

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی نفت-حفاری

عنوان

تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین راستای بهینه حفاری در مخازن با شکستگی بالا در یکی از میادین جنوب غربی ایران

نگارنده

محمدرضا حاج سعیدی صادق

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان زاده

دکتر بهزاد تخم چی

استاد مشاور

دکتر مهدی نوروزی

مهندس محمدرضا پرهیزگار

تابستان ۱۳۹۷

شماره: ۹۷۳۰۵۱
تاریخ: ۹۷/۴/۱۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمدرضا حاج سعیدی صادق با شماره دانشجویی ۹۳۳۲۷۵۴ رشته مهندسی نفت گرایش حفاری تحت عنوان تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین راستای بهینه حفاری در مخازن با شکستگی بالا در یکی از میادین جنوب غربی ایران که در تاریخ ۹۷/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۶ درجه خوب) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر احمد رمضان زاده	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر بهزاد تخم چی	۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر مهدی نوروزی	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مرزئی جوادی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سجاد نoghayan	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

قدردانی

چکیده

مخازن شکافدار عمده مخازن نفتی ایران را تشکیل می‌دهند؛ در عین حال از پیچیدگی‌های زیادی جهت مدلسازی و تحلیل برخوردار می‌باشند. با توجه به ماهیت مخازن شکافدار و تاثیر فرآیندهای تکتونیکی و دیاژنزی بر این مخازن، شکستگی‌ها و ناهمگونی‌های زیادی در این نوع مخازن وجود دارد که مدلسازی را با مشکل مواجه می‌کند. در مخازنی که شکستگی به صورت گسترده مشاهده نمی‌شوند، معمولاً با ساده سازی اثر شکستگی‌ها، می‌توان مطالعات مورد نیاز را انجام داد. اما چشم پوشی از شکستگی‌های گسترده در مخزن، نتایج را به طور جدی تحت شعاع قرار می‌دهد. در این پژوهش به بررسی و مطالعه میزان تراوایی و پایداری دیواره چاه در یکی از چاه‌های میدان پارسا پرداخته شده است. این میدان به دلیل شرایط تکتونیکی، تراکم شکستگی بالایی دارد. در این مطالعه ابتدا به کمک لاگ‌های پتروفیزیکی به محاسبه پارامترهای مکانیک سنگی مخزن پرداخته شد و پنجره ایمن گل حفاری بدست آمد. سپس به کمک نگار تصویری (*FMI*) شکستگی‌های دیواره چاه برداشته شد و به کمک نرم افزار *Dips* مورد ارزیابی و دسته بندی قرار گرفت و به کمک نرم افزار *EasyFit* بررسی آماری شکستگی‌ها انجام شد. در ادامه شبکه شکستگی مجزا (*DFN*)، ساخته شد. در مرحله بعد با ساخت مدل مرجع (*REV*)، مقدار تراوایی سنگ محاسبه و با مقدار اندازه گیری شده واقعی مقایسه شد. این مقایسه انطباق خوب مدل ساخته شده با واقعیت را نشان می‌دهد. در پایان به منظور بررسی ضرورت مدلسازی شبکه شکستگی مجزا در مخازن شکافدار، به کمک مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی میزان تراوایی و پایداری دیواره چاه پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد چشم پوشی از شکستگی‌ها و ساده سازی در مدلسازی مخازن شکافدار می‌تواند موجب نتیجه‌گیری متفاوت و اشتباه در اینگونه مخازن شود.

کلمات کلیدی: مخازن شکافدار طبیعی، شبکه شکستگی مجزا، تراوایی، پایداری دیواره چاه، ساخت مدل

ژئومکانیکی، مدل مرجع

فهرست مطالب

چ	فهرست تصاویر
ذ	فهرست جداول
۱	۱ کلیات پایان نامه
۱	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ ضرورت تحقیق
۳	۱-۳ هدف از تحقیق
۴	۱-۴ سابقه تحقیق
۵	۱-۵ روش تحقیق پژوهش
۶	۱-۶ ساختار پایان نامه
۹	۲ ناپایداری چاه و عوامل موثر آن
۹	۲-۱ مقدمه
۱۰	۲-۲ انواع ناپایداری دیواره چاه
۱۰	۲-۲-۱ ناپایداری با منشاء شیمیایی
۱۱	۲-۲-۲ ناپایداری با منشاء مکانیکی
۱۱	۲-۳ عوامل غیرقابل کنترل
۱۲	۲-۳-۱ شکستگی های طبیعی و گسل
۱۲	۲-۳-۲ سازندهای فعال تکتونیکی

۱۳	.....	۲-۳-۳	چینه شناسی
۱۵	.....	۲-۴	عوامل قابل کنترل
۱۵	.....	۲-۴-۱	فشار گل حفاری
۱۷	.....	۲-۴-۲	شیب و آزمونت چاه
۱۸	.....	۲-۴-۳	لرزش لوله حفاری
۱۸	.....	۲-۴-۴	دمای سیال حفاری
۱۸	.....	۲-۵	انواع گسیختگی
۱۸	.....	۲-۵-۱	گسیختگی برشی
۱۹	.....	۲-۵-۲	گسیختگی کششی
۱۹	.....	۲-۶	پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه
۲۰	.....	۲-۷	حفاری انحرافی
۲۵	.....	۲-۸	هرزروی گل حفاری
۲۵	.....	۲-۸-۱	کنترل پیشگیرانه
۲۶	.....	۲-۸-۲	کنترل اصلاحی
۲۷	.....	۲-۹	جمع‌بندی
۲۹	.....	۳	مخازن شکافدار و جریان سیال در آن
۲۹	.....	۳-۱	مقدمه
۳۰	.....	۳-۲	روش‌های مدل‌سازی مخزن شکافدار
۳۰	.....	۳-۲-۱	روش پیوسته یگانه
۳۱	.....	۳-۲-۲	روش پیوسته دوگانه
۳۳	.....	۳-۲-۳	روش شکستگی مجزا
۳۵	.....	۳-۳	خصوصیات شکستگی‌های طبیعی
۳۶	.....	۳-۳-۱	توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها
۳۶	.....	۳-۴	اصول جریان سیال در مخزن

۳۷	..... اصول جریان سیال در محیط با شکستگی	۳-۵
۳۹	..... جریان از داخل تک درزه با فرض صفحات صاف و موازی	۳-۵-۱
۳۹	..... عوامل موثر در حرکت سیال در سنگ تک درزه	۳-۵-۲
۴۰	..... رفتار اتساعی درزه و تاثیر آن بر نرخ جریان	۳-۵-۳
۴۰	..... رفتار هیدرو مکانیکی سنگ تک درزه	۳-۵-۴
۴۲	..... تحلیل حساسیت تاثیر پارامترها...	۳-۶
۴۴	..... جمع بندی	۳-۷
۴۵	..... معرفی میدان و ساخت مدل ژئومکانیکی	۴
۴۵	..... مقدمه	۴-۱
۴۶	..... میدان پارسی	۴-۲
۴۶	..... جمع آوری داده‌های مورد نیاز	۴-۳
۴۸	..... محاسبه موج فشاری برشی	۴-۴
۵۰	..... تخمین موج فشاری برشی به کمک شبکه عصبی مدار شعاعی	۴-۴-۱
۵۴	..... محاسبه پارامترهای ارتجاعی	۴-۵
۵۶	..... محاسبه خواص مقاومتی سنگ	۴-۶
۵۶	..... زاویه اصطکاک داخلی	۴-۶-۱
۵۶	..... مقاومت فشاری تک محوری	۴-۶-۲
۵۷	..... مقاومت کششی	۴-۶-۳
۵۸	..... چسبندگی سنگ	۴-۶-۴
۵۹	..... فشار منفذی	۴-۷
۶۱	..... تنش‌های برجا	۴-۸
۶۲	..... تنش قائم	۴-۸-۱
۶۳	..... تنش‌های افقی	۴-۸-۲
۶۴	..... بررسی رژیم تنش	۴-۸-۳

۶۶	.....	۴-۹	معیارهای شکست سنگ
۶۷	.....	۴-۹-۱	معیار موهر- کلمب
۶۸	.....	۴-۹-۲	معیار موگی- کلمب
۶۹	.....	۴-۱۰	ساخت مدل ژئومکانیکی چاه شماره ۷۳ میدان پارسى
۷۳	.....	۴-۱۱	جمع بندی
۷۵	.....	۵	مدل سازی عددی و ساخت مدل مرجع
۷۵	.....	۵-۱	مقدمه
۷۵	.....	۵-۲	معرفی نرم افزار 3DEC
۷۶	.....	۵-۳	ساخت مدل مرجع
۷۶	.....	۵-۳-۱	اندازه مدل
۷۸	.....	۵-۳-۲	تعیین مدل رفتاری
۷۹	.....	۵-۳-۳	شرایط مرزی
۸۰	.....	۵-۳-۴	ساخت مدل مرجع سنگ بکر
۸۲	.....	۵-۳-۵	ساخت مدل مرجع سنگ شکافدار
۸۹	.....	۵-۴	جمع بندی
۹۱	.....	۶	مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت
۹۱	.....	۶-۱	مقدمه
۹۲	.....	۶-۲	مطالعه پارامتری تراوایی
۹۲	.....	۶-۲-۱	بازشدگی
۹۶	.....	۶-۲-۲	تراکم شکستگی
۹۷	.....	۶-۳	تحلیل حساسیت تراوایی
۹۷	.....	۶-۳-۱	تغییرات تنش قائم
۹۹	.....	۶-۳-۲	تغییرات نسبت تنش افقی به قائم

۱۰۱	۶-۳-۳ تغییرات ویسکوزیته سیال
۱۰۲	۶-۳-۴ تغییرات فشار منفذی
۱۰۴	۶-۴ تحلیل پارامتری عوامل موثر بر پایداری
۱۰۴	۶-۴-۱ تراکم شکستگی
۱۰۵	۶-۴-۲ زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر
۱۰۶	۶-۴-۳ زاویه اصطکاک داخلی شکستگی‌ها
۱۰۷	۶-۴-۴ چسبندگی سنگ بکر
۱۰۷	۶-۴-۵ مدول برشی
۱۰۸	۶-۵ تحلیل حساسیت عوامل موثر بر پایداری
۱۰۸	۶-۵-۱ فشارمنفذی
۱۰۹	۶-۵-۲ فشارسیال حفاری
۱۱۰	۶-۶ جمع بندی
۱۱۳	۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۳	۷-۱ نتیجه‌گیری
۱۱۶	۷-۲ پیشنهادات
۱۱۷	مراجع

فهرست تصاویر

- ۲-۱ طرح نمادین از انواع ناپایداری زون سست در دیواره (McLean and Addis, 1990) ۱۰
- ۲-۲ حفاری در میان سازند دارای شکستگی یا گسل خورده (Pašić et al., 2007) ۱۳
- ۲-۳ حفاری در میان سازند فعال تکتونیکی (Bowes and Procter, 1997) ۱۳
- ۲-۴ حفاری در سازند متحرک (Pašić et al., 2007) ۱۴
- ۲-۵ حفاری در سازند تحکیم نیافته (Pašić et al., 2007) ۱۴
- ۲-۶ حفاری در سازند شیل (Bowes and Procter, 1997) ۱۵
- ۲-۷ تأثیر وزن گل بر روی استرس ها در دیواره چاه (Le and Rasouli, 2012) ۱۶
- ۲-۸ الف: فشار مکشی ب: فشار موجی (Kadyrov, 2012) ۱۷
- ۲-۹ انواع روش‌های پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه (McLellan et al., 1996) ۲۰
- ۲-۱۰ چاه انحرافی (انزانپور، ۱۳۹۳) ۲۱
- ۲-۱۱ حفر چاه انحرافی برای دسترسی به سطوح غیرقابل دسترسی مستقیم (انزانپور، ۱۳۹۳) ۲۲
- ۲-۱۲ چاه انحرافی جانبی (آ) حفر چاه انحرافی در مواقع انسداد کامل چاه قائم ب) حفر چاه انحرافی به منظور تکمیل اطلاعات زمین شناسی و ساختاری سازند پ) حفر چاه جهت دار به منظور دستیابی به لایه‌های شیب‌دار (انزانپور، ۱۳۹۳) ۲۳
- ۲-۱۳ چاه انحرافی در شرایط تکتونیکی خاص آ-ب) دسترسی به مناطق گسل خورده پ) دسترسی به ذخایر قرار گرفته در گنبد نمکی (انزانپور، ۱۳۹۳) ۲۴
- ۲-۱۴ حالات مختلف هرزروی سیال الف) سازند تراوا، ب) حفره، ج) زون شکسته، د) شکستگی القایی (Stangeland, 2015) ۲۶

- ۳-۱ مدل مرجع در توده سنگ (Chen et al., 1999) ۳۱
- ۳-۲ انتخاب اندازه مناسب مدل مرجع (Kunkel et al., 1988) ۳۲
- ۳-۳ نمایشی از مخزن شکافدار واقعی و نحوه مدل سازی (Warren et al., 1963) ۳۳
- ۳-۴ برداشت شستگی‌ها (الف) روش خط برداشت (ب) روش پنجره (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱) ۳۶
- ۳-۵ نحوه انجام آزمایش داری (Teimoori Sangani, 2005) ۳۸
- ۳-۶ عوامل موثر در حرکت سیال (Hakami, 1995) ۴۰
- ۳-۷ اتساع برشی درزه در اثر جابجایی برشی (Zhou et al., 2008) ۴۱
- ۳-۸ نمایی از سنگ متخلخل و درزه دار (Rutqvist and Stephansson, 2003) ۴۲
- ۳-۹ تغییرات نرخ جریان عبوری از توده سنگ با افزایش ۵ درصدی هریک از پارامترهای ورودی مدل (Farahmand et al., 2011) ۴۳
- ۴-۱ موقعیت میدان پاری در ارتباط با میدین مجاور در فروافتادگی دزفول (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳) ۴۷
- ۴-۲ ساختار شبکه عصبی مدار شعاعی (RBF) (طالش حسینی و همکاران، ۱۳۹۶) ۵۱
- ۴-۳ نمودار پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده ۵۲
- ۴-۴ نگارهای پتروفیزیکی و نگارهای موج فشاری و برشی چاه ۷۳ میدان پاری ۵۳
- ۴-۵ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر- کلمب (Hudson and Harrison, 2000) ۵۹
- ۴-۶ پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ در چاه ۷۳ میدان پاری ۶۰
- ۴-۷ رابطه رژیم تنش منطقه با مقدار تنش برجا در دسته بندی اندرسون (Zoback, 2007) ۶۲
- ۴-۸ تنش‌های اصلی و فشار منفذی ۶۵
- ۴-۹ چندضلعی اندرسون جهت تعیین محدوده تنش‌های افقی ۶۷
- ۴-۱۰ شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری (Le and Rasouli, 2012) ۶۷
- ۴-۱۱ ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی به کمک معیار موهرکلمب چاه ۷۳ میدان پاری ۷۱
- ۴-۱۲ مقاطع وقوع ناپایداری (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳) ۷۲

- ۵-۱ نسبت تغییر تراوایی مدل به تغییر اندازه مدل در دفعات اجرای مختلف کد ۷۷
- ۵-۲ راستای اعمال تنش های افقی حداقل و حداکثر ۸۰
- ۵-۳ توزیع فشار منفذی در مدل ۸۰
- ۵-۴ شکستگی برشی مشاهده شده در لاگ تصویری ۸۱
- ۵-۵ نمایش مقطع دیواره چاه و وضعیت پایداری (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳) ۸۱
- ۵-۶ ساخت مدل سنگ بکر و بررسی تنش های افقی ۸۲
- ۵-۷ مدل ژئومکانیکی یک بعدی ناحیه سنگ شکافدار بر اساس معیار موهر- کلمب ۸۳
- ۵-۸ نمایش استریوگرافیک شکستگی های برداشت شده از درون چاه ۷۳ ۸۴
- ۵-۹ تولید شبکه شکستگی مجزا ۸۵
- ۵-۱۰ برش بلوک توسط شبکه شکستگی تولید شده ۸۶
- ۵-۱۱ نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل کننده تا رسیدن مدل مرجع سنگ شکافدار به تعادل در چاه ۷۳ ۸۷
- ۵-۱۲ تغییرات تراوایی در اثر تغییرات بازشدگی ۸۸
- ۶-۱ تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات بازشدگی ۹۳
- ۶-۲ تاثیر افزایش بازشدگی دسته درزه اول بر روی شدت جریان سیال ۹۴
- ۶-۳ تاثیر کاهش بازشدگی دسته درزه اول بر روی شدت جریان سیال ۹۴
- ۶-۴ تاثیر افزایش بازشدگی دسته درزه سوم بر روی شدت جریان سیال ۹۵
- ۶-۵ تاثیر کاهش بازشدگی دسته درزه سوم بر روی شدت جریان سیال ۹۵
- ۶-۶ تاثیر تغییر تراکم شکستگی بر میزان تراوایی ۹۶
- ۶-۷ تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات تنش قائم ۹۷
- ۶-۸ شدت جریان درون بلوک در حالت تنش قائم برابر با ۶۲/۳۵ مگاپاسکال ۹۸
- ۶-۹ شدت جریان درون بلوک در حالت تنش قائم برابر با ۳۰ مگاپاسکال ۹۸
- ۶-۱۰ تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداکثر ۱۰۰
- ۶-۱۱ تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداقل ۱۰۱
- ۶-۱۲ شبکه شکستگی دسته درزه اول ۱۰۱

- ۱۳-۶ نسبت تغییرات شدت جریان سیال نسبت به تغییرات فشار منفذی ۱۰۳
- ۱۴-۶ مقطع شدت جریان خروجی سیال به درون چاه در حالت فشار منفذی برابر با فشار سیال ۱۰۳
- ۱۵-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات تراکم شکستگی ۱۰۴
- ۱۶-۶ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر- کلمب (Hudson and Harrison, 2000) ۱۰۵
- ۱۷-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر ۱۰۶
- ۱۸-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی شکستگی ۱۰۶
- ۱۹-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات چسبندگی سنگ ۱۰۷
- ۲۰-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات مدول برشی ۱۰۸
- ۲۱-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات فشار منفذی ۱۰۹
- ۲۲-۶ نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات فشار سیال حفاری ۱۱۰

فهرست جداول

۱۲	دسته‌بندی عوامل ناپایداری چاه (Chen et al., 2002)
۲۵	چهار حالت مختلف از هرزروی سیال به درون سازند (Stangeland, 2015)
۳۷	توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی توده‌سنگ (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱)
۴۸	داده های مورد نیاز برای مدل ژئومکانیکی (Afsari et al., 2009)
۶۴	انواع تست‌ها برای تخمین تنش افقی
۷۸	پارامترهای ورودی مدل رفتاری موهر-کلمب سنگ
۷۹	پارامترهای ورودی مدل رفتاری کلمب-اسلیپ درزه
۸۳	خواص سنگ و سیال عمق مورد مطالعه
۸۴	شرایط تنش و فشار منفذی عمق مورد مطالعه
۸۵	پارامترهای برداشت شده شکستگی‌ها
۸۸	تاثیر تغییر اندازه بازشدگی بر روی میزان تراوایی معادل
۹۲	خصوصیات مدل مرجع جهت تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری
۹۶	تاثیر تغییر تراکم شکستگی بر میزان تراوایی
۹۹	تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداکثر
۱۰۰	تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداقل
۱۰۲	ویسکوزیته سیال و دبی معادل (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)
۱۰۲	تغییرات فشار منفذی نسبت به فشار سیال ثابت (۱۶/۶۸)

فصل ۱

کلیات پایان نامه

۱-۱ مقدمه

ناپایداری چاه^۱ را به زبان ساده می‌توان به عنوان تغییرات قطر مقطع چاه نسبت به قطر مته حفاری تعریف نمود. ابعاد ناپایداری می‌تواند آنقدر کوچک باشد که خللی در عملیات حفاری ایجاد ننماید. در نقطه مقابل، گاهی ناپایداری موجب ریزش کامل دیواره^۲ و انسداد کامل چاه می‌گردد که می‌تواند موجب صرف هزینه و زمان اضافی گردد.

قبل از اینکه چاهی حفر شود، سازند در حالت تعادل قرار دارد. زمانی که عملیات حفاری شروع می‌شود، وضعیت تعادلی سازند تغییر کرده و عمدتاً سازند درون چاه برای پایداری نیاز به نیرویی جدید دارد تا در مقابل نیروهای اطراف مقاومت کند. بنابراین سیال حفاری برای مقابله با تنش های اعمالی از جانب دیواره چاه که ناشی از حذف بخشی از سازند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیال حفاری فقط بخشی از تنش های مذکور را تحمل کرده و نمی‌تواند به طور کامل جایگزین سنگ های حذف شده از سازند شود؛ بنابراین تا زمانی که رژیم تعادلی تنش عوض شده و با توزیع دوباره تنش و تغییر جهت تنش، سازند اثر سنگ های حذف شده را جبران نماید. بنابراین مطالعه رفتار مکانیکی سنگ، به ویژه در مخازن شکافدار در تحلیل پایداری چاه و انتخاب راستای بهینه آن اجتناب ناپذیر خواهد بود.

تعداد بی‌شماری از گزارش‌های ناپایداری‌های چاه‌ها مربوط به حفاری در سازندها و مخازن با تراکم شکستگی

¹Wellbore Instability

²Collapse

طبیعی بالاست. حضور شکستگی‌ها با صفحات بازشدگی کوچک و بزرگ مقیاس در سنگ، سبب تضعیف مکانیکی سنگ و افزایش توانایی تراوایی سنگ در سنگ‌های با تراوایی پایین می‌شود. هرزروی سیال حفاری یکی از پرهزینه‌ترین و مشکل‌سازترین مسائل حفاری است. اگر هرزروی گل در سازند مخزنی اتفاق بیافتد مشکلات بسیار جدی‌تر خواهد بود؛ چرا که آسیب‌های وارده به مخزن، در بعضی موارد غیر قابل جبران است (Ottesen, 2010). شناخت و طبقه‌بندی مخازن شکسته در انتخاب نوع و جهت حفاری اهمیت بسزایی دارند (دلپذیریان و همکاران، ۱۳۸۶). از آنجا که شکستگی‌های موجود در مخزن به عنوان کانال‌های هرزروی سیال حفاری مطرح می‌باشند، بررسی و تحلیل رفتار هیدرومکانیکی شکستگی‌ها در این نوع مخازن بسیار کلیدی در پایداری چاه مخازن دارای شکستگی بالا برخوردار بوده است.

۱-۲ ضرورت تحقیق

پایدار نگه داشتن دیواره چاه، یکی از مهمترین مسائلی است که صنعت نفت و گاز با آن مواجه است. ناپایداری چاه در سراسر جهان به عنوان یکی از عوامل مهم توقف و به تاخیر افتادن حفاری و تکمیل چاه به حساب می‌آید که در نهایت سبب افزایش هزینه‌های عملیات حفاری می‌شود.

در سازند سخت و سنگ‌های رسوبی با تخلخل پایین و بدون شکستگی، روش‌های تحلیلی الاستوپلاستیک رایج برای آنالیز تنش‌ها و تغییر شکل اطراف چاه قابل استفاده است. در سازندهای شکافدار، ناپایداری می‌تواند در راستای شکستگی‌های طبیعی سنگ به وقوع بپیوندد. این ناپایداری‌ها زمانی اتفاق می‌افتند که تنش موثر بر روی ناپیوستگی‌ها به مقدار بحرانی خود رسیده و سبب ناپایداری در توده سنگ می‌شود. علاوه بر این نفوذ سیال حفاری در شکستگی‌ها سبب افزایش لغزندگی سطح شکستگی‌ها به وسیله کاهش زاویه اصطکاک داخلی سطح ناپیوستگی‌ها می‌شود. این امر در نهایت سبب افزایش احتمال ناپایداری در سنگ‌های دارای شکستگی خواهد شد. فلذا در سازندهای دارای شکستگی بالا، روش‌های تحلیلی و عددی الاستوپلاستیک رایج قابل استفاده نیست

در مخازن کربناته، به دلیل نبود تخلخل اولیه بالا و وجود شکستگی‌های طبیعی غالباً جریان سیال متناسب با تخلخل ذاتی سنگ نیست و غالباً بیشتر از آن است، لذا نقش شکستگی‌ها در هرزروی، تخلیه طبیعی، بازیافت ثانویه و بالاخره بازیافت نهایی بسیار با اهمیت تلقی می‌شود. شکستگی‌ها کم و بیش در تمامی سنگ‌ها، چه در سطح زمین و چه در اعماق زمین دیده می‌شوند. خواص فیزیکی این شکستگی‌ها تابع منشاء، خواص مکانیکی و شرایط تشکیل سنگ می‌باشند. با وجود اینکه شکستگی‌ها در گستره وسیعی از سنگ‌ها دیده می‌شوند، ولی اهمیت آنها در جریان سیالات هنگامی است که با فاصله‌ای مناسب و بازشدگی ایده‌آل در مخزن ظاهر شوند. فاکتورهای مهم در بررسی شکستگی‌ها عبارتند از:

- میزان بازشدگی شکستگی‌ها

- پایایی شکستگی‌ها

- فاصله بین شکستگی‌ها

بررسی‌های انجام شده توسط سنگری^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۱ بر روی نگارهای تصویری نشان داد که بازشدگی شکستگی‌ها در سازند آسماری، در مقاطع مختلف از اندازه‌های میکروسکوپی تا ۰/۲۵ میلیمتر می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داده است که اگر یک شکستگی منفرد به پهنای یک میلیمتر در یک سنگ مخزن باشد و توسط چاهی قطع شود، یک تراوایی خوب و مناسب ایجاد می‌کند (کرمی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۱ هدف از تحقیق

هدف از این تحقیق، بررسی پایداری چاه و همچنین تراوایی مخزن شکافدار به روش المان مجزا می‌باشد. سپس با مطالعه پارمتری و تحلیل حساسیت عوامل مختلف بروی چاه، به بررسی پایداری دیواره چاه و تراوایی مخزن پرداخته می‌شود. نتایج این تحقیق، تاثیر مهمی در کاهش خطر و هزینه‌های ناشی از ناپایداری چاه و هرزروی سیال به درون سازند را دارد. در این پایان نامه از داده‌های چاه پارس استفاده شده است.

¹Sangree

۱-۴ سابقه تحقیق

تانسور تراوایی اولین بار توسط اسنو^۱ در سال ۱۹۶۹ برای شکستگی‌های موازی با تراوایی ماتریکس صفر، معرفی شد. وی مدلی ریاضی برای محاسبه تراوایی یک دسته شکستگی موازی و نامحدود ارائه کرد (Snow, 1969). لانگ^۲ و همکاران ۱۹۸۲ با در نظر گرفتن اتصال بین شکستگی‌ها سیستمی از شکستگی‌ها با جهت دلخواه مطالعه کردند (Long et al., 1982). اودا^۳ در سال ۱۹۸۵ برای محاسبه تانسور تراوایی خط تولید-تزیق در شکستگی‌هایی با توزیع تصادفی در نظر گرفت. در روش‌های ذکر شده تراوایی ماتریکس نادیده گرفته شده است (Oda, 1985). چن^۴ و همکاران در سال ۱۹۹۹ بر اساس مدل اسنو، روشی تحلیلی برای محاسبه تراوایی معادل یک سیستم شکستگی با شکستگی‌های موازی ارائه کردند (Chen et al., 1999).

ناکاشیما^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۰ با استفاده از روش المان مرزی متغیر در یک محیط دارای شکستگی با توزیع یکسان مدلی برای محاسبه تانسور تراوایی ارائه دادند (Nakashima et al., 2000). در سال ۲۰۰۴ مین^۶ با فرض اتساع درزه‌ها و مدل‌سازی DFN و با در نظر گرفتن المان حجم معرف^۷، تحقیقاتی را در زمین تاثیر تنش بر جریان سیال و نفوذپذیری وابسته به مقیاس توده سنگ درزه‌دار را انجام داد (Min, 2004). تیموری در سال ۲۰۰۵، شکستگی‌های کوتاه را به عنوان تخلخل ماتریکس در نظر گرفت. وی در یک محیط دو بعدی، برنامه کامپیوتری برای محاسبه تانسور تراوایی ارائه کرد (Teimoori Sangani, 2005). سان و ژائو^۸ در سال ۲۰۱۰ به بررسی تاثیر شرایط آنیزوتروپی بر تراوایی توده‌سنگ پرداختند (Sun and Zhao, 2010).

در بررسی ناپایداری دیواره چاه، ژانگ و همکاران در سال ۱۹۹۹ با آنالیز عددی ناپایداری چاه به این نتیجه رسید که حضور شکستگی‌ها و وجود تنش پسماند بالا از عوامل مهم در ایجاد ناپایداری در چاه است. در زیر برخی

¹Snow²Long³Oda⁴Chen⁵Nakashima⁶Min KB⁷REV⁸Sun & Zhao

از نتایج ژانگ آورده شده است.

- فاصله‌داری درزه شکستگی‌ها و هندسه بلاک‌ها تاثیر بسزایی بر پایداری چاه در حین حفاری دارند. کاهش فاصله‌داری یا به عبارتی افزایش تراکم شکستگی، باعث افزایش احتمال ناپایداری می‌شود.
- در حالت کلی افزایش فشار گل سبب افزایش پایداری چاه می‌شود ولی با این عمل با ضرر افزایش ازدست دادن گل حفاری همراه است (Zhang et al., 1999).

چن در سال ۲۰۰۱ با آنالیز عددی به کمک نرم افزار *UDEC* به بررسی پایداری در سازندهای با شکستگی در شرایط همسانگرد و ناهمسانگرد به مطالعه پرداخت و به این نتیجه رسید، کاهش زاویه اصطکاک داخلی سطح ناپیوستگی در اثر نفوذ سیال حفاری به درون سازند، تاثیر آشکاری بر پایداری چاه دارد که این تاثیر در تنش‌های ناهمسانگرد افزایش می‌یابد (Chen et al., 2001).

یونسی و رسولی در سال ۲۰۱۰ به بررسی تاثیر لغزش شکستگی بر ناپایداری چاه پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که شش پارامتر شیب و جهت شیب، زبری، بازشدگی شکستگی‌ها، تنش القایی موثر، فشار منفذی و وزن سیال حفاری تاثیر بسزایی بر لغزش شکستگی‌ها دارند (Younessi and Rasouli, 2010). جمشیدی و امانی در سال ۲۰۱۴ به کمک مدل‌سازی مجزا (*DEM*) به بررسی پایداری چاه‌های افقی پرداختند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد جهت تنش حداقل را می‌توان به عنوان مسیر بهینه حفاری انتخاب نمود (Jamshidi and Amani, 2014).

۵-۱ روش تحقیق پژوهش

در این تحقیق تلاش بر این است با کمک مدل‌سازی عددی شبکه شکستگی‌های مجزای توده سنگ یک چاه نفت، به بررسی میزان تراوایی سنگ درزه دار و همچنین بررسی ناپایداری چاه در این حالت پرداخته شود. با توجه به اینکه انجام آزمایش‌های برجا به منظور اندازه‌گیری تراوایی به دلیل هزینه بالای آن قابل اجرا نمی‌باشد، ضرورت انجام این تحقیق روشن می‌گردد. بدین منظور، ابتدا نتایج مطالعات گذشته بررسی خواهد شد. سپس به کمک

داده‌های چاه مورد نظر مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی چاه ساخته می‌شود. در ادامه به کمک لاگ‌های تصویری، شبکه شکستگی‌ها شناسایی و با استفاده از *DFN* شبیه‌سازی می‌شود، سپس اقدام به مدل‌سازی عددی زون شکسته مخزنی شده و پایداری این زون مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مدل‌سازی‌های عددی با توجه به داده‌های واقعی میزان هرزروی صحت سنجی می‌شود. در نهایت با ساخت مدل توامان زون مخزنی، تراوایی زون شکسته ارزیابی شده و تاثیر این شکستگی در هرزروی سیال حفاری بررسی می‌شود. سپس با مطالعات پارامتری و بررسی حساسیت، تاثیر پارامترهایی از قبیل تنش برجا، فشار منفذی سیال مخزن، وزن گل، پارامترهای هندسی درزه‌ها هندسی درزه‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی مخزن؛ تاثیر مهمترین عوامل در هرزروی مشخص خواهد شد. در ادامه مراحل اصلی تحقیق بیان می‌شود:

- مطالعه کتابخانه‌ای مطالعات گذشته
- جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی ژئومکانیکی چاه
- ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه مورد نظر
- شناسایی شبکه شکستگی‌های محدوده زون مخزن و شبیه‌سازی آن با *DFN*
- ساخت مدل عددی محیط ناپیوسته جهت بررسی میزان تراوایی مخزن
- مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت
- جمع‌بندی و پیشنهادات

۱-۶ ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر در هفت فصل به شرح زیر ساماندهی شده است:

فصل اول، بیانگر کلیات پایان‌نامه از جمله بیان مساله، هدف، سابقه اجمالی، ضرورت تحقیق و روش انجام

پژوهش می‌باشد.

فصل دوم، به بررسی پیشینه تحقیق انجام شده در زمینه ناپایداری دیواره چاه و عوامل موثر بر آن و همچنین

بررسی هرزروی سیال حفاری و روش‌های مقابله با آن می‌پردازد.

فصل سوم، به دسته بندی روش‌های مدل‌سازی عددی مخازن شکافدار، عوامل موثر بر تراوایی سازند پرداخته می‌شود.

فصل چهارم، با معرفی میدان پارسی و چاه مورد مطالعه آغاز می‌گردد. در ادامه مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی زمین، روش‌های تخمین پارامترهای مکانیک سنگی از نگارهای پتروفیزیکی توصیف می‌گردد. سپس پنجره ایمن گل حفاری چاه مورد مطالعه ساخته می‌شود.

در **فصل پنجم**، ابتدا به اختصار به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در پایان نامه برای مدل‌سازی عددی پرداخته می‌شود. سپس مراحل مدل‌سازی عددی تشریح شده و مدل‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

در **فصل ششم**، با توجه به مدل مرجع ساخته شده، تحلیل حساسیت و پارامتری، انجام می‌گردد.

فصل هفتم، به جمع بندی مطالب پایان نامه و نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد پرداخته می‌شود.

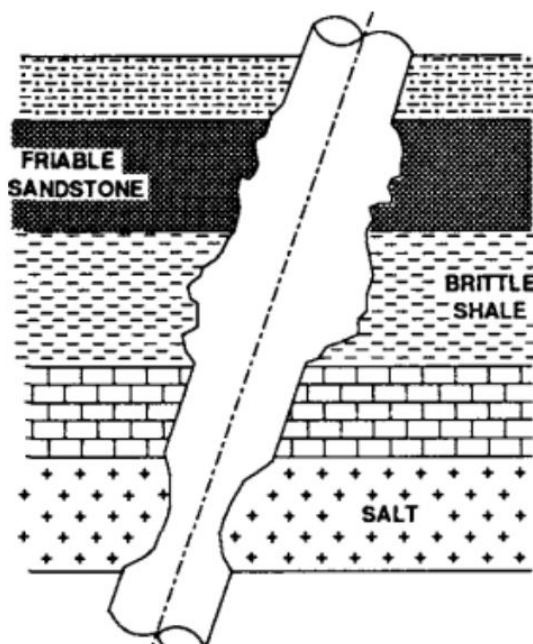
فصل ۲

ناپایداری چاه و عوامل موثر آن

۱-۲ مقدمه

پیدایش بحث پایداری دیواره چاه‌های نفتی را می‌توان تقریباً همزمان با شروع استفاده از فناوری حفاری جهت‌دار دانست. ناپایداری چاه به عنوان تغییر قطر مقطع چاه وقتی قطر چاه به طور چشم‌گیری با قطر مته حفاری اختلاف داشته باشد، تعریف می‌گردد. ابتدایی‌ترین شرایط برای پایدار ماندن یک چاه در حین حفاری، وجود تعادل و توازن بین تمرکز تنش در نزدیک دیواره چاه و استحکام سنگ می‌باشد. نتیجه برهم خوردن این تعادل پدیده‌هایی مانند ریزش جزئی و کلی دیواره چاه، تورم سازند و گیر کردن رشته حفاری، ایجاد درزه، ترک و شکستگی در دیواره چاه و هرزروی سیال است (آشتیانی عبدی و همکاران، ۱۳۸۷).

مسئله ناپایداری چاه ممکن است در مراحل مختلفی از عمر چاه به وجود آید. این ناپایداری‌ها منشأ اصلی مشکلات حفاری می‌باشد، که منجر به هزینه‌های گزاف و اتلاف زمان شده و گاهی اوقات موجب از دست دادن کامل چاه می‌شود. بنابراین اولین مرحله تحلیل پایداری چاه شامل تعریف و تفسیر مشکلات مشاهده‌شده در میدان است. پارامترهای زیادی روی ناپایداری دیواره چاه موثر می‌باشد. در یک تقسیم‌بندی جامع می‌توان ناپایداری چاه را ناشی از دو دسته عوامل مکانیکی و شیمیایی دانست در شکل ۱-۲ تصویری شماتیک از انواع ناپایداری دیواره یک چاه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: طرح نمادین از انواع ناپایداری زون سست در دیواره (McLean and Addis, 1990)

۲-۲ انواع ناپایداری دیواره چاه

به طور کلی ناپایداری چاه به دو دسته کلی زیر تقسیم بندی می‌شود:

الف) ناپایداری با منشاء شیمیایی

ب) ناپایداری با منشاء مکانیکی

۱-۲-۲ ناپایداری با منشاء شیمیایی

جذب آب توسط سازندهای شیلی و شسته شدن سازندهای نمکی توسط گل پایه آبی، متداول‌ترین ناپایداری با منشاء شیمیایی می‌باشد. جذب آب در شیل سبب تورم و کم شدن قطر چاه می‌گردد. شسته شدن سازندهای نمکی ممکن است با حل شدن نمک درون سیال حفاری سبب ایجاد حفره‌های بزرگ در دیواره چاه می‌شود. لذا لازم است با تغییر مناسب در ترکیب شیمیایی سیال حفاری با این نوع ناپایداری‌ها مقابله کرد (Zhang, 2005).

۲-۲-۲ ناپایداری با منشاء مکانیکی

قبل از انجام عملیات حفاری شرایط حاکم بر میدان در حالت تعادل قرار دارد. با شروع عملیات حفاری سبب برهم خوردن تعادل اولیه و ایجاد شرایط جدید تنش در منطقه می‌گردد. اگر شرایط جدید تحمیل شده به سازند، از مقاومت سنگ بیشتر باشد، موجب ایجاد ناپایداری در چاه می‌گردد (آشتیانی عبدی و همکاران، ۱۳۸۷). عوامل عمده اثرگذار بر پایداری دیواره چاه توسط مهندسين در دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل گروه بندی شده است که این عوامل در جدول ۱-۲ عنوان شده است. معیارهای شکست رایج در تحلیل‌های پایداری کاربرد دارند عبارتند از:

- معیار گریفیث^۱
- معیار موهر-کلمب^۲
- معیار دراگر-پراگر^۳
- معیار موگی-کلمب^۴
- معیار لید اصلاح شده^۵
- معیار سه بعدی هوک-براون^۶

هر یک از این معیارهای شکست مقادیر متفاوتی را برای مقاومت سنگ و حداقل وزن گلی که برای پایداری دیواره چاه لازم می‌باشد، پیش‌بینی می‌کنند و بنابراین انتخاب معیار شکست مناسب برای تحلیل پایداری دیواره چاه، مشکل و بحث برانگیز است (Al-Ajmi, 2006).

۳-۲ عوامل غیرقابل کنترل

مجموعه عوامل طبیعی که بر فرآیند حفاری تحمیل می‌گردد جزء عوامل غیرقابل کنترل در نظر گرفته می‌شود. شرایط تکتونیکی و خصوصیات سازند از مهمترین عوامل غیر قابل کنترل می‌باشند. در ادامه به تفصیل برخی از

¹Griffith Criterion

²Mohr-Coulomb Criterion

³Drucker-Prager Criterion

⁴Mogi-Coulomb Criterion

⁵Modified Lade Criterion

⁶3D Hock-Brown Criterion

جدول ۲-۱: دسته‌بندی عوامل ناپایداری چاه (Chen et al., 2002)

عوامل قابل کنترل	عوامل غیرقابل کنترل
تنش برجا	نوع سیال حفاری
فشار منفذی سازند	خواص شیمیایی سیال حفاری
لیتولوژی	فشار ته چاه
شیب	سرعت گردش سیال
درزه‌داری و گسل	فرسایش وابسته به زمان
تخلخل و نفوذپذیری	مسیر چاه
خواص حرارتی سازند	دمای سیال حفاری
	ارتعاش رشته حفاری
	عمق نصب لوله جداری

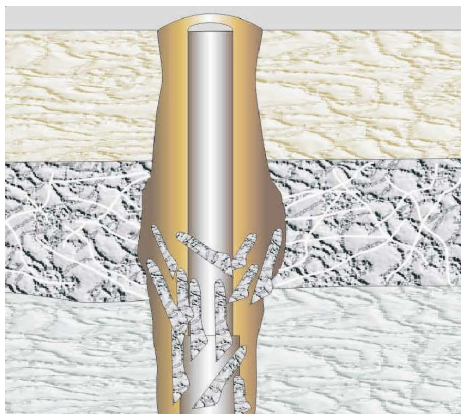
عوامل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱ شکستگی‌های طبیعی و گسل

شکستگی‌های طبیعی درون سنگ به طور معمول در نزدیکی گسل‌ها به وجود می‌آید. سنگ‌های اطراف گسل ممکن است به اندازه‌های بزرگ و کوچک بشکنند. اگر این سنگ‌ها سست شوند و به درون چاه بیافتند می‌توانند باعث گیر کردن رشته ابزار حفاری شوند. حتی اگر این قطعات به هم پیوسته باشند، لرزش رشته ابزار حفاری نیز می‌تواند باعث ریختن قطعات سازند به درون چاه شود. شکل ۲-۲ نشان دهنده یکی از مشکلاتی که در حفاری سازند دارای شکستگی یا سازند گسل خورده به وجود می‌آید را نشان می‌دهد. این مکانیزم در مناطق فعال تکتونیکی، در سنگ‌های آهکی دارای شکستگی و زمانی که سازند حفاری می‌شود به وجود می‌آید. لرزش رشته ابزار حفاری باید حداقل شود تا سازند پایدار باقی بماند (Pašić et al., 2007).

۲-۳-۲ سازندهای فعال تکتونیکی

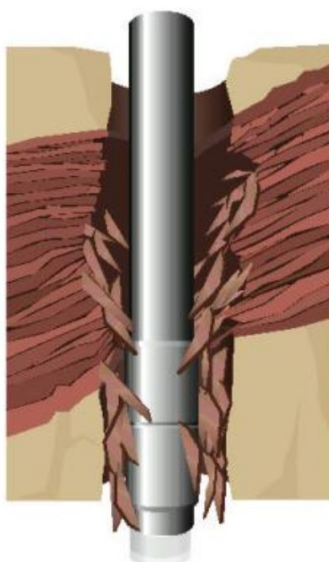
در زمان حفاری سازندهایی که دارای تنش بالایی هستند، اگر اختلاف بین تنش اطراف چاه و فشار سیال حفاری زیاد باشد، ناپایداری چاه را می‌توان متصور بود. تنش تکتونیکی در چاه‌هایی رخ می‌دهد که سنگ‌های سازند در این نواحی بخاطر حرکت پوسته زمین تحت تراکم یا کشش قرار دارند. شرایط غیرطبیعی تنش سبب خرد شدن



شکل ۲-۲: حفاری در میان سازند دارای شکستگی یا گسل خورده (Pašić et al., 2007)

سنگ‌های شده و در صورت حفر چاه با ورود این خرده‌های حفاری به درون چاه، می‌تواند سبب ایجاد مشکل در

فرآیند حفاری شود (شکل ۲-۳) (Bowes and Procter, 1997).



شکل ۲-۳: حفاری در میان سازند فعال تکتونیکی (Bowes and Procter, 1997)

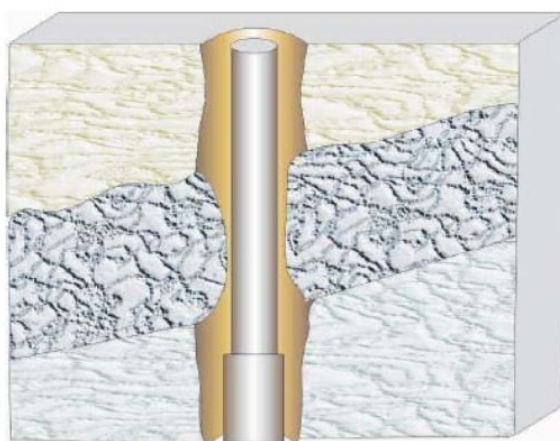
۲-۳-۳ چینه‌شناسی

خصوصیات سنگ‌شناسی سازند یکی دیگر از عوامل موثر بر پایداری دیواره چاه می‌باشد. سنگ‌هایی همچون نمک

به دلیل رفتار پلاستیکی تحت شرایط بارگذاری، به سمت چاه همگرا شده و قطر چاه را کاهش می‌دهند. انتخاب

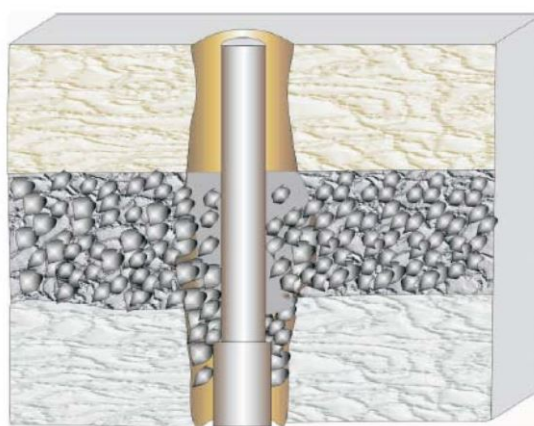
سیال حفاری مناسب با وزن گل کافی می‌تواند به پایداری این سازند کمک کند (شکل ۲-۴) (Plumb, 1994).

از طرفی دیگر، سازندهای تحکیم نیافته و دانه‌ای، به دلیل حذف نیروی نگهدارنده ذرات در اثر حفاری و عدم



شکل ۲-۴: حفاری در سازند متحرک (Pašić et al., 2007)

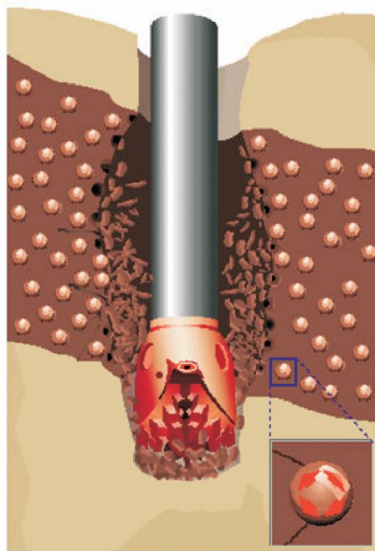
وجود کیک گل کافی، به درون چاه حرکت می‌کنند. سازندهای تحکیم نیافته مانند ماسه نمی‌توانند توسط فشار هیدروستاتیکی حمایت شوند. قطعات جدا شده از سازند به درون چاه می‌ریزند و سبب گیر افتادن لوله حفاری می‌شوند (شکل ۲-۵) (Bowes and Procter, 1997).



شکل ۲-۵: حفاری در سازند تحکیم نیافته (Pašić et al., 2007)

نوعی دیگر از سازندهای مشکل ساز سازند شیلی می‌باشد. لایه‌های شیلی علاوه بر مقاومت ذاتی کمتر نسبت به سایر سنگ‌های در برگیرنده چاه، رفتار پیچیده‌ای در شرایط دمایی و برخورد با سیال حفاری از خود نشان می‌دهد. شیل دارای تخلخل بالایی می‌باشد ولی به علت وجود مقدار زیادی کانی‌های رسی، نفوذپذیری بسیار پایینی دارد. برخی از کانی‌های رسی در واکنش با سیالات پایه آبی، آماس می‌کند. این پدیده در شیل سبب کاهش مقاومت آن در مقابل تنش‌های موجود می‌گردد و در دیواره چاه ناپایداری ایجاد می‌کند (شکل ۲-۶). به منظور کاهش احتمال

ایجاد ناپایداری، استفاده از وزن کافی گل حفاری، استفاده از گل‌های پایه نفتی و کاهش زمان تماس سیال با سازند شیلی می‌توان احتمال ایجاد ناپایداری در این نوع سازند را کاهش داد (Bowes and Procter, 1997).



شکل ۲-۶: حفاری در سازند شیلی (Bowes and Procter, 1997)

۴-۲ عوامل قابل کنترل

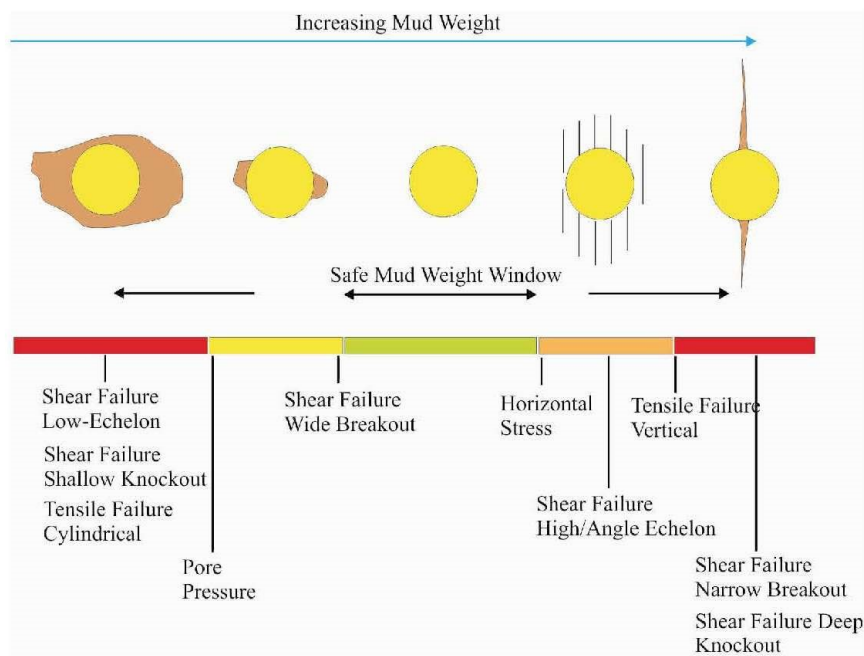
برخی از عوامل ناپایداری را می‌توان به کمک دانش کافی از شرایط موجود تا حد امکان کنترل نمود. انتخاب وزن و جنس گل متناسب با سازند در مقاطع مختلف حفاری، نصب لوله‌های جداری با توجه به مقاومت سازند و انتخاب مسیر مناسب حفاری، از جمله عوامل قابل کنترلی هستند، که با انجام مطالعات اولیه می‌توانند از وقوع ناپایداری تا حد زیادی جلوگیری کنند. در ادامه به تشریح برخی از عوامل قابل کنترل پرداخته می‌شود.

۱-۴-۲ فشار گل حفاری

چگالی گل حفاری و یا چگالی معادل جریان^۱ یکی از معیارهای اصلی در پایدار ماندن دیواره چاه می‌باشد. در هنگام عملیات حفاری تنها جایگزین نیروی حذف شده، نیروی اعمال شده توسط سیال حفاری می‌باشد. انتخاب وزن گل مناسب یکی از پارامترهای کلیدی در انجام امن عملیات حفاری می‌باشد. در شکل ۲-۷ تاثیر وزن گل را بر پایداری دیواره چاه را نشان می‌دهد. وزن زیاد گل باعث ایجاد شکست کششی در دیواره چاه می‌گردد و اگر وزن

¹Equivalent Circulating Density

گل حفاری کمتر باشد، تمرکز تنش ایجاد شده در سنگ سبب ایجاد شکست برشی و ریزش دیواره چاه می‌شود. علاوه بر فشار گل در حالت سکون، ۳ حالت مختلف دیگر برای فشار انتهایی چاه در نظر گرفته می‌شود. این سه



شکل ۲-۷: تأثیر وزن گل بر روی استرس‌ها در دیواره چاه (Le and Rasouli, 2012)

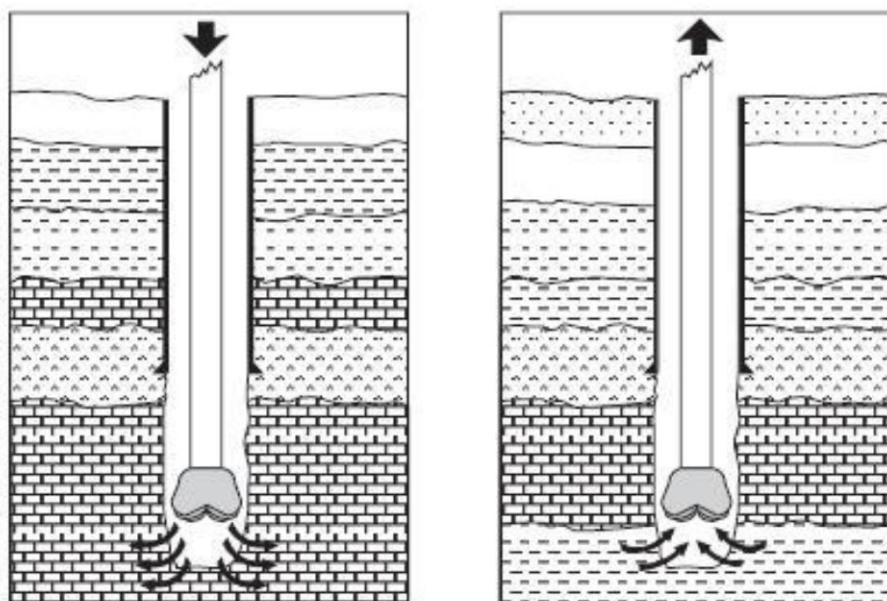
حالت عبارتند از:

- فشار مکشی^۱
- فشار موجی^۲
- فشار معادل جریان

فشار مکشی، در اثر خروج رشته ابزار حفاری از درون چاه، خلاء ایجاد شده در انتهای چاه موجب کاهش موقتی فشار درون چاه می‌شود. در نتیجه سیال از سازند به درون چاه حرکت می‌کند. این تغییر موجب کاهش مقاومت دیواره چاه می‌گردد (شکل ۲-۸ سمت الف) (Kadyrov, 2012). از سوی دیگر وقتی رشته ابزار حفاری به درون چاه حرکت می‌کند، با فشرده کردن سیال حفاری بین رشته ابزار حفاری و دیواره چاه، سبب افزایش فشار و آسیب زدن به دیواره چاه می‌گردد (شکل ۲-۸ سمت ب) (Tan et al., 2005).

¹Swab

²Surge



شکل ۲-۸: الف: فشار مکشی ب: فشار موجی (Kadyrov, 2012)

در اثر حرکت سیال حفاری و اضافه شدن خرده‌های حفاری به درون سیال حفاری سبب افزایش وزن گل حفاری و در نتیجه افزایش فشار نسبی به دیواره چاه می‌گردد. این افزایش نسبی چگالی ناشی از جریان گل حفاری باید در محاسبات وزن ایمن گل حفاری لحاظ گردد (Kadyrov, 2012).

۲-۴-۲ شیب و آزمون چاه

شیب و امتداد چاه نسبت به تنش‌های اصلی برجا یک عامل مهم در فرو ریزش و شروع ترک در دیواره چاه است (McLellan et al., 1996). یکی از روش‌های تعیین راستای تنش‌های اصلی استفاده از مشاهدات شکستگی در چاه می‌باشد. یکی از اولین مطالعات در این زمینه در مطالعات زوباک^۱ در سال ۱۹۸۰ است (Zoback et al., 1980). با توجه به مشاهدات محققین مختلف، وقوع شکست برشی در چاه در راستای تنش افقی حداقل انجام می‌گردد (Barton et al., 1988).

¹Zoback

۲-۴-۳ لرزش لوله حفاری

لرزش لوله حفاری می‌تواند به دیواره چاه آسیب بزند و سبب بزرگ‌تر شدن چاه شود. طراحی مناسب رشته ابزار حفاری درون چاهی^۱ می‌تواند از لرزش لوله‌های حفاری و آسیب به دیواره چاه جلوگیری کند. در سازندها دارای شکستگی طبیعی، تحکیم نیافته و چاه‌های شیب دار این آسیب به دیواره چاه بیشتر می‌باشد (Pašić et al., 2007).

۲-۴-۴ دمای سیال حفاری

افزایش دمای سیال در اثر افزایش عمق و همچنین افزایش دمای سیال ناشی از حفاری سبب افزایش تمرکز تنش در دیواره چاه می‌گردد. با کاهش دما می‌توان به کاهش تمرکز تنش و همچنین افزایش پایداری چاه کمک کرد (Pašić et al., 2007).

۲-۵ انواع گسیختگی

تنش‌های برجا، مقاومت سنگ در برگیرنده، فضای منفذی و فشار سیال حفاری پارامترهای موثر در وقوع گسیختگی در دیواره چاه هستند. در این بخش گسیختگی‌های موجود در دیواره چاه بدون در نظر گرفتن ناپوستگی‌های موجود در دیواره چاه به دو گروه اصلی گسیختگی برشی و گسیختگی کششی تقسیم شده‌اند.

۲-۵-۱ گسیختگی برشی

یکی از متداول‌ترین گسیختگی‌های موجود در دیواره چاه‌های نفتی، گسیختگی برشی است. مطالعات و تحقیقات وسیعی برای درک شکل و نحوه تشکیل این نوع گسیختگی صورت گرفته است. مدل گسیختگی موهر- کلمب یکی از متداول‌ترین مدل‌هایی است که برای حساب کردن فروپاشی دیواره چاه استفاده می‌شود (Simangunsong et al., 2006).

¹Bottom Hole Assembly

۲-۵-۲ گسیختگی کششی

گسیختگی کششی زمانی به وقوع می‌پیوندد که وزن گل حفاری از مجموع تنش افقی حداقل (σ_3) و مقاومت کششی سازند (T_o) تجاوز کند. وزن زیاد گل حفاری باعث به وجود آمدن شکاف‌های هیدرولیکی درون سازند، که باعث هرز روی شدید گل حفاری به درون سازند شده و تغییر درون ماتریکس سازند می‌شود. از این رو، این گسیختگی حد بالایی پنجره وزن گل حفاری در هنگام حفاری است (Simangunsong et al., 2006). به طور ریاضی این نقطه بحرانی وقوع گسیختگی کششی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma_3 + T_o \leq 0 \quad (1-2)$$

در رابطه ۱-۲، σ_3 تنش اصلی حداقل وارده بر دیواره چاه، T_o مقاومت کششی سنگ است.

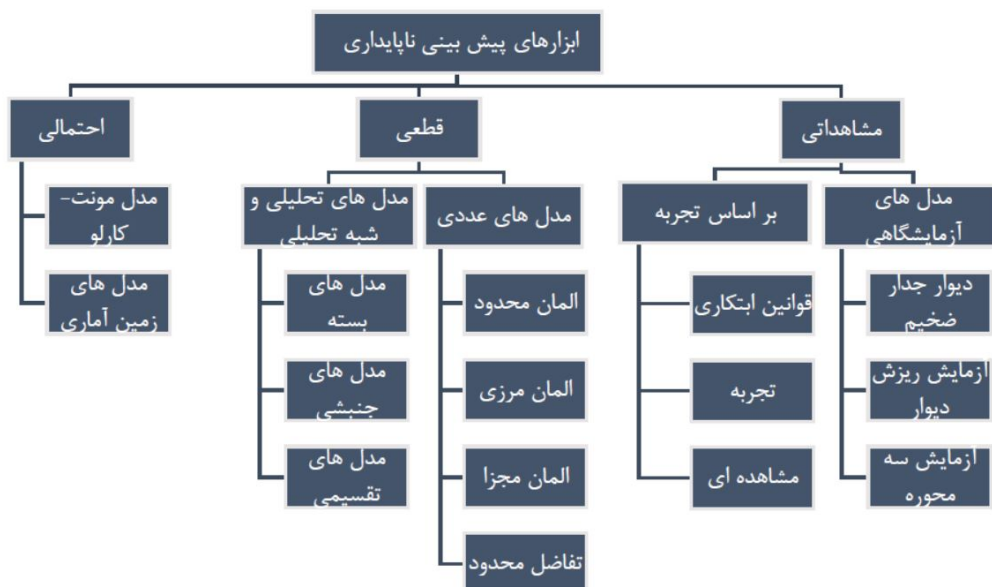
۲-۶ پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه

تحلیل پایداری چاه قبل از حفاری شامل تعیین شرایط ژئومکانیک منطقه و انتخاب گل حفاری مناسب با توجه به شناخت وضعیت ژئومکانیکی منطقه است. از اینرو، در مرحله اول تحلیل پایداری، به منظور ارتقاء کیفیت طراحی و عملیات حفاری، مطالعه کامل ژئومکانیک با هدف شناخت عوامل مؤثر در ایجاد ناپایداری چاه لازم است. این موضوع در زمان حفر چاه‌های افقی و چاه‌های دسترسی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در مرحله دوم، با توجه به آنچه از نقش شیل در ناپایداری چاه عنوان شد، شناخت دقیق نواحی شیلی ضروری است (Akhgarian et al., 2013).

در جدول ۲-۹ یک طبقه بندی از ابزارهای کمکی پیش بینی ناپایداری نشان داده شده است. بر طبق جدول ذیل، روش‌های پیش‌بینی ناپایداری به سه دسته مشاهداتی، قطعی و احتمالاتی تقسیم بندی شده است. در میان این روش‌ها، مدل‌های عددی و تحلیلی بیشتر از سایر روش‌ها به منظور پیش‌بینی پایداری چاه توسط محققین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از ابزارهای تحلیلی پایداری چاه، ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی با استفاده از اطلاعات به دست آمده

از نگاره‌ها می‌باشد (Kadyrov, 2012).



شکل ۲-۹: انواع روش‌های پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه (McLellan et al., 1996)

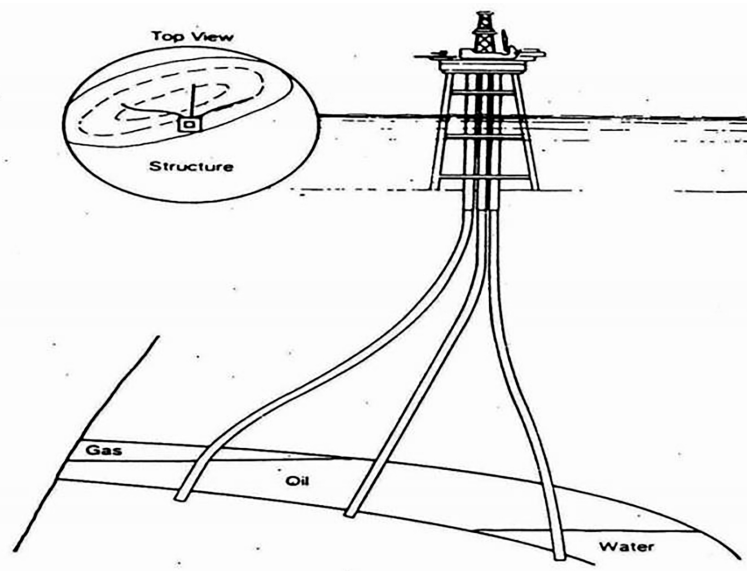
امروزه مدل ژئومکانیکی یک بعدی به عنوان ابزاری توانمند در امر پیش‌بینی پایداری چاه به حساب می‌آید. خروجی مدل ژئومکانیکی زمین، پنجره ایمن گل حفاری است. با در اختیار داشتن وزن ایمن گل حفاری در هر مقطع عمقی و مقایسه آن با وزن گل استفاده شده در چاه میتوان وضعیت پایداری چاه را پیش‌بینی نمود. روش‌های حل عددی نیز به نوبه خود نقش به‌سزایی در ساده‌سازی فرایند تحلیل پایداری دارند. با به‌کارگیری مدل‌های عددی میتوان شرایط حاکم بر هر مقطع حفاری را شبیه‌سازی نموده و رفتار چاه را تحت شرایط مختلف بررسی و تحلیل نمود.

۲-۷ حفاری انحرافی

حفاری غیر قائم در مسیر دلخواه از پیش تعیین شده را حفاری انحرافی^۱ می‌گویند. حفاری انحرافی اولین بار در سال ۱۹۲۹ همزمان با معرفی ابزارهای دقیق اندازه‌گیری زاویه انحراف چاه در طرح توسعه میدان اوکلاهاما معرفی و مورد توجه قرار گرفت (شکل ۲-۱۰). این روش در سال ۱۹۳۰ به منظور دستیابی به ذخایر زیر سطح دریا، در

^۱Deviated Drilling

ساحل هاتینگتون کالیفرنیا^۱ مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۳۳، در توسعه میدان سیگنال هیل در کالیفرنیا^۲ از چند چاه انحرافی در اطراف قبرستان سانی ساید^۳ استفاده شد. یک سال بعد، در سال ۱۹۳۴ از حفاری انحرافی به منظور جلوگیری از ریزش دیواره چاه استفاده شد.



شکل ۲-۱۰: چاه انحرافی (انزانپور، ۱۳۹۳)

گاهی در شرایط خاص، تنها راه دسترسی به مخازن از طریق حفاری جهت‌دار میسر است. به عنوان مثال به منظور دسترسی به ذخایری که در زیر شهرها که امکان دسترسی مستقیم به مخزن نیست، حفاری و استخراج ذخایری که در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور قرار دارند و همچنین به منظور کنترل و خاموش کردن چاه فوران کرده از حفاری انحرافی استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۱).

در برخی موارد، به دلیل ناپایداری چاه، از دست دادن رشته ابزار حفاری و بسته شدن مسیر مستقیم و یا به منظور اصلاح مسیر حفاری، به حفر چاه انحرافی جانبی^۴ از مسیر اولیه چاه اقدام می‌شود. گاهی از حفر چند چاه انحرافی جانبی به منظور دسترسی به ساختار زمین‌شناسی استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۲).

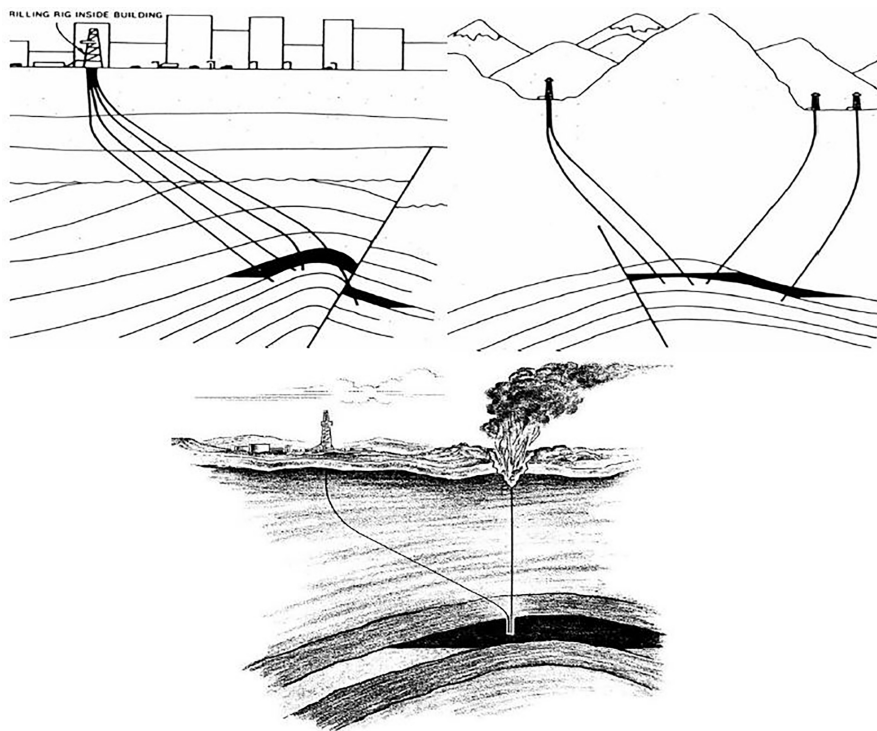
همچنین در شرایط تکتونیکی خاص مانند وجود گسل در مخزن، سبب جابجایی ذخایر می‌شود. به منظور

^۱California, Huntington Beach

^۲California, Long Beach, Signal Hill Field

^۳Sunnyside Cemetery

^۴Side Tracking



شکل ۲-۱۱: حفر چاه انحرافی برای دسترسی به سطوح غیر قابل دسترسی مستقیم (انزانپور، ۱۳۹۳)

دستیابی به این ذخایر نیز از حفاری انحرافی استفاده می‌گردد. یکی دیگر از کاربردهای حفاری جهت‌دار در سازندهای گنبد نمکی است. در این نوع از سازندها به دلیل ناپایداری فراوان سازندهای نمکی، از حفاری انحرافی استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۳).

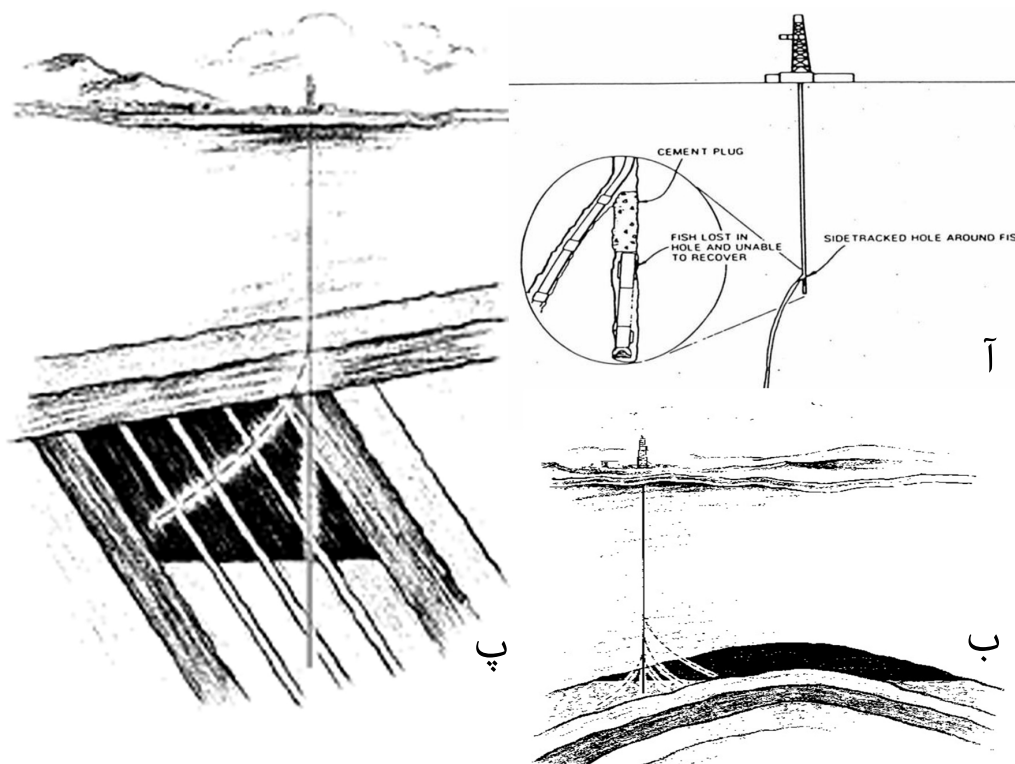
چاه افقی یکی از انواع چاه‌های انحرافی می‌باشد. به منظور افزایش سطح تماس چاه با مخزن و همچنین افزایش میزان بازیابی از مخزن، از چاه افقی استفاده می‌شود.

باتوجه به کاربرد وسیع حفاری انحرافی و مشکلات پایداری در حفاری چاه‌های انحرافی، محققان را بر آن داشت تا جوانب مختلف حفاری چاه‌های جهت‌دار را مورد ارزیابی قرار دهند. بردلی^۱ در سال ۱۹۷۹ و همچنین آدنوی^۲ و چنورت^۳ در سال ۱۹۸۷ به منظور انتخاب وزن ایمن گل حفاری و جلوگیری از ریزش چاه، مدل ارتجاعی خطی برای شکست کششی و فشاری درون چاه‌های جهت‌دار ارائه نموده‌اند. (Aadnoy et al., 1987)

¹Bradley

²Aadnoy

³Chenevert



شکل ۲-۱۲: چاه انحرافی جانبی (آ) حفر چاه انحرافی در مواقع انسداد کامل چاه قائم (ب) حفر چاه انحرافی به منظور تکمیل اطلاعات زمین شناسی و ساختاری سازند (پ) حفر چاه جهت دار به منظور دستیابی به لایه‌های شیب‌دار (انزانیور، ۱۳۹۳)

(Bradley, 1979). ماستین^۱ در سال ۱۹۸۸ عنوان کرد شکستگی‌های چاه‌های شیب‌دار در آزمون‌ها و زوایای

مختلفی رخ می‌دهد. لذا تشخیص وضعیت تنش در چاه‌های جهت‌دار کار دشواری خواهد بود (Mastin, 1988).

آدنوی در سال ۱۹۹۰، به کمک داده‌های شکست هیدرولیکی به دست آمده از چاه‌های انحرافی متعدد تنش

برجا را تخمین زد (Aadnoy, 1990). در سال ۱۹۹۲ زازاک^۲ و استوک^۳ بیان کردند که به دست آوردن میزان

تنش از آزمون شکستگی‌های برشی، تنها در صورتی امکان پذیر است که مشاهدات کافی از چاه‌های حفر شده در

شیب و آزمون‌های مختلف در شرایط تنش یکنواخت وجود داشته باشد (Zajac and Stock, 1997). کووان^۴ و

پدرسون^۵ در سال ۱۹۹۱ برای به دست آوردن تانسور تنش‌های برجا با توجه به شکست برشی در چاه شیب‌دار در

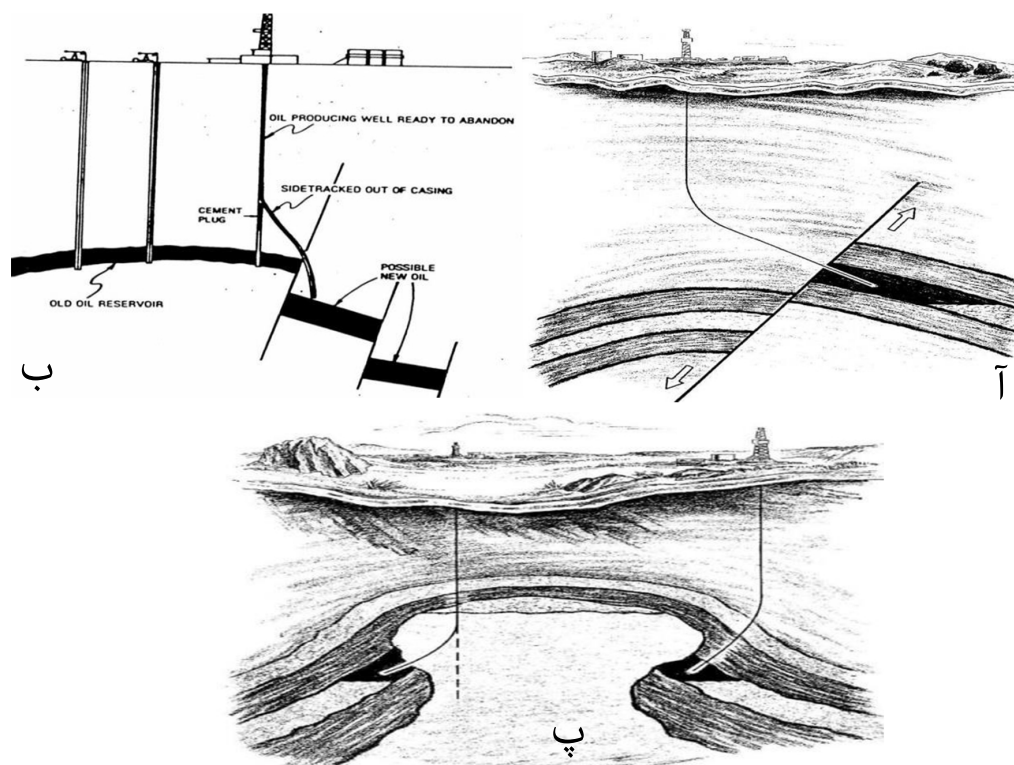
¹Mastin

²Zajac

³Stock

⁴Qian

⁵Pederson



شکل ۲-۱۳: چاه انحرافی در شرایط تکتونیکی خاص آ-ب) دسترسی به مناطق گسل خورده پ) دسترسی به ذخایر قرار گرفته در گنبد نمکی (انزانپور، ۱۳۹۳)

سازند تحکیم یافته سیلیان^۱ واقع در سوئد، روش وارونه غیرخطی^۲ ارائه کردند (Qian and Pedersen, 1991).

رولینگز^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۳ به مطالعه هندسه و نحوه تشکیل شکستگی‌ها در چاه‌های شیب‌دار پرداختند. در سال ۱۹۹۴، موریتا^۴ و همکاران جنبه‌های مکانیک سنگی حفاری چاه‌های شیب‌دار در سازندهای ضعیف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از مطالعات نشان می‌دهد که فشار مفنذی عامل افزایش تنش قائم می‌باشد و باید به عنوان عامل اصلی ناپایداری مورد بررسی قرار گیرد (Rawlings et al., 1993; Morita et al., 1994).

^۱Siljan

^۲Inverse non-linear method

^۳Rawlings

^۴Morita

۸-۲ هرزروی گل حفاری

یکی از مشکلات اساسی عملیات حفاری، هرزروی گل حفاری در درون سازندها می باشد. وجود کانالهای جریان سیال در سازند و فشار بیشتر از اندازه سیال حفاری در هدر رفت سیال حفاری به درون سازند نقش اصلی دارند. نوع هرزروی سیال حفاری باتوجه به اینکه کدام یک از عوامل بالا نقش اصلی را دارند در نوع هرزروی موثر می باشد (Stangeland, 2015). در جدول ۲-۲ و شکل ۲-۱۴ چهار حالت مختلف هرزروی آمده است.

جدول ۲-۲: چهار حالت مختلف از هرزروی سیال به درون سازند (Stangeland, 2015)

زون تراوا	سازندهای تحکیم نیافته و گراولی به دلیل وجود تخلخل و تراوایی بالا در این سازندها، باعث جریان سیال به درون سازند می شود.
زون شکسته	وجود شکستگی های افقی و قائم در سازندهایی مانند کربنات و شیل مسیری برای عبور راحت جریان سیال را فراهم می کند.
شکستگی های القایی	فشار بیش از اندازه سیال حفاری می تواند باعث ایجاد شکستگی های القایی و خروج سیال به درون سازند شود.
حفره	وجود حفره در دیواره چاه که در سازندهای آهکی در هنگام تشکیل توسط سیال آب به وجود می آید.

خسارت های ناشی از هرزروی سیال حفاری به صنعت بسیار بالا می باشد. کاهش خسارت ناشی از هرزروی،

به دو دسته کنترل پیشگیرانه^۱ و کنترل اصلاحی^۲ تقسیم می شود.

۱-۸-۲ کنترل پیشگیرانه

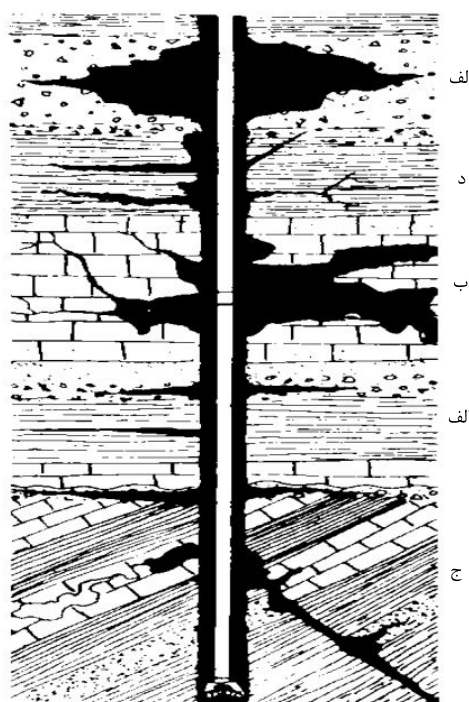
به منظور جلوگیری و یا کاهش اثر هرزروی سیال، به سه عامل حفاری باید تمرکز داشت :

- سیستم سیال حفاری
- پایش چگالی معادل سیال حفاری در گردش
- انتخاب لوله جداری مناسب

برای اطمینان از اینکه فشار سیال حفاری در محدوده پنجره امن گل حفاری قرار دارد باید چگالی معادل سیال

¹Preventative Measure

²Remedial Measure



شکل ۲-۱۴: حالات مختلف هرزروی سیال الف) سازند تراوا، ب) حفره، ج) زون شکسته، د) شکستگی القایی (Stangeland, 2015)

حفاری در گردش باید مورد مشاهده و بررسی قرار گیرد. خصوصیات رئولوژی سیال حفاری نیز از عوامل موثر بر فشار سیال است و به منظور ثابت نگهداشتن فشار در محدوده امن باید به آن توجه گردد. به منظور حفاظت سازندهای ضعیف‌تر در مقابل وزن گل حفاری مورد نیاز در عمق‌های بیشتر، باید لوله جداری مناسب در مقابل سازندها قرار داده شود. دو روش توضیح داده شده ممکن است نتواند از هرزروی جلوگیری کند. لذا نوع سیستم گل حفاری نیز مهم می‌باشد. در بعضی از موارد حفاری با روش‌های متداول گل حفاری نمی‌تواند تضمین‌کننده یک حفاری امن باشد. در این موارد از انواع دیگر از سیستم‌های سیال حفاری مانند حفاری زیر تعادلی (*UBD*)^۱ استفاده می‌گردد (Gerner, 2012).

۲-۸-۲ کنترل اصلاحی

زمانی‌که هرزروی سیال به درون سازند رخ می‌دهد، لازم است از روش‌های اصلاحی به منظور جلوگیری و کنترل هرزروی سیال حفاری استفاده کرد (Stangeland, 2015). این روش‌ها می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

^۱Underbalanced Drilling

- حذف علت هرزروی سیال و به سازند فرصت داده شود تا مشکل را برطرف کند
- اضافه کردن افزودنی‌های به سیال حفاری برای بستن راه خروج سیال به درون سازند
- بستن مقطع هرزروی توسط پلاگ‌های با ویسکوزیته بالا
- بستن مقطع هرزروی با اضافه کردن سیمان
- قرار دادن لوله در راستای مقطع هرزروی
- رها کردن چاه یا انجام عملیات حفاری انحرافی (Gerner, 2012)

۹-۲ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به بیان تعریف کلیات ناپایداری در چاه پرداخته شد. در ادامه انواع ناپایداری، به دو منشا کلی شیمیایی و مکانیکی تقسیم‌بندی شد. ناپایداری‌های با منشا مکانیکی در جدول (۲-۱) به دودسته عوامل غیرقابل کنترل و قابل کنترل دسته‌بندی گردید و به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، کلیاتی در مورد انواع گسیختگی، اهمیت پیش‌بینی ناپایداری پیش از حفاری و نهایتاً روش‌های پیش‌بینی ناپایداری مطرح گردید. در ادامه هرزروی گل حفاری به درون سازند معرفی گردید و روش‌های کنترل هرزروی به دودسته پیشگیرانه و اصلاحی دسته‌بندی شد.

با توجه به آنچه که در این فصل گفته شد می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- ناپایداری چاه ناشی از عوامل متعددی است که هرکدام سهم مهمی را دارا می‌باشند. خصوصیات مقاومتی و ارتجاعی سازند مانند مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری و وجود سازند ضعیف مانند شیل به عنوان پارامترهایی هستند که می‌تواند بر هزینه عملیات تاثیر بگذارد.
- شرایط تنش و رژیم تنش جز عوامل غیر قابل کنترل است. این عوامل در انتخاب وزن مناسب سیال حفاری اهمیت بسزایی دارد.
- انتخاب شیب و آزیموت مناسب چاه می‌تواند به هرچه بهتر بودن عملیات کمک کند.

- عواملی مانند لرزش لوله حفاری، فشارمکشی و موجی با تجربه هرچه بیشتر حفار قابل کنترل است.
- مدل ژئومکانیکی می‌تواند در تحلیل پایداری چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری استفاده شود و همچنین در کنترل پیش‌گیرانه از هرزروی سیال به درون سازند مورد استفاده قرار گیرد.

فصل ۳

مخازن شکافدار و جریان سیال در آن

۳-۱ مقدمه

مخازن شکافدار از پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در علم مهندسی نفت و در عین حال یکی از عمده‌ترین منابع تولید هیدروکربن در سراسر جهان و بالاخص کشورمان به حساب می‌آیند، لذا مشخصه سازی و مدل سازی آن‌ها همواره محل چالش مهندسیین نفت بوده است. وجود شبکه‌ای از شکاف‌ها در این گونه از مخازن، نقش بسزایی در هدایت سیالات به سمت چاه و در پاره‌ای موارد، ممانعت در امر تولید ایفا می‌نماید، شبیه‌سازی عددی این مخازن دشوارتر از مخازن عادی است. این پیچیدگی هم از جهت توصیف مخزن و هم به خاطر دینامیک حاکم بر آنهاست.

شکستگی تقریباً در تمامی سنگ‌ها وجود دارد که نیروهای تکتونیکی، نیرو لیتواستاتیک، فشار بالای سیال و یا بارگذاری حرارتی را می‌توان به عنوان عوامل ایجاد شکستگی در سنگ نام برد. حضور شکستگی‌ها با طول، بازشدگی، و جهت داری متفاوت سبب پیچیده شدن مدل سازی مخازن شکافدار شده‌است. بنابراین نمی‌توان مخازن شکافدار را با روش‌های معمول برای محیط‌های همگن مدل‌سازی کرد. این نکته نیز حائز اهمیت است که شکستگی‌ها مسیر اصلی عبور سیال می‌باشد.

۲-۳ روش‌های مدل‌سازی مخزن شکافدار

با توجه به شرایط متفاوت سیال در محیط متخلخل، روش‌های متعددی برای مدل‌سازی توسعه داده شده است. در حالت کلی سه دسته بندی کلی برای شرایط مدل‌سازی توسعه داده شده است:

- روش پیوسته یگانه^۱

- روش پیوسته دوگانه^۲

- روش شبکه مجزا^۳

در روش پیوسته یگانه، محیط دارای شکستگی توسط یک محیط متخلخل معادل و خصوصیات مخزن محیط را از مقدار نگارپتروفیزیکی به صورت میانگین به محیط نسبت می‌دهند، مدل‌سازی می‌شود. در روش پیوسته دوگانه یا تخلخل دوگانه، هر محیط شکسته را یک محیطی با تخلخل ذاتی سنگ و تعداد زیادی از شکستگی‌های ریز در نظر گرفته می‌شود. در این روش، یک فشار برای جریان سیال در شکستگی‌ها و یک فشار برای فضای متخلخل سنگ در نظر گرفته می‌شود. در آخر روش شبکه مجزا تانسور مقدار تراوایی معادل را معرفی می‌کند که این تانسور تراوایی معادل تراوایی شکستگی‌ها می‌باشد. در ادامه به اختصار روش‌های متفاوت مدل‌سازی معرفی می‌شوند.

۱-۲-۳ روش پیوسته یگانه

محیط پیوسته یگانه یا محیط معادل، یک روش مبتنی بر شبکه می‌باشد که برای ساخت مدل نیاز به مدل مرجع اولیه^۴ (REV) دارد. این مدل نماینده یک مخزن شکافدار می‌باشد (شکل ۱-۳).

اندازه مدل مرجع، از طریق محاسبه تراوایی مدل‌هایی با اندازه‌ی متفاوت اندازه گیری می‌شود. زمانی که میزان تراوایی به اندازه ثابتی رسید، اندازه مدل را به عنوان اندازه مدل معرف توده سنگ معرفی می‌کنند (شکل ۲-۳). کنکل^۵ و همکاران در سال ۱۹۸۸ نشان داد اندازه مدل مرجع با بزرگتر شدن فاصله شکستگی‌ها هم،

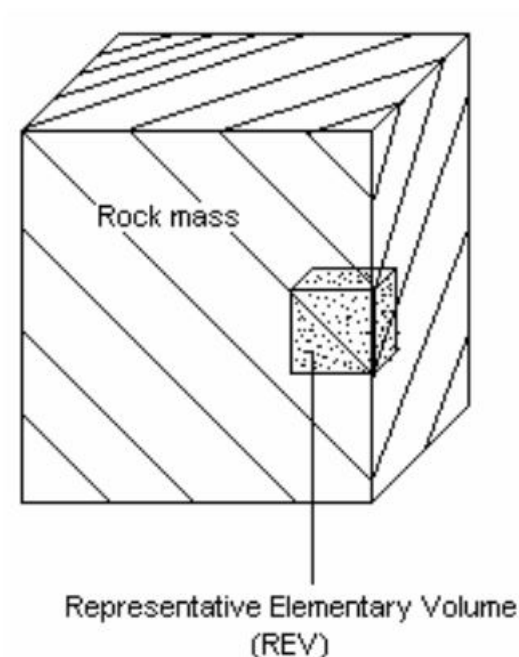
¹Single Continua

²Dual Continua

³Discrete Fracture

⁴Representative Elementary Volume

⁵Kunkel



شکل ۳-۱: مدل مرجع در توده سنگ (Chen et al., 1999)

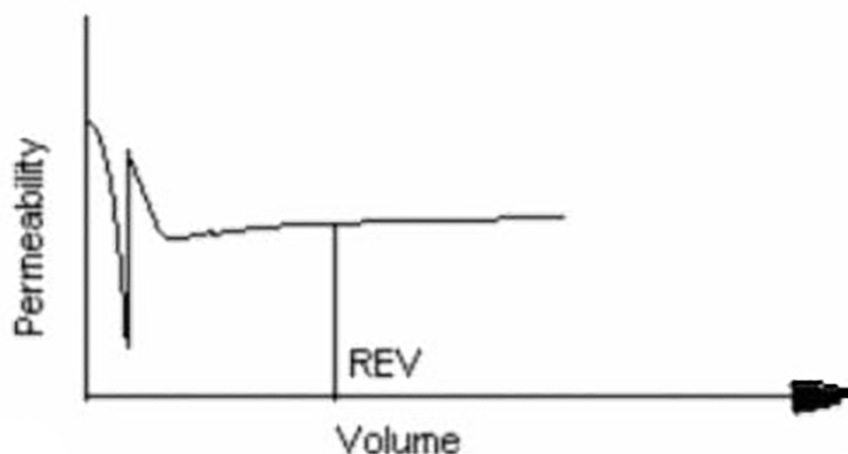
افزایش می‌یابد (Kunkel et al., 1988). اندازه مدل معرف برای سنگ‌های شکسته باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که بتواند تعداد کافی شکستگی‌ها را پوشش داده و با تغییر ابعاد مدل، میزان تراوایی بدست آمده از مدل ثابت بماند (Lee and Farmer, 1993).

چن و همکاران در سال ۱۹۹۹ یک مدل مرجع بر پایه روابط ریاضی برای محاسبه تانسور تراوایی ناهمگن گسترش دادند. در مدل چن خصوصیات دسته‌های شکستگی در مدل مرجع، از میانگین پارامترهای شکستگی‌های طبیعی در سه جهت اصلی بدست می‌آید.

۳-۲-۲ روش پیوسته دوگانه

روش تخلخل دوگانه توسط بارنبلت^۱ در سال ۱۹۶۰ برای شبیه‌سازی جریان چندفازی در محیط شکسته معرفی شد. در این مدل، ماتریکس سنگ و شکستگی‌ها به صورت لایه‌های موازی با طول بی‌نهایت فرض شده‌اند (Barenblatt, 1960). تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی جریان سیال در محیط شکسته به روش پیوسته دوگانه

¹Barenblatt



شکل ۲-۳: انتخاب اندازه مناسب مدل مرجع (Kunkel et al., 1988)

انجام شده‌است. مدل مکعب دانه شکری^۱، لایه لایه^۲ و چوب کبریتی^۳ سه مدل متفاوت از مدل‌های روش پیوسته دوگانه می‌باشند.

در این روش شکستگی‌ها و ماتریکس سنگ به صورت زنجیره پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. تخلخل اولیه بلوک با ظرفیت بالا ذخیره و تراوایی پایین و تخلخل ثانویه با ظرفیت تراوایی بالا و ذخیره سازی اندک فرض می‌شوند. در هر دو روش ذکر شده اکثر سیال عبوری از درون شکستگی‌ها متصل به هم انجام می‌شود (Gilman et al., 1983). در واقع شکستگی‌ها مسیر جریان و ماتریکس سنگ منبع تولید سیال را ایجاد می‌کند. روش مدل‌سازی تخلخل دوگانه جریانی بین ماتریکس‌ها در نظر نمی‌گیرد. در حالی که روش مدل سازی تراوایی دوگانه جریان بین ماتریکس سنگ را نیز در نظر می‌گیرد. شکل (۳-۳) نمایشی از نحوه مدل سازی مخزن شکافدار توسط روش تخلخل دوگانه رو به نمایش می‌گذارد.

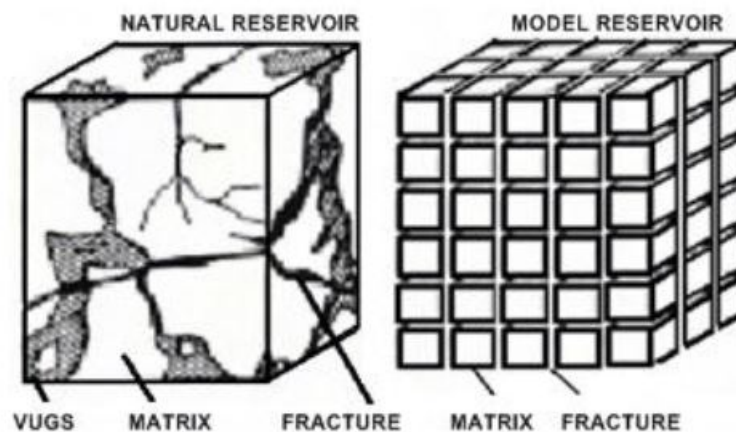
چیلینگاریان^۴ و همکاران در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۶ جریان سیال درون مخزن کربناته را به شیوه مدل پیوسته دوگانه مدل‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که شکستگی را می‌توان به کمک این روش به صورت یک

¹Sugar cube

²Layered

³matchstick

⁴Chilingarian



شکل ۳-۳: نمایشی از مخزن شکافدار واقعی و نحوه مدل سازی (Warren et al., 1963)

ماتریکس و یک شکاف مدل سازی کرد. چیلینگیاریان و همکاران از تست‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی خصوصیات مخزن و شکستگی‌ها را بدست آوردند (Teimoori Sangani, 2005).

۳-۲-۳ روش شکستگی مجزا

در ۱۰ سال گذشته، مطالعات گسترده‌ای در زمینه مدلسازی مجزا شکستگی‌ها انجام شده است. در این روش شکستگی‌ها را به صورت مجزا و بر اساس مشخصات شکستگی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این روش از تراوایی ماتریکس سنگ صرف نظر می‌شود. در حالت کلی، مدل شکستگی‌ها مجزا با توجه به اطلاعات موجود به سه روش قطعی^۱، تصادفی^۲ و ابتکاری^۳ می‌باشند.

• روش مجزا قطعی

در روش قطعی، خصوصیات زمین شناسی مخزن به طور کامل و دقیق در دسترس می‌باشد. این روش برای مخازن ساده که راه حل‌های تحلیل قابل بدست آمدن باشد، مفید است (Teimoori Sangani, 2005). لانگ و ویسرسپون^۴ در سال ۱۹۸۵ مدل مجزا سه بعدی قطعی را با توجه به خصوصیات شکستگی‌ها توسعه داد. در این مدل تراوایی ماتریکس و شکستگی‌ها در نظر گرفته نشده است (Long and Witherspoon, 1985). هیوز^۵ و

¹Deterministic

²Stochastic

³Heuristic

⁴Long and Witherspoon

⁵Hughes

بلانت^۱ در سال ۲۰۰۰ مدلی برای شبیه‌سازی محیط شکسته با استفاده از شبکه‌ها میکرو^۲ مدل‌سازی کردند (Hughes and Blunt, 2001).

• روش مجزا تصادفی

برخلاف روش قطعی، روش تصادفی از مقادیر حدودی و احتمالی استفاده می‌کند. رنارد^۳ و مارسیلی^۴ در سال ۱۹۹۷ روش تصادفی را به چهار دسته تقسیم بندی کرد؛ روش طیفی^۵، روش آشفتگی^۶، تئوری میدان^۷ و روش مونت-کارلو^۸ (Renard and De Marsily, 1997).

اودا در سال ۱۹۸۵ از این روش برای مدل‌سازی ساده مخزن شکافدار با شکستگی‌های خیلی کوتاه استفاده کرد. در مدل اودا، گرادیان فشار درون شکستگی برابر گرادیان فشار درون مخزن فرض شد. به دلیل این فرض گرادیان، جریان سیال در شکستگی‌ها، مستقل از جریان سیال در ماتریکس سنگ عمل می‌کند (Oda, 1985). کاکاس^۹ و همکاران در سال ۱۹۹۰ یک روش مستقیم در مدل‌سازی مجزا تصادفی در شبیه‌سازی جریان سیال در شبکه شکستگی‌ها استفاده کرد. در این روش از جریان سیال در ماتریکس سنگ و همچنین خصوصیات تک درزه‌ها صرف نظر می‌شود (Cacas et al., 1990).

• روش مجزا ابتکاری

در نهایت، روش مجزا ابتکاری به منظور محاسبه منطقی تراوایی معادل پیشنهاد گردید. از اصلی‌ترین روش‌های ابتکاری می‌توان از نمونه برداری^{۱۰}، روش میانگین‌گیری^{۱۱}، میانگین‌توانی^{۱۲} و شبکه بندی منعطف^{۱۳} نام برد. این روش‌ها به صورت گسترده در مخازن شکافدار ناهمگن استفاده شده است (Teimoori Sangani, 2005).

¹Blunt

²Micro Networks

³Renard

⁴Marsily

⁵Spectral Method

⁶Perturbation Method

⁷Field Theory

⁸Monte-Carlo

⁹Cacas

¹⁰Sampling

¹¹Averaging means

¹²Power average

¹³Flexible grid

۳-۳ خصوصیات شکستگی‌های طبیعی

توزیع فضایی^۱، طول، جهت یابی و بازشدگی شکستگی‌ها از خصوصیات اصلی در شبیه سازی مخازن شکافدار می‌باشند. شکستگی‌ها معمولاً در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف در مخزن به وجود می‌آیند. به علاوه، شکستگی می‌تواند توزیع‌ها با قاعده و بی قاعده، باز یا بسته بودن توسط سیمان شدگی داشته باشند.

• مکان و هندسه شکستگی: مکان و هندسه شکستگی توسط مرکز (x, y) و جهت‌یابی آن مشخص می‌شود. هندسه شکستگی بر خصوصیات جریان و خصوصیات توده سنگ موثر می‌باشد. در مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی‌ها این خصوصیات به صورت خطی، مستطیلی و یا دیسکی ساده سازی می‌شود (Teimoori Sangani, 2005).

• طول شکستگی: طول شکستگی یکی از پارامترهای مهم در شبیه سازی مخزن شکافدار می‌باشد. طول شکستگی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی از مقدار 10^{-4} تا 10^8 سانتی متر می‌تواند متغییر باشد (Teimoori Sangani, 2005).

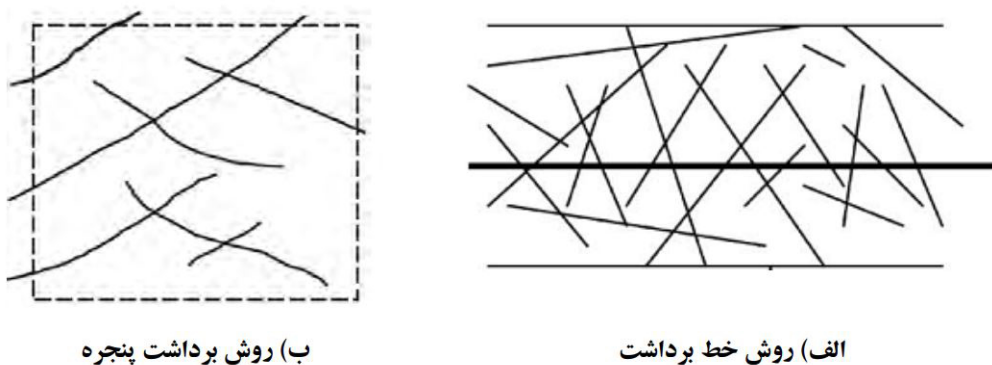
• جهت‌داری: جهت‌داری شکستگی توسط اندازه‌گیری زاویه بین خط مرکزی شکستگی‌ها و جهت شمال در جهت مثبت اندازه‌گیری می‌شود.

• بازشدگی: یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی جریان سیال، بازشدگی شکستگی می‌باشد. در بسیاری از مطالعات بازشدگی ثابت و یا تابعی از طول شکستگی در نظر گرفته می‌شود (Oda, 1985).

• چگالی: تعداد متوسط شکستگی‌ها در واحد حجم توده سنگ را به عنوان دانسیته شکستگی‌ها تعریف می‌کنند. متغییرهای بالا مجموعه پارامترهایی هستند که در برداشت صحرائی با استفاده از پیمایش صحرائی یا برداشت رخنمون اندازه‌گیری می‌شوند. به دلیل عدم قطعیت در خواص هندسی ناپیوستگی‌ها، به جای نمایش قطعی از توزیع تصادفی به عنوان نمایش ریاضی استفاده می‌شود.

¹Spatial Shape

برداشت صحرائی پارامترهای هندسی با روش‌های خط برداشت، برداشت پنجره و یا پیمایش گمانه حفر شده در منطقه صورت می‌گیرد (شکل ۴-۳). در روش خط برداشت که یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ثبت خصوصیات شکستگی‌ها است، فقط شکستگی‌هایی که خط برداشت را قطع می‌کنند برداشت می‌شوند. در روش برداشت پنجره‌ای یک سطح مربعی، مستطبی و یا دایره‌ای انتخاب می‌شود و تمام شکستگی‌هایی که در این پنجره واقع شده است، ثبت می‌گردد (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱).



(ب) روش برداشت پنجره

(الف) روش خط برداشت

شکل ۴-۳: برداشت شکستگی‌ها (الف) روش خط برداشت (ب) روش پنجره (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱)

۳-۳-۱ توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها

برای شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها لازم است. برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها محققان مختلف توابع توزیع احتمالی که با انطباق واقعی پراکندگی پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده سنگ را توصیف می‌کنند، تعیین کرده‌اند. توزیع آماری این پارامترهای هندسی در جدول ۳-۱ درج شده است (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱).

۴-۳ اصول جریان سیال در مخزن

جریان در محیط متخلخل بسیار پیچیده است و نمی‌توان آن را به وضوح جریان درون لوله‌ها و کانال‌ها توصیف کرد. اندازه‌گیری قطر لوله و محاسبه‌ی ظرفیت جریان آن به صورت تابعی از فشار نسبتاً آسان است اما در محیط متخلخل مسیر اصلی جریان مشخص و ابعاد آن قابل اندازه‌گیری نیست.

جدول ۳-۱: توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی توده سنگ (میرزائی نصیر آباد، ۱۳۹۱)

پارامترهای هندسی	تابع توزیع
مقدار شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
جهت شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
طول رخنمون	لاگ نرمال، نمایی منفی
فاصله داری	لاگ نرمال، نمایی منفی، قانون توان
موقعیت مرکز شکستگی	توزیع پواسون

آنالیز جریان سیال در محیط متخلخل، به صورت تحلیلی و تجربی مطالعه شده است. مهندسان، هیدرولوژیست ها و ... رفتار جریان در محیط متخلخل در بازه‌های مختلفی از مواد، از بسته‌های شنی تا شیشه‌های پیرکس، در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند همواره تلاش براین بوده است که نتایج این تحلیل‌ها فرمول‌بندی شوند تا امکان بررسی رفتار سیستم‌های مشابه فراهم گردد. قانون جریان سیال در محیط متخلخل را قانون داری^۱ می‌گویند که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$v_x = -k_x \frac{\sigma h}{\sigma x}, v_y = -k_y \frac{\sigma h}{\sigma y}, v_z = -k_z \frac{\sigma h}{\sigma z} \quad (۱-۳)$$

در رابطه ۳-۱، به ترتیب مولفه‌های سرعت جریان و نفوذپذیری محیط متخلخل در جهت i می‌باشند.

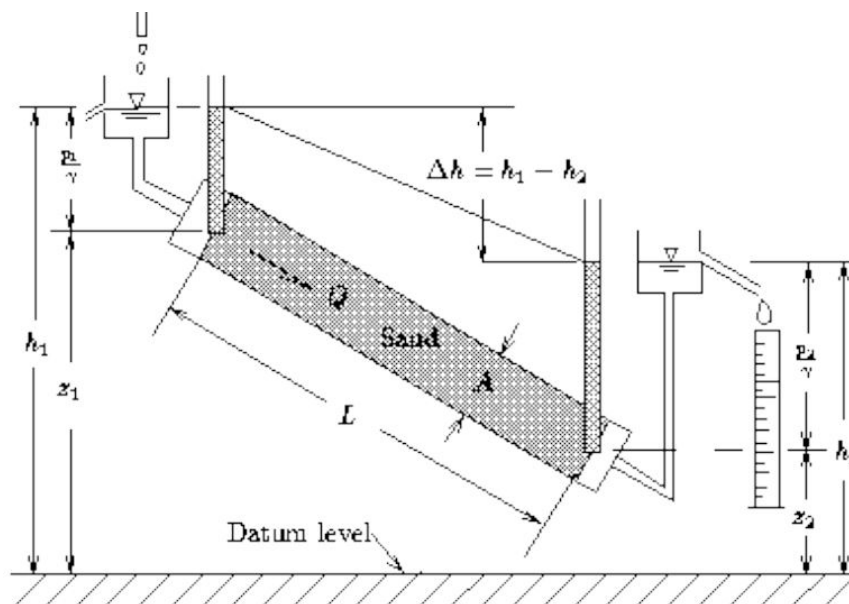
$$h = Z + \frac{p}{g\rho_f} \quad (۲-۳)$$

در رابطه ۳-۲، h هد هیدرولیک، ρ_f چگالی سیال، g شتاب جاذبه، Z ارتفاع سیال از سطح مبنا و p فشار سیال می‌باشند. در شکل ۳-۵ نحوه انجام آزمایش داری در محیط متخلخل و همگن را نشان می‌دهد.

۳-۵ اصول جریان سیال در محیط با شکستگی

در تحلیل هیدرومکانیکی توده سنگ درزه‌دار همیشه فرض بر این است که ماتریکس سنگ نفوذناپذیر است و به‌نوعی این درزه و شکاف‌های توده سنگ هستند که نفوذپذیری معادل توده سنگ موردنظر را تعیین می‌کنند. برای

^۱Darcy



شکل ۳-۵: نحوه انجام آزمایش داری (Teimoori Sangani, 2005)

بررسی جریان سیال در توده سنگ درزه دار، ابتدا با ساده‌سازی شبکه شکستگی به یک تک درزه، جریان سیال را مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پامروی و رایبیسون^۱ در سال ۱۹۶۷ برای اولین بار آزمایش‌های خود را روی نمونه‌هایی مصنوعی با سه دسته درزه متقاطع انجام دادند. حرکت جریان سیال در یک مسیر برای اولین بار به‌عنوان نمونه در یک لوله یا کانال توسط لومیز^۲ در سال ۱۹۵۱ انجام گرفت. در این مطالعات تغییر شکل‌پذیری ناشی از تنش در نظر گرفته نشده بود درحالی‌که تغییرات ناشی از تنش اعمالی بروی مسیر هدایت جریان می‌تواند تغییرات نرخ جریان را به همراه داشته باشد (Indraratna et al., 1999).

مطالعات آزمایشگاهی دیگری بروی خواص سیال در یک شکستگی منفرد توسط لومیز در سال ۱۹۵۱ و لوئیز^۳ در سال ۱۹۶۸ انجام گرفت. نوزیل و تریسی^۴ در سال ۱۹۸۱ و سانگ و براون^۵ در سالهای ۱۹۸۴ و ۱۹۸۷ دریافتند که جریان سیال در یک تک درز تابع زبری سطح درزه، بازشدگی متغییر، میزان بار خارجی وارده به مسیر هدایت جریان، مواد پرکننده درزه‌ها می‌باشند (Indraratna et al., 1999).

¹Pomeroy & Robinson

²Lomize

³Louis

⁴Neuzil & Tracy

⁵Tsang & Brown

۳-۵-۱ جریان از داخل تک درزه با فرض صفحات صاف و موازی

جریان سیال از داخل یک تک درزه با فرض صفحات صاف و موازی، متداولترین روش برای شبیه سازی حرکت سیال در یک درزه می باشد. جریان سیال در یک درزه با بازشدگی e از معادله ناویر-استوکس به دست می آید که به مدل صفحات موازی یا قانون دارسی در مهندسی مکانیک سنگ معروف می باشد (Jing and Stephansson, 2007).

$$V_x = \frac{g\delta h}{12\nu\delta x} \left[Z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \quad (3-3)$$

$$V_y = \frac{g\delta h}{12\nu\delta y} \left[Z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \quad (4-3)$$

روابط ۳-۴ و ۳-۳ به روابط رینولدز معروف هستند که برای دو صفحه موازی بدون هیچگونه زبری و جریان به صورت آرام، پایدار و خطی صحت دارند. نرخ جریان عبوری از یک درزه به کمک قانون کوبیک از رابطه (۳-۵) به دست می آید (Jing and Stephansson, 2007):

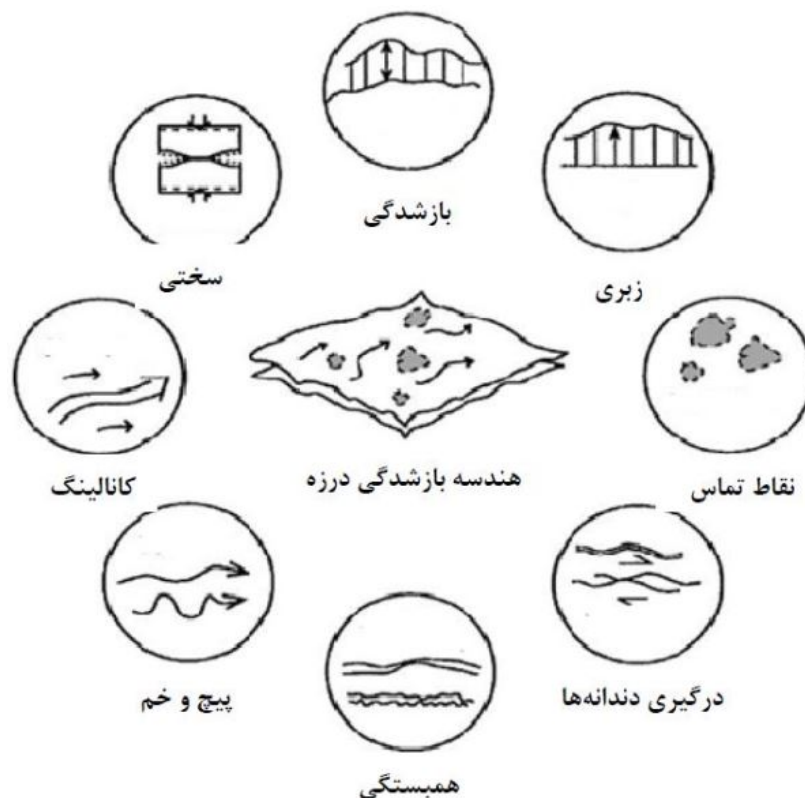
$$Q = \rho_f g \frac{e^3}{12\mu} \quad (5-3)$$

در رابطه (۳-۵)، Q ، نرخ جریان، e میزان بازشدگی درزه، ρ_f چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی سیال است. در نتیجه تراوایی سیال از درزه از رابطه (۳-۶) به دست می آید:

$$k = \frac{ge^2}{12\nu} = \rho_f g \frac{ge^2}{12\mu} \quad (6-3)$$

۳-۵-۲ عوامل موثر در حرکت سیال در سنگ تک درزه

شکستگی ها بهترین مسیر عبور جریان سیال از درون سنگ می باشند. در عبور سیال از درون درزه ها، عواملی بر حرکت جریان سیال تاثیر دارند که به صورت شماتیک در شکل ۳-۶ ارائه شده است.



شکل ۳-۶: عوامل موثر در حرکت سیال (Hakami, 1995)

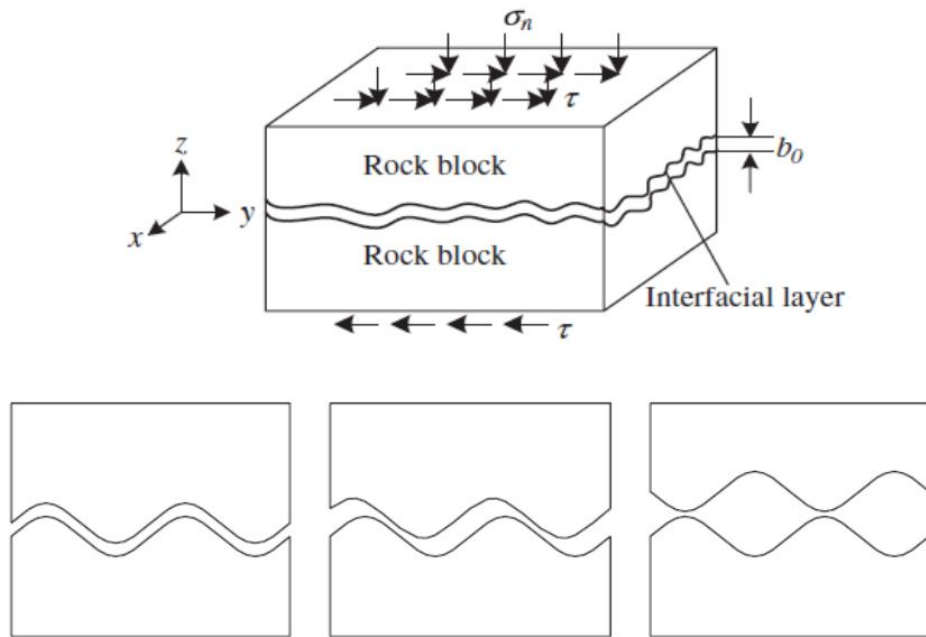
۳-۵-۳ رفتار اتساعی درزه و تاثیر آن بر نرخ جریان

رورانندگی سطح درزه بخاطر زبری سطح درزه تحت تنش نرمال کم و به واسطه اعمال تنش برشی که عموماً باعث افزایش بازشدگی درزه می‌شود را رفتار اتساعی درزه گویند. مقدار اتساع درزه بر میزان نفوذپذیری معادل توده سنگ موثر است. چنانچه مکانیسم اتساعی درزه در تحلیل هیدرو مکانیکی در نظر گرفته شود مشخص می‌گردد که در اثر اتساع درزه مقدار بیشتری جریان سیال از درزه عبور می‌کند چراکه اتساع باعث افزایش بازشدگی مؤثر درزه شده است (شکل ۳-۷) (Zhou et al., 2008).

۳-۵-۴ رفتار هیدرو مکانیکی سنگ تک درزه

در سالهای ۱۹۶۰ برهم کنش‌های هیدرو مکانیکی^۱ و فرایندهای توأمان در توده سنگ‌ها در مباحث مهندسی عمران، محیط زیست، نفت و معدن مورد توجه بیشتر محققان قرار گرفت. به نحوی که بسیاری از پدیده‌ها مانند

¹ Hydromechanical Interactions

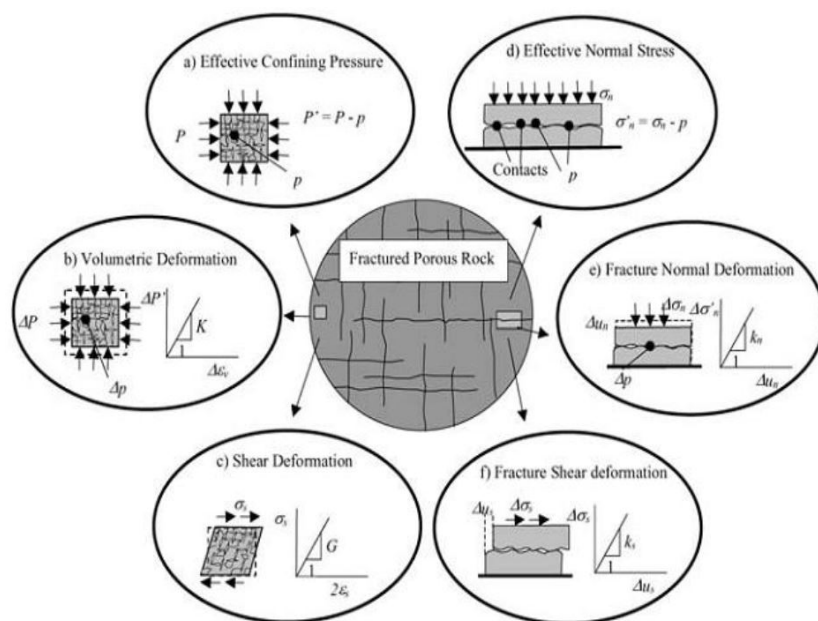


شکل ۳-۷: اتساع برشی درزه در اثر جابجایی برشی (Zhou et al., 2008)

شکست در پی سدها، زمین لغزشها، نشستها، زمین لرزهها، نشت آب به سازه‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن این رفتار در توده سنگ درزه‌دار معنا پیدا کردند. در مهندسی سنگ به اندرکنش‌های فیزیکی بین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی در توده سنگ که به اختصار با $H - M$ ^۱ نمایش داده می‌شود، رفتار توامان هیدرومکانیکی می‌گویند. در شکل ۳-۸ به صورت شماتیک فرآیندها مختلف رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار نشان داده می‌شود (Rutqvist and Stephansson, 2003).

اعمال شدن نیرو و تنش بر یک محیط اشباع، با فشرده کردن ذرات تشکیل دهنده و کاهش حجم می‌گردد. اگر نیرو به صورت ناگهانی اعمال شود سیال درون منافذ کمی برای خروج از محیط داشته در نتیجه فشرده شدن سبب افزایش فشار می‌شود. به این فرآیند، فرآیند هیدرومکانیکی زهکشی نشده می‌گویند. از طرفی دیگر، اگر نیرو خارجی با سرعت کمتری به محیط اعمال شود، آب موحود در محیط بدون فشردگی به بیرون جریان پیدا می‌کند. به این فرآیند، فرآیند هیدرومکانیکی زهکشی شده می‌گویند. در این فرآیندها برخلاف فرآیندهای زهکشی نشده، کاهش در فشار آب منفذی به رخ دادن پدیده تحکیم و نشست در محیط موردنظر کمک می‌کند. این نوع از فرآیندهای

¹ Hydro-mechanical Coupling



شکل ۳-۸: نمایی از سنگ متخلخل و درزه دار (Rutqvist and Stephansson, 2003)

هیدرومکانیکی، به طور کلی تحت عنوان فرآیندهای هیدرو مکانیکی مستقیم^۱ شناخته می‌شوند. علاوه بر فرآیند هیدرومکانیکی مستقیم، فرآیند هیدرومکانیکی غیر مستقیم^۲ نیز وجود دارد. در این نوع از فرآیند تغییرات به وجود آمده در محیط سبب تغییر خواص هیدرولیکی و مکانیکی محیط می‌گردد. در خاک‌ها و سنگ‌های تحکیم نیافته، فرآیند هیدرومکانیکی مستقیم متداول می‌باشد. در مقابل، فرآیند هیدرومکانیکی در سنگ‌های شکسته، فرآیند غیرمستقیم می‌باشد (Rutqvist and Stephansson, 2003).

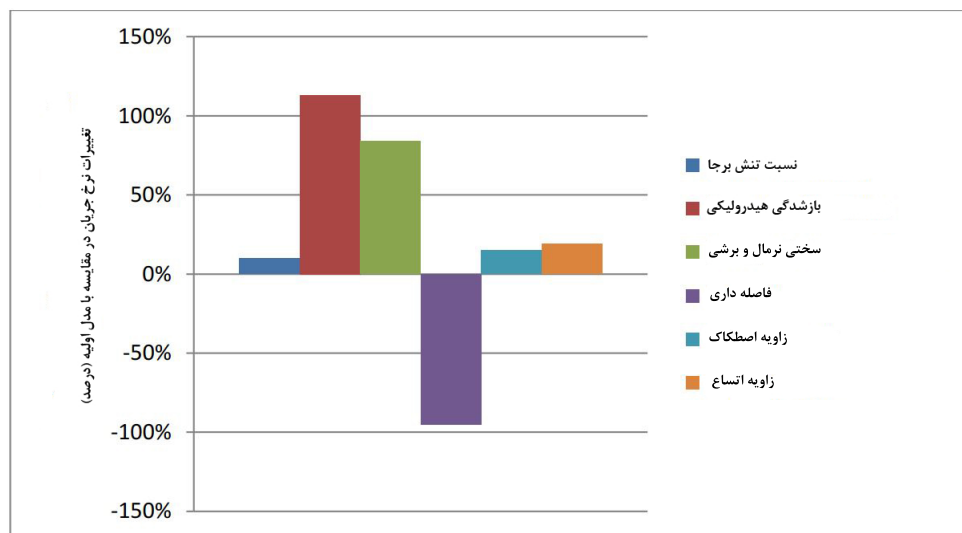
۳-۶ تحلیل حساسیت تأثیر پارامترهای هیدرو مکانیکی و تنش‌های محصورکننده بر نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار

از آنجایی که در نتایج اندازه‌گیری‌ها و تعیین ویژگی‌های توده‌سنگ عدم قطعیت وجود دارد، لذا باید تأثیر عوامل مختلف بر روی نرخ جریان عبوری مورد بررسی قرار گیرد. لذا بسیاری از محققان به منظور درک بهتر رفتار سیال در توده سنگ، به مطالعات تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اثر گذار بر جریان سیال در توده سنگ را به نظر قرار داده‌اند.

¹ Direct hydro-mechanical couplings

² Indirect hydro-mechanical couplings

فرهمند و همکاران در سال ۲۰۱۱ با تحلیل رفتار هیدرو مکانیکی سنگ پی سد گتوند با استفاده از کد 3DEC و انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ جریان آب عبوری از پی این سد به این نتیجه رسیدند که افزایش بازشدگی درزه و نسبت تنش اعمالی به توده سنگ، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر نرخ جریان عبوری از توده سنگ دارا می‌باشند. همچنین تأثیر فاصله‌داری به صورت معکوس عمل کرده به طوری که با افزایش فاصله‌داری نرخ جریان در توده سنگ کاهش می‌یابد. شکل ۳-۹ نتایج به دست آمده از این تحقیق را نشان می‌دهد (Farahmand et al., 2011).



شکل ۳-۹: تغییرات نرخ جریان عبوری از توده سنگ با افزایش ۵ درصدی هر یک از پارامترهای ورودی مدل (Farahmand et al., 2011)

ایوارس^۱ در سال ۲۰۰۶، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC به مطالعه‌ی تأثیر عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی بکار گرفته شده در مدلسازی عددی جریان آب ورودی به یک تونل پرداخت. او با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی در نرم‌افزار، میزان تغییرات نرخ جریان آب ورودی به یک تونل دایره‌ای سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داد (Ivars, 2006).

جعفری و بابادانگلی در سال ۲۰۰۹ به بررسی تأثیر پارامترهای در ساخت شبکه شکستگی (طول خط اثر، چگالی شکستگی، جهت‌داری و بازشدگی درزه‌ها و بعد فرکتال سیستم درزه‌ها) را بر نفوذپذیری مدل‌های دوبعدی

¹Ivars

نفوذپذیری مدل‌های دوبعدی شبکه شکستگی مجزا مورد مطالعه قرار دادند. در تحلیل حساسیت‌های انجام گرفته مشخص شد که بعد فرکتال بیشترین تأثیر را بر نفوذپذیری مدل‌ها در مقایسه با دیگر پارامترهای شبکه‌ی شکستگی دارد. همچنین در بین چهار پارامتر طول خط اثر، چگالی شکستگی‌ها، جهنداری و بازشدگی درزه‌ها، چگالی و طول خط اثر درزه‌ها بیشترین اثر را بر نفوذپذیری مدل‌ها دارند. با کاهش چگالی و طول خط اثر درزه‌ها از یک مقدار مشخصی، بازشدگی (هدایت هیدرولیکی) درزه‌های تکی اثرگذارترین پارامتر شبکه در نفوذپذیری مدل‌ها می‌باشند (Farahmand et al., 2011).

۷-۳ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به انواع روش‌های مدل‌سازی مخازن شکافدار و تاریخچه مطالعات مدل‌سازی عددی پرداخته شد. سه روش در مدل‌سازی مخازن شکافدار کاربرد دارند، روش پیوسته یگانه، روش پیوسته دوگانه و روش شبکه مجزا. در ادامه به توصیف خصوصیات شکستگی طبیعی و نحوه مطالعه و بررسی آماری شکستگی‌ها جهت استفاده در مدل‌سازی عددی مجزا پرداخته شد. در ادامه اصول جریان، روابط حاکم بر جریان و همچنین عوامل موثر بر تراوایی مخازن شکافدار ارائه گردید. عواملی مانند بازشدگی درزه و نسبت تنش برجا که بر جریان سیال موثر می‌باشند، تأثیر مستقیم بر روی نفوذپذیری مخزن دارند.

فصل ۴

معرفی میدان و ساخت مدل ژئومکانیکی

۴-۱ مقدمه

مدل ژئومکانیکی زمین^۱ روشی برای نمایش و بررسی شرایط تنش و خصوصیات مکانیکی زمین برای یک محدوده مشخص از چاه مورد مطالعه می‌باشد (Afsari et al., 2009). گام اول در هر آنالیز ژئومکانیکی، ساخت مدل ژئومکانیکی برای سازند مورد نظر می‌باشد (Al-Wardy and Portillo, 2010). از مقایسه و تفسیر مدل مکانیکی زمین با داده‌های مغزه ارتباط داد و شرایط تنش، فشار ریزش^۲ و فشار شکست^۳ سازند را پیش‌بینی کرد. از همه مهم‌تر، مدل مکانیکی زمین می‌تواند برای تعیین پنجره ایمن گل حفاری^۴ با هدف کاهش خطر ریزش و شکست سازند مورد استفاده قرار گیرد (Archer and Rasouli, 2012).

بسیاری از پروژه‌های مرتبط با صنعت نفت با مشکلات ژئومکانیکی شامل فشار فراتعادلی^۵، ناپایداری چاه، تراکم مخزن^۶، شکست لوله جداری^۷، تولید ماسه^۸، نشست زمین^۹ و غیره مواجه می‌باشد. باهدف کاهش نیاز به شناخت خصوصیات ژئومکانیکی چاه و منطقه مورد بررسی قرار گیرد. ساخت مدل ژئومکانیکی تاثیر به‌سزایی در کاهش هزینه و زمان در صنایع بالادستی نفت دارد (Afsari et al., 2009).

¹Mechanical Earth Model (MEM)

²Breakout Pressure

³Breakdown Pressure

⁴Mud Weight Window (MWW)

⁵Overpressure

⁶Reservoir Compaction

⁷Casing Failure

⁸Sand Production

⁹Surface Subsidence

برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی شامل موارد زیر است :

- تخمین فشار منفذی و فشار شکست سازند
- کاهش خطر از دست دادن رشته ابزار حفاری در اثر ناپایداری
- تصمیم گیری در حین حفاری به کمک مدل ژئومکانیکی ۳ بعدی (Afsari et al., 2009)

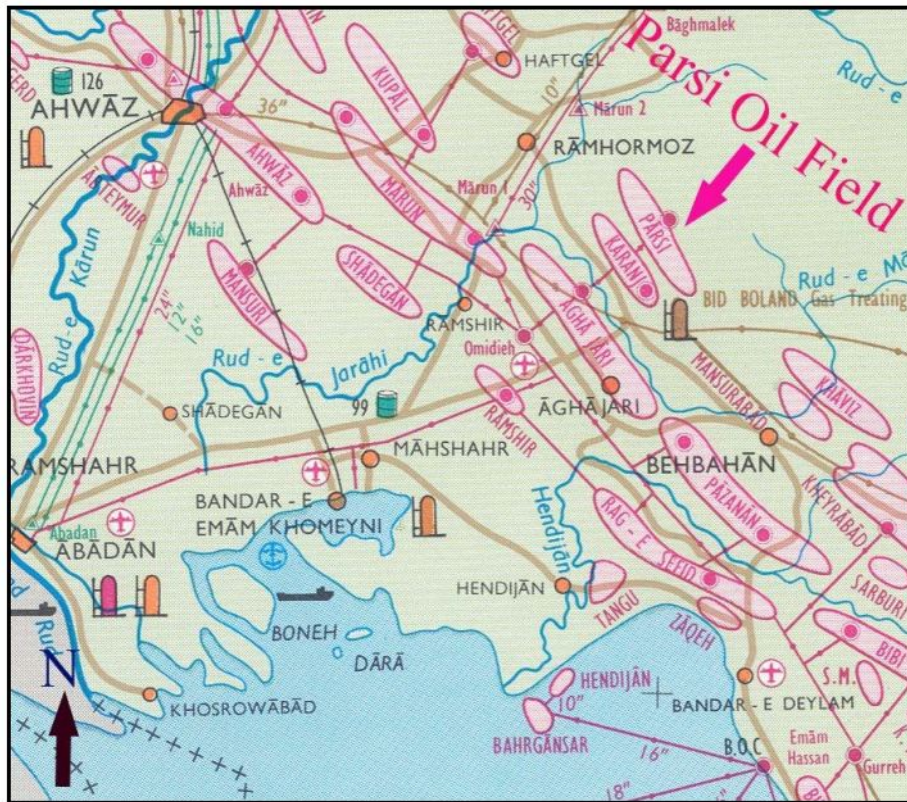
۲-۴ میدان پارسی

میدان پارسی در استان خوزستان و در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اهواز و در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان رامهرمز واقع شده است. میدان پارسی یکی از میادین بزرگ نفتی است که در شمال بخش مرکزی فروافتادگی دزفول، در بین میادین کرنج، ماماتین، کوه بنگستان، منصورآباد و در محدوده عرض های جغرافیایی ۳۰ و ۳۲ درجه و طول جغرافیایی ۴۹ و ۵۰ واقع شده است (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳).

تاقدیس پارسی یک چین نامتقارن، دوکوهانه و دو دماغه با روند شمال غرب- جنوب شرق می باشد که بر اساس آخرین منحنی بسته ساختاری در افق آسماری در عمق ۲۱۰۰ متری زیر سطح دریا ۳۷ کیلومتر طول و ۶ کیلومتر عرض دارد. محور طولی مخزن در سطح زمین بر روی رخنمون هایی از سازندهای گچساران، میشان، آغاچاری و بختیاری قرار گرفته است که در حدود ۷.۳ کیلومتر نسبت به محور ساختمان در راستای سازند آسماری در جهت جنوب غرب جا بجا شده است (شکل ۱-۴) (یزدانی، ۱۳۸۵).

۳-۴ جمع آوری داده های مورد نیاز

برای ساخت مدل ژئومکانیکی از داده های متنوعی مانند، داده های نگار چاه، داده های گزارش حفاری و اندازه گیری های آزمایشگاهی بر روی مغزه های حفاری استفاده می شود (جدول ۱-۴). با توجه به اینکه هزینه مغزه گیری از چاه های نفت و گاز بالاست، عملیات مغزه گیری فقط در بخش های خاص و مهمی از چاه انجام می گیرد؛ لذا از داده های نگارچاه که به صورت پیوسته در سراسر چاهها برداشت می شود به عنوان داده های ورودی برای ساخت مدل ژئومکانیکی استفاده می شود (Razi et al., 2010).



شکل ۴-۱: موقعیت میدان پارسی در ارتباط با میادین مجاور در فروافتادگی دزفول (مناطق نفت خیز جنوب)، (۱۳۹۳)

پس از جمع آوری داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی اشاره شده در جدول (۴-۱) لازم است داده‌های برداشت شده مورد ارزیابی قرار گرفته و داده‌های پوچ^۱ و اشتباه قبل از مدل سازی حذف شوند. در این پایان‌نامه از چاه ۷۳ میدان پارسی که یک چاه قائم می‌باشد، برای مدل‌سازی استفاده شده است. در ادامه به معرفی پارامترهای مورد نیاز و نحوه محاسبه آن‌ها پرداخته می‌شود.

¹Null Data

جدول ۴-۱: داده های مورد نیاز برای مدل ژئومکانیکی (Afsari et al., 2009)

پارامترهای مورد نیاز	لاگ های اصلی	منابع دیگر
مشخصات لایه های زمین شناسی	لاگ گاما، لاگ چگالی، لاگ صوتی (V_P)	کنده های حفاری، سکانس های چینه شناسی
فشار منفذی (P_P)	لاگ صوتی (V_P)، لاگ الکتریکی	تست یک پارچگی سازند، گزارش روزانه حفاری
فشار روباره (S_V)	چگالی بالک	تکه های حفاری
حداقل تنش افقی (S_h)	لاگ صوتی فشاری و برشی (V_P, V_S)	تست نشت، فشار منفذی، گزارش روزانه حفاری، تست تزریق پلکانی
حداکثر تنش افقی (S_H)	لاگ تصویری، مدل تنش چاه	داده ها مقاومت سنگ
جهت تنش	لاگ تصویری، لاگ کالیپر چند باوزی	داده های لرزه ای ۳ بعدی، نقشه ساختار
پارامترهای ارتجاعی	لاگ صوتی فشاری و برشی (V_P, V_S)، چگالی بالک	آزمایش های آزمایشگاهی مغزه
مقاومت مکانیکی سنگ	لاگ صوتی فشاری و برشی (V_P, V_S)، چگالی بالک	آزمایش های حفاری کنده های حفاری
مکانیزم شکست	لاگ تصویری، لاگ کالیپر چند بازو	گزارش روزانه حفاری

۴-۴ محاسبه موج فشاری برشی

موج برشی^۱ یکی از ورودی های مهم در محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی مهم مانند مدول های ارتجاعی^۲ و مدول حجمی^۳ و غیره برای مدلسازی ژئومکانیک می باشد. از طرفی نگار موج برشی و بسیاری از آزمایشات درون چاهی و نگارهای مربوط در تمامی چاه های نفت و گاز انجام نمی گردد. لذا محققین در دهه های گذشته با انجام آزمایش های متعدد در سازندها و مخازن در مناطق مختلف دنیا انجام داده و رابطه های تجربی را برای محاسبه موج برشی پیشنهاد نموده اند. به عنوان مثال، کاستاگنا در سال ۱۹۹۳ با انجام آزمایش بر روی سنگ ها و سازندهای مختلف رابطه ای برای نسبت دادن موج فشاری و برشی را ارائه نمود (Castagna et al., 1993). روابط زیر ارتباط سرعت موج فشاری (V_P) و سرعت موج برشی (V_S) را برای سنگ های مختلف نشان می دهد که توسط کاستاگنا توسعه داده شده است.

¹Shear Waves

²Elastic Modulus

³Bulk Modulus

$$V_S = 0.583V_P - 0.7776 \quad \text{سنگ دولومیت} \quad (1-4)$$

$$V_S = 0.5509V_P^2 + 1.0168V_P - 1.0305 \quad \text{سنگ آهک} \quad (2-4)$$

$$V_S = 0.77V_P - 0.8674 \quad \text{شیل} \quad (3-4)$$

$$V_S = 0.8042V_P - 0.8559 \quad \text{ماسه سنگ} \quad (4-4)$$

در سال ۲۰۰۳ اسکندری و همکاران با در نظر گرفتن تخلخل نوترونی^۱ ($NPHI$) و چگالی سنگ سازند^۲ ($RHOB$) رابطه‌ای را برای مخازن کربناته ایران گسترش دادند (Eskandari et al., 2003).

$$V_S = -17.0885 + 0.4068V_P - 2.1907NPHI^2 - \\ 1.1794NPHI - 3.247RHOB^2 + 15.3587RHOB \quad (5-4)$$

بروچر در سال ۲۰۰۵ رابطه‌ی بین موج فشاری و برشی را در حالتی که مقدار سرعت موج فشاری در بازه‌ی $1/5 \leq V_P \leq 8/5$ قرار دارد را ارائه نموده است (Brocher, 2005).

$$V_S = 0.7858 - 1.2344V_P + 0.7949V_P^2 - 0.1238V_P^3 + 0.0064V_P^4 \quad (6-4)$$

و همچنین رازی و همکاران در سال ۲۰۱۰ با مطالعه بر روی مخازن کربناته ایران رابطه‌ی بین موج فشاری و موج برشی با در نظر گرفتن تخلخل و چگالی سنگ را ارائه نموده است (Razi et al., 2010).

$$DT_S = 2.015DT_C - 4.223 \quad (7-4)$$

$$DT_S = 0.512DT_C + 1.24NPHI + 5.068RHOB - 54.86 \quad (8-4)$$

در روابط ذکر شده، V_S و V_P به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی برحسب $\frac{Km}{sec}$ ، DT_C و DT_S به ترتیب زمان گذر موج فشاری و برشی برحسب $\frac{\mu sec}{ft}$ ، $RHOB$ چگالی برحسب $\frac{g}{cm^3}$ و $NPHI$ تخلخل نوترونی می‌باشد.

¹Neutron Porosity (NPHI)

²Density (RHOB)

۴-۴-۱ تخمین موج فشاری برشی به کمک شبکه عصبی مدار شعاعی

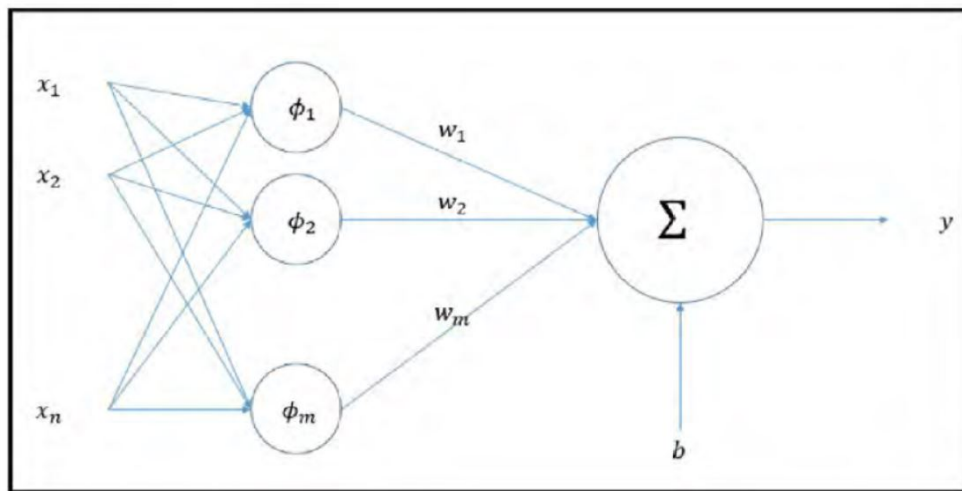
شبکه‌های عصبی نوعی مدل‌سازی ساده شده از سیستم‌های عصبی واقعی هستند که کاربرد فراوانی در حل مسائل مختلف در علوم دارند. حوضه کاربرد این شبکه‌ها آنچنان گسترده است که از کاربردهای طبقه‌بندی گرفته تا کاربردهایی نظیر درون‌یابی، تخمین، آشکارسازی و غیره را شامل می‌شود. شاید مهم‌ترین مزیت این شبکه‌ها، توانایی وافر آن‌ها در کنار سهولت استفاده از آن‌ها است (Witten et al., 2016). شبکه‌های عصبی، طبقه‌بندی الگو هستند. در حالیکه هر طبقه‌بندی الگو، شبکه عصبی نیست. برخی از ویژگی‌های مختص به شبکه عصبی که در سیار طبقه‌بندی‌ها قابل مشاهده نیست، توانایی آن‌ها در یادگیری و تعمیم است. اگر خواسته شود که تمام الگوهای خروجی متناظر با آن‌ها، برای موضوع مورد بحث بدست آورده و به سیستم وارد شود، مستلزم زمان بسیار زیادی به منظور وارد نمودن تمامی ترکیبات محتمل برای ورودی و حافظه زیادی برای ذخیره این اطلاعات است. بهتر آن است که سیستم توسط ارائه تعداد کمتری از مثال‌ها که باعث ایجاد جواب درست می‌شوند، برنامه نویسی شود. این رویه به معنای آموزش است، یعنی سیستم یاد می‌گیرد که الگوهای معینی را شناسایی کند و پاسخ خروجی درستی به آن‌ها بدهد (طالش حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

پس از اتمام فاز آموزش، فاز عملیاتی قرار دارد که در آن الگوها مجدداً به سیستم نشان داده می‌شوند. در صورتیکه این الگوها با الگوهای ارائه شده به سیستم در فاز آموزش یکسان باشند، خروجی صحیح ایجاد می‌شود. دلیل این امر تنظیم سیستم در فاز یادگیری بدین منظور است. در حالت ایده‌آل، ماشین باید بتواند در قبال دریافت ورودی‌هایی که حتی در فاز آموزش ندیده است، پاسخ صحیح ارائه کند. به چنین ویژگی در شبکه عصبی اصطلاحاً تعمیم گویند (طالش حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

شبکه‌هایی با تابع مدار شعاعی یا RBF ^۱ به طور گسترده برای تخمین غیر پارامتریک توابع چند بعدی از طریق مجموعه‌ای محدود از اطلاعات آموزشی به کار می‌رود. شبکه‌های عصبی شعاعی به واسطه آموزش سریع و فراگیر بسیار جالب و مفید هستند و مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. معماری اصلی شبکه مدار شعاعی از سه لایه

^۱ Radial Basis Function

تشکیل شده است. لایه اول، لایه ورودی می‌باشد و هیچگونه پردازشی را انجام نمی‌دهد. لایه دوم یا لایه پنهان، انطباق غیر خطی ما بین فضای ورودی و یک فضای معمولاً با بعد بزرگتر برقرار می‌کند. این لایه نقش مهمی در تبدیل الگوهای غیر خطی به الگوهای تفکیک پذیر خطی دارد. سرانجام لایه سوم، جمع وزنی را به همراه یک خروجی خطی تولید می‌کند. خصوصیت منحصر به فرد این شبکه، پردازشی است که در لایه پنهان انجام می‌گیرد (شکل ۴-۲) (طالش حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

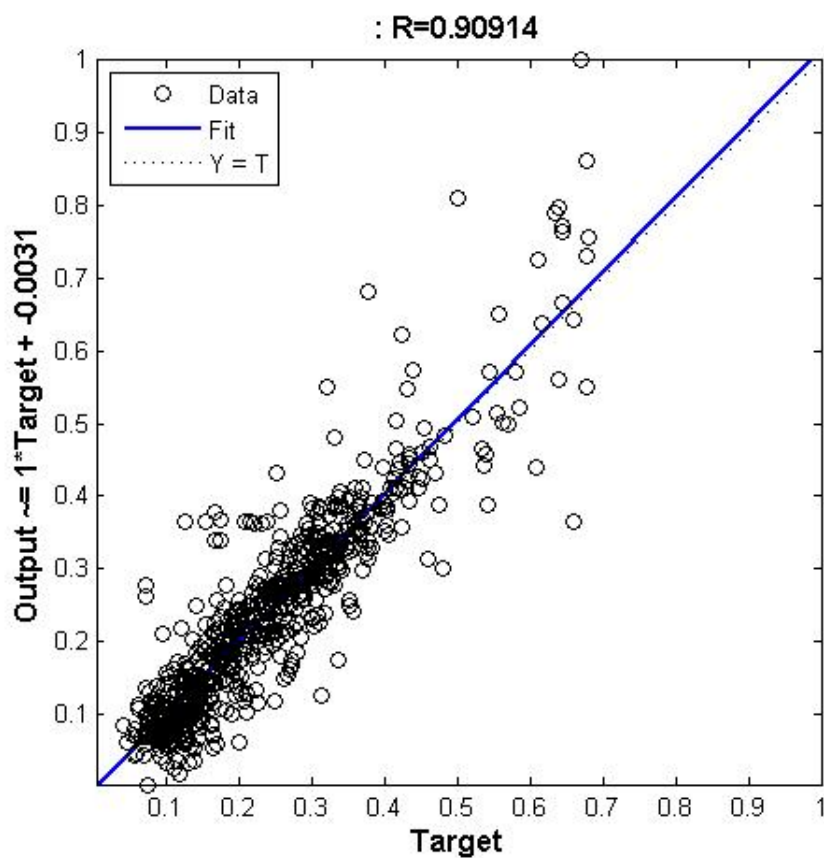


شکل ۴-۲: ساختار شبکه عصبی مدار شعاعی (RBF) (طالش حسینی و همکاران، ۱۳۹۶)

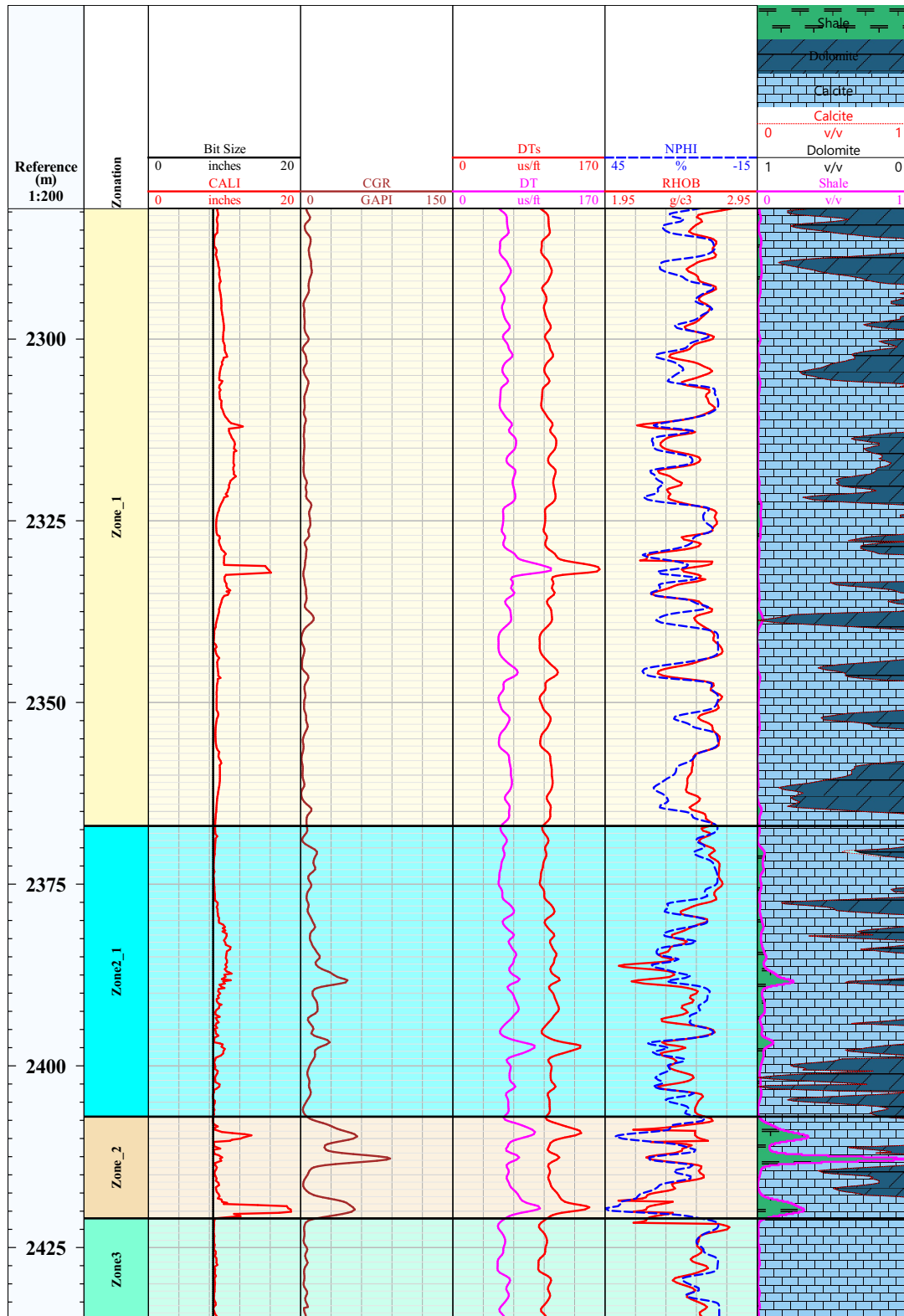
در این تحقیق از شبکه مدار شعاعی به منظور تخمین موج فشاری برشی استفاده است. به منظور تخمین موج برشی چاه ۷۳ به این شکل عمل شد که ابتدا به کمک موج فشاری چاه ۷۶ که به عنوان ورودی و موج برشی چاه ۷۶ به عنوان هدف به شبکه RBF داده شد. پس از آموزش شبکه، داده موج فشاری چاه ۷۳ به عنوان ورودی شبکه آموزش دیده استفاده شد و موج برشی چاه ۷۳ محاسبه گردید. شکل ۴-۳ نمودار کلی و رگرسیونی حاصل از آموزش شبکه RBF را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار همبستگی برابر با ۰/۹۱ بوده و نشان دهنده همبستگی بالای داده‌ها می‌باشد. در شکل ۴-۴ نگارهای پتروفیزیکی برداشت شده از چاه ۷۳ و نگار موج برشی تخمین زده شده توسط شبکه عصبی را نمایش می‌دهد. در ستون اول اندازه مته و تغییرات قطر چاه در طول نمایش داده شده است. در ستون دوم نگار گاما اصلاح شده^۱ را نشان می‌دهد. در ستون سوم نگار زمان گذر موج فشار و زمان گذر

^۱CGR

موج برشی تخمین زده شده چاه ۷۳ را به نمایش می‌گذارد. در ستون چهارم دو نگار تخلخل و نگار چگالی به نمایش در آمده است و ستون آخر سنگ‌شناسی این چاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده



شکل ۴-۴: نگارهای پتروفیزیکی و نگارهای موج فشاری و برشی چاه ۷۳ میدان پارس

۴-۵ محاسبه پارامترهای ارتجاعی

خواص ارتجاعی سنگ را می توان شامل پارامترهای ارتجاعی، نسبت پواسون، مدول برشی و مدول حجمی دانست. پارامترهای ارتجاعی از مهم ترین خواص ورودی برای ساخت مدل ژئومکانیکی می باشد. در حالت ایده آل بهترین راه برای بدست آوردن این پارامترها انجام تست آزمایشگاهی می باشد، ولی از آنجا که در بسیاری از موارد به دلیل در دسترس نبودن نمونه کافی و نیز بالا بودن هزینه ی انجام تست های آزمایشگاهی، محققین روابطی برای تخمین خواص از نگارهای چاه نگاری توسعه داده اند. به عنوان نمونه مدول یانگ^۱ و نسبت پواسون^۲ به ترتیب از طریق روابط ۴-۹ و ۴-۱۰ تخمین زده می شود:

$$E_{Dyn} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (9-4)$$

$$\nu_{Dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (10-4)$$

با در دست داشتن دو پارامتر مدول یانگ و نسبت پواسون می توان مدول برشی^۳ و مدول حجمی را به کمک

روابط (۴-۱۱) و (۴-۱۲) محاسبه نمود:

$$G_{Dyn} = \frac{E_{Dyn}}{2(1 + \nu_{Dyn})} \quad (11-4)$$

$$K_{Dyn} = \frac{E_{Dyn}}{3(1 - 2\nu_{Dyn})} \quad (12-4)$$

در روابط بالا از موج های صوتی برشی و فشاری اندازه گیری شده با فرکانس بالا استفاده شده است. از آنجا پروسه شکست در چاه یک فرایند آهسته در مقایسه با سرعت انتشار موج صوتی در سازند می باشد. این تفاوت در طبیعت پدیده در سازند باعث می گردد مقادیر بدست آمده به کمک این داده های صوتی، معمولاً مقادیر بزرگتری نسبت به حالت اندازه گیری های آزمایشگاهی بر روی مغزه را حاصل می گردد. در نتیجه در مدلسازی های ژئومکانیکی، باید از خواص ارتجاعی استاتیک استفاده کرد. به دلیل هزینه های بالا و مشکلات تهیه مغزه وجود

¹Young's Modulus

²Poisson Ratio

³Shear Modulus

دارد، از روابط تجربی موجود برای تبدیل خواص دینامیک به استاتیک استفاده می‌شود. روابط ذیل نمونه‌هایی از روابط تخمینی خصوصیات استاتیکی از روی خواص دینامیکی است (Afsari et al., 2009).

$$E_{Sta} = 0.4145E_{Dyn} - 1.0593 \quad \text{مخازن کربناته ایران} \quad (13-4)$$

$$E_{Sta} = 0.77E_{Dyn} + 0.02 \quad \text{سنگ آهک} \quad (14-4)$$

$$E_{Sta} = 0.018E_{Dyn}^2 + 0.422 \quad \text{سنگ آهک} \quad (15-4)$$

برای تبدیل نسبت پواسون دینامیکی به استاتیکی نیز از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد. (Afsari et al., 2009)

$$\nu_{Sta} = 0.7\nu_{Dyn} \quad (16-4)$$

از آنجایی که این روابط به صورت تجربی و برای شرایط برخی سازندهای منطقه خاص بدست آمده‌اند، لذا در همه موارد قابل تعمیم به سایر میدان‌ها نمی‌باشد. از همین رو برای افزایش دقت در این مطالعه از روابط ۱۷-۴ و ۱۸-۴ که به صورت آزمایشگاهی و از آزمایش بر روی داده‌های مورد مطالعه در این میدان بدست آمده‌است، برای تبدیل مدول یانگ و نسبت پواسون از حالت دینامیک به استاتیک استفاده شده‌است (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳).

$$E_{Sta} = 0.7E_{Dyn} \quad (17-4)$$

$$\nu_{Sta} = \nu_{Dyn} \quad (18-4)$$

در این روابط V_P و V_S به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی برحسب $\frac{Km}{sec}$ ، ρ دانسیته سنگ بر حسب $\frac{gm}{cc}$ ،

E ، K و G به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی و برحسب GPa هستند.

۶-۴ محاسبه خواص مقاومتی سنگ

در مرحله بعد برای ساخت مدل لازم است خواص مقاومتی سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوری^۱، مقاومت کششی^۲، زاویه اصطکاک داخلی^۳ و چسبندگی سنگ^۴ بدست بیایند. در ادامه به روش های تخمین پارامترهای مقاومت سنگ پرداخته می شود.

۱-۶-۴ زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی طبق تعریف برابر با شیب خط معیار شکست موهر- کلمب در نمودار تنش برشی- تنش محوری می باشد (Hudson and Harrison, 2000). یکی از روابط ارائه شده برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی، رابطه ۱۹-۴ که معروف به رابطه پلامب^۵ است (Archer and Rasouli, 2012).

$$FANG = 26/5 - 37/4 \times (1 - \phi - V_{shale}) + 62/2 \times (1 - \phi - V_{shale})^2 \quad (19-4)$$

در این رابطه درصد حجم شیل را به کمک نگار گاما^۶ (GR) و از طریق رابطه ۲۰-۴ می توان بدست آورد:

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (20-4)$$

رابطه ی دیگری که برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی استفاده می گردد رابطه لال^۷ است: (Lal et al., 1999)

$$FANG = \arcsin\left(\frac{V_p - 1000}{V_p + 1000}\right) \quad (21-4)$$

در این روابط ϕ تخلخل، V_{shale} حجم شیل بر حسب درصد و V_p سرعت موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه است.

۲-۶-۴ مقاومت فشاری تک محوری

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی مقاومت سنگ و ساخت مدل ژئومکانیکی مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (UCS) می باشد. مقاومت فشاری نهایی سنگ مقداری است که تنش های فشاری تک محوری سبب شکست

¹Unconfined Compressive Strength (UCS)

²Tensile Strength

³Friction Angle(FANG)

⁴Cohesion

⁵Plumb

⁶Gamma Ray

⁷Lal

کامل سنگ شود. معمولاً مقدار مقاومت فشاری از طریق آزمایش مربوطه به دست می‌آید. مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه به کمک معادله زیر تخمین زده می‌شود (WurohTimbo, 2012).

$$UCS = CCS - \Delta P - 2\Delta P \times \left(\frac{\sin(FANG)}{1 - \sin(FANG)} \right) \quad (22-4)$$

به این دلیل که دسترسی به مغزه حفاری مشکل می‌باشد، محققان صنعت نفت روابطی را جهت تخمین پارامترهای مکانیکی از روی نگاره‌های پتروفیزیکی و مغزه‌های حفاری ارائه کرده‌اند. از جمله مشکلات استفاده از روابط تجربی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (انزانپور، ۱۳۹۳):

- این روابط عموماً برای یک نوع خاص از سنگ یا چینه شناسی بیان می‌گردند.
- اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ برای انواع چینه شناسی‌های مانند شیل بسیار کم صورت گرفته است؛ بنابراین روابط تجربی برای این نوع از چینه شناسی‌ها بسیار نادر خواهد بود.
- کمبود داده‌های آزمایشگاهی حاصل از مغزه باعث می‌گردد از نمونه‌های رخنمون استفاده شود. در نتیجه نتایج به دست آمده نمی‌تواند بیان‌گر شرایط سنگ‌های رسوبی در عمق باشد.
- حتی اگر همبستگی خوبی میان مغزه‌ها و پارامترهای تخمین زده شده حاصل گردد، این پارامترها به سادگی قابل تعمیم به سایر نقاط نخواهد بود.

در این مطالعه برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری سازند از رابطه پیشنهادی توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب ایران رابطه ۴-۲۳ که برای میادین داخلی کشور ارائه شده است استفاده گردیده است (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳).

$$UCS = 2/27 \times E_{Sta} + 4/74 \quad (23-4)$$

۴-۶-۳ مقاومت کششی

مقاومت کششی در سنگ بکر که با اختصار با T_s نمایش داده می‌شود، در مقایسه با مقاومت فشاری ناچیز است. مقاومت کششی سازندهای تحکیم نیافته برابر 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 خواهد بود (Kadyrov, 2012). به طور معمول و در صورت موجود بودن نمونه مغزه حفاری، مقاومت کششی سنگ به صورت غیرمستقیم با استفاده از آزمون برزیلی به دست می‌آید. همچنین برخلاف مقاومت فشاری تک محوری، روابط تجربی محدودی برای محاسبه مقاومت کششی سنگ ارائه شده است (انزانپور، ۱۳۹۳). برای محاسبه مقاومت کششی سنگ از رابطه ۴-۲۴ که از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران به دست آمده است، استفاده شده است (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳).

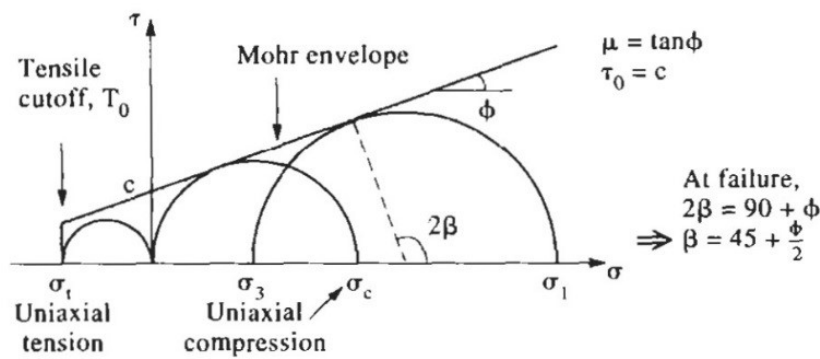
$$T_S = 0.09 UCS \quad (4-24)$$

۴-۶-۴ چسبندگی سنگ

چسبندگی سنگ را می‌توان به عنوان مقاومت برشی سنگ در حالتی که تنش نرمالی بر روی آن اعمال نمی‌گردد، تعریف نمود (Hudson and Harrison, 2000). چسبندگی در واقع محل برخورد خط شکست معیار موهر-کلمب با محور تنش برشی تعریف شده است (شکل ۴-۵). رابطه تجربی برای محاسبه مقدار چسبندگی با استفاده از پارامترای 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 ۴-۲۵ محاسبه کرد.

$$UCS = C \times 2 \times \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4-25)$$

در این رابطه ۴-۲۵ مقاومت فشاری تک‌محوری با (UCS) برحسب MPa ، مقاومت کششی با (T_S) برحسب MPa ، مدول یانگ استاتیک با (E_{Sta}) برحسب MPa و چسبندگی سنگ با (C) برحسب MPa می‌باشند. در شکل ۴-۶ نتایج محاسبات پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ به کمک روابط ارائه شده در این بخش آورده شده است.



شکل ۴-۵: ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب (Hudson and Harrison, 2000)

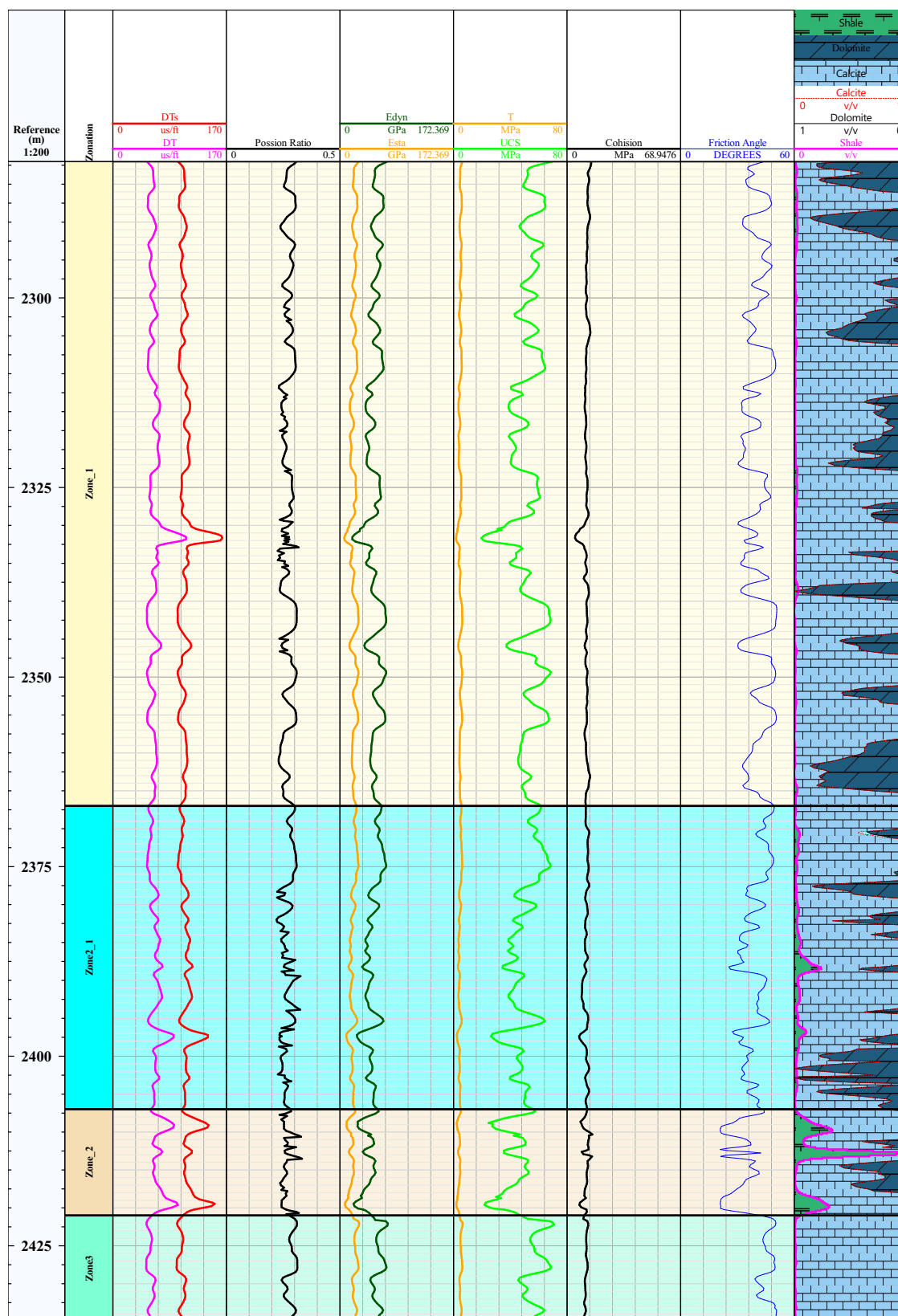
۷-۴ فشار منفذی

طبق تعریف فشار منفذی^۱ به فشار سیال موجود در فضای متخلخل سنگ گفته می‌شود. این عامل یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدلسازی ژئومکانیکی است. فشار منفذی طبیعی، به فشار معادل ستون آب بالادست تا سطح ایستابی گفته می‌شود. چنانچه به دلایل زمین شناسی و یا تکتونیک، میزان فشار منفذی کمتر یا بیشتر از فشار همه جانبه (فشار منفذی طبیعی) گردد، فشار منفذی غیرطبیعی اتفاق می‌افتد. همچنین اگر فشار سیال مخزن به ۴۸ تا ۹۵ درصد فشار روباره برسد، شرایط فشار لیتواستاتیک خواهد بود (Zhang, 2011).

پیش‌بینی فشار منفذی یکی از پارامترهای کلیدی به منظور تعیین نمودن تنش‌های برجای موثر در مطالعات می‌باشد. به طور کلی، فشار منفذی یک پارامتر بحرانی برای یک عملیات حفاری موفق، شناخت ویژگی‌های مخزن و تولید بهینه به حساب می‌آید. به منظور دستیابی به اطلاعات قابل اطمینان از فشار منفذی در شرایطی که وضعیت فشار منفذی بسیار متغیر و در دسترس می‌باشد، استفاده از ابزار نگارگری به منظور اندازه‌گیری برجای لازم می‌باشد. همچنین اطلاعات به دست آمده از تحلیل تست‌های چاه نیز می‌تواند در مشخص نمودن فشار منفذی با اهمیت باشد. روش‌های معمول در صنعت نفت برای پیش‌بینی فشار منفذی روش روند عادی (ایتون^۲) و روش

^۱Pore Pressure

^۲Eaton



شکل ۴-۶: پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ در چاه ۷۳ میدان پارس

ضمنی (هولبروک، بوور) می‌باشد (Tan et al., 2005).

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \times \left(\frac{NCT}{DT_c}\right)^3 \quad (26-4)$$

P_{ng} گرادیان فشار منفذی، OBG گرادیان تنش روباره، NCT زمان کندشدگی یا گذر در فشار نرمال، DT_c زمان انتقال موج فشار و P_{ng} فشار منفذی نرمال یا فشار همه جانبه و برابر با ۰/۴۵ است (Eaton et al., 1975). مقدار موج فشاری نرمال شده با استفاده از برازش منحنی خطی و یا غیر خطی بر روی نمودار انتقال موج فشاری به دست می‌آید.

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌ها از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا در عمق‌های مختلف مخزن و با استفاده گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه ۲۷-۴ فشار منفذی را محاسبه گردید:

$$P_2 = P_1 + \rho_{fg}(Z_2 - Z_1) \quad (27-4)$$

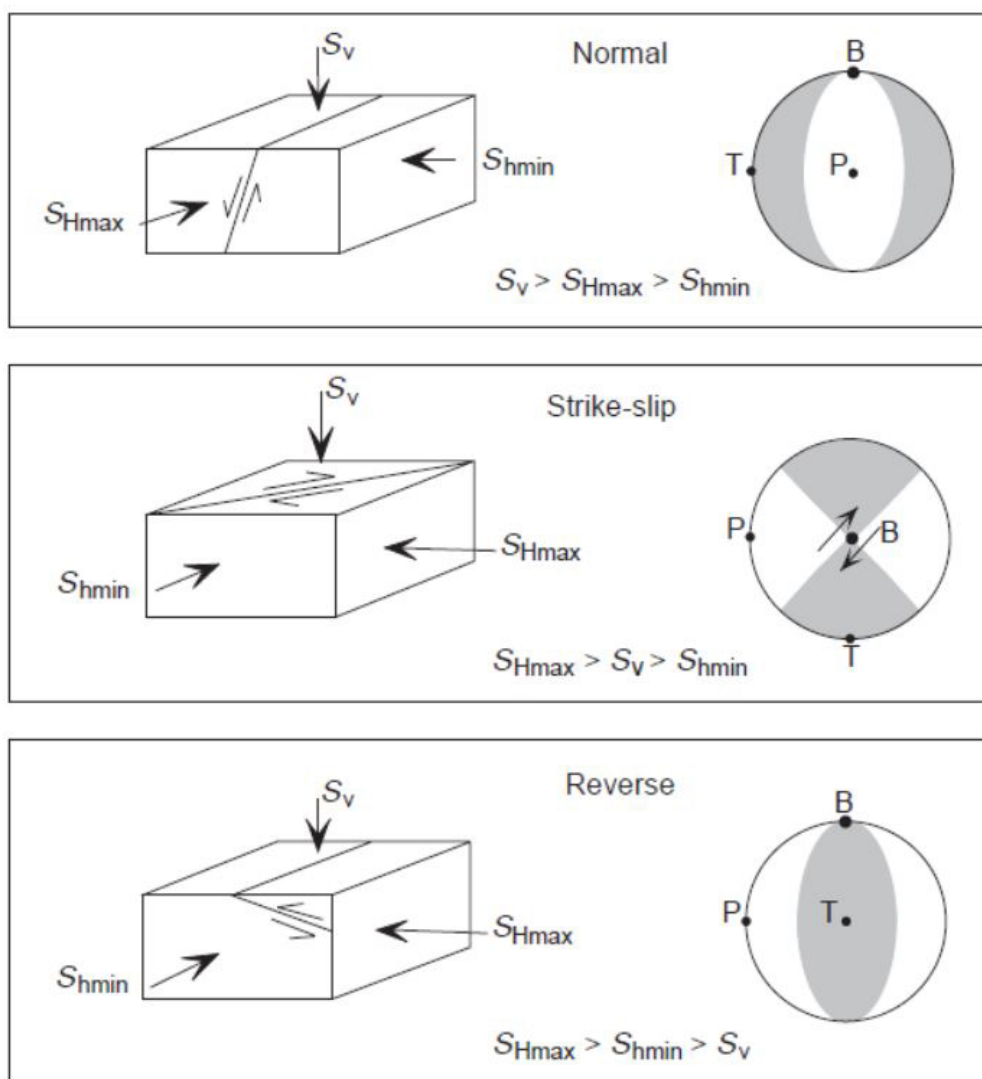
در این رابطه P_1 فشار سیال سازند در عمق Z_1 ، P_2 فشار سیال سازند در عمق Z_2 و ρ_{fg} چگالی سیال زمین است (Zhang, 2011).

۸-۴ تنش‌های برجا

وزن لایه‌های سازندهای روباره و حرکت صفحات زمین، تنشی را در عمق پوسته زمین ایجاد می‌کند. وقتی عمق افزایش پیدا می‌کند، تاثیر توپوگرافی زمین قابل چشم پوشی می‌شود. جهت تنش‌های نرمال عمودی و افقی در عمق مورد نظر به عنوان جهت اصلی تنش‌ها در نظر گرفته می‌شود. میزان و جهت تنش برجا^۱ نقش بسیار مهمی را در مدلسازی ژئومکانیکی دارد. با توجه به رابطه تنش قائم (σ_v)، تنش افقی حداکثر (σ_H) و تنش افقی حداقل (σ_h) نوع رژیم تنش منطقه قابل تشخیص می‌باشد (Razi et al., 2010). رژیم تنش سیستم دسته بندی اندرسون به سه دسته نرمال، امتداد لغز و معکوس دسته بندی می‌گردد (شکل ۷-۴). در ادامه به معرفی و نحوه تخمین هر یک از

¹In-Situ Stresses

تنش‌های قائم، افقی حداکثر و حداقل پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۷: رابطه رژیم تنش منطقه با مقدار تنش برجا در دسته بندی اندرسون (Zoback, 2007)

۴-۸-۱ تنش قائم

برای محاسبه تنش قائم (σ_v)^۱ که ناشی از وزن لایه‌های روباره تا عمق مورد نظر می‌باشد از نگار چگالی استفاده می‌شود. یکی از مشکلاتی که در زمینه تخمین تنش قائم روباره وجود دارد این است که نگارهای پتروفیزیکی عمدتاً فقط در زون مخزنی برداشت می‌شوند. اندازه‌گیری تنش‌های برجا در سرتاسر جهان نشان داده است که تنش عمودی و عمق رابطه خطی با هم دارند (Peng and Zhang, 2007). لذا برای اعماق بالای محدوده مورد نظر از

¹Vertical Stresses

رابطه ۲۸-۴ استفاده می‌گردد. در این رابطه تنش عمودی برحسب مگاپاسکال و عمق برحسب متر است.

$$S_v = 0.027z \quad (28-4)$$

برای محاسبه تنش قائم از رابطه (۲۹-۴) استفاده می‌شود (Archer and Rasouli, 2012):

$$S_v = \rho_w g z_w + \int_{z_w}^z \rho(z) g dz \quad (29-4)$$

در این رابطه S_v تنش قائم، ρ و ρ_w به ترتیب چگالی سازند و چگالی آب، g ثابت گرانش و z عمق از سطح زمین است (Zoback, 2007).

۲-۸-۴ تنش‌های افقی

روش‌های متعددی برای تخمین مقادیر و جهت تنش‌های افقی در چاه قائم ارائه شده است. در میان روش‌های مختلف آزمایش شکاف هیدرولیکی متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری برجای تنش است. علاوه بر آزمایش شکاف هیدرولیکی، آزمایش LOT ^۱ نیز استفاده می‌گردد. اگرچه این آزمایش در صنعت نفت با هدف تعیین حد بالای فشار گل حفاری انجام می‌گیرد، مقادیر به دست آمده از این آزمایش تقریباً برابر با مقدار تنش اصلی افقی حداقل است (Amadei and Stephansson, 1997). در جدول ۲-۴ انواع آزمایش‌ها جهت ارزیابی تنش‌های افقی آورده شده است.

در این روابط v نسبت پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و S_v تنش عمودی برحسب MPa ، E_{sta} مدول یانگ استاتیک برحسب GPa ، ϵ_x و ϵ_y به ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می‌باشد.

علاوه بر روش‌های ذکر شده برای محاسبه تنش‌های افقی، محقیق روابطی را جهت تخمین تنش‌های افقی

^۱Leak off Test

جدول ۴-۲: انواع تست‌ها برای تخمین تنش افقی

نام آزمایش	روش انجام آزمایش	ملاحظات
<i>Micro - FracTest</i>	این شکست به وسیله تزریق آهسته حدود ۱ متر مکعب سیال با ویسکوزیته کم، از طریق چاه باز یا لوله جداری مشبک شده به داخل سازند ایجاد می‌شود. یک شکاف بارها باز و بسته می‌شود. بنابراین کاهش‌های پی‌درپی فشار بر روی نمودار نشان داده می‌شود تا فشار ثابت بسته شدن بدست آید.	این فشار معادل کوچکترین تنش اصلی است که در بیشتر حوضه‌ها کوچکتر از σ_v و برابر با σ_h می‌باشد.
<i>Mini - FracTest</i>	شامل تزریق سریع سیال ویسکوزی در حدود بیش از ۱۰ متر مکعب می‌باشد. مقدار σ_h را می‌توان از منحنی فشار-زمان ثبت شد، معادل فشار بسته شدن شکاف تغییر کرد.	تست تحریک شکاف‌های موجود در سازند می‌باشد.
<i>LOT</i>	سرچاه بسته می‌شود. در نتیجه فشار ستون بالا می‌رود و چاه تخت فشار قرار می‌گیرد. این روند ادامه می‌یابد تا منحنی حجم از حالت خط راست منحرف شود. نقطه انحراف به عنوان فشار نفوذ تعریف می‌کنند.	اگر <i>Mini-FT</i> و یا <i>Micro-FT</i> در چاه‌های مجاور انجام نشده بود و توصیه می‌شود که فقط به داده‌های آزمایشی که در عمق بیش از ۳۰۰ متر انجام شده است، رجوع شود.

توسعه داده‌اند، که یکی از متداول‌ترین این روابط، روابط پروالاستیک می‌باشد (Archer and Rasouli, 2012).

$$S_h = \frac{v}{1-v}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-v)^2}(\varepsilon_x + v\varepsilon_y) \quad (30-4)$$

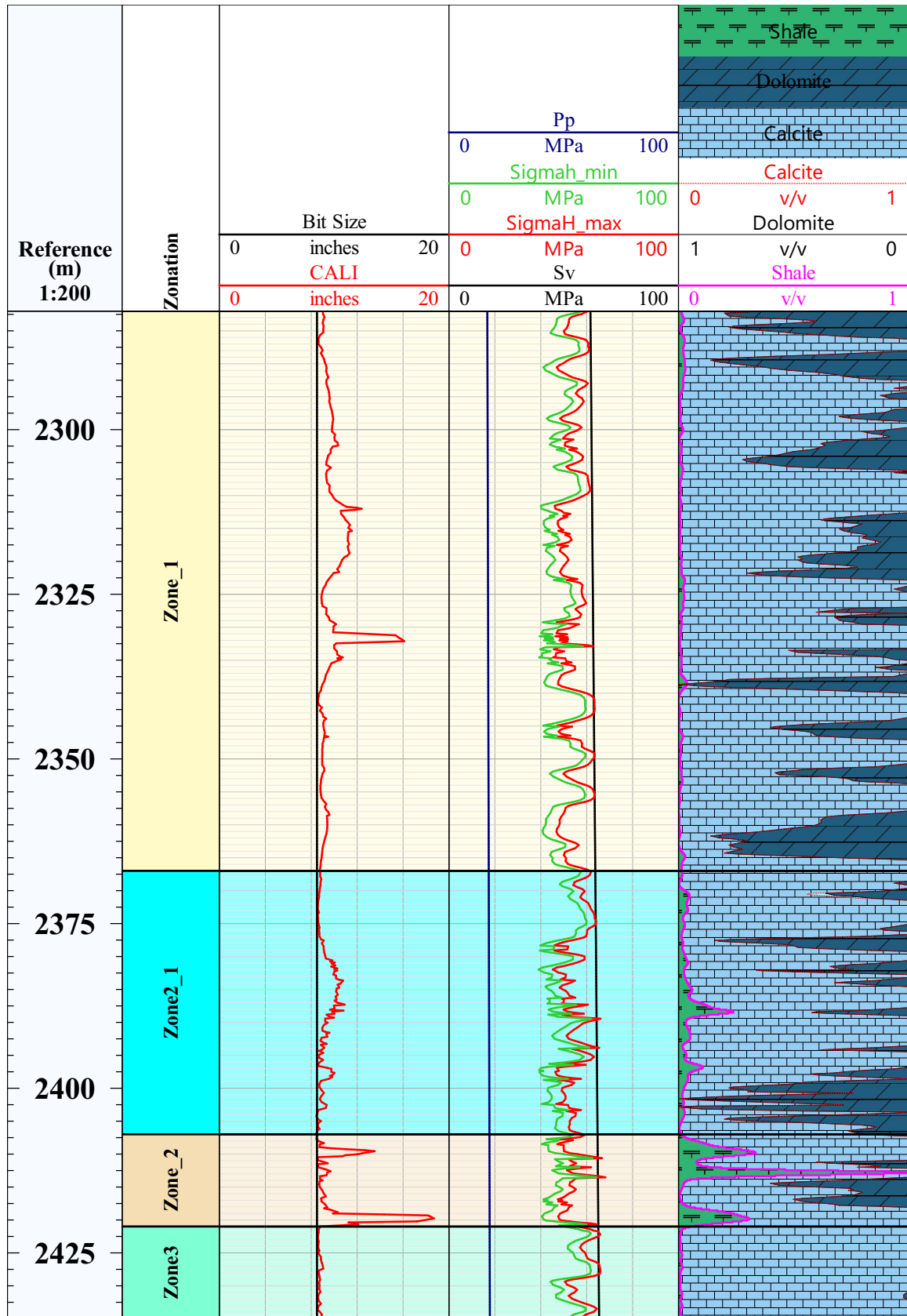
$$S_H = \frac{v}{1-v}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-v)^2}(\varepsilon_y + v\varepsilon_x) \quad (31-4)$$

شکل ۴-۸ فشار منفذی و تنش‌های اصلی محاسبه شده به کمک روابط ارائه شده در این بخش را در ستون دوم نشان می‌دهد.

۴-۸-۳ بررسی رژیم تنش

با فرض آن‌که نسبت تنش برشی به تنش نرمال در سطح گسل نمی‌تواند از مقاومت اصطکاکی سازند بیشتر باشد، می‌توان اختلاف بین مقادیر تنش‌های اصلی محدود نمود. به این ترتیب بر طبق رابطه ۴-۳۲، نسبت تنش موثر حداکثر به حداقل با ضریب اصطکاک سطح گسل ارتباط خواهد داشت (Barton et al., 1988).

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_1 - P_p}{S_3 - P_p} = (\sqrt{(\mu^2 + 1)} + \mu)^2 \quad (32-4)$$



شکل ۴-۸: تنش‌های اصلی و فشار منفذی

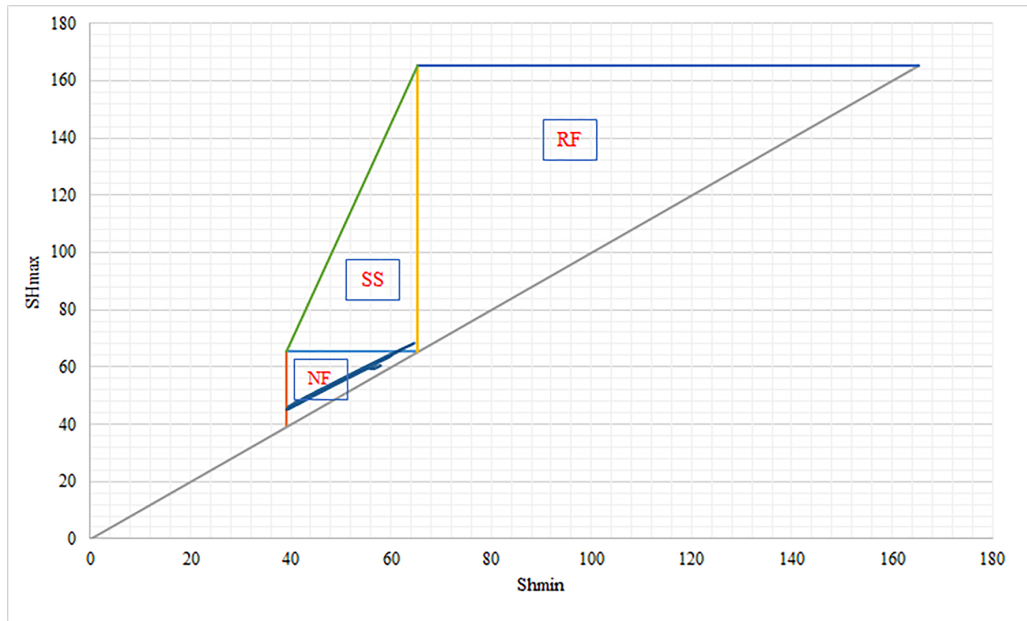
در رابطه فوق، μ ضریب اصطکاک گسل معرفی شده است که مقادیر آن می‌تواند بین ۰/۶ و ۱ مغیر باشد. معمولاً این مقدار در مطالعات مختلف ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود (Zoback, 2007). باتوجه به رابطه مذکور، تفاوت تنش‌های اصلی به عمق، فشارمنفذی و شناخت وضعیت تکنیکی وابسته است. همچنین باید توجه داشت که در این رابطه از چسبندگی سطح گسل صرف‌نظر شده است. در اعماق زیاد، تأثیر مقاومت ناشی از چسبندگی سطح درزه در مقایسه با سایر تنش‌ها قابل صرف‌نظر است. اگرچه، این موضوع در اعماق کم صادق نیست (Zoback, 2007).

با استفاده از تئوری گسل اندرسون، با جایگذاری هر یک از مقادیر تنش‌های اصلی به جای عبارات S_1 و S_3 در رابطه ۴-۳۲ می‌توان محدوده تغییرات تنش‌ها در شرایط تکتونیکی مختلف را بررسی نمود. برای چاه ۷۳ میدان پارس، چند ضلعی اندرسون محدوده تغییرات تنش به صورت شکل ۴-۹ بدست می‌آید. با استفاده از چند ضلعی اندرسون و در اختیار داشتن مقادیر تنش افقی می‌توان وضعیت تکتونیکی منطقه را پیش‌بینی نمود. به همین منظور مقادیر تنش‌های افقی محاسبه شده از روابط پوروالاستیک با رنگ آبی تیره در شکل ۴-۹ نمایش داده شده است. بر طبق توزیع مقادیر تنش بر روی چندضلعی اندرسون شرایط تکتونیکی حاکم بر منطقه، نرمال تا امتداد لغز پیش‌بینی می‌گردد.

۴-۹ معیارهای شکست سنگ

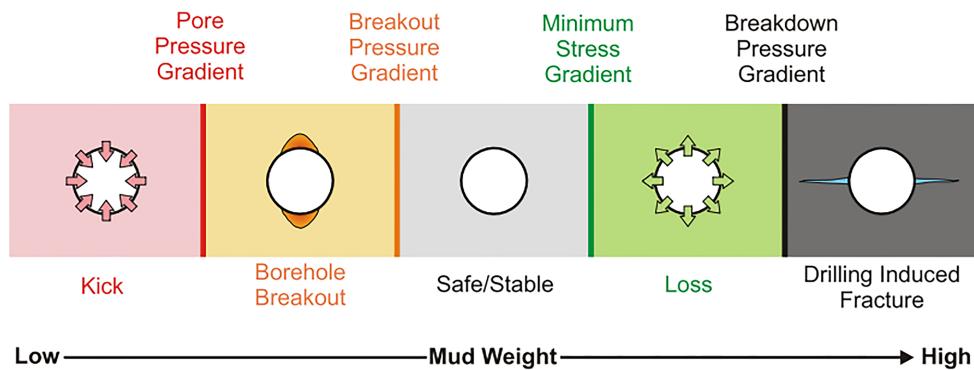
معیار شکست یک رابطه ریاضی می‌باشد که با در نظر گرفتن شرایط تنش‌های اعمالی، حد نهایی مقاومت سنگ^۱ را بیان می‌کند. زمانی که فشار گل در چاه با فشار منفذی سازند متفاوت باشد، این اختلاف فشار می‌تواند سبب ایجاد تنش‌هایی در اطراف چاه شود. در صورتی که این مقدار از مقداری که معیار شکست ارائه کرده بیشتر شود، گسیختگی و ریزش در سنگ رخ می‌دهد (Fjar et al., 2008). به طور کل دو مکانیسم شکست برشی و کششی برای وقوع ناپایداری در دیواره چاه قابل مشاهده است. اگر فشار گل حفاری نسبت به فشار خارجی دیواره بیشتر

^۱Ultimate Strength of Rock



شکل ۴-۹: چندضلعی اندرسون جهت تعیین محدوده تنش‌های افقی

باشد، سبب ایجاد شکستگی کششی در دیواره چاه می‌گردد. از سوی دیگر، اگر فشار خارجی بر دیواره چاه از میزان فشار گل حفاری بیشتر باشد، غلبه تمرکز تنش سبب ایجاد شکستگی برشی در دیواره چاه خواهد شد (شکل ۴-۱۰) (Simangunsong et al., 2006). در ادامه دو معیار شکست پرکاربرد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱۰: شکست کششی و برشی و وزن ایمن گل حفاری (Le and Rasouli, 2012)

۴-۹-۱ معیار موهر-کلمب

معیار موهر-کلمب یکی از پرکاربردترین معیارهای شکست است که به دلیل سادگی آن برای ارزیابی پایداری چاه استفاده می‌شود (Fjar et al., 2008). معیار برشی موهر-کلمب یک معیار پرکاربرد در ارزیابی پایداری دیواره چاه می‌باشد. این معیار تنش اصلی میانی را در نظر نمی‌گیرد. این معیار به صورت تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر

به صورت زیر بیان می‌شود (Al-Ajmi, 2006).

$$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3 \quad (4-33)$$

که در رابطه (۴-۳۳) مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. q نیز پارامتری است که به زاویه

اصطکاک داخلی وابسته بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4-34)$$

مقدار مقاومت فشاری تک محوره نیز از طریق رابطه (۴-۳۵) قابل محاسبه است:

$$\sigma_c = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4-35)$$

می‌توان معیار موهر-کلمب را بازنویسی کرد و به صورت زیر نوشت:

$$F = (\sigma_c + q\sigma_3) - \sigma_1 \quad (4-36)$$

با در نظر گرفتن معیار موهر-کلمب، شکست برشی زمانی اتفاق می‌افتد که $F \leq 0$ شود و بر این اساس وزن

گل مورد نیاز برای جلوگیری از ناپایداری چاه به دست می‌آید.

۴-۹-۲ معیار موگی-کلمب

معیار موگی-کلمب همانند معیار موهر-کلمب سازوکار شکست برشی را با استفاده از رابطه خطی تنش برشی

و تنش نرمال توصیف می‌کند. معیار موهر-کلمب به دلیل این که اثر تنش متوسط را در نظر نمی‌گیرد، برای شرایط

چاه محافظه کارانه‌تر است (Khan et al., 2012). معیار موگی-کلمب در سال ۲۰۰۴ توسط الاجمی و همکاران

پیشنهاد شد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (4-37)$$

که در این رابطه $\sigma_{m,2}$ ، تنش متوسط، τ_{oct} ، تنش برشی هشت وجهی^۱، a و b ثابت مواد هستند و وابسته به

^۱Octahedral

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ می‌باشند که از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (4-38)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4-39)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \phi \quad (4-40)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \sin \phi \quad (4-41)$$

می‌توان معیار موگی-کلمب را بازنویسی کرد و به صورت زیر نوشت :

$$F = (a + b\sigma_{m,2}) - \tau_{oct} \quad (4-42)$$

با در نظر گرفتن معیار موگی-کلمب، شکست برشی زمانی اتفاق می‌افتد که $F \leq 0$ شود و بر این اساس وزن

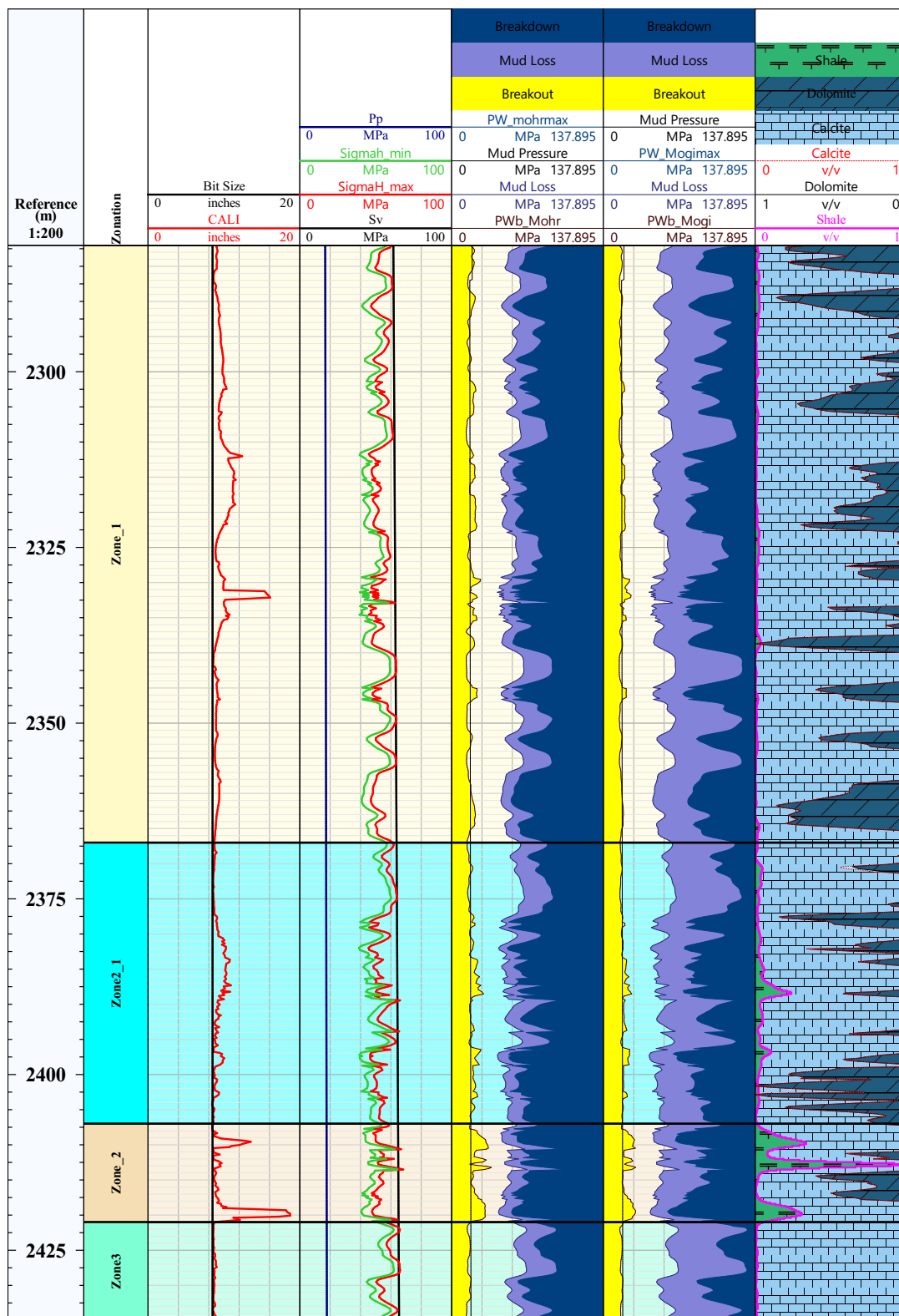
گل مورد نیاز برای جلوگیری از ناپایداری چاه به دست می‌آید (Al-Ajmi, 2006).

۴-۱۰ ساخت مدل ژئومکانیکی چاه شماره ۷۳ میدان پارس

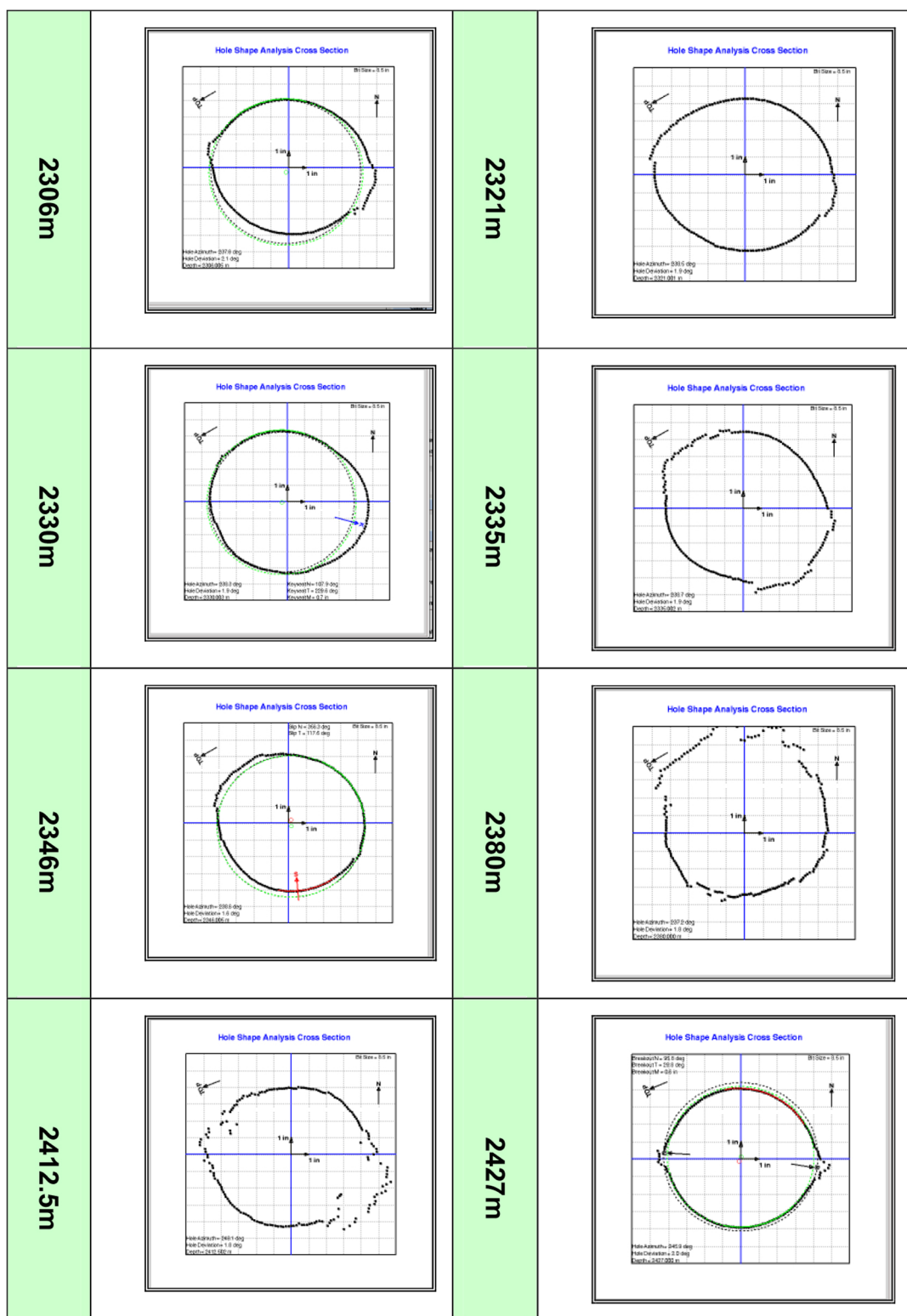
شکل ۴-۱۱ در ستون اول اندازه مته و تغییرات قطر چاه را نشان می‌دهد. در ستون دوم مقادیر تغییرات تنش اصلی و فشار منفذی را نشان می‌دهد. در ستون‌های سوم و چهارم به ترتیب پنجره ایمن گل حفاری را بر اساس دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب به نمایش می‌گذارد. زمانی مقدار فشار سیال حفاری از فشار ریزش سازند (P_{WB}) کمتر باشد، شکست برشی در دیواره چاه آغاز می‌گردد. اگر فشار سیال حفاری از حداقل تنش افقی بیشتر گردد، سیال حفاری شروع به هرزروی می‌کند. اگر افزایش فشار سیال حفاری از آستانه حداکثر معیارها بیشتر گردد، با ایجاد شکست کششی در سازند سبب ایجاد شکستگی بیشتر گردیده و سیال به طور کامل از دست می‌رود. در نتیجه فشار در این بازه مشخص شده، فشار ایمن سیال حفاری به منظور عملیات حفاری است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، در معیار موهر کلمب بازه کوچک‌تر و محتاطانه تری را نسبت به معیار موگی کلمب برای فشار سیال حفاری پیشنهاد می‌کند.

به منظور راستی آزمایی مدل ساخته شده، از گزارش نگار تصویری چاه ۷۳ میدان پارس که توسط شرکت

مناطق نفت خیز جنوب انجام شده، استفاده گردید. همانگونه که در شکل ۴-۱۲ ملاحظه می‌شود، عمق‌هایی که ناپایداری چاه رخ داده، به نمایش گذاشته شده است. با بررسی پنجره ایمن حفاری در شکل ۴-۱۱ در عمق‌های ۲۳۲۱، ۲۳۳۵، ۲۳۴۶ و ۲۳۳۰ و مقایسه با واقعیت مشاهده شده در شکل ۴-۱۲ همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. عدم همخوانی در برخی از عمق‌ها می‌تواند ناشی از خطاهای برداشتی و نبود آزمایش‌های دقیق‌تر مکانیک سنگی آزمایشگاهی دانست. از آنجایی که معیار موهر کلمب شکستگی‌های دیواره چاه را بهتر تخمین زده، لذا در این چاه این معیار، دقیق‌تر عمل کرده است.



شکل ۴-۱۱: ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی به کمک معیار موهركلمب چاه ۷۳ میدان پارسى



شکل ۴-۱۲: مقاطع وقوع ناپایداری (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)

۴-۱۱ جمع بندی

در این فصل پس از معرفی میدان پارسی و چاه مورد مطالعه، مراحل و نحوه تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی تشریح شد. سپس مدل یکی بعدی با استفاده از معیارهای شکست سنگ ساخته و محدوده وزن ایمن گل حفاری تخمین زده شد. نتایج بدست آمده را می توان به این ترتیب ذکر کرد:

- رژیم تکتونیکی در محدوده چاه ۷۳ میدان پارسی برا اساس چندضلعی اندرسون نرمال تا امتداد لغز است.
- اغلب ریزش ها و شکستگی های برشی چاه ۷۳ میدان پارسی در بین عمق های ۲۳۶۰ الی ۲۴۲۰ متر را می توان ناشی از افزایش شیل در این عمق ها ارزیابی نمود. این موضوع به دلیل مقاومت پایین شیل است.
- با مقایسه دو معیار موهر- کلمب و موگی- کلمب با شرایط واقعی مشاهده شده و نتایج ارائه شده در گزارش مناطق نفت خیز جنوب، معیار موهر- کلمب نمایش دقیق تر و درست تری را از شرایط چاه ارائه می نماید.
- با بررسی عوامل موثر در ساخت مدل ژئومکانیکی زمین می توان دریافت، پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ، فشار منفذی، فشار سیال حفاری و وضعیت تکتونیکی می توانند شرایط پایداری یک چاه را تحت تاثیر قرار دهند. لذا مطالعه دقیق این پارامترها ضروری است.

فصل ۵

مدل سازی عددی و ساخت مدل مرجع

۵-۱ مقدمه

مدل سازی، ابزاری کاربردی در طراحی و تحلیل مهندسی می باشد. در مدل سازی حل مسائل مهندسی به کمک ساده سازی های مناسب انجام می گردد. مدل سازی مخازن شکافدار، در زمینه های مختلف علوم زمین خصوصا در مهندسی نفت اهمیت بسیاری دارد. با توجه به عدم همگن بودن این مخازن، نقش اساسی شکستگی ها در کیفیت رفتار مخازن شکافدار روشن است. اغلب این مخازن دارای تراوایی زمینه پایینی هستند و شکستگی ها هدایت کننده اصلی سیال به حساب می آیند. در این فصل نحوه مدل سازی عددی تراوایی مخزن شکافدار به کمک نرم افزار 3DEC شرح داده می شود.

۵-۲ معرفی نرم افزار 3DEC

نرم افزار 3DEC یک برنامه تحلیل عددی سه بعدی بر مبنای روش المان مجزاست که برای تحلیل محیط های سنگی ناپیوسته تهیه شده است. در روش المان مجزا یک توده سنگ به صورت مجموعه هایی از بلوک های مجزا و درزه ها به عنوان فصل مشترک بین دو جسم جدا تعریف می شوند. روش المان مجزا اولین بار توسط کاندال^۱ در سال ۱۹۷۱ فرمول بندی و گسترش یافت و در سال های بعد از آن توسط این محقق و توسط افراد دیگر مورد پیشرفت و تکامل بیشتری قرار گرفت. در سال ۱۹۸۰ برنامه کامپیوتری تحت عنوان 3DEC به منظور حل معادلات سه بعدی بکار رفته برای بررسی رفتار بلوک های تغییر صلب و ناپیوستگی های بین آنها، توسط کاندال و لیموس ابداع گردید

^۱Cundall

که به این ترتیب گام بسیار مهمی در زمینه‌ی استفاده از امکانات کامپیوتری در بررسی محیط‌های ناپیوسته برداشته شد. از ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Itasca, 2013):

الف) توده سنگ مجموعه‌ای از بلوک‌ها صلب مدل می‌گردد.

ب) ناپیوستگی‌ها به صورت مرزی مجزا میان بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شود.

ج) الگوهای درزه‌ای پیوسته و ناپیوسته را می‌توان بر مبنای آماری ایجاد کرد.

د) در الگوریتم این نرم‌افزار چرخش، جابجایی و محاسبات زمان قرار گرفته است.

در ادامه نحوه ساخت مدل تشریح می‌گردد.

۳-۵ ساخت مدل مرجع

در نرم‌افزار 3DEC ماتریکس سنگ نفوذناپذیر بوده و صفحات شکستگی تنها کانال عبور جریان در نظر گرفته می‌شود. قدم اول، ساخت مدلی مناسب است که معرف شرایط واقعی حاکم بر چاه باشد. در ادامه مراحل ساخت و اعتبار سنجی مدل ساخته شده در مقاطع خاصی از چاه شرح داده می‌شود.

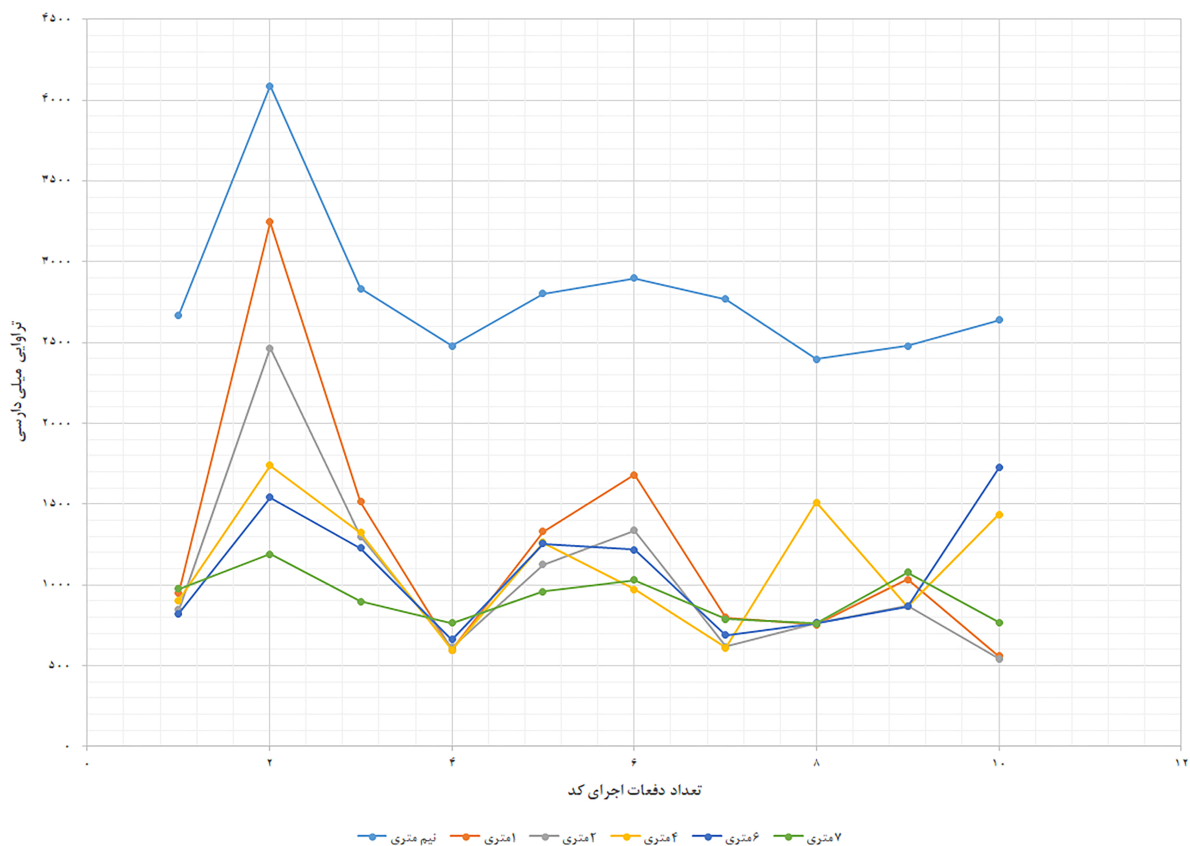
۱-۳-۵ اندازه مدل

مطالعات به‌خوبی نشان می‌دهند که رفتار توده سنگ بسیار وابسته به اندازه نمونه است. در نتیجه در مطالعه بر روی خواص توده سنگ مساله اصلی انتخاب حجم توده سنگی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد تا رفتار توده سنگ به درستی معرف خواص آن باشد. در اینجا باید به این نکته توجه داشت که اندازه‌ی حجم اولیه‌ی معرف برای پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی ممکن است متفاوت باشد. برای انجام تحلیل توامان تنش-جریان سیال بزرگ‌ترین اندازه به منظور مدل سازی در نظر گرفته می‌شود (Lee and Cho, 2002). برای ساخت مدل ابتدا باید ابعاد مناسب مورد نیاز ساخت مدل را به دست آورد. برای انتخاب ابعاد مناسب باید دو شرط را در نظر داشت:

الف) ابعاد مدل معرف خصوصیات مقطع مورد مطالعه باشد

(ب) در زمان و هزینه صرفه جویی شود

برای رسیدن به این اهداف، ابتدا مدل با ابعاد طول و عرض کوچک ساخته شده و مرحله به مرحله به اندازه آن اضافه می‌شود. ناحیه تغییر فشار منفذی ناشی از حرکت سیال درون مدل و همچنین محاسبه تراوایی سازند در اندازه‌های مختلف مدل بررسی می‌گردد. اندازه مدل تا زمانی افزایش داده می‌شود که زون ریزش به مرزهای مدل نرسد و تغییرات تراوایی محاسبه شده نسبت به دفعات اجرای مدلسازی محسوس نباشد. از اندازه ۶ متر به بالا زون تغییرات فشار منفذی به مرز بندی بلوک نمی‌رسد. شکل ۵-۱ تغییرات تراوایی مدل از اندازه ۰/۵ الی ۷ متر را به نمایش می‌گذارد. همانگونه در این نمودار مشاهده می‌شود، زمانی که اندازه مدل به ۷ متر افزایش پیدا می‌کند، از شدت تغییرات تراوایی نسبت به دفعات اجرای مدلسازی کاهش پیدا می‌کند. لذا مدل ۷ متری به عنوان طول و عرض مدل مرجع انتخاب گردید.



شکل ۵-۱: نسبت تغییر تراوایی مدل به تغییر اندازه مدل در دفعات اجرای مختلف کد

۲-۳-۵ تعیین مدل رفتاری

در مرحله بعد مدل رفتاری^۱ مناسب برای بلوک مدل تعریف می‌شود. در نرم افزار 3DEC مدل به دو دسته کلی مدل ارتجاعی و پلاستیک دسته بندی می‌شود. مدل موهر-کلمب به عنوان یکی از مدل‌های پلاستیک معمول برای نمایش شکست برشی در خاک و سنگ می‌باشد. در نرم افزار 3DEC، معیار موهر-کلمب با تنش‌های اصلی تعریف می‌گردد. فرآیند عملکرد مدل رفتاری موهر-کلمب به گونه‌ای است که ابتدا محاسبات با فرض ارتجاعی آغاز شده و پس از اعمال مولفه‌های تنش، با به کارگیری قانون هوک به محاسبه افزایش کرنش کل و نهایتاً به محاسبه مقادیر تنش اصلی و جهت‌های معادل پرداخته می‌شود (Itasca, 2013). اگر مقادیر تنش از حد تسلیم عبور کند، معادلات رفتار پلاستیک برای شکست کششی و برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌طور خلاصه پارامترهای ورودی مدل رفتاری موهر-کلمب سنگ در این نرم افزار در جدول ۱-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۵: پارامترهای ورودی مدل رفتاری موهر-کلمب سنگ

توضیح	اختصار	پارامتر
MPa	<i>Bulk</i>	مدول حجمی K
MPa	<i>Cohesion</i>	چسبندگی C
$\frac{kg}{m^3}$	<i>Density</i>	چگالی ρ
Mpa	<i>Shear</i>	مدول برشی G
MPa	<i>Tension</i>	مقاومت کششی T

مدل کلمب-اسلیپ^۲ مدل رفتاری اصلی تعریف شده برای شکستگی‌ها می‌باشد. مدل‌های ساختاری درزه برای بیان واکنش واقعی درزه‌های سنگی طراحی شده‌اند. مدل تماس سطح درزه برای بلوک‌های نزدیک به هم و دارای تماس سطحی در نظر گرفته شده است. این مدل، رفتار خطی حد تسلیم و سختی درزه را نشان می‌دهد و بر اساس خواص الاستیک سختی، اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی و ویژگی‌های اتساع معمولی در درزه‌های

¹Constitutive Model

²Coulomv-Slip

سنگی است. این مدل ضعیف شدگی ناشی از جابه‌جایی درزه را با کم شدن چسبندگی و مقاومت کششی در آغاز شکست برشی و کششی شبیه سازی می‌کند (Itasca, 2013).

به‌طور خلاصه پارامترهای ورودی مدل رفتاری کلمب-اسلیپ درزه در این نرم افزار در جدول ۲-۵ آورده شده است.

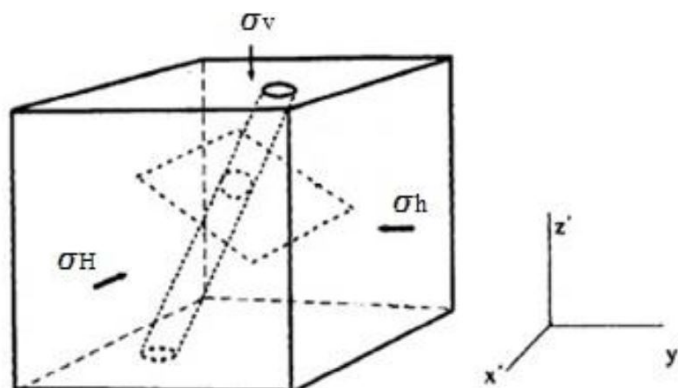
جدول ۲-۵: پارامترهای ورودی مدل رفتاری کلمب-اسلیپ درزه

توضیح	اختصار	پارامتر
$\frac{Pa}{m}$	<i>NormalStiffness</i>	سختی نرمال kn
$\frac{Pa}{m}$	<i>ShearStiffness</i>	سختی برشی ks
	<i>Frictionangle</i>	زاویه اصطکاک داخلی ϕ
<i>Mpa</i>	<i>JointCohesion</i>	چسبندگی درزه $jcoh$
<i>MPa</i>	<i>JointTension</i>	مقاومت کششی درزه $jten$

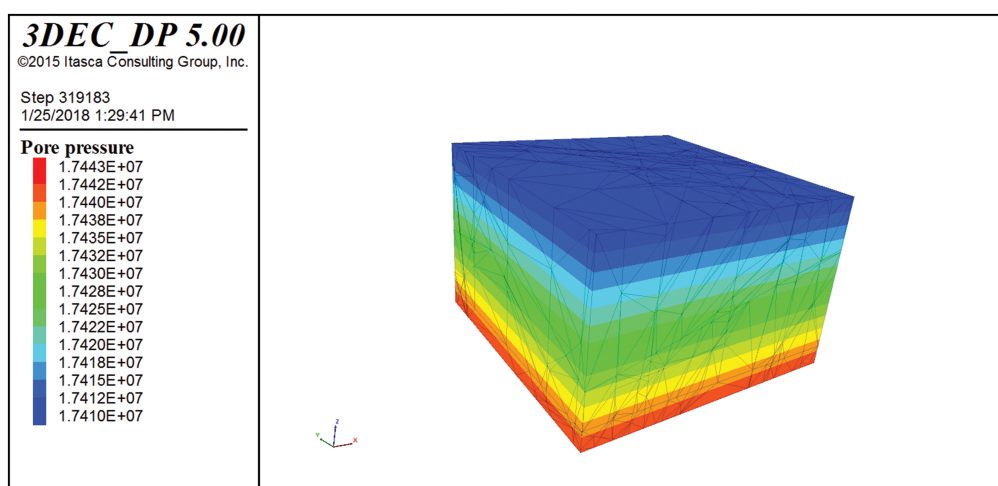
۳-۳-۵ شرایط مرزی

به منظور انجام مدل سازی عددی لازم است ابتدا مرزهای اطراف مدل را محدود کرده تا در تمام مراحل انجام محاسبات بدون تغییر باقی بماند. به این ترتیب مدل بلوکی در مرزهای مدل با تکیه گاه غلتکی و با صفر درجه آزادی طراحی می‌شود. همچنین به دلیل وجود شبکه شکستگی در مدل بلوکی، لازم است، مرزها از نظر جریان سیالی نیز محدود شود.

بارگذاری مدل در راستای محورهای مختصات به کمک مقادیر محاسبه شده تنش در فصل قبل صورت می‌گیرد. بار معادل با روباره عمق موردنظر بر سطح بالایی مدل و بار معادل تنش‌های افقی حداقل و حداکثر به ترتیب در راستای محور X و Y بر مرز مدل اعمال می‌شود (شکل ۲-۵). همچنین نیروهای داخلی ناشی از گرانج و چگالی سنگ‌ها در این مرحله لحاظ می‌گردد. در آخر فشار منفذی به مدل افزوده می‌گردد (شکل ۳-۵).



شکل ۲-۵: راستای اعمال تنش‌های افقی حداقل و حداکثر



شکل ۳-۵: توزیع فشار منفذی در مدل

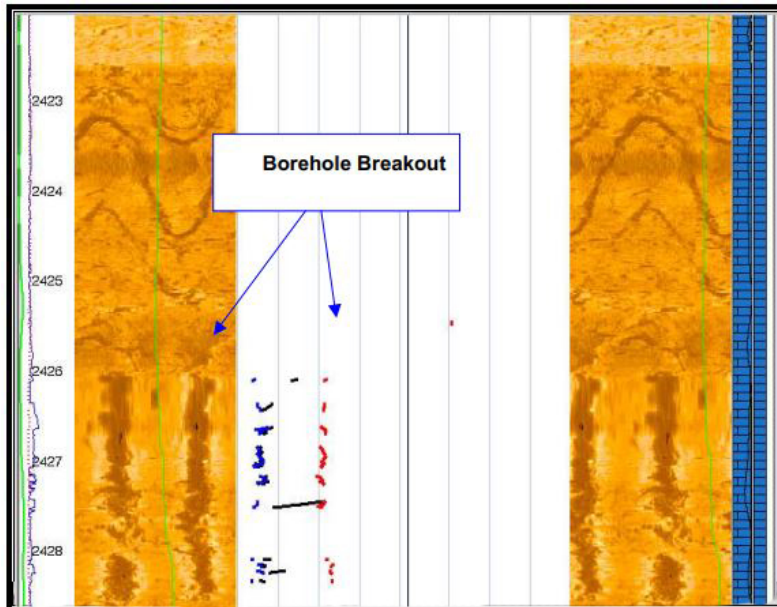
۴-۳-۵ ساخت مدل مرجع سنگ بکر

در ادامه فرآیند مدل‌سازی تراوایی، ابتدا لازم است نسبت به صحت برخی از پارامترهای مدل‌سازی اطمینان حاصل شود. در این مطالعه از روابط پوروالاستیک جهت محاسبه تنش‌ها افقی حداقل و حداکثر استفاده شده است. متأسفانه در این چاه تست‌های برجا صورت نگرفته است. لذا برای پی بردن به صحت محاسبات انجام شده، ابتدا مدل مرجع سنگ بکر مقطعی از چاه ساخته می‌شود. برای ساخت مدل مرجع سنگ بکر، مقطعی از چاه را که دارای شکستگی طبیعی نیست، انتخاب می‌شود.

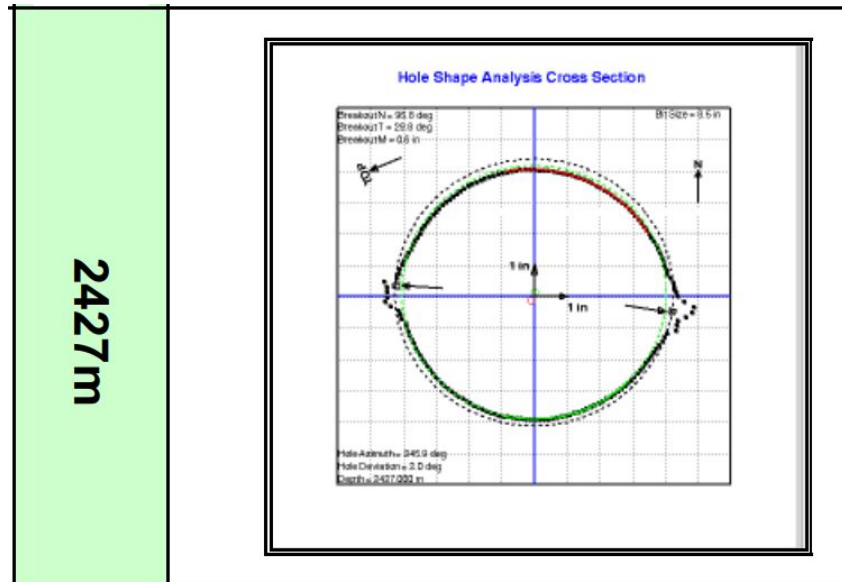
مقطع انتخاب شده به منظور مدل‌سازی در عمق ۲۴۲۶ تا ۲۴۲۹ متر واقع شده است. با توجه به شکل‌های

۴-۵ و ۵-۵ که به ترتیب لاگ تصویری و مقطع چاه هستند، مشاهده می‌گردد که این بخش از چاه دارای شکستگی

برشی وجود دارد. از طرفی دیگر، با توجه به لاگ تصویری که در شکل ۴-۵ هیچگونه شکستگی طبیعی درون سازند وجود ندارد، لذا این بخش از چاه برای ساخت مدل مرجع سنگ بکر انتخاب گردید.



شکل ۴-۵: شکستگی برشی مشاهده شده در لاگ تصویری

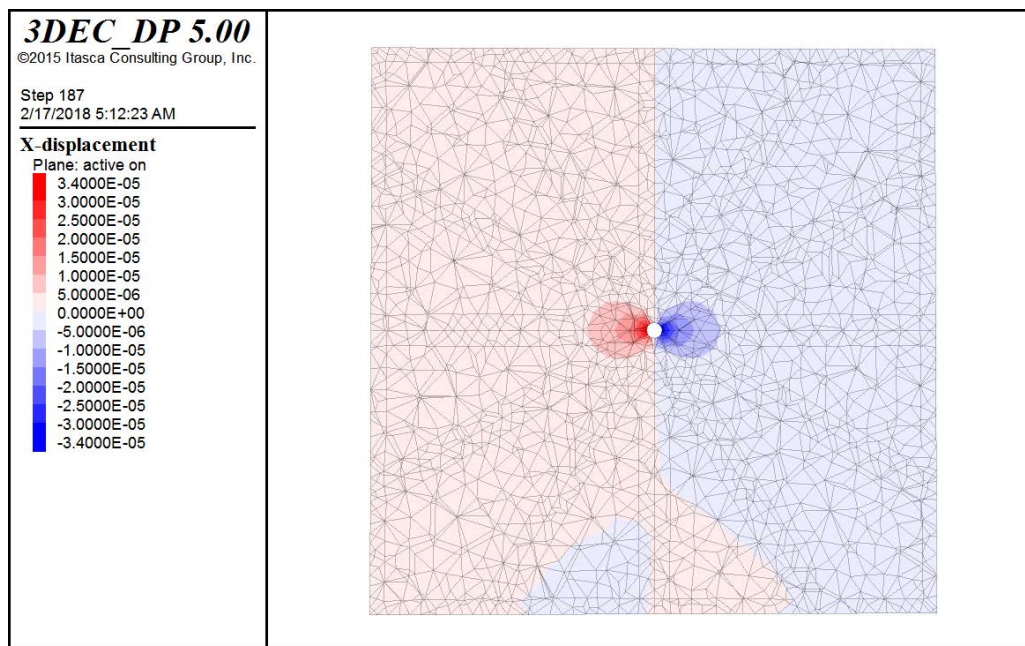


شکل ۵-۵: نمایش مقطع دیواره چاه و وضعیت پایداری (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)

به منظور راستی آزمایی مدل مرجع سنگ بکر ساخته شده، شواهد رویت شده بر روی نگار تصویری شکل ۴-۵ ، که ناپایداری چاه را نشان می دهد؛ با مدل ساخته شده به کمک نرم افزار 3DEC (شکل ۵-۶) مقایسه گردید. از آنجایی که شواهد مشاهده شده در مدل ساخته شده، با شرایط واقعی همخوانی دارد، لذا مقدار نسبت تنش های

حداقل و حداکثر به تنش قائم، مقادیر زیر انتخاب شد.

Kh_{min}	Kh_{max}
۰٫۷	۰٫۸۱



شکل ۵-۶: ساخت مدل سنگ بکر و بررسی تنش‌های افقی

۵-۳-۵ ساخت مدل مرجع سنگ شکافدار

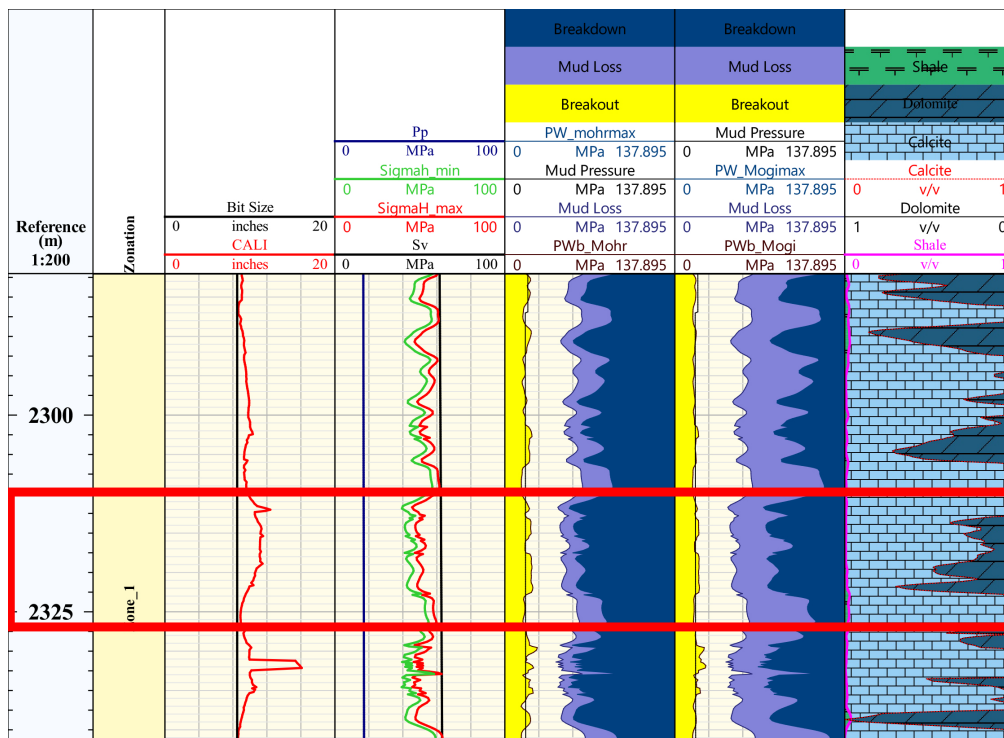
در بخش‌های گذشته مراحل و پارامترهای مورد نیاز جهت ساخت مدل عددی سنگ شکافدار توضیح داده شد. در این مرحله ناحیه شکافدار از چاه مورد مطالعه انتخاب گردید. جهت انتخاب مقطع موردنظر جهت انجام مدلسازی به دو نکته توجه گردید:

- مقطع چاه دارای ریزش دیوار چاه باشد

- تراوایی این بخش از چاه توسط آزمایش‌های برجا اندازه‌گیری و موجود باشد.

از داده تراوایی برای بخشی از چاه موجود بود و از طرفی دیگر ریزش دیواره چاه برای مدلسازی و ارزیابی پایداری چاه ضروری بود، مقطع واقع در عمق ۲۳۱۱ الی ۲۳۲۳ متر که ۱۲ متر از چاه می‌باشد، جهت انجام مدلسازی برگزیده شد. در شکل ۵-۷ مدل ژئومکانیکی یک بعدی ناحیه مورد مطالعه برای ساخت مدل مرجع را

نشان می دهد. در جداول ۳-۵ و ۴-۵ خواص ورودی این عمق مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۵-۷: مدل ژئومکانیکی یک بعدی ناحیه سنگ شکافدار بر اساس معیار موهر- کلمب

جدول ۳-۵: خواص سنگ و سیال عمق مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار اندازه گیری شده
مدول یانگ	گیگاپاسکال	۱۹
مدول برشی	گیگاپاسکال	۸/۳۴
چگالی سنگ	گرم به سانتی متر مکعب	۲/۴۵
ضریب پواسون	-	۰/۲۷
چسبندگی سنگ	مگاپاسکال	۱۱/۵۲
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۴
چگالی سیال	گرم به سانتی متر مکعب	۰/۷۱
ویسکوزیته سیال	سانتی پواز	۱/۲۵

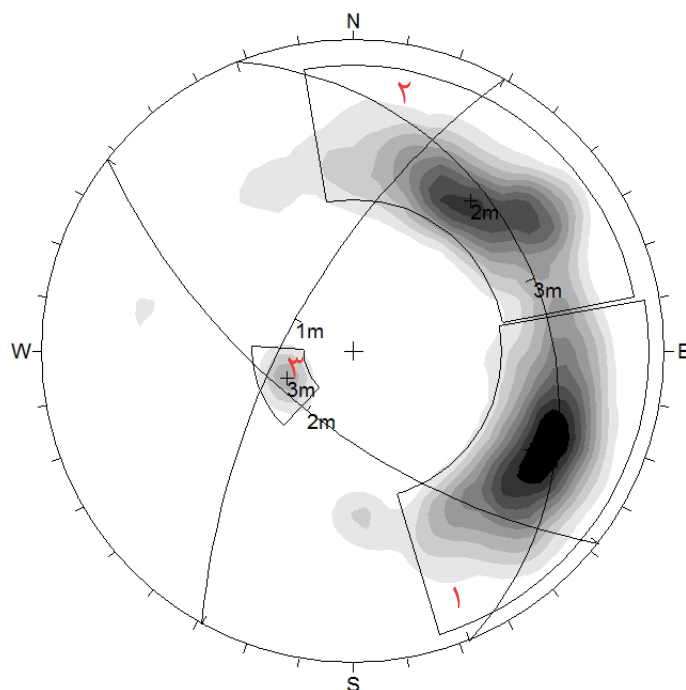
به منظور ساخت شبکه شکستگی ابتدا باید اطلاعات برداشت شده از طریق نگارهای تصویری را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. همانگونه که در فصل های گذشته توضیح داده شده است، به دلیل عدم اطلاع دقیق از تعداد و نحوه دقیق توزیع شکستگی های برداشت شده به جای نمایش قطعی از توزیع تصادفی به کمک نمایش ریاضی استفاده می شود. در این مطالعه برای جهت داری از تابع توزیع فیشر و برای مرکز شکستگی ها از تابع توزیع

جدول ۴-۵: شرایط تنش و فشار منفذی عمق مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار اندازه گیری شده
فشار منفذی اولیه	مگاپاسکال	۱۶/۸
گرادیان فشار منفذی	پاسکال	۷۲۴۵/۲۲۸
تنش قائم اولیه	مگاپاسکال	۶۲/۳۵
گرادیان تنش قائم	پاسکال	۲۶۴۸۷
KH_{max}	-	۰/۸۱
KH_{min}	-	۰/۷

یکنواخت استفاده شده است.

شیب و آزیموت شکستگی‌های مشاهده شده بر روی نگار تصویری را به کمک نرم افزار Dips مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. تعداد دسته درزه‌های برداشت شده در این چاه، سه دسته درزه وجود دارد که خصوصیات برداشت شده از این سه دسته درزه در شکل ۵-۸ و جدول ۵-۵ آورده شده است. در این مطالعه به در مقطع مورد مطالعه از وجود لایه بندی صرف نظر شده است.

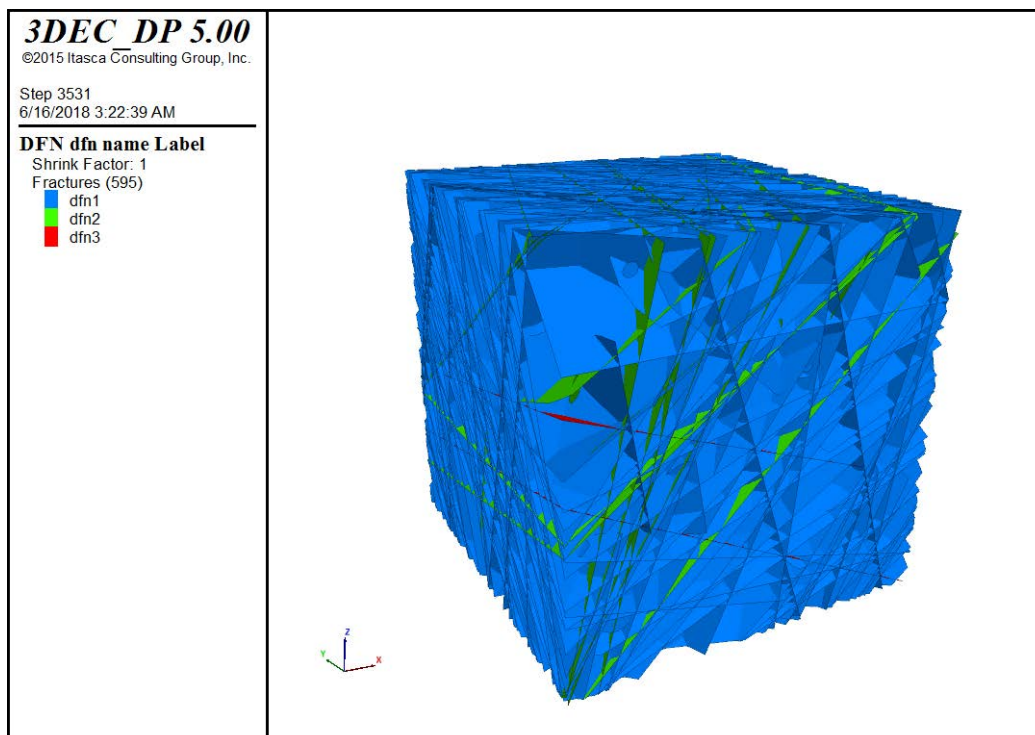


شکل ۵-۸: نمایش استریوگرافیک شکستگی‌های برداشت شده از درون چاه ۷۳

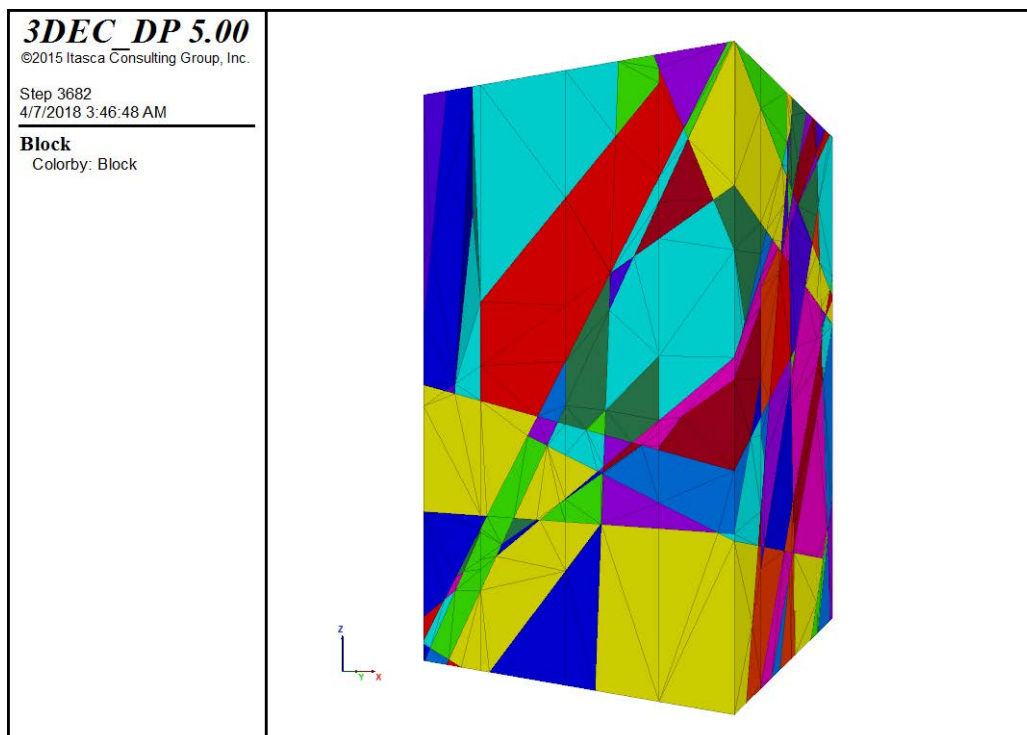
جدول ۵-۵: پارمترهای برداشت شده شکستگی ها

شماره دسته درزه	شیب	جهت شیب	عدد فیشر P_{10}
۱	۶۲/۶۱	۲۱۰/۹۲	۱۱/۱
۲	۶۵/۷۸	۳۰۰/۶	۱۱/۹۴
۳	۲۶/۹۴	۶۷/۵۲	۱۵۲/۷۹

در این مطالعه به منظور ساخت شبکه شکستگی، از بررسی تعداد شکستگی ها در طول چاه (P_{10}) برای نمایش تراکم شکستگی استفاده شده است. قبل از محاسبه P_{10} ابتدا، چاه مورد مطالعه براساس پارامترهای الاستیک به مقاطع مختلف تقسیم بندی و طبقه بندی شد. سپس برای هر مقطع مشابه در راستای چاه و برای هر دسته درزه به طور جداگانه مقدار P_{10} محاسبه گردید. برای محاسبه مقدار P_{10} ، تعداد شکستگی های دیده شده در لاگ تصویری را برای هر مقطع مشخص شد. سپس از تقسیم تعداد شکستگی ها بر طول چاه، میزان P_{10} محاسبه گردید. در شکل ۹-۵ و ۱۰-۵ شبکه شکستگی چاه به کمک توابع احتمالی که به صورت تصادفی تولید شده است را نشان می دهد.



شکل ۹-۵: تولید شبکه شکستگی مجزا



شکل ۵-۱۰: برش بلوک توسط شبکه شکستگی تولید شده

از آنجایی که در این چاه میزان بازشدگی درزه در دسترس نیست مقدار بازشدگی درزه به صورت ذیل تخمین زده شده است.

• بازشدگی

روابط جریان سیال در شکستگی‌ها، ساده سازی شده معادله ناویر-استوکس^۱ است. در معادله ناویر-استوکس بین دو صفحه موازی، با محدوده ناتراوا می‌باشد و سیال بصورت غیر قابل تراکم در نظر گرفته می‌شود (Itasca, 2013).

$$q_i = -\frac{u^3 \rho g}{12\mu} \phi_i \quad (1-5)$$

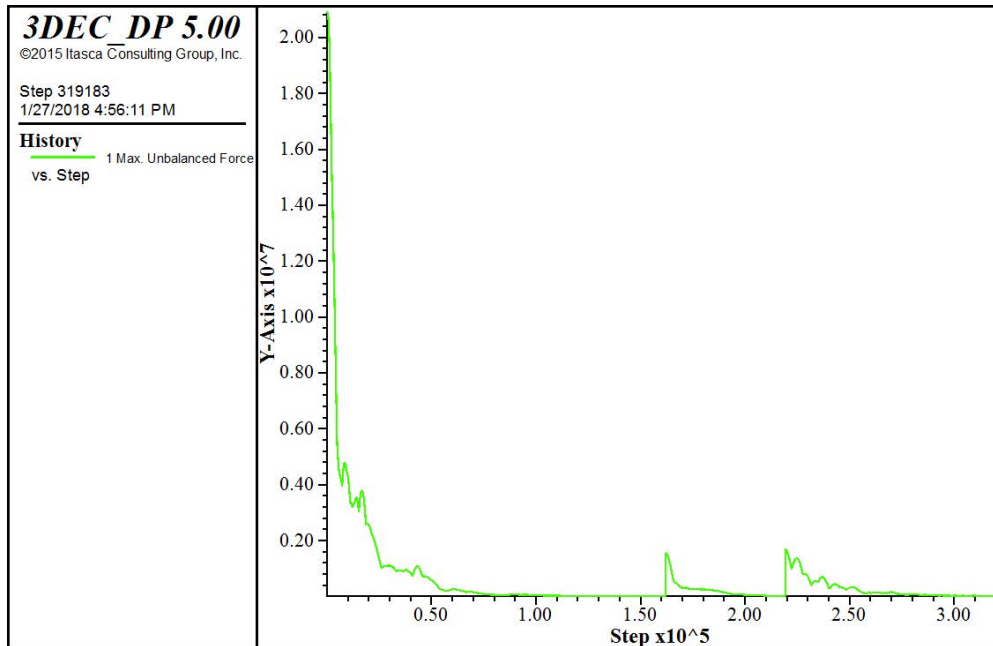
در رابطه ۵-۱ u میزان بازشدگی، ϕ شیب هیدرولیکی^۲، g شتاب گرانش، μ ویسکوزیته سیال و ρ چگالی سیال می‌باشد.

در مرحله آخر با حفر چاه و اعمال فشار گل حفاری وارد بر دیواره چاه، به حل مدل تا زمان رسیدن مدل به

¹Navier-Stokes

²Hydraulic Head

تعدادل پرداخته می شود. به عنوان مثال، نحوه به تعادل رسیدن بخشی از مدل چاه شماره ۷۳ در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، ابتدا تا گام ۲۲۰۰۰ مدل ساخته شده با شرایط تنش های اصلی و فشار منفذی اولیه به تعادل می رسد. سپس، بعد از صفر نمودن مقادیر جابجایی بلوک ها در مرحله تعادل اولیه، حفر چاه و اعمال فشار گل حفاری انجام گردید و مدل را تا رسیدن به تعادل نهایی اجرا شد.



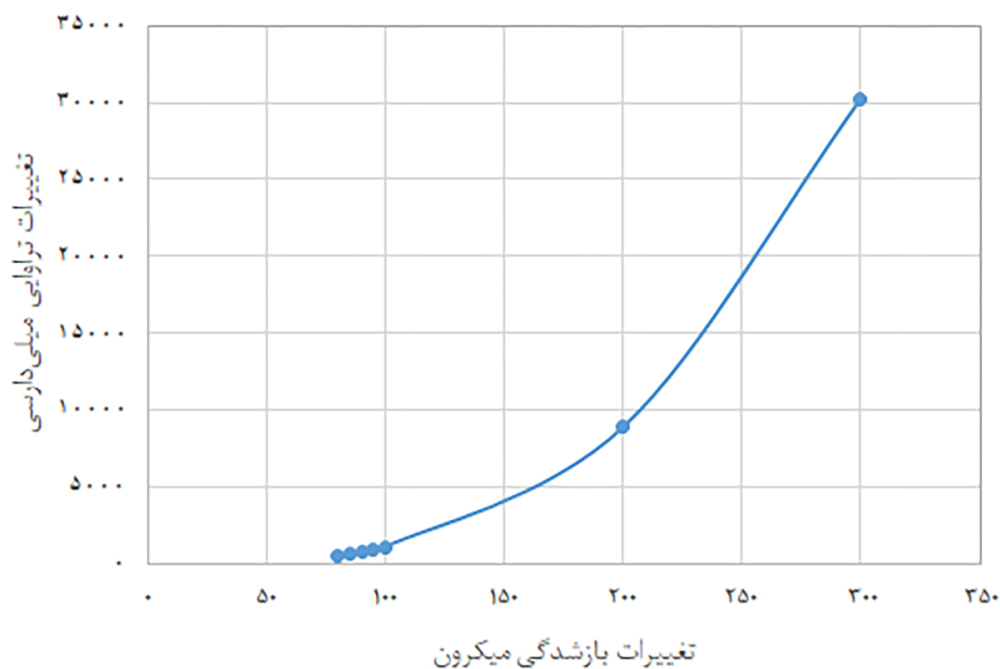
شکل ۵-۱۱: نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل کننده تا رسیدن مدل مرجع سنگ شکافدار به تعادل در چاه ۷۳

فشار گل حفاری از مقدار ۱۶/۶۹ تا ۱۶/۷۸ مگاپاسکال می باشد. تغییرات فشار منفذی به دلیل کمتر بودن فشار گل حفاری نسبت به فشار منفذی، جهت جریان سیال از درون سازند به درون چاه می باشد. برای محاسبه میزان تراوایی، شدت جریان ورودی به درون چاه اندازه گیری و مجموع جریان ورودی محاسبه شد. سپس با توجه به اختلاف فشار منفذی و شدت جریان تراوایی مدل به کمک رابطه داری محاسبه گردید. در جدول ۵-۶ میزان تراوایی محاسبه شده در اثر تغییر میزان بازشدگی را نشان می دهد. همان طور که در رابطه ۵-۱ مشاهده می گردد، شدت جریان سیال با بازشدگی رابطه ای از نوع توان سوم دارد. لذا به دلیل تراکم بالای شکستگی ها در سازند میزان تراوایی معادل با کمترین تغییر در اندازه بازشدگی به میزان زیادی تغییر می کند (شکل ۵-۱۲). با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی میزان تراوایی محاسبه شده، برابر با ۹۵۴/۴۰ میلی داری می باشد. میزان تراوایی

واقعی که حاصل از آزمایش‌های انجام شده می‌باشد، برابر با ۹۵۰ میلی داریسی است. از آنجایی که میزان تراوایی حاصل از بازشدگی ۹۵ میکرون با میزان تراوایی واقعی نزدیکی بیشتری دارد، این میزان بازشدگی به عنوان اندازه بازشدگی مدل مرجع سنگ شکافدار در مدل انتخاب گردید.

جدول ۵-۶: تاثیر تغییر اندازه بازشدگی بر روی میزان تراوایی معادل

شماره	میزان بازشدگی (میکرون)	تراوایی معادل (میلی داریسی)
۱	۸۰	۵۴۷/۷۷
۲	۸۵	۶۵۶/۶۸
۳	۹۰	۸۰۳/۲۰۴۱
۴	۹۵	۹۵۴/۴۰
۵	۱۰۰	۱۱۱۲/۵۵
۶	۲۰۰	۸۹۱۶/۲۳
۴	۳۰۰	۳۰۲۶۵/۴۵



شکل ۵-۱۲: تغییرات تراوایی در اثر تغییرات بازشدگی

۴-۵ جمع بندی

- در فصل پنجم، به مدل سازی عددی چاه ۷۳ میدان پارسى توسط نرم افزار 3DEC پرداخته شده است. :
- به منظور مدل سازی، ابتدا حجم معرف و ضرورت استفاده از حجم معرف توصیف شد. سپس طول ضلع حجم معرف ۷ متر در نظر گرفته شد. تمام خصوصیات مکانیک سنگی در این بلوک یکسان است.
 - اطلاعات حاصل از برداشت شکستگی ها به کمک نرم افزار *Dips* مورد بررسی قرار گرفت. سه دسته درزه عمده بر تراوایی موثر است.
 - با توجه به مدل ژئومکانیکی یک بعدی و اینکه مدل موهر کلمب نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است، برای مدل سازی این چاه، از این مدل رفتاری استفاده شد.
 - نتایج بدست آمده از مدل سازی این بخش چاه را با نتایج واقعی مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد مدل سازی انجام شده انطباق قابل قبولی با واقعیت را دارا است.

فصل ۶

مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

۱-۶ مقدمه

یکی از راه‌های بررسی نقش هریک از عوامل موثر در تراوایی و پایداری چاه مورد نظر انجام تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری است. در تحلیل پارامتری تراوایی به ارزیابی پارامترهای موثر در تراوایی پرداخته می‌شود. از جمله پارامترهایی که در میزان تراوایی موثر است، می‌توان به میزان بازشدگی شکستگی‌ها و نیز تراکم شکستگی‌ها (P_{10}) اشاره کرد. از طرفی دیگر، در تحلیل حساسیت وابستگی تراوایی به تغییرات شرایط بارگذاری، اختلاف بین فشارمنغذی و فشار سیال حفاری و ویسکوزیته سیال اشاره نمود.

سپس در ادامه به تحلیل حساسیت و مطالعه پارامتری عوامل موثر در پایداری دیواره چاه مورد نظر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحلیل پارامتری به عواملی همچون تراکم شکستگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول برشی و مقاومت برشی ذاتی سنگ (چسبندگی) پرداخته می‌شود. در تحلیل حساسیت نیز فشار منغذی و فشار گل حفاری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی هریک از عوامل اشاره شده در بالا پرداخته می‌شود و در نهایت مسیر بهینه حفاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور انجام مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت از خصوصیات مدل مرجع ساخته شده در فصل گذشته استفاده می‌شود و تغییرات تراوایی و پایداری را نسبت به مدل مرجع مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات مدل مرجع در جدول ۱-۶ خلاصه شده است.

در ادامه به بررسی هریک از عوامل اشاره شده در بالا پرداخته می‌شود.

جدول ۶-۱: خصوصیات مدل مرجع جهت تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری

وضعیت تنش				
تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	فشار منفذی (MPa)	فشار سیال حفاری (MPa)
۶۲/۳۵	۴۳/۰۲	۵۰/۵۰	۱۶/۸	۱۶/۶۸
مشخصات مکانیکی سازند				
مدول یانگ (GPa)	مدول برشی (GPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲۸	۱۱/۳۹	۰/۲۷	۱۱/۵۲	۳۴
مشخصات شکستگی ها سازند				
شماره دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	بازشدگی (micron)	P_{10} -
۱	۶۲/۹۱	۲۱۰/۹۲	۹۵	۱
۲	۶۵/۷۸	۳۰/۰۶	۹۵	۰/۲
۳	۲۶/۹۴	۶۷/۵۲	۹۵	۰/۰۸

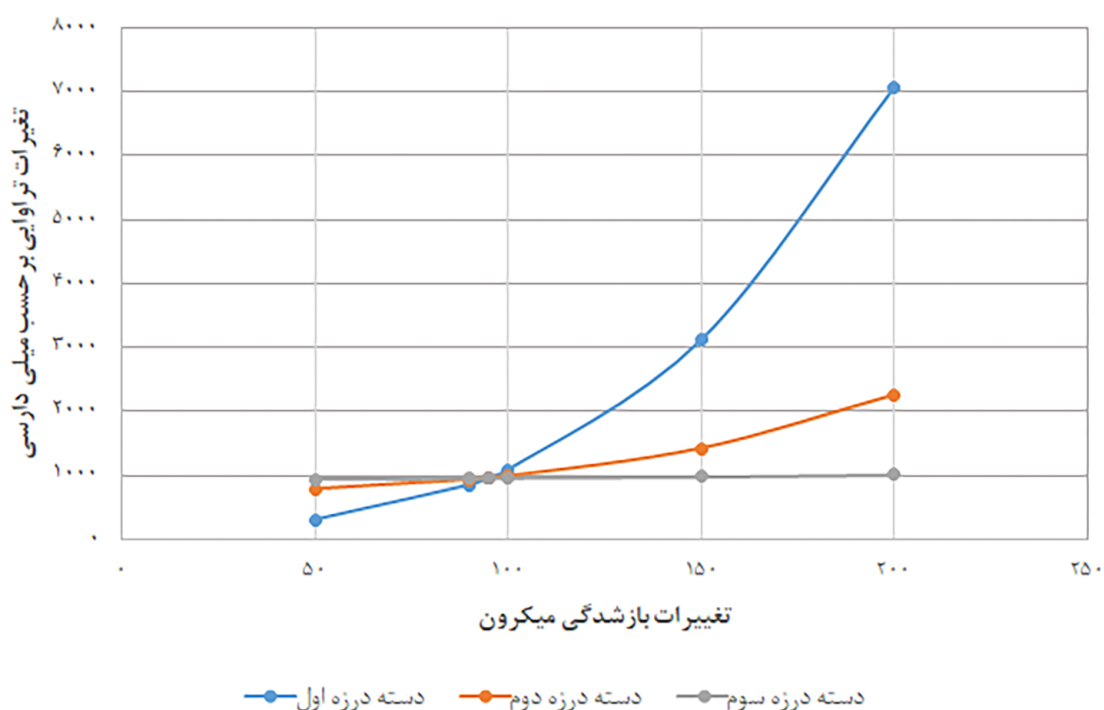
۶-۲ مطالعه پارامتری تراوایی

در این مرحله به کمک مدل‌های عددی به مطالعه پارامتری عوامل موثر بر تراوایی پرداخته می‌شود. در ادامه با تغییر پارامترهای ورودی، به تاثیر آن‌ها بر میزان تراوایی چاه مورد نظر پرداخته می‌شود.

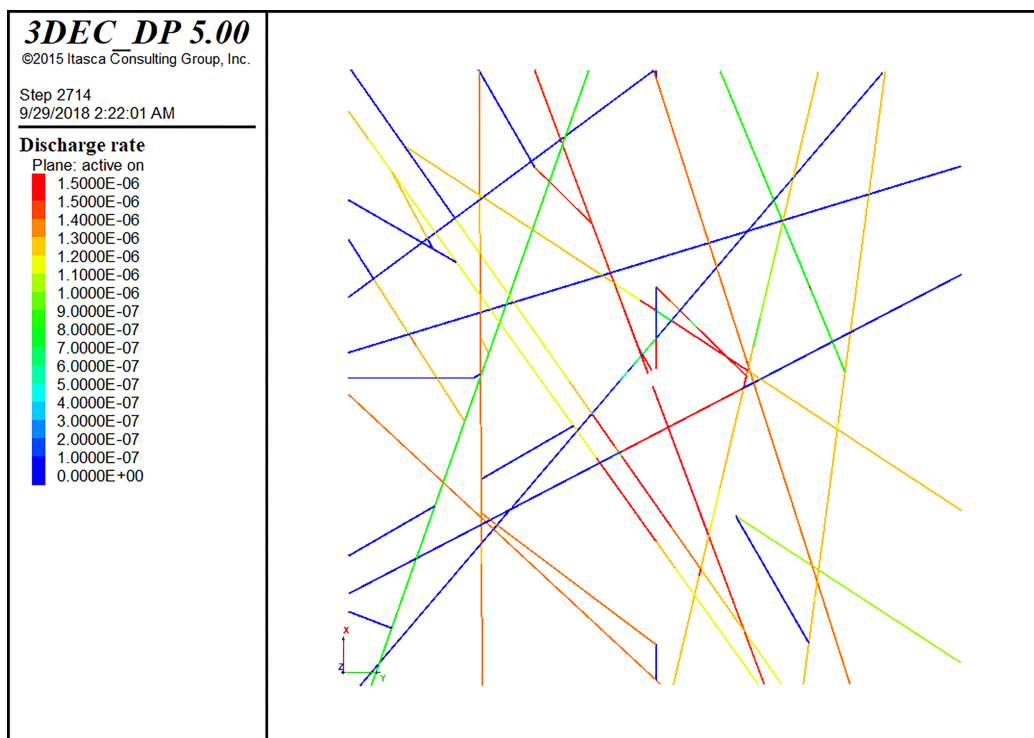
۶-۲-۱ بازشدگی

در ساخت مدل مرجع، بازشدگی هر سه دسته درزه به صورت ثابت فرض شد. در این بخش از مطالعه پارامتری، میزان بازشدگی دسته درزه‌ها به طور جداگانه تغییر داده شد و میزان تاثیر هر یک از دسته درزه‌ها در میزان تراوایی مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر مرحله از انجام مطالعه پارامتری، مقدار بازشدگی دو دسته درزه ثابت و برابر ۹۵ میکرون که برابر میزان بازشدگی مدل مرجع است، در نظر گرفته شد. سپس بازشدگی دسته درزه دیگر در بازه‌ی بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون تغییر داده شد. تغییرات تراوایی در نمودار ۶-۱ قابل مشاهده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد تغییراتی اندک در بازشدگی دسته درزه اول از دسته درزه دوم و سوم بسیار بیشتر است.

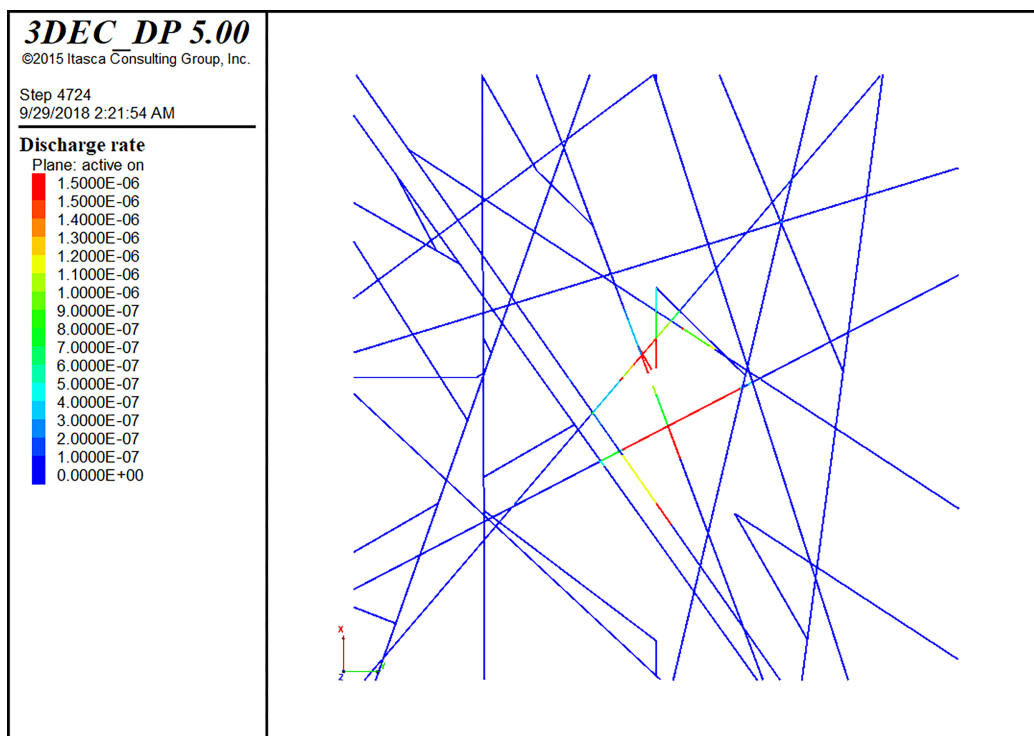
شکل‌های ۲-۶ و ۳-۶ تغییرات شدت جریان سیال نسبت به تغییرات بازشدگی در دسته درزه اول را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات در بازشدگی این دسته درزه تاثیر بسزایی بر روی شدت جریان سیال دارد. در شکل‌های ۴-۶ و ۵-۶ تغییرات شدت جریان سیال نسبت به تغییرات بازشدگی در دسته درزه سوم را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد. تغییرات بازشدگی در این دسته درزه تاثیر کمی بر شدت جریان سیال دارد. از آنجاییکه تراکم دسته درزه اول نسبت به دسته درزه دوم و سوم بیشتر است، لذا تغییرات در بازشدگی شکستگی‌های این دسته درزه بیشترین تاثیر در میزان تراوایی را دارد.



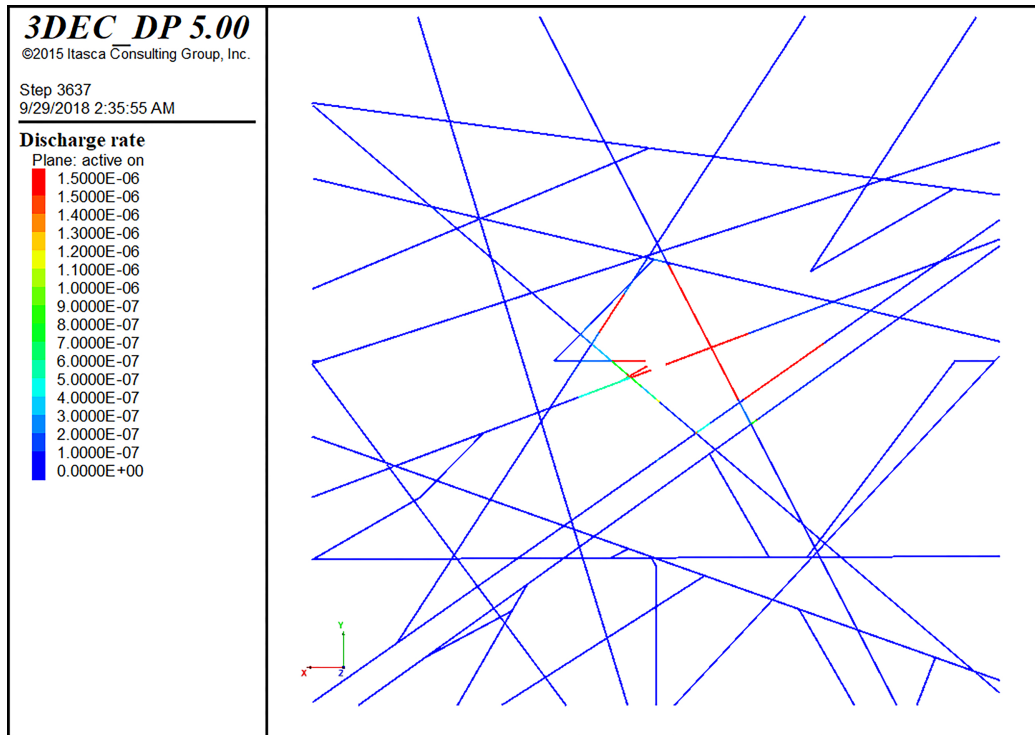
شکل ۶-۱: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات بازشدگی



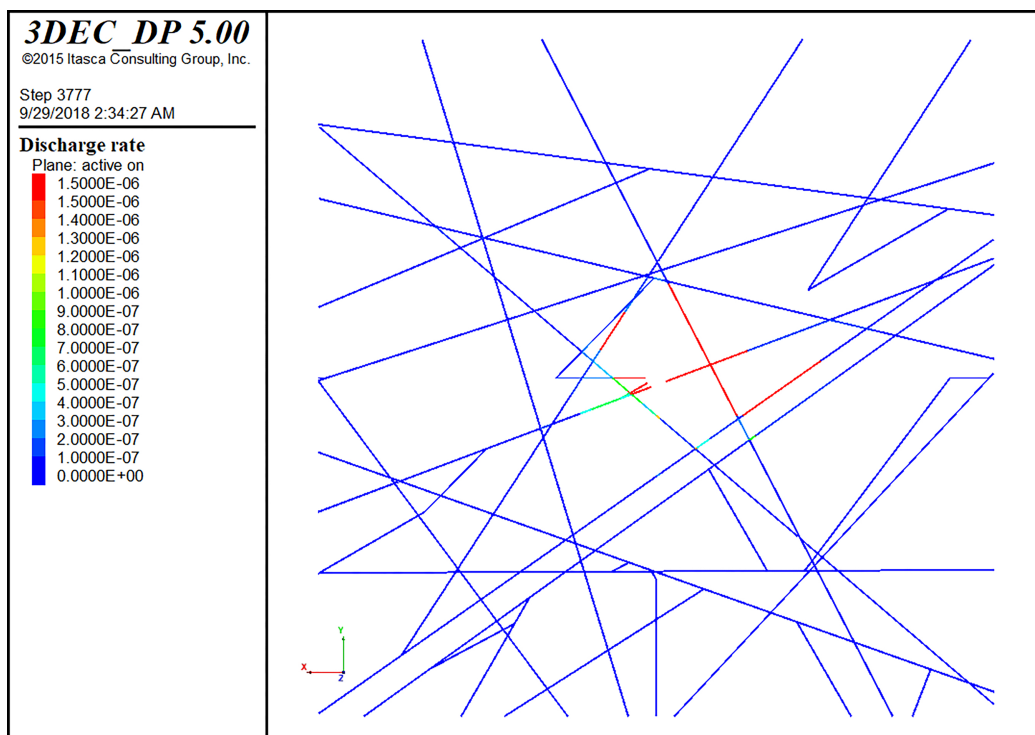
شکل ۶-۲: تاثیر افزایش بازشدگی دسته درزه اول بر روی شدت جریان سیال



شکل ۶-۳: تاثیر کاهش بازشدگی دسته درزه اول بر روی شدت جریان سیال



شکل ۶-۴: تاثیر افزایش بازشدگی دسته درزه سوم بر روی شدت جریان سیال



شکل ۶-۵: تاثیر کاهش بازشدگی دسته درزه سوم بر روی شدت جریان سیال

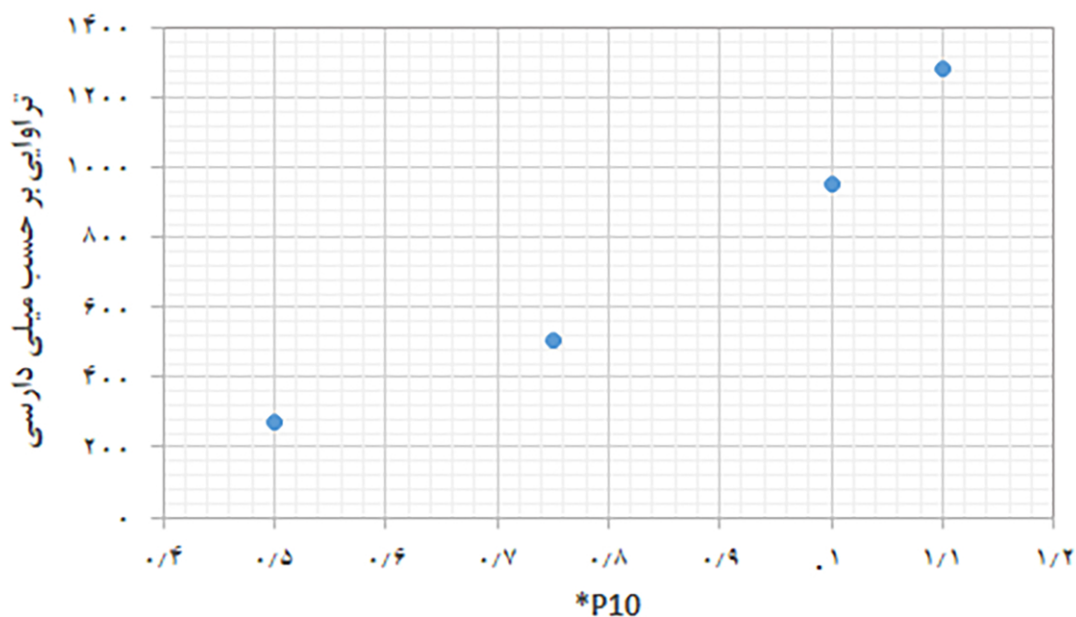
۲-۲-۶ تراکم شکستگی

پارامتر کنترل کننده تراکم شکستگی در این مطالعه، P_{10} می باشد. از این رو افزایش این مقدار، می تواند سبب افزایش تلاقی شکستگی ها با دیواره چاه شود. به منظور ارزیابی تاثیر فاصله داری شکستگی ها بر میزان تراوایی محاسبه شده، تغییر P_{10} را در چهار حالت مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

همان طور که جدول ۲-۶ و شکل ۶-۶ مشاهده می گردد، با تغییر کاهش تراکم شکستگی ها و در نتیجه افزایش فاصله شکستگی ها، میزان تراوایی کاهش می یابد. همچنین با کاهش فاصله شکستگی ها میزان تراوایی نیز افزایش می یابد.

جدول ۲-۶: تاثیر تغییر تراکم شکستگی بر میزان تراوایی

تراوایی (میلی داری)	مقدار p_{10}
۲۷۵/۱۷	$0.5 \times P_{10}$
۵۰۶/۰۶	$0.75 \times P_{10}$
۹۵۵/۹۵	P_{10}
۱۲۸۶/۴۵	$1.1 \times P_{10}$



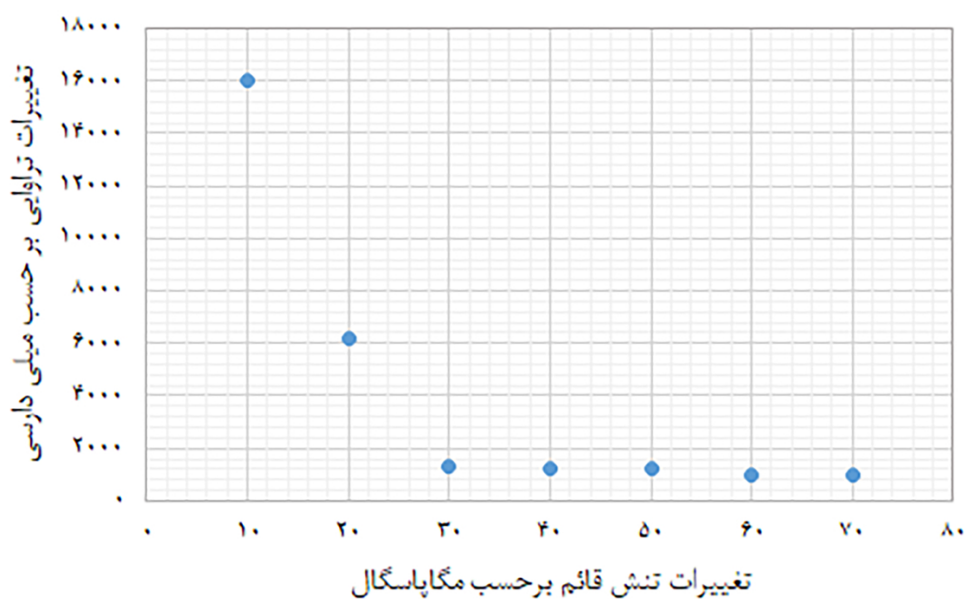
شکل ۶-۶: تاثیر تغییر تراکم شکستگی بر میزان تراوایی

۳-۶ تحلیل حساسیت تراوایی

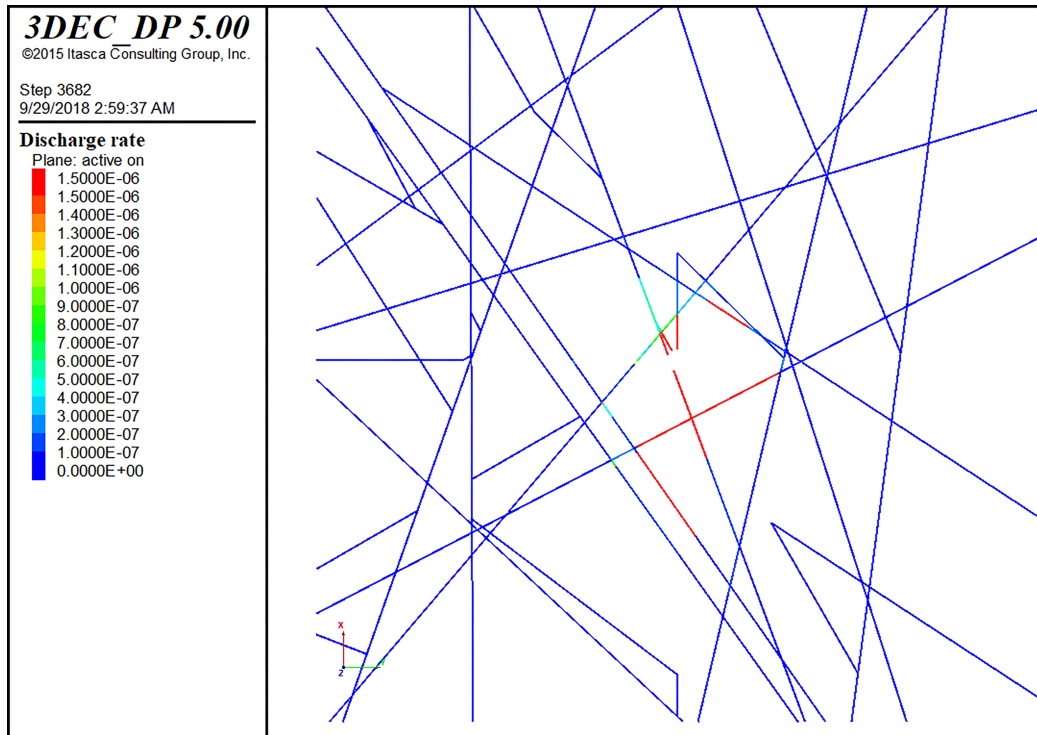
در مرحله بعد به منظور بررسی حساسیت تراوایی به تغییرات شرایط بارگذاری، اختلاف بین فشارمفندی و فشار سیال حفاری و ویسکوزیته سیال پرداخته می‌شود. سپس با تغییر یک به یک عوامل مذکور، نقش هر یک در تراوایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۳-۶ تغییرات تنش قائم

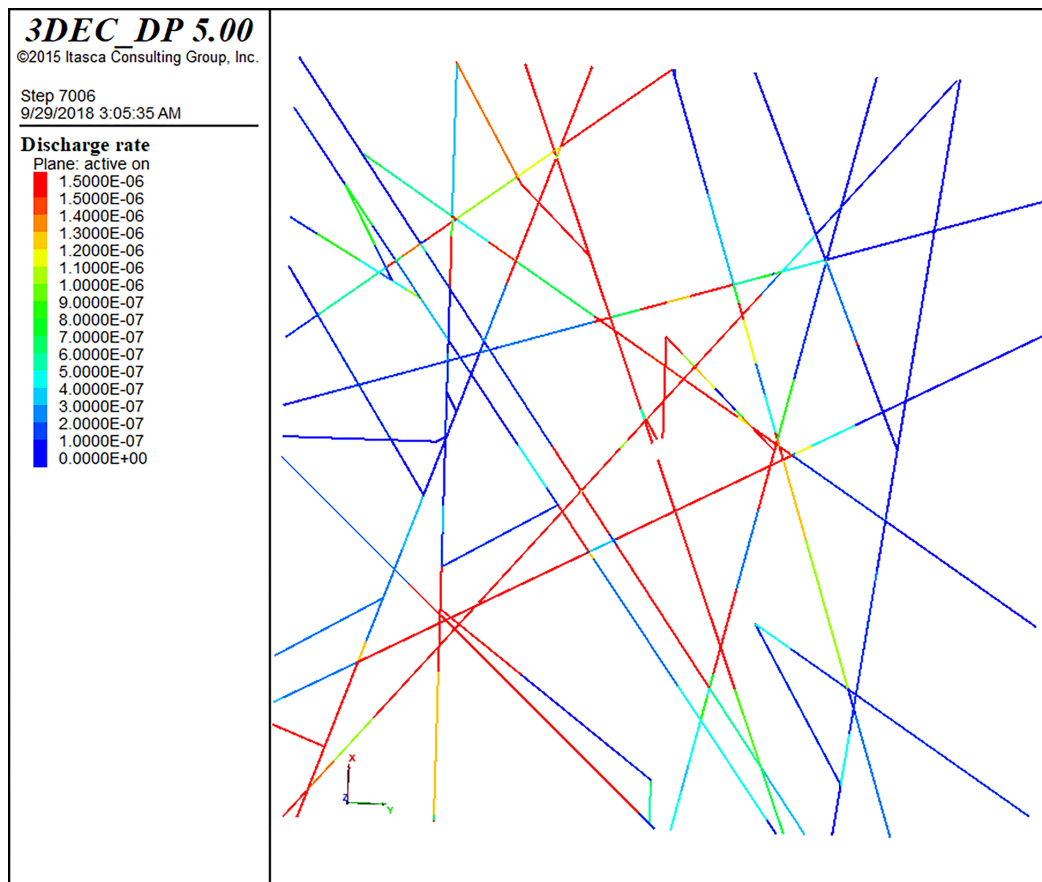
در این مرحله به بررسی تغییرات تراوایی نسبت به تنش قائم پرداخته شده است. برای ارزیابی تغییرات تراوایی، تنش قائم را از میزان ۱۰ مگاپاسکال تا تنش قائم ۷۰ مگاپاسکال افزایش داده شد. همانطور که در شکل ۶-۷ مشاهده می‌گردد، ابتدا در حالتی که تنش قائم در کمترین حالت قرار دارد، دلیل اینکه بازشدگی همه شکستگی‌ها در بیشترین حالت خود قرار دارد، میزان تراوایی بسیار بالا قرار دارد. با افزایش تنش قائم، در ابتدا تغییرات تراوایی به دلیل تغییر اندازه بازشدگی شکستگی‌ها، کاهش سریع دارد و سپس این مقدار به دلیل به حد نهایی رسیدن اندازه بازشدگی، به مقداری ثابت میل می‌کند. شکل‌های ۶-۸ و ۶-۹ شدت جریان درون مخزن و چاه را در دو حالت تنش قائم $62/35 MPa$ و $10 MPa$ را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۷: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات تنش قائم



شکل ۶-۸: شدت جریان درون بلوک در حالت تنش قائم برابر با ۶۲/۳۵ مگاپاسکال



شکل ۶-۹: شدت جریان درون بلوک در حالت تنش قائم برابر با ۳۰ مگاپاسکال

۶-۳-۲ تغییرات نسبت تنش افقی به قائم

به منظور تحلیل حساسیت نفوذپذیری نسبت به تغییرات شرایط تنش، در سناریوی اول نسبت تنش افقی به قائم حداقل را برابر با ۱ فرض شد. سپس مقدار تنش افقی به قائم حداقل از ۱ تا ۵ تغییر داده شد و نتایج مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج در جدول ۶-۳ و نمودار ۶-۱۰ آمده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است تغییرات نفوذپذیری در نسبت تنش‌های افقی به قائم پایین تغییرات بیشتری از خود نشان می‌دهد. میزان تراوایی در حد فاصل نسبت تنش‌های افقی حداکثر ۱ الی ۲ بیشترین تغییرات را در روند تراوایی سنگ مخزن ایجاد می‌کند. این موضوع با مطالعات کی‌بوک مین^۱ در سال ۲۰۰۴ مطابقت دارد (Min, 2004).

جدول ۶-۳: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداکثر

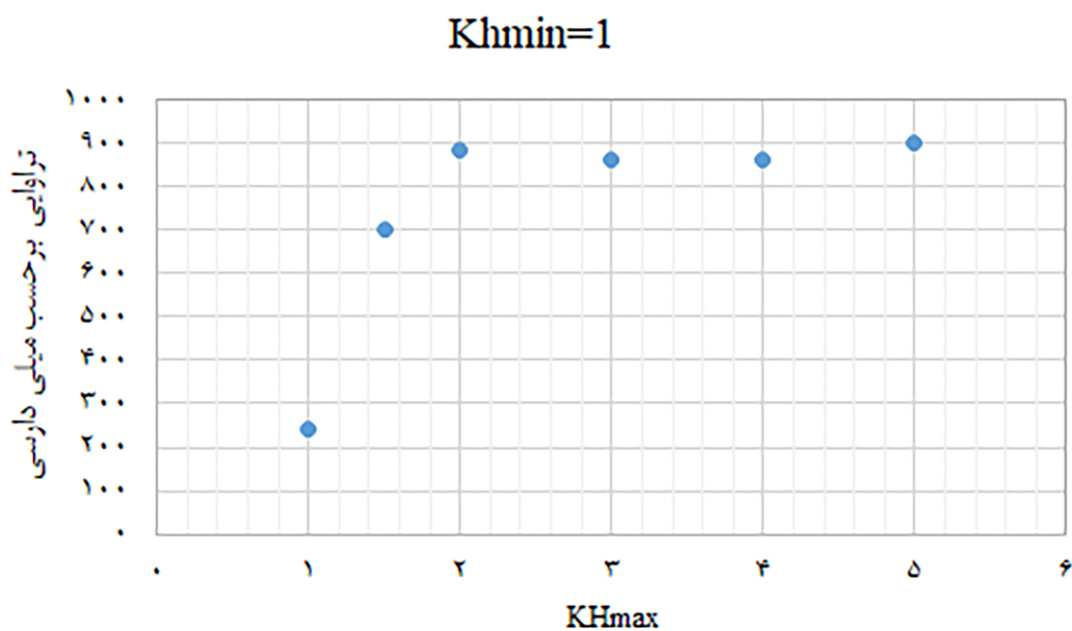
نسبت تنش افقی به قائم	نفوذپذیری (md)
۱	۲۴۴/۰۳
۱/۵	۷۰۰/۳
۲	۸۸۱/۶۷
۳	۸۶۱/۲۱
۴	۸۶۱/۳۱
۵	۸۹۹/۴۰

در سناریوی دوم، نسبت تنش افقی به قائم حداکثر ثابت و برابر با ۰/۶ فرض شد. سپس مقادیر نسبت تنش افقی به قائم حداقل از مقدار ۰/۱ الی ۲ تغییر داده شد. نتایج در جدول ۶-۴ و نمودار ۶-۱۱ آورده شده است. نکته‌ای که در سناریو دوم به چشم می‌آید تغییر ناگهانی مقدار تراوایی در هنگامی که نسبت تنش افقی به قائم حداقل از مقدار ۰/۶ بیشتر شده و عملاً جایگاه این دو نسبت عوض می‌گردد. نتیجه این جابجایی سبب جابجا شدن تنش افقی حداقل و حداکثر می‌شود.

طبق مطالعات نولن^۲ می‌توان نتیجه گرفت جریان سیال متمایل به تنش افقی حداکثر می‌باشد (Nolen-Hoeksema, 2013). زمانی که میزان نسبت تنش افقی به قائم جابجا می‌شود، باتوجه به وضعیت شبکه

^۱Ki-Bok Min

^۲Nolen-Hoeksema

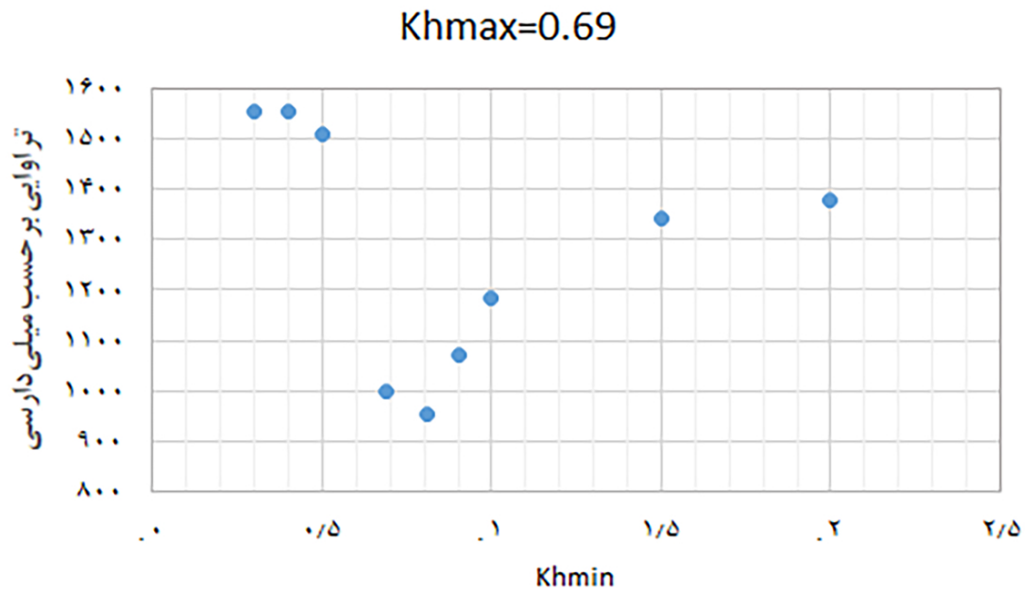


شکل ۶-۱۰: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداکثر

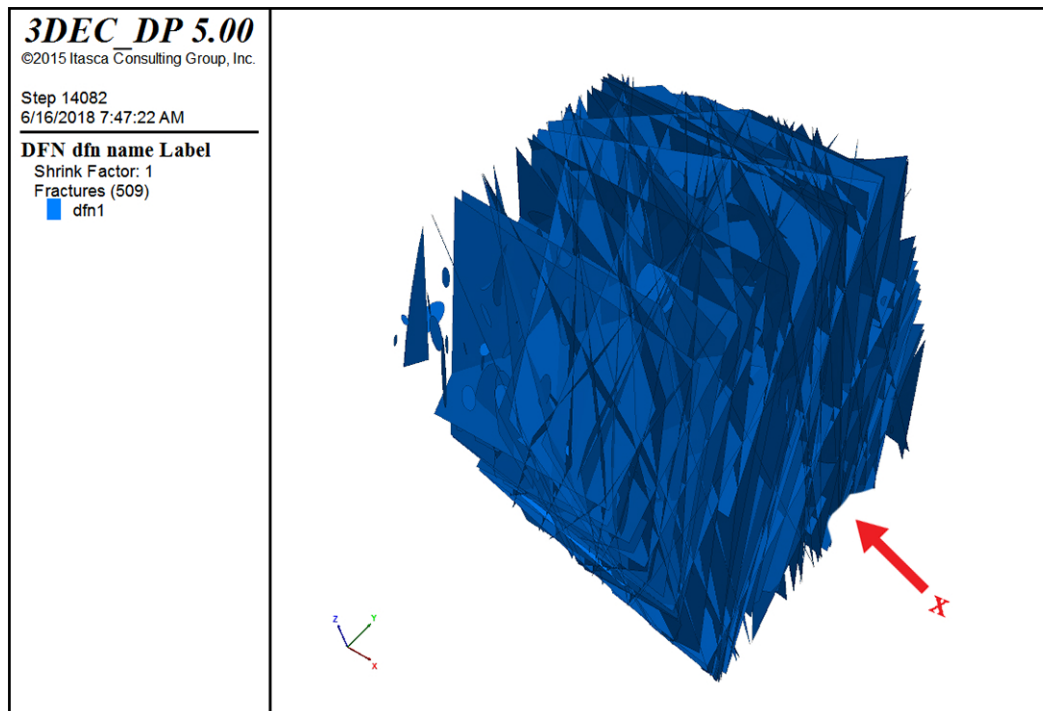
شکستگی دسته درزه اول که به صورت عمده در جهت محور X و به دلیل اینکه این دسته درزه به دلیل تراکم بالای آن تاثیر عمده در جریان سیال و تراوایی را ایفا می‌کند. این تغییر نسبت تنش‌ها از محور X به Y سبب کاهش ناگهانی تراوایی می‌گردد (شکل ۶-۱۲).

جدول ۶-۴: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداقل

نسبت تنش افقی به قائم	نفوذپذیری (md)
۰/۱	۹۲۶/۸۶
۰/۲	۹۳۷/۳۹
۰/۵	۹۵۵/۹۵
۱	۸۳۰/۱۹
۲	۸۵۰/۲۰



شکل ۶-۱۱: تغییرات تراوایی نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم حداقل



شکل ۶-۱۲: شبکه شکستگی دسته درزه اول

۶-۳-۳ تغییرات ویسکوزیته سیال

در این مرحله به منظور بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال در شدت جریان سیال درون چاه مورد ارزیابی قرار گرفت.

میزان ویسکوزیته نفت و آب و همچنین شدت جریان معادل در جدول ۶-۵ آمده است. از آنجایی که ویسکوزیته

نفت نسبت به آب مقدار بیشتری است. لذا با توجه به رابطه ۶-۱ ویسکوزیته سیال با میزان شدت جریان سیال رابطه عکس دارد، با کاهش ویسکوزیته سبب افزایش شدت جریان سیال به درون چاه می‌گردد.

$$q_i = -\frac{u^3 \rho g}{12\mu} \phi_i \quad (1-6)$$

جدول ۶-۵: ویسکوزیته سیال و دبی معادل (مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۹۳)

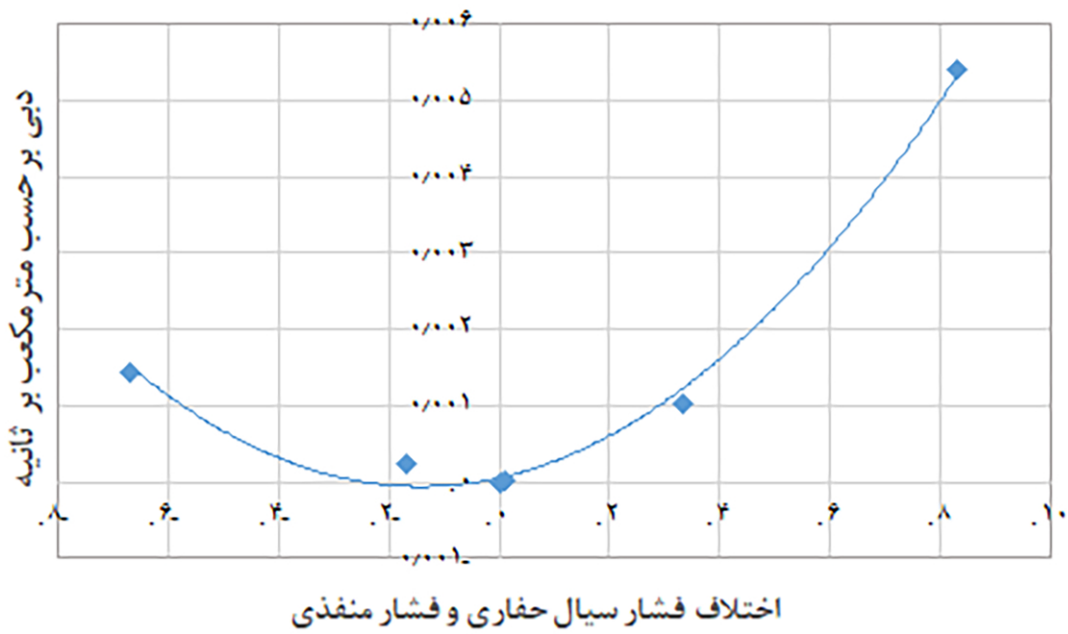
نوع سیال	ویسکوزیته (cp)	دبی ($\frac{m^3}{sec}$)
نفت	۱/۲۸۵	$3/04 \times 10^{-5}$
آب	۱	$3/28 \times 10^{-5}$

۶-۳-۴ تغییرات فشار منفذی

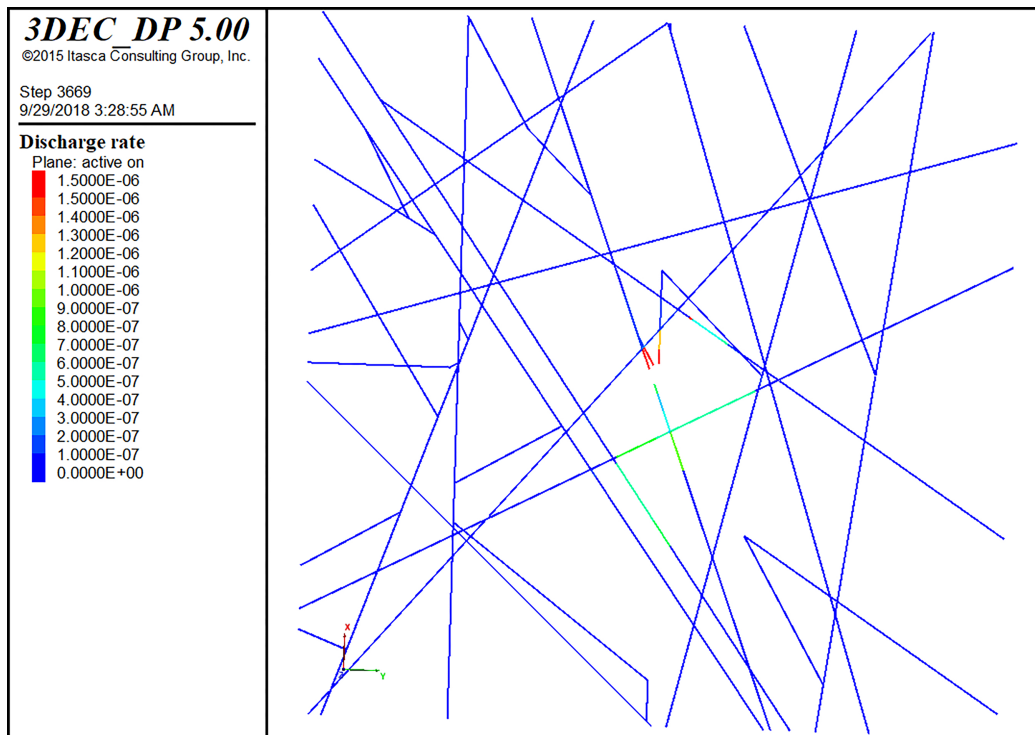
در مدل عددی مقادیر فشار منفذی را از مقدار ۱۰ مگاپاسکال تا مقدار ۲۵ مگاپاسکال تغییر داده شد. همانطور که در شکل ۶-۱۳ و جدول ۶-۶ دیده می‌شود با افزایش اختلاف میزان فشار منفذی از فشار گل حفاری مقدار دبی سیال افزایش می‌یابد و در نتیجه سبب افزایش تراوایی معادل می‌شود. با نزدیک شدن مقدار فشار منفذی به فشار گل حفاری مقدار تراوایی کم خواهد شد. در حالتی فشار منفذی برابر فشار سیال حفاری شود، دبی ایجاد شده بسیار ناچیز می‌گردد (شکل ۶-۱۴).

جدول ۶-۶: تغییرات فشار منفذی نسبت به فشار سیال ثابت (۱۶/۶۸)

فشار منفذی	دبی ($\frac{m^3}{sec}$)
۱۰	$1/45 \times 10^{-3}$
۱۶/۶۸	$2/37 \times 10^{-4}$
۱۶/۸	$9/31 \times 10^{-7}$
۲۰	$1/03 \times 10^{-3}$
۲۵	$5/41 \times 10^{-3}$



شکل ۶-۱۳: نسبت تغییرات شدت جریان سیال نسبت به تغییرات فشار منفذی



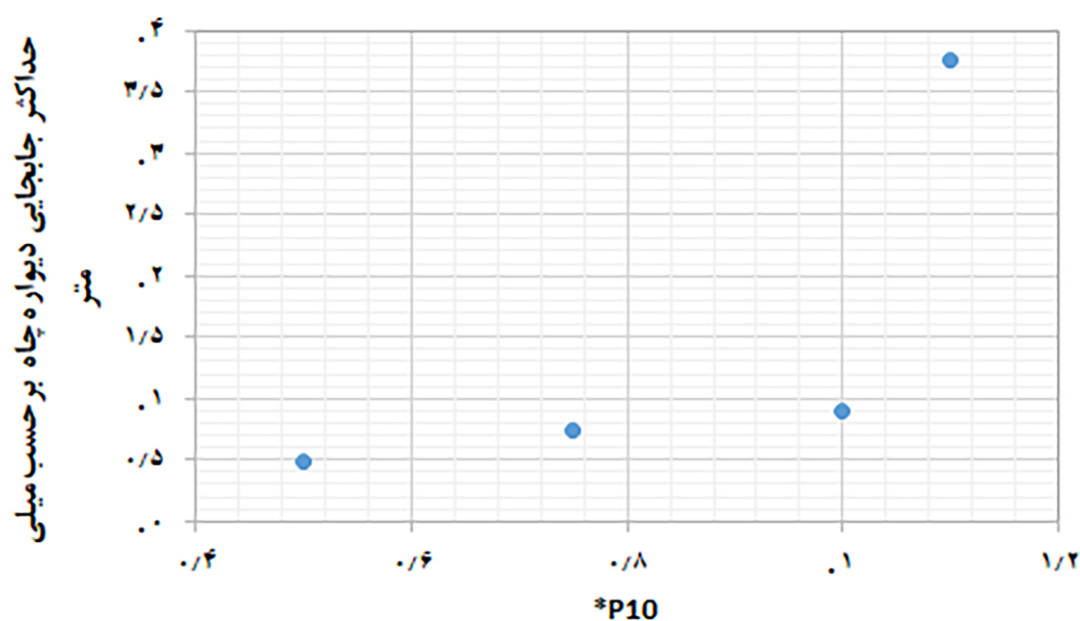
شکل ۶-۱۴: مقطع شدت جریان خروجی سیال به درون چاه در حالت فشار منفذی برابر با فشار سیال

۴-۶ تحلیل پارامتری عوامل موثر بر پایداری

در این بخش به منظور تحلیل پارامتری عوامل موثر بر پایداری دیواره چاه، به بررسی تاثیر برخی از پارامترها پرداخته شده است. لذا در ادامه به بررسی تاثیر تراکم شکستگی، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ و شکستگی‌ها، چسبندگی سنگ و مدول برشی سنگ پرداخته می‌شود.

۱-۴-۶ تراکم شکستگی

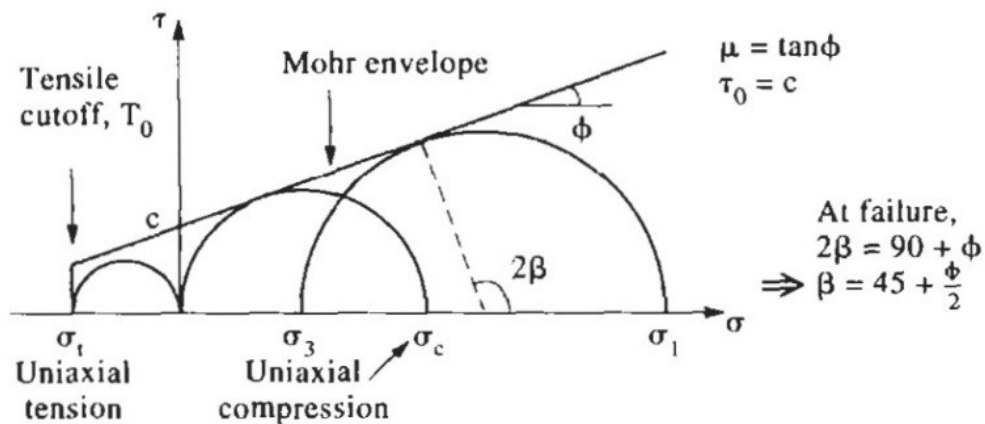
در شکل ۱۵-۶ تغییرات جابجایی حداکثر دیواره چاه نسبت به تغییرات تراکم شکستگی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش تراکم شکستگی به دلیل ایجاد شکستگی‌های ریز در اطراف دیواره چاه سبب افزایش احتمال جابجایی بلوک‌های دیواره چاه شده و چاه را ناپایدارتر می‌کند. از طرفی همانگونه که در بخش تحلیل پارامتری تراوایی بررسی شد، افزایش تراکم سبب افزایش تراوایی می‌گردد. در اینگونه سازندهای خطر هرزروی سیال حفاری به درون مخزن چاه افزایش می‌یابد. در مقابل کاهش تراکم شکستگی، به دلیل پیوسته تر شدن دیواره چاه، حرکت قطعات دیواره چاه به درون چاه کاهش پیدا می‌کند. لذا جابجایی دیواره چاه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵-۶: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات تراکم شکستگی

۶-۴-۲ زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر

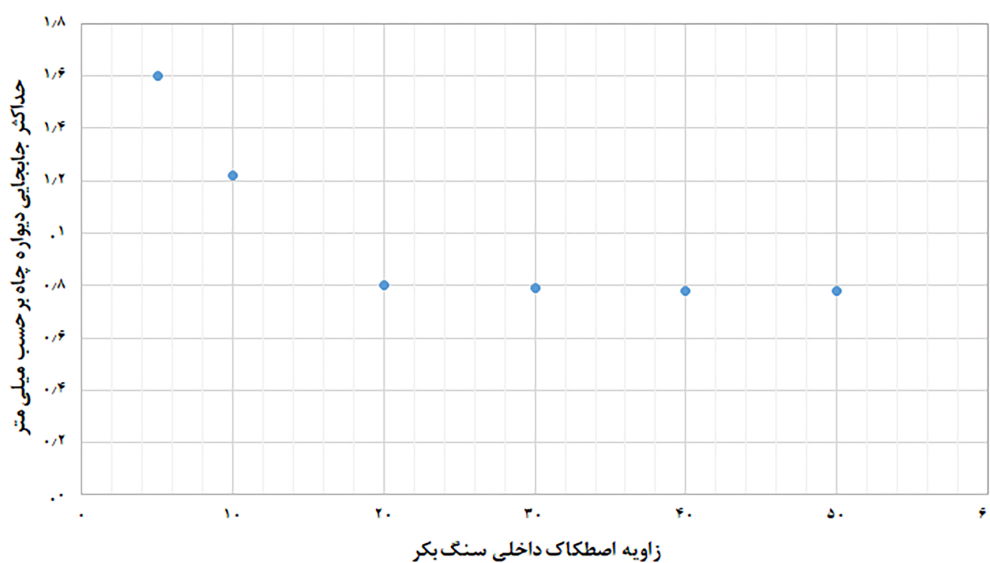
در چاه ۷۳ زاویه اصطکاک داخلی در بازه ۲۰ الی ۵۰ متغییر است. با کاهش زاویه اصطکاک داخلی میزان تنش برشی موثر مورد نیاز برای شکست سنگ نیز کاهش پیدا می‌کند (رابطه ۶-۲ - شکل ۶-۱۶). همانطور که در شکل ۶-۱۷ مشاهده می‌شود، با کاهش زاویه اصطکاک داخلی، میزان جابجایی بلوک‌های دیواره چاه افزایش یافته و دیواره چاه به سمت ناپایداری گرایش پیدا می‌کند.



شکل ۶-۱۶: ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب (Hudson and Harrison, 2000)

$$\tau = C_0 + \mu\sigma \quad (۶-۲)$$

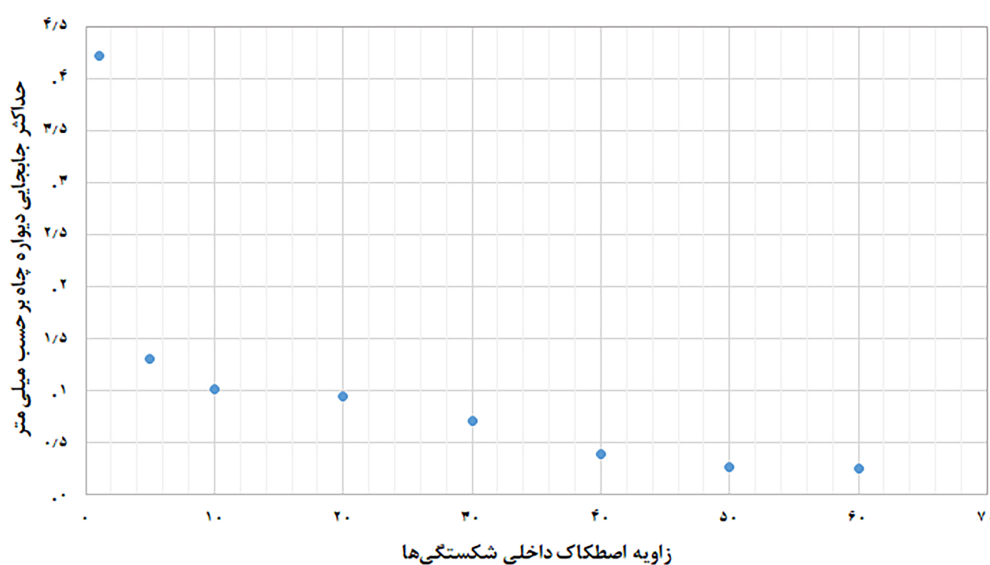
در این رابطه، τ تنش برشی موثر بر صفحه شکست، C_0 چسبندگی سنگ بکر، μ ضریب اصطکاک داخلی و σ تنش عمودی بر صفحه شکست می‌باشند.



شکل ۶-۱۷: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر

۳-۴-۶ زاویه اصطکاک داخلی شکستگی‌ها

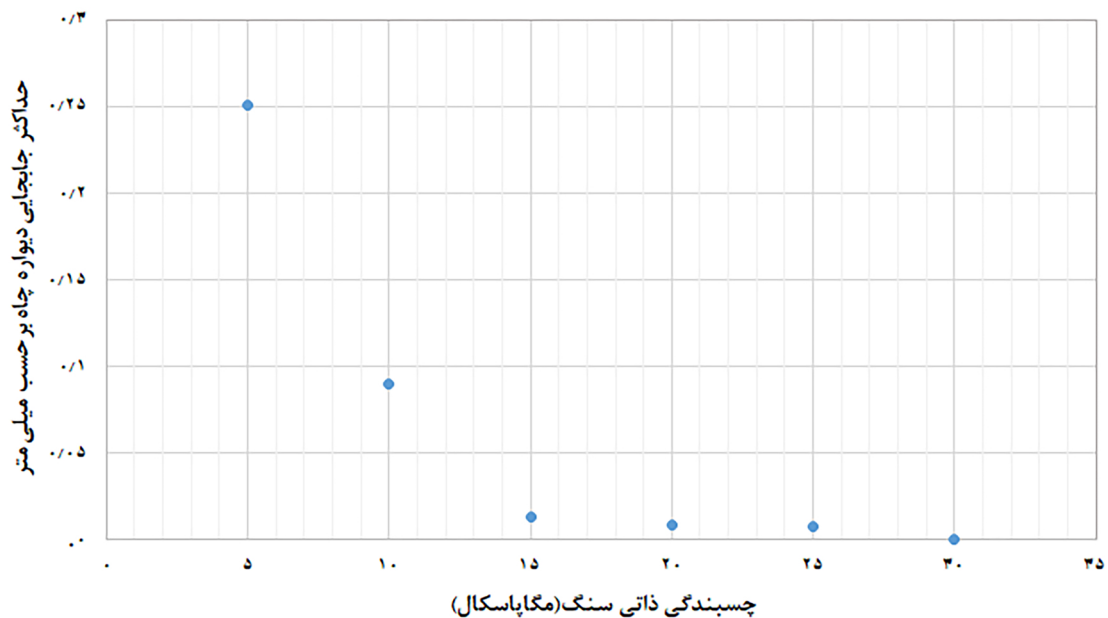
شکل ۶-۱۸ حداکثر جابجایی دیواره چاه را به ازای مقادیر زاویه اصطکاک داخلی شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. در چاه ۷۳ زاویه اصطکاک داخلی در بازه ۱ الی ۶۰ متغییر است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با کاهش زاویه اصطکاک داخلی، میزان جابجایی و در نتیجه ناپایداری دیواره چاه افزایش پیدا می‌کند. همچنین در مقادیر زاویه کمتر از ۵ شدت ریزش دیواره چاه با افزایش ناگهانی می‌باشد.



شکل ۶-۱۸: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی شکستگی

۴-۴-۶ چسبندگی سنگ بکر

شکل ۶-۱۹ حداکثر جابجایی دیواره چاه را به ازای مقادیر چسبندگی را نشان می‌دهد. در چاه ۷۳ چسبندگی در بازه ۷ الی ۲۸ مگاپاسکال متغیر است. با توجه به رابطه ۶-۲، تنش برشی موثر صفحه شکست سنگ با چسبندگی ذاتی سنگ بکر رابطه مستقیم دارد. لذا همان طور که از شکل مشخص می‌باشد، کاهش میزان چسبندگی و سبب کاهش میزان تنش موثر مورد نیاز برای شکست سنگ می‌گردد و در نتیجه جابجایی دیواره چاه افزایش می‌یابد. در مقادیر کمتر از ۵ مگاپاسکال دیواره چاه به طور کامل ناپایدار است.



شکل ۶-۱۹: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات چسبندگی سنگ

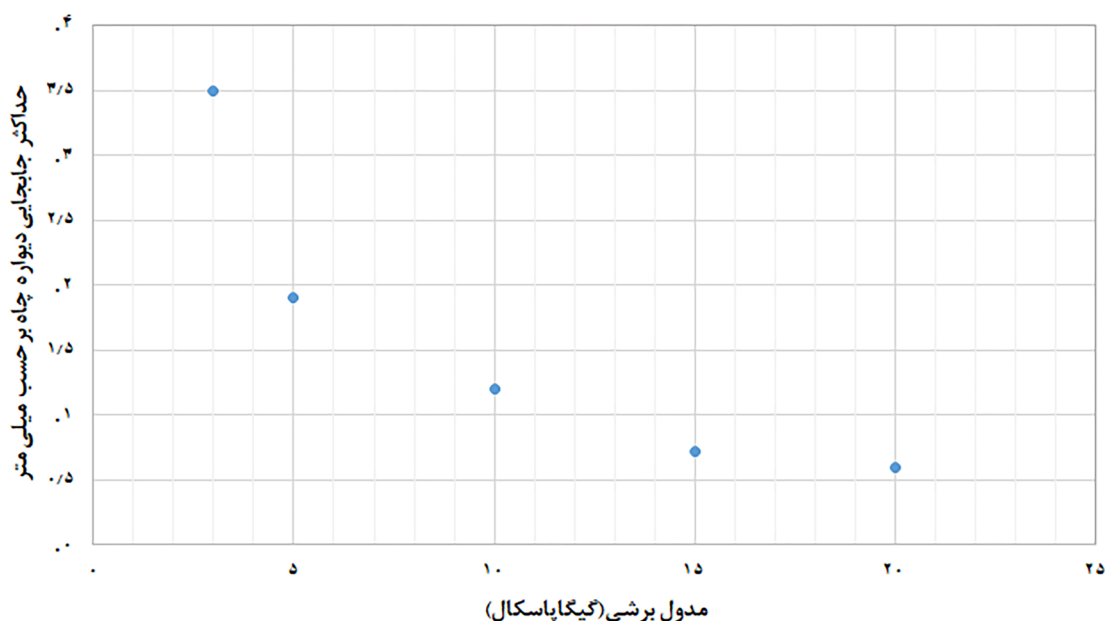
۴-۴-۵ مدول برشی

با توجه به رابطه ۶-۳ مقاومت تک محوری سنگ بکر با مدول یانگ سنگ رابطه مستقیم دارد و از طرفی دیگر مدول یانگ نسبت مستقیمی با مدول برشی سنگ دارد (رابطه ۶-۴). لذا با افزایش مقدار مدول برشی انتظار می‌رود مقاومت سنگ نیز افزایش پیدا کند. در این تحقیق به بررسی حداکثر جابجایی بلوک‌ها به نسبت تغییرات مدول برشی از مقدار ۲ به ۲۰ گیگاپاسکال پرداخته شد. همانطور که در شکل ۶-۲۰ افزایش مدول برشی سبب کاهش جابجایی بلوک‌ها و افزایش پایداری چاه می‌گردد. از مقادیر کمتر از ۱۰ گیگاپاسکال جابجایی بلوک‌ها افزایش

می‌آید و با ادامه این روند به دیواره چاه به ناپایداری کامل نزدیک می‌گردد.

$$UCS = ۲/۲۷ \times E_{Sta} + ۴/۷۴ \quad (۳-۶)$$

$$G_{Dyn} = \frac{E_{Dyn}}{۲(1 + v_{Dyn})} \quad (۴-۶)$$



شکل ۶-۲۰: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات مدول برشی

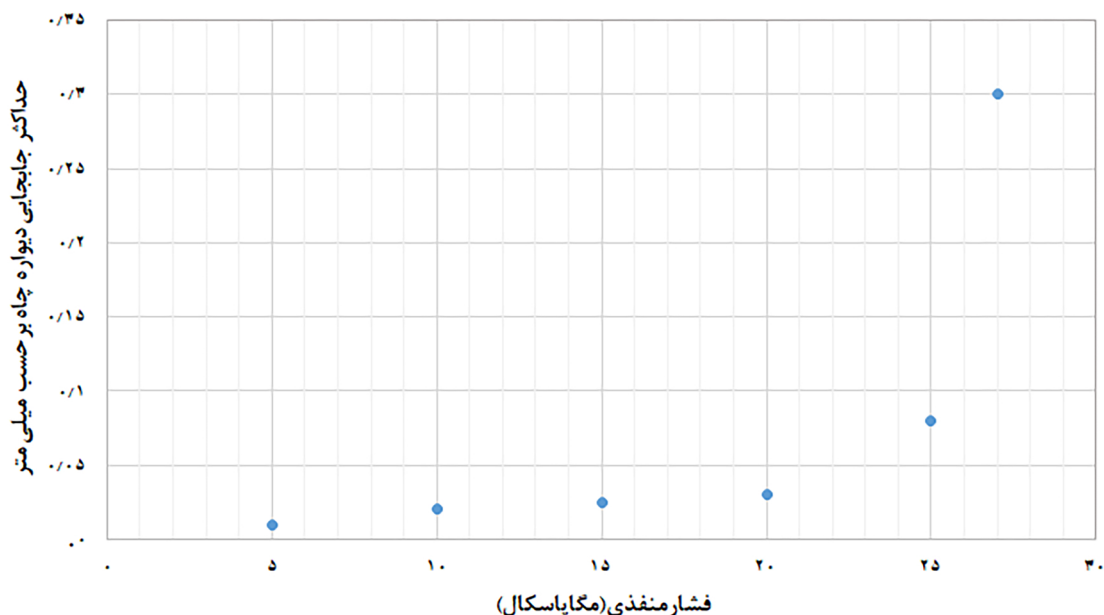
۵-۶ تحلیل حساسیت عوامل موثر بر پایداری

در ادامه به منظور بررسی حساسیت عوامل موثر بر پایداری به فشار منفذی و فشار سیال حفاری پرداخته می‌شود و با تغییر یک به یک عوامل مذکور، نقش هر یک در پایداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۵-۶ فشار منفذی

شکل ۶-۲۱ تاثیر تغییرات فشار منفذی بر مدل مرجع نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش فشار منفذی جابجایی دیواره چاه نیز افزایش پیدا می‌کند. از فشار منفذی ۲۷ مگاپاسکال به بعد تغییرات اندازه جابجایی دیواره چاه میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این میزان جابجایی در فشار منفذی ۳۰ مگاپاسکال به

میزان حدودی ۵۰ سانتی متر افزایش میابد. که این افزایش فشار منفذی باعث از دست رفتن چاه در این مقطع می‌گردد. در طرف مقابل با کاهش فشار منفذی از ۲۰ مگاپاسکال به مقدار ۵ مگاپاسکال تاثیر چندانی در جابجایی دیوار چاه ندارد.

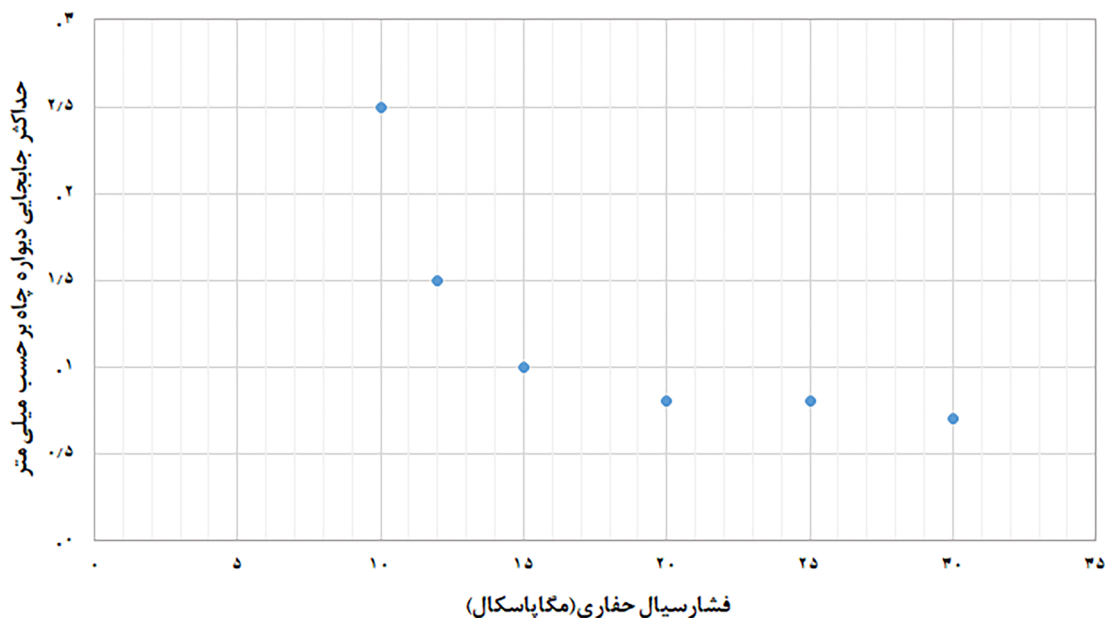


شکل ۶-۲۱: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات فشار منفذی

۶-۵-۲ فشار سیال حفاری

زمانی که فشار سیال حفاری شروع به کاهش می‌کند، اختلاف فشار سیال حفاری و فشار منفذی افزایش یافته و سیال حفاری به درون چاه حرکت می‌کند. از طرفی دیگر کاهش فشار سیال حفاری موجب کاهش توان نگهداری قطعات دیواره چاه می‌گردد و این خود می‌تواند سبب افزایش احتمال از دست دادن چاه شود. همانطور که در شکل ۶-۲۲ مشاهده می‌شود، با کاهش فشار سیال حفاری از مقدار اولیه آن یعنی ۱۶/۶۹ مگاپاسکال جابجایی دیواره چاه افزایش پیدا می‌کند. زمانی که فشار سیال حفاری از مقدار ۱۰ مگاپاسکال شروع به کم شدن کرد، میزان جابجایی چاه بسیار بالا رفت و چاه به طور کامل ناپایدار شد. از طرفی افزایش فشار سیال حفاری با وجود اینکه سبب کاهش جابجایی دیواره چاه می‌گردد، اما افزایش بی رویه این مقدار نیز می‌تواند سبب آسیب به سازند و هدر رفت سیال حفاری شود. به طور معمول حد بالای فشار سیال حفاری را به کمک تنش حداقل افقی تعیین می‌کنند.

زمانی که فشار سیال حفاری از مقدار تنش افقی حداقل بیشتر شود، سبب ایجاد شکست هیدرولیکی و هرزروی سیال می‌شود. با توجه به اینکه تنش افقی حداقل در این مقطع از چاه برابر با $20/88$ مگاپاسکال می‌باشد، لذا انتخاب فشار سیال حفاری بزرگ‌تر از این مقدار سبب آسیب به مخزن می‌گردد.



شکل ۶-۲۲: نسبت جابجایی دیواره چاه به تغییرات فشار سیال حفاری

۶-۶ جمع بندی

در این فصل به مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت عوامل موثر بر تراوایی و پایداری دیواره چاه پرداخته شد.

- تغییر بازشدگی تاثیر مستقیمی در شدت تراوایی سازند دارد. با توجه به نتایج بدست آمده، دسته درزه اول به دلیل تراکم بیشتر در طول چاه تاثیر بیشتر در تراوایی ایفا می‌کند.
- افزایش تراکم شکستگی تاثیر مستقیمی بر روی میزان تراوایی دارد. همچنین افزایش تراکم شکستگی سبب افزایش احتمال ناپایداری در چاه می‌شود.

- افزایش و سیکوزیته سیال، سبب کاهش شدت جریان سیال به درون چاه می‌گردد.
- افزایش تنش قائم سبب بسته شدن شکستگی‌ها می‌شود و این امر سبب کاهش تراوایی می‌گردد. این کاهش

تراوایی نسبت به افزایش تنش قائم در ابتدا بسیار سریع بوده و در ادامه از سرعت کاهش تراوایی کاسته می‌شود.

• از تعییرات فشار منفذی می‌توان نتیجه گرفت، اختلاف فشار بین فشار سیال حفاری و فشار منفذی، بر روی

شدت جریان تاثیر دارد.

• زاویه اصطکاک داخلی سنگ و زاویه اصطکاک داخلی شکستگی‌ها، تاثیر مهمی بر جابجایی دیواره چاه دارد.

• مدول برشی و چسبندگی سنگ نیز عوامل موثر بر پایداری چاه می‌باشند.

فصل ۷

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱ نتیجه‌گیری

در فصل دوم، ابتدا به بیان تعریف کلیات ناپایداری در چاه پرداخته شد. در ادامه انواع ناپایداری، به دو منشا کلی شیمیایی و مکانیکی تقسیم‌بندی شد. ناپایداری‌های با منشا مکانیکی به دودسته عوامل غیرقابل کنترل و قابل کنترل دسته‌بندی گردید و به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، کلیاتی در مورد انواع گسیختگی، اهمیت پیش‌بینی ناپایداری پیش از حفاری و نهایتاً روش‌های پیش‌بینی ناپایداری مطرح گردید. در ادامه هرزروی گل حفاری به درون سازند معرفی گردید و روش‌های کنترل هرزروی به دودسته پیشگیرانه و اصلاحی دسته‌بندی شد.

با توجه به آنچه که در این فصل گفته شد می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- ناپایداری چاه ناشی از عوامل متعددی است که هرکدام سهم مهمی را دارا می‌باشند. خصوصیات مقاومتی و ارتجاعی سازند مانند مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری و وجود سازند ضعیف مانند شیل به عنوان پارامترهایی هستند که می‌تواند بر هزینه عملیات تاثیر بگذارد.
- شرایط تنش و رژیم تنش جز عوامل غیر قابل کنترل است. این عوامل در انتخاب وزن مناسب سیال حفاری اهمیت بسزایی دارد.

• انتخاب شیب و آزیموت مناسب چاه می‌تواند به هرچه بهتر بودن عملیات کمک کند.

• عواملی مانند لرزش لوله حفاری، فشارمکشی و موجی با تجربه هرچه بیشتر حفار قابل کنترل است.

• مدل ژئومکانیکی می‌تواند در تحلیل پایداری چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری استفاده شود و همچنین در کنترل پیش گیرانه از هرزروی سیال به درون سازند مورد استفاده قرار گیرد.

در فصل سوم ابتدا به انواع روش‌های مدل‌سازی مخازن شکافدار و تاریخچه مطالعات مدل‌سازی عددی پرداخته شد. سه روش در مدل‌سازی مخازن شکافدار کاربرد دارند، روش پیوسته یگانه، روش پیوسته دوگانه و روش شبکه مجزا. در ادامه به توصیف خصوصیات شکستگی طبیعی و نحوه مطالعه و بررسی آماری شکستگی‌ها جهت استفاده در مدل‌سازی عددی مجزا پرداخته شد. در ادامه اصول جریان، روابط حاکم بر جریان و همچنین عوامل موثر بر تراوایی مخازن شکافدار ارائه گردید. عواملی مانند بازشدگی درزه و نسبت تنش برجا که بر جریان سیال موثر می‌باشند، تاثیر مستقیم بر روی نفوذپذیری مخزن دارند.

در فصل چهارم، پس از معرفی میدان پاریسی و چاه مورد مطالعه، مراحل و نحوه تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی تشریح شد. سپس مدل یکی بعدی با استفاده از معیارهای شکست سنگ ساخته و محدوده وزن ایمن گل حفاری تخمین زده شد. نتایج بدست آمده را می‌توان به این ترتیب ذکر کرد:

- رژیم تکتونیک در محدوده چاه ۷۳ میدان پاریسی بر اساس تقسیمات اندرسون نرمال می‌باشد
- اغلب ریزش‌ها و شکستگی‌های برشی چاه ۷۳ میدان پاریسی در بین عمق‌های ۲۳۶۰ الی ۲۴۲۰ متر را می‌توان ناشی از افزایش شیل در این عمق‌ها ارزیابی نمود. این موضوع به دلیل مقاومت پایین شیل می‌باشد.
- نتایج بدست آمده از مقایسه معیارهای شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب با نگارها تصویری نشان می‌دهد، در نظر گرفتن تاثیر تنش اصلی میانی در تخمین دقیق‌تر بازه امن گل حفاری موثر می‌باشد. فلذا معیار موهر- کلمب محتاطانه تر و معیار موگی کلمب واقع بینانه‌تر به نظر می‌رسند.
- با بررسی عوامل موثر در ساخت مدل ژئومکانیکی زمین می‌توان دریافت، پارامترهای ارتجاعی و مقاومتی سنگ، فشار منفذی، فشار سیال حفاری و وضعیت تکتونیک می‌توانند شرایط پایداری یک چاه را تحت تاثیر قرار دهند. لذا مطالعه دقیق این پارامترها ضروری است.

- در فصل پنجم، به مدل سازی عددی چاه ۷۳ میدان پارسى توسط نرم‌افزار 3DEC پرداخته شده است. :
- به منظور مدل‌سازی، ابتدا حجم معرف و ضرورت استفاده از حجم معرف توصیف شد. سپس طول ضلع حجم معرف ۷ متر در نظر گرفته شد. تمام خصوصیات مکانیک سنگی در این بلوک یکسان است.
 - اطلاعات حاصل از برداشت شکستگی‌ها به کمک نرم افزار *Dips* مورد بررسی قرار گرفت. سه دسته درزه عمده بر تراوایی موثر است.
 - با توجه به مدل ژئومکانیکی یک بعدی و اینکه مدل موهر کلمب نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است، برای مدل‌سازی این چاه، از این مدل رفتاری استفاده شد.
 - نتایج بدست آمده از مدل‌سازی این بخش چاه را با نتایج واقعی مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد مدل‌سازی انجام شده انطباق قابل قبولی با واقعیت را دارا است.
 - و در نهایت در فصل ششم، به مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت عوامل موثر بر تراوایی و پایداری دیواره چاه پرداخته شد.
 - تغییر بازشدگی تاثیر مستقیمی در شدت تراوایی سازند دارد. با توجه به نتایج بدست آمده، دسته درزه اول به دلیل تراکم بیشتر در طول چاه تاثیر بیشتر در تراوایی ایفا می‌کند.
 - افزایش تراکم شکستگی تاثیر مستقیمی بر روی میزان تراوایی دارد. همچنین افزایش تراکم شکستگی سبب افزایش احتمال ناپایداری در چاه می‌شود.
 - افزایش و سیکوزیته سیال، سبب کاهش شدت جریان سیال به درون چاه می‌گردد.
 - افزایش تنش قائم سبب بسته شدن شکستگی‌ها می‌شود و این امر سبب کاهش تراوایی می‌گردد. این کاهش تراوایی نسبت به افزایش تنش قائم در ابتدا بسیار سریع بوده و در ادامه از سرعت کاهش تراوایی کاسته می‌شود.
 - از تعییرات فشار منفذی می‌توان نتیجه گرفت، اختلاف فشار بین فشار سیال حفاری و فشار منفذی، بر روی شدت جریان تاثیر دارد.

- زاویه اصطکاک داخلی سنگ و زاویه اصطکاک داخلی شکستگی‌ها، تاثیر مهمی بر جابجایی دیواره چاه دارد.
- مدول برشی و چسبندگی سنگ نیز عوامل موثر بر پایداری چاه می‌باشند.

۲-۷ پیشنهادات

- به دلیل ضرورت استفاده داده موج برشی در تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ که در ساخت مدل مرجع استفاده می‌گردد، تهیه این نگاره به طور مجزا برای هر چاه توصیه می‌گردد.
- توصیه می‌گردد در مطالعات بعدی به بررسی تاثیر دمای سیال و سازند بر روی میزان تراوایی و پایداری دیواره چاه پرداخته شود.
- در این نسخه استفاده شده از نرم افزار و به دلیل محدود بودن آن، از تراوایی ماتریکس سنگ صرفه نظر گردید. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی به تراوایی ماتریکس سنگ نیز توجه گردد.

مراجع

- آشتیانی عبدی، هادی، علی قنبری، بهمن بهلولی، و سجاد کاظم شیرودی (۱۳۸۷). طراحی وزن گل حفاری با توجه به ژئومکانیک سازند به منظور پایداری دیواره چاه. در *اولین کنگره ملی صنعت حفاری ایران*.
- انزانپور، سینا (۱۳۹۳). بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر پایداری دیواره چاه نفت در یکی از میداین شرکت ملی نفت مناطق نفت خیز جنوب. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- طالش حسینی، سجاد، بهزاد تخم چپی، و شبلم حسینی (۱۳۹۶). ارزیابی تخمین سرعت موج برشی با استفاده از شبکه عصبی مدار شعاعی (rbf). در *سومین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی*. موسسه علمی تحقیقاتی کومه علم آوران دانش.
- دلپذیریان، امیرحسین، حسین سالاری راد، مجید عطایی پور، و آرش خسروی (۱۳۸۶). تحلیل هیدرومکانیکی دوبعدی ناپیوستگی توده سنگ مخازن نفتی. در *ششمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن*. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- کرمی، ادیب، سید علی رضا طباطبایی نژاد، و شعله خاقانی جونقانی (۱۳۹۳). بررسی تاثیر حضور شکستگیها در میزان هرزروی سیال حفاری در سازند مخزنی با استفاده از تفسیر نمودارهای. در *اولین همایش ملی توسعه میداین نفت و گاز*. مناطق نفت خیز جنوب، شرکت (۱۳۹۳). گزارش زمین شناسی.
- میرزائی نصیر آباد، حسین (۱۳۹۱). تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه های شکستگی مجزای توده سنگ درزه دار. در *اولین همایش زمین شناسی فلات ایران*. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- یزدانی، محمد (۱۳۸۵). تحلیل ساختاری و شکستگی های میدان نفتی پارسی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- Aadnoy, B., M. Chenevert, et al. (1987). Stability of highly inclined boreholes (includes associated papers 18596 and 18736). *SPE Drilling Engineering* 2(04), 364-374.
- Aadnoy, B. S. (1990). In-situ stress directions from borehole fracture traces. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 4(2), 143-153.
- Afsari, M., M. R. Ghafoori, M. Roostaeian, A. Haghshenas, A. Ataei, R. Masoudi, N. Iranian, and O. Company (2009). Mechanical Earth Model (MEM): an effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (Case Study). In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, pp. 1-12.
- Akhgarian, E., H. Jalalifar, and J. Taheri Shakib (2013). Wellbore stability in shale formation using analytical and numerical simulation. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering* 47(1), 51-60.

- Al-Ajmi, A. (2006). Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion.
- Al-Wardy, W. M. and O. E. Portillo (2010). Geomechanical modelling for wellbore stability during drilling nahr umr shales in a field in petroleum development oman. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, pp. 1–11.
- Amadei, B. and O. Stephansson (1997). *Rock stress and its measurement*. Springer Science & Business Media.
- Archer, S. and V. Rasouli (2012). A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in the Northern Perth Basin.
- Barenblatt, G. (1960). On finiteness conditions in the mechanics of continuous media. static problems of the theory of elasticity. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 24(2), 453–461.
- Barton, C. A., M. D. Zoback, and K. L. Burns (1988). In-situ stress orientation and magnitude at the fenton geothermal site, new mexico, determined from wellbore breakouts. *Geophysical Research Letters* 15(5), 467–470.
- Bowes, C. and R. Procter (1997). Drillers stuck pipe handbook. *Ballater, Scotland: Procter & Collins Ltd.*
- Bradley, W. (1979). Failure of inclined boreholes. *Journal of Energy Resources Technology* 101(4), 232–239.
- Brocher, T. M. (2005). Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(6), 2081–2092.
- Cacas, M.-C., E. Ledoux, G. d. Marsily, B. Tillie, A. Barbreau, E. Durand, B. Feuga, and P. Peaudecerf (1990). Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. the flow model. *Water Resources Research* 26(3), 479–489.
- Castagna, J., M. Batzle, and T. Kan (1993). Rock physics—the link between rock properties and avo response, from: Offset-dependant reflectivity—theory and practice of avo analysis, published by the society of exploration geophysicists, edited by castagna. *J, and Backus, M.*
- Chen, M., M. Bai, and J.-C. Roegiers (1999). Permeability tensors of anisotropic fracture networks. *Mathematical geology* 31(4), 335–373.
- Chen, X., C. Tan, C. Detournay, et al. (2001). Wellbore behaviour in fractured rock masses. In *DC Rocks 2001, The 38th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Chen, X., C. P. Tan, C. M. Haberfield, et al. (2002). A comprehensive, practical approach for wellbore instability management. *SPE drilling & completion* 17(04), 224–236.
- Eaton, B. A. et al. (1975). The equation for geopressure prediction from well logs. In *Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers.
- Eskandari, H., M. R. Rezaee, A. Javaherian, and M. Mohammadnia (2003). Shear wave velocity estimation utilizing wireline logs for a carbonate reservoir, south-west iran. *Iranian International Journal of Science* 4(2), 209–221.
- Farahmand, K., B. Ferdosi, R. Nateghi, J. Abbasi, and M. Sharifzadeh (2011). Comparison between hydraulic and hydro-mechanical analyses for estimating flow rate in rock masses case study: Upper gotvand dam foundation-iran. *international journal of rock mechanics and rock engineering*.
- Fjar, E., R. M. Holt, A. M. Raaen, R. Risnes, and P. Horsrud (2008). *Petroleum related rock mechanics*, Volume 53. Elsevier.
- Gerner, A. (2012). Lost circulation experimental study in oil based mud and analyzing experimental data. Master's thesis, University of Stavanger, Norway.

- Gilman, J. R., H. Kazemi, et al. (1983). Improvements in simulation of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal* 23(04), 695–707.
- Hakami, E. (1995). *Aperture distribution of rock fractures*. Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden.
- Hudson, J. A. and J. P. Harrison (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier.
- Hughes, R. G. and M. J. Blunt (2001). Network modeling of multiphase flow in fractures. *Advances in Water Resources* 24(3), 409–421.
- Indraratna, B., P. Ranjith, and W. Gale (1999). Single phase water flow through rock fractures. *Geotechnical and Geological Engineering* 17(3), 211–240.
- Itasca (2013). 3dec user's guide ver 5.
- Ivars, D. M. (2006). Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(5), 705–725.
- Jamshidi, E. and M. Amani (2014). Numerical wellbore stability analysis using discrete element models. *Petroleum Science and Technology* 32(8), 974–982.
- Jing, L. and O. Stephansson (2007). *Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications*, Volume 85. Elsevier.
- Kadyrov, T. (2012). *Integrated wellbore stability analysis for well trajectory optimization and field development: The West Kazakhstan Field*. Colorado School of Mines.
- Khan, S., S. Ansari1a, and N. Khosravi (2012). Prudent and integrated approach to understanding wellbore stability in canadian foothills to minimize drilling challenges and non-productive time.
- Kunkel, J. R., S. Way, and C. McKee (1988). *Comparative Evaluation of Selected Continuum and Discrete-fracture Models: Creston Study Area, Eastern Washington*. US Nuclear Regulatory Commission.
- Lal, M. et al. (1999). Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Le, K. and V. Rasouli (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, C.-H. and I. W. Farmer (1993). *Fluid flow in discontinuous rocks*. Chapman & Hall.
- Lee, H. and T. Cho (2002). Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 35(4), 299–318.
- Long, J., J. Remer, C. Wilson, and P. Witherspoon (1982). Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research* 18(3), 645–658.
- Long, J. and P. A. Witherspoon (1985). The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 90(B4), 3087–3098.
- Mastin, L. (1988). Effect of borehole deviation on breakout orientations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93(B8), 9187–9195.
- McLean, M. R. and M. A. Addis (1990). Wellbore Stability: The Effect of Strength Criteria on Mud Weight Recommendations.
- McLellan, P. et al. (1996). Assessing the risk of wellbore instability in horizontal and inclined wells. *Journal of Canadian Petroleum Technology* 35(05).

- Min, K.-B. (2004). *Fractured rock masses as equivalent continua-A Numerical Study*. Ph.D. dissertation , Mark och vatten.
- Morita, N., L. Whitebay, et al. (1994). Rock mechanics aspects of drilling and completing highly inclined wells in weak formations. In *University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- Nakashima, T., K. Sato, N. Arihara, N. Yazawa, et al. (2000). Effective permeability estimation for simulation of naturally fractured reservoirs. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Nolen-Hoeksema, R. (2013). Defining hydraulic fracturing: Elements of hydraulic fracturing. *Oilfield Review Schlumberger*.
- Oda, M. (1985). Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique* 35(4), 483–495.
- Ottesen, S. (2010). Wellbore stability in fractured rock. In *IADC/SPE drilling conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Pašić, B., N. Gaurina Međimurec, and D. Matanović (2007). Wellbore instability: causes and consequences. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 19(1), 87–98.
- Peng, S. and J. Zhang (2007). *Engineering geology for underground rocks*. Springer Science & Business Media.
- Plumb, R. (1994). Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Qian, W. and L. B. Pedersen (1991). Inversion of borehole breakout orientation data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 96(B12), 20093–20107.
- Rawlings, C., N. Barton, S. Bandis, M. Addis, M. Gutierrez, et al. (1993). Laboratory and numerical discontinuum modeling of wellbore stability. *Journal of Petroleum Technology* 45(11), 1–086.
- Razi, S., R. S. Shadizadeh, K. Shahriar, and E. Kazemzadeh (2010). Building a precise mechanical earth model and its application in drilling operation optimization: A case study of asmari formation in mansuri oil field.
- Renard, P. and G. De Marsily (1997). Calculating equivalent permeability: a review. *Advances in water resources* 20(5), 253–278.
- Rutqvist, J. and O. Stephansson (2003). The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal* 11(1), 7–40.
- Simangunsong, R., J. J. Villatoro, A. K. Davis, et al. (2006). Wellbore stability assessment for highly inclined wells using limited rock-mechanics data. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Snow, D. T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research* 5(6), 1273–1289.
- Stangeland, H. (2015). Experimental lost circulation and performance simulation studies of 60/40, 70/30, 80/20 and 90/10 obms. Master's thesis, University of Stavanger, Norway.
- Sun, J. and Z. Zhao (2010). Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(5), 629–637.
- Tan, C., X. Chen, et al. (2005). Factors governing mud infiltration and impact on wellbore stability in fractured rock mass. In *Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Teimoori Sangani, A. (2005). *Calculation of the Effective Permeability and Simulation of Fluid Flow in Naturally Fractured Reservoirs*. University of New South Wales.

- Warren, J., P. J. Root, et al. (1963). The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal* 3(03), 245–255.
- Witten, I. H., E. Frank, M. A. Hall, and C. J. Pal (2016). *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann.
- WurohTimbo, M. (2012). *An Improved Methodology on Wellbore Stability prediction using Geomechanical Analysis*. Ph.D. disseration , Universiti Teknologi Petronas.
- Younessi, A. and V. Rasouli (2010). A fracture sliding potential index for wellbore stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47(6), 927–939.
- Zajac, B. J. and J. M. Stock (1997). Using borehole breakouts to constrain the complete stress tensor: Results from the sijan deep drilling project and offshore santa maria basin, california. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102(B5), 10083–10100.
- Zhang, J. (2005). *The impact of shale properties on wellbore stability*. Ph.D. disseration , The University of Texas at Austin.
- Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews* 108(1-2), 50–63.
- Zhang, X., N. Last, W. Powrie, and R. Harkness (1999). Numerical modelling of wellbore behaviour in fractured rock masses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Zhou, C. B., R. S. Sharma, Y. F. Chen, and G. Rong (2008). Flow–stress coupled permeability tensor for fractured rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32(11), 1289–1309.
- Zoback, M. (2007). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.
- Zoback, M. D., H. Tsukahara, and S. Hickman (1980). Stress measurements at depth in the vicinity of the san andreas fault: implications for the magnitude of shear stress at depth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 85(B11), 6157–6173.

Abstract

Fractured reservoirs are not only most common oil reservoirs, but also one of the most complexes in modeling and analysis. Due to the nature of the fractured reservoirs and the effect of tectonic and Diagenesis processes on these reservoirs, there are many fractures and heterogeneities in these types of reservoirs which make modeling time-consuming and effortful. In reservoirs that fractures are not widespread, it can usually be done by simplifying the effect of fractures. But wiping out widespread fractures in the reservoir greatly exacerbates the results.

In this research, permeability and stability of wellbore walls in one of the wells of Parsi field has been studied. Due to tectonic conditions, fracture density is extra ordinary high. To this, petrophysical logs were used to calculate the rock mechanical parameters of reservoir. Then, safe mud weight window was obtained. Moreover, Dip and dip direction of fractures on wellbore walls were studied with result of Borehole image logs (FMI) and classified with DIPS Software. The Easy Fit software was used for statistical analysis of fractures as well. A Discrete fracture network (DFN) was constructed. In the next step, by constructing the reference model (REV), permeability was calculated and compared with the actual measured values. These comparisons showed fair conformity of model with reality. Eventually, in order to investigate the necessity of Discrete fracture network modeling in fractured reservoirs, parametric study and sensitivity analysis were applied to investigate the effect of different factors affecting permeability and wellbore wall stability. The results show that ignoring fractures and simplifying them in the modeling of fractured reservoirs can lead to inaccurate conclusions in fractured reservoirs.

Keywords: *Naturally Fractured Reservoirs, Discrete Fracture Network, Permeability, Wellbore Stability, Mechanical Erath Model, REV*



Department of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Master of Science Thesis

Petroleum Engineering

Title

**Wellbore Stability Analysis and Determination of Optimized Drilling
Orientation in Highly Fractured Reservoirs; A Case Study One Oil Well in
South West of Iran**

By

Mohammad Reza Haj Saeedi Sadegh

Supervisor

Dr. Ahmad Ramezanzadeh
Dr. Behzad Tokhmechi

Advisor

Dr. Mehdi Norozi
Mohammad Reza Parhizgar

July 2018