

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی عددی تأثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر بر

گسیختگی لوله‌های جداری چاه‌های نفتی

نگارنده: مهدی باجولوند

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضان‌زاده

بهمن‌ماه ۱۳۹۶

تقدیم به مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم:

مادرم، مهربانی که زندگیم را دیون مهر و عطف آن می دانم؛

پدرم، مهربانی مشوق، بردبار و حامی؛

برادرم، همراه، همیشگی و پشتیبانی زندگیم؛

و خواهران دلسوزم که مهرشان کمتر از مهر مادری نیست...

شکر و قدردانی

به مصداق «من لم یَشکُر المخلوق لم یَشکُر الخالق»، بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشید و گلشن سرای علم و دانش را بار آسمانی های کار ساز و سازنده بارور ساختند تقدیر و شکر نمایم.

همچنین شایسته است که مراتب شکر و قدردانی خود را از زحمات و راهنمایی های ارزشمند دکتر مهدی نوروزی به عل آورم.

در پایان، دست همه عزیزانی که مراد مسیر به سرانجام رساندن این تحقیق یاری نمودند، بخصوص دوستان عزیزم مهندس نوید افراسیابی و مهندس علیدین حجتی را به گرمی می فشارم، امیدوارم که با کسب موفقیت های بعدی بتوانم زحماتشان را جبران کنم.

تعهدنامه

اینجانب **مهدی باجولوند** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **مدل سازی عددی تأثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر بر گسیختگی لوله های جداری چاه های نفتی** تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان زاده متعهد می شوم:

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

تاریخ

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

طی چند دهه گذشته استفاده از روش‌های عددی به عنوان ابزاری کارآمد در پیش بینی رفتار مهندسی توده سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. توانایی شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته ساده تا محیط‌هایی با شرایط پیچیده درزه داری، هیدرولیکی و خزشی با سرعت و دقت بالا و همچنین قابلیت در نظر گرفتن تغییرات رفتار مواد در طول زمان از جنبه‌های مختلف مکانیکی، حرارتی و هیدرولیکی تمایل برای استفاده از این روش‌ها در حل مسائل ژئومکانیکی را افزایش داده است. گسیختگی لوله جداری چاه‌های نفتی تحت تأثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر، یکی از چالش‌های پیش روی صنعت نفت کشور است. با توجه به شرایط ویژه میدان نفتی کوپال از نظر حضور سازندهای نمکی در شرایط پر تنش، در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر خزش به عنوان یک رفتار وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر بر گسیختگی لوله جداری یکی از چاه‌های این میدان، از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار FLAC3D استفاده شده است. از آنجا که پاسخ مدل‌سازی‌های عددی به داده‌های ورودی بسیار وابسته است، بنابراین داده‌های میدانی مانند تنش‌های برجا و خصوصیات مکانیکی سازند اطراف چاه در عمق مورد نظر می‌بایست به دقت در مدل اعمال شود. در این پژوهش به دلیل عدم امکان دسترسی به داده‌های ژئومکانیکی جهت ایجاد مدل پایه و تأیید نتایج مدل‌سازی، از یک مطالعه مشابه که در منطقه مورد نظر انجام شده جهت مقایسه نتایج با داده‌های واقعی برجا استفاده شده است. پس از انتخاب نرم افزار عددی متناسب با شرایط مسئله، مدل سه بعدی از سازند دربرگیرنده چاه در محیط نرم افزار FLAC3D ایجاد شده و پس از برقراری شرایط اولیه و مرزی مراحل مختلف حفاری، اعمال فشار گل، لوله گذاری و تزریق دوغاب و در نهایت تحلیل بلند مدت تنش‌ها، مقدار و الگوی تغییرشکل-های سطح لوله جداری در شرایط مختلف ژئومکانیکی و عملیاتی صرف نظر از تأثیر دما بررسی شده است. نوع مدل‌سازی سازند اطراف چاه به گونه‌ای است که امکان بررسی هر دو نوع آسیب احتمالی وارد بر لوله جداری، یعنی برش‌های موضعی در محل فصل مشترک لایه نمکی و لایه‌های مجاور و همچنین مچالگی لوله در مجاورت لایه نمک با رفتار ویسکوپلاستیک وجود دارد. بر اساس نتایج، رفتار خزشی لایه

نمک علاوه بر زمان، تابعی از توزیع تنش منطقه و خصوصیات مقاومتی و هندسی سازند نمکی است. الگوی تغییر شکل‌های برشی لوله جداری تنها در حالتی که تنش‌های افقی برابر و تنش قائم بزرگتر از تنش‌های افقی وجود دارد نسبت به نوع تغییر شکل مچالگی لوله بیشتر رخ داده است. از سوی دیگر بررسی نقش پارامترهای تکمیل چاه در جلوگیری از بروز آسیب وارد بر لوله جداری، نشان دهنده نقش عمده مدول الاستیک غلاف سیمانی در درجه اول و نوع لوله جداری در درجه دوم است. لازم به ذکر است که پارامترهایی همچون ضخامت غلاف سیمانی، نسبت قطر به ضخامت لوله جداری و مقاومت چسبندگی غلاف سیمانی از اهمیت نسبی برخوردارند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عددی، پایداری چاه نفت، لوله جداری، رفتار خزش نمک، نرم افزار

FLAC3D

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- باجولوند، م.، رمضان زاده، الف. "مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای نمکی بر گسیختگی لوله جداری چاههای نفتی"، نشریه علمی پژوهشی ژئومکانیک نفت ایران، (در حال داوری)

۲- باجولوند، م.، رمضان زاده، الف. (آذر ۱۳۹۶) "مدل سازی عددی تأثیر رفتار وابسته به زمان سازندهای نمکی بر گسیختگی لولههای جداری چاههای نفتی"، سومین همایش منطقه ای و دوازدهمین همایش ملی تونل ایران (تونلسازی و تغییر اقلیم).

3. Bajoolvand, M., and Ramezanzadeh, A. "Numerical modeling of the effect of time-dependent behaviors of salt formations on the casing collapse of oil wells", 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX) in Hannover, Germany. (Under review).

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت و اهمیت پژوهش	۲
۱-۳- اهداف پژوهش	۳
۱-۴- فرضیه‌های تحقیق	۳
۱-۵- فرض‌های تحقیق	۴
۱-۶- وجه تمایز پژوهش با سایر پژوهش‌های مشابه	۴
۱-۷- پیکربندی پایان نامه	۵
۲- فصل دوم: عوامل موثر بر پایداری بلندمدت چاه‌های نفتی	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- عوامل ژئومکانیکی تاثیرگذار بر پایداری بلندمدت چاه‌های نفتی	۸
۲-۲-۱- خصوصیات مکانیکی سنگ‌های رسوبی مناطق نفت‌خیز	۸
۲-۲-۲- میدان تنش اطراف چاه‌های نفتی	۱۰
۲-۲-۳- رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر	۱۱
۲-۳- پارامترهای تکمیل چاه	۱۳
۲-۳-۱- فشار گل حفاری	۱۴
۲-۳-۲- لوله‌های جداری چاه نفت	۱۴
۲-۳-۳- سیمانکاری فضای خالی بین لوله جداری و سازند	۱۸

۴-۲- انواع گسیختگی‌های لوله جداری در مقاطع نمکی	۱۹
۴-۲-۱- برش‌های موضعی	۱۹
۴-۲-۲- مچالگی	۲۰
۴-۲-۵- معیار گسیختگی لوله‌های جداری	۲۱
۴-۲-۶- معیار مچالگی لوله جداری	۲۲
۴-۲-۷- جمع بندی	۲۲
۳- فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته	۲۳
۳-۱- مقدمه	۲۴
۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر	۲۴
۳-۳- مطالعات عددی اثر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر بر گسیختگی لوله جداری	
چاه‌های نفتی	۳۰
۳-۴- جمع بندی	۳۵
۴- فصل چهارم: مدلسازی عددی گسیختگی لوله جداری چاه نفت تحت تأثیر خزش سازند نمکی	
.....	۳۷
۴-۱- مقدمه	۳۸
۴-۲- انتخاب نرم‌افزار برای حل مسئله	۳۸
۴-۳- معرفی نرم‌افزار FLAC3D	۴۰
۴-۴- روند مدلسازی عددی سه بعدی با نرم‌افزار FLAC3D	۴۱
۴-۴-۱- ساخت هندسه سه بعدی مدل مرجع	۴۱

۴۲	انتخاب شبکه مش بندی بهینه..... ۴-۴-۱-۱
۴۳	تعیین مدل و خصوصیات مواد..... ۴-۴-۲
۴۶	خصوصیات مدل موهر-کلمب..... ۴-۴-۲-۱
۴۷	خصوصیات بخش الاستیک سازند..... ۴-۴-۲-۲
۴۷	تعیین خصوصیات فصل مشترک لایه ها..... ۴-۴-۲-۳
۴۸	شرایط اولیه و مرزی..... ۴-۴-۳
۵۰	تعاادل اولیه..... ۴-۴-۴
۵۲	مدلسازی عملیات حفاری و روند تکمیل چاه..... ۴-۵-۵
۵۲	تعیین گام محاسباتی و زمان حل مسئله در FLAC3D..... ۴-۵-۱
۵۴	مدلسازی حفر چاه..... ۴-۵-۲
۵۵	حفاری چاه بدون حضور سیال حفاری..... ۴-۵-۲-۱
۵۵	حفاری چاه با در نظر گرفتن سیال حفاری..... ۴-۵-۲-۲
۵۶	تکمیل چاه..... ۴-۵-۳
۵۷	مقایسه نتایج مدل سه بعدی و دوبعدی..... ۴-۶
۵۹	جمع بندی..... ۴-۷
۶۱	فصل پنجم: مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت..... ۵-۵
۶۲	مقدمه..... ۵-۱
۶۲	روند تحلیل میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف..... ۵-۲
۶۳	تأثیر عوامل ژئومکانیکی بر گسیختگی لوله جداری..... ۵-۳

- ۵-۳-۱- شرایط تنش برجا ۶۳
- ۵-۳-۱-۱- تنش تفاضلی ۶۴
- ۵-۳-۱-۲- شرایط تنش همسانگرد ۶۸
- ۵-۳-۱-۳- تنش های ناهمسانگرد ۶۹
- ۵-۳-۲- خصوصیات مقاومتی سنگ نمک ۷۰
- ۵-۳-۳- ضخامت لایه نمک ۷۲
- ۵-۴- تأثیر عوامل تکمیل چاه در جلوگیری از بروز گسیختگی لوله جداری مجاور سازند نمکی ۷۳
- ۵-۴-۱- خصوصیات غلاف سیمانی ۷۴
- ۵-۴-۱-۱- مدول الاستیک سیمان ۷۴
- ۵-۴-۱-۲- مقاومت چسبندگی سیمان ۷۶
- ۵-۴-۲- خصوصیات لوله جداری ۷۸
- ۵-۴-۲-۱- نسبت قطر/ضخامت لوله با تغییر قطر خارجی ۷۸
- ۵-۴-۲-۲- نسبت قطر/ضخامت لوله با تغییر ضخامت لوله ۸۰
- ۵-۴-۲-۳- انواع لوله جداری ۸۱
- ۵-۵- جمع بندی ۸۳
- ۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۵
- ۶-۱- نتیجه گیری ۸۶
- ۶-۲- پیشنهادات ۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نمودار کرنش بر حسب زمان برای مواد دارای خاصیت خزشی (Fjaer, 1999) ۱۲
- شکل ۲-۲: حالت‌های وقوع خزش به ازای مقادیر مختلف تنش اعمالی (Fjaer, 1999) ۱۳
- شکل ۳-۲: تعدادی از ترکیب‌های مختلف لوله جداری در سه میدان نفتی بزرگ دنیا (Devold, 2013) ۱۸
- شکل ۴-۲: نحوه گسیختگی لوله جداری تحت تأثیر نیروهای برشی (Tekin, 2010) ۲۰
- شکل ۵-۲: مچالگی لوله در مجاورت سازند شکل‌پذیر (Dusseault, 2001) ۲۱
- شکل ۱-۳: الف) نتایج آزمون آزمایشگاهی ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل خزشی برگرز (Jang et al., 2014) ۲۶
- شکل ۲-۳: تأثیر دما بر مقاومت مغزه‌های نمک (Hampel et al., 2015) ۲۷
- شکل ۳-۳: تأثیر نرخ کرنش بر مقاومت مغزه‌های نمک (Hampel et al., 2015) ۲۷
- شکل ۴-۳: نمودار کرنش-زمان نمونه سنگ نمک در فشار محوری ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مگاپاسکال در دما و رطوبت ثابت (Berest et al., 2015) ۲۸
- شکل ۵-۳: نمودار کرنش-زمان آزمون خزش دومرحله‌ای آزمایشگاهی و روش عددی گانزر-سالزر به ازای تنش‌های تفاضلی مختلف در دمای ثابت (Gunther et al., 2015) ۳۰
- شکل ۶-۳: نمودار کرنش-زمان آزمون خزش دومرحله‌ای آزمایشگاهی و روش عددی گانزر-سالزر به ازای تنش محوری ۲۲ مگاپاسکال و تنش محصورکننده ۲۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف (Gunther et al., 2015) ۳۰
- شکل ۷-۳: کنتور سطح لوله‌های جداری مجاور لایه نمک پس از ۲۰ سال الف) جابه‌جایی ب) تنش‌های اصلی (Lao et al., 2012) ۳۲
- شکل ۸-۳: تغییرات قطر لوله جداری طی ۱۰ سال الف) قطر ۹/۶۲ اینچی ب) قطر ۷ اینچی (قدوسی بروجنی، ۱۳۹۵) ۳۳

- شکل ۳-۹: تنش‌های Von Mises تشکیل شده بر روی لوله جداری حاصل از مدلسازی دوبعدی و سه بعدی (Wang et al., 2016)..... ۳۵
- شکل ۳-۱۰: کنتورهای تنش و جابجایی سطح لوله و غلاف سیمانی پس از ۵۰۰ روز (Wang et al., 2016)..... ۳۵
- شکل ۴-۱: روندنمای حل مسائل با نرم افزار FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc., 2013)..... ۴۱
- شکل ۴-۲: شبکه مش‌بندی بهینه مدل (الف) راستای X و Y و شعاعی (ب) محل حفاری چاه (ج) راستای Z..... ۴۳
- شکل ۴-۳: پارامترهای مدل خزشی برگرز (Itasca Consulting group, 2016)..... ۴۴
- شکل ۴-۴: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵) خزش تک محوری..... ۴۵
- شکل ۴-۵: نتایج مدلسازی عددی آزمون خزش سه محوری با بارگذاری چندمرحله‌ای در فشارهای محصورکننده ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال..... ۴۶
- شکل ۴-۶: شرایط اولیه یک زون در مرکز مدل..... ۴۹
- شکل ۴-۷: (الف) نمای دوبعدی توالی لایه‌ها (ب) شرایط اولیه و مرزی مدل..... ۵۰
- شکل ۴-۸: تاریخچه نیروی نامتعادل در اعتبارسنجی مدل FLAC3D..... ۵۱
- شکل ۴-۹: اعتبارسنجی مدل FLAC3D (الف) تنش قائم در تعادل اولیه (ب) جابجایی قائم در تعادل اولیه..... ۵۱
- شکل ۴-۱۰: نمودار تنش قائم سه نقطه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در کف، مرکز و بالای مدل طی برقراری تعادل اولیه..... ۵۲
- شکل ۴-۱۱: نمودار گام محاسباتی در طول زمان بررسی پایداری چاه..... ۵۴
- شکل ۴-۱۲: همگرایی چاه پس از حفاری و عدم اعمال فشار سیال حفاری (مرکز مدل)..... ۵۵
- شکل ۴-۱۳: روند همگرایی شعاعی چاه با حضور گل حفاری (مرکز مدل)..... ۵۶

- شکل ۴-۱۴: روند مدلسازی عملیات تکمیل چاه ۵۷
- شکل ۴-۱۵: هندسه مدل لوله جداری و غلاف سیمانی ۵۷
- شکل ۴-۱۶: همگرایی شعاعی لوله جداری در مدل دوبعدی (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵) ۵۸
- شکل ۴-۱۷: همگرایی شعاعی لوله جداری در مدل سه بعدی (مرکز مدل) ۵۸
- شکل ۴-۱۸: کنتور تنش‌های وون مایسز بر روی سطح لوله جداری پس از سه سال ۵۹
- شکل ۵-۱: روند مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت ۶۲
- شکل ۵-۲: توزیع تنش‌های اصلی اطراف چاه ۶۴
- شکل ۵-۳: تغییر شکل سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال طی ۴ سال ۶۵
- شکل ۵-۴: تغییر شکل سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی $(\sigma_v - \sigma_H)$ مختلف پس از ۴ سال ۶۵
- ۶۵
- شکل ۵-۵: توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک بر روی مقاطع مجموعه غلاف سیمانی و لوله جداری در طول‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متری مدل پس از ۴ سال ۶۶
- شکل ۵-۶: تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی مختلف طی ۴ سال ۶۷
- شکل ۵-۷: کنتور تنش‌های وون مایسز روی لوله مجاور لایه نمکی پس از ۴ سال در شرایط تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال ۶۷
- ۶۷
- شکل ۵-۸: همگرایی دیواره چاه به ازای فشار گل‌های مختلف در شرایط تنش برجا ۹۶ مگاپاسکال ۶۸
- ۶۸
- شکل ۵-۹: کرنش لوله جداری در شرایط مختلف تنش‌های هیدرواستاتیک پس از ۴ سال ۶۹
- شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات بیشینه تنش‌های وون مایسز به ازای تنش‌های هیدرواستاتیک مختلف طی ۴ سال ۶۹
- ۶۹
- شکل ۵-۱۱: کرنش لوله جداری در جهت تنش برجا حداقل پس از ۴ سال ۷۰
- ۷۰
- شکل ۵-۱۲: همگرایی لوله جداری در جهت تنش برجا حداکثر پس از ۴ سال ۷۰

- شکل ۵-۱۳: کرنش لوله جداری با نسبت‌های مختلف E_s/E_r نمک طی ۴ سال ۷۱
- شکل ۵-۱۴: تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری با مدول الاستیک‌های مختلف نمک طی ۴ سال ۷۲
- شکل ۵-۱۵: کرنش سطح لوله جداری مجاور ضخامت‌های مختلف لایه نمک پس از ۴ سال ۷۳
- شکل ۵-۱۶: تغییرات بیشینه تنش وون مایسز سطح لوله جداری به ازای ضخامت‌های مختلف لایه نمک طی ۴ سال ۷۳
- شکل ۵-۱۷: اثر نسبت E_c/E_s در جلوگیری از بروز تغییر شکل سطح لوله جداری پس از ۴ سال ۷۴
- شکل ۵-۱۸: اثر نسبت E_c/E_s در جلوگیری از افزایش تنش سطح لوله جداری طی دوره‌های مختلف ۷۵
- شکل ۵-۱۹: توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک غلاف سیمانی و لوله جداری در مقاطعی از عمق‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متری مدل پس از ۴ سال ۷۶
- شکل ۵-۲۰: اثر مقاومت چسبندگی غلاف سیمانی بر تغییر شکل‌های سطح لوله جداری پس از ۴ سال ۷۷
- شکل ۵-۲۱: اثر چسبندگی دوغاب بر تنش وارد بر لوله جداری در دوره‌های زمانی مختلف ۷۷
- شکل ۵-۲۲: تاثیر نسبت‌های مختلف D/t لوله جداری در بروز تغییر شکل پس از ۴ سال ۷۹
- شکل ۵-۲۳: تاثیر نسبت‌های مختلف D/t لوله جداری در کاهش تنش سطح لوله طی دوره‌های مختلف ۸۰
- شکل ۵-۲۴: کرنش لوله جداری با ضخامت‌های مختلف پس از ۴ سال ۸۱
- شکل ۵-۲۵: تغییرات سطح تنش با تغییر ضخامت لوله جداری در دوره‌های زمانی مختلف ۸۱
- شکل ۵-۲۶: تغییر شکلهای لوله‌های جداری مختلف پس از ۴ سال ۸۲
- شکل ۵-۲۷: تغییرات سطح تنش با تغییر جنس لوله جداری طی ۴ سال ۸۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: برخی ویژگی های سنگ نمک (Hansen et al., 1984) ۱۰
- جدول ۱-۴: نتایج تحلیل مدل نسبت به شبکه مش بندی های مختلف (تنش قائم ۸۱/۳۹۶ مگاپاسکال) ۴۲
- جدول ۲-۴: پارامترهای مدل برگرز (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵) ۴۴
- جدول ۳-۴: خصوصیات مدل موهر-کلمب (فارسی مدان، ۱۳۹۰) ۴۷
- جدول ۴-۴: خصوصیات بخش الاستیک سازند (Peng and Zhang., 2007) ۴۷
- جدول ۵-۴: خواص انواع فصل مشترک های استفاده شده در مدلسازی ۴۸
- جدول ۶-۴: برنامه زمان بندی رعایت شده در مدلسازی ۵۲
- جدول ۷-۴: پارامترهای زمان استفاده شده در مدلسازی عددی ۵۴
- جدول ۸-۴: خصوصیات مقاومتی لوله جداری استفاده شده در مدلسازی (API,2006) ۵۷
- جدول ۱-۵: فشار گل تعیین شده برای شرایط تنش همسانگرد برجا مختلف ۶۸
- جدول ۲-۵: نسبت های قطر/ضخامت لوله های جداری مختلف ۷۸
- جدول ۳-۵: خصوصیات مقاومتی لوله های جداری استفاده شده در مدلسازی (API,2006) ۸۲

فصل اول

کلیات

گسیختگی در لوله‌های جداری چاه‌های نفتی، از پدیده‌هایی است که به دلایل مختلف امکان وقوع آن وجود دارد. در بین علل گوناگون وقوع گسیختگی لوله‌های جداری، رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر موضوعی قابل بحث و بررسی است. علل وقوع گسیختگی در لوله‌های جداری را می‌توان در دو دسته کلی قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم کرد. اغلب آسیب‌های ناشی از عوامل عملیاتی، مانند نرخ تخلیه مخزن، استفاده از روش‌های افزایش بازیابی قابل کنترل‌اند. عوامل غیرقابل کنترل گسیختگی لوله‌های جداری اغلب وابسته به رفتار سازند هستند. رفتارهای گوناگون محیط پیرامون چاه‌های نفتی و همچنین شرایط مختلف حرارتی، فشار منفذی، تخلخل و نفوذ پذیری و مهم‌تر از همه رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر از این قبیل می‌باشند. نمک به عنوان یک سنگ رسوبی متداول در حوضه‌های نفتی اغلب مناطق جهان دارای رفتار وابسته به زمان خزشی است که می‌تواند باعث ایجاد تنش در دیواره چاه حین حفاری یا بعد از آن، همچنین ایجاد تنش در لوله‌های جداری به صورت درازمدت و در طول عمر مفید چاه شود.

۱-۲- ضرورت و اهمیت پژوهش

با توجه به ضرورت بهره‌برداری بلندمدت از چاه‌های نفتی به دلیل کاهش نرخ بهای نفت که امروزه بسیار مد نظر قرار گرفته است، کنترل فاکتورهایی که در دراز مدت پایداری چاه را تحت تاثیر قرار می‌دهند، بسیار اهمیت پیدا می‌کند. عوامل عملیاتی و ژئومکانیکی مختلفی در پایداری بلندمدت چاه نقش دارند. در این بین رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر به دلیل تغییر شرایط بارگذاری در طول زمان و همچنین تأثیرپذیری از شرایط برجا منطقه، کلیدی‌ترین چالش بر سر راه این هدف بلندمدت است. در صورت عدم شناخت این رفتارها و عوامل موثر بر آن و همچنین ارزیابی میزان تغییرات احتمالی در شرایط بارگذاری بر لوله جداری در مرحله اول و بعد از آن به پایداری چاه، خطر خارج شدن از چرخه تولید و تحمیل زیان‌های اقتصادی به مجری طرح و همچنین احتمال آلودگی‌های زیست محیطی و از دست رفتن بخشی از مخزن وجود خواهد داشت. بنابراین رفتار خزشی سنگ نمک

به عنوان یکی از مهم‌ترین رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر در مناطق نفت‌خیز در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۳- اهداف پژوهش

در این تحقیق با استفاده از روش عددی تفاضل محدود که نرم افزار FLAC3D بر پایه آن توسعه یافته است، تاثیر تنش ناشی از جریان پلاستیک لایه‌های نمک بر لوله‌های جداری چاه‌های نفتی بررسی شده است. اهدافی که در این تحقیق دنبال می‌شوند عبارتند از:

- ۱) تعیین میزان جابجایی افقی لایه های نمک با تغییرات عمق سازند، ضخامت سازند و خواص مکانیکی سازند در طول عمر مفید چاه
- ۲) تعیین تنش وارد بر غلاف سیمانی حدفصل لوله جداری و سازند
- ۳) بررسی تنش‌های وارد بر لوله جداری
- ۴) بررسی تاثیر خواص مقاومتی سیمان بر تنش وارده بر لوله جداری ناشی از تغییر شکل‌های لایه نمک
- ۵) تعیین تاثیر تنش‌های برجا منطقه بر شدت خزش و در نتیجه تاثیر بر گسیختگی لوله جداری
- ۶) بررسی اثر ضخامت میان لایه نمکی بر گسیختگی لوله جداری

۱-۴- فرضیه‌های تحقیق

اگر چه رفتار نمک از دیدگاه ژئومکانیکی کاملاً شناخته شده است، ولی آگاهی در زمینه تغییر شکل نمک روی چاه و مخزن بسیار ضعیف است. در مخازنی که زیر لایه‌های نمک واقع شده اند طی فرآیند بازیابی نفت از مخزن، لایه‌های نمک تمایل به جریان یافتن و پر کردن فضای حفاری شده را دارند. این تمایل به جریان یافتگی ناشی از رفتار خزشی سنگ نمک، منجر به وارد آمدن بارهای غیر همسانگرد و تنش‌های برشی وارد شده در فصل مشترک لایه‌ها می‌شود که می‌تواند یکپارچگی لوله‌های جداری که در مجاورت لایه‌های نمک واقع شده‌اند را به خطر اندازد.

۱-۵- فرض‌های تحقیق

مدل‌سازی سازند شامل لایه‌های مختلف با ضخامت‌های یکنواخت و کاملاً افقی است. اگر چه تأثیر دما بر نرخ کرنش لایه نمکی و همچنین رفتار لوله قطعی است، اما به دلیل پیچیدگی مسئله و همچنین نیاز به امکانات سخت افزاری فوق العاده پیشرفته برای حل توأمان مسئله بصورت حرارتی-مکانیکی - خزشی و عدم دسترسی به پارامترهای حرارتی سنگ نمک موجود در عمق مورد نظر، تأثیر دما در این مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. همچنین قطر لوله جداری در طول چاه یکسان فرض شده است. سیمانکاری یکنواخت فضای بین لوله جداری و سازند پیرامون چاه از دیگر فرض‌هایی است که در مدل‌سازی این پژوهش در نظر گرفته شده است.

۱-۶- وجه تمایز پژوهش با سایر پژوهش‌های مشابه

با توجه به اهمیت موضوع، در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای بررسی اثر خزش لایه‌های نمکی بر لوله‌های جداری با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. پایه این مطالعات استفاده از اطلاعات حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی بوده است. در اغلب مطالعات، مدل‌سازی‌ها دوبعدی بوده است، که در این صورت امکان بررسی برخی از عوامل تأثیرگذار بر نحوه تغییرشکل سازند نمکی و تأثیر آن بر لوله جداری وجود نخواهد داشت. به طور قطع نقش تنش تفاضلی در نرخ کرنش موادی با خاصیت جریان یافتگی ویسکوپلاستیک به اندازه نقش دما غیر قابل انکار می‌باشد. اساس این ادعا آزمون‌های خزشی سه محوره متعددی است که محققان در سالیان اخیر انجام داده و به بررسی نقش آن در سرعت وقوع خزش و مقدار کرنش نهایی پرداخته اند. در این تحقیق با توجه به سه بعدی بودن مدل، نقش تنش تفاضلی محیط بر کرنش سازند شکل‌پذیر و در نهایت آسیب وارد بر لوله بررسی شده است. مطالعات عددی سه بعدی محدودی در این زمینه صورت گرفته است. در تمام مطالعات عددی سه بعدی، تنها بخشی از لوله در مجاورت سازند نمکی، بدون توجه به تأثیر برش‌های موضعی لوله جداری در مجاورت فصل مشترک میان لایه‌ها با رفتارهای مختلف مدل‌سازی شده است. در این مطالعه تغییرشکل کل رشته

جداری ارائه شده است که امکان تشخیص اعماق بحرانی لوله را در حالت‌های مختلف توالی لایه‌ها فراهم می‌کند. از دیگر ویژگی‌های مطالعه کنونی مدل‌سازی آزمون خزش تک محوره و سه محوره با سیستم بارگذاری چندمرحله‌ای برای تعیین پارامترهای مدل خزشی است.

۷-۱- پیکربندی پایان نامه

گزارش حاضر مشتمل بر ۶ فصل می‌باشد. فصل اول این پژوهش بیان کلیات مسئله از جمله اهمیت، ضرورت، وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های گذشته و اهداف آن را در بر گرفته است. در فصل دوم خلاصه‌ای از مفاهیم نظری، شامل بیان مفهوم رفتارهای وابسته به زمان، خزش و مفاهیم گسیختگی لوله جداری بیان شده است. فصل سوم شامل مروری بر مطالعات گذشته در زمینه‌های مشابه با موضوع این پژوهش در فازهای آزمایشگاهی و عددی است و در پایان فصل ویژگی و محدودیت‌های هر یک از آن‌ها مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. در ابتدای فصل چهارم، انتخاب نوع مدل‌سازی عددی و نرم‌افزار ارائه شده است. سپس مدلی با شرایط مشابه یک مطالعه عددی دیگر ایجاد شده است. پس از مقایسه و تأیید نتایج حاصل، این مدل به عنوان مدل مرجع معرفی شده است. در فصل پنجم عوامل مختلف تأثیرگذار بر عملکرد مدل مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر هر یک بر شدت گسیختگی لوله جداری مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت در فصل ششم این تحقیق به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شده است.

عوامل موثر بر یاداری بلندمدت

چاه‌های نصتی

۲-۱- مقدمه

امروزه توسعه‌ی میادین نفتی و استفاده از روش‌های افزایش ضریب بازیافت به منظور دستیابی هرچه بیشتر به ذخایر نفت و گاز انجام می‌شود. در بعضی موارد، برخی موانع محیطی و عملیاتی همواره تولید از مخازن را با مشکلاتی اساسی و پیچیده روبرو می‌کنند. گسیختگی لوله‌های جداری چاه تحت تأثیر عوامل متعدد و در نتیجه آن خارج شدن چاه از چرخه تولید از مهم‌ترین این موانع است. شناخت عواملی که در گسیختگی لوله‌های جداری نقش مهمی دارند از اهمیت بالایی برخوردار است. به طور کلی علل گسیختگی لوله‌های جداری را می‌توان به دو دسته کلی عوامل ژئومکانیکی و پارامترهای تکمیل چاه تقسیم کرد. در این بخش از تحقیق، به بیان هر یک از این عوامل و نحوه تأثیر آن بر پایداری چاه پرداخته شده است.

۲-۲- عوامل ژئومکانیکی تأثیرگذار بر پایداری بلندمدت چاه‌های نفتی

خصوصیات مکانیکی سنگ‌های رسوبی که چاه در میان آن حفاری می‌شود، شرایط تنش برجا منطقه و برخی رفتارهای سازنده‌های پیرامون چاه نفتی به عنوان مهم‌ترین عوامل ژئومکانیکی در بروز آسیب وارد بر لوله‌های جداری چاه‌های نفتی شناخته شده‌اند که در ادامه به بیان نقش هر یک از این عوامل در پایداری بلندمدت چاه‌های نفتی پرداخته شده است.

۲-۲-۱- خصوصیات مکانیکی سنگ‌های رسوبی مناطق نفت خیز

از آنجا که تمام تجمعات نفتی (نفت‌گیرها) در سنگ‌های رسوبی ایجاد می‌شوند، لذا شناخت کامل این نوع سنگ‌ها در صنعت نفت از اهمیت بالایی برخوردار است. اغلب ذخایر نفتی دنیا، مانند خلیج مکزیک و خلیج فارس در رسوبات دریایی تشکیل شده و به ندرت می‌توان سنگ‌های آذرین و دگرگونی را بستری مناسب برای تشکیل گاز و نفت دانست. اغلب سنگ‌های رسوبی موجود در میادین نفت و گاز عبارتند از: ماسه سنگ، گچ، شیل و سنگ نمک. تفاوت اصلی این سنگ‌ها در اندازه دانه‌ها (یا حفرات) می‌باشد که درشت‌دانه‌ترین آن ماسه سنگ با ابعاد ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر و ریزدانه‌ترین آن با ابعادی در حد

نانومتر برای شیل است. این تفاوت در ابعاد ذرات بر خصوصیات پتروفیزیکی^۱ مانند نفوذپذیری تاثیر می‌گذارد. نفوذپذیری تأثیر عمده‌ای بر رفتار مکانیکی به‌ویژه پدیده رفتار وابسته به زمان سنگ‌های رسوبی دارد. علاوه بر این سنگ‌ها، برخی مواد مانند دیاتومیت^۲ و برخی رسوبات خاص دیگر به صورت متفرقه نیز وجود دارند که گاهی اوقات از نقش تعیین کننده‌ای در رفتار مخزن و یا میدان نفتی برخوردارند. از میان سنگ‌های رسوبی ذکر شده، طراحی چاه نفت در سنگ نمک به دلیل برخی ویژگی‌های خاص این سنگ، در بیش‌تر موارد در مراحل حفاری، تکمیل چاه و پایداری بلند مدت با چالش مواجه می‌شود. لایه‌های نمک یا رسوب‌های نمکی حاصل رسوب از آب دریا و یا رسوب‌گذاری در منطقه وسیعی از زمین هستند که از نظر ترکیب کانی شناسی می‌توان آن را از کاملاً همگن (۹۹ درصد هالیت) تا ترکیبی از کانی‌های مختلف در نظر گرفت. نقش گنبد‌های نمکی و یا لایه‌های نمکی در بالا یا پایین مخازن نفتی به عنوان لایه‌های نفوذ ناپذیر در ایجاد تله‌های نفتی انکار ناپذیر است (Fjaer, 1999). در بسیاری از مناطق مانند میدان نفتی اکوفیسک^۳ در دریای شمال، گنبد‌های نمکی تأثیر ویژه‌ای بر تنش‌های مخزن دارند. در ایران نیز میادین نفتی کوپال و مارون از نظر وجود لایه‌های نمک سازند پرفشار گچساران بسیار حائز اهمیت هستند. نمک دارای نفوذپذیری بسیار کم است که می‌توان به عنوان علت اصلی کاربرد آن جهت دفن زباله‌های اتمی مرتبط دانست. در جدول ۱-۲ برخی ویژگی‌های رایج سنگ نمک ارائه شده است (Hansen et al., 1984).

مقاومت بسیار پایین در برابر کشش از نقاط ضعف سنگ نمک است (Silberschmidt and Silberschmidt, 2000). فشار محصورکننده بطور قابل ملاحظه‌ای شکل‌پذیری سنگ نمک را افزایش می‌دهد. کرنش محوری اندازه‌گیری شده در گسیختگی نمونه‌های سنگ نمک تحت تنش محصورکننده به ۱۰ تا ۲۵ درصد می‌رسد (Lux and Rokahr, 1984).

^۱ Petrophysical

^۲ Diatomite

^۳ Ekofisk

همچنین رفتار پلاستیک سنگ نمک به رفتار بسیار مهم خزش وابسته است. با افزایش تنش‌های انحرافی و دما مقدار کرنش خزشی افزایش می‌یابد (Munson and Wawersik, 1993; Fokker and Kenter, 1994).

جدول ۱-۲: برخی ویژگی‌های سنگ نمک (Hansen et al., 1984)

ویژگی سنگ نمک	مقدار
نسبت پواسون	بطور میانگین ۰/۲ تا ۰/۳
مقاومت تراکمی تک محوری	۱۵ تا ۳۵ مگاپاسکال
مدول الاستیک	۱۰ تا ۳۰ گیگاپاسکال
زاویه اصطکاک داخلی	بین ۴۰ تا ۶۵ درجه
تخلخل	کمتر از ۰/۵ تا ۱ درصد
مقاومت کششی	کمتر از ۱ تا ۳ مگاپاسکال

۲-۲-۲- میدان تنش اطراف چاه‌های نفتی

سازه‌های زیرزمینی همواره تحت تنش‌هایی قرار دارند که اغلب ناشی از وزن روباره و تنش‌های تکتونیکی است. زمانی که چاه در سازندی حفاری می‌شود، مواد جامد تحت تنش حذف می‌شوند، در حین حفاری دیواره چاه صرفاً توسط فشار گل حفاری می‌شود. اگر فشار گل حفاری با فشار سازند متناسب نباشد، در اثر اختلاف فشار درون چاه و سازند بازتوزیع تنش در سطح بالاتری رخ خواهد داد که می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های انحرافی بزرگتر از مقاومت سازند و در نتیجه گسیختگی چاه شود. بنابراین آگاهی درمورد تنش‌های اطراف چاه برای توضیح مسائل چاه ضروری است. روابط تحلیلی زیادی برای بررسی میدان تنش اطراف چاه ارائه شده است. به طور کلی می‌توان پارامترهای تعیین کننده تنش اطراف چاه را وزن روباره، فشار منفذی، شیب زمین گرمایی، شیب و آزیموت چاه، قطر چاه و رفتار سازندهای پیرامون چاه دانست (Detournay, 1988; Fjaer, 1999; Aadruay, 2004).

۲-۲-۳- رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر

اغلب تصور براین است که هرگونه تغییر در تنش اعمال شده، بلافاصله تغییر شکل متناسب را در پی خواهد داشت. این درحالی است که وقوع تغییر شکل‌ها در موادی با رفتار ویسکوپلاستیک، بعد از تغییر در شرایط تنش در مدت زمان طولانی رخ می‌دهد (قدوسی بروجنی، ۱۳۹۵). اینگونه تغییر شکل‌ها در سازندهای اطراف چاه‌های نفتی به‌وضوح مشاهده می‌شوند که عامل بروز آن با عنوان رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر شناخته می‌شود. این تاثیرات وابسته به زمان به دو نوع خزش و تحکیم یافتگی تقسیم می‌شوند (Fiear., 1999). خزش در واقع تابع رفتار ویسکوپلاستیک مواد جامد است و با تغییر شرایط تنش ناشی از حفاری و در طول زمان مشاهده می‌شود. پدیده تحکیم و نشست مخازن را می‌توان ناشی از تغییرات فشار منفذی ناشی از برداشت از مخازن دانست، که رفتار رایج لایه‌های نزدیک مخازن طی عملیات برداشت و بازیابی از مخزن است. وقوع این پدیده به نرخ برداشت و نوع سازند وابسته است و می‌تواند در طول زمان موجب تراکم لایه‌ها، کاهش حجم و از دست رفتن یکپارچگی چاه با تأثیر بر سیمانکاری اطراف چاه و یا اعمال تنش‌های موضعی نامتقارن و کمانش و زانویی شدن رشته جداری شود (Fiear., 1999).

خزش به عنوان یک رفتار وابسته به زمان در سنگ‌ها، بصورت تغییر شکل برشی^۱ و گسیختگی^۲ پیوسته و تحت تأثیر تنش ثابت کمتر از مقاومت تراکمی تک محوره سنگ تعریف می‌شود (Sun, 2007; Ma, 2004; Brantut et al., 2013). خزش یکی از ویژگی‌های مهم سنگ‌هاست که می‌تواند پایه‌ای برای توصیف و تحلیل پدیده‌های تکتونیکی زمین ساختاری و پیش بینی پایداری در مهندسی سنگ باشد (Tsai et al., 2008; Yang and Jiang, 2010; Zhang et al., 2013). بنابراین برخلاف تحکیم یافتگی که تنها در محیط اشباع رخ می‌دهد خزش ممکن است در سنگ اشباع و یا در سنگ غیر اشباع روی دهد (Fjaer, 1999). همانطور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، نمودار کرنش- زمان خزش

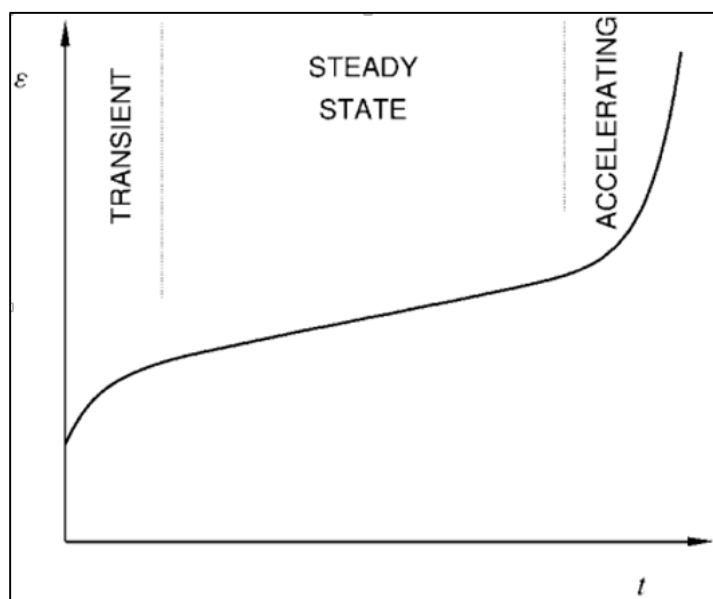
¹ Slip

² Failure

بر اساس Fjaer,1999 دارای سه مرحله است که عبارتند از:

مرحله اول: کاهش تغییرشکل وابسته به زمان با گذشت زمان که به خزش اولیه (گذرا) معروف است. ممکن است ناشی از پایداری ریزترک‌های موجود باشد. اگر تنش اعمالی به صفر میل کند در این مرحله، تغییرشکل هم متعاقباً به صفر می‌رسد.

مرحله دوم: نرخ تغییرشکل ثابت است. خزش ثانویه یا خزش ثابت نام دارد. اگر در این مرحله باراعمالی صفر شود تغییرشکل به طور کامل ناپدید نمی‌شود و تغییرشکل دائمی به مواد وارد می‌کند.

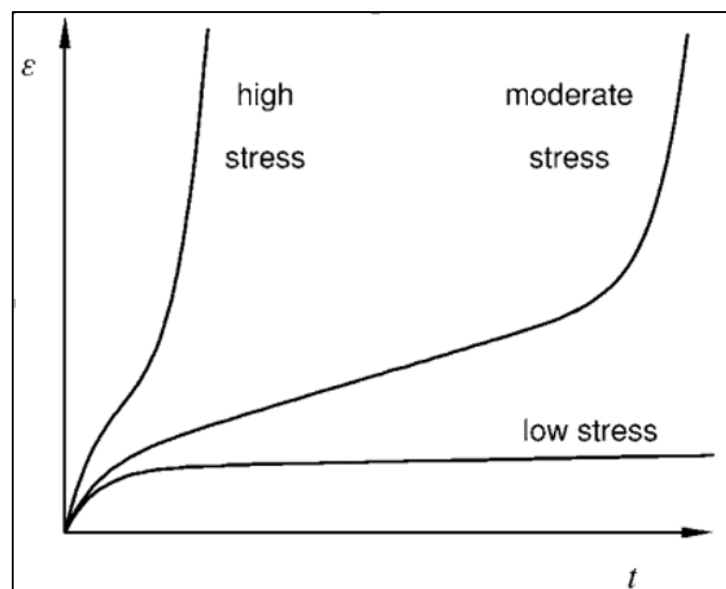


شکل ۱-۲: نمودار کرنش بر حسب زمان برای مواد دارای خاصیت خزشی (Fjaer,1999)

مرحله سوم: در این مرحله که به مرحله خزش شتابنده یا ثالثیه معروف است، افزایش نرخ تغییرشکل با زمان به وضوح قابل مشاهده است. این رفتار منجر به شکست سریع نمونه می‌شود که احتمالاً ناشی از گسترش ترک‌های ناپایدار است.

بر اساس نمودار شکل ۲-۲ رفتار واقعی خزش سنگ به مقدار تنش اعمالی بستگی دارد. برای تنش‌های پایین یا متوسط، مواد ممکن است عملاً بعد از دوره خزش اولیه پایدار شوند. برای تنش‌های زیاد، مواد ممکن است سریعاً سه مرحله خزش را گذرانده و سرانجام شکسته شوند. برای نرخ متوسط تنش، همه مراحل خزش قابل مشاهده است. این حالت در شرایط برجا خیلی کم یا به ندرت رخ می‌دهد.

مقیاس زمان در موارد مختلف از دقیقه تا سال متفاوت است. خزش فرایندی مولکولی است و مقیاس زمان آن به دما بستگی دارد. بطور کلی این فرایند با افزایش دما سرعت بیشتری می یابد. شکست در مرحله دوم خزش یعنی اینکه سنگی که تحت بارگذاری در سطحی اغلب کمتر از تنش تسلیم خود قرار گرفته است، ممکن است با ادامه بارگذاری پس از مدتی کوتاهی بشکند. این نحوه بارگذاری مقاومت تک محوره بلندمدت را به مقدار ۵۰ تا ۷۰ درصد مقاومت نهایی کاهش می دهد. خزش بطور موثر مدول برشی و مدول یانگ را کاهش می دهد ولی مدول بالک را تحت تاثیر قرار نمی دهد و نسبت پواسون ناشی از خزش افزایش می یابد (Fjaer,1999).



شکل ۲-۲: حالت های وقوع خزش به ازای مقادیر مختلف تنش اعمالی (Fjaer,1999)

۲-۳- پارامترهای تکمیل چاه

علاوه بر پارامترهای ژئومکانیکی، عملیات حفاری، نصب لوله و سیمان کاری فضای بین لوله و سازند نیز در آسیب وارد بر لوله جداری تأثیرگذارند. تأثیر این عوامل را می توان در جلوگیری از بروز آسیب وارد بر لوله جداری در مجاورت سازندهای نمکی بسیار ضروری قلمداد کرد. در ادامه نقش هر یک از این عوامل در آسیب وارد بر لوله جداری بیان شده است.

۲-۳-۱- فشار گل حفاری

با توجه به اهمیت کاهش و کنترل زمان و هزینه‌های حفاری، رفع مسائل مربوط به پایداری چاه در زمان حفاری بسیار ضروری است. ناپایداری چاه در زمان حفاری همواره یکی از مسائل رایج در طراحی چاه‌های میادین نفتی بخصوص در برخورد با سازندهای شکل پذیراست (Aslannezhad and Jalalifar, 2016). پایداری چاه نیازمند شناخت رابطه مقاومت سنگ و شرایط تنش برجاست. موفقیت حفاری چاه در میادین نفتی، همواره تحت تأثیر دو دسته عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل است. تانسور تنش منطقه، فشار منفذی، مقاومت و کانی‌شناسی سنگ‌ها از جمله عوامل غیرقابل کنترل در نظر گرفته می‌شوند. در مقابل می‌توان فشار گل حفاری و جهت‌داری چاه را دو عامل قابل کنترل موثر بر پایداری چاه دانست (Mohiuddin and Khan, 2007). بر اساس شرایط میدان نفتی، مهندسان طراح با تعیین جهت داری بهینه چاه نسبت به شرایط تنش برجا و فشار گل حفاری، مشکلات پایداری چاه در زمان حفاری را به حداقل می‌رسانند. از دیدگاه مکانیکی، علت گسیختگی دیواره چاه دو تنش برشی و کششی سازند پیرامون چاه است. از نتایج گسیختگی دیواره چاه باید به گیرکردن لوله جداری، ایجاد شکستگی در دیواره، سیمانکاری ضعیف و از دست رفتن یکپارچگی سیمان اطراف لوله، انحراف لوله جداری هنگام نصب و از دست رفتن فشار گل ناشی از نشت گل به درون شکاف‌های ایجاد شده در سازند پیرامون اشاره کرد (McClean and Addis, 1994). بنابراین تعیین فشار گل حفاری بهینه، جهت حفظ پایداری چاه بسیار ضروری است.

۲-۳-۲- لوله‌های جداری چاه نفت

نصب لوله‌های جداری در چاه نفت با اهداف مختلفی انجام می‌شود که عبارتند از:

- بازنگه‌داشتن چاه و فراهم نمودن یک محافظ در مقابل سازندهای سست و شکننده.
- مجزا نمودن لایه‌های متخلخل دارای سیالات با فشارهای متفاوت مخزن و جلوگیری از آلوده شدن بخش‌های تولیدی مخزن.

- جداسازی لایه‌های کم عمق از فضای داخلی چاه و جلوگیری از آلوده شدن سفره‌های آب زیرزمینی به وسیله گل حفاری.

- فراهم کردن مکانی مناسب برای نصب لوله مغزی که در عمده روش‌های بهره برداری از چاه‌ها استفاده می شود.

- فراهم کردن فضای مناسب برای نصب شیرهای فورانگیر در زمان حفاری و دهانه^۱ چاه در هنگام بهره برداری.

- با ایجاد یک مسیر با عمق و قطر مشخص، امکان راندن وسایل مورد نیاز برای آزمایش چاه و تکمیل نهایی آن را میسر می سازد (Devold., 2013).

در ادامه به انواع لوله‌های جداری مورد استفاده در چاه‌های نفتی اشاره شده است.

• لوله راهنما^۲:

لوله‌های راهنما اولین لوله جداری است که دارای بزرگترین قطر می باشد و طی فرآیند حفاری نصب می شود. در طول‌های ۵۰ تا ۱۰۰ متری برای زیر سطح زمین یا بستر دریا تولید می شود. عملکرد آن نگه داشتن سازند غیرمستحکم سطحی (کم عمق) است (Devold., 2013). در ایران پس از تعیین محل چاه نخست پی زیر دکل و حوضچه زیر سکو^۳ را آماده و پس از کندن حفره ای کم عمق، حدوداً ۱/۵ متر، لوله‌ای به قطر ۳۰ یا ۴۲ اینچ موسوم به لوله هادی در حفره نصب و پیرامون آن را با سیمان می پوشانند. دلیل نصب این لوله ایجاد مسیری برای برگشت گل و پر کردن چاه و محافظت پی زیر دکل می باشد (www.iran-spe.com).

• لوله جداری سطحی^۴:

لوله جداری سطحی بعد از لوله هادی نصب می شود که در طول‌های ۲۰۰ تا ۸۰۰ متر زیر سطح

^۱ Well head

^۲ Conductor Pipe

^۳ Cellar

^۴ Surface Casing

زمین یا بستر دریا به کار می‌رود. عملکرد اصلی آن عایق بندی لایه‌های شن و ماسه حاوی آب شیرین و نگهداری سرچاه نفت و تجهیزات شیرهای فورانگیر^۱ است. لوله‌های جداری سطحی جهت جلوگیری از ریزش سازندهای سست شکننده، که در هنگام حفاری قسمت‌های کم عمق احتمال مواجه با آن وجود دارد، رانده می‌شود. این لوله جداری باید در سازندهای مناسب و سخت نظیر سنگ آهک نصب شود. این عمل موجب اطمینان یافتن از عدم شکست سازندی که کفشک در آن قرار گرفته است، پس از شروع به حفاری مجدد می‌شود. همچنین لوله جداری سطحی برای ممانعت از فوران‌های احتمالی ناشی از وجود گاز سطحی در هنگام حفاری و نصب شیرهای فورانگیر (BOP) کاربرد دارد. نقطه مناسب برای نصب لوله جداری سطحی به گونه ای انتخاب می‌گردد تا از لایه‌های دارای هرزروی، ماسه‌های حاوی آب‌های زیرزمینی، لایه‌های هیدروکربنی سطحی و قسمت منحنی^۲ در چاه‌های جهت‌دار محافظت نماید (Devold., 2013). اندازه معمول این جداری در ایران $18\frac{5}{8}$ اینچ است (www.iran-spe.com).

• لوله جداری میانی^۳:

لوله‌های جداری میانی معمولاً در زیر یا بالای سازندهای پر فشار، جهت عایق بندی^۴ لایه‌های دارای هرزروی زیاد و برای محافظت از سازندهای نمکی یا شیلی نصب می‌گردند. اطمینان از موفقیت‌آمیز بودن سیمان‌کاری پشت این لوله جداری، برای جلوگیری از ارتباط لایه‌های هیدروکربنی زیرین با سازندهای فوقانی دارای آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. جهت جلوگیری از گسیختگی سازندهای شکننده در اثر فشار تزریق سیمان در هنگام سیمان‌کاری این لوله‌های جداری، می‌توان از عملیات سیمان‌کاری چند مرحله‌ای استفاده نمود (Devold., 2013). اندازه معمول این جداری در ایران

$13\frac{3}{8}$ اینچ است (www.iran-spe.com).

^۱ Blowout Preventer

^۲ Buildup Section

^۳ Intermediate Casing

^۴ Seal off

- لوله جداری تولیدی^۱:

لوله جداری تولیدی آخرین رشته جداری رانده شده در درون چاه است. این رشته برای مجزا کردن لایه‌های تولیدی، کنترل سیال تولیدی مخزن و اجازه دادن برای تولید از لایه‌های خاص مخزن به کار می‌رود. عملیات تکمیل چاه به وسیله این لوله انجام می‌شود (Devold., 2013). اندازه معمول این رشته

۹-۵ اینچ است (www.iran-spe.com).

- لوله آستری^۲:

لوله آستری نوعی از رشته‌های جداری است که به سطح نمی‌رسد. لوله آستری توسط مجموعه‌ای از متصل کننده‌ها^۳ و لغزنده‌ها^۴ به نام نگهدارنده لوله^۵ در درون رشته جداری میانی آویزان قرار می‌گیرد. در نمونه‌هایی از تکمیل چاه که در آن لوله آستری استفاده می‌گردد، آستری و لوله جداری میانی به عنوان رشته جداری تولیدی ایفای نقش می‌نمایند. بدلیل قرار گرفتن لوله‌های آستری در قسمت انتهایی چاه و آویزان بودن این لوله‌ها از درون رشته جداری میانی، مهم‌ترین معیار طراحی آن‌ها مقاومت در برابر فشار مچالگی^۶ موجود در قسمت تحتانی چاه است (Devold., 2013).

- لوله مغزی تولیدی^۷:

این نوع آستری به جای راندن یک رشته کامل جداری، جهت مجزا کردن لایه‌های تولیدی مخزن یا لایه‌های معین در هنگام تزریق (گاز و یا آب) استفاده می‌گردد. اندازه و تنظیم عمق رشته‌های جداری تقریباً وابسته به شرایط زمین‌شناسی و فشارمنفذی خصوصیات مکان در هریک از چاه‌های حفاری شده است (Devold., 2013). متداول‌ترین آرایش قرارگیری رشته جداری در چند کشور در شکل ۲-۳ ارائه

^۱ Production Casing

^۲ Liner String

^۳ Packer

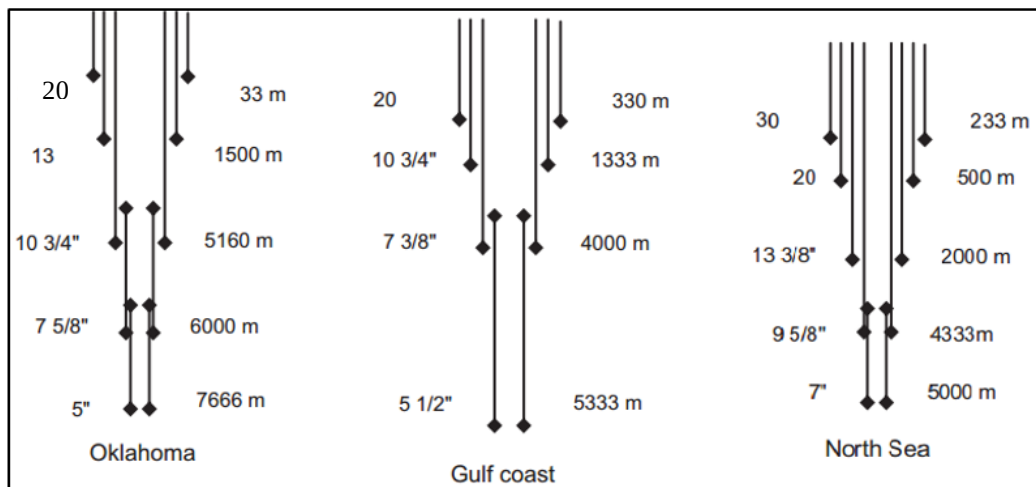
^۴ Slips

^۵ Liner Hanger

^۶ Collapse Pressure

^۷ Production Tubing

شده است.



شکل ۲-۳: تعدادی از ترکیب های مختلف لوله جداری در سه میدان نفتی بزرگ دنیا (Devold, 2013)

۲-۳-۳- سیمان کاری فضای خالی بین لوله جداری و سازند

سیمانکاری فضای خالی بین لوله جداری و سازند پیرامون آن یکی از اصلی ترین عملیات انجام شده در طول حفاری یک چاه می باشد. سیمان نقش اساسی در عملکرد مناسب لوله های جداری و تجهیزات سرچاهی دارد. همچنین سیمان یک عایق نفوذ ناپذیر در برابر عبور گازها و سیالات سازند ایجاد می نماید و بدین ترتیب سازندها عایق می شوند (Devold, 2013). غلاف سیمانی اطراف لوله نقش مهمی در محافظت رشته جداری از خوردگی و پوسیدگی ناشی از تأثیر عوامل مخرب محیطی، جلوگیری از آلودگی سازند و سفره های آب زیرزمینی احتمالی مجاور چاه، ایجاد آب بندی و جلوگیری از نشتی برای کنترل و ایمنی تجهیزات سر چاهی دارد. طراحی سیمان تزریقی به فضای خالی بین لوله و دیواره چاه مستلزم رعایت ملاحظات است که در ادامه به آن اشاره شده است. ویسکوزیته سیمان و دوره زمانی بندش آن باید متناسب با عمق تزریق باشد. به محض قرارگیری در چاه، باید سریعاً و در کوتاه مدت مقاومت کافی در آن ایجاد شود تا از گسیختگی جلوگیری به عمل آید. از نظر ترکیب شیمیایی نیز می بایست به گونه ای باشد که سیالات طبقات مختلف زمین بر روی آن تاثیری نگذارند. حفظ پایداری بلند مدت چاه تا حد زیادی به مقاومت بلند مدت غلاف سیمانی بستگی دارد (Teodoriu et al., 2013). بنابراین بالا بودن کیفیت در بلند مدت نیز باید مد نظر باشد. همچنین رعایت این نکته که غلاف سیمانی

باید فاقد نفوذپذیری باشد تا سیال طبقات در آن نفوذ نکند بسیار حائز اهمیت است. روش سیمان کاری به این ترتیب است که دوغاب سیمان با فشار درون لوله جداری وارد می شود. دوغاب پس از عبور از درون لوله وارد فضای حلقوی می شود و تا ارتفاع از پیش تعیین شده بالا می آید. مسیری که دوغاب سیمان طی می کند شبیه مسیر گل حفاری است. به این معنی که از درون لوله جداری خارج شده و وارد فضای حلقوی می شود. وقتی فضای حلقوی پر شد، ساکن می شود و پس از مدتی خشک شده و سخت می گردد.

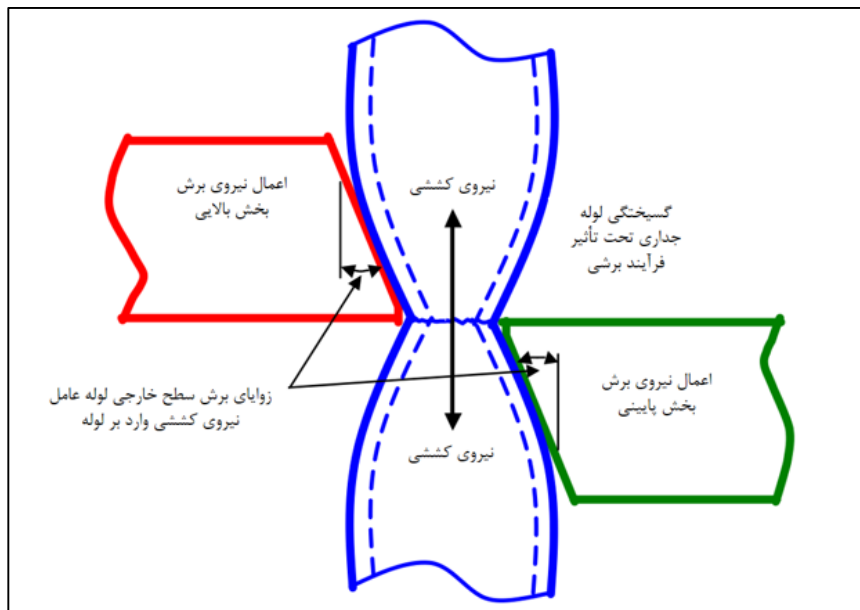
۲-۴- انواع گسیختگی های لوله جداری در مقاطع نمکی

گسیختگی لوله جداری چاه های نفت در اثر رفتار خزشی سازند نمکی پیرامون چاه در بسیاری از میداین نفتی گزارش شده است. بارگذاری موضعی و مچالگی لوله جداری در مجاورت سازند شکل پذیر و برش لوله جداری در فصل مشترک لایه نمکی با لایه های مجاور، به عنوان دو مکانیزم اصلی گسیختگی لوله جداری در مقاطع نمکی تشخیص داده شده اند. تحقیقات نشان می دهد که مقاومت لوله جداری در مقابل بارهای نقطه ای تقریباً $\frac{1}{3}$ مقاومت در برابر بارهای یکنواخت می باشد (Wilson et al., 2002). لذا اگر لوله تحت بارگذاری موضعی قرار گیرد، حتی قوی ترین لوله که از لحاظ عملیاتی می توان استفاده کرد نیز به اندازه کافی مقاوم نیست (Chatar and Imler, 2010). برای رفع مشکل گسیختگی در مقاطع نمکی راه های مختلفی وجود دارد. سیمان کاری مناسب، اثر بارگذاری موضعی را می کاهد و باعث می شود که بارهای خارجی اعمالی به صورت یک فشار هیدرواستاتیکی به لوله جداری منتقل شوند (Cheatham and McEver, 1964; Khalaf, 1985).

۲-۴-۱- برش های موضعی

این شکل گسیختگی معمولاً با ترک خوردگی در محل اعمال تنش برشی موضعی در محدوده کوچکی از سطح لوله جداری مشخص می شود. با ادامه یافتن اعمال تنش (معمولاً این تداوم بارگذاری به دلیل رفتارهای وابسته به زمان برخی لایه های تغییر شکل پذیر و یا لغزش سطوح لغزشی کوچک اتفاق خواهد

افتاد) در اثر نیروی کششی ایجاد شده در طرفین ترک، بطور تدریجی باز شده و گسیختگی به شکل ترکیبگی نمایان می‌شود. در این حالت است که افت فشار تولید نفت و گاز از چاه به میزان چشم‌گیری افزایش خواهد یافت. بروز این‌گونه گسیختگی، از نظر زیست محیطی، از آن جهت که احتمال آلوده شدن لایه‌های بالایی مخزن که حاوی سفره‌های آب زیرزمینی‌اند وجود دارد بسیار نامطلوب خواهد بود. در شکل ۴-۲ برش سازند پیرامون چاه و در نتیجه آن گسیختگی برشی لوله جداری ارائه شده است.

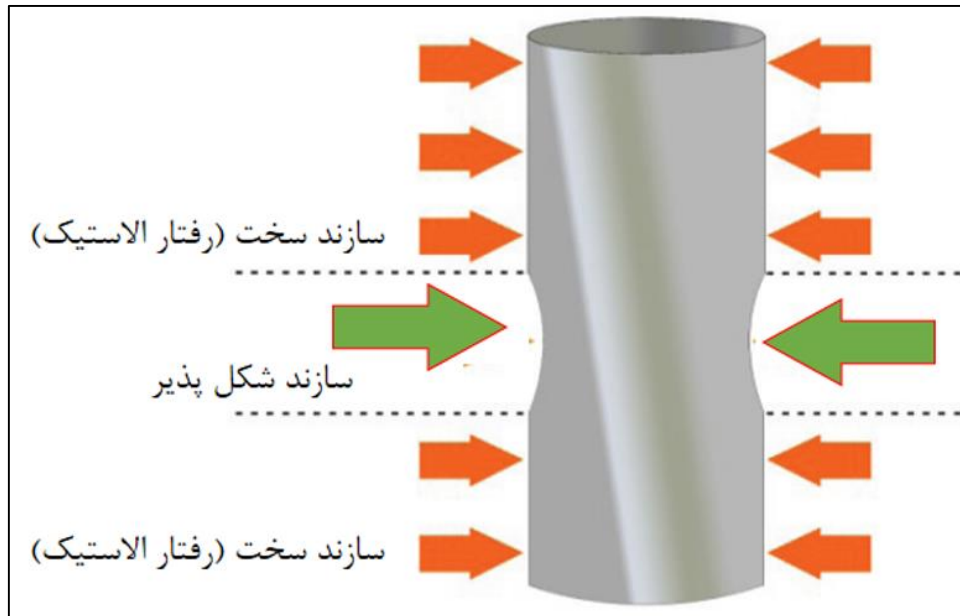


شکل ۴-۲: نحوه گسیختگی لوله جداری تحت تأثیر نیروهای برشی (Tekin, 2010)

۲-۴-۲- مچالگی

مچالگی لوله‌های جداری از جمله مشکلات حاد پایداری چاه‌های میادین هیدروکربنی است. این پدیده موجب خارج شدن چاه از چرخه تولید شده و هزینه‌های زیادی به شرکت‌های نفتی در سراسر دنیا تحمیل می‌کند. مچالگی را می‌توان در اثر اعمال نیروهای همه جانبه متقارن اما غیریکنواخت در ترازهای مختلف در لوله‌های جداری مشاهده کرد. یکی از علل اعمال این شکل از نیروها وجود سازندهای شکل‌پذیر مانند سازندهای نمکی به دلیل رفتارهای ویسکوپلاستیک وابسته به زمان آن است. در شکل ۵-۲ نحوه اعمال نیروها و چگونگی ایجاد مچالگی در مجاورت سازند شکل‌پذیر نشان داده شده است. مدت زمان بروز تغییرشکل‌های سطح لوله جداری مجاور سازند نمکی بصورت مچالگی از مدت کوتاهی

پس از نصب لوله در چاه و تحت تأثیر فشار گل و تزریق سیمان آغاز شده و تقریباً تا ۱۵ سال ادامه می‌یابد (Celegg, 1971).



شکل ۲-۵: مچالگی لوله در مجاورت سازند شکل پذیر (Dusseault, 2001)

۲-۵- معیار گسیختگی لوله‌های جداری

بهترین معیار برای بررسی وضعیت لوله از نظر گسیختگی، معیار Von Mises-Henky یا همان اعوجاج بر اساس انرژی حد می‌باشد (کلانتری، ۱۳۸۰). این معیار با توجه به تنش‌های اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ و مقاومت تسلیم σ_{Yield} به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\sigma_{Mises} \leq \sigma_{yield}$$

مقدار رابطه ۱ به تنش‌های وون مایسز^۱ معروف است. با رسیدن این مقدار به مقاومت

^۱ Von Mises

تسلیم لوله جداری، گسیختگی رخ خواهد داد (Teylor., 1932). در این پژوهش در تمام مراحل مدل - سازی مقادیر بیشینه تنش‌های Von-Mises روی لوله جداری ارائه شده و این معیار برای بیان مفهوم گسیختگی در مطالعه کنونی در نظر گرفته شده است.

۲-۶- معیار مچالگی لوله جداری

مچالگی لوله جداری به دو دسته مچالگی شدید و خفیف تقسیم می شود: چنانچه مچالگی لوله در حدی باشد که مانع راندن یا بیرون کشیدن رشته تکمیلی از چاه شود مچالگی شدید نامیده می شود. در صورتی که لوله دچار تغییر شکل شود ولی امکان راندن و بیرون کشیدن رشته تکمیلی و تعویض آن در شرایطی که چاه دچار کاهش تولید یا بخشی از رشته تکمیلی دچار نشستی شده است وجود داشته باشد، نوع مچالگی خفیف قلمداد می شود (توکلی و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۷- جمع بندی

در این فصل از تحقیق، به بیان جنبه‌های مختلف پدیده گسیختگی لوله جداری چاه نفت مجارو سازندهای نمکی پرداخته شده است. در ادامه انواع تغییرشکل‌های لوله جداری نصب شده در چاه در مجاورت سازند نمکی، معرفی شده است. بنابراین با شناخت انواع الگوهای تغییرشکل لوله جداری به انتخاب معیارهای گسیختگی و مچالگی لوله جداری پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور بررسی گسیختگی لوله جداری، در هر مرحله میزان تنش‌های وون مایسز سطح لوله با مقدار مقاومت تسلیم لوله مقایسه خواهد شد. همچنین به منظور بررسی شدت مچالگی، تمام تغییر شکل‌های سطح لوله جداری به شکل درصدی از ضخامت لوله بیان خواهد شد.

مروری بر مطالعات گذشته

امروزه نیاز به در نظر گرفتن زمان در تحلیل‌های مهندسی رو به افزایش است. خزش نیز به عنوان یک رفتار وابسته به زمان در تحلیل و بررسی پدیده‌های زمین ساختاری و همچنین پیش‌بینی پایداری بلندمدت در مهندسی مکانیک سنگ مورد توجه قرار گرفته است. تغییر شکل‌های وابسته به زمان همواره می‌توانند پایداری برخی فضاها را زیرزمینی مانند تونل، مغار و چاه را به تدریج و طی سال‌های زیاد پس از احداث سازه تهدید کنند. چاه‌های نفتی به عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های زیرزمینی همواره در معرض این تهدید قرار دارند که علت آن وجود سنگ‌های رسوبی مستعد رفتارهای وابسته به زمان در مناطق نفت‌خیز است. هزینه‌های بالای حفاری و از دست رفتن بخش عمده‌ای از ذخایر با متروک شدن چاه‌های تولیدی، لزوم پایداری بلندمدت چاه‌های نفتی را بیش از پیش آشکار می‌کند. در سال‌های گذشته تلاش‌های متعددی به منظور ارائه مدل‌های پیش‌بینی رفتار سنگ‌های دارای خاصیت تغییر شکل وابسته به زمان صورت گرفته است. در این مطالعات، سنگ نمک به عنوان ماده‌ای با رفتار ویسکوپلاستیک خزشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. بطور کلی این مطالعات را می‌توان به دو دسته مطالعات آزمایشگاهی و استفاده از روش‌های عددی تقسیم کرد. در ادامه تعدادی از مهم‌ترین این مطالعات ارائه شده است.

۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر

روش‌های آزمایشگاهی از مهم‌ترین راه‌های بررسی خواص مکانیکی سنگ‌ها است که نتایج آن پایه‌ای برای مدل‌سازی‌های عددی محسوب می‌شود. با انجام آزمون‌های خزشی بر روی نمونه سنگ‌های میادین نفتی، می‌توان نرخ کرنش وابسته به زمان، مقاومت تراکمی تک محوره، مدول الاستیک و پارامترهای ویسکوز را تعیین کرد. سپس با استفاده از نتایج آزمون‌های خزشی و پردازش آماری نتایج، می‌توان پارامترهای مدل رفتاری سنگ را مشخص کرد (Jiang et al., 2014).

کارتر^۱ طی آزمایشاتی به بررسی اثر دما بر نرخ کرنش پرداخته است. بر اساس نتایج این تحقیق

¹ Carter

خواص وابسته به زمان سنگ‌ها به شدت به دما هم بستگی دارد (Carter, 1993).

یانگ^۱ و همکاران (۱۹۹۹) با انجام تعداد زیادی آزمون خزش تک محوری و سه محوری و بررسی نقش فشارهای محصورکننده و محوری بر نرخ کرنش انواع مختلف سنگ‌های رسوبی، تابعی برای مدل-سازی خزش از مرحله خزش انتقالی به خزش پایا ارائه کردند (Yang et al. 1999).

ماسینی^۲ و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی مدل‌های مختلف دریافتند که مدل برگرز - از آن جهت که ترکیبی از مدل کلون^۳ و مدل ماکسول^۴ است- برای مدل‌سازی بارگذاری لوله‌های جداری ناشی از رفتار ویسکوپلاستیک سازند نمکی بهترین گزینه محسوب می‌شود (Macini et al. 2006).

معادلات رفتاری ماکسول، کلون و برگرز با استفاده از انجام این آزمایش‌ها برای مدل خزشی نمک طی مطالعات مختلف ارائه شده است (Zhang, Liu and Wang, 2005; Deng and Huang, 1994) (2009).

لی^۵ (۲۰۰۸) نیز آزمایشاتی با این هدف را انجام داده و به نتایجی مشابه آنچه در سایر مطالعات ذکر شد دست یافت (Li, 2008).

جانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۴) با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی سه محوره خزشی بر روی مغزه‌های به دست آمده از یک میدان نفتی به بررسی رفتار خزشی نمونه‌ها در تنش‌های محصورکننده و تفاضلی مختلف پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از رگرسیون‌گیری نتایج، مقادیر مقاومت، مدول الاستیک، خواص ویسکوز سنگ، ثابت خزش و نیز معادلات رفتار مواد تعیین شده است (Jang et al., 2014). در شکل ۱-۳ نمودار کرنش-زمان یک آزمایش این پژوهش به ازای تنش محوری ۲ مگاپاسکال و تنش‌های محصورکننده مختلف طی ۴۰۰ ساعت نشان داده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، خواص ویسکوز سنگ تابعی از شرایط تنش برجا بوده است.

¹ Yang

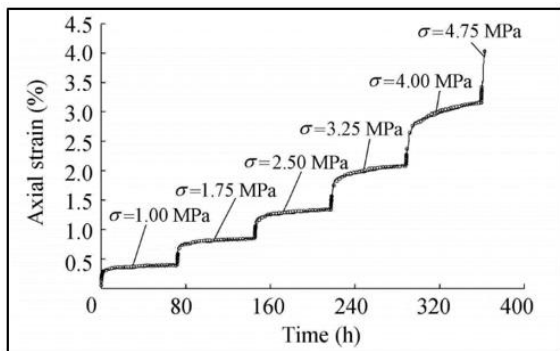
² Macini

³ Kelvin

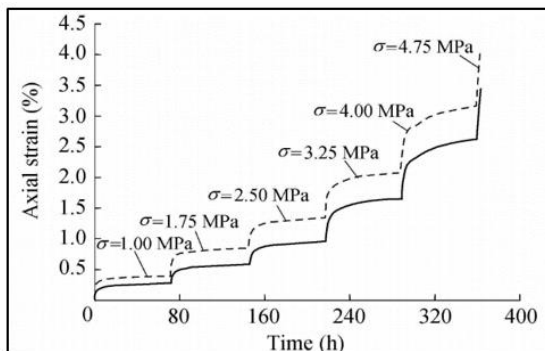
⁴ Maxwell

⁵ Li

⁶ Jang



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳: الف) نتایج آزمون آزمایشگاهی (ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل خزشی برگرز (Jang et al., 2014)

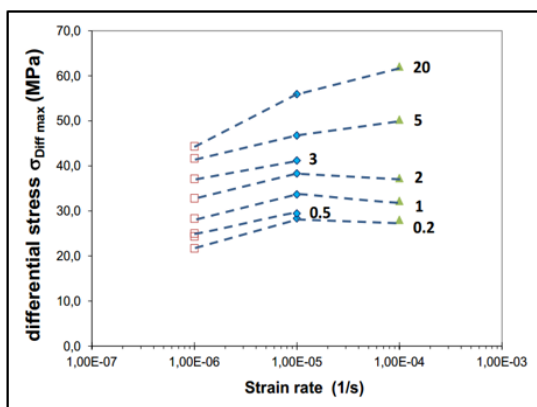
رحیمی و حسینی (۱۳۹۴) در پژوهش خود نقش فشار محصورکننده و تنش تفاضلی را بر روی رفتار خزش و سرعت کرنش سنگ نمک بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که با افزایش خطی فشار محصورکننده، نرخ کرنش به صورت غیر خطی کاهش می یابد. نهایتاً ایشان با بررسی تأثیر فشار محصورکننده و تنش تفاضلی، رابطه ای برای سرعت کرنش بدست آوردند (رحیمی و حسینی، ۱۳۹۴).

حسینی (۱۳۹۵) با نمونه برداری از معدن نمک کوه دشت کهن، ابتدا با استفاده از آزمون های تراکمی تک محوره و سه محوره مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره، مدول الاستیک و نسبت پواسون سنگ نمک این معدن را بدست آورده است. در ادامه رفتار خزشی نمونه ها با انجام آزمون های خزشی تک محوری و سه محوره ارزیابی شده است. در این پژوهش از سیستم بارگذاری چندمرحله ای برای آزمون خزش سه محوری به منظور بررسی تأثیر تنش تفاضلی بر نرخ کرنش استفاده شده است. نتایج این مطالعه نیز تأثیر تنش تفاضلی بر نرخ کرنش و کرنش وابسته به زمان مغزه های مورد بررسی نشان داده است. در نهایت مدل های عددی این آزمون ها شبیه سازی شده و با استفاده از نتایج بخش آزمایشگاهی پارامترهای مورد نیاز مدل خزشی برگرز^۱ کالیبره شده و در مدل سازی عددی یک مغار نمکی ذخیره سازی گاز استفاده شده است. در این مطالعه به دلیل هم دما در نظر گرفتن آزمون های عددی و مدل

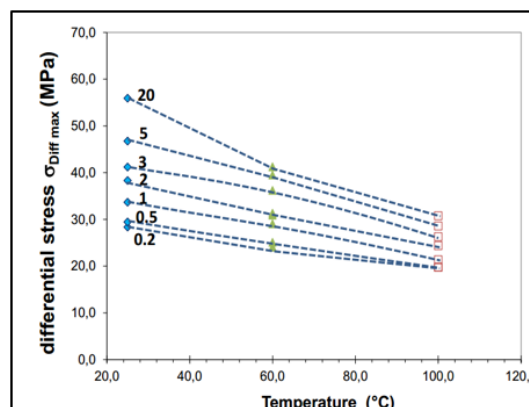
^۱ Burgers

مغار نمکی، تحلیل حرارتی در مدل سازی به کار نرفته است (حسینی، ۱۳۹۵).

هامپل^۱ و همکاران (۲۰۱۵) با انجام آزمایش هایی بر روی دو گروه اصلی مغزه های نمک خالص و نمک دارای درصدی رس که از یک سایت دفن زباله های اتمی تهیه شده است به بررسی خواص ترمومکانیکی سنگ نمک پرداخته اند. به منظور انجام آزمایش های خزش از دستگاه IfG^۲ جدید استفاده شده است. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیر دما بر مقاومت تراکمی تک محوری نمونه هاست، به این ترتیب که با افزایش دما مقادیر مقاومت نمونه ها کاهش یافته است. همچنین مقاومت نمونه ها تابع نرخ تغییر شکل آن ها است. محققان این پژوهش همچنین با انجام آزمون های خزشی بر روی مغزه های نمک خالص دریافتند که رفتار این نمک در تنش های کمتر از ۱۰ مگاپاسکال از مدل ساده توانی پیروی می کند (Hampel et al., 2015). در شکل ۲-۳ و شکل ۳-۳ نمودار تأثیر دما و نرخ کرنش بر مقاومت نمونه های نمک ارائه شده است.



شکل ۳-۳: تأثیر نرخ کرنش بر مقاومت مغزه های نمک (Hampel et al., 2015)



شکل ۲-۳: تأثیر دما بر مقاومت مغزه های نمک (Hampel et al., 2015)

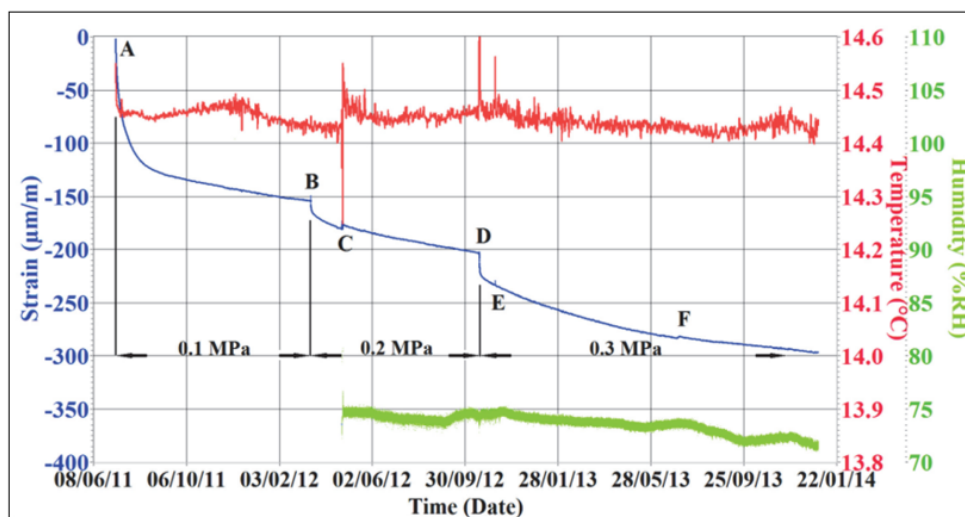
برست^۳ و همکاران (۲۰۱۵) با انجام آزمون خزش به مدت ۳۰ ماه بر روی تعداد زیادی از نمونه های سنگ نمک در ايسلند، رفتار خزشی نمک را مورد بررسی قرار دادند. به منظور کنترل دمای محیط و

¹ Hampel

^۲ Institut für Gebirgsmechanik

³ Berest

ثابت نگه داشتن آن در طول مدت آزمایش‌ها، محل آزمون در داخل گالری نمک استخراج شده معدن وورنگویل^۱ در نظر گرفته شده است. بارگذاری نمونه‌ها تحت بار ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مگاپاسکال انجام شده است. حداقل دوره زمانی هر آزمایش ۸ ماه بوده است. نتایج این تحقیق بیان کننده این است که در مرحله خزش پایا، نرخ کرنش نمونه‌ها نسبت به مقدارهای مورد انتظار برای بارهای محوری بزرگتر، بیشتر است. اگرچه نرخ کرنش نمک تابعی از تنش وارد شده است، اما نمی‌توان رابطه منطقی بین نرخ کرنش و تنش اعمالی در این آزمایش را تعریف کرد (Berest et al., 2015). در شکل ۳-۴ نمودار کرنش-زمان مغزه نمکی این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: نمودار کرنش-زمان نمونه سنگ نمک در فشار محوری ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مگاپاسکال در دما و رطوبت ثابت (Berest et al., 2015)

ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از آزمون خزش سه محوری بر روی مغزه‌های سنگ‌های کلاستیک برداشت شده از پی سد یک نیروگاه برق-آبی در کشور چین رفتار خزشی این سنگ‌ها را ارزیابی کرده‌اند. در مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش، از سیستم بارگذاری محوری چندمرحله‌ای برای اعمال بار محوری استفاده شده است. آزمایش‌ها در حالت‌های مختلف تنش محصور کننده و تنش تفاضلی در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیان کننده

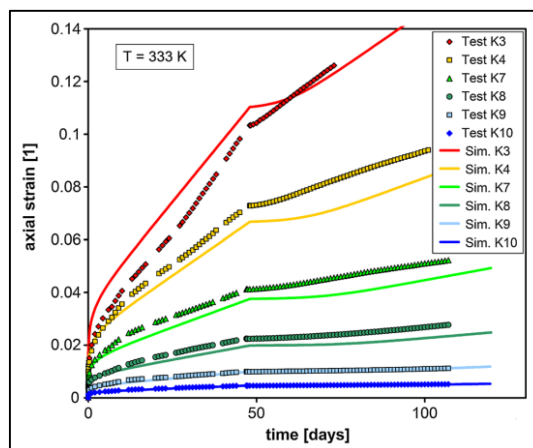
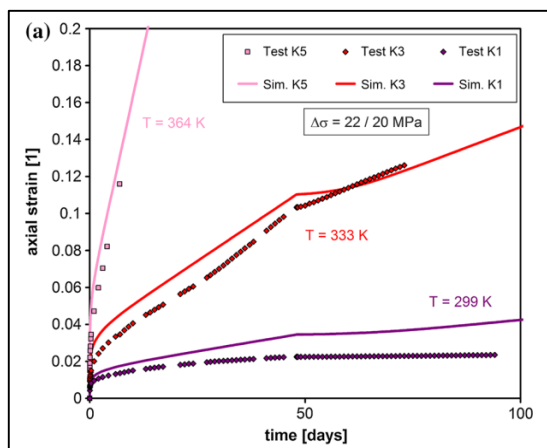
^۱ Varangéville

^۲ Zhang

تأثیرپذیری رفتار خزشی از تنش‌های تفاضلی و محصورکننده است. به این ترتیب که نرخ کرنش مغزه نمک در تنش تفاضلی پایین نزدیک به صفر است و به ازای مقادیر بالای تنش تفاضلی نرخ کرنش نمونه به سرعت افزایش یافته و نهایتاً در یک تنش تفاضلی مشخص نمونه شکسته می‌شود. مقدار تنش محصورکننده با نرخ کرنش دارای رابطه‌ی عکس است. همچنین با استفاده از نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مختلف در تنش‌های محوری و محصورکننده مختلف، پارامترهای مدل خزش برگرز بدست آمده است. مقایسه نمودار کرنش-زمان آزمایش‌های انجام شده با نمودار حاصل از معادلات مدل رفتاری برگرز، مطابقت خوبی نشان داده است (Zhang et al., 2015). در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی سنگ نمک به دلیل خواص منحصربه فرد آن مانند نفوذپذیری ناچیز که می‌تواند محلی برای ذخیره سازی گاز طبیعی و دفن زباله‌های اتمی باشد، با هدف ارزیابی دقیق رفتار آن رو به افزایش است. به این منظور گانتز^۱ و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش خزش سه محوره جدیدی با هدف بهبود روش‌های آزمایشگاهی و عددی ارزیابی خواص سنگ نمک ارائه کردند. در این پژوهش نمونه‌های نمک برای مدت ۳ ماه و دماهای متفاوت (از ۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) تحت آزمون خزش سه محوری با سیستم بارگذاری محوری هیدرولیکی قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، مدل رفتاری خزش گانتز-سالزر برای مدل‌سازی‌های عددی ارائه شده است. نتایج این مطالعه همچنین وابستگی مرحله انتقال خزش از مرحله اولیه به حالت پایا خزش به نرخ بارگذاری و مقدار بارگذاری اولیه و همچنین دما را تأیید می‌کند (Gunther et al., 2015). در شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ نمودار کرنش-زمان نمونه نمک در شرایط دما و تنش تفاضلی مختلف بصورت مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی با استفاده از روش عددی گانتز-سالزر^۲ ارائه شده است.

¹ Gunther

² Gunther-Salzer



شکل ۳-۶: نمودار کرنش-زمان آزمون خزش دومرحله‌ای آزمایشگاهی و روش عددی گانزر-سالزر به ازای تنش محوری ۲۲ مگاپاسکال و تنش محصورکننده ۲۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف (Gunther et al., 2015)

شکل ۳-۵: نمودار کرنش-زمان آزمون خزش دومرحله‌ای آزمایشگاهی و روش عددی گانزر-سالزر به ازای تنش‌های تفاضلی مختلف در دمای ثابت (Gunther et al., 2015)

۳-۳- مطالعات عددی اثر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر بر گسیختگی لوله

جداری چاه‌های نفتی

تخمین رفتار وابسته به زمان این نوع سازندهای شکل‌پذیر در اطراف چاه‌های نفتی به عوامل مختلفی وابسته است که شرایط را بسیار پیچیده می‌کند. عواملی مانند دما، عمق، شرایط تنش برجا و ضخامت لایه دارای خاصیت ویسکوپلاستیک که در شدت تأثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر روی چاه و مجموعه غلاف سیمانی - لوله جداری نقش عمده‌ای دارند. با این وجود در بیشتر مطالعات تنها امکان بررسی برخی از این عوامل وجود داشته است. لوله جداری و غلاف سیمانی چاه مجاور سازندهایی با رفتار ویسکوپلاستیک مانند نمک، گل سنگ و شیل، تحت فشار خارجی ناشی از حرکت این مواد قرار می‌گیرند. بار خارجی وارد بر چاه در طول عمر چاه در این مقاطع به‌صورت فزاینده افزایش یافته و خطر بروز گسیختگی لوله جداری تحت تأثیر این بارگذاری افزایش می‌یابد (Zhao et al., 2011). شناخت رابطه تنش و کرنش سنگ نمک و غلاف سیمانی یا رفتار مکانیکی آن‌ها برای تعیین میزان بار وارد بر لوله جداری مجاور سازندهایی با رفتار ویسکوپلاستیک ضروری است (Zhang and Liu, 2000; Zeng et al., 2002).

زارعیان جهرمی (۱۳۸۸) اثر خزش لایه‌های نمک را در بروز گسیختگی لوله‌های جداری در مغارهای نمکی با استفاده از نرم افزار FLAC2D بررسی کرده است. در این مطالعه تأثیر دما، جنس نمک، اندازه قطر چاه، سیال حفاری بر همگرایی دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل‌سازی لوله‌جداری در شرایط بدون سیمان‌کاری، ضخامت و جنس‌های مختلف و حالت لوله دو جداره به منظور بررسی تأثیر هریک از این عوامل در بروز گسیختگی لوله‌های جداری صورت گرفته است. مدل رفتاری خزش^۱ WIPP برای شبیه‌سازی نمک استفاده شده است. به عنوان نتیجه نهایی، کاربرد لوله‌های دوجداره به عنوان موثرترین راهکار جلوگیری از گسیختگی لوله‌های جداری بیان شده است (زارعیان جهرمی، ۱۳۸۸).

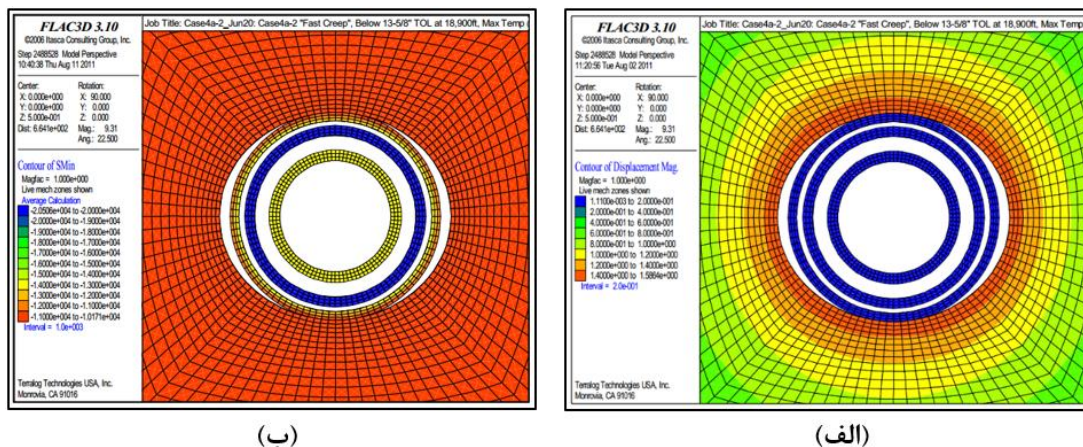
امیرشیرزاد (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار FLAC2D، رفتار خزشی سنگ نمک میدان نفتی مارون در تماس با لوله‌های جداری چاه را شبیه‌سازی کرده است. تأثیر دما بر نرخ خزش نمک و اثر آن بر لوله‌های جداری، همچنین بارگذاری یکنواخت و غیریکنواخت بر لوله‌های جداری در نتیجه‌ی جریان لایه‌های نمک با استفاده از این نرم‌افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در مدل‌سازی این پژوهش از مدل رفتار خزشی WIPP استفاده شده است. نتایج این مطالعه قدرت جریان لایه‌های نمک در بروز مچالگی و گسیختگی لوله‌های جداری را نشان داده است. همچنین در این پژوهش استفاده از لوله‌های دو جداره به منظور کنترل گسیختگی پیشنهاد شده است (امیرشیرزاد، ۱۳۹۰).

لائو^۲ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم افزار FLAC3D به مدل‌سازی یک چاه جهت‌دار میدان نفتی در خلیج مکزیک در شرایط تنش و دمای بالا با حضور لایه ۳ متری نمک پرداخته اند. هدف این پژوهش، ارزیابی میزان آسیب وارد بر لوله جداری مجاور لایه نمکی بوده است. بررسی نتایج حاکی از آن است که مدلسازی عددی یک روش کم هزینه و سریع در ارزیابی خطرات لوله‌های جداری است. مدل رفتاری الاستوپلاستیک خزشی برای لایه نمک در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی این پژوهش

^۱ Waste Isolation Pilot Plant

^۲ Lao

قطر چاه ۴۱/۹۱ سانتی متر و شرایط تنش برجا هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از لوله‌های جداری ترکیبی با قطرهای مختلف به منظور کاهش آسیب وارد بر لوله جداری تولیدی استفاده شده است. در شکل ۳-۷ مقادیر تغییر شکل و تنش‌های اعمال شده بر روی لوله‌های جداری پس از ۲۰ سال نشان داده شده است (Lao et al., 2012).

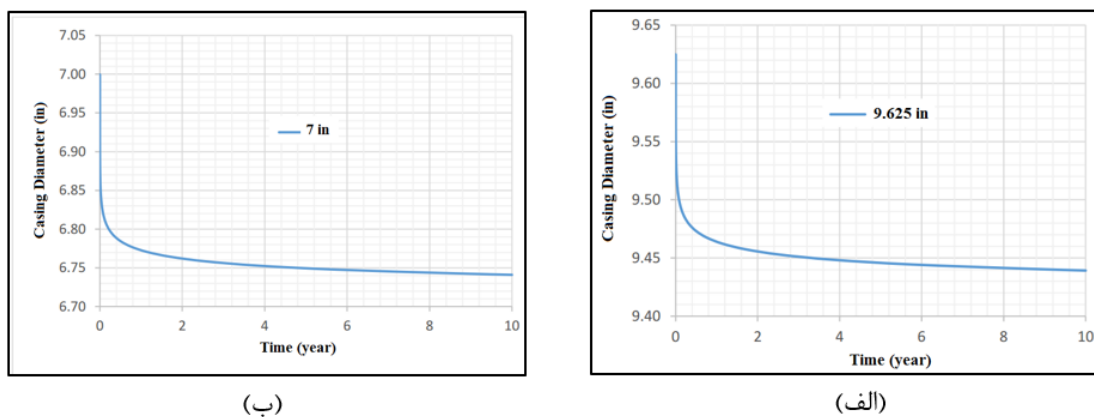


شکل ۳-۷: کنتور سطح لوله‌های جداری مجاور لایه نمک پس از ۲۰ سال (الف) جابه‌جایی (ب) تنش‌های اصلی (Lao et al., 2012)

محبی و جلالی‌فر (۱۳۹۴) مدل‌سازی از سازند، لوله‌ی جداری و سیمان در حالت‌های مختلف تکمیل چاه در مجاورت قسمت نمکی از سازند گچساران با نرم افزار ABAQUS انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه توزیع یکنواخت تنش‌های ناشی از رفتار خزشی نمک اطراف چاه به صورت یکنواخت وارد بر سطح خارجی لوله جداری و کاهش نرخ کرنش آن در بلند مدت در صورت عدم سیمان‌کاری فضای خالی بین سازند نمکی و لوله جداری را نشان داده است (محبی و جلالی‌فر، ۱۳۹۴).

قدوسی بروجنی (۱۳۹۵) در مطالعه خود به بررسی بارگذاری خارجی ناشی از خزش لایه‌های نمک بر لوله‌های جداری و در نهایت مچالگی آن پرداخته است. در این مطالعه مدل‌سازی عددی دویعدی با استفاده از نرم افزار ABAQUS و بر اساس داده‌های مربوط چاه شماره ۲۸ میدان نفتی دهلران از عمق ۲۸۲۶/۴ متری و شرایط تنش افقی حداقل ۴۸/۵ و حداکثر ۵۷ مگاپاسکال انجام شده است. مدل رفتار

خزشی نمک در این پژوهش مدل نورتن-بایلی^۱ در نظر گرفته شده است. تغییر شکل‌های لوله جداری در طول ۱۰ سال تحت تأثیر خزش لایه نمک و همچنین نقص‌های ساختاری لوله جداری مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش مقاومت مچالگی لوله جداری ناشی از وجود نواقص ساختاری لوله، تأثیر نامحسوس دما بر رفتار خزش نمک این میدان و پیشنهاد لوله جداری با گرید L-80 با توجه به میزان تغییر شکل و در نظر گرفتن جنبه اقتصادی از جمله مهم‌ترین نتایج این مطالعه هستند. در شکل ۳-۸ نمودار کاهش قطر دو نمونه لوله جداری با قطرهای ۹/۶۲۵ و ۷ اینچی طی ۱۰ سال ارائه شده است (قدوسی بروجنی، ۱۳۹۵).



شکل ۳-۸: تغییرات قطر لوله جداری طی ۱۰ سال (الف) قطر ۹/۶۲ اینچی (ب) قطر ۷ اینچی (قدوسی بروجنی، ۱۳۹۵)

در مطالعه میرالی و حسینی (۱۳۹۵) ابتدا با نمونه‌گیری از عمق ۳۱۹۲ متری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخصات ژئومکانیکی نمک موجود در یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال به دست آمده است. سپس با استفاده از نتایج آزمون خزش تک محوری مقادیر پارامترهای مدل برگرز تعیین و مدل‌سازی عددی رفتار خزشی لایه‌های نمک پیرامون این چاه انجام شده است. مدل‌سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم افزار FLAC2D در دو حالت هنگام حفاری و پس از حفاری (در تماس با لوله‌های جداری)، در شرایط تنش هیدرواستاتیک ۸۱/۳۹

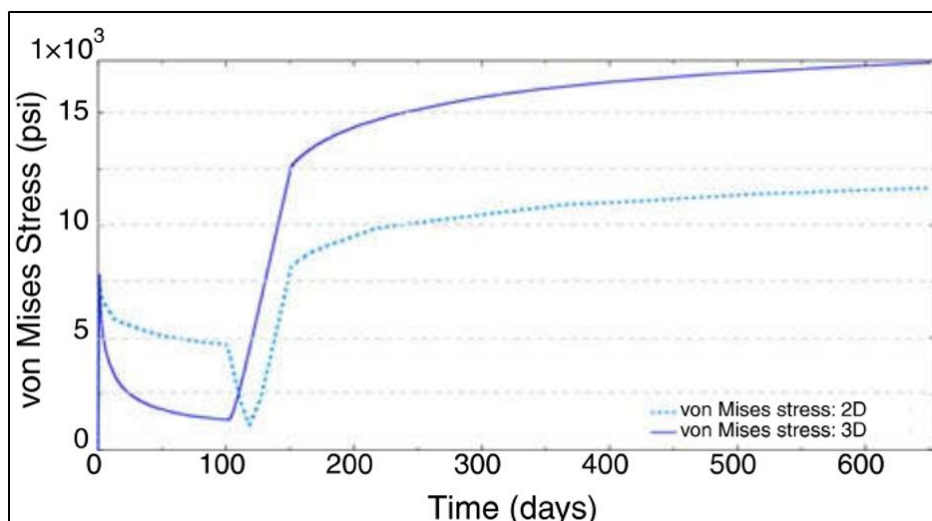
^۱ Norton-Bailey

مگاپاسکال انجام گرفته است. نتایج مدل‌سازی‌های حین حفاری حاکی از کنترل همگرایی دیواره چاه در صورت استفاده از سیال حفاری با وزن 20 PPG^1 است. استفاده از این وزن گل در مدل‌سازی عددی، موجب کنترل همگرایی دیواره چاه به اندازه‌ای نزدیک به مقادیر حاصل از قطرسنجی شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، گسیختگی لوله جداری در صورت سیمان‌کاری مناسب پشت لوله جداری، کنترل شده است. در این حالت میزان تنش معادل وارد بر لوله جداری پس از ۴۶۳ روز ۶۱ مگاپاسکال ارزیابی شده است که بسیار کمتر از مقاومت کششی لوله به مقدار ۸۶۰ مگاپاسکال است. همچنین میزان کاهش قطر لوله جداری پس از این مدت ۰/۶ میلی‌متر ارزیابی شده است (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵).

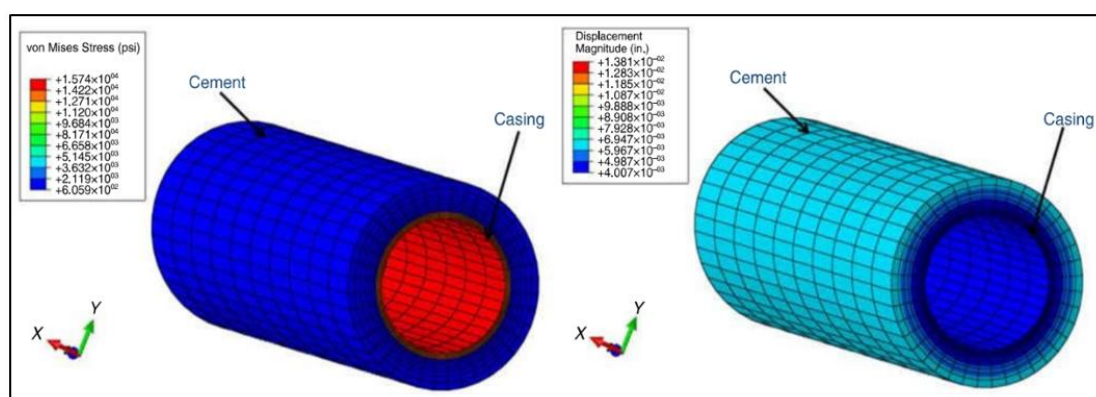
وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش المان محدود به بررسی اثر شکل چاه، دما و خواص ناهمسانگرد سنگ نمک بر یکپارچگی بلند مدت لوله جداری پرداختند (Wang et al., 2014). وانگ و همکاران (۲۰۱۶) با روش المان محدود و نرم افزار ABAQUS به طور مفهومی اثر دما و نقش تنش تفاضلی در آسیب وارد بر لوله جداری ناشی از رفتار خزشی سازند نمکی را مورد بررسی قرار دارند. در این پژوهش با هدف نمایش اثر تغییر شکل‌های قائم ناشی از وزن روباره، مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌سازی در دو بعد و سه بعد صورت گرفته است. در شکل ۳-۹ مقایسه نتایج دوبعدی و سه بعدی برای پیش‌بینی میزان تنش وارد بر لوله جداری ناشی از خزش سنگ نمک پیرامون چاه پس از ۵۰۰ روز نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-۱۰ تنش‌ها و جابجایی‌های سطح لوله جداری و غلاف سیمانی پس از ۵۰۰ روز نشان داده شده است (Wang et al., 2016). نتایج این مطالعه به خوبی غیرواقعی بودن نتایج مدل‌های دو بعدی ناشی از در نظر نگرفتن پارامترهای اساسی موثر در نرخ کرنش سازند نمکی نشان داده است. مقادیر تنش وارد بر لوله جداری در زمان یکسان در مدل دوبعدی تقریباً نصف تنش برآورد شده مدل سه‌بعدی است. این امر در سازندهای پرفشار می‌تواند بسیار بحرانی باشد.

^۱ PPG (Pound Per Gallon)

^۲ Wang



شکل ۳-۹: تنش‌های Von Mises تشکیل شده بر روی لوله جداری حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه بعدی (Wang et al., 2016)



شکل ۳-۱۰: کنتورهای تنش و جابجایی سطح لوله و غلاف سیمانی پس از ۵۰۰ روز (Wang et al., 2016)

راهکار استفاده از لوله جداری سنگین یا دوجداری برای کاهش خطر آسیب وارد بر لوله جداری مجاور سازند نمک نیز بررسی شده است. نتایج نشان دهنده کارآمد بودن این روش در صورتی است که استفاده از آن توجیه اقتصادی داشته باشد (Pattilo and Smith, 1985).

۳-۴- جمع بندی

در اغلب مطالعاتی که تاکنون در زمینه آسیب وارد بر لوله‌های جداری چاه‌های نفتی ناشی از تغییرشکل‌های وابسته به زمان لایه‌های نمکی صورت گرفته است، حل اینگونه مسائل با در نظر گرفتن تمام جنبه‌ها امکان پذیر نبوده است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان پیچیدگی مسائل خزش و زمان‌بر بودن آن با در نظر گرفتن تمام پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار ویسکوپلاستیک سنگ نمک دانست. در

مطالعات آزمایشگاهی، می‌توان زمان آزمایش‌ها را به عنوان بزرگترین محدودیت به‌شمار آورد. هزینه بر بودن آزمون‌های طولانی مدت، دشواری تهیه نمونه و برقراری شرایط مرزی در آزمایشگاه نیز عواملی هستند که مطالعات آزمایشگاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

از سوی دیگر در مطالعات عددی دوبعدی نمی‌توان نقش مهم تنش‌های تفاضلی در نرخ کرنش سازندهای نمکی که در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی به اثبات رسیده است را در نظر گرفت. عدم در نظر گرفتن این عامل، مقدار تنش وارد بر لوله جداری را بسیار پایین‌تر از واقعیت ارزیابی می‌کند. این در حالی است که در سازندهای پرفشاری مانند سازند گچساران، چنین خطایی می‌تواند منجر به از دست رفتن چاه شود.

همچنین در مطالعات سه بعدی صورت گرفته نیز تمام طول چاه در لایه نمک فرض شده است که در اینصورت امکان بررسی آسیب لوله‌های جداری در فصل مشترک لایه نمک و سایر لایه‌های سنگی و همچنین اثر ضخامت و یا توالی لایه‌ها وجود ندارد.

مدل سازی عددی کیستختگی لوله جدار می چاه
نفث تحت تأثیر خزش سازند نمکی

امروزه مدلسازی عددی به عنوان ابزاری کارآمد در برآوردهای مهندسی توده سنگ معرفی شده است. توانایی شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته ساده تا محیط‌هایی با شرایط پیچیده درزه‌اری، هیدرولیکی و خزشی با سرعت و دقت بالا و همچنین قابلیت در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف مکانیکی، حرارتی و هیدرولیکی مسئله تمایل برای استفاده از این روش را در حل مسائل ژئومکانیکی افزایش داده است. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر خزش سنگ نمک به عنوان یک رفتار وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر بر گسیختگی لوله‌های جداری، از روش عددی تفاضل محدود استفاده شده است. دقت نتایج مدلسازی عددی به دقت داده‌های ورودی بسیار وابسته است. بنابراین داده‌های میدانی مانند تنش‌های برجا و خصوصیات مکانیکی سازند اطراف چاه در عمق مورد نظر می‌بایست به دقت تعیین و در مدل اعمال شود. در این پژوهش به دلیل عدم امکان دسترسی به داده‌های ژئومکانیکی جهت ایجاد مدل پایه و تأیید نتایج مدلسازی، پژوهشی که در این زمینه در میدان نفتی کوپال انجام شده جهت مقایسه نتایج استفاده شده است. پس از انتخاب نرم افزار عددی متناسب با شرایط مسئله، مدل سه بعدی از سازند دربرگیرنده چاه در محیط نرم افزار FLAC3D ساخته شده است. در این مدلسازی پس از برقراری شرایط اولیه و مرزی، مراحل مختلف حفاری، اعمال فشار گل، لوله گذاری و تزریق دوغاب در نظر گرفته شده است. در نهایت تحلیل بلند مدت تنش‌ها و تغییرشکل‌های سطح لوله جداری در شرایط مختلف بررسی شده است که در این فصل تشریح خواهد شد.

۴-۲- انتخاب نرم‌افزار برای حل مسئله

انتخاب روش حل عددی و در ادامه آن انتخاب نوع نرم افزار تابع شرایط، هدف و همچنین پارامترهای تأثیرگذار مسئله می‌باشد. مدل‌سازی سازند دربرگیرنده چاه‌های نفت یا گاز، شرایط پیچیده‌ای دارد که در نظر گرفتن همه جنبه‌های تأثیرگذار بر نتایج مسئله و رسیدن به نتیجه ایده‌آل بسیار دشوار است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر بر گسیختگی لوله‌های جداری چاه‌های نفتی است. بنابراین پارامترهای زمان، رفتار خزشی نمک و دما مهم‌ترین مشخصه‌های

مدل سازی در مطالعه کنونی می باشد. با توجه به عدم وجود درزه در سازندهای نمکی ناشی از رفتار خود ترمیمی نمک، استفاده از روش های عددی محیط پیوسته برای مدل سازی این بخش از مدل مناسب است. روش های محیط پیوسته تفاضل محدود و یا المان محدود هر دو توانایی های بالایی در حل چنین مسائلی دارند. با توجه به اهمیت سرعت حل مسئله، اصلاح مدل و همچنین محدودیت سیستم های رایانه ای موجود، می بایست از روشی استفاده کرد که در کمترین زمان پاسخ مسئله حاصل شود. همچنین در حین فرآیند حل بتوان تغییرات مدل را مشاهده و در صورت نیاز اصلاح کرد. شباهت ها و تفاوت های زیادی بین نرم افزارهای المان محدود و تفاضل محدود وجود دارد که خلاصه ای از آنچه در راهنمای این نرم افزار آمده است مختصراً بیان شده است.

نخستین تفاوت این است که در نرم افزار FLAC3D بر خلاف نرم افزارهای المان محدود، برای مدل های جریان پلاستیک و بارهای گسیختگی پلاستیک^۱ از طرح گسسته سازی^۲ استفاده می شود. این در حالی است که برای حل اینگونه مسائل در نرم افزارهای المان محدود از روش کاهش انتگرالی^۳ استفاده می شود. دومین تفاوت استفاده از معادلات تمام دینامیکی برای جابه جایی ها، حتی هنگامی که سیستم استاتیکی است. این قابلیت امکان محاسبه ناپایداری فیزیکی سیستم بدون عوارض عددی (خطاهای ناشی از ساده سازی های روش های عددی) را فراهم می کند. سومین تفاوت را می توان قابلیت استفاده از حل صریح در نرم افزار FLAC3D بر خلاف حل ضمنی در روش المان محدود عنوان کرد. این روش حل به شدت زمان حل مسئله را کاهش می دهد. این نکته که حل مسائل بصورت الاستیک خطی در نرم افزار FLAC3D نسبت به نرم افزارهای المان محدود زمان بیشتری نیاز دارد قابل اهمیت است. در واقع کاربرد اصلی این نرم افزار در حل مسائل به صورت تنش-کرنش غیرخطی و کرنش های بزرگ مقیاسی است که تحت تأثیر این رفتارها مدل عددی بسیار ناپایدار می شود (ITASCA Consulting Group, Inc., 2016). به این ترتیب نرم افزار FLAC3D که بر پایه روش تفاضل محدود توسعه یافته است، برای

¹ plastic collapse loads

² mixed discretization scheme

³ reduced integration scheme

مدل‌سازی تأثیر رفتاروابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر بر گسیختگی لوله‌های جداری چاه نفت انتخاب شده است.

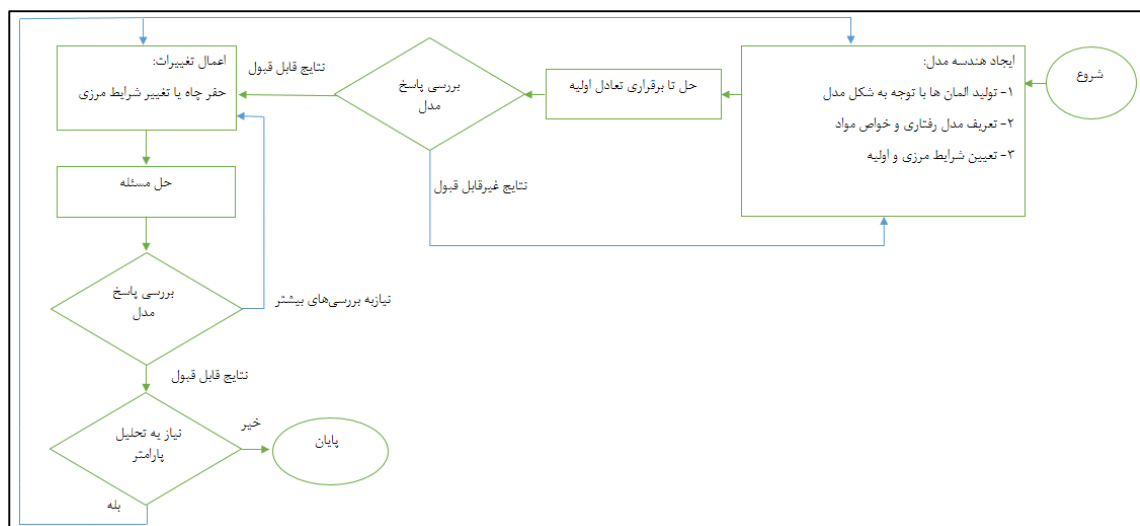
۴-۳- معرفی نرم‌افزار FLAC3D

FLAC3D نرم افزار تفاضل محدودی است که برای محاسبات مکانیکی به کار می‌رود. نرم‌افزار FLAC3D رفتارهای مکانیکی سه بعدی مواد را با عناوین تعادل حدی و یا جریان پلاستیک پایدار محاسبه می‌کند. همچنین در این نرم‌افزار زمانی که گام زمانی به کار می‌رود، از فرمولاسیون حل صریح استفاده می‌شود. این نرم افزار کاربردهای مختلفی در مسائل ژئومکانیکی دارد. در این نرم افزار مواد با شبکه‌های چند گوشه ای در سه جهت X, Y و Z تولید می‌شوند. مواد می‌توانند تسلیم شوند، جریان یابند و گره‌ها می‌توانند تغییرشکل بزرگی در حالت کرنش بزرگ انجام دهند. به منظور اعمال نیرو و شرایط مرزی قوانین تنش-کرنش خطی و غیرخطی می‌توانند به هر المان اعمال شوند. نرم افزار FLAC3D از طرح محاسباتی صریح^۱ استفاده می‌کند. در روش صریح، جابجایی هر گره با توجه به شتاب آن گره در هر گام بارگذاری محاسبه می‌شود. در این روش، تأثیر نیروهای خارجی بر روی جسم به شکل انتشار امواج تنشی خواهد بود و مسئله به صورت دینامیکی حل می‌شود. همچنین روش محاسبات به گونه‌ای است که لازم به تشکیل ماتریس سختی برای کل سازه نیست. به طور کلی روش حل صریح شامل مراحل خرد کردن و جزئی کردن مسئله به مسایل کوچک‌تر و حل مسئله بصورت محلی می‌باشد. استفاده از این روش در حل مسائل غیرخطی برای موادی با رفتار غیرخطی بسیار کارآمد است. با این وجود نکته مهمی که نباید از آن غافل شد این است که اعتبار نتایج در روش حل صریح مشروط به انتخاب گام‌های زمانی کوچک است (Lau, 2010).

¹ explicit

۴-۴- روند مدل‌سازی عددی سه بعدی با نرم‌افزار FLAC3D

در مدل‌سازی با هر نرم‌افزار عددی، پیروی از روندی خاص به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی بسیار اهمیت دارد. بنابراین در مطالعه کنونی روند حل منطبق بر اصول ارائه شده در دستورالعمل کاربردی نرم افزار و مطابق شکل ۴-۱ بوده است. ایجاد هندسه مدل و برقراری شرایط اولیه و مرزی نخستین مراحل مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC3D هستند که نقش بسیار تعیین کننده‌ای در دقت حل مسئله دارند. پس از اطمینان یافتن از اعمال شرایط مورد نظر در هندسه اولیه، تغییرات متناسب با هدف در مدل ایجاد شده و پس از بررسی و تأیید صحت نتایج اولیه در صورت نیاز به تحلیل حساسیت بخش‌های مختلف مدل پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۱: روندنمای حل مسائل با نرم افزار FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc., 2013)

۴-۴-۱- ساخت هندسه سه بعدی مدل مرجع

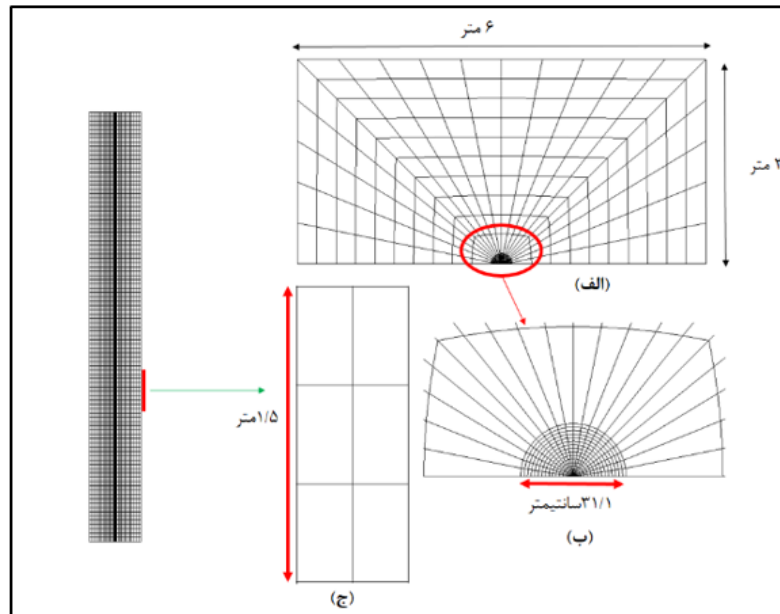
یک مدل سه بعدی با خصوصیات مواد و شرایطی مشابه پژوهش میرالی و حسینی (۱۳۹۵) به عنوان مدل مرجع برای اعتبارسنجی نتایج در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن حاکم بر حل مسئله نیمی از مدل ساخته شده است. این کار باعث افزایش سرعت حل مسئله می‌شود. به منظور کاهش اثرات مرزی، فاصله مرکز چاه تا نزدیک‌ترین مرز ۱۰ برابر قطر چاه تعیین شده است. بنابراین ابعاد مدل $50 \times 3 \times 6$ متر مطابق شکل ۴-۲ در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۱- انتخاب شبکه مش بندی بهینه

اجرای شبکه مش بندی بهینه و برقراری تناسب میان چگالی زون بندی در بخش های مختلف مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. توزیع زون بندی و ابعاد زون ها بطور مستقیم سرعت حل مسئله و پاسخ های مدل را تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین با هدف به کارگیری شبکه زون های بهینه در این پژوهش، تحلیل شبکه بندی نسبت به برقراری شرایط مرزی و تعادل مکانیکی اولیه صورت گرفته است. به طور قطع با کوچکتر شدن ابعاد المان ها، مدل دقیق تر خواهد شد، اما باید در نظر داشت که زمان حل مسئله متناسب با افزایش تعداد المان ها افزایش خواهد یافت. بر اساس آنچه که در جدول ۴-۱ ارائه شده است، و به ازای مش بندی مرحله ۴ بیشترین همگرایی تنش برجا به مقادیر مورد نظر حاصل شده است. نسبت ابعاد زون ها به اندازه مدل در راستای X و Y $0/6$ و در راستای Z نیز $0/5$ در نظر گرفته شده است. به این ترتیب تعداد زون های مدل $50,000$ عدد می باشد. شبکه مش بندی نهایی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. به دلیل پیوستگی کامل مدل و متقارن بودن آن، در صورت مدلسازی کل چاه و فضای پیرامون آن، با در نظر گرفتن شبکه بندی مرحله چهارم تعداد $100,000$ عدد زون ایجاد می شد. بنابراین مدلسازی نصف چاه و کاهش تعداد زون ها با هدف افزایش سرعت حل مسئله مد نظر قرار گرفته است.

جدول ۴-۱: نتایج تحلیل مدل نسبت به شبکه مش بندی های مختلف (تنش قائم $81/396$ مگاپاسکال)

مرحله	تعداد زون در راستای X	تعداد زون در راستای Y	تعداد زون در راستای Z	تعداد زون های شعاعی	تنش قائم	تعداد گام تا تعادل مکانیکی (10^4)
۱	۹	۹	۵۰	۹	$81/9$	$1/035$
۲	۶	۶	۷۵	۶	$81/5$	$1/702$
۳	۳	۳	۱۰۰	۶	$81/41$	$1/442$
۴	۵	۵	۱۰۰	۵	$81/33$	$1/40$

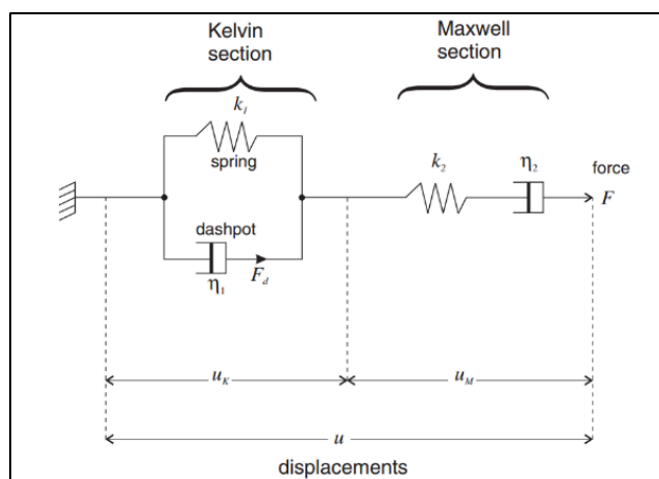


شکل ۲-۴: شبکه مش بندی بهینه مدل الف) راستای X و Y و شعاعی ب) محل حفاری چاه ج) راستای Z

۲-۴-۴- تعیین مدل و خصوصیات مواد

در نرم افزار FLAC3D با استفاده از دستور "Model mechanical" مدل رفتاری بخش های مختلف مسئله تعیین می شود. به منظور ساخت یک مدل پایه و مقایسه نتایج آن با مدل مشابه میرالی و حسینی (۱۳۹۵) برای مدل سازی سازند از دو مدل برگرز (در میان لایه نمکی) و الاستیک (بالا و پایین میان لایه نمکی) استفاده شده است. در ادامه به معرفی پارامترهای مورد نیاز هر مدل و مقادیر به کار رفته در این مطالعه پرداخته شده است.

رفتار خزشی برگرز برای لایه نمک استفاده شده است. این رفتار شامل ترکیبی از رفتار ماکسول و کلوین است (شکل ۳-۴). پارامترهای u_M و u_k به ترتیب جابجایی های بخش های ماکسول و کلوین تحت اعمال نیروی F هستند.



شکل ۴-۳: پارامترهای مدل خزشی برگرز (Itasca Consulting group, 2016)

مقادیر پارامترهای مدل خزشی برگرز به کار رفته در این پژوهش بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های برداشت شده از میدان نفتی کوپال و سازند گچساران در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۲: پارامترهای مدل برگرز (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵)

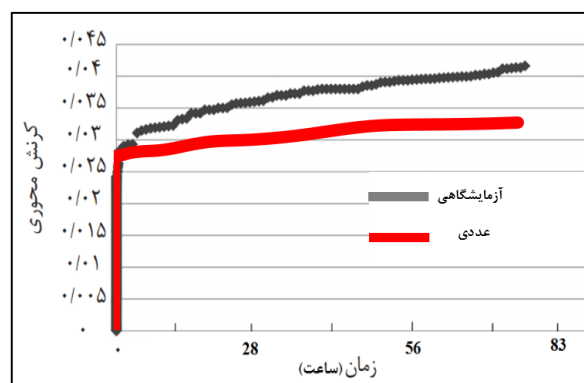
پارامتر (واحد)	نمایه در مدل	مقدار
مدول بالک (گیگاپاسکال)	-	۱۰/۴۶
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	-	۲۵۰۰
مدول برشی ماکسول (مگاپاسکال)	K_2	۱۲۴/۷۱
مدول برشی کلوین (مگاپاسکال)	K_1	۵۱۶
ویسکوزیته ماکسول (پاسکال*ثانیه)	η_2	$1/1 \times 10^{15}$
ویسکوزیته کلوین (پاسکال*ثانیه)	η_1	$1/12 \times 10^{14}$

مدلسازی آزمون خزش تک محوری و سه محوری با هدف بررسی رفتار بلند مدت سنگ نمک مورد مطالعه در نرم افزار FLAC3D انجام شده است. در ادامه نحوه مدلسازی و نتایج این آزمون‌ها ارائه شده است.

الف) مدل‌سازی آزمون خزش تک محوره

مدل‌سازی آزمون خزش تک محوری با هدف مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی انجام شده است. شکل ۴-۴ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان داده است. آزمون آزمایشگاهی خزش

تک محوری در شرایط دمایی ۹۰ درجه سانتی‌گراد و بر روی نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۸۰ میلی‌متر و قطر ۷۳ میلی‌متر انجام شده است (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵). مدل عددی این آزمون نیز مطابق شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده است. تطابق نرخ کرنش در مرحله اولیه خزش و نزدیک بودن روند منحنی کرنش-زمان مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی در مرحله خزش ثانویه بیان‌کننده اعتبار نتایج مدل-سازی عددی و مناسب بودن رفتار خزشی برگرز برای تحلیل این سنگ نمک است. اختلاف نتایج در مرحله خزش ثانویه به دلیل در نظر نگرفتن دما در مدل عددی است.



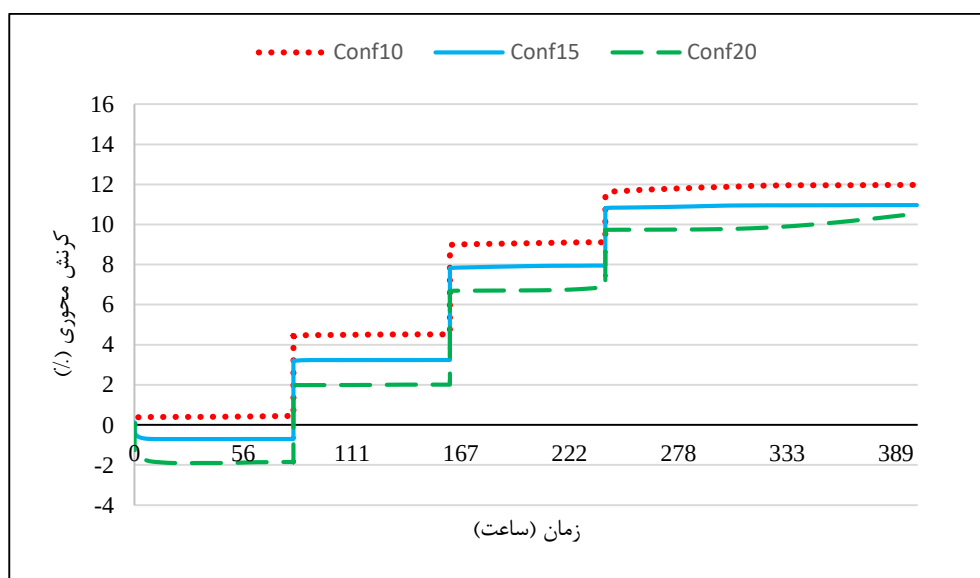
شکل ۴-۴: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵) خزش تک محوری

ب) مدل‌سازی آزمون خزش سه محوره با استفاده از بارگذاری چندمرحله‌ای

آزمون خزش سه محوره با فشار محوری چندمرحله‌ای با هدف بررسی تأثیر سطح تنش تفاضلی بر رفتار خزشی سنگ نمک مدل‌سازی شده است. در آزمایشگاه، بار محوری در این آزمون توسط سیستم بارگذاری خودکنترل^۱ به نمونه سنگ وارد می‌شود (Gunther, 2015). در مدل عددی با استفاده از کدنویسی FISH یک بارگذاری محوری چندمرحله‌ای همزمان با اعمال فشار محصورکننده بر روی مغزه عمل می‌کند. نتایج این آزمون که در حضور تنش‌های محوری ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۴۵ برای تنش‌های محصورکننده ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال در شکل ۴-۵ ارائه شده است. این مقادیر تنش متناسب با ابعاد مغزه و میزان تنش تفاضلی مورد نظر در مدلسازی تعیین شده است. بر اساس این نتایج افزایش تنش تفاضلی به شدت نرخ کرنش نمک را افزایش داده است. همچنین با افزایش فشار محصورکننده

¹ Servo control

تغییر شکل وابسته به زمان سنگ نمک کاهش یافته است. بنابراین کمترین تغییر شکل به ازای فشار محصورکننده بالا رخ میدهد. مقایسه این نتایج با مطالعه (Gunther et al., 2015) که در فصل سوم این پژوهش شرح داده شد، حاکی از مطابقت روند مدل عددی آزمون آزمایشگاهی با آزمون آزمایشگاهی است.



شکل ۴-۵: نتایج مدلسازی عددی آزمون خزش سه محوری با بارگذاری چندمرحله‌ای در فشارهای محصورکننده ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال

۴-۲-۱- خصوصیات مدل موهر-کلمب

انتخاب مدل رفتاری متناسب با جنس مواد از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی عددی است. بررسی غلاف سیمانی و لوله جداری، تحت تأثیر نیروهای برشی و نرمال حاصل از جریان لایه نمک تحت تأثیر رفتار وابسته به زمان خزشی مستلزم داشتن مدل رفتاری متناسب است. در بسیاری از موارد، تعیین مدل رفتاری وابسته به هدف حل مسئله است. در اغلب مطالعات ژئومکانیکی با هدف بررسی پایداری چاه نفت، از مدل رفتاری موهر-کلمب برای غلاف سیمانی و لوله جداری استفاده شده است. در این صورت با مقایسه مقدار تنش تسلیم مدل موهر-کلمب با مقادیر تنش وون مایسز تشکیل شده روی هر بخش می‌توان گسیختگی و آسیب وارد را مشخص کرد. خصوصیات مدل رفتاری موهر-کلمب در جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳: خصوصیات مدل موهر-کلمب (فارسی مدان، ۱۳۹۰)

مقاومت تسلیم کششی (MPa)	چسندگی (MPa)	زاویه اصطکاک	چگالی (Kg/cm ³)	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)	خصوصیات
۴/۸۳	۱۲/۴	۳۰	۳۰۰۰	۱۲/۸	۹/۶	غلاف سیمانی
۸۶۲	-	-	۷۸۶۳/۰۹۱۳	۱۵۵	۷۷/۸	لوله جداری

۴-۲-۴-۲- خصوصیات بخش الاستیک سازند

با هدف بررسی گسیختگی لوله جداری به شکل برش موضعی در محدوده فصل مشترک لایه‌های مجاور چاه، از دو لایه با رفتار مکانیکی الاستیک در بالا و پایین میان لایه نمکی استفاده شده است. مدل رفتاری الاستیک ساده‌ترین مدل رفتاری در نرم‌افزار FLAC3D است. استفاده از این مدل رفتاری علاوه بر اینکه امکان بررسی برش لوله در فصل مشترک لایه نمک با سایر لایه‌ها را فراهم می‌کند، به دلیل عدم تغییر شکل پلاستیک، در بررسی نیروها و تغییر شکل‌های سطح لوله اثر خزش نمک را بطور خاص نشان می‌دهد که به طراحی چاه با هدف پایداری بلند مدت کمک قابل توجهی خواهد کرد. در جدول ۴-۴ خصوصیات مدل رفتاری الاستیک استفاده شده در بخش‌هایی از سازند ارائه شده است.

جدول ۴-۴: خصوصیات بخش الاستیک سازند (Peng and Zhang, 2007)

وزن واحد حجم (Kg/m ³)	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)	خصوصیات (واحد)
۲۵۵۰	۶/۲۹	۱/۳۴	مقدار

۴-۲-۴-۳- تعیین خصوصیات فصل مشترک لایه‌ها

برای برقراری اندرکنش مناسب، جلوگیری از خطای ناشی از فرورفتن مواد با سختی‌های متفاوت در هم و همچنین بهبود سرعت حل مسئله، استفاده از المان فصل مشترک^۱ ضروری است. با وجود اهمیت فراوان این المان و نقش خواص آن در مدل‌سازی‌های عددی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا کنون مطالعه‌ای با هدف تعیین خواص فصل مشترک لایه‌های مختلف صورت نگرفته است. از آنجا که در این

^۱ Interface

پژوهش تنها تأثیر خزش لایه نمک بر گسیختگی لوله‌های جداری چاه‌های نفتی بررسی خواهد شد، بنابراین جلوگیری از تأثیر خطای مربوط به خواص فصل مشترک بر نتایج بسیار ضروری است. در این مدل‌سازی سه نوع فصل مشترک شامل فصل مشترک میان لایه‌های مختلف سازند، فصل مشترک سازند با غلاف بتنی و در نهایت فصل مشترک غلاف بتنی با لوله جداری استفاده شده است. بر اساس دستورالعمل نرم افزار، در شرایطی مشابه مدل‌سازی کنونی به دلیل وجود موادی با سختی‌های متفاوت، سختی نرمال و برشی هر فصل مشترک ۱۰ برابر سخت‌تر از سختی ظاهری نرم‌ترین لایه مجاور آن پیشنهاد شده است. بنابراین با استفاده از رابطه ۴-۱ سختی ظاهری تمام بخش‌های مدل محاسبه شده است. خواص انواع فصل مشترک استفاده شده در مدل‌سازی در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

رابطه ۴-۱

$$K = \max \left\{ \frac{bu + \frac{4}{3}G}{\Delta L_{\min}} \right\}$$

که در این رابطه K سختی ظاهری (گیگاپاسکال)، bu مدول بالک (مگاپاسکال)، G مدول برشی (مگاپاسکال) و $\Delta L_{\min}$ کمترین بعد زون (متر) مجاور فصل مشترک در المان نرم‌تر است (ITASCA Consulting Group, Inc., 2016).

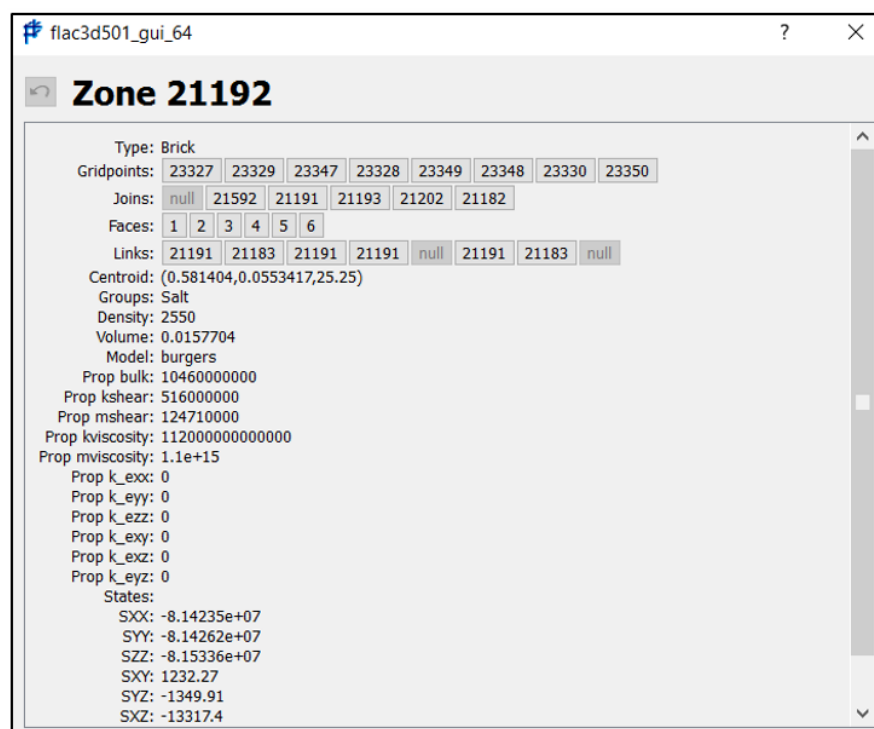
جدول ۴-۵: خواص انواع فصل مشترک‌های استفاده شده در مدل‌سازی

نوع فصل مشترک	سختی نرمال (گیگاپاسکال)	سختی برشی (گیگاپاسکال)
لایه الاستیک با لایه نمک	۳/۴	۳/۴
لایه نمک با غلاف بتنی	۴/۵	۴/۵
لایه الاستیک با غلاف بتنی	۱/۳	۱/۳
غلاف بتنی با لوله جداری	۷/۷	۷/۷

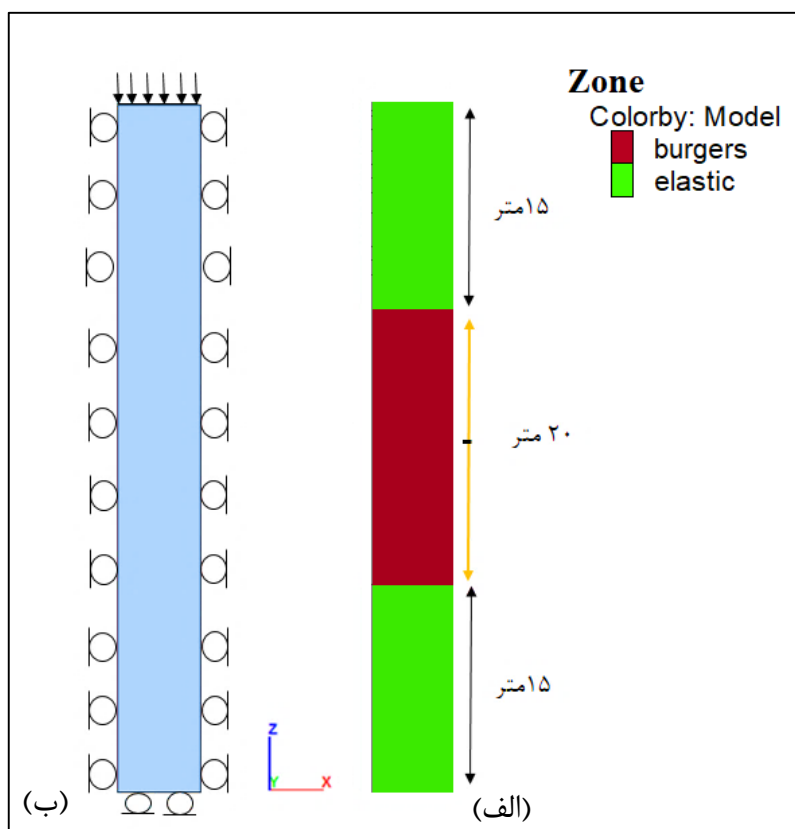
۴-۳-۴- شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه شامل برقراری مقادیر تانسور تنش برجا در مدل سه بعدی است. در نرم افزار FLAC3D می‌توان تمام مقادیر تانسور تنش را با دستور "Initial" در مدل‌سازی اعمال کرد. با توجه به اطلاعات

موجود تنش‌های برجا، سه مولفه اصلی تنش‌قائم و تنش‌های افقی بیشینه و کمینه بصورت هیدرواستاتیک و مقدار هریک $81/39$ مگاپاسکال برای عمق 3192 متر در نظر گرفته شده است (میرالی و حسینی، 1395). با توجه به عدم امکان مدل‌سازی کل این عمق، تنها 50 متر از عمق چاه مدل‌سازی شده و با استفاده از دستور "Apply szz" مقدار بار قائم $81/3$ مگاپاسکال به مرز بالایی مدل اعمال شده است. در شکل ۴-۶ شرایط یک المان در مرکز مدل سه بعدی نشان داده شده است. از مرزهای غلطکی برای ثابت کردن جابجایی دیواره‌ها و کف مدل استفاده شده است. در شکل ۴-۷ مرزهای غلطکی و اعمال تنش قائم و موقعیت مدل نسبت به مبدأ مختصات نشان داده شده است.



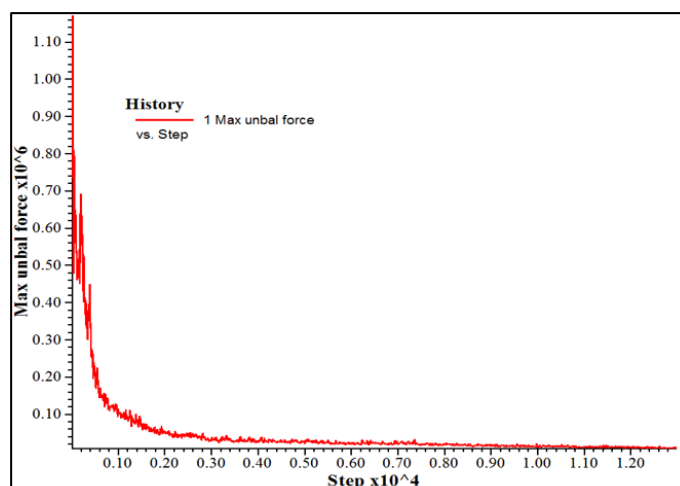
شکل ۴-۶: شرایط اولیه یک زون در مرکز مدل



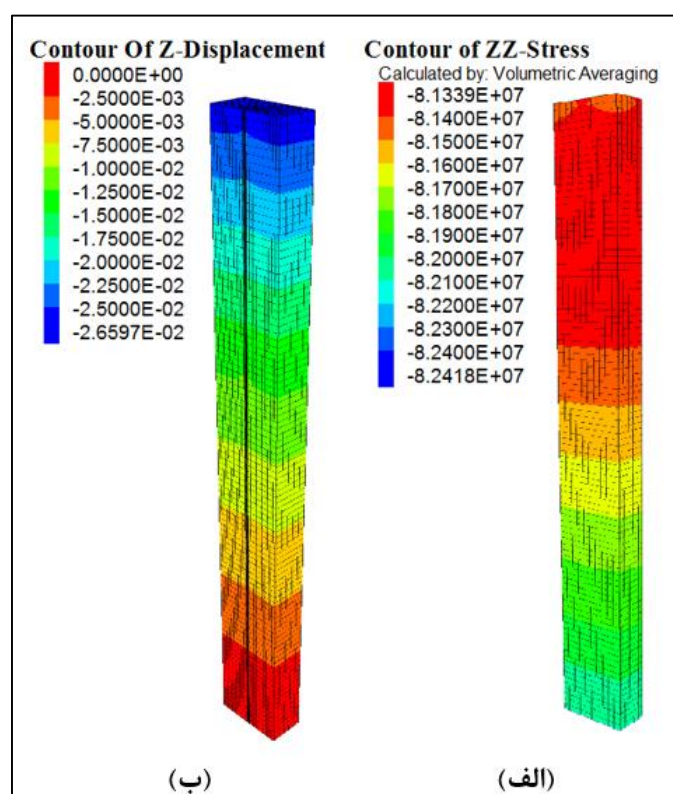
شکل ۷-۴: (الف) نمای دوبعدی توالی لایه‌ها (ب) شرایط اولیه و مرزی مدل

۴-۴-۴- تعادل اولیه

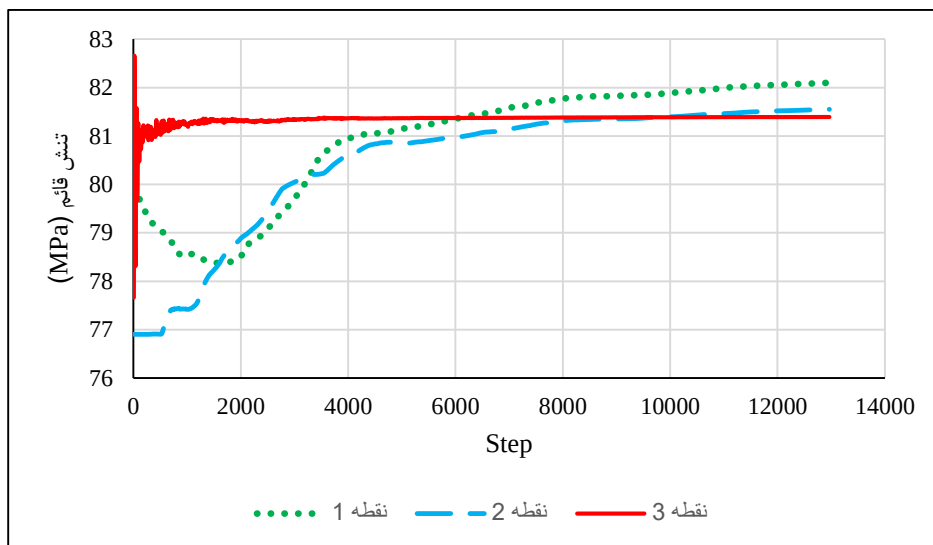
قبل از حل مسئله بصورت خزشی، رسیدن به تعادل مکانیکی نیاز است (Lau, 2010). پس از حل مدل بصورت مکانیکی، پارامترهای خاصی هستند که در طول مدل‌سازی با FLAC3D محاسبه می‌شوند. این پارامترها در موقعیت‌های کلیدی از مدل اعتبارسنجی می‌شوند. این پارامترها شامل تنش قائم، جابجایی قائم و نرخ نیروی نامتعادل می‌شوند. نیروی نامتعادل در واقع نسبت بین مقاومت کلی و بارگذاری نیروی کلی در مجموعه است. هنگامی که نیروی نامتعادل به صفر می‌رسد، سیستم به تعادل مکانیکی رسیده که برای مرحله بعد آماده شده است. تاریخچه نیروی نامتعادل بلوک در شکل ۴-۸ و کانتور جابجایی قائم و تنش قائم در شکل ۴-۹ ارائه شده است. همچنین نمودار تنش قائم سه نقطه در بالا، پایین و مرکز مدل طی برقراری تعادل اولیه در شکل ۴-۱۰ به ازای شبکه مش‌بندی ۴ ارائه شده است. اختلاف سطح تنش‌ها ناشی از اعمال گرادیان وزن بلوک است.



شکل ۴-۸: تاریخچه نیروی نامتعادل در اعتبارسنجی مدل FLAC3D



شکل ۴-۹: اعتبارسنجی مدل FLAC3D (الف) تنش قائم در تعادل اولیه (ب) جابجایی قائم در تعادل اولیه



شکل ۴-۱۰: نمودار تنش قائم سه نقطه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در کف، مرکز و بالای مدل طی برقراری تعادل اولیه

۴-۵- مدل سازی عملیات حفاری و روند تکمیل چاه

برنامه زمانی یکی از مهم ترین پارامترها در عملیات حفاری، اعمال فشار گل و عملیات تکمیل چاه است. در مطالعه کنونی نیز رعایت مدت زمان هر عملیات با دقت بالایی مورد توجه قرار گرفته است. زمان بندی رعایت شده بر اساس تجارب حفاری موجود در این مدلسازی در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۶: برنامه زمان بندی رعایت شده در مدل سازی

عملیات	دوره زمانی
حفاری ۵۰ متر چاه در عمق ۳۱۱۲ متری	۱۲/۵ ساعت (نرخ حفاری ۴ متر در ساعت)
نگهداری دیواره چاه با گل	۱۵ روز
تزریق تا سفت شدن دوغاب پشت لوله جداری	۵ ساعت
بررسی تغییر شکل لوله جداری مدل مرجع	۴ سال

بر اساس این برنامه زمانی، در ادامه به نحوه تعیین گام های محاسباتی و چگونگی مدلسازی مرحله حفاری پرداخته شده است.

۴-۵-۱- تعیین گام محاسباتی و زمان حل مسئله در FLAC3D

بر خلاف حل استاتیکی مسائل مهندسی، در مسائل خزشی، دینامیکی و جریان سیال با نرم افزار

FLAC3D امکان تعیین زمان‌های واقعی برای حل مسئله با استفاده از دستور "Solve age t" وجود دارد که در آن t همان زمان تعیین شده برای حل مسئله است. این در حالی است که در حل مسائل استاتیکی زمان‌ها غیر واقعی بوده و تنها با هدف برقراری یک تعادل در مدل اعمال می‌شود. برای رسیدن شرایط مدل به زمان واقعی در نظر گرفته شده، تعیین گام‌های زمانی ضروری است. همچنین تعیین گام زمانی و زمان حل مسئله از مهم‌ترین پارامترهای حل مسائل خزشی است. از آنجا که نرخ کرنش تابعی از تنش است، باید توجه داشت که در طی حل مسئله با تغییرات تنش ناشی از رفتار ویسکوز نمک، نیروی نامتعادل هم افزایش خواهد یافت که ممکن است نتایج تحت تأثیر افزایش نیروی نامتعادل تغییر کند. بنابراین مقدار گام زمانی عاملی کنترل کننده در این مسئله است. تغییرات گام‌های زمانی بین مقادیر بیشینه و کمینه بطور خودکار و بر اساس مقایسه نسبت حداکثر نیروی نامتعادل به نیروی گره‌ای با حد آستانه تعیین شده عمل می‌کند. مقدار بیشینه گام زمانی بر اساس رابطه ۴-۲ قابل محاسبه است (ITASCA Consulting Group, Inc., 2016).

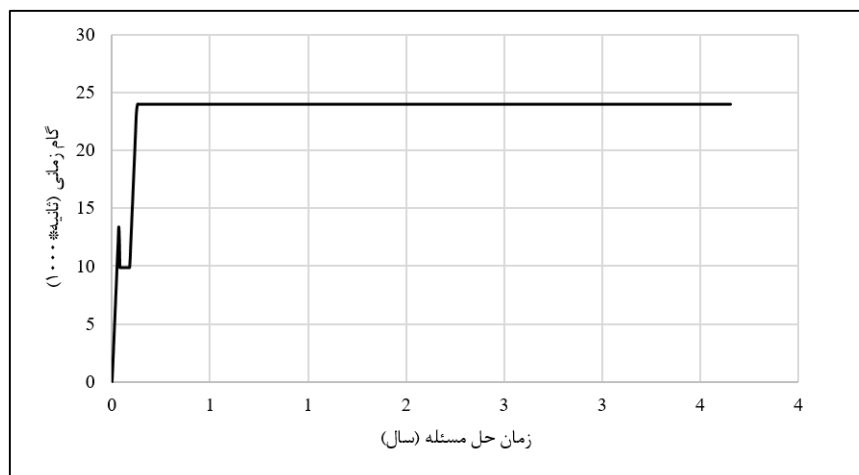
$$\Delta_{\max}^{\text{cr}} = \frac{\eta}{G}$$

رابطه ۴-۲

در این رابطه G مدول برشی نمک (مگاپاسکال) و η مقدار ویسکوزیته نمک (پاسکال×ثانیه) می‌باشد. با توجه به استفاده از مدل برگرز برای شبیه‌سازی رفتار نمک در این پژوهش، مقدار ویسکوزیته بخش ماکسول - که مقدار بزرگتری است - در این رابطه برای تعیین بیشینه گام زمانی استفاده شده است. در جدول ۴-۷ پارامترهای گام‌های زمانی در این مدل‌سازی ارائه شده است. در شکل ۴-۱۱ نمودار گام محاسباتی در طول زمان بررسی پایداری چاه، تغییرات گام زمانی با تغییرات نیروی نامتعادل را بخوبی نشان داده است. در ابتدای حفاری چاه، به دلیل بالاتر بودن نیروهای نامتعادل از حد آستانه، کوتاه بودن گام‌های زمانی قابل مشاهده است. با ادامه حل و کاهش نیروهای نامتعادل به پایین‌تر از حد آستانه، گام‌های زمانی تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۷: پارامترهای زمان استفاده شده در مدل سازی عددی

پارامترهای زمان	کمینه گام زمانی (s)	بیشینه گام زمانی (s)	حد آستانه نیروی نامتعادل (N)
مقدار	۰/۰۰۱	۹۰۰۰۰	۰/۰۰۱



شکل ۴-۱۱: نمودار گام محاسباتی در طول زمان بررسی پایداری چاه

۴-۵-۲- مدل سازی حفر چاه

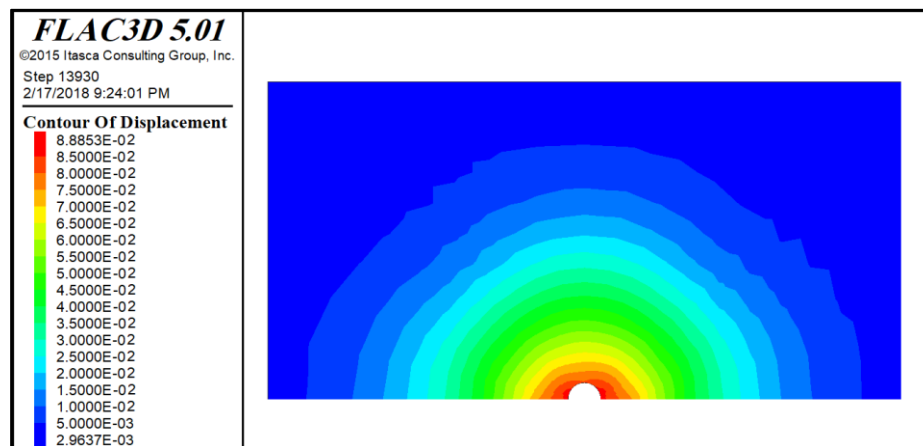
نرخ حفاری به پارامترهای بسیار متعددی همچون تجهیزات حفاری، قطر چاه، نوع سازند و ... وابسته است. در حفاری های چاه های نفتی به منظور کنترل میزان کاهش تنش در سطح حفاری شده، چاه بدون نگهداری باقی نمی ماند. به این معنی که همزمان با عملیات حفاری، بخش حفر شده با فشار گل که تابع فشار سازند در عمق مورد نظر است، به صورت موقت نگهداری می شود. پس از حفر چاه، در مواردی که در طول مسیر حفاری سازندهای حساسی همچون سازندهای نمکی، رسی و بطور کلی سازندهای مستعد بروز مشکل برای پایداری چاه قرار داشته باشند، لزوم مطالعات و بررسی ها می تواند روند تکمیل چاه و بطور مشخص لوله گذاری و تزریق سیمان را برای مدت هایی حدود ۱۰ تا ۱۵ روز به تعویق اندازد.

در این مدل سازی پس از تعادل اولیه بلوک، ابتدا جابجایی و سرعت گره ها ناشی از مرحله اول صفر می شود. سپس با حفر محدوده مشخص شده برای چاه، مدل سازی وارد فاز جدید می شود. به منظور

برقراری شرایط واقعی حفر چاه و جلوگیری از خطای نتایج ناشی از تاثیر حفر یکباره چاهی به قطر ۳۱/۱ سانتی متر با عمق ۵۰ متر در مدل، توجه به عوامل متعددی همچون نرخ حفاری چاه، نحوه اعمال فشار گل حفای و مقدار فشار آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در ادامه مدلسازی حفاری چاه در حضور گل حفاری و بدون گل حفاری ارائه خواهد شد.

۴-۵-۲-۱- حفاری چاه بدون حضور سیال حفاری

در گام نخست به منظور نمایش ضروری بودن اعمال فشار گل به دیواره چاه، میزان همگرایی دیواره چاه در مقطعی دوبعدی از مرکز مدل بدون در نظر گرفتن فشار سیال حفاری در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. نتایج حاصله، بیان کننده جریان لایه نمک به سمت محل حفاری و از دست رفتن حدود ۵۵ درصد قطر چاه در صورتی است که دیواره چاه به مدت ۱۵ روز بدون فشار گل باقی بماند. این میزان همگرایی مانع از لوله گذاری و ادامه عملیات تکمیل چاه خواهد شد. بنابراین استفاده از سیال حفاری در این شرایط ضرورت دارد.

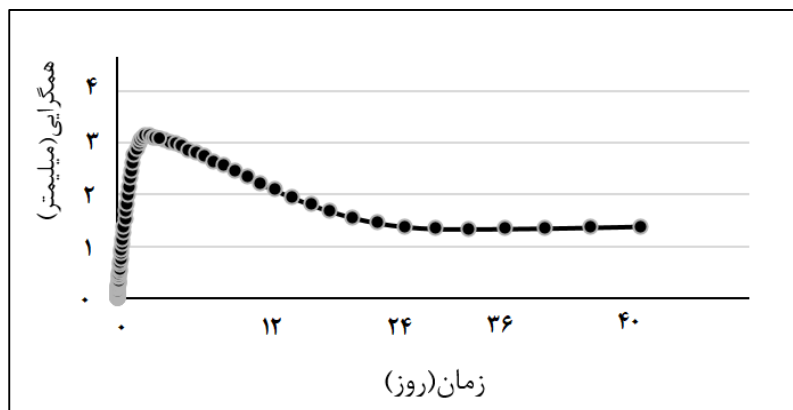


شکل ۴-۱۲: همگرایی چاه پس از حفاری و عدم اعمال فشار سیال حفاری (مرکز مدل)

۴-۵-۲-۲- حفاری چاه با در نظر گرفتن سیال حفاری

نگهداری دیواره چاه با فشار گل ۷۶/۵ مگاپاسکال ناشی از گل حفاری با وزن ۲۰ PPG (معادل $2396/5 \text{ Kg/m}^3$) طبق شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۱۳ روند همگرایی چاه در بخش نمکی طی اجرا شدن دوره نگهداری با گل حفاری نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از قطر سنجی، این چاه پس از اعمال فشار گل در عمق ۳۱۹۲ متری کاهش قطر گمانه به اندازه ۵ میلی متر

گزارش شده است. همگرایی قطر چاه در مدل عددی کنونی بین ۳/۶ تا ۶ میلی‌متر در سرتاسر حفاری به ازای فشار ۷۶/۵ مگاپاسکال است، مطابقت نسبتاً خوبی دارد. بر اساس شکل ۴-۱۳ در مدلسازی با هدف واقعی سازی عملیات در مرحله حفاری، ابتدا فشار در دیواره‌ها به ۷۶ مگاپاسکال کاهش یافته و پس از ۱۲ و نیم ساعت فشار گل از ۷۶ مگاپاسکال به مقدار ۷۶,۵ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. افزایش ۰,۵ مگاپاسکالی برای در نظر گرفتن ستون کامل گل باعث جابجایی معکوس (حدود ۱ میلی‌متر) در دیواره چاه شده است. همچنین این مقدار فشار قادر است دیواره چاه را تا حدود ۴۰ روز نگهداری کند و پس از آن در بخش نمک همگرایی شدید موجب از دست رفتن چاه خواهد شد. بنابراین دوره زمانی ۱۵ روز برای شروع عملیات تکمیل چاه بسیار مناسب است.



شکل ۴-۱۳: روند همگرایی شعاعی چاه با حضور گل حفاری (مرکز مدل)

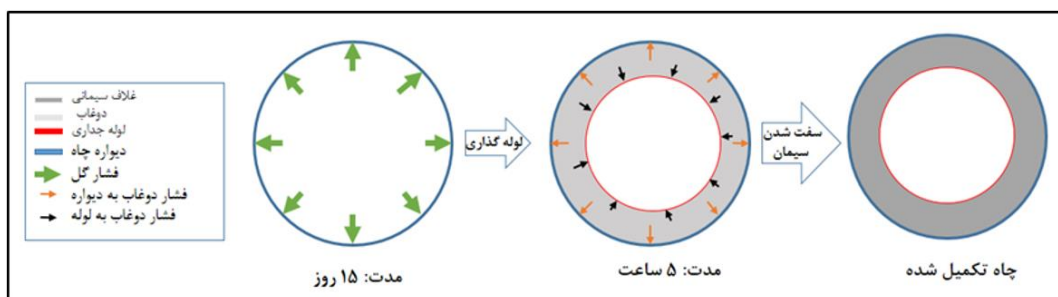
۴-۵-۳- تکمیل چاه

عملیات لوله گذاری پس از اطمینان حاصل کردن از مناسب بودن قطر در تمام طول چاه آغاز می‌شود. لوله جداری قرار داده شده در چاه تحت فشار گل و سپس تحت فشار تزریق سیمان قرار می‌گیرد. در این مدل‌سازی مرحله اعمال فشار دوغاب در فضای خالی بین لوله و سازند مدل‌سازی شده است. میزان فشار تزریق سیمان به منظور جایگزینی با گل حفاری به اندازه فشار گل موجود در محیط در نظر گرفته می‌شود. علت این امر نیز همانند تعیین فشار گل است که نباید از فشار سازند بالاتر باشد و منجر به شکست سنگ اطراف چاه شود. به این ترتیب سازند و لوله طی عملیات تزریق تا سفت شدن سیمان که زمانی بین ۴ تا ۵ ساعت طول می‌کشد، تحت فشار دوغاب به اندازه ۷۶/۵ مگاپاسکال قرار

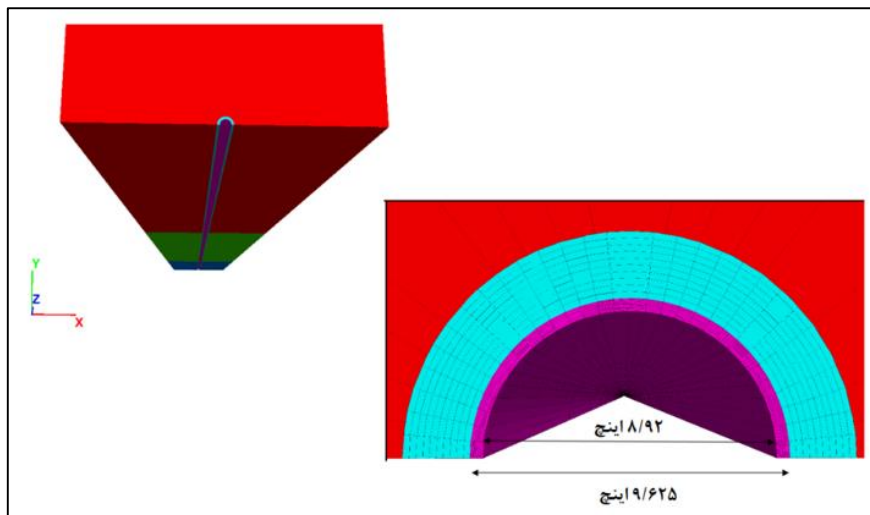
می‌گیرند. روند عملیات حفاری تا تکمیل چاه در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. قطر بیرونی لوله جداري ۹/۶۲۵ اینچ و قطر داخلی لوله ۸/۹۲ اینچ است. هندسه مدل لوله و غلاف سیمانی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. خصوصیات مقاومتی لوله و نوع آن در جدول ۴-۸ ارائه شده است.

جدول ۴-۸: خصوصیات مقاومتی لوله جداري استفاده شده در مدل‌سازی (API,2006)

نوع لوله	تنش تسلیم (MPa)		مقاومت کششی (MPa)
	Min	Max	Min
P110	۷۵۸	۹۶۵	۸۶۲



شکل ۴-۱۴: روند مدل‌سازی عملیات تکمیل چاه

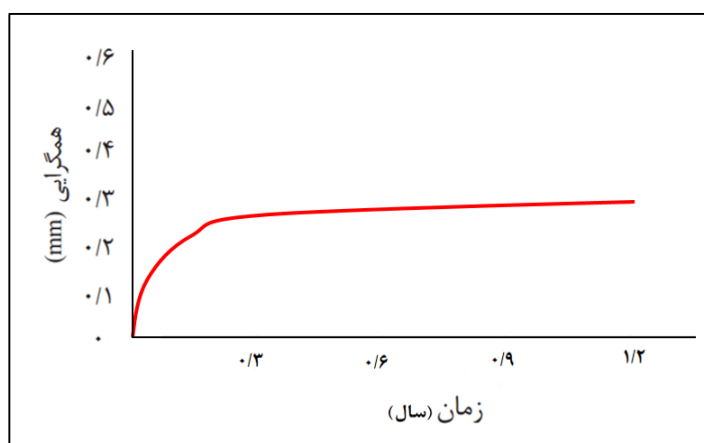


شکل ۴-۱۵: هندسه مدل لوله جداري و غلاف سیمانی

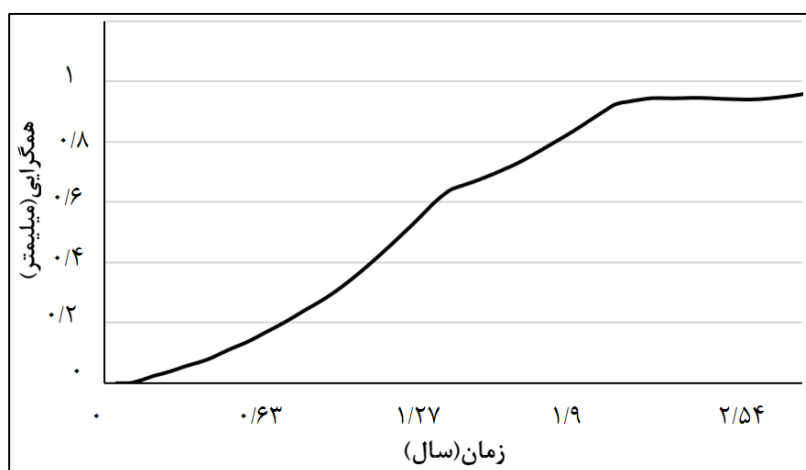
۴-۶- مقایسه نتایج مدل سه بعدی و دوبعدی

پس از اتمام روند مدل‌سازی، حل نهایی به منظور بررسی پایداری چاه، تغییرشکل و تنش‌های ایجاد شده بر لوله جداري ناشی از رفتار وابسته به زمان نمک انجام شده است. مطابق شکل ۴-۱۶ میزان

کاهش قطر لوله جداری در مدل دوبعدی تحت تأثیر رفتار خزشی نمک با سیمانکاری فضای بین لوله و سازند پس از 4×10^4 ثانیه (۴۳۰ روز) به اندازه ۰/۶ میلی‌متر است (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵). میزان کاهش قطر لوله جداری در مدل سه بعدی در مدت مشابه ۱/۱ میلی‌متر بوده است. نمودار همگرایی لوله در مدل سه بعدی روند صعودی داشته و مطابق شکل ۴-۱۷ و پس از ۲ سال به ۱/۸ میلی‌متر همگرا شده است.



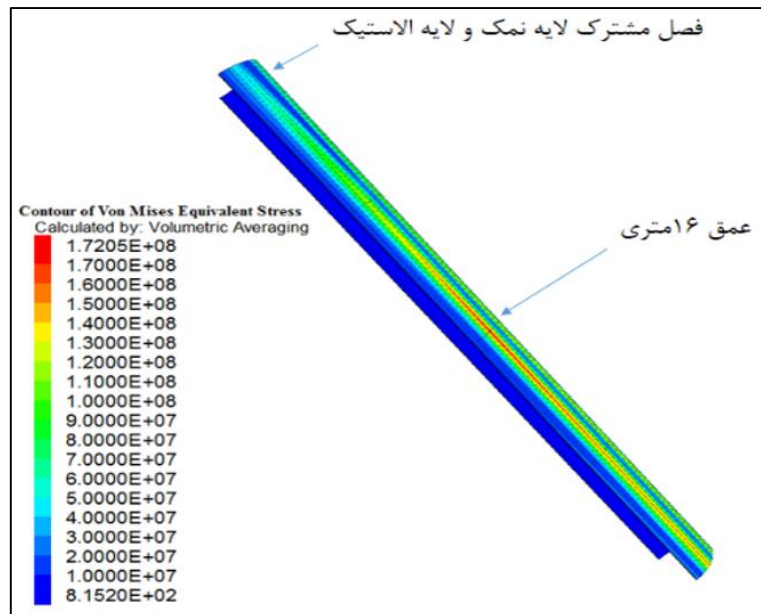
شکل ۴-۱۶: همگرایی شعاعی لوله جداری در مدل دوبعدی (میرالی و حسینی، ۱۳۹۵)



شکل ۴-۱۷: همگرایی شعاعی لوله جداری در مدل سه بعدی (مرکز مدل)

از دیگر مقادیر قابل اهمیت در بررسی لوله جداری، مقدار تنش‌های وون مایسز است. بیشینه مقدار این تنش در مدل دوبعدی ۶۱ مگاپاسکال برآورد شده است که حدوداً ۰/۴۱ بیشینه مقدار این تنش در مدل سه بعدی و در مدت مشابه به مقدار ۱۴۶ مگاپاسکال رسیده است. همانطور که در شکل

۱۸-۴ نشان داده شده است، مقدار تنش‌های وون مایسز پس از ۳ سال در نزدیکی فصل مشترک لایه نمک و لایه الاستیک بالا و پایین آن به اندازه ۱۷۲ مگاپاسکال رسیده است که این اختلاف در سطح تنش وارد بر لوله به خوبی ضرورت مدل‌سازی با در نظر گرفتن رفتار لایه‌های مجاور لایه نمکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸-۴: کنتور تنش‌های وون مایسز بر روی سطح لوله جداری پس از سه سال

۴-۷- جمع بندی

در این فصل از پژوهش، مدل‌سازی عددی گسیختگی لوله جداری یک چاه نفت واقع در میدان نفتی کوپال تحت تأثیر رفتار وابسته به زمان سازند نمکی انجام شده است. بر اساس نتایج قطر سنجی برجا پس از حفاری و قبل از شروع عملیات تکمیل چاه، میزان همگرایی چاه در عمق ۳۱۹۲ متری و حضور فشار گل ۷۶/۵ مگاپاسکال ۵ میلی‌متر بوده است. پس از برقراری تعادل اولیه، مدل‌سازی مرحله حفاری در دو حالت وجود گل و عدم وجود گل انجام شد. نتایج مدل‌سازی سه بعدی حفاری بدون حضور گل، همگرایی کامل چاه را نشان داده است. در حالی که نتایج حفاری با حضور گل همگرایی ۳ تا ۶/۵ میلی‌متر را در طول چاه نشان داده است. پس از مرحله حفاری با حضور سیال حفاری مدل‌سازی عملیات تکمیل چاه انجام شد. بررسی تغییر شکل‌های سطح لوله جداری با ضخامت ۹ میلی‌متری در مدل سه بعدی

مقدار $1/8$ میلی‌متر (معادل ۲۰ درصد ضخامت لوله جداری) کاهش قطر لوله را پس از ۲ سال نشان داده است. نتایج مدل‌سازی دو بعدی میزان این همگرایی را $0/6$ میلی‌متر و پس از ۴۳۰ روز نشان داده است. بررسی تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری پس از ۴۳۰ روز در مدل سه بعدی ۲ برابر مدل دوبعدی است. بنابراین بررسی گسیختگی لوله جداری با استفاده از مدل دو بعدی مقادیر پایین‌تری از سطح تنش و تغییر شکل‌های لوله جداری را نسبت به مدل سه بعدی نشان داده است. همچنین بررسی مدل در حالت سه بعدی امکان بررسی هر دو شکل آسیب وارد بر لوله جداری یعنی برش موضعی در محل فصل مشترک لایه نمک با سازندهای مجاور و مچالگی در مقطع نمکی را فراهم کرده است. در ادامه مدل سه بعدی کنونی به عنوان مدل مرجع معرفی شده و نتایج مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت بخش‌های مختلف مدل در فصل بعد ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

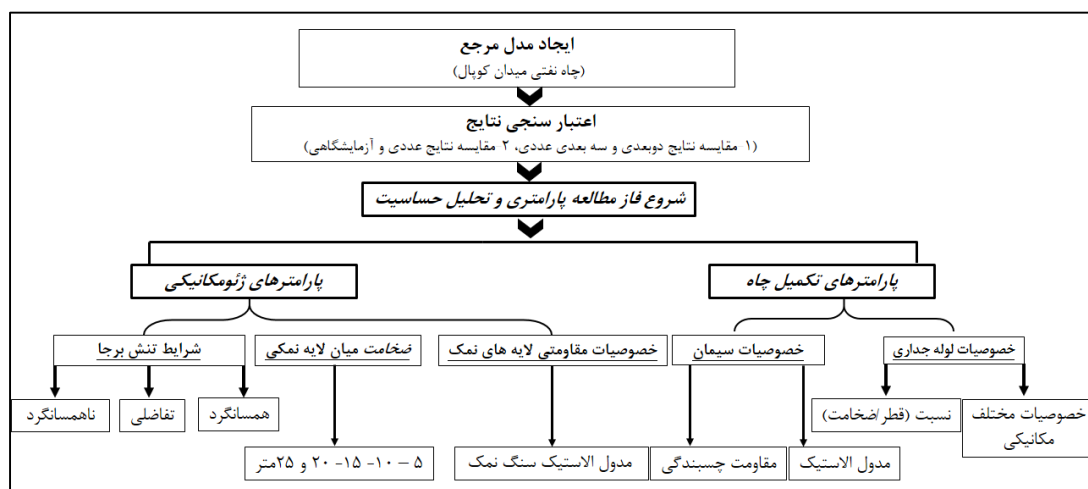
مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

۵-۱- مقدمه

با توجه به لزوم بهره‌برداری‌های بلند مدت از میادین نفتی کشور، شناخت علل مختلف آسیب وارد بر لوله جداری، راه‌های جلوگیری و عوامل کنترل‌کننده این آسیب در چاه‌های نفتی مجاور سازندهای نمکی بسیار ضرورت دارد. در میان عوامل تأثیرگذار بر پایداری بلندمدت مجموعه چاه-غلاف سیمانی-لوله جداری، بررسی شدت تأثیر هر عامل و تعیین نقش آن در الگوی آسیب وارد بر لوله از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور، در این فصل از پژوهش، پارامترهای ضخامت و خصوصیات مقاومتی لایه نمک، شرایط تنش برجا همسانگرد، ناهمسانگرد و تفاضلی به عنوان عوامل ژئومکانیکی و خصوصیات لوله جداری، غلاف سیمانی و گل حفاری به عنوان عوامل تکمیل چاه موثر بر گسیختگی لوله جداری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که در ادامه تشریح خواهد شد.

۵-۲- روند تحلیل میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف

در این فصل از پژوهش، پس از ساخت مدل مرجع و اعتبارسنجی نتایج با تغییر پارامترهای ژئومکانیکی و تکمیل چاه میزان تأثیر هر یک از این عوامل در آسیب وارد بر لوله جداری مطابق شکل ۵-۱ ارزیابی می‌شود.



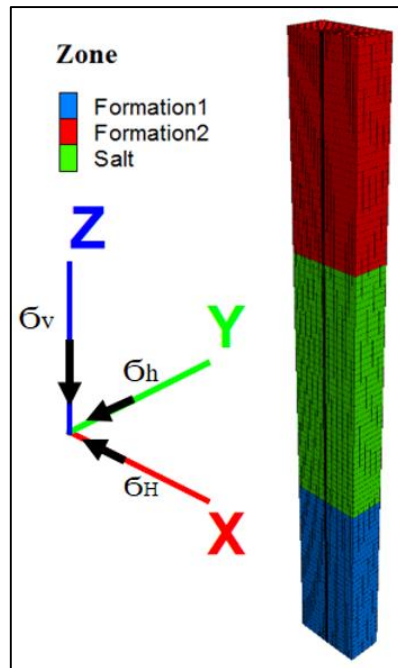
شکل ۵-۱: روند مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

۵-۳- تأثیر عوامل ژئومکانیکی بر گسیختگی لوله جداری

عوامل ژئومکانیکی در تمام طول عمر چاه می‌توانند بر پایداری چاه تأثیرگذار باشند، به نحوی که تغییر در هر یک از این عوامل در اثر پدیده‌های مختلف ممکن است پایداری بلند مدت چاه را با چالش اساسی مواجه کند. از این رو شناخت نحوه تأثیرگذاری این عوامل بر آسیب وارد به لوله جداری و مجموعه چاه بسیار اهمیت دارد. در ادامه نتایج مدلسازی عددی با در نظر گرفتن شرایط مختلف برای عوامل تنش برجا و خصوصیات هندسی و مقاومتی سازند نمکی بیان خواهد شد.

۵-۳-۱- شرایط تنش برجا

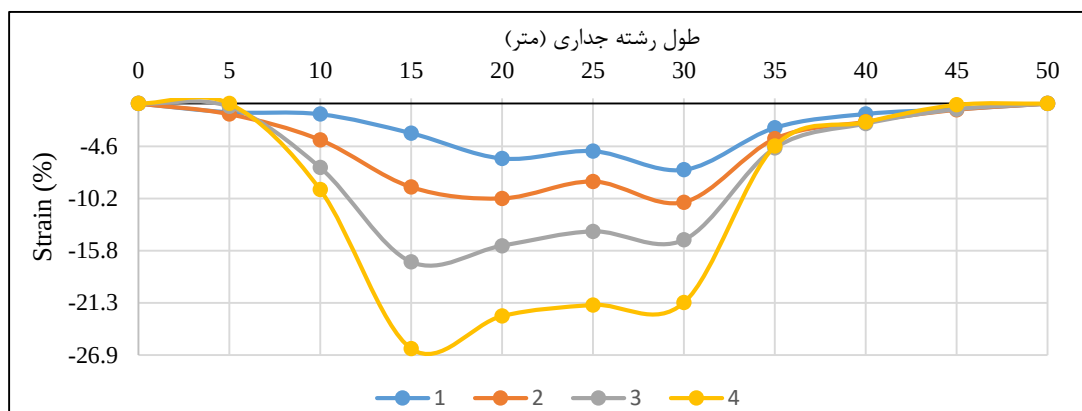
با توجه به رفتار وابسته به زمان سنگ نمک در شرایط مختلف تنش و همچنین متغیر بودن شرایط تنش برجا در مناطق نفت‌خیز، در این بخش از پژوهش شرایط مختلف تنش همسانگرد ($\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h$)، شرایط تنش ناهمسانگرد ($\sigma_v = \sigma_H \neq \sigma_h$) و شرایط تنش تفاضلی ($\sigma_v \neq \sigma_H = \sigma_h$) برای مدل سازند با هدف بررسی شدت آسیب وارد بر لوله جداری در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در تمام مدل‌ها همانند مدل مرجع، تانسور تنش منطقه بصورت نرمال فرض شده است. در شکل ۵-۲ جهت اعمال تنش‌ها نشان داده شده است.



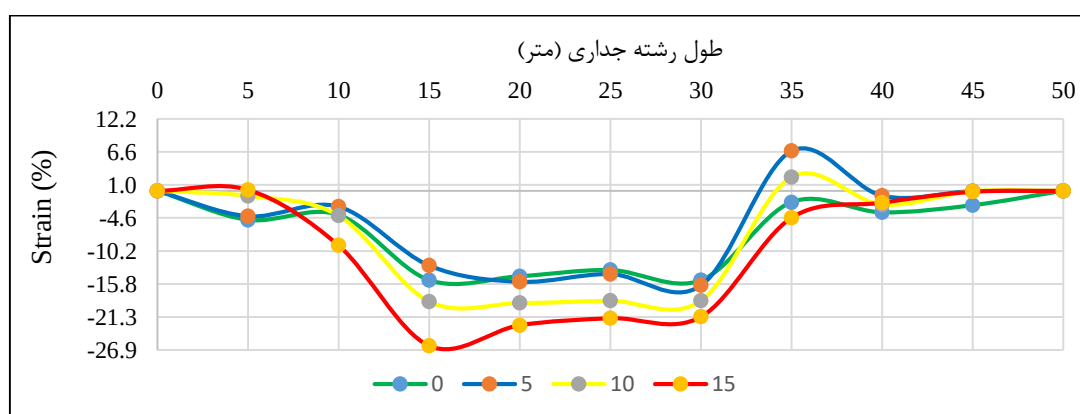
شکل ۵-۲: توزیع تنش‌های اصلی اطراف چاه

۵-۳-۱-۱- تنش تفاضلی

بر اساس مطالعات گذشته، شرایط تنش تفاضلی به عنوان یک حالت بحرانی برای رفتار خزشی وابسته به زمان سنگ نمک شناخته شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی آزمون سه محوره خزشی با بارگذاری چند مرحله‌ای که در فصل قبل ارائه شد، نرخ کرنش و مقدار کرنش کلی نمونه نمک با افزایش تنش تفاضلی ($\sigma_{diff} = \sigma_v - \sigma_H$) افزایش می‌یابد. از آنجا که شرایط تنش تفاضلی حالت بسیار محتمل توزیع تنش در اطراف چاه‌های نفتی در اعماق مختلف است، بررسی رفتار چاه در بلندمدت تحت تأثیر این عامل بسیار اهمیت دارد. با هدف مطالعه تأثیر این پارامتر، ۳ سطح تنش تفاضلی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال در بلوک اولیه متناسب با عمق مورد نظر در میدان نفتی برقرار شده است. در تمام مراحل تنش‌های افقی بصورت همسانگرد با مقدار ۸۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. پس از مدل‌سازی عملیات حفاری و تکمیل چاه، بررسی تغییر شکل و تنش‌های سطح لوله جداري در بلند مدت مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵-۳ تا شکل ۵-۵). کرنش سطح لوله جداري نسبت به ضخامت ۹ میلی‌متری لوله بیان شده است.



شکل ۳-۵: تغییر شکل سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال طی ۴ سال

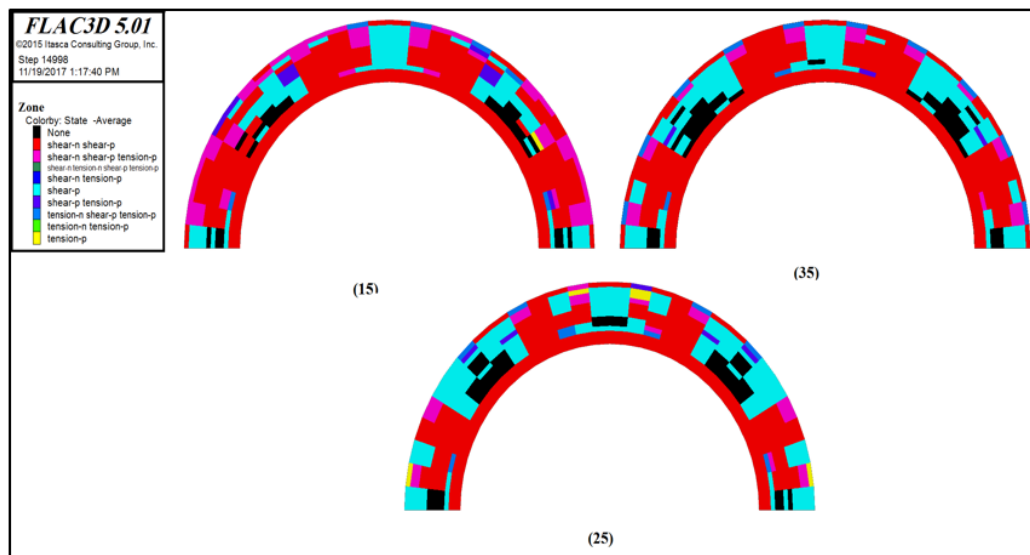


شکل ۴-۵: تغییر شکل سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی ($\sigma_v - \sigma_H$) مختلف پس از ۴ سال

بر اساس نمودارهای کرنش لوله در شکل ۴-۵ با افزایش سطح تنش تفاضلی، تغییر شکل لوله در مقادیر بالاتری رخ داده است.

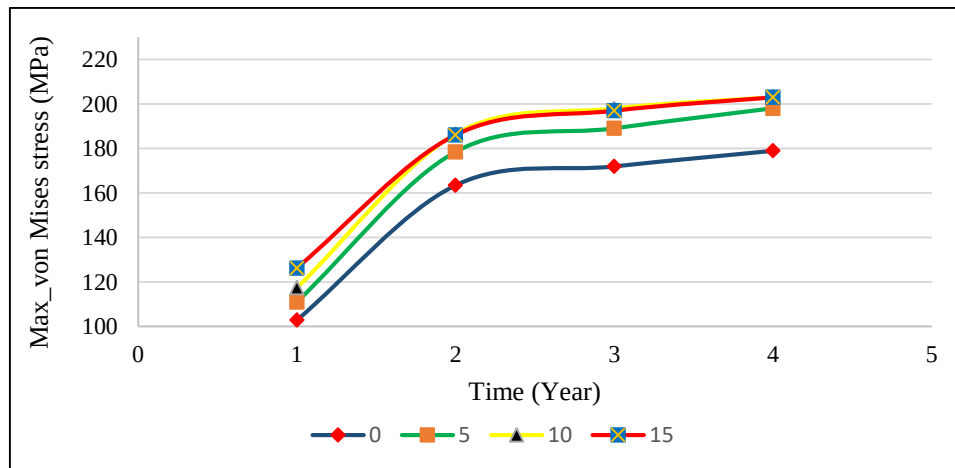
مقایسه نمودار تغییر شکل تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال و مدل مرجع ($\sigma_v = \sigma_H$) مقدار ۲۰ درصد اختلاف در سطح کرنش را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان تأثیر تنش تفاضلی بر همگرایی لوله جداری در بلند مدت را بخوبی مشاهده کرد. در شکل ۳-۵ طی ۴ سال روند همگرایی لوله جداری را به ازای تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال ارائه شده است. در دو سال ابتدایی اختلاف چندانی بین بیشینه همگرایی لوله جداری رخ نداده است. در حالی که با گذشت زمان نرخ کرنش افزایش یافته و در سال‌های سوم و چهارم کرنش لوله از ۸ درصد به ۲۶ درصد ضخامت آن رسیده است. این رفتار سنگ نمک در شرایط تنش تفاضلی مختلف بیان می‌کند که هرچه لایه نمک در اعماقی با شرایط تنش نزدیک به همسانگرد باشد شدت آسیب کمتری بر مجموعه چاه وارد خواهد کرد (شکل ۴-۵). الگوی منحنی تغییر شکل سطح

لوله نشان دهنده بیشتر بودن مقدار کرنش کلی و نرخ کرنش در محل فصل مشترک لایه نمک و لایه الاستیک بالایی است. همانطور که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است، کرنش کل پس از ۴ سال در طول ۱۵ لوله ۶ درصد بیشتر از مرکز مدل می‌باشد. این نتیجه بخوبی بحرانی بودن رفتار سنگ نمک پیرامون چاه در فصل مشترک با لایه‌های مجاور را نشان می‌دهد که می‌تواند منجر به گسیختگی برشی لوله و غلاف سیمان و در نهایت از دست رفتن چاه شود. بررسی نوع تغییرشکل‌های پلاستیک غلاف سیمانی و لوله جداری پس از ۴ سال در مقاطع مختلف در شکل ۵-۵ ارائه شده است. طول ۱۵، ۲۵ و ۳۵ لوله جداری به ترتیب محل فصل مشترک لایه نمک و لایه الاستیک بالایی، وسط لایه نمکی و فصل مشترک لایه نمک و لایه الاستیک پایینی می‌باشد. مطابق شکل ۵-۵ در مقاطع مجاور فصل مشترک لایه نمک و لایه‌های الاستیک، وسعت زون‌های برشی نسبت به مقطع مرکز مدل بیشتر است. این نتیجه به خوبی اهمیت مطالعه رفتار چاه در مجاور فصل مشترک لایه نمک با سایر لایه‌ها را در شرایط تنش تفاضلی نشان می‌دهد.



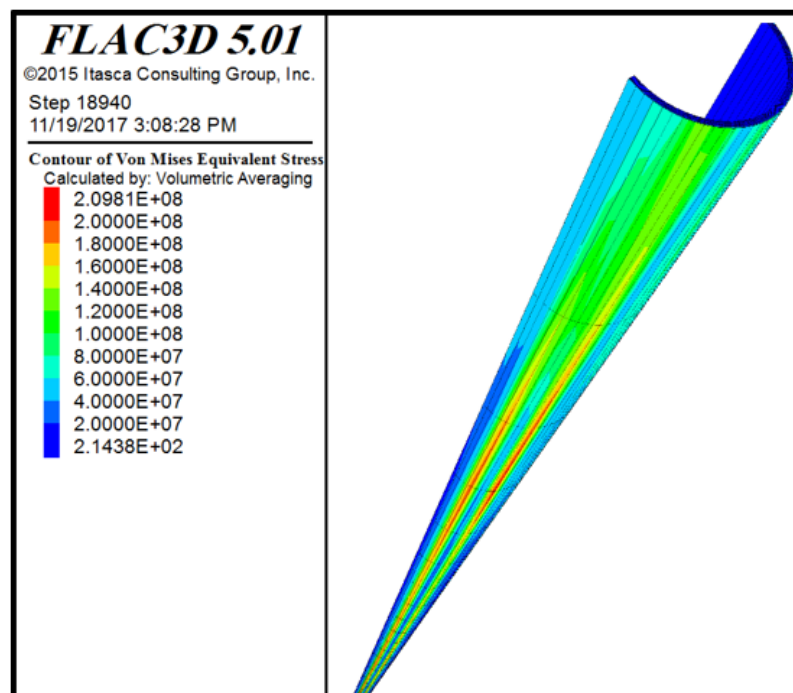
شکل ۵-۵: توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک بر روی مقاطع مجموعه غلاف سیمانی و لوله جداری در طول-های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متری مدل پس از ۴ سال

تغییرات سطح تنش‌های وون مایسز لوله جداری به ازای تنش‌های تفاضلی مختلف طی ۴ سال در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری در شرایط تنش تفاضلی مختلف طی ۴ سال

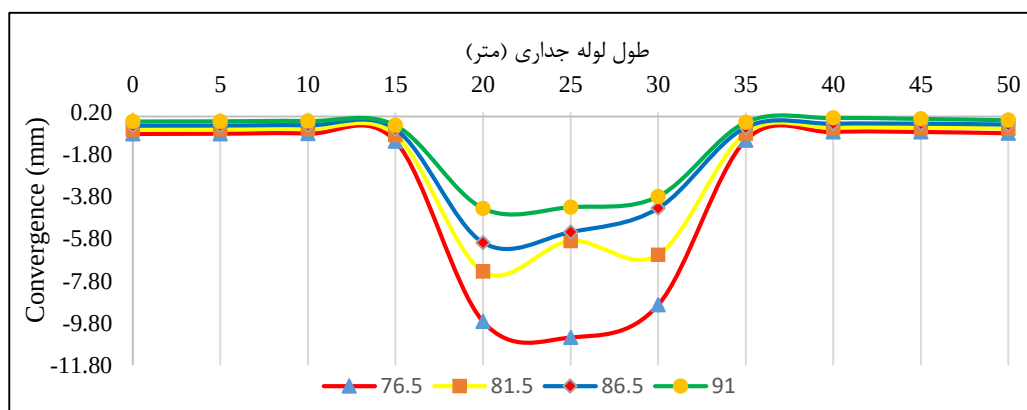
هرچه تنش تفاضلی بیشتر باشد، سطح بالاتری از تنش بر لوله جداری اعمال می‌شود. این بالاتر بودن سطح تنش متناسب با افزایش نرخ کرنش با افزایش تنش تفاضلی است. مقدار تنش ۲۱۰ مگاپاسکال معادل ۲۸ درصد تنش تسلیم لوله P110 بر سطح لوله اعمال شده است که منجر به کرنش ۲۶ درصدی لوله جداری معادل کاهش قطر ۴/۵ میلی‌متری در شرایط تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال شده است. شکل ۵-۷: کنتور تنش‌های وون مایسز روی لوله مجاور لایه نمکی نشان داده شده است.



شکل ۵-۷: کنتور تنش‌های وون مایسز روی لوله مجاور لایه نمکی پس از ۴ سال در شرایط تنش تفاضلی ۱۵ مگاپاسکال

۵-۳-۱-۲- شرایط تنش همسانگرد

در این شرایط، سه سطح تنش ۸۵، ۹۱ و ۹۶ مگاپاسکال در سه راستای اصلی X ، Y و Z متناظر با جهت تنش‌های اصلی برجا به صورت $(\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h)$ در مدل سازند اعمال شده است. نکته قابل ذکر در مدل‌سازی با سطح بالاتری از تنش، لزوم رعایت فشار گل متناسب با فشار سازند است. عدم در نظر گرفتن این پارامتر باعث همگرایی بیش از حد دیواره چاه در مرحله حفاری و تحت تأثیر قرار دادن نتایج نهایی مدل‌سازی شود. بر این اساس تعیین پنجره ایمن گل برای هر یک از سطح تنش‌های هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده برای مطالعه در دستور کار قرار گرفت. مطابق شکل ۵-۸ برای سطح تنش ۹۶ مگاپاسکال، فشارهای گل ۷۱/۵، ۸۱/۵، ۸۶/۵ و ۹۱ مگاپاسکال بررسی شد. به ازای فشار گل ۹۱ میزان کاهش قطر چاه در مجاور لایه نمک ۸ میلی‌متر است که به عنوان فشار بهینه در نظر گرفته شده است. در جدول ۵-۱ فشار گل بهینه برای هر یک از سطح تنش‌ها با توجه به حد ۵ میلی‌متر کاهش قطر حالت واقعی ارائه شده است.



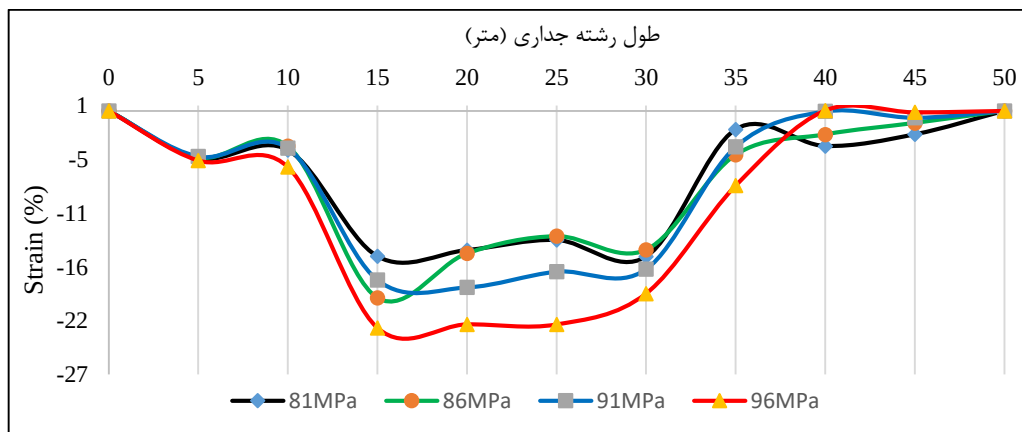
شکل ۵-۸: همگرایی دیواره چاه به ازای فشار گل‌های مختلف در شرایط تنش برجا ۹۶ مگاپاسکال

جدول ۵-۱: فشار گل تعیین شده برای شرایط تنش همسانگرد برجا مختلف

۹۶	۹۱	۸۶	۸۱	تانسور تنش برجا (MPa)
۹۱	۸۶/۵	۸۱/۵	۷۶/۵	فشار بهینه گل (MPa)

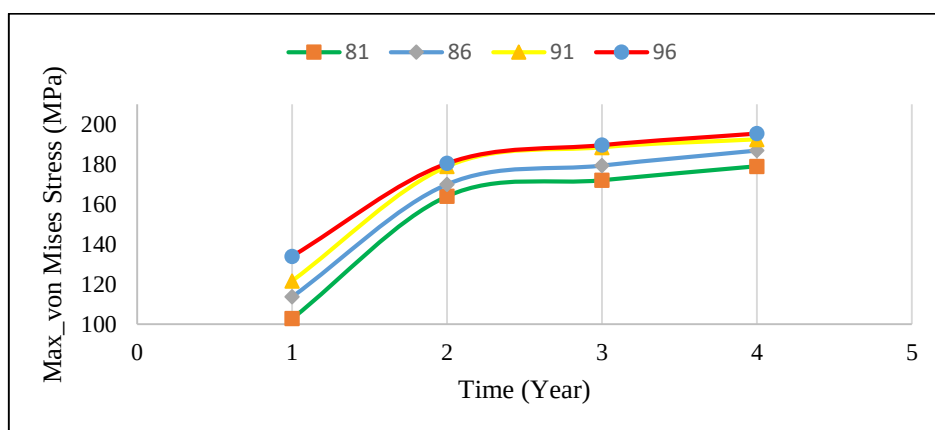
در شکل ۵-۹ مقایسه کرنش سطح لوله تحت شرایط تنش مختلف با مدل مرجع ارائه شده است. با افزایش سطح تنش مقادیر همگرایی لوله نیز افزایش یافته است. الگوی تغییر شکل‌ها در این حالت

در تمام جهات مشابه بوده و شکل تغییر شکل مچالگی لوله پدیده غالب‌تر نسبت به برش موضعی است.



شکل ۵-۹: کرنش لوله جداری در شرایط مختلف تنش‌های هیدرواستاتیک پس از ۴ سال

تغییرات سطح تنش روی لوله طی ۴ سال به ازای تنش‌های برجا مختلف نیز در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. نتایج بیان کننده بارگذاری سطح لوله به اندازه ۲۵ درصد تنش تسلیم لوله جداری است. این سطح از تنش خارج از محدوده گسیختگی لوله می‌باشد و تنها تغییرشکل‌های پلاستیک در لوله ایجاد می‌کند. مقایسه بین نتایج تغییرشکل لوله با افزایش ۱۵ مگاپاسکالی سطح تنش هیدرواستاتیک و تفاضلی نشان می‌دهد که تنها الگوی تغییر شکل تغییر کرده است. این در حالی است که بیشینه کرنش رخ داده در هر دو حالت توزیع تنش حدود ۲۷ درصد ضخامت لوله بوده است.



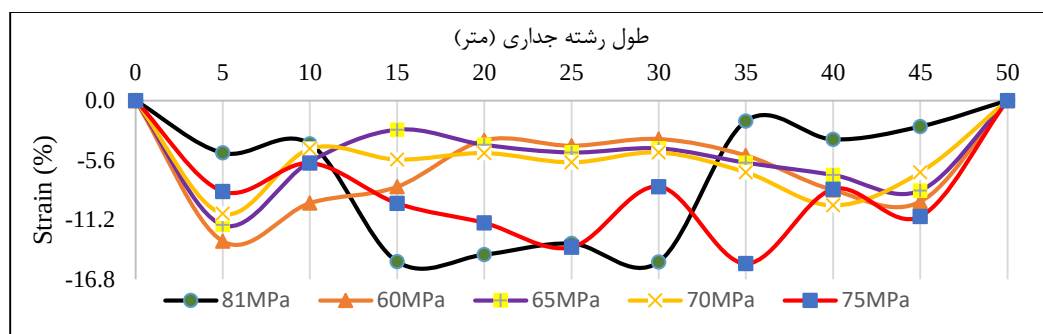
شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات بیشینه تنش‌های وون مایسز به ازای تنش‌های هیدرواستاتیک مختلف طی ۴ سال

۵-۳-۱-۳- تنش‌های ناهمسانگرد

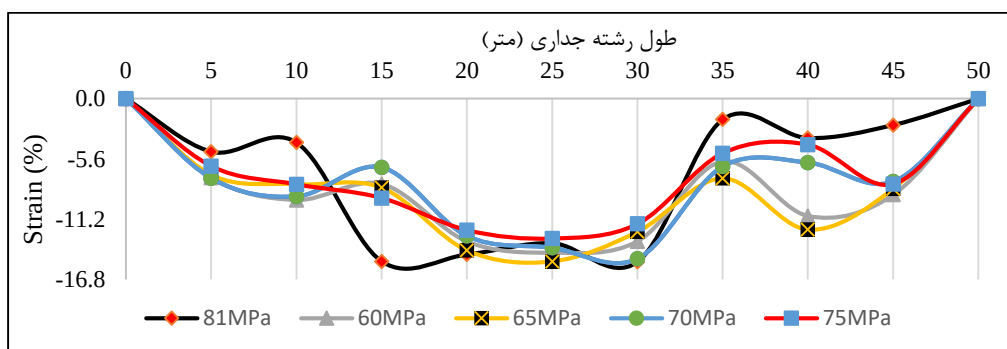
فرض همسانگرد بودن توزیع تنش‌های منطقه در اعماق زیاد اغلب به منظور ساده سازی و تسریع

در روند حل مسئله صورت می‌گیرد. با توجه به نقش توزیع تنش در نرخ کرنش سنگ نمک پیرامون چاه و اهمیت آن از جهات مختلف طراحی و عملیاتی، در این بخش از پژوهش با در نظر گرفتن تنش‌های افقی کمینه و بیشینه متفاوت گسیختگی لوله جداری در شرایط توزیع تنش ناهمسانگرد بررسی شده است. مقدار تنش‌های قائم و افقی ماکزیمم که به ترتیب در راستای Z و X قرار دارند ۸۱ مگاپاسکال فرض شده و مقادیر تنش افقی حداقل در راستای Y برابر ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

بررسی الگوی تغییر شکل‌های سطح لوله جداری در راستای تنش افقی حداکثر و حداقل، نامتقارن بودن تغییر شکل‌ها را نشان می‌دهد. نوع گسیختگی رخ داده در لوله مچالگی در مقطع نمکی است (شکل ۱۱-۵ و شکل ۱۲-۵).



شکل ۱۱-۵: کرنش لوله جداری در جهت تنش برجا حداقل پس از ۴ سال

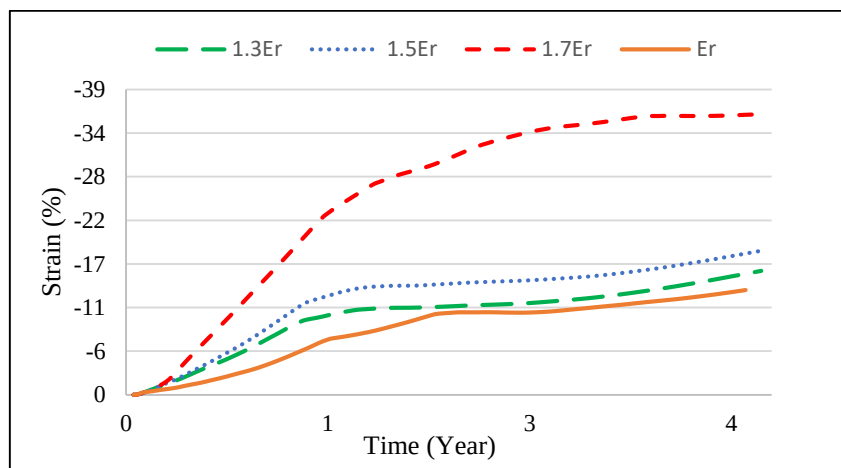


شکل ۱۲-۵: همگرایی لوله جداری در جهت تنش برجا حداکثر پس از ۴ سال

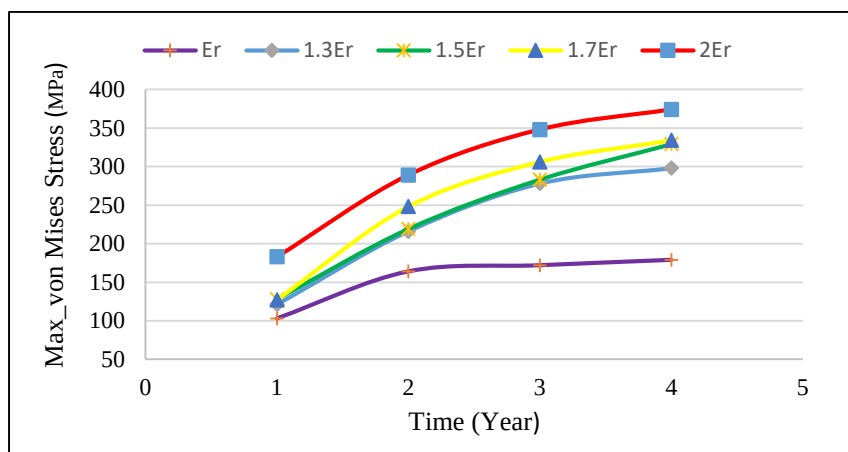
۵-۳-۲- خصوصیات مقاومتی سنگ نمک

خصوصیات مقاومتی سنگ نمک نیز از عوامل تأثیرگذار بر رفتار وابسته به زمان آن است. در این

مطالعه تغییر شکل و تنش‌های سطح لوله جداری با در نظر گرفتن مدول الاستیک‌های مختلف بررسی شده است. با افزایش نسبت E_s/E_r که در آن E_s مدول الاستیک هر مرحله و E_r مدول الاستیک معیار است، سنگ نمک در بلند مدت کرنش بیشتری در سطح لوله ایجاد کرده است (شکل ۵-۱۳). همچنین سطح تنش اعمال شده بر لوله جداری در اثر رفتار خزشی سنگ نمک دارای مدول الاستیک بالاتر بیشتر است (شکل ۵-۱۴). این مقدار کرنش نشان دهنده وابستگی کرنش لوله جداری به نسبت مدول الاستیک نمک و سیمان به کار رفته اطراف لوله جداری است. بنابراین هرچه سیمان صلبیت کمتری نسبت به نمک داشته باشد انتقال تنش از سازند به لوله بیشتر انجام شده و کرنش لوله بیشتر خواهد شد. در حالت اولیه مدول الاستیک نمک $0/8$ مدول الاستیک سیمان اطراف لوله است. در ادامه با افزایش مدول الاستیک نمک این نسبت افزایش یافته و برای مقادیر $1/3$ ، $1/5$ و $1/7$ برابر مدول نمک، به ترتیب $1/06$ ، $1/22$ و $1/3$ شده است. هر چه این نسبت کمتر باشد میزان کرنش لوله جداری کمتر خواهد بود.



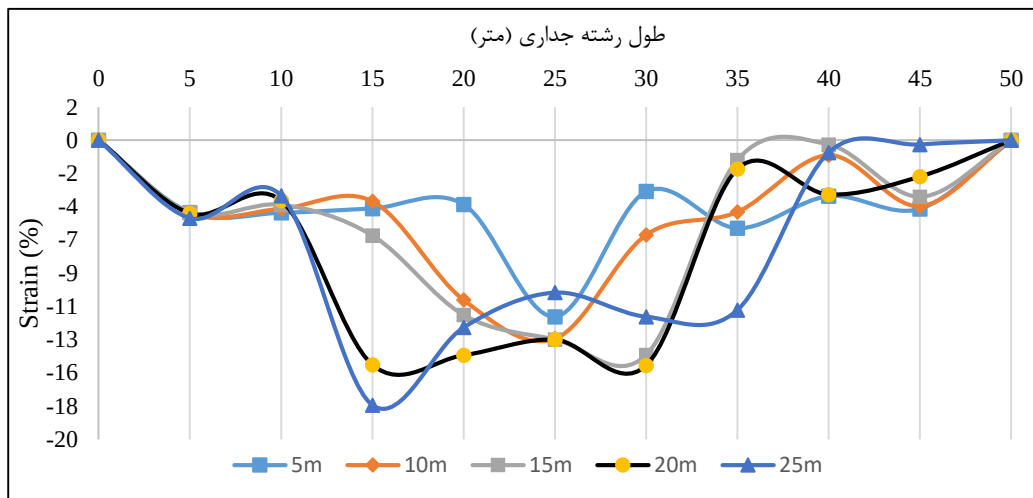
شکل ۵-۱۳: کرنش لوله جداری با نسبت‌های مختلف E_s/E_r نمک طی ۴ سال



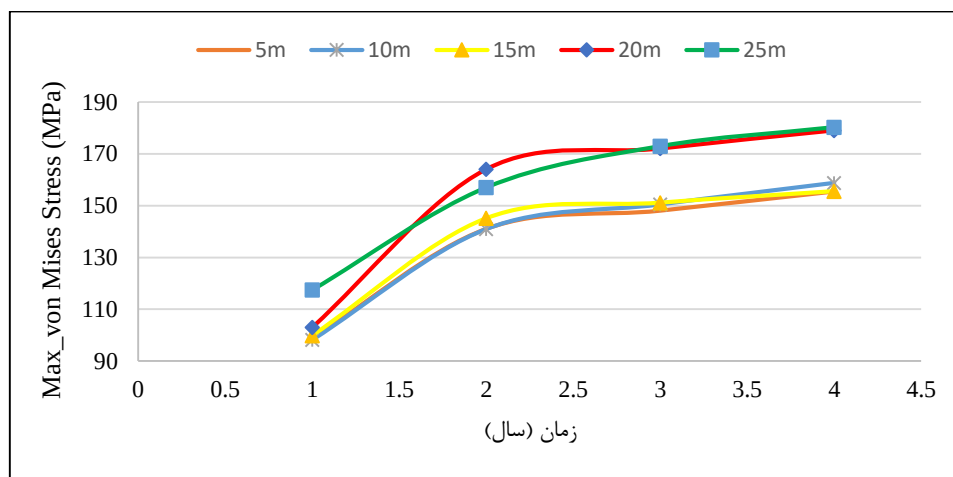
شکل ۵-۱۴: تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری با مدول الاستیک‌های مختلف نمک طی ۴ سال

۵-۳-۳- ضخامت لایه نمک

با توجه به حضور سازندهای نمکی در شکل‌های مختلف لایه‌ای و گنبدهای نمکی در مناطق نفت خیز و نقش غیر قابل چشم‌پوشی این سازندها در ایجاد تله‌های نفتی، در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف با ویژگی‌های خزشی از اهمیت بالایی برخوردار است. در بخش اول این پژوهش، تنش و همگرایی سطح لوله جداری ناشی از خزش لایه افقی نمک با ضخامت ۲۰ متر مشخص و با مدل دوبعدی در شرایط مشابه، مقایسه شده است. یکی دیگر از محدودیت‌های بررسی این موضوع به صورت دوبعدی، عدم امکان در نظر گرفتن ضخامت لایه و نقش احتمالی آن در بروز آسیب به لوله جداری چاه نفت است. در این بخش از پژوهش تغییرات تنش و همگرایی لوله جداری در مجاورت ضخامت‌های مختلف میان‌لایه نمک مورد بررسی قرار گرفته است. میزان کرنش لوله جداری پس از ۴ سال در شکل ۵-۱۵ ارائه شده است. همچنین تغییرات بیشینه تنش وون مایسز سطح لوله جداری به ازای ضخامت‌های مختلف لایه نمک طی ۴ سال در نمودار شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۵-۱۶ لایه‌های ضخیم‌تر سطح بالاتری از تنش را در مدت زمان کوتاهی به لوله جداری اعمال کرده‌اند. همچنین همگرایی بلند مدت مقادیر تنش به مقدار ۲۵ درصد مقاومت تسلیم آن نیز نشان دهنده مناسب بودن لوله موجود در چاه است.



شکل ۵-۱۵: کرنش سطح لوله جداری مجاور ضخامت‌های مختلف لایه نمک پس از ۴ سال



شکل ۵-۱۶: تغییرات بیشینه تنش وون مایسز سطح لوله جداری به ازای ضخامت‌های مختلف لایه نمک طی ۴ سال

۵-۴- تأثیر عوامل تکمیل چاه در جلوگیری از بروز گسیختگی لوله جداری مجاور سازند

نمکی

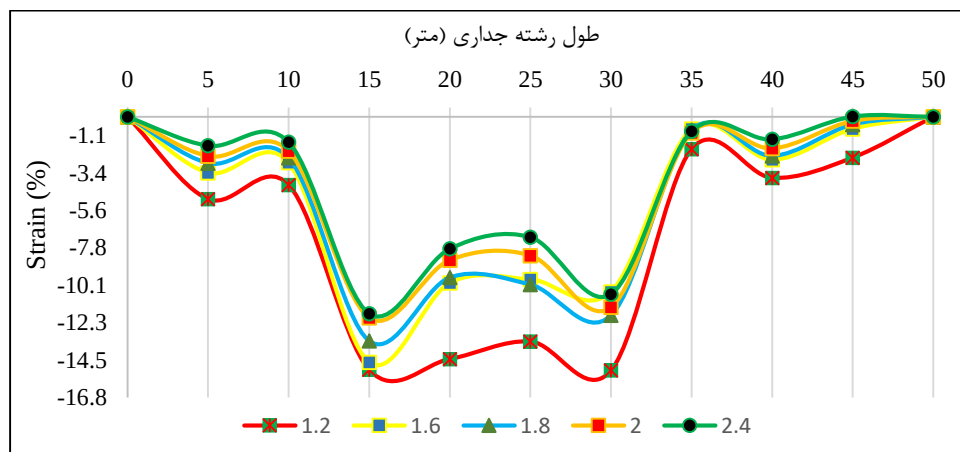
علاوه بر پارامترهای ژئومکانیکی، برخی پارامترهای عملیاتی و بخصوص عملیات تکمیل چاه از عوامل بروز گسیختگی لوله جداری هستند. در این بخش از پژوهش نقش خصوصیات لوله جداری و غلاف سیمانی اطراف آن به عنوان اصلی‌ترین بخش‌های تکمیل چاه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵-۴-۱- خصوصیات غلاف سیمانی

از مهم‌ترین خصوصیات غلاف سیمانی بین لوله جداری و سازند اطراف چاه، مدول الاستیک به عنوان پارامتر تعیین کننده تغییر شکل پذیری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر پارامتر مقاومت چسبندگی غلاف سیمانی به عنوان یکی دیگر از خصوصیات مقاومتی که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی شد.

۵-۴-۱-۱- مدول الاستیک سیمان

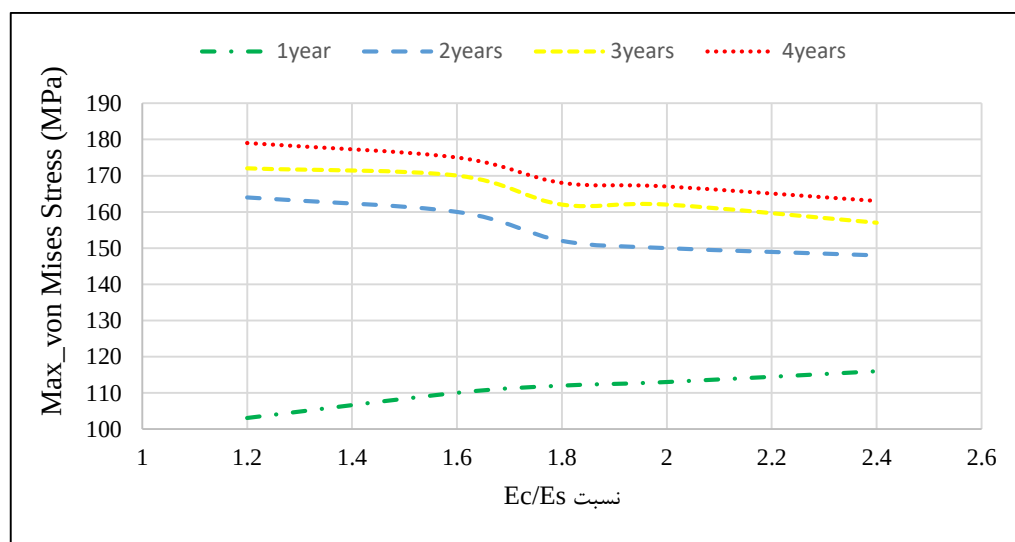
در این بخش، با تغییر در مدول الاستیک مدل غلاف سیمانی، تغییر شکل‌ها و تغییرات سطح تنش وارد بر لوله جداری تحت تأثیر خزش لایه نمک سازند مجاور مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵-۱۷ هر چه صلبیت سیمان (E_c) نسبت به سنگ نمک (E_s) بالاتر باشد، میزان آسیب وارد بر لوله جداری کاهش می‌یابد. در نسبت‌های پایین E_c/E_s خزش لایه نمک بشدت غلاف سیمانی و لوله جداری را تحت تأثیر قرار داده و کرنش حدود ۱۶/۸ درصد ضخامت لوله را ایجاد کرده است. نسبت E_c/E_s در مدل مرجع ۱/۲ بوده است.



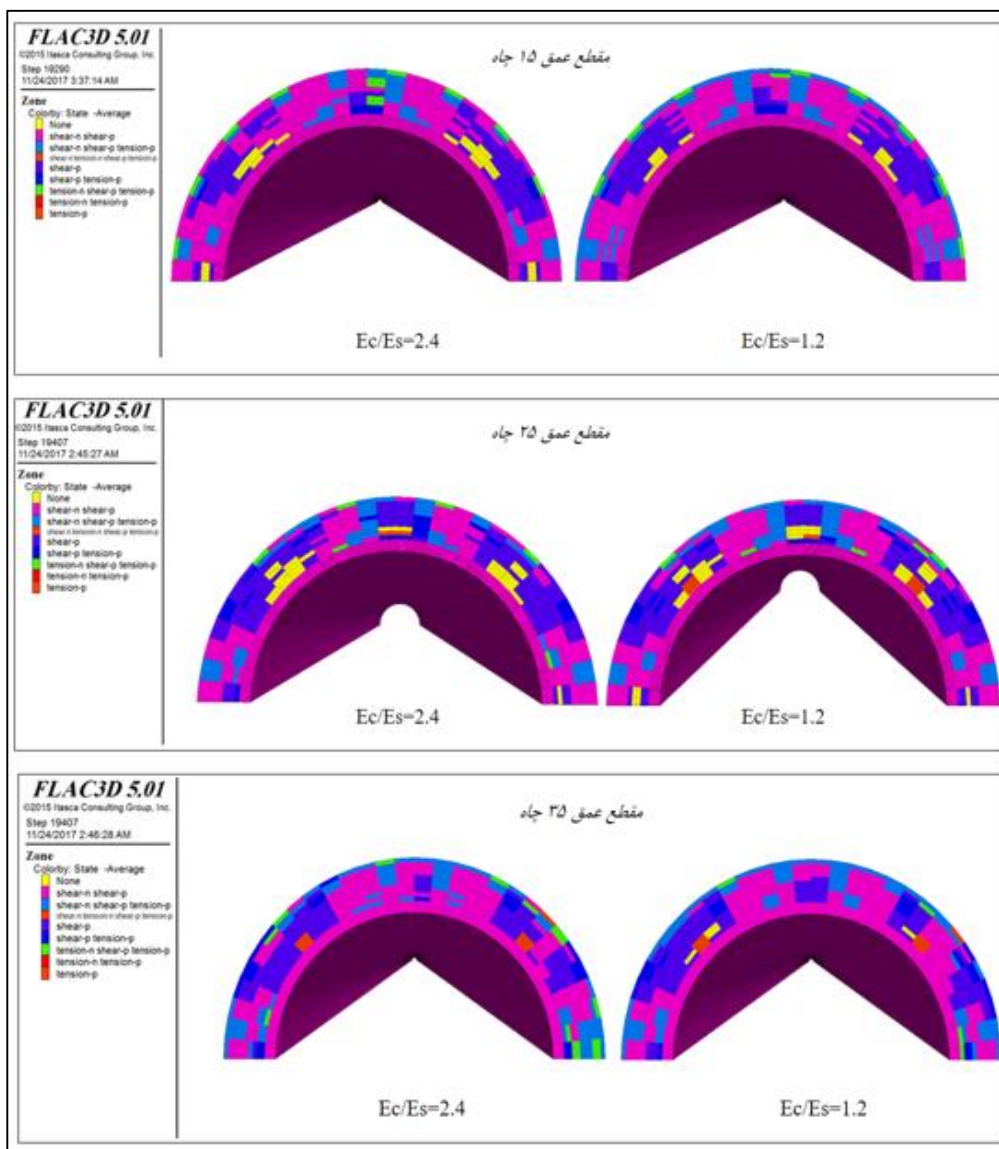
شکل ۵-۱۷: اثر نسبت E_c/E_s در جلوگیری از بروز تغییر شکل سطح لوله جداری پس از ۴ سال

بررسی سطح تنش‌های وون مایسز روی لوله جداری در شکل ۵-۱۸ طی ۴ سال ارائه شده است. افزایش مدول الاستیک سیمان باعث کاهش سطح تنش در سال‌های دوم، سوم و چهارم روی سطح لوله جداری شده است. در حالی که در سال اول افزایش مدول الاستیک باعث افزایش سطح تنش روی سطح

لوله جداری شده است. بنابراین می‌توان با استفاده از طرح اختلاط‌های دیگر، غلاف سیمانی با نسبت E_c/E_s مناسب‌تر نسبت به مدل مرجع در نظر گرفت که علاوه بر جلوگیری از بروز آسیب در لوله جداری، از طول عمر بالاتری نیز برخوردار باشد. همچنین در شکل ۵-۱۹ نحوه توزیع تغییرشکل‌های پلاستیک غلاف سیمانی و لوله جداری در مقاطعی در عمق‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متر مدل به ازای دو نسبت ۱/۲ و ۲/۴ برای E_c/E_s ارائه شده است. گستره المان‌هایی که دچار تغییر شکل پلاستیک برشی شده‌اند در مقاطع ۱۵ و ۳۵ در هر دو نسبت E_c/E_s تقریباً شرایط یکسانی دارند. این در حالی است که در مقطع ۲۵ با افزایش مدول الاستیک غلاف سیمانی گستره المان‌هایی که دچار تغییر شکل برشی شده‌اند، کاهش یافته است. بر این اساس، همانطور که در نمودار کرنش سطح لوله شکل ۵-۱۷ نشان داده شد، افزایش مدول الاستیک غلاف سیمانی در بخش مجاور لایه نمک گستره تغییر شکل‌های سطح لوله را کاهش می‌دهد ولی تغییر شکل‌های لوله در مقاطع مجاور فصل مشترک لایه نمک و لایه‌های الاستیک بالایی و پایینی کاهش چندانی نمی‌یابند. بنابراین می‌توان گفت که افزایش نسبت E_c/E_s تأثیر چندانی بر شکل برش موضعی در محل فصل مشترک لایه نمک و لایه‌های مجاور ندارد و بیشتر مچالگی لوله را در مجاورت لایه نمک کنترل می‌کند.



شکل ۵-۱۸: اثر نسبت E_c/E_s در جلوگیری از افزایش تنش سطح لوله جداری طی دوره‌های مختلف

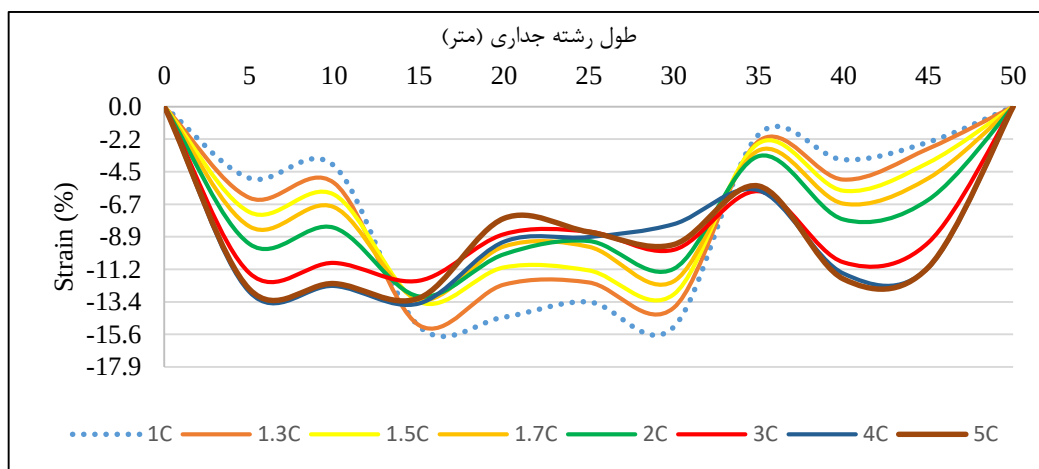


شکل ۵-۱۹: توزیع تغییرشکل‌های پلاستیک غلاف سیمانی و لوله جداری در مقاطعی از عمق‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متری مدل پس از ۴ سال

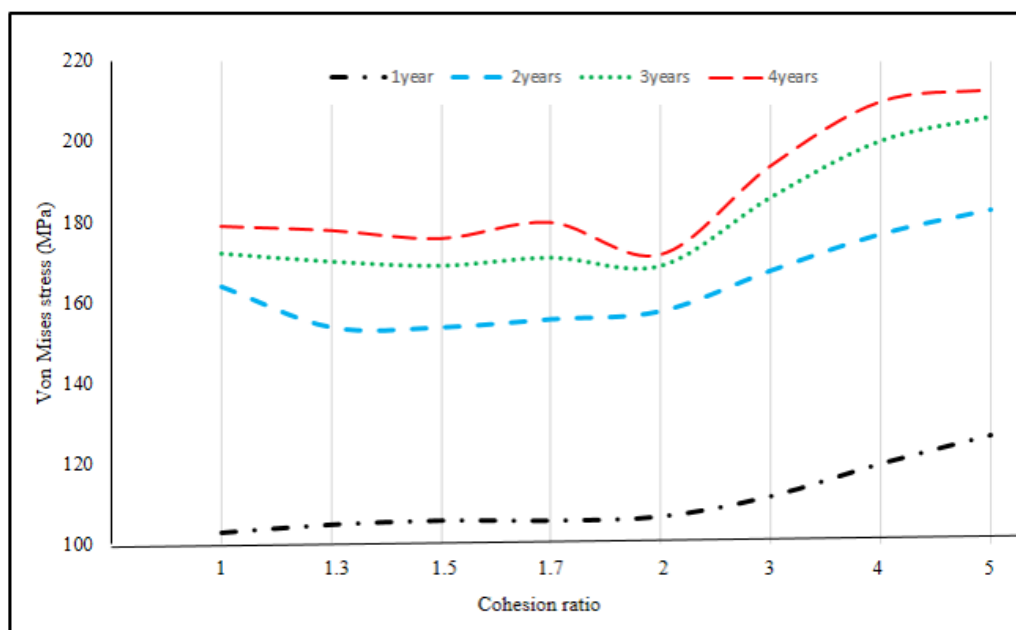
۵-۴-۱-۲- مقاومت چسبندگی سیمان

مقاومت چسبندگی از جمله پارامترهای مدل موهر-کمب در نظر گرفته شده برای غلاف سیمانی اطراف لوله جداری است. مقدار مقاومت چسبندگی غلاف سیمانی به عوامل مختلفی بستگی دارد. در این بخش از پژوهش، تاثیر این پارامتر در مقاومت مجموعه غلاف سیمانی و لوله جداری مورد ارزیابی قرار گرفته و نمودار تغییرشکل سطح لوله به ازای مقاومت چسبندگی C تا 5C در شکل ۵-۲۰ ارائه شده که مقاومت چسبندگی C همان مقاومت چسبندگی مدل اولیه به اندازه ۱۲/۴ مگاپاسکال است.

بررسی نمودارها عدم تأثیر محسوس این پارامتر را بر مقدار تغییر شکل، الگوی تغییر شکل و یا کاهش سطح تنش وارد بر لوله جداری را نشان می‌دهد. بررسی تنش‌های وون مایسز سطح لوله جداری در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که کمترین سطح تنش در سال چهارم به ازای مقاومت چسبندگی 2C رخ داده است (شکل ۵-۲۱). این در حالی است که افزایش چسبندگی تا بیش از ۲ برابر مقاومت مدل اولیه باعث بارگذاری بیش از اندازه بر لوله جداری در بلند مدت شده است، به‌طوری‌که اختلاف مقدار تنش سطح لوله جداری به ازای مقاومت چسبندگی 5C و 2C به اندازه ۴۰ مگاپاسکال است.



شکل ۵-۲۰: اثر مقاومت چسبندگی غلاف سیمانی بر تغییر شکل‌های سطح لوله جداری پس از ۴ سال



شکل ۵-۲۱: اثر چسبندگی دوجاب بر تنش وارد بر لوله جداری در دوره‌های زمانی مختلف

۵-۴-۲- خصوصیات لوله جداری

نقش خصوصیات هندسی و متالورژی لوله جداری، در تغییر شکل‌های ناشی از فشارهای داخلی و خارجی مراحل تکمیل چاه و پس از آغاز عملیات بهره‌برداری انکار ناپذیر است. در این بخش به بررسی تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله و مشخصات مقاومتی (گرید^۱) مختلف لوله پرداخته شده است.

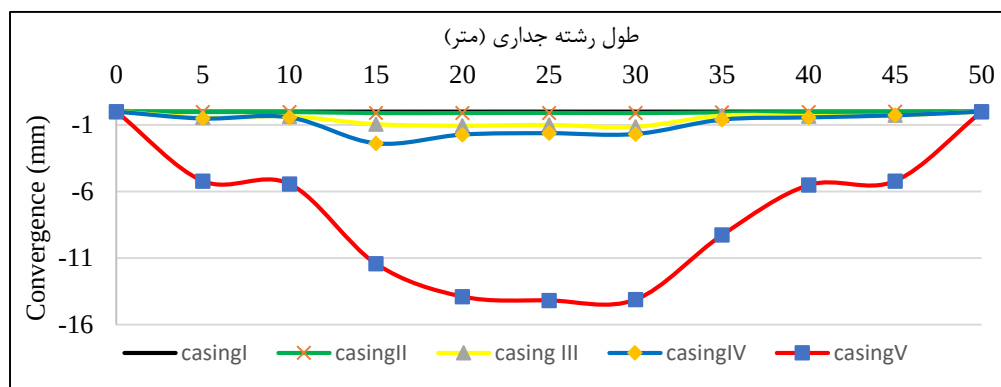
۵-۴-۲-۱- نسبت قطر/ضخامت لوله با تغییر قطر خارجی

با هدف بررسی تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله جداری در بروز تغییر شکل‌های سطح لوله جداری، با تغییر قطر خارجی لوله در مدل‌سازی لوله‌های جداری نوع I، II، IV و V ساخته شده است. سپس نتایج تغییر شکل‌های آنها تحت تأثیر رفتار ویسکوز نمک مجاور با لوله جداری اولیه نوع III مقایسه شده است (شکل ۵-۲۲). در جدول ۵-۲ نسبت D/t هر یک از انواع لوله ارائه شده است. مقدار تغییر نسبت D/t با تغییر قطر خارجی صورت گرفته و ضخامت ثابت بوده است.

جدول ۵-۲: نسبت‌های قطر/ضخامت لوله‌های جداری مختلف

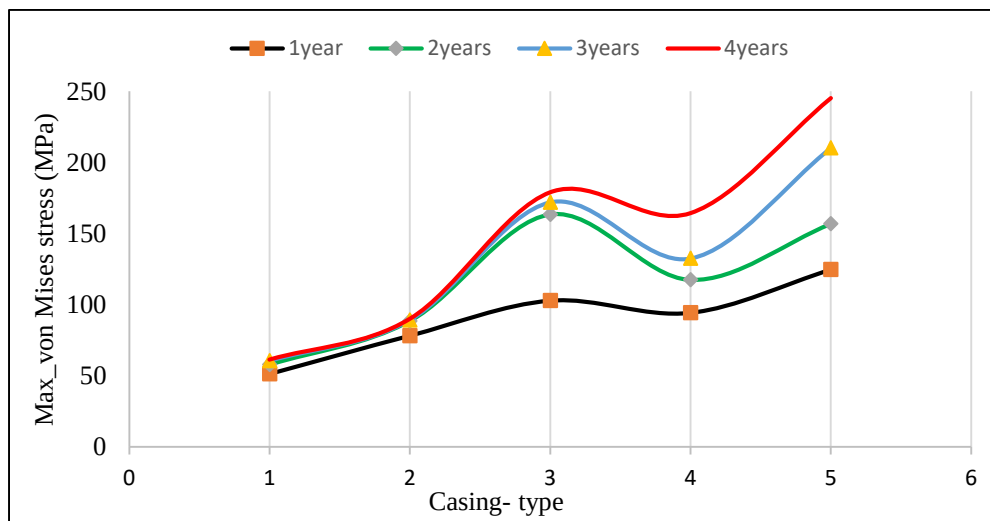
نوع لوله	CasingI	CasingII	CasingIII	CasingIV	CasingV
قطر خارجی (اینچ)	۷/۶۲۵	۸/۶۲۵	۹/۶۲۵	۱۰/۶۲۵	۱۱/۶۲۵
قطر داخلی (اینچ)	۶/۹۲	۷/۹۲	۸/۹۲	۹/۹۲	۱۰/۹۲
ضخامت (اینچ)	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵
نسبت قطر/ضخامت لوله (اینچ)	۱۰/۸	۱۲/۲	۱۳/۶	۱۵/۰۵	۱۶/۵

^۱ Grade



شکل ۵-۲۲: تاثیر نسبت‌های مختلف D/t لوله جداری در بروز تغییر شکل پس از ۴ سال

مطابق شکل ۵-۲۲ در نسبت‌های پایین‌تر D/t بیشینه کرنش سطح لوله جداری حدود ۱ میلی‌متر است. در حالی‌که با افزایش این نسبت تغییر شکل‌ها بشدت زیاد شده و در بیشترین حالت به مقدار کرنش ۱۶ میلی‌متر به ازای نسبت $۱۶/۵$ می‌رسد. بروز این تغییر شکل‌ها با وجود ثابت ماندن ضخامت لوله نقش قطر خارجی لوله و در نتیجه میزان فضای سیمان‌کاری شده بین لوله جداری و سازند در آسیب وارد بر لوله جداری را مشخص می‌کند. با توجه به قطر $۱۲/۲۴$ اینچی قطر حفاری، میزان فضای سیمان‌کاری شده اطراف لوله به ازای لوله‌های نوع I، II، III، IV و V به ترتیب برابر $۳/۶۱۵$ ، $۲/۶۱۵$ ، $۱/۶۱۵$ و $۰/۶۱۵$ اینچ است. بنابراین با کاهش ضخامت سیمان‌کاری در مقاطع نمکی، کرنش لوله جداری افزایش می‌یابد. همچنین بررسی تنش‌های سطح لوله‌های مختلف در شکل ۵-۲۳ ارائه شده است. در کوتاه مدت اختلاف زیادی بین مقادیر تنش ایجاد شده در سطح لوله‌های جداری با نسبت‌های مختلف D/t بسیار کم است. اما در سال چهارم اختلاف تنش ایجاد شده بر روی لوله V تقریباً ۵ برابر تنش روی سطح لوله I است. این در حالی است که در لوله I تغییرات تنش در طی ۴ سال بسیار کم و تقریباً یکسان است. بنابراین افزایش نسبت D/t در ضخامت ثابت باعث افزایش تنش سطح لوله در بلند مدت می‌شود.

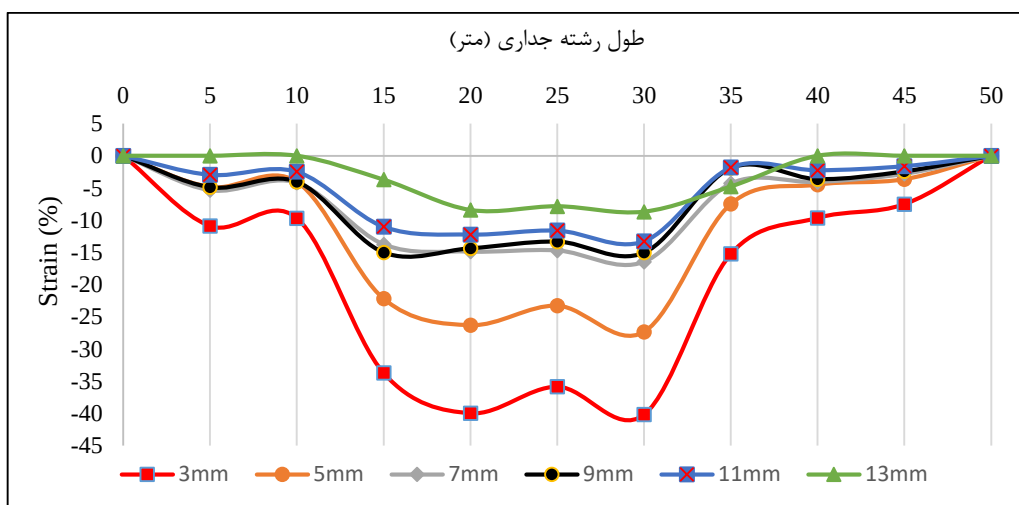


شکل ۵-۲۳: تاثیر نسبت‌های مختلف D/t لوله جداری در کاهش تنش سطح لوله طی دوره‌های مختلف

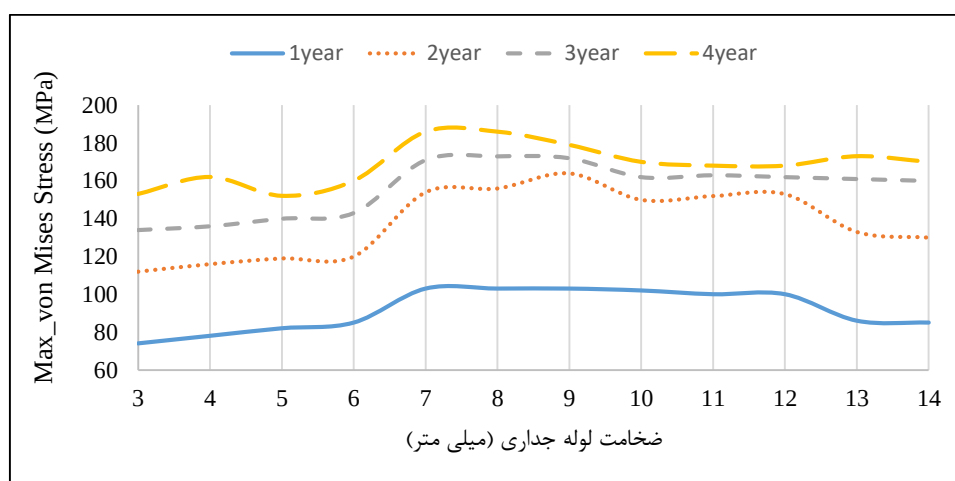
۵-۴-۲-۲- نسبت قطر/ضخامت لوله با تغییر ضخامت لوله

ضخامت لوله جداری رابطه مستقیمی با وزن لوله و مقاومت آن دارد. در صنعت نفت معمولاً از لوله‌هایی با ضخامت ۳ تا ۱۶ میلی‌متر استفاده می‌شود. اثر ضخامت لوله جداری بر میزان کرنش با ضخامت‌های ۳ تا ۱۴ میلی‌متری مورد بررسی قرار گرفت. بررسی کرنش سطح لوله‌های دارای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچه ضخامت بیشتر باشد میزان کرنش کمتری در سطح لوله ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه اغلب استفاده از لوله‌های جداره ضخیم در موارد خاص کاربرد دارد و هزینه بالاتر و الزامات نصب و رانش بیشتری را می‌طلبد، در بین لوله‌های بررسی شده و با توجه به میزان کرنش ایجاد شده مطابق شکل ۵-۲۴، لوله با ضخامت ۷ و ۹ میلی‌متری بهترین انتخاب می‌باشند. بررسی تنش‌ها در مدت زمان‌های مختلف به ازای ضخامت‌های مختلف لوله جداری نشان می‌دهد که در ضخامت‌های ۳ تا ۷ میلی‌متری، با تغییر شکل پذیری بالای لوله جداره نازک، سطح تنش پایین آمده است (شکل ۵-۲۵). این درحالی است که در ضخامت‌های ۷ تا ۹ میلی‌متری تنش در بالاترین سطح خود اعمال می‌شود که علت آن مقاومت بالای لوله در این ضخامت است که با مقادیر تنش در ضخامت‌های بالاتر از ۹ میلی‌متر اختلاف چندانی ندارد. بنابراین با توجه به وزن و قیمت بالاتر لوله جداره ضخیم نسبت به سایر ضخامت‌ها، بهترین ضخامت برای لوله P110 در این شرایط همان ۷ تا ۹ میلی‌متر پیشنهاد

می‌شود (شکل ۵-۲۴).



شکل ۵-۲۴: کرنش لوله جداری با ضخامت‌های مختلف پس از ۴ سال



شکل ۵-۲۵: تغییرات سطح تنش با تغییر ضخامت لوله جداری در دوره‌های زمانی مختلف

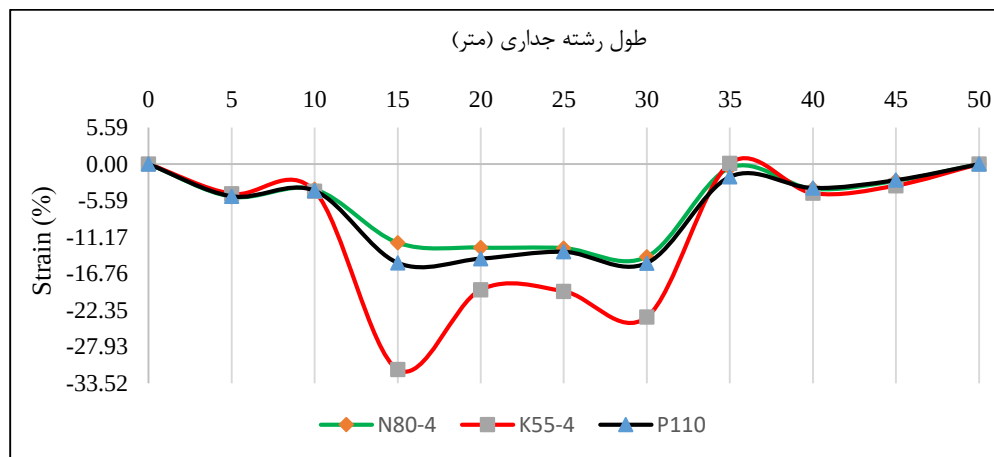
۵-۴-۲-۳- انواع لوله جداری

تعیین اثر نوع لوله در تغییر شکل‌های سطح لوله با استفاده از خواص مختلف به مدل رفتاری در نرم افزار ساخته شده است. از آنجا که لوله به کار رفته در مدل اولیه با خصوصیات لوله جداری با درجه P110 در استاندارد API ساخته شده است. این نوع لوله در مناطق بسیار عمیق به کار می‌رود. برای تحلیل اثر جنس لوله از خصوصیات لوله‌های N80 و لوله K55 که موارد کاربرد متداول‌تری دارند، استفاده شده است. در جدول ۵-۳ خصوصیات مقاومتی هر یک از این لوله‌ها ارائه شده است.

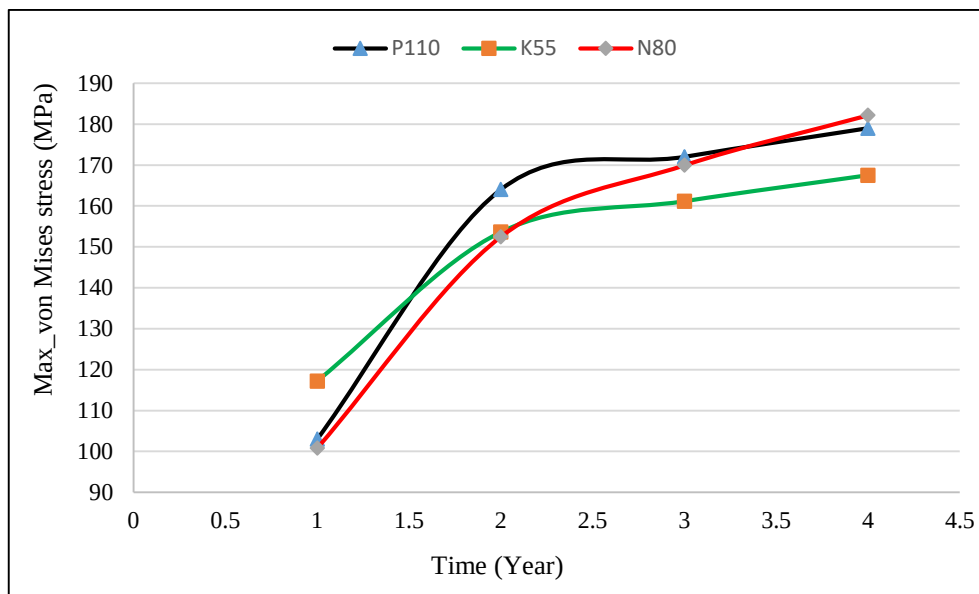
جدول ۵-۳: خصوصیات مقاومتی لوله‌های جداری استفاده شده در مدل‌سازی (API,2006)

نوع لوله	تنش تسلیم (MPa)		مقاومت کششی (MPa)
	Min	Max	Min
P110	۷۵۸	۹۶۵	۸۶۲
N80	۵۵۲	۶۵۵	۶۸۹
K55	۳۷۹	۵۵۲	۶۵۵

بررسی کرنش سطح انواع لوله‌های ذکر شده ناشی از فشار سازند نمکی در شکل ۵-۲۶ نشان می‌دهد که کرنش لوله K55 تا ۳۳ درصد پس از ۴ سال می‌رسد. این در حالی است که بیشینه کرنش لوله‌های N80 و P110 به ترتیب حدود ۱۴ و ۱۶ درصد ضخامت لوله در مدت مشابه می‌رسد. تنش‌های وون مایسز سطح هر لوله نیز در شکل ۵-۲۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان انتخاب لوله P110 را برای این شرایط مناسب دانست.



شکل ۵-۲۶: تغییر شکل‌های لوله‌های جداری مختلف پس از ۴ سال



شکل ۵-۲۷: تغییرات سطح تنش با تغییر جنس لوله جداری طی ۴ سال

۵-۵- جمع بندی

در این فصل از پژوهش مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت عوامل ژئومکانیکی و تکمیل چاه موثر بر وقوع گسیختگی لوله جداری مورد بررسی قرار گرفت. حساسیت نتایج مدل سازی در هر بخش نسبت به تغییرات مقادیر پارامترها با هم مقایسه شد. بر این اساس، نقش پارامتر تنش تفاضلی در تغییر الگوی گسیختگی از مچالگی به برش موضعی در محل فصل مشترک لایه نمک و لایه های الاستیک بالایی و پایینی بسیار قابل توجه است. الگوی کرنش ها در سایر شرایط توزیع تنش بصورت مچالگی لوله و در مجاورت لایه نمک رخ داده است. افزایش ضخامت لایه نمک نیز باعث افزایش سطح تنش ها شده است. با این وجود بررسی ها نشان دهنده عدم اعمال آسیب جدی ناشی از این عامل است. سایر پارامترهای تکمیل چاه مانند خصوصیات هندسی و مقاومتی لوله جداری و همچنین غلاف سیمانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج نسبت قطر به ضخامت لوله جداری و همچنین نسبت مدول الاستیک سیمان به مدول الاستیک نمک، نقش عمده ای در میزان کرنش های سطح لوله جداری دارند.

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف مطالعه نحوه گسیختگی لوله جداری چاه‌های نفتی تحت تأثیر رفتار وابسته به زمان سازندهای نمکی حاضر در میدان‌های نفتی، مدل‌سازی عددی سه بعدی از حفاری یک چاه در عمق ۳۱۹۲ متری در سازندی شامل یک میان لایه نمکی با رفتار ویسکوپلاستیک وابسته به زمان و دو لایه با رفتار الاستیک در بالا و پایین که معرف لایه‌های رسوبی سخت‌تر نسبت به نمک بودند ایجاد شد. با توجه به شرایط و هدف حل مسئله، نرم افزار تفاضل محدود FLAC3D برای این مدل‌سازی استفاده شد. شیوه مدل‌سازی سازند و در نظر گرفتن سه لایه با رفتارهای مختلف اطراف چاه، مدل‌سازی کامل عملیات تکمیل چاه با رعایت برنامه زمان‌بندی و بررسی بلند مدت رفتار چاه از بارزترین خصوصیات این پژوهش نسبت به مطالعات قبلی بوده است. مدل رفتاری برگرز برای مدل‌سازی رفتار وابسته به زمان لایه نمکی و معیار گسیختگی لوله جداری، مقایسه تنش وون مایسز ایجاد شده بر سطح لوله با حداقل تنش تسلیم لوله در نظر گرفته شد. پس از مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت‌های مدل، برجسته‌ترین نتایج این پژوهش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد؛

(۱) استفاده از روش‌های عددی به دلیل سرعت و دقت بالا در پیش‌بینی پایداری بلند مدت سازه‌های زیرزمینی مانند چاه نفت کارآمد خواهد بود.

(۲) مطابقت مراحل مدل‌سازی با شرایط واقعی به سطح اعتبار نتایج عددی خواهد افزود. با این حال همیشه اجرای تمام مراحل که در شرایط واقعی انجام می‌شود ممکن نمی‌باشد.

(۳) در شرایط توزیع تنش‌های همسانگرد و ناهمسانگرد، فشار گل می‌بایست با شرایط فشار سازند متناسب باشد.

(۴) با توجه به لزوم پایداری دیواره چاه در حین حفاری و جلوگیری از ایجاد خطای مدل‌سازی، حفاری با رعایت نرخ حفاری مشابه حالت واقعی و اعمال همزمان فشار گل به دیواره چاه ضروری است.

(۵) حفاری در مقاطع دارای سازندهای با رفتار شکل پذیر بسیار بحرانی است و عدم استفاده از فشار کافی گل حفاری منجر به بسته شدن چاه می‌شود.

۶) عدم استفاده از وزن گل مناسب، منجر به همگرایی بیش از اندازه چاه قبل از عملیات تکمیل چاه می‌شود. این همگرایی باعث بروز مشکلاتی همچون از دست رفتن یکپارچگی سیمان، تماس مستقیم لوله با سازند مجاور، از دست رفتن فشار گل در مراحل بعدی می‌شود.

۷) انتخاب لوله جداری مناسب برای مقاطعی که سازند نمکی وجود دارد بسیار حساس است. با توجه به نتایج و مقایسه کرنش‌های سطح لوله‌های P110، N80 و K55 انتخاب لوله K55 برای این عمق و این شرایط فشار نامناسب بوده و این لوله پس از ۴ سال ۵ برابر کرنش سطح لوله‌های P110 و N80 است. همچنین با توجه به قیمت بالاتر لوله P110 و نزدیک بودن نتایج آن با لوله N80 در شرایط مشابه از این لوله استفاده کرد.

۸) انتخاب نسبت D/t مناسب لوله نیز نقش زیادی در جلوگیری از بروز کرنش‌های بحرانی در سطح لوله جداری دارد. هرچه ضخامت لوله بالاتر باشد، مقاومت بالاتری داشته و کرنش کمتری در سطح آن بوجود می‌آید. البته باید برای افزایش ضخامت، سنگین شدن و قیمت لوله نیز در نظر گرفته شود. لوله‌های P110 با ضخامت ۷ تا ۹ میلی‌متر نتایج مطلوبی از کرنش و سطح تنش در بند مدت از خود نشان دادند.

۹) انتخاب قطر خارجی مناسب لوله در مقاطع نمکی نیز جنبه دیگر انتخاب نسبت D/t است. تعیین قطر خارجی لوله علاوه بر تغییر نسبت D/t باعث تغییر در اندازه ضخامت غلاف سیمانی می‌شود. در مقاطع نمکی هرچه ضخامت غلاف سیمانی بیشتر باشد کرنش کمتری در سطح لوله در بلند مدت ایجاد می‌شود.

۱۰) رعایت نسبت Ec/Es از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر نحوه بارگذاری لوله از سمت فشار سازند نمکی است. هرچه این نسبت بیشتر باشد، میزان مچالگی لوله در مقطع نمکی کمتر می‌شود. البته تغییر در نسبت Ec/Es تغییر شکل برشی لوله در مقاطع مجاور فصل مشترک لایه نمک و لایه‌های الاستیک را چندان کاهش نمی‌دهد.

۱۱) بررسی بلند مدت رفتار مجموعه سازند، غلاف سیمانی و لوله جداری نشان می‌دهد که نرخ کرنش نمک با گذشت زمان افزایش پیدا کرده و احتمال بروز گسیختگی لوله جداری با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند. این افزایش احتمال وقوع گسیختگی بطور کامل به رفتار خزشی تک محوره و سه محوره سنگ نمک منطقه در شرایط توزیع تنش منطقه بستگی دارد.

۱۲) الگوی کرنش‌های سطح لوله جداری به دو صورت مچالگی در مجاورت لایه نمک و برش موضعی در مجاورت فصل مشترک میان لایه نمکی با لایه‌های الاستیک بالا و پایینی رخ داده است. الگوی بروز گسیختگی‌ها تابع توزیع تنش منطقه است. نوع کرنش‌های برشی با حضور شرایط تنش تفاضلی شدت می‌یابد. در حالی که در شرایط تنش همسانگرد و ناهمسانگرد بیشتر الگوی کرنش‌ها بصورت مچالگی بوده و بیشینه کرنش نیز در مرکز مدل و در مجاورت لایه نمکی رخ داده است.

۶-۲- پیشنهادات

۱) مغزه گیری از نمک موجود در اعماق مختلف و مطالعه خصوصیات مقاومتی آن‌ها در حالت خزش تک محوری و سه محوری همراه با اثر دما

۲) قرار دادن اطلاعات ژئومکانیکی میادین نفتی در اختیار محققان علاقمند

۳) در این مطالعه به دلیل محدودیت اطلاعاتی و سخت افزاری و همچنین افزایش سطح پیچیدگی مسئله اثر دما در نظر گرفته نشد. با توجه به نقش غیرقابل انکار دما در رفتار خزشی نمک و همچنین دمای بالای اعماق زیاد چاه‌های نفتی، پیشنهاد می‌شود خصوصیات هم‌چون ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارتی سنگ نمک موجود با روش‌های رایج اندازه‌گیری شده و جهت انجام مطالعات دقیق‌تر در مدل‌سازی‌ها استفاده شود.

منابع

- امیرشیرزاد، ب. (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی پایداری لوله‌های جداری در برابر خزش ناشی از سازندهای نمکی با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D در میدان نفتی مارون"، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- توکلی، ح. امیرشیرزاد، ب. دشتی زرگی، ج. (۱۳۹۱)، "تأثیر جریان لایه های نمک بر پایداری لوله های جداری چاه های نفتی میدان مارون"، اولین کنفرانس ملی فناوری‌های معدنکاری ایران، دانشگاه یزد.
- حسینی، م. (۱۳۹۱)، رساله دکتری، "مطالعه رفتار مکانیکی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی تحت بارگذاری متناوب"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- زارعیان جهرمی، الف. (۱۳۸۸)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "تحلیل گسیختگی لوله جداری ناشی از رفتار خزشی سنگ نمک در مغارهای نمکی"، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- فارسی مدان، م. (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی اثر خزش سنگ در ایجاد مچالگی لوله‌های جداری در میدان نفتی مارون"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ایران.
- قدوسی بروجنی، ف. (۱۳۹۵)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی رفتار مچالگی لوله های جداری تحت تاثیر نیرو های خارجی با استفاده از روش های عددی"، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- رحیمی، ش. حسینی، م. (۱۳۹۳)، "بررسی آزمایشگاهی رفتار خزش سه محوری بر روی استوانه توخالی جداره ضخیم سنگ نمک"، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران.
- کلانتری، ف. (۱۳۸۰)، "مکانیک محیط های پیوسته"، انتشارات دانشگاه گیلان
- لطف اللهی، الف. سجادیان، الف. سلطانپان، ح. (۱۳۸۵)، "ارزیابی دוגاب‌های سیمان چاه‌های یکی از مخازن جنوب و ارائه راهکار مناسب جلوگیری از دوپهن شدن لوله های جداری"، اولین کنگره مهندسی نفت ایران، تهران، انجمن مهندسی نفت ایران.
- محبی، ر. (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی پایداری چاه های حوزه ی نمکی و مدل سازی آن با استفاده از روشهای عددی در یکی از حوزه‌های نفتی"، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- میرالی، م. حسینی، م. (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی عددی رفتار چاه نفت در سازند نمکی (مطالعه موردی: یکی از چاه‌های نفت میدان کوپال)"، فصلنامه علمی-پژوهشی نفت، شماره ۹۲، دوره ۱-۹۶، ص ۱۳۰.
- توکلی، ح. شیرزاد، ب. دشت بزرگی، ج. (۱۳۹۱)، "تأثیر جریان لایه های نمک بر پایداری لوله های جداری چاهای نفتی میدان مارون"، کنفرانس فناوری های معدنکاری ایران.

- API Bulletin. (2006). "Specification for Casing and Tubing", Eight Edition
- Aslannezhad, M., & Jalalifar, H. (2016). Determination of a safe mud window and analysis of wellbore stability to minimize drilling challenges and non-productive time. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 6(3), 493-503.
- Barla, G., Bonini, M., & Debernardi, D. (2010). Time dependent deformations in squeezing tunnels. *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories*, 2(1), 40-65.
- Bérest, P., Béraud, J. F., Gharbi, H., Brouard, B., & DeVries, K. (2015). A very slow creep test on an Avery Island salt sample. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6), 2591-2602.
- Brantut, N., Heap, M. J., Meredith, P. G., and Baud, P. (2013). Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review. *Journal of Structural Geology*, 52, 17-43. [doi:10.1016/j.jsg.2013.03.007].
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rock salt. *Journal of Structural Geology*, 15(9-10), 1257-1271. [doi:10.1016/0191-8141(93)90168-A].
- Chatar, C., & Imler, M. D. (2010, January). Overcoming a difficult salt drilling environment in the Gulf of Mexico: a case study. In *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Cheatham Jr, J. B., & McEver, J. W. (1964). Behavior of casing subjected to salt loading. *Journal of Petroleum Technology*, 16(09), 1-069.
- Clegg JD. (Jun, 1971). "Casing Failure Study-Cedar Creek Anticline". *Journal of Petroleum Technology*. 1;23(06):676-84.
- Dahou, A., Shao, J. F., & Bederiat, M. (1995). Experimental and numerical investigations on transient creep of porous chalk. *Mechanics of Materials*, 21(2), 147-158.
- Devold, H. (2013). *Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production*. Lulu. com.
- Dusseault, M. B., Bruno, M. S., & Barrera, J. (2001). Casing shear: causes, cases, cures. In *SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.
- Fjaer, E., Horsrud, P., Raaen, A. M., Risnes, R., & Holt, R. M. (1992). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 33). Elsevier.
- Fokker, P.A., Kenter, C.J. (1994). "The micro mechanical description of rock salt plasticity". SPE/ISRM 28117. In: *Proc. Eurock '94*. Delft, Netherlands, 29–31 August. A.A. Balkema, pp. 705–713.
- Gunther, R. M., Salzer, K., Popp, T., Ludeling, C. (2015). Steady-State Creep of Rock Salt: Improved Approaches for Lab Determination and Modelling. *Rock Mech Rock Eng*, DOI :10.1007/s00603-015-0839-2.
- Hampel, A., Günther, R. M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., ... & Herchen, K. (2015, May). Joint Project III on the comparison of constitutive models for the thermo-

- mechanical behavior of rock salt I–Overview and results from model calculations of healing of rock salt. In *Proceedings Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII*, South Dakota School of Mines and Technology, USA.
- Hansen, F. D., Mellegard, K. D., & Senseny, P. E. (1984, November). Elasticity and strength of ten natural rock salts. In *Proc First Conf. on the Mechanical Behavior of Salt* (pp. 71-83).
- Horsrud, P., Holt, R. M., Sonstebo, E. F., Svano, G., & Bostrom, B. (1994, January). Time dependent borehole stability: Laboratory studies and numerical simulation of different mechanisms in shale. In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Hunsche, U. (1994). Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock: experimental technique and interpretation. In *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials* (pp. 1-53). Springer Vienna.
- Itasca. (2012). *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)*, Version 5.01. Itasca Consulting Group Inc.
- Jiang, H., Liu, D., Huang, W., Xia, Y. C., & Liu, F. Y. (2014). Creep properties of rock under high confining pressure and different pore water pressures and a modified Nishihara model. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(3), 443-451.
- Jingen, D., & Rongzun, H. (1994). Computing Method of Casing Loads in Creep Formation [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 4.
- Khalaf, F. (1985, January). Increasing casing collapse resistance against salt-induced loads. In *Middle East Oil Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Lao, K., Bruno, M. S., & Serajian, V. (2012, April). Analysis of salt creep and well casing damage in high pressure and high temperature environments. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Lau, L. I. H. (2010). *Performance of Pillars in Rock Salt Mines* (Master's thesis, University of Waterloo).
- Liu, H. (2005). WANG Xiu-xi. Viscoelastic constitutive equation of mudstone and calculation of pressure on casing in Daqing Oilfield [J]. *Journal of University of science and technology of China*, 35(1), 118-123.
- Lux, K.H., Rokahr, R. (1984). “Laboratory investigations and theoretical statements as a basis for the design of caverns in rock salt formations”. In: Hardy Jr., H.R., Langer, M. (Eds.), *Proc. 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Trans. Tech. Publications, Clausthal-Zellerfeld, pp. 275–310.
- Ma, L. (2004). *Experimental Investigation of Time Dependent Behavior of Welded Topopah Spring Tuff*. Ph. D. Dissertation. Reno: University of Nevada.
- Macini, P., Mesini, E., Salomoni, V. A., & Schrefler, B. A. (2006). Casing influence while measuring in situ reservoir compaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50(1), 40-54.
- Maranini, E., & Brignoli, M. (1999). Creep behaviour of a weak rock: experimental

- characterization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 127-138.
- Mohiuddin MA, Khan K (2007) Analysis of wellbore instability in vertical, directional, and horizontal wells using field data. *J Petrol Sci Eng* 55:83–92.
- Munson, D.E., Wawersik, W.R. (1993). “Constitutive modelling of salt behavior—state of the technology”. In: *Proc. of the 7th ISMR Congress*, vol. 3. Aachen. Balkema, Rotterdam, pp. 1797–1810.
- Peng, S., Fu, J., & Zhang, J. (2007). Borehole casing failure analysis in unconsolidated formations: A case study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 59(3), 226-238.
- Ping'en, L., Youquan, Y., & Xianye, S. (2007). Theoretical solution of casing loads in rheological formation in tectonic stress field. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(1), 11-16.
- Rothenburg, L., Frayne, M. A., & Mraz, D. Z. (1993). Application of two and three dimensional numerical models for intact salt rock. *Innovative mine design for the 21st century*, 609-620.
- Silberschmidt, V.G., Silberschmidt, V.V. (2000). “Analysis of cracking in rock salt”. *Rock Mech. Rock Engrg.* 33, 53–70.
- Sun, J. (2007). Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6), 1081-1106. (in Chinese).
- Tekin, A. (2010). Blind shear ram blowout preventers: estimation of shear force and optimization of ram geometry (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- 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
- Taylor, G., Quinney, H. 1932. The plastic distortion of metals. *Philos. Trans. Roy. Soc. A* 230 (681-693): 323-362. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1932.0009>
- Tsai, L. S., Hsieh, Y. M., Weng, M. C., Huang, T. H., and Jeng, F. S. 2008. Time-dependent deformation behaviors of weak sandstones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2), 144-154. [doi:10.1016/j.ijrmms.2007.04.008].
- Wang, H., & Samuel, R. (2016). 3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs”, *SPE Drilling & Completion*.
- Willson, S. M., Fossum, A. F., & Fredrich, J. T. (2002, January). Assessment of salt loading on well casings. In *IADC/SPE Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- www.iran-spe.com
- Yang, C. H., Daemen, J. J. K., and Yin, J. H. (1999). Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 36(2), 233-242. [doi:10.1016/S0148-9062(98)00187-9].

- Yang, S. Q., and Jiang, Y. Z. 2010. Triaxial mechanical creep behavior of sandstone. *Mining Science and Technology*, 20(3), 339-349. [doi:10.1016/S1674-5264(09)60206-4].
- Yi-jin, Z. E. N. G., Chun-he, Y. A. N. G., Feng, C. H. E. N., & Xiuli, D. (2002). Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(4), 595-598.
- Youquan, Y., Zhiming, L., Guangqing, Z., & Xingchao, Z. (2004). Study on casing loads in creep formations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 14, 017.
- Zaman, M. M., Abdulraheem, A., & Roegiers, J. C. (1995). Reservoir compaction and surface subsidence in the North Sea Ekofisk field. *Developments in Petroleum Science*, 41, 373-423.
- Zhang, G., & Liu, C. (2000). Effect of creep of surrounding rocks on deformation of oil well casing. *Chin J Rock Mech Eng*, 19, 971-5.
- Zhang, Y., Xu, W. Y., Gu, J. J., and Wang, W. 2013. Triaxial creep tests of weak sandstone from the deflection zone of high dam foundation. *Journal of Central South University of Technology*, 20(9), 2528-2536.
- Zhang, Y., Xu, W.-y., Shao, J.-f., Zhao, H.-b., Wang, W. (2015). Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project, *Water Science and Engineering*, doi: 10.1016/j.wse.2015.01.005.
- Zhao, H., Chen, M., & Wang, J. (2011). Salt loading on casing in cased wellbore sections. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), 501-505.
- Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press. [doi:10.1007/s11771-013-1765-7].

ABSTRACT

Over the past decades, numerical methods have been used as an effective tool for predicting rock mass engineering behavior. The ability to simulate simple continuous environments to environments with complex, ductile, hydraulic, and creep conditions with high speed and precision as well as the ability to consider changes in material behavior over time in different aspects of mechanical, thermal and Hydraulics have increased the tendency to use these methods in solving geomechanical problems. The casing collapse of the oil wells influenced by ductile formations time-dependent behaviors, is one of the challenges faced by the oil industry in the country. In order to investigate the effect of creep as a ductile formation time dependent behaviors on casing collapse of oil wells, one of the Kupal Oil wells has been modeled by using the finite difference numerical method and FLAC3D software because of the special conditions of the Kopal oil field in terms of the presence of salt formations under High-stress conditions. Field data such as in situ stresses and mechanical properties of the formation around the well at the desired depth should be carefully applied in the model since the numerical modeling response is highly dependent to the input data. In this research, in order to establish a basic model and confirm the results of modeling, a similar study in the area was conducted due to the inability to access geomechanical data. A three-dimensional model of formation surrounding well in the FLAC3D software was built after selecting the numerical software according problem conditions. At the first initial and boundary conditions have been applied in 3D model. Then different stages of drilling, applying Mud pressure, casing instalation and cement injection have been modeled. Finally analysis the long-term stresses, the amount and pattern of the deformations of the casing in various geomechanical and operational conditions have been investigated regardless of the effect of temperature. It is available to examine both possible types of damage to the interstitial casing, namely, the local shear at the salt layer and the adjacent layers interfacs, and also the examination of the casing in the vicinity of the salt formations which have visco-plastic behavior because of modeling attribute of the formation around the wells. Based on the results, the creep behavior of the salt layer in addition to time is a function of the stress distribution and the geometric properties of the salt formation. The shear deformation pattern of the casing is more likely than reduction diameters deformation to occur in the cases of diffrantial stresses distribution around the well. On the other hand, the study of the role of well completion parameters in preventing damage

to the casing shows the major role of the elastic modulus of cement sheath in the first degree and the casing grade in the second degree. It should be noted that the parameters such as the thickness of the cement sheath, the diameter/the wall thickness ratio and the cohesion strength of the cement sheath are of relative importance.

Keywords: Numerical modeling, Oil wells stability, Casing, Salt creep behaviour, FAC3D software



Shahrood Univrsity of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSC Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

**Numerical modeling of the effect of time-dependent behaviors of
ductile formations on the casing collapse of oil wells**

Mahdi Bajoolvand

Supervisor:

Dr. Ahmad Rameanzadeh

January, 2018