود، به سرعت کاربرد آن‌ها افزایش پیدا کرد و به عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها برای طرح‌های توسعه‌ای میادین نفتی انتخاب شد. ارزیابی پایداری چاه، پیش‌بینی تولید ماسه، طراحی شکاف هیدرولیکی، فشرده شدن مخزن، طراحی محدوده پایدار گل، ارزیابی فرونشست سطحی، خصوصیات مکانیکی سازند شکاف‌دار، طراحی عملیات تحریک چاه، ارزیابی گسل‌های عایق، انتخاب مته حفاری، بهینه‌سازی مسیر چاه، حداکثر کردن سرعت نفوذ، بهینه‌سازی جهت مشبک‌ها، مطالعه روی پدیده مچاله شدن لوله جداری، انتخاب بهترین راستا برای حفر چاه، طراحی لوله جداری و بسیاری از موارد دیگر تنها بخشی از کاربردهای مدلسازی ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز می‌باشد. البته بیشتر کاربردهای نوین مدل‌های ژئومکانیکی مربوط به مدل‌های سه‌بعدی است. شناخت هرچه بیشتر مخزن نفتی یا به عبارتی ارزیابی ساختاری مخزن و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و تنش‌های برجا کمک شایانی به پیش‌برد اهداف فوق خواهد کرد. به جرات می‌توان گفت کمتر فعالیتی در مراحل اکتشاف و تولید وجود دارد که مدل‌های ژئومکانیکی قادر به بررسی آن نباشند (ترابی‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعه بر روی ساخت مدل‌های یک‌بعدی ژئومکانیکی بیش از سه دهه پیش آغاز شده است و امروزه به عنوان یک مدل مرسوم از میدان، ارائه می‌شود. اما مدلسازی سه‌بعدی در دو دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات در زمینه مدل‌های سه‌بعدی را می‌توان به طور جدی از سال ۲۰۰۰ به بعد دنبال کرد که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره خواهد شد.

ال روایلی^۱ و چارداک^۲ برای دستیابی به اهدافی همچون شناسایی زون‌های مشکل‌دار از نظر حفاری، انتخاب نوع مته و طراحی وزن گل مناسب به طراحی مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی در سازند خواف^۳ میدان غوار عربستان پرداختند. مدل ژئومکانیکی طراحی شده در این پژوهش به گونه‌ای ساخته شده است که

^۱ Al-Ruwaili

^۲ Chardac

^۳ Jauf

امکان اصلاح و ارتقا آن با داده‌هایی که از هر عملیات حفاری جدید حاصل می‌شود را دارد (Al-Ruwaili & Chardac, 2003). اهمیت حفظ شرایط ایمن وزن گل حفاری را می‌توان به روشنی در برنامه حفاری های میدان پتروناس^۱ واقع در مرز ساحل و آب‌های عمیق خلیج مکزیک مشاهده کرد. تغییرات سریع عمق آب که همراه با تغییر فشار روباره می‌باشد، سبب شده که ملاحظات در طراحی چاه‌های با امتداد جانبی زیاد در این میدان در نظر گرفته شود. مشکلات مشاهده شده در این میدان شامل عدم تمیزکاری مناسب، تنگ شدگی چاه، افزایش زمان چرخش گل حفاری و از دست دادن ابزار حفاری می‌باشد. طراحی چاه‌های با امتداد جانبی زیاد در این میدان به تهیه مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی بر اساس داده های موجود منجر گردید. حفاری در این میدان در سال ۲۰۰۲ شروع شد. نظارت تمام مدت به همراه استفاده از مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در شناخت وقایع ناخواسته‌ای که مانع دستیابی به عمق مورد نظر بودند، تاثیر بسزایی داشت (Akbar Ali et al., 2003).

در سال ۲۰۰۴ جهت به حداقل رساندن خطرات حفاری و جلوگیری از رخ دادن وقایع پیش‌بینی نشده، مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی برای میدان پالوازول^۲ اکوادور تهیه شد. برای مطالعه این میدان یک مقطع لرزه‌ای سه‌بعدی بزرگی/سرعت از زمین‌شناسی ساختاری و تغییرات فشار منفذی، به عنوان اساس مدل ساخته شد. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی بر اساس وقایع حفاری، نمودارهای پتروفیزیکی و نتایج آزمایشگاهی، تهیه گردید. در این میدان برای نخستین بار از روش‌های زمین آماری برای تخمین خصوصیات ژئومکانیکی در مقطع سه‌بعدی زمین‌شناسی ساختاری استفاده گردید. مدل ژئومکانیکی ساخته شده تاثیر بسزایی در مدیریت وقایع برنامه‌ریزی نشده و کاهش خطرات داشت. روش جدید، یک روش منظم را برای طراحی چاه‌ها همراه با کاهش خطر در توسعه مناطق پیچیده را فراهم نمود. مزیت این روش به کارگیری همزمان چندین پارامتر در یک مدل سه‌بعدی جهت انتخاب بهترین مسیر چاه

^۱ Petronias

^۲ Palo Azul

است. این مدل اساس خوبی برای مطالعات تکمیلی میدان مانند مطالعات ماسه‌زایی، بهینه‌سازی توسعه و تکمیل میدان، مطالعات مخزن و آنالیزهای عدم قطعیت می‌باشد (Villalobos et al., 2005).

در مخازن ماسه سنگی سست بر اثر بهره‌برداری، ذرات ناپایدار ماسه همراه با جریان سیال جابه‌جا می‌شوند. مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ماسه‌زایی، تنش‌های درجا و مقاومت سنگ هستند. مدل‌های ژئومکانیکی به‌خصوص مدل‌های سه‌بعدی ابزار بسیار کارآمدی برای بررسی تغییرات این پارامترها و شناسایی زون‌های مستعد برای ماسه‌زایی می‌باشند (Valcarce et al., 2002).

مخزن‌های تولیدی میدان تومبا لاندانا^۱ آنگولا، از لایه‌های ماسه‌سنگی متوالی نسبتاً ضخیم تشکیل شده‌اند. مدل ژئومکانیکی به‌منظور ارزیابی گسیختگی سنگ‌ها در طی دوره بهره‌برداری در این میدان طراحی و بکار گرفته شد. سپس تمامی اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین پتانسیل ماسه‌زایی از جمله مقاومت‌ها، تنش‌ها و مدول‌های گسیختگی با استفاده از مدل توسعه داده شده، تعیین گردیدند. به دلیل خردشدگی شدید سنگ‌ها در این میدان، برآورد مقاومت تک‌محوری با استفاده از نمودار صوتی با خطای زیادی همراه بود. به همین دلیل برای نخستین بار از آزمون خراش^۲ جهت برآورد مقاومت در این میدان استفاده گردید. مزیت اصلی این روش در تعیین مقاومت سنگ‌ها به صورت پیوسته و در یک بازه بزرگ می‌باشد. در این میدان، جهت پیش‌بینی ماسه‌زایی در چاه‌های جهت‌دار از مدل ژئومکانیکی اصلاح شده استفاده شد (Peng et al., 2007).

در سال ۲۰۰۰ شرکت متولی میدان پیلتن استوکسکوی^۳ روسیه در نظر داشت تا روش شکست عمودی غیرمستقیم^۴ را برای کنترل ماسه‌زایی در زون‌های تولیدی با استحکام پایین بکار گیرد. در این راستا با مطالعه داده‌های موجود از چندین چاه، مدل ژئومکانیکی برای شناسایی نوع سنگ‌ها و خصوصیات مکانیکی میدان تهیه شد. در این پژوهش داده‌های ورودی مدل ژئومکانیکی از قبیل نفوذ پذیری، جهت

^۱ Tombua Landana

^۲ TSI™ Scratch

^۳ Piltun-Astokhskoye

^۴ Indirect Vertical Fracturing: IVF

تنش‌ها و پارامترهای الاستیک براساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و نمودارهای پتروفیزیکی چاه‌های قبلی محاسبه گردید. در نهایت از مدل ساخته شده برای تعیین نفوذ، تراکم و بازه‌های مشبک‌کاری و اندازه حفره‌ها جهت به کاهش حداکثری فرآیند ماسه‌زایی استفاده شد (Akbar Ali et al., 2001).

مخزن خواف عربستان از لایه‌های غیرمستحکم با نفوذپذیری متوسط تشکیل شده است. به منظور کنترل ماسه‌زایی در این مخزن مدل ژئومکانیکی براساس داده‌های آزمون‌های آزمایشگاهی و نمودارهای پتروفیزیکی تهیه شده است. همچنین فاصله و موقعیت مشبک‌کاری‌ها با استفاده از مدل محاسبه گردید (Rahim et al., 2003). از مهم‌ترین هدف‌های مدل‌های ژئومکانیکی، شناخت مناطق دارای شرایط خاص ساختاری از جمله میادین واقع در محدوده آب‌های عمیق، گنبد‌های نمکی و مناطق به شدت گسل خورده و شکسته شده به منظور کاهش خطرات حفاری و افزایش بهره‌برداری می‌باشد. به طور کلی میادین کمی در دنیا وجود دارند که دارای ساختار بسیار پیچیده و مشکلات ناپایداری شدید باشند. اما به دلیل فشار بازار جهانی، شرکت‌های فعال در حفاری و توسعه میادین هیدروکربنی ناچار به حفاری مناطق پیچیده با حداقل زمان و هزینه ممکن هستند (Plumb et al., 2000). پیش‌بینی فشار منفذی به دلیل تعدد فرآیندهای موثر و همچنین کمبود اطلاعات زیرسطحی به خصوص برای چاه‌های اکتشافی بسیار دشوار می‌باشد. در بهترین حالت، پیش‌بینی نادرست ممکن است که فقط باعث از دست دادن زمان جهت کنترل فشار شود، اما بدترین حالت ممکن برای پیش‌بینی نادرست، عدم دستیابی به هدف مورد نظر و از دست دادن چاه است. خلیج مکزیک از جمله مکان‌هایی است که برای حفاری در آب‌های عمیق آن به دلیل فشار منفذی بالا به طراحی مدل ژئومکانیکی نیاز می‌باشد (Alsos et al., 2002). در این مکان برای حفر یک چاه اکتشافی، مدل ژئومکانیکی جهت پیش‌بینی فشار منفذی از مطالعات لرزه نگاری و نمودار گل چاه دیگری در فاصله‌ای نزدیک استفاده شد. در ابتدا به دلیل این که فشار کمتر از فشار واقعی پیش‌بینی شده بود، عملیات حفاری در قسمت‌هایی با فوران سیال به درون چاه مواجه گردید. اما در ادامه و با اصلاح و بروزرسانی مدل براساس نمودارهای صوتی، مقاومت ویژه و گاما، حفاری چاه با موفقیت ادامه یافت و به عمق مورد نظر رسید (Plumb et al., 2000).

یکی دیگر از مناطقی که از مدل ژئومکانیکی به منظور دستیابی به اهداف ذکر شده برای آن استفاده شد، میدانی در کمر بند چین خورده رانده شده‌ای^۱ در جنوب آمریکا می‌باشد. اولین عواملی که برای این میدان مشخص شدند، فشار منفذی و تنش روباره بودند. همچنین با به پایان رسیدن هر بخش از حفاری، داده‌های جدید پردازش و برای اصلاح مدل استفاده می‌شدند. پیش‌بینی احتمال ناپایداری در حفاری بخش‌های مشکل‌دار مخزن، تاثیر بسزایی در کاهش برخورد با وقایع غیرمنتظره داشت. مدل ژئومکانیکی ساخته شده نتایجی مانند شناسایی رژیم تنش و جهت‌های آن، تغییرات تنش‌های افقی، شناسایی سیستم‌های ناپیوستگی و خصوصیات آن‌ها را به دنبال داشت (Plumb et al., 2000).

یکی دیگر از مکان‌های مشکل‌دار برای حفاری، محیط‌های ناهموار فلات قاره‌ها مانند دریای شمال و شرق کانادا می‌باشد. میدان هایبریا^۲ از جمله این مناطق است. نشانه‌های مشاهده شده در تمام چاه‌های قائم با عمق زیاد نشان می‌دادند که احتمال ناپایداری در چاه‌های مایل با امتداد جانبی زیاد وجود دارد. لذا برای حفاری چاه‌های جهت‌دار در فاز توسعه میدان، مدل ژئومکانیکی براساس اطلاعات به دست آمده از چاه‌های قائم تهیه شد. فشار ایمن گل حفاری با استفاده از مدل ساخته شده مشخص گردید. علاوه بر این، مدل در فازهای بعدی توسعه میدان جهت انتخاب نوع مته و سرعت نفوذ نیز مورد استفاده قرار گرفت. اولین چاه حفاری شده براساس این مدل که طولانی‌ترین چاه مایل در کانادا نیز بود، با موفقیت به عمق مورد نظر رسید (Plumb et al., 2000).

میدان میرن^۳ دریای شمال از جمله میدان‌هایی است که مدل ژئومکانیکی برای آن ساخته شده است. در این میدان مخازن ماسه سنگی چین خورده در زیر یک گنبد نمکی قرار دارند. هدف از ساخت مدل ژئومکانیکی، ارائه تصویری از وضعیت تنش در این میدان بود. با توجه به این که تنها اطلاعات موجود از میدان، داده‌های یک چاه اکتشافی و یک چاه انحرافی بود، برای ترسیم پروفیل تنش قابل اطمینان، یک مدل عددی براساس اطلاعات موجود ساخته شد. مدل ساخته شده مشخص کرد که اختلاف تنش

^۱ Fold And Thrust Belt

^۲ Hiberia

^۳ Mirren

زیادی در اطراف گنبد وجود دارد. حفاری در این ناحیه به فشار گل زیادی برای کنترل ناپایداری چاه نیاز دارد. اما مدل فشار شکستگی معلوم نمود که در این نواحی فشار شکست پایین است و به فشار گل کمی جهت حفاری نیاز دارد. با توجه به این که به صورت همزمان نمی‌توان هر دو حالت را کنترل کرد، بهترین راه حل تغییر مسیر حفاری است. خصوصیات هر یک از مسیرهای انتخابی با استفاده از مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی تعیین شد. مسیری که کمترین مشکلات ناپایداری و ماسه‌زایی را داشت به عنوان بهترین مسیر انتخاب و تولید از این میدان در سال ۲۰۰۲ آغاز گردید (Akbar Ali et al., 2003).

بسیاری از حفاری‌های انجام شده در میدان میسکار^۱ در تانزانیا با مشکلاتی مانند حفاری در سازندهای ضعیف، عملیات حفاری جدیدی در این میدان آغاز گردید. در زمان حفاری اولین چاه مدل ژئومکانیکی ساخته شده، اصلاح و ارتقا داده شد. حفاری دیگر چاه‌ها براساس این مدل با موفقیت در میدان مذکور انجام گرفت. با مدل تهیه شده، شلومبرژه^۲ نرم افزار جدیدی را تحت عنوان اکلیپس- جی ام^۳ برای مطالعات مخزن ارائه نمود. این نرم‌افزار با مدل‌سازی مخزن که از خروجی‌های مدل ژئومکانیکی استفاده می‌کند، اثر جریان سیالات را بر روی میدان تنش نشان می‌دهد (Akbar Ali et al., 2003).

کلیمنتوس^۴ و شلومبرژه مدل ژئومکانیکی را برای حفاری مجموعه‌ای از چاه‌های عمیق تهیه کردند. در این مطالعه مدل ژئومکانیکی به کمک اطلاعات بدست آمده از چاه‌های حفاری شده در آب‌های عمیق که مشکل ناپایداری در آن‌ها مشاهده شده، تهیه گردید. این مدل ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت سنگ، وضعیت تنش و فشار منفذی را به عنوان تابعی از عمق در ارتباط با یک ستون چینه‌شناسی توصیف می‌کرد. پارامترهای حفاری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند شامل وزن گل حفاری به عنوان تابعی از زاویه میل چاه، مقاومت سنگ، فشار منفذی و تنش‌ها می‌باشند. چاه‌های جدیدی که براساس اطلاعات به دست آمده از مدل حاصل حفر شدند، همراه با کاهش شستگی و هرزروی سیال با موفقیت

^۱ Miskar

^۲ Schlumberger

^۳ ECLIPSE-GM

^۴ Klimentos

به اتمام رسیدند. از دیگر مزایای تهیه مدل ژئومکانیکی در این میدان افزایش کارایی مته و کاهش زمان و هزینه حفاری بود (Klimentos et al., 2005).

به منظور تعیین نرخ افت فشار^۱ سنگ‌ها و حداکثر بهره‌برداری برای تولید بهینه با حداقل تاثیر در تغییر شکل سنگ‌ها در میدان کویتبجرن^۲ نروژ از یک مدل ژئومکانیکی پیشرفته استفاده شد. دستیابی به این هدف ارتباط مستقیمی با اثر تغییر فشار مخزن بر تنش برجا دارد. فشار و دمای بالا یک چالش بزرگ در این میدان می‌باشد و هزینه‌های زیادی را به شرکت‌های متولی تحمیل می‌ساخت. بنابراین تهیه مدل ژئومکانیکی برای میدان مذکور براساس نتایج آزمایشگاهی و نمودارهای پتروفیزیکی ضروری به نظر می‌رسید. فشار روباره، تنش منفذی و تنش‌های افقی در میدان‌های فشار بالا-دمای بالا^۳ معمولاً برابر فرض می‌شوند. بنابراین بازه ایمن فشار گل حفاری کوچک می‌باشد (Ray et al., 1998).

در این میدان با استفاده از زمان تاخیر امواج صوتی تراکمی، برشی و همچنین موج استونلی^۴ خصوصیات مکانیکی و میدان تنش در سه جهت و با فرض آنیزوتروپ و هتروژن بودن مواد، مورد بررسی قرار گرفت. در این شیوه به همراه نمودارهای پتروفیزیکی معمول، آزمون‌های آزمایشگاهی و درجا جهت شناسایی آنیزوتروپی و هتروژنی خصوصیات سنگ‌ها در محل استفاده گردید. نتایج شیوه جدید در طراحی پنجره ایمن فشار گل حفاری، ارائه تصویر کامل چاه، تشخیص تغییر شکل ناحیه نزدیک چاه از ناحیه دور و دست نخورده که برای عملیات تکمیل و مشبک‌کاری مهم است، دقت بیشتری را در پی داشتند. مدل ژئومکانیکی ساخته شده طی این پژوهش به خوبی وقایع احتمالی حفاری را پیش‌بینی می‌کرد (Wendt et al., 2007).

در جدول ۱-۳ می‌توان برخی دیگر از نمونه‌های مدل‌های ژئومکانیکی سه‌بعدی را که در سال‌های اخیر ساخته شده‌اند همراه با کاربردهای آنها در نقاط مختلف دنیا مشاهده کرد.

^۱ Drawdown

^۲ Kvitebjorn

^۳ High Pressure High Temperature: HPHT

^۴ Stoneley Wave Slownesses

جدول ۱-۳ برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی سه بعدی در نقاط مختلف دنیا

ردیف	تاریخ	کشور	نام میدان	هدف از ساخت
۱	۲۰۰۴	اکوادور	Palo Azul	طراحی بهینه چاه به منظور کاهش خطرات حفاری و جلوگیری از وقوع پیشامدهای ناخواسته در حین حفاری (Villalobos et al., 2005)
۲	۲۰۰۵	مکزیک	Gulf of Mexico	طراحی بهینه چاه در مخازن عمیق و زیر گنبد های نمکی با در نظر گرفتن شرایط تنش و مشخصات مخزن (Connolly & Goodman, 2007)
۳	۲۰۰۶	آمریکا	Gulf of Mexico	تخمین تغییرات تنش در مخزن، تراکم مخزن، نشست سطح زمین و تغییرات لوله جداری در اثر تولید برای سال های آینده (Sayers et al, 2006)
۴	۲۰۰۸	دریای شمال	South Arne filed	به منظور محاسبه تغییرات فشار منفذی، حالات تنش و کرنش و ارزیابی خصوصیات مخزن در طول تولید و برداشت (Zhang & Koutsabeloulis, 2009).
۵	۲۰۰۸	کویت	Umm-Gudair filed	بررسی تغییرات نفوذ پذیری و شرایط تنش میدان طی سال های ۱۹۶۲ تا ۲۰۰۸ برای بیش از ۲۰۰ چاه میدان و پیش بینی فشار سیال، تولید نفت و تولید آب در سال های آینده (Dutta et al., 2011)
۶	۲۰۱۰	کانادا	Alberta and Saskatchewan	مدلسازی به منظور تخمین تغییرات رژیم تنش در مخزن و بررسی تغییرات تخلخل، نفوذ پذیری و تولید (Rivero et al, 2010)
۷	۲۰۱۰	آمریکا	Fayetteville	طراحی چاه های جدید با در نظر گرفتن کیفیت سنگ، شکستگی های طبیعی و تخلخل مخزن و پیش بینی تولید در چاه های جدید (Ramakrishnan et al., 2011)

ادامه جدول ۳-۱ برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی سه بعدی در نقاط مختلف دنیا

تخمین پارامترهای الاستیک و مکانیکی سنگ جهت بهینه سازی عملیات شکست هیدرولیکی (Patiño et al., 2011)	Chicontepec Basin	مکزیک	۲۰۱۰	۸
مطالعه کامل بر زوی نفوذ پذیری و پایداری گسلها جهت اجرای عملیات تزریق و شکست هیدرولیکی (Fernandez-ibanez et al., 2010)	Apiay and Suria	کلمبیا	۲۰۱۰	۹
بهینه سازی طراحی شکست هیدرولیکی جهت افزایش تولید و مکان یابی حفر چاههای جدید (Perfetto et al., 2013)	M'Boundi	کنگو	۲۰۱۱	۱۰
ارزیابی خطرات تزریق گاز در میدان نفتی و یافتن نواحی امیدبخش جهت تزریق گاز و پیش بینی و بررسی تغییرات فشار منفذی، تنش مخزن، حرکت گسلها و تغییرات تولید در اثر تزریق گاز (Mei & Press, 2014)	Bokor	مالزی	۲۰۱۱	۱۱
بررسی اثرات تراکم مخزن بر روی حالات تنش و تولید از مخزن (Lee et al., 2013)	Matterhorn	آمریکا	۲۰۱۱	۱۲
بررسی عدم موفقیت شکست هیدرولیکی در مخزن، تعیین پنجره گل ایمن برای حفر چاه افقی و تاثیر تولید از مخزن بر شرایط تنش و نفوذ پذیری گسلها (Correa et al., 2013)	Compos Basin	برزیل	۲۰۱۱	۱۳

ادامه جدول ۳-۱ برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در نقاط مختلف دنیا

۱۴	۲۰۱۲	کانادا	Athabasea	بررسی تغییرات سنگ مخزن در پروژه ۳۰ ساله تزریق به میدان و پیش بینی جابه‌جایی‌های رخ داده از مخزن تا سطح زمین (Ansari et al., 2012)
۱۵	۲۰۱۲	ژاپن	Nankai Trough	بررسی و پیش بینی حرکت گسل‌ها در اثر تولید هیدرات متان (Qiu et al., 2012)
۱۶	۲۰۱۲	کانادا	Alberta	بررسی و پیش بینی تغییرات تنش برجا، شکست پوش سنگ، تغییرات سطح زمین و پایداری چاه در اثر تزریق CO ₂ و بخار (Hongxue Han et al., 2012)
۱۷	۲۰۱۲	چین	XG	به منظور تعیین راستای بهینه جهت حفاری افقی در مخازن گازی نازک شیلی در غرب چین (Qiu et al., 2013)
۱۸	۲۰۱۳	ایالات متحده عربی	Abu Dhabi	مدل سازی شبکه شکستگی‌های طبیعی در مخزن و بررسی اثرات آن روی تنش برجا، مدول حجمی، نفوذ پذیری مخزن، پایداری چاه (Sirat et al., 2014)
۱۹	۲۰۱۶	نروژ	Brage Oil filed	ارزیابی و تحلیل ریسک گسیختگی برای یک چاه (Serajian et al., 2016)
۲۰	۲۰۱۷	چین	Kuqa Depression	تخمین تنش و نحوه توزیع شکست در طول انقباض گسل (Gu & Feng, 2017)
۲۱	۲۰۱۸	چین	Sichuan	توسعه مخزن گاز شیلی (Xie et al., 2018)

۳-۴ مروری بر مطالعات مدل‌سازی ژئومکانیکی در ایران

معمولا مطالعات انجام شده در ایران با هدف تعیین پارامترهای الاستیک، مقاومتی و یا تعیین پایداری دیواره چاه صورت می‌پذیرد. متأسفانه تاکنون در ایران به دلیل محدودیت‌های موجود در کشور، مطالعه ژئومکانیکی جامعی انجام نشده است (امانی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). معمولا یکی از مهم‌ترین دلایل این موضوع، کمبود اطلاعات و داده‌های مورد نیاز است. مهم‌ترین مشکلاتی که برای تهیه مدل ژئومکانیکی در ایران وجود دارد شامل موارد زیر می‌شود (سیدسجادی و همکاران، ۱۳۹۴):

- نگارهای اندازه‌گیری سرعت موج برشی در بیشتر چاه‌های کشور رانده نشده‌اند.
- معمولا آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه‌های بدست آمده از چاه‌ها به اندازه کافی انجام نمی‌پذیرد و همین امر باعث شده است که بانک اطلاعاتی ژئومکانیکی کاملی وجود نداشته باشد.
- اغلب آزمایش‌های شکاف کوچک^۱، ریزشکست^۲ و نشتی^۳ در چاه‌های میدین ایران به اندازه کافی انجام نمی‌شود.
- بیشتر اوقات، اندازه‌گیری فشار منفذی^۴ تنها در تعداد نقاط اندکی از چاه انجام می‌گیرد و اطلاعاتی از روند تغییرات فشار سازند موجود نیست.

در ادامه مروری بر برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی ژئومکانیکی انجام می‌شود. افسری و همکاران مدل ژئومکانیکی را جهت رفع مشکلات مربوط به حفاری چاه‌ها برای یکی از میدین مرکزی خلیج فارس تهیه کردند (Afsari et al., 2009).

امانی‌پور و همکاران با ایجاد مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی به مطالعه ژئومکانیکی مخزن بنگستان میدان نفتی منصوری در جنوب غربی ایران پرداختند. آن‌ها به منظور ارزیابی ژئومکانیکی و تحلیل

¹ Minifrac

² Microfrac

³ Leakoff Test

⁴ Pore pressure

پایداری چاه با استفاده از معیارهای شکست و تعیین پنجره فشار گل ایمن جهت جلوگیری از گسیختگی ها، پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجا و القایی به مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی پرداختند. سپس مدل ژئومکانیکی سه بعدی را جهت ارائه تصویری واضح از تغییرات پارامترهای مذکور در مقیاس کل مخزن، توسعه دادند (امانی پور و همکاران، ۱۳۹۱).

ترابی خواه و همکاران با هدف تعیین راستای بهینه حفاری چاه های افقی در یکی از میادین مناطق نفت خیز جنوب به طراحی مدل های ژئومکانیکی یک بعدی و سه بعدی پرداختند (ترابی خواه و همکاران، ۱۳۹۳).

رنجبر و همکاران برای مخزن فلهیان در یکی از میادین جنوب غرب ایران مدل ژئومکانیکی سه بعدی ساختند. مدل ساخته شده توسط آن ها به منظور فراهم سازی امکان تحلیل های مکانیکی میدان نظیر سناریوهای برداشت نفت و یا تزریق گاز در یک مخزن و نیز تخمین تراکم مخزن و فرونشست سطح توسعه داده شده است (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۴).

سعیدی و همکاران به منظور پایداری چاه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به مدلسازی ژئومکانیکی مخزن در یکی از چاه های میدان نفتی مارون اهواز پرداختند (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶). نجیبی و همکاران در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران با استفاده از داده های لرزه ای، مدل ژئومکانیکی سه بعدی طراحی کردند. بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعات آن ها امکان انجام مطالعات پیشرفته مخزن نظیر تعیین محل مناسب حفر چاه های جدید، ارزیابی نشست و تراکم مخزن، طراحی تزریق گاز به درون مخزن و طراحی شکست هیدرولیکی به منظور افزایش تراوایی مخزن فراهم شد (نجیبی و همکاران، ۱۳۹۶).

عزتی و همکاران برای مخزن سروک در یکی از میادین دشت آبادان مدلسازی سه بعدی ژئومکانیکی انجام دادند. مدل های سه بعدی ایجاد شده در این مطالعه، در حفاری های آتی میدان کاربردی می باشند. همچنین از آن ها می توان در زمینه ازدیاد برداشت و مدیریت مخزن بهره برد (عزتی و همکاران، ۱۳۹۷).

۳-۵ جمع‌بندی

در این فصل، مجموعه‌ای از مطالعات و پژوهش‌هایی که در زمینه مدلسازی و به‌کارگیری مدل ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز دنیا انجام شده، مورد بررسی قرار گرفت. سپس مروری بر برخی از مهم‌ترین کاربردهای مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در نقاط مختلف دنیا انجام گرفت. در انتهای این فصل، پیشینه مطالعات مدلسازی ژئومکانیکی در ایران مورد بحث قرار گرفت. نتایج بدست آمده را می‌توان به این ترتیب خلاصه نمود:

- مدل ژئومکانیکی می‌تواند تاثیر بسزایی در مدیریت وقایع برنامه‌ریزی نشده و کاهش خطرات داشته باشد. برخلاف اینکه هدف اولیه از ساخت آن، بررسی و رفع مشکلات مربوط به ناپایداری چاه بود، به سرعت کاربرد آن افزایش پیدا کرد و به عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها برای طرح‌های توسعه‌ای میادین نفتی بکار گرفته می‌شود.
- تاکنون برای تعدادی زیادی از میدان‌های سرتاسر دنیا مدل ژئومکانیکی با اهداف مختلف ساخته شده است. ارزیابی پایداری چاه، پیش‌بینی تولید ماسه، طراحی شکاف هیدرولیکی، فشردن شدن مخزن، طراحی محدوده پایدار گل، بهینه‌سازی مسیر چاه، انتخاب راستا بهینه برای حفر چاه و بسیاری از موارد دیگر تنها بخشی از کاربردهای مدلسازی ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز می‌باشند. البته بیشتر کاربردهای نوین مدل‌های ژئومکانیکی مربوط به مدل‌های سه‌بعدی است.
- معمولاً یکی از مهم‌ترین دلایل کمبود مطالعات ژئومکانیکی در ایران کافی نبودن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز می‌باشد. عامل نبود بانک جامع اطلاعاتی ژئومکانیکی را می‌توان عواملی از جمله رانده نشدن نگارهای اندازه‌گیری سرعت موج برشی، انجام نشدن تعداد کافی آزمایش‌های مکانیک سنگی، آزمایش‌های تنش‌سنجی درون چاهی مثل شکاف کوچک، ریزشکست و نشتی در بیشتر چاه‌های کشور دانست.

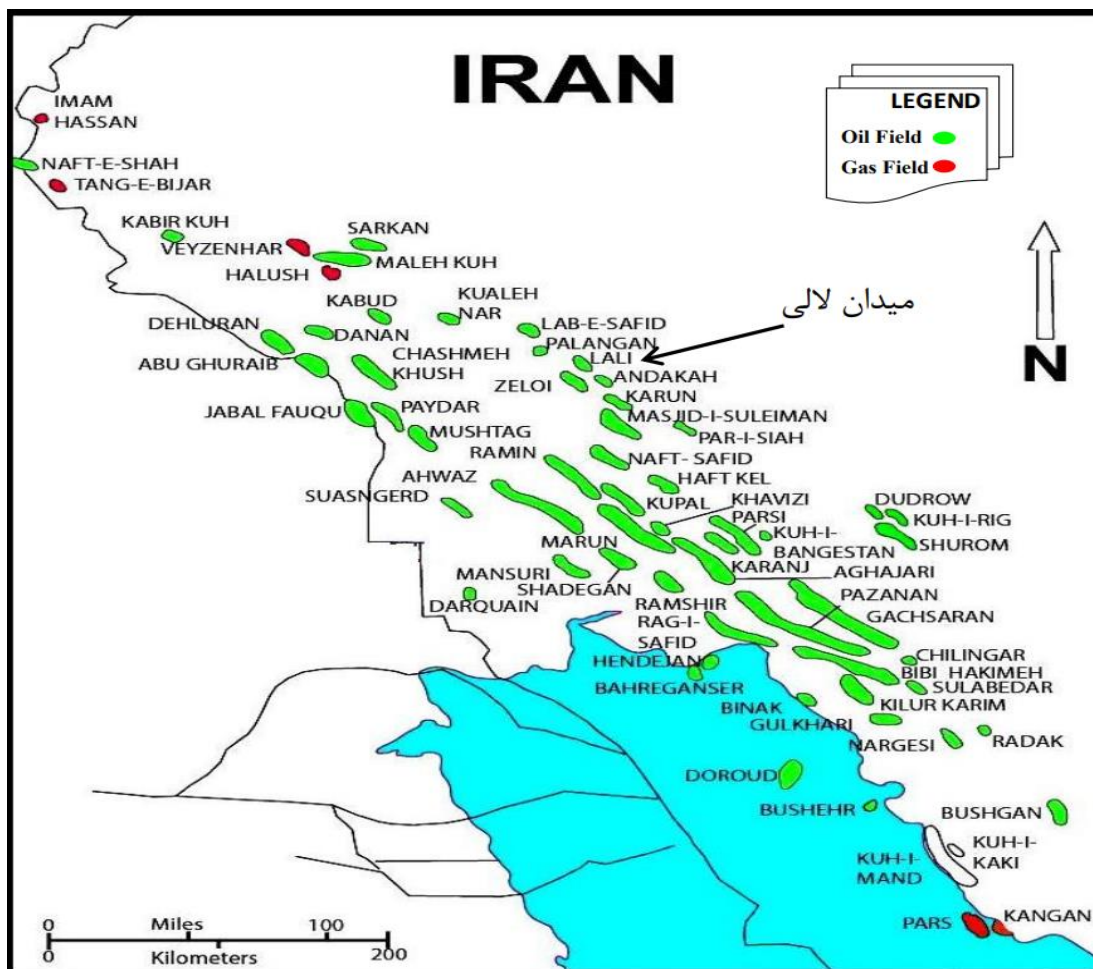
فصل ۴: معرفی میدان لالی و ساخت مدل ژئوکامپیکری یک بعدی

۴-۱ مقدمه

آنالیز پایداری چاه به خصوص در مواردی مانند مناطق فعال تکتونیکی، سازندهای دارای لایه‌بندی پرشیب، سازندهای شکسته و خردشده، تناوب لایه‌بندی و سازندهای فعال شیمیایی مانند سازندهای شیلی دارای اهمیت بسزایی می‌باشد. فاکتورهای اساسی در ارزیابی پایداری دیواره چاه عبارتند از: موقعیت نقاط تحت تاثیر تنش برجا، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و پارامترهای حفاری. با ارزیابی این موارد در کنار یکدیگر وضعیت پایداری چاه بررسی می‌شود. مهم‌ترین هدف آنالیز پایداری، تعیین پنجره فشار ایمن جهت ایجاد حفاظ در برابر تمرکز تنش ایجاد شده است. فشار گل به عوامل متعددی مانند تنش برجا، فشار منفذی، جهت و زاویه میل چاه، سازند و شرایط زهکشی بستگی دارد. با توجه به اهمیت و پیامدهای مهم ناپایداری چاه، در این تحقیق، با ساخت مدل‌های ژئومکانیکی یک بعدی ابتدا به این موضوع پرداخته خواهد شد. در این فصل پس از معرفی میدان لالی، نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی برای چاه‌های مورد مطالعه در میدان بررسی خواهد شد. در نهایت پایداری چاه‌ها به کمک مدل‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۴-۲ معرفی میدان لالی

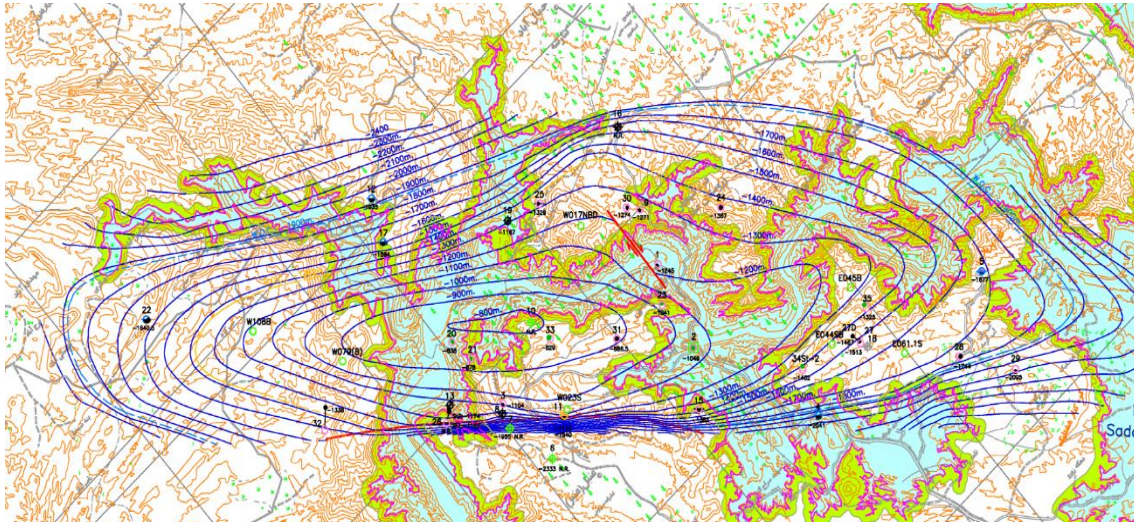
میدان لالی در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی و در حدود ۱۲۰ کیلومتری شمال شرقی اهواز و ۴۰ کیلومتری شمال غربی مسجد سلیمان واقع شده است. این میدان از شمال باختر به میدان لب سفید، از شمال خاور به میدان کمرشاه، از خاور- جنوب خاور به میدان کارون و از جنوب به میدان زیلایی منتهی شده است. میدان لالی بصورت تاقدیس نامتقارن و کشیده با محوری قوسی شکل بوسیله گسل معکوس در امتداد یال‌های شمالی و جنوبی آن، به شکل بلوک فرو افتاده بین میادین زیلایی و کارون قرار گرفته است (عین الهی و همکاران، ۱۳۸۷).



شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی لالی در بین سایر میادین نواحی نفت خیز جنوب. اقتباس از سایت اینترنتی www.gregcroft.com

میدان نفتی لالی از نظر موقعیت جغرافیایی در عرض جغرافیایی $32^{\circ}04'$ تا $32^{\circ}24'$ و طول جغرافیایی $48^{\circ}50'$ تا $49^{\circ}12'$ واقع شده است (پورقاسم، ۱۳۸۷). رخنمون‌های سطحی میدان لالی از سازندهای گچساران، میشان، آغاجاری و بختیاری تشکیل شده‌اند و به سمت پایین شامل سازندهای آسماری، پابده، گورپی، گروه بنگستان، گروه خامی، سازند دشتک و رسوبات پالئوزویک زیرین می‌باشد. سازند آسماری در میدان لالی عمدتاً از سنگ‌های آهکی، آهک‌های دولومیتی و لایه‌های نازکی از شیل و لایه‌هایی از انیدریت است که در بخش‌های میانی سازند آسماری مشاهده گردیده‌اند. مخزن آسماری در این میدان به هفت زون تقسیم می‌شود. زون ۱ و ۲ شامل آسماری فوقانی و سایر زون‌ها آسماری میانی را دربر می‌گیرند. در مطالعات دیرینه شناسی وجود آسماری تحتانی تأیید نگردیده است. هر کدام از این

زون‌ها با شروع یا پایان یافتن یک لایه شیلی مارنی آغاز گردیده است (محمودی، ۱۳۹۱). ضخامت سازند آسماری در این میدان حدود ۴۰۰ متر می‌باشد (مطیعی، ۱۳۸۷).



شکل ۴-۲ نقشه UGC میدان لالی (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)

سازند آسماری با توجه به ماهیت سنگ‌شناسی و شرایط شکل‌گیری خاصی که در چند میلیون سال پیش برای آن بوجود آمده است، بیشترین ذخیره نفت در میان سایر سازندهای منطقه را دارد. رسوبات آسماری در این میدان، متعلق به زمان میوسن بوده و فاقد آسماری تحتانی است. سازند آسماری که در اکثر میادین کشور وجود دارد، تقریباً ۸۵ درصد نفت خام ایران را تولید می‌کند و یکی از مخازن اصلی شناخته شده در جهان می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی مخزن آسماری وجود سیستم شکستگی‌های طبیعی توسعه یافته در آن است که باعث بهره‌وری فوق‌العاده چاه‌ها در میدان لالی می‌شود. (مطیعی، ۱۳۷۴).

۴-۲-۱ وضعیت ساختمانی میدان لالی

میدان لالی بصورت تاقدیس نامتقارن و کشیده با محوری قوسی شکل می‌باشد که بر روی آخرین منحنی هم‌تراز بسته (۲۱۰۰ متر زیر سطح دریا) دارای ابعادی به طول ۳۰ و عرض متوسط ۶ کیلومتر است. عرض ساختار در ناحیه جنوب غربی میدان به ۹ کیلومتر نیز می‌رسد. این ساختمان به وسیله گسل‌های معکوس در امتداد یال‌های شمالی و جنوبی محصور شده و بصورت بلوک فرا افتاده (Horst) نسبت به میادین مجاور خود، کارون و زیلایی، به سمت بالا حرکت کرده است، بطوریکه نسبت به آن‌ها حدود

۲۰۰۰ متر در سطح بالاتری قرار می گیرد. یال جنوبی تحت تاثیر گسل معکوس، شیبی بسیار زیاد (تا ۹۰ درجه) دارد و حتی در ناحیه مرکزی، بصورت برگشته قرار می گیرد. مقدار شیب بر روی یال شمالی، متغیر و از حدود ۱۲ درجه (در ناحیه شمال شرقی) به بیش از ۳۰ درجه (در ناحیه شمال غربی) می رسد (عین الهی و همکاران، ۱۳۸۷).

۲-۲-۴ زون بندی میدان مخزن آسماری در میدان لالی

سازند آسماری در میدان لالی عمدتاً شامل سنگ های آهکی، آهک های دولومیتی و لایه های نازکی از شیل و لایه هایی از انیدریت می باشد که در بخش های میانی سازند آسماری مشاهده شده اند. زون بندی انجام شده بر اساس چاه های جدید صورت گرفته و سپس به چاه های قدیمی دارای نمودارهای گاما-نوترون، تعمیم داده شده است. مخزن آسماری در میدان لالی به هفت زون از ۱ تا ۷ از بالا به پایین مخزن شماره گذاری شده اند. بیشترین ضخامت مربوط به زون ۴ با ضخامت متوسط ۷۰ متر و کمترین ضخامت مربوط به زون ۳ با ضخامت ۴۰ متر می باشد. زون ۵ شامل تناوبی از لایه های انیدریتی و سنگ آهک است و بخش انتهایی زون ۷ که بر روی انیدریت قاعده ای قرار دارد و در انتهای آن سازند پابده شروع می گردد. زون های ۱ و ۲ شامل آسماری فوقانی و بقیه زون ها آسماری میانی را در می گیرند. در مطالعات دیرینه شناسی وجود آسماری تحتانی تایید نگردیده است. هر یک از این زون ها با شروع یا پایان یافتن یک لایه شیلی-مارنی آغاز شده است (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۱-۲-۲-۴ زون ۱ آسماری

این زون از ابتدای سازند آسماری شروع می شود. ضخامت این زون به طور متوسط ۵۰ متر است. از لحاظ سنگ شناسی زون ۱ آسماری از سنگ های آهکی، آهک شیلی و آهک های دولومیتی به رنگ خاکستری تا خاکستری روشن و یک رگه دولومیتی آهکی تشکیل شده است. سنگ های ذکر شده دارای بلورهای ریزدانه و در بخش هایی انیدریتی-پیریتی می باشند و در بعضی نقاط تخلخل زمینه و درزهای موئین از مواد هیدروکربوری پر شده است. ضخامت چینه ای حداقل این زون در چاه ۱۱ به ۳۳.۵ متر و

حداکثر آن در چاه ۱۵ به ۵۴.۴ متر می‌رسد و ضخامت آن از میانه میدان به سمت شرق کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۲ زون ۲ آسماری

این زون بلافاصله در زیر زون ۱ قرار می‌گیرد و با یک لایه مارنی شروع می‌شود. ضخامت متوسط آن ۴۸ متر می‌باشد. از لحاظ سنگ‌شناسی این زون عمدتاً از آهک‌های سفید تا خاکستری روشن و مادستون تا وکستون، آرژیلیتی، دوباره کریستالیزه شده عمدتاً از آهک‌های خالص و متراکم و به همراه درصدهایی جزئی از آهک شیلی، با تبلور ثانویه، دولومیتی، پیریتی تشکیل شده است. ضخامت چینه‌ای حداقل این زون در چاه ۱۱ به ۳۸ متر و حداکثر آن در چاه ۲۱ به ۶۱ متر می‌رسد. ضخامت این زون از شرق میدان به سمت غرب آن کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۳ زون ۳ آسماری

مرز این زون با یک لایه مارنی شروع می‌شود. این زون به طور متوسط ضخامتی برابر با ۴۲ متر دارد. از نظر سنگ‌شناسی عمدتاً از آهک‌هایی به رنگ سفید تا خاکستری روشن و مادستون، آرژیلیتی، کلسیتی با آثاری از نفت، کریستالیزه شده می‌باشد. ضخامت چینه‌ای حداقل این زون در چاه ۲۱ به ۳۱ متر و حداکثر آن در چاه ۱۱ به ۷۰ متر می‌رسد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۴ زون ۴ آسماری

این زون از زیر یک لایه شیلی آغاز می‌گردد. ضخامت این زون به طور متوسط به ۶۹ متر می‌رسد. این زون عمدتاً از آهک‌هایی به رنگ سفید تا خاکستری روشن و مادستون، وکستون و آهک شیلی و شیل کمی ماسه‌ای انیدریتی با آثاری از نفت تشکیل شده است. بیشترین ضخامت چینه‌ای این زون در چاه ۱۵ با ۸۳ متر و کمترین میزان ضخامت آن در چاه لالی ۲۲ به ۵۹ متر می‌رسد. ضخامت این زون از شرق میدان به سمت غرب کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۵ زون ۵ آسماری

بخش معادل کلهر با این زون شروع می‌گردد، این زون به طور متوسط ۵۲ متر می‌رسد. از لحاظ سنگ‌شناسی این زون از سنگ‌های آهکی، آهک شیلی و شیل‌های آهکی انیدریتی و شیلی، آهک انیدریتی تشکیل شده است. آهک‌ها به رنگ سفید تا خاکستری روشن می‌باشند. بیشترین ضخامت چینه‌ای این زون در چاه ۲ با ۶۲ متر و کمترین میزان ضخامت آن در چاه لالی ۲۲ به ۴۴ متر می‌رسد. ضخامت این زون از شرق میدان به سمت غرب کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۶ زون ۶ آسماری

زون ۶ از انتهای بخش معادل کلهر شروع می‌گردد. ضخامت این زون به طور متوسط به ۵۵ متر می‌رسد. از لحاظ سنگ‌شناسی از آهک، آهک شیلی، آهک‌های دولومیتی و شیل آهکی تشکیل گردیده است. آهک‌هایی به رنگ خاکستری روشن و مارلی-مادستون و وکستون، آرژیلی، سیلتی با آثاری از نفت، کلسیتی می‌باشد. بیشترین ضخامت چینه‌ای این زون در چاه لالی ۲۲ با ۵۸ متر و کمترین میزان ضخامت آن در چاه لالی ۱ به ۴۹ متر می‌رسد. ضخامت این زون از غرب به سمت شرق میدان کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۲-۲-۷ زون ۷ آسماری

ضخامت این زون به طور متوسط به ۵۶ متر می‌رسد. از لحاظ سنگ‌شناسی از آهک شیلی، آهک انیدریتی، شیل آهکی، شیل و یک لایه انیدریت در انتهای این زون قرار دارد. آهک‌ها به رنگ خاکستری روشن-کرم-سفید و مادستون تا وکستون، آرژیلی، کمی دارای نفت می‌باشد. بیشترین ضخامت چینه‌ای این زون در چاه ۲۱ و برابر با ۶۵ متر و کمترین ضخامت آن در چاه ۲۳ به ۴۹ متر می‌رسد. ضخامت این زون از شرق میدان به سمت غرب کاهش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۳ ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی

همانطور که در فصل دوم اشاره شد، به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی به تمامی مشخصه‌های مخزن نیاز می‌باشد. برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه بعدی در میدان لالی، لازم است تا در قدم اول مدل ژئومکانیکی یک بعدی کالیبره شده ساخته شده و بر اساس آن، مدل ژئومکانیکی سه بعدی در مقیاس میدانی توسعه داده شود. در ادامه روند ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی در میدان لالی توضیح داده شده است.

۴-۴ جمع آوری داده‌های مورد نیاز

اولین و مهم‌ترین گام در ساخت مدل ژئومکانیکی، جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های مورد نیاز و در دسترس است. به این منظور نگارهای پتروفیزیکی، نگارهای صوتی فشاری و برشی و محل تقاطع چاه‌ها با سرسازندهای مختلف^۱ جمع‌آوری شد. همچنین جهت ساخت مدل ژئومکانیکی سه بعدی، مختصات چاه‌های موجود در میدان، مسیر حفر شده چاه در میدان، داده‌های مربوط به گسل‌های موجود در میدان و اطلاعات مربوط به سطوح لایه‌بندی مخزن در اختیار قرار گرفت. علاوه بر موارد ذکر شده، داده‌های گرافیکی چاه^۲، داده‌های تفسیر شده از نگارهای تصویری و شکستگی‌های برشی و کششی رخداده در چاه‌های مورد مطالعه نیز گردآوری شدند. در جدول ۴-۱، داده‌های گردآوری شده از میدان لالی نمایش داده شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود اطلاعات مربوط به ۱۹ چاه در نقاط مختلف میدان، به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی جمع‌آوری شدند.

^۱ Well Tops

^۲ Graphic Well Log

جدول ۴-۱ داده‌های جمع‌آوری شده از میدان لالی

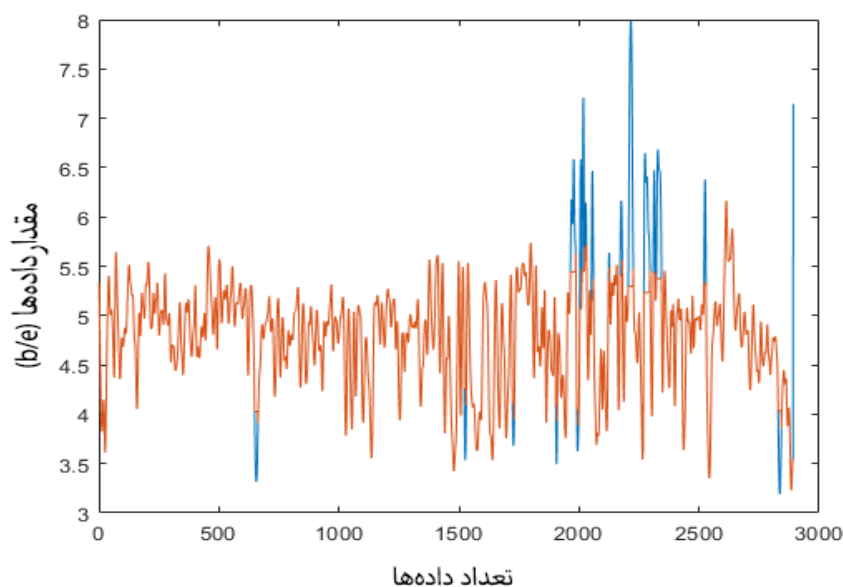
ردیف	نام چاه	مسیر حفر چاه	نگارهای پتروفریزیکی	سرعت امواج برشی	فشار منفذی	نگار گرافیکی چاه	نگارش تفسیر نگار تصویری	وزن گل حفاری	شکستگی برشی	شکستگی کششی	نتایج آزمایشگاهی مکانیک سنگ
۱	۲	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۲	۳	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	۵	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	۱۵	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	۲۰	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۶	۲۱	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۷	۲۲	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-
۸	۲۳	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۹	۲۴	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۰	۲۵	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۱	۲۶	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۲	۲۷	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۳	۲۸	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۴	۲۹	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۵	۳۰	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۶	۳۱	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۷	۳۲	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
۱۸	۳۳	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۹	۳۴	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-

۴-۵ پردازش داده‌های ورودی

پس از گردآوری داده‌های اولیه، داده‌های پوچ^۱ و اشتباه شناسایی شده و سپس از محاسبات خارج شدند. منظور از داده‌های اشتباه، داده‌هایی است که در بازه تغییرات منطقی هر پارامتر قرار نمی‌گیرند. این داده ممکن است بر اثر خطای انسانی و یا خطا در عملکرد دستگاه تهیه نگار ثبت شده باشند. همچنین معمولاً دستگاه تهیه نگار به دلایل مختلف در زمان برداشت قادر به ثبت داده‌ها در مقطعی از حفاری نمی‌باشد که خروجی آن را داده پوچ می‌نامند. داده‌های پوچ معمولاً با عدد ۹۹۹.۲۵- نمایش داده

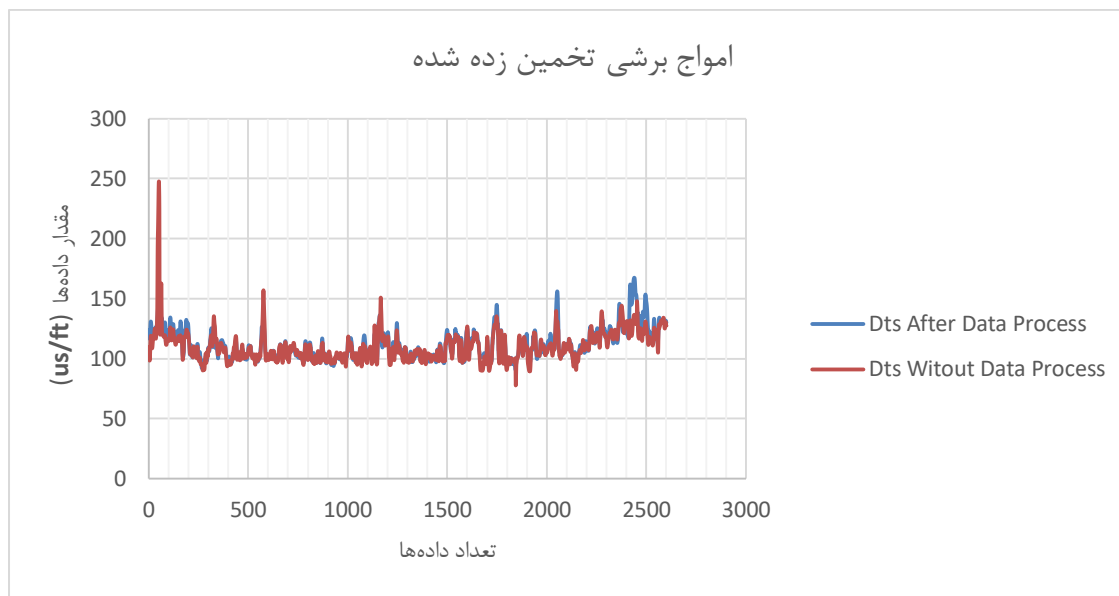
^۱ Null

می‌شوند. به منظور حذف این‌گونه داده‌ها در نرم افزار متلب برنامه‌ای نوشته شد که هر قرائت از داده‌های مورد نظر را با قرائت بعدی مقایسه کند. سپس با در نظر گرفتن اختلاف میان قرائت‌ها، میزان فراوانی اختلاف و مقدار نهایی آن داده در کل چاه، داده‌های اشتباه را حذف و با نزدیک‌ترین داده‌های قرائت شده جایگزین کند. شکل ۳-۴ خروجی نهایی برنامه ذکر شده را برای نگار فتوالکتریک نشان می‌دهد. مقادیر آبی رنگ داده‌های پردازش نشده و مقادیر نارنجی رنگ مقادیر داده‌ها را پس از پردازش توسط برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴ پردازش داده‌های نگار فتوالکتریک در یکی از چاه‌های میدان لالی

برای اطمینان از صحت عملکرد و اثربخشی برنامه نوشته شده در متلب، فرآیند تخمین داده‌ها در چاه‌های مورد مطالعه، یک بار با داده‌های پردازش شده توسط این برنامه و بار دیگر با داده‌های پردازش نشده، انجام شد. شکل ۴-۴ مقادیر امواج برشی تخمین زده شده در یکی از چاه‌های میدان لالی را در هر دو حالت نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ مقایسه داده‌های تخمین زده

شکل ۴-۴ نتایج حاصل از تخمین داده‌های امواج برشی را قبل و بعد از پردازش داده‌های ورودی توسط برنامه نوشته شده در متلب به شبکه نشان می‌دهد. نمودار آبی رنگ در این شکل داده‌های تخمینی را پس از پردازش و نمودار قرمز داده‌های تخمینی را بدون پردازش داده‌های ورودی توسط برنامه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مذکور مشخص است، خطای مقادیر تخمینی پس از پردازش داده‌های ورودی با برنامه نوشته شده کاهش چشم‌گیری داشته است، زیرا نتایج تخمینی برای داده‌های پردازش نشده در برخی موارد خارج از محدوده منطقی داده‌ها بدست آمده است. در ادامه، روش تخمین سرعت موج برشی در سنگ به کمک اطلاعات موجود در نگارها در یکی از چاه‌های مورد مطالعه در میدان لالی شرح داده می‌شود.

۴-۶ تخمین سرعت موج برشی در سنگ

سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین ورودی‌ها برای محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی در فرآیند مدلسازی و مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز است. سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ از جمله سیال منفذی، تخلخل و... تاثیر می‌پذیرد. بنابراین از آن می‌توان برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، نوع سنگ و نوع سیال منفذی استفاده کرد (Eskandari et al., 2004).

همان گونه که در جدول ۱-۴ مشاهده می شود، در داده های جمع آوری شده در میدان لالی سرعت امواج برشی تنها برای دو چاه ۲۷ و ۳۰ موجود بوده است. به همین دلیل برای بدست آوردن سرعت موج برشی در سایر چاه ها، نیاز به استفاده از روش های تخمین سرعت موج برشی وجود دارد.

تاکنون روش های مختلفی برای تخمین سرعت موج برشی در یک مخزن نفتی معرفی شده اند که دامنه ای از روش های تجربی تا روش های هوشمند را شامل می شود. همانطور که در فصل دوم اشاره شد، مهم ترین روش های تجربی که به روش های سخت^۱ معروف شده اند، اندازه گیری های آزمایشگاهی مغزه ها، تفسیر اطلاعات حاصل از چاه پیمایی ها و تحلیل های رگرسیونی می باشند. در چند دهه گذشته، روابط تجربی متعددی برای تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ، به ویژه سرعت موج فشاری و تخلخل، در لیتولوژی های مختلف ارائه شده است (پیرایه گر و همکاران، ۱۳۸۸). اکثر این روابط از برقراری ارتباط میان زمان سیر موج فشاری و ترکیب آن با نگارهای غیرصوتی حاصل شده اند. زیرا برخلاف سرعت موج برشی، اندازه گیری سرعت موج فشاری به عنوان یکی از نگارهای استاندارد شناخته شده و در بیشتر چاه های میدان اندازه گیری می شود (Chardac et al, 2005). جدول زیر برخی از روابط تجربی برای محاسبه سرعت موج برشی را نشان می دهد.

جدول ۲-۴ روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه سرعت موج برشی

$V_s = V_p/1.9$	آهک	(۱-۴) (Pickett, 1963)
$V_s = 0.583 V_p - 0.07776$	دولومیت	(۲-۴) (Castagna et al., 1985)
$V_s = V_p/1.8$	دولومیت	(۳-۴) (Pickett, 1963)
$V_s = 0.796 V_p - 0.7868$	ماسه سنگ	(۴-۴) (De-hua Han et al., 1986)
$V_s = 0.77 V_p - 0.8674$	شیل	(۵-۴) (Castagna et al., 1985)

در روابط ذکر شده، V_p و V_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب $\frac{km}{sec}$ را نشان می دهد.

¹ Hard Computing

استفاده از این روابط صرفاً در شرایط زمین‌شناسی خاص توجیه‌پذیر است، لذا استفاده مستقیم از آن‌ها برای مناطق دیگر نیازمند اعتبارسنجی و ارزیابی است.

در مقابل روش‌های سنتی، روش‌های هوشمند قرار دارند که در اصطلاح محاسبه نرم نامیده می‌شوند. این روش‌ها با الگوبرداری از هوش انسانی برای استخراج الگوریتم‌های پنهان در دل محاسبات عددی، هدفمند شده‌اند. از مهم‌ترین تکنیک‌های محاسبات نرم، شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی است. این روش‌ها با در اختیار داشتن مجموعه‌ای از داده‌های ورودی چند متغیره و اندازه‌گیری‌های هدف، قادر به آموزش و استنتاج روابط غیرخطی پیچیده بین آن‌ها خواهند بود. این روش‌ها در مواردی که مدل‌سازی ریاضی امکان‌پذیر نیست، بسیار راهگشا می‌باشند و از این‌رو امروزه به شدت مورد استفاده قرار گرفته‌است و نقش پررنگی در حل مشکلات پتروفیزیکی ناشی از اکتشاف و بهره‌برداری هیدروکربن‌ها مانند نفت و گاز ایفا می‌کنند (پیرایه‌گر و همکاران، ۱۳۸۸). استفاده از این روش‌ها باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش صحت نتایج شده است. زیرا روش‌های هوشمند نیاز به اطلاعات گسترده و یا آزمایشگاهی ندارند و قادرند تخمین واقعی از خواص ژئومکانیکی سنگ فراهم سازند و در نهایت توسط نتایج آزمایشگاهی و یا اندازه‌گیری‌های برجا کالیبره شوند (Onyia, 1988).

۴-۶-۱ تخمین موج برشی به کمک سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار

برای محاسبه سرعت موج برشی در سایر چاه‌های میدان لالی با بررسی مزایا و معایب روش‌های گوناگون، در نهایت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون^۱، شبکه عصبی مدار شعاعی^۲ و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS^۳) به عنوان کاندیدی برای تخمین داده‌ها انتخاب شدند. در ادامه پس از آشنایی با شیوه عملکرد هر یک از آن‌ها به بررسی مراحل تخمین امواج برشی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

^۱ Multi Layer Perceptron

^۲ Radial Basis Function

^۳ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

۴-۶-۱-۱ سیستم استنتاج فازی

سیستم استنتاج فازی ابزار فرموله کردن یک فرآیند به کمک قواعد اگر-آنگاه فازی است که به نام سیستم استنتاج فازی (FIS) شناخته می‌شود. مراحل نتیجه‌گیری (استدلال) با استفاده از یک سیستم استنتاج فازی انجام می‌شود (Asoodeh, 2013). شکل ۴-۵ نمونه‌ای از ساختار سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهد. سیستم استنتاج فازی به نام سیستم مبتنی بر قواعد نیز نامیده می‌شود، زیرا این سیستم‌ها از تعدادی عبارت «اگر-آنگاه» ساخته شده است. وقتی چنین سیستم‌هایی در نقش کنترلی ظاهر می‌شوند به آن‌ها کنترل کننده‌های فازی می‌گویند. معماری اصلی سیستم استنتاج فازی از پنج بخش اصلی تشکیل می‌شود که عبارتند از (فیضی و همکاران، ۱۳۹۸):

۱. پایگاه قواعد^۱: شامل تعدادی از قواعد فازی "اگر-آنگاه" است.
۲. پایگاه داده^۲: توابع عضویت مجموعه‌های فازی که در قواعد فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند در این بخش تعریف می‌شود.
۳. بخش تصمیم‌گیری^۳: بخش اعمال کننده عملیات استنتاج بر روی قواعد فازی می‌باشد.
۴. بخش فازی سازی^۴: بخش تبدیل کننده ورودی‌های حقیقی به مجموعه‌های فازی می‌باشد.
۵. بخش نافازی سازی^۵: بخش تبدیل کننده نتایج فازی به مقادیر حقیقی می‌باشد.

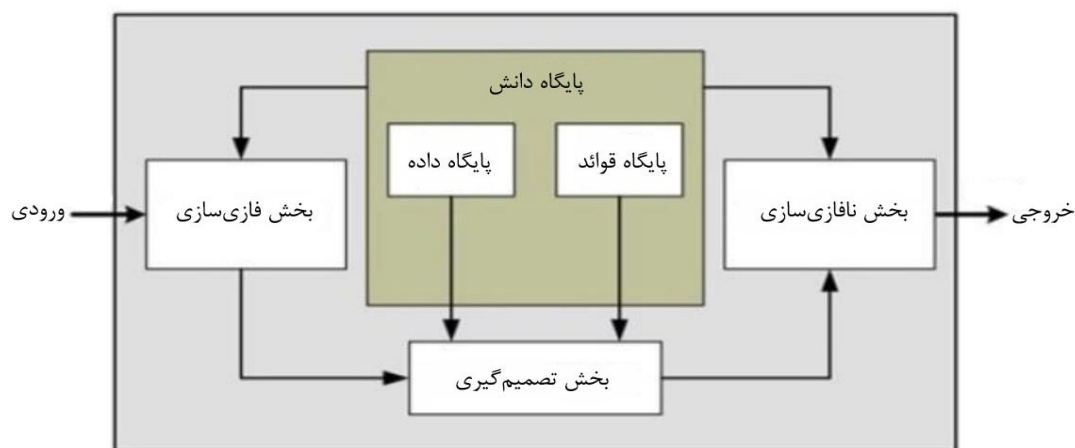
¹ Rule base

² Database

³ Decision Making Unit

⁴ Fuzzification

⁵ Defuzzification



شکل ۴-۵ ساختار یک شبکه FIS در حالت کلی (فیضی و همکاران، ۱۳۹۸)

تاکنون سیستم‌های استنتاجی مختلفی برای انجام تصمیم‌گیری فازی ارائه شده است که پرکاربردترین آن‌ها تاکاگی-سوگنو^۱ می‌باشد. در این سیستم خروجی هر قاعده یک ترکیب خطی از متغیرهای ورودی می‌باشد که با یک مقدار ثابتی جمع می‌شوند و خروجی نهایی، میانگین وزن دار خروجی تمام قواعد است.

۴-۶-۱-۲ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۲ سیستم‌ها و شیوه‌های محاسباتی نوین برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش بدست آمده در جهت بیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده می‌باشد. شبکه‌های عصبی در طی دهه‌های اخیر به عنوان ابزاری مفید و قابل اعتماد جهت مدلسازی نگاشت‌های پیچیده موجود بین متغیرهای مختلف، شناخته شده و مورد توجه قرار گرفته‌اند. ایده اصلی این‌گونه شبکه‌ها تا حدودی الهام‌گرفته از شیوه کارکرد سیستم عصبی زیستی برای پردازش داده‌ها و اطلاعات به منظور یادگیری و ایجاد دانش می‌باشد. عنصر کلیدی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه پردازش اطلاعات است. این سیستم از تعداد زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به هم پیوسته با نام نورون^۳ تشکیل شده است که برای حل یک مساله به صورت هماهنگ با هم عمل می‌نمایند.

^۱ Takagi-Sugeno

^۲ Artificial Neural Networks

^۳ Neuron

وزن یا میزان ارتباط بین نورون‌ها در یک شبکه تعیین کننده تمایز مابین شبکه‌های عصبی است. به عبارتی ساده‌تر ارتباطاتی که بین نورون‌ها وجود دارد، دارای وزن هستند. وزن‌ها در هنگام عبور داده‌ها از آن اتصال، در داده‌های عبوری ضرب می‌شوند (Hajmeer & Basheer, 2000). ساختار هر شبکه عصبی از سه لایه ورودی^۱، پنهان^۲ و خروجی^۳ تشکیل می‌شود. بر اساس ماهیت مساله مورد نظر، شبکه عصبی قادر است از تعداد لایه‌های پنهان بیشتری تشکیل شود. هر کدام از این لایه‌ها دارای تعداد نورون‌های متفاوتی می‌باشند. یک نورون یا یک سلول عصبی در واقع یک تابع با n ورودی و یک خروجی است که رابطه ورودی-خروجی نورون به صورت زیر می‌باشد.

$$Y = h\left(\sum_{j=1}^n (w_j x_j + w_0)\right) \quad (6-4) \text{ (Gurney, 1997)}$$

۳-۱-۶-۴ سیستم استنتاج فازی-عصبی

سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که بر اساس سیستم فازی تاکاگی-سوگنو می‌باشد. این شیوه در اوایل ۱۹۹۰ ایجاد شده است (Jang, 1991). از آنجایی که این سیستم، شبکه‌های عصبی و مفاهیم منطق فازی را یکی می‌کند، می‌تواند از امکانات هر دو آن‌ها بهره برد که این عامل باعث برتری آن نسبت به سایر روش‌ها شبکه عصبی می‌شود. زیرا منطق فازی قادر است تا اطلاعات کیفی انسانی را به اطلاعات کمی تحلیلی تبدیل کند. البته این روش زمان زیادی را برای تعدیل کردن توابع عضویت^۴ مجموعه‌های فازی صرف می‌کند.

از طرفی دیگر بر خلاف منطق فازی، الگوریتم شبکه عصبی توانایی زیادی در آموزش شبکه دارد و می‌تواند در زمان کوتاه‌تری با محیط مسئله مورد نظر منطبق شود. بنابراین می‌توان از شبکه عصبی برای تعدیل اتوماتیک توابع عضویت مجموعه‌های فازی استفاده کرد تا میزان خطا در تعیین قوانین منطق

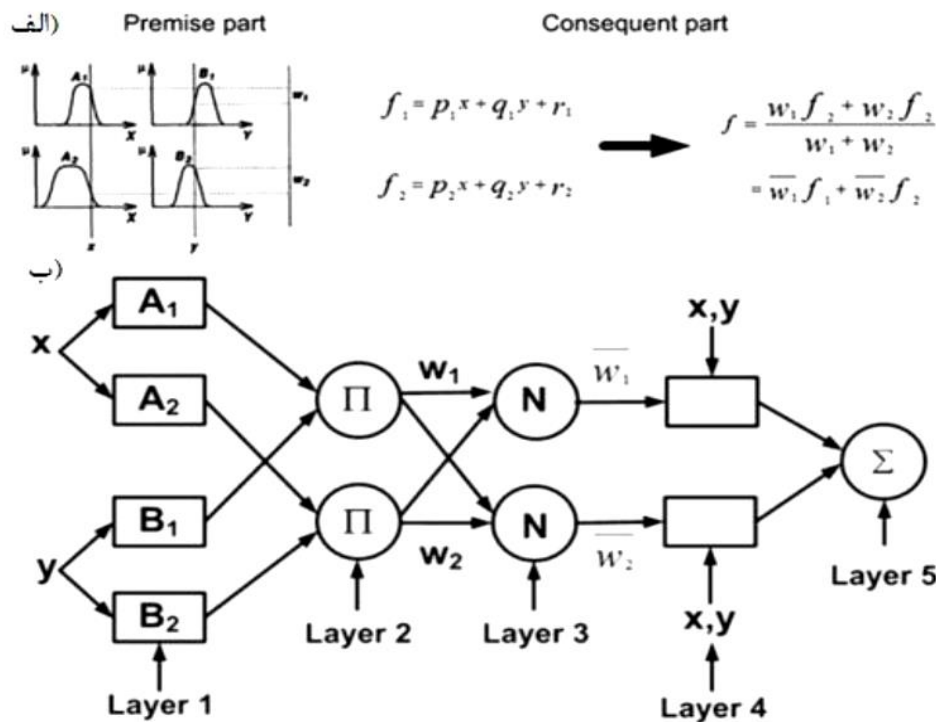
¹ Input

² Hidden

³ Output

⁴ Membership Functions

فازی کاهش پیدا کند (Sugeno & Takagi, 1985). ساختار ANFIS یک شبکه تطبیق یافته است که از روش نظارت شده در آموزش الگوریتم استفاده می‌کند که تابعی شبیه به سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو دارد. شکل ۴-۶ مکانیسم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو و ساختار شبکه ANFIS را نشان می‌دهد (Jang, 1991).



شکل ۴-۶ الف) سیستم استنتاج فازی اگر-آنگاه تاکاگی-سوگنو ب) ساختار ANFIS (Jang, 1991)

برای سادگی فرآیند فرض می‌شود که FIS مورد بررسی از دو ورودی x و y و یک خروجی f تشکیل شده و پایگاه قانون در آن شامل دو قانون اگر-آنگاه می‌باشد. قوانین موجود در این سیستم عبارتند از:

$$IF \ x = A_1 \text{ And } y = B_1. \text{ Then } f_1 = p_1 + q_1 + r_1 \quad (۷-۴)$$

$$IF \ x = A_2 \text{ And } y = B_2. \text{ Then } f_2 = p_2 + q_2 + r_2 \quad (۸-۴)$$

که در آن A_1 و A_2 توابع عضویت برای ورود x ، B_1 و B_2 توابع عضویت برای ورودی y و در نهایت $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ پارامترهای تابع خروجی هستند. همانند سیستم‌های فازی، ساختار ANFIS نیز

از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول مقدم و بخش دوم استنتاج-نتیجه نامیده می‌شود که این دو بخش توسط قواعد فازی در فرم یک شبکه به یکدیگر متصل می‌گردند. با توجه به شکل ۴-۶ لایه‌های اول و چهارم شامل نقاط تطبیقی هستند، به طوری که طی فرآیند آموزش قابل تغییر بوده و سایر لایه‌ها شامل نقاط ثابت می‌باشند. در ادامه فرآیند تخمین سرعت امواج برشی به کمک ANFIS مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۴-۶-۱-۴ فرآیند تخمین سرعت امواج برشی

پس از انجام آزمون‌های مختلف توسط هر سه روش با ثابت نگه داشتن داده‌ها، کمترین میزان خطا در تخمین داده‌ها از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار نسبت به دو روش دیگر بدست آمد. بنابراین در ادامه فقط به بررسی فرآیند تخمین سرعت امواج برشی به کمک ANFIS پرداخته می‌شود.

در این پژوهش با استفاده از نگارهای موجود از سایر چاه‌های میدان لالی، ابتدا به شناسایی عوامل موثر بر نرخ تغییرات سرعت موج برشی پرداخته می‌شود. سپس به کمک سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار، آموزش^۱، آزمون^۲ و اعتبارسنجی^۳ شبکه انجام می‌گیرد. در نهایت مقادیر سرعت موج برشی برای چاه شماره ۲۹ میدان لالی تخمین زده می‌شود.

به این منظور، ابتدا همبستگی سرعت موج برشی با سایر پارامترهای پتروفیزیکی در چاه شماره ۳۰ و ۲۷ میدان لالی بررسی می‌گردد. زیرا از میان چاه‌های مورد مطالعه، فقط در این دو چاه نگار صوتی موج برشی رانده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین همبستگی زمان انتقال موج برشی (DTS) در این چاه به ترتیب با پنج نگار زمان انتقال موج فشاری (DTC)، نوترون (NPHI)، اشعه گاما (CGR) و نگار فتوالکتریک (PEF) و نگار تخلخل مفید (PHIE) می‌باشد. جدول ۴-۲ میزان همبستگی سرعت موج برشی را با پنج نگار مذکور را نمایش می‌دهد.

¹ Train

² Test

³ Validate

جدول ۳-۴ بررسی همبستگی پارامترهای پتروفیزیکی با DTS

میزان همبستگی با زمان انتقال موج برشی (DTS)	پارامتر مورد نظر	روش همبستگی
0.856	DTC	همبستگی پیرسون
0.708	NPHI	
0.664	CGR	
0.620	PEF	
0.604	PHIE	

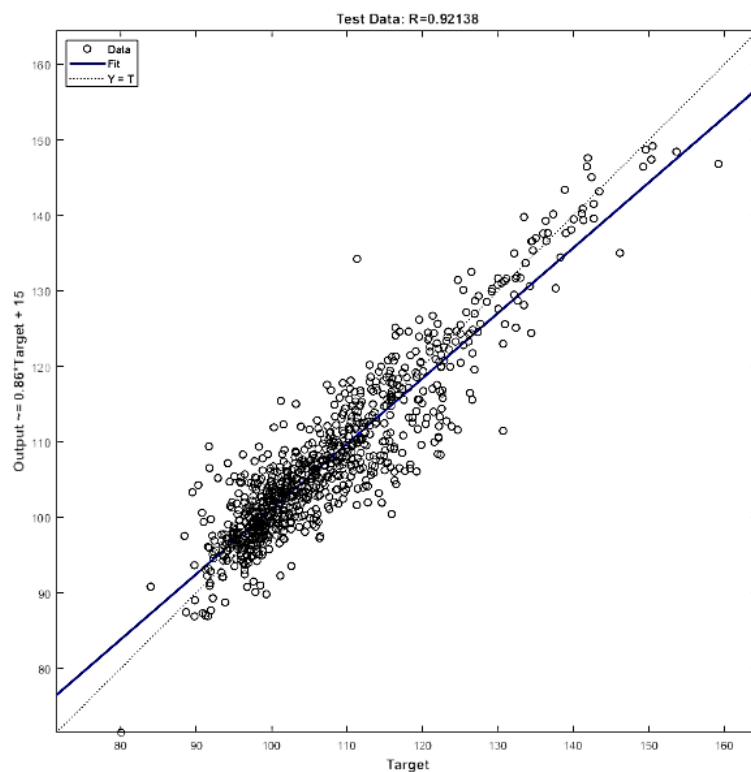
نگارهای مذکور در بالا به عنوان داده‌های ورودی برای آموزش شبکه سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار انتخاب شدند. مهم‌ترین بخش در تخمین داده‌ها، آموزش صحیح شبکه به کمک داده‌های ورودی و در دسترس است. در این گام ۷۰٪ از کل داده‌های در دسترس که مربوط به چاه‌های ۲۷ و ۳۰ میدان لالی و برابر با ۲۵۳۶ سری از کل داده‌ها می‌باشند، به عنوان داده‌های آموزشی شبکه در نظر گرفته شدند. مشخصاً هر چه تعداد این داده‌ها بیشتر باشد، جامعیت شبکه بیشتر بوده و در نتیجه پاسخ شبکه برای داده‌های جدید، دقیق‌تر خواهد بود.

در فرآیند آموزش برای جلوگیری از شرطی شدن شبکه^۱ و یا کاهش قدرت یادگیری آن^۲، ابتدا داده‌های ورودی نرمال‌سازی شدند و سپس به صورت اتفاقی به شبکه وارد گردیدند. شرطی شدن شبکه به معنای این است که الگوریتم فقط رابطه میان داده‌هایی که در مجموعه آموزشی به آن داده شده است را می‌تواند درک و به درستی پیش‌بینی کند. اما اگر داده‌ای کمی از مجموعه‌ی آموزشی فاصله داشته باشد، نمی‌تواند به درستی پاسخی برای داده‌های جدید پیدا کند و تخمین آن‌ها با خطای قابل توجهی همراه خواهد بود. کاهش قدرت یادگیری شبکه نیز زمانی رخ می‌دهد که الگوریتم فقط توانسته است به درک کلی از مجموعه آموزشی دست یابد. یعنی حتی اگر داده‌های مجموعه‌ی آموزشی مجدداً به الگوریتم وارد شوند، خطایی قابل توجه در تخمین آن‌ها وجود خواهد داشت.

^۱ Overfit

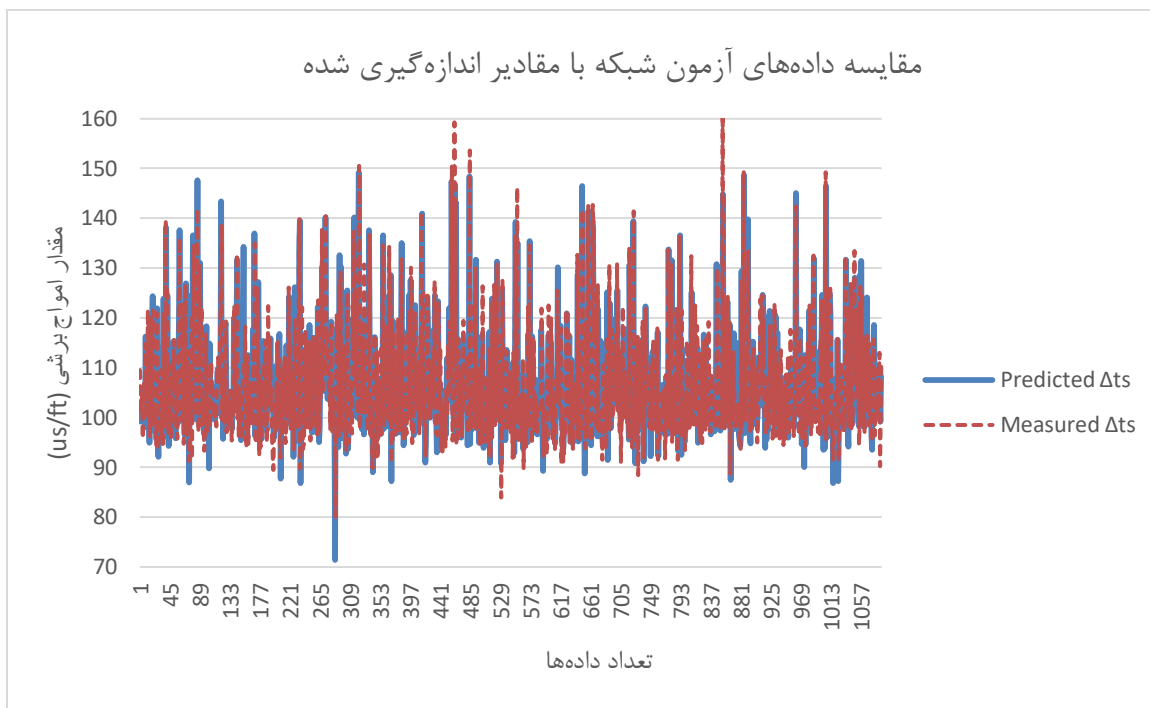
^۲ Underfit

پس از آموزش شبکه به کمک داده‌های ورودی باید دقت و عملکرد شبکه مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گیرد. در این گام شبکه‌ی طراحی شده باید با بخشی از داده‌ها که در آموزش شبکه از آن‌ها استفاده نشده است، مورد آزمایش قرار گیرد. در پژوهش حاضر ۳۰٪ از کل داده‌های در دسترس که برابر است با تعداد ۱۰۸۷ سری از کل داده‌ها، به عنوان داده‌های آزمون شبکه انتخاب شده‌اند. در این بخش با فرض مجهول بودن مقادیر نگار صوتی برشی، این مقادیر با استفاده از شبکه آموزش داده شده، تخمین زده شد. شکل ۴-۷ همبستگی میان مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷ همبستگی میان مقدار واقعی داده‌های کنترل و مقدار تخمینی حاصل از شبکه

همان‌گونه که دیده می‌شود، ضریب همبستگی میان مقادیر واقعی و تخمینی نگار صوتی برشی بیش از ۹۲ درصد می‌باشد. این موضوع بیان‌گر قابلیت مناسب سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار در تخمین این نگار است. در شکل ۴-۸ نتایج داده‌های آزمون شبکه در کنار مقادیر واقعی نشان داده شده است.



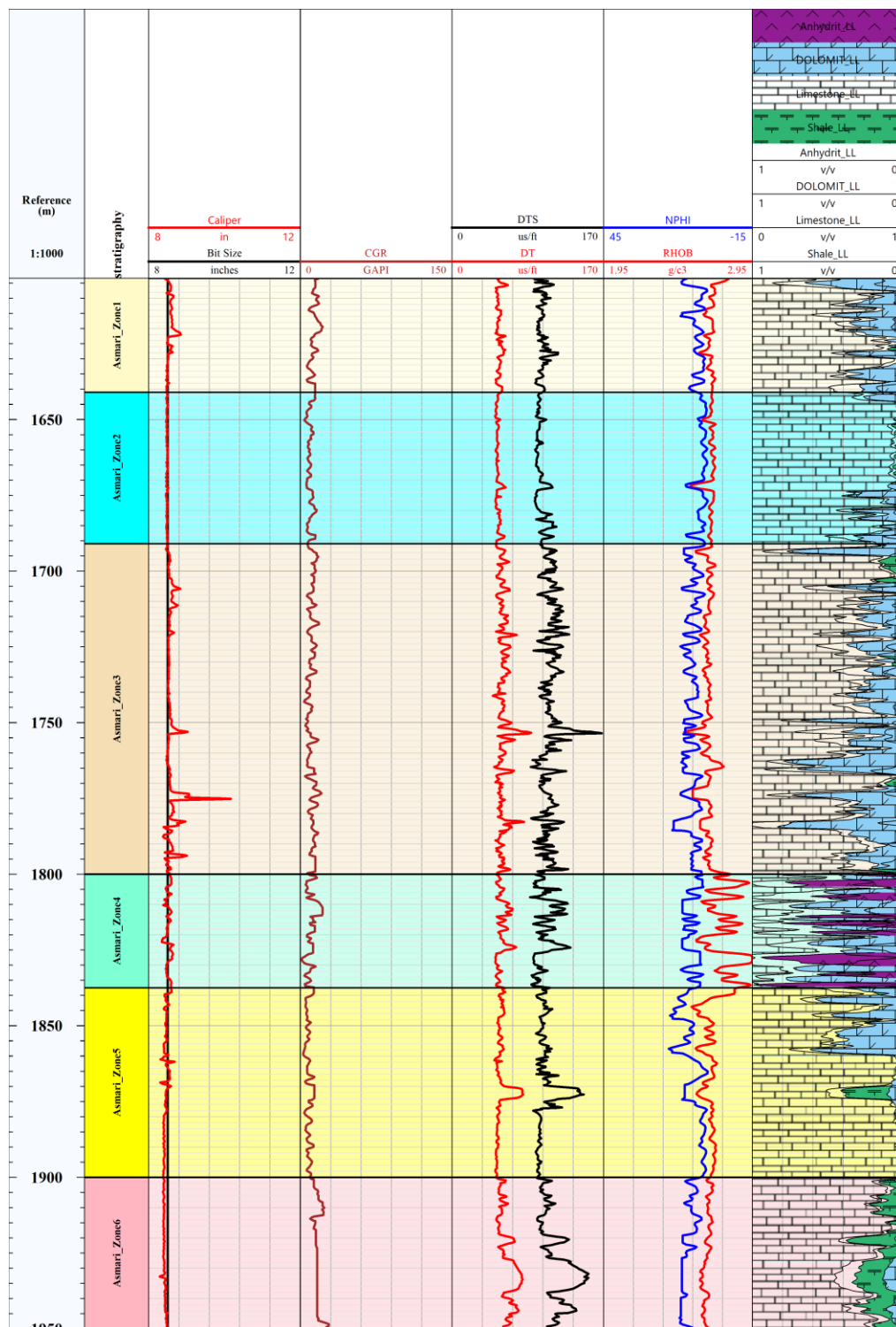
شکل ۴-۸ مقایسه داده‌های آزمون شبکه با مقادیر اندازه‌گیری شده (نمودار آبی داده‌های تخمینی و نمودار قرمز

داده‌های واقعی (اندازه‌گیری شده) را نشان می‌دهد)

به این صورت مقدار سرعت امواج برشی توسط سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار در سایر چاه‌ها

تخمین زده شد و از آن‌ها برای ساخت مدل ژئومکانیکی استفاده گردید. شکل ۴-۹ نگارهای پتروفیزیکی

و نگارهای موج فشاری و برشی چاه ۳۰ میدان لالی را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۴ نگارهای پتروفیزیکی و نگارهای موج فشاری و برشی چاه ۳۰ میدان لالی

۷-۴ محاسبه خواص الاستیک سنگ

خواص الاستیک مورد نیاز، شامل مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و نسبت پواسون می‌باشد. در حالت ایده‌آل این پارامترها را می‌توان از آزمایش مستقیم بر روی مغزه‌ها بدست آورد. اما در بسیاری از موارد به دلیل در دسترس نبودن نمونه کافی و نیز بالا بودن هزینه تست‌های آزمایشگاهی، از روابط توسعه داده شده برپایه تخمین خواص از نگارها، استفاده می‌گردد. از ویژگی‌های این روابط می‌توان به ارزان بودن و پیوستگی داده‌ها در سرتاسر مخزن اشاره نمود (Yale, 1994). مدول یانگ و نسبت پواسون از جمله پارامترهای ژئومکانیکی هستند که با در اختیار داشتن سرعت موج فشاری و برشی به عنوان ورودی‌های اصلی در این روابط می‌توان مقدار آن‌ها را مشخص کرد. با مشخص شدن مقدار این دو پارامتر، سایر پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی و مدول حجمی به راحتی از طریق روابط الاستیک محاسبه می‌شوند. مدول یانگ و نسبت پواسون دینامیکی از طریق دو رابطه زیر قابل محاسبه هستند (Zoback, 2007):

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۹-۴)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2}(V_p^2 - 2V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (۱۰-۴)$$

در این رابطه V_s سرعت امواج برشی است که توسط سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار بدست آمده است. V_p سرعت امواج فشاری است و در تمامی چاه‌های مورد مطالعه برداشت شده است. ρ نیز مقدار چگالی سنگ می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که میان مقادیر مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی تفاوت وجود دارد. این موضوع نخستین بار توسط زیسمن^۱ در سال ۱۹۳۳ مطرح گردید (Zisman, 1933). به طور کلی روش‌های دینامیکی نسبت به روش‌های استاتیکی مقادیر بزرگ‌تری را نشان

^۱ Zisman

می‌دهند. اختلاف بین مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی از صفر تا ۳۰۰٪ تغییر می‌کند (Lama, 1978). بنابراین برای این که مقدار مدول یانگ دینامیکی به مقدار واقعی مدول یانگ استاتیکی نزدیک شود، از روابط تجربی استفاده می‌شود. اما از آنجایی که این روابط به صورت تجربی و برای شرایط برخی سازندهای منطقه خاص بدست آمده‌اند، هنگام استفاده از هر یک از روابط بالا برای مناطق دیگر، باید دقت کرد که از رابطه‌ای استفاده شود که دارای بیشترین شرایط مشابه با منطقه مورد مطالعه را دارد. در چنین شرایطی بهترین راه برای انتخاب رابطه مناسب، مقایسه نتایج حاصل از روابط با مقادیر بدست آمده از آزمایش روی مغزه می‌باشد.

در این پژوهش به منظور افزایش دقت از روابط ۴-۱۱ و ۴-۱۲ که به صورت آزمایشگاهی و از آزمایش بر روی داده‌های مورد مطالعه در این میدان بدست آمده است، برای تبدیل مدول یانگ و نسبت پواسون از حالت دینامیک به استاتیک استفاده شد (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳).

$$E_{sta} = 0.6 E_{dyn} \quad (۱۱-۴)$$

$$\nu_{sta} = \nu_{dyn} \quad (۱۲-۴)$$

با مشخص شدن مدول یانگ و نسبت پواسون، سایر پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی و حجمی را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود (Zoback, 2007):

$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (۱۳-۴)$$

$$K_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (۱۴-۴)$$

ν سبت پواسون و E ، G و K به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی برحسب GPa می‌باشند.

۴-۸ پارامترهای مقاومتی سنگ

در مرحله بعد لازم است تا با بکارگیری روابط موجود، خواص مقاومتی سازند تخمین زده شود.

پارامترهای مقاومتی سنگ که شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی می‌باشند، کاربردهای زیادی در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز دارند. بهترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی است. با استفاده از این آزمون‌ها، به راحتی می‌توان مقادیر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و پارامترهای دیگری مانند زاویه اصطکاک را بدست آورد. مهم‌ترین روش جایگزین محاسبه پارامترهای مقاومت در صورت نبود نتایج آزمایشگاهی، استفاده از داده‌های پتروفیزیکی و روابط تجربی می‌باشد. در ادامه روش تخمین هر یک از پارامترهای مذکور مورد بحث قرار گرفته و خواص مقاومتی سازند در چاه ۳۰ میدان مورد مطالعه تخمین زده می‌شود.

۴-۸-۱ مقاومت فشاری تک محوری

اولین قدم در محاسبه پارامترهای مقاومتی سنگ، محاسبه مقاومت فشاری تک محوری است. مقاومت فشاری تک محوری یکی از پارامترهای اصلی برای تعیین محدوده تغییرات تنش‌های اصلی افقی است. بهترین راه برای اندازه‌گیری مقدار این پارامتر، انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری است. اما همانطور که اشاره شد، به دلیل کمبود مغزه‌های حفاری معمولاً این آزمایش‌ها به طور متداول در تمام سازندهای میدان‌های نفتی انجام نمی‌شوند. بنابراین معمولاً از روابط تجربی استفاده می‌شود که محققین جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی برای شرایط و جنس مختلف سازند ارائه کرده‌اند. در این پژوهش به منظور محاسبه مقاومت فشاری تک محوری از رابطه پیشنهادی که توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب برای میادین داخلی کشور ارائه شده است، استفاده گردید (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳).

$$UCS = 2.27E_s + 4.74 \quad (۴-۱۵)$$

۲-۸-۴ مقاومت کششی سنگ

مقاومت کششی سنگ، دومین پارامتر مقاومتی است که با اختصار با T_S نمایش داده می‌شود. مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری مقدار ناچیزی دارد و در سازندهای تحکیم نیافته برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. با این وجود در اعماق زیاد مقدار مقاومت کششی غیر صفر بوده و در تعیین محدوده حداقل و حداکثر تنش‌های افقی در سازند و پنجره ایمن گل حفاری تاثیرگذار می‌باشد (Kadyrov & Tutuncu, 2012). به طور معمول و در صورت موجود بودن نمونه مغزه حفاری، مقاومت کششی سنگ به صورت غیرمستقیم با استفاده از آزمون برزیلی بدست می‌آید. برای محاسبه مقاومت کششی سنگ از رابطه ۴-۱۶ استفاده شد. این رابطه حاصل مطالعات آزمایشگاهی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران می‌باشد (مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳).

$$T_S = 0.09 \text{ UCS} \quad (۱۶-۴)$$

۳-۸-۴ زاویه اصطکاک داخلی سنگ

سومین پارامتر مقاومتی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. این پارامتر را می‌توان از طریق رابطه پلامپ بدست آورد (Rasouli & Archer, 2012).

$$\text{FANG} = 26.5 - 37.4(1 - \varphi - V_{\text{shale}}) + 62.21 - \varphi - V_{\text{shale}})^2 \quad (۱۷-۴)$$

در این رابطه درصد حجم شیل را به کمک نگار گاما و از طریق رابطه ۴-۱۸ می‌توان بدست آورد (Pile & Johnson, 2002).

$$V_{\text{shale}} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (۱۸-۴)$$

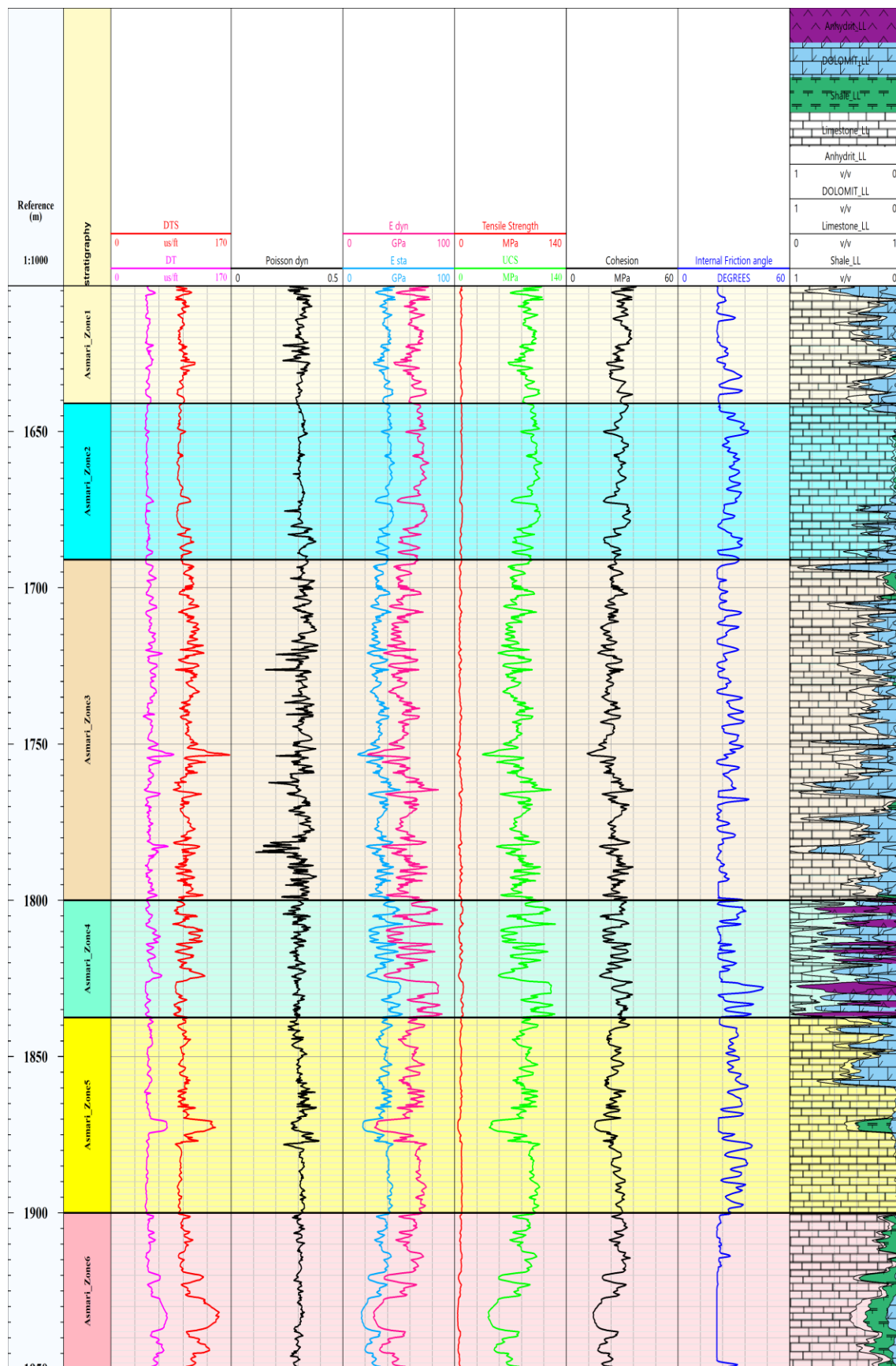
۴-۸-۴ چسبندگی سنگ

چسبندگی سنگ را می‌توان به عنوان مقاومت برشی سنگ در حالتی که تنش نرمالی بر روی آن اعمال نمی‌شود، تعریف کرد (Harrison & Hudson, 2000). تاکنون رابطه تجربی برای محاسبه مقدار

چسبندگی با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی ارائه نشده است. اما با توجه به این که سایر پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه هستند، می‌توان با مراجعه به رابطه معیار موهر کلمب مقدار چسبندگی را نیز از رابطه ۴-۱۹ محاسبه کرد.

$$UCS = C \times 2 \times \tan\left(45 + \frac{FANG}{2}\right) \quad (۴-۱۹)$$

در این رابطه مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و چسبندگی برحسب مگاپاسکال می‌باشند. شکل ۴-۱۰ نتایج بدست آمده از محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی چاه شماره ۳۰ را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۰ پارامترهای الاستیک و مقاومتی چاه شماره ۳۰

۴-۹ فشار منفذی

یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه فشار منفذی، استفاده از رابطه ایتون می‌باشد که بر اساس مقاومت ویژه یا نگارهای صوتی فشار منفذی را محاسبه می‌کند (Eaton, 1975). این روش برای ماسه سنگ‌ها و شیل‌ها کاربرد دارد. اما در سنگ‌های کربناته شکسته و خرد شده، به دلیل توزیع نامنظم تخلخل، این روش مفید نمی‌باشد (امانی‌پور و لشکری‌پور، ۱۳۹۱). بنابراین در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه مورد نظر از روش گرادیان سیال استفاده شد. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا در عمق‌های مختلف مخزن و با استفاده گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز می‌توان فشار منفذی را محاسبه کرد. گرادیان افزایش فشار منفذی در گاز ۰.۱۱ psi/ft، در نفت ۰.۳۵ psi/ft و در آب ۰.۴۶ psi/ft در نظر گرفته شده است. به این ترتیب فشار منفذی در راستای طول چاه با رابطه ۴-۲۰ محاسبه گردید.

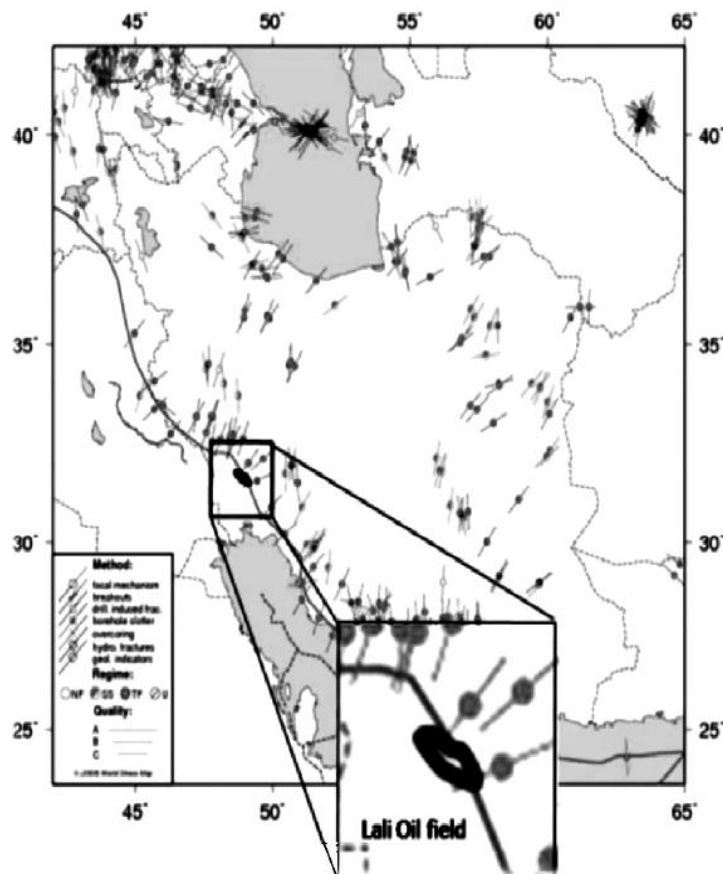
$$P_2 = P_1 + \rho fg(Z_2 - Z_1) \quad (۴-۲۰)$$

در این رابطه P_1 فشار سیال سازند در عمق Z_1 ، P_2 فشار سیال سازند در عمق Z_2 و ρfg چگالی سیال سازند است.

۴-۱۰ وضعیت تنش میدان

آگاهی از نوع تغییرات تنش و خصوصیات مکانیکی سنگ، یک پارامتر کلیدی جهت توسعه میادین است. زیرا سازندهای زمین‌شناسی به دلیل وزن روباره و تنش‌های تکتونیکی همواره در شرایط تحت تنش هستند. عامل اصلی تنش در عمق زمین، چگالی یا وزن لایه‌های فوقانی است که به عنوان تنش روباره شناخته می‌شود (Whitebay & Morita, 1994). امروزه چندین روش مستقیم و غیرمستقیم برای تعیین بزرگی تنش در مخازن نفتی ارائه شده است. اما همچنان تعیین دقیق تنش‌های اصلی افقی یک چالش اساسی در مطالعات ژئومکانیکی می‌باشد. از جمله روش‌های اندازه‌گیری تنش به صورت مستقیم می‌توان به آزمایش نشت، شکست هیدرولیکی و تزریق اشاره کرد. معمولاً از این روش‌ها به دلیل هزینه‌های زیاد، دشواری پیاده‌سازی در اعماق زیاد و امکان شکست در برخی موارد به‌ندرت استفاده

می‌شود. همچنین این روش وضعیت تنش را به صورت یک نمودار پیوسته ارائه نمی‌دهند. برای استفاده از تنش برجا در مدل ژئومکانیکی لازم است تا هم بزرگی و هم جهت تنش برجا اندازه‌گیری شود. تنش‌های اصلی شامل تنش قائم، تنش افقی حداکثر و تنش حداقل می‌باشند. با فرض اینکه راستای تنش قائم به صورت عمودی می‌باشد، دو تنش دیگر در صفحه افقی و عمود با تنش قائم قرار می‌گیرند. معمولاً در چاه دو نوع شکستگی برشی و القایی ناشی از حفاری رخ می‌دهد. این شکستگی‌ها را به راحتی می‌توان به کمک نگارهای تصویری بدست آمده از چاه مشاهده و از آن‌ها برای تخمین بزرگی و راستای تنش‌ها استفاده نمود (Afsari et al., 2009). زیرا راستای تنش افقی حداکثر در راستای شکستگی‌های کششی و راستای تنش افقی حداقل در راستای شکستگی‌های برشی در دیواره چاه می‌باشد (ترابی‌خواه و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج داده‌های تفسیر شده نگارهای تصویری، در چندین چاه در میدان لالی نشان می‌دهد که راستای جهت تنش افقی حداکثر (S_H) در میدان N040E می‌باشد. در نتیجه جهت تنش افقی حداکثر و حداقل به ترتیب عمدتاً در جهت NE-SW و NW-SE می‌باشد. نقشه تنش‌های برجای ایران که میدان نفتی مورد مطالعه نیز در آن واقع است، در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



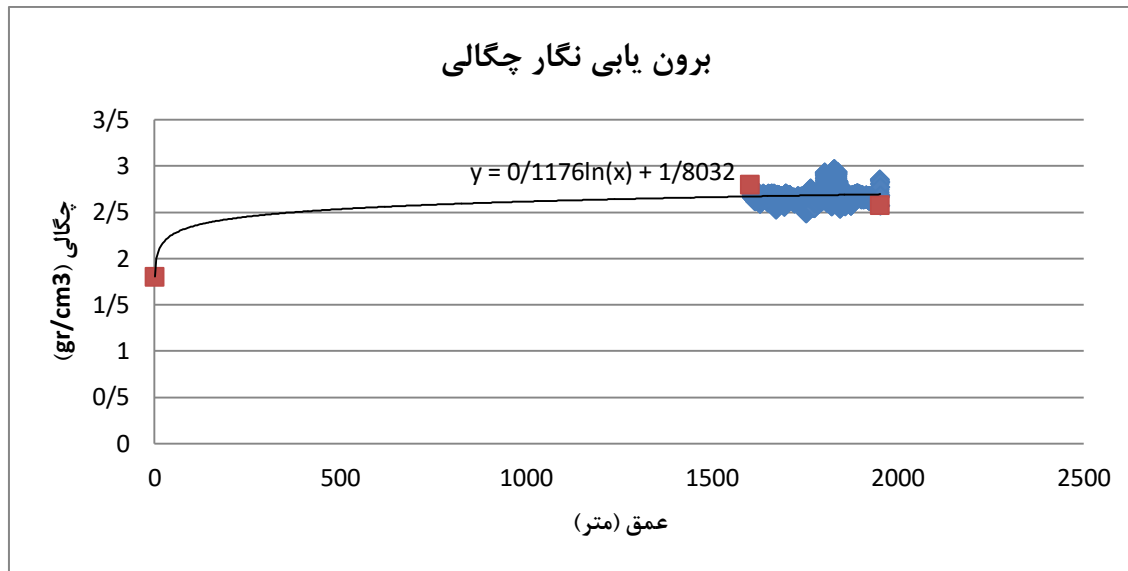
شکل ۴-۱۱ نقشه جهت یابی حداکثر تنش افقی در ایران از نقشه جهانی پایگاه داده تنش (WSM, 2020)

جهت تنش افقی حداکثر بدست آمده از گسل ها و شکستگی های طبیعی و مکانیزم کانونی زمین لرزه در پروژه WSM (نقشه جهانی تنش) روند N36E را نشان می دهد که با توجه به هم خوانی این مقدار با نتایج بدست آمده در این پژوهش صحت محاسبات تایید می گردد. در ادامه روش تخمین مؤلفه های تنش توضیح داده شده است.

۴-۱۰-۱ تنش قائم

تنش قائم در هر عمقی از چاه برابر با وزن روباره ای است که بالای آن عمق قرار گرفته است. تنش قائم با استفاده از نمودار چگالی محاسبه می شود. اما معمولاً نگار چگالی فقط در بخشی از مسیر حفاری و در داخل مخزن رانده می شود و از سطح زمین تا مخزن داده ای برداشت نمی شود. بنابراین باید مقادیر بالادست به روش برون یابی تخمین زده شوند. برای این منظور از تخمین نمایی استفاده گردید. بنابراین در تمامی چاه های مورد مطالعه، نموداری مانند شکل ۴-۱۲ ترسیم و سپس تابعی نمایی بر آن برازش

شد. در این پژوهش چگالی سنگ در نزدیکی سطح زمین برابر با چگالی متوسط خاک منطقه ۱.۸ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شد. سپس به کمک رابطه‌ای که برای هر چاه بدست آمد، مقدار چگالی در اولین نقطه‌ی مخزن دارای نگار چگالی، تخمین زده شد.



شکل ۴-۱۲ تخمین چگالی سنگ از سطح زمین تا مخزن

پس از آن تنش در هر نقطه مخزن که نگار چگالی در آن موجود است، از طریق روابط زیر محاسبه شده و با نقطه قبلی خود جمع می‌گردد. به این صورت تنش قائم در مخزن تخمین زده می‌شود:

$$\sigma_v = \int_0^z p(z) \cdot g \cdot dz \quad (\text{Afsari et al., 2009}) \quad (4-21)$$

$$\sigma_{v(n)} = (\rho_n g (Z_n - Z_{n-1})) + \sigma_{v(n-1)} \quad (\text{ترابی خواه و همکاران، ۱۳۹۴}) \quad (4-22)$$

در روابط مذکور ρ چگالی سنگ، Z عمق و g شتاب ثقل زمین می‌باشد. در رابطه ۴-۲۲ مقدار $\sigma_{v(n)}$ تنش قائم در نقطه n و $\sigma_{v(n-1)}$ مقدار تنش قائم در نقطه $n-1$ می‌باشد.

۴-۱۰-۲ محاسبه تنش‌های افقی حداقل و حداکثر

یکی از مهم‌ترین روش‌های محاسبه تنش‌های افقی حداقل و حداکثر روابط پوروالاستیک می‌باشد. در این روابط با داشتن مقادیر مربوط به مدول یانگ، نسبت پواسون، مقدار تنش قائم و فشار منفذی، می

توان تنش‌های افقی حداکثر و حداقل را محاسبه کرد (کیانی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). در این پژوهش از روابط ۴-۲۳ و ۴-۲۴ که روابط پوروالاستیک می‌باشند، برای تخمین اولیه تنش‌های افقی حداقل و حداکثر استفاده شده است.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_P + \alpha P_P + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (4-23)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_P + \alpha P_P + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad (4-24)$$

در این روابط ν نسبت پواسون، α ضریب بایوت، P_P فشار منفذی، E مدول یانگ، ε_x و ε_y نیز به ترتیب مقادیر کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می‌باشند. ضریب بایوت معمولاً از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود و مقدار آن از صفر (برای سنگ‌های سخت با تخلخل صفر) تا ۱ (برای سنگ‌های متخلخل در حوضه‌های رسوبی کم عمق) تغییر می‌کند. روش استفاده از روابط بالا به منظور تخمین تنش به این گونه است که با جایگذاری تمام مقادیر به جز مقادیر مجهول کرنش‌های تکتونیکی، مقادیر تنش افقی حداقل و حداکثر برحسب کرنش تکتونیکی بدست می‌آید. با عددگذاری انتخابی برای مقادیر کرنش تکتونیکی، مقادیر تنش را آنقدر جابجا کرده تا با شرایط شکستگی‌های کششی و برشی ثبت‌شده در نگار قطرسنجی و گزارش حفاری تطابق داشته باشد (Zoback, 2010).

۴-۱۱ انتخاب معیار شکست

برای محاسبه پنجره ایمن گل به داده‌های مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی نیاز می‌باشد. همچنین علاوه بر پارامترهای مقاومتی، داده‌های تنش‌های افقی نیز مورد نیاز می‌باشند. پس از تخمین مقادیر تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، می‌بایست برای پیش‌بینی وقوع شکست در دیواره چاه با وضعیت تنش‌های پیش‌بینی شده، ملاک یا معیاری برای وقوع شکست انتخاب نمود. به همین منظور از معیارهای شکست سنگ جهت کالیبره کردن تنش‌های تخمینی استفاده می‌شود. در صورتی که وزن

گل در زمان حفاری کمتر از حد پایین وزن گل باشد، شکست برشی در دیواره چاه رخ خواهد داد و در صورتی که وزن گل در زمان حفاری بیشتر از حد بالای فشار گل باشد، شکست کششی در دیواره چاه اتفاق می افتد (ترابی خواه و همکاران، ۱۳۹۴). معیار شکست از طریق برقراری ارتباط بین مقادیر تنش های القایی در دیواره چاه و مقاومت سنگ، شکستگی های ایجاد شده در چاه را پیش بینی می کند. برای این منظور ابتدا نگار قطرسنجی چاه رسم می شود. سپس در صورت وجود نگارهای تصویری، محل شکستگی های برشی و کششی روی دیواره چاه مشخص شده و روی نگار قطرسنجی علامت گذاری می شوند. در گام بعد حد بالا و پایین وزن گل به کمک معیار شکست و با استفاده از مقادیر تنش های تخمینی بدست می آیند. باید حد بالا و پایین وزن گل با وزن گل در زمان حفاری مقایسه شود تا میزان دقت مدلسازی ارزیابی شود. برای افزایش دقت مدل باید مقادیر کرنش های تنش های تخمینی را تغییر داد تا جایی که مدل ساخته شده بتواند شکستگی های رخ داده در چاه را توجیه نماید. در غیر این صورت باید مقادیر اولیه تنش را تغییر داد و یا از معیار شکست دیگری استفاده نمود. با توجه به مطالعات انجام شده، معیار شکست موهر کلمب، هوک براون و موگی کلمب برای پیش بینی پایداری چاه های مورد مطالعه در میدان لالی مورد استفاده قرار می گیرند. نتایج بدست آمده از هر یک از معیارهای شکست در ادامه ارائه شده است.

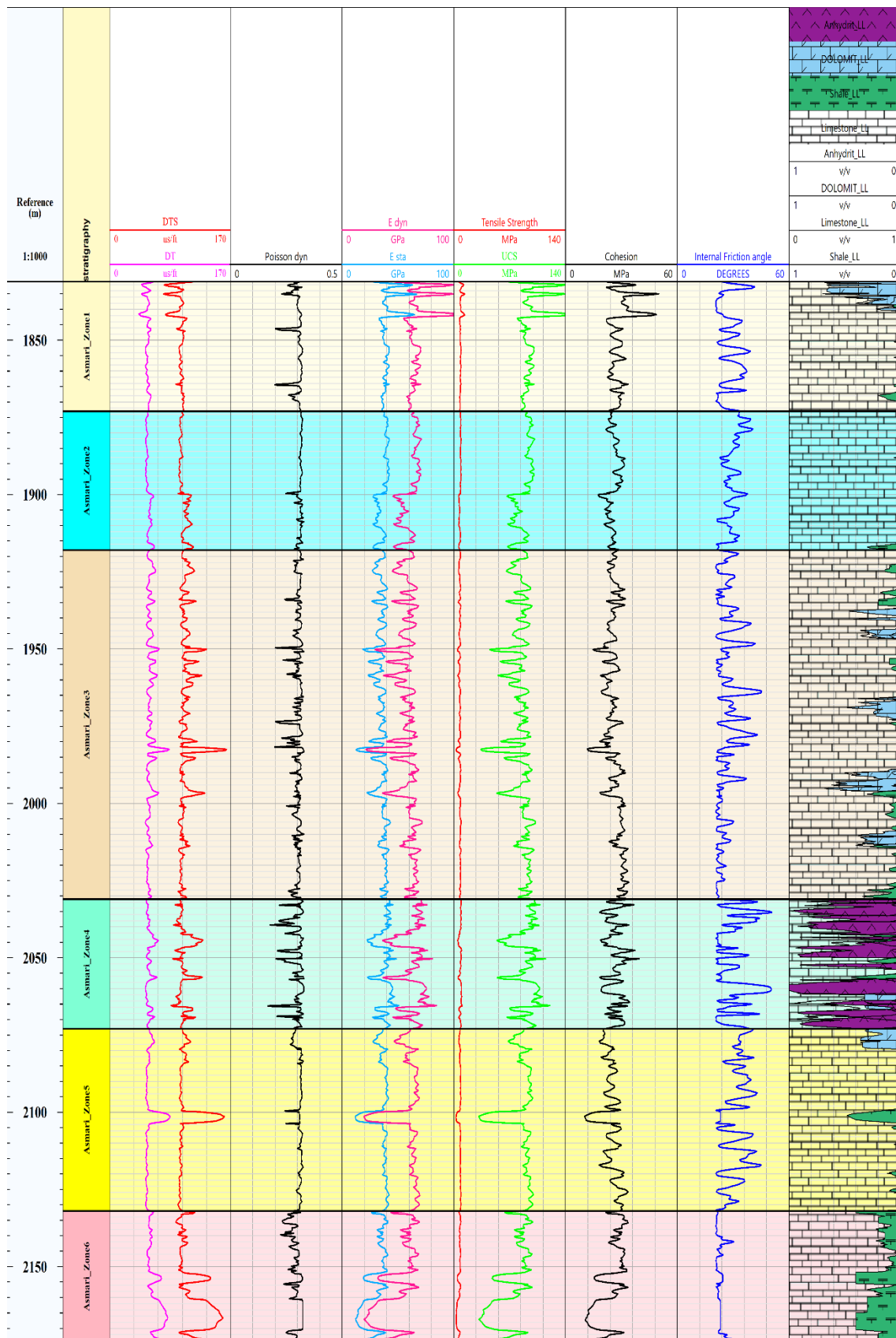
۴-۱۲ مدل ژئومکانیکی یک بعدی

با طی کردن مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی که در بخش های قبل توضیح داده شد، مدل ژئومکانیکی یک بعدی برای چاه های مورد مطالعه در میدان لالی ایجاد شد. نتایج مدل ژئومکانیکی هر شش چاه را می توان در شکل های ۴-۱۳ تا ۴-۲۴ مشاهده نمود.

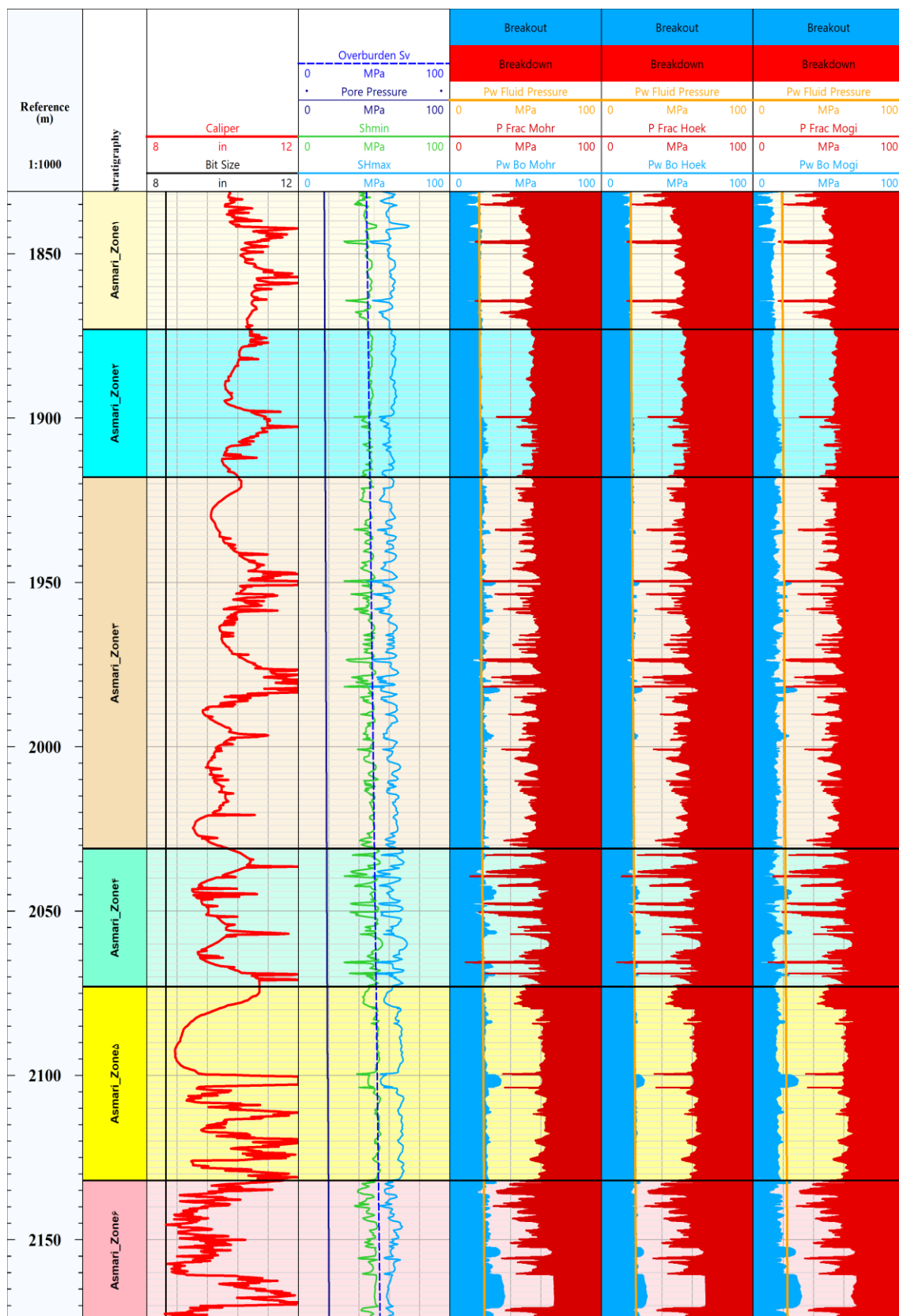
برای هر چاه دو شکل ارائه شده است. در هر دو شکل، ستون اول عمق حفاری شده و ستون دوم چینه شناسی برای هر چاه را نشان می دهد. در شکل اول برای هر چاه، پس از نمایش کندی موج فشاری و برشی، پارامترهای الاستیک سنگ شامل مدول یانگ استاتیک و دینامیک، نسبت پواسون و پارامترهای

مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک و چسبندگی ذاتی در کنار چینه‌شناسی سنگ مخزن نشان داده شده‌اند.

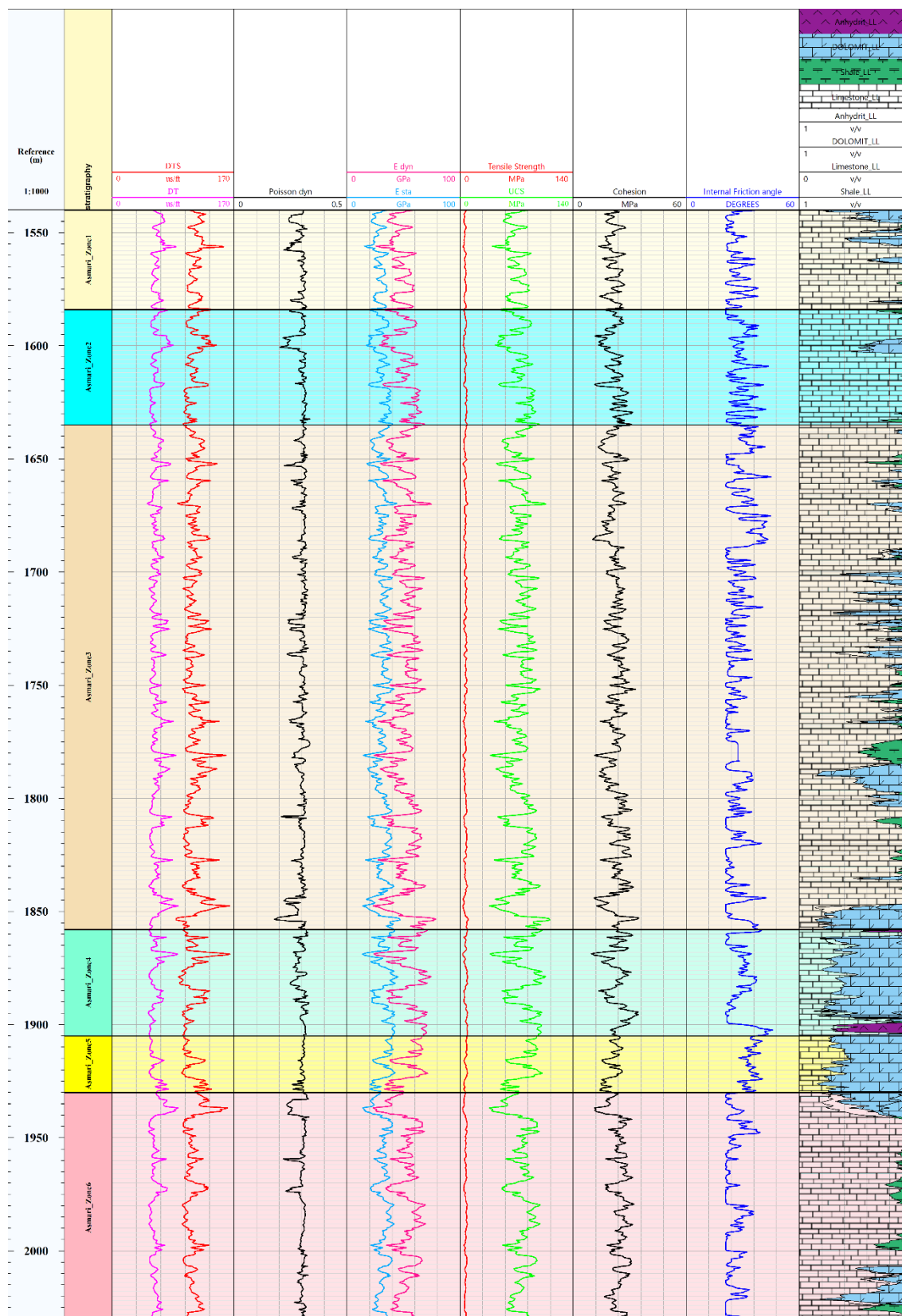
در شکل دوم در ستون سوم، نگار قطرسنجی و سائز مته حفاری نشان داده شده است. در ستون بعد وضعیت تنش شامل تنش قائم، تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداقل در کنار فشار منفذی مشخص شده است. همچنین پنجره ایمن گل حفاری که به ترتیب بر اساس سه معیار شکست موهر کلمب و هوک براون و موگی کلمب بدست آمده‌اند در ستون‌های پنجم تا هفتم به نمایش می‌گذارد. در هر کدام از این ستون‌ها، فشار گل در زمان حفاری، حد پایین و بالای فشار گل بر اساس هر معیار نمایش داده شده است.



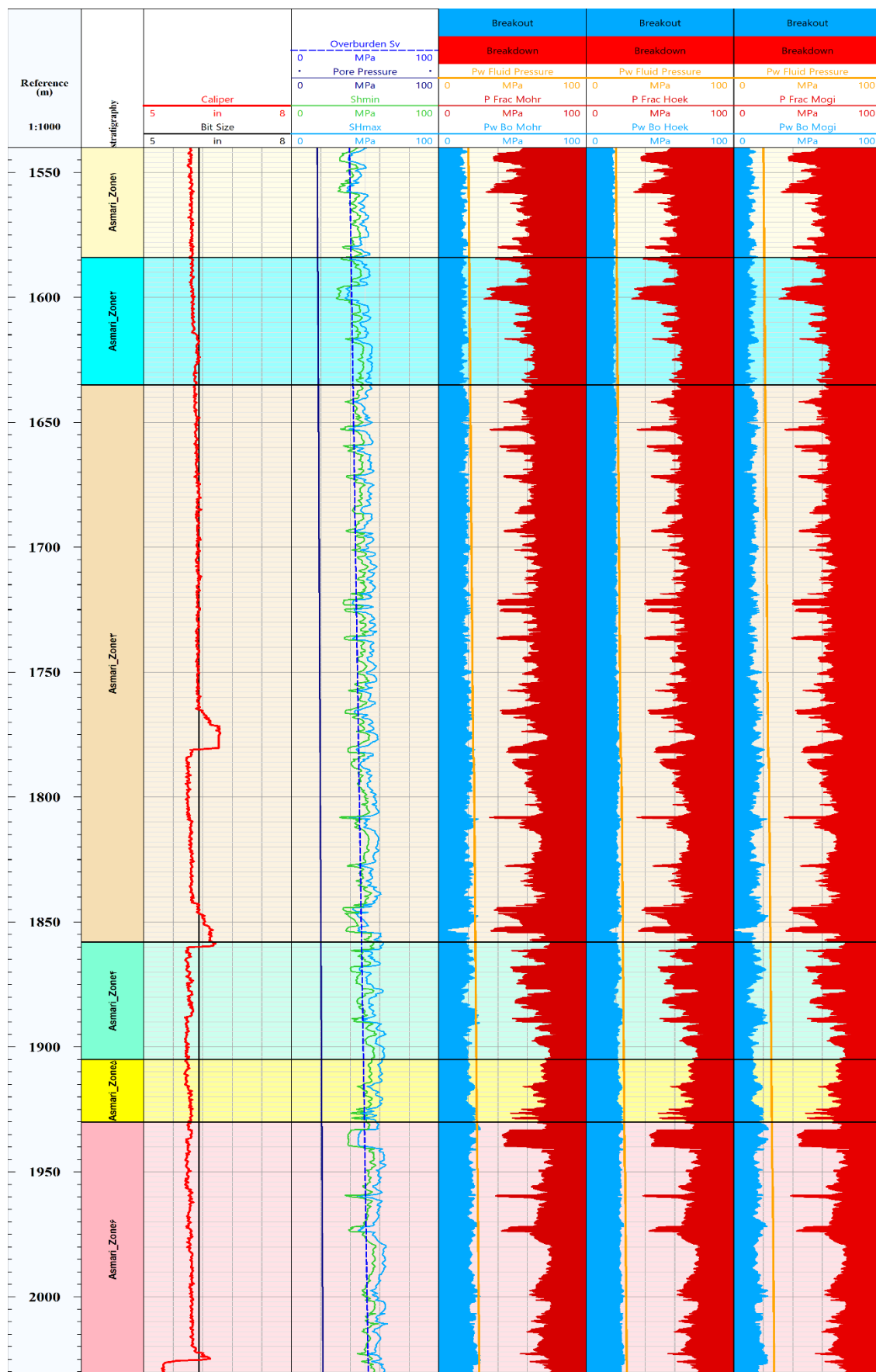
شکل ۴-۱۳ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۴ میدان لالی (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)



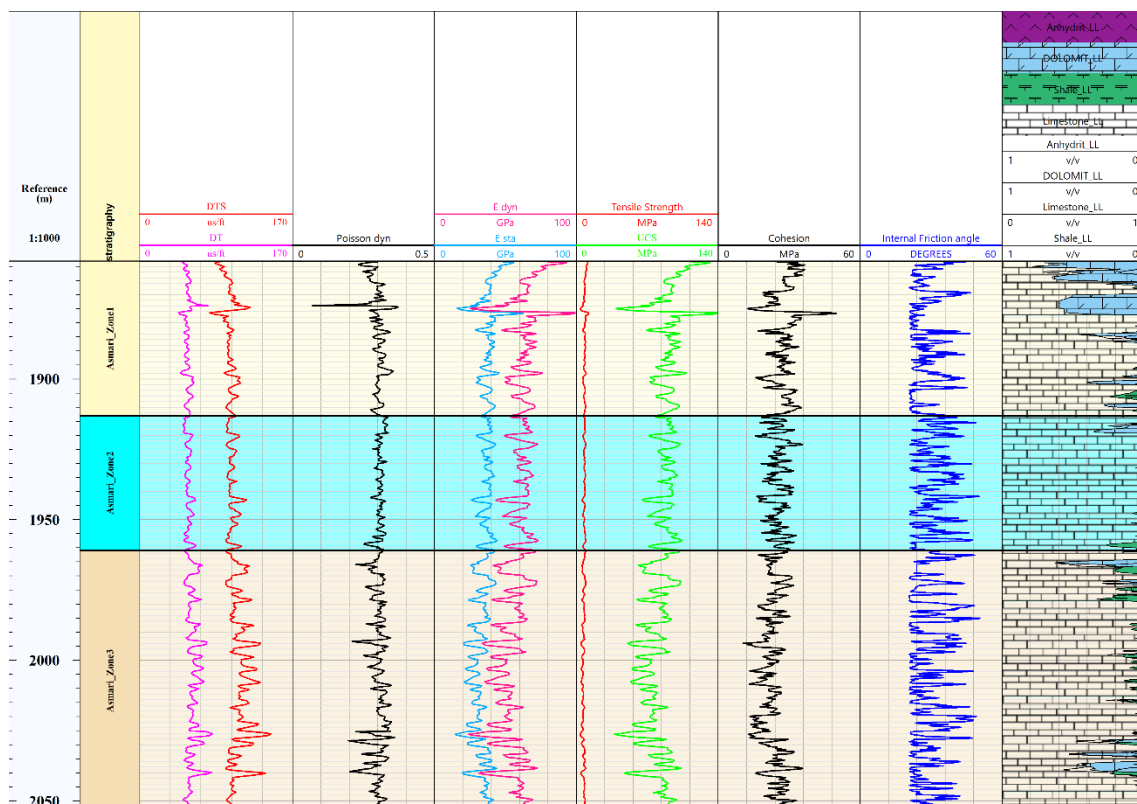
شکل ۴-۱۴ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۴ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)



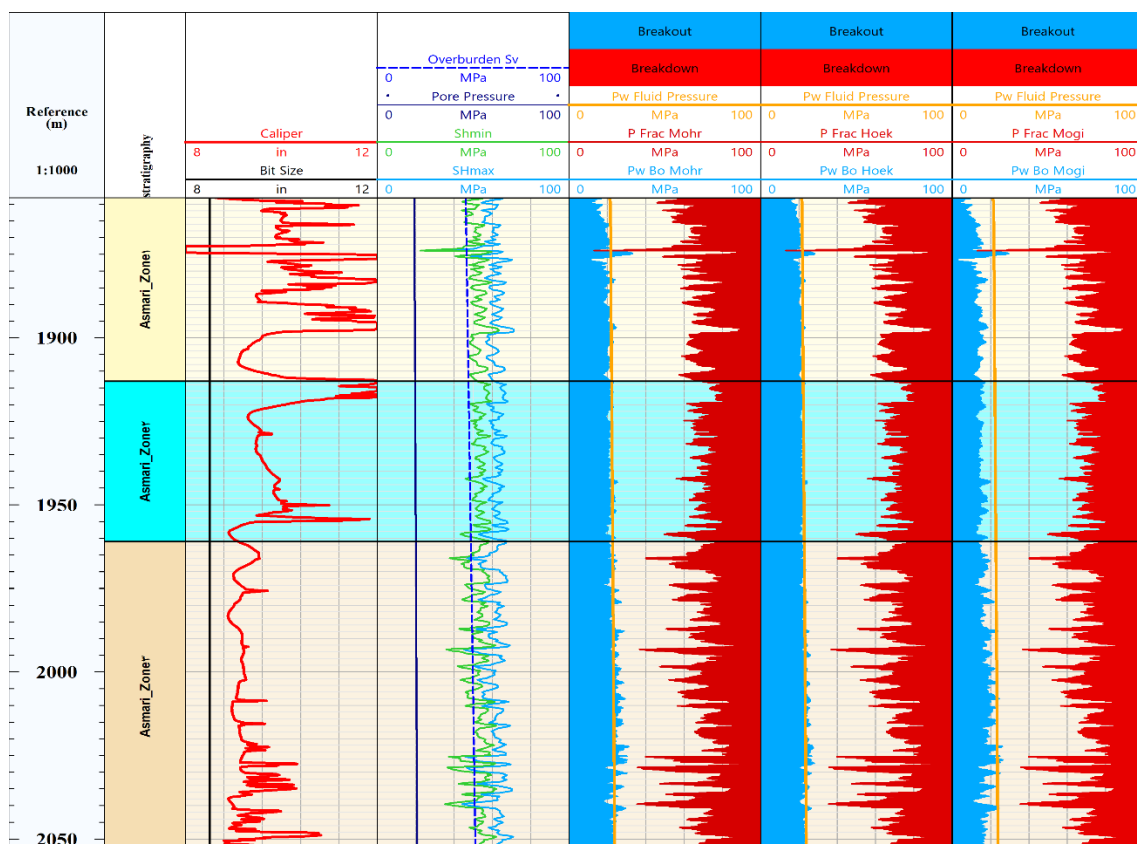
شکل ۴-۱۵ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۶ میدان لالی (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)



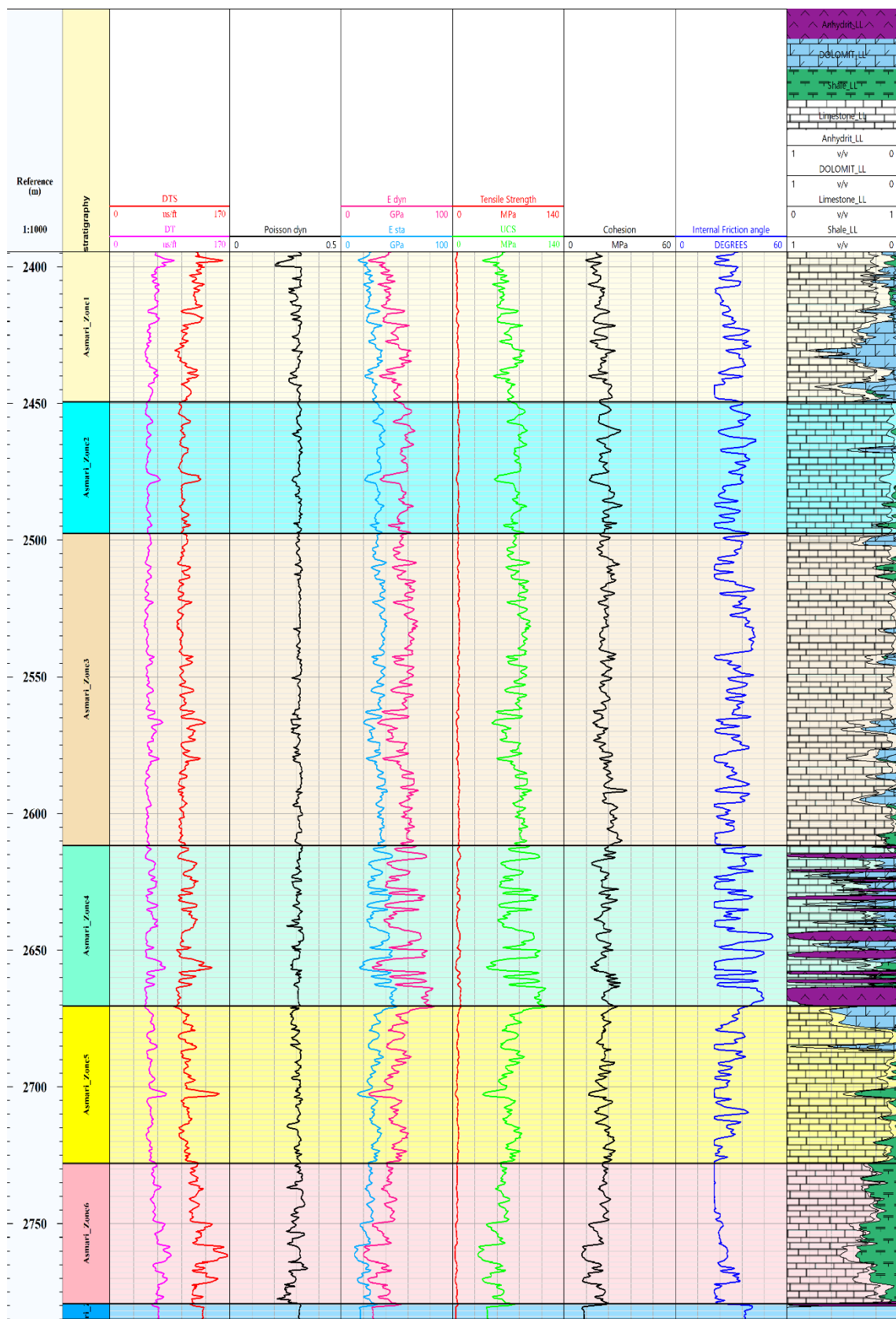
شکل ۴-۱۶ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۶ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)



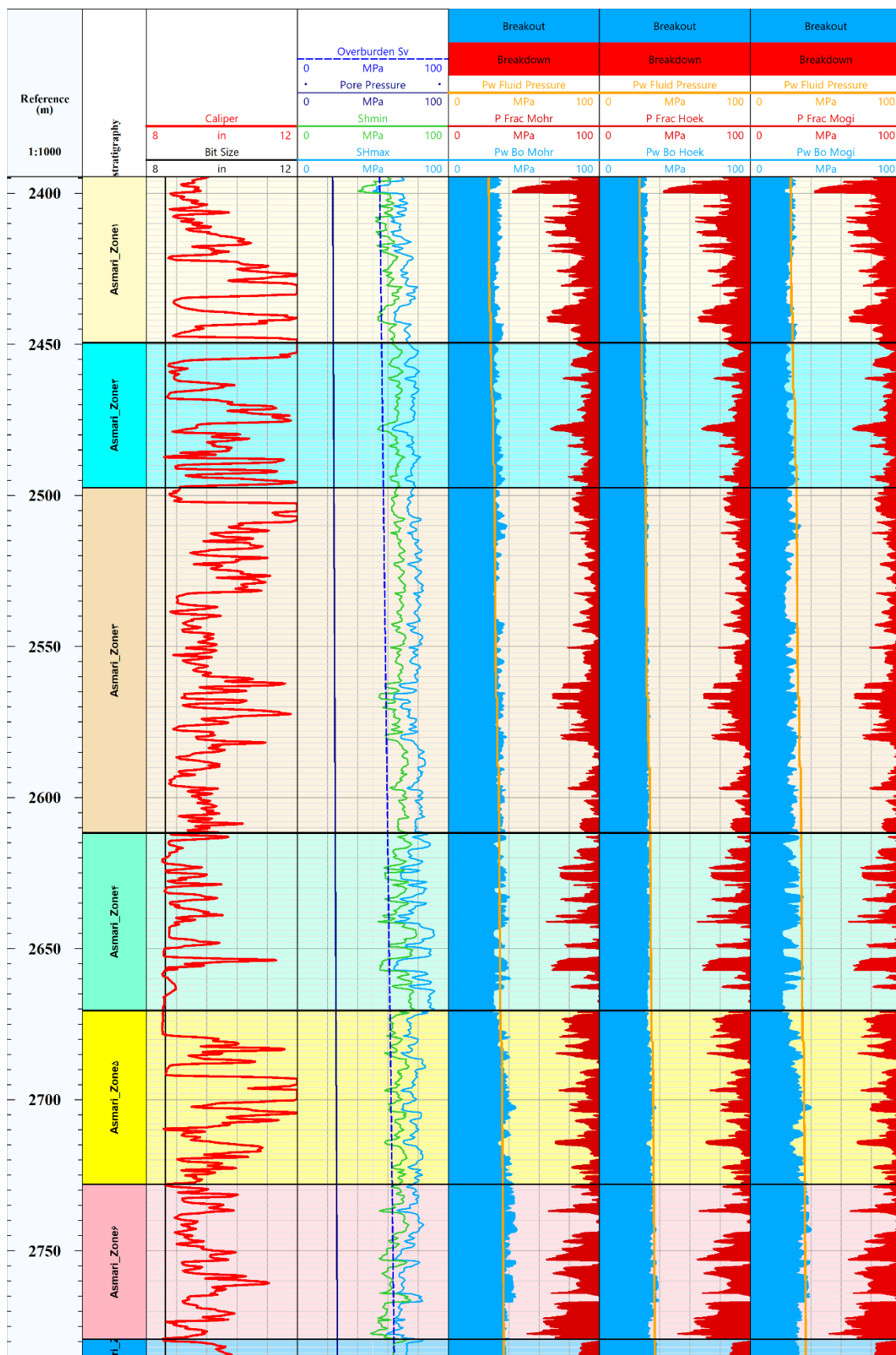
شکل ۴-۱۷ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۷ میدان لالی (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)



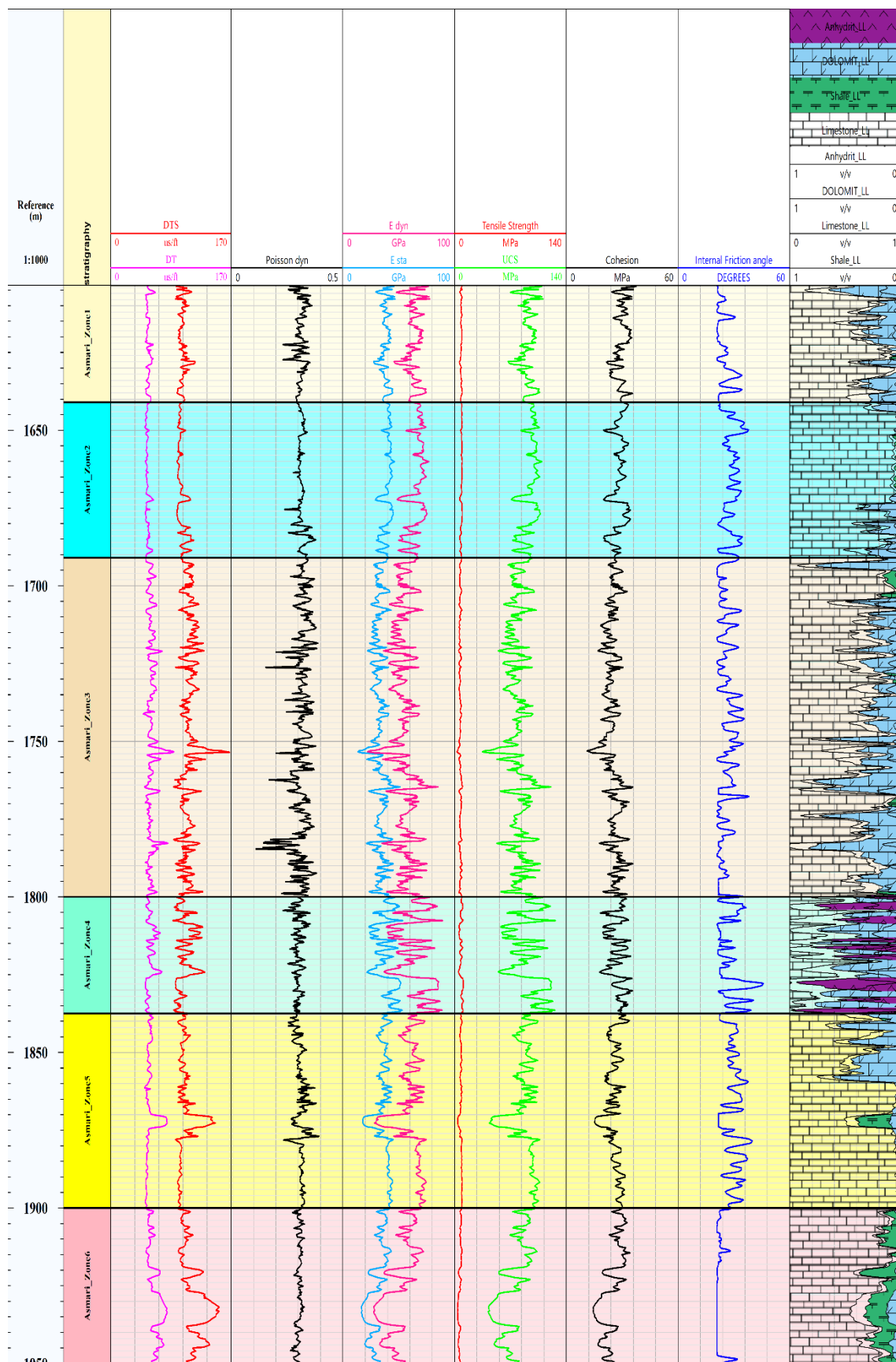
شکل ۴-۱۸ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۷ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)



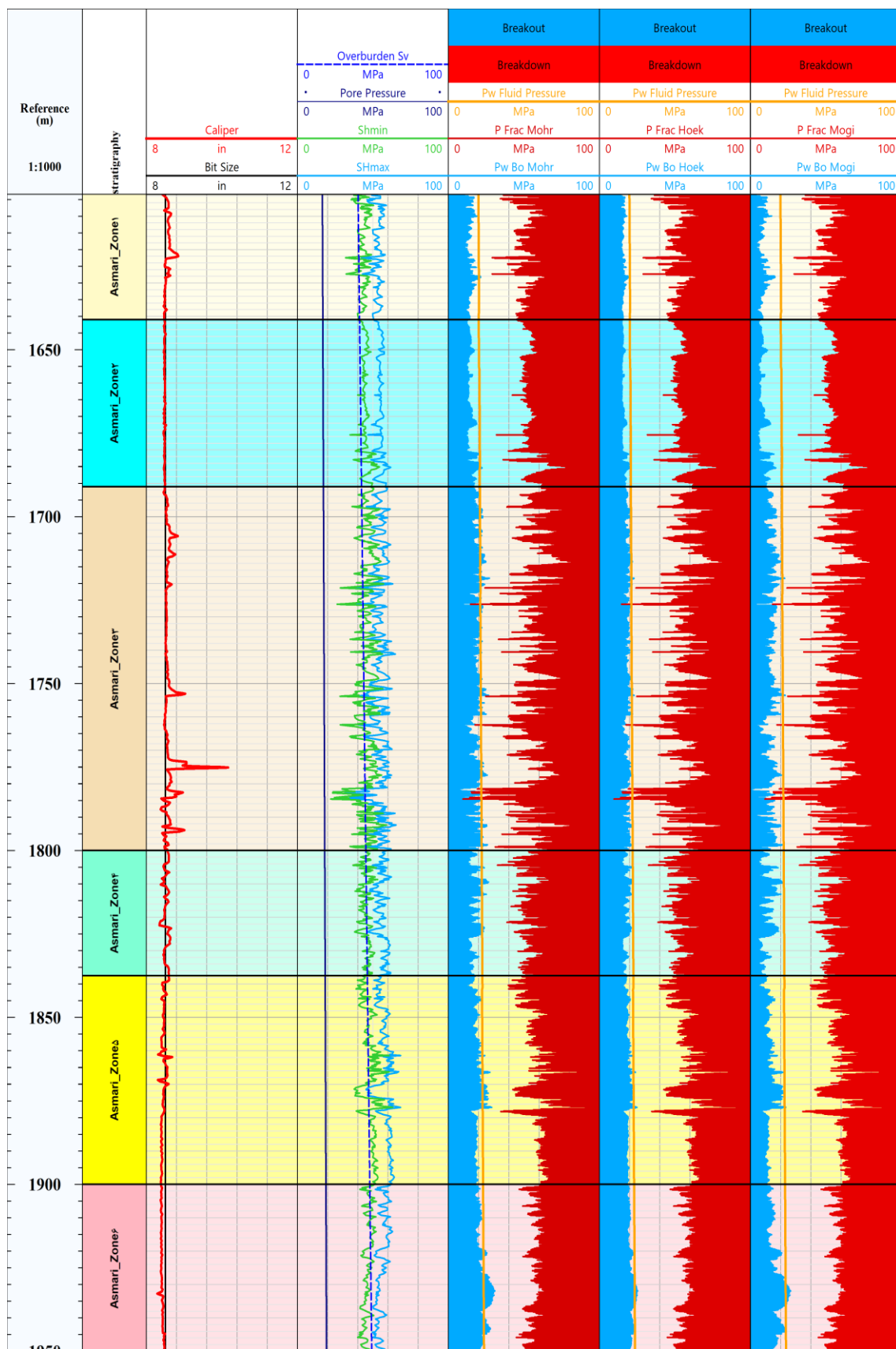
شکل ۱۹-۴ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۹ میدان لالی (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)



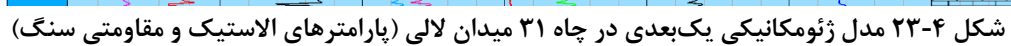
شکل ۴-۲۰ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۲۹ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)

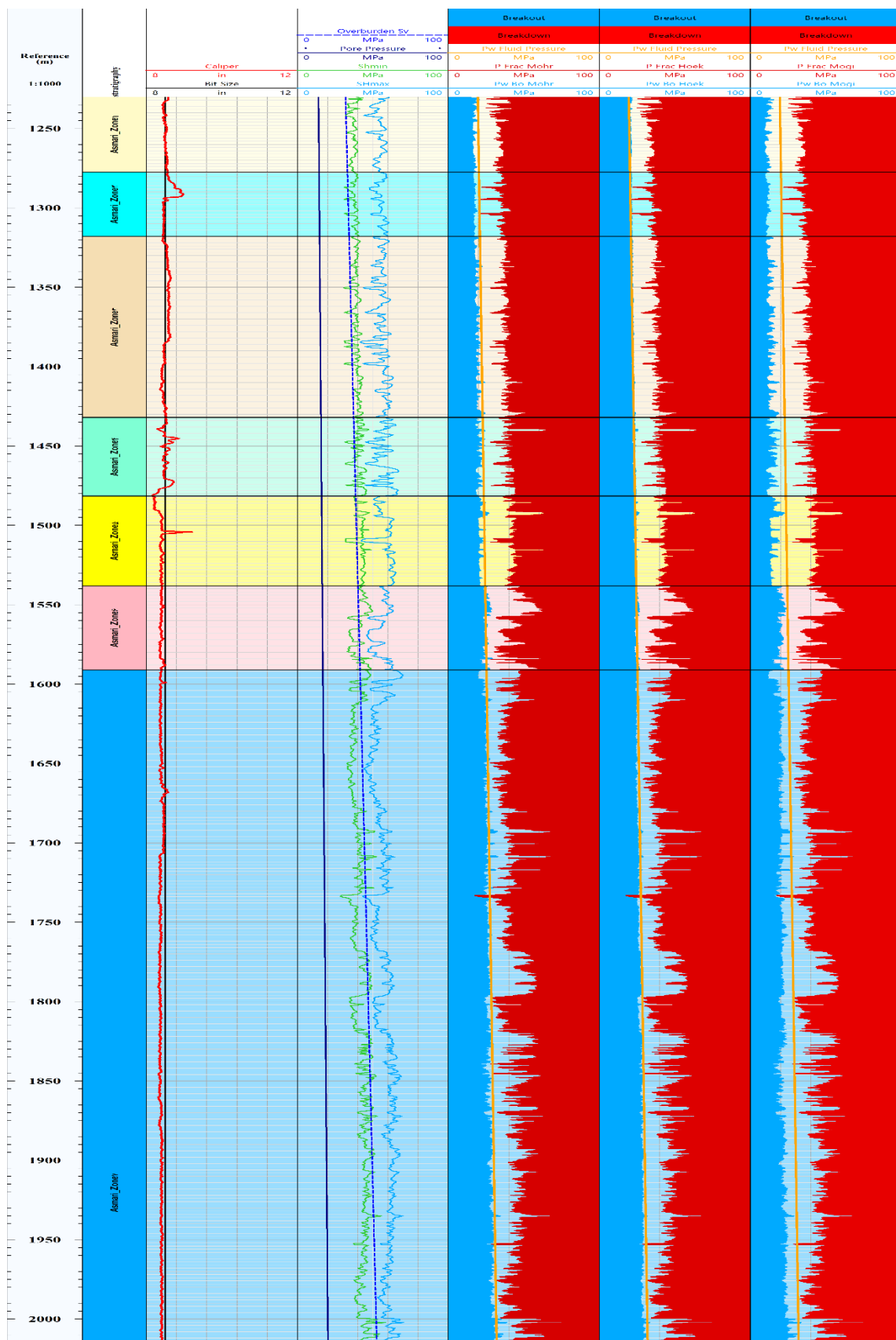


شکل ۴-۲۱ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۰ میدان لالی (پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ)



شکل ۴-۲۲ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۰ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)





شکل ۴-۲۴ مدل ژئومکانیکی یک بعدی در چاه ۳۱ میدان لالی (وضعیت تنش و گل حفاری به همراه نگار قطر سنجی)

همانطور که در فصل دو اشاره شد، زمانی که مقدار فشار گل حفاری از فشار ریزش سازند کمتر باشد، شکست برشی در دیواره چاه آغاز می‌شود. همچنین اگر فشار گل حفاری از حداقل تنش افقی بیشتر گردد، هرزروی مشاهده می‌شود. این هرزروی در واقع ناشی از بازشدگی مجدد شکستگی‌های موجود است. اگر این فرآیند ادامه یابد و فشار گل از فشار بحرانی گسیختگی کششی بیشتر شود، شکستگی‌های جدیدی در دیواره چاه ایجاد شده و به هرزروی کامل سیال حفاری منجر می‌گردد. در نتیجه فشار گل حفاری باید در میان بازه مشخص شده قرار گیرد تا عملیات حفاری به صورت ایمن انجام گردد. متأسفانه در این پژوهش به دلیل در دسترس نبودن نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی، نمی‌توان تطابق میان مقادیر پارامترهای الاستیک و مقاومتی تخمین زده شده را مورد ارزیابی قرار داد. بنابراین به منظور راستی‌آزمایی مدل‌های ساخته شده، باید از مقایسه نتایج حاصل از تفسیر نگار تصویری در چاه‌های مورد مطالعه و تغییرات نگار قطرسنجی و اندازه مته استفاده کرد.

بررسی نگارهای قطرسنجی، گزارشات حفاری و نگارهای تصویری در چاه‌های مورد مطالعه نشان داد، فشار بحرانی محاسبه شده بر اساس معیار موهر کلمب نسبت به معیار موگی کلمب و هوک براون انطباق بیشتری با شواهد موجود در هر یک از چاه‌ها دارد. همچنین لازم به ذکر است که نتایج حاصل از معیار موهر کلمب به دلیل صرف نظر کردن از اثر تنش متوسط در محاسبه فشار گل بحرانی، بازه کوچک‌تر و محتاطانه‌تری را نسبت به معیار موگی کلمب برای فشار گل حفاری پیشنهاد می‌دهند. اما در برخی اعماق عدم تطابق‌هایی نیز دیده می‌شود. مهم‌ترین علت عدم هم‌خوانی در برخی از عمق‌ها می‌تواند ناشی از خطاهای برداشتی و کمبود آزمایش‌های دقیق‌تر مکانیک سنگی دانست.

این عدم تطابق را می‌توان با بررسی اعماق ۱۲۵۰ تا ۱۳۰۰ در مدل یک‌بعدی چاه ۳۱ (شکل ۴-۲۴) مشاهده کرد. بدین معنی که نمودارهای قطرسنجی و تصویری گسیختگی را نشان می‌دهند، در حالی که پنجره گل نشان دهنده پایداری چاه در همان عمق می‌باشد. چندین عامل در ایجاد این اختلاف می‌توانند نقش داشته باشند. این اختلاف ممکن است ناشی از برآورد ناصحیح پارامترهای ژئومکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی و ثابت‌های الاستیک)، بزرگی تنش‌ها (تنش‌های

افقی و فشار منفذی)، نسبت بایوت و یا نسبت ناهمسانگردی تکتونیکی باشد. از طرفی دیگر با افزایش عمق و در نتیجه افزایش تنش روباره، شکستگی‌ها عمدتاً بسته شده و تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای نسبت به آن‌ها کم می‌شود. به همین دلیل شناسایی اثر این سیستم‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی به وسیله داده‌های حاصل از نمودارگیری پتروفیزیکی بسیار مشکل می‌باشد. در نتیجه در تفسیرهای مبتنی بر این داده‌ها ممکن است خطاهایی به وجود آید.

شکل ۴-۱۴ مدل یک‌بعدی ساخته شده برای چاه ۲۴ را که چاهی ریزشی و بسیار ناپایدار است، نشان می‌دهد. نتایج حاصل از معیار موهر کلمب تقریباً در تمامی اعماق نشان دهنده ناپایداری دیواره چاه یا به عبارتی دیگر گسیختگی دیواره چاه می‌باشد. در حالی که دو معیارهای شکست دیگر در بیشتر موارد وضعیت دیواره این را چاه پایدار پیش‌بینی کرده‌اند. این تطابق میان نتایج حاصل از معیار شکست موهر کلمب در سایر مدل‌های یک‌بعدی ساخته شده برای چاه‌های مورد مطالعه به وضوح قابل مشاهده است. در تعیین پنجره ایمن گل، علاوه بر فشار گل بحرانی برای ایجاد گسیختگی برشی، فشار گل بحرانی برای ایجاد گسیختگی‌های کششی و تنش افقی حداقل نیز باید محاسبه شوند. فشار سیال حفاری استفاده شده در حفاری چاه‌های مخزن آسماری، تقریباً برابر و یا مقداری بیشتر از فشار منفذی انتخاب می‌گردد. در واقع به دلیل مقاوم بودن سنگ‌های تشکیل دهنده مخزن آسماری، فشار گل بیشتر به منظور کنترل جریان سیال مخزنی استفاده می‌شود. هر چند که این فشار ممکن است باعث گسیختگی‌هایی در دیواره چاه شود، اما این گسیختگی‌ها محدود بوده و گسترش چندانی وسیعی ندارند. در گزارشات حفاری به وجود آثاری از سیال مخزنی در گل بازگشتی از چاه‌های مورد مطالعه اشاره نشده است. این موضوع نشان می‌دهد که فشار گل استفاده شده از فشار منفذی نیز بیشتر بوده و در نتیجه برای ممانعت از جریان سیال مخزنی هم مناسب می‌باشد.

یکی از کاربردهای سیال حفاری کنترل پایداری دیواره چاه است که دستیابی به این هدف با تغییر فشار و وزن سیال امکان‌پذیر است. با توجه به این که فشار سیال استفاده شده برای حفاری بسیاری از چاه‌های مخزن آسماری میدان لالی پایین و نزدیک به فشار گل بحرانی می‌باشد، با تغییرات اندکی، این

فشار از بازه پنجره ایمن گل خارج شده و وضعیت دیواره چاه به حالت گسیختگی نزدیک می‌شود. عامل موثر دیگر در ایجاد گسیختگی، فشارهای موجی^۱ و مکشی^۲ می‌باشند. فشار موجی در اثر پایین فرستادن رشته حفاری در چاه و حرکت سیال حفاری به طرف بالا و در نتیجه افزایش فشار کف چاه به وجود می‌آید. فشار مکشی عکس این حالت را دارد. اگر فشار موجی زیاد باشد باعث ایجاد شکستگی های کششی القایی و افزایش فشار مکشی باعث شکستگی برشی می‌شود. برخورد رشته حفاری با دیواره چاه باعث افزایش تنش به صورت موضعی می‌شود. به طور حتم این افزایش تنش می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ایجاد گسیختگی داشته باشد. اما این اثر قابل ثبت شدن توسط ابزارهای نمودارگیری پتروفیزیکی نمی‌باشد و فقط توسط نمودارهای تصویری قابل تشخیص است. شرایط تنش در مدل‌های بدست آمده به صورت گسل معکوس است که در برخی موارد به صورت گسل امتداد لغز تغییر می‌کند. این حالت تنش با شرایط تنش در میدان لالی کاملاً مطابقت دارد. با در نظر گرفتن راستای تنش‌های افقی در میدان لالی می‌توان وضعیت تنش‌های بدست آمده را به خوبی توجیه نمود.

۴- ۱۳ جمع‌بندی

در این فصل پس از معرفی میدان لالی و چاه‌های مورد مطالعه، مراحل و نحوه تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی تشریح شد. سپس مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از معیارهای شکست سنگ ساخته شده و وزن ایمن گل حفاری تخمین زده شد. پردازش داده‌های ورودی، تخمین سرعت موج برشی، محاسبه خواص الاستیک و مقاومتی سنگ، تخمین فشار منفذی و در نهایت تعیین وضعیت تنش میدان از جمله مراحل بود که در این فصل برای ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی انجام شد. نتایج بدست آمده را می‌توان به این ترتیب مطرح نمود:

^۱ Surge

^۲ Swab

- با مقایسه هر سه معیار شکست با شرایط واقعی و نتایج ارائه شده در گزارش مناطق نفت خیز جنوب، معیار موهر کلمب نمایش درست تری از شرایط چاه های مورد مطالعه ارائه می دهند.
- علت عدم همخوانی میان نتایج مدل های یک بعدی با شرایط واقعی در برخی از عمق ها را می توان ناشی از خطاهای برداشتی و یا نبود آزمایش های دقیق تر مکانیک سنگی دانست.
- شرایط تنش در مدل های بدست آمده به صورت گسل معکوس است که در برخی موارد به صورت گسل امتداد لغز تغییر می کند. این حالت تنش با شرایط تنش در میدان لالی کاملاً مطابقت دارد.
- فشارهای موجی و مکشی می توان جزو عوامل موثر در ایجاد گسیختگی در دیواره چاه ها دانست. زیرا اگر فشار موجی زیاد باشد باعث ایجاد شکستگی های کششی القایی و افزایش فشار مکشی باعث شکستگی برشی می شود.
- بر اساس بررسی ناپایداری های مشاهده شده در نگارهای تصویری برخی چاه ها، راستای جهت تنش افقی حداکثر و حداقل در میدان لالی به ترتیب N040E و N310W بدست آمد.
- نتایج بدست آمده از مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی در چاه های مورد مطالعه با نتایج واقعی مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد مدلسازی انجام شده انطباق قابل قبولی با واقعیت را داراست.

فصل ۵: ارزیابی پایداری چاه و تعیین وزن کل بر اساس مدل ژئوکانیکی سه بعدی

۵- ۱ مقدمه

تاکنون تلاش‌های زیادی برای شناخت دقیق مخزن و آگاهی از تغییرات خصوصیات آن در راستاهای مختلف، صورت پذیرفته است، اما وجود خاصیت ناهمسانگردی، ناهمگنی و عوامل متعددی که یکپارچگی محیط‌های سنگی را از بین می‌برند، منجر به پیچیده‌تر شدن فرآیند بررسی رفتار سنگ در آن‌ها شده است. شناخت هر چه بیشتر مخزن و پیش‌بینی عملکرد آن، جهت برنامه‌ریزی دقیق، توسعه و بهره‌برداری از میدان امری اجتناب ناپذیر است. مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی یک ابزار موفق برای درک عمیق و صحیح محیط‌های سنگی است. در این فصل پس از توسعه مدل سه‌بعدی برای بخشی از مخزن آسماری میدان لالی، ناهمسانگردی توزیع تنش و ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه مورد نظر ارزیابی می‌شوند تا به کمک آن‌ها وزن مناسب گل حفاری با کمترین مشکلات تعیین گردد. در این فصل پس از معرفی نرم‌افزار پترل، نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری در بخشی از مخزن آسماری میدان لالی توضیح داده شده است. در پایان این فصل پایداری چاه‌ها و میزان ریسک حفاری در بخش مورد مطالعه میدان بر اساس مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت بر اساس نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی، راستای مناسب جهت حفر چاه در مخزن آسماری میدان لالی مشخص می‌گردد.

۵- ۲ زمین آمار

با توجه به اطلاعات کم از مخزن، همواره مهندسان مخازن در پی یافتن روشی برای تخمین توزیع پارامترهای مورد مطالعه در مخزن بوده‌اند. مدل‌سازی زمین آماری یکی از روش‌های پیچیده در مخازن است که به دلیل تمایل برای درک بهتر از ساختار مخزنی، ایجاد مدل‌های واقع بینانه‌تر و در نهایت بهبود و مدیریت سرمایه و طرح توسعه میدان، به عنوان یک گزینه مطلوب مورد استفاده شرکت‌ها قرار گرفته است. صنعت نفت و گاز از منابعی است که علم زمین آمار با سرعت بسیاری در آن فراگیر شده و رشد وسیعی داشته است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲).

در تحلیل‌های زمین آماری، علاوه بر کمیت، بین فاصله و جهت قرارگیری نمونه‌ها نسبت به هم ارتباط فضایی برقرار می‌شود. این ارتباط بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه‌های برداشت شده، در قالب های ریاضی که ساختار فضایی نامیده می‌شوند، قابل تعریف است. همچنین در زمین آمار تنها به بررسی متغیرهایی پرداخته می‌شود که دارای ساختار فضایی هستند (حسنی‌پاک، ۱۳۹۲). داده‌های پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی، داده‌هایی هستند که در فضای مخزن از خود ساختار فضایی نشان می‌دهند. بنابراین، ابتدا باید وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها مشخص شده و سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها انجام گیرد. البته ممکن است نمونه‌های مجاور تا فاصله ای معین در قالب ساختار فضایی به هم وابسته باشند. بنابراین در زمین آمار می‌توان با استفاده از داده‌های یک کمیت در مختصات معلوم، مقدار همان کمیت را در نقطه‌ای با مختصات معلوم دیگر واقع در درون دامنه‌ای که ساختار فضایی حاکم است، برآورد کرد (حسنی‌پاک، ۱۳۹۲). کاربرد زمین آمار به دلیل این که امکان ارائه کمیت خطا، عدم قطعیت و نتایج مطلوب زیرسطحی و در نهایت ایجاد یک مدل دقیق‌تر و واقع بینانه‌تر را دارد، به عنوان یکی از گزینه‌های برتر در مدلسازی مخازن مطرح است.

۵-۳ معرفی نرم‌افزار پترل

در این پژوهش جهت مدلسازی سه‌بعدی مخزن از نرم‌افزار پترل که یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای صنایع بالادستی نفت می‌باشد، استفاده شده است. پترل یکی از نرم‌افزارهای توانا برای تفسیر و مدل‌سازی ساختارهای زمین است که توسط شرکت شلومبرژر به عنوان نرم‌افزاری تجاری به دنیای صنعت نفت معرفی شده است. اولین نسخه نرم‌افزار پترل توسط شرکت شلومبرژر در سال ۲۰۰۳ به بازار عرضه شد (Schlumberger, 2009). پترل تمام امکانات لازم برای شروع از تفسیر لرزه‌ای تا شبیه‌سازی سه‌بعدی را در قالب یک بسته نرم‌افزاری فراهم آورده و به همین دلیل مورد توجه زمین‌شناسان و مهندسين نفت قرار گرفته است. قابلیت‌های این نرم‌افزار به حدی وسیع است که می‌تواند از مراحل اکتشاف تا تولید مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو پترل، به نوعی جامع‌ترین نرم‌افزار

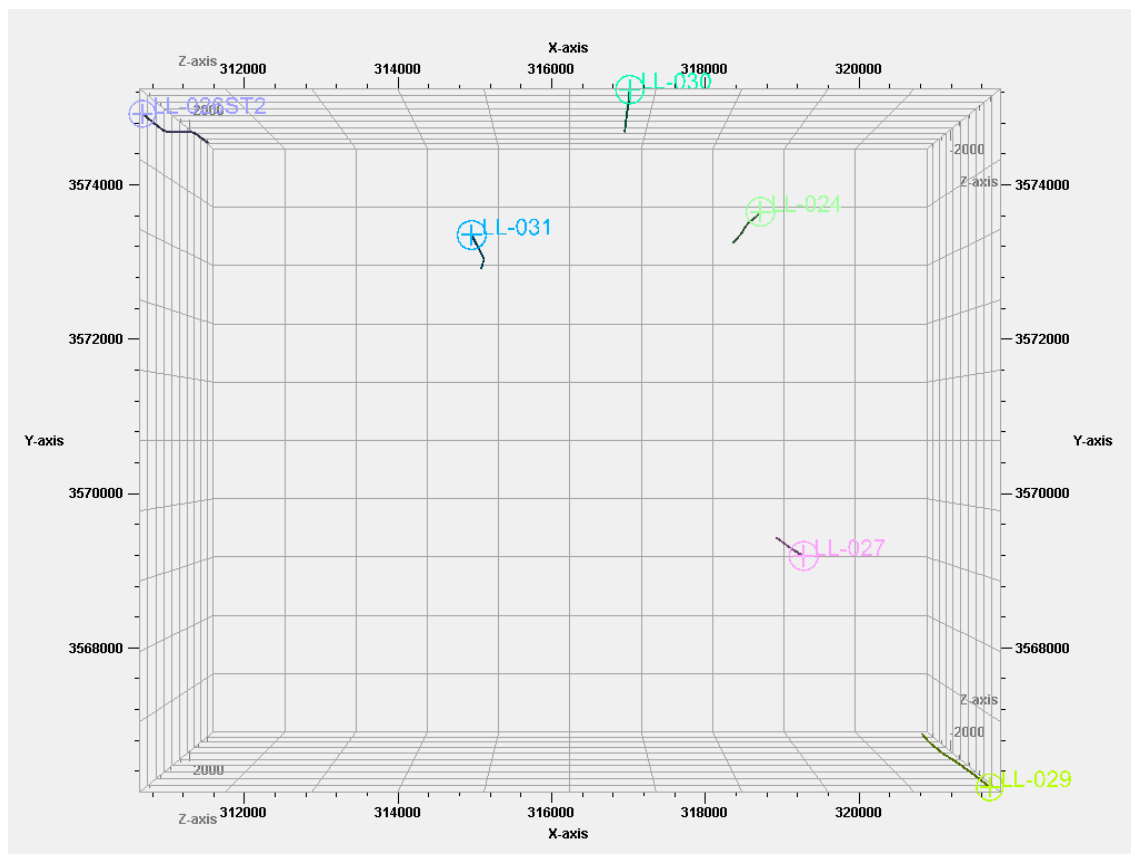
صنعتی و تخصصی مهندسی نفت می‌باشد. برخی از کاربردهای نرم‌افزار پترل به اختصار در ادامه ذکر شده است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶):

۱. مدل‌سازی زمین‌شناسی مخزن
 ۲. تفسیر داده‌های لرزه‌نگاری دوبعدی و سه‌بعدی و تولید نشانگر لرزه‌ای
 ۳. آنالیز زمین‌آماري و مدل‌سازی خصوصیات استاتیک مخازن نفت و گاز
 ۴. مدل‌سازی دینامیکی مخزن و تطابق تاریخچه و پیش‌بینی تولید
 ۵. مدل‌سازی شبکه شکاف‌ها
 ۶. طراحی و تکمیل چاه بر اساس اطلاعات تکمیل چاه
 ۷. مدل‌سازی سه‌بعدی پارامترهای ژئومکانیکی و پیش‌بینی تغییر سایر پارامترهای ژئومکانیکی در اثر تولید و تزریق در مخزن
- همچنین فرآیند مدل‌سازی در این نرم‌افزار را می‌توان در چهار مرحله اصلی خلاصه نمود که عبارتند از:
۱. بارگذاری داده‌های ورودی و کنترل کیفیت آن‌ها
 ۲. مدل‌سازی ساختاری
 ۳. مدل‌سازی خواص
 ۴. محاسبات حجمی
- با توجه به برتری‌های پترل نسبت به سایر نرم‌افزارهای دیگر، از آن برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در این پژوهش استفاده شده است. در ادامه روش ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در میدان لالی با این نرم‌افزار شرح داده می‌شود.

۵-۴ وارد کردن داده‌های اولیه

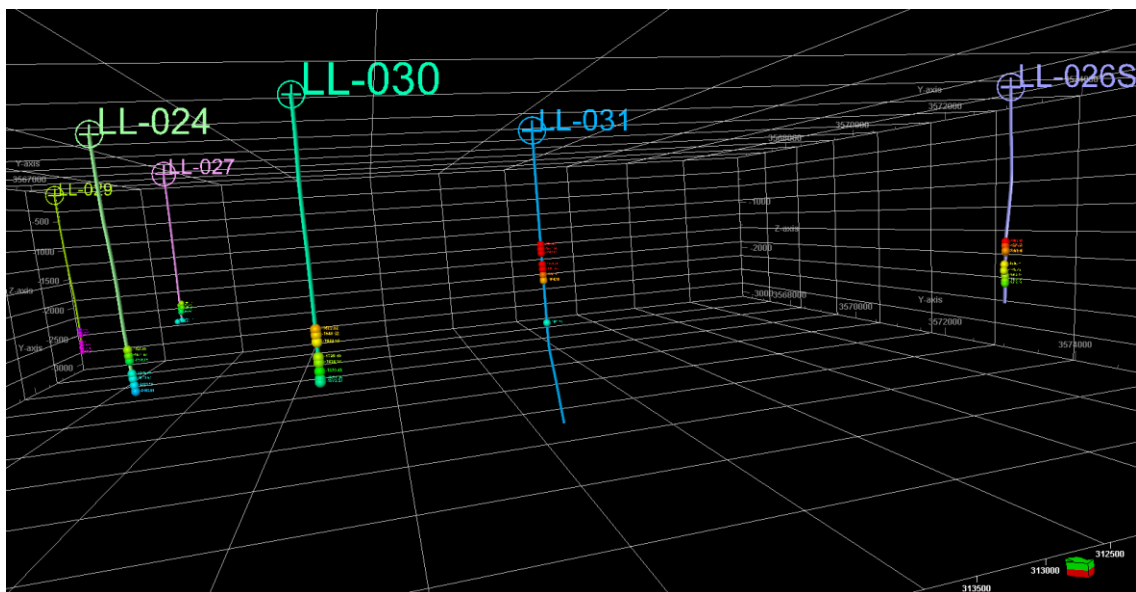
وارد کردن داده‌ها اولین مرحله در ایجاد یک مدل سه‌بعدی از مخزن می‌باشد. در این بخش برای ساخت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، از مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی ساخته شده به همراه مجموعه‌ای از داده

های زمین‌شناسی استفاده شده است. این داده‌ها شامل گسل‌های موجود در میدان، سطوح لایه‌بندی مخزن، داده مسیر و انحراف چاه، نگارهای پتروفیزیکی، نقشه‌های UGC مخزن (نقشه‌های خطوط هم تراز زیرزمینی) و محل تقاطع چاه با سازندهای مختلف می‌باشد. پس از ورود داده‌ها، ابتدا مسیر حفاری چاه‌ها و محل برخورد آن‌ها با لایه‌های زمین‌شناسی در فضای سه‌بعدی مشخص شد. در شکل ۱-۵ موقعیت مکانی چاه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر در میدان لالی مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۵ موقعیت مکانی چاه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر در میدان لالی

همچنین شکل ۱-۵ مسیر حفاری چاه‌های مورد مطالعه و محل برخورد آن‌ها با لایه‌های زمین‌شناسی در میدان لالی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مسیر حفاری همه چاه‌های مورد مطالعه در میدان لالی تقریباً عمودی می‌باشد.

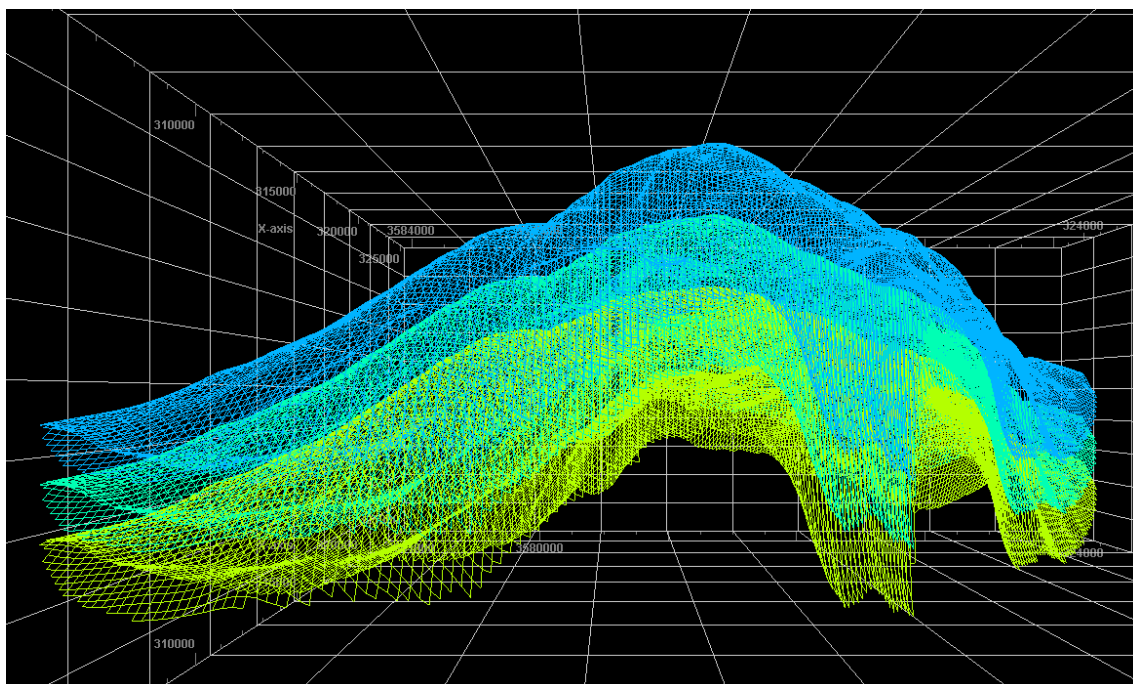


شکل ۲-۵ مسیر حفاری و محل برخورد چاه‌های مورد مطالعه با لایه‌های زمین‌شناسی در میدان لالی

پس از مشخص شدن مسیر حفاری چاه‌ها، خواص پتروفیزیکی و مقاومتی که در فرآیند مدلسازی ژئومکانیکی یک‌بعدی بدست آمدند، در راستای حفاری چاه‌ها به نرم‌افزار معرفی می‌شوند.

۵- ساخت مدل ساختاری و شبکه‌بندی

مدل ساختاری یا زمین‌شناسی به عنوان چهارچوب سه‌بعدی مدل شناخته می‌شود. برای ایجاد مدل ساختاری در نرم‌افزار پترل، ابتدا یک شبکه سلول‌بندی شده متناسب با ابعاد میدان ایجاد می‌شود (شکل ۵-۳). عواملی مانند وجود گسل و ناهمسانگردی، مهم‌ترین عوامل موثر در انتخاب نوع شبکه (منظم و یا گوشه ای) می‌باشند. این شبکه با ایجاد سه لایه سلول‌بندی شده در افق‌های بالا، میانی و پایین مخزن، قالب اصلی مدل زمین‌شناسی را تشکیل می‌دهد. این لایه‌ها تمام ابعاد مخزن را پوشش می‌دهند و امکان تلفیق و بررسی همزمان و گسترش داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی را به منظور ساخت مدل‌های واقع گرایانه در طول تمام مدل فراهم می‌سازند. ابعاد و مرزهای این لایه‌ها بر اساس نقشه UGC میدان لالی مشخص شده است.

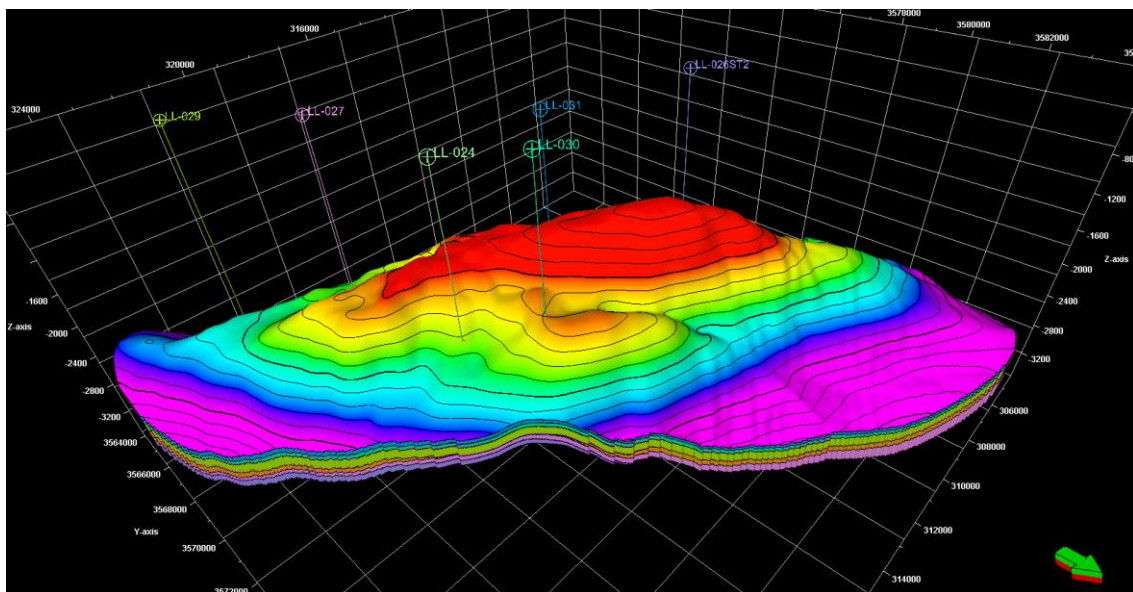


شکل ۵-۳ هندسه مدل ساختاری میدان لالی

پس از ساخت هندسه مدل با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی مربوط به سازندها آسماری میدان لالی، سطوح لایه‌بندی زمین‌شناسی بر روی هندسه مدل اعمال می‌شود و مدل سه‌بعدی ساختاری ایجاد می‌گردد. در این مرحله مخزن به یک شبکه سلول‌بندی شده تقسیم می‌شود. در فرآیند شبکه‌بندی باید مخزن مورد نظر را به بخش‌های کوچک‌تری به نام سلول تقسیم‌بندی کرد که جهت توصیف خصوصیات و ویژگی‌های سطح مورد نظر استفاده می‌شود. به این صورت، هر سلول بازگوکننده مشخصات فیزیکی و شیمیایی بخشی از محیط مخزن می‌باشد که سایر سلول‌ها متفاوت است. بدین ترتیب تمامی خواص سلول‌های ایجاد شده از جمله خواص پتروفیزیکی و ژئومکانیکی در تمام حجم آن یکسان است و با توجه به پراکندگی و حجم داده‌ها از یکدیگر، می‌توان خواص مشابه موجود در سلول‌های فاقد اطلاعات را تخمین زد. بدیهی است که هر چه میزان این اطلاعات بیشتر باشد، تخمین‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. اندازه هر کدام از این سلول‌ها باید متناسب با شرایط سخت‌افزاری و اهداف مدلسازی انتخاب شوند، اگر ابعاد سلول‌ها بزرگ انتخاب شوند نتیجه مطلوبی بدست نمی‌آید و در صورت کوچک بودن ابعاد، مدت اجرای برنامه بسیار طولانی و زمان‌بر خواهد بود (کیانی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به اهمیت ابعاد شبکه در تعیین صحت و دقت مدل‌های خروجی، چندین مدل با ثابت نگه داشتن سایر

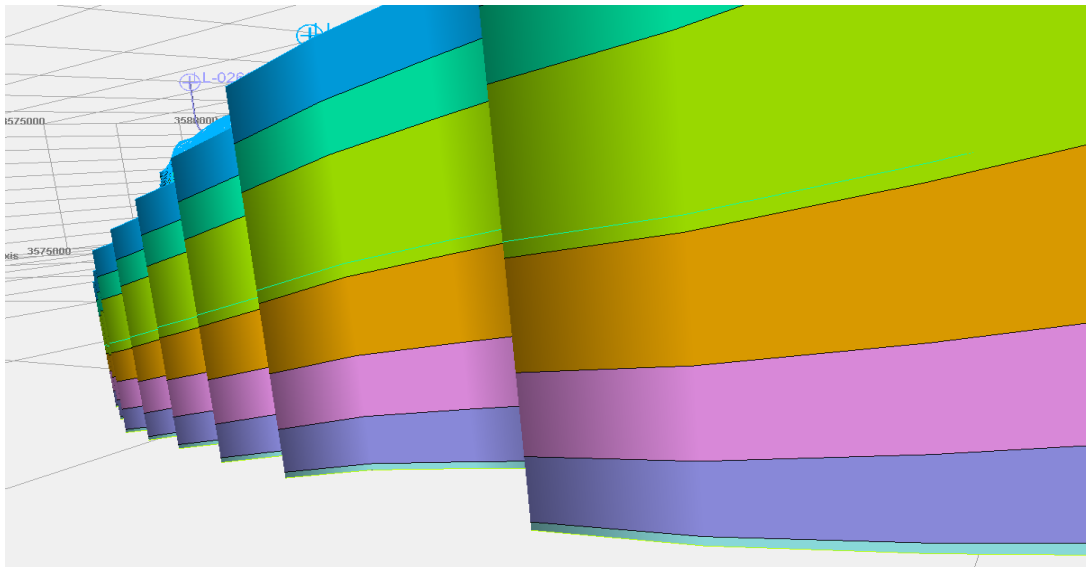
پارامترها به ابعاد 25×25 ، 50×50 و 100×100 ساخته شد.

در این مرحله تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان مدل‌ها از نظر دقت و صحت خروجی‌ها مشاهده نگردید، اما زمان مدل‌سازی به صورت چشم‌گیری افزایش یافت. بنابراین ابعاد مدل برای مخزن آسماری میدان لالی در سطح افقی در راستای X و Y میدان 100×100 انتخاب گردید و در کل تعداد سلول‌های مخزن 47551185 شد. تفکیک قائم (ارتفاع سلول‌ها)، عامل اصلی دیگری در تعیین ابعاد شبکه می‌باشد. بنابراین چندین مدل با تفکیک قائم 15 ، 50 ، 100 ، 125 ، 200 و 500 سانتی‌متر ساخته شد. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های با ارتفاع متفاوت برای سلول‌ها، شبکه با ابعاد 100×100 و ارتفاع سلول 1 متر، به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تخمین پارامترهای مورد مطالعه انتخاب شد. ضخامت سازند آسماری در تاق‌دیس لالی 376.5 متر می‌باشد. شکل ۴-۵ نمایی از تاق‌دیس سازند آسماری و چاه‌های مدل‌سازی شده در مخزن را نشان می‌دهد.

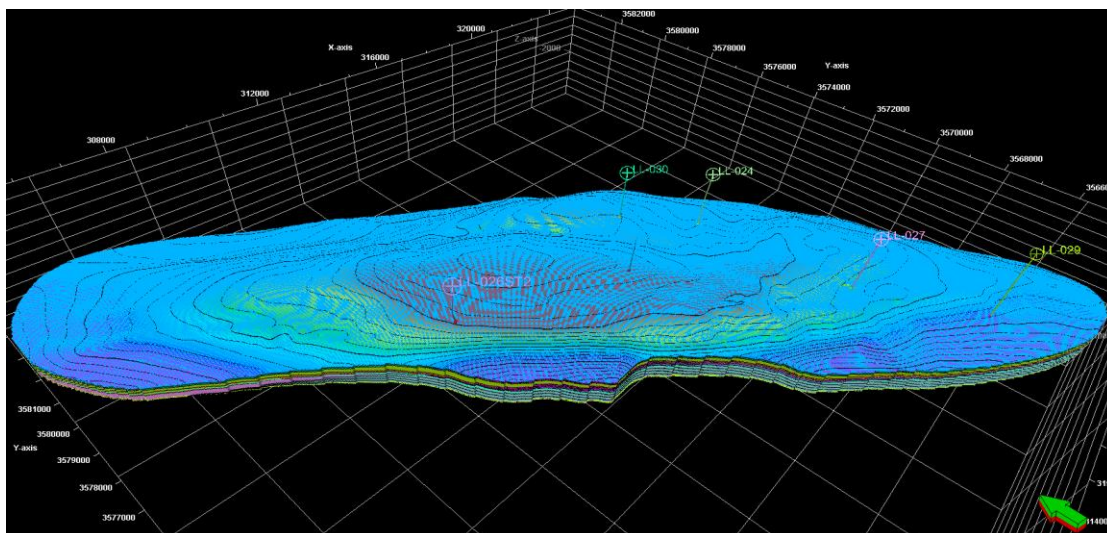


شکل ۴-۵ نمایی از تاق‌دیس آسماری و برخی از چاه‌های میدان

همچنین در شکل ۵-۵ نمایی از لایه‌بندی انجام شده در مدل ساختاری، دیده می‌شود. در این شکل، ۷ لایه به رنگ‌های مختلف مشخص شده است. لایه آبی رنگ از بالا، زون اول آسماری و لایه سبز رنگ، زون دوم آسماری است. پنج لایه بعدی به ترتیب زون سوم، چهارم، پنجم، ششم و هفتم آسماری را تشکیل می‌دهند. لایه‌بندی انجام شده بر اساس داده‌های ژئوفیزیکی و چاه‌پیمایی بدست آمده انجام شده است.



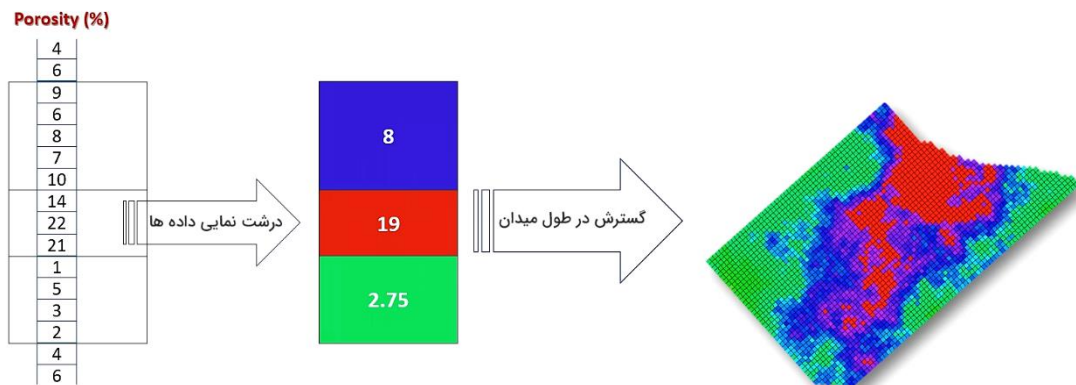
شکل ۵-۵ لایه‌بندی انجام شده در مدل‌سازی مخزن آسماری میدان لالی
در شکل ۵-۶ مدل ساختاری نهایی و شبکه‌بندی آن دیده می‌شود. پس از ساخت مدل ساختاری، باید داده‌های بدست آمده از مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی درشت‌نمایی شوند.



شکل ۵-۶ مدل ساختاری مخزن آسماری میدان لالی

۵-۶ درشت‌نمایی داده‌ها در مدل ساخته شده

به منظور توسعه و گسترش داده‌ها در طول میدان، باید مقیاس داده‌های بدست آمده در راستای چاه‌های مورد مطالعه بزرگ‌تر شوند. درشت‌نمایی، عمل نسبت دادن مقادیر قرائت شده نگارها به سلول‌هایی از شبکه است که اطلاعات آن‌ها در دسترس است. به این فرآیند درشت‌نمایی یا بزرگ مقیاس کردن داده‌ها می‌گویند. سپس داده‌ها درشت‌نمایی شده پس از پردازش و ارزیابی، آماده تبدیل به یک مدل سه‌بعدی می‌باشند. شکل ۵-۷ فرآیند درشت‌نمایی و گسترش داده‌ها را در میدان نشان می‌دهد.



شکل ۵-۷ فرآیند درشت‌نمایی و گسترش داده‌ها در طول میدان

با توجه به این که قرائت داده‌ها از نگارها در فواصل ۱۵ سانتی‌متری انجام می‌شود، لذا درشت‌نمایی آن‌ها برای توزیع هر کدام در هریک از سلول‌های شبکه به منظور استفاده در مدلسازی و تعمیم این خواص به کل شبکه سلول‌بندی شده، لازم می‌باشد. از آنجایی که هر سلول تنها قادر است یک مقدار را برای هر ویژگی و خصوصیت داشته باشد، مقادیر نگارها باید میانگین‌گیری شوند. این فرآیند در نرم‌افزار پترل به صورت اتوماتیک می‌باشد. برای درشت‌نمایی مقادیر برداشت شده از نگارها، نرم‌افزار پترل ابتدا سلول‌های سه‌بعدی که چاه از آن‌ها می‌گذرد را شناسایی می‌کند. سپس برای هر سلول شبکه بر اساس الگوریتم انتخاب شده، میانگین‌گیری بر روی مقادیر ورودی سلول، صورت می‌گیرد. معمولاً در پترل برای میانگین‌گیری از سه روش عددی، هارمونیک و هندسی استفاده می‌شود که در ادامه شیوه عملکرد هر یک از آن‌ها به طور مختصر شرح داده شده است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶).

۵-۶-۱ میانگین عددی

میانگین عددی عبارت است از مجموع مقادیر موجود در یک مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آن‌ها.

فرمول روش میانگین‌گیری عددی به صورت رابطه زیر می‌باشد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶):

$$K_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \quad (۱-۵)$$

در این رابطه K_A میانگین پارامتر K ، K_i مقدار پارامتر K در موقعیت i و N تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

۵-۶-۲ میانگین هارمونیک

میانگین هارمونیک نوعی سنجش گرایش به مرکز است و معمولاً هنگامی کاربرد دارد که محاسبه

میانگین نرخ‌ها اهمیت داشته باشد. در موارد خاص، بخصوص مواردی که شامل نرخ‌ها و نسبت‌ها است،

میانگین هارمونیک صحیح‌ترین مقدار میانگین را محاسبه می‌کند (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶).

۵-۶-۳ میانگین هندسی

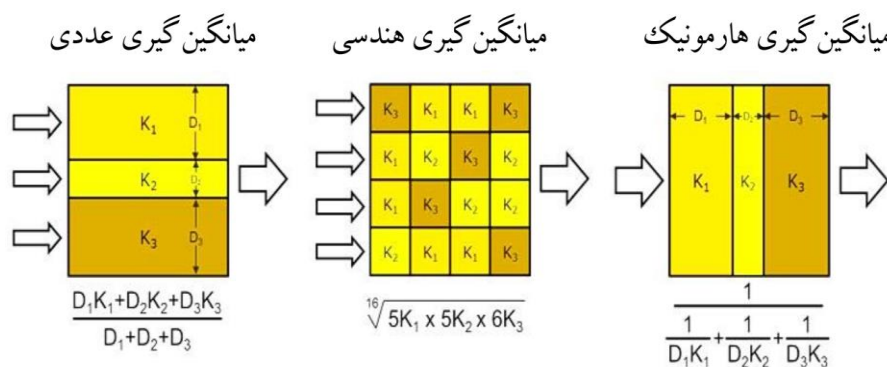
میانگین هندسی در ریاضیات، برابر است با ریشه Π ام از حاصل ضرب Π متغیر. از میانگین هندسی

هنگامی استفاده می‌شود که هر آیتام و مورد دارای ویژگی چندگانه و متعدد است و هر کدام طیف‌های

گوناگون عددی را دارا باشند. اگر اعداد به صورت درصد یا به صورت نسبت باشد، آنگاه از میانگین هندسی

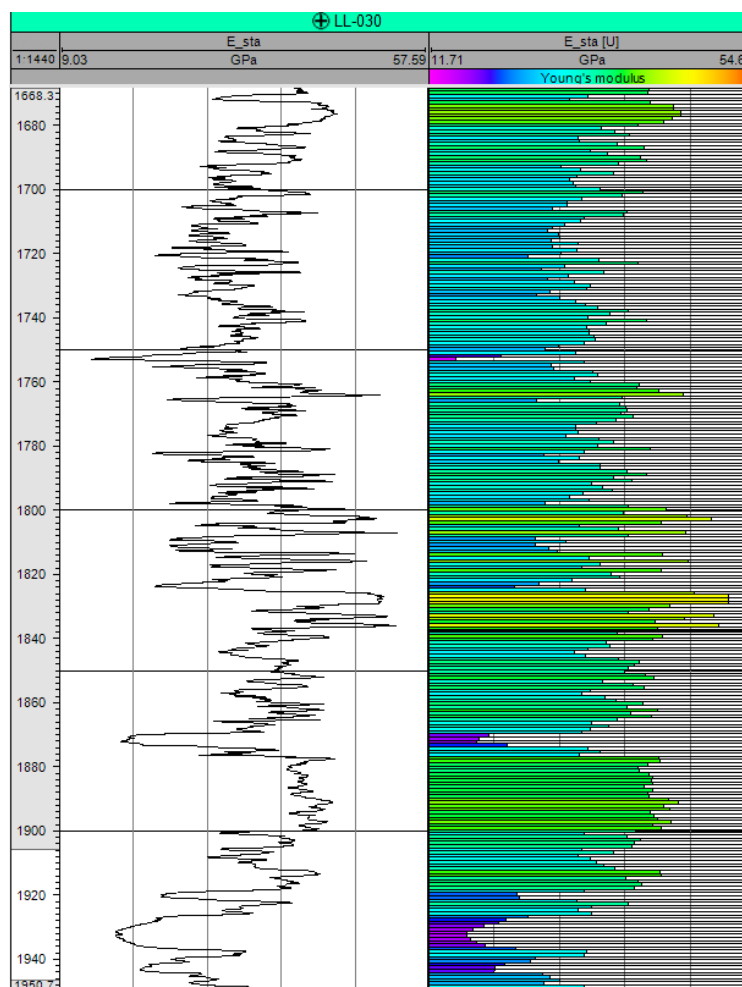
استفاده می‌شود. در شکل ۵-۸ شیوه محاسبه میانگین در هر یک از روش‌های میانگین‌گیری در پترل

نشان داده شده است (Mitchell et al. 2004).



شکل ۵-۸ روش‌های میانگین‌گیری (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۶)

با توجه به اینکه ارتفاع شبکه‌بندی در مدل ساخته‌شده به طور میانگین یک متر بوده و فواصل قرائت نگارها ۱۵ سانتی‌متر است، در هر سلول شبکه ۶ مقدار داده قرار می‌گیرد. از طرفی در حالت کلی تغییرات نگارها در یک متر از چاه به صورت زیادی تغییر نمی‌کند. برای ارزیابی و تایید صحت این موضوع داده‌های درشت‌نمایی شده با داده‌های اولیه مقایسه می‌شوند. همانطور که در شکل ۵-۹ مشاهده می‌شود مقدار داده و روند تغییرات آن‌ها پس از درشت‌نمایی حفظ شده است. بنابراین انتخاب روش میانگین عددی تاثیر چندانی در بزرگ‌مقیاس کردن داده‌ها نداشته و روش کارآمدی به نظر می‌رسد.

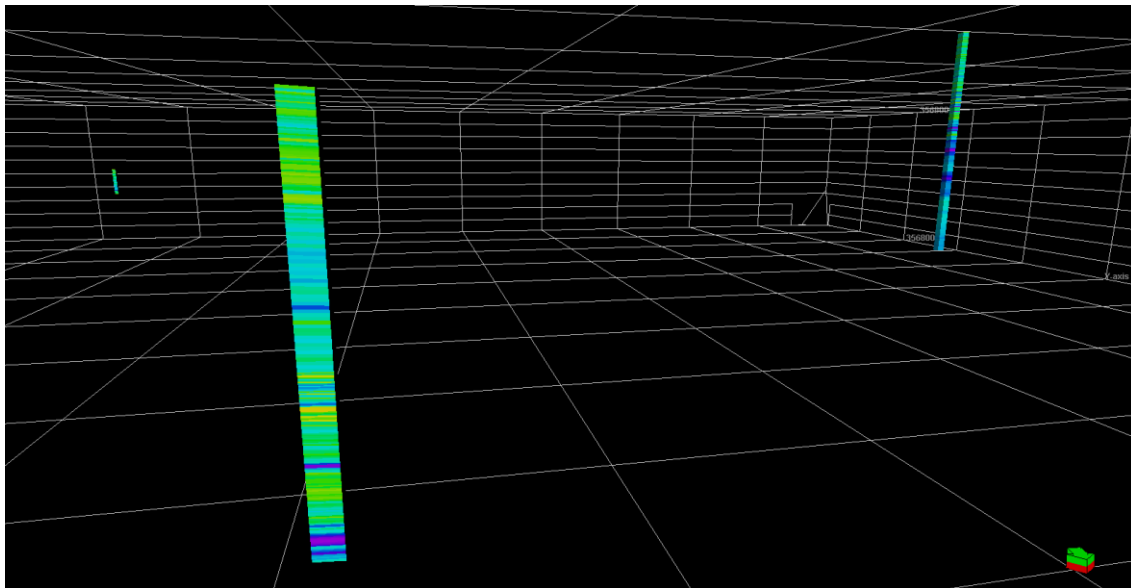


شکل ۵-۹ مقایسه مدول یانگ درشت‌نمایی شده با داده‌های اولیه در چاه ۳۰

بزرگ‌نمایی نگارها به صورت خطی بوده و مقادیر بزرگ‌مقیاس شده در نزدیک‌ترین سلول شبکه‌بندی قرار گرفته‌اند. بنابراین برای درشت‌نمایی داده‌ها در شبکه‌بندی، روش میانگین عددی^۱ انتخاب می‌شود.

^۱ Arithmetic Average Method

در شکل ۵-۱۰ داده مدول یانگ درشت‌نمایی شده در شبکه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰ درشت‌نمایی مدول یانگ در شبکه‌بندی

۵-۷ واریوگرافی و پردازش داده‌ها

پس از درشت‌نمایی داده‌ها، باید ویژگی‌های مورد مطالعه در تمام شبکه‌بندی گسترش یابند. برای این منظور نیاز است تا پیش از هر اقدامی، داده‌های درشت‌نمایی شده در فرآیند واریوگرافی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرند. در مرحله واریوگرافی داده‌ها پردازش شده و واریوگرام‌ها رسم می‌شوند. به این ترتیب منحنی واریوگرام در راستای قائم و دو راستای افقی کوچک و بزرگ برای هر یک از پارامترها تعریف شد. واریوگرام ابزاری برای تحلیل و توصیف تغییرات فضایی یک ویژگی می‌باشد. در واریوگرام این فرض در نظر گرفته می‌شود که نمونه‌های نزدیک به هم تشابه بیشتری نسبت به نمونه‌های دور از هم دارند. در ادامه، به منظور افزایش دقت تخمین و کاهش عدم قطعیت داده‌های درشت‌نمایی شده از نظر داشتن دو ویژگی توزیع نرمال و پایایی در هر زون ارزیابی می‌شوند. پایایی یعنی عدم وجود روندهای احتمالی در داده‌ها که در علوم زمین‌شناسی بدین معناست که اثر تمامی گسل‌ها حذف شده و لایه‌ها به حالت قبل از چین‌خوردگی برگشته و اثرات دیاژنز کنار گذاشته می‌شوند. در این صورت داده‌ها پایایی خواهند داشت. اکثر روش‌های زمین آماری بر فرض نرمال بودن داده تاکید دارند. بنابراین داشتن داده‌هایی که توزیعی نرمال دارند، در حقیقت مجوز کاربرد روش‌های مورد نظر می‌باشد. زیرا استفاده از داده‌های

غیرنرمال در روش‌های مختص داده‌های نرمال، محاسبات زمین آماری را دچار خطای سیستماتیک می‌کند (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین در این مرحله پس از نرمال کردن داده‌های درشت‌نمایی شده، منحنی واریوگرام در سه جهت برآزش و بیضوی ناهمسانگردی ایجاد شد.

۵-۸ روش‌های مدلسازی ویژگی‌ها

زمانی که پردازش داده‌های درشت‌نمایی شده به پایان رسید، هر یک از این داده‌ها در تمامی سلول‌های شبکه‌بندی گسترش می‌یابند و مدلی سه‌بعدی برای هر یک از آن‌ها ساخته می‌شود. نرم‌افزار پترل این قابلیت را فراهم ساخته تا به کمک روش‌های مختلف، داده‌های درشت‌نمایی شده در مدل شبکه‌بندی توسعه یابند. مدلسازی ویژگی‌ها را می‌توان در دو دسته قطعی و احتمالی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول، مدل‌های قطعی می‌باشند که روش کریجینگ را شامل می‌شود. این‌گونه روش‌های تخمین مانند کریجینگ، جزو روش‌های زمین آماری می‌باشند که به ازای هر واریوگرافی، یک خروجی بدست می‌آید. زمانی که اطلاعات ورودی طیف گسترده‌ای از داده‌ها را شامل شود (به عنوان مثال داده‌های لرزه‌نگاری به همراه تعداد زیادی چاه با توجه به وسعت میدان) از روش قطعی استفاده خواهد شد و این روش تنها یک جواب خواهد داشت. از روش‌های احتمالی می‌توان به دو روش شبیه‌سازی گوسی متوالی^۱ و روش شبیه‌سازی تابع تصادفی گوسی^۲ اشاره کرد. در روش‌های شبیه‌سازی، با یک واریوگرافی چندین مدل بدست می‌آید، بدین دلیل از روش‌های شبیه‌سازی، مدل‌های احتمالی حاصل می‌شود (پیامنی و همکاران، ۱۳۹۲).

لازم به ذکر است که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد. مهم‌ترین مسأله در رابطه با مدل‌سازی، امکان تلفیق داده‌ها از منابع مختلف و استفاده از نتایج هر یک از آن‌ها برای رسیدن به نتایج مطلوب است. با یک مدل دقیق و واقع‌گرایانه می‌توان تخمین نسبتاً کاملی از کل مخزن، حتی مکان‌های فاقد اطلاعات، بدست آورد. مدل کردن تمامی جزئیات زیرسطحی با توجه به محدودیت‌هایی

^۱ Sequential Gaussian Simulation

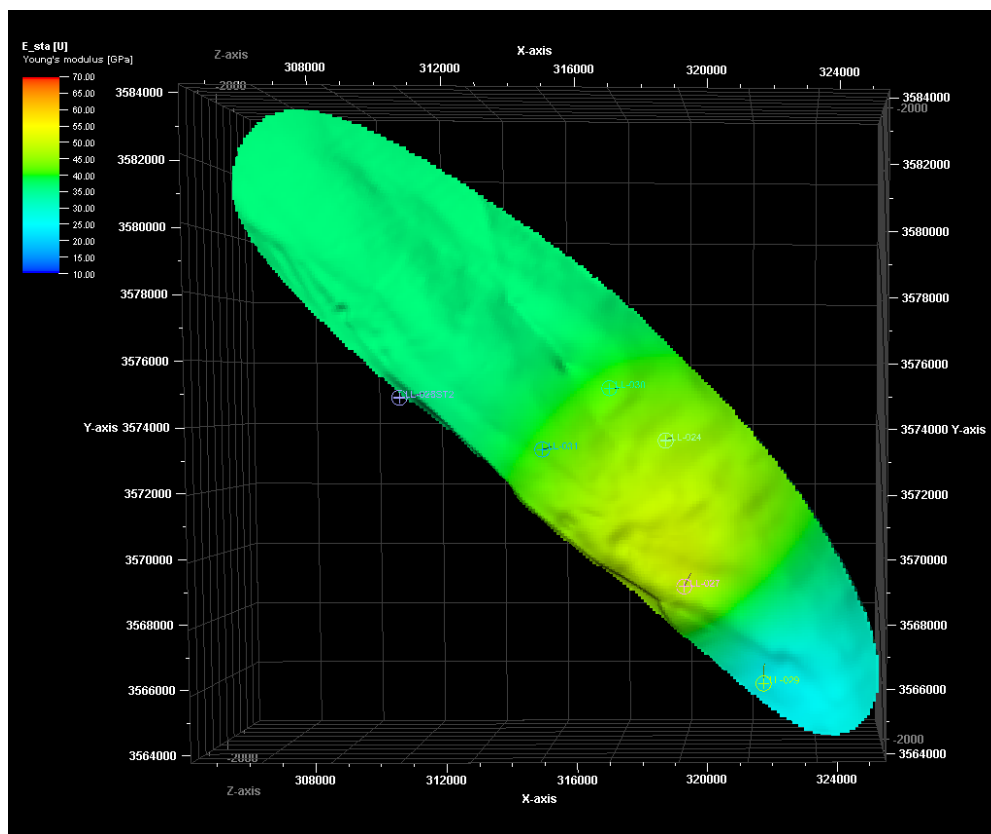
^۲ Gaussian Random Function simulation

که برای دسترسی به اطلاعات وجود دارد، امری بسیار دشوار است. به همین دلیل است که مدل‌های مخزنی فقط می‌توانند بخشی از اسرار زیرسطحی را با اطمینان مشخصی تفسیر کنند. پیچیدگی ساختار زمین، ناهمگنی و اطلاعات غیرمستقیم و غیرکامل بدست آمده از ابزارهای اندازه‌گیری به‌ندرت می‌تواند یک درک و فهم کامل و واقع‌گرایانه از ناهمگنی زیرسطحی را ارائه دهند. بنابراین در مدلسازی، دستیابی به یک مدل کامل و بدون نقص، امکان‌پذیر نیست (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). به منظور انتخاب روش تخمین در میدان لالی مقایسه‌ای میان روش‌های کریجینگ و گوسی متوالی صورت گرفت که در ادامه نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

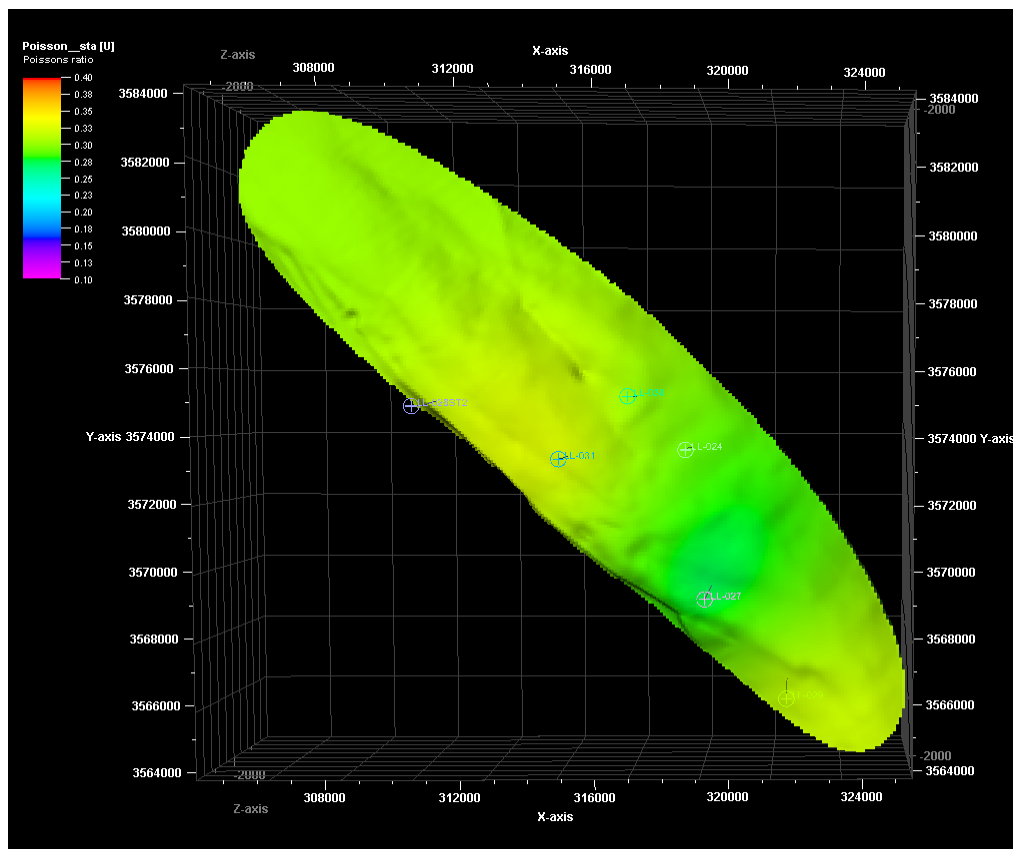
۵-۹ مدلسازی براساس پارامترها ژئومکانیکی

بررسی پراکندگی و موقعیت مکانی چاه‌های مورد مطالعه در میدان نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ساده خطی برای تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی در سایر نقاط میدان معقول به نظر نمی‌رسد. مقایسه و بررسی مدل‌های حاصل از روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی و تخمین به روش کریجینگ نشان داد که هر دو مدل روند تغییرات مشابهی را پیش‌بینی می‌کنند، اما مدل‌های حاصل از روش کریجینگ علی‌رغم کاهش جزییات به دلیل هموارسازی اطلاعات، به مراتب تطابق بیشتری با داده‌های واقعی دارند. نتایج حاصل از این مقایسه را می‌توان در شکل ۵-۲۰ مشاهده نمود.

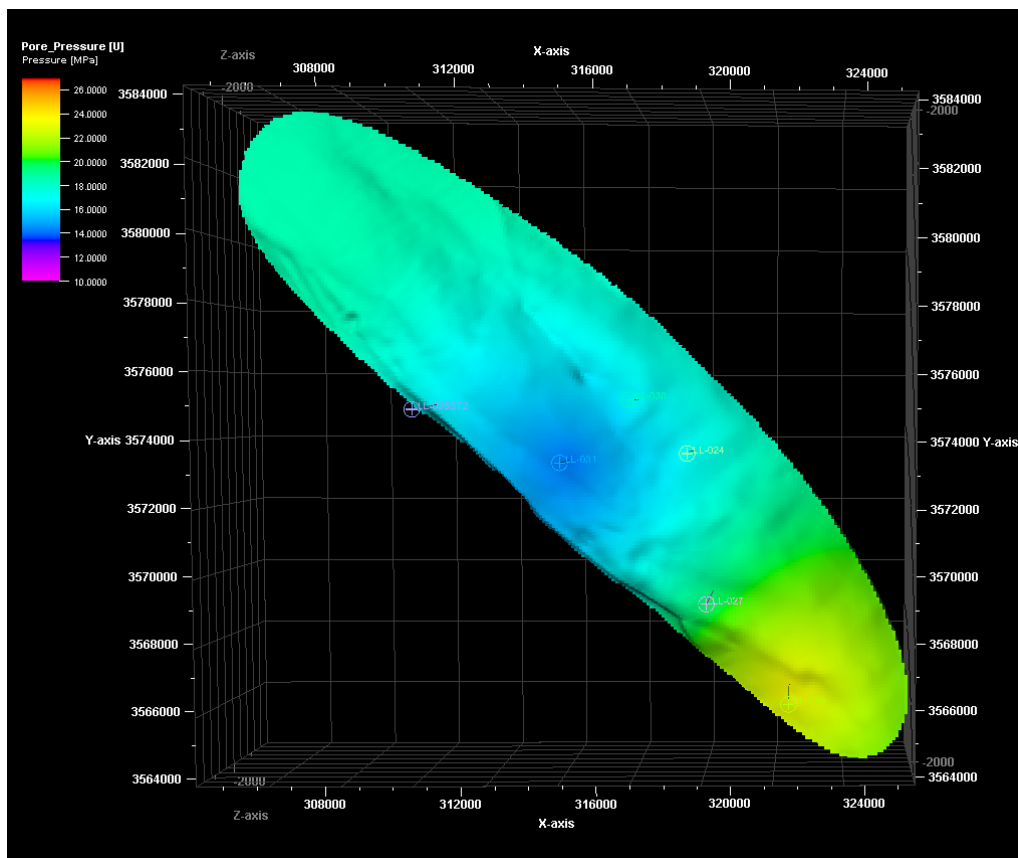
به همین دلیل از بین روش‌های مختلف، روش کریجینگ به عنوان تخمین‌گر پارامترهای ژئومکانیکی در فرآیند مدلسازی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت برای تمامی ویژگی‌های بزرگ مقیاس شده، مدل سه‌بعدی ساخته شد. شکل ۵-۱۱ تا شکل ۵-۱۷ مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده برای ویژگی‌های میدان را نشان می‌دهند.



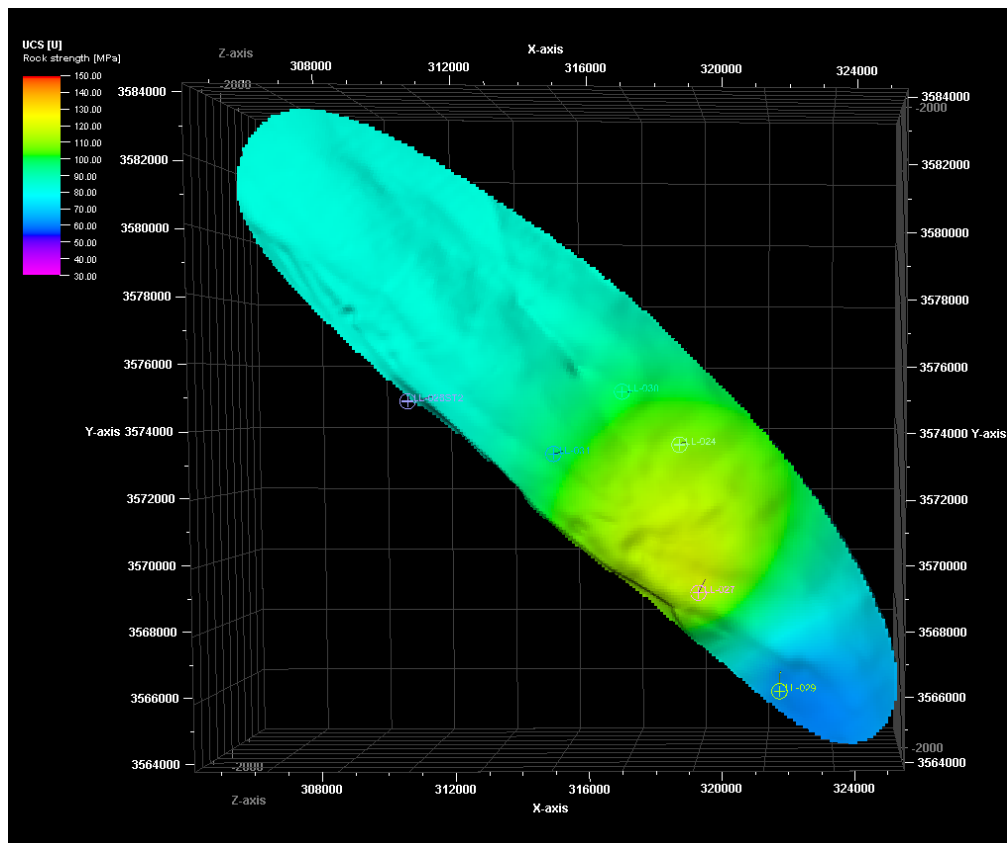
شکل ۵-۱۱ مدل سه بعدی ساخته شده برای مدول یانگ استاتیک (GPa)



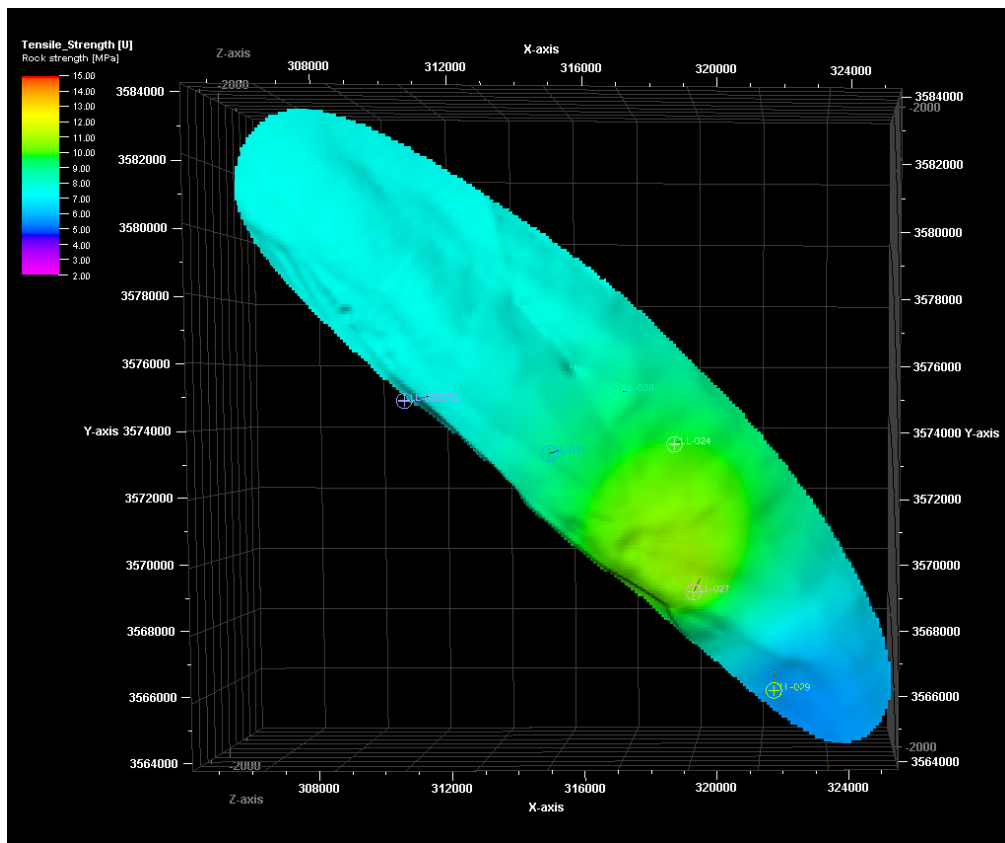
شکل ۵-۱۲ مدل سه بعدی ساخته شده برای نسبت پواسون



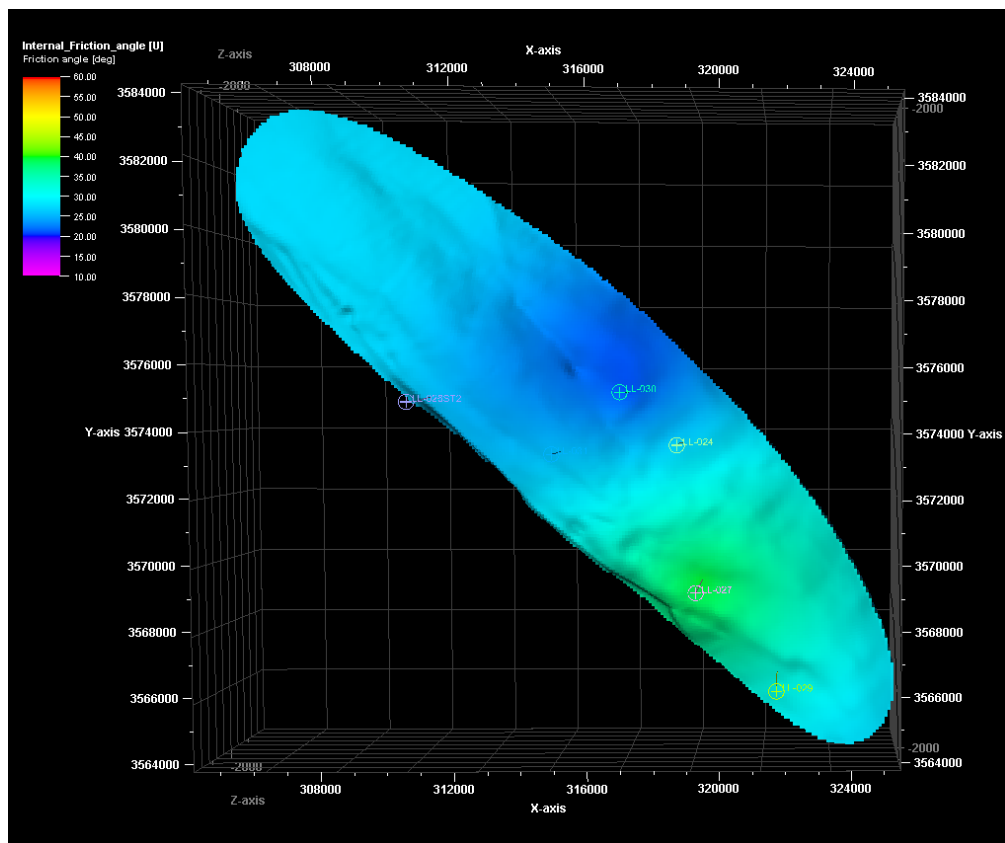
شکل ۱۳-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای فشاری منفذی (Mpa)



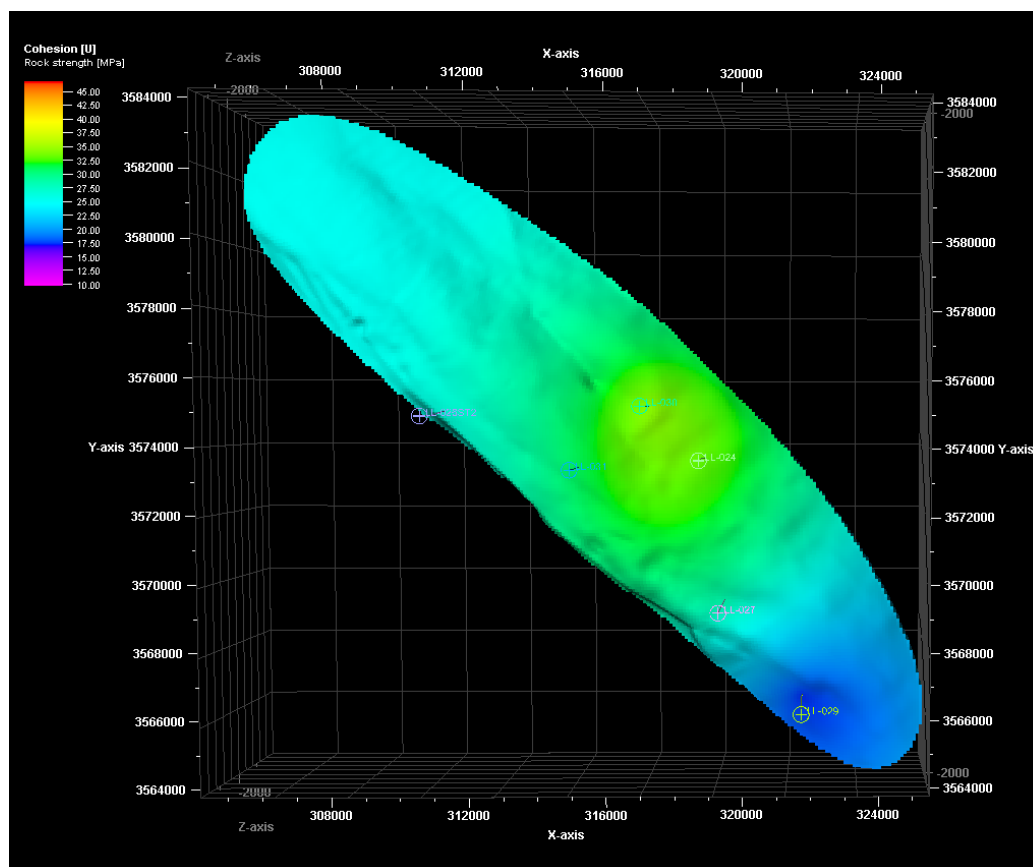
شکل ۱۴-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)



شکل ۵-۱۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای مقاومت کششی (Mpa)

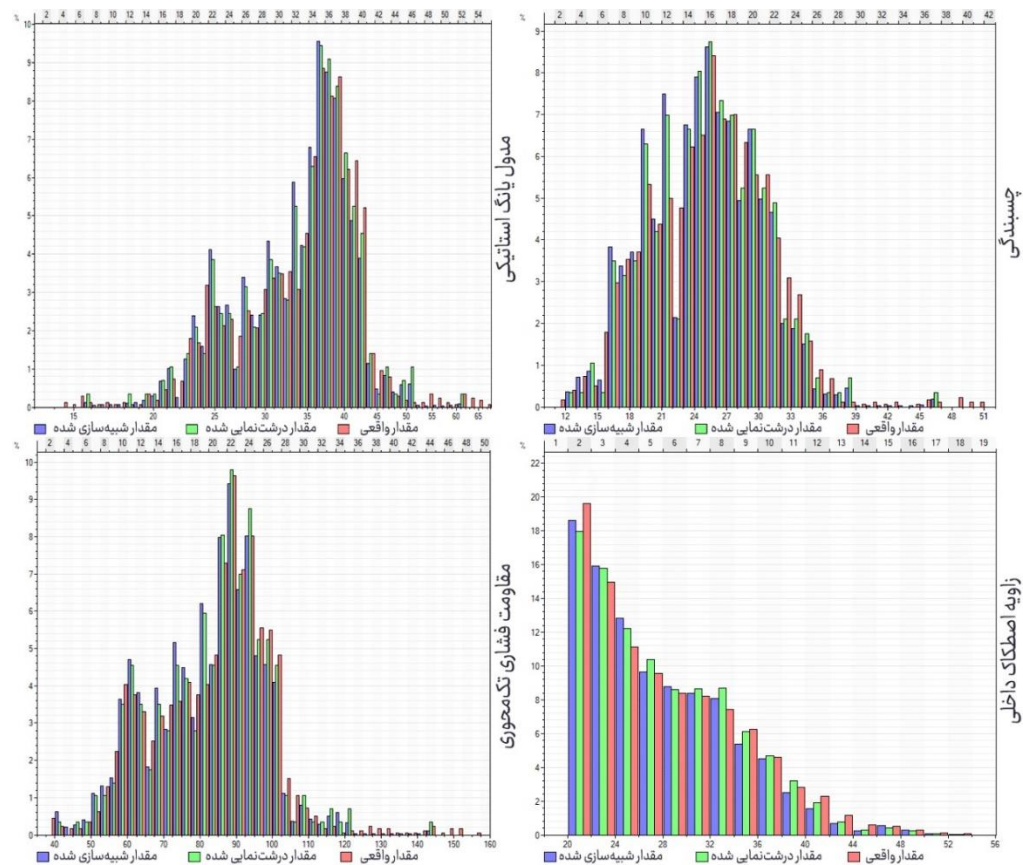


شکل ۵-۱۶ مدل سه بعدی ساخته شده برای زاویه اصطکاک داخلی (deg)

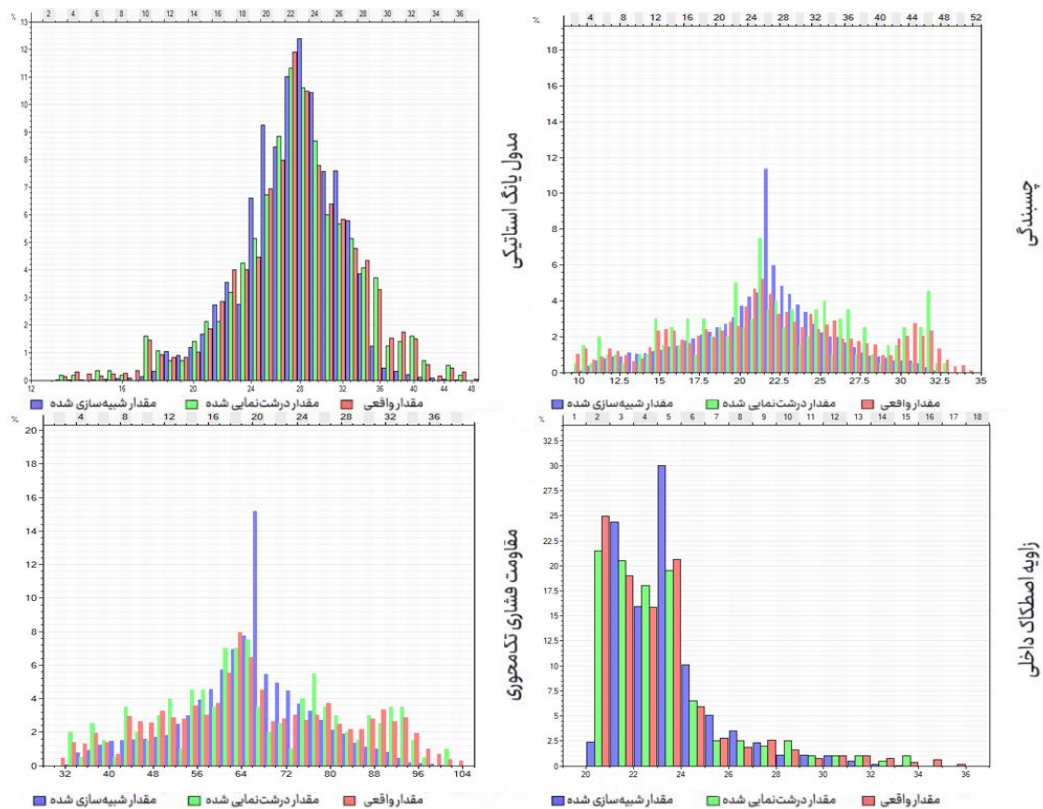


شکل ۱۷-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای چسبندگی ذاتی سنگ (Mpa)

یکی از روش‌های تایید صحت و دقت مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار پترل، مقایسه هیستوگرام داده‌های ورودی و خروجی در محل چاه‌های مورد مطالعه است. برای این منظور، هیستوگرام داده‌های ورودی و داده‌های تخمین زده شده برای هر پارامتر به صورت زون به زون مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۱۸-۵ و ۱۹-۵ هیستوگرام داده‌های ورودی، درشت‌نمایی شده و خروجی حاصل از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی و کریجینگ را برای مدول یانگ، چسبندگی ذاتی سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری و زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد. مدلی دقیق‌تر است که بیش‌ترین شباهت را بین دو هیستوگرام داده‌های درشت‌نمایی شده و خروجی نشان می‌دهد.

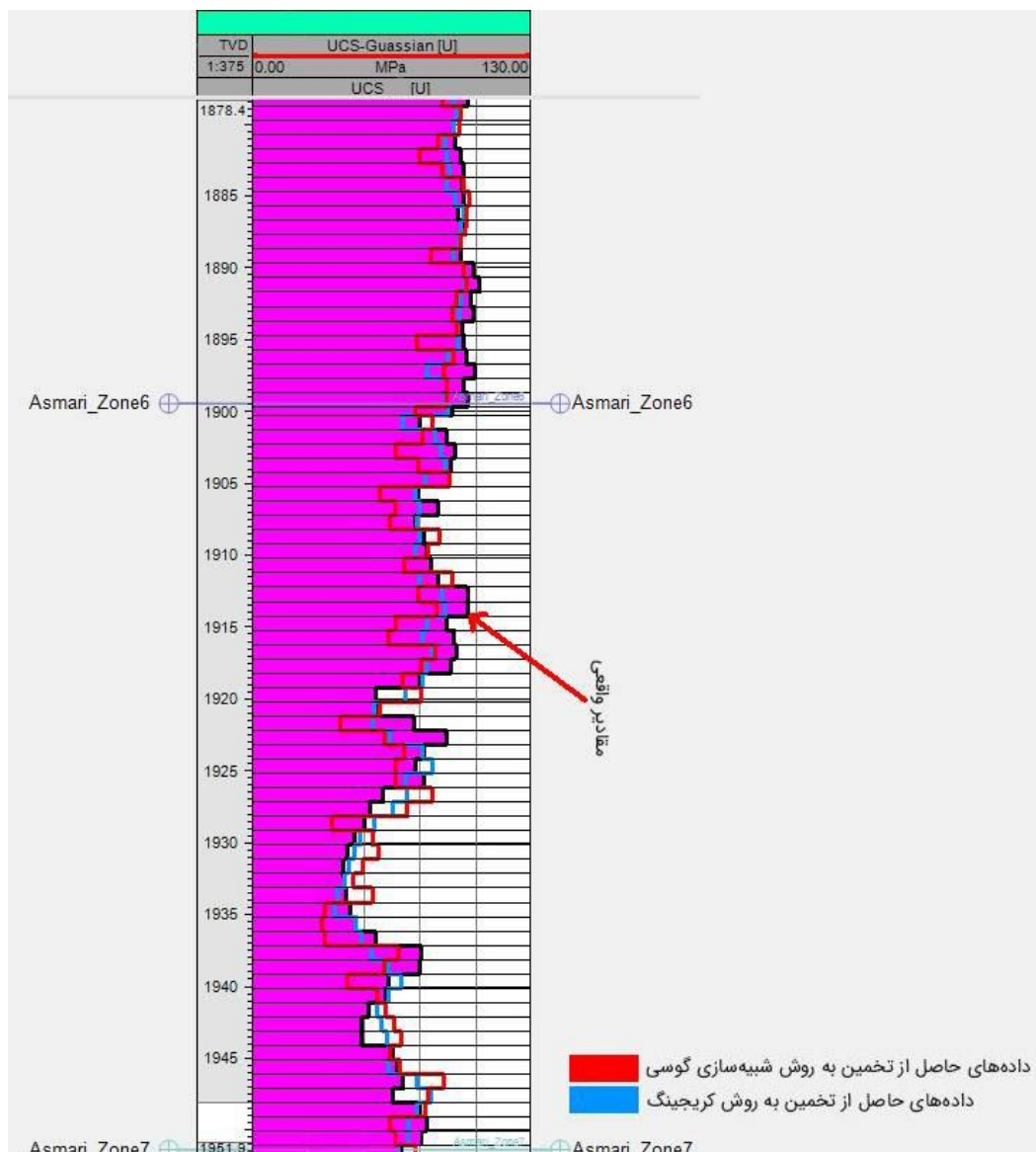


شکل ۵-۱۸ ارزیابی دقت مدل به کمک مقایسه هیستوگرام داده‌های ورودی و خروجی (شبیه‌سازی گوسی متوالی)



شکل ۵-۱۹ ارزیابی دقت مدل به کمک مقایسه هیستوگرام داده‌های ورودی و خروجی (کریجینگ)

همانطور که در شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود داده‌های حاصل از مدلسازی به روش گوسی متوالی تطابق بسیار بالایی با داده‌های ورودی نشان می‌دهند. علت این امر در نظر گرفتن توزیع داده‌های ورودی در روش شبیه‌سازی می‌باشد. اما از آنجایی که در روش تخمین به روش کریجینگ، داده‌ها حول میانگین بدست می‌آیند، مقادیر نزدیک به میانگین بیشتر از سایر مقادیر می‌باشد (شکل ۵-۱۹). به عبارتی دیگر در روش کریجینگ زمانی که داده‌ای برای تخمین بدست نیاید، از مقدار میانگین داده‌ها استفاده می‌شود. بنابراین روش کریجینگ باعث هموارسازی داده‌ها می‌شود. در این پژوهش جهت صحت‌سنجی مدل‌های ساخته شده و ارزیابی توانایی هر یک از روش‌های تخمین، علاوه بر مقایسه داده‌های ورودی و خروجی، داده‌های یکی از چاه‌ها به طور تصادفی برای خارج شدن از مدل انتخاب شد تا نتایج حاصل از مدل با داده‌های واقعی مقایسه شوند. در این فرآیند داده‌های مربوط به پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری تک محوری و فشار منفذی مورد ارزیابی قرار گرفتند. این مقایسه نشان داد که هر دو روش قابلیت خوبی در تخمین داده‌های ژئومکانیکی در میدان دارند. همانطور که در شکل ۵-۲۰ مشاهده می‌شود، انطباق نسبتاً خوبی بین نتایج مدلسازی‌ها و داده‌های واقعی وجود دارد.



شکل ۵-۲۰ مقایسه بین مقدار داده‌های واقعی و داده‌های مدل‌سازی شده در چاه خارج شده

همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های حاصل از تخمین به روش کریجینگ تطابق بیشتری با داده‌های واقعی دارند. البته همانطور که اشاره شد به دلیل این که کریجینگ باعث هموارسازی داده‌ها می‌شود، نتایج حاصل از آن، جزئیات ناهمگنی و تغییرات را به دقت روش شبیه‌سازی گوسی متوالی نشان نمی‌دهد. لازم به ذکر است که عدم انطباق میان داده‌های مدل‌سازی شده و داده‌های واقعی می‌تواند به دلیل دو عامل باشند که عبارتند از:

۱. تعداد کم و یا عدم توزیع مناسب چاه‌های مورد مطالعه برای ساخت مدل سه‌بعدی

۲. شبکه‌بندی نامناسب مدل ساختاری

قطعا در صورت افزایش تعداد چاه‌ها و یا تغییر موقعیت آن‌ها متناسب با تغییرات بنیادی میدان مورد مطالعه، دقت مدل بهتر خواهد شد. در شکل‌های مربوط به مدول یانگ استاتیک، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ، ناحیه‌ای که در مجاورت چاه ۲۷ قرار دارد بالاترین مقادیر در مخزن آسماری را نشان می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد مقدار مقاومت کششی، معادل یک‌دهم مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو روند تغییرات مدل سه‌بعدی این پارامتر در شکل ۵-۱۵ با مدل سه‌بعدی مقاومت فشاری تک محوری در شکل ۵-۱۴ تقریبا مشابه یکدیگر می‌باشد.

در شکل ۵-۱۲ مدل سه‌بعدی ساخته شده برای نسبت پواسون مشاهده می‌شود. این پارامتر از درشت نمایی کردن نتایج ۶ چاه در مخزن بدست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نسبت پواسون تغییرات چندانی در مخزن نداشته و در اکثر نقاط مقادیر تقریبا یکسانی دارد. همچنین برای زاویه اصطکاک داخلی سنگ در شکل ۵-۱۶ و چسبندگی ذاتی سنگ در شکل ۵-۱۷ نیز تغییرات زیادی در میدان مشاهده نمی‌گردد.

۵-۱۰ تخمین وضعیت تنش میدان لالی

در گام بعدی برای ارزیابی پایداری چاه در مخزن لازم است تا شرایط تنش در میدان لالی تخمین زده شود. برای بدست آوردن مقدار تنش قائم از گرادیان افزایش تنش قائم استفاده شده است. این مقدار با بررسی‌های انجام شده برای شرایط تنش در چاه‌های مورد مطالعه ۰.۰۲۴۵ مگاپاسکال به ازای هر متر بدست آمد. به منظور محاسبه تنش قائم در تمام میدان، این مقدار باید در عمق واقعی هر نقطه در مخزن ضرب شود. با مقایسه تنش قائم بدست آمده به کمک این روش با مقادیر تنش قائم موجود در مدل‌های یک‌بعدی، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار گرادیان افزایش فشار محاسبه شده برای میدان لالی، مقدار مناسبی می‌باشد. برای محاسبه تنش‌های افقی در میدان از روش پوروالاستیک استفاده شد که مراحل مشابهی با مراحل محاسبه تنش‌های افقی در ساخت مدل یک‌بعدی دارد. با این تفاوت که پارامترهای ورودی در این روابط، مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده می‌باشند. با توجه به پراکندگی چاه‌های

مورد مطالعه در میدان، مقدار ε_x و ε_y به کمک روابط زیر محاسبه شد (Taghipour et al. 2019):

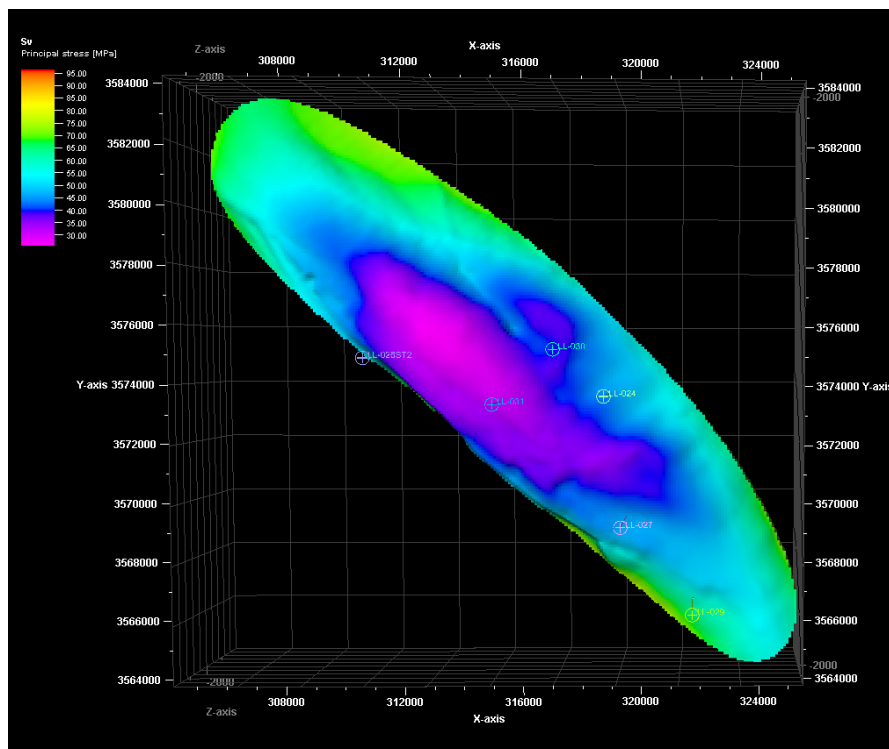
$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_V \times \nu}{E} \times \left(\frac{\nu^2}{1 - \nu} - 1 \right) \quad (2-5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_V \times \nu}{E} \times \left(1 - \frac{\nu^2}{1 - \nu} \right) \quad (3-5)$$

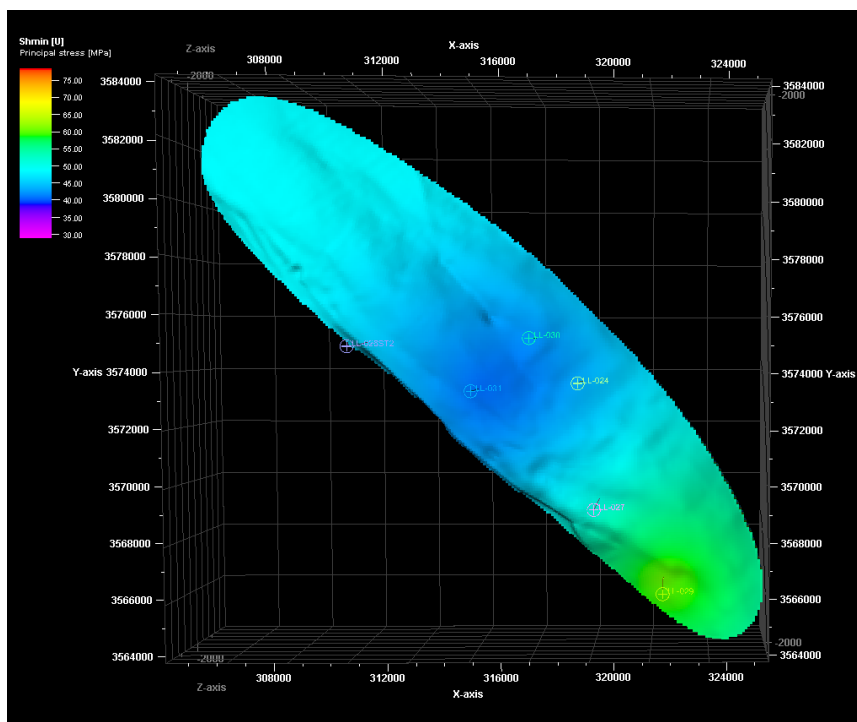
در این معادلات σ_V تنش قائم، ν نسبت پواسون و E مدول یانگ است. ε_x و ε_y به ترتیب کرنش خطی

در محور X و Y می‌باشد. شکل‌های ۵-۲۱ تا ۵-۲۳ مدل‌های سه‌بعدی تنش قائم، تنش افقی حداقل و

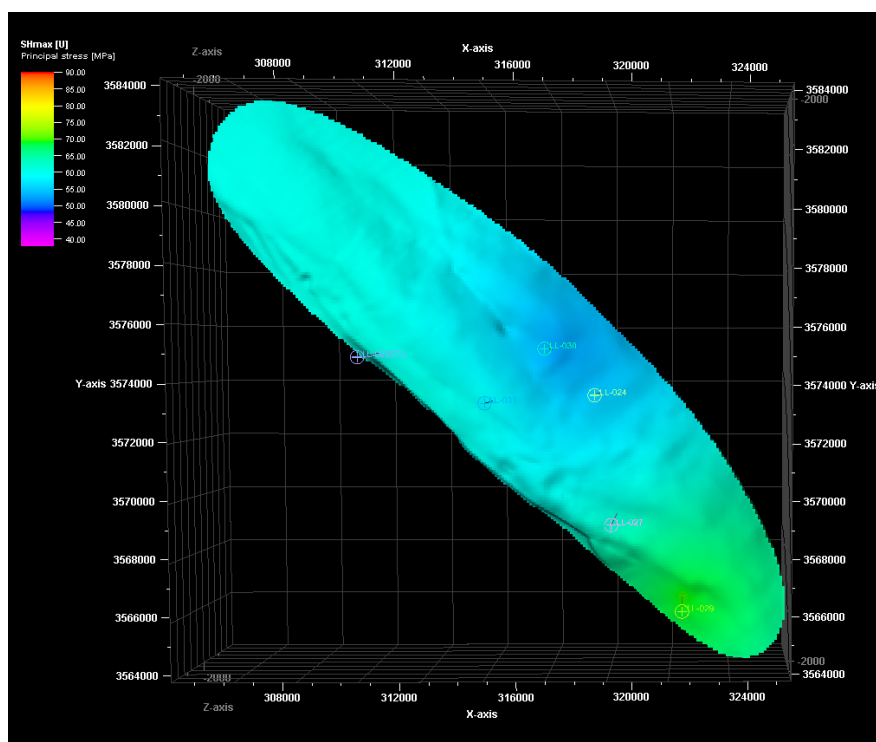
تنش افقی حداکثر بدست آمده را نمایش می‌دهند.



شکل ۵-۲۱ مدل سه‌بعدی ساخته شده برای تنش قائم (Mpa)



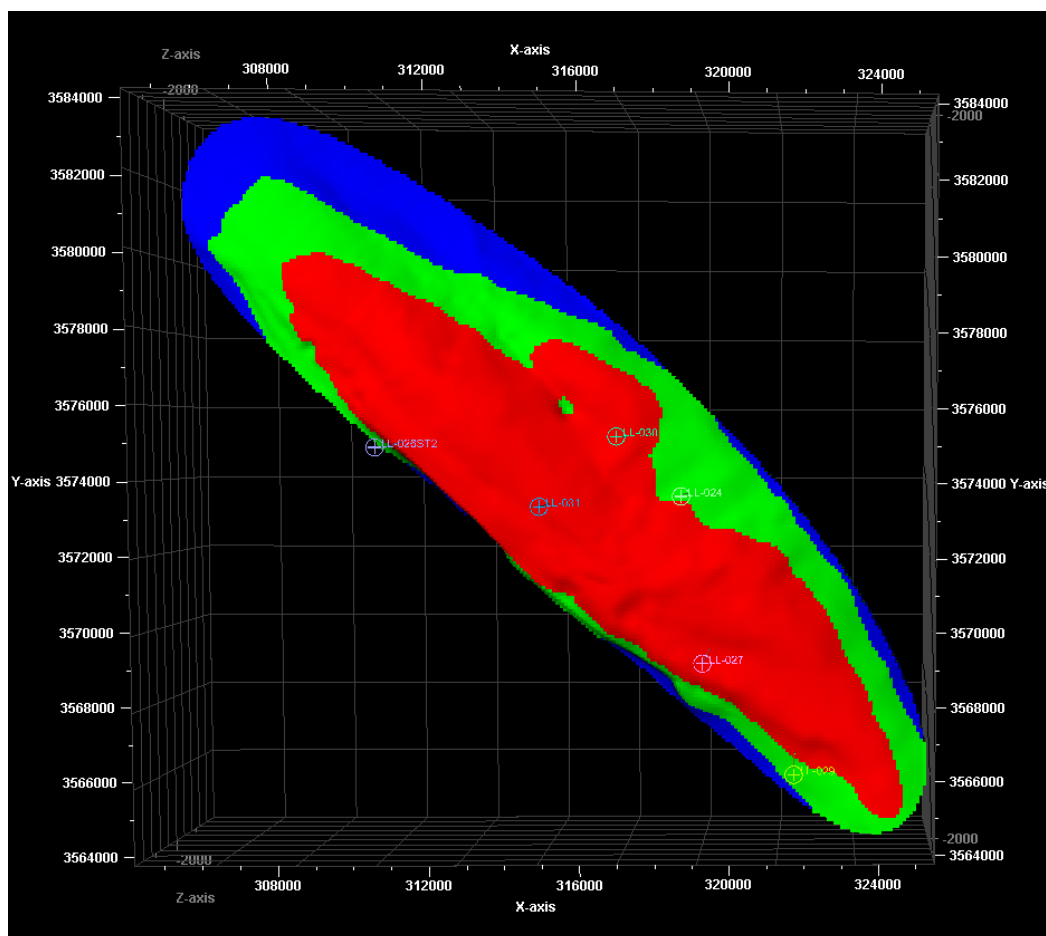
شکل ۲۲-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداقل (Mpa)



شکل ۲۳-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداکثر (Mpa)

تنش قائم وابستگی شدیدی به عمق دارد که این موضوع در مدل سه بعدی ساخته شده به خوبی قابل مشاهده می باشد. در شکل ۲۲-۵ مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداقل و در شکل ۲۳-۵

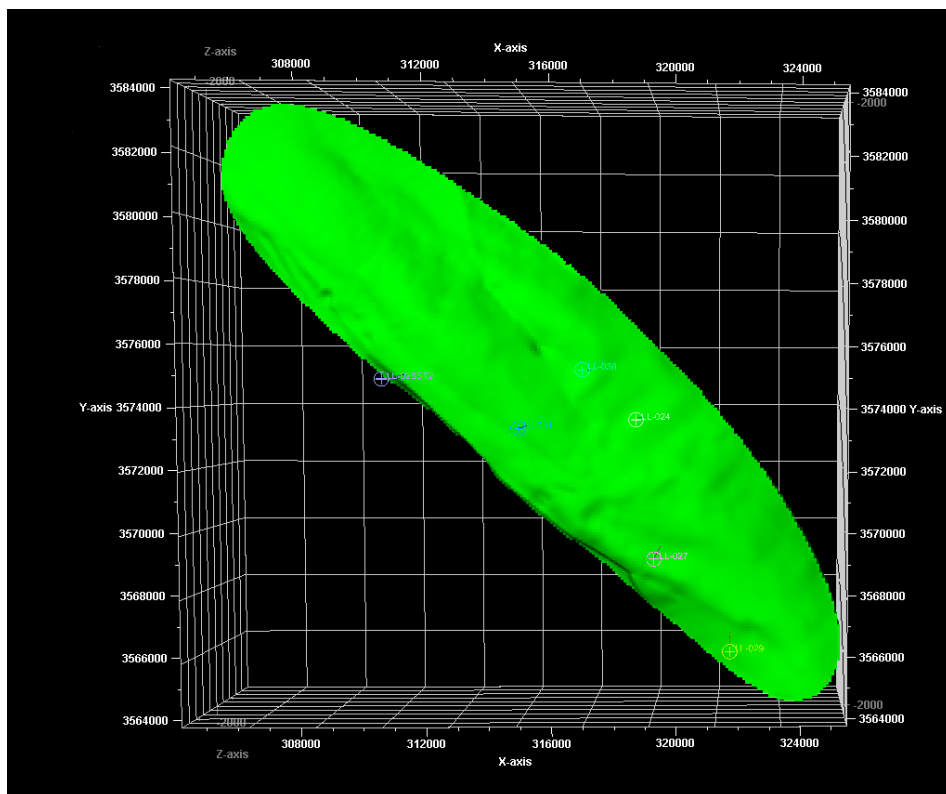
مدل سه بعدی ساخته شده برای تنش افقی حداکثر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود روند تغییرات تنش های افقی در میدان مشابه است، اما قسمت میانی مخزن مقدار تنش کمتری نسبت به قسمت جنوبی آن نشان می دهد. ناحیه ای که در مجاورت چاه ۲۹ قرار دارد بالاترین مقادیر تنش را در مخزن نشان می دهد. در نهایت با بررسی وضعیت تنش های تخمین زده شده قائم و افقی، حالت تنش در تمام نقاط مخزن آسماری میدان لالی بدست آمده است. این موضوع در شکل ۵-۲۴ ارائه شده است. در این شکل مناطق با رنگ قرمز معرف مناطقی هستند که شرایط تنش به صورت گسل معکوس بدست آمده است. مناطق سبز رنگ و آبی رنگ به ترتیب شرایط تنش به صورت گسل امتدادلغز و نرمال را نشان می دهند. همانطور که در فصل قبل اشاره شد، با توجه به زمین شناسی منطقه و وجود گسل اصلی در راستای طول مخزن، می توان شرایط تنش بدست آمده را به خوبی توجیه نمود.



شکل ۵-۲۴ حالت تنش بدست آمده در میدان لالی گسل نرمال (آبی)، امتدادلغز (رنگ سبز) و معکوس (قرمز)

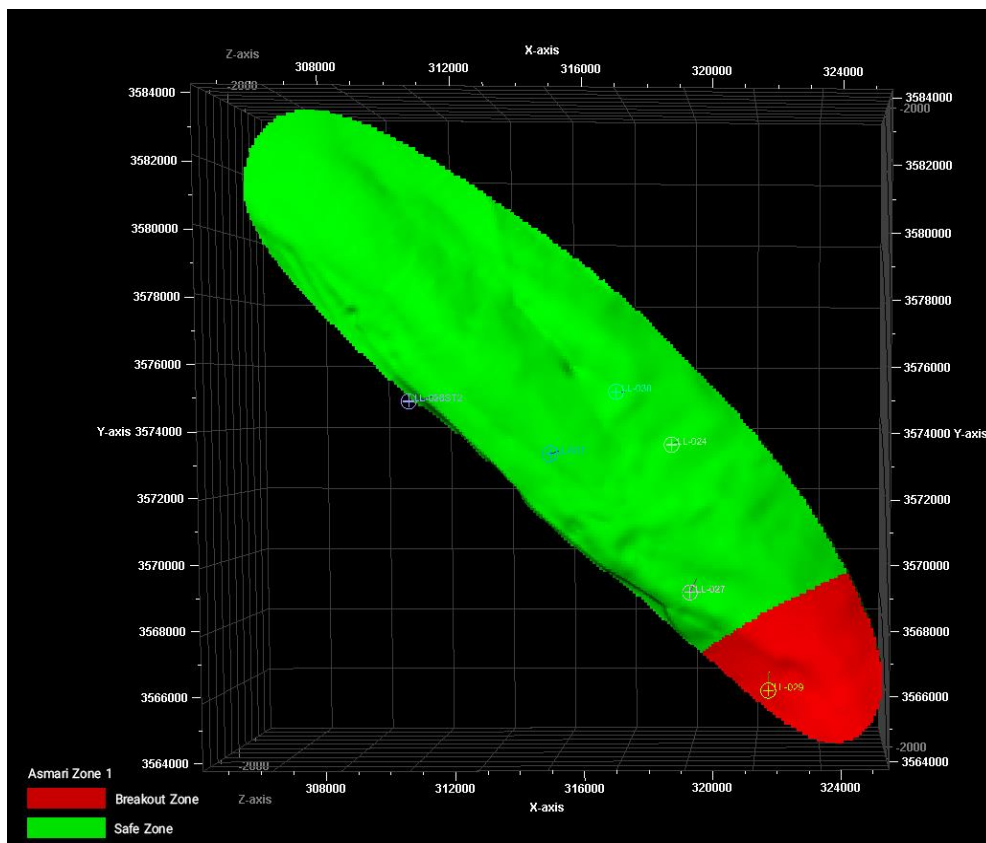
۵- ۱۱ ارزیابی پایداری دیواره چاه و تعیین وزن گل

به منظور ارزیابی پایداری دیواره چاه‌ها به کمک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، باید پنجره ایمن وزن گل را برای تمام مخزن آسماری میدان لالی تخمین زد. با در اختیار داشتن تمام اطلاعات و ویژگی‌های ژئومکانیکی به ویژه شرایط تنش در مخزن، می‌توان پنجره ایمن گل را توسعه داد. همانطور که در فصل قبل اشاره شد، معیار شکست موهر کلمب پس از مقایسه با دو معیار شکست دیگر نمایش درست‌تری از شرایط چاه‌های مورد مطالعه ارائه داد. در این بخش برای تعیین پنجره ایمن گل در مخزن، علاوه بر معیار شکست موهر کلمب از معیار موگی کلمب به منظور محاسبه فشار حداقل و حداکثر گل حفاری استفاده شد. هدف از بکارگیری معیار موگی کلمب در مدلسازی سه‌بعدی فراهم شدن شرایط مقایسه دقیق‌تر و تفصیلی آن با معیار شکست موهر کلمب در میدان لالی می‌باشد. مراحل توسعه پنجره گل در سه‌بعد مشابه مراحل تعیین پنجره ایمن گل در ساخت مدل یک‌بعدی است. با این تفاوت که پارامترهای ورودی در این روابط، مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده می‌باشند. در نهایت پنجره ایمن وزن گل بر پایه هر دو معیار شکست در سه‌بعد ساخته و نتایج حاصل از آن با فشار گل حفاری در مخزن آسماری مورد مقایسه قرار گرفت. بر طبق محاسبات انجام شده، میزان فشار گلی که در زمان حفاری چاه‌ها ایجاد شده است، بسیار کمتر از حد بالای فشار گل بدست آمده از هر دو معیار شکست است؛ بنابراین مدل‌های ساخته شده گسیختگی کششی را برای چاه‌هایی که با وزن گل و شرایطی مشابه چاه‌های مورد مطالعه حفاری شوند، پیش‌بینی نمی‌کند. شکل ۵-۲۵ نتایج حاصل از مقایسه فشار گل حفاری با حد بالای فشار بدست آمده از معیار موهر کلمب را نشان می‌دهد. در این مقایسه برای هر چاه دو ناحیه پایدار و ناحیه گسیختگی کششی در مخزن وجود خواهد داشت. بخش‌های سبز رنگ نشان دهنده بخش‌های پایدار می‌باشند. در صورتی که هرگونه ناپایداری در مخزن پیش‌بینی می‌گردید به صورت نواحی قرمز رنگ به نمایش در می‌آمدند.

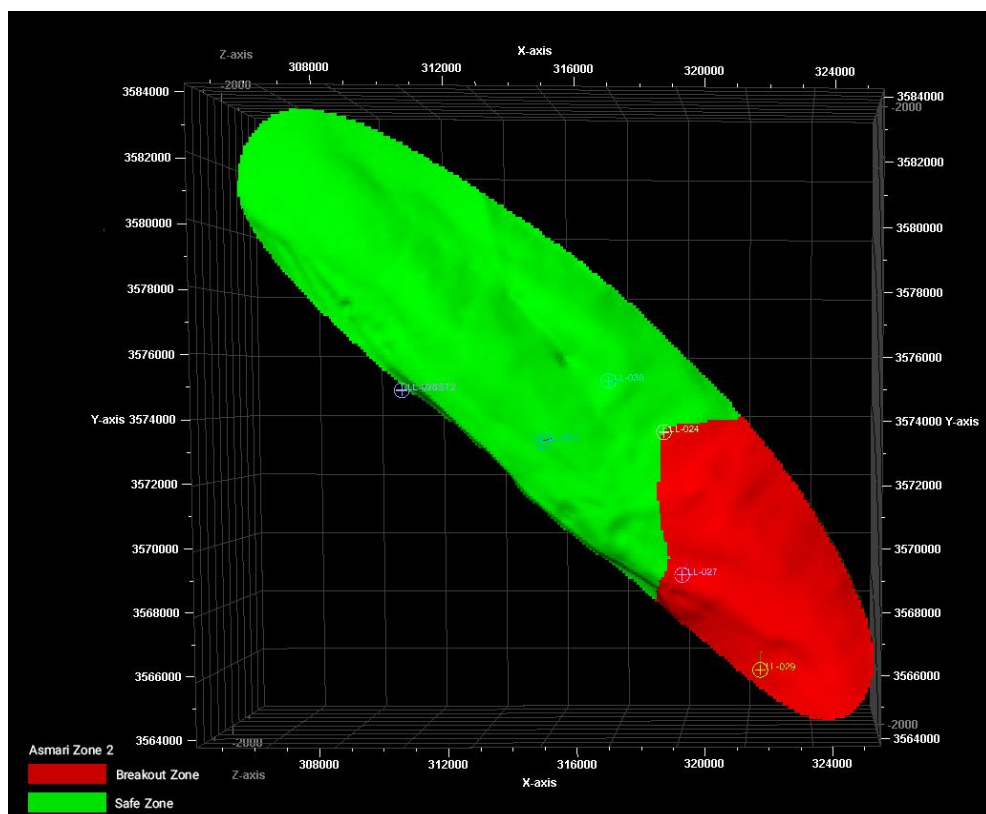


شکل ۵-۲۵ نواحی پایدار و ناپایدار در مخزن آسماری (گسیختگی کششی)

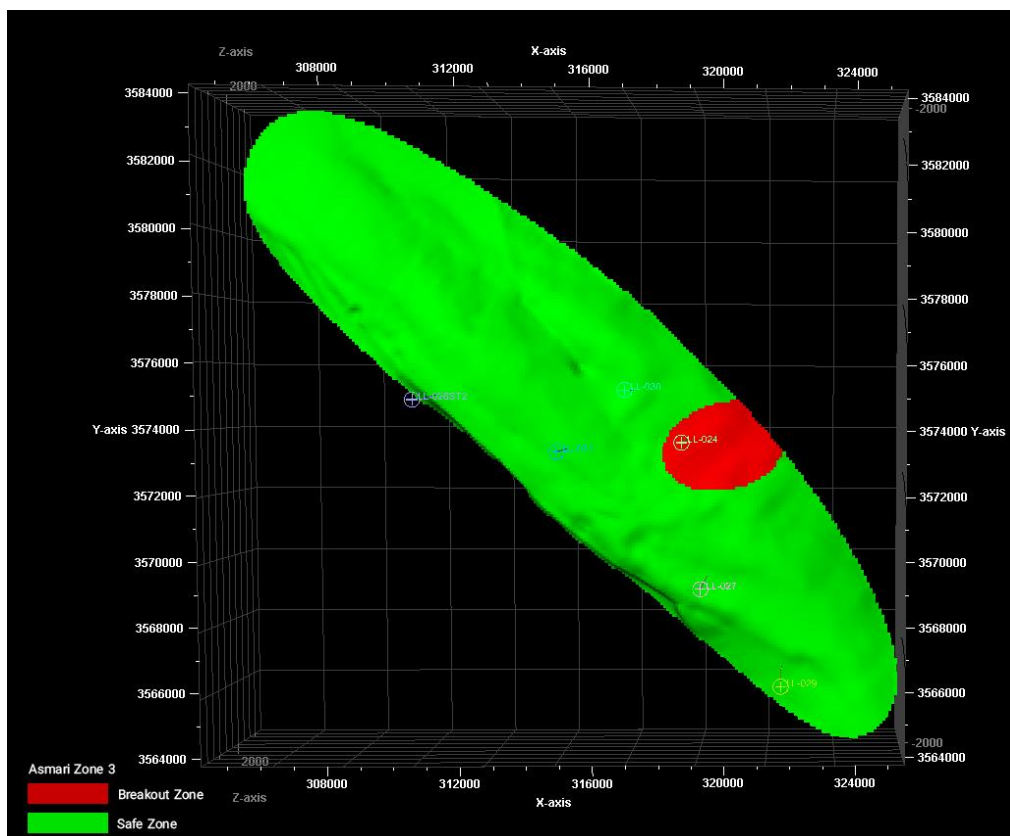
در ادامه حد پایین فشار گل با فشار گل حفاری در مخزن آسماری مقایسه گردید. در این مقایسه هر دو معیار شکست برای بخش‌هایی از میدان گسیختگی برشی را پیش‌بینی کردند. اما معیار موگی کلمب تخمین بسیار خوش‌بینانه‌تری نسبت به معیار موهر کلمب ارائه می‌دهد. به عبارتی دیگر معیار شکست موهر کلمب محتاطانه‌تر عمل کرده و حد پایین فشار گل بیشتری را نشان می‌دهد که با شرایط میدان لالی تطابق بیشتری دارد. با مقایسه فشار گل حفاری با حد پایین فشار گل بدست آمده از معیار شکست موهر کلمب، همانطور که در شکل‌های ۵-۲۶ تا ۵-۳۲ قابل مشاهده است، در برخی از مناطق جنوبی مخزن گسیختگی برشی رخ خواهد داد. در این مقایسه برای هر چاه دو ناحیه پایدار و ناحیه گسیختگی برشی در مخزن وجود خواهد داشت که در شکل‌های مذکور محدوده پایدار و محدوده دارای شکستگی برشی برای زون‌های مختلف میدان نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها ناحیه قرمز رنگ مناطقی است که چاه در آن با شکست برشی مواجه خواهد شد و نواحی سبز رنگ معرف مناطقی هستند که با توجه به فشار گل حفاری، چاه پایدار خواهد بود.



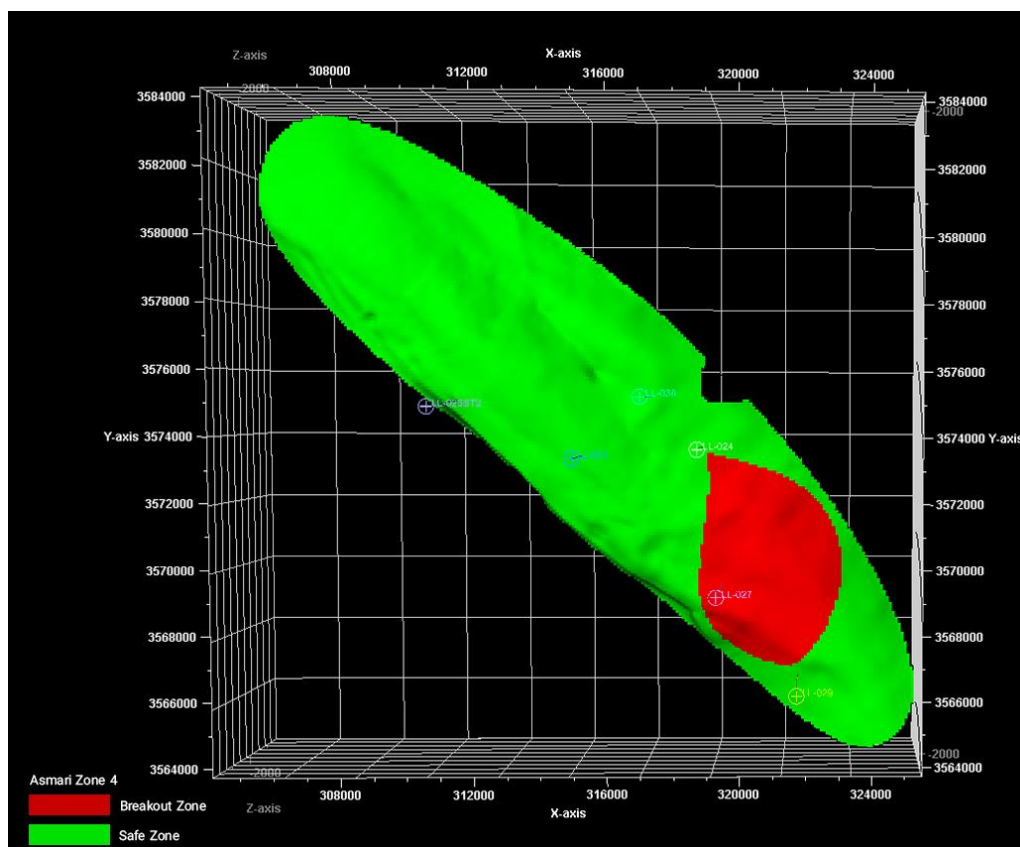
شکل ۵-۲۶ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۱ مخزن آسماری



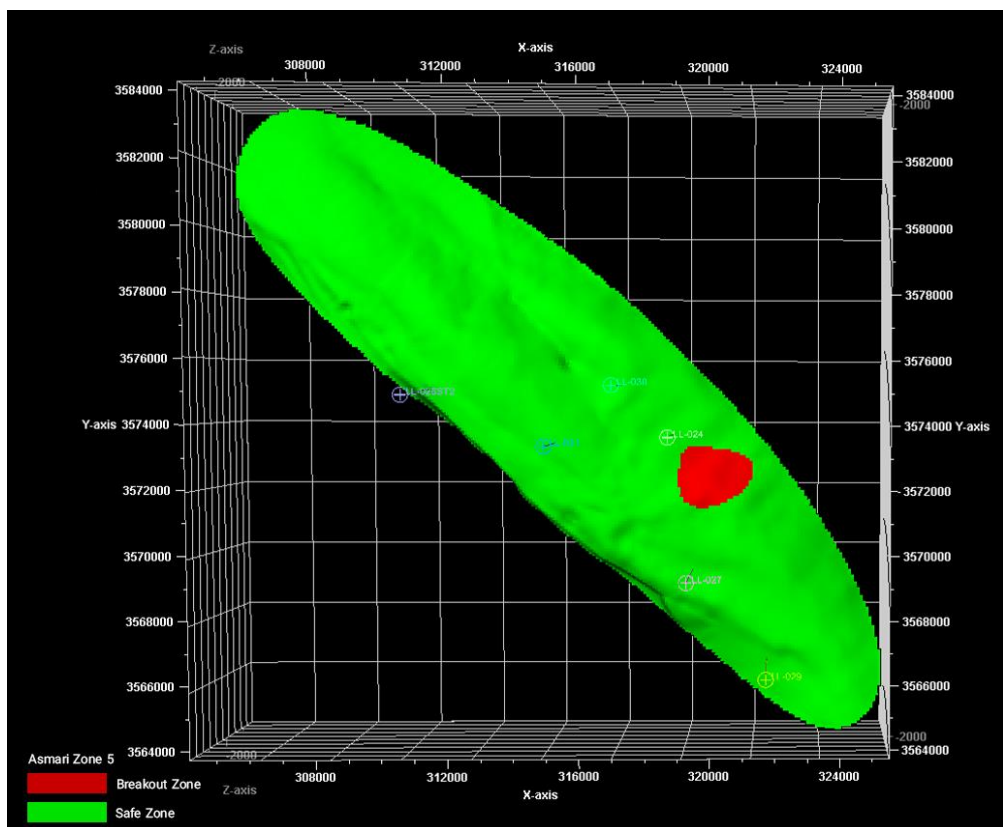
شکل ۵-۲۷ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۲ مخزن آسماری



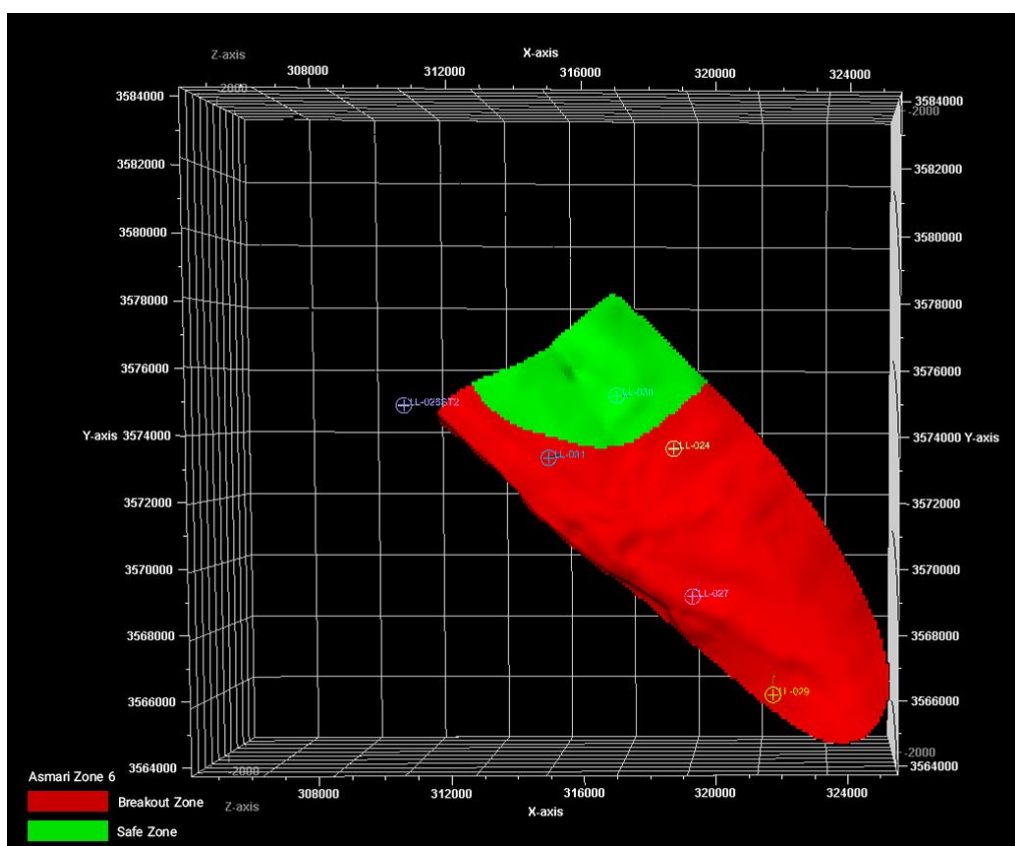
شکل ۵-۲۸ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۳ مخزن آسماری



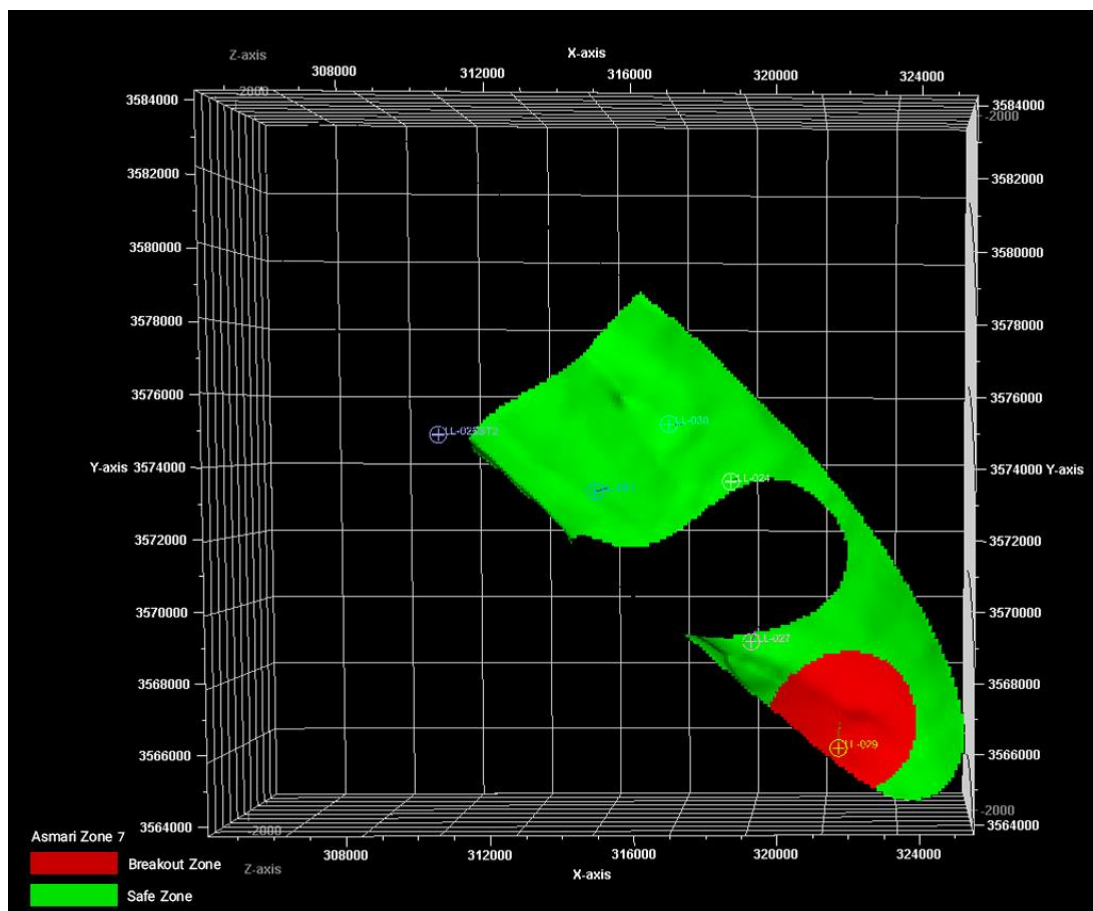
شکل ۵-۲۹ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۴ مخزن آسماری



شکل ۳۰-۵ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۵ مخزن آسماری



شکل ۳۱-۵ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۶ مخزن آسماری

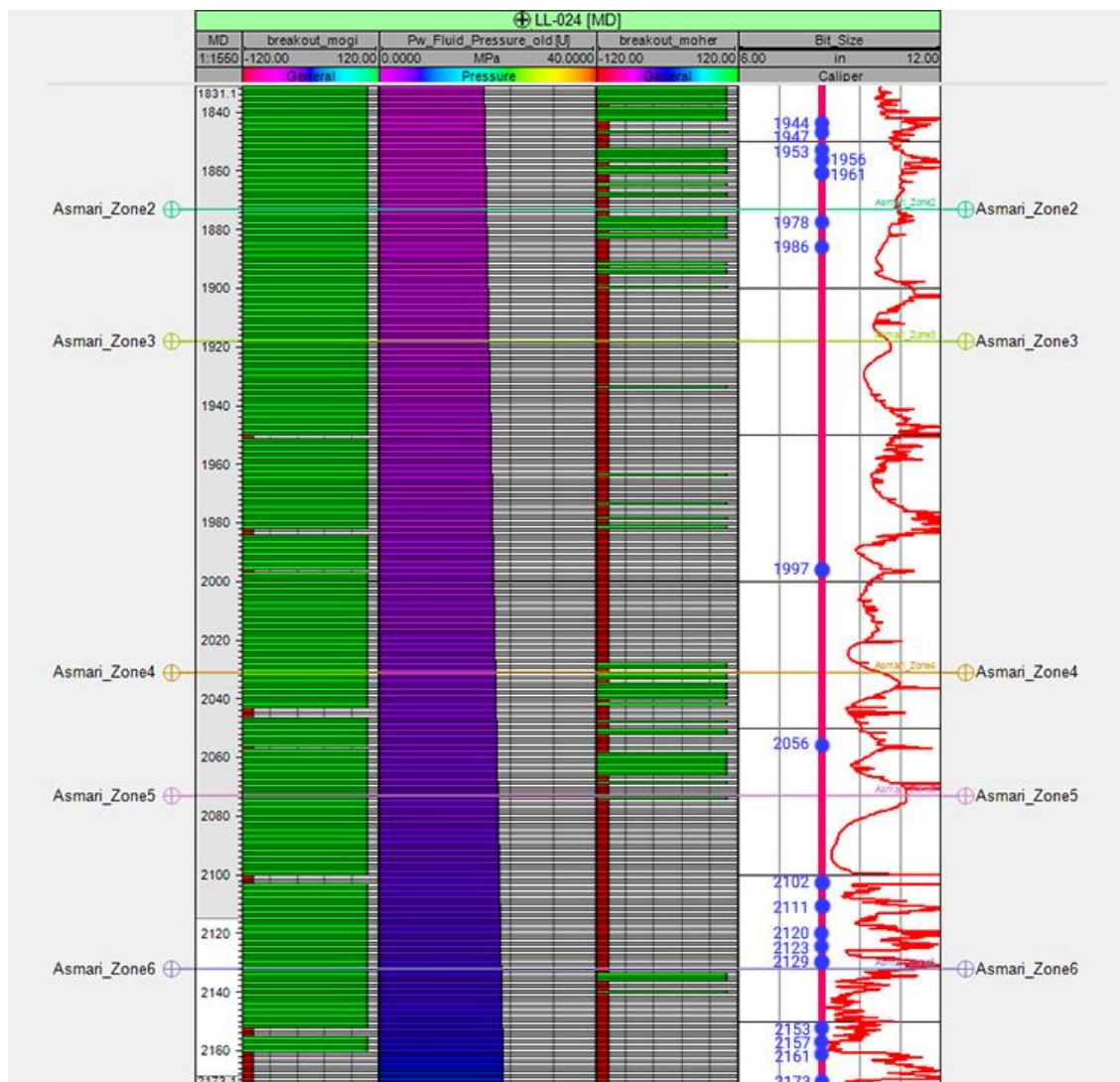


شکل ۵-۳۲ نواحی پایدار و ناپایدار در زون ۷ مخزن آسماری

با مشاهده روند کلی تغییرات در مناطق دارای شکستگی برشی و مناطق پایدار از زون ۱ تا ۷ مخزن آسماری، می‌توان نتیجه گرفت که در تمام زون‌ها با حرکت به سمت بخش‌های شمالی میدان، محدوده پایدار افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، زون ۵ را می‌توان به عنوان پایدارترین و کم‌خطرترین زون از نظر وضعیت پایداری در دیواره چاه معرفی کرد. در مقابل زون ۶ که در پایین آن قرار دارد، بیشترین ناپایداری برشی را نشان می‌دهد. بخش‌های جنوبی زون‌های ۱ و ۲ و بخش‌های مرکزی زون ۳ و ۴ نسبت به سایر بخش‌ها ناپایداری بیشتری دارند. این ناپایداری‌ها به وضوح در مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی چاه‌های ۲۴، ۲۷ و ۲۹ قابل مشاهده می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان با فشار گل حفاری توجیه نمود. همچنین در نواحی اطراف چاه ۲۹ در زون ۷ بیشترین ناپایداری بیش‌بینی شده است.

در ادامه جهت ارزیابی دقت و صحت‌سنجی پنجره ایمن گل تخمین زده شده و همچنین مقایسه بیشتر

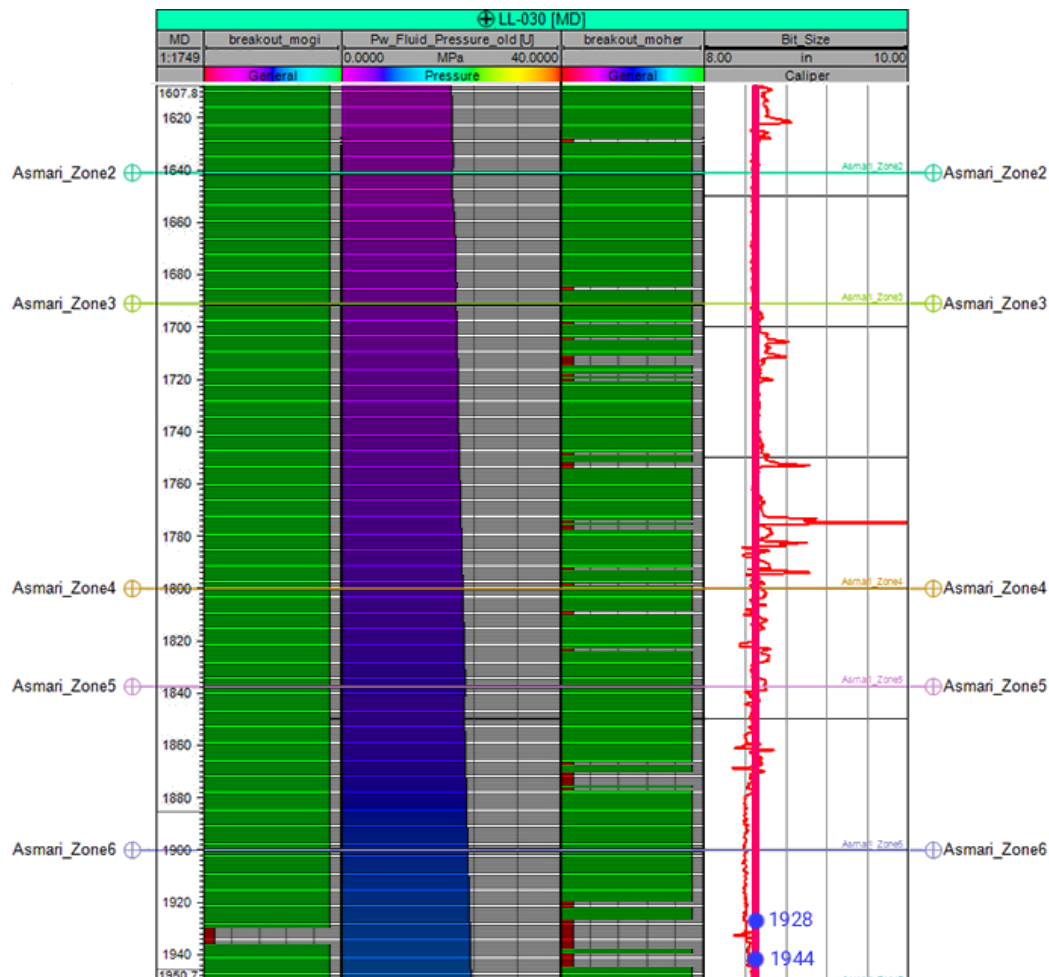
میزان تطابق پیش‌بینی معیارهای شکست موهر کلمب و موگی کلمب با وقایع و شرایط مخزن، داده‌های چاه‌های مورد مطالعه با داده‌ها و وقایع واقعی مقایسه شدند. به این منظور، حد پایین فشار محاسبه شده بوسیله هر دو معیار شکست در کنار داده‌های حاصل از نگار تصویری، داده‌های مربوط به نگار قطرسنجی و فشار گل حفاری در چاه‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مقایسه برای سه چاه ۲۴، ۲۶ و ۳۰ میدان لالی به ترتیب در شکل ۵-۳۳ تا ۵-۳۵ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور نمایش بهتر دقت و صحت خروجی مدل ساخته شده، سه چاه مورد بررسی در این بخش بر اساس میزان پایداری آن‌ها انتخاب شدند. چاه ۲۴ را می‌توان یکی از چاه‌های بسیار ناپایدار و ریزشی میدان لالی دانست. در مقابل چاه ۳۰ شرایط ناپایداری مناسب‌تری نسبت به چاه ۲۴ دارد. در نهایت چاه ۲۶ به عنوان یکی از چاه‌های پایدار در میدان مورد بررسی قرار گرفت. ستون اول و سوم در شکل‌های مذکور وضعیت پایداری چاه را به ترتیب بر پایه پیش‌بینی معیار شکست موگی کلمب و موهر کلمب نشان می‌دهد. بخش‌های قرمز رنگ مناطقی است که چاه در آن با شکست برشی مواجه خواهد شد و نواحی سبز رنگ معرف مناطقی هستند که با توجه به فشار گل حفاری، چاه پایدار خواهند بود. ستون دوم فشار گل در زمان حفاری را نمایش می‌دهد. در ستون آخر نگار قطر سنجی و سائز مته حفاری نشان داده شده است. نقاط آبی رنگ بر روی سائز مته حفاری، نواحی وقوع شکستگی برشی را نشان می‌دهد که بر اساس تفسیر نگار تصویری به عنوان شواهدی برای حضور شکست برشی ارائه شده‌اند.



شکل ۵-۲۳ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه بعدی در چاه ۲۴

همانطور که در شکل بالا مشاهده می شود، نگار قطرسنجی و داده های حاصل از نگار تصویری به خوبی وضعیت ناپایداری های چاه ۲۴ را نشان می دهند. خوش بینانه بودن تشخیص معیار شکست موگی کلمب در مقایسه با معیار موهر کلمب به خوبی در هر سه شکل دیده می شود. زیرا معیار موگی کلمب مقدار حد پایین فشار ایمن گل کمتری را نسبت به معیار موهر کلمب پیشنهاد داده است. از این رو این معیار بسیاری از شکست های کششی را پیش بینی نکرده است. این عدم تطابق را می توان با بررسی اعماق ۱۸۴۰ تا ۱۹۰۰ در شکل بالا مشاهده نمود. در این اعماق، معیار موگی کلمب وضعیت چاه را پایدار پیش بینی کرده است. این در حالی است که نتایج حاصل از نگارهای تصویری و قطرسنجی ناپایداری

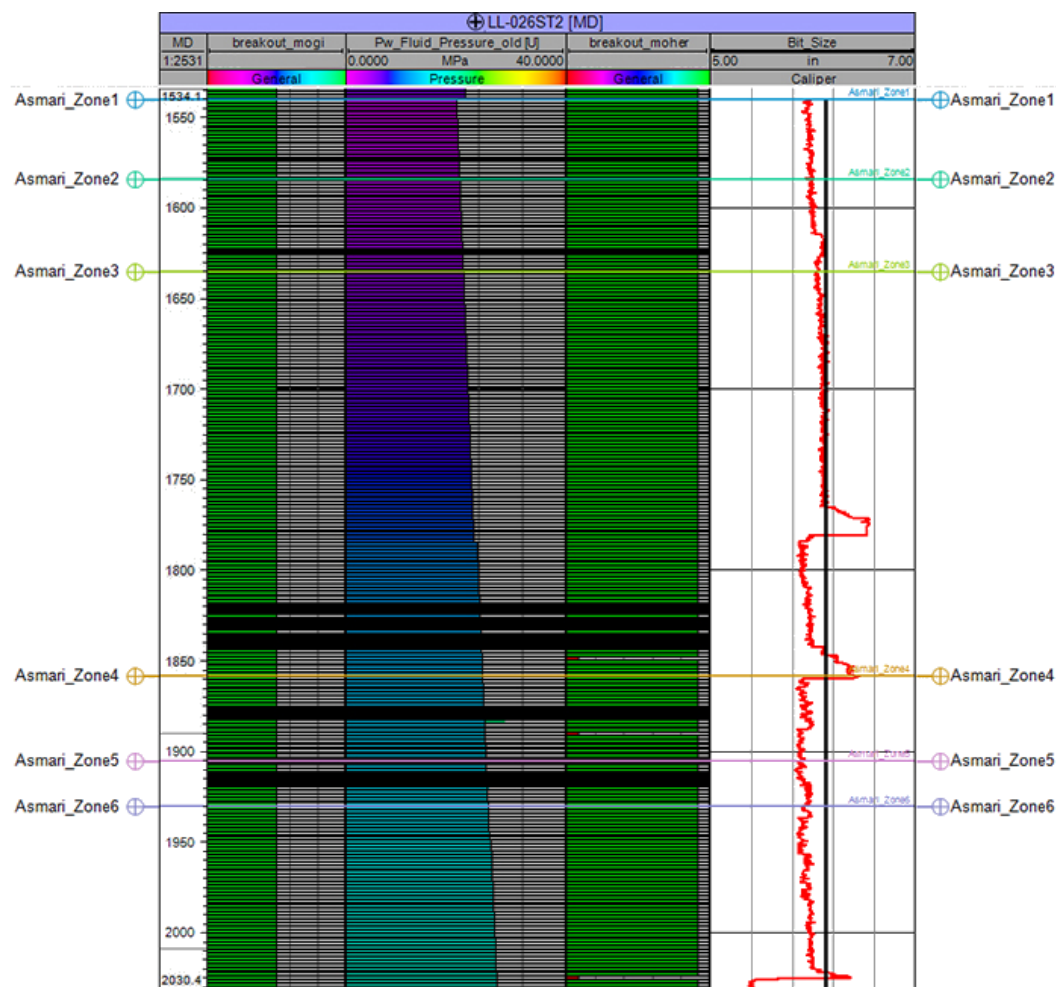
چاه را در این اعماق تایید می‌کند. همچنین تطابق بالای معیار شکست موهر کلمب با شرایط واقعی ناپایداری به خوبی قابل تشخیص است.



شکل ۳۴-۵ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه بعدی در چاه ۳۰

علت ریزش در چاه ۲۴ را می‌توان کاهش وزن گل در زمان حفاری دانست. این امر با مقایسه وزن گل حفاری در هر سه چاه به راحتی قابل تشخیص است. همانطور که در شکل ۳۳-۵ و ۳۴-۵ دیده می‌شود، وزن گل حفاری در چاه ۲۴ تقریباً برابر با وزن گلی است که در زمان حفاری چاه ۳۰ انتخاب شده است، در حالی که عمق حفاری چاه ۲۴ بسیار بیشتر از چاه ۳۰ می‌باشد. با بررسی فشار گل حفاری در چاه‌های مورد مطالعه می‌توان دریافت که با افزایش عمق، میزان فشار گل حفاری نیز افزایش می‌یابد. افزایش وزن گل با هدف بالاتر نگاه داشتن فشار گل حفاری نسبت به حد پایین فشار گل و برقراری پایداری صورت می‌گیرد. با مطالعه چاه‌های دارای شکستگی برشی در میدان لالی، می‌توان علت ناپایداری‌ها را

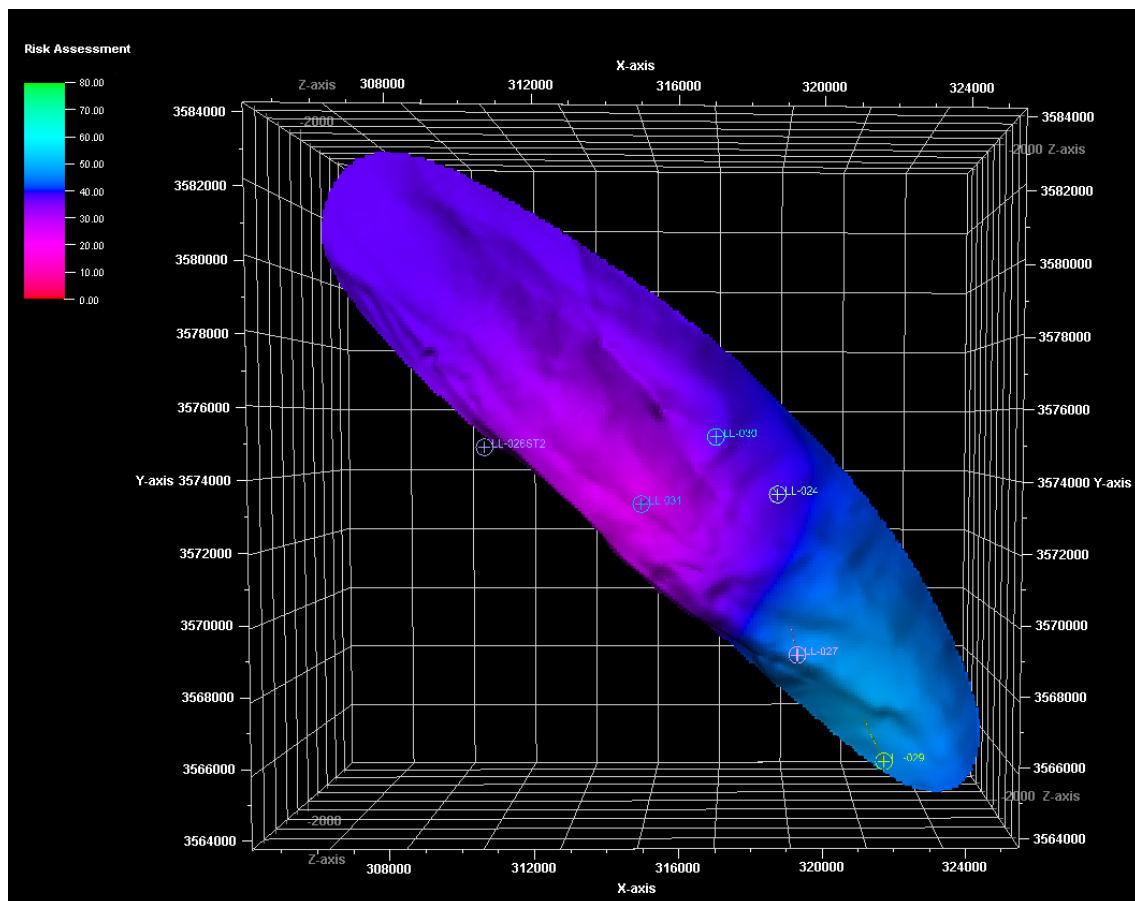
انتخاب وزن پایین گل دانست، زیرا با افزایش عمق، روند افزایش تنش‌های افقی نیز شیب تندتری به خود می‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود تا حد بالا و پایین فشار گل افزایش یابد. در این حالت روند رشد فشار گل حفاری باید به گونه‌ای باشد که از حد پایین فشار گل بیشتر شود. بنابراین به منظور پایداری چاه حفاری شده در این نواحی نیاز است تا با در نظر گرفتن سایر عوامل دیگر، از وزن گل بیشتری استفاده شود.



شکل ۵-۳۵ ارزیابی دقت و صحت پنجره ایمن گل سه بعدی در چاه ۲۶

شکل ۵-۳۵ نتایج حاصل از این مقایسه را تایید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود وزن گلی که در زمان حفاری چاه ۲۶ انتخاب شده است به مراتب بیشتر از دو چاه ۳۰ و ۲۴ می‌باشد. همچنین با افزایش عمق حفاری، فشار گل حفاری افزایش یافته است. البته لازم به ذکر است که افزایش فشار گل حفاری با محدودیت‌هایی همراه است. افزایش وزن گل، باعث افزایش فشار گل حفاری و در نتیجه غلبه بر فشار

منفذی می‌شود. در این حالت هرزروی گل حفاری اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش این روند ممکن است گسیختگی کششی در چاه ایجاد شود. این مقایسه نشان داد که انطباق بسیار خوبی بین نتایج مدل‌سازی و وقایع واقعی در میدان وجود دارد. نتایج حاصل از این مقایسه به عنوان یکی از خروجی‌های نهایی مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی تاییدی بر صحت پارامترهای ژئومکانیکی تخمین زده شده و در نتیجه بالا بودن میزان تطابق میان مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی و مدل سه‌بعدی می‌باشد. در ادامه با هدف ارزیابی میزان ریسک حفاری در میدان، عرض پنجره ایمن گل به عنوان شاخصی مناسب انتخاب شد. برای این منظور اختلاف میان حد پایین و بالای فشار گل حاصل از معیار شکست موهر کلمب محاسبه شد. شکل ۵-۳۶ عرض پنجره ایمن گل حفاری را در میدان نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۶ عرض پنجره ایمن گل حفاری در میدان لالی

افزایش عرض پنجره ایمن گل در بخش‌هایی از مخزن را می‌توان تفسیری از کاهش ریسک حفاری در آن مناطق دانست. زیرا عرض پنجره ایمن گل، محدوده‌ی امن افزایش و یا کاهش فشار گل حفاری را

تشکیل می‌دهد. کاهش عرض پنجره ایمن گل، کاهش آزادی عمل در زمان حفاری را به دنبال دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، عرض پنجره ایمن گل با حرکت به سمت مرکز مخزن، کاهش می‌یابد. ناحیه‌ای که در مجاورت چاه ۳۱ قرار دارد کمترین عرض پنجره ایمن گل را در مخزن نشان می‌دهد. این روند در سایر زون‌های مخزن آسماری مشاهده شد. میانگین عرض پنجره ایمن گل در این ناحیه ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین در این مناطق باید وزن گل حفاری به دقت انتخاب شود. همچنین در صورت ایجاد گسیختگی‌های برشی و ریزش در چاه، وزن گل باید با احتیاط افزایش یابد تا باعث بروز گسیختگی کششی در چاه نگردد. جدول ۵-۱ مقدار حداقل، حداکثر و میانگین عرض پنجره ایمن گل را در زون‌های مخزن آسماری میدان لالی نشان می‌دهد. زون‌های ۷ و ۶ آسماری به ترتیب با میانگین ۲۲.۹۵ و ۳۲.۹۲ مگاپاسکال کمترین عرض پنجره ایمن گل را در مخزن دارند.

جدول ۵-۱ عرض پنجره ایمن گل در زون‌های مخزن آسماری میدان لالی

زون‌های مخزن آسماری	میانگین (Mpa)	حداکثر (Mpa)	حداقل (Mpa)
زون ۱ آسماری	۳۷.۷۵	۶۴.۲۰	۱۲.۳۲
زون ۲ آسماری	۴۱.۳۵	۶۴.۹۸	۱۰.۸
زون ۳ آسماری	۴۰.۸۵	۶۹.۸۹	۱۰.۴۲
زون ۴ آسماری	۴۰.۳۵	۸۱.۹	۹.۵۳
زون ۵ آسماری	۴۱.۱۲	۶۷.۶۰	۹.۱۳
زون ۶ آسماری	۳۲.۹۲	۶۴.۷۲	۹.۴۸
زون ۷ آسماری	۲۲.۹۵	۵۸.۳۲	۹.۲۷
کل مخزن آسماری	۳۲.۳۴	۸۱.۹	۹.۱۳

۵- ۱۲ بهینه‌سازی مسیر حفاری در مخزن

از مدل ژئومکانیکی ساخته شده طی این پژوهش می‌توان برای بهینه‌سازی مسیر حفاری در مخزن آسماری میدان لالی بهره برد. برای این منظور ابتدا باید محل حفاری چاه جدید در میدان مشخص شود. برای مشخص شدن محل حفاری چاه جدید، وضعیت مخزن از نظر پتانسیل تولید به کمک مدل‌های تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سپس خصوصیات ژئومکانیکی و شرایط تنش در محل مورد نظر از مدل ژئومکانیکی میدان استخراج می‌شود. در ادامه، با آگاهی از موارد ذکر شده می‌توان مسیر حفاری چاه جدید در راستاهای مختلف مورد ارزیابی قرار داد. در این فرآیند، تحلیل وضعیت پایداری چاه جدید در سه عمق مختلف ۱۶۵۰، ۱۸۰۰ و ۱۹۵۰ متر به عنوان نمونه برای ارائه نتایج و تفسیر انجام گرفت. تجزیه و تحلیل مشابه را می‌توان برای سایر اعماق نیز انجام داد. در جدول ۵-۲ داده‌های مربوط به هر سه عمق ذکر شده است.

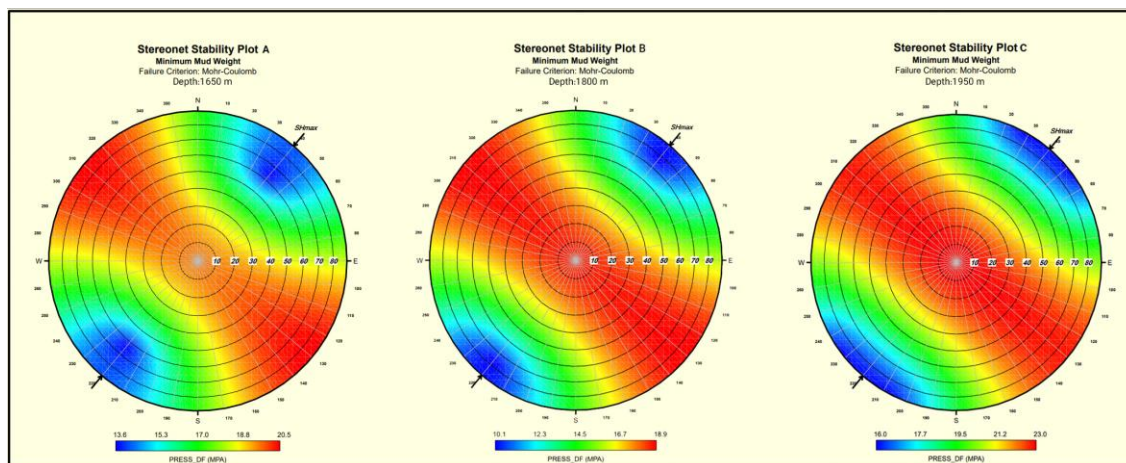
جدول ۵-۲ خصوصیات ژئومکانیکی استخراج شده برای چاه جدید در سه عمق مختلف.

پارامتر	عمق ۱۶۵۰ (A)	عمق ۱۸۰۰ (B)	عمق ۱۹۵۰ (C)
نسبت پواسون	۰.۳۲۵	۰.۲۹۸	۰.۳۰۶
مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)	۷۱.۴	۹۰.۴	۷۴.۱
زاویه اصطکاک داخلی سنگ (deg)	۳۸.۴	۳۲.۳۱	۲۲.۴۹
فشار منفذی (Mpa)	۱۷.۰۵	۱۸.۲۱	۱۹.۴
تنش افقی حداقل (Mpa)	۴۵.۰۲	۴۶.۵۱	۴۹.۷۹
تنش افقی حداکثر (Mpa)	۵۳.۷۹	۵۸.۳۲	۵۸.۷۳
تنش قائم (Mpa)	۴۱.۴	۴۵.۳	۴۹.۲۵

همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، رژیم تنش در هر سه عمق مورد بررسی به صورت گسل معکوس است. زیرا مقدار تنش افقی حداکثر بزرگ‌ترین مقدار در میان سه تنش اصلی است، در حالی

که مقدار تنش قائم کمتر از تنش افقی حداقل می‌باشد. در ادامه با آگاهی از جهت تنش‌های اصلی و مقادیر آن‌ها در میدان می‌توان مسیر حفاری چاه جدید را در اعماق مذکور با هدف تعیین راستای مناسب مورد ارزیابی قرار داد.

شکل ۵-۳۷ حداقل فشار مورد نیاز برای حفاری ایمن را در هر سه عمق مورد نظر برای چاه جدید در قالب استریونت^۱ نشان می‌دهد. هر استریونت نمایان‌گر صفحه‌ای همراه با چاه و جهت‌گیری حفاری آن است. استریونت قادر است بهترین جهت حفاری و وضعیت پایداری چاه را برای تمام مسیرهای حفاری در عمقی مشخص نشان دهد.



شکل ۵-۳۷ حد پایین فشار گل برای حفاری ایمن در راستاهای مختلف (سه عمق ۱۶۵۰، ۱۸۰۰ و ۱۹۵۰)

در این شکل‌ها مرکز استریونت چاه قائم را نشان می‌دهد. گوشه‌های خارجی آن چاه افقی و فاصله میان آن‌ها (فاصله شعاعی و آزیموت) نشان دهنده چاه جهت‌دار می‌باشد. به عبارتی دیگر دایره‌هایی که از مرکز استریونت به سمت خارج آن حرکت می‌کنند، راستاهای مختلف حفاری چاه از قائم (صفر در مرکز) تا افقی (۹۰ درجه) را نشان می‌دهند. همانطور که در فصل قبل ذکر گردید، جهت تنش افقی حداکثر در میدان لالی N040E می‌باشد که در این شکل‌ها مشخص شده است.

با توجه به شرایط تنش بدست آمده، پایدارترین راستای حفاری جهت به حداقل رساندن شکست‌های برشی، راستای تنش افقی حداکثر (آزیموت ۴۰ درجه) می‌باشد. بنابراین باید حفاری چاه به صورت افقی

^۱ Stereonet

و در جهت NE-SW انجام شود. این موضوع به دلیل کمتر بودن تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه است. ناپایداریترین جهت برای حفاری که به بیشترین فشار گل نیاز دارند، جهت عمودی و یا حفاری انحرافی در راستای تنش افقی حداقل می‌باشد. زیرا هنگامی که چاه در راستای تنش افقی حداقل حفر می‌شود، راستای تنش افقی حداکثر عمود بر مسیر حفر چاه خواهد بود. به این ترتیب تمرکز تنش در اطراف چاه به نحوی خواهد بود که چاه را به سمت محدوده ریزش^۱ هدایت نماید. بنابراین احتمال وقوع شکست برشی بیشتر شده و در تمام فضای دیواره چاه، احتمال وقوع ناپایداری افزایش خواهد یافت. با توجه به مطالب ذکر شده در این بخش، پایدارترین حالت حفاری چاه در شرایط مذکور برای مخزن آسماری، در جهت تنش افقی حداکثر می‌باشد. این درحالی است که با تغییر مسیر حفاری در جهت تنش افقی حداقل، میزان احتمال وقوع ناپایداری در چاه افزایش چشم‌گیری می‌یابد.

۵- ۱۳ جمع بندی

در این فصل ابتدا مفاهیم مربوط به علم زمین آمار مورد بررسی قرار گرفت. سپس با معرفی نرم‌افزار پترل به عنوان یکی از بهترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی در صنایع گاز و نفت، به مدل‌سازی ژئومکانیکی سه‌بعدی مخزن آسماری میدان لالی پرداخته شد. طی این فرآیند ناهمسانگردی توزیع تنش و ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه مورد نظر ارزیابی قرار گرفت تا به کمک آن وزن بهینه گل حفاری با کمترین مشکلات تعیین گردد. در پایان این فصل پایداری چاه‌ها و میزان ریسک حفاری در بخش مورد مطالعه از میدان لالی بر اساس مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت راستای مناسب جهت حفر چاه مشخص گردید.

- مدل‌سازی زمین آماری به دلیل امکان ارائه کمیت خطا، عدم قطعیت و ارائه نتایج مطلوب زیرسطحی و در نهایت ایجاد یک مدل دقیق‌تر و واقع بینانه‌تر، می‌تواند گزینه مناسبی برای مدل‌سازی مخازن باشد.

^۱ Kick Zone

- مدل‌های حاصل از درونیابی به روش کریجینگ و شبیه‌سازی گوسی، روند یکسانی را برای تغییرات پارامترهای میدان نشان می‌دهند. اما در نتایج حاصل از روش کریجینگ، دقت بیشتری نسبت به روش گوسی متوالی مشاهده شد.
- با بررسی عوامل موثر در ساخت مدل ژئومکانیکی می‌توان نتیجه گرفت پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ، فشار منفذی، فشار سیال حفاری و در نهایت وضعیت تکتونیکی هریک به نوبه خود قادرند شرایط پایداری یک چاه را تحت تاثیر قرار دهند. لذا مطالعه دقیق نقش هر کدام در وقوع ناپایداری ضروری است.
- با توجه به این که محیط زمین یک محیط ناهمگن است، شبکه‌بندی مدل ساختاری تاثیر بسیار زیادی بر دقت مدل نهایی خواهد داشت.
- افزایش عرض پنجره ایمن گل در بخش‌هایی از مخزن را می‌توان تفسیری از کاهش ریسک حفاری در آن مناطق دانست. زیرا عرض پنجره ایمن گل، محدوده‌ی امن افزایش و یا کاهش فشار گل حفاری را تشکیل می‌دهد. کاهش عرض پنجره ایمن گل، کاهش آزادی عمل در زمان حفاری را به دنبال دارد.
- ناپایدارترین جهت برای حفاری که به بیشترین فشار گل نیاز دارند، در راستای کوچک‌ترین تنش اصلی در میدان می‌باشد. این موضوع به دلیل افزایش تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه می‌باشد.
- راستای حفاری مناسب جهت به حداقل رساندن ناپایداری، راستای بزرگترین تنش اصلی در میدان می‌باشد. زیرا در این حالت تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

فصل ۶: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۶-۱ جمع‌بندی و نتایج

هدف اصلی از این پژوهش ارزیابی پایداری چاه‌های مورد مطالعه در میدان لالی و فراهم‌سازی زمینه انتخاب راستای حفاری مناسب و کاهش مشکلات و هزینه‌های مربوط به آن می‌باشد. از مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش می‌توان به ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی، سه‌بعدی و بدست آوردن پارامترهای پتروفیزیکی و ژئومکانیکی مخزن آسماری در میدان نفتی لالی اشاره کرد. از مدل‌های ساخته شده طی این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی و مدیریت حفاری‌های آتی میدان لالی استفاده کرد. مدل ژئومکانیکی ساخته شده این قابلیت را دارد که با داده‌های حاصل از حفاری‌های جدید یا سایر چاه‌های حفاری شده برورسانی شده تا دیدگاه بهتری را از میدان نمایش دهد. نتایج بدست آمده در این پژوهش به شرح زیر است:

- با تخمین تنش توسط مدل ژئومکانیکی در بخشی از مخزن آسماری میدان لالی مشخص شد که رژیم تنش‌های برجا به صورت گسل معکوس تا امتداد لغز می‌باشد. با توجه به اینکه وجود گسل در میدان ثبت شده است، وضعیت تنش‌های معکوس در این منطقه کاملاً قابل پذیرش می‌باشد و با مطالعات قبلی در این منطقه هم‌خوانی دارد.
- بر اساس بررسی ناپایداری‌های مشاهده شده در نگارهای تصویری برخی چاه‌ها، راستای جهت تنش افقی حداکثر و حداقل در میدان لالی به ترتیب N040E و N310W بدست آمد. در نتیجه جهت تنش افقی حداکثر و حداقل به ترتیب عمده‌تا در جهت NE-SW و NW-SE می‌باشد.
- در مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی در میدان لالی نیاز به تخمین سرعت امواج برشی در مخزن وجود داشت. به منظور تخمین سرعت امواج برشی در سایر چاه‌های میدان لالی، روش‌های شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون، شبکه عصبی مدار شعاعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار به عنوان روش‌هایی مناسب انتخاب شدند. پس از انجام آزمون‌های مختلف توسط هر یک از روش‌ها در شرایط یکسان، سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار نسبت به دو

روش دیگر کمترین میزان خطا و بالاترین دقت در تخمین داده‌ها را نشان داد. نتایج بدست آمده در این پژوهش، کارآمد بودن این روش را در تخمین سرعت امواج برشی در مخزن به اثبات رسانید.

- در این پژوهش مشاهده شد که پردازش داده‌های حاصل از نگارهای پتروفیزیکی پیش از فرآیند تخمین امواج برشی، می‌تواند تاثیر چشم‌گیری در کاهش خطای مقادیر تخمین زده شده داشته باشد. همچنین به منظور جلوگیری از شرطی شدن (Overfit) و یا کاهش قدرت یادگیری (Underfit) شبکه، باید داده‌ها نرمال‌سازی و سپس به صورت اتفاقی به آن وارد شوند.
- با توجه به اینکه مدل‌های یک‌بعدی به خوبی تغییرات پارامترها را در راستای حفاری چاه نمایش می‌دهند، ابزار مناسبی برای ارزیابی و تحلیل پایداری چاه می‌باشند. اما این مدل‌ها قادر به نمایش ناهمسانگردی تغییرات افقی در میدان نیستند و جهت شناخت و بررسی کلی وضعیت میدان در راستاهای مختلف باید از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شود.
- با توجه به این که زمین یک محیط ناهمگن است، شبکه‌بندی مدل ساختاری تاثیر بسیار زیادی بر دقت مدل نهایی خواهد داشت. همچنین با توجه به اهمیت ابعاد شبکه در تعیین دقت مدل‌های خروجی، چندین مدل با ابعاد مختلف ساخته شد. در این فرآیند تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان مدل‌ها از نظر دقت و صحت خروجی‌ها مشاهده نگردید، اما زمان مدلسازی به صورت چشم‌گیری افزایش یافت. در نهایت آزمایش‌های مختلف نشان داد ابعاد 100×100 و ارتفاع ۱ متر، اندازه مناسبی برای سلول‌های تشکیل دهنده شبکه در سازند آسماری میدان لالی می‌باشد.
- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های ژئومکانیکی با داده‌های واقعی نشان می‌دهد که روش‌های زمین آماری، ابزار مناسبی برای ارائه تصویری سه‌بعدی از توزیع این متغیرها در سازند آسماری می‌باشند. علت عدم انطباق کامل میان نتایج مدلسازی با داده‌های واقعی را می‌توان عواملی از

جمله تعداد کم چاه‌های مورد مطالعه و یا توزیع نامناسب آن‌ها، شبکه‌بندی مدل ساختاری و خطای موجود در داده‌های ورودی مطرح کرد.

- مدل‌های حاصل از درون‌یابی به روش کریجینگ و شبیه‌سازی گوسی، روند یکسانی را برای تغییرات پارامترهای میدان نشان می‌دهند. اما در نتایج حاصل از روش کریجینگ، دقت بیشتری نسبت به روش گوسی متوالی مشاهده شد. از طرفی دیگر نتایج حاصل از روش گوسی متوالی، جزئیات ناهمگنی و تغییرات جزئی را با دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان هموارسازی داده‌ها در روش کریجینگ دانست.

- در صورتی که حجم داده‌های ورودی برای ساخت مدل ژئومکانیکی مناسب و موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در میدان به صورت پراکنده توزیع شده باشند، درون‌یابی به روش کریجینگ می‌تواند گزینه مناسبی برای تخمین داده‌ها باشد.

- بررسی‌های مخزن آسماری نشان داد در تمام زون‌ها با حرکت به سمت بخش‌های شمالی آن، محدوده پایدار افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل از مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، زون ۵ را می‌توان به عنوان پایدارترین و کم‌خطرترین زون از نظر وضعیت پایداری در دیواره چاه معرفی کرد. در مقابل زون ۶ که در پایین آن قرار دارد، بیشترین ناپایداری برشی را نشان می‌دهد. بخش‌های جنوبی زون‌های ۱ و ۲ و بخش‌های مرکزی زون ۳ و ۴ نسبت به سایر بخش‌ها ناپایداری بیشتری دارند. دلیل این امر را می‌توان با فشار گل حفاری توجیه نمود. همچنین در نواحی اطراف چاه ۲۹ در زون ۷ بیشترین ناپایداری بیش‌بینی شده است.

- مقایسه میان نتایج بدست آمده از معیار شکست‌های موهر کلمب، هوک براون و موگی کلمب با وقایع و داده‌های واقعی در میدان از جمله نگار قطرسنجی و نگار تصویری نشان داد که معیار شکست موهر کلمب توانایی بهتری در پیش‌بینی ناپایداری‌های رخ داده در چاه‌های میدان لالی دارد. همچنین این مقایسه خوش‌بینانه بودن تشخیص معیار شکست موگی کلمب در مقایسه با معیار موهر کلمب را تایید کرد. زیرا بر اساس معیار موگی کلمب، بیشتر چاه‌ها از نظر

گسیختگی دارای شرایط پایداری می‌باشند. این در حالی است که بررسی نگار قطرسنجی و تصویری، گسیختگی‌های متعددی در چاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.

- بررسی پنجره ایمن گل حفاری نشان داد که علت ناپایداری در چاه‌های مورد مطالعه انتخاب وزن گل، نامناسب است. حد پایین فشار گل محاسبه شده بر اساس مدل حاصل از معیار موهر کلمب نشان می‌دهد که در برخی از چاه‌های مورد مطالعه، فشار گل بکارگرفته شده برای جلوگیری از ناپایداری مناسب نمی‌باشد.
- عرض پنجره ایمن گل حفاری با حرکت به سمت مرکز مخزن آسماری کاهش می‌یابد. ناحیه ای که در مجاورت چاه ۳۱ قرار دارد کمترین عرض پنجره ایمن گل را در مخزن نشان می‌دهد. این روند در سایر زون‌های مخزن آسماری مشاهده شد. میانگین عرض پنجره ایمن گل در این ناحیه ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین در این مناطق باید وزن گل به دقت انتخاب شود. همچنین در صورت ایجاد گسیختگی‌های برشی در زمان حفاری، وزن گل باید با احتیاط افزایش یابد تا باعث بروز گسیختگی کششی در چاه نگردد. زون‌های ۷ و ۶ آسماری به ترتیب با میانگین ۲۲.۹۵ و ۳۲.۹۲ مگاپاسکال کمترین عرض پنجره ایمن گل را در مخزن دارند.
- از نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده می‌توان دریافت که مدل ژئومکانیکی به خوبی پاسخ گوی تحلیل سه بعدی پایداری دیواره چاه بوده و از تطابق قابل قبولی برخوردار است. بنابراین مدل ژئومکانیکی ابزاری توانمند در تحلیل پیش‌بینی پایداری چاه می‌باشد.
- با توجه به شرایط تنش در میدان لالی، راستای حفاری مناسب جهت به حداقل رساندن ناپایداری، راستای تنش افقی حداکثر (آزیموت ۴۰ درجه) می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادات

- مدل ژئومکانیکی وابستگی بسیار زیادی به حجم و کیفیت داده‌های ورودی دارد. عدم قطعیت

موجود در این داده‌ها، استفاده از روابط تجربی و عدم دسترسی به مغزه‌های حفاری جهت اعتبارسنجی محاسبات انجام شده می‌تواند بر ابهامات موجود در نتایج نهایی بیفزاید. بنابراین توصیه می‌شود نتایج بدست آمده از هر مرحله، در صورت امکان با نتایج مطالعات آزمایشگاهی مقایسه و کالیبره شوند.

- با توجه به نقش کلیدی سرعت امواج برشی در فرآیند ساخت مدل ژئومکانیکی، تهیه این نگار به طور مجزا برای هر چاه توصیه می‌شود.
- با افزایش تعداد چاه‌های مورد مطالعه و یا تغییر موقعیت آن‌ها نسبت به نقاط دارای تغییرات بنیادی، دقت مدل ژئومکانیکی بهتر خواهد شد. از آن جایی که مدل سه‌بعدی ساخته شده در این پژوهش، قابلیت بروزرسانی با داده‌های جدید حفاری را دارد، توصیه می‌شود که از تمام داده‌های بدست آمده از میدان برای بروزرسانی و توسعه آن استفاده شود.
- توصیه می‌شود تنش‌های تخمین زده شده حاصل از روابط پوروالاستیک به کمک نتایج حاصل از روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا در میدان اعتبارسنجی شود.
- سایر عوامل موثر بر ناپایداری چاه‌ها در میدان مورد مطالعه مورد بررسی قرار گیرند و میزان تاثیر پارامترهای مختلف ژئومکانیکی و زمین‌شناسی در ایجاد ناپایداری در چاه‌ها به کمک تحلیل حساسیت ارزیابی شود.
- در این پژوهش از میان معیارهای شکست، معیارهای هوک براون، موهر کلمب و موگی کلمب مورد بررسی قرار گرفتند. لذا توصیه می‌شود معیارهای دیگری از جمله معیار دراگر پراگر و معیار اصلاح شده لید مورد ارزیابی قرار گیرند.
- بهینه‌سازی مسیر چاه باید با در نظر گرفتن ملاحظات ژئومکانیکی (پایداری) و ملاحظات تراوایی (تولیدی) انجام شود.
- استفاده از روش‌های هوشمند و تلفیق داده جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در سه‌بعد در کنار استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی توصیه می‌شود.

- استفاده از مدل‌های ژئومکانیکی سه‌بعدی توامان مکانیکی-هیدرولیکی، مکانیکی-گرمایی و یا ترمو-هیدرومکانیکی، باعث به وجود آمدن شناخت دقیقی از میادین شده و طراحی بهینه و پایدار را در طول عمر میدان نتیجه می‌دهد. از این‌رو پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی از مدل‌های توامان استفاده شود.

مراج

آشتیانی عبدی هادی؛ قنبری علی؛ بهلولی بهمن و کاظم شیروودی سجاد. (۱۳۸۷). طراحی وزن گل حفاری با توجه به ژئومکانیک سازند به منظور پایداری دیواره چاه. اولین کنگره ملی صنعت حفاری ایران

آشتیانی عبدی هادی. (۱۳۸۹). دانش نوپای ژئومکانیک مخازن هیدروکربنی جمع آوری داده‌ها و تشکیل مدل مکانیکی زمین. ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۶۶(۶۶)
امانی‌پور حکیمه؛ صادقی حسین؛ غفوری محمد و لشکری‌پور غلامرضا (۱۳۹۱). تعیین مدل ژئومکانیکی لایه مخزنی بنگستان میدان نفتی منصوری. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده علوم

امیدوار آزاده؛ کمالی محمدرضا و کاظم زاده عزت اله. (۱۳۹۲). شبیه سازی سه بعدی استاتیکی و تخمین پارامترهای مخزنی با به کارگیری روشهای زمین آماری در یکی از مخازن ایران. پژوهش نفت، ۲۳(۷۵)

بهزاد رامین؛ رفیعی بهروز؛ رحیمی زهرا؛ محسنی حسن و ظهرا ب زاده موسی. (۱۳۸۹). مدلسازی سه بعدی مخازن کربناته با استفاده از زمین آمار؛ مطالعه موردی برای تخمین تخلخل در میدان A حوضه زاگرس (ایران). پژوهش های چینه نگاری و رسوب شناسی، ۲۶(۴): ۱۲۵-۱۴۲.
پورقاسم ب. (۱۳۸۷). مطالعه مخزن آسماری میدان لالی، گزارش ۶۲۰۶، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.

پیامنی کیومرث؛ کدخدایی علی؛ حمدی بهالدین؛ حسنی گیو محمد و رشیدی نژاد آوا. (۱۳۹۲). مدل سازی سه بعدی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش های زمین آماری در یکی از میادین گازی در خلیج فارس. زمین شناسی کاربردی پیشرفته

پیرایه گر آتنا؛ مهرگینی بهزاد و معماریان حسین. (۱۳۸۸). نگاهی بر گستره رو شهای تخمین سرعت موج برشی از روابط تجربی تا محاسبات هوشمند. ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۶۳: ۷۰-۷۹.

تخم چی بهزاد؛ محمد لطفی؛ حمید صیفی و مریم سادات حسینی. (۱۳۹۵). ترکیب اطلاعات، رویکردی نوین جهت تصمیم گیری در زمین شناسی، مهندسی معدن و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

تخم چی بهزاد (۱۳۹۵). ترکیب اطلاعات رویکردی نوین جهت تصمیم گیری در زمینشناسی. تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

ترابی خواه مسعود؛ احمد رمضان زاده؛ بهزاد تخم چی و عبدالله ملقب. (۱۳۹۴). ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی در میدان نفتی آغاچاری (مطالعه موردی). اولین کنفرانس ژئومکانیک نفت ترابی خواه مسعود؛ رمضان زاده احمد؛ تخم چی بهزاد و رسولی وامق. (۱۳۹۳). مدل ژئومکانیکی سه بعدی، ابزاری کاربردی در توسعه میادین نفت و گاز. سومین کنفرانس علمی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی

ترابی خواه مسعود؛ رمضان زاده احمد؛ تخم چی بهزاد و ملقب عبدالله. (۱۳۹۳). تعیین راستای بهینه جهت حفر چاه های افقی بر اساس مدل ژئومکانیکی سه بعدی مخزن، در یکی از میادین مناطق نفت خیز جنوب.، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده معدن و ژئوفیزیک

تقی زاده صابر و آبدیده محمد. (۱۳۹۲). طراحی مدل ژئومکانیکی و تعیین محدوده پنجره ایمن گل حفاری درسازندهای تولیدی یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از داده های لرزه نگاری سه

بعدی. هشتمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران
حسنی پاک علی اصغر. (۱۳۹۲). زمین آمار (ژئواستاتستیک): دانشگاه تهران، موسسه انتشارات و چاپ.
خسروی یونس و عباسی اسماعیل. (۱۳۹۵). تحلیل فضایی داده های محیطی با زمین آمار، آذر کلک.
رحیمی رضوان؛ باقری محمود و مسیحی محسن. (۲۰۱۵). مشخصه سازی و تخمین خواص مخزنی یکی از مخازن کربناته ی جنوب ایران با استفاده از روش های زمین آماری (کریجینگ). ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۲۶ (۱۲۶): ۷۶-۸۳.

رضانی عظیم؛ علوی احمد، و طالبی حسین. (۱۳۸۹). تحلیل ساختاری و شکستگی های میدان نفتی لالی (جنوب غربی ایران). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.

رنجبر علی؛ حسنی حسین و شهریار کورش. (۱۳۹۴). ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی مخزن فلهیان در یکی از میادین جنوب غرب ایران. اولین کنفرانس ژئومکانیک نفت

سعیدی مهرداد؛ منصوری اصفهانی مهین؛ باغبانان علیرضا و هاشم الحسینی سیدحمید. (۱۳۹۶). مدلسازی ژئومکانیکی سه بعدی مخزن و تحلیل پایداری دیواره چاه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مطالعه موردی یکی از چاه های میدان نفتی مارون، اهواز، دولتی - وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده معدن.

سید سجادی شهرزاد و عقیقی محمدعلی. (۱۳۹۴). ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان در میدان کوپال. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، ۱۰(۲۶): ۲۱-۳۴.

شریفی جواد؛ میرزاخانیاں مرضیه؛ سکوتی دیارجان محمدرضا و حافظی مقدس ناصر. (۱۳۹۵). مطالعه موردی ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی جهت اهداف حفاری. ششمین همایش علمی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی

عزتی محسن؛ عزیززاده مهران؛ ریاحی محمدعلی و فتاح پور وحیدالدین. (۱۳۹۷). مدل سازی سه بعدی پارامترهای پایداری چاه در مخزن سروک یکی از میادین جنوب غرب ایران. سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

عسگری رامین، حیدری زاده محمد، معماریان حسین. بررسی پایداری چاه و تعیین بازه ی وزن گل حفاری با استفاده از روش NYZA در یکی از میادین نفتی جنوب ایران. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. ۱۳۹۶؛ ۱۳۹۶ (۱۴۶): ۵۹-۶۵

عین الهی علی و موسوی میررضا. (۱۳۸۷). محیط رسوبی، دیاژنز و خصوصیات مخزنی سازند آسماری در میدان نفتی لالی (شمال غرب مسجد سلیمان). وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده علوم زمین

فیضی رسول؛ وثوقی بهزاد و غفاری رزین میررضا. (۱۳۹۸). مدل سازی سری های زمانی تغییرات محتوای الکترون کلی یونسفر با بکارگیری روش عددی سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار مطالعه خاص: ایستگاه دائمی GPS تهران. علوم و فنون نقشه برداری

کیانی زاده نسرین؛ زمانی بهزاد؛ کدخدایی علی و طالبی حسین. (۱۳۹۵). مدل سازی ساختاری و برآورد تنش های تکتونیکی میدان نفتی لالی در فروافتادگی دزفول. زمین شناسی نفت ایران، ۶(۱۲) محمودی ح. (۱۳۹۱). مطالعه تکمیلی و تهیه مدل زمین شناسی مخزن بنگستان میدان لالی گزارش شرکت مناطق نفت خیز جنوب.

مطیعی همایون. (۱۳۷۴). زمین شناسی نفت زاگرس: سازمان زمین شناسی کشور.

مطیعی همایون. (۱۳۸۷). زمین شناسی نفت سنگ های کربناتی ۱ و ۲: آراین زمین.

مناطق نفت خیز جنوب شرکت. (۱۳۹۳). گزارش زمین شناسی.

نجیبی علیرضا؛ غفوری محمد؛ لشکری پور غلامرضا و آصف محمدرضا. (۱۳۹۶). تعیین مدل سه بعدی ژئومکانیک مخزن نفتی با استفاده از داده های دینامیکی در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران. دکتری تخصصی، دانشگاه فردوسی مشهد.

یوسفی سید علیرضا؛ مهرگینی بهزاد و معماریان حسین. (۱۳۹۴). استخراج خصوصیات ژئومکانیکی از اطلاعات لرزه ای جهت ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی. اولین کنفرانس ژئومکانیک نفت

یوسفی سید علیرضا، مهرگینی بهزاد، نوروزی غلامحسین، معماریان حسین. ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی با استفاده از داده های لرزه ای. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. ۱۳۹۳؛ ۶۴-۵۶: (۱۱۳) ۱۳۹۳

- Abdideh Mohammad & Alisamir Sina. (2018). Analysis of deep stress field using well log and wellbore breakout data: a case study in Cretaceous oil reservoir, southwest Iran. *Geodesy and Cartography*, 113-128.
- Abraham Ajith. (2005). Adaptation of fuzzy inference system using neural learning *Fuzzy systems engineering* (pp. 53-83): Springer.
- Addis Tony 'Last Nigel 'Boulter David 'Roca-Ramisa Luis&Plumb Dick. (1993). The quest for borehole stability in the Cusiana field, Colombia. *Oilfield Review*
- Afsari M. . (2007). *Wellbore Stability Analysis Using Mechanical Earth Model (MEM) in One of the Iranian Oil Field* Master, Islamic Azad University Sciences and Research Branch.
- Afsari Meisam 'Ghafoori Mohammadreza 'Roostaeian Mohammad 'Haghshenas Ashkan 'Ataei Abdolrahim & Masoudi Rahim. (2009). *Mechanical Earth Model (MEM): an effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (Case Study)*. the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference.
- Al-Ajmi Adel. (2006). *Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion*. , KTH.
- Al-Ruwaili, S.B., & Chardac, O. (2003, April). 3D Model for Rock Strength & In-Situ Stresses in the Khuff Formation of Ghawar Field, Methodologies & Applications. Paper Presented at the SPE 13th Middle East Oil Show & Conference.
- Alsos, T., Eide, A., Astratti, D., Pickering, S., Benabentos, M., Dutta, N., ... Stronen, L.K. (2002). Seismic applications throughout the life of the reservoir. *Oilfield Review*, 14 (2), 48-65.
- Al-Wardy Widad Mohd & Portillo Oscar E. (2010). *Geomechanical modelling for wellbore stability during drilling Nahr Umr shales in a field in petroleum development Oman*. the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference.
- Akbar Ali, A.H., Brown, T., Delgado, R., Lee, D., Plumb, D., Smirnov, N., ... Stouffer, T. (2003). Watching rocks change – mechanical earth modeling. *Oilfield Review*, 15 (1), 22-39..

- Akbar Ali, A.H., Marti, S., Esa, R., Ramamoorthy, R., Brown, T., & Stouffer, T. (2001). Advanced hydraulic fracturing using geomechanical modeling and rock mechanics—an engineered integrated solution. Paper Presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia.
- Amadei, B. and Stephansson, O., 1997. *“Rock Stress and Its Measurement.”* Springer.
- Ameen Mohammed S ‘Smart Brian Gd ‘Somerville J Mc ‘Hammilton Sally & Naji Nassir A. (2009). Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). *Marine and Petroleum Geology*.
- Ansari Sajjad Ahmed ‘Haigh Robert Russell ‘Khosravi Nader ‘Khan Safdar ‘Han Hongxue & Vishteh Morteza Rahimi. (2012). *Caprock Integrity Case Study for Nonthermal Polymer Flooding Project Using 4D Reservoir Coupled Geomechanical Simulation*. the SPE Heavy Oil Conference Canada.
- Archer S & Rasouli V. (2012). A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin. *WIT Transactions on Engineering Sciences*.
- Asoodeh M. (2013). Prediction of Poisson's ratio from conventional well log data: a committee machine with intelligent systems approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- Barton Colleen A ‘Zoback Mark D & Burns Kerry L. (1988). In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton Geothermal Site, New Mexico, determined from wellbore breakouts. *Geophysical Research Letters*.
- Basheer Imad A & Hajmeer Maha. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of microbiological methods*, 43 (1): PP 3-31.
- Bowes C & Procter R. (1997) Drillers stuck pipe handbook, 1997 guidelines & drillers handbook credits. *Schlumberger, Ballater, Scotland*.
- Brudy Mo & Zoback Mod. (1999). Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (2): 191-215.
- Castagna John P ‘Batzie Michael L & Eastwood Raymond L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *geophysics*, 50 (4): 571-581.
- Chardac Olivier ‘Murray Doug ‘Carnegie Andrew John G & Marsden Robert. (2005). *A proposed data acquisition program for successful geomechanics projects*. the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference.

- Chen Xi 'Tan Chee P & Haberfield Chris M. (2002). A comprehensive, practical approach for wellbore instability management. *SPE drilling & completion*.
- Clifton Peter M & Neuman Shlomo P. (1982). Effects of kriging and inverse modeling on conditional simulation of the Avra Valley aquifer in southern Arizona. *Water Resources Research*, 18 (4): 1215-1234.
- Correa Antonio Claudio Franca 'Newman Robert Bourne 'Naveira Vanessa Palma 'De Souza Antonio Luiz Serra 'Araujo Tales 'Da Silva Alexandre Augusto Cardoso 'Soares Antonio Claudio 'Herwanger Jorg Volker & Meurer Gustavo Bechara. (2013). *Integrated modeling for 3D geomechanics and coupled simulation of fractured carbonate reservoir*. the Otc Brasil.
- Deutsch Cv. (2002). Geostatistical reservoir modeling: Oxford University Press, 376PP.
- Dutta Dipankar 'Nair Cholanmcottu V Gopalakrishnan 'Zhang Xing 'Khan Khaqan 'Hussein Assef Mohamad 'Yaser Muhammad 'Press David John 'Al-Khalifa Nasser 'Faldi Eman & Koutsabeloulis Nick. (2011). *A 3D coupled reservoir geomechanics study for pressure, water production, and oil production simulation: application in Umm-Gudair Field, West Kuwait*. the SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition.
- Eaton Ben A. (1975). *The equation for geopressure prediction from well logs*. the Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME.
- Eissa Ea & Kazi A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*.
- Eskandari H 'Rezaee Mr & Mohammadnia M. (2004). Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from wireline log data for a carbonate reservoir South-West Iran. *CSEG recorder*.
- Feng Jianwei & Gu Kaikai. (2017). Geomechanical Modeling of Stress and Fracture Distribution during Contractional Fault-Related Folding. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5 (11):61.
- Fernandez-Ibanez Fermin 'Cardona Felipe 'Holland Marc 'Araujo Ewerton Mp 'Brudy Martin 'Alvarelllos Jose 'Ordonez Luz Yamile & Mateus Darwin Clemente. (2010). *3D Geomechanical Modeling for the Apiay and Suria Oil Fields (Llanos Orientales Basin, Colombia): Insights on the Stability of Reservoir-Bounding Faults*. the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference.
- Fischer K & Henk A. (2013). A workflow for building and calibrating 3D geomechanical models—a case study for a gas reservoir in the North German Basin. *Solid Earth*, (2): 347-355.

- Fjaer E 'Holt Rm 'Horsrud P 'Raaen Am & Risnes R. (2008). Geological aspects of petroleum related rock mechanics. *Developments in petroleum science*,53: PP103-133.
- Goodman Harvey Edwin & Connolly Peter. (2007). Reconciling subsurface uncertainty with the appropriate well design using the mechanical Earth model (MEM) approach. *The Leading Edge*,26 (5): 585-588.
- Gurney Kevin. (1997). *An introduction to neural networks*: CRC press.
- Han De-Hua 'Nur Amos & Morgan Dale. (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *geophysics*,51 (11): 2093-2107.
- Han Hongxue 'Khan Safdar 'Ansari Sajjad Ahmed & Khosravi Nader. (2012). *Prediction of injection induced formation shear*. the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control.
- Holden Lars 'Mostad Petter 'Nielsen Bjørn Fredrik 'Gjerde Jon 'Townsend Chris & Ottesen Signe. (2003). Stochastic structural modeling. *Mathematical geology*, 35 (8): 899-914.
- Holland M 'Brudy M 'Van Der Zee W 'Perumalla S & Finkbeiner T. (2010). *Value of 3D Geomechanical Modeling in Field Development-A New Approach Using Geostatistics*. the SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition.
- Hudson John A & Harrison John P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*: Elsevier.
- Jang Jyh-Shing Roger. (1991). *Fuzzy modeling using generalized neural networks and kalman filter algorithm*. the AAAI.
- Johnson David Earl & Pile Kathryne E. (2002). *Well logging in nontechnical language*: PennWell Books.
- Kadyrov Tlek & Tutuncu Azra N. (2012). *Integrated wellbore stability analysis for well trajectory optimization and field development in the West Kazakhstan Field*. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- King M Soo. (1983). Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield. *Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs*.
- Klimentos, T. & Schlumberger (2005, November). Optimizing drilling performance by wellbore stability and pore-pressure evaluation in deepwater exploration. Paper Presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar
- Koutsabeloulis Nick & Zhang Xing. (2009). *3D reservoir geomechanical modeling in oil/gas field production*. the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium.

- Lama Rd & Vutukuri Vs. (1978). Handbook on mechanical properties of rocks: Series on Rock and Soil Mechanics, *Trans Tech Publications, Clausthal, Germany*.
- Le K & Rasouli V. (2012). Determination of safe mud weight windows for drilling deviated wellbores: a case study in the North Perth Basin. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 81: 83-95.
- Lee Dw & Adachi J & Waggoner J & Holicek J & Flack B & Fauquier M & J Holland J. (2013). *Quantifying Reservoir Compaction in an Unconsolidated Pliocene Reservoir Using Time-Lapse Seismic, Continuous Downhole Pressure Monitoring, and 3D Finite Element Modeling*. the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- Maleki Shahoo & Gholami Raoof & Rasouli Vamegh & Moradzadeh Ali & Riabi Reza Ghavami & Sadaghzadeh Farhad. (2014). Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weight window in drilling practice. *Earth-Science Reviews*, 136: 36-58.
- McLellan Pj. (1996). Assessing the risk of wellbore instability in horizontal and inclined wells. *Journal of Canadian Petroleum Technology*,.
- Mitchell, Douglas W. (2004). "More on spreads and non-arithmetic means". *The Mathematical Gazette*. 88: 142–144
- Moos D & Peska P & Zoback Md. (1998). *Predicting the stability of horizontal wells and multi-laterals– The role of in situ stress and rock properties*. the SPE International conference on horizontal well technology.
- Morales Rh & Marcinew Rp. (1993). *Fracturing of high-permeability formations: Mechanical properties correlations*. the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Morita Nobuo & Whitebay Lee. (1994). *Rock mechanics aspects of drilling and completing highly inclined wells in weak formations*. the University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium.
- Onyia Ec. (1988). *Relationships between formation strength, drilling strength, and electric log properties*. the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Pašić Borivoje & Gaurina Međimurec Nediljka & Matanović Davorin. (2007). Wellbore instability: causes and consequences. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 87-98.
- Patiño Gs & Saucedo Nr & Naveja Fa & Rabe C. (2011). *Use of a neural network to build a 3D rock property model for a geomechanical model to optimize multi-stage fracture design in Chicontepec Basin, Mexico*. the 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- Peng L.R., Kurt Hilarides, w., Wetzel, R.J., & Sweep, M.N. (2007, December). Mechanical earth model calibration for sanding potential estimation: a case study from the tombua-landana development in

- angola's deepwater block 14. Paper Presented at the International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E.
- Perfetto R 'Saldungaray P 'Martocchia F 'Ceccarelli Rl 'Lorefice R 'Rinaldi F 'Tealdi L & Dalmaso P. (2013). *Fracture Optimization Applying a Novel Traceable Proppant and a Refined Mechanical Earth Model in the Congo Onshore*. the IPTC:2013 International Petroleum Technology Conference.
- Pickett George R. (1963). Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum technology*, (06): 659-667.
- Plumb Ra. (1994). *Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks*. the Rock Mechanics in Petroleum Engineering.
- Plumb Richard 'Edwards Stephen 'Pidcock Gary 'Lee Donald & Stacey Brian. (2000). *The mechanical earth model concept and its application to high-risk well construction projects*. the IADC/SPE Drilling Conference.
- Press David John & Mei Pc. (2014). *Integration of Geological & Coupled 3D Geomechanical Modeling to Evaluate Gas Injection Risk-A Due Diligence Study Prior to iWAG Injection Development*. the Second EAGE/SPE/AAPG Shale Gas Workshop in the Middle East.
- Qiu Kaibin 'Cheng Ning 'Ke Xiangui 'Liu Yang 'Wang Lirong 'Chen Yingru 'Wang Yong & Xiong Pi. (2013). *3D reservoir geomechanics workflow and its application to a tight gas reservoir in western China*. the IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference.
- Qiu Kaibin 'Yamamoto Koji 'Birchwood Richard Anthony 'Chen Ying Ru 'Wu Chuan 'Tan Chee Phuat & Singh Vasudev. (2012). *Evaluation of fault re-activation potential during offshore methane hydrate production in Nankai Trough, Japan*. the Offshore Technology Conference.
- Rahim, Z., Al-Qahtani, M.Y., Bartko, K.M., Goodman, H., 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. Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, U.S.A.
- Ray, P.L., Goodman, H.E. & Perrin, V.P. (1998, November). Application of rock mechanics to HPH and horizontal well drilling and completion: A case study. Paper Presented at the 6 th international oil and gas conference and exhibition, China, Beijing.
- Ramakrishnan Hariharan 'Peza Eva A 'Sinha Shekhar 'Woods Miriam A 'Ikeocha Chris 'Mengel Flemming A 'Simon Yves 'Pearce Paul 'Kiester Jeff A & Mcketta Steven F. (2011). *Understanding and*

- predicting fayetteville shale gas production through integrated seismic-to-simulation reservoir characterization workflow.* the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Rivero Jose A ‘Coskuner Gokhan ‘Asghari Koorosh ‘Law David Hin-Sum ‘Pearce Andrew ‘Newman Robert ‘Birchwood Richard Anthony ‘Zhao John & Ingham Jonathan Paul. (2010). *Modeling CHOPS using a coupled flow-geomechanics simulator with nonequilibrium foamy-oil reactions: A multiwell history matching study.* the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Rzhevskii Vladimir Vasil’Evich & Novik Gottfried. (1971). *The physics of rocks:* Mir Publishers.
- Sarda Jp ‘Kessler Nicolas ‘Wicquart Emmanuelle ‘Hannaford Kevin & Deflandre Jp. (1993). *Use of porosity as a strength indicator for sand production evaluation.* the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Sayers Colin Michael ‘Den Boer Lennert ‘Lee Donald W ‘Hooyman Patrick James & Lawrence Roland Patrick. (2006). *Predicting reservoir compaction and casing deformation in deepwater turbidites using a 3D mechanical earth model.* the International Oil Conference and Exhibition in Mexico.
- Schlumberger. (2009) Schlumberger, Property Modeling Course. In Schlumberger (Ed.),.
- Serajian V ‘Diessl J ‘Bruno Ms ‘Hermansson Lc ‘Hatland J ‘Risanger M & Torsvik M. (2016). *3D Geomechanical Modeling and Fault Reactivation Risk Analysis for a Well at Brage Oilfield, Norway.* the SPE Europec featured at 78th EAGE Conference and Exhibition.
- Shakib Jaber Taheri ‘Jalalifar Hossein & Akhgarian Ebrahim. (2013). Wellbore stability in shale formation using analytical and numerical simulation. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tehran*, (1): 51-60.
- Simangunsong Roly ‘Villatoro Jaime J & Davis Aaron Keith. (2006). *Wellbore stability assessment for highly inclined wells using limited rock-mechanics data.* the SPE annual technical conference and exhibition.
- Sirat M ‘Zhang X ‘Xi G ‘Ni Q & Mohamad-Hussein A. (2014). *Methodology and Implications for Natural Fracture Network Modelling in a Carbonate Reservoir of Abu Dhabi.* the IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference.
- Taghipour Majid ‘Ghafoori Mohammad ‘Lashkaripour Gholam Reza ‘Moghaddas Nasser Hafezi & Molaghab Abdullah. (2019). Estimation of the current stress field and fault reactivation analysis in the Asmari reservoir, SW Iran. *Petroleum Science*, (3): 513-526

- Takagi Tomohiro & Sugeno Michio. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 116-132.
- Torres Villalobos Manuel Ernesto ‘Frydman Marcelo ‘Casalis Daniel Jorge ‘Ramirez Alexander ‘Leon C ‘Fernanda Maria & Villalba Enrique. (2005). *3D Analysis for Wellbore Stability: Reducing Drilling Risks in Oriente Basin, Ecuador*. the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference.
- Valcarce, G.Z., Zapata, T., Ansa, A., & Selva, G., (2006). Three-dimensional structural modeling and its application for development of the El Porto’n field, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 307-319
- Vann John ‘Bertoli Olivier & Jackson Scott. (2002). *An overview of geostatistical simulation for quantifying risk*. the Proceedings of Geostatistical Association of Australasia Symposium" Quantifying Risk and Error.
- Venkatesh Anantharamu T. N. Singh, Reddy Venkat. (2011). Stability of horizontal oil well - A Jointed Rock model approach. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*.
- Wendt, A.S., Kongslien, M., Sinha, B.K., Vissapragada, B., Newton, A., Schlumberger, ... Pedersen, E.S. (2007, November). Advanced mechanical earth modelling and wellbore stability calculations using advanced sonic measurements-a case study of the HP/HT Kvitebjorn field in the Norwegian North sea. Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A..
- Widarsono B ‘Wong Pm ;Saptono F. (2001). *Estimation of rock dynamic elastic property profiles through a combination of soft computing, acoustic velocity modeling, and laboratory dynamic test on core samples*. the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition.
- Wsm. (2020). World Stress Map. Website: www.world-stress-map.org/beta/.
- Xie Jun ‘Qiu Kaibin ‘Zhong Bing ‘Pan Yuanwei ‘Shi Xuewen & Wang Lizhi. (2018). Construction of a 3D geomechanical model for development of a shale gas reservoir in the Sichuan basin. *SPE drilling & completion*, 33 (04): 275-297.
- Yale Dp. (1994). *Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma fields, Kansas*. the SPE Mid-Continent Gas Symposium.
- Yasar E & Erdogan Y. (2004). Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 871-875.

- Zisman Wa. (1933). Comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 19 (7): 680
- Zoback M. (2007). Reservoir Geomechanics, Cambridge Univ: Press.
- Zoback Mark D. (2010) *Reservoir geomechanics*: Cambridge University Press.
- Zoback Mark D ‘Moos Daniel ‘Mastin Larry & Anderson Roger N. (1985). Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, (B7):5523- 5530.

Abstract

The exploitation of oil resources is associated with many challenges and costs that most of them are related to drilling operations. Wellbore drilling is one of the main processes of exploration, evaluation, and development of oil and gas reservoirs and is always presented as one of the main challenges in the upstream industries. One of the main concerns in the drilling industry is the stability of wells and determining the optimal weight of drilling mud. The purpose of this research is to evaluate the stability of the studied wells in the Lali field and to provide the basis for selecting the best drilling direction and reducing the problems and costs associated with it. In order to determine the safe mud window and to provide the basis for selecting the best drilling direction, the status of factors such as stress conditions, tectonic factors, and geomechanical parameters and physical characteristics of the reservoir rock should be evaluated. One-dimensional models show the parameters' changes in the direction of the wellbore drilling properly but are not able to show the anisotropy of horizontal changes in the field. Therefore, in this research, three-dimensional geomechanical modeling has been used to identify and investigate the general condition of the field in different directions. In this thesis, the relevant studies on geomechanical considerations of well stability evaluation have been performed. Then, the data are collected in the Lali field, and based on them, the one-dimensional geomechanical model of the intended wells is constructed. Then, a geomechanical model has been developed for the Asmari reservoir of the Lali field to evaluate the anisotropy of effective stress distribution and geomechanical properties of the region. Construction of a three-dimensional structural model, gridding, magnification of data scale, and finally, expansion of obtained parameters from one-dimensional geomechanical models in a part of the Lali field reservoir is one of the steps that have been done to build the three-dimensional geomechanical model. by using Columbus's Mohr criterion as a failure criterion that is more adjustment with the events of the study field, the stability status of wells and drilling risk in the reservoir has been evaluated. Finally, the optimal direction for wellbore drilling in the Asmari reservoir of Lali field is determined. The cause of instabilities and failures in the wells in this research has been distinguished from inappropriate mud weight selection. According to the fluid pressure used for drilling many wells in the Asmari reservoir of the Lali field is low and close

to the critical mud pressure, with small changes, this pressure has got out of the safe mud window and the wellbore wall position closes to rupture. According to the geomechanical model, the safe window width of the drilling mud is reduced by moving towards the center of the Asmari reservoir. This trend was observed in other areas of the Asmari reservoir. Therefore, in these areas, the weight of the mud must be carefully selected. Zones 7 and 6 of Asmari, with an average of 95.22 and 92.32 MPa, respectively, have the lowest safe mud window width in the tank. According to the stress conditions in Lali field, which was obtained as reverse fault along strike slip, the most stable drilling direction to minimize instability is the direction of maximum horizontal stress (N040E).

Keywords (5 to 7 keywords): Three-dimensional geomechanical model, geological model, safe mud window, well instability, failure criterion, Adaptive neuro-fuzzy inference system, Lali field.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

**Wellbore stability analysis and determining the mud
weight of drilling to ascertain the orientation of wellbore
drilling based on 3D Geomechanical modeling in the
Asmari reservoir of the Lali field**

By: Mehdi Allameh

Supervisor:
Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Advisor:
Dr. Behzad Tokhmechi
Hassan Shojaie

February 2020