

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف، نفت و ژئوفیزیک

ارزیابی، مدل سازی و تخمین مقاومت نهایی لوله های جداری چاه های نفتی با استفاده

از روش اجزاء محدود، مطالعه موردی: یکی از چاه های میدان نفتی مارون

دانشجو: محمدرضا همتیان خراسانی

اساتید راهنما :

دکتر بهزاد تخم چی

دکتر وامق رسولی

استاد مشاور :

مهندس رئوف غلامی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استغانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد رضا همتیان خراسانی رشته مهندسی نفت گرایش حفاری و بهره برداری تحت عنوان: ارزیابی، مدل سازی و پیش بینی مقاومت نهایی لوله های جداري چاه های نفتی با استفاده از روش اجزای محدود مطالعه موردی مناطق نفت خیز جنوب
که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : <u>بسیار خوب</u> امتیاز ۱۸)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

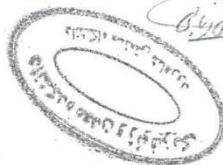
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد اعضا	۱- دکتر میرزا تهمین چی	دانشیار	
	۲- دکتر وافی رسولی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	مهندس رنوف غلامی	مربی	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهرداد سلیمانی	استادیار	
۴- استاد منتحن	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۵- استاد منتحن	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	

تأیید رئیس دانشکده :



تقدیم بہ

روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونہ در عرصہ زندگی، ایستادگی را

تجربہ نمایم

و بہ مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق

تشکر و قدردانی

اینک که به شکر خداوند، با انجام این تحقیق مقطعی از دوران تحصیل را به پایان رسانیده‌ام، لازم می‌دانم تا از تمامی کسانی که در انجام این پروژه به من کمک نمودند یاد کرده و مراتب قدرشناسی خود را ابراز کنم.

- از اساتید راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر بهزاد تخم چی و دکتر وامق رسولی صمیمانه سپاسگزارم چرا که این عزیزان با نظرات و اطلاعات مفید همواره مرا در مسیر صحیح این هدف راهنمایی نمودند.
- بی شک انجام این تحقیق بدون راهنمایی‌های دوست و استاد مشاور عزیزم جناب آقای مهندس رئوف غلامی غیر ممکن بود.
- از جناب آقای مهندس بیژن جهانگیری و شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب که اطلاعات مورد نیاز این تحقیق را در اختیار بنده قرار دادند بسیار سپاسگزارم.
- از سایر دوستان و عزیزان به خصوص جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده که راهنمایی بزرگی در راستای انتخاب و انجام این تحقیق نمودند سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب محمد رضا همتیان خراسانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی حفاری و بهره برداری نفت دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان ارزیابی، مدل سازی و تخمین مقاومت نهایی لوله های جداری چاه های نفتی با استفاده از روش اجزای محدود، مطالعه موردی: یکی از چاه های میدان نفتی مارون تحت راهنمایی دکتر بهزاد تخم چی و دکتر وامق رسولی متعهد می شوم.

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

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری به دلیل نقش حیاتی آن‌ها در فازهای حفاری و تولید از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهایی که در ایجاد شرایط بحرانی و متلاشی شدن لوله‌های جداری نقش دارند به دو دسته محیطی و ذاتی تقسیم می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان به نسبت قطر به ضخامت، لنگی، نوع سازند، دمای محیط اطراف چاه، فشار منفذی و ... اشاره نمود. به منظور تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری از روابط تجربی و روش‌های عددی می‌توان استفاده نمود. در این میان، روش‌های تجربی به دلیل فرضیات بسیار زیاد و عدم در نظر گیری برخی شرایط مؤثر در آسیب لوله- های جداری، تخمین مناسبی از مقاومت نهایی لوله‌های جداری ارائه نمی‌کنند. به همین دلیل روش- های عددی روشی مؤثر در تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری به حساب می‌آیند. در مطالعه حاضر به منظور مدل‌سازی مقاومت نهایی و پیش بینی گسیختگی لوله جداری، ابتدا به بررسی پارامترهای مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری پرداخته، سپس خصوصیات مکانیکی سازند توسط نگارهای چاه تعیین گردید و در نهایت به منظور مدل‌سازی عددی از نرم افزار ABAQUS استفاده شد و تحلیل حساسیت نسبت به برخی پارامترهای مؤثر بر مقاومت لوله‌های جداری صورت گرفت. نتایج این مدل‌سازی سه بعدی نشان داد که ناهمسانگردی تنش و نسبت قطر به ضخامت مؤثرترین پارامترهای درگیر در گسیختگی لوله جداری می‌باشند.

کلمات کلیدی: لوله جداری، مقاومت نهایی، پارامترهای ژئومکانیکی، گسیختگی لوله جداری.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

Hemmatian, M.R. , Tokhmechi, B., Rasouli, V., Gholami, R., (2014), **The impact of poor cementing casing damage : A numerical simulation study**, Journal of Mining and Environment.

همتیان م، تخم چی ب، رسولی و، غلامی ر، (۱۳۹۲)، " تعیین پارامترهای الاستیک، مقاومتی و تنش های برجا با استفاده از نمودارهای چاه به منظور بررسی پایداری چاه"، کنفرانس بین المللی مهندسی معدن، فرآوری مواد معدنی، متالوژی و محیط زیست، دانشگاه زنجان.

همتیان م، تخم چی ب، رسولی و، غلامی ر، (۱۳۹۲)، " بررسی اثر سازند بر روی مقاومت نهایی لوله های جداری چاه های نفتی"، کنفرانس بین المللی مهندسی معدن، فرآوری مواد معدنی، متالوژی و محیط زیست، دانشگاه زنجان.

فهرست

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- سابقه انجام تحقیق
۴	۱-۳- هدف و ضرورت مطالعه حاضر
۵	۱-۴- روش انجام تحقیق
۵	۱-۵- سازمان دهی پایان نامه
۷	فصل دوم: گسیختگی لوله جداری
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- انواع لوله های جداری
۸	۲-۲-۱- لوله جداری راهنما
۸	۲-۲-۲- لوله جداری سطحی
۹	۲-۲-۳- لوله جداری میانی
۹	۲-۲-۴- لوله جداری تولید
۹	۲-۲-۵- لوله آستری
۱۰	۲-۳- فشار وارد بر لوله جداری
۱۱	۲-۳-۱- فشار مچالگی

۱۱	۲-۳-۲- فشار ترکشی
۱۱	۲-۳-۳- فشار کششی
۱۲	۲-۴- گسیختگی (مچالگی) لوله جداری
۱۴	۲-۵- اثر پارامترهای مختلف مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری
۱۵	۲-۵-۱- اثر عوامل محیطی بر روی مقاومت نهایی لوله‌های جداری
۱۵	۲-۵-۱-۱- سیمانکاری
۱۷	۲-۵-۱-۲- دما
۱۸	۲-۵-۱-۳- سازند
۲۰	۲-۵-۱-۴- تنش باقیمانده
۲۱	۲-۵-۱-۵- فشار منفذی
۲۲	۲-۵-۱-۶- هیدرات‌های گازی
۲۳	۲-۵-۲- اثر عوامل ذاتی بر روی مقاومت نهایی لوله‌های جداری
۲۴	۲-۵-۲-۱- برجستگی لوله جداری
۲۵	۲-۵-۲-۲- لنگی
۲۷	۲-۵-۲-۳- انتخاب مواد
۲۹	۲-۶- پیش‌گیری از بروز گسیختگی لوله جداری
۲۹	۲-۶-۱- لوله جداری جدار ضخیم
۳۰	۲-۶-۲- لوله جداری با مقاومت بالا
۳۱	۲-۶-۳- فشار داخلی
۳۳	۲-۶-۴- سیمان کاری
۳۳	۲-۷- روش‌های تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری
۳۴	۲-۷-۱- روابط تجربی
۳۴	۲-۷-۱-۱- فرمول API
۳۹	۲-۷-۱-۲- رابطه کلایندینست

۴۰	۳-۱-۷-۲- فرمول‌های گسیختگی تامانو و همکاران
۴۱	۴-۱-۷-۲- فرمول توکیماسا و تاناکا
۴۲	۵-۱-۷-۲- فرمول عیسی و کرافورد
۴۳	۶-۱-۷-۲- فرمول عباسیان و پارفیت
۴۴	۲-۷-۲- روش‌های عددی
۵۴	۸-۲- نتیجه‌گیری
۵۵	فصل سوم: میدان مورد مطالعه
۵۶	۱-۳- مقدمه
۵۶	۲-۳- میدان نفتی مارون
۵۷	۳-۳- سازندهای منطقه مورد مطالعه
۵۷	۱-۳-۳- سازند آغاچاری
۵۸	۲-۳-۳- سازند میشان
۵۸	۳-۳-۳- سازند گچساران
۵۹	۴-۳-۳- سازند مخزنی آسماری
۶۰	۵-۳-۳- سازند پابده
۶۱	۶-۳-۳- سازند گورپی
۶۱	۷-۳-۳- سازند ایلام
۶۱	۸-۳-۳- سازند سروک
۶۱	۹-۳-۳- سازند کژدمی
۶۲	۴-۳- گسیختگی لوله‌های جداری در میدان مارون
۶۵	۵-۳- معرفی داده‌های مورد استفاده
۶۷	فصل چهارم: مدل سازی ژئومکانیکی
۶۸	۱-۴- مقدمه

۶۸	۴-۲- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مطالعه
۶۹	۴-۲-۱- تخمین پارامترهای الاستیک سنگ
۷۲	۴-۲-۲- تبدیل پارامترهای الاستیک دینامیکی به استاتیکی
۷۵	۴-۲-۳- تعیین مقاومت فشاری تک محوری
۷۸	۴-۲-۴- تعیین فشار منفذی
۸۱	۴-۲-۵- تعیین تنش های برجا
۸۱	۴-۲-۵-۱- تعیین تنش عمودی
۸۲	۴-۲-۵-۲- تعیین تنش های افقی
۸۶	۴-۳- نتیجه گیری
۸۷	فصل پنجم: مدل سازی عددی
۸۸	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- روش های عددی مدل سازی
۸۹	۵-۲-۱- روش های المان مرزی
۸۹	۵-۲-۱-۱- روش غیرمستقیم (تنش ساختگی)
۹۰	۵-۲-۱-۲- روش مستقیم
۹۰	۵-۲-۲- روش های حوزهای
۹۰	۵-۲-۲-۱- روش اجزاء محدود
۹۱	۵-۲-۲-۲- روش تفاضل محدود
۹۱	۵-۲-۲-۳- روش المان مجزا
۹۲	۵-۲-۲-۴- روش ترکیبی
۹۲	۵-۳- تحلیل با استفاده از نرم افزار
۹۲	۵-۳-۱- نرم افزار ABAQUS
۹۳	۵-۳-۱-۱- محیط نرم افزار ABAQUS

۹۶	۵-۴-مدل سازی
۹۷	۵-۴-۱- شرایط و پارامترهای مدل سازی
۹۹	۵-۴-۱-۱- تنشهای برجا
۱۰۰	۵-۴-۱-۲- معیارهای شکست
۱۰۱	۵-۴-۱-۲-۱- معیار موهر کلمب
۱۰۲	۵-۴-۱-۲-۲- معیار شکست فون میسس
۱۰۳	۵-۴-۱-۲-۳- معیار شکست دراگر-پراگر
۱۰۴	۵-۴-۲- گامهای مدل سازی
۱۰۴	۵-۴-۳- نتایج مدل سازی
۱۱۰	۵-۵- حساسیت سنجی لوله جداری نسبت به پارامترهای مختلف
۱۱۰	۵-۵-۱- نسبت قطر به ضخامت
۱۱۱	۵-۵-۲- لنگی
۱۱۲	۵-۵-۳- فشار منفذی
۱۱۳	۵-۵-۴- تغییرات دما
۱۱۴	۵-۵-۵- ناهمسانگردی تنش
۱۱۵	۵-۶- نتیجه گیری
۱۱۷	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۸	۶-۱- مقدمه
۱۱۸	۶-۲- نتیجه گیری
۱۱۹	۶-۳- پیشنهادات
۱۲۰	منابع فارسی
۱۲۰	منابع لاتین

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: انواع لوله های جداری استفاده شده در چاه ۱۰
- شکل ۲-۲: نمونه‌ای از گسیختگی لوله جداری در یکی از چاه‌های مکزیک ۱۳
- شکل ۳-۲: کمانش و مچالگی لوله جداری ۱۴
- شکل ۴-۲: عوامل مؤثر بر مقاومت لوله های جداری ۱۵
- شکل ۵-۲: حفرات و کانال های سیمانی اطراف لوله جداری ۱۷
- شکل ۶-۲: تغییرات جانبی و طولی سازند به دلیل فشارهای اعمالی و اثر آن بر روی لوله جداری ۱۸
- شکل ۷-۲: سازند با رفتار پلاستیسته و نسبت پواسون بالا و تنش بالای اعمال شده بر لوله جداری ۱۹
- شکل ۸-۲: اختلاف زیاد میان تنش های افقی، ایجاد صفحه برشی در مرز بین دو سازند و بریدگی لوله جداری ۲۰
- شکل ۹-۲: نشت گاز و مچاله شوندگی لوله‌های جداری ناشی از تولید گاز از هیدرات‌های گازی ۲۳
- شکل ۱۰-۲: برجستگی یک لوله جداری ۲۴
- شکل ۱۱-۲: سطح مقطع لوله همراه با برجستگی ۲۵
- شکل ۱۲-۲: سطح مقطع لوله همراه با لنگی ۲۶
- شکل ۱۳-۲: لنگی لوله جداری ۲۶
- شکل ۱۴-۲: کاهش فشار گسیختگی لوله جداری به علت لنگی ۲۷
- شکل ۱۵-۲: نمونه ای از خوردگی داخلی لوله جداری ۲۹

- شکل ۲-۱۶: مقایسه مقاومت گسیختگی به ازای نسبت‌های مختلف D/t ۳۰
- شکل ۲-۱۷: لوله جداری تحت تنش مماسی و شعاعی مؤثر ۳۱
- شکل ۲-۱۸: تأثیر فشار داخلی بر روی مقاومت در برابر گسیختگی لوله نازک ۳۲
- شکل ۲-۱۹: تأثیر فشار داخلی بر روی مقاومت در برابر گسیختگی لوله ضخیم ۳۲
- شکل ۲-۲۰: مقایسه بین روش اجزای محدود و روش آزمایشگاهی (۹۷ نمونه) ۴۵
- شکل ۲-۲۱: مقایسه بین پیشینه تنش فون میسس در صورت وجود حفره برای سیمان سخت و نرم ۴۶
- شکل ۲-۲۲: اثر کاهش فشار منفذی بر پیشینه تنش فون میسس (سیمان سخت) ۴۶
- شکل ۲-۲۳: مقایسه بین سیمان سخت و نرم با کاهش فشار منفذی برای مدل با سیمان کاری نامناسب ۴۶
- شکل ۲-۲۴: نمایی از انتقال حرارت به سازند (ناشی از اثر ژئوترمال و افزایش دمای گل) پشت لوله جداری در طول عملیات حفاری ۴۸
- شکل ۲-۲۵: نمایی از افزایش فشار منفذی پشت لوله جداری در طول عملیات حفاری ناشی از رسوبات با هیدرات گازی ۴۸
- شکل ۲-۲۶: نمایی از تنشهای غیر یکنواخت وارد شده بر لوله جداری ناشی از حفرات و بارهای محوری و دگر شکلی پوش سنگ به دلیل حفرات ماسه ای ایجاد شده ۵۰
- شکل ۲-۲۷: نمایی از مدل اجزای محدود در مطالعه مچالگی جداری ۵۰
- شکل ۲-۲۸: وسیله آزمایش مچالگی جداری همراه با ایجاد برجستگی القایی در آن ۵۱
- شکل ۲-۲۹: مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ۵۱
- شکل ۲-۳۰: اجزای سیستم سازند، سیمان و لوله جداری ۵۲
- شکل ۲-۳۱: اثرات کانال های سیمانی وزاویه چاه بر تنش فون میسس لوله جداری ۵۲
- شکل ۲-۳۲: اثرات لنگی جداری و زاویه چاه بر تنش فون میسس لوله جداری ۵۳
- شکل ۲-۳۳: اثر لنگی جداری و کانال های سیمانی بر تنش فون میسس لوله جداری (چاه قائم) ۵۳

- شکل ۳-۱: موقیت جغرافیایی میدان نفتی مارون ۵۷

- شکل ۳-۲: گسیختگی لوله جداری حاصل شده در طول هر سال ۶۲
- شکل ۳-۳: گسیختگی‌های لوله جداری در میدان مارون ۶۳
- شکل ۳-۴: تعداد گسیختگی در فواصل زمانی مختلف میدان مارون ۶۳
- شکل ۴-۱: نگار گاما، صوتی و چگالی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ۶۹
- شکل ۴-۲: نمودار مربوط به مدول الاستیک دینامیکی به دست آمده از چاه مورد مطالعه ۷۱
- شکل ۴-۳: نمودار مدول‌های یانگ استاتیکی ۷۴
- شکل ۴-۴: مقاومت فشاری تک محوری به دست آمده از روابط مختلف ۷۸
- شکل ۴-۵: نمودار مربوط به فشار منفذی به دست آمده از چاه مورد مطالعه ۸۰
- شکل ۴-۶: نمودار کالیبره شده تنشهای افقی توسط روابط مختلف ۸۴
- شکل ۴-۷: نمودار مربوط به تنش‌های برجا به دست آمده از چاه مورد مطالعه ۸۵
- شکل ۵-۱: انواع روش‌های عددی مدل‌سازی ۸۹
- شکل ۵-۲: محیط نرم افزار آباکوس ۹۵
- شکل ۵-۳: مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس برای شبیه‌سازی مقاومت نهایی لوله جداری ۹۷
- شکل ۵-۴: تغییرات و تبدیل تنش‌های اصلی اولیه به تنش‌های اطراف دیواره چاه ۱۰۰
- شکل ۵-۵: گسترش اثر تنش فون میسس بر روی سیمان‌بندی و لوله جداری ۱۰۵
- شکل ۵-۶: گسیختگی برشی در اطراف دیواره چاه به دلیل تنش تماسی بیش از اندازه بر دیواره چاه ۱۰۶
- شکل ۵-۷: جابه‌جایی ایجاد شده در سیمان اطراف لوله جداری به دلیل تنش مماسی گسترده ۱۰۷
- شکل ۵-۸: جابه‌جایی ایجاد شده در لوله جداری به دلیل تنش مماسی گسترده ۱۰۸
- شکل ۵-۹: توزیع تنش برشی در لایه پوش سنگ و لوله جداری ۱۰۹
- شکل ۵-۱۰: تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله جداری بر مقاومت آن ۱۱۱
- شکل ۵-۱۱: تأثیر لنگی لوله جداری بر مقاومت آن ۱۱۲

- ۱۱۳ شکل ۵-۱۲: تأثیر فشار منفذی سازند بر مقاومت لوله جداری
- ۱۱۴ شکل ۵-۱۳: تأثیر درجه حرارت محیط بر مقاومت لوله جداری
- ۱۱۵ شکل ۵-۱۴: تأثیر ناهمسانگردی تنش بر مقاومت نهایی لوله جداری

فهرست جدول‌ها

- جدول ۲-۱: طبقه بندی API لوله‌های جداری و مقاومت تسلیم و کششی آن‌ها ۱۲
- جدول ۲-۲: آلیاژهای فولاد ضد زنگ رایج درون چاهی ۲۸
- جدول ۲-۳: محدوده فرمول گسیختگی تسلیم ۳۵
- جدول ۲-۴: فاکتورهای فرمول و محدوده D/t برای گسیختگی پلاستیک ۳۶
- جدول ۲-۵: فاکتورهای فرمول و محدوده D/t برای گسیختگی انتقال ۳۷
- جدول ۲-۶: محدوده D/t برای گسیختگی الاستیک ۳۸
- جدول ۲-۷: بیشینه تنش فون میسس وارد شده بر لوله جداری بعد از جدایش هیدرات‌ها ۴۹
- جدول ۳-۱: سازندهای چاه مورد مطالعه ۵۸
- جدول ۳-۲: خواص مکانیک سنگی لایه‌های تشکیل دهنده سازند آسماری ۶۰
- جدول ۳-۳: خلاصه‌ای از گسیختگی‌های لوله جداری ۶۴
- جدول ۵-۱: محیط‌های نرم افزار آباکوس ۹۴
- جدول ۵-۲: برخی متغیرهای خروجی نرم افزار آباکوس ۹۵
- جدول ۵-۳: خصوصیات مکانیکی استفاده شده برای سیمان در مدل سازی عددی ۹۹

فصل اول

مقدمه

ناپایداری دیواره چاه می‌تواند سبب ریزش و از دست رفتن چاه شده و موجب مخاطره برای پرسنل حفاری شود. از علائم ناپایداری دیواره چاه می‌توان به پوسته پوسته شدن دیواره، کاهش سرعت حفاری، چسبیدن لوله‌ها، گشادشدگی غیر طبیعی چاه، مچالگی^۱ لوله جداری، هرزروی گل حفاری و حتی فوران چاه اشاره کرد. مچالگی لوله جداری از جمله مشکلات حاد چاه‌ها در میدین هیدروکربنی است. این پدیده موجب خارج شدن چاه از چرخه تولید شده و هزینه‌های زیادی را به شرکت‌های نفتی تحمیل می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده پارامترهای بسیاری در ایجاد شرایط بحرانی و متلاشی شدن لوله جداری دخیل هستند که برخی از آنها به ماهیت خود لوله و برخی دیگر به عوامل محیطی و مخزن بستگی دارند. از جمله عواملی که به ماهیت خود لوله جداری وابسته‌اند و جزء عوامل ذاتی می‌باشند می‌توان به قطر لوله، ضخامت، لنگی^۲، برجستگی^۳، خصوصیات الاستیک و ناهمسانگردی لوله جداری اشاره کرد (Khalaf and Seibi, 2011). از عوامل مختلف محیطی نیز می‌توان به نوع سازند، شرایط حرارتی محیط اطراف چاه، فشار منفذی، وجود شکستگی در دیواره چاه، تنش‌های باقی مانده و... اشاره نمود. نوع سازند از آن جهت حایز اهمیت است که به عنوان مثال در زون‌های نمکی و شیلی به دلیل خصوصیت ویسکوالاستیک و پلاستیک این سنگ‌ها، شرایط فشار خارجی غیریکنواخت بر لوله جداری به شدت افزایش می‌یابد (Zhao et al, 2011). علاوه بر آن در زون‌های ماسه سنگی ضعیف به دلیل شرایط سست این سنگ‌ها و ایجاد شرایط برشی در دیواره، احتمال ایجاد کمانش^۴ در لوله جداری بسیار زیاد است. علاوه بر تمامی موارد فوق، اندرکنش میان لوله جداری، زون سیمان شدگی دور چاه و دیواره چاه پارامتر بسیار مهمی دیگری است که نادیده

^۱Collapse

^۲Eccentricity

^۳Ovality

^۴Buckling

گرفتن آن موجب تخمین های نادرست از مقاومت حداقل و نهایی لوله جداری خواهد شد (Vasilikis and Karamanos, 2009).

با توجه به موارد فوق تعیین مقاومت نهایی لوله های جداری به دلیل نقش حیاتی که این لوله ها در فاز حفاری و تولید در چاه های نفتی بازی می کنند از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۲ - سابقه انجام تحقیق

مقاومت نهایی لوله های جداری در مقیاس ها و شرایط مختلف موضوع مطالعات بسیاری بوده است و روابط تجربی متفاوتی برای تخمین مچالگی لوله های جداری تحت شرایط الاستیک (Clinedinst, ۱۹۸۵)، پلاستیک (Holmquist and Nadai, 1939) و الاستو پلاستیک (Issa, 1993; Tokimasa, ۱۹۸۶) ارائه شده است. نتایج مطالعات انجام شده به روشنی نشان داده است که هیچ کدام از این معادلات تجربی به دلیل فرضیات بسیار زیاد نمی توانند تخمین مناسبی از مقاومت نهایی لوله جداری ارائه کنند (Huang et al, 2000). تمامی مشکلات بیان شده و پیچیدگی های موجود بر سر راه تخمین مقاومت لوله های جداری به دلیل وجود پارامترهای تأثیرگذار فراوان باعث شده تا روش های عددی به عنوان روشی مؤثر برای مدل سازی در این شرایط استفاده گردند (Wang and Dusseault, 2003; Huang et al, 2000; Zhao et al, 2011; Zengxin and Gao, 2009). به عنوان مثال هانگ و همکاران (Huang et al, 2000) به بررسی تغییرات لنگی و نسبت قطر به ضخامت لوله پرداختند و تأثیر آن ها را بر روی مقاومت نهایی لوله جداری ارائه کردند. در مطالعه ای دیگر واسیلیکیس و کارامانوس (Vasilikis and Karamanos, 2009) به بررسی روابط تجربی ارائه شده پرداختند و در شرایط کرنش صفحه ای، تأثیر شکاف میان سیمان شدگی و جداره لوله و تأثیر مناطق دارای برجستگی در لوله جداری را مشخص ساختند. اما آن ها در مطالعه خود اشاره ای به شرایط محیطی مؤثر بر مقاومت نهایی اشاره ای نکردند. ژائو و همکاران (Zhao et al, 2011) نیز در مطالعه ای به بررسی شرایط محیطی اطراف چاه و لوله جداری و تأثیر آن بر گسیختگی لوله به صورت دوبعدی

پرداختند. پنگ و همکاران (Peng et al, 2007) سعی نمودند تا شرایط و پارامترهای درگیر محیطی و تا حدی ذاتی مؤثر بر گسیختگی لوله را مدل‌سازی نمایند. اگرچه مطالعه آن‌ها مطالعه خوبی در راستای مدل‌سازی عددی با نرم افزار FLAC به حساب می‌آید اما تأثیر بسیاری از پارامترهای درگیر در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. بنابراین، نیاز به انجام مطالعات دقیق‌تر و گسترده‌تر بر روی شرایط و پارامترهای مؤثر احساس می‌شود.

۳-۱- هدف و ضرورت مطالعه حاضر

با توجه به پیچیدگی‌های موجود بر سر راه تخمین مقاومت نهایی لوله‌های جداری و عوامل متعدد مؤثر در مچالگی لوله‌های جداری، هدف از مطالعه حاضر شناخت پارامترهای مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری و مدل‌سازی گسیختگی لوله‌های جداری با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری خواهد بود. با توجه به تعداد مطالعات محدود سه بعدی در ارزیابی تعیین مقاومت نهایی این لوله‌ها و پارامترهای متنوعی که در مطالعه حاضر بر روی پارامترهای درگیر در گسیختگی انجام خواهد شد، امید است این مطالعه کمک شایانی در راه ارزیابی گسیختگی لوله‌های جداری باشد. با توجه به این نکته که پدیده گسیختگی لوله‌های جداری از جمله مشکلات حاد برخی چاه‌های میادین هیدروکربوری کشور مانند میدان مارون و کوپال در حوزه مناطق نفت خیز جنوب است نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌های توسعه میادین مد نظر قرار گرفته و پیشنهاداتی را جهت برنامه‌ریزی نحوه مواجهه با این مشکلات ارائه نماید. بر اساس آنچه بیان گردید سؤالات اصلی این تحقیق عبارتند از:

الف- مهمترین پارامترهای ذاتی و محیطی مؤثر بر مچالگی لوله‌های جداری کدامند؟

ب- آیا مدل سازی الاستوپلاستیک عددی نتایج مناسب‌تر و دقیق‌تری نسبت به مدل سازی الاستیک یا پلاستیک ارائه می‌کند؟

ج- دقت روش‌های تحلیلی ارائه شده تا چه میزان است؟

۴-۱- روش انجام تحقیق

مطالعه حاضر در ابتدا به بررسی پارامترهای محیطی و ذاتی مؤثر بر مچالگی لوله‌های جداری پرداخته و سعی خواهد شد تا مهمترین این پارامترها را شناسایی کرده و با دریافت داده‌های یک چاه حفاری و مدل سازی خصوصیات ژئومکانیکی سازند دربرگیرنده آن، تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت نهایی لوله جداری را بررسی نماید. بدین منظور، برای ارزیابی تأثیر شرایط محیطی، مدل سه بعدی از چاه و محیط اطراف آن با استفاده از نرم افزارهای المان محدود ABAQUS ساخته خواهد شد و با تغییر پارامترهایی چون حرارت، شکستگی، تغییرات تنش افقی و عمودی، تغییر نسبت قطر به ضخامت، لنگی، افزایش برجستگی و ... تأثیر آن‌ها بر مقاومت نهایی لوله تعیین می‌گردد.

۵-۱- سازمان دهی پایان نامه

مطالب این پایان‌نامه در شش فصل ارائه خواهد شد. در فصل اول، ضمن ارائه مطالب مقدماتی، ضرورت هدف مطالعه و روش تحقیق تشریح می‌شوند. در فصل دوم، توضیحاتی در مورد لوله‌های جداری، پدیده گسیختگی لوله‌های جداری، پارامترهای مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری و روش‌های تعیین مقاومت نهایی آن آورده شده است. در فصل سوم، توضیحاتی در رابطه با میدان مورد مطالعه، موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی سازندها آورده شده است. در فصل چهارم، با دریافت داده‌های یک چاه حفاری شده به مدل سازی خصوصیات ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه پرداخته شده است. در فصل پنجم، با مشخص شدن پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز مطالعه، مدل سازی چاه با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده است. در نهایت در فصل ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

گسیختگی لوله جداری

۲-۱ مقدمه

وجود لایه‌های پرفشار، سازندهای سست و شکننده و شیل با قابلیت متورم شوندگی، لزوم راندن لوله‌های جداری را برای حفاری و رسیدن به عمق نهایی چاه، ضروری می‌سازد. در این فصل ضمن آشنایی با انواع لوله‌های جداری و نیروهای وارده بر آن، پدیده گسیختگی لوله جداری معرفی شده و روش‌های تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری بیان خواهد شد.

۲-۲ انواع لوله‌های جداری

۲-۲-۱ لوله جداری راهنما^۱

اولین لوله جداری است که تا عمق ۱۰۰ تا ۲۰۰ فوتی رانده می‌شود و هدف از راندن آن، ایجاد مجرای برای حرکت گل برگشتی از چاه و هدایت آن روی الک لرزان است. این لوله از شسته شدن و ریزش سازندهای سطحی سست جلوگیری می‌کند. در اکثر مناطق ایران به دلیل اینکه ضخامت لایه‌های سست و هوازده در حد چند متر است، لوله راهنما توسط اداره مهندسی و ساختمان قبل از انتقال دکل به محل چاه، نصب و دور آن سیمان می‌شود. قطر معمول این نوع لوله جداری $18\frac{5}{8}$ اینچ (۴۷۳ میلی‌متر) یا ۲۰ اینچ (۵۰۸ میلی‌متر) است.

۲-۲-۲ لوله جداری سطحی^۲

این لوله جداری جهت مقابله با سازندهای ماسه‌ای و کم استحکام، جلوگیری از ریزش سازند به درون چاه، فراهم کردن محلی برای سوارکردن شیرهای فوران گیر، جلوگیری از هرزروی گل در زون‌های

^۱-Drive pipe or conductor pipe

^۲-Surface casing

کم عمق با نفوذپذیری زیاد، پوشاندن زون‌های کم عمق با فشار بالا و جلوگیری از فوران چاه رانده می‌شود. قطر این نوع لوله جداری چیزی در حدود $13\frac{3}{8}$ اینچ (۲۴۰ میلی متر) است.

۳-۲-۲- لوله جداری میانی^۱

راندن این لوله جداری بستگی به عمق چاه و شرایط زمین شناسی منطقه دارد و هدف از راندن آن محافظت و پوشاندن طبقات سست و مشکل ساز است. در واقع این لوله جداری سعی می‌کند تا از ریزش دیواره چاه و گیر کردن لوله‌ها به خصوص در لایه‌های شیلی جلوگیری کند، فوران چاه را با پوشاندن طبقات بالاتر کاهش دهد و امکان افزایش وزن گل را ممکن سازد. رایج ترین قطر این نوع لوله جداری $9\frac{5}{8}$ یا $10\frac{3}{4}$ اینچ است.

۴-۲-۲- لوله جداری تولید^۲

آخرین و طولانی‌ترین لوله جداری است که به درون چاه رانده می‌شود. تمامی لوله‌های جداری قبلی را پوشانده، مسیر لازم جهت عبور و تولید نفت و یا گاز را فراهم می‌سازد. و با توجه به نوع تکمیل چاه ممکن است تا بالا، میان یا پایین‌ترین نقطه زون هیدروکربوری رانده شود. اگر تا ابتدای زون مولد ادامه یابد نوع تکمیل از نوع تکمیل چاه حفره باز می‌باشد. اندازه‌های رایج این لوله جداری $4\frac{1}{4}$ ، ۵ و ۷ اینچ می‌باشند.

۵-۲-۲- لوله آستری^۴

^۱-Intermediate casing

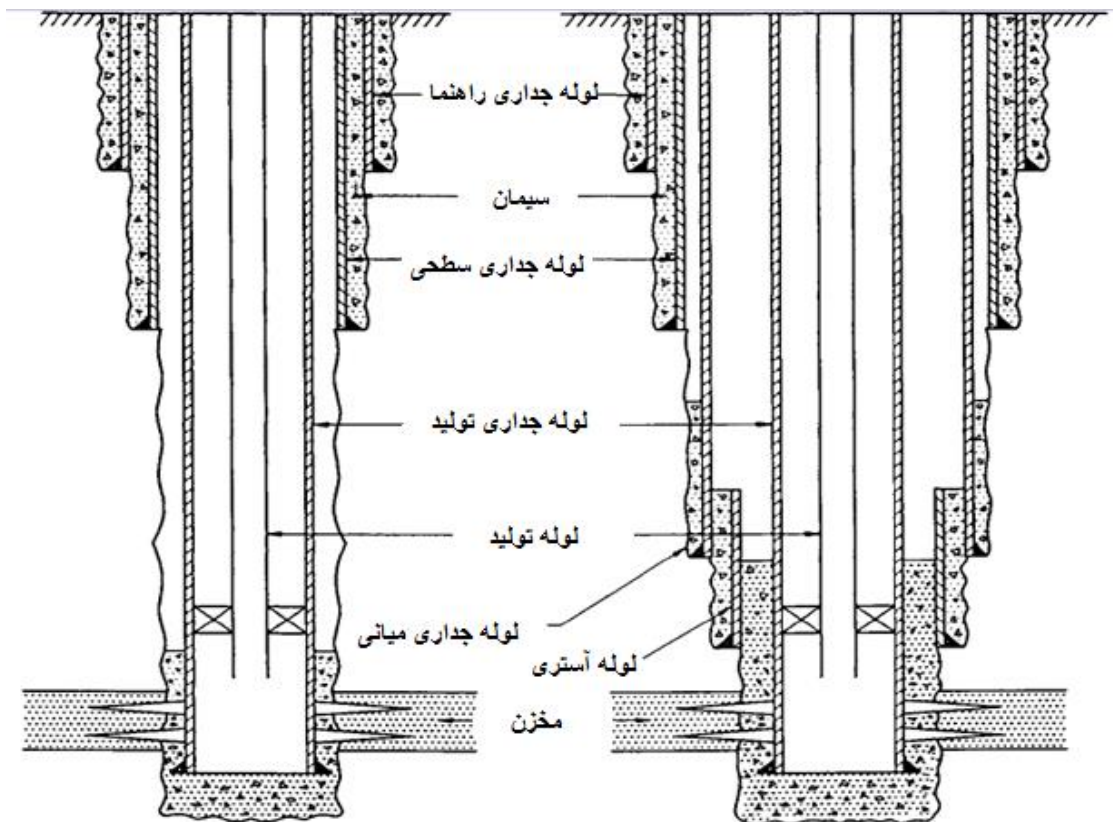
^۲-Production casing

^۳-Open hole

^۴-liner

وظیفه لوله آستری مشابه لوله جداری تولید است. با این تفاوت که آستری تا سطح ادامه پیدا نمی‌کند بلکه درون آخرین لوله جداری توسط آویزه آستری آویزان می‌شود.

دلایل عمده استفاده از آستری، کاهش هزینه زمان راندن و سیمان‌کاری و امکان استفاده از لوله مغزی با اندازه‌های مختلف به دلیل کوتاه‌تر شدن قسمت تنگ شده چاه می‌باشد. شکل (۱-۲) انواع لوله‌های جداری استفاده شده در چاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: انواع لوله‌های جداری استفاده شده در چاه (Rahman and Chilingarian, 1995).

۲-۳- فشار وارد بر لوله جداری

۱-۳-۲- فشار مچالگی

سطح خارجی هر رشته لوله جداری که درون چاه رانده می شود تحت تأثیر فشار هیدروستاتیک سیال موجود در چاه (که تقریباً معادل فشار طبقات است) قرار می گیرد. سیال درون لوله جداری نیز باعث اعمال فشار به سطح داخلی لوله می گردد. در صورتی که فشار اعمال شده به سطح خارجی لوله از فشار اعمالی به سطح داخلی آن تجاوز نماید، نیرویی به سطح خارجی لوله وارد می شود که باعث فشردن و مچالگی لوله های جداری خواهد شد. در چنین شرایطی مقاومت فشاری لوله جداری بسیار حایز اهمیت خواهد بود.

۲-۳-۲- فشار ترکشی^۱

اگر فشار وارد به سطح داخلی لوله از فشار وارد به سطح خارجی آن تجاوز نماید، فشار ترکشی به لوله جداری وارد می شود که اگر از استحکام ترکشی لوله بیشتر باشد، باعث انبساط و ترکاندن لوله جداری می گردد. بنابراین، مقاومت ترکشی لوله جداری باید مد نظر قرار گیرد.

۳-۳-۲- فشار کششی^۲

در رشته جداری رانده شده هر شاخه وزن تمام شاخه های واقع در زیر خود را تحمل می کند. بنابراین بیشترین میزان تنش کششی به بالاترین شاخه لوله جداری و رزوه های آن وارد می شود. چنانچه این تنش از حد مجاز تجاوز نماید باعث جدا شدن رزوه های لوله از کوپلینگ می گردد.

مقاومت لوله های جداری در برابر نیروهای فوق به قطر اسمی لوله، درجه فولاد لوله و ضخامت دیواره آن (وزن واحد طول) بستگی دارد. هدف اصلی از طراحی لوله های جداری انتخاب لوله های مناسبی

^۱-Burst loading

^۲-Tensile Loading

است که بتواند در برابر نیروهای عنوان شده مقاوم بوده، در عین حال از لحاظ اقتصادی هم مقرون به صرفه باشد. جدول (۱-۲) لیستی از مقاومت کششی و تسلیم لوله‌های جداری را ارائه نموده است.

جدول ۲-۱: طبقه بندی API لوله‌های جداری و مقاومت تسلیم و کششی آن‌ها (Hughes, 1995).

نوع لوله جداری (طبقه بندی) (API)	حداقل مقاومت تسلیم (PSI)	حداقل مقاومت کششی (PSI)
H-40	۴۰۰۰	۶۰۰۰
J-55	۵۵۰۰	۷۵۰۰
K-55	۵۵۰۰	۹۵۰۰
C-75	۷۵۰۰	۹۵۰۰
L-80	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰
N-80	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰
C-90	۹۰۰۰	۱۰۵۰۰
C-95	۹۵۰۰	۱۰۵۰۰
P-110	۱۱۰۰۰	۱۲۵۰۰

۴-۲- گسیختگی (مچالگی) لوله جداری

لوله جداری به طور گسترده برای محافظت چاه حفاری در برابر فشار سازند در طول عملیات حفاری و بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین تعیین دقیق مقاومت نهایی گسیختگی در طراحی لوله جداری بسیار حایز اهمیت خواهد بود (Mirzaghobanali et al, 2011). سونال و همکاران (Sunal et al, 2008) گسیختگی لوله جداری را به عنوان پدیده کمناش ناشی شده از تنش خارجی تعریف کرده‌اند. گسیختگی می‌تواند قابلیت نیروی مکانیکی در تغییر شکل یک لوله تحت تأثیر فشار خارجی تعریف شود. کلایندینست (Clinedinst, 1985) گسیختگی را به سه دسته گسیختگی در شرایط الاستیک، پلاستیک و تسلیم تقسیم کرده است. گسیختگی الاستیک در تنش‌هایی کمتر از مقاومت

نهایی رخ می‌دهد. گسیختگی پلاستیک در تنش‌هایی بالاتر از مقاومت نهایی و پایین‌تر از نقطه تسلیم رخ می‌دهد و گسیختگی تسلیم هنگامی رخ می‌دهد که تنش‌ها به نقطه تسلیم می‌رسند. انجمن نفت آمریکا (API, 1989) گسیختگی را بر اساس نسبت قطر به ضخامت به چهار گروه گسیختگی الاستیک، گسیختگی پلاستیک، گسیختگی تسلیم و گسیختگی انتقال^۱ تقسیم نموده است. شکل-های (۲-۲) و (۲-۳) نمونه‌هایی از مچالگی لوله جداری را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۲: نمونه‌ای از گسیختگی لوله جداری در یکی از چاه‌های مکزیک (Asadi et al, 2011).

^۱-Transition Collapse

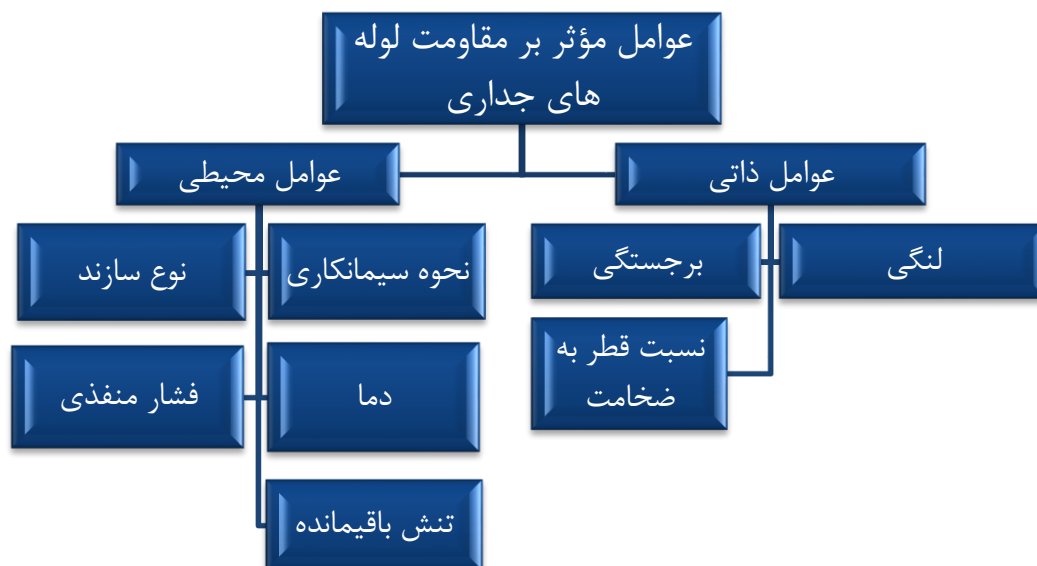


شکل ۲-۳: کمانش و مچالگی لوله جداری (Toscano, 2009).

۵-۲- اثر پارامترهای مختلف مؤثر بر مقاومت نهایی لوله های جداری

تعیین پارامترهای مختلفی که می‌توانند موجب آسیب به لوله‌های جداری شوند، نقش بسزایی در پیش‌بینی رفتار لوله جداری در شرایط مختلف خواهد داشت. لوله‌های جداری در معرض بارهای زیادی در طول عملیات حفاری و در حین بهره‌برداری قرار دارند. فشار هیدروستاتیک اعمال شده بر بیرون سطح لوله جداری توسط سازند و داخل فضای آنالوس توسط سیال موجود در این فضا در طول عملیات حفاری و قبل از سیمانکاری از مهم‌ترین بارهای وارده بر لوله جداری می‌باشد. کمانش ناشی از بارهای محوری، و بارهای ترکشی و لهیدگی به ترتیب ناشی از فشارهای داخلی و خارجی اعمال شده بر روی لوله‌های جداری می‌باشند که متعاقب آن منجر به آسیب به این لوله‌ها می‌شوند. در

ادامه عوامل و پارامترهای مؤثر در ایجاد فشارهای گسترده بر روی لوله جداری به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



شکل ۲-۴: عوامل مؤثر بر مقاومت لوله های جداری

۲-۵-۱- اثر عوامل محیطی بر روی مقاومت نهایی لوله های جداری

۲-۵-۱-۱- سیمانکاری

پُر کردن فضای بین دیواره چاه و جداره لوله جداری با دوغاب سیمان، عملیات سیمان کاری نامیده می شود. ترکیب اصلی سیمان هایی که در سیمانکاری چاه های نفت به کار برده می شوند، همان سیمان های صنعتی است با این تفاوت که از لحاظ ترکیب ساختاری، موادی به آن اضافه می شود که خاصیت پمپ پذیری دوغاب سیمان افزایش یابد. روش سیمانکاری به این ترتیب است که دوغاب سیمان با فشار درون لوله جداری وارد می شود. دوغاب پس از عبور از درون لوله وارد فضای حلقوی می شود و تا ارتفاع از پیش تعیین شده بالا می آید. مسیری که دوغاب سیمان طی می کند شبیه مسیر

گل حفاری است. یعنی از درون لوله جداره گذاری خارج شده و وارد فضای حلقوی می‌شود. وقتی فضای حلقوی پر شد، ساکن می‌شود و پس از مدتی خشک شده و سخت می‌گردد.

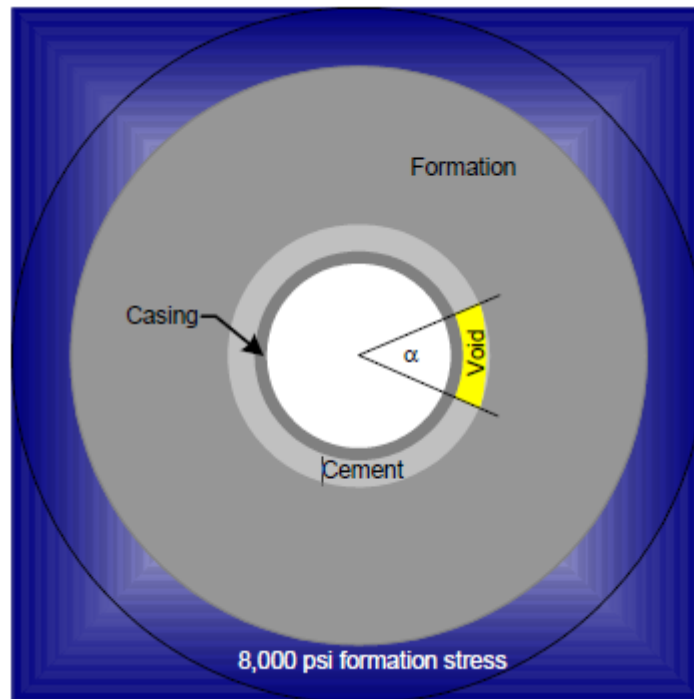
اثر صفحات و کانال‌های سیمانی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روی مقاومت لوله‌های جداری می‌باشد. اکثر روابط تجربی که جهت محاسبه فشار لهیدگی لوله‌های جداری وجود دارند اثرات پوشش سیمانی را روی مقاومت لهیدگی در نظر نگرفته و همچنین بار وارده بر روی لوله‌های جداری را به طور یکنواخت در نظر گرفته‌اند. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که عملیات سیمانکاری خوب بین لوله‌های جداری و اطراف سازند بیشتر تنش‌های القایی ایجاد شده توسط سازند را جذب کرده و از آسیب لوله‌های جداری جلوگیری می‌کند. عملیات سیمانکاری ضعیف و وجود حفرات یا لنگی در لوله‌های جداری سبب ایجاد بارهای غیریکنواخت می‌شود. نتایج عملیات سیمان کاری بد در فضای آزاد در پوشش سیمان، کانال نامیده می‌شود. شناخت اثر کانال‌های سیمانی روی بی نقصی چاه در صورت وجود مشکلات سیمانکاری بسیار مهم می‌باشد. وجود این کانال‌های سیمانی سبب ایزوله ناکامل زون ها و مشکل مهاجرت گاز شده و به سبب ایجاد بارهای غیر یکنواخت، آسیب دیدگی لوله‌های جداری را در پی خواهد داشت. در نتیجه، با استفاده از نمودارهای کیفیت سیمانکاری (CBL^1 و VDL^2 و ...)، میزان کیفیت عملیات سیمانکاری عموماً بررسی گردیده و مشخص می‌گردد که سیمانکاری به صورت کامل انجام گردیده یا در آن حفره‌هایی وجود داشته است. عملیات سیمانکاری ضعیف، حفره‌های بیشتری را در درون پوشش سیمان ایجاد خواهد کرد که باعث اعمال بارگذاری غیر یکنواخت بر لوله جداری خواهد شد. در نهایت این اعمال تنش بیشتر منجر به رخ دادن پدیده گسیختگی لوله جداری خواهد شد. شکل (۵-۲) این کانال‌های سیمانی را نشان می‌دهد.

برگر و همکاران (Berger et al, 2004) همچنین فلکنستین و همکاران (Fleckenstein et al, 2000) اثر حفرات و کانال‌های سیمانی و فشار منفذی را روی کاهش مقاومت لوله‌های جداری مورد مطالعه

¹-Cement Bonding Log

²-Variable Density Log

قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وقوع حفرات و کانال‌های سیمانی می‌تواند امکان وقوع لهیدگی لوله‌های جداری را افزایش دهد. البته این حفرات ممکن است در سازند نیز وجود داشته باشد که ناشی از تولید ماسه به دلیل سستی سازند در طول عمر یک چاه باشد (Berger et al, 2004).



شکل ۲-۵: حفرات و کانال‌های سیمانی اطراف لوله جداری (Berger et al, 2004).

ایونس و همکاران (Evans et al, 1972) در مطالعه‌ای دیگر تأثیر حفره‌های طولی و شعاعی را در پوشش سیمان بررسی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش حفره‌های موجود باعث خواهد شد تا تأثیر مقاومت پوشش سیمان در برابر گسیختگی نادیده گرفته شود.

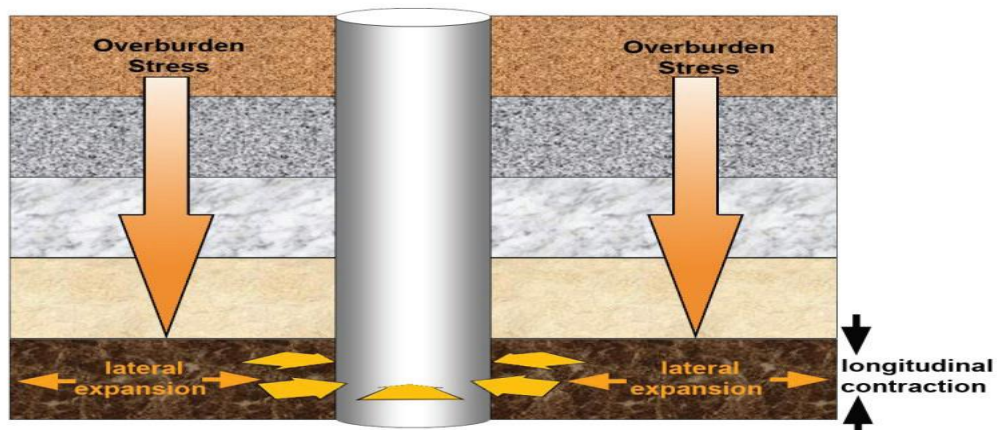
۲-۵-۱-۲ دما

بارهای وارده بر لوله‌های جداری ناشی از عملیات‌های راندن لوله جداری، سیمانکاری، تولید و تعمیر چاه می‌باشند. تغییرات دما عامل ایجاد و القا بارهایی بر لوله‌های جداری در طول عملیات‌های حفاری، تولید و تعمیر چاه می‌باشد. این بارها ممکن است سبب ایجاد کمانش در فاصله‌های غیرسیمانی شود.

در چاه‌های کم عمق و با فشار نرمال، درجه حرارت عموماً اثر ثانویه‌ای در طراحی لوله‌های جداری دارد. اما در چاه‌های عمیق و با شرایط متفاوت بارهای ناشی از تغییرات دما می‌تواند محدودیت‌هایی را در طراحی ایجاد کند (Aadnoy, 1996; Adams and MacEachran, 1994). اثر تغییرات دمایی فقط در بارهای ایجاد شده خلاصه نمی‌شود بلکه می‌تواند در مقاومت لوله‌ها نیز تأثیر گذار باشد. زیرا مقاومت نهایی مواد تابعی از دما می‌باشد.

۳-۱-۵-۲- سازند

یکی از پیامدهای اعمال تنش محوری به هر ماده، از جمله سنگ‌ها، افزایش پهنای (قطر) نمونه در ازای کاهش طول آن است. این فرآیند با پارامتر نسبت پواسون بیان می‌شود. نسبت پواسون در حقیقت انبساط جانبی به ازای انقباض طولی ماده است. نسبت پواسون بین ۰ تا ۰٫۵ تغییر می‌کند. نسبت پواسون کمتر مربوط به سازندهای سخت و نسبت‌های بیشتر مربوط به سازندهای نرم‌تر است. افزایش وزن سرباره به ویژه در سازندهای پلاستیک و نرم در اعماق زیاد، باعث انبساط جانبی و در نتیجه هجوم سازند به داخل چاه در حین عملیات حفاری می‌گردد (شکل ۲-۶).



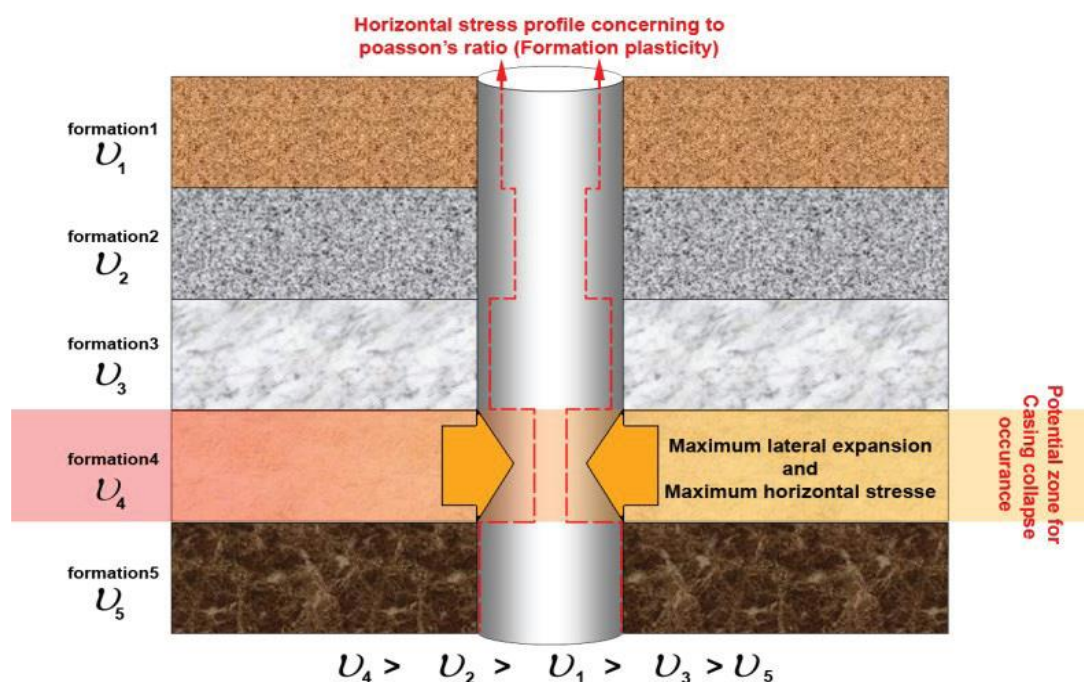
شکل ۲-۶: تغییرات جانبی و طولی سازند به دلیل فشارهای اعمالی و اثر آن بر روی لوله جداری (آشتیانی عبدی و

امیری بختیار، ۱۳۸۹).

سازندهای دارای نسبت پواسون بالاتر دچار انبساط جانبی بیشتری شده و در نتیجه، تنش‌های افقی بزرگتری را نیز تولید می‌کند. این تنش‌های جانبی، وابستگی مشخصی به نسبت پواسون، تنش مؤثر قائم و فشار منفذی سازند دارند و توسط رابطه (۱-۲) بیان می‌شوند.

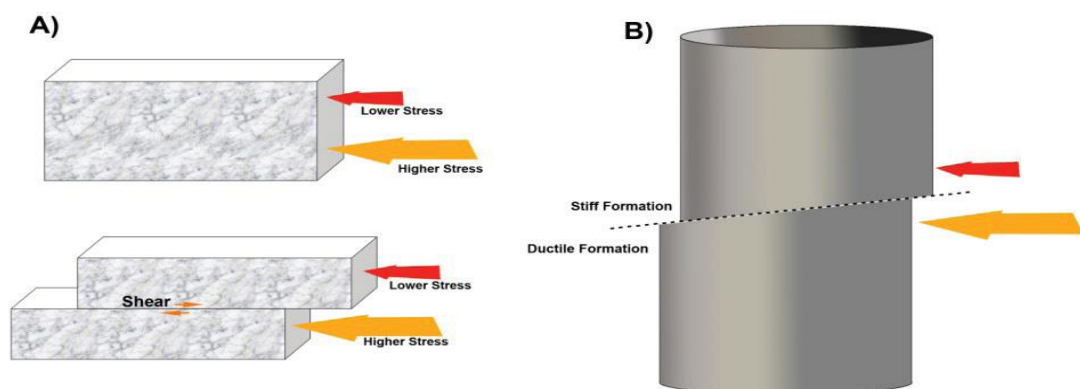
$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + p_p \quad (2-1)$$

در این رابطه، σ_v تنش مؤثر قائم بر حسب Mpa/Psi، ν نسبت پواسون و p_p فشار منفذی بر حسب Mpa/Psi است. تنش افقی یاد شده در طول مقطع سازندهای احاطه کننده چاه، می‌تواند عاملی تعیین کننده در تخمین فشار مچالگی جداری باشد. شکل (۲-۷) چاهی با ۵ سازند مختلف را نشان می‌دهد که به دلیل نسبت پواسون بالای سازند ۴ احتمال مچالگی لوله در این سازند بیش از بقیه خواهد بود.



شکل ۲-۷: سازند با رفتار پلاستیسته و نسبت پواسون بالا و تنش بالای اعمال شده بر لوله جداری (آشتیانی عبدی و امیری بختیار، ۱۳۸۹).

در برخی دیگر از موارد، در صورت اختلاف زیاد در میزان تنش‌های افقی، صفحه برشی در مرز بین دوسازند ایجاد می‌شود که موجبات بریدگی لوله‌های جداری را فراهم می‌آورد. البته به شرط آنکه اختلاف میان تنش‌های افقی بین دو سازند از میزان مقاومت برشی لوله‌های جداری بیشتر باشد (شکل ۸-۲).



شکل ۸-۲: اختلاف زیاد میان تنش‌های افقی، ایجاد صفحه برشی در مرز بین دو سازند و بریدگی لوله جداری)
آشتیانی عبدی و امیری بختیار، ۱۳۸۹.

در صورت حضور شیل و نمک در چاه‌های عمیق، گسیختگی لوله جداری به علت جریان پلاستیک سازند پدیده‌ای شایع است و تنش اعمال شده به رشته لوله، نتیجه خزش سازند خواهد بود.

۴-۱-۵-۲- تنش باقیمانده

تنش باقیمانده، مجموعه‌ای از تنش‌ها است که می‌تواند زمانی که نیروی خارجی روی آن عضو وارد نمی‌شود، در هر عضو وجود داشته باشد. تنش باقیمانده را می‌توان از طریق رابطه (۲-۲) تعیین نمود (Clinedinst, 1985).

$$RS = \left(\frac{E}{1-\nu^2}\right)t\left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_0}\right) \quad (2-2)$$

در این رابطه D_0 قطر خارجی لوله قبل از درزبندی^۱ بر حسب اینچ، D_1 قطر خارجی لوله بعد از درز بندی بر حسب اینچ، t ضخامت دیواره لوله بر حسب اینچ، ν نسبت پواسون، E مدول الاستیسیته و RS تنش باقیمانده در سطح داخلی لوله بر حسب Ψ می باشد که در شرایط کششی مثبت در نظر گرفته می شود.

بیک (Baek, 2011) تأثیر تنش باقیمانده را بر روی فشار گسیختگی را مورد بررسی قرار داد. او به این نتیجه رسید که فشار گسیختگی لوله با تنش باقیمانده، مقداری مشابه را در مقایسه با حالت بدون تنش باقیمانده نشان می دهد. بنابراین اثر تنش باقیمانده بر گسیختگی لوله ناچیز خواهد بود. هانگ و همکاران (Huang et al, 2000) نیز در مطالعه ای اثرات عوامل مختلف را بر روی مقاومت گسیختگی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اثر تنش باقی مانده محیطی در فشار گسیختگی بسیار کوچک است و می تواند در طراحی لوله جداری نادیده گرفته شود.

۵-۱-۵-۲- فشار منفذی

یکی از عواملی که می تواند در پدیده مچالگی لوله های جداری و آسیب آن نقش داشته باشد فشار منفذی سازند است. هنگامی که فشار منفذی افت می کند تنش های افقی سازند بخش قابل توجهی از بارهای وارده بر سازند را به خود اختصاص می دهند. با ثابت در نظر گرفتن تنش های افقی سازند، حفرات باعث اعمال تنش غیریکنواخت بر روی لوله های جداری می شوند. این بارها بر روی لوله جداری در نواحی که حفرات وجود دارند و یا فشار منفذی کاهش پیدا کرده است، عدم یکنواختی بیشتری را از خود نشان می دهند. مطالعات برگر و همکاران (Berger et al, 2004) نشان داد که با کاهش فشار منفذی، توزیع تنش نیز تغییر خواهد کرد و با کاهش فشار منفذی تنش های شدیدتری بر لوله جداری وارد خواهد شد که می تواند منجر به مچالگی لوله های جداری شود.

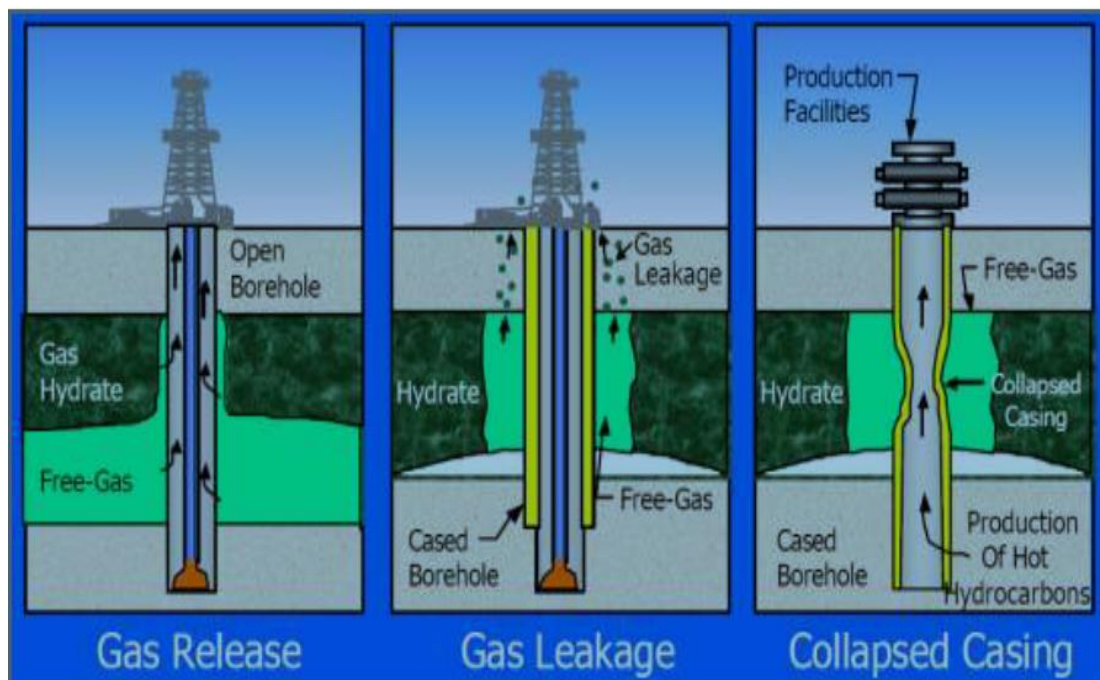
^۱-Slitting

۶-۱-۵-۲- هیدرات‌های گازی

هیدرات‌های گازی شامل مولکول‌های آب هستند که در یک ساختار بلورین به یکدیگر متصل شده‌اند. این مواد به صورت میزبان، مولکول‌های غیر قطبی یا اندکی قطبی را که نسبتاً بزرگ بوده و ارتباط مستحکمی را در شبکه بلورین ایجاد می‌کنند در بر گرفته است. هیدرات‌های گازی در شرایط فشار بالا و دمای پایین پایدار بوده و عمدتاً در نواحی اقیانوسی در اعماق پایین‌تر از ۳۰۰ متر و یا در نواحی منجمد قطبی یافت می‌شوند. روش‌های رایج حفاری در این ذخایر باعث ایجاد حرارت و در نتیجه تجزیه ساختار هیدرات می‌گردد، در نتیجه، سیال حفاری با محتوای گاز بالا ایجاد شده و باعث بروز مشکلاتی در کنترل و نگهداری چاه می‌گردد.

مادامی که پایداری در ساختار هیدراتی وجود دارد، هیدرات گازی منسجم باقی می‌ماند اما با تداوم رسوبگذاری و در نتیجه افزایش دما این شرایط تغییر خواهد کرد. با تجزیه هیدرات گازی، آب و گاز تولید شده و در نتیجه فشار منفذی افزایش می‌یابد. با کاهش فشار منفذی، تنش‌های نرمال و برشی که به ترتیب در امتداد عمود و در امتداد صفحه گسل هستند دستخوش تغییراتی شده و بسته به نوع تغییرات و رژیم حاکم بر میدان، گسل‌های جدیدی به صورت امتداد لغز، معکوس و یا نرمال در سطح ضعیف لایه‌ها تشکیل می‌شود. از طرفی در شرایطی که گسل‌های غیرفعال فصل مشترکی با مخزن در حال تولید داشته باشند، تغییرات تنش باعث فعال‌سازی مجدد گسل‌های موجود در منطقه در حین تولید خواهد شد. این امر باعث به وجود آمدن خسارات سنگینی به چاه‌های تولیدی (ناپایداری و مچالگی لوله جداری) و تاسیسات دریایی شده و از طرفی مسیرهای جدیدی را برای نشت فراهم می‌کند. تولید گاز از هیدرات‌ها باعث کاهش فشار منفذی و در نتیجه افزایش تنش مؤثر قایم وارده بر رسوبات هیدراتی می‌شود. تراکم سنگ مخزن ناشی از این افزایش تنش زمانی که بیشتر از ۵ درصد شود می‌تواند نشانه‌ای برای مچالگی لوله جداری گردد. برش لوله جداری پدیده‌ای غالب در بیشتر

میدانین هیدرات گازی است که عمدتاً در روباره مخزن و صدها فوت بالاتر از مخزن اتفاق می‌افتد. شکل (۹-۲) فرآیند مچالگی لوله جداری در میدانین هیدرات گازی را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲: نشت گاز و مچاله شونده‌گی لوله‌های جداری ناشی از تولید گاز از هیدرات‌های گازی (صائمی، ۱۳۹۲).

۲-۵-۲- اثر عوامل ذاتی بر روی مقاومت نهایی لوله‌های جداری

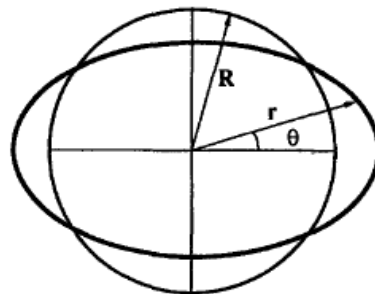
بیان دلیل اصلی مچالگی لوله‌های جداری بسیار دشوار است زیرا عوامل مهم و متعددی بر روی مقاومت نهایی این لوله‌ها تاثیر گذار هستند. مهم ترین فاکتورهای هندسی لوله‌های جداری که بر روی مقاومت نهایی آن نیز تاثیر گذار است شامل نسبت قطر به ضخامت، برجستگی اولیه و لنگی لوله می‌باشد. در ادامه این پارامترها و نقش آن‌ها در مقاومت نهایی لوله مورد بحث و بررسی بیشتری قرار می‌گیرد.

۱-۲-۵-۲- برجستگی لوله جداری

برجستگی به صورت تغییر شکل لوله جداری از حالت دایره‌ای به بیضوی تعریف می‌گردد. برجستگی لوله جداری از طریق آزمایش و یا از طریق روابط تجربی تعیین می‌گردد. در شرایط آزمایشگاه، مجموعه می‌تواند نمونه آزمایشی تا ۴۵ اینچ طول را در خود قرار دهد و دقت جابجایی ایجاد شده را تا مقدار 3×10^{-3} اینچ اندازه‌گیری کند (Madhavan, 1998). اگر امکان اندازه‌گیری مستقیم وجود نداشته باشد، از روابط تجربی برای برآورد برجستگی لوله جداری استفاده خواهد شد. رابطه (۲-۳) یکی از روابط موجود جهت تعیین برجستگی لوله جداری می‌باشد (Issa and Crawford, 1993).

$$r = R(1 + S \cos(2\theta)) \quad (2-3)$$

که در آن، r شعاع لوله ناقص، R شعاع اسمی لوله دست نخورده، S نسبت بیضی شکلی و θ مختصات زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از مرکز لوله می‌باشد (شکل ۲-۱۰).

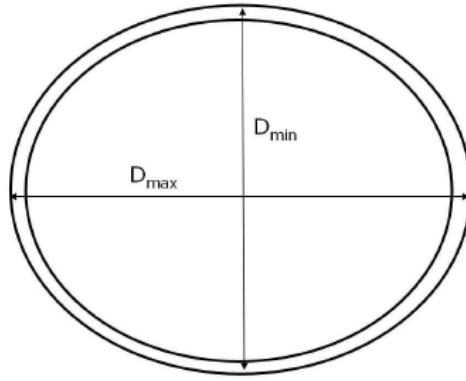


شکل ۲-۱۰: برجستگی یک لوله جداری (Issa and Crawford, 1993).

بیک و همچنین آدامز و همکاران (Adams et al, 1998; Baek, 2011) برجستگی لوله جداری را به صورت رابطه زیر تعریف کرده‌اند.

$$O_v = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{av}} \quad (2-4)$$

که در آن D_{max} قطر حداکثر، D_{min} قطر حداقل و D_{av} قطر متوسط می‌باشد. و معمولاً برجستگی به صورت درصد بیان می‌گردد. در شکل (۲-۱۱) نمایی از برجستگی تعریف شده توسط بیک و همچنین آدامز و همکاران را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱: سطح مقطع لوله همراه با برجستگی (Baek, 2011).

در شرایط کلی می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش برجستگی لوله جداری، مقاومت لوله جداری به شدت کاهش می‌دهد و گسیختگی لوله جداری تسریع می‌گردد. بر اساس مطالعات کلایندینست (Clinedinst, 1985) برجستگی بر مقاومت الاستیک تأثیر نمی‌گذارد، اما مقاومت در برابر گسیختگی پلاستیک را کاهش می‌دهد.

۲-۵-۲-۲- لنگی

یکی از عیوب دیگری که بر گسیختگی لوله جداری تأثیر گذار است، لنگی لوله جداری است که در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این نکته که در صورت وجود لنگی ضخامت دیواره لوله جداری در امتداد خط سطح مقطع متفاوت خواهد بود، لنگی به صورت زیر تعریف می‌شود (Huang et al, 2000).

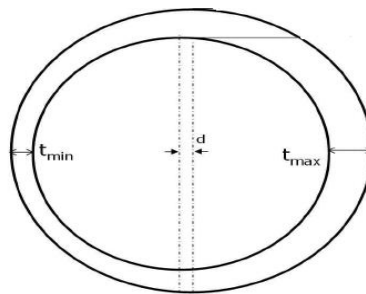
$$\varepsilon = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} + t_{min}} \quad (2-5)$$

که در آن ε میزان لنگی لوله جداری، $t_{\max}$ بیشترین ضخامت لوله جداری و $t_{\min}$ کمترین ضخامت لوله جداری می باشد.

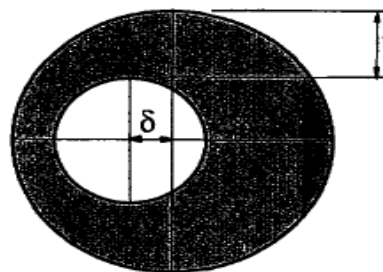
از طرفی دیگر عیسی و کرافورد (Issa and Crawford, 1993) لنگی را به صورت رابطه زیر تعریف کرده‌اند (شکل ۲-۱۳).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{t} \quad (2-6)$$

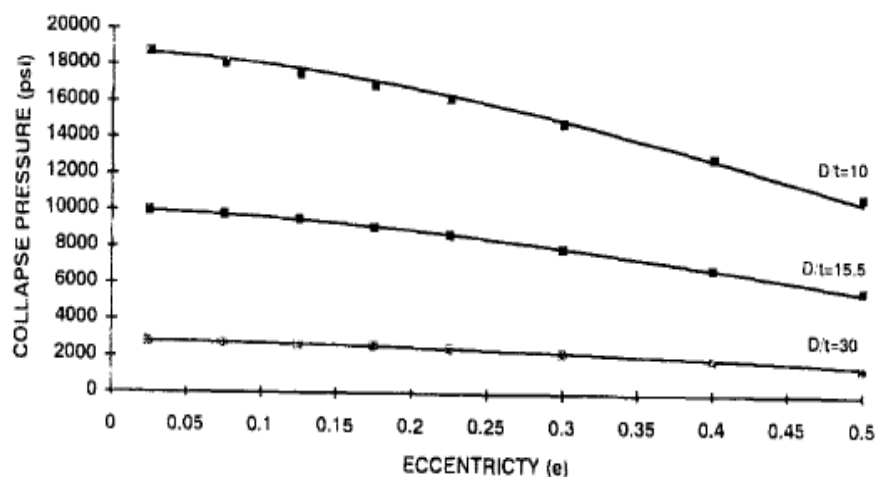
لنگی لوله جداری، فشار گسیختگی لوله جداری را کاهش می‌دهد اما تأثیر آن بر روی گسیختگی لوله جداری به نسبت کمتر از برجستگی خواهد بود. تأثیر کاهش فشار گسیختگی لوله به وسیله لنگی در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲: سطح مقطع لوله همراه با لنگی (Baek, 2011).



شکل ۲-۱۳: لنگی لوله جداری (Issa and Crawford, 1993).



شکل ۲-۱۴: کاهش فشار گسیختگی لوله جداری به علت لنگی (Issa and Crawford, 1993).

همانگونه که در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است، با افزایش لنگی مقاومت در برابر گسیختگی کاهش می‌یابد. و با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله‌های جداری این کاهش شدیدتر خواهد بود.

۳-۲-۵-۲- انتخاب مواد

اکثر تجهیزات تکمیل چاه از جنس فولاد هستند و از آلیاژهای فولادی تهیه می‌شوند به طوری که اگر درصد کربن درون آن از ۰.۲۵ درصد کمتر باشد، فولاد کم آلیاژ و در صورتی بیش از این مقدار باشد فولاد آلیاژی نامیده می‌شوند. به منظور بهبود مقاومت و جلوگیری از خوردگی تجهیزات می‌توان فلزاتی همچون مس، نیکل، کرم و تیتانیوم و... را به آن‌ها افزود. طراحی‌های مختلف تکمیل چاهی برای فلزات کم آلیاژ از استانداردهای API به منظور مقایسه استفاده می‌کنند. اکثر تجهیزات درون چاهی تحت استانداردهای AISI، ASTM و ASME ساخته شده‌اند.

جدول ۲-۲: آلیاژهای فولاد ضد زنگ رایج درون چاهی (Bellarby, 2009).

استاندارد طراحی	میزان کربن (%)	میزان کرم (%)	میزان نیکل (%)	میزان مولیبدن (%)
AISI 304	۰.۰۸	۲۰-۱۸	۱۰-۸	-
AISI 316	۰.۰۸	۱۸-۱۶	۱۴-۱۰	۳-۲
AISI 316L	۰.۰۳	۱۸-۱۶	۱۴-۱۰	۳-۲
AISI 410	۰.۱۵	۱۳.۵-۱۱.۵	-	-
AISI 420	حداقل ۰.۱۵	۱۴-۱۲	-	-
AISI 420 mod	۰.۱۵-۰.۲۲	۱۴-۱۲	-	۰.۵
ASTM F6NM	۰.۰۵	۱۴-۱۲	۴.۵-۳.۵	۰.۵

یکی از معضلات و مشکلات تجهیزات درون چاهی بحث فرسایش و خوردگی آن‌ها می‌باشد که می‌بایست در انتخاب مواد با توجه به شرایط درون چاهی مورد توجه قرار گیرند. فرسایش تجهیزات ناشی از حذف و آسیب فیزیکی مواد می‌باشد که ممکن است به دلایلی همچون تماس قسمت‌های مختلف تجهیزات با یکدیگر، رژیم جریان و سرعت جریان رخ دهد. خوردگی تجهیزات که در واقع آسیب شیمیایی تجهیزات می‌باشد در صورت وجود سه عامل فلز، آب یا الکترولیت و یک عامل خوردگی همچون وجود اکسیژن، اسید و یا گاز H_2S رخ می‌دهد. به طور کلی خوردگی لوله‌های جداری به دو دسته تقسیم می‌شود. در دسته اول، دیواره خارجی لوله جداری دچار خوردگی می‌گردد. عواملی نظیر زون‌های آبی (آب نمک در سازند های آبدار)، اختلاف لیتولوژی سازند و جنس لوله‌های جداری در این نوع از خوردگی مؤثر می‌باشند. در دسته دوم، لوله‌های جداری از قسمت داخلی دچار خوردگی می‌شوند. در محدوده آنالوس فضای بین لوله جداری و لوله مغزی مخلوطی از سیالات مختلف وجود دارد که می‌تواند موجب خوردگی شود. زمانی که تکمیل چاه با پکرهای مناسب صورت نگیرد آنالوس از سیال تولیدی پر می‌شود و در صورتی که این سیال همراه با گاز تر باشد درصد کمی از گاز H_2S

می‌تواند عاملی برای خوردگی لوله‌های جداری گردد. از آنجاکه مدت زمان خوردگی لوله‌جداری طولانی خواهد بود، گسیختگی تحت خوردگی باید در لوله‌های جداری با عمر بالا مد نظر قرار گیرد (شبانکاره بندری وهمکاران، ۱۳۹۰). شکل (۱۵-۲) نمونه‌ای از خوردگی داخلی لوله جداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵-۲: نمونه‌ای از خوردگی داخلی لوله جداری (Bellarby, 2009)

۲-۶- پیش‌گیری از بروز گسیختگی لوله جداری

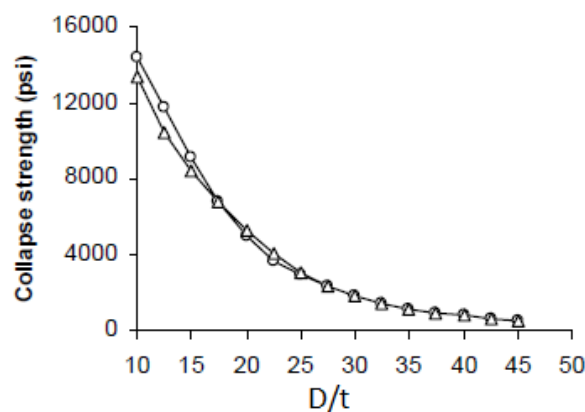
مقاومت در برابر گسیختگی لوله جداری یک از پارامترهای اصلی در طراحی لوله‌های جداری است که در چاه‌های عمیق استفاده خواهند شد. راه‌کارهای مختلفی برای مقابله و افزایش مقاومت در برابر گسیختگی ارائه گردیده است که در ادامه به برخی از این موارد اشاره خواهد شد.

۲-۶-۱- لوله جداری جدار ضخیم

یک راهکار جهت افزایش مقاومت در برابر گسیختگی هر لوله‌ای، افزایش ضخامت دیواره است. لوله جداری جدار ضخیم در حال حاضر در بسیاری از کارخانه‌های تولید در اندازه‌های $\frac{1}{5}$ تا $\frac{5}{8}$ اینچی موجود می‌باشند که از ضخامت دیواره بیش از ۰٫۶ اینچ برخوردار هستند. لوله جدار ضخیم معمولاً از

نوع C-75، C-95، P-110 و فولاد غیر API با مقاومت‌های ۹۵۰۰۰، ۱۰۵۰۰۰، ۱۱۰۰۰۰ و ۱۲۵۰۰۰ بر حسب PSI تولید می‌شود (Khalaf and Cario, 1985).

با افزایش ضخامت دیواره، مقاومت گسیختگی لوله جداری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش مقاومت در برابر گسیختگی، احتمال رخداد پدیده گسیختگی کاهش پیدا خواهد کرد (Gholami and Rasouli, 2012). شکل (۱۶-۲) تغییرات مقاومت گسیختگی در برابر افزایش نسبت قطر خارجی به ضخامت را نشان می‌دهد (Adams et al, 1998).



شکل ۱۶-۲: مقایسه مقاومت گسیختگی به ازای نسبت‌های مختلف D/t (Adams et al, 1998).

۲-۶-۲- لوله جداری با مقاومت بالا

لوله خاص با مقاومت بالا در برابر گسیختگی در اواسط دهه هفتاد برای پاسخ به الزامات صنعت با توجه به افزایش عمق‌های چاه و حفاری در محیط‌های دشوار توسعه یافته‌اند. با استفاده از لوله‌های جداری با مقاومت بالا، مقاومت در برابر گسیختگی افزایش پیدا خواهد کرد و به نحوی این پدیده کنترل می‌گردد. این لوله‌ها با مقاومت زیاد در برابر گسیختگی می‌تواند قدرت کافی در برابر گسیختگی برای غلبه بر بارهای یکنواخت نمک گاهی اوقات تا عمق بیش از ۱۰۰۰۰ سربار را داشته باشند.

۳-۶-۲- فشار داخلی

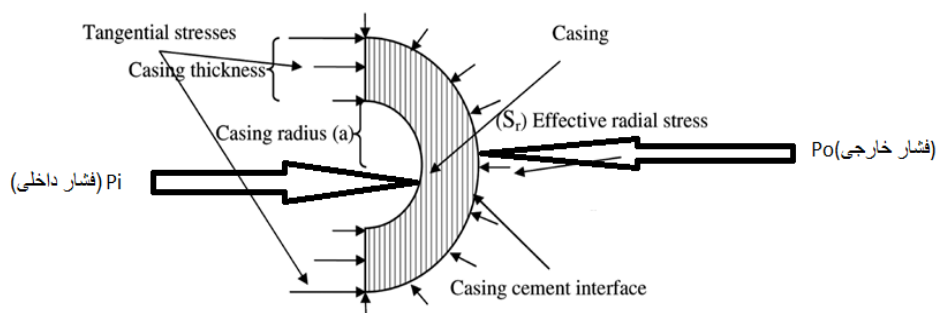
یکی دیگر از راه کارهای ارایه شده، اعمال فشار داخلی است. همواره سیالات موجود در لوله جداری در حین تکمیل و تولید از چاه می‌توانند به عنوان فشار داخلی در لوله جداری در نظر گرفته شوند. در حالت کلی فشار داخلی به مجموعه‌ای از بارگذاری داخل لوله جداری اطلاق می‌گردد. فشار داخلی در مقابل اثر فشارهای خارجی مقاومت می‌کند. بنابراین آن را می‌توان به عنوان پارامتری برای افزایش مقاومت در برابر گسیختگی و کاهش اثر فشار خارجی در نظر گرفت. برخی اوقات از تفریق فشار داخلی از فشار خارجی به عنوان پارمتر مقاومت در برابر گسیختگی یاد می‌شود. در چنین شرایطی، فشار معادل فشار داخلی و خارجی به صورت زیر تعیین می‌شود (Clinedinst, 1985).

$$P_e = P_o - (d / D)P_i \quad (۲-۷)$$

یا

$$P_e = P_o - (1 - 2 / (D / t))P_i \quad (۲-۸)$$

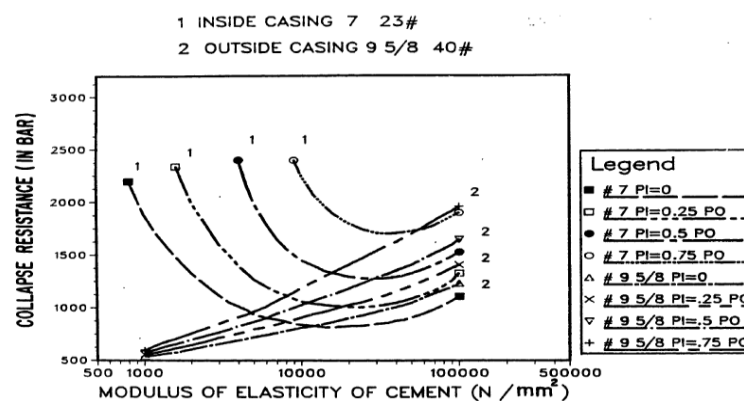
در روابط فوق D قطر خارجی، d قطر داخلی، t ضخامت دیواره، P_e فشار معادل، P_i فشار داخلی و P_o فشار خارجی می‌باشند. نمایی از لوله جداری تحت فشارهای خارجی و داخلی در شکل (۲-۱۷) نمایش داده شده است.



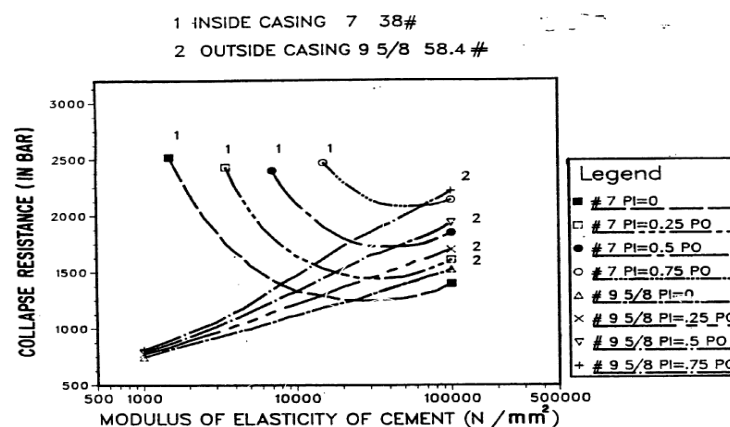
شکل ۲-۱۷: لوله جداری تحت تنش مماسی و شعاعی مؤثر (Mirzaghobanali et al, 2011).

در حضور یک فشار خارجی بزرگ، به کار بستن یک فشار داخلی در لوله جداری سبب می‌شود تا تنش بر روی دیواره لوله کاهش پیدا کند. بر اساس مطالعات انجام شده، تنش مماسی در لوله با افزایش فشار داخلی به اندازه ۳۵,۵ درصد در داخل لوله کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که این درصد کاهش برای سطح خارجی چیزی در حدود ۲۷,۶ خواهد بود (El-Sayed et al, 1987).

تأثیر فشار داخلی بر روی مقاومت در برابر گسیختگی برای لوله‌های جداری ضخیم و نازک متحدالمرکز در شکل‌های (۲-۱۸) و (۲-۱۹) نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش فشار داخلی، مقاومت در برابر گسیختگی برای هر دو نوع لوله جداری ضخیم و نازک افزایش پیدا می‌کند. (Clegg, 1974).



۲-۱۸: تأثیر فشار داخلی بر روی مقاومت در برابر گسیختگی لوله نازک (El-Sayed et al, 1987).



شکل ۲-۱۹: تأثیر فشار داخلی بر روی مقاومت در برابر گسیختگی لوله ضخیم (El-Sayed et al, 1987).

۴-۶-۲- سیمان کاری

سیمان کاری مناسب اطراف لوله جداری سبب افزایش مقاومت در برابر گسیختگی می‌گردد. در مطالعه‌ای مارکس و همکاران (Marx et al, 1985) تأثیر استفاده از سیمان کاری بر مقاومت لوله جداری را ارزیابی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با بهبود سیمان کاری، مقاومت در برابر گسیختگی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، تغییر مواد موجود در سیمان توسط مواد افزودنی و یا استفاده از مواد با کیفیت بهتر می‌تواند احتمال رخداد گسیختگی لوله جداری را کاهش دهد. در واقع، هر چقدر مقاومت سیمان بیشتر شود، فشار کمتری به لوله جداری وارد خواهد گردید و یا در شرایط بحرانی لاقط گسیختگی کنترل می‌شود. نتایج مطالعات ایونس و هاریمان (Evans and Harriman, ۱۹۷۲) بر تأثیر مقاومت فشاری پوشش سیمان بر مقاومت لوله جداری تأکید دارد.

تغییر در ضخامت پوشش سیمان پشت لوله جداری نیز میزان مقاومت در برابر گسیختگی لوله جداری را تغییر خواهد داد. در واقع با افزایش ضخامت این پوشش، اجازه اعمال تنش کمتری به لوله جداری داده خواهد شد و مقاومت در برابر گسیختگی افزایش پیدا می‌کند. به منظور بررسی تأثیر ضخامت سیمان، سونال و همکاران مدلی با قطر چاه $10\frac{3}{4}$ اینچ و ضخامت بخش سیمان ۰٫۵۶۲۵ اینچ ساختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش ضخامت سیمان باعث بهبود مقاومت در برابر گسیختگی لوله می‌شود (Sunal et al, 2008). رودریگز و همکاران (Rodrigues et al. 2004) اثرات خواص مکانیکی سیمان در شرایط بارگذاری گسیختگی را با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزاء محدود مطالعه کرده‌اند و بهبود ۶۲ درصدی را در مقاومت گسیختگی لوله جداری مشاهده نمودند.

۷-۲- روش‌های تعیین مقاومت نهایی لوله های جداری

روش‌های ساده عملی که عموماً به منظور پیش بینی مچالگی لوله‌های جداری استفاده می‌شود مبتنی بر راه‌حل‌های تجربی هستند. این راه‌حل‌های تجربی مبتنی بر معادلاتی هستند که به منظور

ایجاد یک رابطه خطی و یا غیر خطی بین فشار لهیدگی و پارامترهای مهم که باعث مچالگی لوله‌های جداری می‌شوند توسعه یافته‌اند. در اکثر این معادلات تجربی نسبت قطر به ضخامت، برجستگی و لنگی از مهم ترین پارامترهای هندسی لوله‌های جداری، و مدول یانگ، نسبت پواسون و مقاومت نهایی از خصوصیات مهم مکانیکی لوله‌های جداری می‌باشند. علاوه بر روش‌های تجربی، روش‌های عددی نیز به منظور تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری استفاده می‌شود. در مطالعات زیادی به گسیختگی لوله جداری پرداخته شده است و معادلات مختلفی به منظور پیش‌بینی گسیختگی لوله‌های جداری پیشنهاد شده است (Abbassian and parfitt, 1995). در ادامه برخی از این روش‌های تجربی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۷-۲- روابط تجربی

۱-۷-۲-۱- فرمول API

انجمن نفت امریکا فرمول‌هایی را برای ارزیابی مقاومت نهایی لوله جداری در برابر گسیختگی در سال ۱۹۳۶ منتشر کرده است. آنها شرایط گسیختگی را به چهار گروه الاستیک، پلاستیک، تسلیم و انتقال تقسیم نمودند و برای هر شرایط رابطه‌ای را ارائه کرده‌اند.

الف) گسیختگی تسلیم

مقاومت تسلیم از طریق رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$P_Y = 2Y_p [((D/t) - 1)/(D/t)^2] \quad (2-9)$$

که در آن، Y_p مقاومت تسلیم و D/t نسبت قطر به ضخامت جداره می‌باشد. رابطه (۲-۹) برای مقاومت در برابر گسیختگی تسلیم برای محدوده D/t تا $(D/t)_{YP}$ بکار می‌رود. رابطه (۲-۹) دارای فصل مشترک با فرمول گسیختگی پلاستیک است. این مقدار فصل مشترک با استفاده از رابطه (۲-۱۰) تعیین می‌شود.

$$(D/t)_{yp} = [(A-2)^2 + 8(B + (C/Y_p))]^{0.5} + [(A-2)/2(B + (C/Y_p))] \quad (2-10)$$

نسبت‌های قابل قبول D/t برای گسیختگی مقاومت تسلیم در جدول (۲-۳) آمده است.

جدول ۲-۳: محدوده فرمول گسیختگی تسلیم (Clinedinst, 1985).

GRADE	D/t RANGE
H40	16.40 and less
50	15.24 and less
J55, K55 & D	14.81 and less
60	14.44 and less
70	13.85 and less
C75 & E	13.60 and less
L80 & N80	13.38 and less
C90	13.01 and less
C95	12.85 and less
100	12.71 and less
P105	12.57 and less
P110	12.44 and less
120	12.21 and less
125	12.11 and less
130	12.02 and less
135	11.92 and less
140	11.84 and less
150	11.67 and less
155	11.59 and less
160	11.52 and less
170	11.37 and less
180	11.23 and less

ب) گسیختگی پلاستیک

مقاومت حداقل در برابر گسیختگی پلاستیک توسط رابطه (۲-۱۱) محاسبه می‌شود.

$$P_p = Y_p[(A/(D/t)) - B] - C \quad (2-11)$$

فرمول (۲-۱۱) برای مقاومت حداقل در برابر گسیختگی پلاستیک برای محدوده نسبت‌های D/t از $(D/t)_{YP}$ تا $(D/t)_{PT}$ قابل قبول است. فصل مشترک رابطه فوق با مقاومت در برابر گسیختگی انتقال به وسیله رابطه (۲-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$(D/t)_{PT} = Y_p(A - F) / [C + (Y_p(B - G))] \quad (2-12)$$

فاکتورها و محدوده قابل قبول D/t گسیختگی پلاستیک در جدول (۲-۴) آمده است.

جدول ۲-۴: فاکتورهای فرمول و محدوده D/t برای گسیختگی پلاستیک (Clinedinst, 1985).

GRADE	A	B	C	D/t RANGE
H40	2.950	0.0465	754	16.46 to 27.01
50	2.976	0.0515	1056	15.24 to 25.63
J55, K55 & D	2.991	0.0541	1206	14.81 to 25.01
60	3.005	0.0566	1336	14.41 to 24.42
70	3.037	0.0617	1656	13.85 to 23.30
C75 & E	3.054	0.0642	1806	13.60 to 22.91
L80 & N80	3.071	0.0667	1955	13.38 to 22.47
C90	3.106	0.0718	2254	13.01 to 21.69
C95	3.124	0.0743	2404	12.85 to 21.33
100	3.143	0.0768	2553	12.70 to 21.00
P105	3.162	0.0794	2702	12.57 to 20.70
P110	3.181	0.0819	2852	12.44 to 20.41
120	3.219	0.0870	3151	12.21 to 19.88
125	3.239	0.0895	3301	12.11 to 19.63
130	3.258	0.0920	3451	12.02 to 19.40
135	3.278	0.0946	3601	11.92 to 19.18
140	3.297	0.0971	3751	11.84 to 18.97
150	3.336	0.1021	4053	11.67 to 18.57
155	3.356	0.1047	4204	11.59 to 18.37
160	3.375	0.1072	4356	11.52 to 18.19
170	3.412	0.1123	4660	11.37 to 17.82
180	3.449	0.1173	4966	11.23 to 17.47

پ) گسیختگی انتقال

فشار حداقل گسیختگی انتقال به وسیله رابطه (۲-۱۳) محاسبه شده است.

$$P_T = Y_p [F / ((D/t) - B)] \quad (2-13)$$

فرمول (۲-۱۳) برای مقاومت حداقل در برابر گسیختگی انتقال برای محدوده مقادیر (D/t) از (D/t)_{Pt} تا (D/t)_{TE} به کار می‌رود. فصل مشترک این رابطه با مقاومت در برابر گسیختگی الاستیک از رابطه (۲-۱۴) محاسبه می‌شود.

$$(D/t)_{TE} = [2 + (B/A)] / [2B/A] \quad (2-14)$$

فاکتورها و محدوده قابل قبول (D/t) برای فرمول گسیختگی انتقال در جدول (۲-۵) آمده است.

جدول ۲-۵: فاکتورهای فرمول و محدوده D/t برای گسیختگی انتقال (Clinedinst, 1985).

GRADE	F	G	D/t RANGE
H40	2.063	0.0325	27.01 to 42.64
50	2.003	0.0347	25.63 to 38.83
J55, K55 & D	1.989	0.0360	25.01 to 37.21
60	1.983	0.0373	24.42 to 35.73
70	1.984	0.0403	23.38 to
C75 & E	1.990	0.0418	33.17
L80 & N80	1.998	0.0434	22.91 to 32.05
C90	2.017	0.0466	22.47 to 31.02
C95	2.029	0.0482	21.69 to 29.18
100	2.040	0.0499	21.33 to 28.36
P105	2.053	0.0515	21.00 to 27.60
P110	2.066	0.0532	20.70 to 26.89
120	2.092	0.0565	20.41 to 26.22
125	2.106	0.0582	19.88 to 25.01
130	2.119	0.0599	19.63 to 24.46
135	2.133	0.0615	19.40 to 23.94
140	2.146	0.0632	20.41 to 26.22
150	2.174	0.0666	18.97 to 22.98
155	2.188	0.0683	18.57 to 22.11
160	2.202	0.0700	18.37 to 21.70
170	2.231	0.0734	18.19 to 21.32
180	2.261	0.0769	17.82 to 20.60
			17.47 to 19.93

ج) گسیختگی الاستیک

حداقل مقاومت در برابر گسیختگی الاستیک به وسیله روابط (۲-۱۵) یا (۲-۱۶) محاسبه می‌شود.

$$P_E = (2E / 1 - \nu^2) / [(D/t)((D/t) - 1)^2] \quad (2-15)$$

$$p_E = 46.95 * 10^6 / [(D/t)[(D/t) - 1]^2] \quad (2-16)$$

محدوده بکار رفته برای (D/t) برای گسیختگی الاستیک در جدول (۲-۶) آمده است.

جدول ۲-۶: محدوده D/t برای گسیختگی الاستیک (Clinedinst, 1985).

GRADE	D/t RANGE
H40	42.64 and greater
50	38.83 and greater
J55, K55 & D	37.21 and greater
60	35.73 and greater
70	33.17 and greater
C75 & E	32.05 and greater
L80 & N80	31.02 and greater
C90	29.18 and greater
C95	28.36 and greater
100	27.60 and greater
P105	26.89 and greater
P110	26.22 and greater
120	25.01 and greater
125	24.46 and greater
130	23.94 and greater
135	23.44 and greater
140	22.98 and greater
150	22.11 and greater
155	21.70 and greater
160	21.32 and greater
170	20.60 and greater
180	19.93 and greater

در روابط فوق، پارامترهای A، B، C، F، G فرمول گسیختگی توسط رگرسیون آماری از ۴۰۲ آزمایش گسیختگی لوله‌های جداری تعیین و به صورت روابط زیر ارائه گردیده‌اند (Clinedinst, 1985).

$$A = 2.8762 + (0.10679 * 10^{-5} Y_p) + (0.21301 * 10^{-10} Y_p^2) - (0.53132 * 10^{-16} Y_p^3) \quad (2-17)$$

$$B = 0.26233 + (0.50609 * 10^{-6} Y_p) \quad (2-18)$$

$$C = -465.93 + (0.30867 Y_p) - (0.10843 * 10^{-7} Y_p^2) + (0.36989 * 10^{-13} Y_p^3) \quad (2-19)$$

$$F = 46.95 * 10^6 \left[\left(\frac{3B}{A} \right) / \left(2 + \left(\frac{B}{A} \right) \right)^3 \right] / Y_p \left(\left(\frac{3B}{A} \right) / \left(2 + \left(\frac{B}{A} \right) \right) - \left(\frac{B}{A} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{3B}{A} \right) / \left(2 + \left(\frac{B}{A} \right) \right)^2 \right) \right] \quad (2-20)$$

$$G = FB / A \quad (2-21)$$

۲-۷-۱-۲- رابطه کلایندینست

کلایندینست فرمول‌های تجربی مقاومت در برابر گسیختگی را بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون آماری ۲۷۷۷ آزمایش گسیختگی به نمایندگی از ۶ نوع لوله جداری API تولید شده، به دست آورد. نتایج کار او در سه فرمول برای گسیختگی الاستیک، گسیختگی پلاستیک و گسیختگی تسلیم ارائه شده است. مقاومت حداقل در برای این سه نوع گسیختگی توسط روابط (۲-۲۲) تا (۲-۲۴) محاسبه می‌شود (Clinedinst, 1985).

$$P_E = 47.94 * 10^6 \frac{1}{(D/t)((D/t)-1)^2} \quad (2-22)$$

$$P_P = 1.123 * 10^6 \frac{Y_p}{(D/t)^{2.096-3.432*10^{-6}}} \quad (2-23)$$

$$P_Y = 2Y_p \frac{1}{(D/t)} \quad (2-24)$$

در روابط فوق، P_E گسیختگی الاستیک، P_P گسیختگی پلاستیک، P_Y گسیختگی تسلیم، Y_P تنش تسلیم و D/t نسبت قطر به ضخامت می باشد.

در سال ۱۹۸۵، گسیختگی پلاستیک با در نظر گرفتن تأثیر برجستگی، لنگی و تنش باقیمانده مورد تجدید نظر قرار گرفت و رابطه زیر برای آن ارایه شد.

$$P_P = 1.918 * 10^6 (D/t)^{2.070-0.00247Y_P} (L/D)^{-0.0515} EXP[(-0.108 * O_V) - (0.00293 * E_C) + (0.00141R_S)] \quad (2-25)$$

در رابطه (۲-۲۵)، O_V برجستگی، E_C لنگی و R_S تنش باقیمانده است.

۳-۱-۷-۲- فرمول‌های گسیختگی تامانو و همکاران

تامانو و همکاران (Tamano et al, 1983) رابطه (۲-۲۶) را که در آن، تأثیر بارگذاری محوری، لنگی، برجستگی و تنش باقیمانده لحاظ شده است برای تخمین مقاومت نهایی لوله جداری ارایه نمودند.

$$P_A = 0.5(P_E + P_{YA}) - ((0.25(P_E - P_{YA})^2 + P_E P_{YA} H)^{0.5} \quad (2-26)$$

پارامترهای موجود در رابطه فوق از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$H = 0.06680O_V + 0.00049E_C - 0.1429R_S / Y_P \quad (2-27)$$

$$P_{YA} = (2Y_P \left(\frac{(D/t)-1}{(D/t)^2} \right) (1 + \frac{1.49}{((D/t)-1)}) ((1 - 0.6864(S_a/Y_P)^2)^{1/2} - 0.56(S_a/Y_P))) \quad (2-28)$$

$$P_E = \frac{(2E/(1-\nu^2))}{(D/t)((D/t)-1)^2} \quad (2-29)$$

در روابط فوق S_a تنش محوری، H تابع فاکتورهای نامطلوب، P_A مقاومت در برابر گسیختگی تحت تنش محوری، P_{YA} فشار تسلیم تحت تنش محوری بدون وجود عیوب هندسی در جداری می‌باشد.

۴-۱-۷-۲- فرمول توکیماسا^۱ و تاناکا^۲

توکیماسا و تاناکا (Tokimasa and Tanaka, 1986) رابطه (۲-۳۰) را به منظور ارزیابی مقاومت در برابر گسیختگی بر اساس تجزیه و تحلیل اجزاء محدود توسعه داده‌اند که تأثیر تنش باقیمانده، برجستگی و لنگی در آن لحاظ شده است.

$$P_{CR} = F_{OV} * F_{RS} * F_{ES} \& P_O \quad (2-30)$$

در رابطه فوق F_{OV} فاکتور برجستگی، F_{EC} فاکتور لنگی، F_{RS} فاکتور تنش باقیمانده، P_{CR} فشار گسیختگی بحرانی، P_O مقاومت در برابر گسیختگی لوله بدون هیچ گونه برجستگی، لنگی یا تنش باقیمانده می باشد.

$$P_O = (2E / (1 - \nu^2)) (t / D)^3 \quad (2-31)$$

$$F_{EC} = F_{RS} = 1 \quad (2-32)$$

$$F_{OV} = 2B / (A^2 - 4B)^{0.5} \quad (2-33)$$

$$A = 1 + 1.5 * O_V ((D/t) - 1) + ((1 - \nu^2) Y_p / E) (D/t) ((D/t) - 1) \quad (2-34)$$

$$F_{OV} = 1 - r \left(1 - \frac{2}{A - \frac{2}{A + (A^2 - 4A)^{1/2}}} \right) \quad (2-35)$$

برای D/t کمتر از ۲۵ و بزرگتر از ۱۴: $r = 0.956(D/t) - 1.14$ و برای D/t بزرگتر از ۲۵: $r = 1$

$$P_O = (2Y_{e-0.4\%}) (D/t)^2 ((D/t) - 1) \quad (2-36)$$

$$F_{EC} = 1 - E_C / 2 \quad (2-37)$$

^۱-Tokimasa

^۲-Tanaka

برای RS کمتر از صفر: $F_{RS} = 1 + 0.8RS / Y_p$ و RS بزرگتر از صفر، F_{RS} کمتر از F_{RS1} یا F_{RS2} است.

$$F_{RS1} = 1 + 0.8R_S / Y_p \quad (2-38)$$

$$F_{RS2} = 2((1 + 0.8R_S / Y_p) / (1 + (1 - 2(t / D))^2)) \quad (2-39)$$

این فرمول‌ها برای نسبت‌های L/D برابر یا بزرگتر از ۱۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱-۷-۲- فرمول عیسی^۱ و کرافورد

عیسی و کرافورد (Issa and Crawford, 1993) رابطه (۲-۴۰) را به منظور پیش بینی مقاومت گسیختگی به دست آوردند. این معادله قادر به پیش بینی فشار گسیختگی بر اساس پارامترهای مؤثری مانند نسبت قطر به ضخامت جداره D/t، مقاومت تسلیم مواد Y_p ، مدول الاستیسیته E، برجستگی لوله S و لنگی لوله e می‌باشد.

$$P = P_0(D/t, Y_p, E)g(s, D/t)h(e) \quad (2-40)$$

که در آن P فشار گسیختگی لوله، $P_0(E, Y_p, D/t)$ به عنوان تابع گسیختگی برای لوله‌های تقریباً کامل و سالم، $g(D/t, S)$ و $h(e)$ به ترتیب توابع کاهشی برای محاسبه برجستگی و لنگی لوله است. این توابع به صورت زیر تعریف شده است.

$$P_0 = [1/2(P_E + P_{EP}) - 1/2\sqrt{(P_E - P_{EP})^2}] \quad (2-41)$$

$$P_E = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left[\frac{1}{D/t(D/t - 1)^2} \right] \quad (2-42)$$

$$P_{EP} = \frac{Y(D/t - 1)}{(D/t)^2} \left[\frac{1}{1 + [A_2 + A_3(Y_p / E)](D/t)} \right] \quad (2-43)$$

^۱-Issa

در رابطه (۲-۴۳)، $A_1=7.0333$ ، $A_2=0.1295$ ، $A_3=12,3298$ می باشند.

$$g(S, D/t) = \frac{1}{1 + [B_1 + B_2(D/t)]S^{B_3}} \quad (2-44)$$

در رابطه (۲-۴۴)، $B_1=0.1648$ ، $B_2=0.5972$ ، $B_3=0.7618$ می باشند.

$$H(e) = (1-e)(1 + C_{1e}^2 + C_{2e}^2) \quad (2-45)$$

در رابطه (۲-۴۵)، $C_1=0.8123$ و $C_2=-1.1272$ می باشند.

۶-۱-۷-۲- فرمول عباسیان و پارفیت

عباسیان و پارفیت (Abbassian and parfitt, 1995) روشی ساده را به منظور پیش بینی گسیختگی لوله‌های جداری تحت فشار خارجی بیان نمودند. روش محاسبه شده به آسانی برای تجزیه و تحلیل گسیختگی لاینرهای سوراخ شده و روزنه‌دار و همچنین برای لوله جداری تحت فشار غیر یکنواخت قابل اجرا است. فشار گسیختگی الاستیک و پلاستیک برای حالت لوله همراه با برجستگی به ترتیب در معادلات (۲-۴۶) و (۲-۴۷) ارایه شده است.

$$P_{eo} = P_E \left(\frac{u - u_o}{u} \right) \quad (2-46)$$

$$P_E = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (2-47)$$

u_o برجستگی اولیه، u برجستگی در فشار P_{eo} ، P_E فشار الاستیک برای لوله کامل و t/D نسبت ضخامت به قطر است.

$$P_{PC} = (2Y_P t / D) \left[-2(D/t) \left(1 - \frac{u}{D} \right) \frac{u}{D} + \sqrt{1 + 4 \frac{D^2}{t^2} \left(1 - \frac{u}{D} \right)^2 \frac{u^2}{D^2}} \right] \quad (2-48)$$

در رابطه فوق Y_P تنش تسلیم و u برجستگی لوله می باشد.

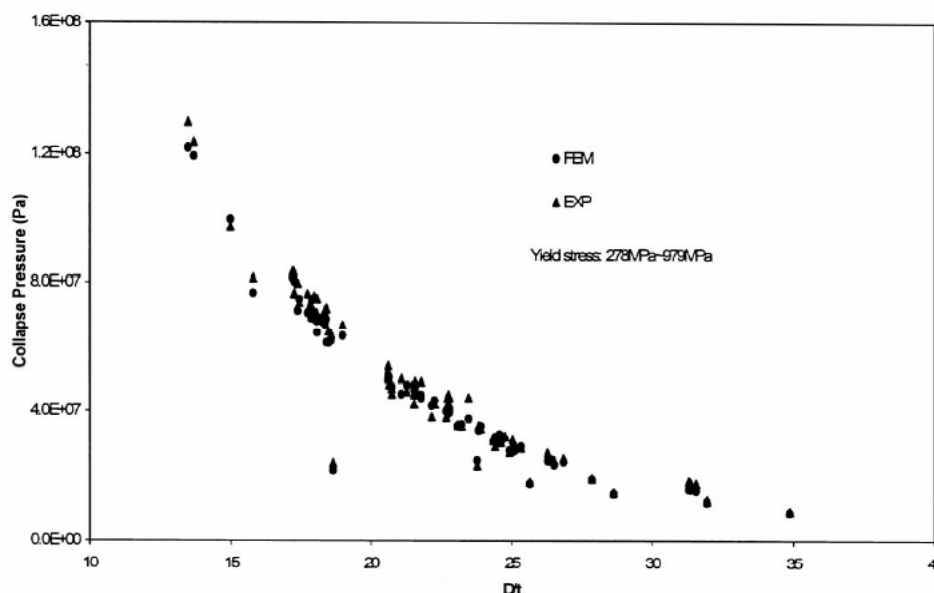
هر یک از روش‌های تجربی بیان شده در قسمت‌های قبل تنها تعدادی از پارامترهای مؤثر در مقاومت گسیختگی را در نظر گرفته‌اند. به طور کلی فرمول‌های ارایه شده توسط API و کلایندینست (۱۹۷۷)، تنها تأثیر نسبت قطر به ضخامت جداره بر آن لحاظ شده و بقیه عوامل نادیده گرفته شده است. در حالی که در فرمول عباسیان و همکاران علاوه بر پارامتر D/t ، تأثیر برجستگی اتخاذ شده است. همچنین عیسی و همکاران نسبت قطر به ضخامت جداره D/t ، برجستگی لوله S و لنگی لوله e را لحاظ کرده‌اند. بنابراین مقادیر پیش بینی شده توسط این روابط تجربی با مقادیر تعیین شده برای لوله‌های جداری مقایسه می‌شود تا دقت مقادیر به دست آمده بررسی گردد.

علاوه بر روابط تجربی فوق، روابط دیگری نیز برای مچالگی لوله تحت شرایط الاستیک (Clinedinst, 1939)، پلاستیک (Holmquist and Nadai, 1939) و الاستوپلاستیک (Issa, 1993;) (Tokimasa, 1986) ارایه شده است. اما نتایج مطالعات انجام شده به روشنی نشان داده است که هیچ کدام از این معادلات تجربی به دلیل فرضیات بسیار زیاد و از طرفی عدم در نظرگیری بسیاری از شرایط دخیل در آسیب لوله‌های جداری نمی‌توانند تخمین مناسبی از مقاومت نهایی لوله جداری ارایه کنند (Huang et al, 2000). تمامی مشکلات بیان شده و پیچیدگی‌های موجود بر سر راه تخمین مقاومت لوله‌های جداری باعث شده تا روش‌های عددی به عنوان روشی مؤثر برای مدل‌سازی در این شرایط استفاده گردند.

۲-۷-۲- روش‌های عددی

هانگ و همکاران (Hung et al, 2000) با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود مشکل گسیختگی لوله جداری را تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحلیل خود عوامل مهمی مانند برجستگی اولیه، لنگی و ناهمسانگردی را مورد توجه قرار دادند و به منظور بررسی دقت و صحت روش خود مقایسه‌ای را با یکسری اطلاعات آزمایشگاهی نیز انجام دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که همبستگی و دقت بالایی بین آزمایشات صورت گرفته و تحلیل اجزاء محدود و روش‌های عددی به

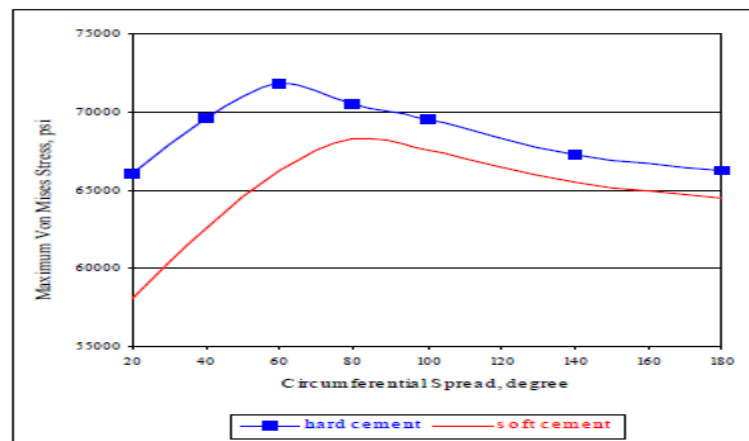
منظور بررسی و پیش بینی مقاومت لوله‌های جداري وجود دارد و معادله‌ای جدید را برای طراحی لوله جداري ارائه دادند. این همبستگی در شکل (۲۰-۲) نشان داده شده است.



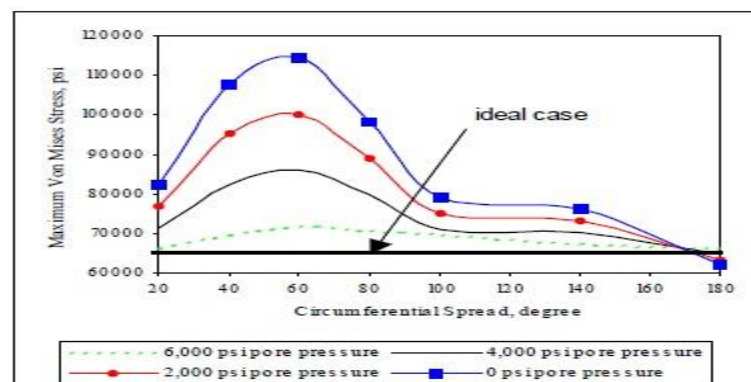
شکل ۲۰-۲: مقایسه بین روش اجزای محدود و روش آزمایشگاهی (۹۷ نمونه) (Hung et al, 2000).

برگر و همکاران (Berger et al, 2004) مطالعه‌ای را بر روی لوله‌های جداري که در معرض بارهای غیر یکنواخت قرار دارند با استفاده از روش اجزای محدود انجام دادند. آنها به منظور بررسی اثرات ناشی از بارهای غیر یکنواخت بر روی مقاومت گسیختگی با استفاده از روش اجزای محدود بر روی ۴ نوع بار تمرکز کردند که شامل بارهای ناشی از وجود لنگی در لوله جداري، حفرات داخل سازند، کانال‌های سیمانی و کاهش فشار منفذی در حفرات می باشد. نتیجه کار آنها نشان داد که اثر وجود حفرات در سازند، کاهش مقاومت گسیختگی لوله جداري تا حدود ۶۰ درصد می باشد که با توجه به اختلاف بین تنش‌های افقی سازند و فشار منفذی متفاوت می باشد. همچنین وجود کانال در سیمان نیز مقاومت لوله جداري را تا حدود ۶۰ درصد کاهش می دهد و این کاهش به فراخور خصوصیات سیمان می تواند متفاوت باشد. نتایج مطالعات برگر و همکاران نشان داد که اثر لنگی در کاهش میزان مقاومت لوله جداري ناچیز می باشد و این کاهش میزان مقاومت در حالت استفاده از سیمان نرم تا ۹

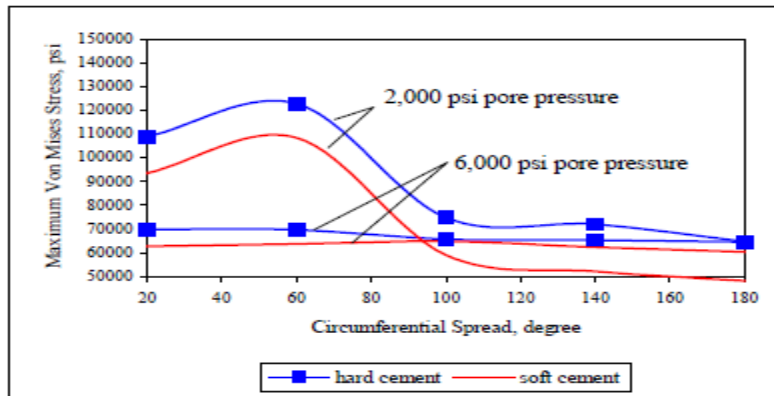
درصد و در صورت استفاده از سیمان سخت حدود ۱ درصد می‌باشد که این مسئله به سیمانکاری خوب و مرکزیت بی عیب عملیات سیمانکاری نیز بستگی دارد. همچنین هنگامی که فشار منفذی سازند ناشی از تولید و یا تخلیه مخزن در حفرات و کانال‌ها کاهش می‌یابد بیشترین میزان تنش فون میسس در لوله جداری ناشی از بارهای گسیختگی افزایش می‌یابد و احتمال آسیب لوله جداری افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲-۲۱: مقایسه بین بیشینه تنش فون میسس در صورت وجود حفره برای سیمان سخت و نرم (Berger et al, ۲۰۰۴).

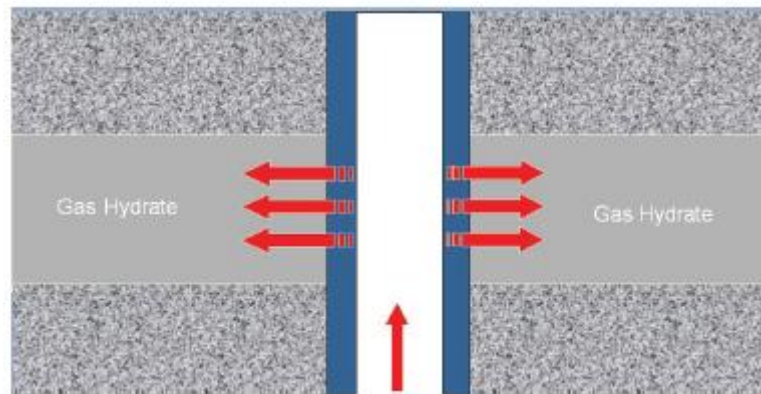


شکل ۲-۲۲: اثر کاهش فشار منفذی بر بیشینه تنش فون میسس (سیمان سخت) (Berger et al, 2004).

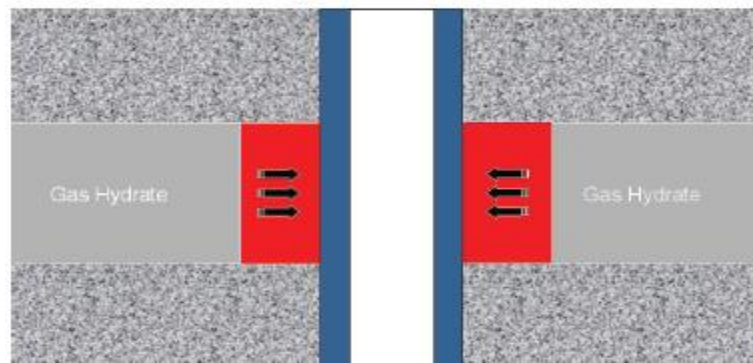


شکل ۲-۲۳: مقایسه بین سیمان سخت و نرم با کاهش فشار منفذی برای مدل با سیمان کاری نامناسب (Berger et al, 2004).

صالح آبادی و همکاران (Salehabadi et al, 2010) از یک مدل مکانیکی با استفاده از روش اجزای محدود به منظور تحلیل پایداری لوله جداری در چاه های حفاری شده در محیط های عمیق آبی با رسوبات حاوی هیدرات گازی که در معرض بارهای یکنواخت و غیر یکنواخت قرار دارد استفاده کردند. عامل ایجاد بارهای غیر یکنواخت در این مطالعه حضور هم زمان لنگی در لوله جداری و افزایش فشار منفذی ناشی از جدایی هیدرات های گازی می باشد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تنش فون میس در لوله جداری سیمانکاری شده با خصوصیات دمایی کم، کمتر از میزان آن برای لوله جداری سیمانکاری شده با خصوصیات دمایی بالا می باشد. همچنین نتایج مطالعات نشان می دهد که در صورت وجود لنگی در لوله جداری استفاده از سیمان با خصوصیات دمایی پایین در قسمت هیدرات های گازی باعث قرار گیری لوله جداری در مرکز چاه و عملیات جداره گذاری مناسب می گردد در غیر این صورت تنش های وارد شده بر لوله جداری در طول عملیات ممکن است منجر به گسیختگی لوله جداری گردد.



شکل ۲-۲۴: نمایی از انتقال حرارت به سازند(ناشی از اثر ژئوترمال و افزایش دمای گل) پشت لوله جداری در طول عملیات حفاری (Salehabadi et al, 2010).



شکل ۲-۲۵: نمایی از افزایش فشار منفذی پشت لوله جداری در طول عملیات حفاری ناشی از رسوبات با هیدرات گازی (Salehabadi et al, 2010).

جدول ۷-۲: بیشینه تنش فون میسس وارد شده بر لوله جداری بعد از جدایش هیدرات ها (Salehabadi et

al,2010).

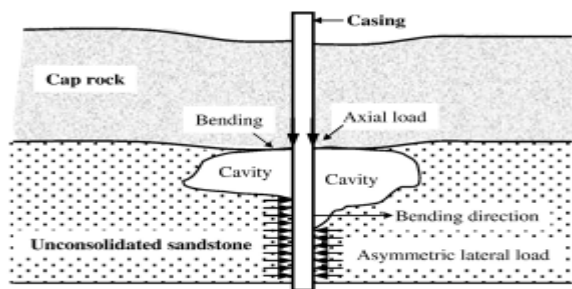
بیشینه تنش فون میسس (Mpa)								در صد لنگی لوله جداری
قاعده ۲				قاعده ۱				
افزایش تنش (%)	سیستم با خصوصیات دمایی B	افزایش تنش (%)	سیستم با خصوصیات دمایی A	افزایش تنش (%)	سیستم با خصوصیات دمایی B	افزایش تنش (%)	سیستم با خصوصیات دمایی A	
۰	۷۵,۷	۰	۱۸۵,۵	۰	۶۶,۹۷	۰	۱۷۴,۶	
۷,۰۶	۸۱,۰۵	۱۹,۲۴	۲۲۱,۲	۸,۴۹	۷۲,۶۶	۲۰,۸۴	۲۱۱	
۹۵,۹۰	۱۴۸,۳	۵۶,۸۱	۲۹۰,۹	۱۰۹,۳۴	۱۴۰,۲	۶۱,۲۸	۲۸۱,۶	۴۰

پنگ و همکاران (Peng et al,2007) نیز از مدل سازی عددی به منظور بررسی آسیب لوله جداری در ماسه سنگ های نرم در مخزن گودالو از میدان نفتی^۱ چین استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که به دلیل وجود ماسه سنگ های نرم در قسمت هایی از سازند و جدایش آنها یک سری حفرات در سازند ایجاد می شوند که عامل ایجاد تنش های غیر یکنواخت شده و در اثر آن لوله های جداری دچار کمانش و آسیب و شکستگی می گردند. بنابراین توزیع غیر یکنواخت تنش ها اطراف لوله جداری دلیل اصلی تغییر شکل و شکست آن می باشد که ناشی از تولید ماسه در آن ناحیه است. و از آنجا که شکست چاه و آسیب جداری در محل های تولید ماسه رخ می دهد بایستی به محل و جهت مشبک کاری^۲ ها توجه داشت و برای جلوگیری از بروز تولید ماسه بایستی مشبک کاری ها در

^۱-Shengli

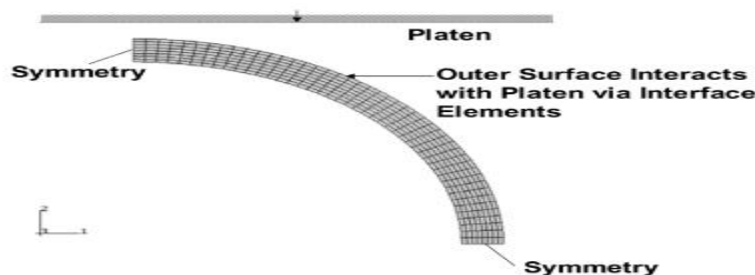
^۲-Perforation

جهت بیشترین تنش افقی ایجاد شوند. نتایج محاسبات عددی نشان می‌دهد که وقتی حفرات به وسیله خروج و تولید ماسه ایجاد می‌شوند لوله جداری تغییر شکل پذیری‌های غیر یکنواخت و چند جهته را متحمل می‌شود که منجر به کمانش و آسیب آن می‌شود.

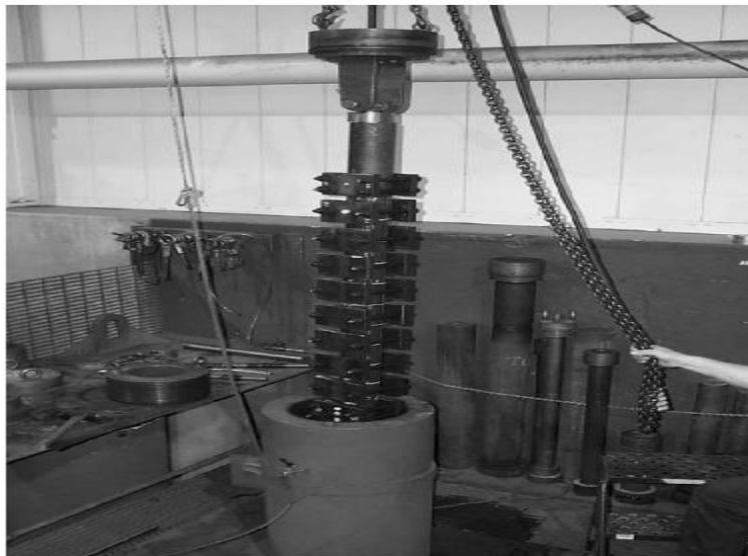


شکل ۲-۲۶: نمایی از تنش‌های غیر یکنواخت وارد شده بر لوله جداری ناشی از حفرات و بارهای محوری و دگر شکلی پوش سنگ به دلیل حفرات ماسه‌ای ایجاد شده (Peng et al, 2007).

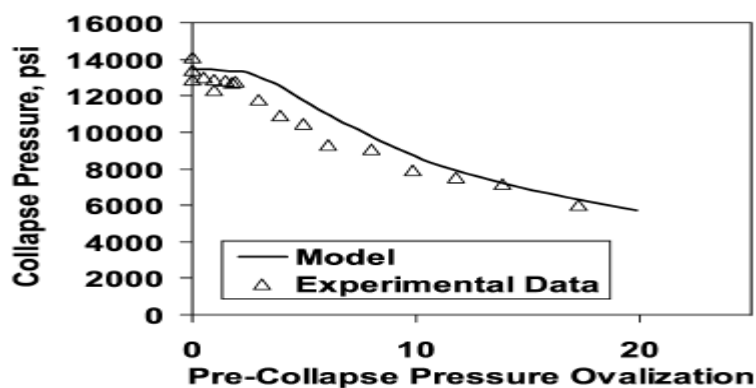
پاتیلو و همکاران (Pattillo et al, 2004) به منظور بررسی اثر بارهای غیر یکنواخت و برجستگی لوله جداری بر روی مقاومت گسیختگی لوله‌های جداری مطالعات خود را به صورت عددی و نیز به منظور اعتبار سنجی، به انجام مطالعات آزمایشگاهی و عملی پرداختند. آنها به منظور تحلیل اثر بارهای غیر یکنواخت خود از مدل ۲ بعدی با استفاده از نرم افزار ABAQUS بهره بردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که همبستگی خوبی بین روش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته و مدل سازی عددی به منظور بررسی اثرات بارهای غیر یکنواخت و برجستگی لوله جداری در مقاومت گسیختگی لوله جداری وجود دارد.



شکل ۲-۲۷: نمایی از مدل اجزای محدود در مطالعه مچالگی جداری (Pattillo et al, 2004).



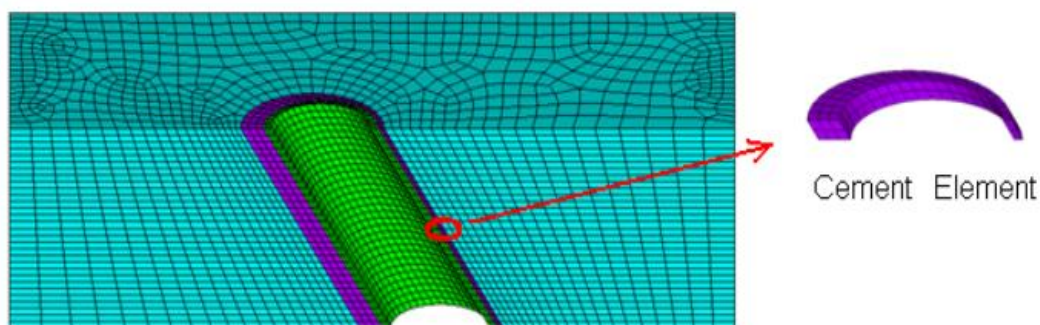
شکل ۲-۲۸: وسیله آزمایش مچالگی جداری همراه با ایجاد برجستگی القایی در آن (Pattillo et al, 2004).



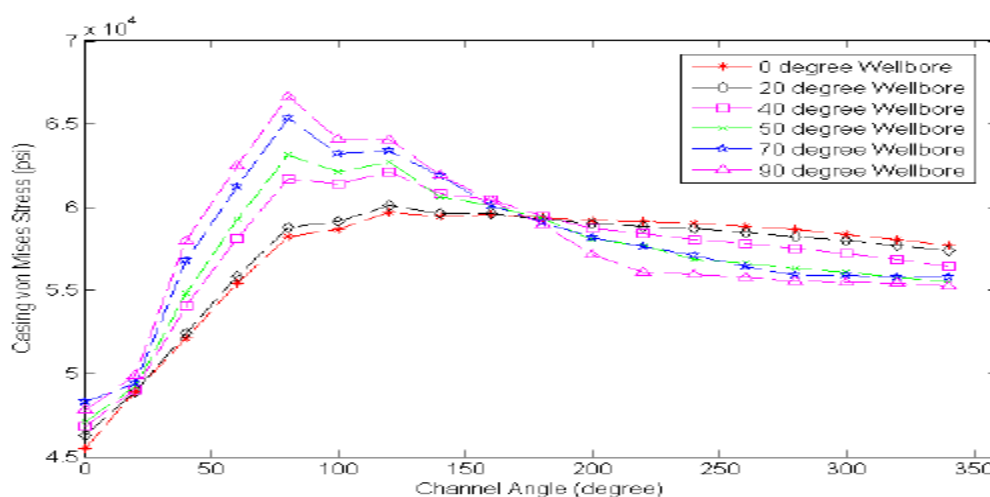
شکل ۲-۲۹: مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی (Pattillo et al, 2004).

یوآن و همکاران (Yuan et al.2012) به منظور بررسی اثر حفرات و کانال های سیمانی و نیز لنگی لوله جداری بر پایداری چاه و لوله جداری از مدل سه بعدی سازند، لوله جداری و سیمان در زاویه های صفر تا ۹۰ درجه از چاه با استفاده از نرم افزار ANSYS و تحلیل اجزای محدود بهره بردند. اثر کانال های سیمانی در زاویه های مختلف از چاه در شکل (۲-۳۱) نشان داده شده است. با توجه به نمودار، در چاه با زوایای متفاوت بیشترین تنش فون میسس مایسس بر لوله جداری بین زوایای کانال های سیمانی بین ۸۰-۱۲۰ درجه رخ می دهد. همچنین هنگامی که زاویه چاه از ۰ تا ۹۰ درجه افزایش می یابد میزان تنش وان مایسس وارده بر لوله جداری نیز افزایش می یابد. و بیشترین میزان

تنش فون میسس برابر $6,7E4$ که در زاویه 90° از چاه و زاویه کانال سیمانی 80° رخ می-دهد.

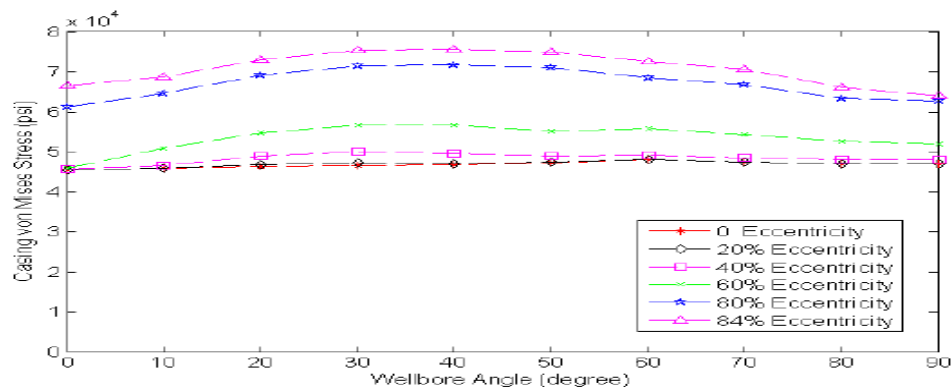


شکل ۲-۳۰: اجزای سیستم سازند، سیمان و لوله جداری (Yuan et al, 2012).



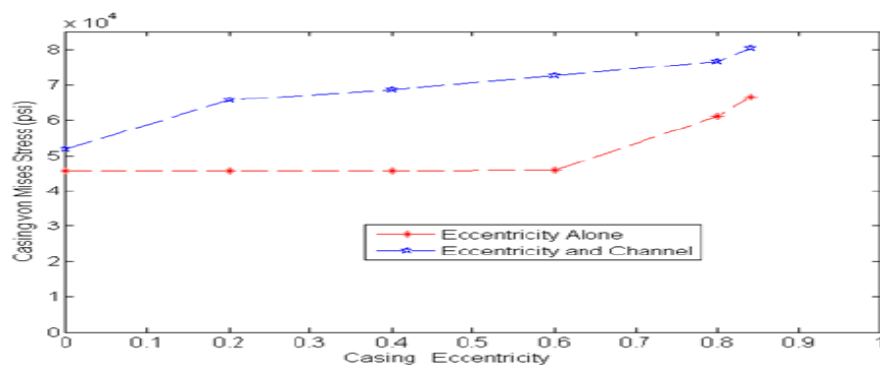
شکل ۲-۳۱: اثرات کانال های سیمانی و زاویه چاه بر تنش فون میسس لوله جداری (Yuan et al, 2012).

نمودار (۲-۳۲) اثر لنگی لوله جداری را نشان می-دهد. طبق نمودار در میزان لنگی های کمتر از 40% در زوایای مختلف چاه اثر لنگی بر تنش فون میسس ناچیز است. وهنگامی که میزان لنگی به 90% می-رسد و در زاویه چاه 30° تا 50° درجه بیشترین میزان تنش فون میسس برابر با $7,5E4$ PSI رخ می-دهد.



شکل ۲-۳۲: اثرات لنگی جداری و زاویه چاه بر تنش فون میسس لوله جداری (Yuan et al, 2012).

در نمودار (۲-۳۳) نیز اثر هم زمان وجود لنگی در لوله جداری و کانال سیمانی بر تنش وان مایسس وارده بر لوله جداری در یک چاه عمودی را نشان می‌دهد. طبق نمودار در چاه عمودی در میزان لنگی کمتر از ۶۰٪ اثر حداقل در تنش فون میسس وارده بر لوله جداری وجود دارد. و تحت شرایط وجود هم زمان لنگی و کانال‌های سیمانی میزان تنش فون میسس به میزان ۵۶٪، بزرگتر از حالتی است که کانال‌های سیمانی وجود ندارند.



شکل ۲-۳۳: اثر لنگی جداری و کانال‌های سیمانی بر تنش فون میسس لوله جداری (چاه قائم) (Yuan et al, 2012).

۸-۲- نتیجه گیری

پدیده گسیختگی لوله جداری باعث ایجاد اختلال در تولید و نیز خارج شدن چاه از چرخه تولید شده و در نهایت هزینه‌های قابل توجهی را به شرکت‌های نفتی کشور تحمیل می‌نماید. پارامترهای زیادی در ایجاد شرایط بحرانی و متلاشی شدن لوله‌های جداری دخیل هستند که به پارامترهای ذاتی و محیطی تقسیم بندی می‌شوند. از این رو از فرمول‌های تجربی برای پیش‌بینی فشار گسیختگی در طراحی لوله جداری استفاده شده است. هر یک از فرمول‌ها تأثیر برخی از پارامترها را لحاظ کرده‌اند. آدامز بر اساس قابلیت اطمینان، رابطه تامانو را بهترین رابطه معرفی کرده است اما هانگ بر اساس مدل‌سازی، رابطه تامانو را غیر محافظه کارانه نشان داده است. روابط تجربی متفاوتی برای مچالگی لوله تحت شرایط الاستیک (Clinedinst, 1939)، پلاستیک (Holmquist and Nadai, 1939) و الاستوپلاستیک (Issa, 1993; Tokimasa, 1986) ارائه شده است. اما نتایج مطالعات انجام شده به روشنی نشان داده است که هیچ کدام از این معادلات تجربی به دلیل فرضیات بسیار زیاد و از طرفی عدم در نظرگیری بسیاری از شرایط دخیل در آسیب لوله های جداری نمی‌توانند تخمین مناسبی از مقاومت نهایی لوله جداری ارائه کنند (Huang et al., 2000). تمامی مشکلات بیان شده و پیچیدگی‌های موجود بر سرراه تخمین مقاومت لوله‌های جداری به دلیل وجود پارامترهای تأثیرگذار فراوان باعث شده تا روش‌های عددی به عنوان روشی مؤثر برای مدل‌سازی در این شرایط استفاده گردند (Wang and Dusseault, 2003; Huang et al, 2000; Zhao et a, 2011; Zengxin and Gao, 2009; Gholami and Rasouli, 2012).

فصل سوم

میدان مورد مطالعه

۱-۳- مقدمه

با توجه به آنچه که در فصول گذشته بیان شد، هدف از مطالعه حاضر بررسی گسیختگی و مدل سازی این پدیده می باشد. در این راستا، میدان نفتی مارون در جنوب غربی ایران انتخاب شده است. چاه های حفر شده در این میدان همواره شاهد مشکلات ناپایداری و گسیختگی لوله جداری بوده است. بنابراین، این میدان و یکی از چاه های حفر شده در آن برای انجام مطالعه حاضر انتخاب شده است که در ادامه مختصری در مورد سازندها و شرایط این میدان آورده شده است.

۲-۳- میدان نفتی مارون

میدان مارون در سال ۱۳۴۲ به روش لرزه نگاری اکتشافی کشف گردید. مارون در شمال شرقی شهر اهواز قرار گرفته است و همجوار با میادین کوپال از شمال، آغا جاری از شرق و اهواز از شمال غرب می باشد. به طور کلی این میدان در قسمت شرقی در حوزه عظیم فروافتادگی دزفول قرار دارد. میدان مارون دارای نفتی با عیار API ۳۳ و ۱,۵ درصد سولفور می باشد. ذخیره این میدان ۹,۵ بیلیون بشکه نفت و ۴۵ ترلیون فوت مکعب گاز بوده است که تا قبل از انقلاب ۱,۲۸۸ میلیون بشکه از آن تولید شده است. تاکنون در حدود ۴۰۰ حلقه چاه در این میدان حفر شده است و دارای ۶۵ کیلومتر طول و به طور متوسط ۷ کیلومتر عرض می باشد. در میدان مارون گسلی به همین نام وجود دارد. این گسل در شمال غربی گسل آغا جاری و در کمر بند زاگرس چین خورده قرار گرفته است و طول آن به ۵۰ کیلومتر می رسد (تقوی پور و شیخ زاده، ۱۳۸۶). شکل (۱-۳) نمایی از موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مارون را نشان می دهد.



شکل ۳-۱: موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مارون (کریمی و همکاران، ۱۳۸۵).

۳-۳- سازندهای منطقه مورد مطالعه

در این قسمت سازندهای میدان مارون مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا شرایط زمین شناسی و قابلیت در ایجاد تنش‌های گیریک‌نواخت بر اساس جنس سنگ در هریک از سازندها ارزیابی شود.

۳-۳-۱- سازند آغاچاری

این سازند از ماسه سنگ‌های آهکی قهوه‌ای تا خاکستری، مارن‌های گچ دار و سیلت استون تشکیل شده است. گاهی نیز عدسی‌های گچ دار در داخل آن مشاهده می‌شود. در خوزستان این سازند تا حدی دارای رخساره کولابی است.

۲-۳-۳- سازند میشان

این سازند از مارن‌های خاکستری رنگ و لایه‌های آهکی پوشیده از غشای دوکفه‌ای‌ها تشکیل شده است.

۳-۳-۳- سازند گچساران

این سازند پوشش مخزن نفتی آسماری به شمار می‌رود و به علت دارا بودن مقدار زیادی از گچ و نمک بسیار متحرک می‌باشد. جدول (۳-۱) سازندهای چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱: سازندهای چاه مورد مطالعه

سازند	سن	تاپ‌ها سازند (متر)	جنس
آغاجاری	میوسن - پلیوسن	۱۱۰۲	(سیلت سنگ - مارن سیلتی دارای رگه‌های نازک گچ)
			ماسه سنگ آهکی (قهوه‌ای تا خاکستری) و مارن و سیلت سنگ
میشان	میوسن	۲۶۸۸	مارن خاکستری و آهک مارنی
گچساران	میوسن	۲۹۵۸	بخش ۷- (انیدریت - مارن - آهک)
		۳۰۶۵	بخش ۶- (نمک - مارن - آهک)
		۳۲۴۰	بخش ۵- (مارن قرمز و خاکستری - انیدریت - آهک)
		۳۴۶۶	بخش ۴- (نمک ضخیم - مارن - آهک - انیدریت)
			بخش ۳- (انیدریت ضخیم - مقدار زیادی نمک - آهک - مارن)
		۳۵۳۵	بخش ۲- (نمک ضخیم - انیدریت - شیل بیتومن دار)
		۳۵۹۵	بخش ۱- (انیدریت ضخیم - آهک نازک و مقداری شیل بیتومن دار)
آسماری	الیگومیوسن	۳۶۶۰	آهک شکافدار - دولومیت - ماسه سنگ آهکی و شیل در پایین لایه
پابده	پالئوسن	۴۱۰۵	شیل خاکستری و لایه‌های نازک آهک رسی

۴-۳-۳- سازند مخزنی آسماری

نام این سازند از کوه آسماری در جنوب شرقی مسجد سلیمان گرفته شده است. سازند آسماری در سرتاسر منطقه جنوب غربی ایران (حوضه رسوبی زاگرس- خلیج فارس) گسترش یافته، در لرستان و ناحیه فارس رخنمون دارد و کم عمق ترین مخزن نفتی در جنوب غربی ایران محسوب می‌شود. سازند آسماری با ضخامت متوسط ۴۰۰ متر غالباً کربناته بوده که این سنگ کربناته ترکیبی از توالی آهک، دولومیت و شیل آهکی می‌باشد. همچنین در جنوب خوزستان ماسه سنگ به صورت بین انگشتی در کربنات وجود دارد. مارون در این منطقه که هر دوی کربنات و ماسه سنگ وجود دارد قرار گرفته است. پوش سنگ آن شامل بخش ۱ سازند گچساران با ترکیب مارن خاکستری و انیدرید می باشد و در زیر آن مارن‌های شیلی پابده قرار دارند که احتمالاً سنگ منشأ آسماری می‌باشند. سازند آسماری از نظر سنی بر پایه سنگواره‌ها به سه بخش زیرین، میانی و زبرین تقسیم می شود. سن آسماری زیرین الیگوسن و سن آسماری میانی و فوقانی میوسن زیرین است. سن سازند بطور کلی الیگوسن تا میوسن زیرین است. تقریباً سه چهارم نفت درجای کشف شده در جنوب غربی ایران در مخزن آسماری انباشته شده است. جدول (۲-۳) خواص مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده سازند آسماری را نشان می‌دهد که در طول آزمایشات مکانیک سنگی بر روی نمونه‌های مغزه به دست آمده از این سازند ارایه شده است. این مقادیر می‌تواند برای مدل‌سازی سازند در مطالعه حاضر مفید باشد.

جدول ۳-۲: خواص مکانیک سنگی لایه‌های تشکیل دهنده سازند آسماری (طاهری، ۱۳۸۸).

نوع سنگ	تخلخل $\emptyset$ (%)	نفوذ پذیری K (md)	نسبت بواسون ν	مدول الاستیسیته E (GPa)	مقاومت کششی T (MPa)	چسبندگی C (MPa)	زاویه اصطکاک ϕ (درجه)	وزن مخصوص سنگ $\frac{KN}{m^3}$
کربنات	۱۲	۵۲۵	۰/۳	۵۰	۸/۱	۲۶/۱	۳۹/۱	۲۷
کربنات مارن	۱۴	۵۴۵	۰/۲۵	۳۰	۴/۷	۲۱/۵	۳۵/۳	۲۶
ماسه سنگ	۲۰	۵۵۰	۰/۲	۲۰	۴/۷	۲۱/۵	۳۵/۳	۲۴
شیل	۶	۵/۵	۰/۳	۸	۳	۹	۳۵	۲۵

۵-۳-۳- سازند پابده

لیتولوژی این سازند شامل مارن، شیل‌های آهکی و سنگ آهک‌های رسی است. بر اساس مطالعات انجام شده بر روی فسیل‌های به دست آمده از این سازند، سن این واحد چیزی میان پالئوسن تا الیگوسن تعیین شده است. مرز زیرین سازند پابده با سازند آهکی-شیلی گورپی مشخص می‌گردد. مرز فوقانی سازند پابده با سازند آسماری به صورت تدریجی است. سازند پابده در میدان نفتی اهواز متشکل از سنگ آهک‌های رسی خاکستری و مارن‌های خاکستری می‌باشد. سازند پابده در قسمت فوقانی متشکل از شیل و مارن‌های ماسه و سیلت دار به رنگ خاکستری است.

۳-۳-۶- سازند گورپی

لیتولوژی این سازند در محل مقطع نمونه شامل شیل‌های خاکستری مایل به آبی و سنگ آهک‌های شیلی می‌باشد که در اکثریت رخنمون‌ها از نظرتوپوگرافی طبیعت پست و فرسایش یافته‌ای را به نمایش می‌گذارد.

۳-۳-۷- سازند ایلام

این سازند شامل سنگ آهک سفید رنگ تا سفید شیری و مقدار کمی شیل است. حد بالایی این سازند با سازند گورپی به صورت هم شیب و حد پایینی آن با سروک به صورت دگرشیبی می‌باشد.

۳-۳-۸- سازند سروک

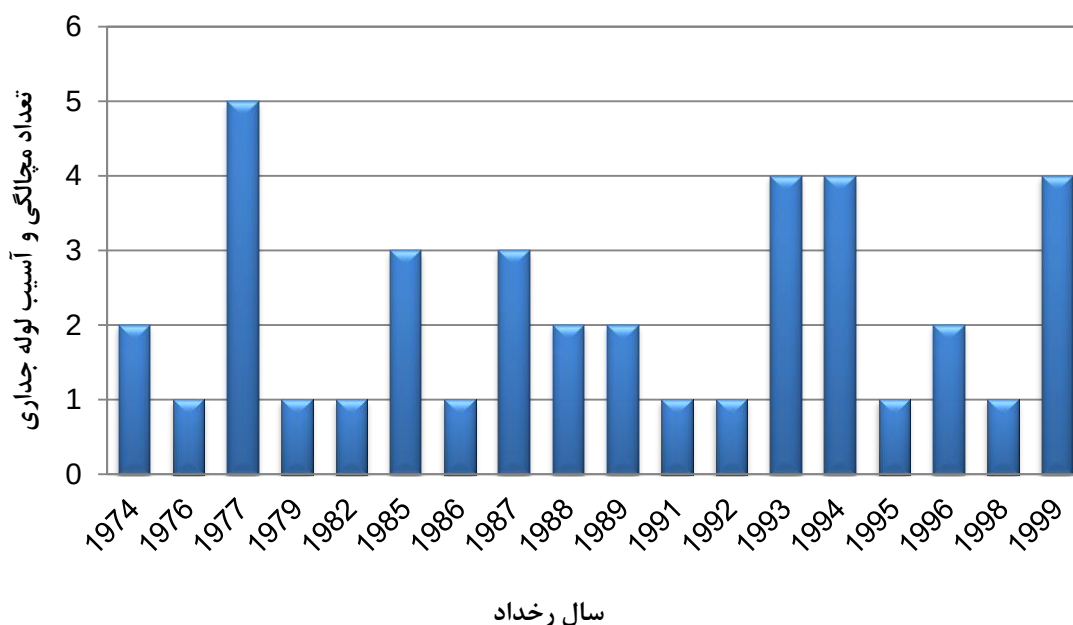
این سازند به طور عمده متشکل از مارن، شیل، سنگ آهک سفیدرنگ به همراه ندول‌های چرت، آهک رسی ریزدانه و آهک توده‌ای می‌باشد. در قسمت قاعده این سازند لایه‌هایی از آسفالت و قیر موجود است که به علت فشار نسبتاً زیاد در موقع حفاری، وزن گل بیشتری نسبت به بخش‌های بالاتر طلب می‌کند.

۳-۳-۹- سازند کژدمی

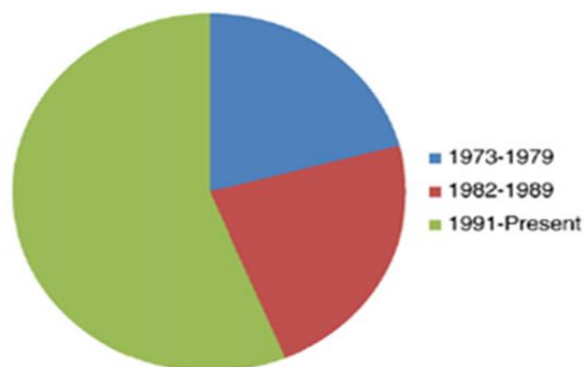
سازند کژدمی عمدتاً متشکل از شیل‌های قیری تیره رنگ با لایه‌ایی از آهک رسی تیره رنگ و مارن است. سازند کژدمی به صورت هم شیب توسط آهک‌های سروک پوشانده می‌شود.

۴-۳- گسیختگی لوله‌های جداری در میدان مارون

پدیده گسیختگی لوله جداری در میدان نفتی مارون یکی از مهمترین مشکلات این میدان پس از حفاری می‌باشد. این میدان نفتی در سال ۱۹۵۰ تولید خود را شروع کرده است اما پس از گذشت چند سال، پدیده گسیختگی لوله جداری در برخی از چاه‌های در حال تولید این میدان مشاهده شده است. در سال ۲۰۰۵ هزینه برآورد شده برای چاه‌های مشکل‌دار، در حدود ۲۴۰ میلیون دلار بوده است که به طور متوسط ۵ میلیون دلار سهم هر چاه می‌باشد (فارسی مدان، ۱۳۹۰). بر طبق گزارشات شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب و شرکت شولمبرژه، از زمان شروع تولید نفت در این میدان تا سال ۲۰۰۵، ۲۶۷ حلقه چاه در این میدان حفاری شده است که ۴۸ حلقه از آن‌ها دچار مشکل گسیختگی لوله جداری شده‌اند. این تعداد برابر با ۱۷,۵ درصد کل چاه‌های حفاری در این میدان می‌باشد (Rolf et al, 2006). شکل (۲-۳) نموداری از تعداد گسیختگی‌های لوله جداری در چاه‌های این میدان را در هر سال نشان می‌دهد.

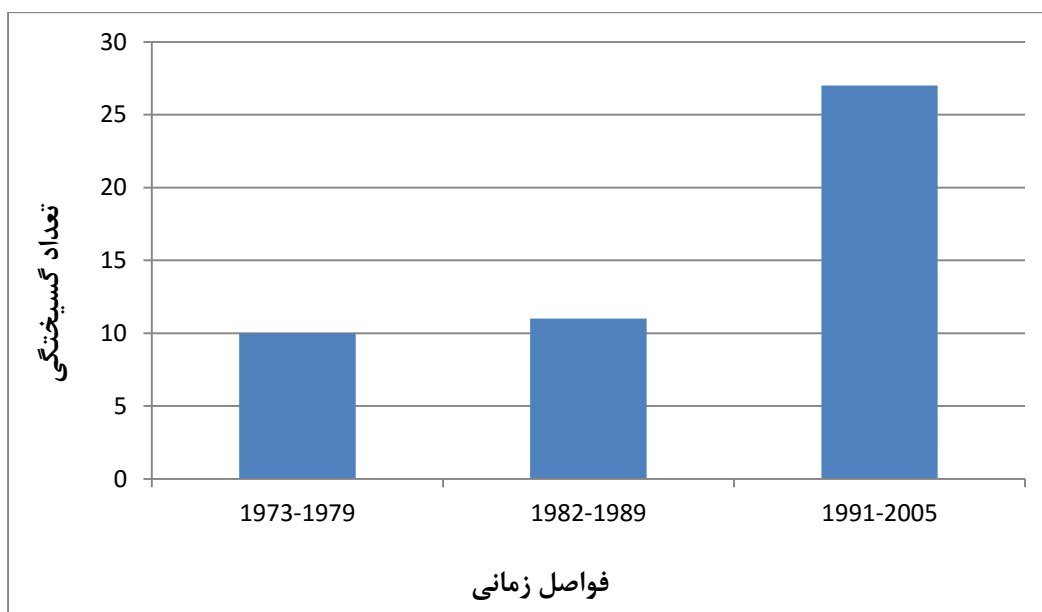


شکل ۲-۳: گسیختگی لوله جداری حاصل شده در طول هر سال (Salehi et al, 2009).



شکل ۳-۳: گسیختگی‌های لوله جداری در میدان مارون (Salehi et al, 2009).

گسیختگی‌های میدان مارون به سه دوره زمانی مختلف تقسیم شده‌اند که در نمودار شکل (۳-۳) نشان داده است. بیشترین تعداد گسیختگی در دوره زمانی سوم با تعداد ۲۷ حلقه چاه آسیب دیده می‌باشد که از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۵ میلادی اتفاق افتاده است. و شامل ۵۶ درصد کل چاه‌های آسیب دیده می‌گردد (فارسی مدان، ۱۳۹۰). جدول (۳-۳) خلاصه‌ای از گسیختگی‌های میدان مارون را نشان می‌دهد.



نمودار ۳-۴: تعداد گسیختگی در فواصل زمانی مختلف میدان مارون (فارسی مدان، ۱۳۹۰).

جدول ۳-۳: خلاصه‌ای از گسیختگی‌های لوله جداری (Salehi et al, 2009).

شماره چاه	تاریخ تکمیل	تاریخ مجاله شدگی	عمق مجاله شدگی	لوله آسیب دیده	تاپ سازند آسماری
۴	۱۹۶۵	۱۹۹۴	۲۵۷۸	L7	۲۷۶۰
۲۰	۱۹۶۸	۱۹۹۳	۲۷۵۲	L7	۳۲۹۶
۲۳	۱۹۶۸	۱۹۸۸	۳۳۶۴	L7	۳۳۹۱
۲۳	۱۹۶۸	۱۹۸۸	۲۸۲۷-۲۸۳۱	L7	۳۳۹۱
۲۳	۱۹۶۸	۱۹۹۸	۲۶۲۱	L5	۳۳۹۱
۲۹	۱۹۶۹	۱۹۸۲	۱۹۵۷	C 95/8	۳۵۲۳
۳۰	۱۹۶۹	۱۹۹۳	۱۵۷۵	C 95/8	۲۹۵۰
۳۲	۱۹۶۹	۱۹۹۹	۳۱۹۴	L7	۳۲۰۸
۳۴	۱۹۷۰	۱۹۸۷	۳۱۴۴	L7	۳۳۰۳
۴۰	۱۹۷۲	۱۹۸۵	۱۱۰۰-۱۲۵۰	C 95/8	۳۰۱۲
۴۲	۱۹۷۳	۱۹۷۴	۳۲۵۰	L7	۳۴۴۲
۴۵	۱۹۷۴	۱۹۷۶	۱۰۱۳	C 7	۲۷۹۵
۴۷	۱۹۷۷	۱۹۷۴	۳۱۷۳	L7	۳۳۴۶
۵۳	۱۹۷۴	۱۹۸۹	۲۸۳۰	L7	۳۴۵۲
۵۳	۱۹۷۴	۱۹۹۲		L5	۳۴۵۲
۵۵	۱۹۷۴	۱۹۷۴	۳۱۷۴	L5	۳۵۰۰
۵۹	۱۹۷۴	۱۹۷۶	۱۸۵۹	C 95/8	
۶۶	۱۹۷۵	۱۹۸۹	۳۱۵۰	L7	۳۳۵۸
۷۱	۱۹۷۵	۱۹۸۵	۲۱۳۷	C 95/8	۳۱۱۳
۷۴	۱۹۷۵	۱۹۷۷	۲۹۸۴	C7	۳۳۳۴
۷۵	۱۹۷۶	۱۹۸۵	۱۷۸۷-۱۷۹۷	C 95/8	۳۰۲۲
۷۹	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۱۹۲۳-۱۹۲۵	C 95/8	۳۲۷۱
۸۱	۱۹۷۶	۱۹۹۵	۳۰۱۰	C 95/8	۳۱۷۲
۸۲	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۳۵۳۵	L7	۳۴۰۶
۸۲	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۷۲۰۷	C 95/8	۳۴۰۶
۸۵	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۳۰۲۵-۳۰۵۷	L7	۳۲۶۵
۹۰	۱۹۷۶	۱۹۹۴	۳۳۶۹	L7	۳۵۰۸
۹۳	۱۹۷۶	۱۹۹۱		L5	
۹۵	۱۹۷۶	۱۹۹۴	۳۱۶۱	L7	۳۳۲۹
۹۸	۱۹۷۶	۱۹۸۶	۳۳۱۶	C 95/8	۳۱۳۳
۹۹	۱۹۷۶	۱۹۸۷	۲۳۱۷.۵	L7	۳۵۶۴
۱۰۳	۱۹۷۶	۱۹۸۷	۲۹۵۷	L7	۳۵۸۶
۱۰۸	۱۹۷۶	۱۹۷۹	۲۸۷-۲۹۰	C 95/8	۳۲۹۴
۱۱۸	۱۹۷۷	۱۹۹۱	۲۹۶۹	L7	۲۹۹۵
۱۲۶	۱۹۷۷	۱۹۷۹	۲۴۵	C 95/8	۳۳۶۲
۱۲۹	۱۹۷۷	۱۹۹۱	۲۰۲-۲۲۵	L5	
۱۳۰	۱۹۷۷	۱۹۹۲	۳۴۲۰	L7	۳۴۷۷
۱۳۳	۱۹۷۷	۱۹۹۳	۳۰۳۷	L7	۳۴۳۴
۱۷۳	۱۹۸۹	۱۹۹۶	۳۲۷۰	L5	۳۵۰۳
۱۷۴	۱۹۸۹	۱۹۹۴	۲۷۹۷	L7	۳۱۹۵
۲۰۹	۱۹۹۳	۱۹۹۳	۲۳۴۱	C 95/8	۲۸۴۶
۲۱۴	۱۹۹۳	۱۹۹۹	۲۲۶۵	L7	۳۱۷۸
۲۲۶	۱۹۹۶	۱۹۹۹	۲۵۷۰-۳۷۴۰	L7& C 95/8	۳۵۴۸
۲۲۹	۱۹۹۶	۱۹۹۶	۳۲۷۴-۳۴۴۶	L7	۳۴۹۹
۲۴۳	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۳۹۸	C 95/8	۲۵۲۱
۲۵۲	۱۹۹۹	۱۹۹۹		C 95/8	۳۰۷۱

در گزارش منتشر شده توسط اداره زمین شناسی مناطق نفت خیز جنوب، شواهدی در مورد عدم سیمان کاری خوب و مناسب در پشت لوله های جداری در اعماق گسیختگی چاه های آسیب دیده ارایه شده است. در این گزارش از اطلاعات حاصل از نمودارهای کیفیت سیمان (CBL^۱ و VDL^۲) استفاده شده است که عدم سیمان کاری خوب و در برخی از چاه ها عدم وجود سیمان در پشت لوله جداری در بخش ۲ تا ۴ گچساران در عمق گسیختگی را مشخص می کند (کریمی، ۱۳۸۱). این می تواند یکی از دلایل اصلی پدیده گسیختگی در این میدان باشد. اما دلایل دیگری نیز می تواند وجود داشته باشد که در فصل مربوطه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۵-۳- معرفی داده های مورد استفاده

داده های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به چاه شماره ۴۱۰ میدان مارون می باشد. داده های این چاه شامل نگارهای پتروفیزیکی مانند چگالی (RHOB)، DSI، صوتی (DT)، گاما (GR)، داده های MDT و لیک آف تست^۳ (LOT) می باشد. از آنجاکه نگارهای برداشت شده مربوط به عمق ۲۵۲۵ تا ۳۲۵۲ متری می باشد، مدل سازی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی بر اساس داده های این عمق انجام شده است. علاوه بر نگارهای فوق به منظور مدل سازی شرایط چاه و لوله های جداری از اطلاعات شرایط و خصوصیات سیمان کاری و لوله های جداری (طبق طبقه بندی API) در چاه مورد نظر نیز استفاده شده است.

^۱-Cement Bonding Log

^۲-Variable Density Log

^۳-Leak off Test

فصل چہارم

مدل سازی ژئومکانیکی

۱-۴- مقدمه

در این مطالعه به منظور مدل سازی مقاومت نهایی لوله های جداری از اطلاعات مربوط به یکی از چاه های میدان نفتی مارون استفاده شده است. برای ارزیابی مقاومت نهایی سازند، علاوه بر پارامترهای الاستیک و مقاومتی لوله جداری و سیمان، پارامترهای سازند در چاه مورد مطالعه نیز مورد نیاز هستند که در فصل حاضر چگونگی تعیین آن ها ارایه شده است.

۲-۴- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مطالعه

در ارزیابی بسیاری از مسایل مرتبط با مخازن هیدروکربوری از قبیل ماسه دهی^۱ شکست هیدرولیکی^۲، گسیختگی لوله جداری^۳ و.... تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ ها از قبیل ضرایب الاستیک، فشار منفذی، تنش های اصلی و مقاومت فشاری تک محوره ضروری است (Zoback, 2007). تعیین این پارامترها عموماً از طریق اطلاعات حاصل از مغزه های حفاری و استفاده از داده های چاه نگاری امکان پذیر است. دقیق ترین روش جهت تعیین پارامترهای سنگ انجام آزمایشات مکانیک سنگی بر روی نمونه های مغزه است. که به دلیل هزینه بر بودن و تعداد محدود نمونه ها، نمی تواند جهت مدل سازی پیوسته لایه های زیرسطحی استفاده شود. بنابراین، عموماً این پارامترها از طریق نگارهای چاه و کالیبراسیون آن ها از طریق داده های مغزه تعیین می شوند. در واقع در طول این فرآیند، مدل ژئومکانیکی^۴ سازند ساخته می شود که می تواند جهت بررسی پایداری چاه، تعیین تنش های برجا و اثرات آن بر روی لوله های جداری مورد استفاده قرار گیرد. متداول ترین نگارها که جهت تخمین پارامترهای الاستیک سنگ استفاده می شوند، نگارهای صوتی و چگالی هستند. با در اختیار داشتن این داده ها و استفاده از روابط الاستیک سنگ می توان پارامترهای ژئومکانیکی لایه های زیرسطحی را

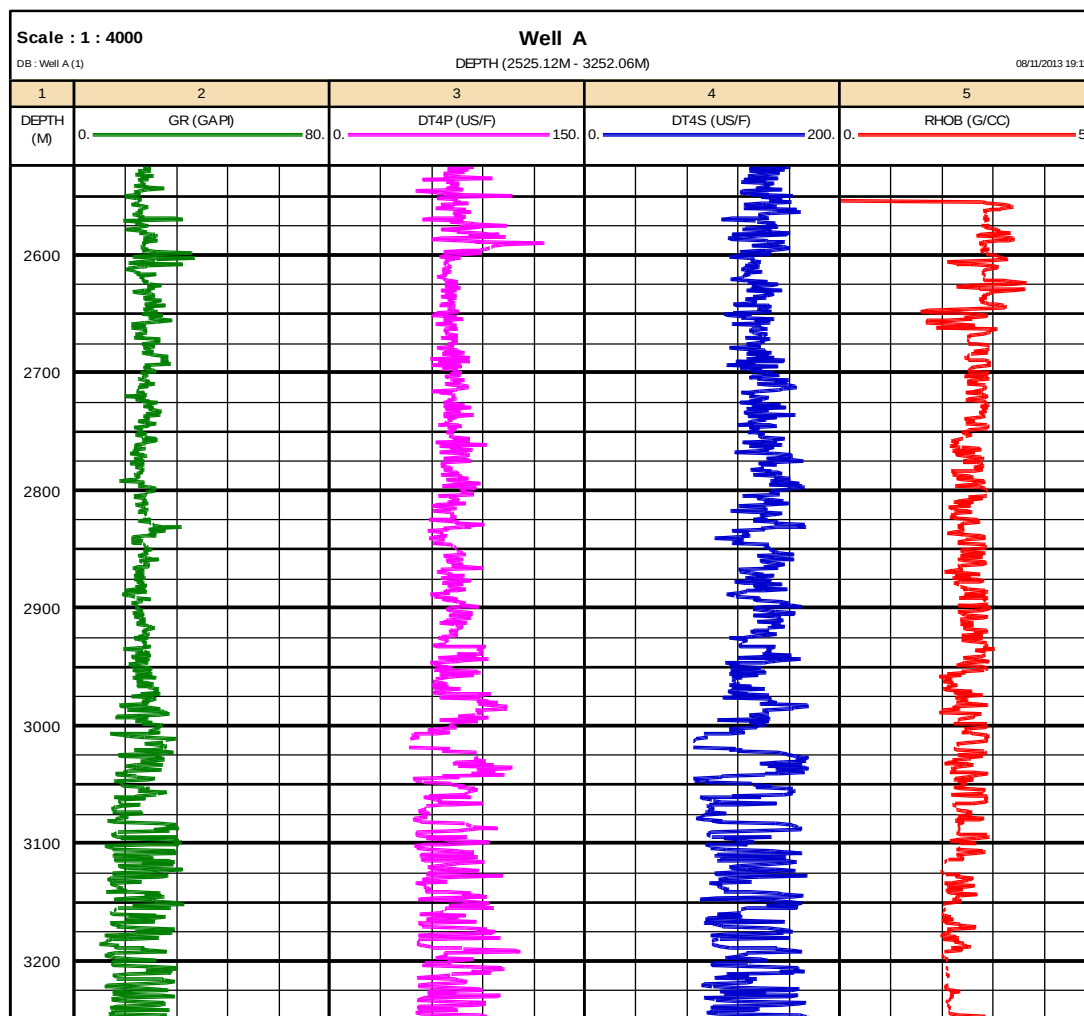
^۱Sand production evaluation

^۲Hydraulic fracturing

^۳Casing collapse

^۴Rock Mechanical Model (RMM)

به صورت دینامیکی پیوسته محاسبه نمود. این پارامترها سپس از طریق روابط تجربی و داده‌های مغزه به پارامترهای الاستاتیکی تبدیل می‌شوند. نگارهای استفاده شده در این مطالعه در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ : نگار گاما، صوتی و چگالی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

۴-۲-۱- تخمین پارامترهای الاستیک سنگ

پارامترهای الاستیک سنگ می‌توانند از طریق نگارهای صوتی و چگالی تعیین شوند. در واقع با استفاده از سرعت موج فشاری و برشی در کنار چگالی سنگ‌ها می‌توان ضرایب الاستیک دینامیکی

سنگ مخزن را محاسبه نمود. این پارامترها سپس باید از طریق روابط تجربی و داده‌های مغزه به پارامترهای استاتیکی تبدیل شوند. زیرا سرعت امواج نمی‌تواند دامنه کرنش لازم را برای تعیین دقیق پارامترهای الاستیک ایجاد کند. از آنجا که مدول‌های الاستیک سنگ در محاسبه بسیاری از پارامتر-های دیگر مانند فشار منفذی، تنش‌های منطقه، تغییرات لیتولوژی، محل شکستگی و ... چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، داشتن اطلاعات دقیق از سرعت امواج فشاری و برشی برای انجام محاسبات ضروری خواهد بود. سرعت موج فشاری می‌تواند از طریق نگار صوتی معمولی و نگار سرعت موج برشی دوقطبی (DSI) به دست آید در حالی که سرعت موج برشی تنها از طریق نگار DSI قابل محاسبه است. اما برداشت نگار DSI بسیار پر هزینه می‌باشد. به همین دلیل محققین بسیاری تلاش نموده‌اند تا سرعت امواج برشی را از طریق نگارهای دیگر چاه نگاری تعیین کنند (Castagna et al, 1985; Brocher, 2005). اما مقادیر به دست آمده از این روابط از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشد. به علاوه، اکثر روابط تجربی تنها برای میدانی که برای آن‌ها ارایه شده‌اند قابل استفاده هستند. خوشبختانه برای مطالعه حاضر نگار DSI و نگار RHOB برای محاسبه مدول‌های الاستیک دینامیکی سنگ که از طریق روابطه زیر تعیین می‌شوند، موجود بودند.

$$G_{dyn} = \rho V_S^2 \quad (4-1)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_S^2 - 2\rho V_S^2 \quad (4-2)$$

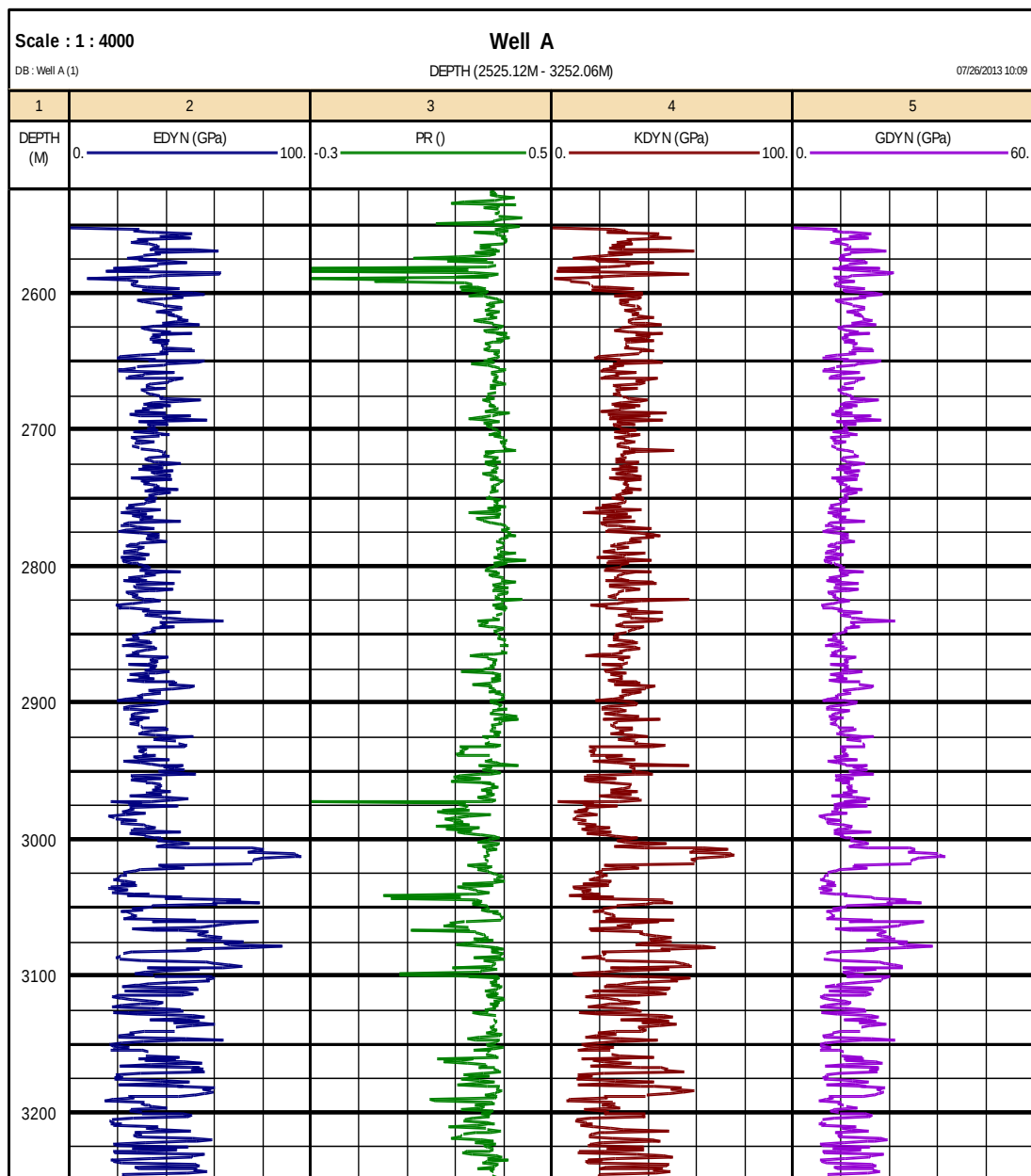
$$k_{dyn} = \rho V_P^2 - \frac{4}{3}\rho V_S^2 \quad (4-3)$$

$$E_{dyn} = \rho V_S^2 \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \quad (4-4)$$

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (4-5)$$

^۱ Dipole Sonic Imager (DSI)

در روابط بالا، V_P و V_S سرعت موج فشاری و برشی، ν نسبت پواسون، E مدول یانگ، G مدول برشی، λ مدول لامه و K مدول بالک دینامیکی می‌باشند. مدل‌های به دست آمده برای مدول‌های دینامیکی سنگ در بازه عمقی ۲۵۲۵ تا ۳۲۵۲ متر در چاه مورد مطالعه در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: نمودار مربوط به مدول الاستیک دینامیکی به دست آمده از چاه مورد مطالعه

۲-۲-۴- تبدیل پارامترهای الاستیک دینامیکی به استاتیکی

همانگونه که بیان شد، پارامترهای الاستیک سنگ از طریق نگارهای چاه تعیین گردیدند. این پارامترها ضرایب الاستیک دینامیکی هستند و با پارامترهای استاتیکی که از طریق نمونه‌های مغزه گرفته شده از چاه و انجام آزمایشات مکانیک سنگی به دست می‌آیند، متفاوت هستند. علت اصلی این تفاوت، دامنه کرنش است به طوری که مقدار دامنه کرنش برای حالت استاتیکی در حدود 10^{-2} تا $10^{-3} S^{-1}$ و در حالت دینامیکی حدود 10^{-6} تا 10^{-7} است (Mashinskii, 2009). منشأ فیزیکی این اختلاف می‌تواند ساختار و ساختمان فیزیکی و در واقع بافت ناهمگن سنگ‌ها باشد. در حقیقت در یک سنگ متخلخل، دو پارامتر سیال منفذی و ترک‌ها می‌توانند باعث افزایش اختلاف مدول‌های الاستیک سنگ در دو حالت دینامیکی و استاتیکی گردند (Rasouli et al, 2012).

همانگونه که بیان شد به دلیل مشکلات بسیاری که در زمینه تعیین پارامترهای استاتیکی به دلیل کمبود یا نبود مغزه وجود دارد، روابط تجربی فراوانی جهت تخمین این پارامترها وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان پارامترهای دینامیکی سنگ را به پارامترهای استاتیکی تبدیل نمود. این روابط برای مناطق خاصی استفاده شده است و با توجه به نوع منطقه و خصوصیات لیتولوژی آن متفاوت می‌باشند. در ادامه برخی از این روابط که جهت تبدیل پارامترهای الاستیک دینامیکی به استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارایه شده است.

عیسی و کازی (Eissa and Kazi, 1988) رابطه زیر را برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی (E_d) به استاتیکی (E_s) در سنگ آهک پیشنهاد داده‌اند.

$$E_s = 0.02 + 0.77 E_d \quad (۴-۶)$$

فجایر و همکارانش (Fjaer et al, 2008) رابطه (۴-۷) را برای سنگ آهک ارایه کردند:

$$E_s = 0.18 E_d^2 + 0.422 E_d \quad (۴-۷)$$

وانگ (Wang, 2000) رابطه (۴-۸) را برای سنگ آهک ارایه کرد:

$$E_s = 1.153E_d - 15.197 \quad (۴-۸)$$

جامبونیس (Jambunathan, 2008) روابط زیر را برای سنگ‌های کربناته مانند سنگ آهک (۴-۹) و دولومیت (۴-۱۰) ارایه کرد:

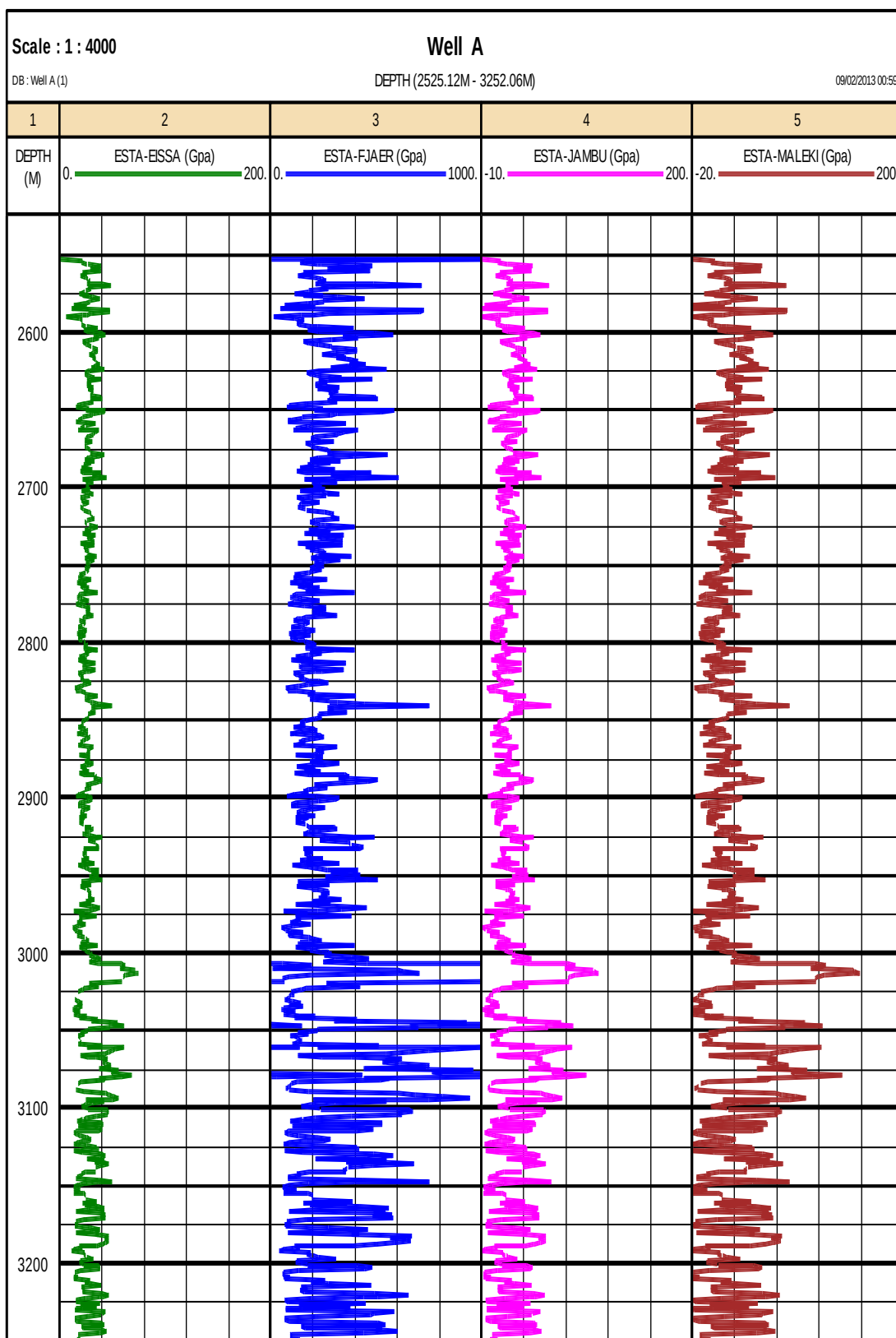
$$E_s = 1.43E_d - 32 \quad (۴-۹)$$

$$E_s = 0.84E_d + 0.7 \quad (۴-۱۰)$$

ملکی (ملکی، ۱۳۹۱) بر اساس مطالعات خود بر روی سنگ‌های کربناته رابطه زیر را ارایه نمود.

$$E_s = 2.2321E_d - 60.606 \quad (۴-۱۱)$$

در این مطالعه با کمک روابط (۴-۶) تا (۴-۱۱) مدول‌های یانگ دینامیکی به استاتیکی تبدیل گردیدند و به منظور کالیبراسیون به دلیل عدم وجود مغزه از خصوصیات مکانیک سنگی ارایه شده در جدول (۳-۲) استفاده شده است. با توجه به این مطلب، رابطه عیسی و کازی به عنوان بهترین رابطه برای تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی ارایه شد. شکل (۴-۳) مدل‌های استاتیکی به دست آمده از روابط مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمودار مدول‌های یانگ استاتیکی

۳-۲-۴- تعیین مقاومت فشاری تک محوری

دقیق‌ترین روش جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری انجام آزمایشات مکانیک سنگی بر روی نمونه‌های مغزه می‌باشد. اما از آنجا که این مغزه‌ها پراکنده و محدود بوده و از طرفی تعیین خواص مکانیک سنگی مانند مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه هزینه‌بر می‌باشد، تلاش‌های بسیاری برای تخمین مقاومت فشاری از طریق روش‌های غیرمستقیم مانند نگاره‌های چاه انجام شده است. هرچند که مقاومت سنگ نمی‌تواند به صورت مستقیم از طریق نگاره‌های چاه به دست آید، اما از طریق ارتباط میان پارامترهای الاستیک سنگ، تخلخل و سرعت موج، می‌توان دیدی در این زمینه ایجاد نمود. البته مدل‌های ساخته شده از این طریق نیاز به کالیبراسیون دارند.

روابط تجربی که جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوری ارائه شده‌اند، عموماً از مدول یانگ، زمان عبور موج فشاری و تخلخل جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بهره می‌گیرند. البته برخی از این روابط معمولاً برای نوع خاصی از سنگ یا لیتولوژی ارائه شده است. در ادامه برخی از روابط تجربی که جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری مورد استفاده قرار می‌گیرند ارائه شده است.

$$UCS = 0.035V_p - 31.5 \quad (۴-۱۲)$$

رابطه تجربی بالا برای ماسه سنگ‌ها و در یکی از مناطق کشور آلمان به کار رفته است (Freybourg, ۱۹۷۲).

کریستارس و همکاران (Christaras et al, 1997) بر اساس مطالعاتی که بر روی مجموعه سنگ‌های آهک، مارن، دولومیت، ماسه سنگ، هماتیت، سرپانتین، دیاباز و توف انجام دادند، رابطه زیر را برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس سرعت موج فشاری ارائه نمودند.

$$UCS = 9.9V_p^{1.21} \quad (۴-۱۳)$$

یاسر و اردوغان (Yaser and Erdogan, 2004) بر اساس مطالعاتی که بر روی مجموعه سنگ‌های آهک، دولومیت، مرمر، بازالت، تراورتن، ماسه سنگ و توف انجام دادند، رابطه زیر را برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس سرعت موج فشاری ارائه نمودند.

$$UCS = 21.677V_p + 0.0648 \quad (4-14)$$

زوباک (Zoback, 2007) براساس مطالعاتی که بر روی سنگ های کربناته انجام داد و روابط زیر را بر اساس مدول یانگ و تخلخل جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوری ارائه نمود.

$$UCS = 0.4067E^{0.51} \quad (4-15)$$

رابطه فوق برای سنگ آهک هایی که مقاومت فشاری تک محوره آن در بازه $10 < UCS < 300$ مگاپاسکال باشد کاربرد دارد.

$$UCS = 2.4E^{0.34} \quad (4-16)$$

رابطه فوق برای دولومیت هایی که مقاومت فشاری تک محوره آن در بازه $100 < UCS < 60$ باشد کاربرد دارد.

$$UCS = 143.8 \exp(-6.95 f) \quad (4-17)$$

رابطه (4-17) برای سنگ های کربناته با تخلخل کم تا متوسط ($0.2 > f > 0.05$) و مقاومت فشاری تک محوری بالا $10 < UCS < 300$ مگاپاسکال کاربرد دارد.

$$UCS = 135.9 \exp(-4.8 f) \quad (4-18)$$

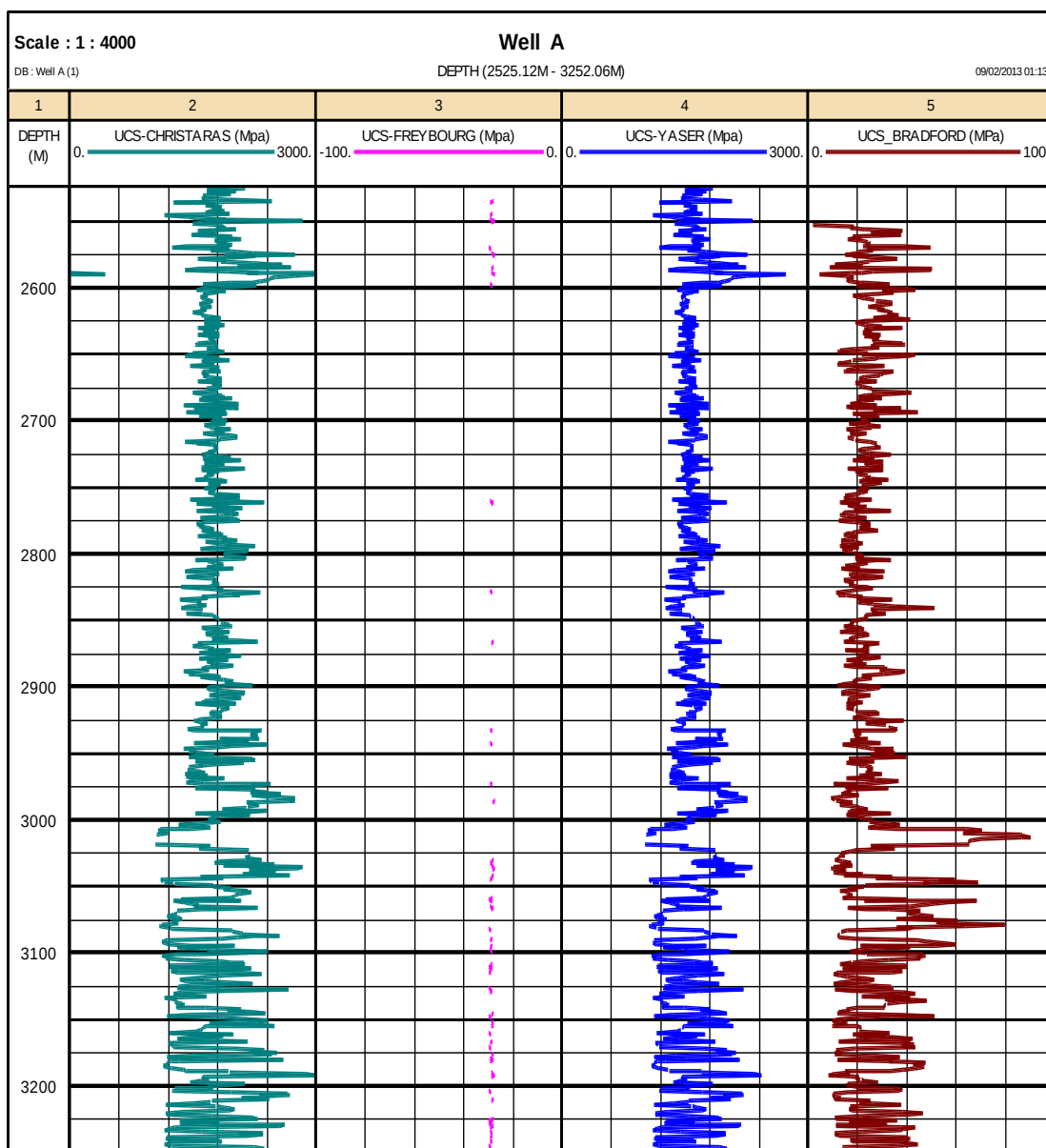
رابطه فوق برای سنگ های کربناته با تخلخل کم تا متوسط ($0.2 > f > 0$) و مقاومت فشاری تک محوری $10 < UCS < 300$ مگاپاسکال کاربرد دارد.

برادفورد و همکاران (Bradford et al., 1998) نیز با مطالعه بر روی سنگ‌های کربناته رابطه زیر را به منظور پیش بینی مقاومت فشاری تک محوری بیان نمودند.

$$UCS = 2.28 + 1.4E \quad (۴-۱۹)$$

در روابط فوق V_p (Km/s) سرعت موج فشاری، E (MPa) مدول یانگ، f (%) تخلخل و UCS (MPa) مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد.

باید توجه داشت که روابط تجربی ارائه شده جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری نیاز به کالیبراسیون دارند و در صورت استفاده باید نتایج از طریق داده‌های مغزه کالیبره گردند. شکل (۴-۴) مدل مقاومت فشاری به دست آمده از روابط فوق را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده و توجه به خصوصیات الاستیک سنگ رابطه برادفورد و همکاران به عنوان بهترین رابطه در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۴: مقاومت فشاری تک محوری به دست آمده از روابط مختلف

۴-۲-۴- تعیین فشار منفذی

فشار سیال منفذی از مهمترین پارامترها در تحلیل پایداری دیواره چاه و تغییرات ژئومکانیکی است. تخمین نادرست فشار منفذی مشکلاتی مانند فوران چاه، گیرکردن رشته لوله حفاری و... را به همراه

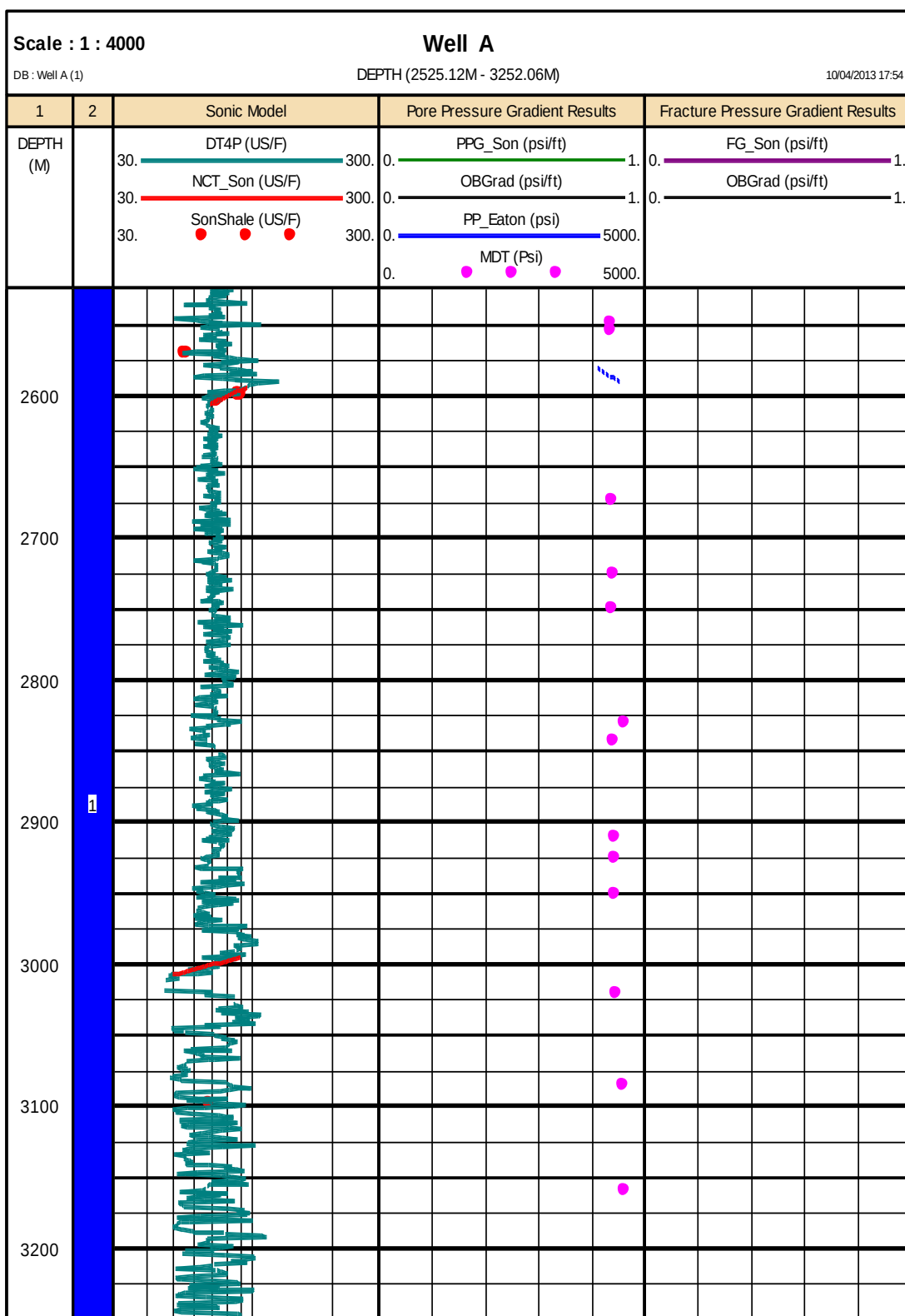
خواهد داشت. فشار منفذی از طریق ابزار^۱ MDT در اعماق مختلف اندازه‌گیری می‌شود. اما داده‌های MDT مربوط به چند عمق خاص و به صورت گسسته می‌باشند و نمی‌توانند مدل پیوسته‌ای از فشار منفذی را ارائه نمایند. روش‌های مختلفی جهت محاسبه فشار منفذی ارائه شده است که عموماً شامل روش‌های تجربی می‌باشند که معمولاً از نگارهای تخلخل، صوتی و مقاومت ویژه برای پیش‌بینی بهره می‌گیرند (Zhang, 2011).

در این مطالعه به منظور پیش‌بینی فشار منفذی از رابطه تجربی ایتون و سرعت عبور موج فشاری حاصل از نگار صوتی استفاده شده است (Eaton, 1975). برای کالیبراسیون نیز از داده‌های تست MDT استفاده شده است. رابطه تجربی ایتون رابطه متداولی است که به منظور پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی از طریق زمان عبور موج فشاری استفاده می‌کند. این رابطه به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{NCT}{\Delta t} \right)^3 \quad (۴-۲۰)$$

در رابطه فوق، NCT زمان عبور موج یا کندشدگی در فشار نرمال، Δt زمان عبور موج به دست آمده از نگار صوتی چاه، OBG گرادیان تنش روباره، P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (که معمولاً برابر با ۰,۴۵ psi/ft می‌باشد) و P_{pg} گرادیان فشار منفذی سازند می‌باشد. شکل (۴-۵) نمودار فشار منفذی که توسط مقادیر MDT کالیبره شده است را نشان می‌دهد.

^۱ Modular Dynamics Tester (MDT)



شکل ۴-۵ : نمودار مربوط به فشار منفذی به دست آمده از چاه مورد مطالعه

۵-۲-۴- تعیین تنش های برجا

تعیین مقدار و جهت تنش های برجا توزیع شده بر روی دیواره چاه به دلیل مشکلات ناپایداری به وجود آمده از آن ها و نیز امکان مچالگی لوله های جداری از اهمیت زیادی برخوردار است. در روابط کلی که جهت تعیین مقدار و جهت تنش های برجا استفاده می شود فرض بر آن است که یکی از تنش ها به صورت قایم و دو تنش دیگر به صورت افقی می باشند. در ادامه چگونگی تعیین این تنش ها ارائه شده است.

۱-۵-۲-۴- تعیین تنش عمودی

برای محاسبه تنش روباره از مقادیر چگالی سنگ که از طریق نگار چگالی (RHOB) به دست می آید استفاده می شود. در صورت عدم دسترسی به این نگار با توجه به آنکه این نگار تنها برای چند صد متر چاه در دسترس است، بایستی چگالی برای اعماق مورد نظر برون یابی شود. با توجه به این مطلب مقدار تنش روباره از سطح تا عمق مورد نظر طبق رابطه (۴-۲۱) و در صورت حضور آب از رابطه (۴-۲۲) قابل محاسبه است.

$$S_V = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (4-21)$$

$$S_V = \rho_w g Z_w + \int_{Z_w}^z \rho(Z) g dZ \cong \rho_w g Z_w + \bar{\rho} g (Z - Z_w) \quad (4-22)$$

در روابط فوق $\rho(z)$ چگالی سنگ در عمق z ، ρ_w چگالی آب، $\bar{\rho}$ چگالی متوسط لایه های سنگی، Z_w عمق آب و S_V تنش قایم می باشد.

۲-۵-۲-۴- تعیین تنش های افقی

تخمین تنش های افقی به مراتب پیچیده تر از تعیین تنش قائم می باشد (John et al, 1997). تنش های افقی شامل دوتنش افقی حداقل (σ_{hmin}) و حداکثر (σ_{Hmax}) می باشند که تعیین آن ها به دو روش مستقیم و غیرمستقیم امکان پذیر است. در روش مستقیم تنش افقی حداقل از طریق تست لیک آف تست، مینی فراکچر^۱ شکست هیدرولیکی^۲ و میکرو فراکچر^۳ برای نقاط خاصی از چاه و به صورت گسسته تعیین می شود. جهت تعیین پیوسته این تنش افقی می توان از روابط تجربی استفاده نمود. تنش افقی حداکثر نیز در صورت تعیین مقادیر تنش های عمودی و افقی حداقل، می تواند از طریق روابط پوروالاستیک^۴ تئوری گسلش اندرسون^۵ و استفاده از عرض شکستگی های برشی در چاه محاسبه شود. در ادامه برخی از روش های تجربی ارائه شده برای تعیین تنش های افقی ارائه شده است.

ایتون (Eaton, 1969) بر اساس مقادیر تنش روباره، فشار منفذی و نسبت پواسون رابطه زیر را به منظور تعیین تنش افقی حداقل بیان نمود.

$$S_{hmin} = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)(S_V - P_p) + P_p \quad (4-23)$$

هابرت و ویلیز (Hubbert and Willis, 1957) بر اساس داده های حاصل از شکست هیدرولیکی در یکی از نواحی خلیج مکزیک رابطه زیر را که از مقادیر فشار منفذی و تنش روباره استفاده کرده است را ارائه نمود.

$$S_{hmin} = 0.3(S_V - P_p) + P_p \quad (4-24)$$

^۱-Mini-Fracture Test

^۲-Hydraulic Fracturing

^۳-Micro-Fracture Test

^۴-Poro elastic

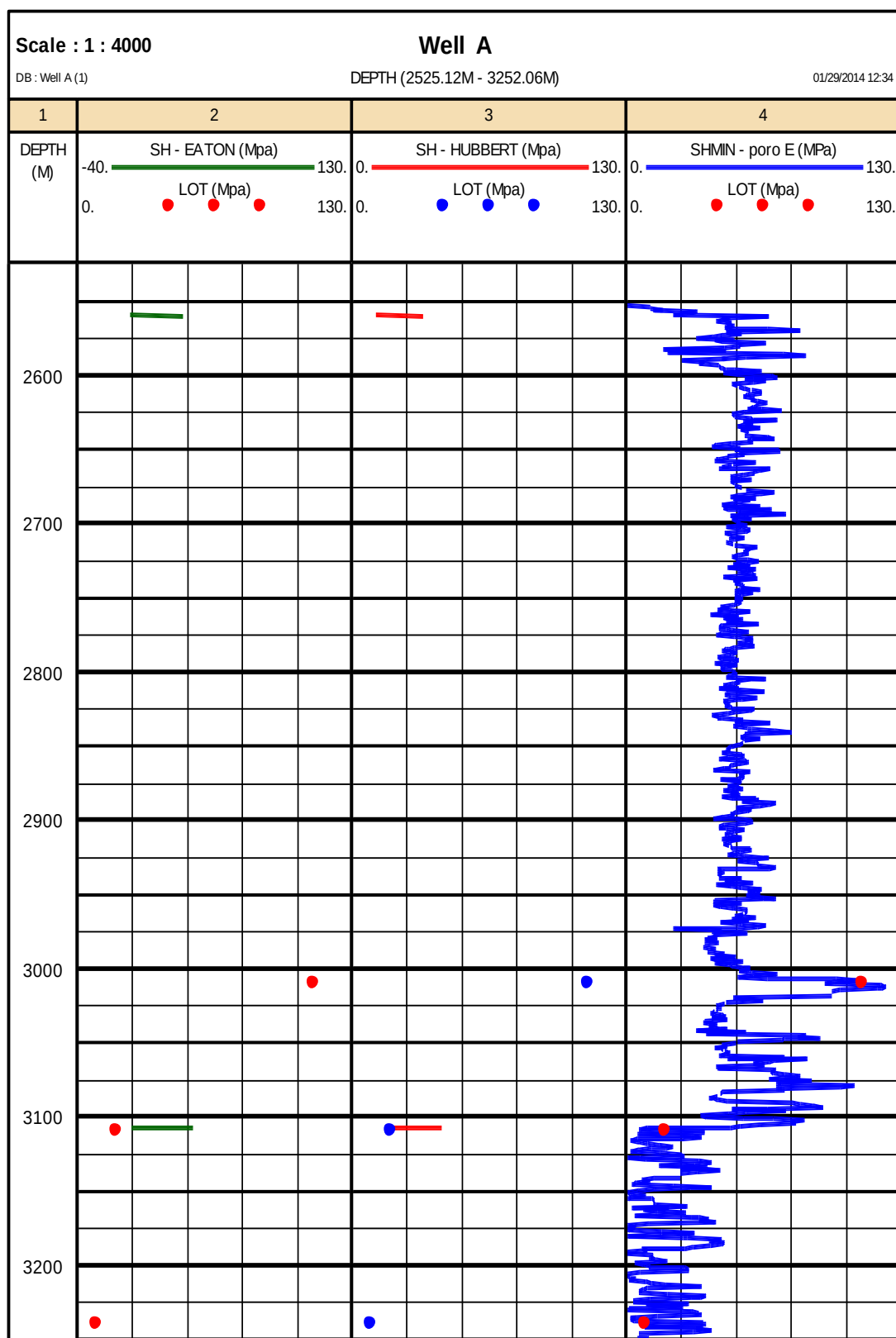
^۵-Anderson faulting theory

در این مطالعه از روابط پوروالاستیک که در ادامه آمده است جهت تعیین تنش‌های افقی حداقل و حداکثر استفاده شده است و نتایج از طریق داده‌های لیک آف تست کالیبره شده‌اند. این روابط از پرکاربردترین روابط جهت تعیین تنش‌های افقی می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شوند.

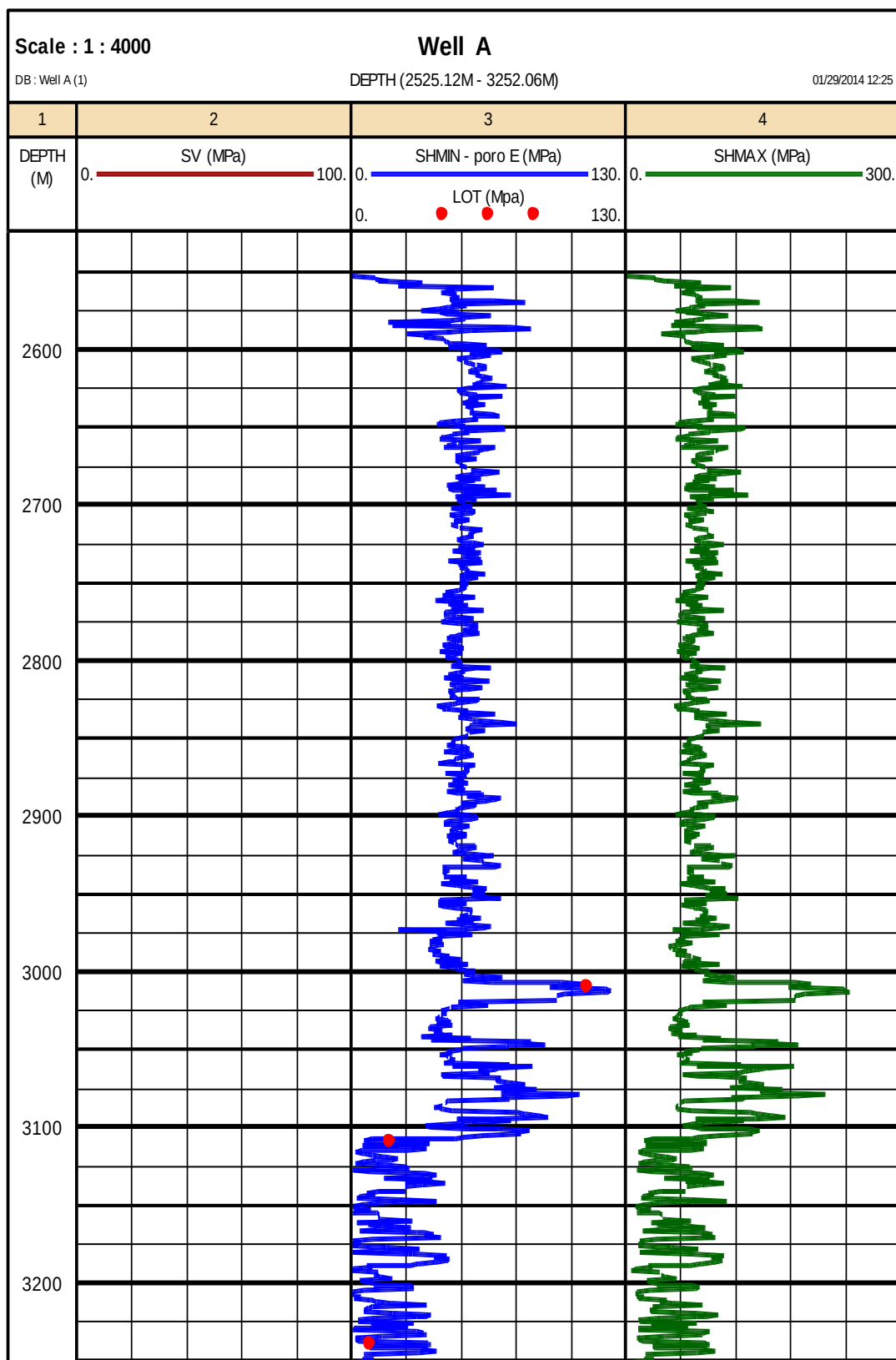
$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (4-25)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (4-26)$$

در روابط فوق α ضریب بایوت، ν نسبت پواسون، P_p فشار منفذی، ε_x و ε_y کرنش در جهت تنش‌های افقی حداقل و حداکثر می‌باشد. شکل (۴-۶) و (۴-۷) نمودار تنش‌های افقی به دست آمده از روابط مختلف که توسط مقادیر لیک آف تست کالیبره شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: نمودار کالیبره شده تنش‌های افقی توسط روابط مختلف



شکل ۴-۷: نمودار مربوط به تنش های برجا به دست آمده از چاه مورد مطالعه

همانگونه که در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی میان مقادیر تنش تعیین شده و مقادیر داده‌های LOT وجود دارد که نشان دهنده دقت بالای نتایج می‌باشد.

۳-۴- نتیجه گیری

در این فصل مدل‌سازی خصوصیات ژئومکانیکی سازندهای چاه مورد مطالعه شامل مدول‌های الاستیک، مقاومت فشاری تک محوری، فشار منفذی و تنش‌های سازند مربوطه محاسبه گردیدند. در فصل آینده این مقادیر به عنوان ورودی مدل سازی عددی که با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام خواهد شد، استفاده می‌گردند.

فصل پنجم

مدل سازی عددی

۱-۵- مقدمه

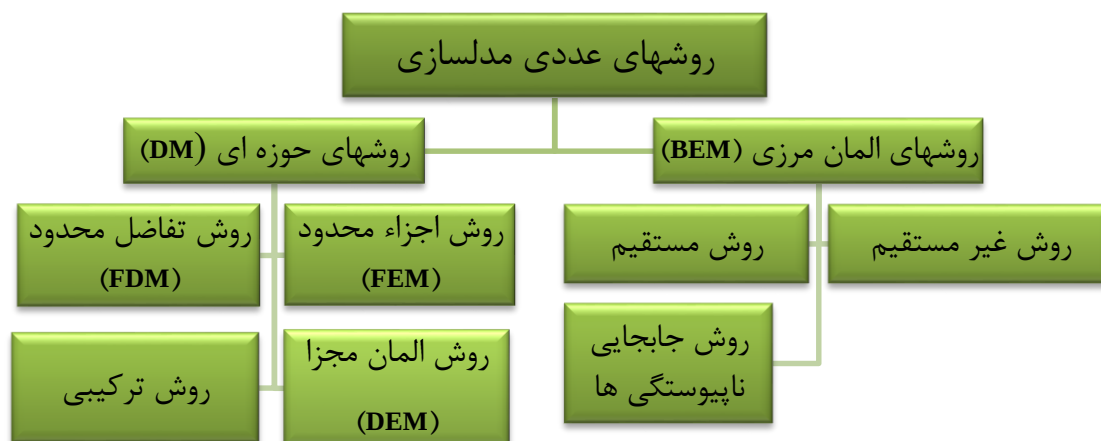
روش‌های تعیین مقاومت نهایی لوله‌های جداری چاه‌های نفتی در فصول قبل مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که روش‌های عددی به دلیل در نظرگیری بسیاری از پارامترهای مؤثر بر روی مقاومت نهایی لوله‌های جداری روش مناسب‌تری می‌باشند. در این فصل روش‌های عددی مختلفی که عموماً به منظور مدل سازی چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند ارائه خواهند شد. سپس توضیحاتی در زمینه نرم افزار ABAQUS که در این مطالعه استفاده شده است آورده می‌شود و در نهایت با معرفی پارامترهای مورد استفاده به منظور مدل سازی، مدل به دست آمده، ارائه و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۵- روش‌های عددی مدل سازی

روشهای عددی که برای مدل سازی چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند را می‌توان به دو گروه روش‌های المان مرزی^۱ و روش‌های حوزه ای تقسیم بندی نمود. هر یک از گروه‌های فوق به زیرگروه‌هایی تقسیم بندی می‌شوند که به صورت شماتیک در شکل (۱-۵) نشان داده شده است.

^۱-Boundary Element Method

^۲-Domain Method



شکل ۵-۱: انواع روش های عددی مدل سازی

۵-۲-۱- روش های المان مرزی

در روش های المان مرزی فضای اطراف منطقه حفاری به اجزای کوچکتر تقسیم بندی شده و محیط اطراف به صورت محیط نامحدود در نظر گرفته می شود. این روش به زیرگروه های زیر تقسیم بندی می شوند.

۵-۲-۱-۱- روش غیرمستقیم^۱ (تنش ساختگی)^۲

در این روش، در مرحله اول یک تنش ساختگی برای شبیه سازی تنش های اولیه در محیط اطراف فضای حفاری اعمال می شود و از آن برای محاسبه تنش ها و جابجایی های واقعی در توده سنگ استفاده می شود.

^۱-Indirect Method

^۲-Fictitious Stress

۲-۱-۵- روش مستقیم

در این روش، جابجایی‌ها مستقیماً از شرایط تعریف شده برای محیط اطراف فضای حفاری شده به دست می‌آید.

۲-۲-۵- روش‌های حوزه‌ای

در روش‌های المان مرزی، شرایط مرزهای حفاری به کل منطقه تعمیم داده می‌شود. اما در روش‌های حوزه‌ای توده سنگ به اجزای هندسی کوچکتر تقسیم بندی شده و به هر یک از این اجزاء، مشخصات لازم اعمال می‌گردد. رفتار مجموع این اجزاء و اثرات متقابل آن‌ها، بیانگر رفتار پیچیده کل مجموعه مدل می‌باشد. روش‌های اجزاء محدود^۱ و تفاضل محدود^۲ از جمله روش‌های این مجموعه بوده که محیط را به صورت پیوسته در نظر می‌گیرند. روش المان مجزا^۳ از دیگر روش‌های این مجموعه می‌باشد و هر بلوک سنگی را بصورت یک جزء واحد در نظر می‌گیرد. از روش‌های ترکیبی^۴ که ترکیبی از دو روش فوق می‌باشد به منظور کاهش معایب هر یک از این روش‌ها و استفاده از مزایای هر کدام از آن‌ها استفاده می‌شود.

۱-۲-۵- روش اجزاء محدود

در روش اجزاء محدود شرایط یک سری از نقاط (نقاط گره‌ای) درون سنگ به شرایط کلیه نقاط و گره‌های تشکیل دهنده مدل ارتباط داده می‌شود و مسئله با تقسیم کل منطقه به تعداد زیادی اجزاء حل می‌شود. در این روش زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد و خصوصیات مواد پس از مدل‌سازی با دقت مناسبی ارزیابی می‌شود. روش اجزاء محدود به خوبی قادر است تا درز و شکاف را مدل نماید و مورد

^۱-Finite Element Method (**FEM**)

^۲-Finite Difference Method (**FDM**)

^۳-Distinct Element Method (**DEM**)

^۴-Hybrid Method

تجزیه و تحلیل قرار دهد و حتی ناهمگنی و رفتار غیر خطی را به خوبی در مدل سازی وارد کند. اما استفاده از این روش برای مدل سازی مرزهای نامحدود، همانگونه که در اغلب حفاری های زیرزمینی رخ می دهد، بهترین انتخاب نمی باشد.

۲-۲-۵- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود شاید قدیمی ترین روش استفاده شده برای حل معادلات دیفرانسیلی باشد. در روش تفاضل متناهی، هر مشتق در دسته معادلات، مستقیماً توسط رابطه جبری نوشته شده و بر حسب متغیرهای موجود در نقاط مجزایی از فضا جایگزین می شود. در این روش مدل به اجزاء کوچکتر تقسیم می شود، خواص مواد به مدل داده شده و بارگذاری اعمال می شود. آن گاه با استفاده از برخی روش های توزیع مجدد بار نامتعادل و تعیین شرایط پایداری مدل، می توان به جواب قابل قبول دسترسی یافت. تفاضل محدود قادر به مدل سازی المان ها با خواص، اشکال و مقادیر مختلف است.

۳-۲-۵- روش المان مجزا

در شرایط واقعی زمین که عموماً شرایط بلوکی نامیده می شود، درزهای متقاطع می توانند گوه هایی از سنگ را تشکیل دهند. به عبارت دیگر هر یک از این قطعات سنگی می توانند آزادانه حرکت کنند و حتی جابجا شوند و جابجایی در محل تماس بلوک ها می تواند بیشتر از جابجایی توده سنگ باشد. در این گونه شرایط احتیاج به تعریف تعداد زیادی درز می باشد. در این مسائل استفاده از روش اجزاء محدود به علت رفتار بسیار خطی مدل، ناکارآمد می باشد. راه حل جایگزین برای حل این گونه مسائل، فرض بلوک آزاد است که می تواند با بلوک های احاطه کننده آن در سطح درز رابطه داشته باشد. این تعریف سبب می شود که نیازی به تعریف درزهای متعدد به صورت مجزا نباشند و علاوه بر آن می توان جابجایی های بزرگ را نیز مدل نمود. اینگونه مدل سازی را مدل سازی المان مجزا می نامند.

۴-۲-۵- روش ترکیبی

از این روش برای کاهش معایب یک روش و استفاده از مزایای روش دیگر استفاده می‌شود. به عنوان مثال در مدل‌سازی چاه می‌توان برای محدوده اطراف فضای حفاری شده که دارای رفتار غیر خطی می‌باشد از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود استفاده نمود و برای مکان‌های دورتر، که دارای رفتار خطی می‌باشند از روش‌های پیرامونی استفاده نمود. استفاده از روش‌های ترکیبی سبب کاهش چشمگیری در زمان انجام محاسبات می‌گردد.

۳-۵- تحلیل با استفاده از نرم افزار

برای تحلیل پایداری چاه و بررسی عوامل و پارامترهای مؤثر بر مقاومت نهایی لوله‌های جداری، امروزه با توسعه نرم افزارهای مناسب می‌توان با کمترین هزینه و در زمانی کوتاه، شرایط پیچیده محیط و وضعیت تنش‌های ایجاد شده را مدل‌سازی نمود. نتایج عددی که از این مدل‌سازی حاصل می‌شود، متأثر از پارامترهایی است که در مراحل مختلف فرایند مدل‌سازی وارد می‌شوند. در این بخش نرم افزار ABAQUS که در این مطالعه برای مدل‌سازی و ارزیابی مقاومت نهایی لوله‌های جداری استفاده شده است، معرفی می‌گردد.

۱-۳-۵- نرم افزار ABAQUS

ABAQUS یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود است و قابلیت حل مسائل ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را برخوردار می‌باشد. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسط، پاول^۱، سورنسون^۲، کارلسون^۳ و هییت^۱ ارایه شده است و دارای

^۱-Paul

^۲-Sorensen

^۳-Karlsson

مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی مدل‌سازی نمود. ABAQUS همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت شده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابل استفاده می‌باشد.

نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش-تعییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم افزار می‌توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، مکانیک خاک و... را مورد مطالعه قرار داد. استفاده از نرم افزار ABAQUS با وجود اینکه مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. به عنوان مثال، حتی در مدل‌هایی با درجه غیرخطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مسأله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط بارگذاری و مرزی آن مسأله را در اختیار داشته باشد تا مدل‌سازی را به سادگی انجام دهد. اغلب ابزارهای مورد نیاز برای مدل‌سازی به سادگی در دسترس قرار می‌گیرند و برای حل تمامی مسائل شرایط خاص آن در نرم افزار در نظر گرفته شده است. در یک تحلیل غیرخطی، ABAQUS به طور اتوماتیک میزان نمو بار و خطای همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آن‌ها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسأله را تعیین کند.

۱-۳-۵- محیط نرم افزار ABAQUS

نرم افزار ABAQUS/CAE به مدول‌های متفاوتی تقسیم شده است که به همراه خصوصیات در جدول (۵-۱) آورده شده‌اند. همچنین شکل (۵-۲) محیط نرم افزار را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱: محیط های نرم افزار ABAQUS

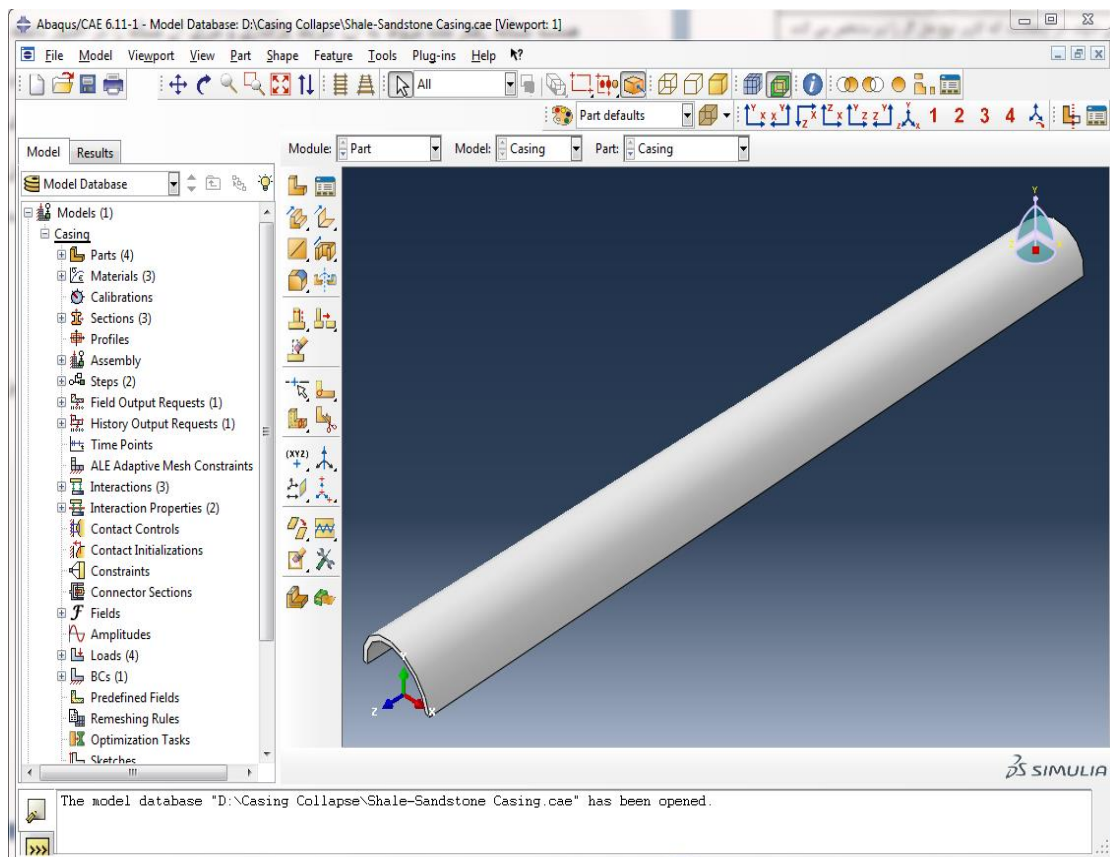
نام محیط	خصوصیت محیط
Part	در این محیط مدل سازی هندسی قطعات انجام می گیرد.
Property	در این محیط تعریف خصوصیات مواد مورد تحلیل، تعریف پروفیل سطح مقطع، نسبت دادن خواص تعریف شده به قطعات و.... انجام می گیرد.
Assembly	در این محیط مونتاژ قطعات مختلف در صورت وجود در یک تحلیل انجام می گیرد. در واقع موقعیت هندسی قطعات را کاربر تعیین می کند.
Step	در این گام های حل مساله انتخاب می شوند. در اینجا است که کاربر نوع حل گر را نیز مشخص می کند.
Interaction	در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعیین می شود.
Load	در این محیط بارگذاری و شرایط مرزی تعیین می گردد.
Mesh	در این محیط المان بندی مدل انجام می شود.
Job	در این محیط با تعریف یک job، کاربر شروع حل مسئله را به پردازشگر اعلام می کند.
Visualization	در این محیط کاربر نتایج حل را مشاهده می کند.

پس از انجام تحلیل، نرم افزار خروجی هایی را به عنوان نتایج در اختیار کاربر قرار می دهد. به صورت پیش فرض، نرم افزار خروجی های متعددی را در اختیار کاربر قرار می دهد که در صورت لزوم می توان خروجی ها را پیش از انجام تحلیل تعیین نمود تا از زمان اجرای تحلیل کاسته شود. نتایج خروجی را می توان به دو صورت کلی زیر دریافت نمود.

الف) نتایج میدانی^۱: خروجی ها در این حالت به صورت توزیع رنگ روی مدل نمایش داده می شوند. پارامتر خروجی نشان داده شده روی مدل در گوشه بالای سمت چپ مشخص می شود و مقدار آن در کنار هر رنگ مشخص است. لذا با توجه به رنگ بندی و مقادیر مربوطه روی مدل توزیع مقادیر پارامتر

^۱-Field output

مربوطه روی مدل مشخص می‌شود. برخی از متغیرهای خروجی نتایج میدانی در جدول (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: محیط نرم افزار ABAQUS

جدول ۲-۵: برخی متغیرهای خروجی نرم افزار ABAQUS

متغیر خروجی	خصوصیت خروجی
S	مولفه‌های تنش
PE	مولفه‌های کرنش پلاستیک
PEEQ	کرنش پلاستیک معادل
PEMAG	مقدار کرنش پلاستیک
U	تغییر مکان‌ها و دوران‌ها
RF	نیروها و گشتاورهای واکنشی

ب) نتایج وابسته به زمان^۱ خروجی ها در این حالت به صورت نمودار بر اساس زمان نشان داده می شود.

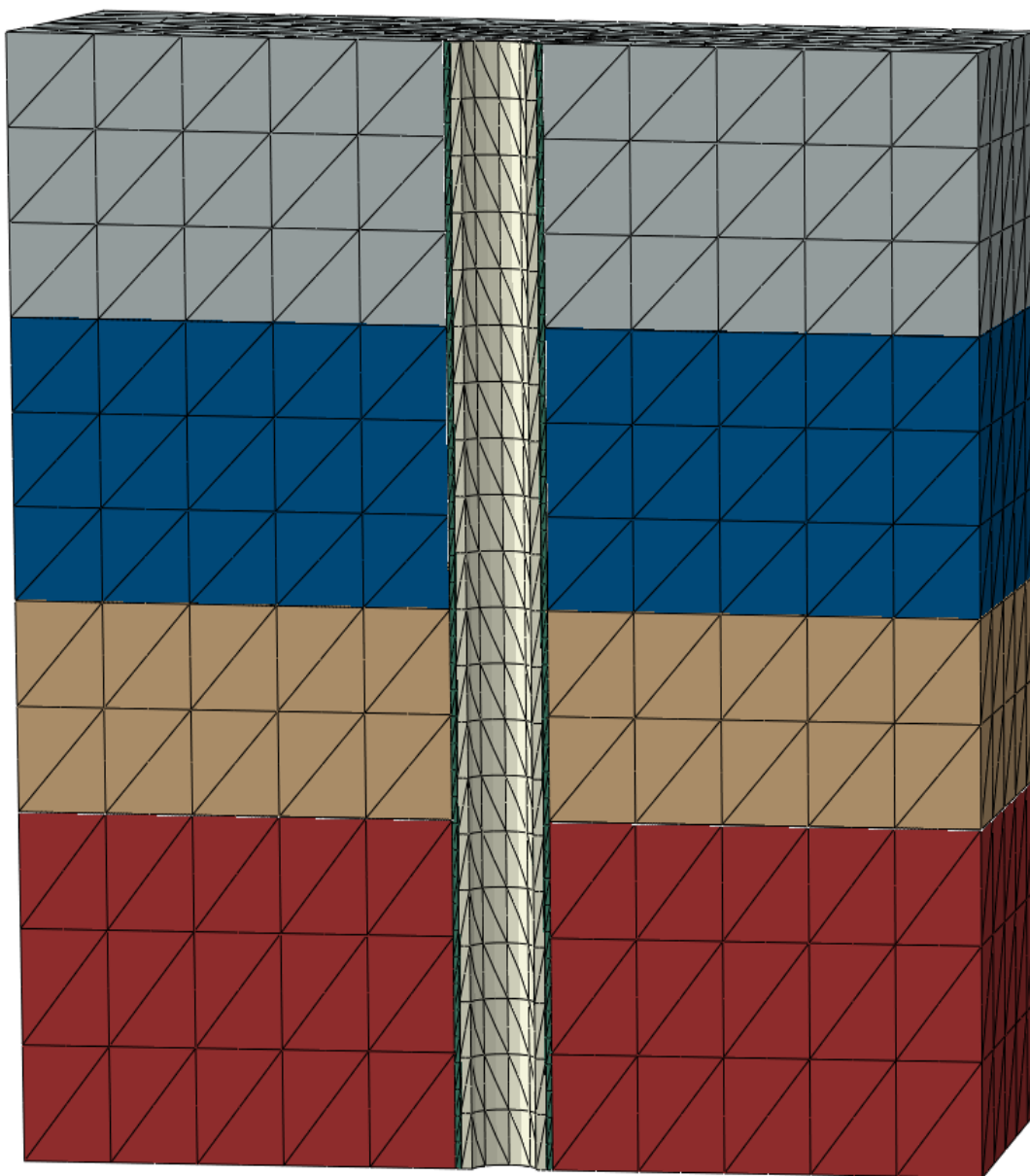
۴-۵- مدل سازی

در این مطالعه به منظور بررسی مقاومت نهایی لوله جداری با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدلی سه بعدی از شرایط چاه، لوله جداری موجود و سیمانکاری اطراف آن ایجاد گردید. پارامترهای ورودی مورد نیاز به منظور مدل سازی شرایط چاه شامل پارامترهای ژئومکانیکی سازند (که مدل سازی آن ها در فصل گذشته انجام شد)، خصوصیات سیمان و لوله جداری مورد استفاده در چاه می باشد. جهت انجام مدل سازی ابتدا مدل هندسی قسمت های مختلف ایجاد گردیدند و خصوصیات مواد و ویژگی های هرکدام از آن قطعات به آن ها داده شد. پس از این مرحله به منظور تحلیل و بررسی تطابق مدل های ساخته شده، کار مونتاژ قطعات بر روی یکدیگر انجام شد. جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و تماس بین سطوح ایجاد شده، تماس بین سازندها و سازند با سیمان، چسبنده^۲ و تماس بین سیمان و لوله جداری، بدون اصطکاک^۳ در نظر گرفته شد. همچنین بارهای وارده بر لوله جداری از جمله تنش های سازند و... نیز از طریق تنش های تعیین شده در قسمت قبل بر مرزهای مدل اعمال شد. در نهایت با مش بندی هریک از قطعات ایجاد شده، پردازش و تحلیل توسط نرم افزار صورت گرفت و خروجی های لازم به منظور بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر روی مقاومت لوله های جداری مشاهده شد. مدل سازند ساخته شده در مدل سازی عددی دارای چهار لایه است که به ترتیب سازند آغاجاری، میشان، گچساران و آسماری می باشد. شکل (۳-۵) مدل ساخته شده را نشان می دهد.

^۱-History output

^۲-Cohesive

^۳-Frictionless



شکل ۵-۳: مدل ساخته شده در نرم افزار ABAQUS برای شبیه سازی مقاومت نهایی لوله جداری

۵-۴-۱- شرایط و پارامترهای مدل سازی

همانگونه که در قسمت قبل بیان شد، در مطالعه حاضر به منظور شبیه سازی مقاومت نهایی لوله جداری، رفتار و اندرکنش میان لوله جداری، صفحات سیمانی و سازند با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شد. در این راستا، تنش های برجا، بر اساس مدل سازی ژئومکانیکی فصل قبل به صورت ناهمسانگرد مدل شدند و اثر سیال حفاری در داخل لوله جداری به عنوان فشار داخلی

بر روی مقاومت مکانیکی لوله جداری در نظر گرفته شد. اثر فشار منفذی از طریق در نظر گرفتن نفوذپذیری و المان‌های پوروالاستیک به مدل اعمال شد. به منظور تحلیل و شبیه سازی اثر کمانش بر لوله، لوله جداری به صورت ماده‌ای الاستیک-پلاستیک مدل سازی شد. از آنجا که شکل کمانش لوله جداری متقارن خواهد بود، نیمی از مدل تجزیه و تحلیل شد. مش بندی لوله جداری با المان‌های ۴ گره و به صورت پوسته‌ای (نوع S4R) انجام شد، در حالی که المان‌های ۸ گره‌ای از نوع تنش (نوع C3D8) و ۱۰ گره‌ای سیال منفذی از نوع تنش (نوع C3G10) به ترتیب به منظور شبیه سازی سیمان بندی و سازند استفاده گردیدند. با انجام شبیه سازی با بعدهای مختلف و در نظرگیری ابعاد بزرگتر و مش ظریفتر دقت و صحت مدل سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مش‌های در نظر گرفته شده برای سازند که در شکل (۳-۵) نشان داده شده اند، قادر است نتایج مناسبی را ارایه کند. به علاوه، به دلیل پیچیدگی مدل و اندرکنش‌های در نظر گرفته شده، در نظر گرفتن مش‌های ریز باعث آسیب به کامپیوتر خواهد شد. معیار دراگر-پراگر برای سازند، معیار پلاستیسیته فون میسس برای لوله جداری و معیار موهر-کلمب برای سیمان کاری مد نظر قرار گرفت. اثر مرزها^۱ نیز از طریق الگوریتم تماس شبیه سازی گردید به نحوی که تماس بین لوله جداری و سیمان بدون اصطکاک^۲، تماس بین لایه‌های سازند و سازند با سیمانکاری چسبنده^۳ همراه با اندکی لغزش در نظر گرفته شد. به منظور ساده سازی در انتها نیز سیال سازند یک فازی فرض شد. در ادامه معادلات معیارهای استفاده شده که نرم افزار ABAQUS از آن‌ها برای مدل سازی حاضر استفاده می کند، بیان شده است. خصوصیات سیمان و لوله جداری استفاده شده در این مطالعه که از طریق گزارشات و بروشورهای چاه به دست آمده در جداول (۳-۵) و (۴-۵) آورده شده است.

۱-□□□□□□□□

۱-□□□□□□□□□□

۲-□□□□□□□□

جدول ۵-۳: خصوصیات مکانیکی استفاده شده برای سیمان در مدل سازی عددی

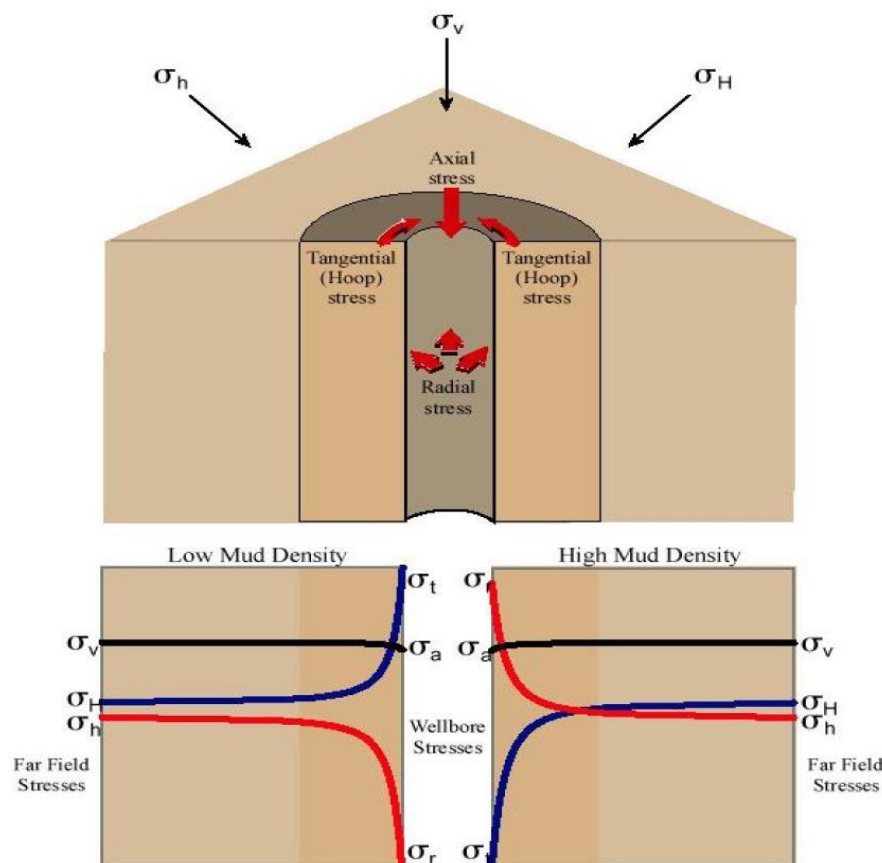
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	خصوصیات مکانیکی سیمان
۲۰	۰,۳۲	۸,۵	مقدار

جدول ۵-۴: خصوصیات مکانیکی استفاده شده برای لوله جداری در مدل سازی عددی

تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	خصوصیات مکانیکی لوله جداری
۳۷۵	۰,۲۶	۲۰۰	مقدار

۱-۴-۵- تنش‌های برجا

قبل از حفاری چاه، تنش‌های موجود در درون سنگ‌ها در وضعیت تعادل با همدیگر قرار داشته و به تنش‌های برجا یا اولیه موسوم اند. هنگام حفاری، این تعادل بین تنش‌ها برهم خورده و یک آشفتگی بین آن‌ها به وجود می‌آید که باعث آرایش جدیدی از تنش‌ها در اطراف دیواره چاه می‌شود. در این شرایط سه تنش جدید در اطراف دهانه چاه ایجاد می‌شود که به ترتیب تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری می‌باشند. در چاه‌های قائم، تنش مماسی در اثر تنش‌های مؤثر اولیه ایجاد می‌شود در حالی که تنش شعاعی در اثر اعمال سیال حفاری بر فضای داخلی دیواره چاه پدیدار خواهد شد. شکل (۵-۴) چگونگی تغییرات و تبدیل تنش‌های اصلی اولیه به تنش‌های اطراف دیواره چاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: تغییرات و تبدیل تنش‌های اصلی اولیه به تنش‌های اطراف دیواره چاه (Mengjiao et al, 2003).

با تعیین تنش‌های وارد بر دیواره چاه، عموماً این معیارهای شکست سنگ هستند که برای تعیین چگونگی و شرایط گسیختگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که در مطالعه حاضر، سازند، سیمان و لوله جداری با استفاده از معیارهای دراگر-پراگر، موهر-کلمب، و فون میسس انجام شده است، این معیارها در ادامه به صورت مختصر ارایه می‌شوند.

۲-۱-۴-۵- معیارهای شکست

در سازندهای اطراف چاه، زمانی که فشار سازند (تنش مماسی) با فشار درون چاه (تنش شعاعی) متفاوت باشد شکستگی‌های کششی و برشی در دیواره چاه ایجاد می‌شوند که از طریق معیارهای شکست قابل پیش‌بینی هستند. هر کدام از این معیارها با ایجاد رابطه بین چند پارامتر، سعی در

توصیف شرایط شکست دارند. به عنوان مثال، معیار موهر-کلمب^۱ ارتباط بین تنش نرمال و تنش برشی را در حالت شکست توصیف می کنند. معیار گریفیث^۲ مقاومت کششی تک محوره را بر حسب انرژی کرنشی مورد نیاز برای توزیع و گسترش میکروشکاف ها و مقاومت فشاری تک محوره را بر حسب مقاومت کششی توصیف می کند. در صنعت نفت، به خصوص به منظور پایداری چاه از معیارهای موهر کلمب، دراگر-پراگر^۳ و فون میسس^۴ به عنوان معیارهای شکست برشی استفاده می شود و نتایج قابل قبولی از آن ها به دست آمده است.

البته باید این نکته را در نظر داشت که نتایج به دست آمده از این سه معیار ممکن است دارای تفاوت-هایی باشد. بعنوان مثال مک لیان^۵ و آدیس^۶ در سال ۱۹۹۰ مقایسه ای کلی بر روی معیارهای دراگر-پراگر و موهر-کلمب انجام دادند. مقایسه بین این دو معیار نشان داد که برای حالت تنش های متداول، مقاومت و استحکام به دست آمده توسط موهر-کلمب به دلیل نادیده گرفتن اثر تنش اصلی میانی (σ_2) کم تخمین زده خواهد شد. در حالیکه نتایج معیار دراگر-پراگر به حالت واقعی نزدیکتر است.

۱-۲-۱-۴-۵- معیار موهر کلمب

موهر-کلمب مدل مرسوم برای نشان دادن شکست برشی در خاک و سنگ است. برای مثال، ورمیر^۷ و دبورست^۸ در سال ۱۹۸۴ گزارشی از نتایج آزمایشگاهی برای ماسه و بتون ارایه کردند که با نتایج معیار موهر-کلمب مطابقت داشت. طبق نظریه موهر-کلمب، تنش قائم و برشی حداکثر، هیچ یک به تنهایی سبب گسیختگی نمی شوند بلکه ترکیبی بحرانی از آن ها است که منجر به گسیختگی می شود.

^۱ Mohr-Coulomb

^۲ Griffith

^۳ Drucker-Prager

^۴ vanMisses

^۵ Mclean

^۶ Addis

^۷ Vermeer

^۸ Deborst

طبق این نظریه، گسیختگی در یک صفحه وقتی رخ می دهد که در آن رابطه زیر میان تنش برشی و قایم برقرار باشد (Hudson and Harrison, 1997).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (5-1)$$

در رابطه بالا، σ_n تنش نرمال، C چسبندگی و φ زاویه اصطکاک داخلی است. این معیار تاثیر تنش میانی σ_2 بر مقاومت سنگ را نادیده می گیرد و عموماً مقاومت سنگ را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند. این معیار در شرایط آزمایش سه محوره ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$) به صورت معادله زیر بیان می شود.

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (5-2)$$

در رابطه فوق، C_0 مقاومت فشاری تک محوره و q پارامتری ثابت است که از طریق رابطه زیر تعیین می گردد.

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5-3)$$

مقاومت فشاری تک محوره (σ_c) و مقاومت کششی (σ_t) تک محوره نیز از روابط زیر تعیین می شوند.

$$\sigma_c = C_0 = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5-4)$$

$$\sigma_t = \frac{2C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (5-5)$$

۲-۲-۱-۴-۵- معیار شکست فون میسس

این معیار اثر سه تنش اصلی را در نزدیک چاه بر روی شکست سنگ بررسی می کند و به صورت زیر عنوان می شود:

$$J_{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5-6)$$

$$S = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5-7)$$

در این رابطه S میانگین تنش های اصلی می باشد.

برای بررسی شکست سنگ مقادیر σ_1 و σ_2 و σ_3 از طریق تست سه محوره و یا از طریق روابط و معادلات خاصی تعیین می شود و سپس بر روی محورهای مختصات (J_2^1 بر حسب S) منحنی شکست رسم می شود (Boyun and Ghalambor, 2002).

۳-۲-۱-۴-۵- معیار شکست دراگر-پراگر

این معیار در واقع، بسط داده شده معیار فون میس می باشد. معیار دراگر-پراگر برای مدل سازی سنگ های سست و خاک با زاویه اصطکاک کم مناسب می باشد. به هر حال چون شیل ها بیش از ۷۵٪ سازندهای حفاری شده را تشکیل می دهند و مسبب بیش از ۹۰٪ مشکل ناپایداری چاه می باشند (Mengjiao et al, 2003)، این معیار عموماً برای سازندها در نظر گرفته می شود. این معیار به صورت زیر بیان می شود.

$$\sqrt{J_2} = A J_1^{ef} + B \quad (5-8)$$

$$J_1^{ef} = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{3} - P_p \quad (5-9)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2] + \sigma_{r\theta}^2 + \sigma_{\theta z}^2 + \sigma_{rz}^2 \quad (5-10)$$

در اینجا J_1^{ef} تنش مؤثر متوسط می باشد و طبق این معیار، شکست وقتی اتفاق خواهد افتاد که تنش مؤثر گسیختگی^۱ (σ_{cl}) در هر نقطه کمتر از صفر شود. این شرایط به صورت زیر بیان می شود:

$$\sigma_{cl} = \text{Failure Index (FI)} = -\sqrt{J_2} + A J_1^{ef} + B \leq 0 \quad (5-11)$$

^۱-Collapse

ضرایب ثابت در معیار دراگر- پراگر را می‌توان از طریق خواص الاستیک، مانند مدول یانگ و نسبت پواسون محاسبه کرد. مک لیان و آدیس در سال ۱۹۹۰ مقدار ضرایب A و B را به صورت زیر ارائه کرده‌اند (Mengjiao et al, 2003).

$$A = \frac{2\sqrt{2} \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (5-12)$$

$$B = \frac{2\sqrt{2}c \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (5-13)$$

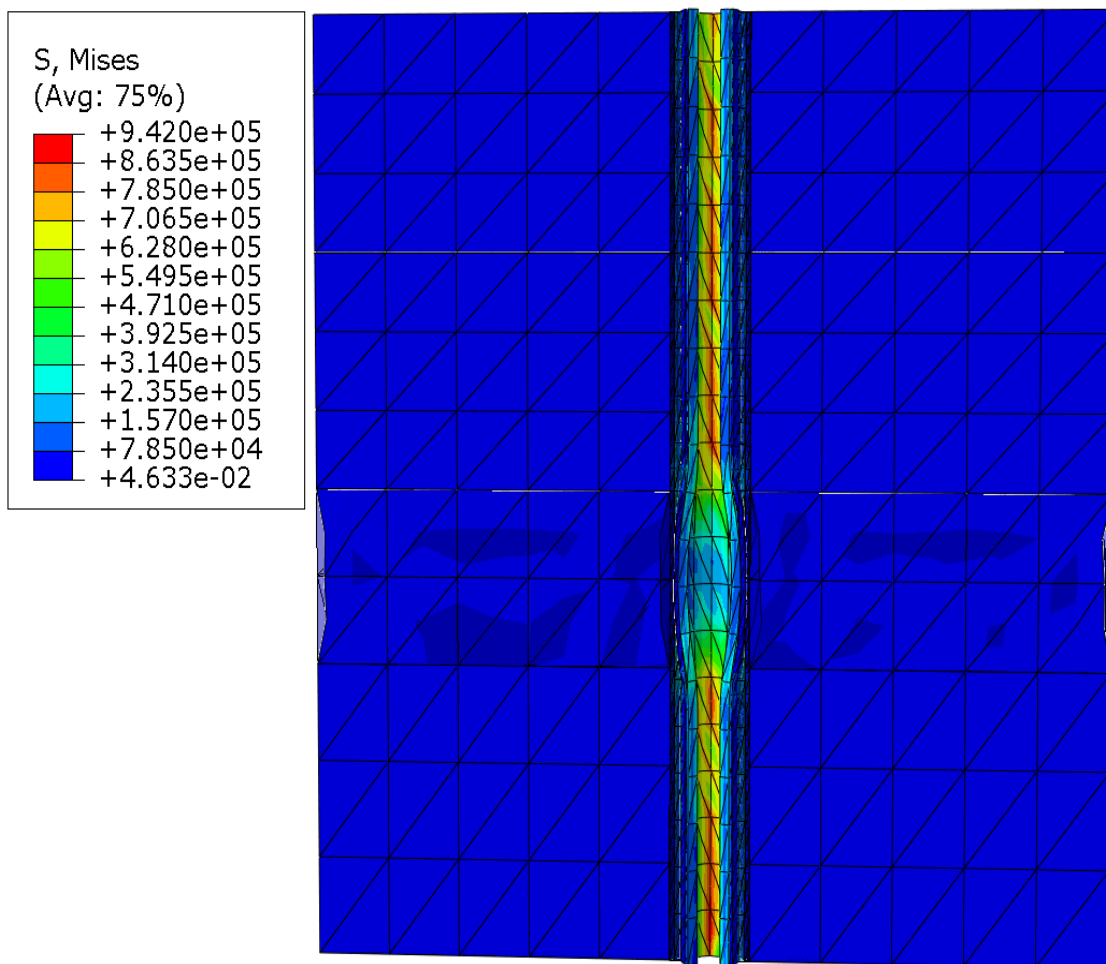
۲-۴-۵- گام‌های مدل سازی

برای مدل‌سازی گسیختگی لوله جداری، در نظر گرفتن گام‌های دقیق مدل‌سازی ضروری است. در این راستا برای مطالعه حاضر، ابتدا مدل در شرایط استاتیک و در نظر گرفتن تخلخل اولیه، تنش مؤثر و فشار منفذی به تعادل رسانده شد. گام حفاری با حذف قسمتی استوانه‌ای شکل با قطر مشخص از سازند انجام شد. به منظور دست یابی به توزیع تنش در نزدیکی چاه پس از حفاری، عناصر درون چاه در این مرحله از مدل حذف شدند. همچنین فرض شد که لوله جداری نصب و بلافاصله بعد از حفاری سیمان شده است. بنابراین بعد از افزودن اجزای سیمان و لوله جداری به مدل فشاری برابر با فشار هیدرواستاتیک گل حفاری بر سطح داخلی لوله جداری وارد شد. تماس بین سطح سازند و سیمان با معرفی یک مدل تماسی با این قابلیت که قابلیت جدا شدن از یکدیگر را داشته باشند اما در یکدیگر نفوذ نکنند مدل‌سازی شد. به منظور غلبه بر مشکل همگرایی مدل، فرض شد که سیمان سطح خارجی لوله جداری را به صورت کامل پوشانده است.

۳-۴-۵- نتایج مدل سازی

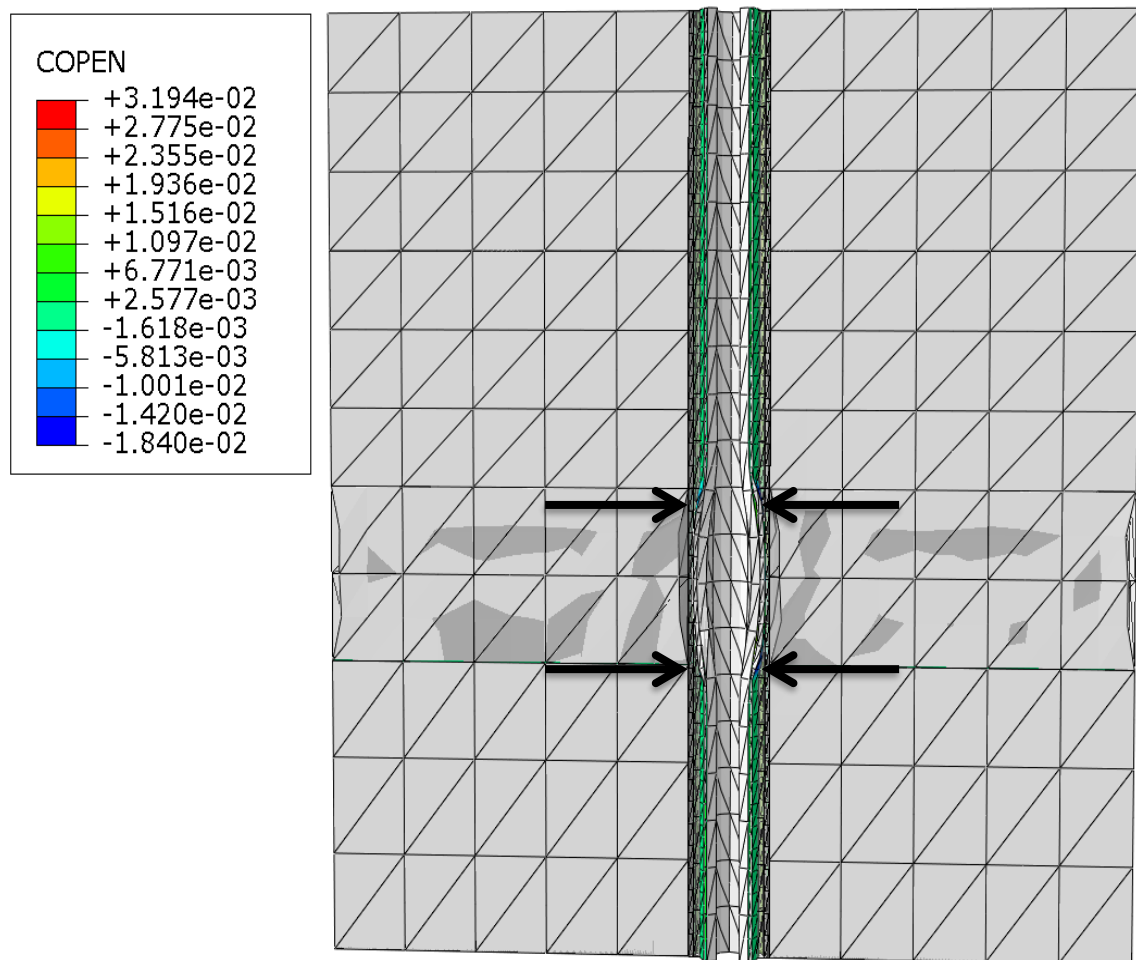
نکته مهم در مدل‌سازی، ارزیابی اثر تنش‌های برجای ناهمسانگرد بر روی مدل است. از آنجاکه گسیختگی لوله جداری در چاه مورد نظر به کرار اتفاق افتاده بود، بررسی اثر تغییر تنش بر مقاومت

سازند و سیمانکاری اطراف آن بسیار حیاتی به نظر می‌رسید. همانگونه که در فصل قبل نشان داده شد، تنش وارد بر سازند در قسمت پوش سنگ به شدت ناهمسانگرد است که این می‌تواند یکی از دلایل اصلی گسیختگی لوله جداری در این قسمت از سازند باشد. علاوه بر آن، با توجه به پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ که در لایه پوش سنگ به صورت قابل توجهی از دیگر لایه‌ها بالاتر هستند؛ اینکه این لایه به دلیل داشتن نمک فراوان بتواند به تنهایی باعث گسیختگی لوله جداری شود، ناممکن به نظر می‌رسد. با در نظر داشتن شرایط فوق، مدل عددی ساخته شده اجرا شد. نتایج اولیه مدل‌سازی در شکل (۵-۵) نشان داده شده است.



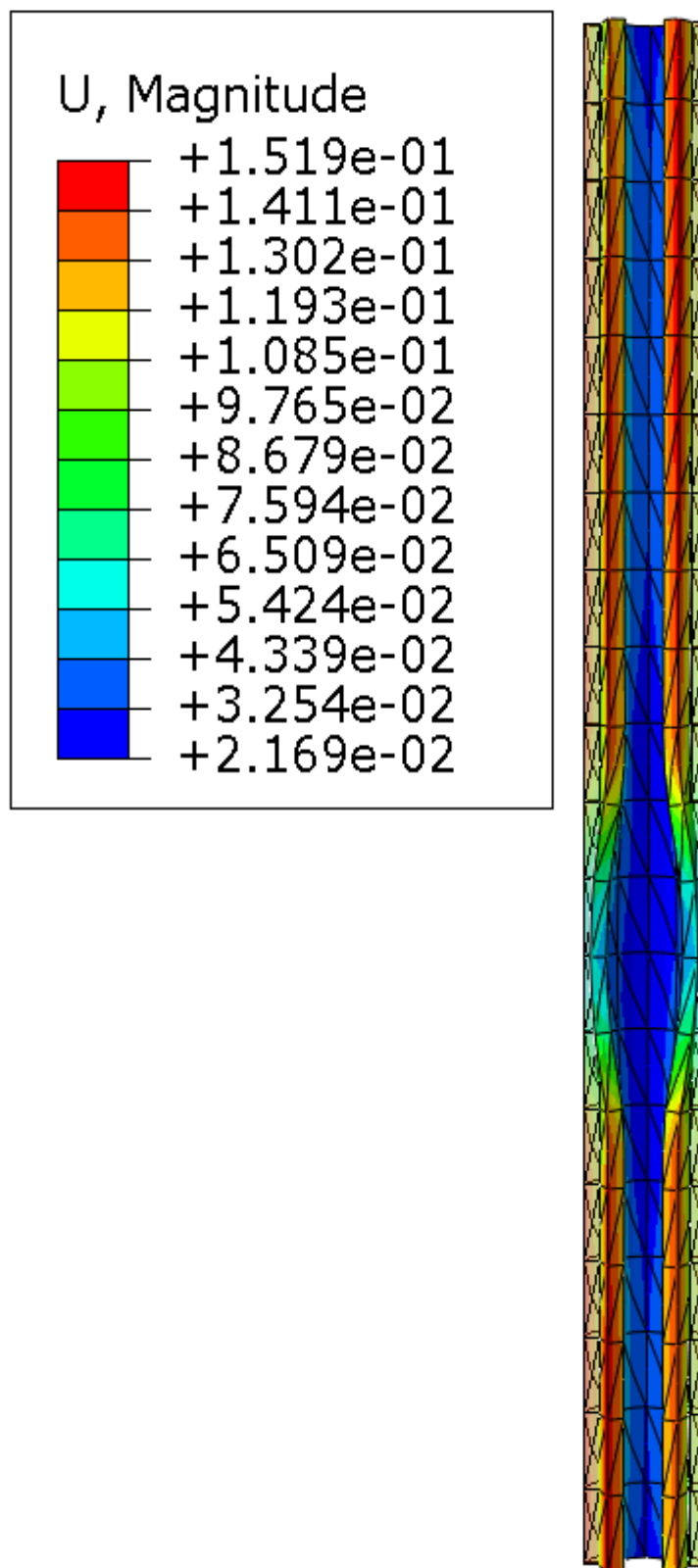
شکل ۵-۵: گسترش اثر تنش فون میسس بر روی سیمان‌بندی و لوله جداری

همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، اعمال تنش‌های برجای با ناهمساگردی بالا و تفاوت در تنش برجای بیشینه و کمینه در سازند گچساران باعث گسیختگی لوله جداری خواهد شد. علاوه بر آن، تمرکز تنش مماسی بیش از اندازه در دیواره در این قسمت، همانگونه که در شکل نشان داده شده است باعث گسترش گسیختگی برشی در لایه پوش سنگ شده است. شکل (۵-۶) شکستگی‌های برشی ایجاد شده در سازند به دلیل تنش مماسی بالا را نشان می‌دهد.

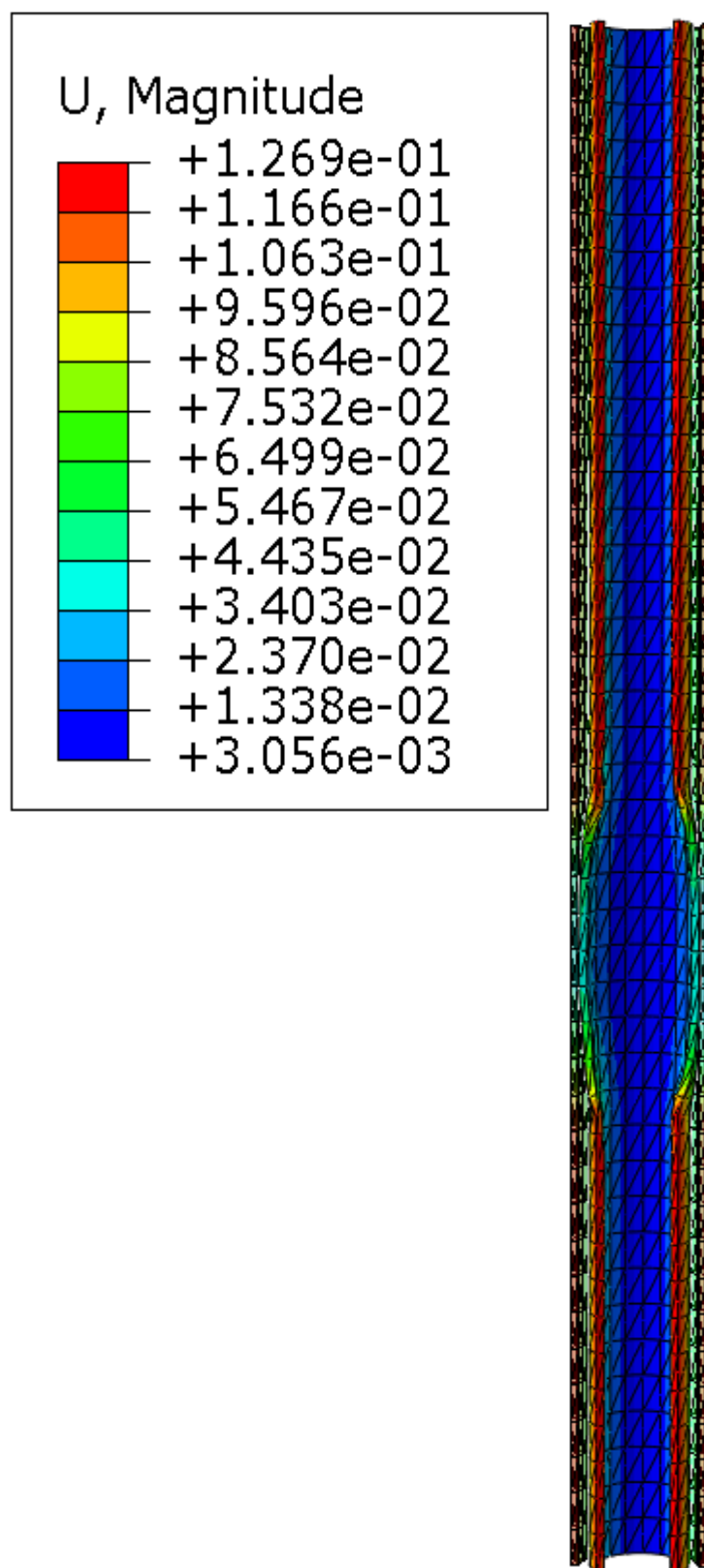


شکل ۵-۶: گسیختگی برشی در اطراف دیواره چاه به دلیل تنش تماسی بیش از اندازه بر دیواره چاه

وجود چنین شرایطی در اطراف چاه باعث شده تا سیمان بندی و لوله جداری دچار له شدگی گسترده شوند. شکل (۵-۷) و (۵-۸) جابه‌جایی ایجاد شده در سیمان و لوله جداری را نشان می‌دهد.

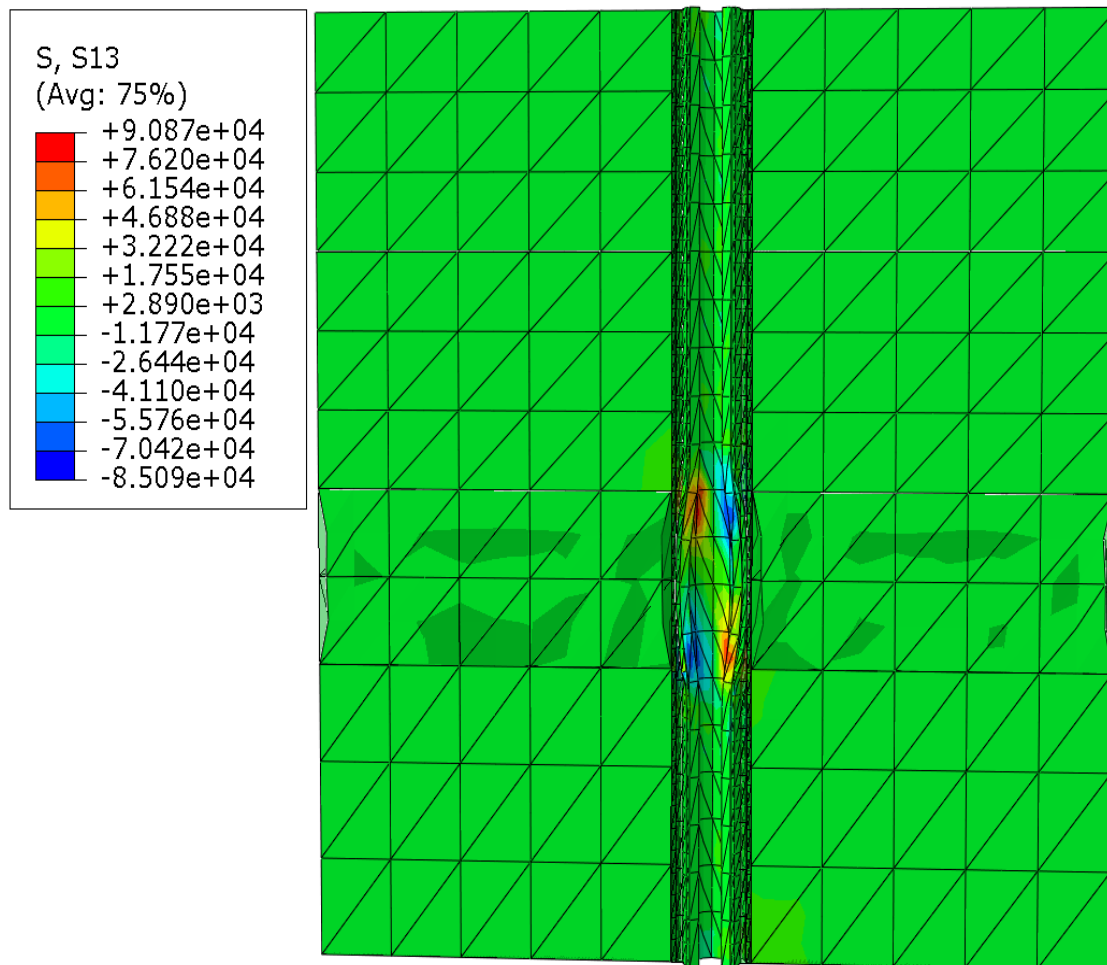


شکل ۵-۷: جابه‌جایی ایجاد شده در سیمان اطراف لوله جداری به دلیل تنش مماسی گسترده



شکل ۵-۸: جابه‌جایی ایجاد شده در لوله جداری به دلیل تنش مماسی گسترده

با توجه به شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸)، با ایجاد گسیختگی برشی و توزیع تنش‌های مماسی گسترده باعث خمش لوله‌جداری در جهات مخالف یکدیگر می‌شود. بنابراین جابه‌جایی لوله‌جداری و سیمان در قسمت مرکز کمتر از قسمت‌های بالایی و پایینی خواهد بود. شکل (۵-۹) یکی از مؤلفه‌های تنش برشی در لایه پوش سنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۹: توزیع تنش برشی در لایه پوش سنگ و لوله‌جداری

همانگونه که در شکل (۵-۹) نشان داده شده است تنش برشی با علامت‌های مختلف در قسمت بالا و پایین لایه پوش سنگ، سیمان‌بندی و لوله‌جداری توزیع شده‌اند که باعث گسیختگی لوله‌جداری شده است. نکته جالب توجه در سازند گچساران داشتن نمک فراوان است که بر اساس مطالعات بسیاری، دلیل اصلی گسیختگی لوله‌جداری معرفی شده است. اگرچه مطالعه حاضر به دلیل محدود

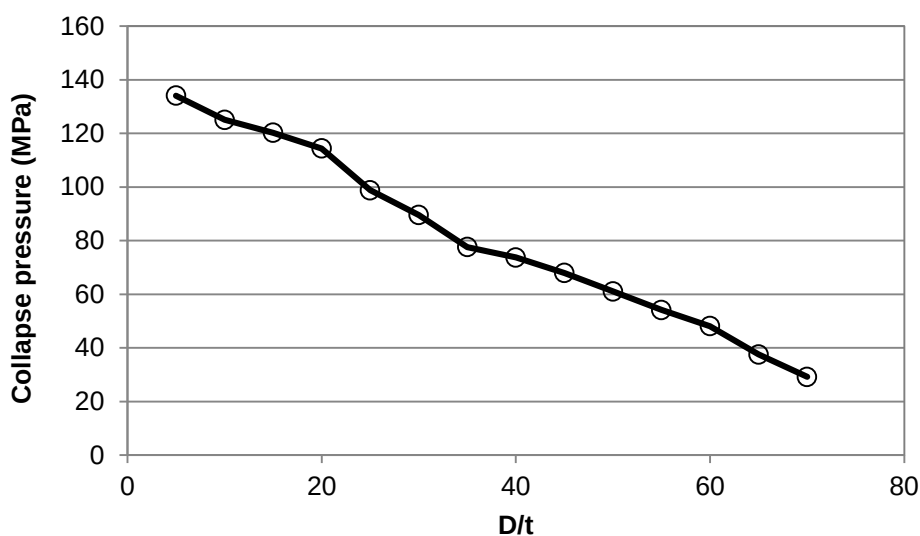
بودن اطلاعات و نبود داده‌های لازم برای سازند گچساران نمی‌تواند مسلماً دلیل اصلی گسیختگی را تنش‌های برجا معرفی کند و اثر رفتار خزش سنگ پوش را نادیده بگیرد اما برای بررسی و مطالعه دقیق بر روی خزش نیاز به نمونه‌های مغزه و اطلاعات جامع‌تری می‌باشد که امکان دسترسی به آن‌ها برای مطالعه حاضر امکان پذیر نبود. با این حال باید توجه داشت که خزش به تنهایی و بدون در نظر گرفتن ناهمسانگردی در تنش قادر به گسیختگی و تغییر شکل لوله جداری نمی‌باشد. یکی از دلایل این امر داشتن خصوصیات الاستیک و مقاومتی بالای پوش سنگ است که ورود به شرایط پلاستیک و خزش سنگ تحت آن به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد.

۵-۵- حساسیت سنجی لوله جداری نسبت به پارامترهای مختلف

بعد از مدل سازی شرایط چاه و لوله جداری به منظور تعیین پارامترهایی که روی لوله جداری تاثیر می‌گذارند، تحلیل حساسیت انجام شد. انجام چنین تحلیل‌هایی کمک خواهد نمود تا با شناخت مهمترین پارامترها، تا حد امکان از شرایطی که تحت آن‌ها گسیختگی لوله جداری ایجاد می‌شود جلوگیری نمود. در ادامه با تغییر برخی از پارامترهای ذاتی و محیطی مانند نسبت قطر به ضخامت، ایجاد لنگی، شرایط درون چاهی و خصوصیات سیمان و سازند تأثیر هریک از آن‌ها بر روی مقاومت لوله‌های جداری بررسی خواهد شد.

۱-۵-۵- نسبت قطر به ضخامت

به منظور بررسی تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله جداری در این مطالعه در مدل ساخته شده با تغییر ابعاد هندسی لوله جداری به بررسی نسبت قطر به ضخامت لوله جداری بر مقاومت آن پرداخته شد. شکل (۵-۱۰) نتایج به دست آمده از این مطالعه را نشان می‌دهد.

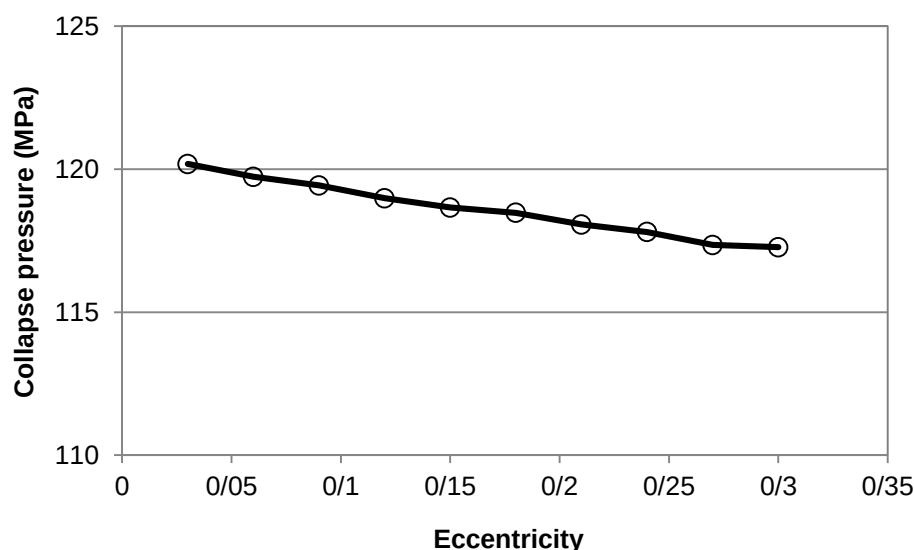


شکل ۵-۱۰: تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله جداری بر مقاومت آن

همان‌گونه که در شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله جداری، مقاومت آن به شدت کاهش می‌یابد. در واقع بر اساس مطالعات انجام شده، این پارامتر یکی از مهمترین پارامترهایی است که تغییرات آن باعث تأثیر بسزایی روی لوله جداری می‌شود.

۲-۵-۵- لنگی

همان‌گونه که بیان شد در صورت وجود لنگی در لوله جداری ضخامت آن در طول سطح مقطع لوله جداری متفاوت خواهد بود. در این مطالعه به منظور بررسی اثر لنگی بر مقاومت لوله جداری با تغییر ضخامت لوله جداری در طول سطح مقطع آن به بررسی اثر آن بر روی مقاومت لوله جداری پرداخته شد. شکل (۵-۱۱) نتایج این مطالعه را نشان می‌دهد.



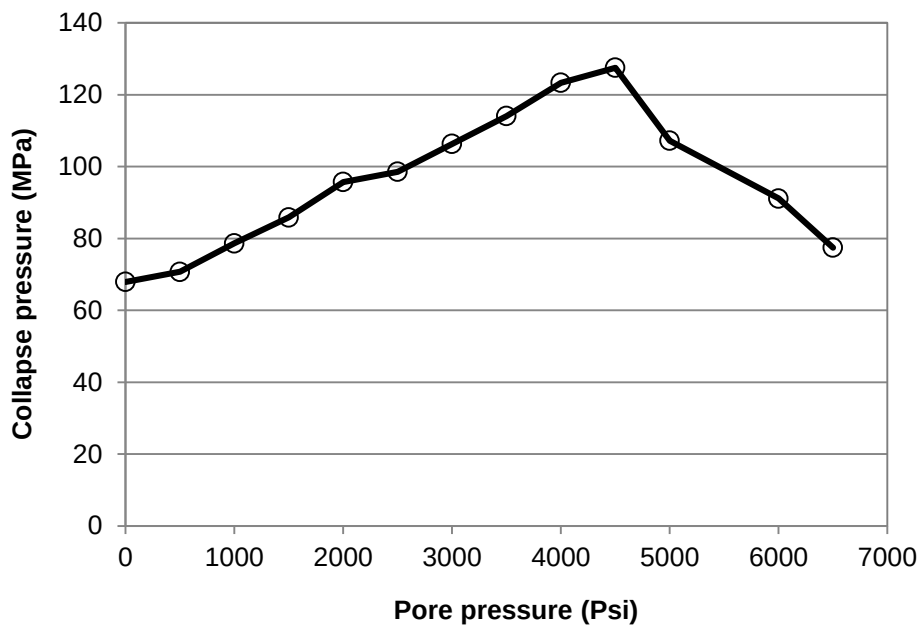
شکل ۵-۱۱: تأثیر لنگی لوله جداری بر مقاومت آن

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۵-۱۱)، با افزایش میزان لنگی لوله جداری مقاومت آن کاهش می‌یابد. البته شدت این کاهش به بزرگی شدت کاهش در اثر تغییرات قطر به ضخامت نخواهد بود. در واقع در بسیاری از مطالعات انجام شده بر روی مقاومت لوله جداری، اثر لنگی بر مقاومت لوله جداری نادیده گرفته می‌شود.

۳-۵-۵- فشار منفذی

رابطه میان فشار منفذی و مقاومت لوله جداری رابطه‌ای پیچیده است. به صورت کلی می‌توان گفت که با کاهش فشار منفذی سازند به دلیل افزایش تنش مؤثر وارد بر لوله جداری از طرف سازند، مقاومت لوله جداری کاهش خواهد یافت. اما عکس این مطلب درست نمی‌باشد. این بدان معنی است که با افزایش میزان فشار منفذی سازند از یک میزان مشخص به بعد مقاومت لوله جداری کاهش خواهد یافت. در واقع با افزایش فشار منفذی از میزان تنش‌های مؤثر وارد بر لوله جداری کاسته می‌شود اما زمانیکه تنش مؤثر مماسی به سمت صفر میل می‌کند و شرایط برای ایجاد گسیختگی کششی سازند فراهم می‌شود، مقاومت لوله جداری به دلیل اعمال تنش‌های غیریکنواخت به شدت

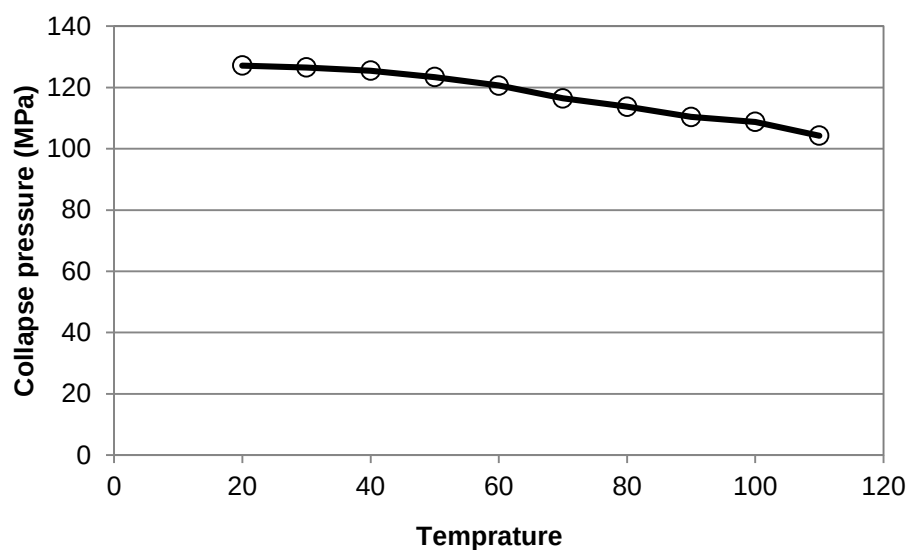
کاهش می‌یابد. شکل (۵-۱۲) نتیجه تغییر فشار منفذی بر روی لوله جداری مدل شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲ : تأثیر فشار منفذی سازند بر مقاومت لوله جداری

۴-۵-۵- تغییرات دما

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر مقاومت لوله‌های جداری درجه حرارت محیط می‌باشد که می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی مقاومت لوله جداری داشته باشد. با افزایش دمای سازند، در اثر انبساط محیط علاوه بر فشار ناشی از پلاستیک شدن سازند، مقاومت لوله جداری در اثر حرارت زیاد کاهش می‌یابد. شکل (۵-۱۳) اثر تغییرات دما بر روی مقاومت لوله جداری مدل شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

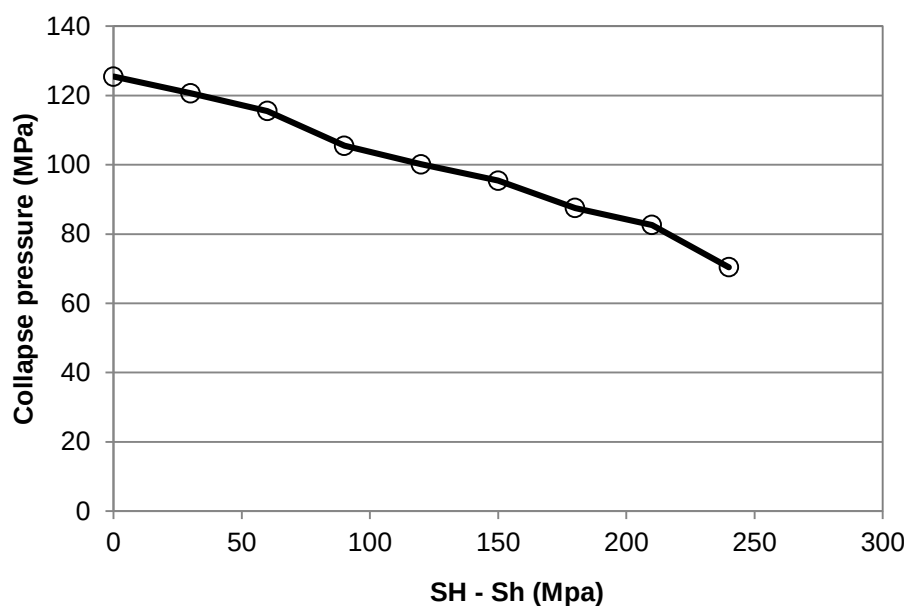


شکل ۵-۱۳ : تأثیر درجه حرارت محیط بر مقاومت لوله جداری

با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شد که درجه حرارت باعث کاهش مقاومت لوله جداری می‌شود.

۵-۵-۵- ناهمسانگردی تنش

به منظور بررسی اثر تغییرات تنش افقی بر روی مقاومت لوله جداری با تغییر اختلاف میان تنش افقی حداقل و حداکثر سعی شد تا نقش ناهمسانگردی تنش بر روی مقاومت لوله جداری بررسی شود. از میان پارامترهای محیطی، شاید مهمترین پارامتر، ناهمسانگردی تنش است که تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت لوله جداری خواهد داشت. شکل (۵-۱۴) مطالعه انجام شده بر روی این پارامتر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۴: تأثیر ناهمسانگردی تنش بر مقاومت نهایی لوله جداری

همانگونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، ناهمسانگردی در تنش تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت نهایی لوله جداری دارد. این پارامتر در کنار پارامتر نسبت قطر به ضخامت از جمله مهمترین پارامترهای درگیر در افزایش یا کاهش مقاومت لوله جداری خواهد بود.

۵-۶- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با تعیین پارامترهای ژئومکانیکی از طریق نگارهای چاه، سعی نمود تا به مدل‌سازی مقاومت لوله جداری بپردازد و اندرکنش میان سازند، سیمان شدگی و لوله جداری را به خوبی تعیین نماید. نتایج این مدل‌سازی نشان داد که ناهمسانگردی تنش مهمترین پارامتری است که می‌تواند اثر به‌سزایی روی مقاومت نهایی لوله جداری داشته باشد. علاوه بر آن، اثر قطر به ضخامت نیز به عنوان پارامتر ذاتی مؤثر معرفی شد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶- مقدمه

بر اساس آنچه که بیان شد و مدل سازی انجام شده، فصل حاضر به جمع بندی نتایج می پردازد و نتیجه گیری مطالعه انجام شده را ارایه خواهد نمود. علاوه بر آن، پیشنهاداتی ارایه می شود که می تواند در هرچه کامل تر نمودن مطالعه حاضر مفید باشد.

۲-۶- نتیجه گیری

مطالعه حاضر با بررسی مقاومت نهایی لوله های جداری و پارامترهای دخیل در آن، سعی نموده است تا چگونگی انجام مدل سازی سه بعدی با یکی از نرم افزارهای قدرتمند عددی را ارایه نماید. علاوه بر آن با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، نشان داده شد که کدام یک از پارامترهای مدل سازی بیشترین تأثیر را بر روی مقاومت نهایی لوله جداری دارند. بر اساس مطالعه صورت گرفته نتایج حاصل از این مطالعه می تواند به صورت زیر خلاصه گردد.

الف) روابط تجربی فراوانی که به منظور پیش بینی مقاومت نهایی لوله های جداری ارایه شده است به دلیل فرضیات زیاد و عدم در نظرگیری برخی از شرایط که ممکن است روی لوله جداری تأثیرگذار باشد نمی توانند تخمین دقیق و مناسبی از مقاومت نهایی لوله های جداری ارایه نمایند.

ب) روش های عددی با در نظرگیری خصوصیات و شرایط درون چاهی روش مناسب تری برای پیش بینی مقاومت نهایی لوله های جداری می باشند.

پ) پارامترهای فراوانی در ایجاد شرایط بحرانی و گسیختگی لوله های جداری دخیل هستند که برخی با خصوصیات ذاتی لوله جداری و برخی با شرایط محیطی مرتبط هستند. بر اساس مطالعه حاضر، ناهمسانگردی تنش و نسبت قطر به ضخامت مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت نهایی لوله های جداری می باشند.

ت) به منظور محاسبه خصوصیات مکانیکی سازند و تعیین پارامترهای الاستیک سنگ جهت تعیین پارامترهای مهمی همچون نسبت پواسون، تنش های برجا و فشار منفذی می توان از نگارهای چاه استفاده نمود. اما نتایج باید از طریق نمونه های مغزه و داده های موجود از چاه و میدان کالیبره شود. ث) انجام تحلیل های دقیق تر نیاز به در اختیار داشتن اطلاعات کامل تری دارد.

۳-۶- پیشنهادات

با توجه به مشکلاتی که مطالعه حاضر برای انجام با آن روبه بوده است، پیشنهادات زیر ارائه می گردد.

الف) به منظور تعیین و مطالعه دقیق تر مقاومت سازند مربوطه، انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و سه محوره بر روی نمونه مغزه، پیشنهاد می شود.

ب) به منظور بررسی دقیق عملیات سیمان کاری برای جلوگیری از ایجاد حفرات و سیمانکاری نامناسب از نمودارهای کیفیت سیمان استفاده شود زیرا سیمان کاری ضعیف می تواند تاثیر بسزایی بر مقاومت لوله جداری داشته باشد.

پ) جهت بررسی شکستگی ها و حفرات در سازند و جلوگیری از ایجاد تنش غیریکنواخت به لوله های جداری استفاده از نگارهای تصویری FMI و UBI در کنار لاگ کالیپر توصیه می شود.

ت) با توجه به ناهمسانگردی شدید تنش در میدان مورد نظر، مطالعات دقیق تری روی تغییرات تنش در این میدان توصیه می گردد. علاوه بر آن جهت حفر چاه های بعدی بر اساس جهت تنش ها انتخاب شود.

منابع فارسی

آشتیانی عبدی ه.، امیری بختیار ح.، ۱۳۸۹، "پیش بینی و کنترل پدیده مچالگی لوله های جداری با استفاده از تحلیل ژئومکانیکی سازند ها در یکی از میادین نفتی ایران"، اکتشاف و تولید . شماره ۷۴.

تقوی پور ش، شیخ زاده ح، (۱۳۸۶)، "خلاصه ای از وضعیت زمین شناسی میدان نفتی مارون"، اداره مطالعات زمین شناسی، مناطق نفت خیز جنوب.

صائمی، م، (۱۳۹۲)، "تحلیل فرایندهای ژئومکانیکی بوجود آمده ناشی از تولید گاز از لایه های دربردارنده هیدرات های گازی"، دومین همایش ملی هیدرات های گازی ایران، دانشگاه سمنان.

طاهری، ه، (۱۳۸۸)، "تحلیل پایداری چاه در شیل ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات، تهران.

فارسی مدان م.، (۱۳۹۰)، "بررسی اثر خزش در ایجاد مچالگی لوله های جداری در میدان نفتی مارون"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات، تهران.

کریمی م.ر، شیخ زاده ح، صفاری ح، (۱۳۸۵)، "بررسی علل مچالگی لوله های جداری میدان نفتی مارون"، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

کریمی م ر، (۱۳۸۱)، "بررسی علل مچالگی لوله جداری / آستری در چاه های مارون از دیدگاه زمین شناسی"، گزارش پ-۵۱۳۹، اداره زمین شناسی مناطق نفت خیز جنوب.

منابع لاتین

Aadnoy,B.S, (1996), “**Modern well Design**”, Rotterdam, The Netherland, Belkema publications.

Abbassian.F., Parfitt.S.H.L, (1995), “Collapse and post collapse in tubullars: an simple approach”, SPE 29458, Production Operation Symposium, Oklahoma City.

Adams.A.J., Warren.A.V.R., Masson.P.C, (1998), “on the Development of Reliability-Based Design Rules for Casing Collapse”, SPE 48331,SPE Applied Technology Workshop on Risk Based Design of Well Casing and Tubing, Texas.USA.

Adams, A.J., MacEachran, A. (1994), “Impact on Casing Design of Thermal Expansion of Fluids in Confined Annuli”, *SPE Drill&Compl* 9 (3): 210-216. SPE-21911-PA.

API,(1989), “Bulletin 5C3 on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties”, Fifth edition, July.

Asadi.A., Parhizgar.N., Momeni.E., (2011), “Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran”, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ISSN 1991-8178, 5(11): 831-840.

Baek.J.H., (2011), “Effect of Ovality and Eccentricity on Collapse Pressure of Subsea Pipeline”, International Gas Union Research Conference, Ansan, Korea.

Bellarby J., (2009),”**Well Completion Design**”, Vol. 6, First edition, Elsevier, pp. 433-450.

Berger.A, Fleckenstien.W.W., Eustes.A.W., Thonhauser.G., (2004), “Effect of Eccentricity, Voids, Cement Channels, and Pore Pressure Decline on Collapse Resistance of Casing”, SPE 90045, Prepared at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas,USA.

Boyun, Guo and Ghalambor, A.,(2004), An Innovation in Designing Underbalanced Drilling Flow Rates: A Gas-Liquid Rate Window (GLRW) Approach; Paper IADC/SPE 77237 presented at the IADC/SPE Asia Pacific.Drilling Technology held in Jakarta, Indonesia, 9–11 September 2002

Bradford, I.D.R., Fuller, J., Thompson, P.J., Walsgrove, T.R., (1998), “Benefits of assessing the solids production risk in a North Sea reservoir using elastoplastic modeling”, SPE/ISRM Eurock '98 held in Trondheim, Norway, 8–10 July, pp. 261–269.

Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., (1985), “Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks”. *Geophysics*, 50, PP. 571-581.

Chang CH., Zoback M.D, Khaksar, A., (2006). “Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks”. *J. Petrol. Sci. Eng*, 51, 223–237.

Clinedinst W.O.,(1985), “collapse resistance of pipe”, Phd Thesis, Dissertation Submitted to Cetury University,California.

Clegg, J.D.,(1974), “Casing Failure in Cedar Creek Inticline”, Journal of Petroleum Technology, 674-684.

El-Sayed .A.H, Khalaf .F, Cario.U., (1987), “Effect of Internal Pressure and Cement Strength on the Resistance of Concentric Casing Strings” ,SPE 15708,Fitth SPE Middle East Oil,Manama.Bahrain.

Eaton, B.A., (1975), “The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs”. Society of Petroleum Engineers Of AIME. Paper SPE 5544.

Evans.G.A., Harriman.D.W.,(1972), “Laboratory Tests on Collapse Resistance of Cemented Casing”, SPE 4088,47th Annual Fall Meeting of the Society of Petrleum Engineers of AIME, Texas.

Fjaer, E., Holt, R.M., Hordurt, P., Raaen, A.M. and Risnes, R., (2008), “**Petroleum Related Rock Mechanics**”. Elsevier press, Development in petroleum Science, Vol. 53.

Fleckenstein, W.W., Eustes, A.W., Miller, M.G., (2000), “Burst Induced Stresses in Cemented Wellbores”, paper SPE 62596 presented at the SPE/AAPG Western Regional Meeting, Long Beach, California, June 19-23.

Golami,R., Rasouli, V., (2012), “Numerical simulations of casing collapse: a case study in the South of Iran”, Petroleum and Mineral resources, Vol 81, ISSN 1743-3۵۳۳.

Holmquist JL, Nadai A.,(1939), “A theoretical approach to the problem of collapse of deep well casing”. Drilling Production Practice, API 1939:392-۴۲۰.

Huang X., Mihsein M., Kibble K., Hall. R., (2000). “Collapse strength analysis of casing design using finite element method”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 77, 359-367.

Hubbert, M. K. and Willis, D. G., (1957), Mechanics of hydraulic fracturing. Pet Trans AIME, 210, PP. 153-163.

Hudson, J. A. and Harrison, J. P.,(1997),“**Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles**”, Published by Elsevier Science Ltd, 1997.

Hughes, B., (1995), “**Drilling Engineering Workbook**”, Training & Development 2520 W.W. Thorne Houston, TX 77073 United States of America.

Issa.J.A., Crawford.D.S., (1993), “An Improved Design Equation for Tubular Collapse”, SPE 26317,68th Annual Technical Conference and Exhabition of The Society of Petroleum, Houston,Texas.

John A. Hudson and John P, (1997), “Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles”, Published by Elsevier Science Ltd.

Khalaf. F., Cario.U.,(1985),”Increasing Casing Collapse Resistance Against Salt-Induced Loads”, SPE 13712,SPE Middle East Oil Technical Conference and Exhibition, Bahrain.

Khalaf, A.M., Seibi, A.C., (2011), ” Failure analysis of lube oil feed tube of a gas turbine operating in oil fields”, Engineering Failure Analysis 18, 1341–1350.

King, M.S. (1970). “Static and dynamic elastic moduli of rocks under pressure”. In: Proc. 11th US Symp. On Rock Mechanics, pp. 329–351.

Kyriakides, S., Lee L. H., (2005), ”Buckle propagation in confined steel tubes”, International Journal of Mechanical Sciences 47, 603–620.

Lan. Z., Xia. Y., Zhang.C., (2000), “The repairing technology of driving channel on small drifting-diameter's casing damage in Daqing Oilfield”, SPE 65099 presented at SPE Int. Oil Gas Conf. Exhib, China, Beijing.

Madhavan.R., (1998), “on the Collapse of Long Thick-Walled Circulars Tubes under Biaxial Loading”, Phd Thesis, California Institute of Technology, California.

Marx.C., El-Sayed. A.A.H., (1985),” Evaluation of Collapse Strength of Cemented Pipe-in-Pipe Casing Strings “, SPE 13432,SPE Drilling Conference, Louisiana.

Mashinskii, E.I., (2009). “Strain amplitude-dependent attenuation of P and S waves in dry and water-saturated sandstone under confining pressure” Russian Geology and Geophysics, Volume 50, Issue 8a, pp. 734-738.

Mengjiao, Yu., Chenevert, M. E. and Sharma, Mukul M.,(2003), Chemical–mechanical wellbore instability model for shales:accounting for solute diffusion, paper presented at Journal of Petroleum Science and Engineering, 38 (2003) 131-143.

Mirzaghobanali. A., Fathianpour. N., Ghasemzadeh. H., Salarian. M., (2011), “A New Approach in Casing Collapse Design Using the Geomechanical Model and Heaviest Drilling Fluid”, Petroleum Science and Technology, 29: 1948-1962.

Morris.C.W., Gwinn.R.L., Rambow.F.H.K., Mitzel.D.P., (1998), “Monitoring casing offset damage using ultrasonic measurements” , SPE 49254 presented at Ann. Tech. Conf. Exhib, held in New Orleans, Louisiana.

Parsa, M.H., Allahkaram S.R., Ghobadi S.H., (2010), “Simulation of cathodic protection potential distributions on oil well casings”, Journal of Petroleum Science and Engineering 72, 215–219.

Pattili, P.D., (2003), “Effect of Nonuniform Loading on conventional Casing Collapse Resistance”, SPE 79871 Drilling Conference, Amsterdam.

Peng, S., Fu.J., Zhang.J., (2007), “Borehole casing failure analysis in unconsolidated formations: A case study”, Journal of Petroleum Science and Engineering;59, 228-236.

Qian, F., Gao., (2011), “A mechanical model for predicting casing creep load in high temperature wells”, Journal of Natural Gas Science and Engineering 3, 530-535.

Rahman, s.s., Chilingarian, G.V., (1995), “**Casing design theory and practice**”, Elsevier Science B.V., Netherland, PP. 1-26.

Rasouli, V., Pallikathakathil, Z. J., and Mawuli, E. (2011). "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: A case study in Blacktip field, North Australia", *Journal of Petroleum Science and Engineering* 76, pp. 37–50.

Rolf. B and Mohammed.W and Mohsen.P., (2006), "A Preliminary Study of Casing Collapse in Iran", Hydroquest Report, Schlumberger Oil Company.

Salehabadi, M., Jin, M., Yang, J., Ahmad, R., Tohidi, B., (2010), "The Effect of Casing Eccentricity on The Casing Stability Analysis of a Wellbore Drilled in Gas Hydrate Bearing Sediments", SPE 131236 Annual Conference and Exhibition, Barcelona.

Salehi.S., Hareland.G., Khademi Dehkordi. K., Ganji.M., Abdollahi.M., (2009), "Casing collapse risk assessment and depth prediction with a neural network system approach", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69:156-162.

Sunal. O., Bilgesu. H.I., Heasley. KA., Tulu. I.B.,(2008), "A Look Into Casing Deformation Due to Plastic Behavior of Formations", Paper SPE 11773, Prepared at SPE Eastern Regional, Pennsylvania, USA.

Tamano.T , (1983), "A new empirical formula for collapse resistance of commercial casing", *ASME Transactions of Energy Resources Technology*: 489–495.

Tokimasa.K., Tanaka.K, (1986), "FEM Analysis of the Collapse Strength of a Tube", *J.Pressure Vessel Technology*, ASME.

Toscano, R.G., (2009), "Collapse and post-collapse behavior of steel pipes under external pressure and bending. Application to deep water pipelines", Phd Thesis, Dissertation Submitted to Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Vasilikis D., Karamanos S.A. (2009). "Stability of confined thin-walled steel cylinders under external pressure", *International Journal of Mechanical Sciences* 51, 21–32.

Vendeville.B.C, (2005), "Similarities and Differences Between Salt and Shale Tectonic", *Universite de Lille 1,Villeneuve D Ascq Cedex, Geophysical research Abstracts*, Vol.7, 03575,France.

Wang, H. F., 2000. *Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology*. Princeton, NJ, Princeton University Press.

Wang Y., Dusseault M.B. (2003), "A coupled conductive–convective thermo-poroelastic solution and implications for wellbore stability", *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38, 187– 198.

Yasar, E. and Erdogan, Y., (2004), Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, PP. 871–875.

Yuan, z., Schubert, j., Texas A&M., Teodoriu, C., Claustal, T. (2012), “The Effect of Hole Angle and Cementing Complications on HPHT well integrity”, SPE 162839 unconventional Resources conference, Canada.

Zengxin Z., D Gao. (2009), “Casing strength degradation due to torsion residual stress in casing drilling”, Journal of Natural Gas Science and Engineering 1, 154–157.

Zhang, J. (2011), “Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches”, Earth-Science Reviews 108, 50–63.

Zhao, H., Chen M., Wang J. (2011), “Salt loading on casing in cased wellbore sections”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48, 501–509.

Zoback, M., 2007. “**Reservoir Geomechanics**”. Cambridge University Press, New York.

Abstract

Determination of the ultimate strength of casing due to its critical role in drilling and production phases is significantly important. The parameters involved in reduction the strength and collapse of casing can be divided into two categories: intrinsic and environmental parameters. Among these parameters diameter to thickness ratio, eccentricity, formation type, temperature and pore pressure are of the most important ones. In order to determine the ultimate strength of casing, empirical formula and numerical methods are commonly used. However, empirical methods are not able to provide reliable results due to lots of assumptions and neglecting some of the effective conditions causing casing to damage. That is why numerical methods are being found as an effective approach in determination of strength of the casing. In this study, to simulate ultimate strength of casing, and prediction of casing collapse, mechanical properties of formations were firstly estimated through utilizing of well logs data and used for modeling by nommercial ABAQUS software. Sensivity analysis was performed some parameters effective on casing strength. Results obtained from this 3D modeling indicated that stress anisotropy and diameter to thickness ratio are the most important parameters may cause casing to damage.

Keywords: Casing, Ultimate Strength, Geomechanical parameters, casing collapse



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

M.Sc Thesis for Petroleum Eng.

***Assessment, modeling and prediction of ultimate strength of
casing of oil wells using finite element method case study
one of the wells of Maroon oil field***

Mohammad Reza Hemmatian Khorasani

Supervisors:

Dr. Behzad Tokhmechi

Dr. Vamegh Rasouli

Advisor:

Eng. Raoof Gholami

January 2014