

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته‌ی مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی عددی یکپارچگی چاه نفت با نگاه ویژه به مشخصات مکانیکی سیمان در یکی از

چاه‌های میادین جنوب غرب ایران

نگارنده: عیسی خدای

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضان زاده

استاد مشاور:

دکتر مهدی نوروزی

تیر ۱۳۹۷

شماره: ۳۴۱ / ۴۷
 تاریخ: ۳ / ۴ / ۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عیسی خدای عیسی خدای با شماره دانشجویی ۹۴۰۶۶۹۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان "مدلسازی عددی یکپارچگی چاه نفت با نگاه ویژه به مشخصات مکانیکی سیمان در یکی از چاه‌های میدین جنوب غرب کشور" که در تاریخ ۱۳۹۷/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی) مردود
 نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر احمد رمضان زاده	۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر مهدی نوروزی	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مجید نیکخواه	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر شکراله زارع	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند مجدداً دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



پروردگارا:

نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که شمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم.

پس توفیقم ده که هر لحظه سکرگزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

سپاسگزاری

بشکر و سپاس بی پایان مخصوص خدای است که بشر را آفریده و به او قدرت اندیشیدن داده و توانایی های بالقوه را در وجود انسان قرار داده و او را امر به تلاش و کوشش نموده و راهنمایی برای هدایت بشر فرستاده.

ایزدمنان را سپاس می گویم که توفیق گذراندن این دوران تحصیلی را به من عنایت فرمود و سپس مراتب سپاس خویش را به تمامی عزیزانی که در انجام مراحل مختلف این تحقیق مرایاری نمودند که پیمودن این راه جز با مساعدت و بهکاری آن ها ممکن نبود، شایسته است تقدیر ویژه خود را به این بزرگواران تقدیم نمایم.

- از بهکاری و حمایت شرکت مناطق نفت خیز جنوب برای در اختیار قرار دادن نمونه های سیان جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحقق اهداف این پژوهش صمیمانه تشکر میکنم.

- استاد ارجمند جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده که در طول تحصیل و تحقیق پیوسته راهنمایم بوده اند و با سکینایی و درایت ایشان مشکلات تحقیق یکی پس از دیگری پشت سر گذاشته ام.

- استاد ارجمند جناب آقای دکتر مهدی نوروزی که از مشاورت ایشان در مدت تحقیق بهره برده ام.

- پدر و مادرم که در سختی ها و دشواری های زندگی بهواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بودند و هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانشان سیراب می کنند.

- برادرانم که بهواره در طول تحصیل متحمل زحمت بودند و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودشان مایه دلگرمی من هست.

- خواهرم که وجودش شادی، بخش و صفایش مایه آرامش من است.

تعهدنامه

اینجانب عیسی خدای دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع مدل سازی عددی یکپارچگی چاه نفت با نگاه ویژه به مشخصات مکانیکی سیمان در یکی از چاه های میادین جنوب غرب ایران تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان زاده متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های 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:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

یکپارچگی چاه یک هدف و راه حل جهت حفاظت از جان انسان، محیط زیست و در نهایت میزان تولید نفت، در طول عمر چاه است. ضرورت نگهداری و تعمیر چاه‌هایی با طول عمر زیاد و از یک سو هزینه‌های بالا جهت احداث چاه‌های جدید باعث می‌شود مطالعه یکپارچگی چاه یک عنصر حیاتی در مدیریت طول عمر چاه باشد. فلذا شناخت بهتر رفتار سیمان، نقش مهمی در اطمینان از یکپارچگی چاه داشته و می‌تواند به‌طور مؤثر در پیشگیری و یا کنترل گسیختگی لوله‌های جداری مدنظر قرار گیرد. این مسئله ضمن ارتقا سطح ایمنی فرایند تولید از چاه، باعث کنترل هزینه‌های پیش‌بینی نشده و غیرمتعارف تولید نفت و گاز (هزینه‌های تعمیر و نگهداری چاه، سیمان کاری ثانویه و...) می‌شود که در برخی میدان‌ها مثل مارون و کوپال بسیار جدی است.

در این تحقیق ابتدا با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی چاه مورد نظر، مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی از سازند دربرگیرنده چاه ساخته می‌شود. در این مرحله ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند تخمین زده می‌شوند. مشخصات مکانیکی مربوط به سیمان با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود. با انجام آزمایش‌های تک‌محوره، سه محوره و برزیلی بر روی نمونه‌های سیمان، پارامترهای مکانیکی غلاف سیمان تعیین می‌شوند. همچنین آزمایش برش مستقیم روی درزه مصنوعی بین سیمان و سازند نیز انجام شده که پارامترهای اصطکاکی سطح تماس بین سیمان و سازند تعیین می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های ورودی و با توجه به شرایط محیطی چاه، مدل عددی مرجع در دو مقطع از چاه توسط نرم‌افزار ABAQUS ساخته می‌شود. با مقایسه مدل‌های ساخته شده، مدل بحرانی انتخاب می‌شود و در ادامه، تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری جهت بررسی اثر شرایط تنش‌های برجا، پارامترهای اصطکاکی سطوح تماس و پارامترهای مکانیکی سیمان صورت گرفته و اثر آن‌ها بر یکپارچگی چاه بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت تنش‌های افقی به قائم و اختلاف تنش‌های افقی، کرنش پلاستیک در سیمان افزایش و ضریب ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد. غلاف سیمان با مدول یانگ بالا، ضریب

پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک پایین، بیشترین تمرکز کرنش پلاستیک را به همراه دارد. همچنین با افزایش اصطکاک سطوح تماسی سازند - سیمان و سیمان - لوله‌جداری، کرنش پلاستیک در سیمان کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: یکپارچگی چاه، ژئومکانیکی، مشخصات مکانیکی، کرنش پلاستیک، ضریب ایمنی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

بررسی عددی تاثیر ویژگی های تماسی بر یکپارچگی سیمان چاه نفت در یکی از میادین جنوب غرب ایران، کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران. اسفند ۱۳۹۶، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

Numerical Investigation of the Impact of Geomechanical Parameters on Well Integrity in One of Iran's Southwestern Oil Field, Journal of Mining and Environment.

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: کلیات ۱
- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق ۳
- ۳-۱ هدف تحقیق ۴
- ۴-۱ روش تحقیق ۵
- ۵-۱ ساختار پایان نامه ۶
- ۲- فصل دوم: تعاریف و مبانی نظری ۹
- ۱-۲ مقدمه ۱۰
- ۲-۲ یکپارچگی چاه در مراحل مختلف احداث و بهره‌برداری ۱۱
- ۱-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله طراحی ۱۲
- ۲-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله حفاری و تکمیل ۱۲
- ۳-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله عملیاتی ۱۳
- ۴-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله رهاسازی ۱۳
- ۳-۲ عوامل موثر بر یکپارچگی در موانع مختلف چاه ۱۴
- ۱-۳-۲ سازند و اثر آن بر یکپارچگی چاه ۱۴
- ۲-۳-۲ لوله جداری و اثر آن بر یکپارچگی چاه ۲۰
- ۳-۳-۲ سیمان و اثر آن بر یکپارچگی چاه ۲۲

۳۲	۴-۲ جمع بندی
۳۳	۳- فصل سوم: مروری بر مطالعات انجام شده
۳۴	۳-۱ مقدمه
۳۴	۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی
۳۶	۳-۲-۱ اندازه گیری میزان مهاجرت سیال در سیمان
۳۸	۳-۲-۲ مطالعه بر روی خواص مکانیکی و حرارتی سیمان
۴۰	۳-۳ مطالعات تحلیلی
۴۱	۳-۳-۱ تحلیل تنش در سیمان
۴۳	۳-۳-۲ مدل تحلیلی سطح مشترک بین سازند، سیمان و لوله جداری
۴۴	۳-۳-۳ پدیده نشت در سیستم چاه
۴۶	۴-۳ مطالعات عددی
۵۶	۳-۴-۱ مدل سازی تاثیر عوامل مکانیکی بر یکپارچگی چاه عددی
۵۲	۳-۴-۲ مدل سازی تاثیر دما و فشار بالا (HT-HP) بر یکپارچگی چاه
۴۸	۳-۴-۳ مدل سازی سطح مشترک بین سازند، سیمان و لوله جداری
۵۹	۳-۵ جمع بندی
۶۱	۴- فصل چهارم: تخمین و تعیین پارامترهای مکانیکی سازند و سیمان
۶۲	۴-۱ مقدمه
۶۲	۴-۲ معرفی میدان مورد مطالعه
۶۵	۴-۳ تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سازند

- ۶۶ ۱-۳-۴ تفسیر نگارهای گرفته شده از چاه و تعیین جنس سنگ
- ۶۷ ۲-۳-۴ تخمین پارامترهای الاستیک
- ۷۰ ۳-۳-۴ تخمین مقاومت سازند
- ۷۰ ۴-۳-۴ تخمین پارامترهای پلاستیکی سازند
- ۷۱ ۵-۳-۴ تخمین تنش قائم
- ۷۲ ۶-۳-۴ تخمین فشار منفذی
- ۷۳ ۷-۳-۴ تخمین مقدار تنش‌های افقی
- ۷۵ ۸-۳-۴ معیار شکست جهت بررسی پایداری چاه
- ۷۷ ۹-۳-۴ تفسیر مدل ژئومکانیکی و اعتبار سنجی مدل
- ۷۹ ۴-۴ تعیین پارامترهای مکانیکی سیمان
- ۸۱ ۱-۴-۴ فرمولاسیون سیمان و تهیه نمونه‌ها
- ۸۳ ۲-۴-۴ آزمایش تک محوره بر روی نمونه‌های سیمان
- ۸۵ ۳-۴-۴ آزمایش سه‌محوره برای نمونه‌های سیمان
- ۸۷ ۴-۴-۴ آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های سیمان
- ۸۸ ۵-۴-۴ آزمایش برش مستقیم بر روی درزه مصنوعی
- ۹۰ ۵-۴ جمع بندی
- ۹۳ ۵- فصل پنجم: مدلسازی عددی یکپارچگی چاه موردنظر
- ۹۴ ۱-۵ مقدمه
- ۹۵ ۲-۵ انتخاب روش عددی مناسب

۹۷	۳-۵ نرم افزار ABAQUS
۹۸	۴-۵ مراحل مدل سازی عددی یکپارچگی چاه
۹۸	۱-۴-۵ تعریف هندسه مدل
۹۹	۲-۴-۵ تخصیص مواد و مدل های رفتاری
۱۰۱	۳-۴-۵ تعریف سطوح تماس
۱۰۲	۴-۴-۵ تولید مش
۱۰۳	۵-۴-۵ شرایط مرزی و بارگذاری
۱۰۴	۶-۴-۵ معیارهای شکست مکانیکی در مدل
۱۰۵	۷-۴-۵ مرحله تعادل ژئواستاتیک
۱۰۷	۸-۴-۵ مرحله حفاری
۱۱۰	۹-۴-۵ مرحله تکمیل
۱۱۳	۵-۵ جمع بندی
۱۱۵	۶- فصل ششم: تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری
۱۱۶	۱-۶ مقدمه
۱۱۷	۲-۶ تاثیر شرایط تنش های برجا بر یکپارچگی چاه
۱۱۷	۱-۲-۶ شرایط ارتوتروپیک و ایزوتروپ تنش های برجا
۱۲۰	۲-۲-۶ شرایط آنیزوتروپیک تنش های برجا
۱۲۱	۳-۶ تاثیر پارامترهای مکانیکی سازند
۱۲۴	۴-۶ تاثیر پارامترهای مکانیکی سیمان

- ۵-۶ تاثیر پارامترهای تماس اصطکاکی معیار کولمب بر یکپارچگی چاه ۱۲۹
- ۶-۶ جمع‌بندی ۱۳۱
- ۷- فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۳۳
- ۷-۱ مقدمه ۱۳۴
- ۷-۲ نتیجه‌گیری ۱۳۵
- ۷-۳ پیشنهادها ۱۳۶
- ۸- منابع ۱۳۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: ایجاد پدیده Breakout و شکستگی‌های کششی در چاه ۱۷
- شکل ۲-۲: نواحی و پنجره‌های مختلف سیال حفاری جهت پایداری چاه ۱۸
- شکل ۳-۲: انبساط جانبی بر اثر فشار روباره ۲۱
- شکل ۴-۲: اختلاف زیاد در تنش افقی و برش در لوله جداری ۲۲
- شکل ۵-۲: مسیرهای ایجادشده در غلاف سیمان ۲۵
- شکل ۶-۲: افزایش تنش‌های مماسی و شعاعی در سیمان با افزایش تنش برجا ۲۶
- شکل ۷-۲: تأثیر محوریت لوله‌جداری بر یکپارچگی سیمان ۲۷
- شکل ۸-۲: شکستگی‌های حاصل از انقباض ۲۸
- شکل ۹-۲: اثر آلودگی سیمان توسط گل حفاری ۲۹
- شکل ۱۰-۲: از دست رفتن یکپارچگی سیمان و انواع شکستگی‌های ایجادشده در آن ۲۹
- شکل ۱۱-۲: انواع کانال‌ها و حفرات ایجادشده در غلاف سیمان ۳۰
- شکل ۱۲-۲: تشخیص نمودار صوتی (سیمان‌کاری خوب) ۳۱
- شکل ۱۳-۲: تشخیص نمودار صوتی (نبود سیمان) ۳۲
- شکل ۱-۳: دستگاه شبیه‌ساز مهاجرت گاز و اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول آزمایش ۳۸
- شکل ۲-۳: نمونه ساخته شده و اصول آزمایش مطابق شرایط ته چاه ۳۸
- شکل ۳-۳: دستگاه تولید اشعه ایکس و حفرات و مسیرهای مشخص شده در سیمان ۳۹
- شکل ۴-۳: آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره روی نمونه‌های سیمان ۴۰
- شکل ۵-۳: هندسه و فرضیات مدل تحلیلی ۴۲
- شکل ۶-۳: مجموعه سازند، سیمان و لوله‌جداری ۴۳
- شکل ۷-۳: اثر انقباض بر تمرکز تنش اطراف چاه ۴۵
- شکل ۸-۳: رشد ترک در جهت عمود ۴۵

- شکل ۳-۹: رفتار مکانیکی سطح مشترک ۵۷
- شکل ۳-۱۰: لغزش سطوح مشترک و تنش برشی سطوح نسبت به افزایش عمق ۵۷
- شکل ۳-۱۱: هندسه ترکهای اولیه در پاشنه لوله‌جداری ۵۸
- شکل ۳-۱۲: رشد ترک، فشار شکستگی و کرنش پلاستیک برای ترکهای اولیه با اندازه‌های متفاوت ۵۹
- شکل ۳-۱۳: تاثیر محوریت لوله جداری و احتمال شکست بزرگتر در طرف نازکتر سیمان ۵۴
- شکل ۳-۱۴: تاثیر مدول یانگ بر تغییرات کرنش ۵۴
- شکل ۳-۱۵: تاثیر ضریب پواسون بر کرنش پلاستیک سیمان ۵۴
- شکل ۳-۱۶: شکست و پلاستیک شدن سیمان ۵۵
- شکل ۳-۱۷: کرنش عمودی و تنش از دست رفته برای سه نوع لوله‌جداری در ۶ و ۱۰ سال پس از تولید ۴۹
- شکل ۳-۱۸: تغییرات تنش مماسی نسبت به زمان در المانهای داخلی غلاف سیمان ۵۰
- شکل ۳-۱۹: تغییرات کرنش پلاستیک با سخت شدن سیمان ۵۱
- شکل ۳-۲۰: (الف): جابجایی سیمان به علت بارهای ناشی از سازند، (ب): جابجایی لوله‌جداری به دلیل سیمان‌کاری ضعیف ۵۲
- شکل ۴-۱: موقعیت میدان نفتی مارون نسبت به میدانهای مجاور در فروافتادگی دزفول ۶۵
- شکل ۴-۲: تغییرات نگارهای چاه مورد مطالعه نسبت به عمق مخزن ۶۷
- شکل ۴-۳: تغییرات پارامترهای الاستیک سازند نسبت به عمق ۶۹
- شکل ۴-۴: تخمین چگالی سازند از سطح زمین تا مخزن ۷۲
- شکل ۴-۵: تغییرات پارامترهای مقاومتی، پلاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا نسبت به عمق ۷۵
- شکل ۴-۶: طرحی از پایداری و ناپایداری چاه و وزن گل پایدار بین فشار Breakout و تنش افقی

- حداقل ۷۶
- شکل ۷-۴: پروفیل چاه مورد مطالعه، سنگ شناسی مخزن و نمودار کالیبر نسبت به عمق ۷۸
- شکل ۸-۴: تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری طبق دو معیار شکست در چاه مورد مطالعه ۷۹
- شکل ۹-۴: نمونه‌های مکعبی آماده سیمان و افزاینده FLC ۸۱
- شکل ۱۰-۴: مواد مصرفی در ساخت دوغاب سیمان ۸۲
- شکل ۱۱-۴: نمونه‌های سیمان قبل از گیرش (الف) و بعد از ۲۸ روز (ب) درون قالب ۸۲
- شکل ۱۲-۴: نمایی از دستگاه و نمونه‌های سیمان در آزمایش تک محوری ۸۳
- شکل ۱۳-۴: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U_2) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره ۸۴
- شکل ۱۴-۴: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U_1) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره ۸۴
- شکل ۱۵-۴: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U_3) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره ۸۵
- شکل ۱۶-۴: نمونه سیمان بعد از آزمایش و قطعات مختلف آزمایش سه محوری ۸۶
- شکل ۱۷-۴: پوش موهر شکست در آزمایش سه محوری و نمونه‌های سیمان بعد از آزمایش ۸۷
- شکل ۱۸-۴: هندسه، ابعاد و خط شکست کششی نمونه سیمان تحت آزمایش برزیلی ۸۸
- شکل ۱۹-۴: نمودار گسیختگی کششی در آزمایش برزیلی ۸۸
- شکل ۲۰-۴: دستگاه برش، هندسه، ابعاد نمونه‌ها و مراحل آزمایش برش مستقیم روی درزه مصنوعی ۸۹
- شکل ۲۲-۴: نمودار تنش بر حسب کرنش و رگرسیون خطی بین تنش‌های نرمال و برشی در آزمایش برش مستقیم ۹۰
- شکل ۱-۵: روش‌های عددی مورد استفاده در ژئومکانیک ۹۴

- شکل ۲-۵: مشخصات هندسی مدل ۹۹
- شکل ۳-۵: هندسه و رفتار مکانیکی سطوح تماس در مدل ۱۰۲
- شکل ۴-۵: الگوی مش بندی در سیستم سازند - سیمان - لوله جداري ۱۰۳
- شکل ۵-۵: شرایط مرزی و بارگذاری ۱۰۴
- شکل ۶-۵: تغییرات کنتور فشار منفذی مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک ۱۰۶
- شکل ۷-۵: تغییرات تنش قائم مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک ۱۰۷
- شکل ۸-۵: تغییرات جابجایی کلی مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک ۱۰۷
- شکل ۹-۵: مسیر تعیین شده و تمرکز تنش‌های Von Mises در مرحله حفاری در مدل اول و دوم ۱۰۸
- شکل ۱۰-۵: تنش مماسی بعد از حفاری چاه در مدل اول ۱۰۹
- شکل ۱۱-۵: تغییر تنش‌های مماسی اطراف چاه نسبت به مسیر انتخاب شده در مدل اول و دوم ۱۰۹
- شکل ۱۲-۵: جابجایی کلی مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله حفاری ۱۱۰
- شکل ۱۳-۵: تغییرات فشار منفذی مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله حفاری ۱۱۰
- شکل ۱۴-۵: تغییرات تنش (Von Mises) لوله جداري در مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله تکمیل چاه ۱۱۱
- شکل ۱۵-۵: تغییرات تنش مماسی غلاف سیمان در مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله تکمیل چاه ۱۱۱
- شکل ۱۶-۵: تغییرات تنش شعاعی غلاف سیمان در مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) ۱۱۲
- شکل ۱۷-۵: تغییرات جابجایی محوری در غلاف سیمان برای مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) ۱۱۲
- شکل ۱۸-۵: کرنش پلاستیک ایجاد شده در غلاف سیمان برای مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) ۱۱۲

- ۱۱۳
- شکل ۶-۱: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش نسبت تنش افقی به قائم ۱۱۸
- شکل ۶-۲: تغییرات فاکتور ایمنی و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری با افزایش نسبت تنش‌های افقی به قائم ۱۱۹
- شکل ۶-۳: تغییرات کرنش پلاستیک ایجاد شده در سیمان (الف) و تغییرات ضریب ایمنی لوله‌جداری (ب) با افزایش اختلاف تنش‌های افقی ۱۲۰
- شکل ۶-۴: تغییر کرنش پلاستیک در سیمان، تنش Von Mises و فاکتور ایمنی لوله‌جداری با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی ۱۲۱
- شکل ۶-۵: تغییر کرنش پلاستیک سازند و سیمان با افزایش مدول یانگ سازند ۱۲۲
- شکل ۶-۶: روند خطی تغییرات تنش Von Mises و ضریب ایمنی لوله‌جداری با افزایش مدول یانگ سازند ۱۲۳
- شکل ۶-۷: تغییرات کرنش پلاستیک سازند با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سازند ۱۲۴
- شکل ۶-۸: تغییرات ضریب ایمنی و تنش‌های Von Mises لوله‌جداری با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سازند ۱۲۴
- شکل ۶-۱۱: تغییرات کرنش پلاستیک در سیمان با چسبندگی ۱۸ (الف) و ۱,۵ (ب) مگاپاسکال ۱۲۵
- شکل ۶-۱۲: تغییرات کرنش پلاستیک با افزایش مدول یانگ سیمان ۱۲۶
- شکل ۶-۱۳: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سیمان ۱۲۶
- شکل ۶-۱۴: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش ضریب پواسون سیمان ۱۲۷
- شکل ۶-۱۵: تغییر حداکثر تنش (Von Mises) (الف) و ضریب ایمنی (ب) لوله‌جداری با افزایش مدول یانگ سیمان ۱۲۷
- شکل ۶-۱۶: تغییر تنش (Von Mises) (الف) و ضریب ایمنی (ب) لوله‌جداری با افزایش زاویه

اصطکاک داخلی سیمان ۱۲۸

شکل ۶-۱۷: تغییر تنش (Von Mises) (الف) و فاکتور ایمنی (ب) لوله‌جداری با افزایش ضریب

پوآسون سیمان ۱۲۸

شکل ۶-۹: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان و سازند نسبت به تغییر پارامترهای اصطکاکی کولمب

..... ۱۳۰

شکل ۶-۱۰: تغییرات فاکتور ایمنی و تنشهای (Von Mises) در لوله‌جداری با تغییر پارامترهای

اصطکاکی کولمب ۱۳۱

فهرست جداول

- جدول ۴-۱: روابط ارائه شده برای محاسبه UCS در سازندهای کربناته ۷۰
- جدول ۴-۲: فشار بهینه گل با استفاده از معیار موهر - کولمب ۷۶
- جدول ۴-۳: فشار بهینه گل با استفاده از معیار موگی - کولمب ۷۷
- جدول ۴-۴: طرح اختلاط سیمان جهت ساخت دوغاب ۸۲
- جدول ۴-۵: مشخصات هندسی و نتایج آزمایش تک محوره ۸۵
- جدول ۴-۶: مشخصات هندسی و نتایج آزمایش سه محوره ۸۷
- جدول ۴-۷: تنش‌های نرمال، برشی و کرنش‌های برشی در آزمایش برش مستقیم بر روی درزه مصنوعی ۸۹
- جدول ۵-۱: مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در مدل ۱۰۰
- جدول ۵-۲: پارامترهای اصطکاکی سطوح مشترک بین مواد دربرگیرنده مدل ۱۰۱
- جدول ۶-۱: شرایط اورتوتروپیک و ایزوتروپیک تنش‌های برجا ۱۱۸
- جدول ۶-۲: شرایط آنیزوتروپیک تنش‌های برجا ۱۲۱
- جدول ۶-۳: تحلیل حساسیت روی پارامترهای اصطکاکی سطح تماس ۱۲۹

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

یکپارچگی چاه^۱ طبق استاندارد صنعت نفت نروژ به صورت استفاده از راه‌حل‌های فنی، عملیاتی و سازمانی به منظور کاهش خطر غیرقابل کنترل نشت سیالات سازند در طول چرخه عمر یک چاه تعریف می‌شود. حفظ یکپارچگی چاه در طول عملیات حفاری و نگهداری چاه، یک نگرانی عمده برای شرکت‌های نفتی در سراسر جهان است. نگهداری و تعمیر چاه‌هایی با طول عمر زیاد و هزینه بالا جهت ایجاد چاه‌های جدید باعث می‌شود یکپارچگی چاه یک عنصر حیاتی در مدیریت طول عمر چاه باشد (NORSOK standard, 2004). عواملی مانند ناپایداری چاه، خوردگی، سیمان بدون یکپارچگی، انقباض / انقباض و تغییر فشار باعث از بین رفتن یکپارچگی چاه می‌شوند. بنابراین ارزیابی یکپارچگی چاه برای بهینه‌سازی بهره‌وری و ارزش افزوده بسیار مهم است (Etetim, 2013). از میان خدماتی که در طول حفاری یک چاه نفت یا گاز صورت می‌گیرد، لوله‌گذاری^۲ و سیمان‌کاری^۳ را می‌توان از مهم‌ترین خدمات به شمار آورد. یکپارچگی در طول عمر چاه، میزان تولید و مدت بهره‌دهی آن به مقدار وسیعی به درجه موفقیت این خدمات بستگی دارد. در عملیات لوله‌گذاری، چاه بدون نگهداری به وسیله یک رشته لوله فولادی مخصوص پوشیده می‌شود و در پی آن در عملیات سیمان‌کاری، فضای حلقوی بین لوله و دیواره‌ی چاه، از یک دوغاب سیمان با ترکیبات معین پر می‌شود. دوغاب سیمانی که به این ترتیب فضای پشت لوله‌ها را پر می‌کند با گذشت زمان (معمولاً پس از چند ساعت تا چند روز) سخت می‌شود و سنگ سیمان حاصل مانند غلافی محکم، لوله جداره را در برمی‌گیرد و آن‌ها را با سازند پیوند می‌دهد. از اساسی‌ترین اهدافی که در سیمان‌کاری چاه نفت در نظر گرفته می‌شود ایجاد پیوند مناسب بین لوله‌های جداره با دیواره‌ی سازند در تماس با چاه و ایزولاسیون و جداسازی نواحی پرفشار و کم‌فشار و یا قطع ارتباط بین قسمت‌های مختلف یک مخزن (گاز و نفت) است. بنابراین در اکثر موارد، ایجاد و پیدایش

^۱ Well integrity

^۲ Casing

^۳ Cementing

ترک‌ها و میکرو کانال‌ها در حین سفت شدن سیمان اتفاق می‌افتد. این موارد باعث ضعیف شدن پیوند سیمان با سازند و لوله‌جداری شده و غلاف سیمان نمی‌تواند به عنوان یک مانع مناسب در چاه مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

یکپارچگی چاه یک هدف و راه‌حل جهت حفاظت از جان انسان، محیط‌زیست و درنهایت میزان تولید نفت، در سراسر طول عمر چاه و با هزینه‌ای کم است. علت وقوع فوران چاه‌های نفت و گاز را می‌توان به دودسته اصلی تقسیم کرد: ۱- فوران‌های ناشی از عدم عکس‌العمل مناسب و به‌موقع نیروی انسانی، معیوب بودن ابزارآلات درون و برون چاهی و شیرهای فوران گیر، فرسایش لوله‌های جداری و اتصالات سر چاهی، آسیب‌های سیمان کاری، پیش‌بینی نادرست از وضعیت طبقات زمین به دلیل کمبود اطلاعات، مهاجرت سیال و غیره. ۲- فوران‌های ناشی از زلزله، رانش زمین، انفجار و بمباران. در سال‌های بعد از انقلاب اسلامی، فوران چاه فروزان در دریا، کنگان ۲۹، چاه میدان گچساران، سکوی ابوذر و ۲۴ نفت شهر به دلایلی که در دسته اول به آن‌ها اشاره شد، اتفاق افتاده است. فوران چاه‌های میدان سروش و نوروز، میدان ابوذر در دریا و چاه‌های دهلران در جنگ تحمیلی، چاه ۵۰ اهواز، چاه ۲۳ کنگان و مارون ۱۰۴، نیز جزء دسته دوم هستند. در سال ۱۹۸۹ در دریای شمال (نروژ) به دلیل ترکیدن لوله جداری (از دست رفتن یکپارچگی چاه) و نشت سیال به اطراف، در چاه فوران رخ داد. در سال ۲۰۰۴ در دریای شمال (نروژ) نیز بر اثر آسیب دیدن لوله جداری و از دست رفتن یکپارچگی چاه و در پی آن نشت گاز به بیرون فوران چاه اتفاق افتاد. در سال ۲۰۱۰ در خلیج مکزیک آسیب دیدن سیمان کاری و در پی آن از دست رفتن یکپارچگی علاوه بر خسارت مالی و زیست‌محیطی، جان یازده نفر را نیز گرفت. در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به ترتیب ۱۶۰۹، ۱۹۷۹ و ۱۰۱۴ چاه در شیل مارسلوس پنسیلوانیا^۱ حفر شده است که به ترتیب تعداد ۱۱۱، ۱۴۲ و ۶۷ چاه دچار گسیختگی و درنهایت از دست رفتن یکپارچگی

^۱ Pennsylvania Marcellus

شده‌اند (Etetim, 2013). مهاجرت سیال، یکی از عوامل مؤثر بر فوران چاه‌های نفت و گاز است. یکی از مسیرهای مهم مهاجرت سیال، ناحیه حلقوی و یا فضای بین لوله‌جداری و دیواره چاه است که این ناحیه توسط سیمان پر می‌شود. این غلاف سیمانی وظایف متعددی را انجام می‌دهد که شاید بتوان همه آن‌ها را در دو کلمه‌ی محافظت و ممانعت خلاصه کرد. سیمان به دیواره چاه ثبات می‌دهد، لوله‌های جداری را در مقابل فشارهای خارجی ناشی از طبقات زمین که ممکن است حتی باعث درهم‌شکسته شدن لوله‌جداری شوند و نیز در مقابل الکترولیز و خوردگی که ناشی از آب‌های خورنده زیرزمینی، هیدروکربن‌ها و یا تماس مستقیم لوله‌ها با ساختار هست، محافظت می‌کند. از مهاجرت سیال‌های یک سازند به سازند دیگر و آلوده شدن ناخواسته هیدروکربن‌های ارزشمند (نفت و گاز) ممانعت به عمل می‌آورد. باید در نظر داشت که هر تصمیم عملیاتی اشتباه، منجر به از دست رفتن یکپارچگی چاه می‌شود. از دست رفتن یکپارچگی سیمان یکی از دغدغه‌های شرکت‌های نفتی است که با شناخت عوامل مؤثر بر یکپارچگی، می‌توان این مشکل را تا حدودی برطرف و یا قبل از رخ دادن مشکل، آن را پیش‌بینی کرد.

۱-۳ هدف تحقیق

شناخت بهتر مکانیسم رفتاری سیمان، نقش مهمی در اطمینان از یکپارچگی چاه داشته و می‌تواند به‌طور مؤثر در پیشگیری و یا کنترل گسیختگی لوله‌های جداری مدنظر قرار گیرد. این مسئله ضمن ارتقا سطح ایمنی فرایند تولید از چاه، باعث کنترل هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده و غیرمعارف تولید نفت و گاز (هزینه‌های تعمیر و نگهداری چاه، سیمان‌کاری ثانویه و ...) می‌شود که در برخی میدان‌ها مثل مارون و کوپال بسیار جدی است. توجه به این مسائل به‌ویژه، زمانی که قیمت نفت به پایین‌ترین میزان خود طی سالیان اخیر رسیده است از اهمیتی مضاعف برخوردار است. در این پایان‌نامه سعی شده است با مدل‌سازی عددی به روش FEM^۱ درک صحیحی از یکپارچگی غلاف سیمان و درنهایت یکپارچگی چاه ارائه داده شود. به‌منظور رسیدن به این هدف تغییرات پارامترهای مکانیکی سیمان از جمله کاهش

^۱ Finite element method

و افزایش مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. اهداف اصلی این پایان‌نامه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- (۱) ایجاد و اجرای یک مدل عددی مرجع به روش FEM و تحلیل تغییرات نواحی اطراف چاه
- (۲) بررسی یکپارچگی چاه تحت شرایط مختلف تنش‌های برجا و پارامترهای مکانیکی سازند
- (۳) تغییر پارامترهای مکانیکی سیمان و اثر آن روی یکپارچگی سیمان و فاکتور ایمنی لوله‌جداری

۴-۱ روش تحقیق

عوامل زیادی از جمله عوامل مکانیکی، بر یکپارچگی سیمان و در پی آن یکپارچگی چاه مؤثر هستند. در این پروژه ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای عوامل مؤثر بر یکپارچگی سیمان، مکانیسم گسیختگی در سیمان و در نهایت یکپارچگی چاه بررسی می‌شود. در مرحله بعد، پس از تعیین داده‌های ورودی، مدل عددی تولید می‌شود. بدین منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی که از چاه موردنظر دریافت شده است، مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی از سازند دربرگیرنده چاه ساخته می‌شود. در این مرحله ویژگی‌های مکانیکی مصالح دربرگیرنده شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک و ... ایجاد می‌شود. داده‌های مکانیکی مربوط به سیمان بر اساس پیشنهاد شرکت بهره‌بردار، با در نظر گرفتن نوع سیمان، میزان نسبت آب به سیمان و افزایش‌ها با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شده و سپس با استفاده از داده‌های ورودی و با توجه به شرایط محیطی چاه (محیط پیوسته) توسط نرم‌افزار ABAQUS، مدل مرجع ساخته می‌شود. پس از ساخت مدل عددی مرجع، تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری جهت بررسی اثر شرایط تنش‌های برجا، پارامترهای اصطکاکی سطوح تماس (سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری) و پارامترهای مکانیکی سیمان صورت گرفته و اثر آنها بر یکپارچگی چاه بررسی می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی تفسیر و تحلیل شده و در پایان گزارشی از کار انجام‌شده ارائه می‌شود. به‌طور مختصر مراحل انجام کار به‌صورت زیر است:

- (۱) مطالعات کتابخانه‌ای

- ۲) جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های موردنیاز چاه‌های موردنظر
- ۳) ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی از سازندهای دربرگیرنده و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی
- ۴) ساخت مدل عددی مرجع
- ۵) مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های موجود
- ۶) تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری
- ۷) ارائه گزارش

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

در این تحقیق از نرم‌افزار ABAQUS که یک نرم‌افزار بر پایه المان محدود است، استفاده شده تا مراحل مختلف تحلیل یکپارچگی چاه در سه بخش سازند، سیمان و لوله‌جداری در یکی از میدان‌های جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار گیرد. از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، ارائه یک پیشنهاد برای طراحی دوغاب‌های سیمان در چاه‌های نفت و پیش‌بینی گسیختگی لوله‌جداری تحت شرایط مختلف تنش‌های برجا، پارامترهای مکانیکی سازند و سیمان است. این تحقیق در هفت فصل ارائه شده است که فصل اول آن کلیات بوده که پیش رودارید.

در فصل دوم مبانی نظری شامل یکپارچگی چاه در عملیات و موانع مختلف و تأثیر بخش‌های سازند، سیمان و لوله‌جداری بر یکپارچگی چاه مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل سوم با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، تحقیق‌های انجام شده بر روی یکپارچگی چاه در زمینه‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی بیان می‌شود.

در فصل چهارم زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه بررسی و داده‌های ورودی مدل‌سازی عددی تولید می‌شود. در این فصل ابتدا با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی، زمین‌شناسی و نگاره‌هایی که از چاه موردنظر دریافت می‌شود، مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی از سازند دربرگیرنده چاه ساخته می‌شود و سپس بر اساس پیشنهاد شرکت بهره‌بردار، با در نظر گرفتن نوع سیمان، میزان نسبت آب به سیمان، افزایشها

و با استفاده از آزمایش‌های سه محوره و برش مستقیم، پارامترهای مکانیکی سیمان شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی بین سیمان و سازند تعیین می‌شوند. در فصل پنجم با استفاده از داده‌های ورودی و با توجه به شرایط محیطی چاه و ماهیت مسئله و همچنین براساس قابلیت روش عددی المان محدود در مدل‌سازی پلاستیک سیمان، ضریب ایمنی لوله‌جداری و درنهایت بررسی یکپارچگی چاه از نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی استفاده شده است. در فصل ششم تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری جهت بررسی اثر پارامترهای مکانیکی سیمان، سازند و شرایط تنش برجا و پارامترهای سطوح تماس سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری صورت گرفته و اثر آن‌ها بر یکپارچگی چاه بررسی می‌گردد.

در فصل هفتم نتایج تحقیق و پیشنهادهایی جهت توسعه مدل مرجع آورده می‌شود.

فصل دوم

تعاریف و مبانی نظری

۱-۲ مقدمه

چاه در صنعت نفت و گاز، یک اتصال فیزیکی بین سطح و مخزن هست که از طریق این اتصال می‌توان نفت و یا گاز را از ترازهای پایین به سطح انتقال داد. طراحی این اتصال فیزیکی برای کنترل نشت سیال به سازند و مخزن بسیار مهم است. استفاده از راه‌حل‌های فنی، عملیاتی و سازمانی به منظور کاهش خطر غیرقابل کنترل نشت سیال در طول چرخه عمر یک چاه ضروری است. هنگامی که راه‌حل‌های فنی انتخاب می‌شود مهم است که تجهیزات با مشخصات صحیح نصب شوند و احتیاجات دیواره برای تأمین یکپارچگی چاه (نگهداری و حفاظت در طول عمر چاه) تعریف شود. شکست‌های مختلفی در چاه می‌تواند منجر به از دست رفتن یکپارچگی شود که میزان شدت این شکستگی‌ها متفاوت است. این شکستگی‌ها شامل شکست مکانیکی، هیدرولیکی و یا الکتریکی ناشی از به کار بردن تجهیزات نامناسب در چاه است. بنابراین برای کنترل یکپارچگی باید فراتر از جنبه‌های فنی اقداماتی صورت گیرد و جنبه‌های مدیریتی مناسب نیز در نظر گرفته شود. در بسیاری از موارد نیز تصمیم‌گیری‌های اشتباه باعث از دست رفتن یکپارچگی شده که با توسعه آموزش‌های فنی و مدیریتی بر اساس یکپارچگی چاه، می‌توان این مشکل را تا حدودی حل کرد. راه‌حل‌های عملیاتی جهت اطمینان از یکپارچگی در طول عمر چاه انجام می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان به نظارت دائم بر فشار حلقه برای اطمینان از کنترل نشت و یا رفع نواقص موانع چاه قبل از وقوع خطر (تشخیص خطر قبل از رخداد و اقدامات اصلاحی و یا به‌عبارت‌دیگر مدیریت ریسک) اشاره کرد. راه‌حل‌های سازمانی نیز برای حفظ یکپارچگی چاه در طول عمر آن لازم و ضروری است. ارتباط خوب بین طرفین (نیروهای کاری در هر مرحله از چاه) در شرکت‌های نفت، باعث اشتراک گذاشتن اطلاعات صحیح از مراحل قبلی چاه و ایجاد فضای ایمن در طول عمر چاه است. بسیاری از مشکلات و حوادث رخ داده در اثر از دست رفتن یکپارچگی چاه به دلیل اشتراک ضعیف مستندات و اطلاعاتی است که از جمله این اطلاعات می‌توان به اطلاعات مربوط به موانع

چاه^۱ (لوله جداری، سیمان کاری و سازند)، طراحی چاه، محدودیت‌های عملیاتی و... اشاره کرد. توجه به یکپارچگی چاه به دلیل هرزروی سیال نفت از طریق فضای بین دیواره چاه و لوله‌جداری به سازند اطراف و یا سطح زمین از اهمیت زیادی برخوردار است (NORSOK standard, 2004).

در این فصل با توجه به اهمیت بالای تفکیک موضوع یکپارچگی در مراحل مختلف طول عمر چاه، ابتدا یکپارچگی چاه در مراحل مختلف شرح داده می‌شود. سپس یکپارچگی چاه در موانع مهم چاه از جمله سازند، سیمان و لوله‌جداری بررسی شده و عوامل مختلفی که یکپارچگی این موانع را به خطر می‌اندازند مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۲ یکپارچگی چاه در مراحل مختلف احداث و بهره‌برداری

مدیریت مؤثر یکپارچگی چاه نیاز به در نظر گرفتن طیف وسیع فعالیت‌های انجام شده در مراحل مختلف چاه همراه با تولید پایدار است. چهار مرحله اصلی در طول عمر چاه وجود دارد که دو مرحله ساخت و تولید، مراحل حیاتی در بحث یکپارچگی هست. مراحل اصلی طول عمر چاه شامل موارد زیر است (Etetim, 2013):

- طراحی: شامل فعالیت‌های اکتشافی قبل از آغاز ساخت چاه
- ساخت و تکمیل: این مرحله شامل حفاری، سیمان کاری و تکمیل چاه است. تنش‌های اطراف چاه و پایداری آن با نوسان‌های چگالی مایعات درون چاه به‌طور مداوم تغییر می‌کنند. این فرآیندها تنش‌های ایجاد شده در غلاف سیمان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.
- مرحله عملیاتی (تولید): طولانی‌ترین مرحله عمر چاه را تشکیل می‌دهد. عملیات از قبل تعیین شده و مداخلات برنامه‌ریزی نشده بشر، به‌طور جدی یکپارچگی چاه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. افزایش تنش‌های برجا در اثر نشست ناشی از تخلیه مخزن، عملیات

^۱ Well Barriers

پرفشار HP-HT^۱، بخار آب، تزریق گاز و تولید در مخزن از جمله این عملیات هستند.

➤ مرحله رهاسازی چاه: شامل بستن و متروکه کردن چاه در صورت اتمام زندگی اقتصادی آن است.

این مراحل در ادامه تشریح می‌شوند.

۱-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله طراحی

چالش اصلی در این مرحله، دستیابی به اطلاعات قابل اطمینان مربوط به فشارهای زیرسطحی و ناهمگن است. اغلب چاه‌ها دارای عدم قطعیت‌هایی شامل پیش‌بینی فشار منفذی و شکست، دمای زمین‌گرمایی، لیتولوژی و سیال‌های مختلف مورد انتظار جهت پایداری چاه هستند. گروه زمین‌شناسی برای برآوردهای اولیه خود، بسیاری از عدم قطعیت‌ها را برای رسیدن به ذخیره مخزن می‌پذیرد. معمولاً در مرحله طراحی، در درجه اول موانع چاه از جمله سازند، سیمان و لوله‌جداری جهت حفاری، بارگذاری دینامیکی ناشی از ماهیت پیچیده زیرسطحی و رسیدن به عمق کلی لوله‌جداری تحت شرایط سخت طراحی شده‌اند (Etetim, 2013).

۲-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله حفاری و تکمیل

فعالیت‌های حفاری روی پایداری چاه، یکپارچگی لوله‌جداری، سیمان و درنهایت یکپارچگی چاه تأثیر می‌گذارد. به‌ندرت امکان اندازه‌گیری‌های کیفیت و بازبینی روزانه طراحی در این مرحله وجود دارد. در این مرحله دستیابی به محیط زیرسطحی واقعی که انتظار می‌رفت و برای آن برنامه‌ریزی شده بود، به‌ندرت اتفاق می‌افتد. پیش‌بینی دور از واقعیت فشار منفذی، مقاومت سنگ، سیالات مخزن، ویژگی‌های سنگ، سازندهای بالا و انواع سنگ‌شناسی باعث تغییر شرایط مرزی در مرحله طراحی می‌شوند. معمولاً این تغییر شرایط مرزی، بدون در نظر گرفتن طراحی اصلی پذیرفته می‌شود. هدف اولیه چاه، تضمین ایمنی و قابل اطمینان بودن تولید سیال نفت و یا گاز به سطح زمین است. در مرحله ساخت باید هر

^۱ High Pressure - High Temperature

مرحله، قبل و بعد از سیمان‌کاری و مراحل تکمیل چاه کنترل شود تا صحت طراحی اصلی تقریباً به دست آید. ستون سیال حفاری اولین مانع در برابر ورود سیال‌های سازند به درون چاه است. در حقیقت گل حفاری تشکیل فیلتر کیک^۱ داده و پایداری دیواره چاه را تضمین می‌کند. سالم نگه‌داشتن دیوار چاه، ستون سیمانی که در مرحله تکمیل چاه ایجاد می‌شود را تضمین می‌کند. حفاری از میان سازندهای پیچیده نیازمند تقویت چاه برای جلوگیری از نشت سیال به سطح و یا اطراف چاه است (Etetim, 2013).

۳-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله عملیاتی (تولید)

معمولاً مرحله عملیاتی بیشترین خطر از دست رفتن یکپارچگی را برای چاه ایجاد می‌کند. به‌طور طبیعی مرحله تولید سیال نفت، خطر خوردگی، حرارتی و بارهای فشاری که در مرحله ساخت چاه دیده نمی‌شدند را ایجاد می‌کند. برای محافظت از اپراتورهای تولید و کاهش مشکلات یکپارچگی در مرحله تولید، تهدیدات باید در مرحله طراحی ارزیابی شود و سپس در مرحله ساخت چاه اعتبارسنجی و رفع شوند. این رویکرد مستلزم آن است که اپراتورها درک صحیحی از یکپارچگی داشته باشند تا بتوانند مشکلات را به‌خوبی اداره کنند. اطمینان بیشتر به تولید، ریسک کمتر و دارایی‌ها از دیگر نتایج این رویکرد هستند (Etetim, 2013).

۴-۲-۲ یکپارچگی چاه در مرحله رهاسازی

ثبت ضعیف اطلاعات در مراحل قبل، عبور چاه از دوره‌های مختلف و حجم زیاد اطلاعات باعث می‌شود که مدیریت عملیات در این مرحله سخت شود. مسائل مربوط به نرم‌افزارهای ناسازگار و عدم انتقال مناسب اطلاعات در مراحل چاه، تأثیر زیادی بر مدیریت ریسک، ایمنی، محیط‌زیست و تصمیم‌گیری چگونگی رهاسازی چاه دارد. عدم اطمینان در رهاسازی چاه اغلب به دلیل اطلاعات مربوط به فشار مخزن است (Etetim, 2013).

^۱ Filter cake

۲-۳ عوامل موثر بر یکپارچگی در موانع مختلف چاه

موانع چاه در حقیقت ابزارهایی برای جلوگیری از دست رفتن یکپارچگی چاه هستند. این موانع برای جلوگیری از نشت سیال و کاهش خطرهایی که در ارتباط با مراحل مختلف چاه از جمله حفاری، تکمیل و تولید ایجاد می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق استاندارد صنعت نفت نروژ موانع چاه شامل یک یا چند عنصر مانع هستند که از ورود سیال نفت یا گاز از سازند به سازند دیگر، از سازند به داخل چاه و سطح زمین و یا برعکس از چاه به داخل سازند جلوگیری می‌کنند. این عناصر به تنهایی قادر به توقف جریان سیال به اطراف نیستند (NORSOK D-010, 2004). چهار راه اصلی برای نشت هیدروکربن از سیستم چاه به محیط اطراف و یا سطح، شامل رشته لوله تکمیلی، فضای حلقوی تکمیلی، سیمان بین فضای حلقوی و اطراف سیستم لوله‌گذاری است (Etetim, 2013). از جمله عناصر حیاتی که در ترکیب باهم می‌توانند مانع از نشت هیدروکربن به اطراف شوند می‌توان به سازند، سیمان و لوله‌گذاری اشاره کرد.

۲-۳-۱ سازند و اثر آن بر یکپارچگی چاه

اگر سازند به‌عنوان بخشی از موانع چاه به شمار آید باید به این نکته توجه داشت که زمانی که سازند به‌عنوان پوشش و مانع استفاده می‌شود نباید اجازه دهد هیچ‌گونه نشت و یا جریان سیال درون آن اتفاق افتد. یعنی اینکه ویژگی‌های سازند برای این هدف به‌گونه‌ای باشد که اولاً نفوذناپذیر باشد و ثانیاً شامل شکستگی‌های باز عمودی بین مصالح سخت سازند نباشد. در صنعت نفت دو سناریو مختلف که در آن شرایط مختلفی به یکپارچگی سازند اعمال می‌شود، وجود دارد (Etetim, 2013).

✓ به‌طور معمول در مرحله حفاری، شما به چاه دسترسی دارید و می‌توانید رفتار فشاری مربوط به چاه را مشاهده کنید.

✓ به‌طور معمول در مرحله تولید و تزریق شما هیچ دسترسی به چاه جهت نظارت و ارزیابی بر تغییرات فشار نخواهید داشت.

در مورد اول می‌توان بنا به تقاضا عمل کرد و تا حدی شرایط چاه را از طریق تغییر فشار چاه، اضافه کردن مواد شیمیایی، تغییر شرایط دمایی و... کنترل کرد. بنابراین تا حدودی شرایط آزادانه مانند گرادیان فشار شکست جهت نشان دادن یکپارچگی سازند، تعریف شده است. فشار چاه باید به گونه‌ای باشد که سازند بتواند بدون شکستن وضعیت یکپارچگی خود را حفظ کند. در مورد دوم به اطلاعات دقیق‌تری در مورد یکپارچگی سازند نیاز است. دانش کامل درباره تمرکز تنش‌های برجا زیرسطحی برای بررسی پایداری چاه و تغییر تنش در طول عمر چاه برای بررسی یکپارچگی چاه امری ضروری است (Himmelberg, 2014). حداقل تنش سازند و ویژگی‌های سازند (مکانیکی، گرمایی و شیمیایی) باهم به‌عنوان عوامل مؤثر و مهم بر یکپارچگی آن می‌باشند. تشخیص درست این عوامل مطمئن‌ترین راه برای حفظ یکپارچگی است. در این مورد سازند اجازه نخواهد داد که سیالات مخزن به‌طور غیرقابل تشخیص نشت کنند (Sangesland et al, 2012).

به‌طور کلی باید گفت که ناپایداری دیواره چاه بستگی به آن دارد که سنگ دیواره چاه چگونه به تمرکز تنش القایی ناشی از عملیات حفاری جواب خواهد داد. اگر استحکام سنگ بیشتر از مقدار تنش القایی باشد، چاه پایدار خواهد ماند. در شرایط عکس سنگ تسلیم خواهد شد و احتمال ناپایداری در چاه وجود دارد. آیا این ناپایداری موجب مشکلات جدی خواهد شد یا نه؟ پاسخ این سؤال بستگی به عواملی مانند: رفتار سنگ بعد از شکست، حجم سنگ‌های جدا شده و فروریخته، حساسیت عملیات حفاری به گشاد شدگی چاه و ظرفیت تمیزکاری چاه (خواص سیال، سرعت گردش سیال) دارد. بنابراین اولین مرحله آنالیز پایداری چاه شامل تعریف و تفسیر مشکلات مشاهده شده در میدان است. پوسته پوسته شدن دیواره چاه، کاهش سرعت حفاری، چسبیدن لوله به دیواره چاه، شستشوی دیواره چاه، نیاز به تمیزکاری مفرط و غیرطبیعی برای رسیدن به ته چاه، ریزش کامل دیواره چاه، ایجاد شکاف، هرزروی سیال حفاری و حتی فوران داخلی چاه از جمله پدیده‌هایی است که نشان می‌دهند دیواره چاه ناپایدار است (پارسامهر و همکاران، ۱۳۸۹). به دلیل اینکه ناپایداری چاه باعث از دست رفتن یکپارچگی سازند و در پی آن یکپارچگی چاه می‌شود، عوامل مهم و تأثیرگذاری که پایداری چاه را به خطر می‌اندازند، از

سالیان قبل مورد مطالعه محققین قرار گرفته است (Fajar et al, 2008, Nawrocki et al, 1998, Mengiiao, 2003, Rahman, 2003). پایداری چاه را می توان با تعیین پنجره بهینه گل حفاری پیش-بینی کرد و از شکست و فروپاشی جلوگیری کرد. ناپایداری در حفاری چاه های نفت و گاز ممکن است توسط تنش های برجایی که در مقایسه با مقاومت سازند بسیار بالا هستند و یا برهم کنش های فیزیکی-شیمیایی میان گل حفاری و شیل و یا ترکیبی از هر دو باشد. از جمله عوامل مؤثر بر پایداری چاه می توان به موارد زیر اشاره کرد.

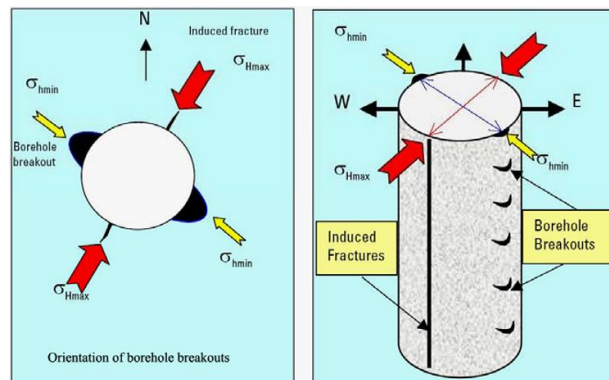
۲-۳-۱-۱ مشخصات مکانیکی

مشخصات مکانیک سنگی شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، تخلخل سنگ، نفوذپذیری، چگالی، چسبندگی، مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی است. این پارامترها می توانند بر پایداری چاه تأثیر گذار باشند. اگرچه این پارامترها تحت کنترل مهندسان حفاری نیستند اما دانش کافی درباره آنها طراحی مناسب چاه، پیش بینی پایداری و انتخاب مسیر مناسب حفاری را در پی خواهد داشت.

۲-۳-۱-۲ تنش های برجای اصلی

سازندهای زیرزمینی تحت تنش فشاری عمودی هستند که ناشی از وزن روباره است و تنش های افقی منجر به مهار جانبی می گردند. تحت عمل تنش های برجای فوق، در ابتدای حفاری چاه، توده سنگ از تعادل ابتدایی خارج شده و تعادل اولیه از بین می رود. با فرض اینکه تنش های اصلی موجود در محیط (قبل از ایجاد چاه)، σ_v (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی حداکثر)، σ_h (تنش افقی حداقل) باشند؛ پس از حفر، تنش های اطراف دیواره چاه جای خود را به تنش های القایی می دهند. تنش های القایی به وجود آمده در اطراف دیواره چاه شامل: σ_r (تنش شعاعی)، σ_θ (تنش مماسی) و σ_z (تنش محوری) است. باین حال تنش های القایی تنها در محدوده ای در حدود ۲ تا ۳ برابر قطر چاه القا می شود. با گذر از این محدوده، تنش های موجود در محیط برابر با تنش های قبلی خواهند شد. تنش های برجا از چاه تأثیر نمی پذیرند و در مقابل، تنش های القایی در دیواره چاه (سطح اشتراک گل و سازند) فعال می گردند. این

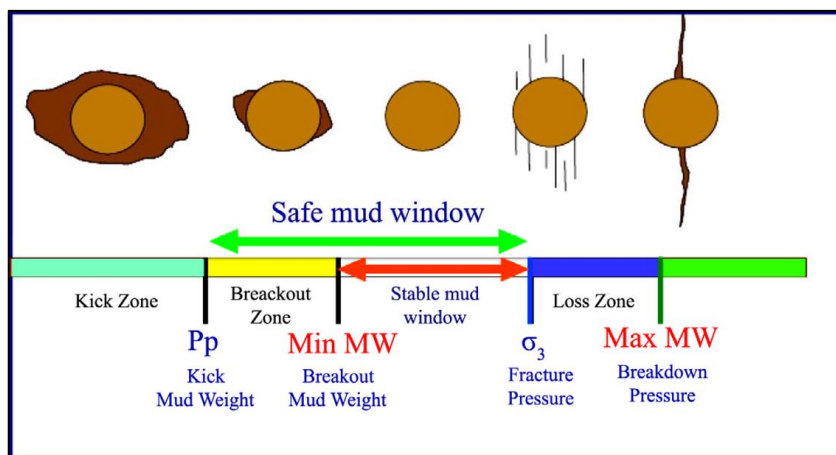
تنش‌ها را تنها می‌توان به‌وسیله چگالی گل حفاری کنترل کرد. همان‌طور که در شکل (۱-۲) نیز مشخص است، پدیده Breakout به دلیل اعمال تنش‌های القایی در اطراف چاه ایجاد می‌شود. در این پدیده افزایش قطر و ریزش در جهت تنش حداقل و شکستگی‌های کششی در جهت تنش افقی حداکثر رخ می‌دهد.



شکل ۱-۲: ایجاد پدیده Breakout و شکستگی‌های کششی در چاه (Afsari, 2009)

۳-۱-۳-۲ فشار سیال حفاری

در هنگام حفاری یک چاه، سنگ برجا توسط مته حفاری شکسته خواهد شد و توسط جریان سیال حفاری خارج می‌شود. در این زمان حمایت از دیواره چاه توسط سیال حفاری انجام می‌شود. ایجاد پنجره ایمن سیال حفاری جهت تضمین پایداری دیواره چاه ضروری است. برای پیشگیری از شکست القایی سازند باید وزن مخصوص گل به‌اندازه کافی بالا باشد که فشار سازند را کنترل کند. شکل (۲-۲) انواع نواحی و پنجره‌های ایجادشده در پایداری چاه را نشان می‌دهد. اگر فشار گل حفاری از فشار منفذی کمتر شود، باعث ایجاد زون کیک مانند در اطراف چاه می‌شود. فشار گل در بازه بین فشار منفذی و تنش حداقل اصلی، پنجره ایمن گل را ایجاد می‌کند. اگر وزن گل بیشتر از فشار منفذی و کمتر از وزن حداقل خود باشد، پدیده Breakout در چاه رخ می‌دهد.



شکل ۲-۲: نواحی و پنجره‌های مختلف سیال حفاری جهت پایداری چاه (Afsari, 2009)

۲-۳-۱-۴ ناپایداری شیمیایی

ناپایداری‌های شیمیایی غالباً در سازندهای شیلی دیده می‌شود و شدیداً تحت تأثیر ترکیب سیال حفاری است. واکنش رس موجود در شیل با سیالات نامناسب حفاری، باعث انبساط و ایجاد تنش‌های هیدرولیکی و تغییر خواص آن در طول زمان خواهد شد. متفاوت بودن مواد شیمیایی درون سیال منفذی و سیال حفاری می‌تواند باعث ایجاد واکنش‌هایی حین حفاری شود (Rahman et al, 2000).

۲-۳-۱-۵ تغییر دما

با افزایش عمق حفاری، دما نیز افزایش می‌یابد و در پی آن تنش وارد بر دیواره چاه نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال اگر دمای بین سازند و سیال حفاری از ۶۰ درجه به ۷۰ درجه تغییر کند تنش معادل ۱۰ مگاپاسکال متحمل چاه می‌شود (Maury, 1994). همچنین باعث تغییر در واکنش‌های شیمیایی سیال‌های منفذی و حفاری می‌شود. علاوه بر این افزایش حرارت سازند سبب می‌شود تا تمرکز تنش‌های شعاعی و مماسی در اطراف چاه بیشتر شود. این افزایش دمای سازند سبب می‌شود تا جریان سیال به درون سازند بیشتر شده و در نتیجه مقاومت سازند کاهش یافته و پتانسیل شکست برشی افزایش یابد. برای غلبه بر این مشکل می‌توان وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست‌های برشی و کششی را افزایش داد.

۲-۳-۱-۶ اثرات وابسته به زمان

در هنگام حفاری و بعد از مرحله ساخت چاه، مشکلات پایداری اغلب به صورت وابسته به زمان ظاهر می‌شوند. مشکلات شدیدی ممکن است در مراحل بعد از حفاری شروع شوند که اگر مشکلات یک‌باره در چاه ایجاد شوند غلبه بر آن‌ها آسان نخواهد بود. دو مکانیسم ذاتی برای کنترل رفتار تنش- کرنش- زمان مربوط به سنگ اشباع شده وجود دارد (فاتحی راد، م. ۱۳۹۲).

➤ مورد اول تحکیم است که به وسیله رابطه بین تغییرات تنش‌های مؤثر و نتایج حاصل از آن توصیف می‌شود. این فرایند همچنین به مهاجرت سیال حفره‌ها نیز مربوط می‌شود. ایجاد تراوایی یک پارامتر ضروری است و همچنین سختی ماتریکس نیز مهم خواهد بود.

➤ مکانیسم دوم خزش است که به صورت افزایش کرنش در تنش مؤثر ثابت دسته‌بندی می‌شود. خزش می‌تواند اثرات قابل توجهی در سنگ‌های مانند نمک و همچنین شیل‌های سخت شده داشته باشد. اگر میزان تغییر شکل بزرگ باشد، نتیجه‌ی آشکار آن، کاهش در قطر چاه خواهد بود. به دلیل فشار وارد بر دیواره چاه و عدم توان مقابله چاه در برابر این فشار باعث شکست در سازند و همچنین در سیمان اطراف لوله جداری می‌شود.

در بسیاری از موارد جدایش بین خزش و تحکیم در سنگ‌های با تخلخل کم مانند شیل امکان پذیر نیست. تحکیم معمولاً بعد از بارگذاری و خزش بعد از تغییر شکل غالب خواهند بود. تخمین چنین اثراتی با توجه به این حقیقت که شرایط مرزی از شرایط ثابت اطراف چاه دورتر است، پیچیده‌تر خواهد بود. بنابراین نکته‌ی حائز اهمیت این است که سنگ چگونه می‌تواند سریع توسط لوله جداری عایق شود (الوندی، ع. ۱۳۹۳).

۲-۳-۱-۷ اثر تخلیه مخزن

در اثر تولید، مخزن تخلیه می‌شود. این مخازن می‌توانند رفتارهای متفاوتی نسبت به حالت اولیه از خود نشان بدهند. اتفاقی که در اثر تخلیه مخزن می‌افتد، کاهش فشار منفذی است. این کاهش تأثیرات

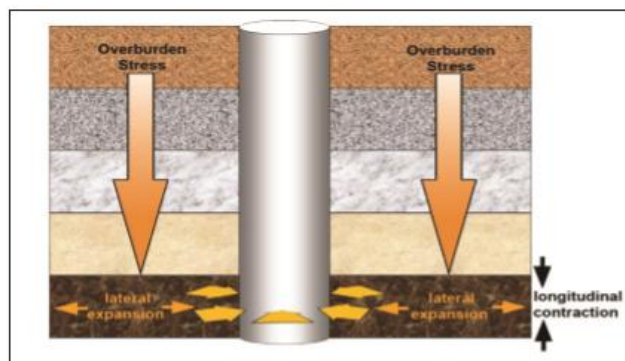
مختلفی دارد و می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی شود و یا به‌عنوان عامل مساعد به حساب آید. همچنین ممکن است در اثر تولید، گسل در مخزن ایجاد شود. کاهش فشار منفذی و رسیدن مسیر تنش به مقدار بحرانی عامل این اتفاق هستند.

تخلیه مخزن می‌تواند بسیاری از پارامترهای مکانیک سنگی را تغییر داده و سبب افزایش مقادیر تنش‌های مؤثر، قوام سنگ و کاهش مقادیر تنش‌های افقی کل، کاهش فشار منفذی و قابلیت حفاری سنگ شود. کاهش فشار در مخزن گرادیان شکستگی را تغییر داده و تنش برشی را افزایش می‌دهد که خود منجر به وقوع گسیختگی برشی در مخزن می‌گردد. همچنین با افت فشار منفذی مخزن دچار عارضه انقباض شده و سبب ایجاد نشست و حرکت (به‌خصوص در لایه‌های نرم در مجاورت لایه‌های سخت) در طبقات روباره می‌گردد، که بسته به شدت و بزرگی آن می‌تواند از عوامل وقوع و یا تسریع مچالگی لوله‌های جداری باشد. تخلیه مخزن همچنین می‌تواند تحریک و فعال‌سازی مجدد گسل‌های موجود را به دنبال داشته باشد. لغزش گسل و شکاف‌های جدید می‌تواند تراوایی را افزایش دهد. این امر خود می‌تواند باعث افزایش تولید از مخزن شود. بنابراین، توجه به افزایش تراوایی و تغییرات آن در مدیریت تولید از یک مخزن نقش مهمی دارد (Schutjens et al, 2004).

۲-۳-۲ لوله جداری و اثر آن بر یکپارچگی چاه

در عمل حفاری یک چاه با یک سرمرته ثابت و کامل کردن آن به‌وسیله یک لوله از سطح تا عمق موردنظر بسیار ارزان است. با این حال وجود لایه‌های پرفشار، سازندهای سست شکننده و شیل‌های دارای خاصیت متورم شونده در اعماق مختلف، راندن لوله‌های جداری را برای حفاری نمودن این قسمت و رسیدن به عمق نهائی ضروری می‌نماید. بنابراین لوله‌های جداری با اندازه‌های مختلف برای پوشاندن قسمت‌های متفاوت درون چاه رانده می‌شوند که در نهایت حالت مخروطی شکلی را به چاه خواهد داد. از آنجاکه فشار در هر قسمت چاه متغیر است، این امکان وجود دارد که لوله‌های جداری هم‌اندازه با ضخامت دیواره متفاوت یا درجه فولادی متفاوت را برای گذر از آن منطقه به کاربرد. بنابراین لوله

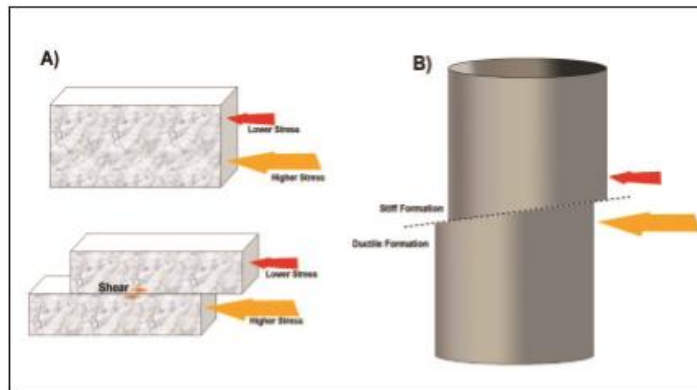
جداری سنگین تر یا دارای درجه فولادی بالاتر می‌تواند در طول قسمتی که دارای فشار بیشتری است و یا نزدیک به سطح است و در آنجا نیروی کششی بیشتری به لوله‌ها اعمال می‌گردد، به کار برده شود. گسیختگی‌هایی که در لوله جداری رخ می‌دهد عمدتاً ناشی از عوامل شیمیایی است که به آن خوردگی می‌گویند و یا بر اثر عوامل طبیعی و مکانیکی رخ می‌دهد که به آن‌ها مچاله شوندگی و برش می‌گویند. مچاله شوندگی لوله جداری از جمله مشکلات حاد یکپارچگی چاه‌های میدان‌های هیدروکربنی است. این پدیده موجب خارج شدن چاه از چرخه تولید و تحمیل هزینه‌های زیاد به شرکت‌های نفت می‌شود. مهم‌ترین عواملی که باعث مچاله شوندگی لوله‌جداری می‌شود شامل: انبساط جانبی بر اثر فشار روباره (شکل ۲-۳)، خصوصیات شدیداً پلاستیکی برخی سازندها، خالی شدن و تراکم مخزن حین تولید، عملیات سیمان‌کاری ضعیف و فشار منفذی بالای برخی سازندها است (Dusseault, 2001).



شکل ۲-۳: انبساط جانبی بر اثر فشار روباره (آشتیانی عبدی و امیری بختیار، ۱۳۸۹)

از طرف دیگر پدیده خوردگی هر ساله میلیاردها دلار به صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز زیان وارد می‌کند. یکی از بخش‌های آسیب‌پذیر صنعت نفت در برابر خوردگی، لوله جداری است. عواملی که باعث خوردگی لوله جداری می‌شوند شامل: ترکیبات شیمیایی آب زیرزمینی، تفاوت در ساختارها (نمکی، شیلی و...)، واکنش با دیگر فلزات موجود در خاک، حضور هیدروژن سولفید و کربن دی‌اکسید هستند. برش لوله جداری به دلیل عوامل طبیعی و القایی است. این عوامل طبیعی شامل حرکت طبیعی سنگ-های اطراف به سمت چاه است که با زلزله، انفجار و یا حرکت گسل تحریک می‌شوند. عوامل القایی شامل تمرکز تنش، تغییر شکل به دلیل تزریق و برداشت و اختلاف فشار است (Dusseault, 2001).

مطابق شکل (۲-۴)، با افزایش اختلاف در تنش‌های افقی، برش در لوله‌جداری رخ می‌دهد.



شکل ۲-۴: اختلاف زیاد در تنش افقی و برش در لوله‌جداری (آشتیانی عبدی و امیری بختیار، ۱۳۸۹)

به‌طور کلی می‌توان گفت که عوامل ژئومکانیکی تأثیر زیادی بر یکپارچگی لوله‌جداری خواهند داشت. بنابراین برای رسیدن به حالت ایده‌آل طراحی، باید این طراحی طبق پارامترهای ژئومکانیکی انجام گیرد.

۲-۳-۳ سیمان و اثر آن بر یکپارچگی چاه

در مرحله تکمیل چاه، عملیات لوله‌گذاری و سیمان‌کاری به‌منظور حفظ یکپارچگی چاه انجام می‌شود. تهیه و پمپاژ سیمان در چاه را سیمان‌کاری چاه می‌گویند و پر کردن فضای حلقوی بین دیوار و جداره لوله‌جداری با دوغاب مناسب سیمان را عملیات سیمان‌کاری می‌گویند. یکی از عوامل مهم کمک‌کننده به یکپارچگی چاه، باند سیمان است. باند سیمان در چاه، شامل پیوند بین سیمان، سازند و لوله‌جداری است. مهاجرت گاز و نفت به بالا از طریق کانال‌های سیمان منجر به فوران چاه می‌شود. هنگامی که سیال نفت یا گاز تراوش کند و سراسر لوله‌جداری را فراگیرد، باگذشت زمان باعث پوسته‌شدن و ساییده شدن لوله شده و درنهایت یک کانال و یا شکستگی درون آن ایجاد می‌شود. غلاف سیمان، به‌طور مداوم پس از حفاری بررسی می‌شود. باوجود این بررسی‌های انجام‌شده، رویدادهای پیش‌بینی‌نشده مانند نشت سیالات سازند و فوران باعث از دست رفتن یکپارچگی چاه می‌شوند. نیاز اولیه برای جلوگیری از مهاجرت گاز و نفت از درون غلاف سیمان، طراحی و برنامه‌ریزی درست سیمان‌کاری است. بنابراین شرکت‌های نفتی تلاش زیادی برای جلوگیری از ایجاد کانال در سیمان هنگام سیمان‌کاری انجام می‌دهند. سیمان باید اطراف لوله‌جداری را در برگیرد و با سازند اطراف خود درگیر شود به‌گونه‌ای که درز

و یا بازشدگی بین آن‌ها ایجاد نشود. این سیمان باید یکپارچگی ساختار اصلی چاه در مراحل اکتشاف، تولید و بعد از رهاسازی را ایجاد کند. طرح اختلاط سیمان یکی از کارهای پیچیده مهندسی است که افزاینده‌های بسیاری برای این کار طراحی شده‌اند. با این حال در سال ۲۰۱۰ انجمن مهندسی نفت (SPE)^۱ بر پایه بررسی یکپارچگی چاه یک مجله تولیدی- عملیاتی ارائه داد که نشان داد ۱۸ درصد چاه‌ها در بررسی‌های یکپارچگی دچار شکستگی، مشکلات و عدم قطعیت‌های فراوان شده‌اند.

سیمان، لوله جداری را در برابر نیروهای وارده محافظت می‌کند و از زوال آن در طولانی‌مدت جلوگیری می‌کند. سیمان از خوردگی لوله‌جداری بر اثر وجود آب نمک‌دار در طبقات مختلف خاکی جلوگیری می‌کند. همچنین سیمان وظیفه دارد از نفوذ آب و گازهای مختلف موجود در طبقات زمین به فضای حلقوی لوله جداری ممانعت به عمل آورد. از وظایف دیگر آن، آب‌بندی کردن بخش‌هایی از چاه است که گل حفاری از آنجا نشت کرده و وارد طبقات خاکی می‌شود. می‌توان با استفاده از سیمان چاه را بست و از خروج گاز و سایر سیالات از آن، جلوگیری کرد. و همچنین با سیمان‌کاری می‌توان بخش انتهایی چاه را آب‌بندی کرد و چاه دیگری را با فاصله از چاه قدیمی حفر نمود. سیمان‌کاری مناسب در حقیقت به‌عنوان محافظ لوله جداری عمل می‌کند که این لوله جداری تا پایان عمر چاه، یکپارچگی چاه را تضمین می‌کند. بنابراین شناخت غلاف سیمان برای بررسی یکپارچگی چاه ضروری است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱ ویژگی‌های استاندارد سیمان

ترکیب اصلی سیمان‌هایی که در سیمان‌کاری چاه‌های نفت بکار برده می‌شوند، همان سیمان‌های صنعتی است با این تفاوت که از لحاظ ترکیب ساختاری، موادی به آن اضافه می‌شود که خاصیت پمپ پذیری دوغاب سیمان افزایش یابد. نوع مواد و میزان مواد تشکیل‌دهنده سیمان‌های صنعت حفاری باید به‌گونه‌ای باشد که خواص ذیل را در آن‌ها ایجاد نماید: ویسکوزیته سیمان و زمان سفت شدن آن به

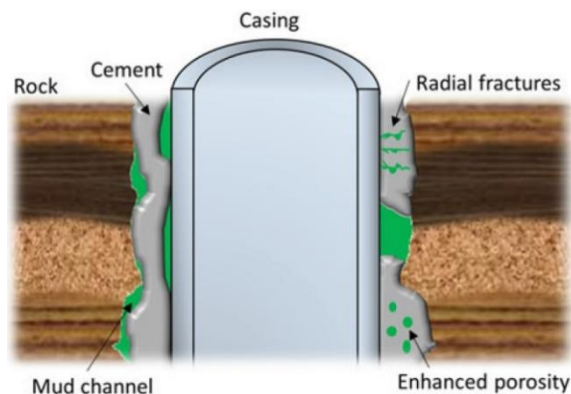
^۱ Society of Petroleum Engineers

صورتی باشد که بتوان آن را با پمپ در عمق معینی از چاه قرارداد. به محض قرارگیری در چاه باید سریعاً و در کوتاه مدت مقاومت کافی در آن ایجاد شود تا از شکست مکانیکی جلوگیری به عمل آید. سیمان باید فاقد نفوذپذیری باشد تا سیال طبقات در آن نفوذ نکند. به طور کلی طبق نظریه استاندارد نفت نروژ، سیمان باید مشخصات زیر را داشته باشد (NORSOK standard, 2004):

- نشت ناپذیر
- یکپارچگی طولانی مدت
- نباید انقباض پیدا کند.
- شکل پذیر (شکننده نباشد)، قادر به مقاومت در برابر بارگذاری و ضربات مکانیکی
- مقاوم در برابر مواد شیمیایی مانند CO_2 ، H_2S و هیدروکربن ها
- مرطوب باشد، برای اطمینان از اتصال به فولاد

۲-۳-۳-۲ عوامل مؤثر بر یکپارچگی سیمان

از اساسی ترین اهدافی که در سیمان کاری چاه نفت در نظر گرفته می شود، ایجاد پیوند مناسب بین لوله های جداری با دیواره سازند در تماس با چاه و ایزولاسیون و جداسازی نواحی پرفشار و کم فشار و یا قطع ارتباط بین قسمت های مختلف یک مخزن (مثلاً گاز و نفت) است. در اکثر موارد ایجاد و پیدایش ترک ها و کانال های مویی در حین بندش سیمان باعث ضعف ایزولاسیون پیوند شبکه سیمان گردیده و سیمان قادر به قطع ارتباط نواحی مختلف نمی گردد و عملاً دستیابی به اهداف سیمان کاری را مشکل و بعضاً غیرممکن می نماید و مشکلات جدی را به آینده تولیدی چاه و یا شرایط ادامه حفاری تحمیل می کند. از دست رفتن یکپارچگی سیمان یکی از دغدغه های شرکت های نفتی است که با شناخت عوامل مؤثر بر یکپارچگی آن می توان این مشکل را تا حدودی برطرف کرد و یا اینکه قبل از رخ دادن مشکل، آن را پیش بینی کرد. شکل (۲-۵) مسیرهای ایجاد شده در غلاف سیمان برای مهاجرت سیال را نشان می دهد. این مسیرها شامل تخلخل، شکستگی های شعاعی، از بین رفتن پیوند بین سیمان، سازند و لوله جداری به دلیل عوامل مکانیکی و ایجاد انقباض در سیمان، هستند (Lavrov and Torsaeter, 2016).



شکل ۲-۵: مسیره‌های ایجادشده در غلاف سیمان (Lavrov and Torsaeter, 2016)

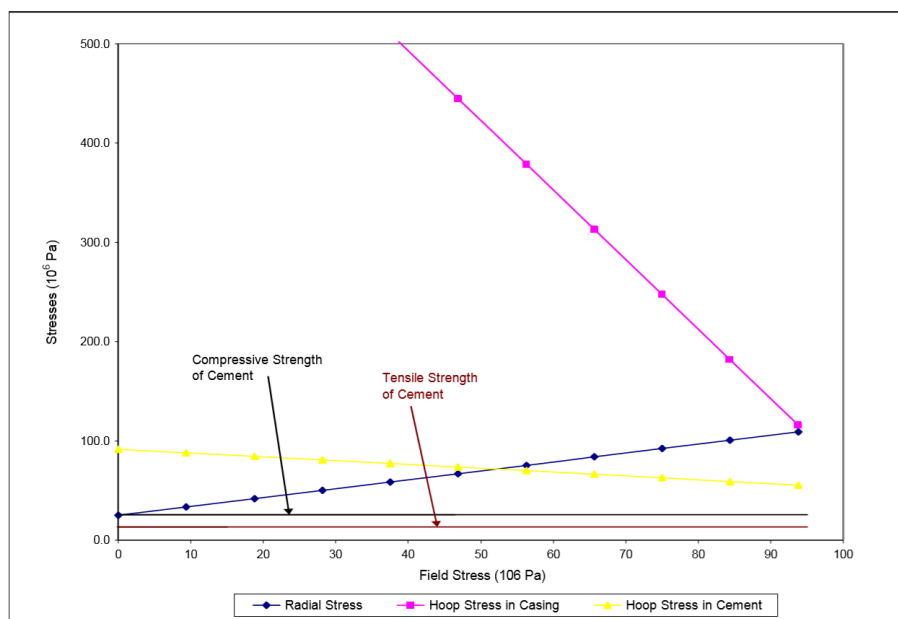
• تنش‌ها و کرنش‌های مکانیکی

ناشی از تغییرات فشار و دما در چاه می‌باشند که باعث ایجاد شکستگی در سیمان، انفصال در مرز بین سازند- سیمان - لوله‌جداری و ایجاد میکرو کانال در سیمان می‌شوند. با افزایش تنش‌های برجا، تنش‌های مماسی و شعاعی در سیمان افزایش می‌یابند که در شکل (۲-۶) نیز مشاهده می‌شود. در پی تنش‌های مکانیکی وارد بر سیمان شکست‌هایی رخ می‌دهد که به‌صورت زیر است (Teodoriu et al, 2013):

✓ شکست کششی: سیمان تحت فشار داخلی بالاتری از لوله‌جداری قرار گرفته است. این باعث می‌شود که اگر تنش کششی بیش از مقاومت کششی سیمان باشد، باعث شکست در سیمان شود.

✓ جدا شدن پیوند بین سیمان و لوله‌جداری: اگر فشار داخلی در لوله‌جداری رخ دهد، ممکن است لوله‌جداری دچار تغییر شکل شود، و در این راه تماس بین سیمان و لوله‌جداری از بین برود، و یک میکرو حلقه رخ دهد.

✓ شکست برشی: فشار بالای سازند (به‌عنوان مثال خزش سازندهای نمکی) ممکن است از مقاومت فشاری سیمان تجاوز کند و شکست برشی اتفاق افتد.



شکل ۲-۶: افزایش تنش‌های مماسی و شعاعی در سیمان با افزایش تنش برجا (Khandka, 2007)

• آسیب سازند در مرحله حفاری

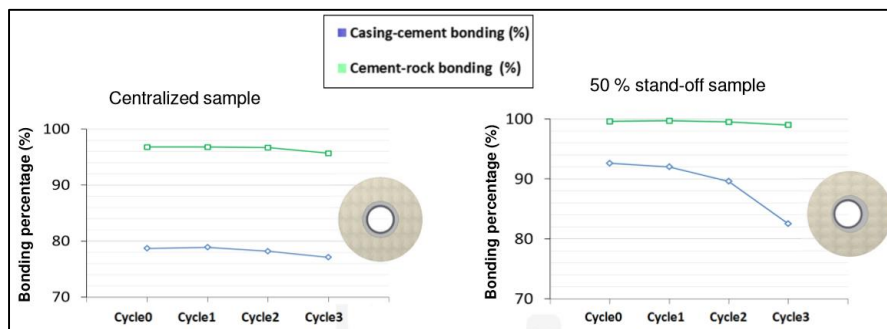
در طول فرایند حفاری ارتعاشات و اختلاف فشار بین سازند و چاه باعث ایجاد نیروهای نهایی در شکست سازند می‌شود.

• محوریت^۱ لوله جداری

سیمان به‌طور کامل جانشین گل درون حلقه نشده و نتیجه آن غیریکنواخت شدن سیمان در اطراف لوله‌جداری است. اکثر سیالات حفاری با گذشت زمان شروع به ژل شدن یا ویسکوز شدن می‌کنند. وقتی که لوله‌جداری رانده می‌شود مقداری از این گل را جابجا می‌کند که گل جابجا شده معمولاً ویسکوزیته کمی دارد. وقتی که لوله‌جداری در محل موردنظر قرار گرفت، سرعت گردش درجایی که جداری در نزدیک‌ترین فاصله از (یا در تماس با) دیواره قرار دارد حداقل است، که تمیز سازی گل را در آن ناحیه دشوار می‌سازد. گل ژل شده باید تمیز گردد تا سیمان کاری موفق انجام شود. بررسی محوریت لوله‌جداری، از جمله الزامات انجام‌شده جهت رفع این مشکلات است. در نواحی که پیوند سیمان اهمیت ویژه‌ای دارد متمرکز کننده‌ها نیز جهت محوریت بهتر لوله‌ها رانده می‌شوند تا تمام گل ژل شده جابجا

^۱ Centralization

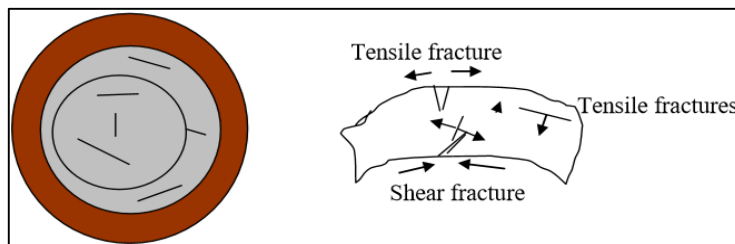
شود و یک پوشش سیمانی یکنواخت در اطراف لوله‌جداری تشکیل شود. شکل (۷-۲) تأثیر محوریت لوله‌جداری بر از دست رفتن پیوند سیمان را نشان می‌دهد. با کاهش محوریت لوله‌جداری در چاه، پیوند بین سیمان و لوله‌جداری ضعیف‌تر می‌شود (De Andrade et al, 2014).



شکل ۷-۲: تأثیر محوریت لوله‌جداری بر یکپارچگی سیمان (De Andrade et al, 2014)

• انبساط و انقباض سیمان

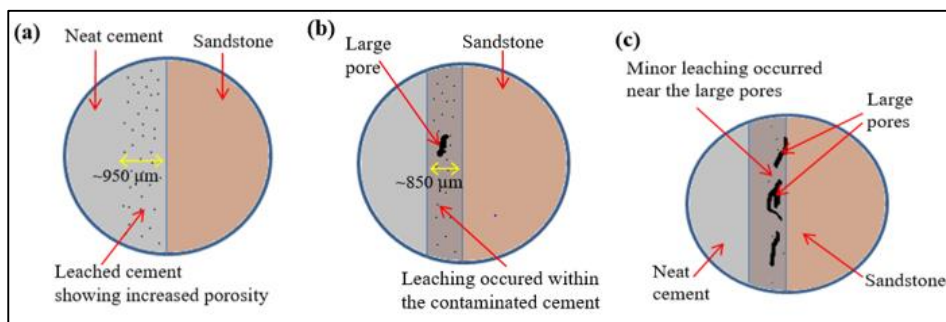
هنگامی که عمل هیدراته شدن در سیمان شروع می‌شود، ذرات سیمان، آب درون سازند را به تدریج مصرف می‌کنند و یک ساختار خمیری را به وجود می‌آورند (انبساط). این عمل باعث محدود شدن فشار هیدرو استاتیک ستون دوغاب سیمان شده و از فشار سازند کمتر می‌شود. دوغاب به دلیل تأثیر دمای چاه و سازند، از مرحله خمیری به مرحله ژله‌ای تغییر می‌کند و فاز پیوستگی خود را از دست می‌دهد و قادر به جریان نیست. در این مرحله انقباض و انبساط سیمان به اوج خود می‌رسد و مولکول‌هایی که دارای اتصالات ضعیف بودند، با کاهش حجم سیمان به هم می‌چسبند (انقباض). پس از این مرحله، دوغاب سیمان به مرحله گیرش می‌رسد که در این مرحله به علت وجود فضای خالی، سیمان برای واکنش نیاز به آب بیشتری دارد، چون بیشتر آب خود را از دست می‌دهد و دیگر آبی در دسترس نیست. اگر گازی در سازند وجود داشته باشد به این فضاها نفوذ می‌کند و به مرور زمان باعث ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در غلاف سیمان می‌شود (Baret and Daccord, 1994, Robert, 1985). پیامدهای انقباض در سیمان‌های چاه نفت شامل: جداسدگی در مرز بین سازند-سیمان و سیمان-لوله‌جداری و تشکیل شکست برشی و کششی در سیمان به علت القا شدن تنش‌های برشی و کششی است. این نوع شکستگی‌ها در شکل (۸-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۸: شکستگی‌های حاصل از انقباض (Teodoriu et al, 2013)

• آلودگی سیمان توسط گل یا سیال‌های موجود در سازند

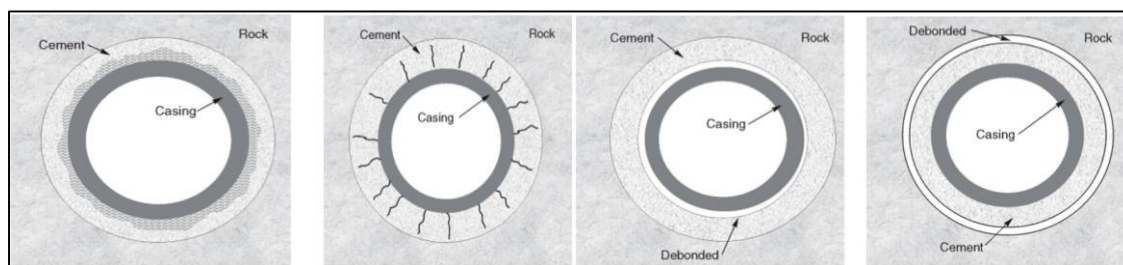
هنگامی که گل یا سیالات موجود در سازند (به‌ویژه گاز یا آب) با دوغاب سیمان مخلوط می‌شوند، خواص و رفتار سیمان را تغییر می‌دهند (مانند تغییر در محتوای نمک که باعث تنوع در رفتار انحلالی می‌شود). گاز می‌تواند، یک کانال در سیمان ایجاد کند و یک مسیر جریان سیال ایجاد شود. در سال ۲۰۱۲ سه آزمایش جریان به‌منظور تأثیر گل حفاری بر یکپارچگی سیمان انجام شد که مغزه‌های کامپوزیتی (سیمان و ماسه‌سنگ) در سه حالت زیر مورد بررسی قرار گرفتند. درصد آلودگی گل در مغزه کامپوزیتی صفر، ۵ و ۱۰ در نظر گرفته شده بود. این آزمایش به مدت ۳۰ روز انجام شد. هدف این مطالعه اثر آلودگی سیال حفاری بر ایجاد منطقه ایزوله سیمان و تغییرات فیزیکی- شیمیایی در مرز بین ساختار و سیمان بود. انحلال سیمان به‌وسیله آب‌نمک به دلیل اختلاف در PH های مواد مغزه یعنی سیمان، گل حفاری و آب‌نمک است. (PH آب‌نمک، سیمان و گل به ترتیب ۶٫۲-، ۱۳ و ۱۲ است). همان‌طور که در شکل (۲-۹) مشخص است (درصد آلودگی در شکل به ترتیب از راست به چپ ۱۰، ۵ و صفر) تخلخل در سیمان مجاور سازند به دلیل نشت و آلودگی سیمان توسط گل حفاری، افزایش می‌یابد و روزنه‌های بزرگ ایجاد شده در سیمان به دلیل انحلال، با افزایش درصد آلودگی بیشتر می‌شود. اندازه این منافذ بزرگ به طول ۷۵۰ میکرومتر و ضخامت ۱۵۰ میکرومتر است. در طولانی مدت با پیوستن این منافذ به هم باعث ایجاد کانال و مسیرهای نشت در سیمان شده که یکپارچگی آن از دست می‌رود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که احتمال ایجاد شکست مکانیکی در سیمان و از دست رفتن منطقه ایزوله با افزایش آلودگی گل بیشتر می‌شود (Agbasimalo, 2012).



شکل ۲-۹: اثر آلودگی سیمان توسط گل حفاری (Agbasimalo, 2012)

۲-۳-۳-۳ حالت‌های شکست سیمان

حفظ یکپارچگی سیمان و عدم آسیب در سطح مشترک سازند، سیمان و لوله‌جداری، برای اطمینان حاصل کردن از اینکه غلاف سیمان همچنان می‌تواند شرایط منطقه ایزولاسیون (بدون نشت) در طول عمر چاه را داشته باشد، باید برآورده شود (Petty et al, 2003). شکل (۲-۱۰) ترک‌های ایجاد شده در غلاف سیمان، تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف سیمان و انفصال بین سیمان- لوله‌جداری و سیمان- سازند که باعث جریان‌های شعاعی و عمودی می‌شود را نشان می‌دهد.

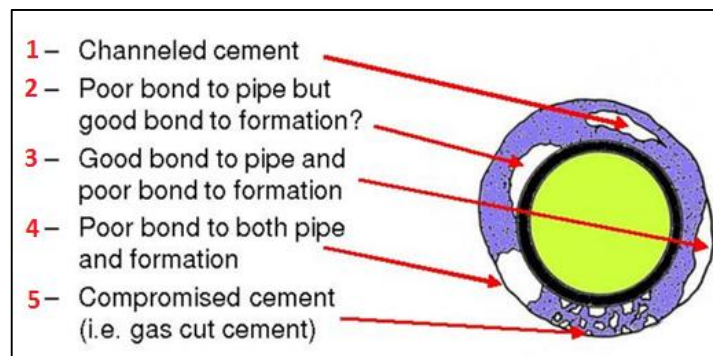


شکل ۲-۱۰: از دست رفتن یکپارچگی سیمان و انواع شکستگی‌های ایجاد شده در آن (Petty et al, 2003)

۲-۳-۳-۴ تشخیص یکپارچگی سیمان در چاه

سیمان‌کاری از عملیات معمول در حفاری و تکمیل هر چاه بوده و لازم است میزان و چگونگی بندش سیمان در این عملیات مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. پس از انجام عملیات سیمان‌کاری، لازم است نسبت به موفقیت آن اطمینان حاصل شود. برای ارزیابی کیفیت بندش سیمان، روش‌های مختلفی وجود دارد

که آنچه بیشتر رایج است، راندن ابزارهای نمودارگیری بندش سیمان (CBL^۱ و VDL^۲) است (دستخوان و مختاری، ۱۳۸۹). این ابزارها از دسته ابزارهای نمودارگیری صوتی هستند و کارکرد ساده‌ای دارند، اما تفسیر داده‌های آنها به دقت و مهارت زیادی نیاز دارد. شکل (۲-۱۱) انواع کانال‌هایی که هنگام بندش ضعیف سیمان در پشت لوله‌های جداری به وجود می‌آید، نشان می‌دهد. در این شکل، کانال‌های درون سیمان از نوع ۲ و ۴ به وسیله نمودارهای صوتی قابل تشخیص هستند. ولی کانال‌های نوع ۱ و ۳ برای نمودار CBL قابل تشخیص نیستند، مگر اینکه این کانال‌ها آن قدر بزرگ باشد که لایه سیمان پشت لوله بسیار نازک شده باشد. نوع ۵ که سیمان گاز گرفته نامیده می‌شود به وسیله این ابزار تشخیص داده شده ولی مثل انواع دیگر واضح نیست.



شکل ۲-۱۱: انواع کانال‌ها و حفرات ایجادشده در غلاف سیمان (Richard Leeth, 2015)

سیگنال صوتی در مسیر حرکت خود از فرستنده به گیرنده از مواد مختلف و با سرعت‌های متفاوت عبور می‌کند. این سرعت به خواص فیزیکی ماده از جمله چگالی وابسته است. معمولاً به جای سرعت صوت، اصطلاح کندی صوت و یا زمان عبور (گذر) صوت که معکوس سرعت است، به کار برده می‌شود. به عنوان مثال کندی صوت در فولاد $57 \mu\text{s}/\text{ft}$ است، یعنی صوت در این ماده، هر فوت را در زمان $57 \mu\text{s}$ طی می‌کند. در نمودار (VDL) سیگنال لوله که همواره باید در یک زمان مشابه دریافت شود، خطوط مستقیم تشکیل می‌دهد. سیگنال سازند از ضخامت‌های متغیر سیمان و سازندهایی می‌گذرد که خواص

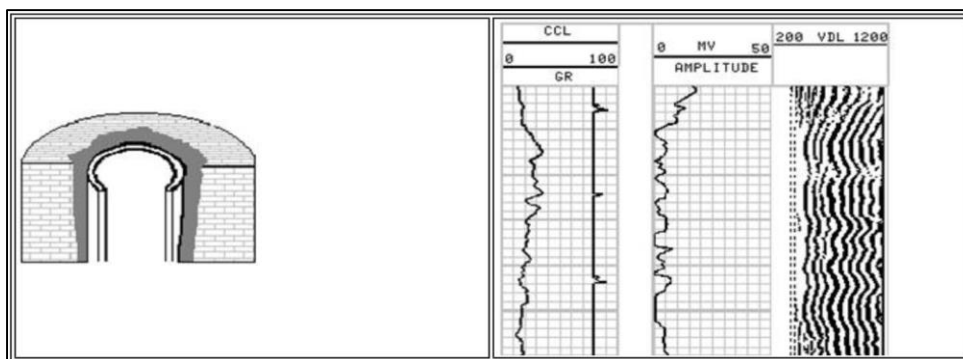
^۱ Cement bond log

^۲ Variable density log

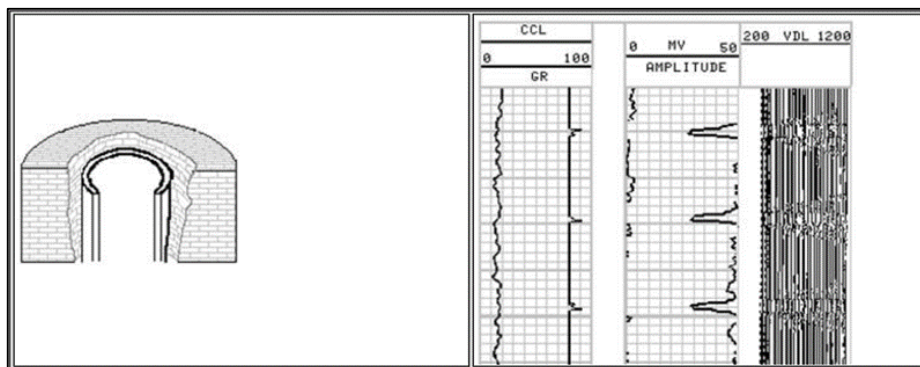
آکوستیک آن‌ها ثابت نیستند. در نتیجه، سیگنال سازند به شکل مجموعه‌ای از خطوط غیرمستقیم یا موج‌دار نمایش داده می‌شود. ورودی‌های گل یا سیال درون ستون چاه ممکن است خطوط مستقیمی را از خود نشان دهند، ولی زمان رسیدن آن طولانی و معمولاً با تأخیر است (دستخوان و مختاری، ۱۳۸۹).

۲-۳-۵ مدل‌های تفسیر مرزهای سیمان

اگر در سیمان کاری بندش سیمان خوب باشد، وجود سیمان باعث ایجاد یک‌لایه پوششی شده و سبب می‌شود که دامنه موج، زمانی که گیرنده آن را دریافت می‌کند، بسیار ضعیف شده باشد. اگر تماس پوشش و سیمان ضعیف باشد یا اینکه اصلاً تماسی وجود نداشته باشد، آنگاه تضعیف سیگنال خیلی کم است و دامنه موج به همان بزرگی اولیه باقی می‌ماند که این همان بندش ضعیف است. بنابراین هرچه دامنه موج صوتی در گیرنده کم‌تر باشد، بیانگر این است که بندش سیمان بهتر بوده است (Midtgarden, 2013). شکل (۲-۱۲) سیمان کاری خوب را نشان می‌دهد. در این شکل همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه دریافتی کوتاه بوده و سیگنال‌های دریافتی از VDL قوی است. بنابراین سیمان کاری خوب انجام‌شده و نیاز به تزریق سیمان فشاری و یا سیمان کاری ثانویه نیست. شکل (۲-۱۳) عدم وجود سیمان پشت لوله‌جداری را نشان می‌دهد. در این شکل همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه دریافتی زیاد است و همچنین هیچ سیگنال دریافتی توسط VDL ثبت نشده است. پس پشت لوله‌جداری هیچ سیمانی نبوده و نیاز به تزریق فشاری سیمان است (Midtgarden, 2013).



شکل ۲-۱۲: تشخیص نمودار صوتی (سیمان کاری خوب) (Midtgarden, 2013)



شکل ۲-۱۳: تشخیص نمودار صوتی (نبود سیمان) (Midtgarden, 2013)

۴-۲ جمع بندی

تنش‌های برجا و ویژگی‌های سازند (مکانیکی، گرمایی و شیمیایی) به عنوان عوامل مهم و موثر بر یکپارچگی چاه هستند. با ارزیابی پایداری چاه و شناخت عوامل ناپایداری قبل از رخ دادن گسیختگی می‌توان مشکلات مربوط به یکپارچگی چاه در مراحل بعدی (لوله جداری و سیمان کاری)، زمان و هزینه تعمیر چاه را کاهش داد. بر اساس مطالعات ژئومکانیکی، نقص در لوله جداری به سه حالت برش، مچاله شوندگی و خوردگی اتفاق می‌افتد. عوامل اصلی چنین گسیختگی‌هایی زمین و عملیات چاه است. به‌طور کلی می‌توان گفت که عوامل ژئومکانیکی تأثیر زیادی بر یکپارچگی لوله جداری خواهند داشت. بنابراین برای رسیدن به حالت ایده‌آل طراحی، باید طراحی براساس پارامترهای ژئومکانیکی انجام گیرد. از طرفی با شناخت عوامل مؤثر بر یکپارچگی سیمان می‌توان مشکل گسیختگی سیمان را تا حدودی برطرف کرد و یا اینکه قبل از رخ دادن مشکل، آن را پیش‌بینی کرد. شاید بتوان گفت تغییرات دما و فشار که منجر به تنش‌های القایی در غلاف سیمان و همچنین انقباض می‌شوند مهم‌ترین عوامل از دست رفتن یکپارچگی سیمان در چاه‌های با فشار و دمای بالا هستند. یکپارچگی سیمان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فوران چاه‌های نفت است. فضای حلقوی بین لوله جداری و دیواره‌ی چاه که از سیمان پر می‌شود مسیری برای مهاجرت سیال و در پی آن فوران است که در صورت نقص و عدم یکپارچگی سیمان، مشکلات فراوانی از جمله فوران چاه اتفاق می‌افتد که هزینه‌های بسیار زیادی برای مهار آن هدر می‌رود.

فصل سوم

مروری بر مطالعات انجام شده

۳-۱ مقدمه

عواملی مانند ناپایداری چاه، خوردگی، خمش و گسیختگی لوله‌جداری، آسیب سیمان در مرزهای بین سیمان و سازند اطراف و همچنین سیمان و لوله‌جداری، انبساط و انقباض در سیمان، تغییر فشار و دما و شرایط تنش برجا باعث از بین رفتن یکپارچگی چاه می‌شوند. بنابراین با توجه به گستردگی این عوامل، ارزیابی یکپارچگی چاه، برای بهینه‌سازی بهره‌وری و ارزش‌افزوده بسیار مهم است. همچنین برای چاه‌های نفت و گاز مسئله یکپارچگی، از نظر اقتصادی پر اهمیت است (Etetim, 2013). افزایش فوران‌های چاه ناشی از عدم یکپارچگی باعث شد که به تدریج این موضوع اهمیت بیشتری پیدا کند. بنابراین برای کاهش مشکلات یکپارچگی و شناخت بیشتر آن تاکنون تحقیقات علمی زیادی صورت گرفته است. مسئله‌ی مهاجرت گاز درون دوغاب سیمان حفاری چاه‌های نفت و گاز به دلیل از دست رفتن یکپارچگی سیمان، یکی از خطرناک‌ترین و پیچیده‌ترین چالش‌های پیش روی صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز برشمرده می‌شود، چالشی که باعث خسارات مالی و حتی جانی می‌شود. تدوین برنامه‌ای به‌منظور بهینه‌سازی دوغاب سیمان حفاری باهدف مقاوم نمودن آن در برابر مهاجرت گاز حاصل مطالعات جهانی چند دهه گذشته است. تحقیقات انجام‌شده در سه زمینه آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی انجام‌شده است که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته شده است.

۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی معمولاً شامل آزمون سه محوری، تک‌محوری، برش مستقیم، برزلی، آزمایش رابط^۱ بین سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری و سایر آزمون‌های تنش و کرنش است. این روش‌های آزمایشگاهی در گذشته توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (Carter and Evans, 1964; Scott and Brace, 1966; Evans and Harriman, 1972; Goodwin and Crook, 1992; Stiles, 2006). در این آزمایش‌ها توجه خاصی به غلاف سیمان شده و تأثیر خواص مکانیکی و الاستیکی سیمان

^۱ Interface

بر روی یکپارچگی مورد بحث قرار گرفته است. برای بررسی اثر سطح تماس، در آزمایشگاه نیروی لازم جهت حرکت لوله‌جداری از سیمان به دست آمده است (Carter and Evans, 1964). تأثیر فشار و دما بر روی پارامترهای مکانیکی و الاستیک سیمان‌های مختلف بررسی شده است. به منظور اطمینان از موفقیت در عملیات سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز، دوغاب‌های سیمان بر اساس شرایط چاه طراحی و آزمایش می‌گردند. آزمایش‌های زمان بندش، استحکام تراکمی، اندازه‌گیری میزان هرز روی دوغاب سیمان، اندازه‌گیری چگالی دوغاب، اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی و ... به صورت یک روال عادی در آزمایشگاه سیمان صورت می‌پذیرد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سیمان با افزایش مدول یانگ و سخت شدن پس از تزریق دوغاب به پایین چاه، بهبود می‌یابد (Zheng et al, 2010). خواص مقاومتی و الاستیک غلاف سیمان در طول فرآیند بهبود سیمان بررسی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زمان اولیه پاسخ‌های مکانیکی و فیزیکی، قبل از آزمایش فشار برای کاهش تغییراتی که باعث شکست در سیمان می‌شوند، باید معین شود (Meuller and Eid, 2006). تأثیر نسبت آب به سیمان بر تکامل مدول یانگ در ساخت دوغاب سیمان بررسی شده است. با افزایش مقدار آب در سیمان، مدول یانگ نهایی سیمان کاهش می‌یابد. اگر نسبت آب به سیمان $0/2$ تا $0/6$ افزایش یابد، مدول یانگ از 20 تا کمتر از 5 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. البته این نتیجه با فرض برابر بودن فشار منفذی سیمان در طول فرآیند بهبود و فشار منفذی سازند حاصل می‌شود. اگر به طراحی سیمان توجه خاصی نشود، مدول یانگ سیمان سخت شده کمتر از حالت طراحی اولیه است. لازم به ذکر است که در آزمایش‌های ابتدایی زمان سخت‌شوندگی بیش از 14 روز در نظر گرفته شده است (Zheng et al, 2010). به منظور بهبود سیمان-کاری و با در نظر گرفتن یکپارچگی چاه، جایگزین‌های ThermaSet و Sandaband به جای سیمان بررسی می‌شود. سیمان به دلیل توانایی برتر برای نگهداری از لوله‌جداری، تنوع و هزینه کم عملکرد بهتری نسبت به سایر جایگزین‌ها دارد (Etetim, 2013).

سیمان اطراف فضای لوله‌جداری در چاه‌های نفتی تحت تأثیر دما و فشار بالا، اثر نامطلوبی بر یکپارچگی لوله‌جداری دارد. با استفاده از مواد خاص افزودنی به سیمان می‌توان از بروز گسیختگی در

لوله‌های جداری جلوگیری کرد (لطف‌اللهی، ۱۳۸۵).

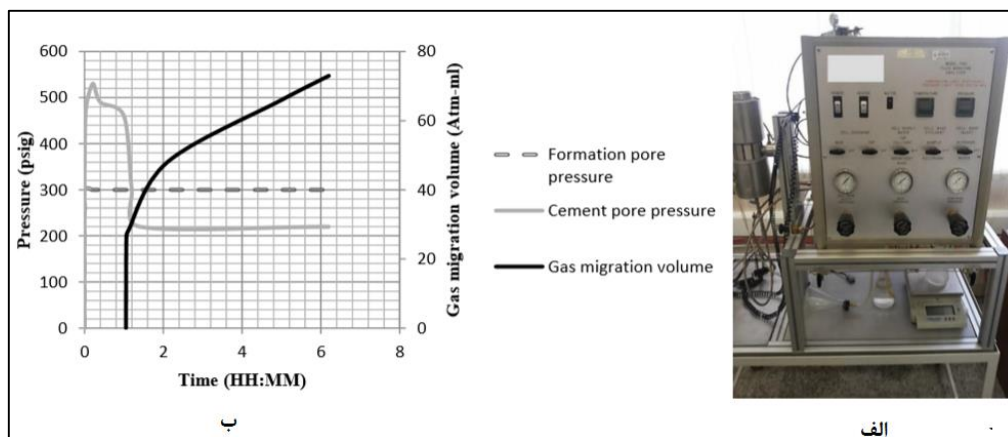
۳-۲-۱ اندازه‌گیری میزان مهاجرت سیال در سیمان

سیمان در مقابل مهاجرت گاز آسیب‌پذیر است. نوعی خاص از سیمان وجود دارد که نفوذناپذیر است ولی به دلیل قیمت بالا و محدودیت دسترسی به آن، کمتر در ایران مورد توجه قرار گرفته است. پس می‌توان از دوغاب‌های طراحی شده با افزودنی‌های سازگار (کند کننده، ضد مهاجرت گاز، مقاومت ژله‌ای و تراکمی و...) جهت مقابله با مهاجرت گاز استفاده کرد. سیمان کاری فرآیندی پرهزینه و دشوار است و اینکه مهاجرت گاز درون سیمان باعث خطرات زیادی از جمله از دست رفتن یکپارچگی چاه می‌شود. مطالعات و تحقیقات گوناگونی تاکنون در مورد مهاجرت و نفوذ گاز به درون دوغاب سیمان چاه‌های نفت و روش‌های پیش‌گیری از آن انجام شده است. همچنین بررسی و مطالعات میدانی انجام شده بر روی چندین چاه نفتی مناطق نفت‌خیز جنوب کشور ایران (در میدان‌های نفتی مختلف) که مشکل مهاجرت گاز در آن‌ها مشاهده شده ارائه گردیده است. با استفاده از روابط موجود، که برای پیش‌بینی وقوع پدیده مهاجرت گاز ارائه شده است، وقوع این پدیده در چاه‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تا توانایی و کارایی این روابط در میدان‌های مختلف نفتی جنوب کشور ارزیابی و مشخص شوند. نتایج حاصله بیانگر عدم دقت کافی روش‌های موجود در پیش‌بینی احتمال مهاجرت گاز است. از موارد دیگر تحقیقات، انجام کارهای آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر پدیده مهاجرت گاز است (صالحی کسایی، ۱۳۸۰).

مطالعات انجام شده بر روی یکی از مخازن گازی نشان داده است با وجود اینکه در ترکیب دوغاب سیمان چاه‌های این مخزن از افزودنی ضد مهاجرت گاز استفاده شده ولی در بیشتر موارد هنوز مشکل مهاجرت گاز مشاهده گردیده است. به منظور پیدا کردن عوامل احتمالی، افزودنی ضد مهاجرت گاز به کار گرفته شده در ترکیب دوغاب سیمان، با استفاده از دستگاه منحصر به فرد آنالیز مهاجرت گاز مورد کنترل کیفی قرار گرفت و تأثیر آن بر روی خواص مختلف دوغاب سیمان اعم از خواص فیزیکی و

مکانیکی مشخص گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می توان گفت که صرفاً با افزودن ماده ضد مهاجرت گاز نمی توان از مهاجرت گاز در ستون دوغاب سیمان جلوگیری شود. لذا در طراحی دوغاب سیمان مطلوب، باید ضمن به دست آوردن مقدار مصرف بهینه، تمامی پارامترهای مؤثر در کنترل مهاجرت گاز در نظر گرفته شود (سلطانیان، ۱۳۹۵).

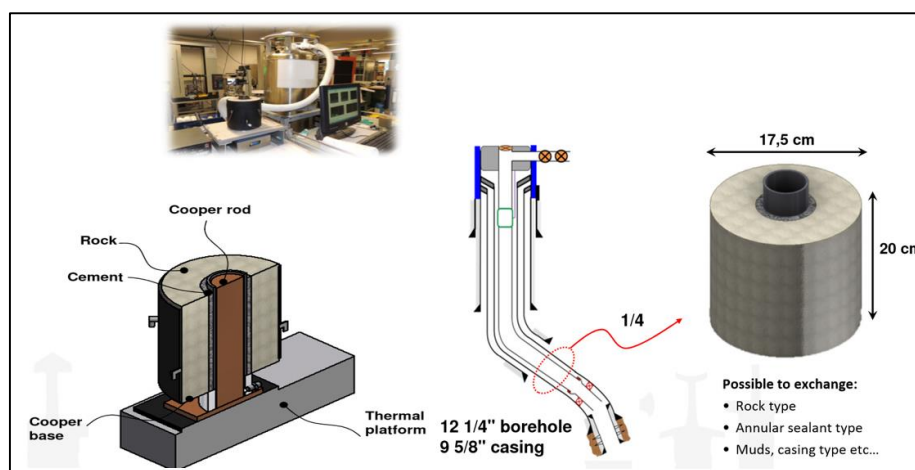
دیگر پژوهش آزمایشگاهی در خصوص دستیابی به بهترین فرمولاسیون دوغاب سیمان حفاری مقاوم در برابر نفوذ گاز انجام شده است. در این پژوهش، ریشه های پدیده مهاجرت گاز شناسایی شده و همچنین پارامترهای مؤثر در مقابله با این مشکل ذکر شده است. عوامل گوناگونی در مهاجرت گاز تأثیرگذارند و روش های متعددی برای مقابله با این پدیده موجود است. دوغاب مورد شبیه سازی شرایط چاه در مقیاس آزمایشگاهی قرار می گیرد. در این مطالعه از دستگاه تحلیلگر مهاجرت گاز که قابلیت شبیه سازی شرایط سیمان کاری و چاه را در مقیاس آزمایشگاهی داشته و توانایی اندازه گیری پارامترهای خروجی مهمی مثل نرخ مهاجرت گاز را دارد که به منظور اعتبارسنجی برنامه پیشنهادی استفاده شده است. همچنین عملکرد دوغاب های رایج چاه ها در برابر مهاجرت گاز مورد مطالعه قرار گرفته و نقش افزایش ها، به ویژه افزایش های مخصوص ضد مهاجرت گاز مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه شده است. شکل (۳-۱) قسمت (الف) دستگاه شبیه ساز مهاجرت گاز را نشان می دهد. این شبیه ساز کلیه موارد مورد نیاز به منظور شبیه سازی واقعی پارامترهایی مثل دما، فشار هیدرولیکی، فشار سیال سازند و گرادیان های فشار محرک جریان از خلال ستون سیمان را برآورده می نماید که نمونه ای از این نتایج در قسمت (ب) مشاهده می شود (ولایتی، ۱۳۹۳).



شکل ۳-۱: دستگاه شبیه‌ساز مهاجرت گاز و اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول آزمایش (ولایتی، ۱۳۹۳)

۳-۲-۲ مطالعه بر روی خواص مکانیکی و حرارتی سیمان

آندرید^۱ در سال ۲۰۱۵، نمونه‌ای از قسمت پایین چاه را شبیه‌سازی و در آزمایشگاه تحت دماهای مختلف آزمایش نمود. سیمان مورد استفاده از نوع (G) و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ است. شکل (۳-۲) شماتیکی از آزمایش یکپارچگی و نمونه ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در این آزمایش، افزایش حرارت توسط مقاومت‌های الکتریکی و خنک کردن توسط نیتروژن مایع انجام می‌شود. نمونه مورد نظر تحت سیکل‌های دمایی مختلف قرار می‌گیرد (Andrade, 2015).

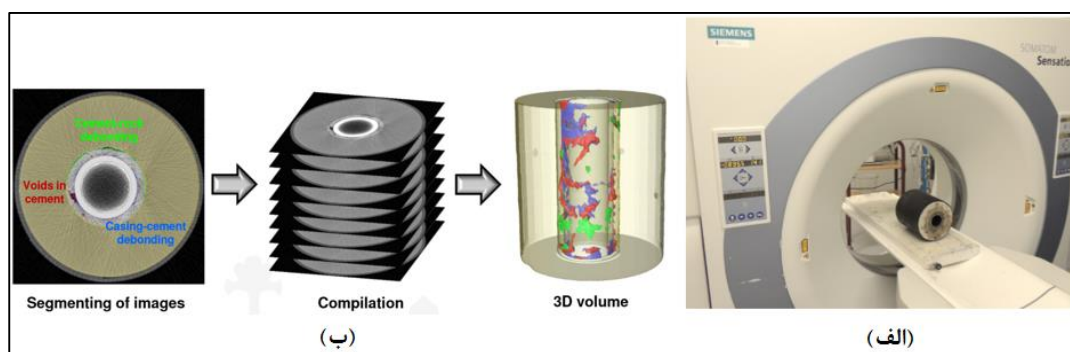


شکل ۳-۲: نمونه ساخته شده و اصول آزمایش مطابق شرایط ته چاه (Andrade, 2015)

بعد از اینکه غلاف سیمان تحت چرخه دمایی قرار گرفت آن را از زیر دستگاه سی‌تی اسکن عبور

^۱ Andrade

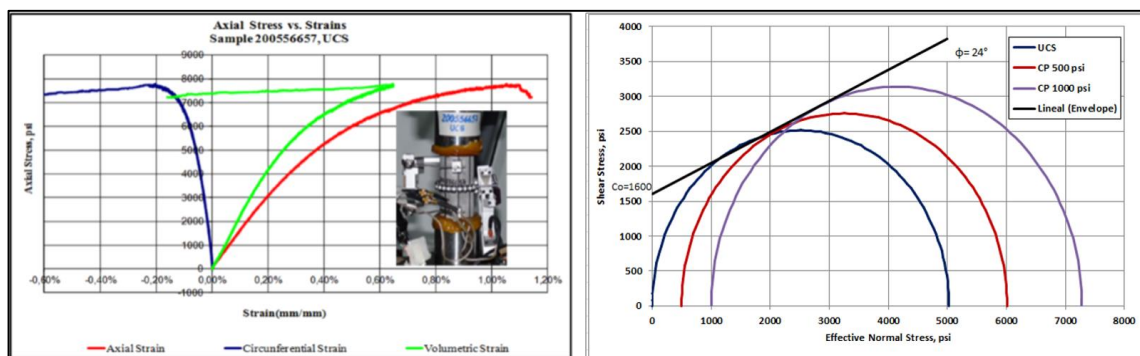
می‌دهند که این کار برای پیداشدن محل و اندازه مسیر نشت احتمالی در سیمان می‌باشد. شکل (۳-۳):
 الف) دستگاه سی تی اسکن را نشان می‌دهد که یک روش گرافیکی جهت تشخیص اندازه و محل مسیر نشت و یا به عبارت دیگر محل از دست رفتن یکپارچگی سیمان است. قسمت (ب) حفرات و مواد مشخص شده در سیمان طبق نتایج سی تی اسکن را نشان می‌دهد که هر کدام از مسیرهای نشت با رنگ‌های سبز، قرمز و آبی مشخص شده است (Andrade, 2015).



شکل ۳-۳: دستگاه تولید اشعه ایکس و حفرات و مسیرهای مشخص شده در سیمان (Andrade, 2015)

آزمایش‌های آزمایشگاهی دیگری توسط آریاس^۱ در سال ۲۰۱۳ بر روی سیمان‌های مختلف پرتلند و غیر پرتلند از شرکت‌های مختلف سیمان‌سازی در میدان‌های نفتی مختلف در کلمبیا برای سنجش خواص مکانیکی و حرارتی آن‌ها انجام شده است. هدف از طراحی این دوغاب‌ها، یافتن سیمان الاستیک از شرکت‌های مختلف سیمان‌سازی برای کاهش شکست آن‌ها در میدان‌های مختلف است. مطابق شکل (۳-۴) آزمایش‌های تک‌محوره، سه‌محوره و برزیلی بر روی نمونه‌های سیمان به قطر ۳۸ میلیمتر با چگالی‌های مختلف انجام شد (Arias, 2013).

^۱ Arias



شکل ۳-۴: آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره روی نمونه‌های سیمان (Arias, 2013)

۳-۳ مطالعات تحلیلی

یک مدل تحلیلی خوب باید جنبه‌های معمولی رفتار چاه را که در واقعیت مشاهده می‌شود، توضیح دهد. مطالعات تحلیلی که در زمینه یکپارچگی انجام شده است، اکثراً پارامترهای مکانیکی از جمله تنش را مورد بررسی قرار داده‌اند و فرمول‌های تحلیلی برای بررسی ناپایداری چاه ارائه شده است. این فرمول‌ها جهت تحلیل تنش‌های اطراف چاه در نظر گرفته شده و برای بررسی تغییرات تنش در اطراف یک سیستم استوانه‌ای چند عنصری (سازند، سیمان و لوله‌جداری) مناسب نمی‌باشد (Kirsch, 1898; Zhang et al, 2006). در این روابط از معادلات کرش با استفاده از تئوری الاستیک خطی به بررسی توزیع تنش در اطراف چاه‌های شیب‌دار پرداخته شده است. معادلات کرش بیانگر این است که وجود سوراخ یا چاه درون یک صفحه بینهایت، باعث تغییر شرایط تنش‌های برجا می‌شود (Bradley, 1979; Charlez, 1991). از آنجایی که منطقه نزدیک چاه، شامل سازند، سیمان و لوله‌جداری است، نظریه‌هایی مانند استوانه‌ای با جداره نازک و ضخیم برای تعیین تنش‌ها استفاده شده است (Boresi and Schmidt, 1993). لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲، آنالیز شکست مکانیکی سیمان کاری لوله‌جداری تحت میدان تنش برجا و کوپلینگ اثر فشار و دمای ته چاه بر سیمان، بررسی نمودند. در میدان تنش برجا چه یکنواخت و چه غیر یکنواخت، تنش مماسی بسیار بزرگتر از تنش شعاعی است. هنگامی که تنش‌های

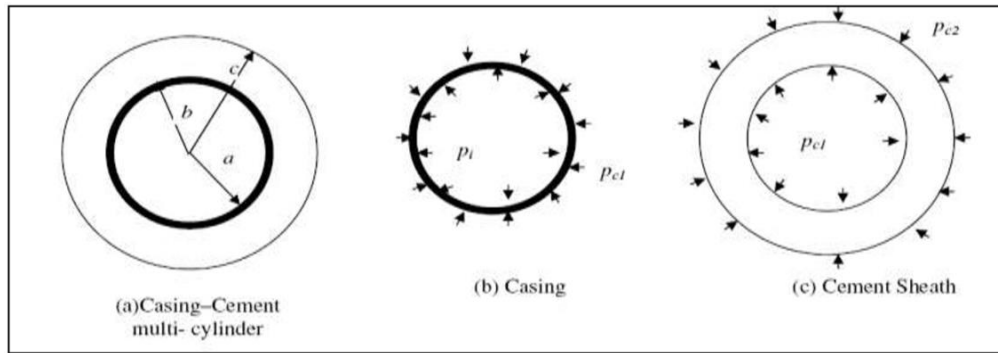
^۱ Li

برجا نسبتاً بزرگ هستند، افزایش فشار درونی می‌تواند عملکرد مناسبی را در پایداری پوشش از خود نشان دهد. در حالی که افزایش فشار برای پوشش در مقیاس بزرگ مضر است. اگر هزینه‌های چاه و نیازهای مهندسی اجازه دهند، لوله جداری با ضخامت بزرگتر ترجیح داده می‌شود (Li et al, 2012).

۳-۳-۱ تحلیل تنش در سیمان

برای تجزیه و تحلیل خستگی در سیمان مهم است که تحریک تنش در سیمان در حالت واقعی و آزمایشگاهی محاسبه شود. تحلیل تنش‌ها با توجه به فشار داخلی و تغییر درجه حرارت داخلی کمک می‌کند تا صلاحیت خواص مکانیکی سیمان بررسی شود (Khandka, 2007). مدل تحلیلی ریاضی ترکیبی از سیمان و لوله‌جداری طبق نظریه الاستیک ساخته شده است. این مدل تحت شرایط مختلف (یکنواخت و غیریکنواخت) تنش‌های برجا، فشارهای متنوع و اثر دما تحلیل شده است. در این مدل فرض شده است که سیمان به سازند و لوله‌جداری کاملاً پیوند خورده است و هر سه مواد مصرفی، الاستیک حرارتی هستند. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های مماسی بسیار بزرگتر از تنش‌های شعاعی است. هنگامی که تنش‌های منطقه زیاد باشد، فشار داخلی مناسب می‌تواند عملکرد یکپارچگی چاه را تضمین کند (Xu, 1982; Li et al, 2012).

یک مدل تحلیلی برای تعیین تنش در سیمان با توجه به خواص مکانیکی لوله جداری، سیمان و سازند ساخته شده است. شکل (۳-۵) بیانگر هندسه و فرضیات مدل است. اساس محاسبات بر پایه این فرض است که لوله جداری و سیمان را می‌توان به عنوان دو استوانه تودرتو در نظر گرفت (Ugwu, 2008; Teodoriu et al, 2010).



شکل ۳-۵: هندسه و فرضیات مدل تحلیلی (Ugwu, 2008; Teodoriu et al, 2010)

روابط (۱-۳) تا (۴-۳) برای محاسبه فشارهای تماسی تعیین شده‌اند. P_{C2} فشار تماس بین سیمان و سازند (فشاری که از طرف سازند به سیمان وارد می‌شود) (بر حسب Psi) و P_{C1} فشار تماس بین سیمان و لوله جداری (بر حسب Psi) است که برای محاسبه توزیع تنش، این دو فشار باید حساب شوند (Ugwu, 2008; Teodoriu et al, 2010).

$$AP_{C1} + BP_{C2} = C \quad (1-3)$$

$$A = \frac{b}{E_c} \left[(1-\nu_c^2) \left[\frac{b^2+c^2}{c^2-b^2} \right] + (\nu_c + \nu_c^2) \right] + \frac{a}{E_s} \left[\frac{r_m}{t_s} (1-\nu_s^2) + (\nu_s + \nu_s^2) \right] \quad (2-3)$$

$$B = - \left[\frac{b}{E_c} \left(\frac{2c^2}{c^2-b^2} \right) (1-\nu_c^2) \right] \quad (3-3)$$

$$C = \frac{p_i a}{E_s} \left[\frac{r_m}{t_s} (1-\nu_s^2) + (1+\nu_s - \nu_s^2) \right] + [(1+\nu_s) a \alpha_s \Delta T] - (1+\nu_s) b \alpha_c \Delta T \quad (4-3)$$

در این رابطه‌ها، p_i فشار داخلی لوله جداری (Psi)، a شعاع داخلی لوله جداری (in)، b شعاع داخلی غلاف سیمان، C شعاع خارجی غلاف سیمان، α_c ضریب انبساط حرارتی سیمان، α_s ضریب انبساط حرارتی فولاد، E_c مدول یانگ سیمان (Gpa)، E_s مدول یانگ فولاد، r_m قطر متوسط لوله جداری، t_s ضخامت دیواره لوله جداری، ν_c ضریب پواسون سیمان، ν_s ضریب پواسون فولاد و ΔT اختلاف دما است.

وقتی P_{C2} معلوم باشد، P_{C1} نیز قابل محاسبه است. معادلات زیر برای تعیین تنش‌های مماسی (σ_θ)،

شعاعی (σ_r) و محوری (σ_{axial}) در غلاف سیمان به عنوان تابعی از شعاع ارائه شده‌اند (البته در صورتی که مقادیر P_{C1} و P_{C2} و b و c مشخص باشند).

$$\sigma_{\theta}(r) = P_{C1} \left(\frac{b^2}{c^2 - b^2} \right) \left(\frac{1+c^2}{r^2} \right) - P_{C2} \left(\frac{c^2}{c^2 - b^2} \right) \left(\frac{1+b^2}{r^2} \right) \quad (5-3)$$

$$\sigma_r(r) = P_{C1} \left(\frac{b^2}{c^2 - b^2} \right) \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) - P_{C2} \left(\frac{c^2}{c^2 - b^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (6-3)$$

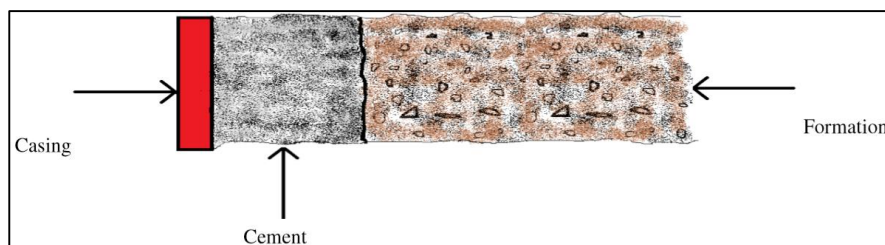
$$\sigma_{axial} = \nu_c (\sigma_{\theta} + \sigma_r) \quad (7-3)$$

۳-۳-۲ مدل تحلیلی سطح مشترک بین سازند، سیمان و لوله‌جداری

سیستم سازند، سیمان و لوله‌جداری در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. یکپارچگی چاه وابسته به تماس سیمان با لوله‌جداری و توانایی آن در مهر و موم کردن فضای حلقوی در طول عمر چاه است. بنابراین درک پیوند بین سیمان، سازند و لوله‌جداری تحت شرایط چاه که منجر به بهترین روش و مدل برای پیش‌بینی طول عمر چاه شود، ضروری است (Amamoo, 2012). بر اساس تئوری کولمب شکست برشی تحت شرایط زیر اتفاق می‌افتد:

$$\tau_n = c + \mu \sigma_n = c + \tan \varphi * \sigma_n \quad (8-3)$$

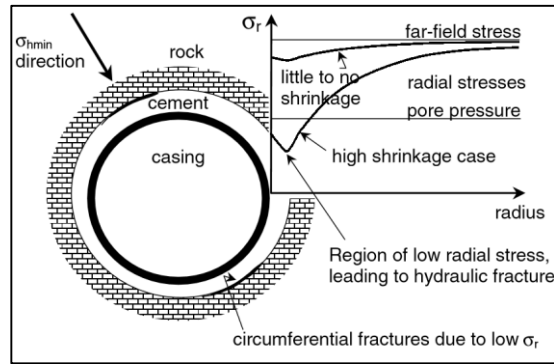
در این رابطه، τ_n تنش برشی، c مقاومت چسبندگی، φ زاویه اصطکاک داخلی بین سیمان، سازند و سیمان، لوله‌جداری و μ ضریب اصطکاک است.



شکل ۳-۶: مجموعه سازند، سیمان و لوله‌جداری (Amamoo, 2012)

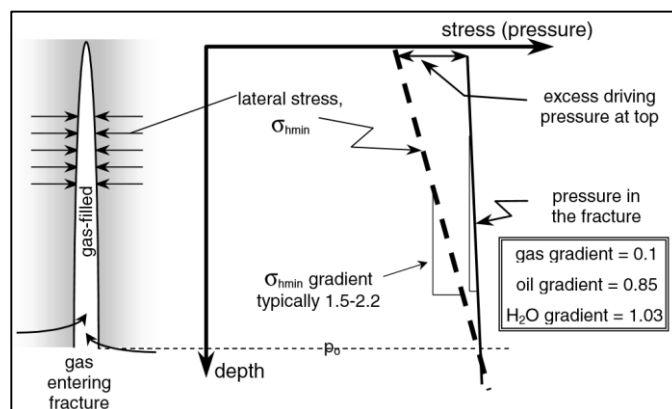
۳-۳-۳ پدیده نشت در سیستم چاه

به طور کلی پس از انجام سیمان کاری مناسب در چاه، شکستگی های مجاور محیطی قابل تشخیص نمی باشند. چنین شکستگی های با طول زمان و انجام عملیات های مختلف توسعه می یابند. نشت در چاه های نفت (رفتار سیمان و عواقب بلند مدت آن) بررسی شده است که علت اصلی نشت، انقباض سیمان و در پی آن افت تنش شعاعی است (Dusseault et al, 2001). پدیده نشت در دو دوره کوتاه مدت و بلند مدت اتفاق می افتد. در کوتاه مدت عواملی چون ویژگی های دوغاب، جابجایی های مکانیکی و فشار هیدرواستاتیک در زمان سیمان کاری موثر هستند و در بلند مدت عواملی چون، تنش های مکانیکی و حرارتی (فشاری و کششی) که باعث به خطر افتادن یکپارچگی سیمان می شوند، نقش دارند. شکست غلاف سیمان به طور عمده با انقباض و انبساط سیمان (به دلیل تغییر در دما و فشار داخلی) همراه است (Khandka, 2007). شکل (۳-۷) اثر انقباض را بر تمرکز تنش های اطراف چاه نشان می دهد. فشار سیمان تقریباً همیشه بیشتر از فشار منفذی و کمتر از تنش افقی حداقل است. پس از آنکه دوغاب سیمان سخت می شود، فشار هیدرواستاتیک حلقه متوقف می شود و تنش برشی به فصل مشترک سیمان و سازند وارد می شود. با سخت شدن سیمان و اثرات دمایی در محیط چاه، سیمان ۰,۱ تا ۰,۲ درصد کاهش حجم می دهد که در نهایت تنش شعاعی بین سازند و سیمان کاهش می یابد. کرنش های شعاعی کوچک (۰,۰۰۱ تا ۰,۰۰۳) در سازندهای سخت، موجب آرام شدن تنش شعاعی و زیاد شدن تنش مماسی می شود. در شرایطی که فشار منفذی از تنش شعاعی یا تنش افقی حداقل بیشتر شود، شکست هیدرولیکی اتفاق می افتد. در این شرایط شکستگی کمتر از ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر در فصل مشترک سیمان و سازند ایجاد می شود. این شکستگی های ریز با انجام عملیات و تمرکز فشار و تنش در اطراف چاه، بزرگتر شده و باعث از بین رفتن پیوند بین سیمان و سازند می شود و در نهایت یکپارچگی چاه از دست می رود. از آنجایی که تنش های افقی همیشه در شرایط ایزوتروپ قرار ندارند، این شکستگی ها در یک طرف و یا در دو طرف غلاف سیمان و در جهت تنش حداقل اتفاق می افتد (Khandka, 2007).



شکل ۳-۷: اثر انقباض بر تمرکز تنش اطراف چاه (Khandka, 2007)

برای درک رشد ترک در راستای قائم گرادیان تنش نقش اصلی را ایفا می‌کند. مطابق شکل (۳-۸) ترک عمودی از سیال یا گاز موجود در سازند پر شده که گرادیان آب ۰,۵ کیلوپاسکال بر متر، گرادیان گاز کمتر از یک و گرادیان تنش افقی جانبی ۱۸ تا ۲۴ کیلوپاسکال بر متر است. ترک حاوی فشار آب یا گاز می‌تواند فضای باز در پایین ترک را نگهداری کند اما اختلاف گرادیان فشار (۲۱ - ۱۰,۵) در نوک ترک باعث می‌شود که یک نیروی شکست ذاتی ایجاد شود. رشد ترک در جهت عمودی افزایش می‌یابد که در نهایت باعث نشت گاز در پشت لوله‌جداری می‌شود. با این وجود شاید چندین دهه طول بکشد تا گاز به سطح زمین برسد و فوران اتفاق افتد. دلیل این امر آن است که میزان انتشار گاز به شکستگی و انتقال هیدرولیکی به دلیل باریک بودن این ناپیوستگی، پایین است.



شکل ۳-۸: رشد ترک در جهت عمودی (Khandka, 2007)

۳-۴ مطالعات عددی

مطالعات عددی ابزاری مناسب و اقتصادی برای پیش‌بینی صحت یکپارچگی چاه در طول عمر مفید آن است. توصیف رفتار سازند، سیمان، لوله‌جداری و همچنین سطح مشترک بین آنها که در معرض بارهای ناشی از عملیات‌های انجام شده در مراحل حفاری، تکمیل و تولید قرار می‌گیرند، باید با دقت و به درستی انجام شود. آنالیز مجموعه سیمان، سازند و لوله‌جداری در طول عمر چاه یکی از عوامل موثر بر حفظ یکپارچگی چاه است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی این مجموعه، توسط نرم‌افزارهای عددی المان محدود (FEM)، المان مجزا (DEM)^۱ و ... انجام شده است. همانطور که در فصل دوم نیز اشاره شد، شکل‌های شکست در سیمان به صورت کششی، پلاستیک شدن غلاف سیمان و یا از دست رفتن پیوند بین سیمان-لوله‌جداری و یا سیمان-سازند هستند. این شکست‌ها به دلیل تنش‌ها و فشارهای بالا، در طول عمر چاه اتفاق می‌افتند. یکپارچگی غلاف سیمان نقش کلیدی در یکپارچگی کلی یک سیستم چاه نفتی ایفا می‌کند. عدم یکپارچگی سیمان منجر به ایجاد شرایط خطرناک می‌شود. بدترین حالت انفجار ناشی از به وجود آمدن شکاف‌های کششی در غلاف سیمان و در پی آن باز شدن مسیری برای مهاجرت هیدروکربن‌ها است (Bois et al, 2010). مطالعات غلاف سیمان به لحاظ تاریخی صرفاً در یک محیط آزمایشی یا با استفاده از ابزارهای خنک‌کننده تخصصی انجام شده است؛ با این وجود، مطالعات عددی المان محدود بر روی غلاف سیمان جهت تعمیم آزمایش‌های گذشته، گسترش یافته است (Cooke et al, 1983). با استفاده از مدل‌های المان محدود، رفتار غلاف سیمان در شرایط مخزن مورد مطالعه قرار گرفته است (Shahri et al, 2005; Shen and Beck, 2012). رویکرد المان محدود اجازه می‌دهد تا سناریوهای پیچیده‌تر مورد آزمایش قرار گیرد و امکان انجام شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی فراهم شود. هنگامی که مدل‌های المان محدود با استفاده از خواص موادی که در آزمایشگاه به دست می‌آیند، بررسی می‌شوند، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند (Haider et al, 2012). المان محدود پدیده‌های

^۱ Discrete Element Method

فیزیکی بسیاری از جمله دما و تغییرات فشار چاه، تغییرات فشار سازند و تغییر حجم در غلاف سیمان در طول فرآیند انقباض را شبیه‌سازی کرده است (Haider et al, 2012; Patillo and Kristiansen, 2002; Gray et al, 2007; Shari et al, 2005). اگرچه مدل‌های ساخته شده تعاملات بین سیمان، سازند و لوله‌جداری را به صورت کامل بررسی کرده‌اند اما تا سال ۲۰۰۲ تغییرات تنش قبل از سیمان-کاری کمتر مورد توجه بوده است. اثر تغییرات تنش قبل از سیمان‌کاری با استفاده از تحلیل‌های المان محدود توسط محققان ارائه شده است (Patillo and Kristiansen, 2002; Bosma et al, 2003; Gray et al, 2007). در برخی موارد، فرآیندهای فیزیکی مانند: سخت شدن، انقباض، هیدراتاسیون و ... در مدل‌سازی‌ها نادیده گرفته می‌شوند و یکی از فرضیه‌های معمول جهت ساخت مدل، اعمال مدول یانگ نهایی سیمان به مدل المان محدود می‌باشد. (Gray et al, 2007; Haider et al, 2012; Shen and Beck, 2012).

گری^۱ در سال ۲۰۰۷ مدل المان محدود چاه با استفاده از نرم افزار ABAQUS که شامل مراحل حفاری و تکمیل است، ایجاد نموده است. این مدل شامل استفاده از مراحل متعدد برای تولید تنش‌های برجا، تنش‌های القایی وارد شده به چاه و تنش‌های سیمان می‌باشد. در این مدل، مرحله سیمان‌کاری با قرار دادن فشار هیدرواستاتیک به المان‌های سیمان انجام می‌شود و نحوه سخت شدن سیمان با افزایش مدول یانگ در نظر گرفته نشده است (Gray et al, 2007). به دلیل اهمیت موضوع یکپارچگی و دقتی که در ارزیابی آن باید انجام داد، سیمان در مقیاس آزمایشگاهی و تحت شرایط چاه (دما و فشار بالا) به صورت حلقه‌ای توسط کاتالین تئودوریو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۳ شبیه‌سازی شد. با اضافه کردن فشار درونی (فشار سیال درون لوله‌جداری)، رفتار سیمان در مراحل زمانی مختلف بررسی شد. در نهایت با به کار بردن یک مدل تحلیلی و المان محدود، گسیختگی در سیمان پیش‌بینی شد (Catalin Teodoriu et al, 2013).

^۱ Gray

^۲ Catalin Teodoriu

۳-۴-۱ مدل‌سازی تاثیر عوامل مکانیکی بر یکپارچگی چاه

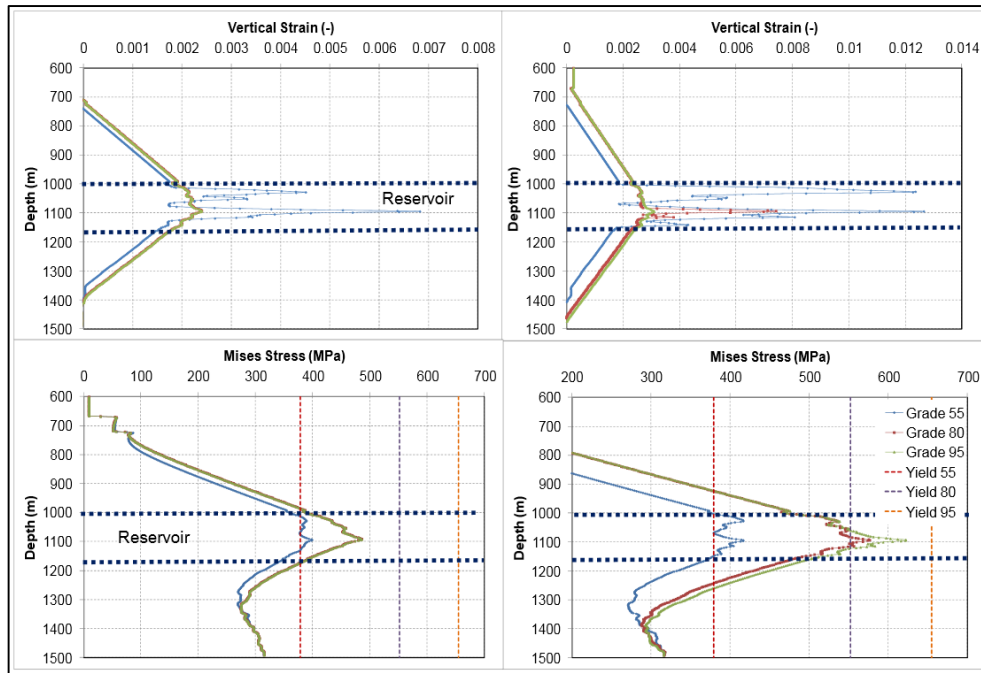
در طول بهره‌برداری از مخزن‌های هیدروکربنی، در نزدیکی چاه جابجایی‌هایی به دلیل اقدامات مکانیکی مانند لوله‌گذاری و سیمان‌کاری رخ می‌دهد. همچنین در طول بهره‌برداری فشار مخزن تخلیه شده و سنگ‌های نزدیک چاه متراکم می‌شوند که در پی آن فشار مکانیکی به سیمان و لوله‌گذاری انتقال می‌یابد. این اقدامات باعث تغییر رژیم تنش در برخی از نقاط اطراف چاه می‌شود و امکان شکست در سیمان و لوله‌گذاری افزایش پیدا می‌کند. بنابراین ارزیابی یکپارچگی چاه تکمیلی در دراز مدت، یک مسئله بحرانی در مرحله طراحی است. تحلیل یکپارچگی چاه با روش المان محدود برای چاه و اجرای سیستم استاندارد در مخزن تولید انجام شده است. تمرکز تنش در اطراف چاه و در پی آن انتقال تنش به سیستم‌های تکمیل و انجام عملیات‌های مکانیکی در چاه باعث ایجاد شکست در سازند، سیستم‌های تکمیل (سیمان، لوله‌گذاری) می‌شود (Capasso and Musso, 2014).

تحلیل خمش^۱ لوله‌گذاری برای ارزیابی یکپارچگی طولانی مدت یک چاه هیدروکربنی توسط تاپینی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام شده است (Topini et al, 2011). در این تحقیق یک روش توسعه یافته جهت بررسی یکپارچگی سیمان و لوله‌گذاری در یک چاه تولیدی به کار گرفته شده است. علاوه بر ارزیابی آسیب‌های احتمالی مربوط به تنش و کرنش، خطر خمش نیز در هر مرحله از تولید در نظر گرفته شده است. همچنین جهت ایجاد یک فاکتور ایمنی برای ساختار چاه، بر روی فاکتورهای لوله‌گذاری تحلیل حساسیت انجام گرفته است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS، اطلاعات و دانش با ارزشی جهت طراحی تکمیل چاه و همچنین اطمینان از پایداری در طول عمر چاه کسب می‌شود. آنها سه نوع لوله‌گذاری با قطر و عمق متفاوت در نظر گرفتند و در نهایت بر روی نوع فولاد، تنش تسلیم و زمان تولید سیال نفت تحلیل حساسیت کردند که نتایج مطابق شکل (۳-۱۷) است. در این شکل، پس از ۶ سال تولید (شکل‌های سمت چپ)، کرنش عمودی برای لوله‌گذاری با

^۱ Buckling

^۲ Topini

درجه ۸۰ و ۹۵ برابر و کمتر از درجه ۵۵ است. لوله‌جداری با درجه ۵۵ به تنش تسلیم خود رسیده است و در نتیجه کرنش پلاستیک در آن به وجود می‌آید. پس از ۱۰ سال تولید (شکل‌های سمت راست)، لوله‌جداری با درجه ۸۰ نیز به تنش تسلیم خود رسیده است و کرنش عمودی به صورت قابل توجهی افزایش یافته است (Topini et al, 2011).



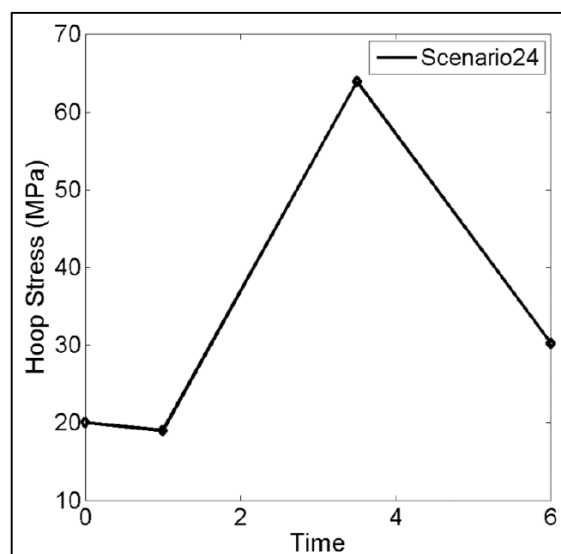
شکل ۳-۹: کرنش عمودی و تنش از دست رفته برای سه نوع لوله‌جداری در ۶ و ۱۰ سال پس از تولید (Topini et al, 2011)

همیلبرگ^۱ در سال ۲۰۱۴، مطالعات عددی برای پایداری و یکپارچگی چاه در مراحل حفاری و تکمیل انجام داده است. در این تحقیق اثرات مکانیکی غلاف سیمان- لوله‌جداری- سازند و اثرات تغییر دما که بر اثر تزریق CO_2 به وجود آمده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. شرایط تنش با استفاده از روش المان محدود، قبل از سیمان‌کاری تخمین زده می‌شود و اثر آن روی مجموعه چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. افزایش مدول یانگ سیمان در طول سخت شدن و تخریب سیمان شبیه‌سازی شده است. در تحقیق مذکور، بررسی یکپارچگی چاه اکثراً تحت یک مدول یانگ ثابت انجام شده است. با استفاده

^۱ Himmelberg

از روش المان محدود می‌توان نشان داد که در حین سخت شدن^۱ سیمان امکان تشکیل شکست‌های برشی وجود دارد، و برعکس هنگام تخریب^۲ سیمان، امکان شکست کششی در طول سرد شدن CO_2 وجود دارد.

مطابق شکل (۳-۱۸) با افزایش مدول یانگ سیمان، مقدار تنش مماسی کاهش می‌یابد. در زمان $t=1$ سخت‌شوندگی سیمان شروع می‌شود و مدول یانگ از ۵ به ۳۵ گیگاپاسکال افزایش می‌یابد. از زمان ۳،۵ تا ۶ مدول یانگ از ۳۵ به ۱۰ کاهش می‌یابد (Himmelberg, 2014).



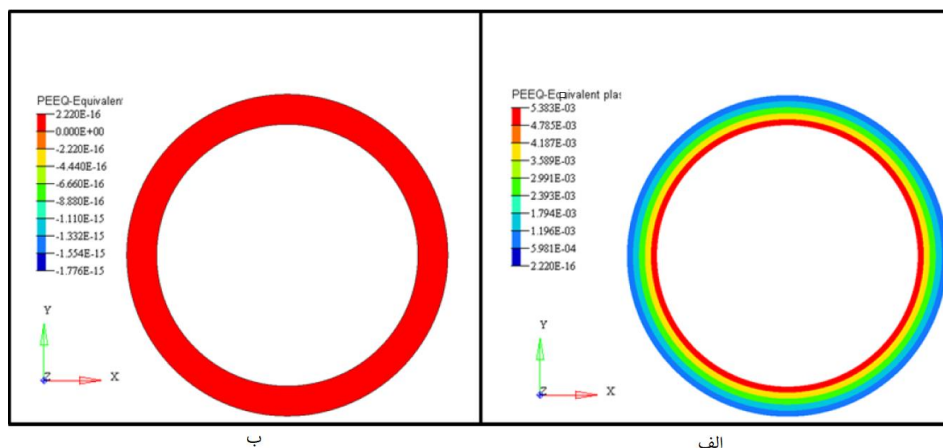
شکل ۳-۱۰: تغییرات تنش مماسی نسبت به زمان در المان‌های داخلی غلاف سیمان (Himmelberg, 2014)

شکل (۳-۱۹) نشان می‌دهد که با تغییرات مدول یانگ، کرنش پلاستیک نیز دچار تغییر می‌شود. در

قسمت (الف) مدول یانگ سیمان از ۵ به ۳۵ گیگاپاسکال افزایش می‌یابد اما در قسمت (ب) مدول یانگ ثابت و مقدار آن ۳۵ است.

^۱ Hardening

^۲ Degradation



شکل ۳-۱۱: تغییرات کرنش پلاستیک با سخت شدن سیمان (Himmelberg, 2014)

در این مدل سازی عددی محدودیت های خیلی مهم وجود دارد که به شرح زیر می باشد:

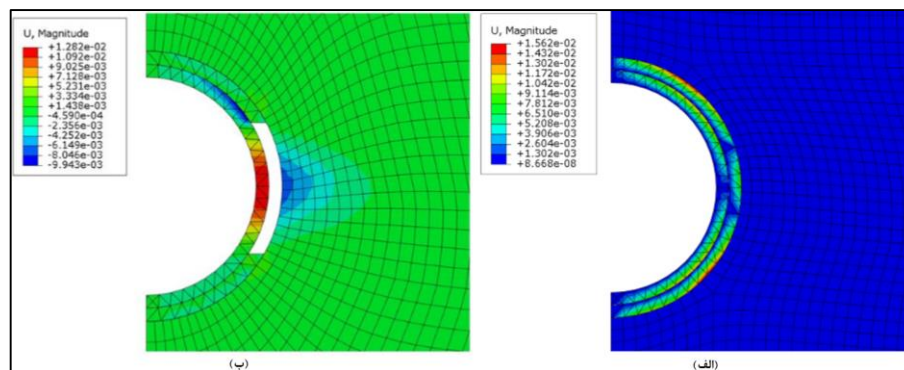
- ✓ فرض شده است که مجموعه سیمان- لوله جداری و سازند کاملاً به هم پیوند خورده باشند (عدم استفاده از رابط^۱ در مدل).
- ✓ عدم اطلاعات دقیق و آزمایشگاهی
- ✓ مواد الاستیک در نظر گرفته شده اند و برای نتایج دقیق تر این مواد باید پلاستیک و یا متخلخل الاستیک در نظر گرفته شوند.

همتیان^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵، تاثیر سیمان کاری ضعیف بر گسیختگی لوله جداری را مورد بررسی قرار داده اند. نقش خواص مکانیکی و هندسی سیمان به خصوص در بلند مدت برای جلوگیری از گسیختگی سیمان و ناپایداری چاه بسیار مهم است. گسیختگی سیمان در نتیجه توسعه کرنش پلاستیک اتفاق می افتد. در این مطالعه، بر اساس معیار دراکر-پراگر و با استفاده از روش المان محدود، نقش خواص مکانیکی و هندسی سیمان در ثبات آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج، زمانی که سیمان در حالت پلاستیکی است، بهبود خواص مکانیکی سیمان (مدول یانگ، نسبت پواسون و یا مقاومت فشاری تک محوری) برای جلوگیری از توسعه کرنش پلاستیک در سیمان می تواند مفید باشد. در چنین شرایطی، افزایش ضخامت سیمان ممکن است مفید باشد. با افزایش نسبت پواسون

^۱ Interface

^۲ Hemmatian

سیمان، کرنش پلاستیک توسعه یافته در سیمان به صورت لگاریتمی کاهش یافته است. علاوه بر این، با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، فشار پلاستیکی توسعه یافته در سیمان به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در شکل (۳-۲۰: الف) نشان داده شده است که به علت بارهای بیش از حد ناشی از تنش‌های برجا، سیمان تا ۱,۳ سانتی متر جابجا شده است اما جابجایی قابل توجهی در لوله‌جداری وجود ندارد. قسمت (ب) وجود حفره در سیمان را نشان می‌دهد، همانطور که مشخص است لوله‌جداری در مکان‌هایی که سیمان وجود ندارد، در معرض جابجایی و آسیب جدی قرار می‌گیرد. این جابجایی تقریباً برابر با جابجایی سیمان در حالت سیمان‌کاری خوب است (Hemmatian et al, 2015).



شکل ۳-۱۲: (الف): جابجایی سیمان به علت بارهای ناشی از سازند، (ب): جابجایی لوله‌جداری به دلیل سیمان‌کاری ضعیف (Hemmatian et al, 2015)

این تحقیق نیز در فضای دو بعدی و با فرض کرنش صفحه‌ای انجام شده است. اثر دما و فشار منفذی نیز در نظر گرفته نشده است. همچنین غلاف سیمان نیز به صورت الاستیک فرض شده است که بهتر بود، پارامترهای پلاستیک سیمان نیز مورد بررسی قرار گیرند.

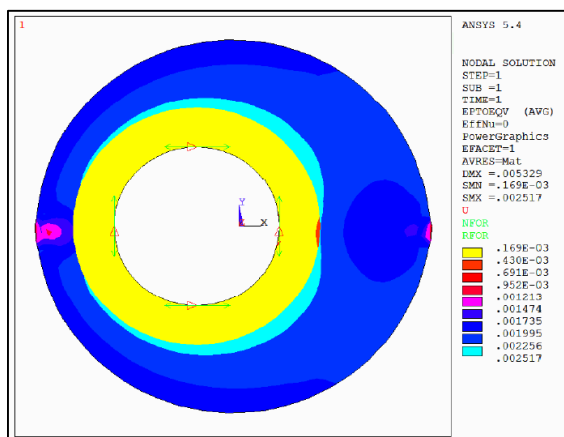
۳-۴-۲ مدلسازی تاثیر دما و فشار بالا (HT-HP) بر یکپارچگی چاه

برای رسیدن به سیمان‌کاری خوب باید در طراحی، عوامل مختلفی از قبیل امنیت چاه، تمرکز لوله‌جداری، حذف گل موثر و مهاجرت گاز در نظر گرفته شود. هنگامی که چاه تحت فشار و دمای بالا قرار می‌گیرد باید سعی کرد که سیمان تحت این شرایط دچار شکستگی و نفوذپذیری نشود. در این شرایط سیمان باید انعطاف پذیرتر از حالت‌های دیگر باشد. با افزایش انعطاف‌پذیری سیمان (کاهش

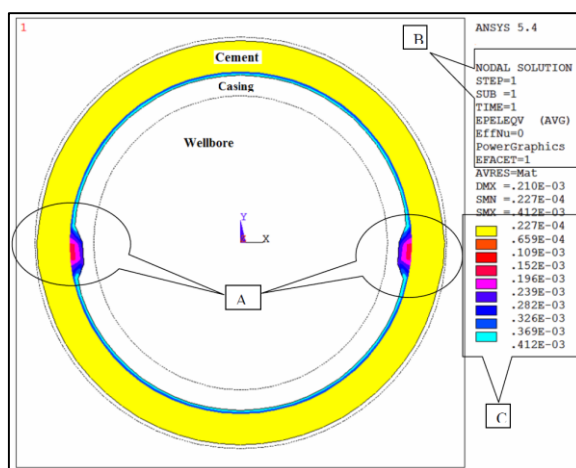
مدول یانگ) تنش کششی در غلاف سیمان به دلیل انبساط حرارتی، کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۵ شهری^۱ و همکاران شکست سیمان را در شرایط HT-HP مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود، تنش در اطراف و داخل سیمان، پیش‌بینی زمان شکست و تاثیر آن روی یکپارچگی سیمان بررسی شده است. شرایط مرزی پیچیده برای پیش‌بینی شکست سیمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تنش به دما و فشار وابسته است. شکست در سیمان به شدت تحت تاثیر درجه حرارت چاه، دمای سازند، انقباض سیمان، ضخامت سیمان، قطر و تمرکز لوله‌جداری قرار دارد. شکل (۳-۱۳) احتمال شکست در سیمان با توجه به تمرکز لوله‌جداری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در طرفی که سیمان نازک‌تر می‌شود، این احتمال افزایش پیدا می‌کند. ویژگی‌های سازند، سیمان و لوله‌جداری مانند مدول یانگ و نسبت پواسون نقش مهمی در این سیستم دارند. افزایش مدول یانگ باعث سخت شدن و شکننده شدن سیمان می‌شود (شکل ۳-۱۴) و افزایش ضریب پواسون در (شکل ۳-۱۵) (در قسمت الف (۰/۴) و در قسمت ب (۰/۱)) باعث می‌شود که رفتار پلاستیکی از خود نشان دهد (Shahri et al, 2005). این مدل‌سازی در شرایط تنش همسانگرد انجام شده که برای ارائه نتایج دقیق‌تر بهتر بود که در شرایط ناهمسانگرد نیز بررسی شود. همچنین اثر تنش در حالت دو بعدی انجام شده است که برای مدل‌سازی تنش روباره، حالت سه بعدی پیشنهاد می‌شود. صرفاً در نظر گرفتن سیمان با مدول یانگ پایین و ضریب پواسون بالا منجر به طراحی ضعیف می‌شود و بهتر است که این طراحی با توجه به شرایط چاه و دیگر عوامل موثر بر یکپارچگی انجام شود.

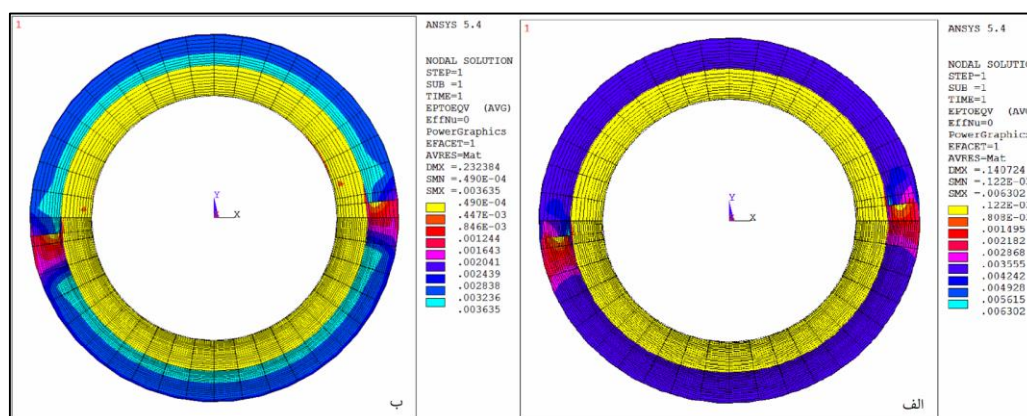
^۱ Shahri



شکل ۳-۱۳: تاثیر محوریت لوله جداری و احتمال شکست بزرگتر در طرف نازکتر سیمان (Shari et al, 2005)



شکل ۳-۱۴: تاثیر مدول یانگ بر تغییرات کرنش (Shari et al, 2005)

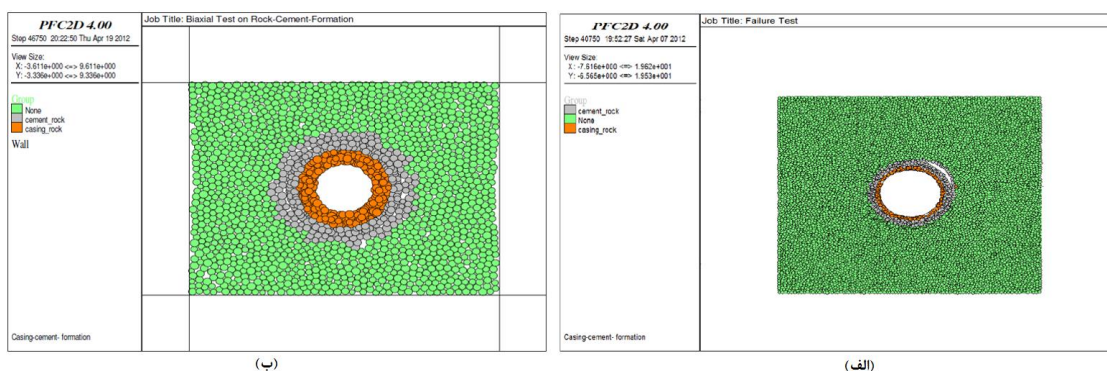


شکل ۳-۱۵: تاثیر نسبت پواسون بر کرنش پلاستیک سیمان (Shari et al, 2005)

اثر فشار بالا بر یکپارچگی چاه با روش المان مجزا توسط آمامو^۱ در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار

^۱ Amamoo

گرفته است. هدف اصلی این تحقیق استفاده از روش المان مجزا، برای بررسی یکپارچگی چاه است. تاثیر پیوند بین سیمان، لوله‌گذاری و سیمان، سازند به طور کامل مورد بحث قرار گرفته است. پس از اعتبار سنجی مدل، با استفاده از نرم‌افزار PFC^۱ به تحلیل یکپارچگی چاه پرداخته شده است. شکل (۳-۱۶: الف) شکست در سیمان بر اثر افزایش فشار و قسمت (ب) پلاستیک شدن آن را نشان می‌دهد. همچنین تشکیل میکروتکرک در سازند، پلاستیک شدن سیمان و تغییر شکل لوله‌گذاری بر اثر تغییر فشار بررسی شده است (Amamoo, 2012). این تحقیق در فضای دوبعدی انجام شده و از آنجایی که فشار و دما باهم تغییر می‌کنند و با افزایش عمق فشار و دما نیز افزایش می‌یابند، بهتر است که بعد سوم نیز در مسئله گنجانده شود. زمانی که وزن گل حفاری از تنش‌های مماسی و شعاعی بیشتر شود، احتمال رخ دادن ترک‌های محوری وجود دارد که با روش DEM به خوبی می‌توان آن را مدل کرد. اگر چه روش المان مجزا یک روش محاسباتی و ریاضی پیچیده است و در پی آن زمان طولانی برای انجام این محاسبات وجود دارد ولی این روش قادر به تحلیل پایداری یا ناپایداری چاه می‌باشد. در نظر گرفتن فولاد به عنوان یک ماده دانه‌ای خود یکی از مشکلات مدل‌سازی است. عدم در نظر گرفتن فشار منفذی و دما در این تحقیق یکی از محدودیت‌های جدی است. شاید بتوان گفت که بهترین راه برای مدل‌سازی جدایش بین سیمان - فولاد و سیمان - سازند، ترکیب روش‌های پیوسته و ناپیوسته باشد.



شکل ۳-۱۶: شکست و پلاستیک شدن سیمان (Amamoo, 2012)

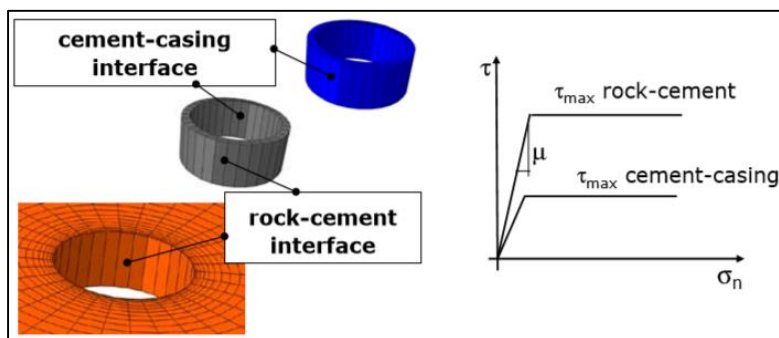
^۱ Particle Flow Code

۳-۴-۳ مدل‌سازی سطح مشترک بین سازند، سیمان و لوله جداری

جدایش در سطح مشترک باعث ایجاد کانال‌هایی برای عبور و نشت سیال می‌شود که در نتیجه باعث از دست رفتن یکپارچگی چاه می‌شود. انتظار می‌رود که سیمان‌کاری خوب باعث ایجاد ناحیه‌ای بسته در مقابل نشت سیال بین سازند و لوله‌جداری شود اما نمی‌توان همیشه به این هدف دست یافت و شکست غلاف سیمان و از دست رفتن پیوند آن با سازند و لوله‌جداری در طول عمر چاه اتفاق می‌افتد (Fourmaintraux et al, 2005). محققان زیادی مدل‌هایی را برای شبیه‌سازی سطح مشترک بین سیمان، سازند و لوله‌جداری بر اساس ساده‌سازی‌هایی نظیر فرضیه‌های الاستیک خطی برای لوله‌جداری، سیمان و سازند ایجاد نموده‌اند (Bosma et al, 1999; Fleckenstein et al, 2001; Patillo and Kristiansen, 2002; Ravi et al, 2002; Fourmaintraux et al, 2005; Shari et al, 2005; Gray et al, 2007).

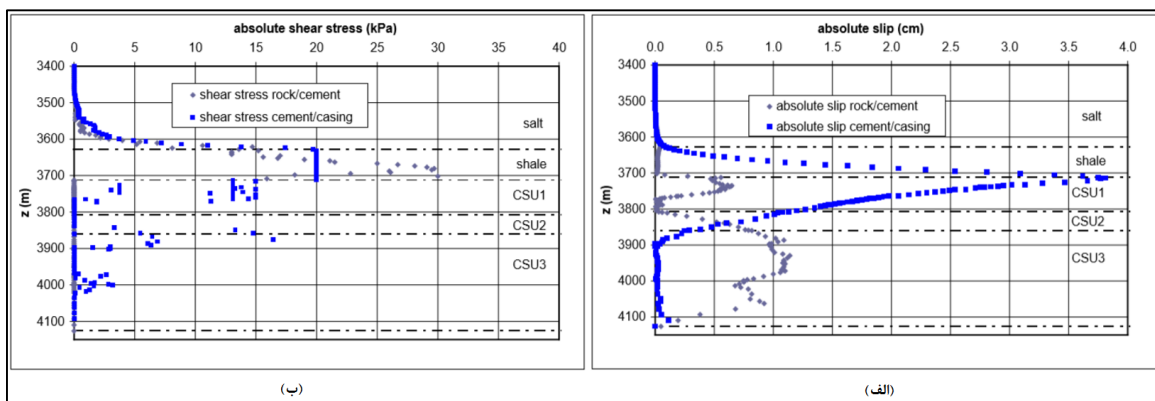
کاپاسو و موسو^۱ در سال ۲۰۱۰، تاثیر تنش و کرنش ایجاد شده توسط سنگ متراکم بر روی چاه تکمیل شده، با استفاده از مدل‌سازی سطح مشترک در آباکوس مورد ارزیابی قرار دادند. دو لایه نمک و شیل به عنوان روباره مخزن و سه لایه مخزن با پارامترهای ژئومکانیکی متفاوت مدل‌سازی شده است. آنها سطح مشترک بین سیمان- سازند و سیمان- لوله جداری را از نوع اصطکاکی با لغزش مجاز در نظر گرفتند. مدل به کار برده شده از نوع کولمب ایزوتروپیک است که در شکل (۳-۹) مشاهده می‌شود. در این مدل دو پارامتر ضریب اصطکاک (μ) و حداکثر تنش برشی (τ_{max}) برای سطح مشترک در نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است (Topini et al, 2011; Capasso and Musso, 2010).

^۱ Capasso and Musso



شکل ۳-۱۷: رفتار مکانیکی سطح مشترک (Capasso and Musso, 2010)

رفتار سطح مشترک با ایجاد تنش برشی و توسعه لغزش در تماس مورد ارزیابی قرار گرفت. با پایان شبیه‌سازی مطابق شکل (۳-۱۰: الف)، در سطوح مشترک بین سیمان، سازند و لوله‌جداری لغزش اتفاق افتاده است. لغزش بین سیمان و سازند اکثراً در لایه‌های مخزن تمرکز یافته درحالی‌که لغزش بین سیمان و لوله‌جداری در پایین روباره و در بالای مخزن توسعه می‌یابد. اصطکاک بین سیمان و لوله‌جداری نسبت به سیمان و سازند کمتر است، بنابراین میزان لغزش آن بیشتر است. شکل (۳-۱۰: ب)، مقادیر بالای لغزش در عمق‌هایی که تنش برشی بیشتری متحمل شده است را نشان می‌دهد.



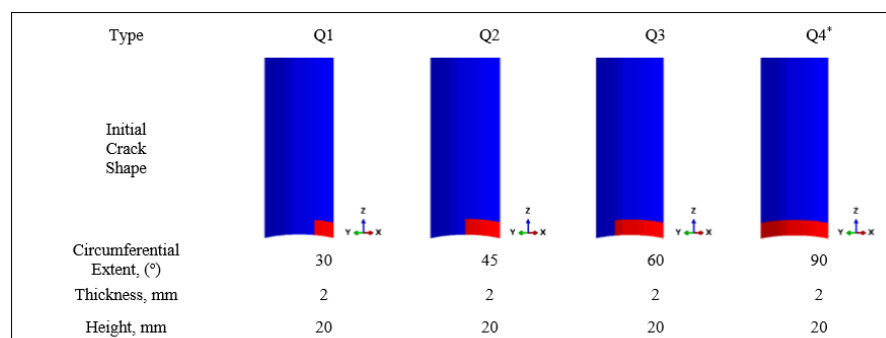
شکل ۳-۱۸: لغزش سطوح مشترک و تنش برشی سطوح نسبت به افزایش عمق (Capasso and Musso, 2010)

در سال ۲۰۱۶ فنگ^۱ و همکاران مدل سه بعدی از دست رفتن پیوند بین سیمان و لوله‌جداری را ارائه دادند. در این تحقیق مدلی برای شبیه‌سازی انتشار ترک در سیمان طراحی شده است. پیوندهای سیمان به دلیل فشار ناشی از نشت سیال در پاشنه لوله‌جداری از بین می‌رود. در این مدل می‌توان

^۱ Feng

طول، عرض و رشد محیطی ایجاد شده در پیوند سیمان را تعیین کرد. نتایج نشان می‌دهد که عرض و رشد محیطی شکستگی به شرایط تنش برجا، ترک‌های اولیه در اطراف پاشنه لوله‌جداری و ویژگی‌های سیمان و سازند وابسته است. چهار ترک اولیه در سطح مشترک سیمان در نظر گرفته شده که رشد ترک در جهت عمودی به نسبت محیطی بیشتر است. در واقع آنها روشی را برای پیش‌بینی یکپارچگی چاه و راهنمایی برای بهینه‌سازی مرحله تکمیل ارائه دادند.

در شکل (۱۱-۳) چهار نمونه ترک با ارتفاع اولیه ۲۰ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و زوایای رشد محیطی متفاوت در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲-۳) حالت آسیب یا تضعیف سختی (SDEG^۱) در سطح مشترک سیمان و لوله‌جداری، فشار سیال (POR^۲) موجود در شکستگی و کرنش پلاستیک (PEEQ^۳) در سیمان را نشان می‌دهد (Feng et al, 2016).



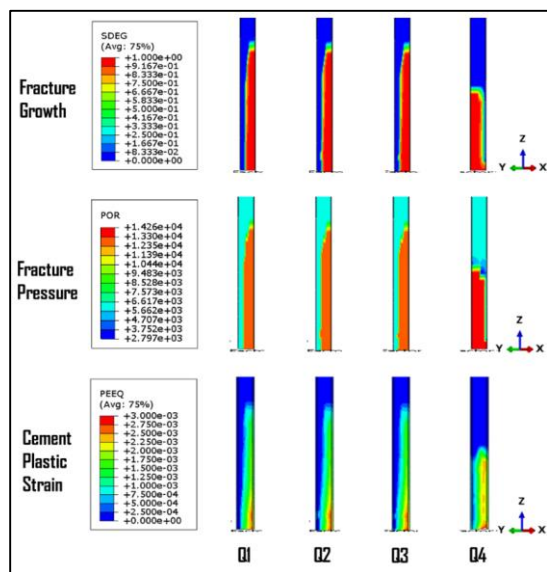
* Q4 is the base case.

شکل ۳-۱۹: هندسه ترک‌های اولیه در پاشنه لوله‌جداری (Feng et al, 2016)

^۱ Stiffness degradation

^۲ Pore pressure

^۳ Equivalent plastic strain



شکل ۳-۲۰: رشد ترک، فشار شکستگی و کرنش پلاستیک برای ترک‌های اولیه با اندازه‌های متفاوت (Feng et al,)

(2016)

۳-۵ جمع بندی

عواملی مانند ناپایداری چاه، خوردگی، خمش و گسیختگی لوله‌جداری، آسیب سیمان در مرزهای بین سیمان و سازند اطراف و همچنین سیمان و لوله‌جداری، انبساط و انقباض در سیمان و تغییر فشار و دما باعث از بین رفتن یکپارچگی چاه می‌شوند. تدوین برنامه‌ای به منظور بهینه‌سازی دوغاب سیمان حفاری با هدف مقاوم نمودن آن در برابر مهاجرت گاز حاصل مطالعات جهانی چند دهه گذشته است. در مطالعات آزمایشگاهی، توجه خاصی به غلاف سیمان شده و تاثیرات خواص مکانیکی و الاستیکی سیمان، دما و فشار بالا، گل حفاری، نسبت آب به سیمان و افزایشدهای مختلف بر یکپارچگی سیمان مورد بحث قرار گرفته است. مطالعات تحلیلی که در زمینه یکپارچگی انجام شده است، اکثراً پارامترهای مکانیکی از جمله تنش و امکان نشت سیال را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنالیز شکست مکانیکی سیمان- کاری لوله‌جداری تحت میدان تنش برجا و اثر فشار و دمای ته چاه بر سیمان، بررسی شده است. برای تجزیه و تحلیل خستگی در سیمان مهم است که تحریک تنش در سیمان در حالت واقعی و آزمایشگاهی محاسبه شود. یک مدل تحلیلی برای تعیین تنش در سیمان با توجه به خواص مکانیکی لوله‌جداری،

سیمان و سازند ارایه شده است. نشت در چاه‌های نفت (رفتار سیمان و عواقب بلند مدت آن) بررسی شده است که علت اصلی نشت، انقباض سیمان و در پی آن افت تنش شعاعی ذکر شده است. آنالیز عددی مجموعه سیمان، سازند و لوله‌جداری در طول عمر چاه یکی از عوامل موثر بر پیش‌بینی یکپارچگی چاه است. در مطالعات عددی که در گذشته صورت گرفته است، عوامل مختلفی مانند: دما و فشار بالا، انقباض، سطوح تماس بین سیمان، سازند و لوله‌جداری و عوامل مکانیکی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند و اثر آنها بر یکپارچگی چاه بررسی شده است. طبق تحقیقات انجام شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که اثر پارامترهای مکانیکی سیمان و سازند از جمله مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک و همچنین شرایط توزیع تنش‌های برجا بر یکپارچگی چاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است و جاهایی که بررسی شده‌اند نیز دارای محدودیت (کرنش صفحه‌ای، عدم اطلاعات دقیق و آزمایشگاهی، شرایط تنش همسانگرد، در نظر نگرفتن دما و فشار منفذی) بوده است. بنابراین در این پایان‌نامه سعی شده است که با شبیه‌سازی عددی المان محدود و با استفاده از کوپل هیدرومکانیک (اثر توامان سیال و سازند) در نرم‌افزار ABAQUS، این اثرات بررسی شوند.

فصل چهارم

تخمین و تعیین پارامترهای مکانیکی سازند و سیمان

۴-۱ مقدمه

عدم تأمین یکپارچگی چاه هر ساله هزینه زیادی را متحمل شرکت‌های نفتی در سراسر جهان می‌کند. برای رسیدن به یکپارچگی چاه، مهندسان نفت و زمین‌شناسان با طیف وسیعی از مشکلات در طول عملیات مخازن مواجه می‌شوند. مدل ژئومکانیکی، یک بیان عددی از حالات تنش و خصوصیات مکانیکی زمین در مقطعی خاص از چینه‌شناسی یک میدان هست (ترابی خواه و همکاران، ۱۳۹۴). در واقع مدل ژئومکانیکی، خواص مکانیکی مخزن و سازند روباره از جمله مقاومت سنگ، تنش‌های برجا، پارامترهای الاستیک و فشار منفذی را تفسیر می‌کند. بسیاری از میدان‌های نفتی با مشکلات ژئومکانیکی ناشی از فشار بیش از حد، ناپایداری‌های چاه، تراکم مخزن، شکست لوله جداری چاه، تولید ماسه، نشست سطح زمین، فعالیت گسل‌ها و عدم یکپارچگی چاه روبرو هستند. کاهش خطر مشکلات ژئومکانیکی مرتبط، نیازمند درک صحیح از رفتار ژئومکانیکی میدان دارد. در این میان استفاده از مدل‌های ژئومکانیکی، باعث کاهش شدید زمان و هزینه در توسعه میدان‌ها خواهد شد. دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری خواص ژئومکانیکی انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه است. متأسفانه این روش به علت پرهزینه بودن، تخریب مغزه پس از انجام آزمایش و ارائه اطلاعات فقط در بازه‌ای که آزمایش صورت گرفته است، قادر نیست که نمودار پیوسته‌ای از رفتار ژئومکانیکی ستون حفاری شده ارائه دهد. در این فصل پس از معرفی میدان مورد مطالعه، مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی از سازند مخزن با استفاده از نرم‌افزار IP^۱ ساخته می‌شود. سپس با استفاده از نتایج حاصل از انجام مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های تک‌محوره، سه‌محوره و برش مستقیم، پارامترهای مکانیکی سیمان تعیین می‌شوند که در فصل بعد، از آن‌ها جهت ساخت مدل عددی استفاده می‌شود.

۴-۲ معرفی میدان مورد مطالعه

شواهد نشان می‌دهد که نفت خام و گاز طبیعی بر اثر میلیون‌ها سال گرما و فشار که به تغییر

^۱ Interactive Petrophysics

میکروسکوپی گیاهی و حیوانی می‌انجامد، به وجود می‌آیند. برای تشکیل نفت تجمع مواد آلی به مقدار فراوان و کافی، ضروری است. این نیاز در حوضه‌های رسوبی تأمین می‌گردد که مواد آلی در آن‌ها درصد بالایی از مواد رسوبی را تشکیل داده و نهشتگی این دو به صورت توأم و هم‌زمان صورت می‌گیرد. زمین‌شناسان گسترش‌های نفتی در زیرزمین را به سه گروه زیر تقسیم می‌کنند (رضایی، ۱۳۸۰):

مخزن^۱: سازند مخزن از جنس ماسه‌سنگ، آهک و دولومیت است. مخازن نفتی برای آنکه بتوانند مقدار کافی نفت را در خود ذخیره کنند باید شرایط زیر را داشته باشند:

➤ سطح فوقانی مخزن غیرقابل نفوذ باشد که در غیر این صورت نفت به سطح زمین رسیده و از بین می‌رود. به این سطح غیرقابل نفوذ، پوش‌سنگ می‌گویند که بیشتر از جنس سنگ‌های شیل است.

➤ به‌اندازه کافی متخلخل باشد تا بتواند مقدار کافی نفت در خود ذخیره کند.

➤ داشتن تخلخل به‌تنهایی کافی نیست، بلکه این منافذ باید به هم مرتبط بوده به‌طوری‌که نفت بتواند به‌آسانی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر حرکت کند.

➤ انسداد^۲ مخزن به‌اندازه کافی بزرگ باشد. اختلاف بین بالاترین نقطه تاقدیس و پایین‌ترین منحنی بسته را کلوزر می‌گویند که هر چه این اندازه بزرگ‌تر باشد نفت بیشتری ذخیره می‌شود.

به‌طور کلی شرایط مخزن باید به‌گونه‌ای باشد که پس از حفر چاه، سیالات درون سازند به‌راحتی به درون چاه جریان پیدا کنند. از جمله مخزن‌های مهم کشور می‌توان به مخازن آسماری، ایلام، سروک، کنگان و دالان اشاره کرد.

میدان^۳: مجموعه چند مخزن را که در وضعیت مشترک زمین‌شناسی قرار گیرند را میدان می‌گویند. از جمله میدان‌های بزرگ نفتی در کشور می‌توان به میدان‌های اهواز، آغاچاری، مارون، بی‌بی‌حکیمه،

^۱ Reservoir

^۲ Closure

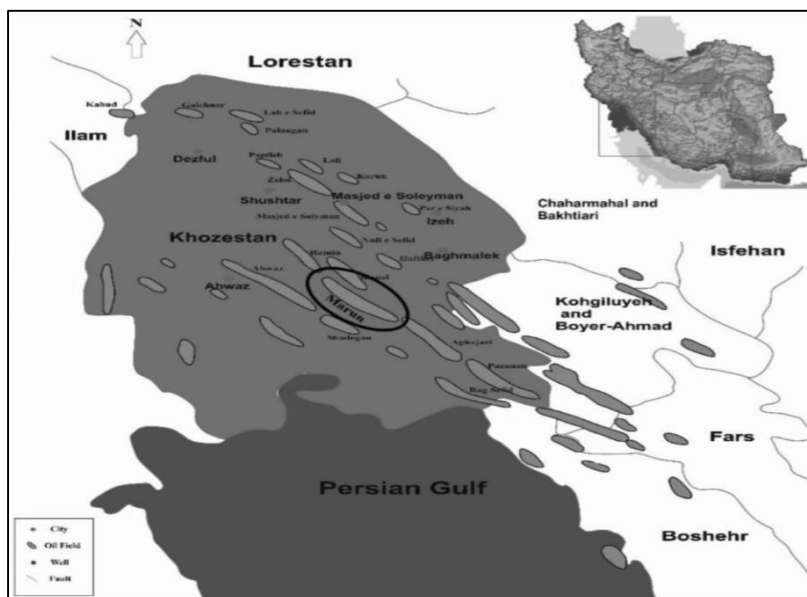
^۳ Field

پازنان، هفت گل و رگ سفید اشاره کرد.

حوضه^۱: حوضه عبارت است از یک محدوده جغرافیایی که در آن میدان‌ها و مخازن متعددی در یک مجموعه زمین‌شناسی مربوط به شرایط محیطی، رسوبی معین و مستقل به وجود آمده‌اند. از جمله حوضه‌های معروف می‌توان به حوضه زاگرس در جنوب غرب ایران اشاره کرد.

مخازن کربناته پس از مخازن ماسه‌سنگی مهم‌ترین و فراوان‌ترین مخازن نفتی و گازی را در جهان تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی این نوع از مخازن دارای اهمیت زیادی است. میدان نفتی مارون که دارای مخازن کربناته است، سومین میدان بزرگ نفتی ایران است که در استان خوزستان، در شمال غربی شهرستان امیدیه و در فاصله ۴۰ کیلومتری از جنوب شرقی اهواز قرار دارد. شکل (۴-۱) مشخصات جغرافیایی میدان مارون را نشان می‌دهد. حجم ذخیره درجای نفت خام این میدان معادل ۲۲ میلیارد بشکه برآورد شده است. همچنین حجم گاز درجای این میدان، معادل ۴۶۲/۱ تریلیون فوت مکعب است (رحیمی لرکی، ۱۳۸۸). میدان مارون در سال ۱۳۴۲ کشف شد و بهره‌برداری از آن در سال ۱۳۴۵ آغاز گشت. این میدان از دو مخزن نفتی بنام‌های آسماری و بنگستان و یک مخزن گاز طبیعی بنام خامی تشکیل شده است. مخزن خامی میدان مارون یکی از عمیق‌ترین مخازن گازی جهان است. میدان نفتی مارون یکی از بزرگ‌ترین میدان‌های نفتی حوضه زاگرس است که در بخش خاوری منطقه ساختاری فروافتادگی دزفول، در مجاورت میدان نفتی آغاچاری، میدان نفتی اهواز و میدان نفتی کوپال قرار دارد. این میدان با روند شمال غربی - جنوب شرقی در قسمت غربی تا مرکزی و روند شمال شرقی - جنوب غربی، در قسمت انتهای شرقی امتداد یافته است. رخنمون سطحی این میدان، سازند آغاچاری بوده و سازندهای آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی، مخازن هیدروکربوری موجود در این میدان هستند (بهبود محمدی، ۱۳۹۵).

^۱ Basin



شکل ۴-۱: موقعیت میدان نفتی مارون نسبت به میدان‌های مجاور در فروافتادگی دزفول (شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۸)

سر سازندهای میدان مارون شامل سازند آغاچاری (۱۴۵ متر)، میشان (۲۴۸۰ متر)، گچساران (۲۷۶۰ متر) و آسماری (۳۵۰۶ متر) می‌باشند. چاه مورد مطالعه در سازند آسماری، از عمق ۳۵۰۶ تا ۳۸۷۵ با داشتن نگارهای چاه و اطلاعات عملیاتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است (بهبود محمدی، ۱۳۹۵).

۳-۴ تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سازند

انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری مستقیم، مطمئن‌ترین راه برای تعیین خواص سنگ است؛ اما به علت در دسترس نبودن مغزه‌های حفاری به‌خصوص در صنعت نفت، استفاده و گاهی تکیه به نتایج به‌دست‌آمده از روابط تجربی دینامیکی تنها راه تخمین خواص سنگ است. از ویژگی‌های روابط تجربی می‌توان به ارزان بودن و پیوستگی داده‌ها در سرتاسر مخزن اشاره نمود (Yale, 1994). پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل ضرایب الاستیک، مقاومت سنگ، فشار منفذی و تنش‌های برجا نقشه‌ای اساسی را در روش‌های ارزیابی بهبود مخازن از قبیل پایداری، تعیین میزان تولید ماسه، شکاف هیدرولیکی و غیره ایفا می‌کنند (Zoback, 2010). مدل‌سازی ژئومکانیکی فرآیندی است که در آن

تغییرات پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ، در کنار تغییرات تانسور تنش مشخص می‌گردد. ساده‌ترین حالت نمایش مدل ژئومکانیکی به صورت یک‌بعدی است. در مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی تغییرات پارامترهای ذکرشده در راستای طول چاه مشخص می‌شود (Akbar et al, 2005).

۴-۳-۱ تفسیر نگارهای گرفته شده از چاه و تعیین جنس سنگ

ساخت مدل ژئومکانیکی، در واقع یک روش مناسب برای تخمین و پیش‌بینی مراحل حفاری و تکمیل چاه است. در مواردی که در مخزن نمونه‌ای برای آزمون‌های آزمایشگاهی در دسترس نباشد برای تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی از روابط تجربی استفاده می‌شود. این روابط تجربی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و داده‌های به دست آمده از نگارهای^۱ صوتی (DTC و^۲ DTS)، چگالی (RHOB^۴)، تخلخل (NPHI^۵) و گاما (GR^۶) را برقرار می‌کند. تغییرات این نگارها نسبت به عمق یکی از چاه‌های مخزن آسماری میدان مارون در شکل (۴-۲) مشاهده می‌شود. از لحاظ زمین‌شناسی، مسئله اصلی در ساخت مدل ژئومکانیکی تعیین ترکیب سنگ‌ها است که می‌توان از طریق تفسیر داده‌های چاه‌نگاری به آن دست یافت. نمودار گاما با حجم شیل رابطه مستقیم دارد یعنی در جایی که نمودار گاما کمترین مقدار را نشان دهد، کمترین مقدار شیل یافت می‌شود. در سنگ‌های آهکی، تخلخل چگالی با تخلخل نوترون برابر، در ماسه‌سنگ‌ها، تخلخل چگالی بیشتر از نوترون و در دولومیت‌ها، تخلخل چگالی کمتر از تخلخل نوترون است. در جاهایی که تخلخل نوترون از تخلخل چگالی کمتر شود احتمال وجود گاز و بالعکس احتمال وجود شیل زیاد است. وجود گاز باعث افزایش در تخلخل صوتی می‌شود. با توجه به نمودار کالیپر^۷ در جاهایی که افزایش قطر چاه رخ داده است، هنگام نمودارگیری از چاه به دلیل وجود گل زیاد

^۱ Logs

^۲ Compressional sonic travel time

^۳ Shear sonic travel time

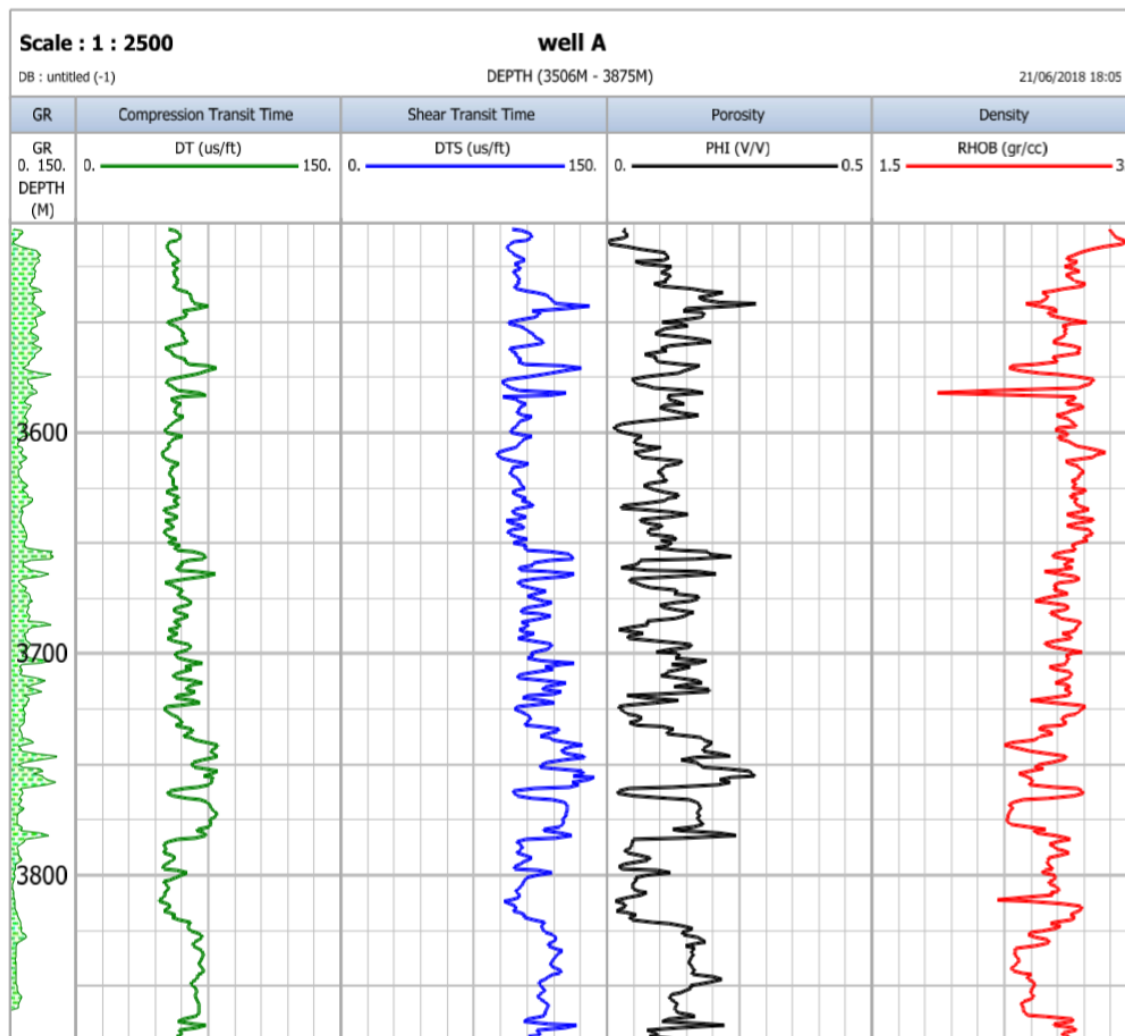
^۴ density

^۵ Neutron porosity

^۶ gamma ray

^۷ Caliper

در این ناحیه، اشعه گاما ضعیف است (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۶). با توجه به توضیحات فوق، می‌توان گفت که سازند عمدتاً از جنس آهک - دولومیت با لایه‌های شیلی است که در گزارش حفاری نیز این موضوع به اثبات رسیده است.



شکل ۴-۲: تغییرات نگارهای چاه مورد مطالعه نسبت به عمق مخزن

۴-۳-۲ تخمین پارامترهای الاستیک

ساده‌ترین مدل ساختاری برای توصیف رفتار سنگ، مدل الاستیک خطی است که این مدل پایه و اساس محاسبات مکانیک سنگی است. این نظریه بر پایه قانون هوک استوار است که وابسته به مفاهیم تنش و کرنش است. مدول یانگ و ضریب پواسون دو پارامتری است که برای توصیف پاسخ الاستیک هر ماده‌ای از جمله سنگ مورد نیاز است. یکی از روش‌های تخمین پارامترهای الاستیک سنگ، استفاده

از نگار صوتی چاه است. خروجی این نگار، سرعت موج فشاری و سرعت موج برشی است. این دو پارامتر از لحاظ ریاضی به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Zoback, 2010; Asef and Najibi, 2013; Fjaer et al, 2008):

$$E_{dyn} = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (1-4)$$

در این رابطه E_{dyn} مدول یانگ دینامیکی، v_p و v_s به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری و ρ نیز چگالی بالک (حجمی) است. اختلاف در حالت استاتیکی و دینامیکی ناشی از ساختار فیزیکی و بافت ناهمگن سنگ‌ها است. رابطه بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در مخازن کربناته توسط محققان زیادی ارائه شده است (Fjaer et al, 1992; Eissa and Kazi, 1998; Wang, 2017;). جهت انتخاب رابطه مناسب باید از نتایج آزمایش تک‌محوره بر روی مغزه استفاده کرد. بر اساس تحقیقات زوبک، مدول استاتیکی $0.4/4$ مدول دینامیکی است (Zoback, 2010). ونگ برای تبدیل مدول دینامیکی به استاتیکی در سازند کربناته، رابطه (۲-۴) را ارائه داد (Wang, 2000).

$$E_{sta} = 0.414E_{dyn} - 1.15 \quad (2-4)$$

افسری و همکاران از رابطه (۳-۴) برای تبدیل مدول دینامیکی به استاتیکی در سازندهای کربناته ایران استفاده کردند (Afsari et al, 2009). با توجه به عمومیت استفاده از این رابطه در مخازن کربناته ایران، در این تحقیق از این رابطه استفاده می‌شود.

$$E_{sta} = 0.414E_{dyn} - 1.0593 \quad (3-4)$$

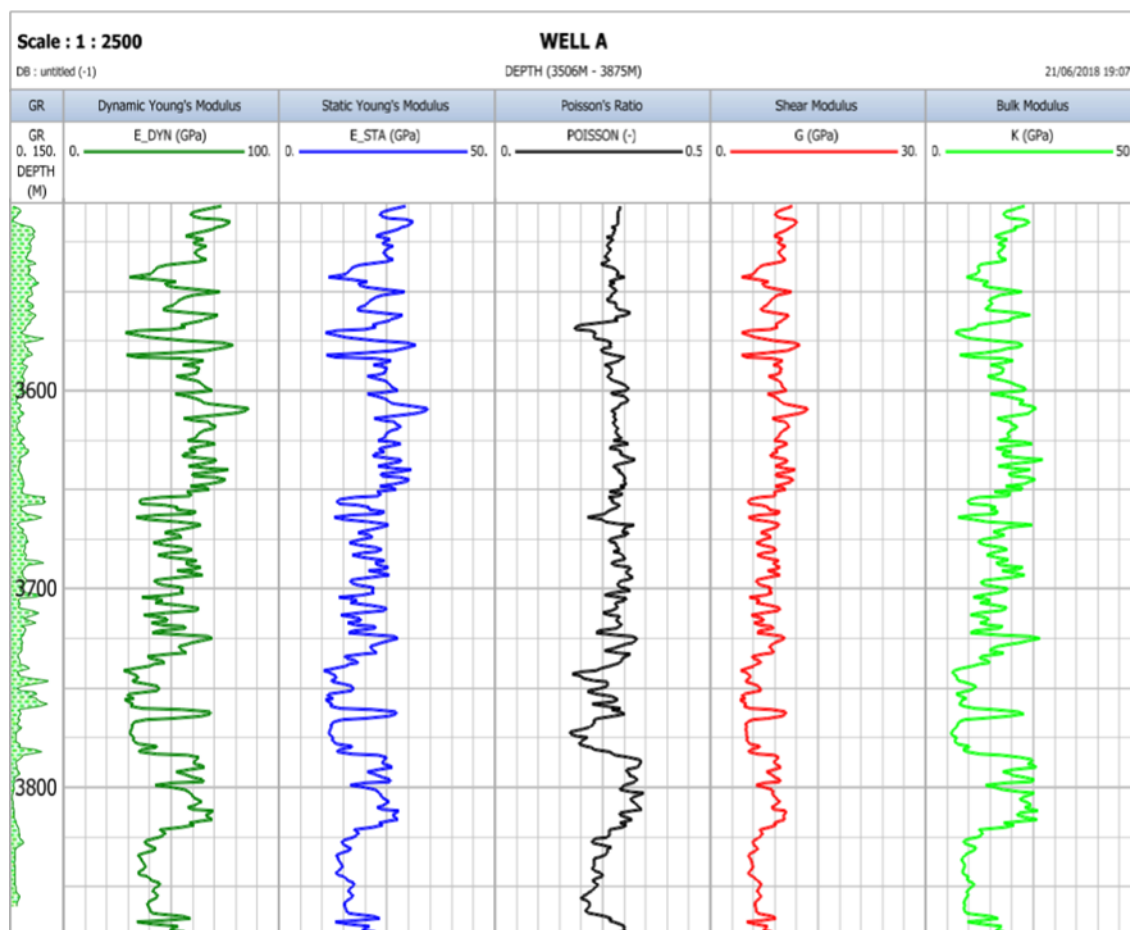
ضریب پواسون از عوامل مهم در مدل‌سازی ژئومکانیکی و خصوصاً در تخمین فشار شکست سازند است. این ضریب طبق تعریف، نسبت تغییر شکل عرضی به تغییر شکل طولی در اثر اعمال تنش به جسم است. این ضریب طبق رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شود که در این رابطه، v_{sta} ضریب پواسون دینامیکی و استاتیکی هستند (Fjaer et al, 2008).

$$v_{dyn} = v_{sta} = \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (4-4)$$

با مشخص شدن پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون، سایر پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی و مدول حجمی (بالک) از طریق روابط (۴-۵) و (۴-۶) به سادگی به دست می‌آیند (Archer and Rasouli, 2012; Fjaer et al, 2008). در شکل (۴-۳)، تغییرات پارامترهای الاستیک نسبت به عمق را نشان می‌دهد.

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

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



شکل ۴-۳: تغییرات پارامترهای الاستیک سازند نسبت به عمق

۴-۳-۳ تخمین مقاومت سازند

مقاومت فشاری به توانایی سنگ برای تحمل تنش‌های اطراف چاه می‌گویند. محاسبه UCS با استفاده از روابط تجربی متعددی انجام شده است. روابط رایج برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره در سازندهای کربناته در جدول (۴-۱) ارائه شده است. هر کدام از این روابط برای سنگ‌هایی مخصوص و در شرایط مشخص به دست آمده‌اند. با توجه به جنس سازند (کربناته)، وجود لایه‌های شیل در این مخزن و کارایی بهتر این رابطه در حوضه سازندهای کربناته جنوب غرب ایران، از رابطه (۴-۸) برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده می‌شود.

جدول ۴-۱: روابط ارائه شده برای محاسبه UCS در سازندهای کربناته

شماره رابطه	رابطه	حوضه کاربرد	مرجع
۷-۴	$UCS = \left(\frac{7682}{\Delta t_c}\right)^{1.82} / 145$	سنگ‌های کربناته	Militzer and Stoll, 1973
۸-۴	$UCS = 2.28 + 4.1089E_{sta}$	سنگ‌های کربناته دارای ورقه‌های شیلی	Afsari et al, 2009
۹-۴	$UCS = 13.8E_{dyn}^{0.51}$	سنگ آهک ($300 > UCS > 10$)	Zoback, 2010

مقاومت کششی مبنی بر تحقیقات انجام شده، ۰/۱ تا ۰/۰۸ مقاومت فشاری تک‌محوره است (Militzer, 1973; Akbar et al, 2005; Holland et al, 2010; Fernández-Ibáñez et al, 2010; Archer and Rasouli, 2012; Qiu et al 2013).

۴-۳-۴ تخمین پارامترهای پلاستیکی سازند

زاویه اصطکاک داخلی سنگ با پارامترهای فیزیکی سنگ ارتباط دارد. این پارامتر از ساختارهای مکانیک سنگی مانند صلبیت سنگ که به میزان زیادی به تخلخل و نوع سیمان سنگ بستگی دارد، تأثیر می‌پذیرد. روابط تجربی محدودی در راستای تخمین این پارامتر ارائه شده است (Khaksar et al,)

بر اساس تخلخل و حجم شیل رابطه (۴-۱۰) برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی و رابطه (۴-۱۱) برای تخمین چسبندگی سنگ ارائه شده است (Gholami et al, 2009; Archer and Rasouli, 2012; Plumb, 1994; Jaeger et al, 2009).

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (10-4)$$

$$C = \frac{UCS}{2 \tan \theta} \quad (11-4)$$

در اینجا، φ زاویه اصطکاک، C چسبندگی، $NPHI$ تخلخل نوترون، UCS مقاومت فشاری تک محوره و V_{shale} حجم شیل است. حجم شیل و زاویه θ طبق روابط (۴-۱۲) و (۴-۱۳) تخمین زده می‌شوند (Asquith et al, 2004; Jaeger et al, 2009).

$$V_{shale} = \frac{Gr - Gr_{min}}{Gr_{max} - Gr_{min}} \quad (12-4)$$

$$\theta = 45 + \frac{\varphi}{2} \quad (13-4)$$

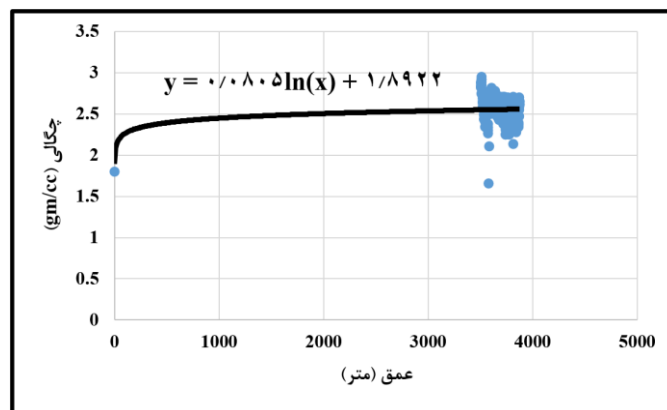
در این روابط Gr نگار گاما گرفته شده از چاه موردنظر و Gr_{min} و Gr_{max} به ترتیب قرائت نگار پرتو گاما در ناحیه بدون شیل و شیل دار هستند (رحمانی، ۱۳۸۹).

۴-۳-۵ تخمین تنش قائم

با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی، می‌توان تنش‌های برجا و جهت آن‌ها را تعیین کرد. این تنش‌های اصلی شامل تنش قائم (σ_v)، تنش افقی حداقل (σ_h) و تنش افقی حداکثر (σ_H) می‌باشند. معمولاً دو نوع شکست در دیواره چاه اتفاق می‌افتد که تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنش قائم با استفاده از انتگرال چگالی سازند، مطابق رابطه (۴-۱۴) به دست می‌آید. برای محاسبه این پارامتر به نگار چگالی سنگ نیاز است. در رابطه زیر ρ چگالی و g شتاب گرانش است. طبق این رابطه تنش قائم به شدت به چگالی سنگ وابسته است و رابطه مستقیم دارد (Zang and Stephansson, 2010).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \quad (14-4)$$

اصولاً نگار چگالی در داخل مخزن رانده می‌شود و از سطح زمین تا مخزن داده‌ای برداشت نمی‌شود. از این رو باید مقادیر چگالی سنگ از زمین تا مخزن تخمین زده شود. برای این منظور بهتر است از تخمین‌نمایی استفاده شود (Archer & Rasouli 2012). بنابراین در چاه موردنظر نموداری مطابق شکل (۴-۴) رسم شده است. در این نمودار چگالی در سطح زمین برابر با چگالی متوسط خاک منطقه، ۱٫۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده و تابعی نمایی بر آن برازش شده است. در عمق‌هایی از چاه چگالی بالک کاهش یافته و با توجه به اینکه جنس سازند مخزن آهکی (عمدتاً دولومیت) است، می‌توان گفت که در این نقاط تخلخل افزایش یافته و در نتیجه فشار منفذی نیز بیشتر شده است.



شکل ۴-۴: تخمین چگالی سازند از سطح زمین تا مخزن

با توجه به رابطه به دست آمده از تخمین چگالی و رابطه (۱۴-۴) ابتدا مقدار تنش قائم در اولین نقطه مخزن به دست می‌آید. پس از آن تنش در هر نقطه مخزن که نگار چگالی در آن موجود است، طبق رابطه (۱۵-۴) محاسبه شده و با نقطه قبلی خود جمع می‌شود (Zoback, 2010).

$$\sigma_{V(n)} = \rho_n g (Z_n - Z_{n-1}) + \sigma_{V(n-1)} \quad (15-4)$$

۴-۳-۶ تخمین فشار منفذی

فشار منفذی یک پارامتر کلیدی جهت محدود کردن تنش‌های برجا در تحلیل عددی یکپارچه‌گی چاه است. برای تخمین فشار منفذی از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لایه آزمایشی ساق مته و ابزار DST

استفاده شده است. در این روش سطوح تماس گاز با نفت و نفت با آب در نقاط مختلف مشخص بوده و با استفاده از گرادیان افزایش فشارمنفدی در گاز، نفت و آب، فشار منفدی در سایر نقاط چاه تخمین زده شده است. گرادیان افزایش فشار منفدی در گاز $0,08 \frac{psi}{ft}$ ، در نفت $0,35 \frac{psi}{ft}$ و در آب $0,45 \frac{psi}{ft}$ در نظر گرفته شده است. طبق اطلاعات زمین‌شناسی، سازند آسماری در زیر سازند پر فشار گچساران واقع شده است که فشار منفذی این سازند نسبت به گچساران کاهش پیدا کرده است. فشار منفذی مینا در عمق 3350 از سطح دریا 4150 پوند بر اینچ مربع اندازه‌گیری شده است.

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه، از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مینا، فشار منفذی را می‌توان از رابطه (۴-۱۶) محاسبه کرد.

$$P_2 = P_1 + \rho g(z_2 - z_1) \quad (4-16)$$

در رابطه فوق، P_1 فشار سیال در عمق Z_1 ، P_2 فشار سیال در عمق Z_2 ، p چگالی سیال و g شتاب جاذبه زمین است (Zhang, 2011).

۴-۳-۷ تخمین مقدار تنش‌های افقی

با مطالعات انجام‌شده توسط متخصصین ژئومکانیک نفت در سراسر دنیا مشخص شده است که ایجاد شکستگی‌های کششی-القایی و یا خردشدگی‌ها در دیواره چاه فاقد ارتباط با لیتولوژی است. بدین معنی که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در هر نوع لیتولوژی بسته به شرایط تنش‌های برجا در طول مسیر چاه در حین حفاری ایجاد شوند. در میادین نفتی، محاسبه تنش‌های افقی به خصوص تنش افقی حداقل از اهمیت خاصی برخوردار است. روشی که در این تحقیق برای محاسبه تنش‌های افقی استفاده می‌شود، روش مبتنی بر تئوری پروالاستیک مطابق روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۸) است (Zoback et al, 2003; Ostadhassan et al, 2012; Thiercelin and Plumb, 1994).

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(e_x + \nu e_y) \quad (4-17)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(e_y + \nu e_x) \quad (18-4)$$

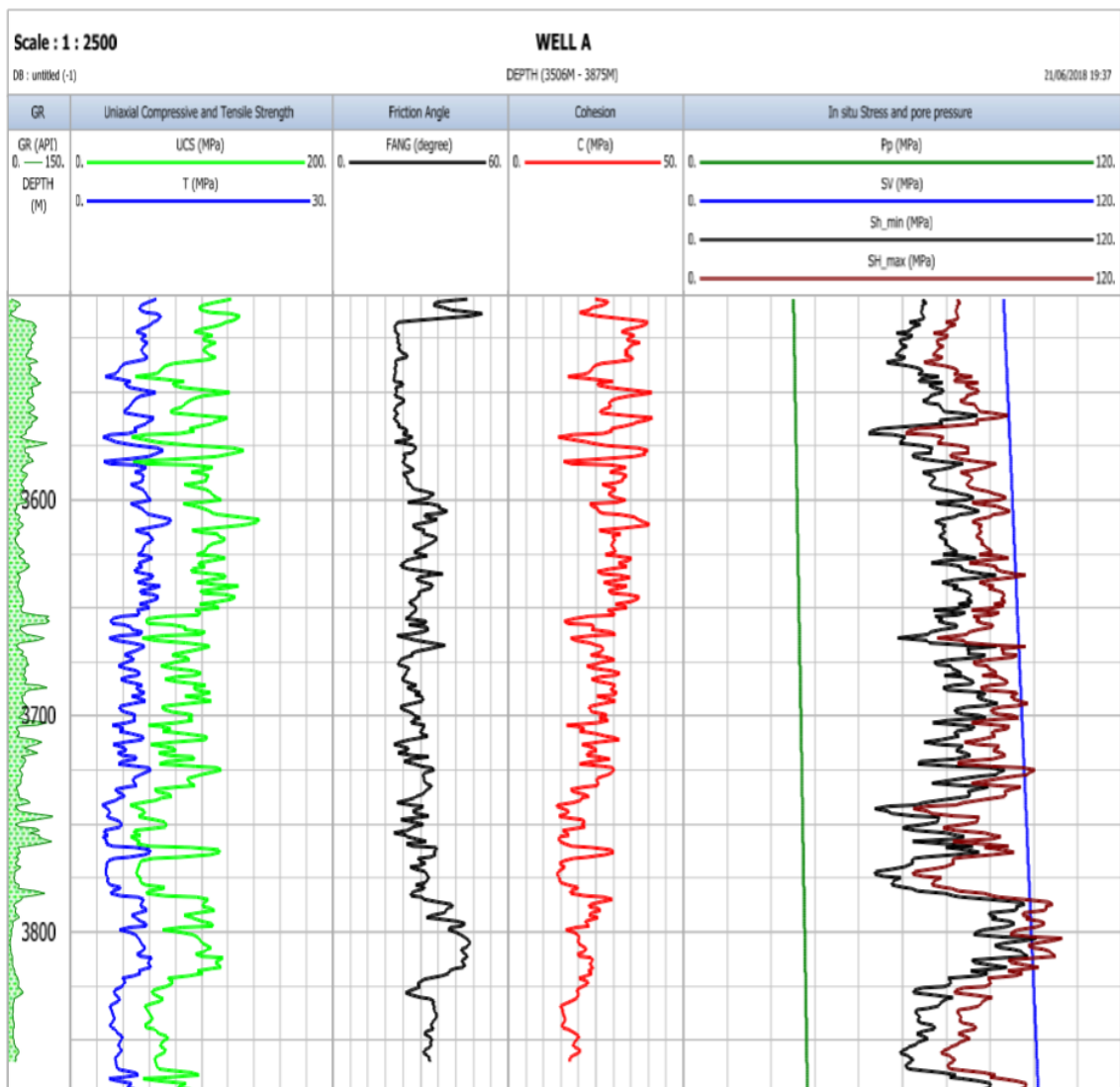
در این روابط ν ضریب پواسون، P_p فشار منفذی، α ثابت الاستیک بایوت، e_x کرنش در جهت تنش افقی حداقل، e_y کرنش در جهت تنش افقی حداکثر و E مدول یانگ می باشد.

ضریب بایوت معمولاً از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود و مقدار آن از صفر (برای سنگ‌های سخت با تخلخل صفر) تا یک (برای سنگ‌های متخلخل در حوضه‌های رسوبی کم عمق) تعیین می‌کند. در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز به دلیل سخت بودن اجرای آزمون‌ها، از انجام آنها صرف نظر شده و با توجه به متخلخل بودن سنگ‌های تشکیل دهنده مخزن، این نسبت معمولاً برابر با یک در نظر گرفته می‌شود (Richard et al, 2000). عدد یک برای ضریب بایوت بسیار محافظه کارانه است که در سازندهای کربناته این عدد معمولاً ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روابط (۴-۱۹) و (۴-۲۰) مولفه‌های کرنش‌های تکتونیکی مشخص می‌شود (Fjaer, 2009; Kidambi and Kumar, 2016; Najibi et al, 2017).

$$e_x = \frac{\sigma_v * \nu}{E} \left(\frac{1}{1-\nu} - 1 \right) \quad (19-4)$$

$$e_y = \frac{\sigma_v * \nu}{E} \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (20-4)$$

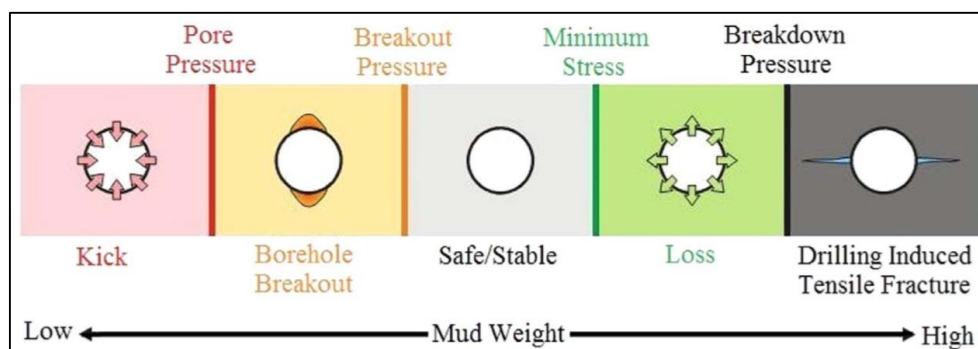
با استفاده از نرم‌افزار IP و بر اساس روابط تجربی ذکر شده، مدل ژئومکانیکی تک بعدی تهیه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. بر اساس این مدل، پارامترهای مقاومتی، پلاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا نسبت به عمق تخمین زده شده اند.



شکل ۴-۵: تغییرات پارامترهای مقاومتی، پلاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا نسبت به عمق

۴-۳-۸ معیار شکست جهت بررسی پایداری چاه

با استفاده از معیار شکست و شکستگی‌های داخل چاه، می‌توان تنش‌های تخمینی را کالیبره کرد. وظیفه معیار شکست برقراری رابطه بین مقادیر تنش‌های القایی در دیواره چاه و مقاومت سنگ در چاه است تا در نهایت شکستگی‌های رخ داده در چاه که در شکل (۴-۶) مشخص شده‌اند را پیش بینی نماید (Najibi et al, 2017). برای این منظور ابتدا نگار قطر سنجی چاه رسم می‌شود و سپس در صورت وجود نگارهای تصویری، محل شکستگی‌های برشی و کششی روی دیواره چاه مشخص شده و روی نگار قطر سنجی علامت گذاری می‌شوند.



شکل ۴-۶: طرحی از پایداری و ناپایداری چاه و وزن گل پایدار بین فشار Breakout و تنش افقی حداقل (Najibi et al, 2017)

۴-۳-۸-۱ معیار شکست موهر-کولمب

یکی از ساده‌ترین معیارهای شکست و در عین حال موثر برای تخمین مقاومت برشی سازند، معیار موهر-کولمب است. طبق این معیار، پارامترهایی مانند تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقاومت برشی سازند موثر هستند. این معیار به صورت زیر ارائه شده است. جدول (۴-۲) فشار بهینه گل وابسته به پدیده Breakout (P_{WB}) طبق معیار شکست موهر - کولمب را نشان می‌دهد (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006). تئوری موهر کولمب برای شکست چاه مطابق رابطه (۴-۲۱) تعریف می‌شود (Jager et al, 2009).

$$\sigma_1 - P_p = UCS + q(\sigma_3 - P_p) \quad (4-21)$$

در اینجا، P_p فشار منفذی است و q به صورت رابطه (۴-۲۲) تعریف می‌شود.

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4-22)$$

جدول ۴-۲: فشار بهینه گل با استفاده از معیار موهر - کولمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

$\sigma_r = P_w$ $\sigma_\theta = A - P_w$ $\sigma_z = B$ $A = 3\sigma_H - \sigma_h$ $B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$	فشار بهینه گل وابسته به شکست	حالت تنش‌های اصلی	حالت
	Breakout	$(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$	
	$P_{WB1} = \frac{B - UCS}{q}$	$(\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r)$	۱
	$P_{WB2} = \frac{A - UCS}{1+q}$	$(\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r)$	۲
	$P_{WB2} = A - UCS - qB$	$(\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z)$	۳

در جدول (۲-۴) تنش شعاعی، σ_r تنش مماسی، σ_θ تنش محوری، P_w فشار گل، σ_H تنش افقی حداکثر، σ_h تنش افقی حداقل، ν ضریب پواسون، σ_v تنش قائم و UCS مقاومت فشاری تک محوره است (Ajmi and Zimmerman, 2006).

۲-۸-۳-۴ معیار شکست موگی کولمب

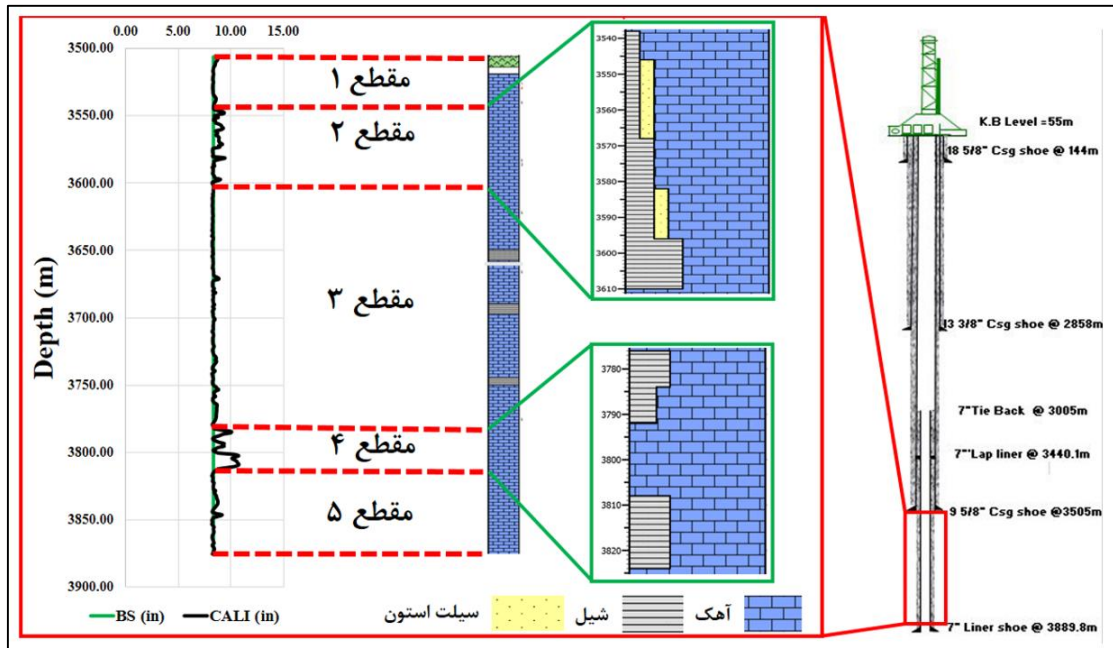
معیار شکست موگی - کولمب به دلیل در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط، مقادیر فشار گل بیشتری را برای پایداری چاه در زوایای انحراف مختلف پیشنهاد می‌کند.

جدول ۳-۴: فشار بهینه گل با استفاده از معیار موگی - کولمب (Ajmi and Zimmerman, 2006)

فشار بهینه گل وابسته به شکست Breakout	حالت تنش‌های اصلی ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)	حالت
$P_{WB1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$	($\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$)	۱
$P_{WB2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a'+b'(A-2P_p)]^2 - 3(A-2B)^2}$	($\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$)	۲
$P_{WB1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right]$	($\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$)	۳
$H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12); G = K + b'A; a' = 2C \cos \varphi; b' = \sin \varphi$		

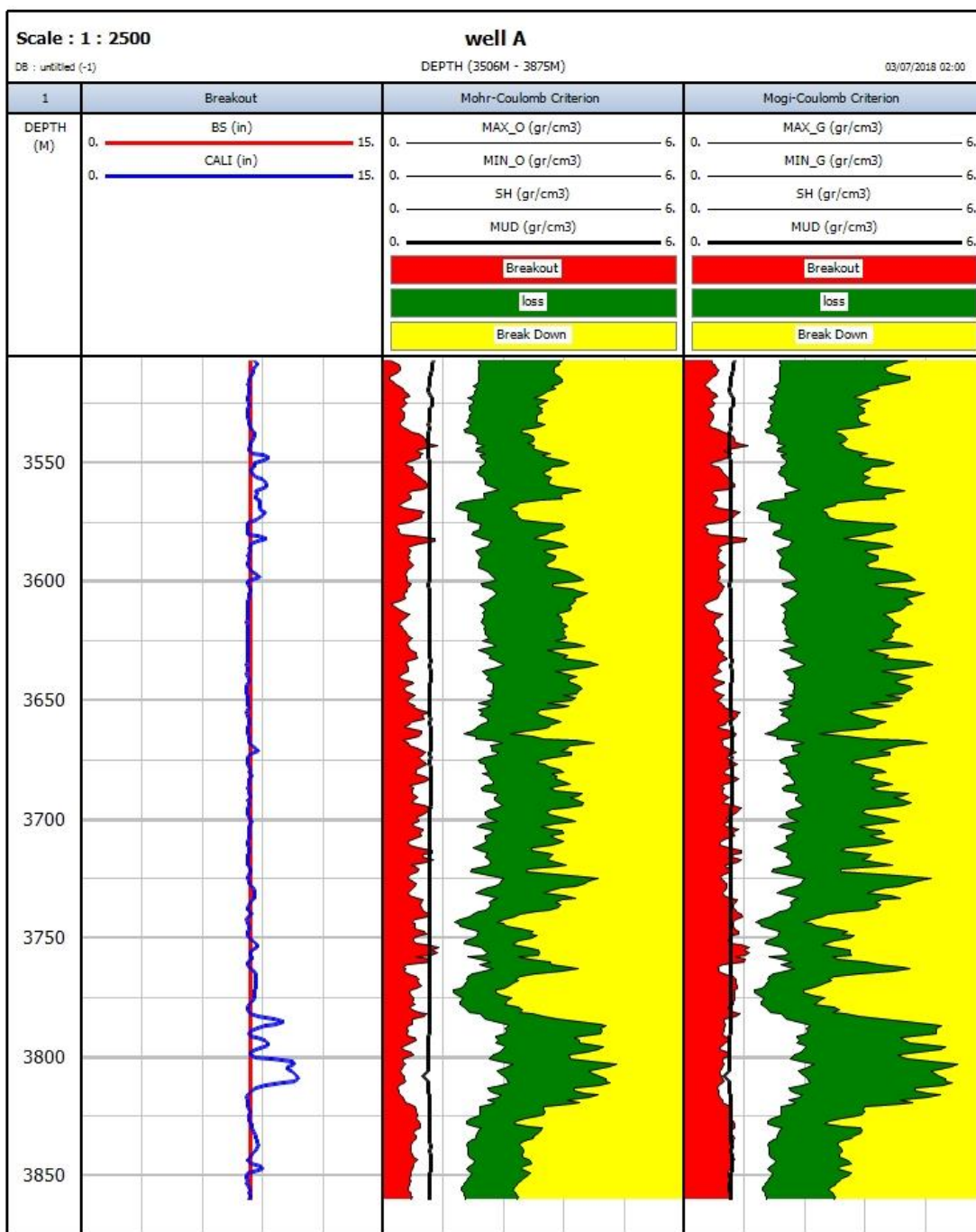
۹-۳-۴ تفسیر مدل ژئومکانیکی و اعتبار سنجی مدل

مطابق نمودار کالیپر و قطر سرمرته حفاری که در شکل (۷-۴) مشاهده می‌شود، می‌توان عمق مخزن را به ۵ مقطع تفکیک کرد. در مقطع‌های (۲ و ۴)، طبق اطلاعات مربوط به کالیپر، افزایش قطر اتفاق افتاده است و طبق گزارش حفاری در این مقاطع، سنگ شناسی از نوع آهک شیلی است. اما برای صحت سنجی ریزش و شکستگی‌های انجام شده در چاه نیاز به نگار کالیپر چندبازویی و نگارهای تصویری است. در مقطع‌های (۱، ۳ و ۵)، تغییر قطر چاه ناچیز است. در مقطع ۳ در سه عمق مختلف وجود لایه شیل مشاهده می‌شود که به دلیل بیشتر بودن شیل نسبت به آهک، این لایه‌ها شیل آهکی نام گرفته‌اند.



شکل ۴-۷: پروفیل چاه مورد مطالعه، سنگ شناسی مخزن و نمودار کالیپر نسبت به عمق

طبق گزارش حفاری و شکل (۴-۷)، در عمق ۳۷۸۰ تا ۳۸۲۵، شیل وجود دارد. همچنین در این عمق افت فشار گل نیز رخ داده است. بنابراین احتمال وجود شکستگی در این ناحیه و در پی آن هرزروی گل وجود دارد. هرزروی گل می‌تواند سبب انتقال ذرات ریز گل به درون منافذ سازند و کاهش نفوذپذیری ناحیه‌ای اطراف چاه شود. افت فشار تا جایی که فضای خالی شکستگی پر شود ادامه یافته و دوباره به حالت اولیه بر می‌گردد. پس از نفوذ گل درون شکستگی و نرم بودن لایه مورد نظر، احتمال پدیده انحلال و شکستگی سازند بالا بوده که در پی آن افزایش قطر اتفاق افتاده است. در عمق ۳۵۵۰ تا ۳۵۸۰ طبق معیارهای شکست موهر - کولمب و موگی - کولمب، همانطور که در شکل (۴-۸) نشان داده شده است، فشار حداقل گل حفاری بیشتر از فشار گل شده که باعث ایجاد شکست برشی عریض و یا پدیده (Breackout) می‌شود که باعث افزایش قطر چاه شده است. بنابراین این دو محدوده (مقاطع ۲ و ۴) به عنوان مقاطع بحرانی برای چاه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۸) رنگ زرد بیانگر ایجاد شکستگی‌های کششی، محدوده سبز رنگ، از دست رفتن گل حفاری، رنگ قرمز پدیده Breackout و در نهایت رنگ سفید پنجره ایمن گل حفاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری طبق دو معیار شکست در چاه مورد مطالعه

۴-۴ تعیین پارامترهای مکانیکی سیمان

سیمان روی سطح زمین به حالت مایع تهیه می شود. جریان دوغاب سیمان و حرکت آن درون چاه، تابع خواص رئولوژی آن است. فضای بین لوله جداري و سازند از دوغاب سیمان پر شده و این دوغاب به

تدریج شروع به سخت شدن می‌کند. به دلیل پیچیدگی این فرآیند، باید مشخصات سیمان به طور بهینه طراحی و با دقت زیاد تعیین شود. این مشخصات شامل افزایه‌ها، نسبت آب به سیمان و خواص رئولوژی است. پس از اینکه دوغاب به پایین چاه پمپ شد، فرآیند هیدراسیون در سیمان انجام می‌شود که باعث تغییر در خواص و ساختار آن می‌شود. طبق روش‌هایی که در فصل دوم به آنها اشاره شد، میزان چسبندگی سیمان به سازند و لوله‌جداری قابل تشخیص است. در طول عمر یک چاه، غلاف سیمان تحت تاثیر انواع مختلف نیروها از جمله تنش‌های مکانیکی، دوره گرم و سرد شدن، ارتعاشات و هجوم سیالات سازند قرار می‌گیرد. برای مشخص شدن پاسخ سیمان نسبت به بارهای مکانیکی و تغییر شکل‌ها باید پارامترهای الاستیک و مقاومتی سیمان شناخته شوند. بنابراین محاسبه دقیق پارامترهای مکانیکی سیمان در آزمایشگاه برای ساخت مدل‌های عددی امری ضروری است. در این بخش از تحقیق، آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی انجام می‌شود. هدف از انجام این آزمایش‌ها، تعیین ویژگی‌های مکانیکی سیمان است که در فصل بعد در تحلیل المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش‌های تک محوره و سه محوره بر روی نمونه‌های مختلف سیمان مورد استفاده در عمق مخزن چاه مورد مطالعه در این تحقیق واقع در میدان مارون انجام می‌شود. لازم به ذکر است که این آزمایش‌ها با قابلیت کنترل کرنش طراحی شده است.

همانطور که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است، نمونه‌های مکعبی سیمان با ابعاد ۵ سانتی‌متر به همراه سیمان نوع (G) و افزاینده‌های ضد مهاجرت گاز^۱، کنترل کننده استحکام سیمان در دماهای بالا^۲، کنترل کننده عصاره دوغاب در دماهای بالا^۳، کند کننده زمان بندش سیمان در دماهای بالا^۴ و کاهنده اصطکاک درونی و پایین آورنده گرانش دوغاب^۵ توسط شرکت مناطق نفت خیز جنوب دریافت شده است. با توجه به هدف تحقیق و تعیین پارامترهای مکانیکی سیمان، ابتدا از نمونه‌های مکعبی مغزه‌هایی

^۱ Anti Gas Migration

^۲ Silica Flour

^۳ Fluid Loss Controller (FLC)

^۴ High Temperature Retarder (HTR)

^۵ Dispersant

به قطر ۳۸ میلیمتر گرفته شد. به دلیل کم بودن نسبت طول به قطر نمونه‌ها و محدود بودن نمونه‌های سیمان و افزایشده، نیاز شد تا نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلیمتر در آزمایشگاه ساخته شود. با توجه به میدان مورد مطالعه و پیشنهاد شرکت مناطق نفت خیز جنوب برای در نظر گرفتن درصد اختلاط دوغاب سیمان مورد استفاده در چاه مورد نظر، از فرمولاسیون زیر جهت ساخت نمونه‌های سیمان استفاده شده است.



شکل ۴-۹: نمونه‌های مکعبی آماده سیمان و افزایشده FLC

۴-۱-۴ فرمولاسیون سیمان و تهیه نمونه‌ها

خواص مهم دوغاب سیمان شامل کنترل خواص رئولوژیکی، کنترل هرزروی عصاره سیمان، زمان نیم بندش و استحکام تراکمی سنگ سیمان با وجود پیچیدگی و محدودیت های دما و فشار سازندی میدان، متناسب با شرایط چاه طراحی می‌شود. سیمان پرتلند عمدتاً ترکیبی از سیلیکات تری کلسیم (C_3S) و سیلیکات دی کلسیم (C_2S) است. افزودن آب (در این تحقیق از آب آشامیدنی شهرستان تهران استفاده شده است) به سیمان، باعث ایجاد دوغاب ژله‌ای سیلیکات هیدرات کلسیم ($C-S-H$) می‌شود که پایداری و مقاومت سیمان را تضمین می‌کند.

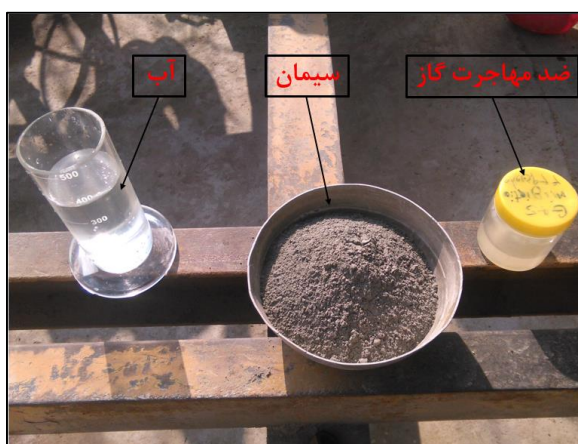
فرمولاسیون دوغاب سیمان نوع G استفاده شده در چاه نفت مورد مطالعه، در جدول (۴-۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است، افزایشده ضد مهاجرت گاز^۱، جهت

^۱ Anti Gas Migration

ساخت دوغاب سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان مخلوط کردن دوغاب، ۳۰ ثانیه و وزن دوغاب ۱۱۵ پوند بر فوت مکعب یا ۱۸۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب است.

جدول ۴-۴: طرح اختلاط سیمان جهت ساخت دوغاب

Anti Gas Migration (gr)	Fresh Water (ml)	Cement G (gr)
۱۰۷	۳۷۷	۱۰۰۰



شکل ۴-۱۰: مواد مصرفی در ساخت دوغاب سیمان

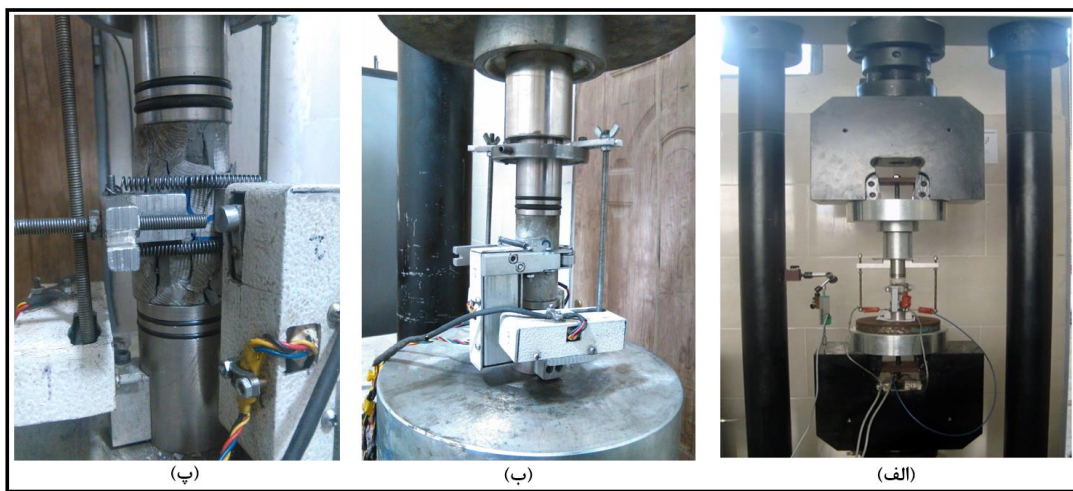
در مرحله بعد، دوغاب در قالب‌هایی با قطر ۳۸ و ارتفاع ۸۰ میلیمتر ریخته می‌شود و پس از آنکه ۲۴ ساعت از ساخت آن گذشت (۲ میلیمتر نشست دارد)، به مدت ۲۸ روز در ظرفی پر از آب قرار داده می‌شود. شکل (۴-۱۱: الف)، نمونه‌های ساخته شده در مرحله اول و قسمت (ب)، نمونه‌های سیمان پس از ۲۸ روز را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱: نمونه‌های سیمان قبل از گیرش (الف) و بعد از ۲۸ روز (ب) درون قالب

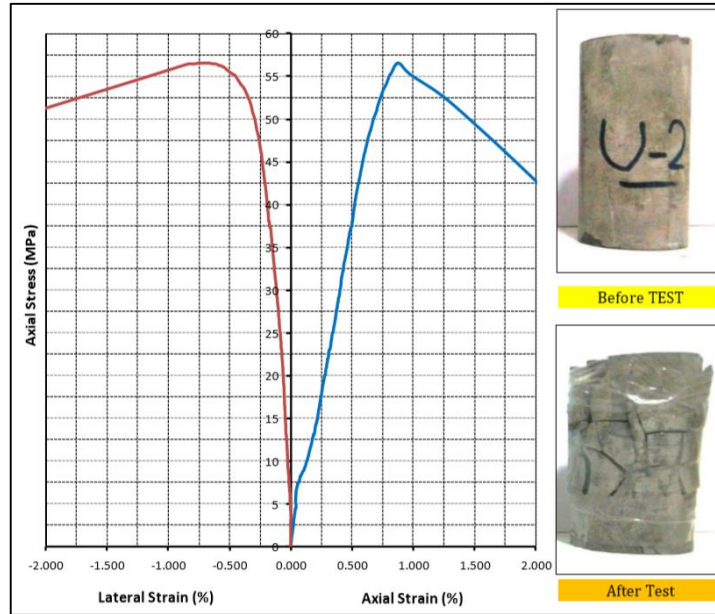
۴-۲ آزمایش تک محوره بر روی نمونه‌های سیمان

آزمایش تک محوره به منظور ترسیم منحنی‌های تنش - کرنش، تعیین مدول یانگ، نسبت پواسون و مقاومت فشاری تک محوری نمونه سیمان به کار می‌رود. آزمایش مورد نظر به طور عمده با هدف طبقه بندی و تعیین مشخصه‌های رفتاری نمونه سیمان انجام می‌شود. شکل (۴-۱۲: الف) دستگاه اعمال نیرو به نمونه، قسمت (ب)، نمونه سیمان زیر دستگاه اعمال بار و قسمت (پ) نمونه سیمان بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.

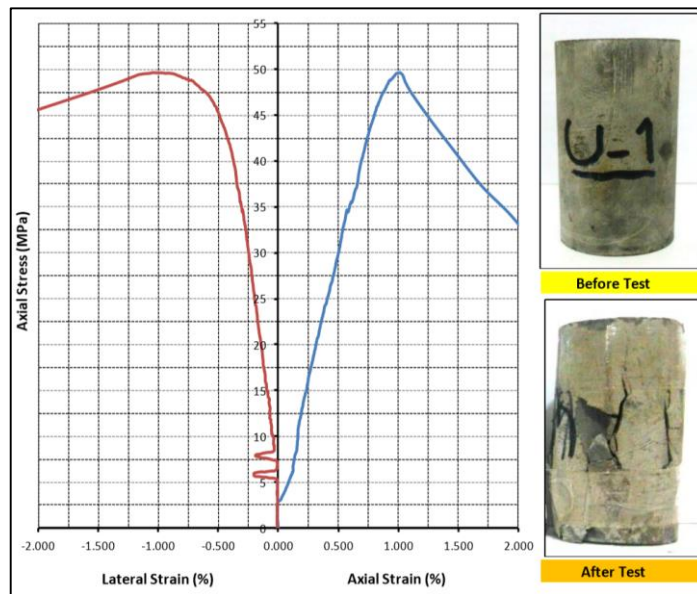


شکل ۴-۱۲: نمایی از دستگاه و نمونه‌های سیمان در آزمایش تک محوری

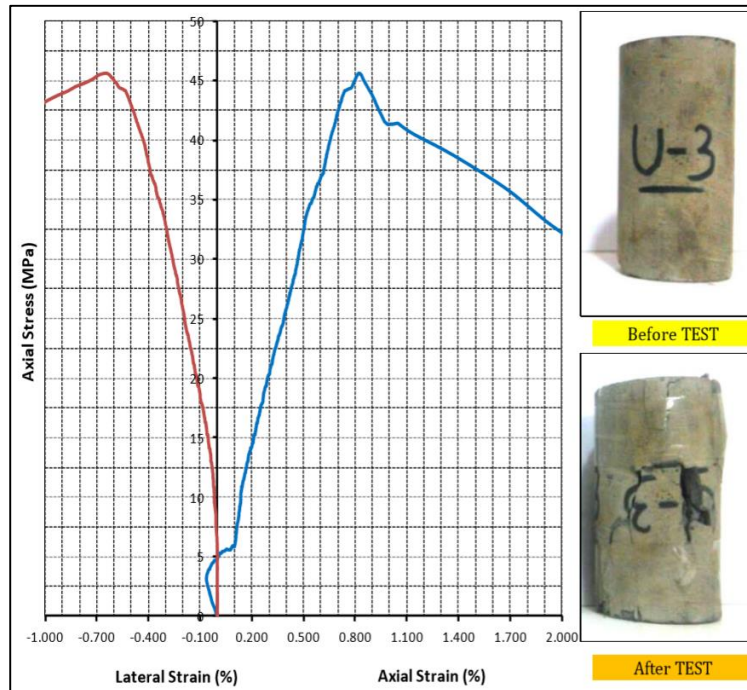
ارتفاع و قطر نمونه‌ها به ترتیب ۷۶ و ۳۸ میلیمتر و نسبت طول به قطر آنها ۲ است که این ابعاد مطابق استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ طراحی شده است. شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۵)، نمودار تنش محوری نسبت به کرنش‌های محوری و جانبی نمونه‌های سیمان را نشان می‌دهد. از این نمودارها جهت محاسبه مدول یانگ و ضریب پواسون استفاده شده است.



شکل ۴-۱۳: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U_2) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره



شکل ۴-۱۴: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U_1) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره



شکل ۴-۱۵: نمودار تنش - کرنش و تصویر نمونه (U₃) قبل و بعد از شکستگی در آزمایش تک محوره

مشخصات هندسی و نتایج آزمایش تک محوری شامل مقاومت فشاری تک محوره، مدول الاستیک، نسبت پواسون و نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌های سیمان در جدول (۴-۵) نشان داده شده است. برای استفاده از پارامترهای الاستیک سیمان (مدول الاستیک و نسبت پواسون) در مدل‌سازی عددی، از میانگین مقادیر نمونه‌ها استفاده می‌شود.

جدول ۴-۵: مشخصات هندسی و نتایج آزمایش تک محوره

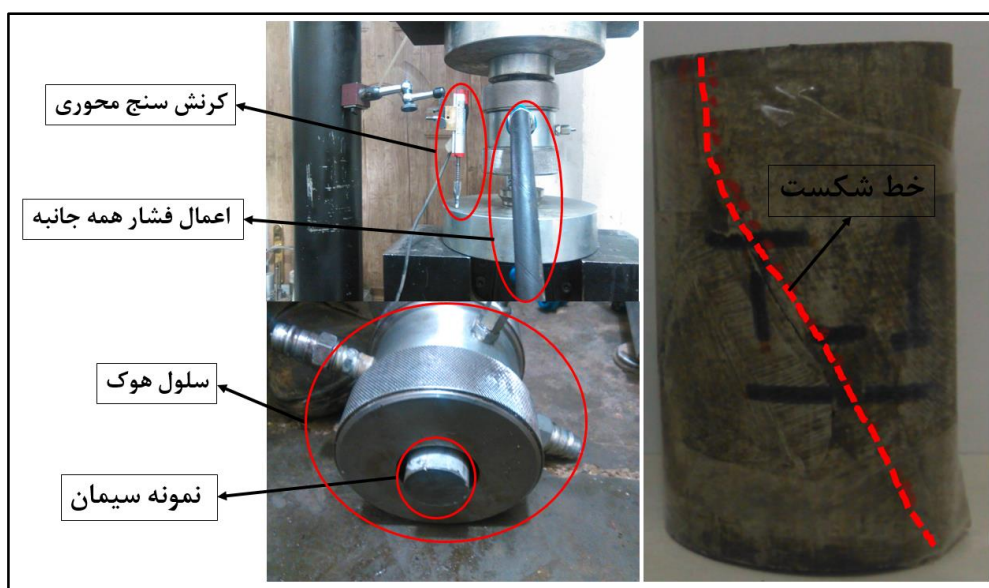
نسبت پواسون	مدول الاستیک (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	قطر/ارتفاع	ارتفاع (mm)	قطر (mm)	شماره نمونه
۰/۳۱	۶/۲۸	۴۹/۶۴	۲	۷۶	۳۸	U ₁
۰/۲۹	۷/۷۱	۵۶/۵۶	۲	۷۶	۳۸	U ₂
۰/۳	۶/۴۶	۴۵/۶۱	۲	۷۶	۳۸	U ₃
۰/۳	۶/۸	۵۰/۶	۲	۷۶	۳۸	میانگین

۴-۳ آزمایش سه محوره برای نمونه‌های سیمان

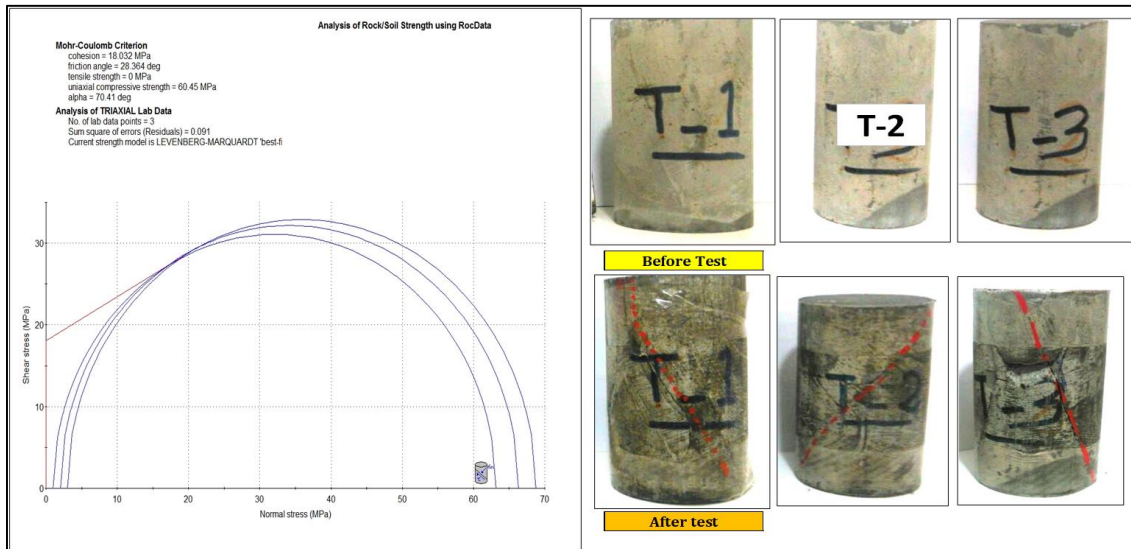
با کمک آزمایش سه محوره، امکان تعیین خصوصیات نسبتاً واقعی نمونه سیمان وجود دارد. با قرار دادن نمونه‌های ۳۸ میلی‌متری در دستگاه، بارگذاری محوری انجام می‌شود. دستگاه آزمایش سه محوره

به تخمین نحوه عکس العمل سیمان مورد نظر نسبت به تغییرات بارگذاری، تنش، جابجایی‌ها، شکست و سایر وضعیت‌ها کمک می‌نماید. متداول‌ترین روش اعمال تنش سه محوری در آزمایشگاه به نمونه سیمان، استفاده از سلول هوک می‌باشد که در آن ضمن اعمال یک فشار جانبی هیدرولیکی، نمونه تحت تنش قائم قرار می‌گیرد. با انجام این آزمایش تحت مقادیر مختلف تنش جانبی، پوش گسیختگی سیمان ترسیم و بر اساس آن پارامترهای مقاومتی (نظیر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) تعیین می‌گردد.

برای انجام آزمایش، دیسک انتهایی، غلاف، محفظه سه‌محوری و ابزارهای اندازه‌گیری فشار و جابجایی جاگذاری می‌شوند. لوله‌های هیدرولیکی متصل شده و سلول هوک سه محوره با روغن پر می‌شود و پس از هواگیری، دریچه هوا بسته می‌شود. محفظه سه محوری در دستگاه بارگذاری قرار داده می‌شود و در انتها فشار جانبی مورد نظر نیز اعمال می‌شود. فشار محوری به طور معمول همزمان با افزایش فشار جانبی افزایش می‌یابد تا جایی که فشار جانبی به اندازه از پیش تعیین شده برسد. شکل (۴-۱۶) قسمت‌های مختلف آزمایش سه محوری و نمونه سیمان بعد از آزمایش را نشان می‌دهد. سه نمونه سیمان تحت آزمایش سه محوره قرار گرفت که پوش موهر هر سه آزمایش (توسط نرم‌افزار RocData تحلیل شده است). به همراه نمونه‌های سیمان بعد از آزمایش در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶: نمونه سیمان بعد از آزمایش و قطعات مختلف آزمایش سه محوری



شکل ۴-۱۷: پوش موهر شکست در آزمایش سه محوری و نمونه‌های سیمان بعد از آزمایش

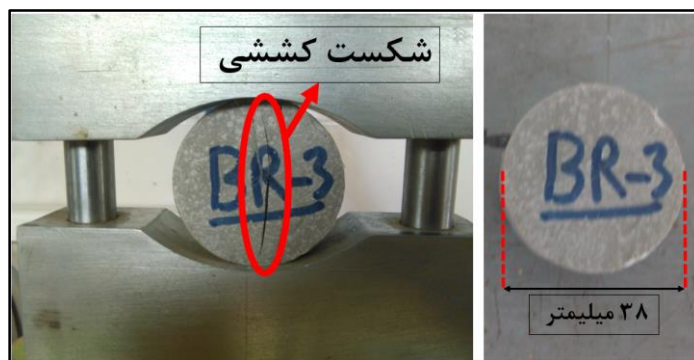
این آزمایش با نیروی همه‌جانبه ۱، ۲ و ۳ مگاپاسکال صورت گرفته که با افزایش این نیروها، مقاومت سیمان نیز افزایش یافته است. نتایج آزمایش سه محوره شامل مقاومت فشاری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سیمان در جدول (۴-۶) نشان داده شده است.

جدول ۴-۶: مشخصات هندسی و نتایج آزمایش سه محوره

شماره نمونه	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	قطر/ارتفاع	مقاومت فشاری (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
T ₁	۳۸	۷۶	۲	۶۳/۱	۱۸	۲۸
T ₂	۳۸	۷۶	۲	۶۶/۳		
T ₃	۳۸	۷۶	۲	۶۸/۸		

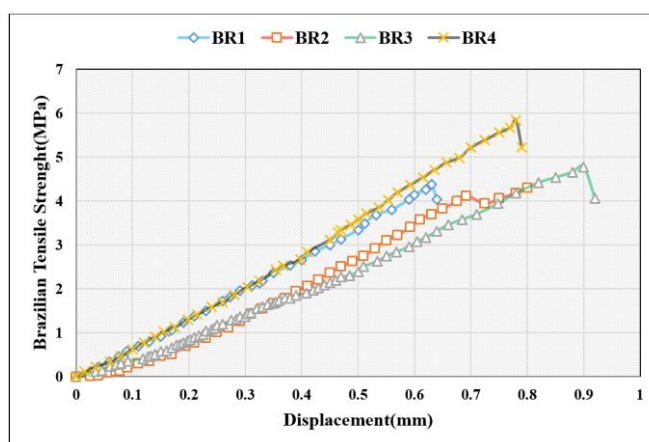
۴-۴-۴ آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های سیمان

از آنجایی که اندازه‌گیری مقاومت کششی سیمان به طور مستقیم مشکل است، لذا برای برآورد آن از دستگاه برزیلی استفاده می‌شود. در این آزمایش نمونه‌های سیمان با قطر ۳۸ و ارتفاع ۲۰ میلیمتر تهیه می‌شود و مطابق شکل (۴-۱۸) بین دو فک به صورت قطری قرار داده می‌شود. نمونه با ایجاد یک ترک کششی گسیخته می‌شود.



شکل ۴-۱۸: هندسه، ابعاد و خط شکست کششی نمونه سیمان تحت آزمایش برزیلی

چهار نمونه تحت آزمایش برزیلی قرار گرفته است که نمودار کرنش نسبت به مقاومت کششی (پس از تبدیل میزان بارگذاری به مقاومت کششی) در شکل (۴-۱۹) مشاهده می‌شود. با اعمال نیرو کرنش‌ها افزایش می‌یابند تا در مقاومت کششی حداکثر به گسیختگی برسند. با میانگین‌گیری از نمودارهای زیر، مقاومت کششی سیمان ۴/۴ مگاپاسکال به دست می‌آید. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌ها، ۰/۰۸۷ است.

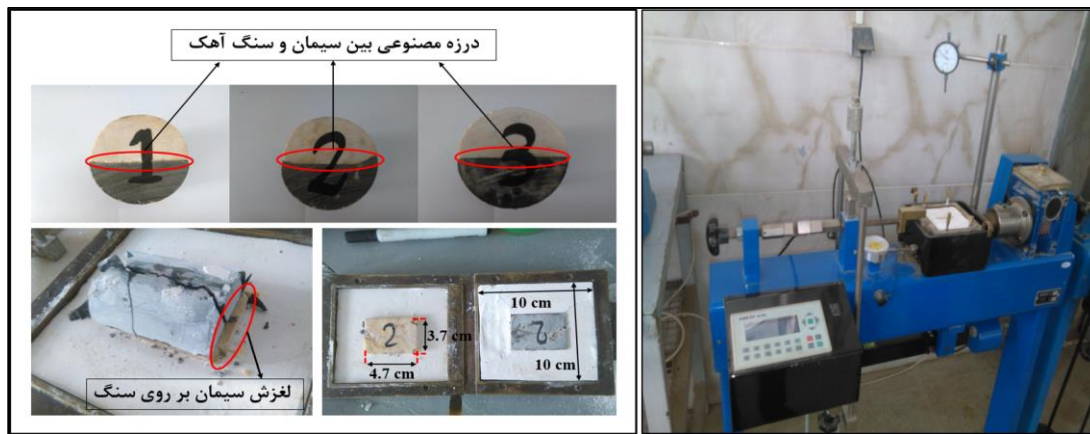


شکل ۴-۱۹: نمودار گسیختگی کششی در آزمایش برزیلی

۴-۴-۵ آزمایش برش مستقیم بر روی درزه مصنوعی

مقاومت برشی در سطح ضعیف بین سیمان و سنگ، یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در مهندسی ژئومکانیک است. این مقاومت از دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تشکیل شده است که هرکدام از این دو نیز به عوامل دیگری وابسته‌اند. در این آزمایش مقاومت برشی نمونه در امتداد درزه

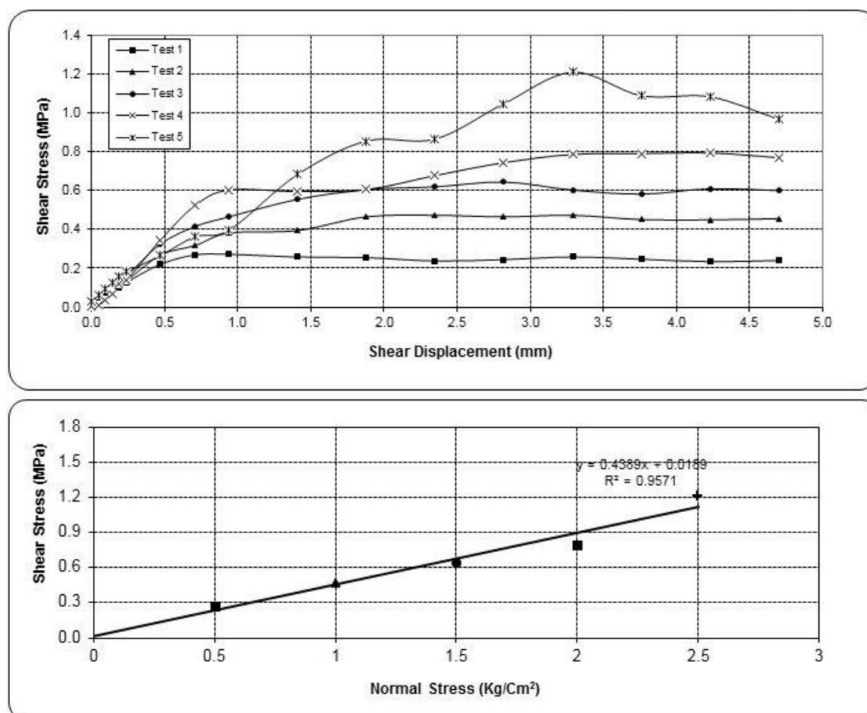
مصنوعی بین سیمان و سنگ اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۲۰) مشاهده می‌شود، نمونه سنگ و سیمان در قالب‌های گچ تثبیت‌شده، سپس بین دو فک (که یکی ثابت (سنگ) و دیگری متحرک (سیمان) است) قرار می‌گیرد و در حالی که تحت اثر نیروی قائم قرار دارد، توسط نیروی افقی تحت برش قرار می‌گیرد. در انتهای انجام آزمایش، نیروهای قائم، برشی و همچنین جابجایی قائم و برشی اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۴-۲۰: دستگاه برش، هندسه، ابعاد نمونه‌ها و مراحل آزمایش برش مستقیم رروی درزه مصنوعی سه نمونه سیمان - سنگ که در شکل (۴-۲۰) مشخص شده‌اند، تحت ۵ آزمایش برش قرار می‌گیرند. تنش‌های نرمال و نتایج مربوط به تنش برشی حداکثر در جدول (۴-۷) مشخص است. آزمایش برش مستقیم روی درزه مصنوعی بین سیمان و سنگ آهک انجام شد که نمودار تنش برشی بر حسب کرنش و همچنین رگرسیون خطی بین تنش‌های برشی حداکثر و تنش نرمال در شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود. پس از تحلیل نتایج مقدار میانگین تنش برشی $0/68$ مگاپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی 24 درجه و مقدار چسبندگی 200 کیلوپاسکال محاسبه شد.

جدول ۴-۷: تنش‌های نرمال، برشی و کرنش‌های برشی در آزمایش برش مستقیم بر روی درزه مصنوعی

آزمایش	تنش نرمال (MPa)	جابجایی برشی هنگام شکست (mm)	تنش برشی هنگام شکست (MPa)
۱	۰/۵	۰/۹۴	۰/۲۷
۲	۱	۲/۳۵	۰/۴۷
۳	۱/۵	۲/۸۲	۰/۶۴
۴	۲	۴/۲۳	۰/۷۹
۵	۲/۵	۳/۲۹	۱/۲۱



شکل ۴-۲۱: نمودار تنش بر حسب کرنش و رگرسیون خطی بین تنش‌های نرمال و برشی در آزمایش برش مستقیم

۴-۵ جمع بندی

میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین مخازن کربناته در جهان است. اغلب مطالعات ژئومکانیکی بر پایه آزمایشات مکانیکی سنگ و نگارهای چاه پیمایی استوار است. با توجه به محدودیت‌های موجود در صنعت نفت در امر دسترسی به مغزه، در این تحقیق از نگارهای چاه پیمایی جهت برآورد پارامترهای ژئومکانیکی از جمله پارامترهای مکانیکی سنگ، فشار منفذی و همچنین تخمین تنشهای منطقه استفاده شده است. سپس با قرار دادن نگارهای صوتی در کنار نگارهای تخلخل، چگالی و گاما پارامترهای الاستیک، مقاومت و پلاستیک سنگ براساس روابط تجربی مناسب منطقه میدان مورد نظر برآورد شد. برای مشخص شدن پاسخ سیمان نسبت به بارهای مکانیکی و تغییر شکل‌ها بیشتر پارامترهای الاستیک و مقاومتی سیمان درگیر هستند. بنابراین محاسبه پارامترهای مکانیکی سیمان در آزمایشگاه برای اعتبار سنجی تحلیل‌های عددی امری ضروری است. آزمایش‌های تک محوره، سه‌محوره و برزیلی برای محاسبه پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه

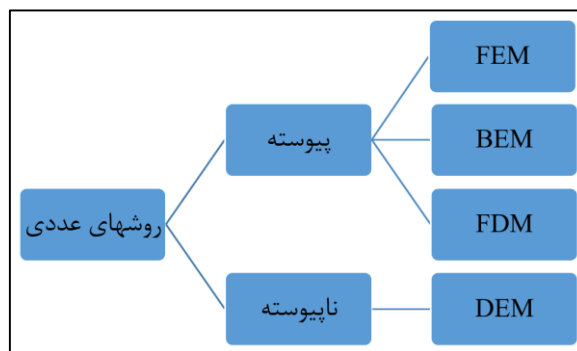
اصطکاک و مقاومت کششی سیمان انجام شد. همچنین آزمایش برش بر روی درزه مصنوعی بین سیمان و سنگ نیز انجام شد که پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت برشی سطح تماس بین سیمان و سازند (سنگ آهک) تعیین شد.

فصل پنجم:

مدلسازی عددی یکپارچگی چاه مورد نظر

۵-۱ مقدمه

از آنجایی که بیشتر سازه‌های زیرزمینی شکل منظم و ساده‌ای ندارند و از طرفی به علت وجود شرایط پیچیده تنش‌های برجا و تاثیر توأمان سیال و سازند، تعیین تنش‌ها، جابجایی‌ها و گسیختگی‌ها در توده سنگ، غلاف سیمان و لوله‌جداری با محدودیت‌های جدی مواجه است. لذا از چند دهه گذشته روش‌های عددی برای حل این مشکل جایگزین روش‌های ریاضی شده است. در یک نگاه کلی این مدل‌ها باهدف ارزیابی رفتار دقیق توده سنگ و یا بررسی جنبه‌های پایداری و یکپارچگی سازه‌های مهندسی از جمله چاه به کار می‌روند. روش‌های عددی مورد استفاده در ژئومکانیک مطابق شکل (۵-۱) به دو گروه پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند. روش‌های پیوسته شامل: روش تفاضل محدود، المان مرزی و المان محدود است و روش المان مجزا را می‌توان جزء روش ناپیوسته دانست.



شکل ۵-۱: روش‌های عددی مورد استفاده در ژئومکانیک

مدل‌های تحلیلی برای بررسی رفتار سیمان معمولاً غلاف سیمان را به صورت الاستیک و مدل‌های عددی برای اعمال کوپل هیدرو مکانیک معمولاً سازند را پوروالاستیک در نظر می‌گیرند که این دو محدودیت در مدل عددی حاضر رفع شده است. در این فصل دو مدل مرجع در دو مقطع از چاه که در فصل قبل به عنوان مقاطع بحرانی تعریف شدند، ساخته می‌شود. در ادامه با بررسی تنش‌ها و جابجایی‌هایی که در اطراف چاه رخ می‌دهد، با مقایسه این دو مدل، مدل بحرانی معرفی می‌شود. برای ساخت این دو مدل ابتدا هندسه، مدل رفتاری، مش بندی و مراحل مدل‌سازی توضیح داده شده و در ادامه پس از تحلیل مدل مرجع، رفتار پلاستیک سیمان در مرحله تکمیل و همچنین کوپل

هیدرومکانیک سازند در مراحل ژئواستاتیک و حفاری بررسی می‌شود. در نهایت طبق معیار Von Mises ضریب ایمنی لوله‌جداری محاسبه خواهد شد.

۵-۲ انتخاب روش عددی مناسب

روش عددی که در این پایان‌نامه استفاده می‌شود، المان محدود^۱ FEM است. این روش در سال‌های اخیر و با توجه به ماهیت محیط‌های سنگی برای ارزیابی و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ اطراف تونل و فضاهای زیرزمینی از جمله چاه نفت به کار برده می‌شود. مدل‌سازی عددی با استفاده از خواص مواد، نوع مدل و شرایط مرزی انجام می‌شود. شرایط مرزی مناسب به‌جای شرایط مرزی تصادفی نتایج بسیار زیادی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این روش شبیه‌سازی در سه بخش انجام می‌شود. در بخش اول که پیش پردازنده است، مدل با برخی از ورودی‌ها تعریف می‌شود. این ورودی‌ها شامل: نوع مواد مورد استفاده در مدل، شرایط مرزی قابل‌اجرا، نوع المان‌ها، تعداد گره‌ها، نوع مش و قدرت تحمل بین گره‌ها و المان‌ها است. به‌عنوان مثال اگر سیستم متقارن باشد از مش‌های مشبک و اگر نامتقارن باشد از مش‌های آزاد استفاده می‌شود. در بخش دوم که پردازنده است، سیستم داده‌های ورودی را برای رسیدن به بهترین نتایج به کار می‌گیرد و مطابق با دستور ورودی اجرا می‌شود. در بخش سوم که به‌عنوان پس پردازنده شناخته می‌شود، رفتار مدل تحت شرایط خاص که در بخش اول تعریف شد، مشاهده می‌شود. از آنجایی که روش المان محدود معادلات چندجمله‌ای را به‌صورت همزمان حل می‌کند، در زمان صرفه‌جویی می‌شود. این روش می‌تواند شرایط مرزی پیچیده را اداره کند. مدل رفتاری قابل تعریف برای مواد به مدل الاستیک محدود نمی‌شود و مدل‌های رئولوژی زیادی در این روش تعریف شده است. همگن و ایزوتروپ بودن در این روش محدودیتی ایجاد نمی‌کند و می‌توان از شرایط غیر همگن و غیر ایزوتروپ هم استفاده کرد، زیرا هر المان ماتریس سختی مخصوص به خود را دارد. در اتصالات سطحی بین مواد اجازه داده می‌شود که از نوع اصطکاکی یا اتساعی نیز استفاده شود. خروجی نهایی را

^۱ Finite Element Method

می‌توان در هر کامپیوتری پردازش کرد.

امروزه بیشتر از دو روش FEM و FDM^۱ جهت حل مشکلات عددی در زمینه ژئومکانیک استفاده می‌شود. برای ساخت مدل سیمان، سنگ و لوله‌جداری بهتر است از روشی استفاده کرد که مبنی بر مکانیک جامدات باشد. به همین دلیل روش FEM، بهترین پیشنهاد برای مدل‌سازی این تحقیق است. روش FDM بر اساس گره‌ها و عکس‌العمل بین آن‌ها کار می‌کند و در این مورد خیلی سریع‌تر از FEM است. اما این روش نمی‌تواند مسائل شرایط مرزی پیچیده را مدل‌سازی کند و اغلب در زمینه مکانیک سیالات استفاده می‌شود. به‌طور کلی در روش‌های عددی به‌جز روش المان محدود، همگرا شدن المان‌ها با خطای بیشتری مواجه می‌شوند. این مزیت اصلی المان محدود نسبت به سایر روش‌های عددی است. در روش DEM که برای محیط ناپیوسته طراحی شده است، مهم‌ترین قسمت طراحی مربوط به شکستگی‌ها است و به دلیل در دسترس نبودن نگارهای تصویری و اطلاعات شکستگی‌ها، استفاده از محیط پیوسته به‌جای محیط ناپیوسته پیشنهاد می‌شود. روش المان مجزا یک روش محاسباتی و ریاضی پیچیده است و در پی آن زمان طولانی برای انجام این محاسبات مورد نیاز است. در نظر گرفتن فولاد به‌عنوان یک ماده دانه‌ای خود یکی از مشکلات مدل‌سازی در نرم‌افزار PFC است. بر اساس تحقیقات زیادی که درباره انتخاب نرم‌افزار صورت گرفت به این نتیجه می‌توان دست یافت که استفاده از روش المان محدود با توجه به موضوع تحقیق مناسب‌ترین روش است.

در مورد دوبعدی یا سه‌بعدی بودن مدل، هندسه چاه به‌گونه‌ای است که مدل‌های دوبعدی با توجه به یکی از هدف‌های تحقیق (تأثیر آنیزوتروپی تنش‌های برجا)، با فرض تقارن یا کرنش صفحه‌ای نمی‌تواند بیانگر رفتار مواد دربرگیرنده باشد و بهتر است از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شود. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر تغییرشکل‌های اطراف چاه، پلاستیک در سیمان و فاکتور ایمنی لوله‌جداری، تحلیل سه‌بعدی کارایی بیشتری دارد و نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه می‌دهد.

^۱ Finite difference method

۵-۳ نرم افزار ABAQUS

در میان نرم افزارهای مدل سازی بر اساس FEM استفاده از ABAQUS از جایگاه ویژه ای برخوردار است. نرم افزار ABAQUS یک مجموعه قدرتمند از برنامه های مدل سازی مهندسی بر پایه روش المان محدود است که می تواند مسائل آنالیز خطی نسبتاً ساده تا مسائل پیچیده و چالش برانگیز مدل سازی های غیرخطی را حل کند. این نرم افزار دارای مجموعه ای بزرگ از ابزارها است که می تواند هر هندسه ای را مدل کند. همچنین نرم افزار مذکور دارای یک مجموعه کامل از مدل های مواد است که می تواند رفتار بسیاری از مواد رایج مهندسی از جمله الاستیک، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن تقویت شده، فوم های انعطاف پذیر و تراکم پذیر یا مواد تشکیل دهنده ی پوسته زمین مثل خاک و سنگ را شبیه سازی نماید. بنابراین ABAQUS به عنوان یک ابزار شبیه سازی همه کاره طراحی، مطرح شده است. این نرم افزار در تحلیل مسائل ساختاری (تنش - کرنش) و در سطوح مختلف مانند انتقال حرارت، انتقال جرم، کنترل حرارت اجزای الکتریکی، مکانیک خاک، مکانیک سنگ و غیره به کار گرفته شده است. از دیگر کاربردهای این نرم افزار تحلیل شکست قطعات و بررسی مکانیسم رشد ترک، تحلیل بارگذاری های دینامیکی بر روی سازه ها و تحلیل پیش بینی تخریب ناشی از زمین لرزه و کاربردهای فراوان دیگر است (شهبازی، ر و یکرنگ نیا، م، ۱۳۹۵).

اگرچه دسترسی محدود به اطلاعات زمین شناسی، به یک نگرانی در فرآیند مدل سازی تبدیل شده است اما لازم است با پذیرش این واقعیت، مدل با همان ساختار پیچیده، مدنظر قرار گیرد. در این پروژه، مدل با استفاده از مفروضات ذیل ساخته می شود.

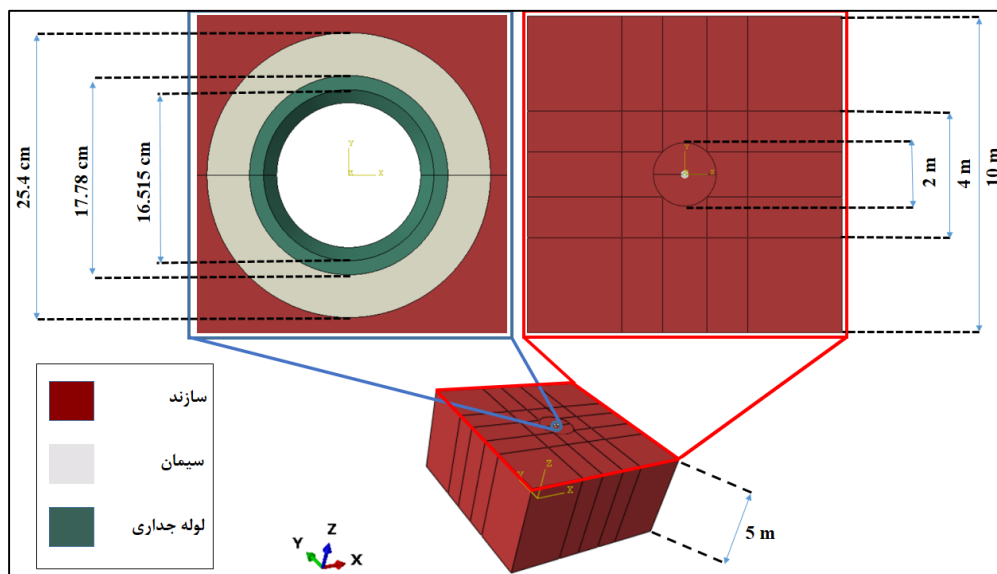
- همه مواد استفاده شده (سازند، سیمان و لوله جداری) هموزن و پیوسته هستند.
- هیچ گونه انقباض و یا انبساط در سیمان وجود ندارد.
- در آباکوس به طور پیش فرض تنش های منفی و مثبت به ترتیب کششی و فشاری است.
- در این مدل سازی اثر دما در نظر گرفته نشده است.

۴-۵ مراحل مدل سازی عددی یکپارچگی چاه

سه منبع اصلی شامل: مواد، شرایط مرزی و هندسه مدل باعث ایجاد رفتار غیرخطی در مدل سازی عددی می شود. زمانی که شرایط مرزی در طول تحلیل عددی تغییر کند، رفتار المان ها از حالت خطی به غیرخطی تغییر می کنند. به عنوان مثال در تحلیل شکست هیدرولیکی، شرایط مرزی ممکن است از حالت بدون جریان به شرایط جریان تغییر کند. در این پایان نامه انجام شبیه سازی باهدف ارزیابی یکپارچگی چاه صورت می گیرد. تحلیل المان محدود با استفاده از یک رویکرد مرحله ای انجام می شود. مدل المان محدود در دو مقطع از چاه در عمق مخزن چاه مورد مطالعه در میدان مارون در جنوب غرب کشور ایران ساخته شده است.

۴-۵-۱ تعریف هندسه مدل

تعریف دامنه شبیه سازی مستلزم انتخاب اندازه بلوک سنگی به همراه سیستم چاه است. سبب بهینه هندسه باعث ایجاد تعادل درستی بین نتایج دقیق و زمان معقول محاسبات می شود و علاوه بر این تأثیر شرایط مرزی بر نتایج شبیه سازی نیز تا حد امکان کاهش می یابد. محدوده شعاعی این دامنه تقریباً ۵۰ برابر شعاع حفاری در نظر گرفته شده است تا کاملاً اثر شرایط مرزی بر نتایج شبیه سازی برطرف شود. مشخصات هندسی مدل در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. در این پایان نامه دو مدل مرجع، یکی برای عمق ۳۵۵۵ تا ۳۵۶۰ و دیگری برای عمق ۳۸۰۰ تا ۳۸۰۵ متری تهیه شده است. از لحاظ مشخصات هندسی، مدل اول و دوم تنها در ضخامت سیمان و قطر چاه تفاوت دارند. در مدل اول و دوم، ضخامت سیمان به ترتیب (۲/۵۴ و ۳/۸۱ سانتی متر) و قطر چاه (۲۲/۸۶ و ۲۵/۴ سانتی متر) است. لوله جداری استفاده شده در هر دو مدل مشترک بوده که از نوع آستری در عمق مخزن، با قطر خارجی ۷ اینچ و مقاومت تسلیم ۸۷۸ مگاپاسکال انتخاب شده است.



شکل ۵-۲: مشخصات هندسی مدل

۵-۴-۲ تخصیص مواد و مدل‌های رفتاری

مدل رفتاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل و شاید مهم‌ترین عامل مؤثر در یک تحلیل عددی است. انتخاب صحیح مدل رفتاری می‌تواند تأثیر شگرفی بر نتایج تحلیل‌ها و طراحی داشته باشد. با توجه به اطلاعات قابل‌دسترس، مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای سازند و سیمان از نوع موهر - کولمب و برای لوله‌جداری از نوع الاستیک است. این مدل الاستوپلاستیک (موهر-کولمب)، یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در تحلیل‌های عددی است. دلیل این امر تعداد پارامترهای مورد استفاده در این مدل است که تعیین آن‌ها نیاز به آزمایش‌های پیچیده‌ای ندارد. در استفاده از این مدل بایستی توجه کرد که برخی از جنبه‌های رفتار اساسی سنگ مانند وابسته بودن سختی به مسیر و تاریخچه تنش و کرنش در آن صرف‌نظر شده و استفاده از این مدل به‌خصوص در مسائل بارگذاری، باربرداری یا بارگذاری‌های رفت و برگشتی صحیح نخواهد بود. پارامترهای لازم برای انجام تحلیل با این مدل شامل دانسیته جرمی، مدول یانگ و ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک است. جدول (۵-۱) ویژگی‌های مواد دربرگیرنده مدل شامل: سازند، سیمان و لوله‌جداری با توجه به مدل رفتاری آن‌ها در دو مقطع ۲ و ۴ که در فصل قبل به عنوان مقاطع بحرانی معرفی شدند، را نشان می‌دهد. وزن مخصوص سازند در مقطع ۲ و ۴ به ترتیب ۲۵۵۰ و ۲۵۵۵ و وزن مخصوص سیمان و لوله‌جداری، به

ترتیب ۱۷۶۵ و ۷۹۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب است.

جدول ۵-۱: مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در مدل

ردیف	مقطع	عمق (m)	مواد	خواص	مقدار				
۱	۲	۳۵۵۵ ↓ ۳۵۶۰	سازند	هندسی	قطر چاه (cm)	۲۲,۸۶			
۲				الاستیک	مدول یانگ (GPa)	۱۹			
۳				پلاستیک	ضریب پواسون	۰,۲۸			
۴					چسبندگی (MPa)	۲۷			
۵				مقاومتی	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۸۱,۵		
۶						مقاومت کششی (MPa)	۶,۵		
۷				سیال	فشار منفذی (MPa)	فشار گل (MPa)	۳۰		
۸						تخلخل (%)	۱۵		
۹				پتروفیزیکی	نفوذپذیری (md)	تنش قائم (MPa)	۷۵		
۱۰						تنش افقی حداقل (MPa)	۶۸		
۱۱				تنش های برجا	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	۷۸		
۱۲						هندسی	قطر چاه (cm)	۲۵,۴	
۱۳				۴	۳۸۰۰ ↓ ۳۸۰۵	سازند	الاستیک	مدول یانگ (GPa)	۲۳
۱۴							پلاستیک	ضریب پواسون	۰,۳۲
۱۵	پلاستیک	چسبندگی (MPa)	۲۰						
۱۶		زاویه اصطکاک داخلی	۴۵						
۱۷	مقاومتی	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	مقاومت کششی (MPa)				۹۷		
۱۸			فشار منفذی (MPa)				۷,۷۷		
۱۹	سیال	فشار گل (MPa)	تخلخل (%)				۳۳		
۲۰			نفوذپذیری (md)				۷		
۲۱	پتروفیزیکی	تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)				۹۵		
۲۲			تنش افقی حداکثر (MPa)				۹۰		
۲۳	تنش های برجا	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)				۱۰۰		
۲۴			هندسی				ضخامت (mm)	۲۵,۴	
۲۵	سیمان	↓	سیمان				الاستیک	مدول یانگ (GPa)	۳۸,۱
۲۶							پلاستیک	ضریب پواسون	۰,۳
۲۷				پلاستیک	چسبندگی (MPa)	۱۸			
۲۸					زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۸			
۲۹				مقاومتی	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	۵۰,۶		
۳۰						تنش قائم مدل اول (MPa)	۴,۴		
۳۱				تنش	تنش قائم مدل دوم (MPa)	تنش قائم مدل اول (MPa)	۱۰		
۳۲						تنش قائم مدل دوم (MPa)	۱۴		
۳۳				لوله جداری	↓	لوله جداری	هندسی	ضخامت (mm)	۱۲,۶۵
۳۴							الاستیک	مدول یانگ (GPa)	۲۰۰
۳۵	پلاستیک	ضریب پواسون	۰,۳						
۳۶	مقاومتی	مقاومت تسلیم (MPa)	تنش قائم مدل اول (MPa)				۸۷۸		
۳۷			تنش قائم مدل دوم (MPa)				۴۰		
۳۸	تنش	تنش قائم مدل دوم (MPa)	۶۰						

۵-۴-۳ تعریف سطوح تماس

مبحث سطح تماس در یک مسئله و در نظر گرفتن آن در شبیه‌سازی اجزای محدود، یکی از مهم‌ترین مواردی است که در نتیجه به دست آمده از حل، تأثیر مستقیم دارد. مدل کردن سطوح تماس سازند - سیمان و سیمان - لوله‌جداری یکی از قسمت‌های مهم مدل‌سازی یکپارچگی چاه است. عموماً این سطوح تماس به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش و جدا افتادگی بین سطوحی که باهم در تماس هستند، وجود داشته باشد، مدل می‌شوند. در این روش برای مدل کردن تغییر مکان نسبی از المان سطح تماس در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. جهت اعمال المان سطح تماس در نرم‌افزار آباکوس، دو نوع تماس اصطکاکی و تماس عمودی بین سطوح مشترک در نظر گرفته شده است. در تماس اصطکاکی که از قانون اصطکاک موهر کولمب تبعیت می‌کند (در فصل ۲ توضیح داده شد)، از روش پنالتی^۱ با ویژگی‌های درج شده در جدول (۵-۲) استفاده شده است. سطح داخلی چاه با سطح خارجی غلاف سیمان در تماس هستند که ویژگی‌های تماس این سطح در جدول (۵-۲)، ردیف ۱ درج شده است. سطح بیرونی لوله‌جداری و داخلی غلاف سیمان در تماس با یکدیگر هستند که ویژگی‌های تماس این سطح در جدول (۵-۲)، ردیف ۲ آورده شده است. در تماس عمودی بین سطوح از تماس سخت^۲ مبنی بر روش پنالتی استفاده شده است. تنش برشی بین سیمان و لوله‌جداری طبق مطالعات انجام شده، تقریباً ۰/۱ تنش برشی بین سازند و سیمان است (Capasso and Musso, 2010; Topini et al, 2011).

جدول ۵-۲: پارامترهای اصطکاکی سطوح مشترک بین مواد دربرگیرنده مدل

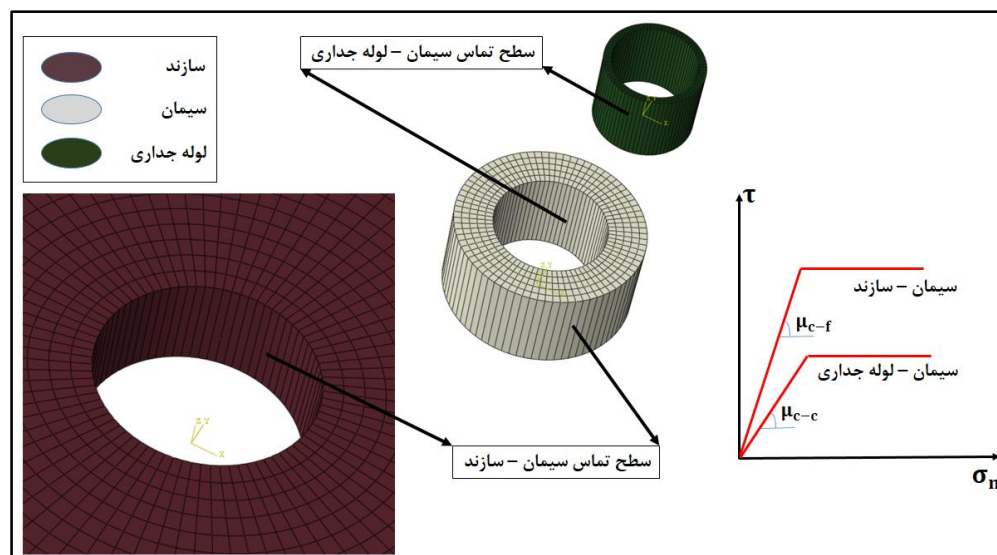
ردیف	سطوح تماس	مقاومت برشی (Kpa)	ضریب اصطکاک	تماس عمودی
۱	سیمان - سازند	۶۸۰	۰/۴۵	سخت
۲	سیمان - لوله‌جداری	۶۸	۰/۳	سخت

شکل (۵-۳)، رفتار مکانیکی سطوح تماس بین سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری را نشان

^۱ Penalty

^۲ Hard Contact

می‌دهد. در این شکل، τ مقاومت برشی سطح تماس، μ_{c-c} ضریب اصطکاک بین سیمان و لوله‌گذاری، μ_{c-f} ضریب اصطکاک بین سیمان و سازند و σ_n تنش نرمال هستند.



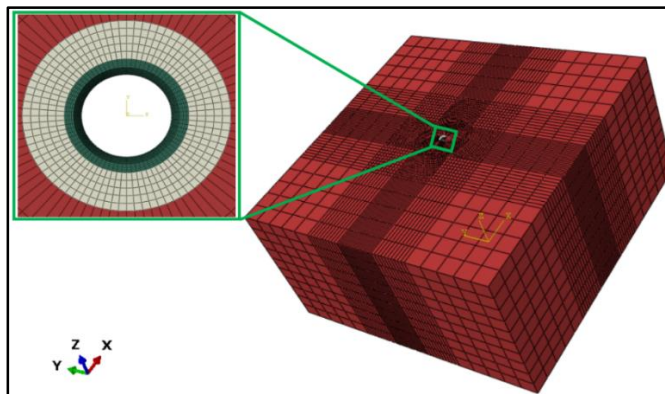
شکل ۳-۵: هندسه و رفتار مکانیکی سطوح تماس در مدل

۴-۴-۵ تولید مش

رویکرد ترسیم مش بندی مدل، مطابق مدل‌های میچل در سال ۱۹۹۷ و هیملبرگ در سال ۲۰۱۴ است (Mitchell, 1997; Himelberg, 2014). همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود، این مدل باهدف به دست آوردن طرح مناسب تقسیم‌بندی هندسه و زمان منطقی محاسبات، مش بندی شده است. المان‌های سازند تنها جهت انتقال بار و جابجایی استفاده می‌شوند بنابراین اندازه آن‌ها نسبت به المان‌های سیمان و لوله‌گذاری بزرگ‌تر هستند و تغییرات شعاعی آن‌ها به صورتی است که با نزدیک شدن به دیواره چاه اندازه المان‌ها کاهش می‌یابند. المان‌ها بر پایه روش (structural) و (hexagonal) تقسیم‌بندی شده‌اند که در نهایت سیستم یکپارچگی چاه با المان‌های مکعبی مش بندی می‌شوند. نوع المان‌های استفاده‌شده برای سازند (C3D8RP) هستند که بیانگر المان‌های سه‌بعدی شامل ۸ گره هستند که تعداد این المان‌ها ۳۷۸۰۰ است. در این مدل‌سازی از المان‌های پیوسته^۱ استفاده می‌شود.

^۱ Continuum

باهدف سرعت بخشیدن به تحلیل و نگاه داشتن رفتار سختی واقع بینانه المانها از روش (Reduced Integration) برای انتگرال گیری نقاط المانها استفاده شده است که در انتهای نام المانها حرف R آمده است. حرف P نیز معرف فشار منفذی^۱ است. المانهای سیمان و لوله جداري از نوع (C3D8R) هستند که تعداد این المانها ۸۰۰۰ است. به طور کلی این مدل شامل ۴۵۸۰۰ المان و ۴۸۴۱۱ گره است.



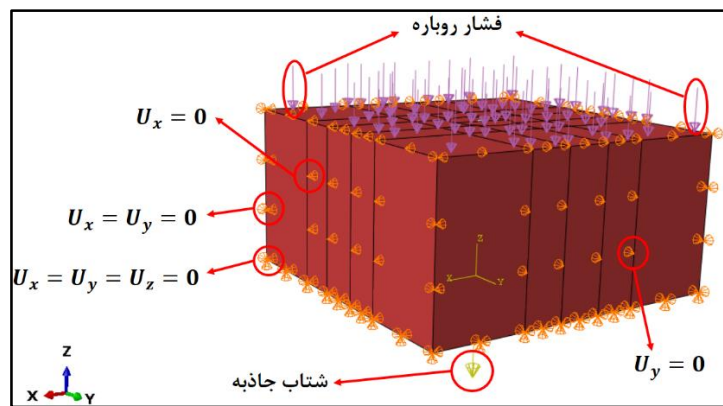
شکل ۴-۵: الگوی مش بندی در سیستم سازند - سیمان - لوله جداري

۵-۴-۵ شرایط مرزی و بارگذاری

همانگونه که ورود اطلاعات غلط به یک تحلیل صنعتی یا اقتصادی منجر به اتخاذ تصمیمات نادرست می شود، ورودی های نادرست به نرم افزارهای مدل سازی عددی نیز می تواند کاربر را در تحلیل و تفسیر نتایج دچار اشتباهات جبران ناپذیری نماید. بنابراین شاید بتوان شرایط مرزی را از حساس ترین مواردی دانست که همواره برای کاربران مشکل ساز بوده است. اعمال شرایط مرزی و همچنین بارگذاری بر مسئله امری اجتناب ناپذیر است و اصولاً تحلیل یک مسئله بدون بار (مکانیکی، حرارتی و ...) معنایی ندارد. در نقطه مقابل، علی رغم تمام ساده سازی هایی که می تواند در یک تحلیل اجزا محدود بکار رود، تا حد امکان سعی بر این است که در خصوص بار و شرایط مرزی ساده سازی صورت نگیرد تا نتایج دچار انحراف نشود و به شرایط واقعی نزدیک باشد. از این رو اعمال بار به شکل صحیح به مجموعه مورد نظر حایز اهمیت

^۱ Pore pressure

بالایی است. همان‌طور که در شکل (۵-۵) مشاهده می‌شود، گره‌های سازند، سیمان و لوله‌گذاری در کف مدل در جهت Z بسته می‌شوند. سطح مدل آزاد و در طرف‌های (صفحه‌های) دیگر نیز به صورت غلظتی بسته می‌شوند. U_x ، U_y و U_z به ترتیب جابجایی در جهت‌های X، Y و Z هستند. فشار روباره به سطح سازند، سیمان و لوله‌گذاری اعمال می‌شود. شتاب جاذبه نیز برای اعمال بار وزنی مواد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۵: شرایط مرزی و بارگذاری

۵-۴-۶ معیارهای شکست مکانیکی در مدل

پیدایش شکستگی در مواد به عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن میان می‌توان به ماهیت ماده، نوع بارگذاری و تغییرات درجه حرارت و فشار اشاره نمود. مدل‌های متنوعی برای شکست ارائه شده است. در این تحقیق با توجه به ماهیت ماده، معیار Von Mises برای بررسی ایمنی لوله‌گذاری و از تئوری حداکثر کرنش پلاستیک برای بررسی پلاستیک شدن سیمان و سازند استفاده شده است. معیار شکست Von Mises بیانگر این است که اگر ترکیب سه تنش اصلی بیش از مقاومت تسلیم مواد باشد، شکست رخ می‌دهد. از لحاظ ریاضی این معیار مطابق رابطه (۵-۱) است. در این رابطه، σ_1 تنش اصلی حداکثر، σ_2 تنش اصلی میانه و σ_3 تنش اصلی حداقل می‌باشد (Arias, 2013).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (۵-۱)$$

با توجه به مقاومت تسلیم فولاد به کار برده شده، جهت ساخت لوله‌گذاری که ۸۷۸ مگاپاسکال است،

طبق معیار شکست Von Mises پارامتری به نام ضریب ایمنی لوله‌جداری تعریف می‌شود که طبق رابطه (۲-۵) محاسبه می‌شود. در این رابطه، (SF_{casing}) ضریب ایمنی لوله‌جداری و σ_{VM} حداکثر تنش Von Mises ایجاد شده در لوله‌جداری بر حسب مگاپاسکال است.

$$SF_{casing} = \frac{878}{\sigma_{VM}} \quad (2-5)$$

پس از مدل‌سازی چاه در مرحله حفاری و تحلیل المان محدود تغییرات پلاستیک را می‌توان مطابق رابطه (۳-۵) مشاهده کرد. در این رابطه، ε_{ij}^p تانسور نرخ کرنش پلاستیک، t ، زمان، PEEQ، حداکثر کرنش پلاستیک کلی هستند (Arias, 2013).

$$PEEQ = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{ij=1,2,3} (\varepsilon_{ij}^p)^2} dt \quad (3-5)$$

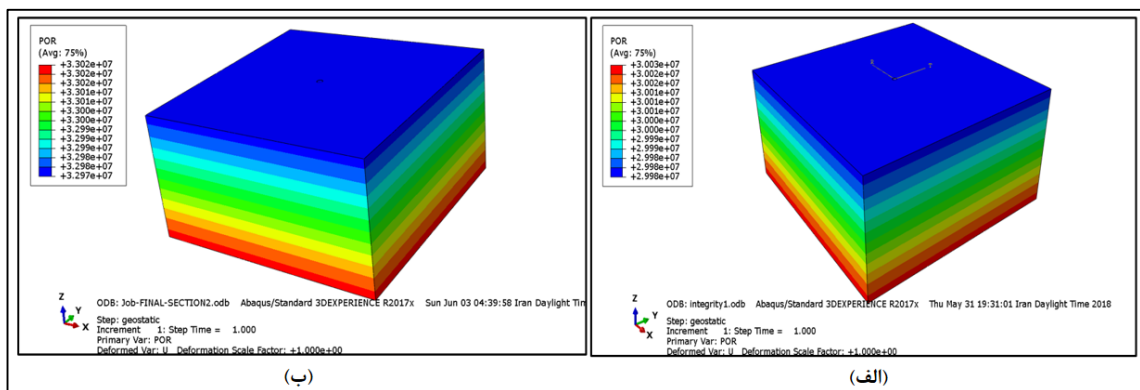
۷-۴-۵ مرحله تعادل ژئواستاتیک^۱

در این مرحله، سازند یا بلوک سنگی متخلخل تحت حالت سه بعدی تنش عمودی، تنش‌های افقی حداقل و حداکثر و فشار منفذی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر شرایط مرزی، شرایط قبل از حفاری و بارگذاری‌ها در این مرحله انجام می‌شود. تغییرات تنش و جابجایی در اقدامات بعدی از جمله حفاری و تکمیل چاه، به شدت به مرحله ژئواستاتیک وابسته است، بنابراین مرحله ژئواستاتیک از بخش‌های مهم مدل‌سازی می‌باشد. اگر تنش‌های برجای اولیه که در ابتدا توسط کاربر به نرم‌افزار داده می‌شود نزدیک به مقادیر محاسبه شده توسط ABAQUS نباشد، ممکن است این مرحله تحلیل شود اما گام‌های بعدی از جمله حفاری و تکمیل را کامل نخواهد کرد. لازم به ذکر است که در نرم‌افزارهای شرکت ITASCA مانند FLAC باید قبل از حفاری، جابجایی‌ها را صفر کرد اما در نرم‌افزار ABAQUS مرحله ژئواستاتیک به گونه‌ای تعریف شده است که جابجایی‌ها در پایان تحلیل تقریباً صفر می‌شود. برای صحت مدل‌سازی در مرحله ژئواستاتیک، لازم است که موارد زیر بررسی شوند.

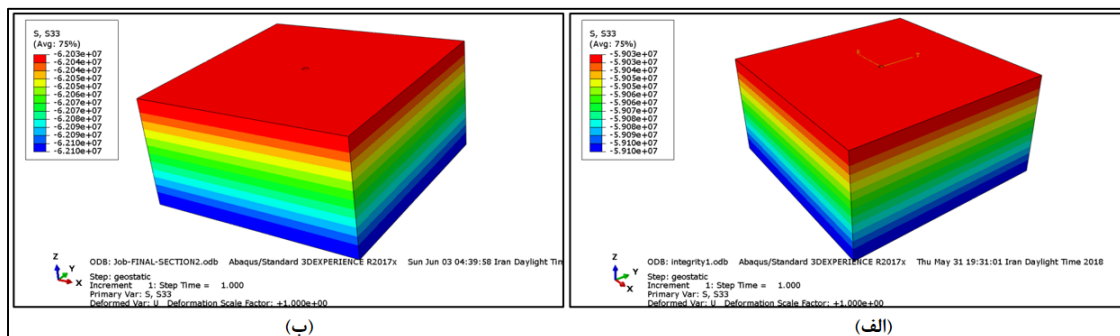
^۱ Geostatic

فشار منفذی در مرحله ابتدایی مدل‌سازی به صورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود که تغییرات کنتور فشار منفذی به دلیل اعمال شتاب گرانش به مدل اول در شکل (۵-۶: الف) و در مدل دوم در شکل (۵-۶: ب) مشاهده می‌شود. فشار منفذی بر روی تنش‌های برجا اثر گذاشته و در نهایت تنش موثر به مدل اعمال می‌شود که در شکل (۵-۷: الف) همانطور که مشاهده می‌شود، تنش در راستای قائم از ۸۹ به ۵۹ مگاپاسکال کاهش یافته است که دلیل آن حضور فشار منفذی (۳۰ مگاپاسکال) است. در مدل دوم با توجه به مقدار فشار منفذی که ۳۳ مگاپاسکال است، مقدار تنش برجا در راستای قائم از ۹۵ به ۶۲ مگاپاسکال کاهش می‌یابد که در شکل (۵-۷: ب) مشاهده می‌شود.

تنش‌های موثر و کلی در آباکوس قابل محاسبه می‌باشد که تغییرات تنش در راستای Z (S33)، بیانگر این موضوع است. S33 در نرم‌افزار باید نزدیک (یا برابر) به تنش‌هایی که توسط کاربر به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است، باشد. در شکل (۵-۷) همانطور که مشاهده می‌شود، تنش‌ها در جهت Z با توجه به رابطه ρgh ، با افزایش عمق (h) افزایش می‌یابند.

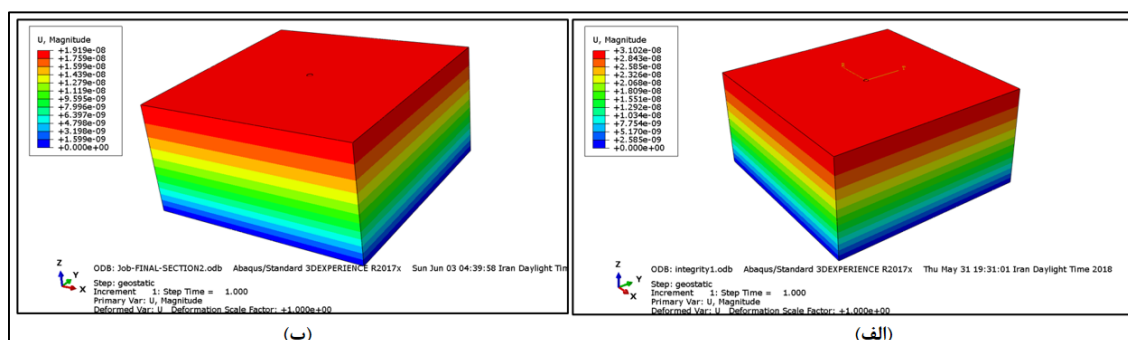


شکل ۵-۶: تغییرات کنتور فشار منفذی مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک



شکل ۵-۷: تغییرات تنش قائم مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک

برای اطمینان حاصل کردن از اینکه این مرحله به تعادل رسیده است، باید جابجایی‌های ناچیزی در مدل اتفاق بیافتد. شکل (۵-۸) جابجایی کلی (ترکیب جابجایی در جهت‌های x ، y و z) در مدل را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، جابجایی‌های اندک در حدود صفر در مدل ایجاد شده است که نشان می‌دهد مرحله اول مدل‌سازی، به درستی تحلیل و برای مرحله حفاری آماده شده است.



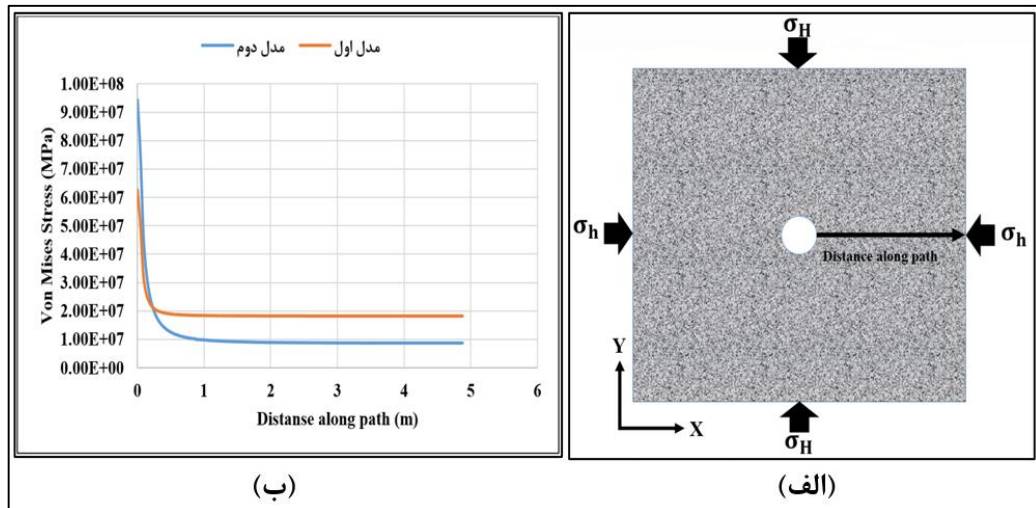
شکل ۵-۸: تغییرات جابجایی کلی مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله ژئواستاتیک

۵-۴-۸ مرحله حفاری

در این مرحله، بخشی از سازند به صورت استوانه‌ای توپر از تحلیل خارج شده و در حقیقت حفاری انجام می‌شود. همزمان با حفاری، فشار هیدرواستاتیک گل حفاری بر جداره داخلی چاه وارد می‌شود. شبیه‌سازی این مرحله، تمرکز تنش و جابجایی در اطراف چاه را به همراه خواهد داشت.

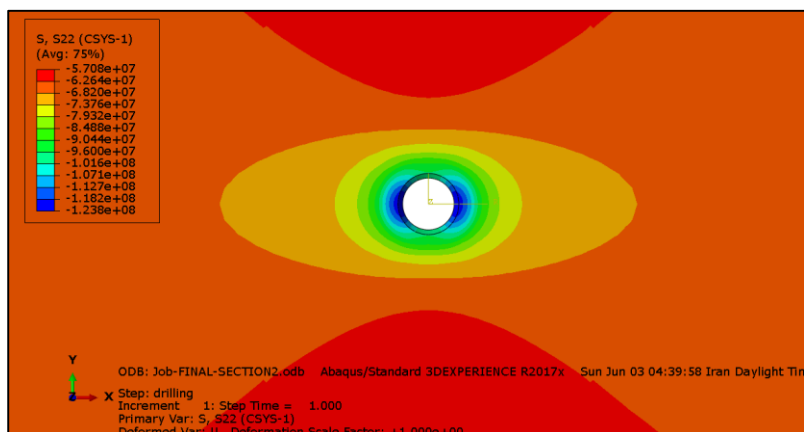
با انجام حفاری، تنش‌ها عمدتاً اطراف چاه تمرکز پیدا می‌کنند و طبق معیار Von Mises افزایش می‌یابند. رفتار سازند در این مرحله، به شناخت بیشتر سیمان و لوله‌گذاری در مرحله بعدی کمک می‌کند. حداکثر تنش Von Mises در جهت تنش افقی حداقل تمرکز می‌یابد. بنابراین در جهت تنش

حداقل و مسیری که در شکل (۵-۹: الف) تعریف شده است، تنش‌های Von Mises در هر دو مدل در شکل (۵-۹: ب) نشان داده شده است. در مدل دوم به دلیل روباره بیشتر و مقادیر تنش افقی بزرگتر نسبت به مدل اول، دارای تمرکز تنش بیشتری در اطراف چاه است.

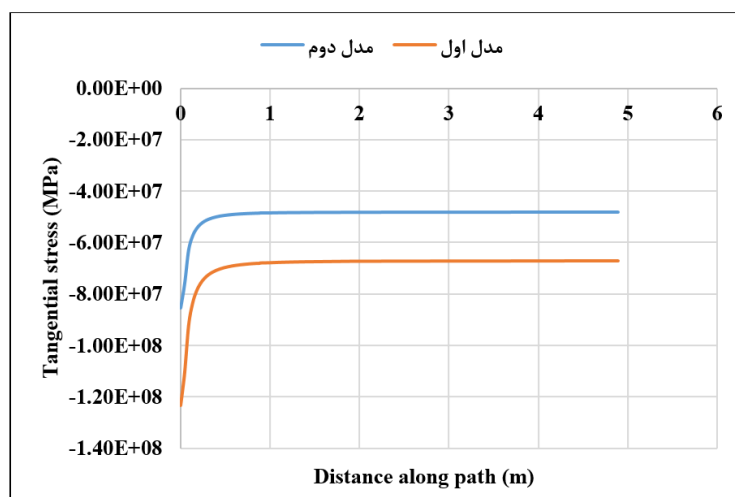


شکل ۵-۹: مسیر تعیین شده و تمرکز تنش‌های Von Mises در مرحله حفاری در مدل اول و دوم

تنش‌های مماسی یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ناپایداری چاه است. همانطور که در شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود، پس از حفاری چاه، تنش‌های مماسی در اطراف چاه تمرکز می‌یابند. تنش مماسی حداکثر در جهت تنش برجا افقی حداقل (جهت x) و حداقل تنش مماسی در جهت تنش برجا افقی حداکثر (جهت y) تمرکز یافته‌اند. در علم ژئومکانیک، توضیح فوق بیانگر ایجاد پدیده Breakout در جهت تنش برجا افقی حداقل و ایجاد شکستگی در جهت تنش برجا افقی حداکثر است (Arias, 2013). شکل (۵-۱۱) تمرکز تنش مماسی نسبت به فاصله‌ای که در مسیر انتخابی تعریف شده است، را نشان می‌دهد. با دور شدن از دیواره چاه و نزدیک شدن به مرز بیرونی مدل، تنش‌های مماسی کاهش پیدا می‌کنند. تمرکز تنش مماسی در اطراف چاه، در مدل اول کمتر از مدل دوم است.

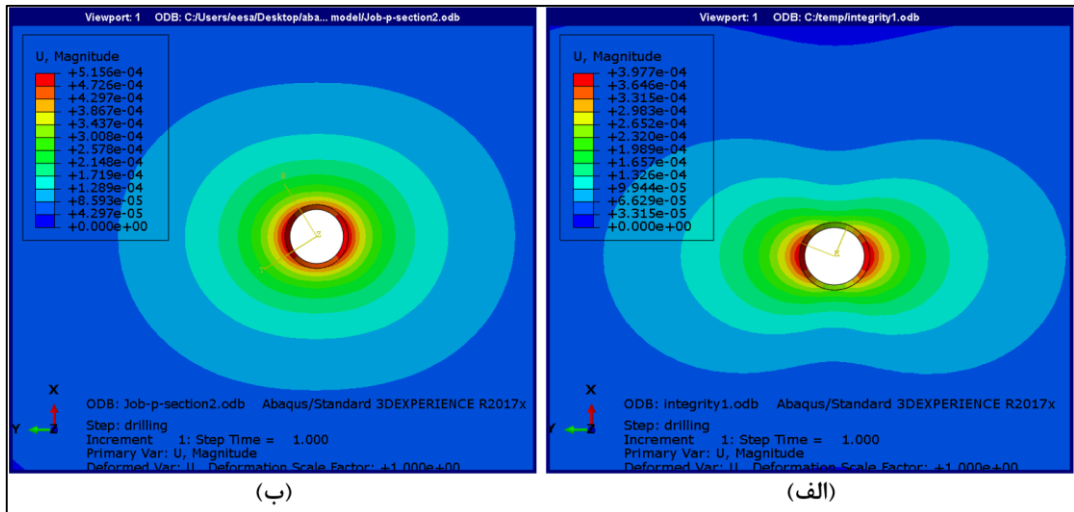


شکل ۵-۱۰: تنش مماسی بعد از حفاری چاه در مدل اول



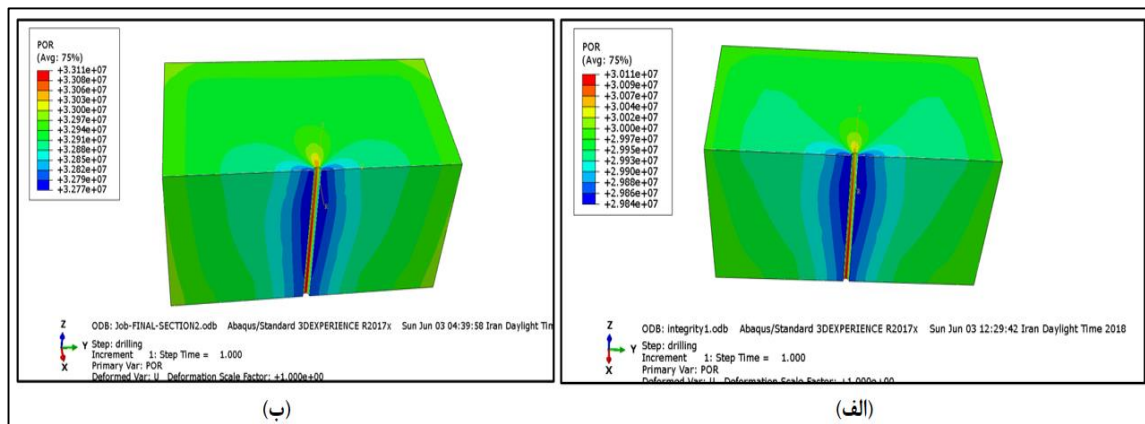
شکل ۵-۱۱: تغییر تنش‌های مماسی اطراف چاه نسبت به مسیر انتخاب شده در مدل اول و دوم

جابجایی کلی در مدل به دلیل اعمال تنش‌های برجا و خالی شدن بخشی از بلوک سنگی که در مرحله ژئواستاتیک به تعادل رسیده بود، در اطراف چاه مطابق شکل (۵-۱۲) تمرکز می‌یابند. شکل (۵-۱۲: الف) کنتور جابجایی کلی مدل اول و شکل (۵-۱۲: ب) کنتور جابجایی کلی مدل دوم در مرحله حفاری را نشان می‌دهد. شکل تمرکز جابجایی به شدت به شرایط تنش‌های افقی وابسته است. اگر شرایط تنش‌ها ایزوتروپ باشد زون جابجایی در اطراف چاه، دایره‌ای شکل خواهد بود. در این تحقیق در هر دو مدل مرجع، شرایط تنش‌های برجا افقی آنیزوتروپ است که در نهایت زون جابجایی در اطراف چاه بیضی شکل و در جهت تنش افقی حداکثر کشیده‌تر می‌شود.



شکل ۵-۱۲: جابجایی کلی مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله حفاری

در مرحله حفاری با خالی شدن فضایی از سازند و خارج شدن آن از تعادل اولیه، مسیری جهت جریان آب ایجاد می‌شود که در نتیجه آن، فشار منفذی مطابق شکل (۵-۱۳) تغییر می‌کند و مقدار آن کاهش پیدا می‌کند. فشار منفذی در مرز بیرونی مدل معادل فشار اولیه و با نزدیک شدن به چاه، این فشار به دلیل ایجاد حفره باز کاهش می‌یابد.



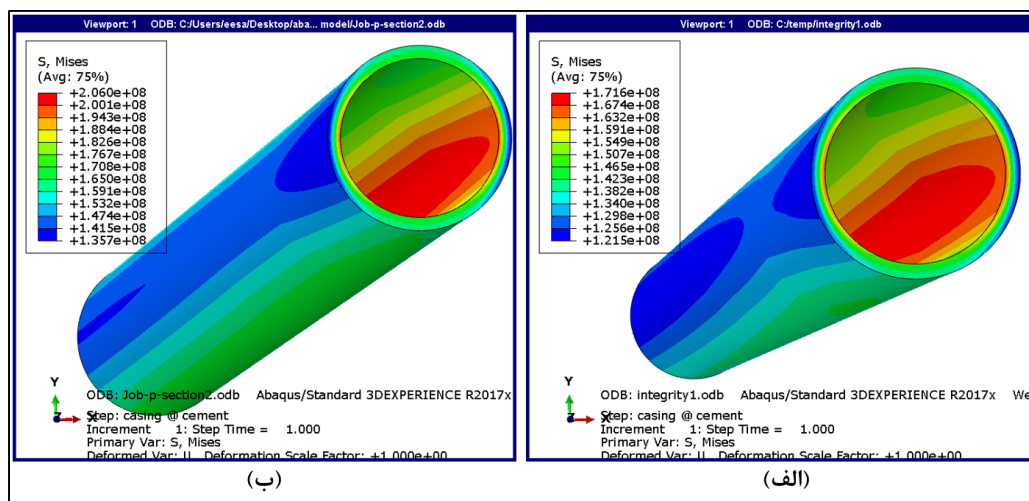
شکل ۵-۱۳: تغییرات فشار منفذی مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله حفاری

۵-۴-۹ مرحله تکمیل

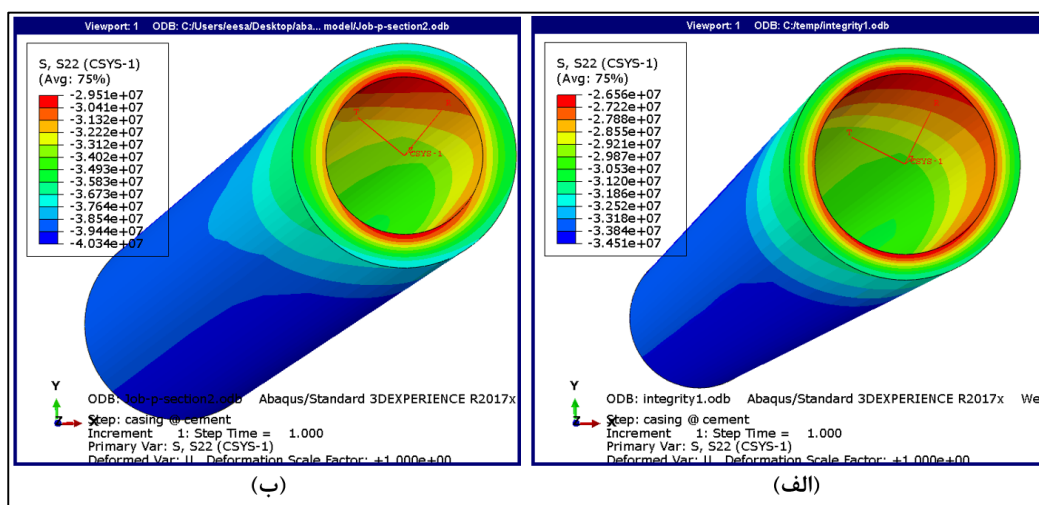
در این مرحله پس از اینکه سیمان و لوله‌گذاری به مدل اضافه شد، سطوح تماسی بین سیمان - سازند و سیمان - لوله‌گذاری فعال می‌شود. فشار گلی که در مرحله حفاری به دیواره داخلی چاه وارد شده بود، غیر فعال می‌شود و فشاری برابر با فشار گل به عنوان فشار تکمیل به جداره داخلی لوله‌گذاری

اعمال می‌شود.

شکل (۵-۱۴: الف) تغییرات تنش Von Mises لوله‌جداری در مدل اول و شکل (۵-۱۴: ب) تغییرات تنش (Von Mises) لوله‌جداری در مدل دوم را نشان می‌دهد. ضریب ایمنی لوله‌جداری با توجه به این معیار شکست، در مدل اول و دوم به ترتیب، $5/1$ و $4/26$ است. حداکثر تنش Von Mises در دیواره داخلی لوله‌جداری متمرکز شده که در شکل (۵-۱۴) مشاهده می‌شود.

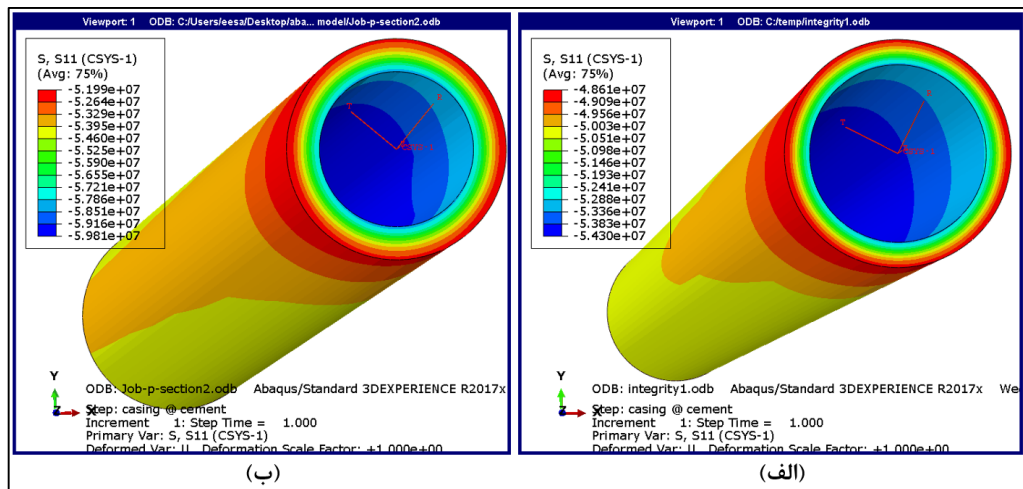


شکل ۵-۱۴: تغییرات تنش (Von Mises) لوله‌جداری در مدل اول (الف) و دوم (ب) در مرحله تکمیل چاه
 شکل (۵-۱۵) تنش مماسی در غلاف سیمان در مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) را نشان می‌دهد. حداکثر تمرکز این تنش در سطح بیرونی غلاف سیمان اتفاق می‌افتد که ناشی از اعمال تنش‌های برجا به مدل و القا شدن آن‌ها در مرز بین سیمان و سازند است.



شکل ۵-۱۵: تغییرات تنش مماسی غلاف سیمان در مدل اول (الف) و مدل دوم (ب) در مرحله تکمیل چاه

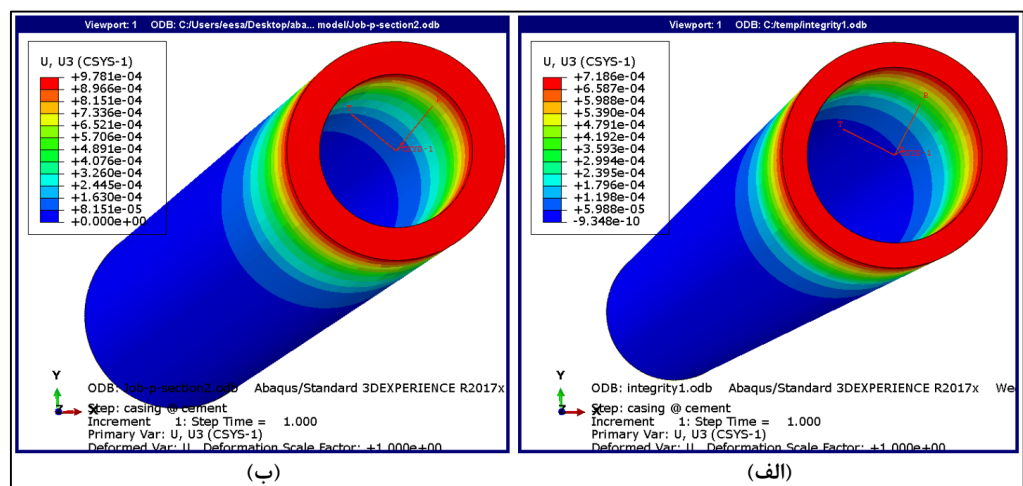
در مرحله تکمیل چاه، تنش‌های شعاعی برای تعیین خطر از دست رفتن پیوند سیمان با سازند و لوله‌جداری، یا تغییر شکل پلاستیک در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود، حداکثر تمرکز تنش شعاعی در سیمان در مرز بین سیمان و لوله‌جداری بوده که ناشی از اختلاف فشار درونی و بیرونی وارد شده به لوله‌جداری بوده که دلیلی بر از دست رفتن پیوند بین سیمان و لوله‌جداری است.



شکل ۵-۱۶: تغییرات تنش شعاعی غلاف سیمان در مدل اول (الف) و مدل دوم (ب)

جابجایی محوری یکی از فاکتورهای مهم در یکپارچگی غلاف سیمان و لغزش آن در سطوح تماسی

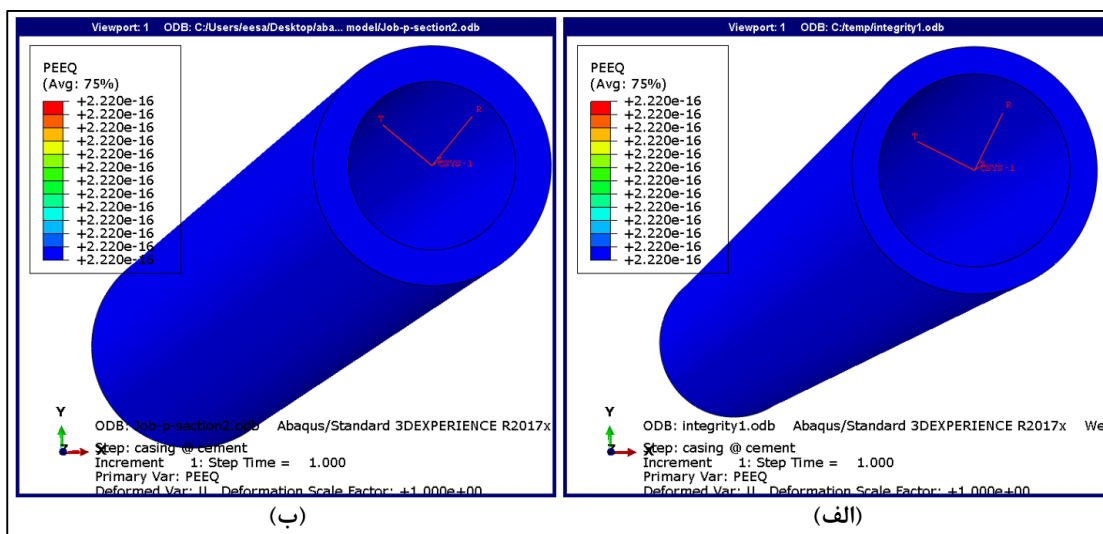
است. مطابق شکل (۵-۱۷) جابجایی محوری در مدل اول (الف) کمتر از مدل دوم (ب) است.



شکل ۵-۱۷: تغییرات جابجایی محوری در غلاف سیمان برای مدل اول (الف) و مدل دوم (ب)

در مرحله تکمیل چاه، کرنش پلاستیک عمدتاً در سیمان متمرکز می‌شود. همانطور که در شکل (۵-۱۷)

۱۸) مشاهده می‌شود، با توجه به چسبندگی بالای سیمان هیچ‌گونه کرنش پلاستیکی در آن ایجاد نمی‌شود و تنها کرنش‌های الاستیک در آن ایجاد می‌شود. ضعیف‌تر بودن مصالح سیمان نسبت به سازند و لوله‌جداری دلیلی بر ایجاد کرنش پلاستیک حداکثر است. سختی بالا برای لوله‌جداری، باعث می‌شود که شکننده باشد اما تحت شرایط چاه مورد نظر، پلاستیک نمی‌شود. حداکثر کرنش در مرز بین سیمان و لوله‌جداری، به دلیل اصطکاک کمتر رخ می‌دهد.



شکل ۵-۱۸: کرنش پلاستیک ایجاد شده در غلاف سیمان برای مدل اول (الف) و مدل دوم (ب)

۵-۵ جمع بندی

روش‌های عددی باهدف ارزیابی رفتار دقیق توده سنگ و یا بررسی جنبه‌های پایداری و یکپارچگی سازه‌های مهندسی از جمله چاه به کار می‌روند. بر اساس تحقیقات زیادی که درباره انتخاب نرم‌افزار صورت گرفت، روش المان محدود برای انجام این تحقیق انتخاب شد. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر تغییرشکل‌های اطراف چاه، پلاستیک در سیمان و فاکتور ایمنی لوله‌جداری، تحلیل سه‌بعدی توسط نرم افزار ABAQUS با اعمال شرایط مرزی (تنش‌های برجا و فشارمنفذی) و به کار بردن تماس واقعی بین سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری، رفتار مواد دربرگیرنده مدل انجام شد. دو مدل مرجع در مقیاس چاه نفت در عمق‌های ۳۸۰۰ تا ۳۸۰۵ و ۳۵۵۵ تا ۳۵۶۰ متری مخزن آسماری در میدان مارون، با توجه به داشتن شرایط تنش و اطلاعات مکانیکی سازند ساخته شده است. نتایج مدل‌های اول و دوم

شامل: ارزیابی تنش و کرنش در سیستم چاه، بررسی معیار شکست Von Mises، در نظر گرفتن ضریب ایمنی لوله‌گذاری و کرنش پلاستیک در سیمان، با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس نتایج ارائه شده در این فصل، مدل دوم به عنوان مدل بحرانی‌تر انتخاب می‌شود.

فصل هشتم

تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری

۶-۱ مقدمه

سازند از موادی با پارامترهای ژئومکانیکی مختلف تشکیل شده است که به مبداء تشکیل و فرآیندهای زمین شناسی رخ داده روی آنها بستگی دارد. به طور کلی پارامترهای ژئومکانیکی سازند را می توان به دو دسته پارامترهای مکانیکی و پارامترهای فیزیکی تقسیم کرد. پارامترهای مکانیکی به کلیه پارامترهایی که برای بیان رابطه بین تنش و کرنش سنگها مورد استفاده قرار می گیرند اطلاق می شود و به موارد زیر قابل تفکیک است.

- خواص الاستیسیته مانند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، که رابطه بین تنش و کرنش را در محدوده تغییر شکل های برگشت پذیر نشان می دهد.
- خواص مقاومتی و پلاستیکی مانند مقاومت تک محوره، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، که مشخص کننده شرایط تحمل تنش ها و تغییر شکل های برگشت ناپذیر است.

پارامترهای فیزیکی مانند تخلخل و چگالی به پارامترهایی اطلاق می شوند که مربوط به فیزیک ماده می باشند. نفوذپذیری نیز پارامتری مکانیکی وابسته به پارامترهای فیزیکی است. بخش مهمی از مباحث مکانیک سنگ مربوط به حفاری های زیرزمینی از جمله چاه نفت می باشد که در این خصوص تعیین رابطه بین تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده از اهمیت زیادی برخوردار است. برای این منظور لازم است که اثر پارامترهای مکانیکی مواد دربرگیرنده سیستم چاه شامل سازند، سیمان و لوله جدار با دقت قابل قبول بررسی شوند. در این بخش از تحقیق پارامترهای فیزیکی ثابت هستند و روی پارامترهای مکانیکی مطالعات پارامتری می شود.

آگاهی از شرایط، مقدار و جهت تنش های اولیه اهمیت زیادی دارد و ندانستن آن ممکن است خسارت های جبران ناپذیری را برای شرکت های نفتی به همراه داشته باشد. این آگاهی در بسیاری از مراحل طراحی و اجرا راه گشا بوده و به مهندسين دیدی وسیعی می بخشد. با ایجاد یک مدل مرجع عددی می توان رفتار سیستم سازند، سیمان و لوله جدار را پیش بینی کرد (در فصل قبل به طور مفصل

توضیح داده شد). با توجه به هدف اصلی این پایان‌نامه، در این فصل تاثیر شرایط تنش‌های برجا، اصطکاک و مقاومت سطوح تماس سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری و همچنین اثر پارامترهای مکانیکی سازند و سیمان بر یکپارچگی چاه با مطالعات پارامتری بررسی می‌شود.

۲-۶ تاثیر شرایط تنش‌های برجا بر یکپارچگی چاه

روشن است که مجموعه سازند، سیمان و لوله‌جداری تنش‌های برجا را تحمل می‌کنند. این تنش‌ها شامل تنش‌های عمودی، حداکثر افقی و تنش حداقل افقی هستند. بسیاری از محققان برای ساده سازی مسئله تنش‌های افقی را باهم برابر قرار می‌دهند، اما حقیقت این است که این دو تنش همیشه با هم برابر نیستند. این بدان معنا است که از فرض همسانگرد بودن تنش‌های برجا، نمی‌توان در تجزیه و تحلیل میدان تنش این مجموعه استفاده کرد و آنچه که در واقعیت وجود دارد باید در مدل‌سازی لحاظ شود. هدف اصلی این بخش از تحقیق، نشان دادن تاثیر شرایط تنش‌های اصلی سازند بر کرنش پلاستیک سیمان و ضریب ایمنی لوله‌جداری با استفاده از تحلیل عددی المان محدود است که در ادامه تشریح می‌شود.

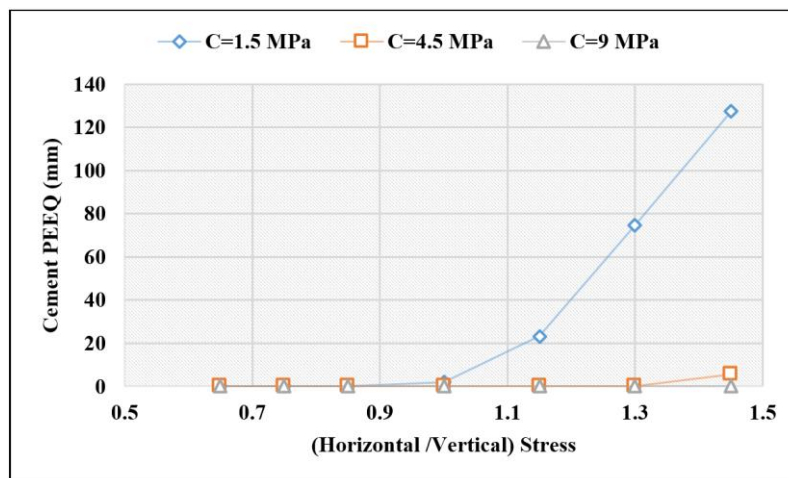
۱-۲-۶ شرایط ارتوتروپیک و ایزوتروپ تنش‌های برجا

ارتوتروپیک یک حالت خاص از آنیزوتروپی است. به این معنا که خواص آنها به جهتی که در آن اندازه‌گیری می‌شوند، بستگی دارند. مواد ارتوتروپیک دارای دو یا سه محور تقارن عمود بر هم هستند و در حالت کلی، خواص مکانیکی ماده در طول هر کدام از این محورها با محور دیگر متفاوت است. طبق جدول (۱-۶)، چهار حالت برای شرایط ارتوتروپیک در نظر گرفته شده است. حالت (۲) شرایط ایزوتروپیک را نشان می‌دهد. هنگامی که سازند در شرایط ایزوتروپیک قرار می‌گیرد، خواص آن از جمله تنش، مستقل از جهت هستند و در سه جهت x ، y و z با هم برابر می‌شوند. در جدول (۱-۶)، σ_v ، σ_H و σ_h به ترتیب تنش‌های قائم، افقی حداکثر و حداقل هستند.

جدول ۱-۶: شرایط اورتوتروپیک و ایزوتروپیک تنش‌های برجا

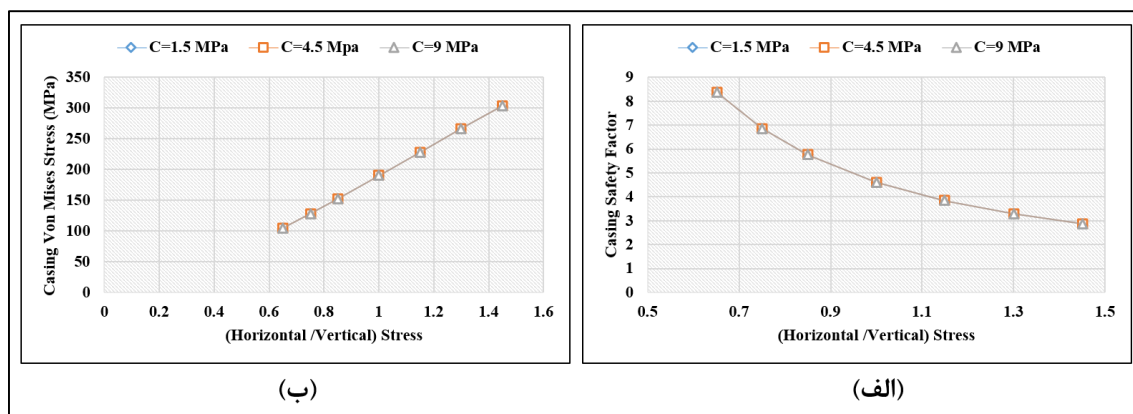
σ_h / σ_v	σ_H / σ_V	$\sigma_H - \sigma_h (Mpa)$	$\sigma_v (Mpa)$	شرایط تنش	حالت	ردیف
۰/۶۵	۰/۶۵	۰	۹۵	اورتوتروپیک ($\sigma_H = \sigma_h < \sigma_v$)	۱	۱
۰/۷۵	۰/۷۵					۲
۰/۸۵	۰/۸۵					۳
۱	۱	۰	۹۵	ایزوتروپیک ($\sigma_H = \sigma_h = \sigma_v$)	۲	۴
۱/۱۵	۱/۱۵	۰	۹۵	اورتوتروپیک ($\sigma_H = \sigma_h > \sigma_v$)	۳	۵
۱/۳	۱/۳					۶
۱/۴۵	۱/۴۵					۷
۰/۷	۱	۱۰	۹۵	اورتوتروپیک ($\sigma_H = \sigma_v > \sigma_h$)	۴	۸
۰/۸		۲۰				۹
۰/۹		۳۰				۱۰
۱	۱/۱	۱۰	۹۵	اورتوتروپیک ($\sigma_H > \sigma_v = \sigma_h$)	۵	۱۱
	۱/۲	۲۰				۱۲
	۱/۳	۳۰				۱۳

مطابق شکل (۱-۶)، در شرایط اورتوتروپیک و ایزوتروپ با افزایش نسبت تنش‌های افقی به تنش قائم، بر آیند نیروهای افقی وارد بر سیمان زیاد شده که در پی آن حداکثر کرنش پلاستیک در سیمان افزایش می‌یابد. در مدل مرجع، چسبندگی سیمان ۱۸ مگاپاسکال است که تا ۵۰ درصد کمتر از این مقدار (۹ مگاپاسکال) نیز کرنش‌ها الاستیک است. کرنش‌های پلاستیک در سیمان با افزایش چسبندگی کاهش می‌یابد. بنابراین در این بخش از تحقیق برای بررسی اثر تنش‌های برجا، چسبندگی‌های ۱/۵ و ۴/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که تحت این شرایط کرنش پلاستیک در سازند نیز به دلیل بالا بودن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ایجاد نمی‌شود.



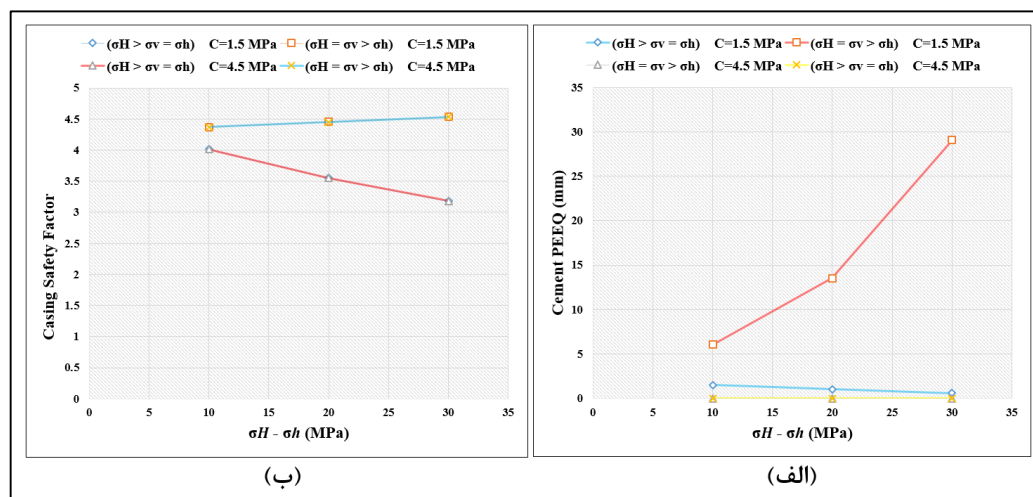
شکل ۱-۶: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش نسبت تنش افقی به قائم

همانطور که در فصل دوم نیز اشاره شد، یکی از وظایف مهم سیمان، حفاظت از لوله‌جداری در برابر فشار سازند است. همچنین یکی از انواع شکست در سیمان، پلاستیک شدن آن است که سبب از دست رفتن یکپارچگی غلاف سیمان می‌شود. با پلاستیک شدن سیمان، تنش‌های القا شده به لوله‌جداری افزایش یافته که در پی آن طبق تعریف معیار شکست Von Mises حداکثر تنش در لوله‌جداری تمرکز می‌یابد. با افزایش نسبت تنش‌های افقی به قائم، مطابق شکل (۶-۲)، فاکتور ایمنی لوله‌جداری کاهش (الف) و تنش Von Mises در لوله‌جداری افزایش (ب) می‌یابد. لازم به ذکر است که در چسبندگی‌های مختلف سیمان، ضریب ایمنی لوله و تنش Von Mises ثابت است.



شکل ۶-۲: تغییرات فاکتور ایمنی و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری با افزایش نسبت تنش‌های افقی به قائم در حالت‌های (۴ و ۵)، اختلاف بین تنش‌های افقی با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال تحلیل حساسیت می‌شوند. در حالت (۴)، تنش افقی حداکثر با تنش عمودی برابر بوده و تنش افقی حداقل تغییر می‌کند. با افزایش تنش افقی حداقل و نزدیک شدن به شرایط ایزوتروپیک، مطابق شکل (۶-۳): الف)، پلاستیک در سیمان افزایش و مطابق شکل (۶-۳: ب) ایمنی لوله‌جداری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، کرنش پلاستیک در سیمان کاهش و ایمنی لوله‌جداری افزایش می‌یابد. در حالت (۵)، تنش افقی حداقل با تنش عمودی برابر بوده و تنش افقی حداکثر تغییر می‌کند. با افزایش تنش افقی حداکثر و دور شدن از شرایط ایزوتروپیک، مطابق شکل (۶-۳: الف)، پلاستیک در سیمان افزایش و مطابق شکل (۶-۳: ب) ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر

با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، کرنش پلاستیک در سیمان افزایش و ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد.



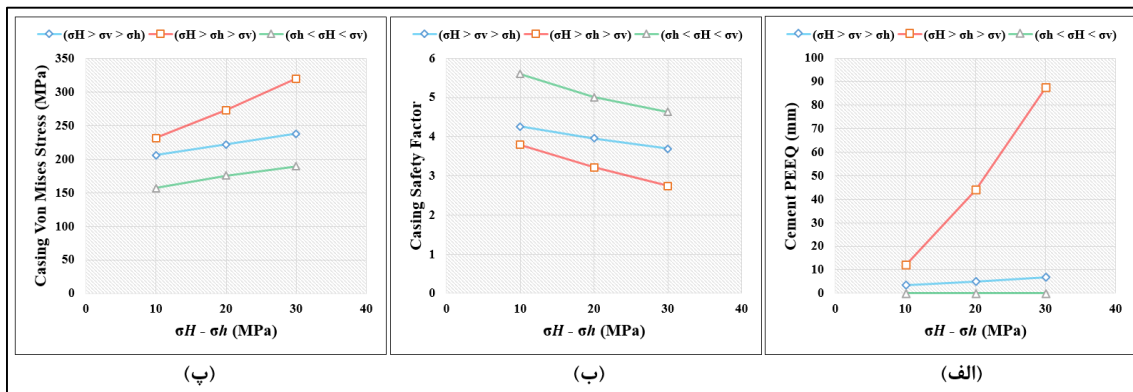
شکل ۳-۶: تغییرات کرنش پلاستیک ایجاد شده در سیمان (الف) و تغییرات ضریب ایمنی لوله‌جداری (ب) با افزایش اختلاف تنش‌های افقی

۲-۲-۶ شرایط آنیزوتروپیک تنش‌های برجا

در شرایط آنیزوتروپیک خواص سازند از جمله تنش در جهات مختلف متغیر است و برای تحلیل این شرایط مطابق جدول (۲-۶)، حالت‌های ۱ تا ۳ در نظر گرفته شده است. اختلاف تنش‌های افقی در سه حالت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال تحلیل حساسیت می‌شوند. به عبارت دیگر تنش افقی حداقل تا مرحله‌ای که σ_h و σ_H با هم برابر شوند و از شرایط آنیزوتروپیک به ارتوتروپیک تبدیل شوند، تغییر می‌کنند. حالت ۳، ردیف ۷ در جدول (۲-۶)، که با رنگ قرمز نشان داده شده است بیانگر شرایط تنش‌های برجا در مدل عددی مرجع است. مطابق شکل (۴-۶) با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، پلاستیک در سیمان (الف) و تنش‌های Von Mises (پ) افزایش پیدا می‌کنند و در پی آن، ضریب ایمنی لوله‌جداری (ب) طبق معیار Von Mises کاهش می‌یابد.

جدول ۶-۲: شرایط آنیزوتروپیک تنش‌های برجا

σ_h / σ_v	σ_H / σ_v	$\sigma_H - \sigma_h (Mpa)$	$\sigma_v (Mpa)$	شرایط تنش	حالت	ردیف
۰/۷۴	۰/۸۵	۱۰	۹۵	آنیزوتروپیک ($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$)	۱	۱
۰/۷	۰/۹۱	۲۰				۲
۰/۶۳	۰/۹۵	۳۰				۳
۱/۰۵	۱/۱۵	۱۰	۹۵	آنیزوتروپیک ($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)	۲	۴
۱/۱	۱/۳	۲۰				۵
۱/۱۵	۱/۴۷	۳۰				۶
۰/۹۵	۱/۰۵	۱۰	۹۵	آنیزوتروپیک ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$)	۳	۷
۰/۹	۱/۱	۲۰				۸
۰/۸۵	۱/۱۵	۳۰				۹



شکل ۶-۴: تغییر کرنش پلاستیک در سیمان، تنش Von Mises و فاکتور ایمنی لوله‌جداری با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی

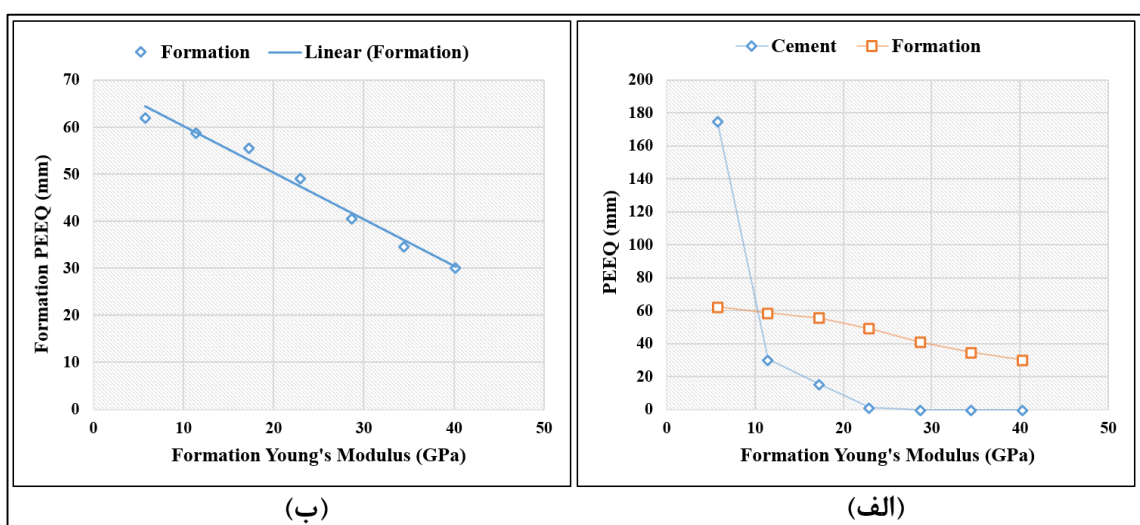
پس از تحلیل حساسیت بر روی شرایط توزیع تنش‌های اصلی در سازند، می‌توان نتیجه گرفت که بحرانی‌ترین حالت برای ایمنی لوله‌جداری و غلاف سیمان مربوط به شرایط اورتوتروپیک است که در آن ($\sigma_H = \sigma_h > \sigma_v$) و در شرایطی که تنش‌های افقی بزرگتر از تنش قائم باشند، ضریب ایمنی لوله‌جداری حداقل می‌شود. حداکثر کرنش در المان‌های مرزی بین سیمان و لوله‌جداری به دلیل اصطکاک کمتر نسبت به سیمان و سازند، ایجاد می‌شود که باعث جداسدن و ایجاد کانالی جهت عبور سیال می‌شود. لذا باید در طراحی دوغاب سیمان، افزایش‌های خاصی جهت افزایش چسبندگی سیمان و افزایش سطح اصطکاک، در نظر گرفته شود.

۶-۳ تاثیر پارامترهای مکانیکی سازند

ساده‌ترین مدل ساختاری برای توصیف رفتار سنگ، مدل الاستیک خطی است که این مدل پایه و

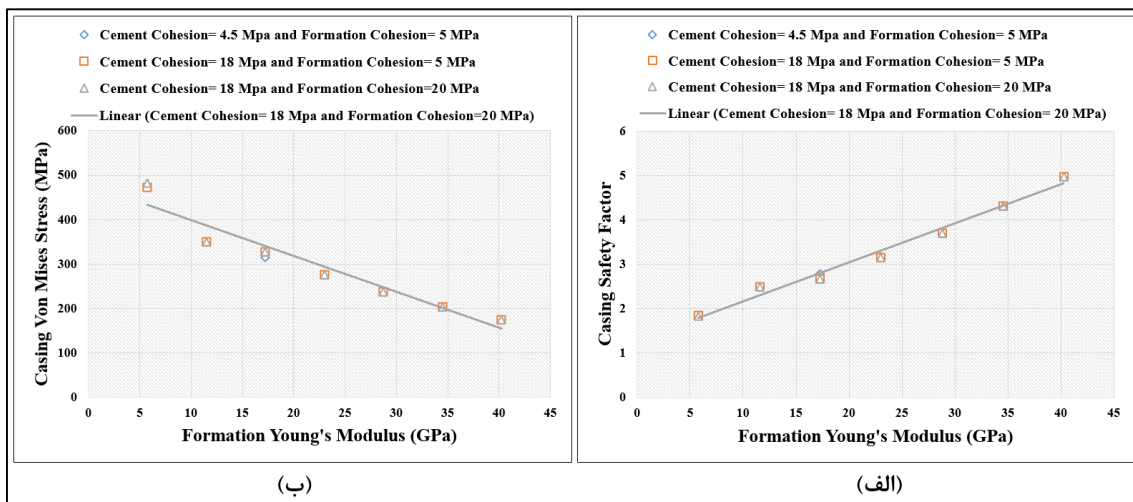
اساس محاسبات مکانیک سنگی است. این نظریه بر پایه قانون هوک که وابسته به مفاهیم تنش و کرنش است. مدول یانگ و ضریب پواسون دو پارامتری است که برای توصیف پاسخ الاستیک هر ماده‌ای از جمله سنگ مورد نیاز است. مدل سازی معیار رفتاری پلاستیک نسبت به الاستیک و در نظر گرفتن دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک، نتیجه قابل قبول تری را در پی خواهد داشت. در فصل چهارم با ساخت مدل ژئومکانیکی تک بعدی چاه، پارامترهای مدل رفتاری موهر-کولمب محاسبه شد که این پارامترهای الاستوپلاستیک، در این فصل جهت بررسی یکپارچگی چاه تحلیل پارامتری می‌شوند.

با افزایش مدول یانگ سازند، مطابق شکل (۵-۶: الف)، کرنش پلاستیک در سیمان و سازند کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سنگ‌های نرم نسبت به سنگ‌های سخت کرنش پلاستیک اطراف چاه بیشتر است. شکل (۵-۶: ب)، روند خطی کرنش پلاستیک در سازند نسبت به مدول یانگ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در قسمت (الف)، برای نشان دادن تاثیر مدول یانگ سازند بر کرنش پلاستیک، چسبندگی سازند و سیمان، ۲۵ درصد چسبندگی مدل مرجع بوده که به ترتیب، ۵ و ۴/۵ مگاپاسکال است. در قسمت (ب)، چسبندگی سیمان معادل چسبندگی در مدل مرجع (۱۸ مگاپاسکال) است که هیچ گونه کرنش پلاستیکی در غلاف سیمان ایجاد نمی‌شود.

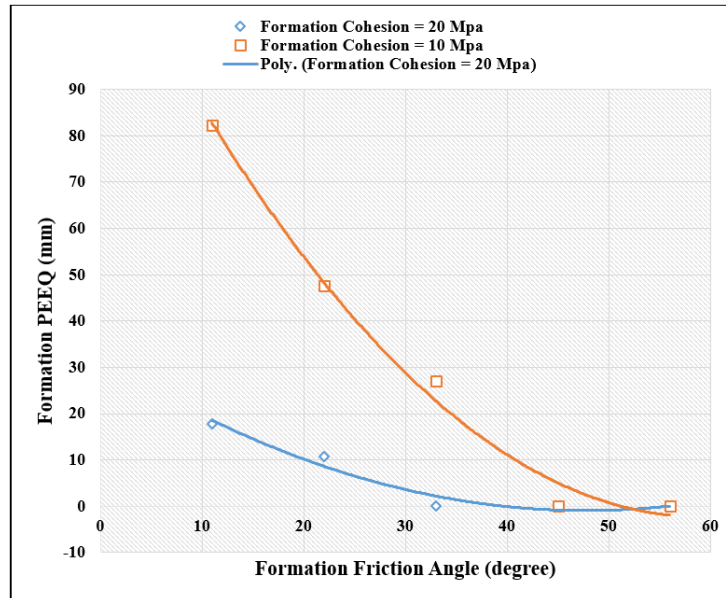


شکل ۵-۶: تغییر کرنش پلاستیک سازند و سیمان با افزایش مدول یانگ سازند

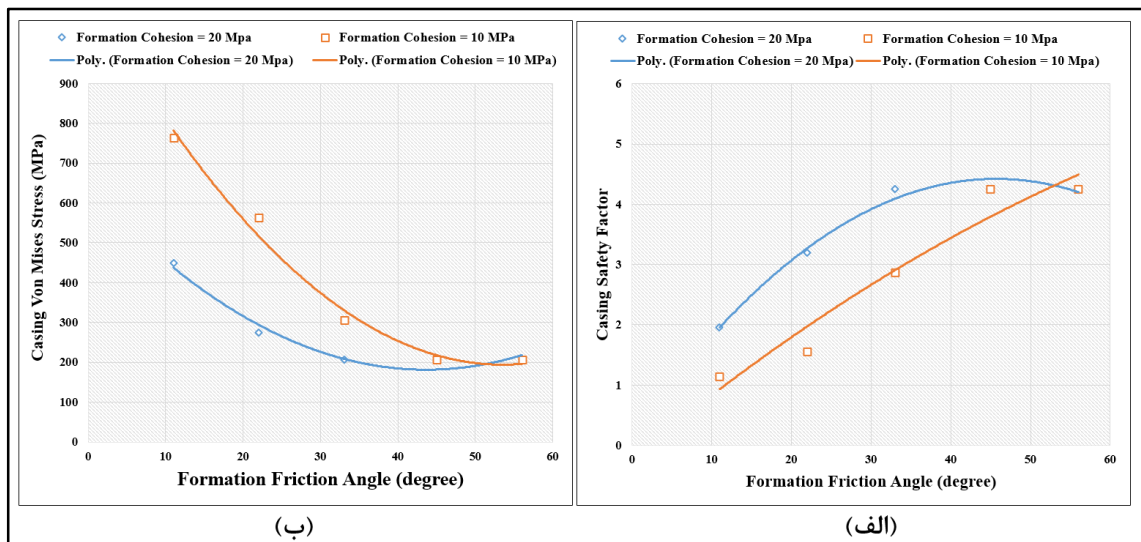
یکی از عوامل مهم در طراحی لوله‌جداری، دسترسی به اطلاعات مربوط به جنس سازند است. بنابراین پیش‌بینی ایمنی لوله‌جداری در سازندهای مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. مطابق شکل (۶-۶) با افزایش مدول یانگ سازند، تنش‌های Von Mises کاهش و ضریب ایمنی لوله‌جداری افزایش می‌یابد. با کاهش مدول یانگ و رسیدن به مقدار ۲۵ درصد مدول یانگ مرجع (۲۳ گیگاپاسکال)، مقدار تنش Von Mises حدود ۶۰ درصد افزایش یافته و در پی آن ضریب ایمنی لوله‌جداری نیز ۶۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۶-۶: روند خطی تغییرات تنش Von Mises و ضریب ایمنی لوله‌جداری با افزایش مدول یانگ سازند زاویه اصطکاک داخلی دومین پارامتر پلاستیک سازند است که در این بخش از تحقیق اثر آن بر یکپارچگی چاه بررسی می‌شود. این پارامتر توان سازند برای مقابله با تنش‌های برشی است. همانطور که در شکل (۶-۷) نیز مشخص است، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ، کرنش پلاستیک در سازند کاهش می‌یابد که شیب کاهش آن با افزایش چسبندگی سازند، کاهش می‌یابد. روند تغییرات این پارامتر طبق رگرسیون گرفته شده، با ضریب اطمینان بالایی از روابط قطبی پیروی می‌کند. شکل (۶-۸) نیز تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر لوله‌جداری را نشان می‌دهد. با افزایش این زاویه، تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری کاهش یافته که در پی آن ضریب ایمنی لوله‌جداری افزایش می‌یابد.



شکل ۶-۷: تغییرات کرنش پلاستیک سازند با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سازند

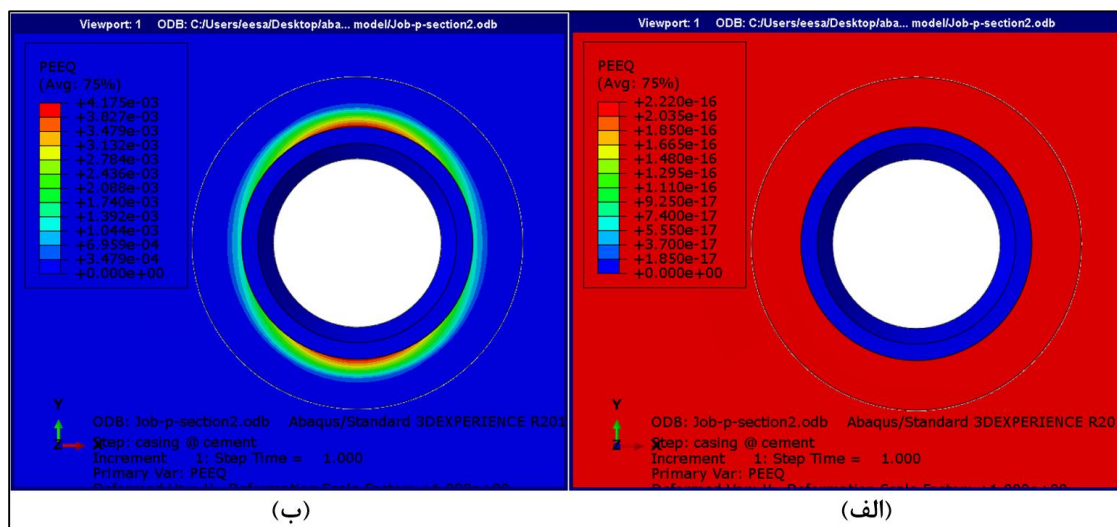


شکل ۶-۸: تغییرات ضریب ایمنی و تنش‌های Von Mises لوله‌جداری با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سازند

۶-۴ تاثیر پارامترهای مکانیکی سیمان

به دلیل پایین بودن پارامترهای مکانیکی سیمان نسبت به سازند و لوله‌جداری، احتمال ایجاد کرنش‌های پلاستیک در سیمان بیشتر است. از طرفی چون سیمان از لحاظ طراحی، نسبت به لوله‌جداری قابلیت کنترل بیشتری دارد، لذا بیشتر مورد توجه قرار دارد. پس از تحلیل مدل مرجع در فصل قبل، به این نتیجه می‌توان دست یافت که چسبندگی غلاف سیمان در چاه مورد نظر بالا بوده که همین امر از

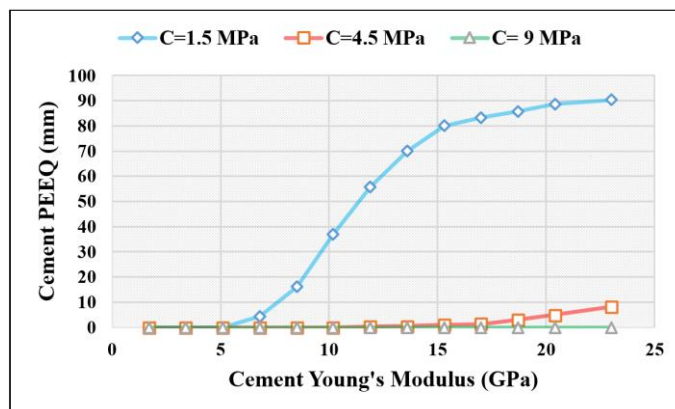
پلاستیک شدن آن جلوگیری می‌کند. بنابراین می‌توان گفت چسبندگی پارامتر کلیدی در تحلیل پارامتری است که پارامترهای دیگر بر مبنای آن تحلیل می‌شوند. در این بخش از تحقیق برای درک بهتر رفتار سیمان و تاثیر پارامترهای مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر کرنش پلاستیک سیمان، تمرکز تنش Von Mises در لوله‌جداری و در ادامه ضریب ایمنی لوله‌جداری، تحلیل حساسیت بر این پارامترها انجام می‌شود. دلیل از دست رفتن یکپارچگی چاه در این تحقیق، کرنش‌های برگشت ناپذیر حاصل از تنش‌های برجا وارد بر چاه است. همانطور که در شکل (۶-۱۱: الف) نشان داده شده است، چسبندگی سیمان در مدل مرجع، ۱۸ مگاپاسکال است که تحت این شرایط سیمان به مرحله کرنش پلاستیک نمی‌رسد. همچنین کرنش ایجاد شده در آن از نوع الاستیک و برگشت-پذیر است. با کاهش چسبندگی، کرنش پلاستیک سیمان افزایش یافته و کرنش ایجاد شده در آن از نوع پلاستیک و برگشت‌ناپذیر می‌شود. شکل (۶-۱۱: ب)، کرنش پلاستیک در غلاف سیمان با چسبندگی ۱/۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. حداکثر کرنش در مرز بین سیمان و لوله‌جداری، در جهت تنش افقی حداکثر رخ می‌دهد.



شکل ۶-۹: تغییرات کرنش پلاستیک در سیمان با چسبندگی ۱۸ (الف) و ۱/۵ (ب) مگاپاسکال

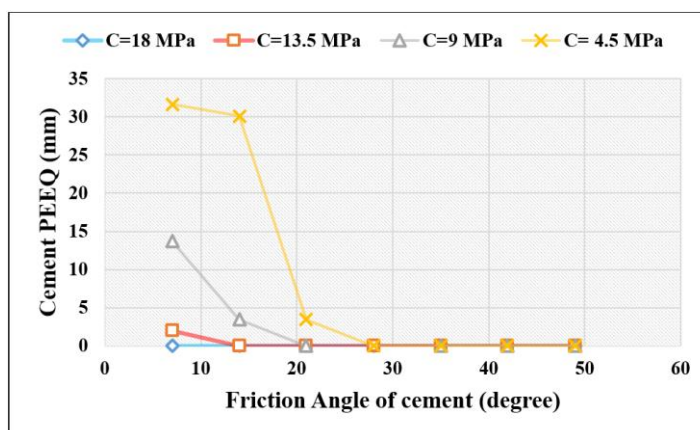
دلیل از دست رفتن یکپارچگی چاه در این تحقیق، کرنش‌های برگشت ناپذیر حاصل از تنش‌های برجا وارد بر چاه است. مطابق شکل (۶-۱۲)، با افزایش مدول یانگ کرنش پلاستیک در سیمان افزایش

و کرنش‌های الاستیک در سیمان کاهش می‌یابد. هر چه چسبندگی سیمان کاهش یابد، در مدول‌های پایین‌تری به کرنش پلاستیک می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش مدول یانگ، انعطاف پذیری غلاف سیمان کاهش و شکنندگی آن افزایش می‌یابد.



شکل ۶-۱۰: تغییرات کرنش پلاستیک با افزایش مدول یانگ سیمان

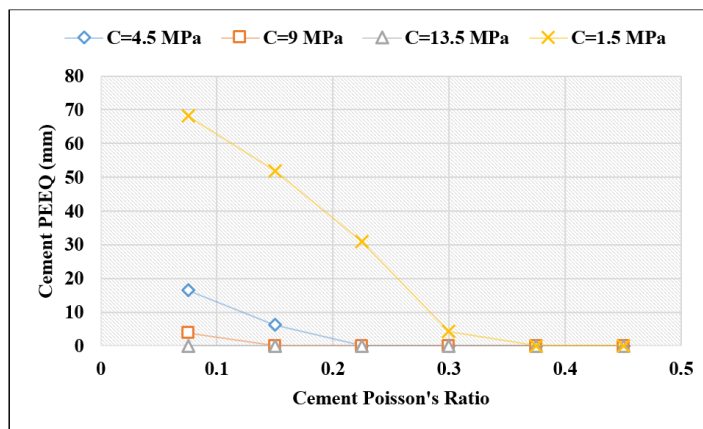
مطابق شکل (۶-۱۳)، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی کرنش پلاستیک در سیمان کاهش می‌یابد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سیمان در مدل مرجع به ترتیب، ۱۸ مگاپاسکال و ۲۸ درجه است. تحت این شرایط هیچ‌گونه کرنش پلاستیکی در سیمان اتفاق نمی‌افتد و کرنش‌های ایجاد شده از نوع الاستیک هستند. با کاهش چسبندگی، پیوند بین ذرات سیمان ضعیف‌تر خواهد شد که در پی آن کرنش ایجاد شده از نوع برگشت‌ناپذیر می‌شود. در نهایت سیمان در زاویه‌های بالاتری به این کرنش‌ها می‌رسد.



شکل ۶-۱۱: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سیمان

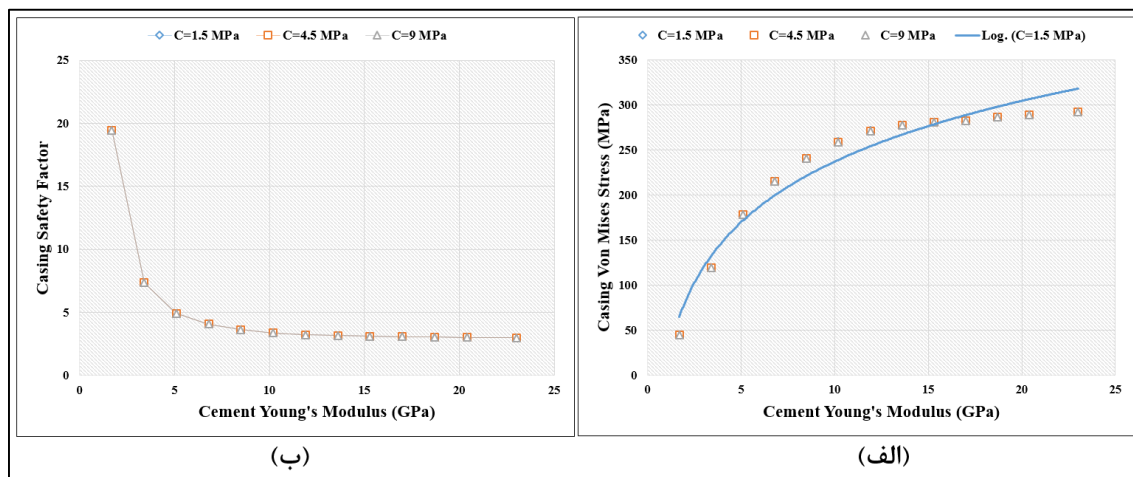
مطابق شکل (۶-۱۴) با افزایش ضریب پواسون، کرنش پلاستیک در سیمان کاهش می‌یابد. به عبارت

دیگر با افزایش ضریب پواسون غلاف سیمان انعطاف پذیر می شود که در پی آن کرنش های ایجاد شده از نوع الاستیک و برگشت پذیر هستند.



شکل ۶-۱۲: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان با افزایش ضریب پواسون سیمان

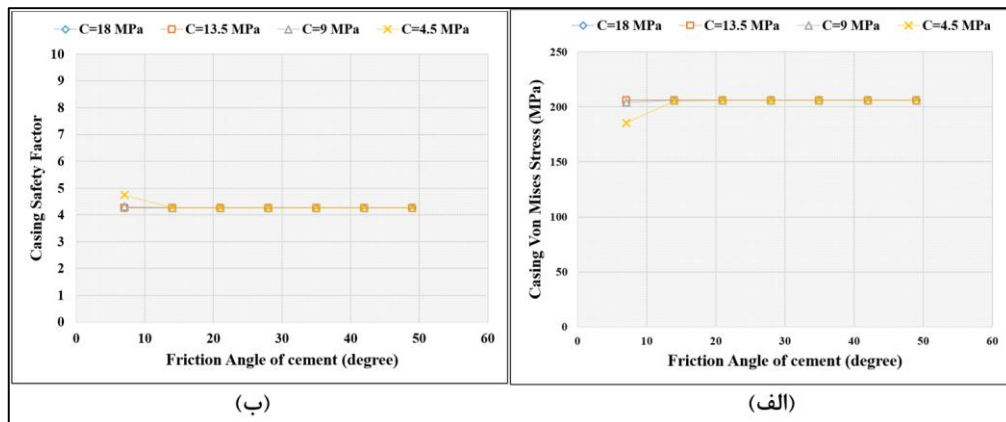
شکل (۶-۱۵) تغییر تنش های Von Mises (شکل الف) و فاکتور ایمنی لوله جداری (شکل ب) نسبت به مدول یانگ مختلف سیمان را نشان می دهد. با افزایش مدول یانگ سیمان، تنش به صورت لگاریتمی افزایش یافته که در پی آن ضریب ایمنی لوله جداری کاهش می یابد.



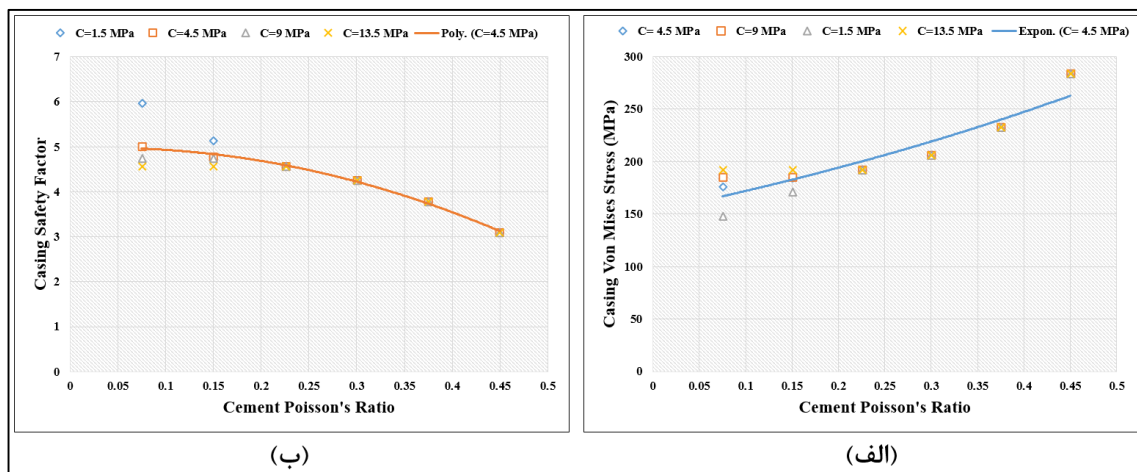
شکل ۶-۱۳: تغییر حداکثر تنش (الف) و ضریب ایمنی (ب) لوله جداری با افزایش مدول یانگ سیمان

شکل (۶-۱۶) تغییر تنش های Von Mises (شکل الف) و ضریب ایمنی لوله جداری (شکل ب) نسبت به زاویه اصطکاک داخلی مختلف سیمان را نشان می دهد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، تنش و فاکتور ایمنی لوله جداری تقریباً ثابت می ماند. با کاهش همزمان چسبندگی، تنش Von Mises روند

صعودی و ضریب ایمنی لوله‌جداری روند نزولی خواهند داشت.



شکل ۶-۱۴: تغییر تنش (Von Mises) (الف) و ضریب ایمنی (ب) لوله‌جداری با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سیمان
 شکل (۶-۱۷) تغییر تنش‌های Von Mises (شکل الف) و فاکتور ایمنی لوله‌جداری (شکل ب) نسبت
 به ضریب پواسون مختلف سیمان را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب پواسون، تنش به صورت نمایی
 افزایش یافته که در پی آن ضریب ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که چسبندگی
 سیمان اثر زیادی بر این دو پارامتر ندارد.



شکل ۶-۱۵: تغییر تنش (Von Mises) (الف) و فاکتور ایمنی (ب) لوله‌جداری با افزایش ضریب پواسون سیمان

۵-۶ تاثیر پارامترهای تماس اصطکاکی معیار کولمب بر یکپارچگی چاه

علاوه بر شکست در سیمان، مکانیزم‌های دیگری نیز وجود دارند که یکپارچگی سیمان را کنترل می‌کنند. به طور خاص سطح تماس بین سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری به عنوان نقاط ضعف شناخته شده است. عدم پیوند مناسب در سطوح تماس باعث ایجاد کانال‌هایی برای عبور سیال می‌شود. حتی زمانی که پیوند به خوبی انجام شود باز هم مقاومت سطوح تماس کمتر از مقاومت خود سیمان می‌باشد. مکانیزم کرنش پلاستیک در سیمان با در نظر گرفتن سطح تماس، طبق مدل اصطکاکی کولمب مدل‌سازی می‌شود. عموماً این سطوح تماس به دو صورت مدل می‌شود:

(۱) به صورت کاملاً به هم چسبیده، به طوری که سیمان نسبت به سازند و لوله‌جداری هیچ‌گونه لغزشی ندارد و در واقع تغییرمکان نسبی سیمان نسبت به مواد اطراف صفر می‌باشد.

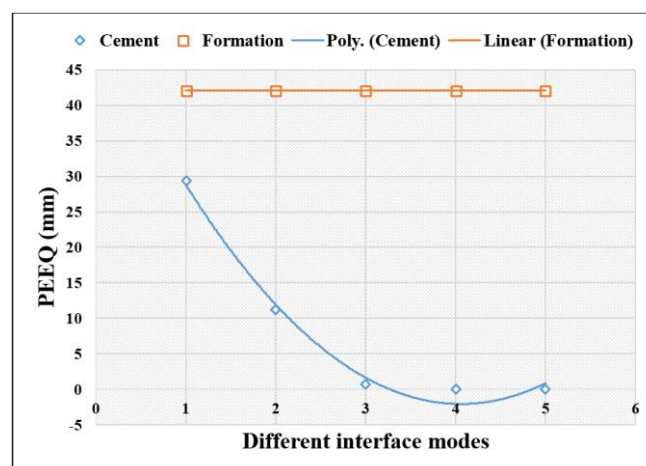
(۲) به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش و جدا افتادگی بین سطوحی که باهم در تماس هستند، وجود داشته باشد. در این روش برای مدل‌کردن تغییرمکان نسبی از المان سطح تماس در نرم‌افزار ABAQUS استفاده می‌شود.

در این بخش از تحقیق با فراهم آوردن زمینه درک بهتر رفتار واقعی اندرکنش سازند- سیمان- لوله‌جداری، هر دو روش مدل‌سازی شده است. جدول (۳-۶) حالت‌های مختلف تماس اصطکاکی را نشان می‌دهد.

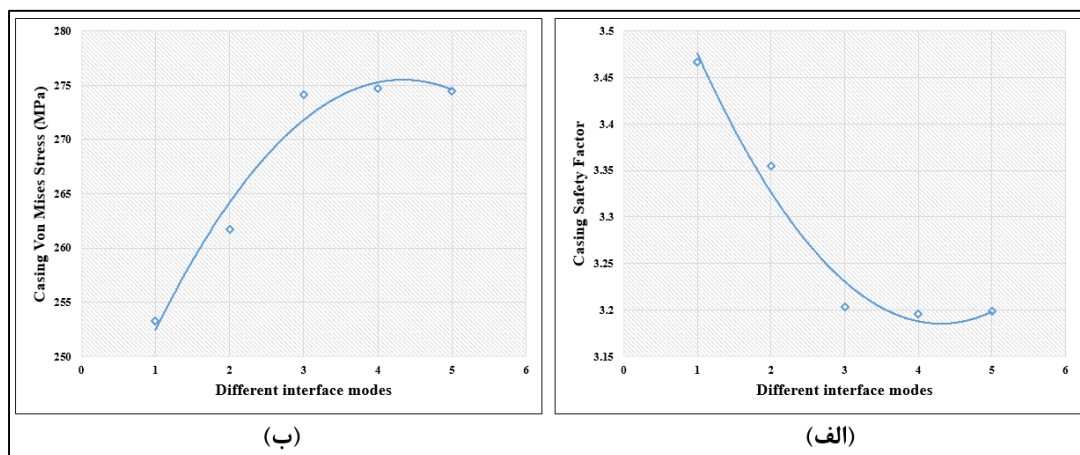
جدول ۳-۶: تحلیل حساسیت روی پارامترهای اصطکاکی سطح تماس

ضریب اصطکاک		مقاومت برشی (Kpa)		حالت
سیمان- لوله‌جداری	سازند- سیمان	سیمان- لوله‌جداری	سازند- سیمان	
۰/۱	۰/۲۵	۳۶	۳۶۰	۱
۰/۲	۰/۳۵	۵۲	۵۲۰	۲
۰/۳	۰/۴۵	۶۸	۶۸۰	۳
۰/۴	۰/۵۵	۸۴	۸۴۰	۴
۰/۵	۰/۶۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۵

همانطور که در شکل (۶-۹) نشان داده شده است، کرنش پلاستیک در سیمان با افزایش تنش برشی و اصطکاک سطح تماس، کاهش یافته است. لازم به ذکر است که کرنش پلاستیک حداکثر در سطح تماس سیمان و لوله‌جداری است. برای اتصال سیمان به فولاد نیاز به طراحی سیمان با افزایش‌های مخصوص و اطمینان از رطوبت کافی سیمان در عمق مورد بررسی می‌باشد. تغییر پارامترهای اصطکاکی کولمب تاثیری بر کرنش پلاستیک سازند ندارد و با افزایش آن‌ها، کرنش پلاستیک در سازند ثابت می‌ماند. مدل مرجع در حالت چسبندگی کامل نیز ساخته شد که پلاستیک در سیمان صفر و پلاستیک در سازند افزایش یافته و به (۵۸/۵۴ میلی‌متر) می‌رسد. هنگامی که سیمان و سنگ کاملاً به هم می‌چسبند، به صورت لایه‌ای یکنواخت عمل می‌کنند که در چنین شرایطی توسعه کرنش پلاستیک در غلاف سیمان کاهش یافته و فشار تنش‌های برجا عمدتاً در سازند متمرکز می‌شوند. تنش در لوله‌جداری به ۲۵ مگاپاسکال کاهش یافته و کرنش پلاستیک در سازند افزایش می‌یابد. شکل (۶-۱۰)، تغییرات ضریب ایمنی (الف) و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری (ب) را نشان می‌دهد که با افزایش تنش برشی و اصطکاک بین سطوح تماسی، ایمنی لوله‌جداری کاهش و تنش‌ها افزایش می‌یابند. این تغییرات در حالت‌های (۴ و ۵) ثابت می‌مانند.



شکل ۶-۱۰: تغییرات کرنش پلاستیک سیمان و سازند نسبت به تغییر پارامترهای اصطکاکی کولمب



شکل ۶-۱۷: تغییرات فاکتور ایمنی و تنش‌های (Von Mises) در لوله‌جداری با تغییر پارامترهای اصطکاکی کولمب

۶-۶ جمع‌بندی

آگاهی از شرایط، مقدار و جهت تنش‌های اولیه اهمیت زیادی دارد و ندانستن آن ممکن است خسارت‌های جبران ناپذیری را برای شرکت‌های نفتی به همراه داشته باشد. با توجه به هدف تحقیق، تاثیر شرایط تنش‌های برجا، اصطکاک و مقاومت سطوح تماس سیمان - سازند و سیمان - لوله‌جداری و همچنین اثر پارامترهای مکانیکی سازند و سیمان بر یکپارچگی چاه با مطالعات پارامتری بررسی شد. در شرایط ارتوتروپیک و ایزوتروپ با افزایش نسبت تنش‌های افقی به تنش قائم، برآیند نیروهای افقی وارد بر سیمان زیاد شده که در پی آن حداکثر کرنش پلاستیک در سیمان و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری افزایش و در پی آن ضریب ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد. با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، کرنش پلاستیک در سیمان افزایش و ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد. در شرایط آنیزوتروپیک، با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، پلاستیک در سیمان و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری افزایش پیدا می‌کنند و در پی آن، فاکتور ایمنی لوله‌جداری طبق معیار Von Mises کاهش می‌یابد. با افزایش مدول یانگ سازند، کرنش پلاستیک در سیمان و سازند کاهش می‌یابد. با افزایش چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون، سنگ انعطاف پذیرتر شده و کرنش‌های ایجاد شده در آن اکثراً از نوع الاستیک بوده و کرنش پلاستیک کاهش می‌یابد. غلاف سیمان با مدول یانگ بالا، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک پایین، بیشترین تمرکز کرنش پلاستیک را به همراه دارد.

فصل ہفتم

پیچہ گیری و پیشہ داری

۷-۱ مقدمه

پارامترهای ژئومکانیکی سازند از نگارهای چاه‌پیمایی برآورد می‌شوند. بدین منظور، به دلیل عدم وجود مغزه، از طریق نگارهای پتروفیزیکی موجود و روابط تجربی مناسب برای منطقه، مدل‌سازی ژئومکانیکی تک بعدی چاه نفت در یکی از میادین جنوب غرب کشور انجام شد.

پس از ساخت مدل ژئومکانیکی، با استفاده از اطلاعات مربوط به وزن گل، گزارش حفاری و معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی کولمب، مدل ساخته شده اعتبار سنجی شده تا بتوان از داده‌های تخمینی مطمئن جهت ساخت مدل عددی مرجع استفاده کرد.

پس از تفسیر و تحلیل مدل ژئومکانیکی و با در نظر گرفتن نگار کالیپر، چاه مورد مطالعه در عمق مخزن به پنج مقطع تقسیم بندی شد که با توجه به افزایش قطر چاه، مقاطع (۲ و ۴)، به عنوان مقطع‌های بحرانی جهت تحلیل عددی انتخاب شدند.

پارامترهای مکانیکی سیمان در آزمایشگاه برای اعتبار سنجی مدل عددی مرجع محاسبه شدند. آزمایش‌های تک محوره، سه‌محوره و برزیلی برای محاسبه پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کششی سیمان انجام شد. همچنین آزمایش برش بر روی درزه مصنوعی بین سیمان و سنگ نیز انجام شد که پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت برشی سطح تماس بین سیمان و سازند (سنگ آهک) تعیین شد.

دو مدل مرجع در مقطع‌های بحرانی انتخاب شده ساخته شد. این دو مدل از لحاظ جابجایی، تنش-های مماسی، شعاعی و تنش‌های Von Mises اطراف چاه در مراحل حفاری و تکمیل چاه، مقایسه شدند که مدل دوم در عمق ۳۸۰۰ تا ۳۸۰۵ متری، به عنوان مدل بحرانی‌تر انتخاب شد.

در این تحقیق علاوه بر فرض (محدودیت) چسبندگی کامل بین سطوح تماسی، با استفاده از روش پنالتی مبتنی بر قانون اصطکاکی کولمب در نرم‌افزار ABAQUS، سطوح تماسی با مجاز بودن جداشدگی و لغزش در سطح تماس در نظر گرفته شد.

۲-۷ نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بسیار بالای یکپارچگی چاه در صنعت نفت، در این تحقیق سعی بر شناخت تاثیر عوامل ژئومکانیکی سازند، مشخصات مکانیکی سیمان و پارامترهای اصطکاکی کولمب بر پلاستیک سیمان و ایمنی لوله‌جداری طبق معیار شکست Von Mises شده است.

بسیاری از محققان برای ساده سازی مسئله تنش‌های افقی را باهم برابر قرار می‌دهند، اما حقیقت این است که این دو تنش همیشه با هم برابر نیستند. در این تحقیق شرایط مختلف تنش‌های برجا از جمله: اورتوتروپیک، ایزوتروپیک و آنیزوتروپیک و اثر آنها بر یکپارچگی چاه در نظر گرفته شدند.

در هر دو مدل مرجع ساخته شده، به دلیل بالا بودن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، هیچ گونه کرنش پلاستیکی در سیمان و سازند اتفاق نمی‌افتد. بنابراین چاه مورد نظر تحت شرایط مدل مرجع، ایمن بوده و خطری از لحاظ کرنش‌های پلاستیک آن را تهدید نمی‌کند. برای درک بهتر رفتار غلاف سیمان و تاثیر شرایط تنش‌های برجا در این تحقیق چسبندگی کاهش یافت.

در شرایط اورتوتروپیک و ایزوتروپیک، با افزایش نسبت تنش‌های افقی به قائم کرنش پلاستیک در سیمان و تنش‌های Von Mises در لوله‌جداری افزایش و در پی آن فاکتور ایمنی لوله‌جداری کاهش می‌یابد.

در شرایط اورتوتروپیک با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی و رسیدن به حالت ایزوتروپیک (افزایش تنش افقی حداقل)، کرنش پلاستیک در سیمان کاهش و فاکتور ایمنی لوله‌جداری افزایش می‌یابد. با دور شدن از شرایط ایزوتروپیک و افزایش تنش افقی حداکثر، کرنش پلاستیک در سیمان افزایش و فاکتور ایمنی لوله‌جداری کاهش یافته است.

در شرایط آنیزوتروپیک تنش‌های برجا، با افزایش اختلاف بین تنش‌های افقی، پلاستیک در سیمان و تنش‌های Von Mises افزایش پیدا می‌کنند و در پی آن، فاکتور ایمنی لوله‌جداری طبق معیار Von Mises کاهش می‌یابد.

پس از تحلیل حساسیت بر روی شرایط توزیع تنش‌های اصلی در سازند، می‌توان نتیجه گرفت که بحرانی‌ترین حالت برای ایمنی لوله‌جداری و غلاف سیمان مربوط به شرایط اورتوتروپیک است که در آن $(\sigma_H = \sigma_h > \sigma_v)$ و نسبت تنش‌های افقی به قائم $1/4$ است.

با افزایش مدول یانگ سازند، کرنش پلاستیک در سیمان و سازند کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سنگ‌های نرم نسبت به سنگ‌های سخت کرنش پلاستیک اطراف چاه بیشتر است. کرنش پلاستیک حداکثر در سطح تماس بین سیمان و لوله‌جداری رخ می‌دهد. کرنش‌های پلاستیک باعث ایجاد میکروکانال‌های درونی (بین سیمان و لوله‌جداری) در غلاف سیمان می‌شود.

با افزایش چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون، سنگ انعطاف پذیرتر شده و کرنش‌های ایجاد شده در آن اکثراً از نوع الاستیک بوده و کرنش پلاستیک کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر کرنش پلاستیک در جهت تنش افقی حداقل رخ می‌دهد که این کرنش‌های پلاستیک در سازند، مسبب ایجاد میکروکانال‌های بیرونی (بین سیمان و سازند) در اطراف چاه می‌شود.

تحلیل عددی به روش المان محدود نشان داد که غلاف سیمان با مدول یانگ بالا، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک پایین، بیشترین تمرکز کرنش پلاستیک را به همراه دارد. چسبندگی و مدول یانگ نقش مهمی را در تغییر شکل پلاستیک سیمان در طول عمر چاه ایفا می‌کنند.

همچنین تحلیل عددی نشان داد که دوغاب سیمان باید به گونه‌ای طراحی شود که پس از سخت شدن، مدول یانگ پایین‌تری نسبت به مدول سازند داشته باشد.

۳-۷ پیشنهادها

جهت ارائه یک مدل قابل اعتماد و ارزشمند، نیاز به داده‌های گسترده‌ای از چاه‌های نفت در منطقه مورد مطالعه است. توصیه می‌شود که مدل عددی مرجع در چاه‌های مختلف بر اساس حجم گسترده‌ای از داده‌ها به ویژه بر اساس اندازه‌گیری‌های درون چاهی و آزمایشگاهی انجام شود.

استفاده از سایر ویژگی‌های مرتبط با سازند مانند درزه‌داری و شکستگی‌هایی که از لاگ‌های تصویری

و مغزه‌گیری برآورد می‌شود، می‌تواند در بهتر شدن مدل‌سازی عددی یکپارچگی چاه نفت با نگاه ویژه به سازند، کمک قابل توجهی کند. پیشنهاد می‌شود که با دسترسی به این اطلاعات و با استفاده از نرم‌افزارهای عددی المان مجزا، مدل عددی حاضر توسعه یابد.

با توجه به اهمیت پارامترهای اصطکاکی سطح تماس در تحلیل‌های عددی، پیشنهاد می‌شود که آزمایش‌های آزمایشگاهی برای به دست آوردن این پارامترها در مرز بین سیمان و لوله‌جداری نیز انجام شود.

ویژگی‌های مکانیکی سازند، سیمان و لوله‌جداری با افزایش حرارت در نرخ‌های متفاوت، مطابق با ویژگی‌های حرارتی آنها تغییر می‌کنند. بنابراین با دسترسی به اطلاعات دمایی مربوط به چاه مورد مطالعه و کوپل ترمو - هیدرو مکانیک، می‌توان مدل عددی ساخته شده را توسعه داد.

در نظر گرفتن انقباض و انبساط در سیمان و تحلیل عددی اثر این دو پارامتر، تحلیل‌های دینامیکی و اثر سازندهای شکل‌پذیر در طولانی مدت بر یکپارچگی چاه توصیه می‌شود.

مدل مرجع ساخته شده در مرحله تکمیل چاه تحلیل شده است. پیشنهاد می‌شود که مراحل شکست هیدرولیکی و تولید نیز در این مدل گنجانده شود و اثر پارامترهای مکانیکی سیمان در این مراحل بررسی شود.

نحوه آماده سازی نمونه های سیمان و شرایط آزمایشگاه نسبت به میدان، تاثیر زیادی بر تعیین پارامترهای مکانیکی سیمان دارد. لذا برای اندازه‌گیری دقیق این پارامترها، پیشنهاد می‌شود تاثیر شرایط محیطی بررسی شود.

- آشتیانی عبدی، ه. امیری بختیار، ح (۱۳۸۹). "پیش‌بینی و کنترل پدیده مچالگی لوله‌جداری با استفاده از تحلیل ژئومکانیکی سازندها در یکی از میداین نفتی ایران" اکتشاف و تولید، ۵۳، شماره ۷۴.
- الوندی، عذیر (۱۳۹۳). بررسی پایداری چاههای نفت به روش عددی، سمینار دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس
- ترابی خواه. مسعود، رمضان‌زاده. احمد، تخم‌چی. بهزاد، ملقب. عبدالله (۱۳۹۴). ساخت مدل ژئومکانیکی تک بعدی در میدان نفتی آغاجاری (مطالعه موردی)، اولین کنفرانس ژئومکانیک نفت، مرکز همایش‌های بین‌المللی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ۲۲-۲۴ اردیبهشت.
- دستخوان، ظهراب، مختاری، سید علی (۱۳۸۹). ارزیابی نمودارهای بندش سیمان و معرفی نرم‌افزار CBLE، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۷۱
- رحمانی، علی اکبر (۱۳۸۹). فیزیک سنگ. تهران. شرکت ملی نفت ایران.
- رحیمی لرکی. ا. عادل‌زاده. م. شهتا. ش (۱۳۸۸). "بررسی نتایج اسیدکاری چاه‌های نفتی آسماری میدان مارون با استفاده از آنالیز داده‌های چاه‌آزمایی"، مجله تولید و اکتشاف: ۵۹-۶۲.
- رضایی، م (۱۳۸۰). زمین‌شناسی نفت، دانشگاه تهران، گروه علوم زمین‌شناسی.
- سلطانیان. ح، عطایی. م، خالوکاکی. ر، کاظم‌زاده. ع (۱۳۹۵). "بررسی کارایی و اثر افزودنی مهارکننده مهاجرت گاز بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان حفاری در شرایط واقعی چاه، پژوهش نفت.
- شهبازی، رضا و یکرنگ‌نیا، محمد (۱۳۹۵). راهنمای کاربردی آباکوس به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک، نشر علم عمران.

صالحی کسایی، محمدحسین (۱۳۸۰). "مطالعه و تحقیق در مورد مهاجرت و نفوذ گاز به درون دوغاب سیمان چاه های نفت و روش های پیش گیری از آن". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، مهندسی شیمی.

فاتحی راد، منصور (۱۳۹۲). بررسی ناپایداری چاه های نفت ایران، پایان نامه کارشناسی دانشگاه صنعتی شریف

لطف اللهی. اسرافیل، ولی احمد سجادیان حمید سلطانیان (۱۳۸۵). ارزیابی دوغابهای سیمان چاههای یکی از مخازن جنوب و ارائه راهکار مناسب و جلوگیری از دوپهن شدگی لوله های جداری، اولین کنگره مهندسی نفت ایران، تهران، انجمن مهندسی نفت ایران.

محمدی بهبود، م (۱۳۹۵). "طبقه بندی ژئومکانیکی سازندهای نفتی بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری در حفاریهای عمیق". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.

مرادزاده، ع. قوامی ریایی، ر (۱۳۸۶). چاه پیمایی برای مهندسی، دانشگاه صنعتی شاهرود موقعیت جغرافیایی میدان های نفتی/گازی، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، مقیاس ۱:۲۰۰۰۰۰۰، ۱۳۸۸.

ولایتی، آرین (۱۳۹۳). "پژوهش آزمایشگاهی در خصوص دستیابی به بهترین فرمولاسیون دوغاب سیمان حفاری مقاوم در برابر گاز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، علوم کاربردی، مهندسی نفت.

Afsari, M, M.R Ghafoori, M Roostaeian, A Haghshenas, A Ataei, and R Masoudi. (2009). "Mechanical Earth Model (MEM): An Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study)." the 2009 SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Bahrain: Society of Petroleum Engineers. 1-12
Agbasimalo, N. C. (2012). Experimental study of the effect of drilling fluid contamination on the integrity of cement-formation interface.

- Akbar Ali, Anwar Husen, Tim Brown, Roger Delgado, Don Lee, Dick Plumb, Nikolay Smirnov, Rob Marsden. (2005). *Watching Rocks Change - Mechanical Earth Modeling*. Oilfield Review, Houston, Texas, USA: Schlumberger.
- Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1200-1211.
- Amamoo, S. J. (2012). *Analysis of high pressure effects on wellbore integrity using the distinct element method (Doctoral dissertation)*.
- Andrade, J. D. (2015). *Cement Sheath Integrity during Thermal Cycling*.
- Archer, S, and V Rasouli. (2012). "A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin." *Petroleum and Mineral Resources (Curtin University, Department of Petroleum Engineering)* 12.
- Arias, H. (2013). *Use of finite-element analysis to improve well cementing in HTHP conditions*. Texas A&M University.
- Asef, M. R., & Najibi, A. R. (2013). The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio. *Geophysics*, 78(3), D135-D142.
- Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic well log analysis (Vol. 16)*. Tulsa, OK: American association of petroleum geologists.
- Baret J. F. and Daccord G., How fluid loss influences primary cementing: literature review and methodology, SPE 25150, pp. 133-138, 1994
- Bois, A-P, A. Garnier, G. Galdiolo, and J-B Jaudet. Use of a Mechanicstic Model to Forecast Cement-Sheath Integrity for CO2 Storage. In SPE Internationa Conference on CO2 Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, 10-12 November 2010.
- Boresi, A. P., Schmidt, R. J., & Sidebottom, O. M. (1993). *Advanced mechanics of materials (Vol. 6)*. New York: Wiley.
- Bosma, M., K. Ravi, W. Driel, and G. Schreppers. Design approach to sealant selection for the life of the well. In SPE, (SPE 56536), 26 October, 1999. Houston, Texas.
- Bradley, W. B. (1979). Failure of inclined boreholes. *ASME J. Energy Resour. Technol*, 101(4), 232-239.
- Capasso, G. and Musso, G. (July, 2014). *Finite Element Well Integrity Analysis for Open-*

- Hole and Standard Completion Systems in a Producing Reservoir. 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain.
- Capasso, G., & Musso, G. (2010). Evaluation of Stress and Strain Induced by the Rock Compaction on a Hydrocarbon Well Completion Using Contact Interfaces with Abaqus. In Proc. ABAQUS Users' Conference, Providence RI, USA.
- Carter, L. G., & Evans, G. W. (1964). A study of cement-pipe bonding. *Journal of Petroleum Technology*, 16(02), 157-160.
- Charlez, P. A. (1991). *Rock mechanics, theoretical fundamentals*, vol. 1. Editions Technip, Paris, France.
- Cheung, P. R., & Beirute, R. M. (1985). Gas flow in cements. *Journal of petroleum technology*, 37(06), 1-041.
- Cooke, C.E. Jr., M.P. Kluck, and R. Medrano. 1983. Field Measurements of Annular Pressure and Temperature during Primary Cementing. *Journal of Petroleum Technology*, V. 35, n. 8. August 1983.
- De Andrade, J., Torsæter, M., Todorovic, J., Opedal, N., Stroisz, A., & Vralstad, T. (2014, March). Influence of casing centralization on cement sheath integrity during thermal cycling. In IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Dusseault, M. B., Bruno, M. S., & Barrera, J. (2001, January). Casing shear: causes, cases, cures. In SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Society of Petroleum Engineers.
- Eissa, E. A., & Kazi, A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(6).
- Etetim, D. U. (2013). Well Integrity behind casing during well operation. Alternative sealing materials to cement (Master's thesis, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk).
- Evans, G. W., & Harriman, D. W. (1972, January). Laboratory tests on collapse resistance of cemented casing. In Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Society of Petroleum Engineers.
- Feng, Y., Podnos, E., & Gray, K. E. (2016, June). Well integrity analysis: 3D numerical

- modeling of cement interface debonding. In 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Fernández-Ibáñez, F, F Cardona, M Holland, E Araujo, M Brudy, J Alvarellós, Y Ordóñez, and D Mateus. (2010). "3D Geomechanical Modeling for the Apiay and Suria Oil Fields (Llanos Orientales Basin, Colombia): Insights on the Stability of Reservoir Bounding Faults." the SPE Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. Lima, Peru: Society of Petroleum Engineers. 1-14.
- Fjær, E. (2009). Static and dynamic moduli of a weak sandstone. *Geophysics*, 74(2), WA103-WA112.
- Fjaer, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53). Elsevier.
- Fleckenstein, W. W., Eustes, A. W., & Miller, M. G. (2000, January). Burst induced stresses in cemented wellbores. In SPE/AAPG Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers.
- Fourmaintraux, D. M., Bois, A. P., & Fraboulet, B. (2005, January). Efficient wellbore cement sheath design using the SRC (System Response Curve) method. In SPE Europec/EAGE Annual Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Gholami, R, Moradzadeha, A, Rasouli, V, Hanachi, J. 2014. Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering* 6; 13-25.
- Goodwin, K. J., & Crook, R. J. (1992). Cement sheath stress failure. *SPE Drilling Engineering*, 7(04), 291-296.
- Gray, K.E., E. Podnos and E. Becker. 2007. Finite element studies of near-wellbore region during cementing operations: Part I. In SPE (106998-MS), 31 March-3 April, Oklahoma City, Oklahoma, U.S.A
- Haider, M.G., J. Sanjayan, and P.G. Ranjith 2012. Modeling of a Well-bore Composite Cylinder System for Cement Sheath Stress Analysis in Geological Sequestration of CO₂. In 46th U.S. Rock Mechanics Symposium, Chicago, IL, USA, 24-27 June 2012.
- Hemmatian, M., Tokhmchi, B., Rasouli, V., & Gholami, R. (2015). The impact of poor cementing casing damage: A numerical simulation study. *Journal of Mining and Environment*, 6(1), 41-53.

- Himmelberg, N. C. (2014). Numerical simulations for wellbore stability and integrity for drilling and completions. Missouri University of Science and Technology.
- Holland, M, M Brudy, W van der Zee, S Perumalla, and T Finkbeiner. (2010). "Value of 3D Geomechanical Modeling in Field Development - A New Approach Using Geostatistics." the 2010 SPE/DGS Annual Technical Symposium and Exhibition, 4-7 April. Al-Khobar, Saudi Arabia: Society of Petroleum Engineers. 1-7.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2009). Fundamentals of rock mechanics. John Wiley & Sons.
- Khaksar. A, Geoffrey Taylor. P, Fang. Zh, Kayes.T, Salazar. A, Rhaman.Kh. 2009."Rock strength from core and logs, where we stand and ways to go". EUROPEC/EAGE Conferece and exhibition. Amsterdam, Netherlands.
- Khandka, R. K. (2007). Leakage behind casing (Master's thesis, Institutt for petroleumsteknologi OG anvendt geofysikk).
- Kidambi, T., & Kumar, G. S. (2016). Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. Journal of Petroleum Science and Engineering, 141, 38-51.
- Lake, Larry. 2007. Drilling Engineering. Petroleum Engineering Handbook Vol.2 .Society of Petroleum Engineers Society of Petroleum Engineers, 770 pages.
- Lavrov, A., & Torsæter, M. (2016). Physics and mechanics of primary well cementing. Springer.
- Li, Y., Yuan, J., Qi, F., Liu, S., Wang, Z., & Qu, C. (2012, January). Analysis of cemented casing mechanical failure under arbitrary in-situ stress field coupling effects of downhole pressure and temperature. In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Maury, V. (1994, January). Rock failure mechanisms identification: A key for wellbore stability and reservoir behaviour problem. In Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Society of Petroleum Engineers.
- Midt garden, T. (2013). Advancement of P&A operations by utilizing new PWT concept from Archer (Master's thesis, University of Stavanger, Norway).
- Militzer, M.A.S. (1973). Einige Beitrageder geophysics zur primadatenerfassung im Bergbau, Neue Bergbautechnik, Lipzig. 3 (1): 21-25.
- Mitchell, S. A. (1997, August). Choosing corners of rectangles for mapped meshing. In

- Proceedings of the thirteenth annual symposium on Computational geometry (pp. 87-93). ACM.
- Mueller, D., & Eid, R. (2006, June). Characterizing Early-Stage Physical Properties, Mechanical Behavior of Cement Designs. In *Drilling Conference*, Miami Beach (FL).
- Najibi, A. R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Asef, M. R. (2017). Reservoir geomechanical modeling: In-situ stress, pore pressure, and mud design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, 31-39.
- Nawrocki, P. A., Dusseault, M. B., & Bratli, R. K. (1998). Use of uniaxial compression test results in stress modelling around openings in nonlinear geomaterials. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 21(1), 79-94.
- Ostadhassan, M., Zeng, Z., & Zamiran, S. (2012, January). Geomechanical modeling of an anisotropic formation-Bakken case study. In *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Pattillo, P.D. and Kristiansen, T.G. 2002. Analysis of Horizontal Casing Integrity in the Valhall Field. Paper SPE 78204 presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, USA, 20 - 23 October. DOI: 10.2118/78204-MS.
- Petty, S., Gastineau, J., Bour, D. L., & Ravi, K. (2003, January). Life Cycle Modeling of Wellbore Cement Systems Used for Enhanced Geothermal System Development. In *28th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford U, (27–29 January 2003).
- Plumb, R. A. (1994, January). Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Qiu, Kaibin, Ning Cheng, Xiangui Ke, Yang Liu, Lirong Wang, Yingru Chen, Yong Wang, and Pi Xiong. (2013). "3D Reservoir Geomechanics Workflow and Its Application to a Tight Gas Reservoir in Western China." the International Petroleum Technology Conference, 26–28 March. Beijing, China: International Petroleum Technology Conference. 1-11.
- Rahman, M. K., Chen, Z., & Rahman, S. S. (2003). Modeling time-dependent pore pressure due to capillary and chemical potential effects and resulting wellbore stability in shales. *Journal of energy resources technology*, 125(3), 169-176.

- Rahman, M. K., Naseby, D., & Rahman, S. S. (2000). Borehole collapse analysis incorporating time-dependent pore pressure due to mud penetration in shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 28(1-2), 13-31.
- Ravi, K., Bosma, M., & Gastebled, O. (2002, January). Improve the economics of oil and gas wells by reducing the risk of cement failure. In IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Robert M., "Gas flow in cements," SPE 11207, 1985.
- Schutjens, P. M. T. M., Hanssen, T. H., Hettema, M. H. H., Merour, J., De Bree, P., Coremans, J. W. A., & Helliesen, G. (2004). Compaction-induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: Data and model for elasticity-dominated deformation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 7(03), 202-216.
- Scott, J. B., & Brace, R. L. (1966). Coated Casings-A Technique for Improved Cement Bonding, *Drilling and Prod. Prac. API*, 43-47.
- Shahri, M.A., J.J. Schubert, and M. Amani (2005). Detecting and Modeling Cement Failure in High-Pressure/High-Temperature (HP/HT) Wells, Using Finite Element Method (FEM). Presented at the International Petroleum Technology Conference held in Doha, Qatar, 21-23 November 2005.
- Shen, Z., and F.E. Beck. (2012). Three-Dimensional Modeling of Casing and Cement Sheath Behavior in Layered, Nonhomogeneous Formations. Presented at IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition held in Tianjin, China, 9-11 July 2012.
- Standard, N. O. R. S. O. K. (2004). Well integrity in drilling and well operations. D-010, rev, 3.
- Stiles, D. (2006, January). Effects of long-term exposure to ultrahigh temperature on the mechanical parameters of cement. In IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Teodoriu, C., Kosinowski, C., Amani, M., Schubert, J., & Shadravan, A. (2013). Wellbore integrity and cement failure at HPHT conditions. *International Journal of Engineering*, 2(2), 2305-8269.
- Teodoriu, C., Ugwu, I. O., & Schubert, J. J. (2010, January). Estimation of Casing-Cement-Formation Interaction using a new analytical model. In SPE

- EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Thiercelin, M. J., & Plumb, R. A. (1994). A core-based prediction of lithologic stress contrasts in east Texas formations. *SPE Formation Evaluation*, 9(04), 251-258.
- Topini, C., Bertolo, F., Capasso, G., & Mantica, S. (2011, May). Buckling analysis for the long-term integrity evaluation of a hydrocarbon well. In *Proc. Simulia Customer Conference*, Barcelona, Spain.
- Ugwu, I. O. (2008). Cement fatigue and HPHT well integrity with application to life of well prediction (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
- Wang, H. F. (2017). *Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology*. Princeton University Press.
- Wang, H.F. (2000). *Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 304 P.
- Xu, Z. (1982). *Theory of Elasticity*, Vol. 2 of 2nd Edition. People Education press, Beijing 94-98.
- Yu, Mengjiao, Martin E. Chenevert, and Mukul M. Sharma. "Chemical–mechanical wellbore instability model for shales: accounting for solute diffusion." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38, no. 3-4 (2003): 131-143.
- Zang, A., & Stephansson, O. (2009). *Stress field of the Earth's crust*. Springer Science & Business Media.
- Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), 50-63.
- Zheng, J., X. Zhou, L. Shao, and X. Jin. 2010. Simple Three-Step Analytical Scheme for Prediction of Elastic Moduli of hardened Cement Paste. *J. of Mater. In Civ. Eng.* 2010.22:1191-1194.
- Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press.
- Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkbeiner, T., Grollmund, B. R., & Wiprut, D. J. (2003). Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1049-1076.

Abstract

The well integrity is an objective and a solution in order to protect human life, the environment and, eventually, the amount of oil produced during the life of the well. The necessity to maintain and repair the wells with long life and, on the one hand, high costs for the construction of new wells cause that studying the integrity of the well to be a vital element in managing the longevity of a well. Therefore, the better understanding of cement behavior plays an important role in ensuring the integrity of the well and can effectively be considered in preventing or controlling the failure of cavity tubes. This matter, while improving the level of security of the production process from the well, causes to control the unexpected and unconventional costs of oil and gas production (maintenance and repairing costs for wells, secondary cementing, etc.), which in some fields, such as Maroon and Kupal is very serious.

In this research, first, a one-dimensional geomechanical model is constructed of a well-covering formation using the petrophysical data of the considered well. At this stage, geomechanical features of the formation are estimated. The mechanical data related to the cement is determined using laboratory tests. The mechanical parameters of the cement sheath are determined using single-axis, three-axis and Brazilian tests on cement samples. Also, a direct cutting test on the artificial gap between the cement and the formation is also done, which the friction parameters of the contact surface between the cement and the formation are determined. Then, a reference numerical model is formed in two sections of the well with ABAQUS software using input data and according to the environmental conditions of the well. The critical model is chosen by comparing the constructed models and in the following, sensitivity analysis and parametric studies are conducted in order to examine the effect of situations of in situ stresses, friction parameters of contact surfaces and mechanical parameters of cement, and their effects are examined on the integrity of the well. The results show that the strain of plastic in the cement is increased and the casing safety factor is decreased by increasing the ratio of horizontal to vertical stresses and the difference in horizontal stresses. The cement sheath with high Young's modulus, Poisson coefficient, adhesion and low friction angle, have the highest concentration of plastic strain. Also, the strain of plastic in the cement is decreased by increasing friction of contact surfaces of formation - cement and cement - casing.

Keyword: Well Integrity, Geomechanical, Mechanical Parameters, Plastic Strain, Safety Factor



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Rock Mechanics Engineering

**Numerical modeling of oil well integrity with special attention
to cement mechanical properties of one oil well in one Iran's
southwestern field.**

By: Eissa Khodami

Supervisor:
Ahmad Ramezanzadeh

Advisor:
Mehdi Noroozi

July 2018