

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی ژئوتکنیک

تحلیل دینامیکی لوله‌های مدفون تحت اثر حرکت گسل

دانشجو:

خشایار خزاعی

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۸



دانشکده مهندسی عمران
گروه خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای خشایار خزاعی به شماره دانشجویی: ۹۵۰۵۴۶۴

تحت عنوان: تحلیل دینامیکی لوله‌های مدفون تحت اثر حرکت گسل

در تاریخ ۱۳۹۸ / ۶ / ۱۰ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی
و با درجه خیلی خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر رضا نادری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر مهدی گلی		دکتر امیر بذرافشان مقدم
			دکتر سید مهدی توکلی

تقدیم به:

پدر عزیز و مادرم مهربانم.

امیدوارم قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم.

سپاسگزاری‌ها:

با سپاس از استاد ارجمند جناب آقای دکتر نادری
هر آنچه تاکنون آموختم و در عمل بکار بردم
نتیجه زحمات بی‌شائبه شما استاد گرامی بوده
باینکه نوشتن در تقدیر از زحمات شما کاری بس
صعب و دشوار است لذا بدین‌وسیله تشکر و خسته
نباشید تقدیمتان می‌نمایم. باشد که بتوانم
گوشه‌ای از زحمات بی‌دریغ شما را جبران نمایم.

تعهدنامه

این جانب خشایار خزاعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل دینامیکی لوله های مدفون تحت اثر حرکت گسل تحت راهنمایی دکتر رضا نادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای 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 است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سازه‌های مدفون در خاک همواره در معرض آسیب‌های ناشی از زلزله و حرکت گسل می‌باشند. احتمال خرابی در آن‌ها با نزدیک شدن به منبع آسیب‌رسان بیشتر می‌شود. از عوامل آسیب‌رسان می‌توان به حرکت گسل‌ها اشاره کرد که باعث می‌شود تا سازه‌های مجاور گسل از جمله خطوط لوله مدفون دچار تغییر شکل یا گسیختگی شوند. به همین جهت انجام مطالعات و ارزیابی دقیق‌تر بازتاب لوله‌های مدفون ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های بررسی رفتار لوله در مواجهه با حرکت گسل، مدل‌سازی عددی خطوط توسط نرم‌افزار است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS حرکت گسل امتدادلغز به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و رفتار لوله فولادی در خاک رسی سست و متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تغییر شکل گروه خط لوله در کنار یکدیگر و اثر متقابل لوله‌ها بررسی شده است. طبق نتایج به دست آمده، با دفن لوله‌ها، با آرایش افقی می‌توان تغییر شکل‌های مقطع لوله را کاهش داد. همچنین در شرایط خاص دفن لوله‌ها با آرایش مثلی باعث عملکرد یکپارچه لوله‌ها شده و سختی خمشی گروه لوله بالا می‌رود و از کمانش لوله جلوگیری می‌شود. افزایش نسبت قطر به ضخامت $(\frac{D}{t})$ در لوله‌هایی با قطر یکسان باعث کاهش سختی خمشی در لوله شده و در نتیجه تغییر شکل مقطع کاهش می‌یابد و در صورتی که نسبت $\frac{D}{t}$ در لوله‌ها متفاوت باشد، با قرار دادن لوله با بیشترین نسبت $\frac{D}{t}$ به عنوان اولین لوله در جهت حرکت گسل امتدادلغز، می‌تواند از تغییر شکل زیاد لوله‌های دیگر جلوگیری کرد.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی عددی، نرم افزار اباکوس، تحلیل دینامیکی، لوله مدفون، اندرکنش خاک و لوله

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسئله	۳
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق	۴
۴-۱ هدف از انجام تحقیق	۵
۵-۱ فصل‌بندی مطالب	۶
فصل دوم: حرکت گسل‌ها و تأثیر آن‌ها بر لوله‌های مدفون	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ انواع لوله‌ها	۱۰
۳-۲ عوامل آسیب‌رسان و انواع آن	۱۵
۱-۳-۲ گسل شیب‌لغز	۲۰
۲-۳-۲ گسل امتدادلغز	۲۱
۳-۳-۲ گسل مورب‌لغز	۲۱
۴-۲ روش‌های تحلیل	۲۲
۵-۲ استفاده از روش‌های عددی	۲۴
۱-۵-۲ نیومارک و هال	۳۰
۲-۵-۲ کندی و همکاران	۳۵
۳-۵-۲ وانگ-یاه	۳۹
۴-۵-۲ کارامیتوس و همکاران	۴۳
۶-۲ مدل‌ها عددی	۴۵
۱-۶-۲ لئو و همکاران	۴۷
۲-۶-۲ وازوراس و همکاران	۴۸
۳-۶-۲ ژائو و همکاران	۴۹
۴-۶-۲ جوشی و همکاران	۵۰
۵-۶-۲ وازوراس و همکاران	۵۱

۵۲	۲-۶-۶ ژئ و همکاران.....
۵۵	فصل سوم: طراحی دینامیکی خطوط لوله.....
۵۶	۳-۱ مقدمه.....
۵۶	۳-۲- روش المان محدود.....
۵۸	۳-۳- معرفی اباکوس.....
۶۰	۳-۴- تئوری‌ها.....
۶۱	۳-۵- نظریه خمیری.....
۶۲	۳-۶- معیار تسلیم فون مایسز.....
۶۳	۳-۷- معیار تسلیم موهر کولمب.....
۶۵	۳-۸- دینامیک تماس.....
۶۶	۳-۹- مدل‌سازی عددی.....
۷۱	فصل چهارم: مدل‌سازی عددی جابه‌جایی گسل.....
۷۲	۴-۱- مدل تک لوله و ۲ بلوک.....
۷۷	۴-۲- مدل دو یا چند لوله و دو بلوک.....
۸۷	۴-۳- مدل تک لوله و سه بلوک.....
۹۷	فصل پنجم.....
۹۸	۵-۱ مقدمه.....
۹۸	۵-۲ نتیجه‌گیری.....
۹۹	۵-۳ پیشنهادها.....
۱۰۱	پیوست ۱ - اشکال.....
۱۰۳	منابع.....

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): نمونه‌ای از خطوط لوله مدفون	۱۱
شکل (۲-۲): نمونه‌ای از خطوط لوله روزمینی	۱۲
شکل (۳-۲): نمونه‌ای از اتصال جوشی انعطاف‌پذیر	۱۳
شکل (۴-۲): خط لوله روزمینی با اتصالات انعطاف‌پذیر	۱۳
جدول (۵-۲): طبقه‌بندی لوله بر اساس اهمیت لرزه‌ای	۱۴
شکل (۶-۲): تغییر شکل ماندگار	۱۵
شکل (۷-۲): شماتیک رفتار روانگرایی در خاک اشباع	۱۶
شکل (۸-۲): پدیده فرونشست زمین و حالت‌های آن	۱۷
شکل (۹-۲): پدیده زمین‌لغزش	۱۷
شکل (۱۰-۲): نمایش امتداد و شیب گسل	۱۹
شکل (۱۱-۲): مشخصات کلی گسل	۱۹
شکل (۱۲-۲): گسل شیب‌لغز به صورت نرمال و معکوس	۲۰
شکل (۱۳-۲): گسل امتدادلغز	۲۱
شکل (۱۴-۲): گسل‌های فعال در ایران	۲۲
شکل (۱۵-۲): نرخ خرابی ناشی از انتشار امواج نسبت به حداکثر شتاب زمین در لوله	۲۳
شکل (۱۶-۲): رابطه نیرو تغییر مکان خاک	۲۵
شکل (۱۷-۲): خاک مدل شده با فنرهای غیرخطی وینکلر	۲۶
شکل (۱۸-۲): ضریب باربری خاک رسی و ماسه‌ای بر اساس نسبت عمق به قطر	۲۸
شکل (۱۹-۲): ضریب عکس‌العمل فنریت جانبی خاک	۲۸
شکل (۲۰-۲): ضریب باربری قائم خاک رسی و ماسه‌ای بر اساس زاویه اصطکاک داخلی خاک	۲۹
شکل (۲۱-۲): ضریب عکس‌العمل فنریت قائم خاک	۳۰
شکل (۲۲-۲): نمایش حرکات نسبی در گسل الف (امتدادلغز ب) نرمال	۳۱
شکل (۲۳-۲): منحنی ایدئال‌سازی شده تنش-کرنش فولاد ۶۰X	۳۲
جدول (۲۴-۲): روابط نیومارک و هال	۳۳
شکل (۲۵-۲): مدل کندی و همکاران برای بررسی رفتار لوله در گسل امتدادلغز	۳۵

شکل (۲-۲۶) : جابجایی جانبی خط لوله	۳۷
شکل (۲-۲۷) : محدوده کارایی روش کندی و همکاران	۳۸
شکل (۲-۲۸) : مدل ارائه شده توسط وانگ - یاه	۴۰
شکل (۲-۲۹) : طرح پیشنهادی وانگ برای لوله عبوری از گسل	۴۲
شکل (۲-۳۰) : مدل پیشنهادی تاکادا و همکاران	۴۲
شکل (۲-۳۱) : قسمت های مختلف لوله در مدل کارامیتوس	۴۴
شکل (۲-۳۲) : مدل ایدئال سازی شده خط لوله	۴۵
شکل (۲-۳۳) : تقسیم بندی لوله به اجزاء کوچک تر	۴۶
شکل (۲-۳۴) : مدل پوسته استوانه ای جدار نازک	۴۷
شکل (۲-۳۵) : مدل پیشنهادی لئو و همکاران	۴۷
شکل (۲-۳۶) : مدل پیشنهادی وازوراس و همکاران	۴۹
شکل (۲-۳۷) : مدل ارائه شده توسط ژئو و همکاران	۵۰
شکل (۲-۳۸) : مدل پیشنهادی لوله و فنر جوشی و همکاران	۵۱
شکل (۲-۳۹) : مدل ساخته شده با نرم افزار اباکوس - وازوراس و همکاران	۵۲
شکل (۲-۴۰) : مدل اول ژی و همکاران	۵۳
شکل (۲-۴۱) : مدل دوم ارائه شده توسط ژی و همکاران	۵۳
شکل (۲-۴۲) : مدل سوم ارائه شده توسط ژی و همکاران	۵۴
شکل (۳-۱) : نمودار تنش- کرنش ماده الاستوپلاستیک	۶۰
شکل (۳-۲) : سطح تسلیم در فضای ۳ بعدی تنش های اصلی	۶۲
شکل (۳-۳) : ترسیم معیار ترسکا و فون مایسز در فضای تنش های اصلی	۶۳
شکل (۳-۴) : ترسیم معیار فون مایسز و ترسکا در صفحه تنش های $\sigma_1 - \sigma_3$ و $\sigma_2 - \sigma_3$	۶۳
شکل (۳-۵) : معیار تسلیم موهر کولمب	۶۴
شکل (۳-۶) : ترسیم معیار موهر کولمب در فضای ۳ بعدی	۶۵
جدول (۳-۷) : مشخصات خاک مورد استفاده در مدل	۶۷
نمودار (۳-۸) : رفتار فولاد X65	۶۷
شکل (۳-۹) : المان بندی بلوک خاک و لوله	۷۰
شکل (۴-۱) : هندسه مدل شماره ۱	۷۲
جدول (۴-۲) : مشخصات مصالح مصرفی	۷۳

شکل (۳-۴): نمودار رفتار فولاد X65	۷۳
شکل (۴-۴): برشی از مقطع لوله و خاک پس از جابه‌جایی	۷۴
شکل (۵-۴): المان بندی بلوک خاک و لوله و مقطع خاک	۷۵
نمودار (۶-۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل شماره ۱ با مدل آقای وازاروس	۷۵
جدول (۷-۴): مقایسه خطای دامنه کرنش های محوری در مدل کار شده با مدل آقای وازاروس	۷۶
شکل (۸-۴): نمایش دهنده توزیع تنش مایسز در طول لوله در مدل شبیه‌سازی شده	۷۶
شکل (۹-۴): نمایش توزیع تنش مایسز در محدوده چین‌خوردگی لوله فولادی	۷۶
شکل (۱۰-۴): بررسی روند تمرکز کرنش محوری و ایجاد چین‌خوردگی	۷۷
شکل (۱۲-۴): نمایش المان بندی بلوک و لوله در مدل شماره ۲	۷۹
شکل (۱۳-۴): مقایسه نتایج حاصل از بررسی پارامتر فاصله افقی	۸۰
شکل (۱۴-۴): برش مقطع خاک-جابه‌جایی لوله و فشردگی خاک	۸۰
شکل (۱۵-۴): برش مقطع لوله‌ها و تغییر شکلان در بلوک خاک	۸۱
نمودار (۱۶-۴): مقایسه نتایج کرنش محوری لوله در فواصل عمودی بین ۲ لوله	۸۱
شکل (۱۷-۴): جابه‌جایی گسل در آرایش عمودی لوله‌ها	۸۲
شکل (۱۸-۴): تغییر شکل مقطع لوله و نمایش کمانش در جدار لوله در آرایش عمودی	۸۲
نمودار (۱۹-۴): مقایسه نتایج حاصل از آرایش قرارگیری ۲ لوله	۸۲
نمودار (۲۰-۴): نتایج حاصل از آرایش قرارگیری ۳ لوله	۸۳
شکل (۲۱-۴): نحوه قرارگیری ۳ لوله با آرایش مثلثی مدفون در خاک	۸۴
شکل (۲۲-۴): جابه‌جایی گسل و تغییر شکل مقطع لوله در آرایش مثلثی	۸۴
شکل (۲۳-۴): آستانه ایجاد کمانش در لوله در آرایش مثلثی	۸۴
شکل (۲۴-۴): تغییر شکل مقطع در لوله سمت راست ($D/t=96$) نسبت به لوله سمت چپ ($D/t=72$)	۸۵
نمودار (۲۵-۴): ترتیب قرارگیری لوله‌ها با ضخامت متفاوت و قطر یکسان	۸۵
نمودار (۲۶-۴): ترتیب قرارگیری ۲ لوله با سختی متفاوت	۸۶
شکل (۲۷-۴): نمایش مدل در نرم‌افزار و نحوه قرارگیری بلوک‌ها	۸۷
نمودار (۲۸-۴): رفتار فولاد X65	۸۸
شکل (۲۹-۴): مش بندی در مدل ۳ بلوکه	۸۹
شکل (۳۰-۴): اعمال جابه‌جایی به یک بلوک از بلوک‌های کناری	۸۹
شکل (۳۱-۴): نمایش اندازه زاویه موردبررسی در بلوک میانی	۹۰

- نمودار (۴-۳۲): مقایسه نتایج کرنش محوری در لوله حاصل از بررسی زاویه‌های مختلف در بلوک میانی ۹۰
- نمودار (۴-۳۳): میزان جابه‌جایی بلوک‌ها و نتایج حاصل از بررسی طول مختلف بلوک میانی ۹۱
- شکل (۴-۳۴): نمایش اعمال جابه‌جایی به‌صورت قرینه به هر دو بلوک کناری ۹۲
- نمودار (۴-۳۵): مقایسه نتایج حاصل از اعمال جابه‌جایی به ۲ بلوک ۹۳
- جدول (۴-۳۶): مشخصات مصالح مصرفی در مدل شماره ۲ ۹۳
- نمودار (۴-۳۷): بررسی اثر نوع خاک بر کرنش محوری در راستای لوله ۹۴
- شکل (۴-۳۸): نمایش زوایای α و β در بلوک میانی مدل شماره ۳ ۹۴
- نمودار (۴-۳۹): بررسی اثر زاویه β بر کرنش محوری در لوله فولادی ۹۵
- شکل (۱-۱): شریان‌های حیاتی ۱۰۱
- شکل (۱-۲): لوله آسیب‌دیده طی زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن (۵۹) ۱۰۱
- شکل (۱-۳): زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان و تغییر شکل بزرگ سطح مقطع لوله (۶۰) ۱۰۲
- شکل (۱-۴): فوران آب ناشی از شکست لوله آب در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج ۱۰۲

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

خطوط لوله در هر کشور حامل موادی است که برای حفظ حیات بشر ضروری است. صدمه به این گونه خطوط جدا از احتمال تلف شدن محصولات، امکان ایجاد خطرات جانی برای کارکنان مجموعه و گاهی خسارات زیست محیطی جبران ناپذیری را در پی دارد. در بعضی موارد برای جلوگیری از آسیب های سطحی و زیبایی، این خطوط در عمقی از خاک دفن می شوند. این گونه خطوط را خطوط لوله مدفون می نامند. توجه به اینکه ایران در یکی از مناطق زلزله خیز جهان واقع شده است حائز اهمیت است زیرا زلزله خیز بودن باعث ایجاد خسارات مالی و جانی زیادی به ساکنین این مرزوبوم می شود. با بررسی زلزله های اخیر متوجه می شویم که خسارات زیادی به شریان های حیاتی وارد شده است. لوله های مدفون نیز از این قاعده مستثنا نیستند.

از جمله آسیب هایی که متوجه خطوط لوله مدفون است، آسیب زلزله است که از طریق انتشار امواج و تغییر شکل های بزرگ باعث گسیختگی یا تغییر شکل مقطع لوله می شود. تغییر شکل ها در حالت شبه استاتیک بر لوله ها وارد می شوند و الزاماً به صورت تکان های شدید لرزه ای نیستند اما خط لوله در محدوده پلاستیک تغییر شکل های جدی می دهد که باعث تسلیم و گسیختگی جداره می شود. در اغلب موارد آسیب دیدگی این خطوط از نوع گسیختگی است. بررسی های انجام شده بر روی خطوط لوله مدفون نشان می دهند اکثر این خرابی ها بر اثر جابه جایی صورت می گیرد. به عبارتی خطوط لوله تا حدود زیادی در برابر بار های سطحی و امواج مقاوم بوده ولی نسبت به جابه جایی های بزرگ بسیار آسیب پذیر است. اگر یک خط لوله بین دونقطه از زمینی که دارای حرکات غیریکنواخت هستند قرار گیرد به دلیل اختلاف فاز به وجود آمده کرنش ها و انحنای در لوله ایجاد می شود. با توجه به اهمیت این خطوط، آسیب های وارده نباید باعث از کار افتادگی خطوط لوله شوند. از این رو نیازمند طراحی در برابر جابه جایی های بزرگ زمین می باشند (۱). لازمه این طراحی، شناسایی بار های وارد بر خطوط لوله و پس از آن بررسی خطوط طراحی شده با استفاده از روش های تحلیلی و عددی است.

در این فصل ابتدا تاریخچه تأثیرات زلزله و گسل بر خطوط مدفون بازنگری گردیده، سپس به شرح مسئله، ضرورت انجام مطالعه، اهداف پایان نامه و ساختار پایان نامه پرداخته خواهد شد.

۱-۲ بیان مسئله

به مجموعه سازه‌ها، تأسیسات و تجهیزاتی که وظیفه ذخیره، تأمین، انتقال و توزیع نیازهای حیاتی شامل آب، برق، گاز و یا جمع‌آوری، ذخیره و تصفیه یا بازیافت فاضلاب و مواد زائد و یا برقراری ارتباط شامل تلفن ثابت و همراه، اینترنت و داده رادارند شریان‌های حیاتی گفته می‌شود. همانطور که از اسم این سازه‌ها پیدا است گستردگی و عملکرد بی‌وقفه این شبکه دو خصوصیت اصلی این سازه‌ها است. کلمه شریان بر وسیع بودن این شبکه و کلمه حیاتی پرتداوم خدمت این شبکه حتی در حوادثی مانند زلزله دلالت دارد (۲).

در ادامه فهرستی از شریان‌های حیاتی (۳) بیان می‌شود.

۱. شریان‌های حیاتی حمل و نقل از جمله جاده، خطوط راه آهن و ...
۲. شریان‌های حیاتی توزیع آب و دفع فاضلاب، شبکه جمع‌آوری و ...
۳. شریان‌های توزیع انرژی شامل نیروگاه‌ها، سدها، خطوط انتقال نفت و ...
۴. شریان‌های حیاتی مخابرات مانند خطوط تلفن، ایستگاه‌ها و ...
۵. شریان‌های حیاتی مخازن آب، خطوط انتقال، تهیه و توزیع آب و تونل‌های انتقال

خصوصیات مشترک (۴) موارد فوق عبارت‌اند از:

گستردگی شبکه در ناحیه: با توجه به گسترش شبکه‌ها در مناطق مختلف، نمی‌توان تحلیل شبکه را به منطقه‌ای خاص نسبت داد بنابراین تحلیل شبکه یک تحلیل پیوسته خواهد بود و عواملی همچون خاک‌شناسی، تحلیل خطر، تراز آب زیرزمینی و تفاوت‌های نقاط مختلف شبکه باعث دشواری تحلیل خواهد شد.

تأثیر متقابل اجزا: در شبکه‌ها، اجزا فرعی از اجزا اصلی تأثیرپذیرند به‌عنوان مثال قطع لوله اصلی گاز باعث قطع گاز در لوله‌های فرعی می‌شود.

اندرکنش شریان‌های حیاتی مختلف: بسیاری از فعالیت‌ها از جمله فعالیت‌های حفاظتی نیاز مستقیم به استفاده از منابع انرژی دارند به‌طوری‌که قطع یک منبع باعث اختلال شدید و یا ازکارافتادگی کامل آن سیستم می‌شود.

به‌عنوان اولین مثال می‌توان از زلزله ۱۹۲۰ توکیو یادکرد که شبکه آب‌رسانی دچار اختلال شد و ۱۲۰ هزار نفر در آتش سوختند. همچنین در زلزله ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو سیستم آب‌رسانی دچار اختلال شد و آتش در منطقه به‌سرعت نفوذ کرد.

زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن از جمله زلزله‌هایی بود که بر لوله‌های انتقال آب و گاز تأثیر زیادی داشت. گسیختگی لوله انتقال آب شهر باعث قطع آب شد. در نتیجه نه تنها ۱,۵ میلیون نفر دچار مشکل تأمین آب آشامیدنی شدند، بلکه سیستم آتش‌نشانی که وابسته به آب بود با چالش جدی روبرو شد (۵).

همچنین زلزله‌های ۱۹۷۲ ماناجوا و ۱۹۹۹ چی چی تایوان اثرات تخریبی زیادی بر خطوط انتقال انرژی داشتند که راه‌اندازی مجدد این خطوط حدود ۴ ماه به طول انجامید. بعد از زلزله خسارت ۵ شرکت عمده گاز حدود ۲۵ میلیارد دلار برآورد شد (۶) و (۷).

بنابراین همان‌طور که مشخص است اختلال در کار این شریان‌ها باعث ایجاد مشکلات بسیاری در زندگی افراد خواهد شد و لازم است که این شریان‌ها در تمام مواقع بدون اختلال به کار خود ادامه دهند.

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

به‌طور کلی تلاش بر این است که سازه‌ها و شریان‌های حیاتی به‌دوراز مناطق زلزله‌خیز و گسل‌ها احداث شوند اما با توجه به محدودیت‌ها از جمله هزینه و موقعیت منطقه‌ای، در برخی موارد این سازه‌ها ملزم به احداث در کنار گسل‌ها و یا عبور از روی خطوط گسل می‌باشند. این نزدیکی به گسل به‌شدت باعث افزایش احتمال آسیب‌دیدگی آن‌ها می‌شود که اکثراً به‌صورت سازه‌های زیرزمینی بنا

می‌شوند. سازه‌های زیرزمینی تأسیساتی هستند که در اعماق زمین و در محاصره خاک و سنگ بنا می‌شوند. از مزایای این سازه‌ها می‌توان به موارد زیر (۳) اشاره کرد:

۱. مقاومت بیشتر در مقابل زلزله

۲. اشغال کم فضا

۳. اثرات سو زیست‌محیطی کمتر

بنا به دلایل ذکرشده، اکثر شریان‌های حیاتی به‌صورت خطوط مدفون می‌باشند، بنابراین تشخیص مشکل و محل آن بسیار دشوار است. همچنین عدم تشخیص صحیح و به‌موقع این خرابی‌ها باعث ایجاد خسارات شدید و ناگهانی در درازمدت خواهد شد. به‌عنوان مثال تشخیص نشت آب به میزان کم بسیار دشوار بوده ولی ممکن است در درازمدت باعث نشست آبی زمین شود. خسارت‌های ناشی از زلزله بر سازه‌های زیرزمینی به‌خصوص خطوط لوله مدفون باعث شده تا محققین توجه ویژه‌ای به این سازه‌ها داشته باشند. اهمیت موضوع زمانی پررنگ‌تر شد که در سال ۱۹۷۱، زلزله سان فراندو، عمده خسارات ناشی از آسیب‌دیدگی شریان‌های حیاتی به‌ویژه خطوط لوله بود. در این زلزله تقریباً تمامی خطوط لوله عبوری از گسل‌ها آسیب دیدند. پس‌از آن شریان‌های حیاتی به حدی موردتوجه قرار گرفت که رشته‌ای مجزا به نام مهندسی زلزله شریان‌های حیاتی به‌عنوان یک شاخه تخصصی از زلزله در این زمینه مطرح شد (۸).

۴-۱ هدف از انجام تحقیق

در برخی مواقع خطوط لوله ملزم به عبور از گسل‌ها می‌باشند. در این موارد در هنگام حرکت گسل در فاصله مشخصی از لبه گسل جابه‌جایی نسبی لوله و خاک صفر می‌شود و لوله به‌طور کامل از خاک تبعیت می‌کند اما در فاصله‌های کمتر از آن حرکت لوله و گسل متفاوت است. در این حالت جابه‌جایی‌های گسل به‌صورت نوسانی نیستند به همین جهت در پایان زلزله گسل و لوله به نقطه‌ای غیر از نقطه اولیه تغییر مکان می‌ابند و در مکان جدید قرار می‌گیرند. این نوع جابه‌جایی را جابه‌جایی

ماندگار (PGD) می‌نامند که تأثیرات مخربی بر لوله‌های مدفون دارند به صورتی که پس از حرکت گسل، فشار وارده از خاک به لوله باعث تغییر شکل شدید در طول و مقطع لوله می‌شود. در مواردی نیز باعث ایجاد گسیختگی در مقطع می‌گردد. تغییر شکل مقطع می‌تواند باعث کاهش دبی، کاهش فشار و یا قطع جریان سیال داخل لوله شود در نتیجه بازده شبکه لوله کاهش شدیدی پیدا کند. تغییر شکل ایجادشده در لوله می‌تواند تحت اثر عوامل مختلف، متفاوت باشد. بررسی این عوامل و تأثیر آن‌ها با مدل‌سازی امکان‌پذیر است. یکی از راه‌های شبیه‌سازی، مدل‌سازی عددی است که کم‌هزینه‌ترین راه برای بررسی پارامترها است و در صورت اعمال صحیح شرایط واقعی بر لوله مدل شده پاسخی مشابه پاسخ خط لوله در شرایط طبیعی و واقعی خواهد داد. در پژوهش پیش رو برای مدل‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است.

۱-۵ فصل‌بندی مطالب

در فصل اول مقدمه‌ای از خطوط لوله مدفون و علت نامیدن آن‌ها به عنوان شریان‌های حیاتی بیان شد. همچنین انواع این شریان‌ها و تأثیرشان بر شهرها و جوامع با بیان مثالی عنوان شد. سپس به دلایل اهمیت و نوع آسیب‌دیدگی این خطوط پرداخته شد و برای هر کدام مثالی از زلزله‌های اتفاق افتاده آورده شد تا اهمیت بررسی این کاملاً مشخص شود.

در فصل دوم به بررسی انواع لوله‌ها پرداخته می‌شود و با عنوان نمونه‌ای از هر دسته، دسته‌بندی‌های مختلف لوله عنوان می‌شود. همچنین عواملی آسیب‌رسان به خطوط لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و زلزله‌هایی که باعث خرابی می‌شوند نیز بیان خواهد شد. سپس به بررسی پدیده گسلش و خصوصیات مشترک گسل‌ها پرداخته شده و دسته‌بندی گسل‌ها بیان خواهد شد. در ادامه روش‌های تحلیل و پس‌از آن تئوری اولیه بررسی خطوط لوله مدفون بیان خواهد شد.

فصل سوم به توضیح مدل‌سازی عددی خطوط لوله مدفون پرداخته است که این توضیحات شامل تئوری‌ها، نحوه مدل‌سازی و کارهای انجام‌شده در این راستا است. در ابتدا روش المان محدود توضیح داده شده و معادله کلیان بیان می‌شود. همچنین در رابطه با نرم‌افزار المان محدود اباکوس و دلایل

استفاده از آن توضیح مختصری ارائه می‌گردد. سپس تئوری‌های مورد استفاده در مدل‌سازی، مقادیر اولیه آن‌ها در مدل و شرایط مدل‌سازی بیان خواهد شد.

توضیحات مدل‌سازی عددی در فصل چهارم بیان شده است. در این فصل ۳ مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اول به بررسی لوله تک مدفون شده در ۲ بلوک خاک می‌پردازد و در مدل دوم تعداد لوله‌ها به ۲ و ۳ عدد افزایش پیدا می‌کند و اثر متقابل لوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل سوم لوله تک در ۳ بلوک خاک مدفون شده و تحت اثر جابه‌جایی یک بلوک قرار می‌گیرد. نتایج پارامترهای بررسی شده در هر حالت بر روی نمودار آورده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تغییر شکل کلی و سطح مقطع لوله نیز نشان داده شده است.

در فصل پنجم جمع‌بندی نتیجه کلی حاصل از ۳ مدل عددی کار شده در فصل قبل بیان می‌شود که می‌توان به بهینه‌سازی آرایش لوله در این نتیجه‌گیری اشاره کرد. همچنین برای گسترش تحقیق پیشنهادهایی در راستای کار انجام شده و همچنین در حیطه این موضوع عنوان می‌گردد.

فصل دوم: حرکت گسل‌ها و تأثیر آن‌ها بر لوله‌های مدفون

۱-۲ مقدمه

خطوط انتقال انرژی در کشور به صورت‌های مختلفی در حال خدمت‌رسانی است. بخشی از این خطوط (شریان‌های حیاتی) را لوله‌های مدفون تشکیل می‌دهند؛ که نقش اساسی در جامعه ایفا می‌کند. اکثر فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و خدمات شهری مانند انتقال گاز، انتقال آب و یا جمع‌آوری فاضلاب، وابسته به این خطوط است. این وابستگی شدید باعث شده تا این خطوط به‌صورت تمام‌وقت در حال خدمت‌رسانی باشند. هرگونه اختلال در عملکرد این خطوط نه‌تنها باعث اختلال در عملکرد زیرشاخه خطوط شده بلکه به‌طور غیرمستقیم بر خطوط انتقال دیگر تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین حفظ و نگهداری و پیشگیری از آسیب به این خطوط از اهمیت بالایی برخوردار است.

اولین قدم برای پیشگیری از خطرات احتمالی شناخت اجزای سیستم و شناخت رابطه آن‌ها با یکدیگر است؛ که این شناخت در موارد زیر موردبررسی قرار می‌گیرد:

۱. شناخت خط لوله مدفون که شامل انواع لوله و توضیحاتی در رابطه با هرکدام و دامنه کاربردی لوله است.

۲. شناخت انواع جابجاهای ماندگار و حرکت گسل‌ها به‌عنوان عامل آسیب‌رسان به لوله برای مشخص شدن نحوه جابجایی لوله انجام می‌گیرد.

۳. تحلیل دینامیکی که درواقع رابطه بین نیروی اعمالی توسط جابه‌جایی به لوله مدفون را موردبررسی قرار می‌دهد.

۲-۲ انواع لوله‌ها

با توجه به تعاریف موجود، خطوط لوله را می‌توان در دسته‌های متفاوتی طبقه‌بندی کرد. این دسته‌بندی‌ها بر اساس محل قرارگیری، جنس، عملکرد و اهمیت خطوط لوله (۹) انتخاب می‌شوند.

۱-۲-۲ دسته‌بندی بر اساس محل قرارگیری

یکی از روش‌های دسته‌بندی توجه به نحوه قرارگیری خطوط انتقال مواد است. در برخی موارد برای حفظ مسائل ایمنی و اجتناب از ناهماهنگی در محیط، لوله را در عمق مشخصی از خاک دفن

می‌کنند. این دفن شدگی باهدف حفظ خط لوله از خطراتی نظیر برخورد اجسام صلب و همچنین جلوگیری از آسیب‌هایی نظیر هوازدهی و یا یخ‌زدگی انجام می‌گیرد. دفن کردن لوله علاوه بر جلوگیری از آسیب‌رسانی، فضای ناکارآمد حاصل از وجود لوله را به حداقل ممکن می‌رساند به‌طوری‌که مانعی برای مسیر حمل‌ونقل نمی‌شود. در مواردی تحت شرایط خاص فعالیت روی خطوط لوله نیز مجاز است.



شکل (۱-۲): نمونه‌ای از خطوط لوله مدفون

در برخی موارد همچون سخت بودن یا سنگ و لایخی بودن زمین، امکان دفن لوله وجود ندارد. در این شرایط خطوط لوله به‌صورت روزمینی کارشده و در سطح زمین ادامه می‌یابد. لوله روزمینی به لوله‌ای عنوان می‌شود که در هنگام جابه‌جایی زمین، تغییر شکل خط لوله از تغییر شکل زمین پیروی نکند. با این تعریف خط لوله‌ای که بر روی تراز طبیعی زمین قرار دارد و توسط لایه‌ای خاک یا خاک‌ریز پوشانده شده است نیز در این گروه جای می‌گیرد.

۲-۲-۲ دسته‌بندی بر اساس جنس

در این دسته لوله‌ها بر اساس جنس و مصالح مصرفی می‌توانند در مواجهه با جابجایی به‌صورت صلب یا انعطاف‌پذیر عمل کنند. لوله صلب لوله‌ای تعریف می‌شود که در اثر نیروی وارد بر لوله جابجایی در

کل لوله یکسان بوده و سطح مقطع لوله نیز تغییری نکند. لوله‌های آربست و سفالی (۹) در این گروه جای می‌گیرند.



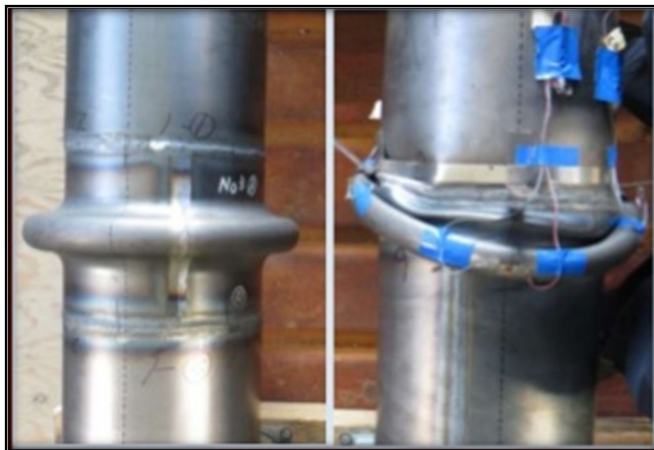
شکل (۲-۲): نمونه‌ای از خطوط لوله روزمینی

در گروه دوم با اعمال نیرو و جابجایی، سطح مقطع لوله شکل اولیه خود را از دست می‌دهد و بدون آنکه آسیب ببیند از حالت دایره به مقطع بیضی تغییر شکل پیدا می‌کند. این نوع لوله‌ها، لوله‌های انعطاف‌پذیر نامیده می‌شوند. لوله‌های فلزی و بتن‌آرمه در این دسته جای دارند.

در موارد بالا ۲ قسمت از لوله توسط رابطی به یکدیگر وصل می‌شود. این اتصال می‌تواند باعث عملکرد یکپارچه لوله شده و یا عملکرد ۲ قسمت لوله را از یکدیگر جدا کند که به ترتیب در حالت اول آن را اتصال صلب و در حالت دوم اتصال انعطاف‌پذیر نام‌گذاری می‌کنند. در اتصالات صلب در ۲ قسمت انتهایی اتصال اجازه هیچ‌گونه تغییر مکان نسبی و چرخش نسبی وجود ندارد. اتصالات جوشی و رزوه‌ای (۱۰) در لوله‌های فلزی در این گروه جای دارند.

۳-۲-۲ دسته‌بندی بر اساس عملکرد

با توجه به پاسخ لوله در خاک، می‌توان آن را به دو گروه پیوسته و ناپیوسته تقسیم کرد. لوله‌های پیوسته لوله‌هایی هستند که در آن‌ها اتصالات از نوع صلب است. این خطوط به علت یکپارچه بودن و پیوستگی در عملکرد قسمت‌های مختلف لوله، خطوط لوله پیوسته نام‌گذاری می‌شوند. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، مد اصلی خرابی در این لوله‌ها کمانش موضعی یا گسیختگی کششی است. در مقابل لوله‌های ناپیوسته لوله‌هایی هستند که شرایط معادلات تعادل در دو سمت متفاوت باشد. عملکرد لوله‌های ناپیوسته به‌گونه‌ای است که خرابی در آن‌ها بیشتر از لوله‌های پیوسته اتفاق می‌افتد و در اغلب موارد کشش طولی لوله‌ها منجر به جدا شدن لوله از محل اتصال می‌شود (۹). حدود ۸۰ درصد از خرابی‌ها در زلزله ۱۹۷۶ تانگ شان (۱۱) مربوط به گسیختگی اتصالات بود.



شکل (۳-۲): نمونه‌ای از اتصال جوشی انعطاف‌پذیر



شکل (۴-۲): خط لوله روزمینی با اتصالات انعطاف‌پذیر

۴-۲-۲ تقسیم‌بندی بر اساس اهمیت خطوط

در این حالت خطوط لوله بر اساس اهمیت لرزه‌ای مورد دسته‌بندی قرار می‌گیرد. طبق این دسته‌بندی

و بر اساس استاندارد خطوط امریکا (American Lifelines Alliance)، ۶ معیار اساسی در

تقسیم‌بندی لوله‌ها لحاظ شده است. این معیارها عبارت‌اند از:

- ۱- تحلیل مدل هیدرولیکی جریان و محاسبه حساسیت اجزا
 - ۲- جمعیت تحت پوشش
 - ۳- نقاط فاقد جایگزین
 - ۴- تأثیر قسمت‌هایی که کل شبکه را از کار می‌اندازد
 - ۵- دسترسی به مصالح و بازسازی سریع
 - ۶- تأثیر قسمت‌هایی که باعث حوادث و خسارات ثانویه می‌شوند.
- با لحاظ کردن پارامترهای فوق دسته‌بندی خطوط بر اساس اهمیت (۱۲) به‌صورت زیر است:

جدول (۲-۵): طبقه‌بندی لوله بر اساس اهمیت لرزه‌ای

طبقه‌بندی لوله	اهمیت لرزه‌ای	توضیح
۱	خیلی پایین یا صفر	خطوط لوله کم‌خطر در اتفاقات، برای واکنش بعد از زلزله احتیاج نیست، نتیجه خسارت معمول و ضربه اقتصادی ندارد
۲	عادی، نرمال	استفاده خط لوله نرمال و عادی، اغلب سامانه‌های آبی
۳	بحرانی و مهم	خطوط لوله بحرانی تعداد زیادی از مشتریان را بهره‌مند می‌کند و اثر اقتصادی مهمی در جامعه و زندگی انسان‌ها در صورت انهدام ناشی از زلزله دارد.
۴	ضروری	خطوط لوله‌ای ضروری برای عملکرد پس از زلزله.

۲-۳ عوامل آسیب‌رسان و انواع آن

به‌طور کلی سازه‌های زیرزمینی و روزمینی می‌توانند تحت اثر جابه‌جایی‌های موقت یا دائمی قرار گیرند. جابجایی موقت می‌تواند بر اثر عواملی همچون لرزش باشند. این لرزش بر اثر امواج درون زمین به‌صورت دوره‌ای ایجاد شده که می‌تواند سازه‌های روزمینی و زیرزمینی را به میزان اندکی جابجا کند. انرژی انتقال سازه به عواملی از جمله خاک واسطه، سازه، انرژی و نوع موج بستگی دارد.



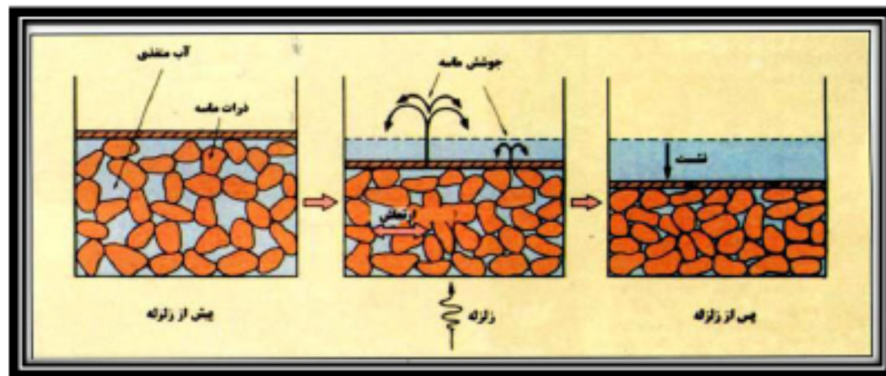
شکل (۲-۶): تغییر شکل ماندگار (۱۳)

اما نوع دیگر جابجایی، نسبت به جابجایی حاصل از لرزش، بسیار بزرگ‌تر است. این جابجایی‌ها به‌صورت ماندگار در سازه باقی می‌ماند. با توجه به میزان بالای جابجایی، این جابجایی بیشترین آسیب را به سازه‌های زیرزمینی به‌ویژه خطوط لوله مدفون وارد می‌کند (۱۳). روانگرایی، نشست سطح خاک، زمین‌لغزش و گسلش از جمله موارد فوق است که به‌اختصار توضیح داده می‌شوند.

۲-۳-۱ روانگرایی

روانگرایی زمانی اتفاق می‌افتد که خاک، تغییر فاز داده و به حالت مایع برسد که این حالت بیشتر در لایه‌های ماسه‌ای یکنواخت اشباع در سطح و زیرزمین اتفاق می‌افتد. علاوه بر لایه‌های ماسه در خاک‌های مستغرق و بدون چسبندگی نیز احتمال وقوع روانگرایی وجود دارد. علت ایجاد روانگرایی افزایش فشار آب منفذی است به‌طوری‌که در اثر این افزایش فشار آب، تنش مؤثر در دانه‌های ماسه صفر شده و خاک به‌صورت شناور درمی‌آید. به همین جهت خاک‌های مستعد روانگرایی معمولاً نزدیک

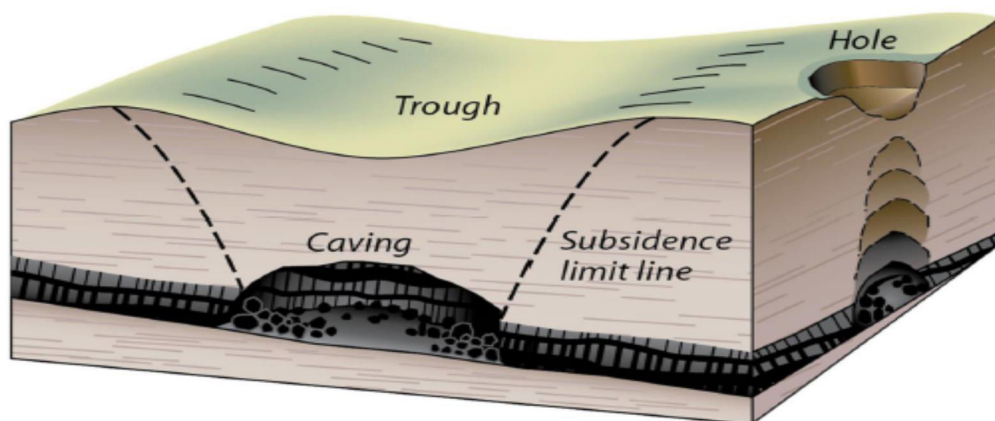
به سفره‌های آب زیرزمینی و در مناطقی که سطح آب بالا و نزدیک سطح زمین است یافت می‌شود. مناطقی که با مصالح غیر مهندسی پر شده باشند نیز مستعد روانگرایی هستند. احتمال و شدت روانگرایی با افزایش شدت و زمان تداوم زلزله افزایش می‌یابد. روانگرایی و حرکت‌های جانبی خاک می‌توانند سازه‌های زیرزمینی را به سطح زمین سوق داده و یا سازه‌های سطحی را در خاک غرق کنند (۱۳) بنابراین احتمال آسیب به سازه را بسیار بالا می‌برند.



شکل (۲-۷): شماتیک رفتار روانگرایی در خاک اشباع (۱۴)

۲-۳-۲ نشست خاک

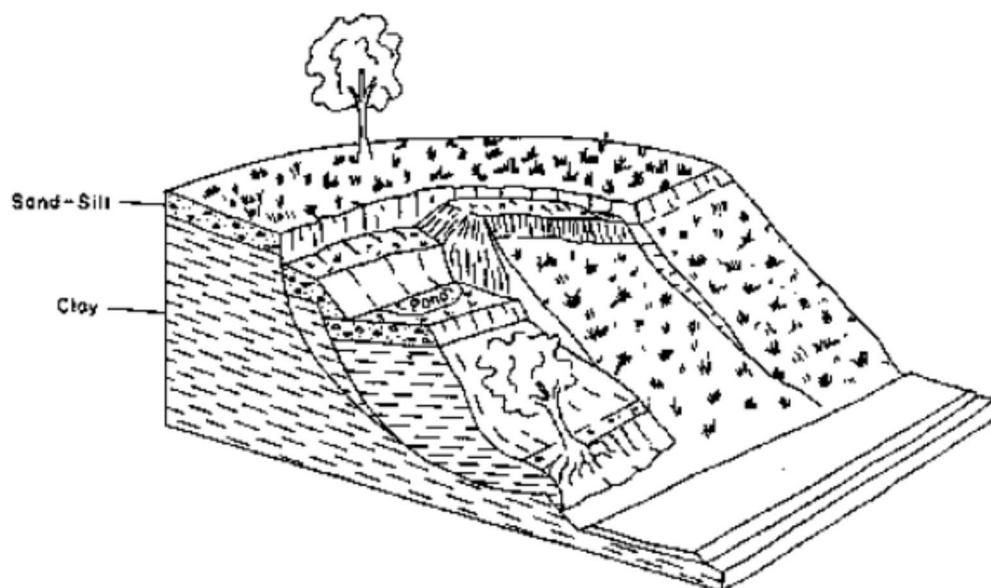
در برخی موارد خاک می‌تواند متراکم‌تر شود که این تراکم به صورت نشست رخ می‌دهد و قابل مشاهده است. این نشست، می‌تواند بر اثر لرزش خاک ایجاد شود که باعث ایجاد تغییر مکان‌های غیریکنواخت در خاک می‌شود. در نشست خاک در راستای قائم دارای تغییر مکانی بیشتر از راستای افقی است به طوری که می‌توان از تغییر مکان افقی در نشست ها چشم‌پوشی کرد و همین امر سبب تفاوت بین پدیده نشست خاک با زمین‌لغزش است. هنگامی که این تغییر مکان قائم در مقیاس بسیار بزرگی صورت گیرد به آن فرونشست گفته می‌شود که می‌تواند در اثر عواملی مانند کاهش آب زیرزمینی، عملیات انسانی نظیر حفاری معدن و یا انحلال خاک در آب به وقوع بپیوندد.



شکل (۸-۲): پدیده فرونشست زمین و حالت‌های آن (۱۵)

۳-۳-۲ زمین لغزش

زمین لغزش‌ها حرکت بخشی از خاک به صورت توده‌ای هستند. الگوهای متفاوتی برای زمین لغزش‌ها وجود دارد. این حرکت توده گاهی به علت لرزه ایجاد شده از زلزله و گاهی به علت کاهش نیروی مقاوم تکیه‌گاهی پدید می‌آید که معمولاً در شیب‌های تند دامنه کوه و جداره رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد. شدت رانش خاک به زاویه شیب، مقاومت، میزان آب و میزان تحکیم خاک وابسته است. همچنین احتمال وقوع رانش خاک به زمان تداوم و شدت زلزله بستگی دارد.



شکل (۹-۲): پدیده زمین لغزش (۱۳)

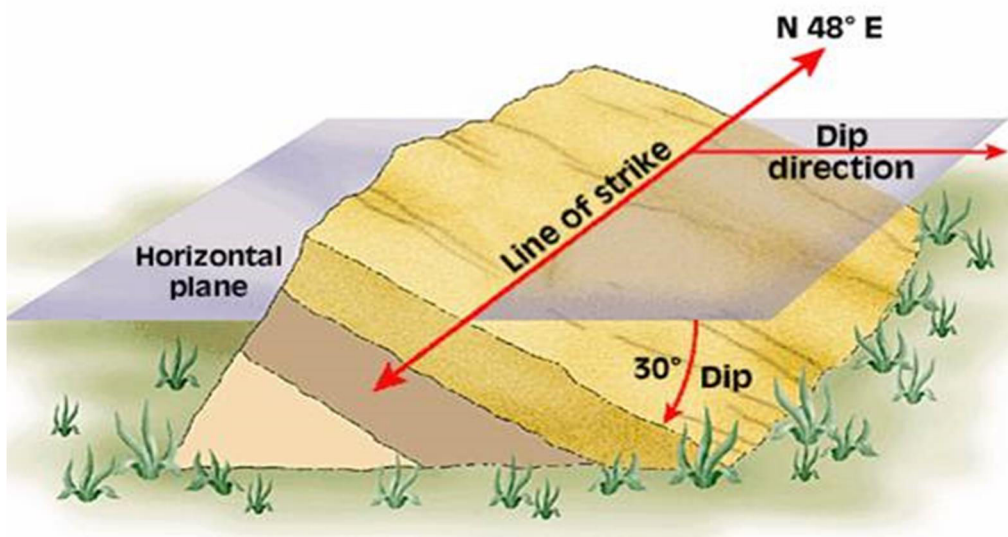
بحرانی‌ترین حالت زمین‌لغزش هنگامی اتفاق می‌افتد که خاک با حرکات چرخشی و انتقالی در عمق همراه باشد. به‌طور مثال در سال ۱۳۶۹ در زلزله منجیل (۱۶) لغزش زمین باعث جابه‌جایی حدود ۲۰ میلیون مترمکعب خاک در منطقه‌ای به طول ۲ کیلومتر و عرض ۴۰۰ متر و عمق ۵۰ متر شد. در نمونه دوم خط لوله گاز عبوری در اطراف کوه دشت (کوه‌های زاگرس) که از تنگنایی عبور می‌کرد دچار حادثه شد. در این سانحه زمین‌لغزشی با سرعت زیاد در توده ماسه‌ای و سنگی اطراف لوله رخ داد که باعث گسیختگی لوله، نشست گاز و در نتیجه انفجار خط لوله در میان جنگل شد. آتش‌سوزی به درختان بلوط سرایت کرد و خسارات زیادی را به منطقه وارد کرد (۱۷).

۲-۳-۴ گسلش

زلزله باعث جابجایی لایه‌های زمین می‌شود. گاهی این جابجایی‌ها باعث ایجاد شکستگی در سطح زمین شده (۱۸) و این شکستگی‌ها قابل‌مشاهده هستند. شکستگی‌هایی که در آن‌ها، سنگ‌های طرفین صفحه شکستگی، موازی با صفحه شکستگی لغزش پیدا می‌کنند، گسل نام دارد. همین مشخصه، تمایز آن‌ها را از درزه‌ها بیان می‌کند. لغزش گسل‌های مختلف متفاوت است و می‌تواند تا چند کیلومتر نیز امکان‌پذیر باشد (۱۹).

گسل‌های کوچک در ترانشه ای جاده، در مکان‌هایی که جابه‌جایی لایه‌های رسوبی مشاهده می‌شوند، قابل‌تشخیص هستند. گسل‌ها در این مقیاس و اندازه معمولاً به‌صورت تک گسیختگی جدا اتفاق می‌افتند.

گسل‌های بزرگ، شامل چندین صفحه گسل درگیر می‌باشند. این منطقه گسله، می‌تواند بسیار عریض بوده و معمولاً از روی عکس‌های هوایی نسبت به بررسی از روی سطح زمین، راحت‌تر قابل‌تشخیص هستند. تقسیم‌بندی گسل‌ها (۱۹) بر اساس هندسه و جهت جابجایی نسبی ایجادشده در آن‌ها صورت می‌پذیرد. هر گسل دارای مشخصاتی مشترک است (۱۳) که در ادامه به معرفی این مشخصات می‌پردازیم.

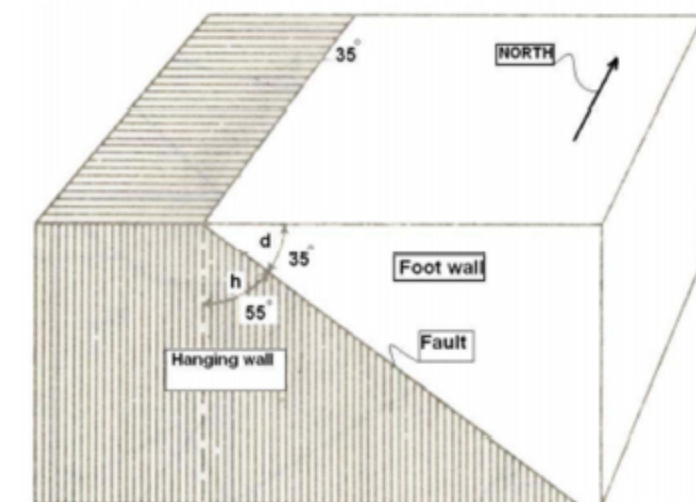


شکل (۲-۱۰): نمایش امتداد و شیب گسل

امتداد: امتداد گسل، امتداد یک خط افقی در سطح گسل است و زاویه آن خط با شمال را امتداد گسل می‌نامند.

شیب: زاویه بین سطح افق و سطح گسل را شیب گسل می‌نامند.

فرا دیواره و فرو دیواره: قطعه روی سطح گسل را فرا دیواره و قطعه زیر آن را فرو دیواره می‌نامند.



شکل (۲-۱۱): مشخصات کلی گسل

لغزش در گسل‌ها به دو صورت لغزش در راستای امتداد گسل و لغزش در راستای شیب گسل

اندازه‌گیری می‌شود که بر این اساس زمین‌شناسان گسل‌ها به سه دسته (۲۰) تقسیم می‌کنند:

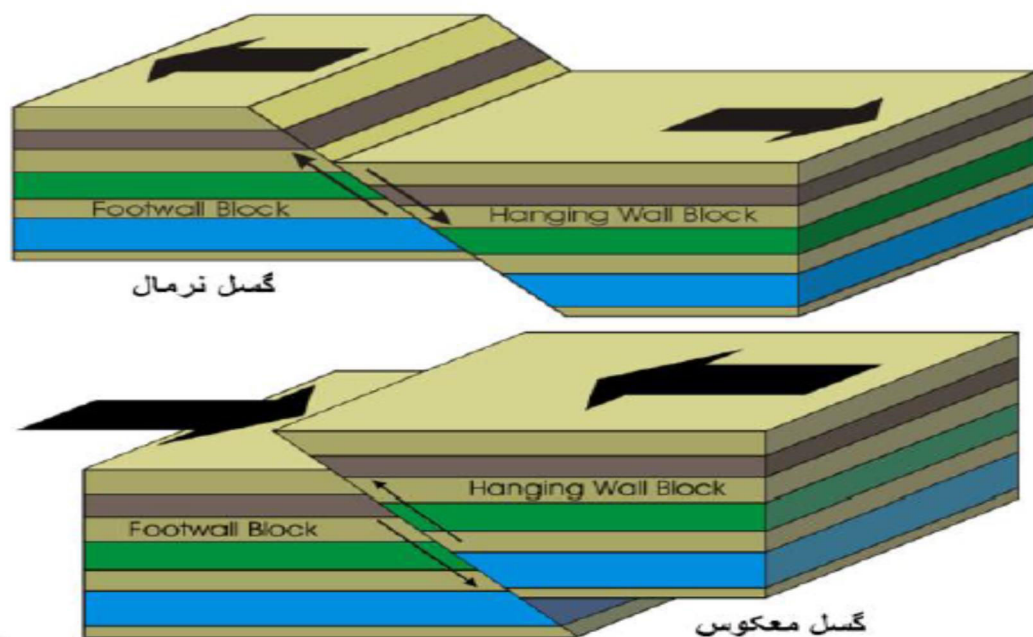
۱. در صورتی که لغزش کلی در جهت شیب گسل باشد، گسل شیب‌لغز (Dip-slip fault) نامیده می‌شوند.

۲. در صورتی که لغزش کلی به موازات امتداد گسل باشد، گسل امتدادلغز (Strike-slip fault) نامیده می‌شوند.

۳. در صورتی که لغزش دارای هر دو مؤلفه امتدادی و شیبی باشد، گسل مورب‌لغز (Oblique-slip fault) یا (Diagonal-slip fault) نامیده می‌شوند.

۲-۳-۱ گسل شیب‌لغز (۲۱)

گسل‌های شیب‌لغز به دو صورت «عادی» و «معکوس» تقسیم می‌شوند. گسل‌های عادی هنگامی ایجاد می‌شوند که پوسته زمین تحت کشش باشد. در گسل‌های شیب‌لغز عادی فرادیواره نسبت به فرودیواره به سمت پایین حرکت کرده است. وضعیت گسل‌های معکوس، خلاف گسل‌های عادی است؛ بدین معنی که فرادیواره نسبت به فرودیواره به سمت بالا حرکت می‌کند. گسل‌های معکوس هنگامی ایجاد می‌شوند که پوسته زمین تحت فشار باشد. شیب گسل‌های معکوس نسبتاً زیاد است. گسل‌های رانده جابه‌جایی‌ای همانند گسل‌های معکوس دارند منتها شیب صفحه گسل کمتر از ۴۵ درجه است.



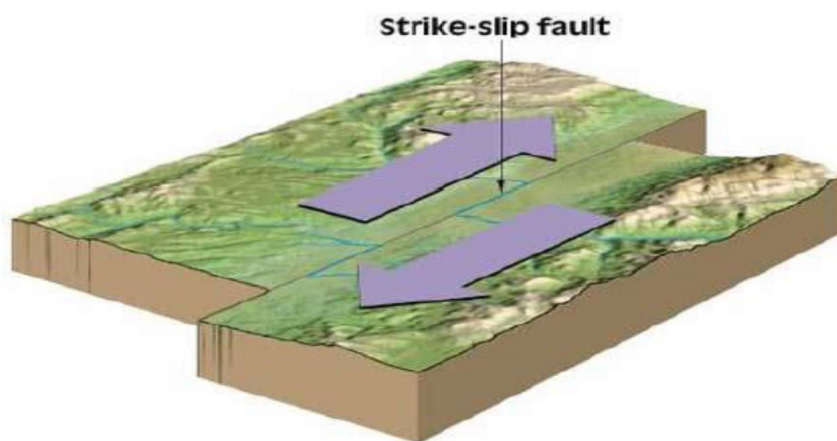
شکل (۲-۱۲): گسل شیب‌لغز به صورت نرمال و معکوس

۲-۳-۲ گسل امتدادلغز (۲۱)

در گسل‌های امتدادلغز جابه‌جایی به موازات امتداد گسل صورت می‌گیرد. در این نوع گسل‌ها سطح گسل تقریباً عمودی است. گسل‌های امتدادلغز راست‌بر را گسل‌های راست لغز و گسل‌های امتدادلغز چپ‌بر را گسل‌های چپ لغز نیز می‌نامند.

۲-۳-۳ گسل مورب لغز (۲۱)

گسلی که هم مؤلفه لغزشی امتدادی داشته باشد و هم مؤلفه لغزشی شیبی، گسل مورب لغز نام دارد. تقریباً همه گسل‌ها، هرچند کوچک، هر دو مؤلفه را دارند. در نتیجه برای اینکه همه گسل‌ها در این دسته جای نگیرند، لازم است که هر دو مؤلفه گسل‌های مورب لغز قابل اندازه‌گیری و درخور توجه باشند.



شکل (۲-۱۳): گسل امتدادلغز (۲۲)

گسل‌های یک منطقه، زلزله‌خیز بودن آن منطقه را بیان می‌کنند. ایران نیز منطقه‌ای لرزه‌خیز است که این امر بیان‌کننده تعداد بالای گسل در این منطقه است. از طرفی در سازه‌هایی همچون ساختمان‌ها، می‌توان با دوری از منطقه گسل به مقدار زیادی خطر آسیب زلزله را کاهش داد اما در خطوط انتقال انرژی به علت طولانی بودن خطوط و پهنای بودن آن در جهات مختلف، احتمال برخورد یا عبور از گسل بسیار بالا می‌رود. همچنین جهت قرارگیری خطوط گسل در ایران و محل قرارگیری منابع انرژی به گونه‌ای است که مسیر انتقال این موارد به‌طور مکرر با خطوط گسل متقاطع بوده و مجبور به

عبور از آن هاست. صفحه ایران از جهات مختلف در حال فشار است به همین جهت اکثر گسل‌های موجود از نوع گسل معکوس می‌باشند. رفتار لوله نیز در مواجهه با گسل معکوس بسیار متفاوت است به طوری که علاوه بر فشار ایجاد شده در لوله، کمانش لوله در اثر فشار باعث بحرانی تر شدن شرایط می‌شود (۸).

۴-۲ روش‌های تحلیل

لوله‌های مدفون را می‌توان به روش‌های زیر (۲۳) تحلیل کرد:

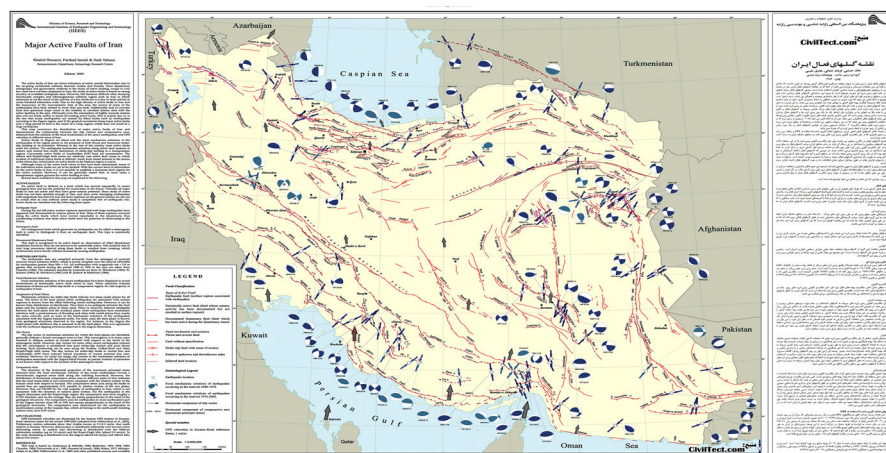
۱. تجربی

۲. روش مرحله‌ای

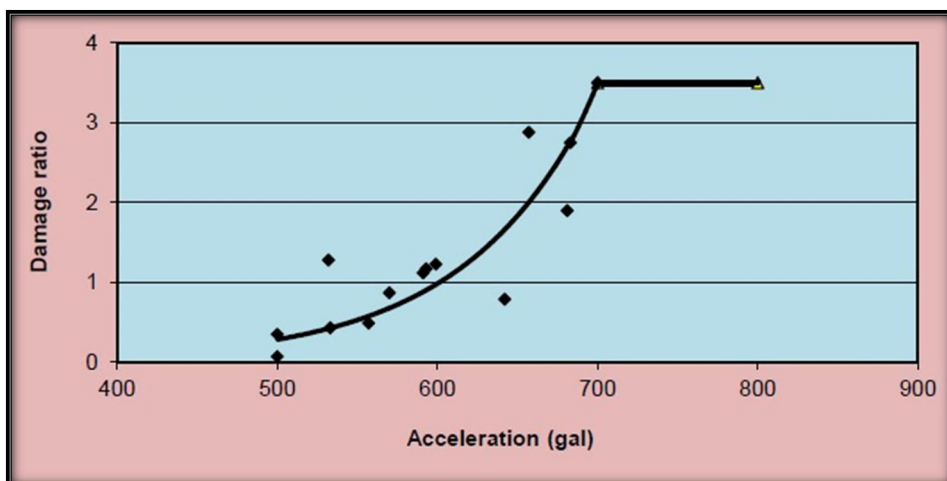
۳. استاتیک معادل

۱-تجربی:

در روش تجربی ارزیابی وضعیت لوله‌های مدفون بر اساس نمودارهایی که از تقسیم خرابی بر شتاب زلزله یا جابجایی ناشی از زلزله ایجاد شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. در این روش پس از اندازه‌گیری شتاب زلزله، مشخص کردن آن شتاب بر روی نمودار، خرابی احتمالی را تخمین می‌زنند. شتاب ماکزیمم زلزله از تحلیل خطر در منطقه مورد مطالعه به دست می‌آید. نمونه‌ای از این نمودار به صورت شکل ۲-۱۵ است.



شکل (۲-۱۴): گسل‌های فعال در ایران



شکل (۲-۱۵): نرخ خرابی ناشی از انتشار امواج نسبت به حداکثر شتاب زمین در لوله

۲- روش مرحله‌ای:

این روش طبقه‌بندی عملکرد لوله را با سطح خطر لرزه‌ای برای نشان دادن یک نوع خط لوله ترکیب می‌کند (۶). بر اساس این روش مراحل انجام و محاسبه عملکرد لوله به‌صورت زیر است:

۱. مشخص کردن محل جغرافیایی خط لوله

۲. انتخاب طبقه‌بندی مناسب برای خط لوله

۳. محاسبه سطح خطر لرزه‌ای

۴. انتخاب نوع ساختمان خط لوله

۵. تهیه نقشه‌ها

توضیحات مراحل فوق به‌طور کامل در استاندارد خطوط امریکا (ALA) آمده است.

۳- استاتیک معادل

در این روش پاسخ لرزه‌ای لوله از تأثیر متقابل خاک و لوله پیروی می‌کند؛ که به بررسی رفتار ساده‌شده لوله در تقابل با خاک پرداخته و باعث درک آسان آن می‌شود. پارامترهایی که در این روش و در محاسبات تأثیرگذارند، شامل موارد زیر می‌باشند.

(۱) اهمیت خط لوله

(۲) عدم قطعیت در خطر

(۳) شرایط خاک

(۴) توانایی خط لوله

(۵) تأثیرات خسارات محدود

در این تحلیل (ESM) حرکات ساده شده زمین که از نقشه های منطقه ای به دست آمده است، توسط اتصالات به لوله وارد می شود. این حرکات موجب ایجاد نیرویی هایی در لوله شده که با مقادیر مجاز مقایسه می شود (۲۴).

موارد استفاده از روش ESM به صورت زیر است:

۱- محاسبه عملکردها در مواجهه با انتشار موج و تأثیرات دینامیکی

۲- آسیب های ایجاد شده توسط تغییر شکل های ماندگار زمین از جمله گسلش، زمین لغزه و

روانگرایی

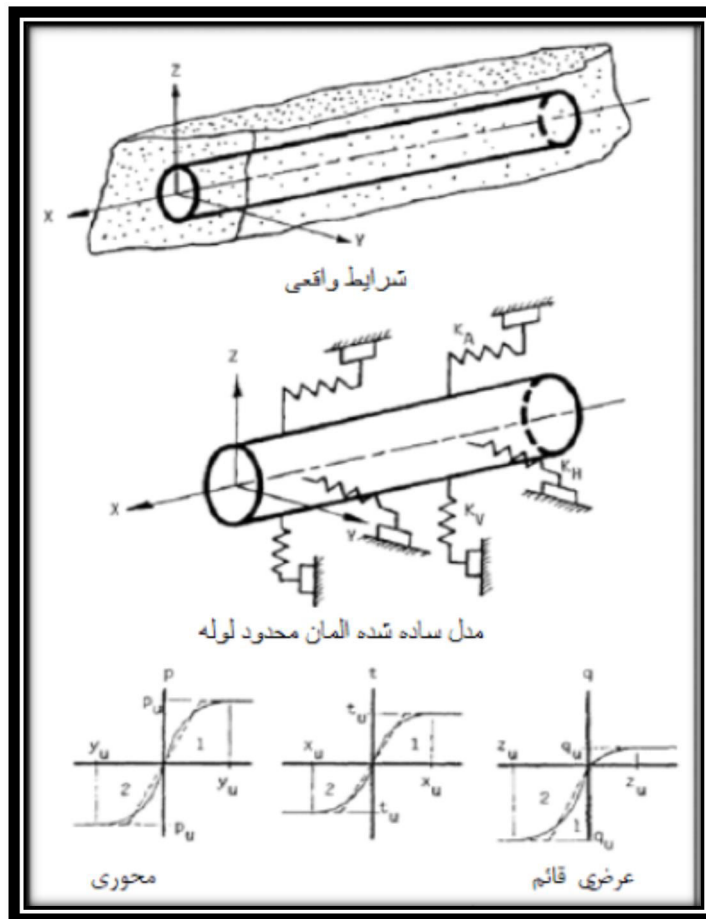
اما نکته مهم در این روش عدم توانایی آن در لحاظ کردن حرکات غیرعادی زمین و یا پیکربندی پیچیده لوله است. در برخی موارد با ساده کردن شرایط مسئله، امکان مدل سازی وجود دارد. می توان روش ESM را با روش المان محدود اصلاح کرد. همچنین این روش با استفاده از فن هایی قابل تصحیح است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. به نظر می رسد در برخی موارد این تصحیحات غیرقابل اجرا است.

۲-۵ استفاده از روش های عددی

از مزایای روش المان محدود (FEM) تحلیل و طراحی لوله در اثر انواع بارگذاری است. این بارگذاری می تواند مانند انفجار ناگهانی و یا همانند نشست به صورت تدریجی باشد.

در شکل ۲-۱۶ نمونه ساده شده مدل سازی نشان داده می شود. در این حالت لوله توسط المان خطی از نوع تیر مدل شده است. المان تیر در مواردی استفاده می شود که یک بعد المان و یا مدل نسبت به بعدهای دیگر بسیار بزرگتر باشد. همچنین در برخی موارد لوله توسط المان پوسته "shell" مدل

می‌شود. در این نوع المان یک بعد نسبت به ۲ بعد دیگر المان بسیار کوچک است که این بعد می‌تواند همان ضخامت جداره لوله باشد.



شکل (۲-۱۶): رابطه نیرو تغییر مکان خاک

مدل کردن خاک توسط فنرهای جانبی و محوری انجام می‌شود. این فنرها قابلیت نمایش دادن رفتار غیرخطی نیرو- تغییر مکان را داشته و کرنش آن‌ها در جهت قرارگیری فنر با کرنش خاک برابر است. اندرکنش خاک و لوله نیز بسیار پیچیده است. دلیل آن نیز رفتار پیچیده خاک در هنگام اعمال نیرو به آن است. نیرو می‌تواند توسط عوامل مختلفی از جمله جابجایی قسمتی از خاک ایجاد شود. همچنین تغییر دمای لوله می‌تواند موجب ایجاد تنش‌های کششی و فشاری شده که قسمتی از این تنش‌ها به خاک وارد خواهد شد.

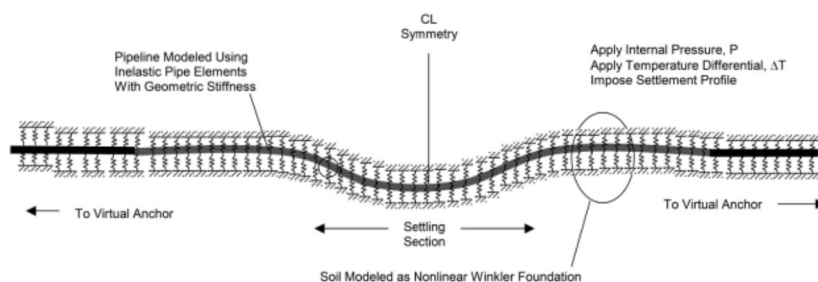
با توجه به پیچیدگی رفتار خاک و اهمیت خطوط لوله مدفون برای دستیابی به یک نتیجه نزدیک به واقعیت در مدل بهتر است حالت رفتار غیرخطی را به بهترین شکل لحاظ کرد.

مدل‌های مختلفی برای نشان دادن اندرکنش خاک و لوله مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به مدل‌های زیر اشاره کرد:

۱. مدل محیط پیوسته ۱۰ که یک فرمول ریاضی پیچیده برای رفتار لوله‌های محدود، در محیط خاک نیمه محدود را بیان می‌کند.
 ۲. مدل شبکه المان محدود
 ۳. مدل تیر بر روی بستر غیرخطی وینکلر (BNMF) که در آن خاک توسط فنر مدل می‌شود.
- در موارد بالا مدل وینکلر بسیار رایج‌تر از بقیه مدل‌ها است. علت آن سادگی روابط و درعین حال رفتار غیرخطی مواد است.

طبق آیین‌نامه ALA، برای محاسبه رفتار لوله در برابر نیرو و محاسبه تنش و کرنش به صورت غیرخطی نیاز به پارامترهای زیر است:

۱. مقاومت خمشی و محوری لوله
 ۲. مقاومت طولی و عرضی خاک با توجه به ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک
- طبق پارامترهای بالا (۲۵)، بار اعمال شده به خاک توسط فنرها که در جای مشخص در لوله قرار گرفته‌اند، به لوله اعمال می‌شود.



شکل (۲-۱۷): خاک مدل شده با فنرهای غیرخطی وینکلر

محاسبه فنرهای معادل خاک:

- ۱- فنرهای جانبی

با توجه با قانون هوک ($F = k.x$) برای محاسبه ضریب فنریت باید به هر دو پارامتر جابجایی و نیروی اعمالی در آن راستا دسترسی داشت. نیروی وارد به فنر با ظرفیت باربری خاک برابری می کند بنابراین با محاسبه ظرفیت باربری خاک می توان نیروی وارد بر فنر را به دست آورد. طبق آیین نامه شریان های حیاتی امریکا، (ALA) ظرفیت باربری (۲۳) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_u = S_u N_{ch} D \quad (۱-۲) \text{ برای خاک رسی}$$

$$P_u = Y H N_{qh} D \quad (۲-۲) \text{ برای خاک ماسه ای}$$

که در رابطه بالا:

S_u : مقاومت برشی زهکشی نشده خاک

N_{ch} , N_{qh} : ضریب به دست آمده از نمودار

D : قطر خارجی لوله

Y : وزن مؤثر واحد حجم خاک

H : عمق دفن لوله (فاصله سطح خاک تا محور طولی لوله)

با توجه به آیین نامه شریان های حیاتی هند (۲۶) در صورتی که خاک ترکیبی از ماسه و رس باشد،

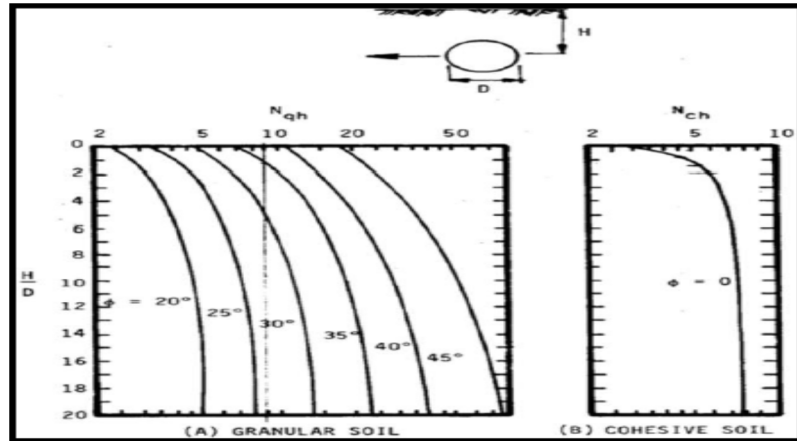
می توان حاصل جمع روابط بالا را به عنوان ظرفیت باربری در نظر گرفت.

$$P_u = S_u N_{ch} D + Y H N_{qh} D \quad (۳-۲)$$

اما این کار باعث سخت شدن لایه خاک شده و ضریب اطمینان را کاهش می دهد؛ بنابراین

در صورتی که زاویه اصطکاک داخلی خاک زیاد باشد، خاک را ماسه ای در نظر گرفته و در غیر این

صورت از رابطه خاک رسی برای محاسبه استفاده خواهد شد (۲۷).



شکل (۲-۱۸): ضریب باربری خاک رسی و ماسه‌ای بر اساس نسبت عمق به قطر (۲۷)

پس از محاسبه ظرفیت باربری نیاز به محاسبه تغییر مکان ماکزیمم در جهت نیرو است، آیین‌نامه

شریان‌های حیاتی امریکا (ALA) روابط زیر را پیشنهاد می‌کند:

$$Y_n = \quad (۲-۴)$$

0.07 – 0.1 (H + D/2) loose Sand

0.03 – 0.05 (H + D/2) Medium Sand

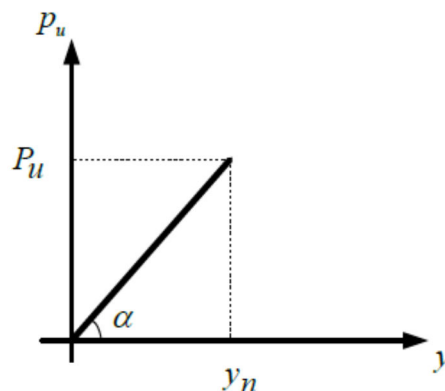
0.02 – 0.03 (H + D/2) Dense Sand

0.03 – 0.05 (H + D/2) Stiff to soft Clay

پس از رسم نمودار $P_u - Y_n$ ، می‌توان شیب این نمودار را به‌عنوان ضریب عکس‌العمل فنر معادل

ظرفیت باربری خاک در نظر گرفت.

$$k = \quad (۲-۵)$$



شکل (۲-۱۹): ضریب عکس‌العمل فنریت جانبی خاک

ظرفیت قائم خاک:

روش به دست آوردن ظرفیت فنریت قائم، مشابه محاسبه ظرفیت فنریت جانبی است. در برخی موارد

فرمول‌ها متفاوت است. طبق آیین‌نامه ALA (۲۳) ظرفیت باربری مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q_u = S_u N_c D \text{ Clay} \quad (۶-۲)$$

$$q_u = Y H N_q D + \frac{1}{2} Y D^2 N_\gamma \text{ Sand} \quad (۷-۲)$$

که در این رابطه:

S_u : مقاومت برشی زهکشی نشده خاک

N_c, N_q, N_γ : ضریب به دست آمده از نمودار

D : قطر خارجی لوله

Y : وزن مؤثر واحد حجم خاک

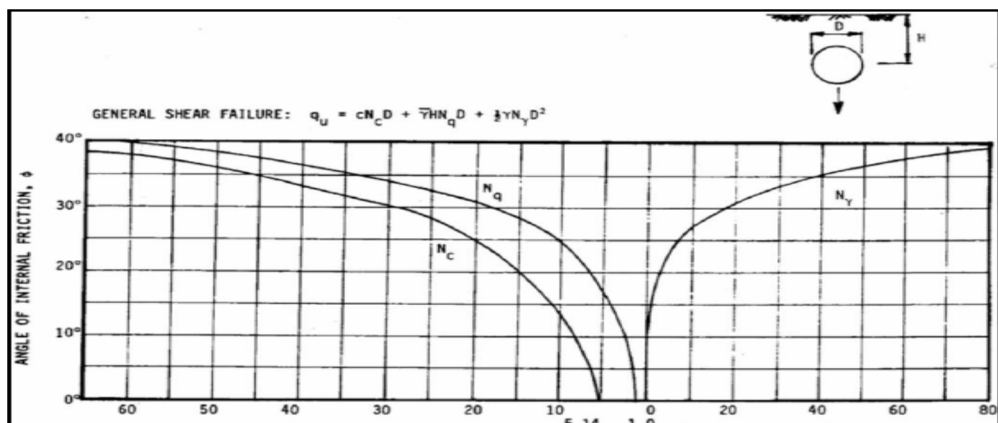
H : عمق دفن لوله (فاصله سطح خاک تا محور طولی لوله)

همچنین تغییر مکان ماکزیمم (۲۳) در جهت قائم توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

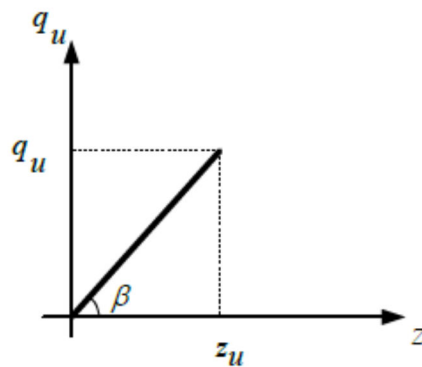
$$Z_u = 0.1D - 0.15D \quad (۸-۲)$$

با رسم نمودار $P_u - Z_u$ و محاسبه شیب نمودار، ضریب عکس‌العمل فنریت قائم خاک به دست می‌آید.

$$\beta = \tan \beta \quad (۸-۲)$$



شکل (۲۰-۲): ضریب باربری قائم خاک رسی و ماسه‌ای بر اساس زاویه اصطکاک داخلی خاک



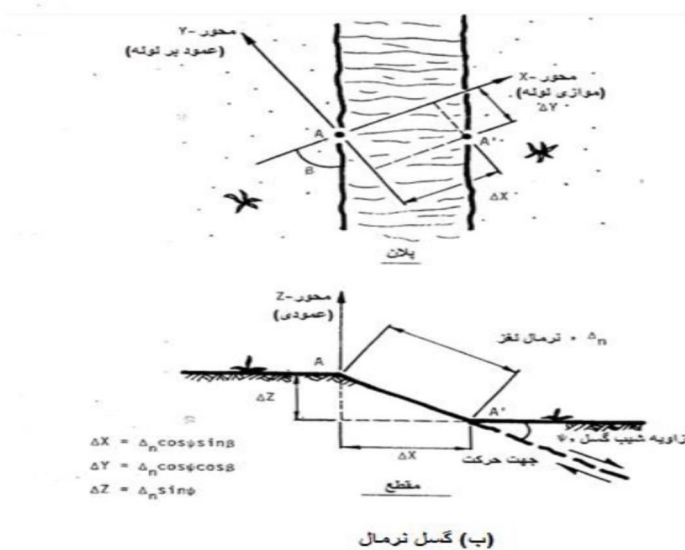
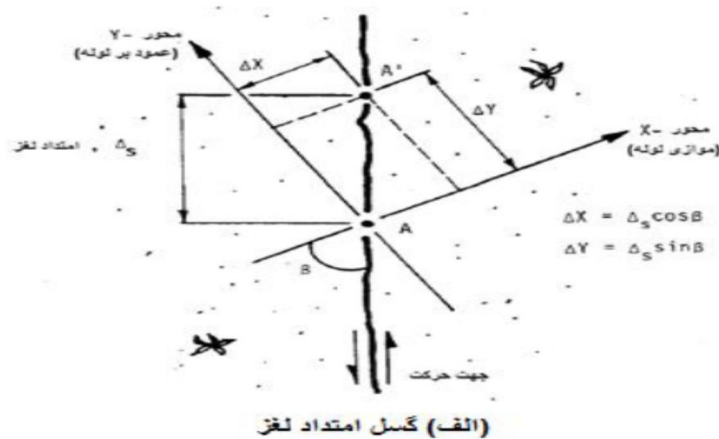
شکل (۲-۲۱): ضریب عکس‌العمل فنریت قائم خاک

۲-۵-۱ نیومارک و هال

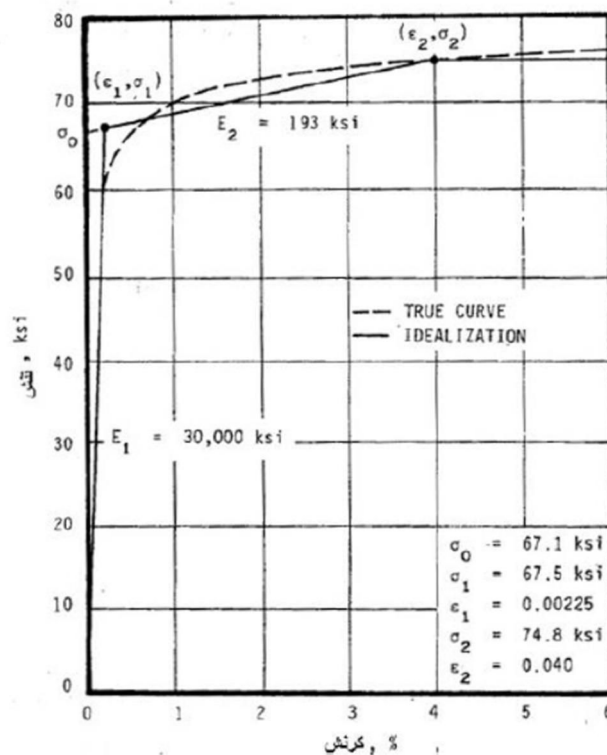
یکی از روش‌های ارائه‌شده روش نیومارک و هال (۲۸) است که جهت بررسی رفتار لوله در جابه‌جایی‌های بزرگ ارائه شد. بر طبق آن لوله در ترانشه با دیواره‌های شیب‌دار دفن شده است. این شیب به لوله اجازه می‌دهد در زمان جابجایی گسل، لوله حرکت‌های عمودی و عرضی داشته باشد. توده خاک به صورت ۲ جسم صلب قابل تحرک در ۲ طرف گسل فرض شده است. اساس این روش مقایسه تغییر شکل محوری لوله در بین ۲ قید لوله و به دست آوردن میزان تغییر شکل با آزمون و خطا است به این صورت که تغییر طول ناشی از تنش خاص با تغییر طول واقعی لوله مقایسه می‌شود؛ بنابراین تغییر شکل ناشی از بخش کشسان و بخش خمیری، به‌طور مجزا محاسبه می‌شود. این کرنش‌ها در محدوده ۲ تا ۵ درصد محاسبه می‌شوند زیرا در این روش لوله نباید به گسیختگی برسد. سادگی فرضیات مواردی همچون حذف قیدهای جانبی تحمیلی از سمت خاک، عدم در نظر گرفتن منحنی تغییر شکل خط لوله در نواحی نزدیک گسل باعث بروز خطا و پاسخی کمتر از میزان واقعی می‌شود. پارامترهای ورودی در این روش رابطه تنش-کرنش کشسان و خمیری لوله، خواص اصطکاک در خاک و سطح لوله و موقعیت لوله گذرنده از گسل می‌باشند.

مراحل زیر برای لوله‌های گذرنده از گسل با شرایط هندسی شبیه شکل ۲-۲۲ است.

۱- ابتدا باید رفتار لوله مشخص شود. شکل ۲-۲۳ رفتار لوله با جنس فولاد X60 را نمایش می‌دهد. طبق این شکل، σ_1 و ϵ_1 به ترتیب، تنش تسلیم اولیه، کرنش تسلیم اولیه و مدول کشسانی ناحیه الاستیک است. σ_2 و ϵ_2 نقاط انتقال از حالت نیمه تسلیم به تسلیم کامل است که پیشنهاد شده به ۲ تا ۵ درصد محدود گردد.



شکل (۲-۲۲): نمایش حرکات نسبی در گسل الف (امتداد لغز ب) نرمال (۲۹)



شکل (۲-۲۳): منحنی ایدئال سازی شده تنش-کرنش فولاد ۶۰X

۲- با فرض جابه جایی کافی برای بهینه شدن مقاومت اصطکاک (tu) خاک (۳۰)، رابطه زیر کاهش نیرو در واحد طول لوله را محاسبه می کند:

$$\sigma_0 = \sigma_1 (1 + \epsilon_1) \quad (۲-۹)$$

$$\sigma_2 = (0.1 - 0.2) \sigma_1 = 2.54 - 10.16 \times 10^{-3} \sigma_1 \quad (۲-۱۰)$$

که در رابطه بالا:

D: قطر لوله

H: عمق دفن از سطح خاک تا تراز محور لوله

Y: وزن مخصوص مؤثر خاک

δ: زاویه اصطکاک داخلی خاک و لوله

K₀: ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون

کول هاوی و همکارانش (۳۱) برای $\tan \delta$ مقادیر ۰,۵ تا ۰,۷ را برای اصطکاک بین ماسه و لوله صاف و مقادیر ۰,۷ تا ۱ را برای اصطکاک بین ماسه و لوله زبر پیشنهاد کرده‌اند. همچنین با توجه به تقریب اوروک و همکارانش (۳۲) برای لوله‌های مدفون در شرایط مختلف، ضریب فشار جانبی ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۳- در این مرحله مقداری بیشینه برای تنش محوری (σ_a) ایجادشده در لوله فرض می‌شود سپس بر اساس آن طولی از لوله که بتواند با این نیرو محوری مقابله کند، محاسبه می‌شود؛ که با توجه به مقادیر σ_a و t_u می‌تواند مختلف باشد. جدول داده‌شده روابط موردنیاز برای محاسبه طول کشسان (L_e) و طول خمیری (L_p) را بیان می‌کند. این روابط برای بخش مستقیم لوله عنوان شده است و اگر در طول لوله موردنظر اتصالی باشد که باعث انحراف مسیر لوله شود، باید تمهیدات ویژه‌ای برای محاسبه در نظر گرفته شود.

در جدول ۲-۲۴:

ΔL_a : تغییر طول لوله ناشی از تنش فرضی

ΔL_r : تغییر طول لازم در لوله با توجه به حرکت گسل

ΔL_e : تغییر طول کشسان

ΔL_p : تغییر طول خمیری

$\sigma_a \leq \sigma_1$	$\sigma_1 \leq \sigma_a \leq \sigma_2$
$L_e = \frac{\sigma_a A_s}{t_u}$	$L_e = \frac{\sigma_1 A_s}{t_u}$
$L_p = 0$	$L_p = \frac{(\sigma_a - \sigma_1) A_s}{t_u}$
$\bar{\epsilon}_e = \frac{\sigma_a}{2E_1}$	$\bar{\epsilon}_e = \frac{\sigma_a}{2E_1}$
$\bar{\epsilon}_p = 0$	$\bar{\epsilon}_p = \frac{\sigma_a - 2\sigma_0 + \sigma_1}{2E_2}$
$\Delta L_e = L_e \bar{\epsilon}_e$	$\Delta L_e = L_e \bar{\epsilon}_e$
$\Delta L_p = 0$	$\Delta L_p = L_p \bar{\epsilon}_p$
$\sigma_{a(new)} = \sigma_{a(old)} + \frac{E_1 t_u (\Delta L_r - \Delta L_a)}{2A_s \sigma_{a(old)}}$	$\sigma_{a(new)} = \sigma_{a(old)} + \frac{E_2 t_u (\Delta L_r - \Delta L_a)}{2A_s (\sigma_{a(old)} - \sigma_o)}$

جدول ۲-۲۴: روابط نیومارک و هال (۳۳)

۴- کرنش‌های کشسان و خمیری متناظر با تغییر طول‌های کشسان و خمیری با استفاده از روابط جدول ۲-۲۴ قابل محاسبه است.

۵- با توجه به کرنش‌های به دست آمده در گام ۴ و طول اولیه در هر بخش تغییر طول کشسان (ΔL_e) و تغییر طول خمیری (ΔL_p) محاسبه شده و سپس تغییر طول لوله در ۲ سمت گسل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta L_a = 2(\Delta L_e + \Delta L_p) \quad (11-2)$$

در فرمول بالا فرض بر آن است که رفتار لوله در ۲ سمت گسل یکسان باشد.

۶- با توجه به نوع حرکت گسل و فاصله نقاط مهاری، تغییر طول لازم را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$L_T = L_e + L_p \quad (12-2)$$

$$\Delta L_r = \Delta X + (1/2L_T)(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) \quad (13-2)$$

L_T : فاصله نقاط مهاری از محل گسل

ΔX , ΔY , ΔZ : برای گسل امتداد لغز و نرمال در شکل ابتدای گام‌ها آورده شده است.

۷- برای تطبیق نتایج ΔL_a و ΔL_r با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در صورت اختلاف زیاد، σ_a جدیدی فرض شده و گام‌ها مجدد تکرار می‌شود تا به نتیجه مطلوب برسد.

نمو تنش برای اصلاح تنش فرض شده به صورت زیر قابل محاسبه است. (۲۸)

اگر تنش مفروض از تنش تسلیم اولیه کوچک‌تر باشد:

$$\Delta \sigma_a = \frac{E_1 t_u (\Delta L_r - \Delta L_a)}{2A \sigma_a} \quad (14-2)$$

و در غیر این صورت:

$$\Delta \sigma_a = \frac{E_2 t_u (\Delta L_r - \Delta L_a)}{2A(\sigma_a - \sigma_0)} \quad (15-2)$$

گام‌های بالا برای گسل‌هایی با حرکت عمودی و عرضی قابل مقایسه است. پس از چند بار آزمون و خطا و نزدیک شدن جواب‌ها به یکدیگر، تنش ایجاد شده در اثر حرکت گسل به دست می‌آید.

۲-۵-۲ کندی و همکاران

پس از نیومارک و هال، کندی و همکارانش (۲۹) در سال ۱۹۷۷ روش نیومارک را اصلاح کردند. در روش کندی، نیروهای جانبی اعمال شده از سمت خاک نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تغییر شکل لوله به تغییر شکل محوری محدود شده و سختی خمشی لوله (۳۴) نادیده گرفته شد. با فرض موارد گفته شده به نتایج زیر رسیدند:

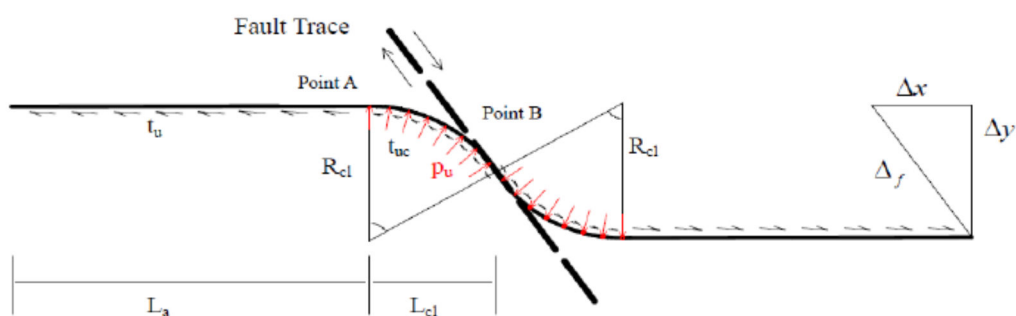
۱. در مواردی که کرنش خمشی کمتر از ۰.۸٪ کرنش‌های محوری باشد، انحنای خط لوله و

نیروی محوری مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند.

۲. در هنگام جاری شدن کل سطح مقطع لوله، می‌توان آن را مانند کابل در نظر گرفت و تحلیل کرد.

۳. بر طبق این روش، نیروی اصطکاک وارد بر لوله در طول لوله در قسمت مستقیم با نیروی اصطکاک وارد بر لوله در نزدیک گسل متفاوت است.

این روش فقط در مواردی که جابجایی گسل بسیار بزرگ بوده و باعث ایجاد نیروی کششی در لوله می‌شود، کاربرد دارد.



شکل (۲-۲۵): مدل کندی و همکاران برای بررسی رفتار لوله در گسل امتدادلغز (۳۴)

در این حالت لوله نباید دچار چین خوردگی شود.

بر اساس مطالعه موردی، مقاومت به دست آمده از روش نیومارک نیازمند اصلاح است. ضرایب اصلاح

به صورت زیر است: (برای لوله مدفون با قطر ۴۲" در ماسه با تراکم متوسط)

۱. به ازای عمق دفن ۶۳" برابر با $2.4 t_u$

۲. به ازای عمق دفن ۱۴۷" برابر با $3.3 t_u$

که در موارد فوق t_u مقاومت محوری در نواحی دور از گسل است.

به طور خلاصه گام‌های زیر روش کندی را تشریح می‌کند:

۱. در ابتدا مقاومت نهایی محوری و جانبی (t_u, p_u) و مقاومت اصطکاک خاک در نزدیکی گسل

(t_{uc}) برآورد می‌شود.

۲. با فرض اولیه تنش محوری، نیروی محوری به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F = \sigma_a \cdot A \quad (۱۶-۲)$$

در رابطه بالا A سطح مقطع لوله است.

۳- شعاع انحنا در نزدیکی گسل محاسبه می‌شود. (فرض بر این است که شعاع انحنا در نزدیک گسل

ثابت باشد.)

$$R_{cl} = \frac{F}{P_u} \quad (۱۷-۲)$$

در رابطه بالا R_{cl} شعاع انحنا در نزدیکی گسل و P_u مقاومت نهایی جانبی خاک است.

۴- کرنش محوری از رابطه رمبرگ از گود، به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_i} \left[1 + \frac{\alpha}{r+1} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right)^r \right] \quad (۱۸-۲)$$

که در رابطه بالا α, r و σ_0 ثابت‌های وابسته به جنس مصالح و E_i مدول الاستیسته مصالح لوله است.

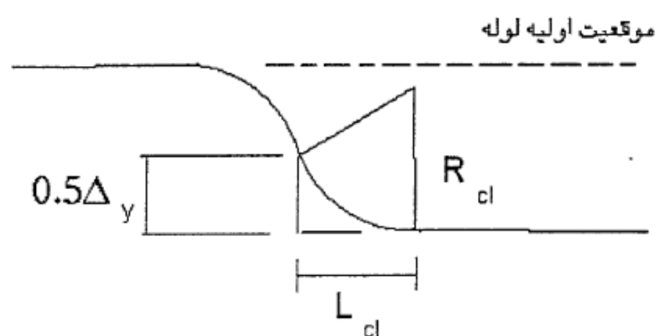
۵- کرنش خمشی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\epsilon_b = \frac{D}{2R_{cl}} \quad (۱۹-۲)$$

در رابطه بالا D قطر لوله است.

۶- باید افزایش طول ایجاد شده در اثر جابه‌جایی گسل، با افزایش طول در اثر تغییر شکل لوله یکسان

شود. با توجه به این نکته طبق شکل ۲-۲۶ داریم:



شکل (۲-۲۶): جابجایی جانبی خط لوله (۳۴)

$$\delta_{cl} = \sqrt{\Delta y \delta_{cl}} \quad (20-2)$$

$$\Delta \delta = \sqrt{\Delta \delta^2 + \frac{\Delta y^2}{3l_{cl}}} \quad (21-2)$$

در روابط فوق l_{cl} طول بخش انحنا یافته، Δx تغییر مکان محوری گسل و Δy تغییر مکان جانبی گسل است. همچنین Δl_r تغییر طول ناشی از حرکت گسل است.

اگر طول خط لوله از طول به دست آمده از رابطه زیر (l_1) بزرگ تر باشد، می توان ادعا کرد که نیروی محوری لوله به طور کامل توسط نیروی اصطکاک مهار می شود.

$$\delta_1 = \frac{F - t_{uc} \cdot l_{cl}}{t_u} + \delta_{cl} \quad (22-2)$$

همچنین از روابط زیر می توان تغییر طول حاصل از تنش محوری (Δl_a) را به دست آورد.

$$\Delta \delta_a = 2(\Delta \delta_c + \Delta \delta_s) \quad (23-2)$$

$$\Delta \delta_c = \delta_0 \left\{ \delta_{cl} \left(\frac{B_m + B_s}{2} \right) + \frac{\alpha}{(r+1)(r+2)} \frac{A\sigma_0}{t_{uc}} (\delta_m^{r+2} - \delta_s^{r+2}) \right\} \quad (24-2)$$

$$\Delta \delta_s = \delta_0 \left\{ \delta_{sl} \left(\frac{B_1 + B_s}{2} \right) + \frac{\alpha}{(r+1)(r+2)} \frac{A\sigma_0}{t_u} (\delta_s^{r+2} - \delta_1^{r+2}) \right\} \quad (25-2)$$

که در آن:

$$\delta_{sl} = \delta_1 - \delta_{cl} \quad (26-2)$$

$$\delta_0 = \frac{\sigma_0}{E_i} \quad (27-2)$$

$$\delta_m = \frac{\sigma_a}{\sigma_0} \quad (28-2)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_m - \frac{t_{uc} \cdot l_{cl}}{A \sigma_0} \quad (29-2)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_s - \frac{t_u \cdot l_{sl}}{A \sigma_0} \quad (30-2)$$

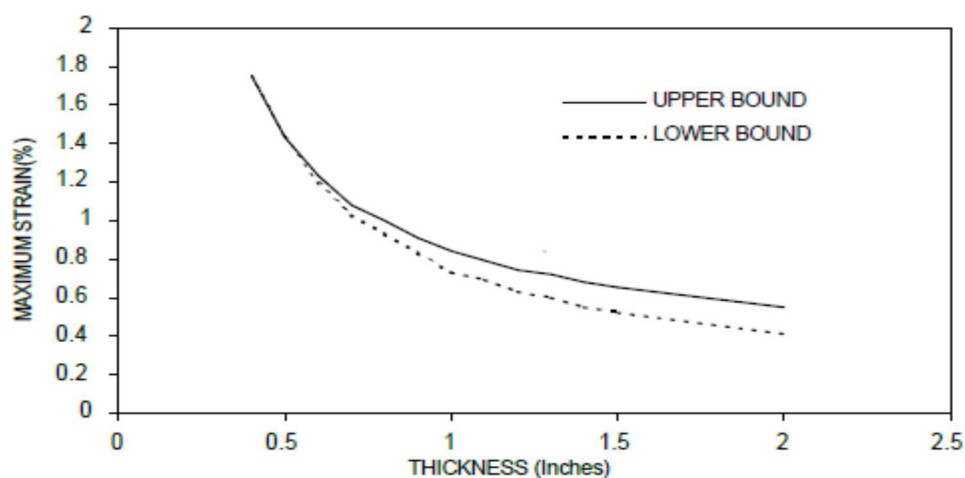
۷- در این صورت کرنش کلی لوله برابر است با:

$$\epsilon_{max} = \epsilon_a + \epsilon_b \quad (31-2)$$

در این روش باید کرنش بیشینه به ۲ تا ۵ درصد محدود شود تا تمرکز کرنش‌های ترک جوش، تغییر نقطه تسلیم و غیریکنواختی ضخامت لوله باعث ایجاد خطا در روابط محاسبه شده نشود. همچنین در موارد فوق باید تنش محوری به گونه‌ای تصحیح شود که تغییر طول محاسبه شده در این بند با تغییر طول محاسبه شده در بند قبل برابر گردد.

۸- در انتها تغییر طول لازم در اثر جابجایی گسل Δl_r با تغییر طول محوری لوله Δl_a مقایسه می‌شود؛ که باید برابر باشد. در غیر این صورت فرض اولیه دیگری در نظر گرفته و مراحل مجدد تکرار می‌شود. این روش نیز مانند روش نیومارک با آزمون و خطا قابل محاسبه است. در روابط بالا در صورت صحیح بودن رابطه زیر می‌توان از تغییر شکل ناشی از خمش صرف نظر کرد و فرض اولیه کندی درست خواهد بود.

$$\epsilon_a - \epsilon_b < \frac{\sigma_0}{E_i} \quad \epsilon_b \leq 0.8 \epsilon_a \quad (32-2)$$



شکل (۲۷-۲): محدوده کارایی روش کندی و همکاران (۳۴)

دو شرط فوق باعث می‌شود روابط یادشده در محدوده کرنش‌های کوچک برقرار باشد. در این حالت لوله شبیه کابل رفتار کرده و نیروی جانبی از سمت خاک توسط تنش محوری لوله تحمل می‌گردد. در مجموع می‌توان تفاوت روش کندی با روش نیومارک را به‌صورت زیر عنوان کرد:

- ۱- در روش کندی از رابطه اسگود رمبرگ (۳۵) برای رفتار مصالح لوله استفاده شده است.
- ۲- در نواحی نزدیک گسل تغییر شکل‌ها به‌صورت انحنای ثابت فرض شده است.
- ۳- مقاومت محوری لوله در بخش انحنای یافته در نزدیک گسل، افزایش پیدا کرده است.

۲-۵-۳ وانگ-یاه

کندی با تصحیح روش نیومارک باعث دقیق‌تر شدن مدل رفتاری لوله شد اما با فرض اولیه و عدم در نظر گرفتن سختی خمشی لوله، هنوز دقت لازم را نداشت. به همین جهت وانگ-یاه در سال ۱۹۸۵ (۳۶) با اصلاح مدل کندی تأثیر سختی خمشی در رفتار لوله را نیز مورد بررسی قرار داد. در این مدل لوله به ۲ قسمت با انحنای ثابت در نزدیکی گسل و ۲ قسمت دورتر از گسل تحت عنوان تیر بر روی بستر الاستیک مدل شد و تحت اثر فشار مقاوم خاک و نیروی اصطکاک بین خاک و لوله قرار گرفت. در قسمت داخل قوس بر اساس معادلات پیوستگی و تعادل، شعاع انحنای حساب شد. سپس لنگر خمشی در قسمت اتصال قوس به تیر قابل محاسبه بود. با مقایسه لنگر اعمال شده به تیر با ظرفیت خمشی نهایی (۳۶) ضریب اطمینان از خرابی لوله به دست آمد.

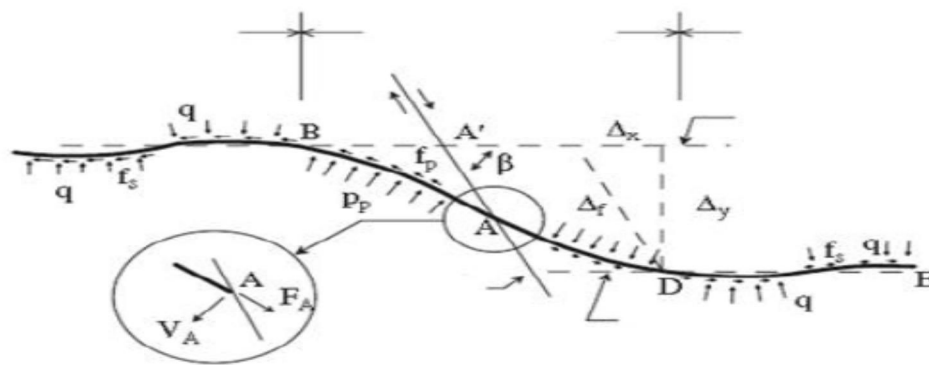
در این مطالعه به دلیل تقارن منحنی تغییر شکل، نیاز به تحلیل همه طول لوله نیست و تحلیل نصف آن نیز کافی است. همچنین تأثیر ممان خمشی و رفتار غیر هندسی و غیرخطی مصالح در رفتار لوله لحاظ شده است. از مزیت‌های روش وانگ می‌توان به تحلیل لوله‌ها در تنش‌های فشاری اشاره کرد اما این خطوط باید تحت اثر جابجایی گسل امتدادلغز باشند (۳۶).

این روش دارای نقاط ضعف زیر بود (۲۶) که توسط کارامیتوس و همکاران بیان شد:

- ۱- تأثیر نیروی محوری در کاهش ظرفیت خمشی در نظر گرفته نشده و اثر آن بر روی سختی خمشی لحاظ نشده است.

۲- فرض ابتدایی این روش مبنی بر رخ دادن حالت بحرانی در نقاط B و D در شکل ۲-۳۸ اشتباه بوده است. کرنش محوری و خمشی دارای اثر ترکیبی مخرب‌تری در نقطه A نزدیک گسل می‌باشند.

۳- بررسی ضریب اطمینان بر اساس لنگر خمشی دقیق نبوده و این ضریب اطمینان باید بر اساس شکل‌پذیری یا کرنش محاسبه شود.



شکل (۲۸-۲): مدل ارائه‌شده توسط وانگ - یاه (۳۶)

به‌طور خلاصه گام‌های روش یانگ به‌صورت زیر است:

۱- در ابتدا مشابه روش کندی t_u و p_u محاسبه می‌شود.

۲- زاویه مرکزی نظیر منحنی تغییر شکل یافته لوله در نزدیکی گسل تخمین زده‌شده و با نماد Q مشخص می‌شود.

۳- از رابطه زیر شعاع انحنا R را به دست می‌آوریم:

$$\theta = \frac{0.5\Delta \sin(\beta - \theta_b) + \cos(\beta - \theta_b)t}{1 - \cos\theta} \frac{b}{\tan Q} \quad (۳۳-۲)$$

$$\theta_b = \frac{M_H}{2\lambda EI} \quad (۳۴-۲)$$

$$\theta = \sqrt[4]{\frac{k_s}{4\theta}} \quad (۳۵-۲)$$

که در روابط بالا:

β : زاویه تقاطع لوله با گسل

Δ : میزان جابه‌جایی گسل

λ : ضریب نشان‌دهنده سختی لوله نسبت به بستر خاک

K_s : سختی ارتجاعی بستر

EI : سختی خمشی لوله

۴- در صورت تخمین درست Q ، باید افزایش طول لوله با افزایش طول ناشی از جابه‌جایی گسل برابر

شود؛ که این افزایش طول از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta_a = 2 \left(\frac{RQ - (R \sin Q + 0.5 \Delta \cos(\beta - \theta_b))}{\cos \theta_b} \right) \quad (36-2)$$

از طرفی برای محاسبه تغییر طول ناشی از تنش فرض شده، خط لوله به ۳ ناحیه تقسیم می‌شود

(شکل ۲-۲۹). ناحیه اول، ناحیه نزدیک گسل با زاویه Q_1 است. در این ناحیه لوله به حالت پلاستیک

رسیده و نیروی اندرکنش خاک به حد نهایی رسیده است. پس از ناحیه اول به ناحیه دوم می‌رسیم.

در این ناحیه لوله در حالت الاستیک قرار دارد. زاویه متناظر با این ناحیه Q_2 است و در انتها به ناحیه

دور از گسل می‌رسیم که ناحیه سوم نامیده می‌شود. Δe_1 ، Δe_2 و Δe_3 به ترتیب بیانگر تغییر طول

لوله در ناحیه اول، دوم و سوم می‌باشند.

$$\Delta u_1 = \frac{R}{E_2 A} (u_A \sin \theta_1 + (u_A + u_u) (\cos \theta_1 - 1) + u_u (\theta_1 - \sin \theta_1)) + \theta_1 u_1 \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \quad (37-2)$$

$$\Delta u_2 = \frac{u}{u_1} (u_T \sin \theta + (u_T + u_u) (\cos \theta_2 - 1) + u_u (\theta_2 - \sin \theta_2)) \quad (38-2)$$

که در آن:

$$u_A = u_u + \frac{\left(\frac{EI}{R} \left(\frac{1}{R} + \cos \theta_b \tan Q + \sin \theta_b \right) \right)}{R - t_u R (\tan Q - Q)} \quad (39-2)$$

$$\Delta u_3 = \frac{\sigma_b L - \frac{f_s L^2}{2A}}{E_1} \quad (40-2)$$

که در رابطه بالا:

$\bar{E}$: مدول الاستیسیته کاهش یافته بر اساس تراز خنثی

F_s : نیروی اصطکاک لوله با خاک در ناحیه ارتجاعی

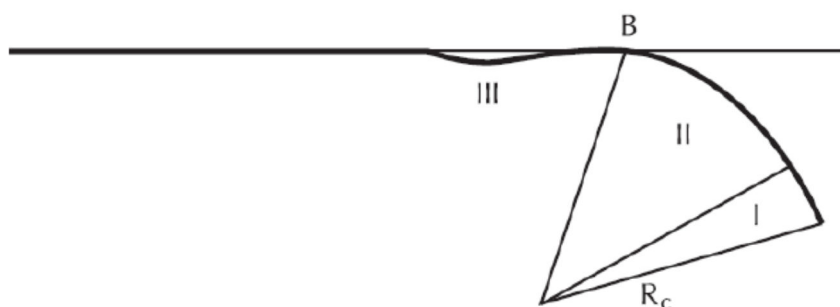
L : طول مهاری لوله

می‌باشند. مجموع روابط بالا تغییر طول لوله تحت اثر تنش فرضی را عنوان می‌کند.

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3 \quad (۴۱-۲)$$

۵- در گام قبل Δp باید با Δa برابر گردد. در غیر این صورت فرضیه اولیه اصلاح شده و گام‌ها تکرار

می‌شوند.



شکل (۲۹-۲): طرح پیشنهادی وانگ برای لوله عبوری از گسل (۳۶)

تاکادا و همکاران

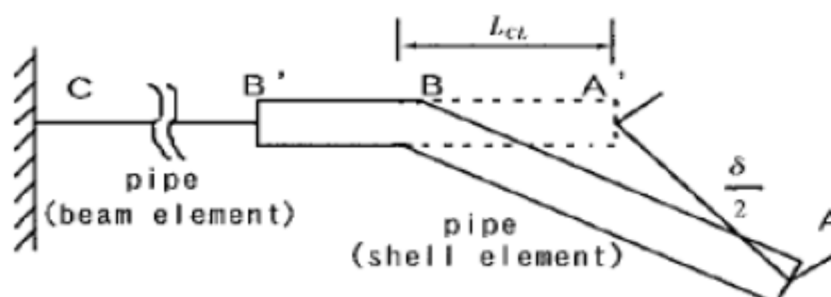
با اصلاح روش کندی توسط وانگ، دقت محاسبات بیشتر شده و نتایج به واقعیت نزدیک‌تر شده بود اما

در این محاسبات اثر تغییر شکل مقطع در هنگام جابه‌جایی گسل بررسی نشده بود. تاکادا و همکاران

(۱۸) با در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی، مدل قبل را اصلاح کردند.

در این روش، در انحنا ایجاد شده در لوله در نزدیکی گسل، هندسه لوله در جهت طول تغییر شکل

داده و خم می‌شود. سپس رابطه بین کرنش حداکثر با زاویه خم، با مدل کردن لوله در نزدیکی گسل



شکل (۳۰-۲): مدل پیشنهادی تاکادا و همکاران (۱۸)

با المان پوسته و در ناحیه دورتر از گسل با استفاده از المان تیر، به دست می‌آید.

روش تاکادا نسبت به روش‌های قبل از خود دقیق‌تر است اما به علت در نظر نگرفتن بارهای

اندرکنشی خاک-لوله هنوز دارای خطا در محاسبات است.

گام‌های روش تاکادا (۱۸) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- در ابتدا همانند روش‌ها قبلی، P_u ، t_u و همچنین مشخصات هندسی لوله و زاویه تقاطع لوله با گسل

تخمین زده می‌شود.

۲- I_{cl} را از روش کندی به دست می‌آوریم.

۳- زاویه خم به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\theta_b = \theta \tan\left(\frac{\Delta s \theta}{l_{cl} + \Delta c \theta}\right) \quad (42-2)$$

۴- همچنین پارامتر کمانش موضعی برای لوله با قطر t به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\theta_c = \frac{E t}{\sigma_y D} \quad (43-2)$$

۵- کرنش‌های بیشینه کشش و فشار در جدار لوله، طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta_{max}^c = \frac{1.27 \theta_b^2 + 0.13 \theta_b}{\alpha_c} \quad (44-2)$$

$$\theta_{max}^t = \frac{0.34 \theta_b^2 + 0.13 \theta_b}{\sqrt{\alpha_c}} \quad (45-2)$$

۲-۵-۴ کارامیتوس و همکاران

هرچند روش‌های قبلی به جواب اصلی نزدیک بود ولی به دلیل فرضیات ساده نیاز به تصحیح داشت

که در سال ۲۰۰۷ این کار توسط کارامیتوس و همکاران (۳۷) انجام شد. طبق نظریه کارامیتوس،

اشکال روش یانگ عدم در نظر گرفتن اثر نیروی محوری بر سختی خمشی بود همچنین هرچند

ترکیب بحرانی کرنش محوری و خمشی در نزدیکی محل گسل اتفاق می‌افتد، اما این نقطه الزاماً در

قسمت انتهایی بخش خم شده لوله رخ نمی‌دهد.

گام‌های روش کارامیتوس را می‌توان به اختصار به صورت زیر بیان کرد: (شکل ۲-۳۱)

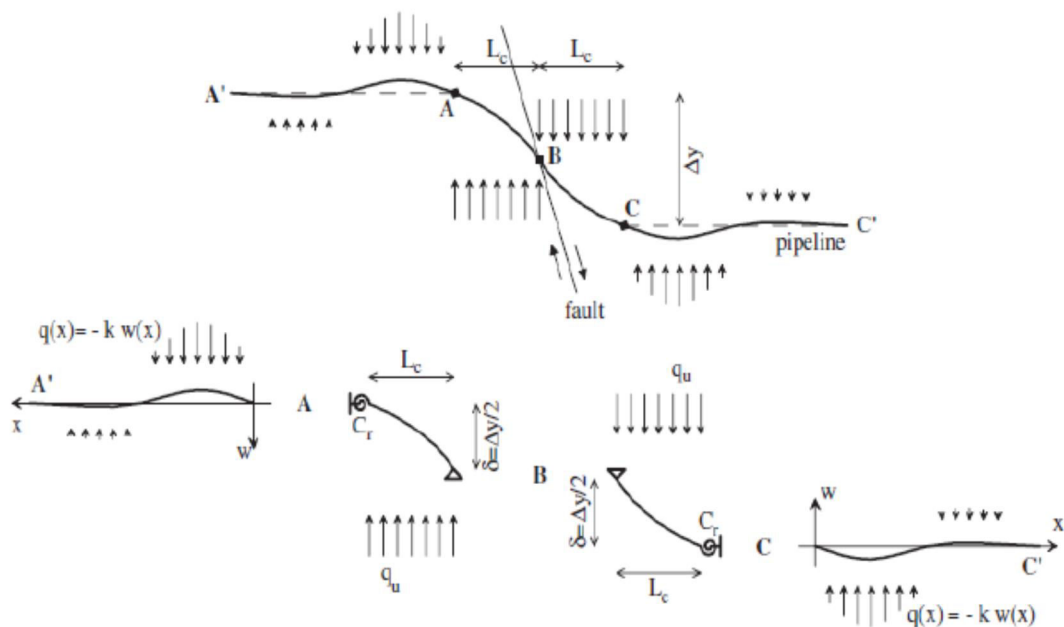
۱- نخست همانند روش وانگ قسمت انتهایی و مستقیم لوله (CC', AA') به صورت تیر بر بستر الاستیک فرض می‌شود.

۲- با اعمال شرایط مرزی، بخش AB و BC را با توجه به نظریه تیر بر بستر الاستیک تحلیل کرده تا لنگر خمش بیشینه به دست آید.

۳- همانند روش یانگ، با مساوی قرار دادن طول موردنیاز و طول موجود لوله، نیروی محوری بیشینه ایجادشده در لوله در محل برخورد با گسل، محاسبه می‌شود.

۴- کرنش‌های خمشی با در نظر گرفتن اثر نیروی محوری محاسبه شده و سپس با برقراری معادلات تعادل بین نیروی محوری اعمال شده و تنش ایجادشده در مقطع لوله، کرنش بیشینه به دست می‌آید.

۵- پس از محاسبه کرنش و تنش در طول لوله و در سطح مقطع آن، مدول یانگ سکانتی اصلاح شده و سپس گام‌های ۲ تا ۵ آن قدر تکرار می‌شود تا جواب به همگرایی کافی برسد.



شکل (۲-۳۱): قسمت‌های مختلف لوله در مدل کارامیتوس (۳۷)

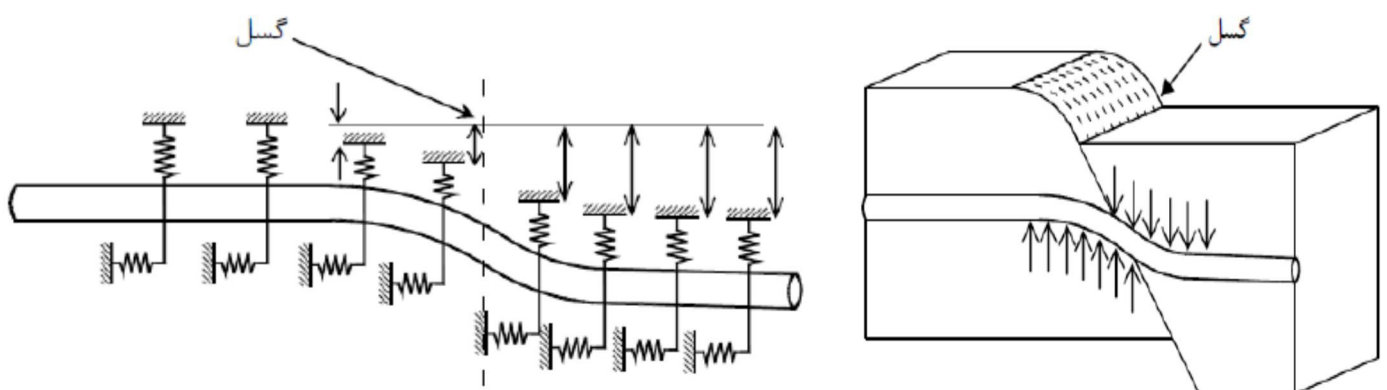
۲-۶ مدل‌ها عددی

در روش‌های تحلیلی بالا، به دلیل فرضیات اولیه، رسیدن به جواب نزدیک به واقعیت، بسیار سخت بود. همچنین وجود نقاط ضعف گفته‌شده در هر روش باعث شد تا محققان به روش‌های آنالیز عددی رجوع کنند. برخی از تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود انجام می‌گیرد. علت، توانایی بالای نرم‌افزار در تحلیل معادلات غیرخطی و در نتیجه مدل‌سازی صحیح‌تر و دقیق‌تر رفتار غیرخطی خاک و مصالح لوله است. در مدل‌سازی طول کافی در اطراف یک لوله برای ایجاد مرزهای مطمئن و رسیدن به جواب مطلوب بسیار بااهمیت است. به همین دلیل فرض اولیه زیر را می‌توان به عنوان طول لوله در نظر گرفت:

$$l = 2l_1 = 2l_2 = 2 \left(\frac{Q - t_{uc} l_{cl}}{t_u} + l_l \right) \quad (۴۶-۲)$$

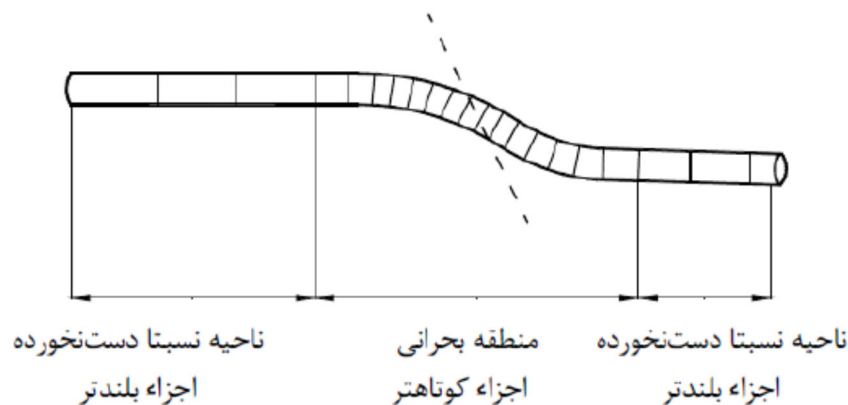
رابطه بالا رابطه تعیین طول کندی است که در قسمت قبل توضیح داده شد.

همچنین مراجع معتبر مدل رفتاری فنرهای غیرخطی و یا اجزای حجمی را برای خاک اطراف لوله پیشنهاد کردند که این مدل رفتاری باید در جهت‌های افقی-عرضی، عمودی-عرضی و محوری تعیین شود.



شکل (۲-۳۲): مدل ایدئال‌سازی شده خط لوله (۳۸)

می‌توان جهت افزایش دقت کار منطقه نزدیک گسل را به صورت ریز تر و مناطق دور از گسل را به صورت اجزاء بزرگ‌تر تقسیم‌بندی و سپس تحلیل کرد.



شکل (۲-۳۳): تقسیم‌بندی لوله به اجزاء کوچک‌تر (۳۸)

مدل‌های زیر، مدل‌ها رایج در رابطه با اندرکنش خاک و سازه هستند:

(۱) مدل تیر:

یکی از مدل‌های رایج، مدل کردن لوله توسط تیر است. در این مدل تیر در یک محیط نیمه بی‌نهایت الاستوپلاستیک دفن می‌شود و یا این محیط بی‌نهایت توسط فنرهای معادل‌سازی می‌شوند. این تحلیل به صورت مسئله شبه استاتیک حل شده و از اثر اینرسی در آن (۳۹) صرف‌نظر می‌شود. این مدل را تاکادا و شینوزیکا استفاده کردند.

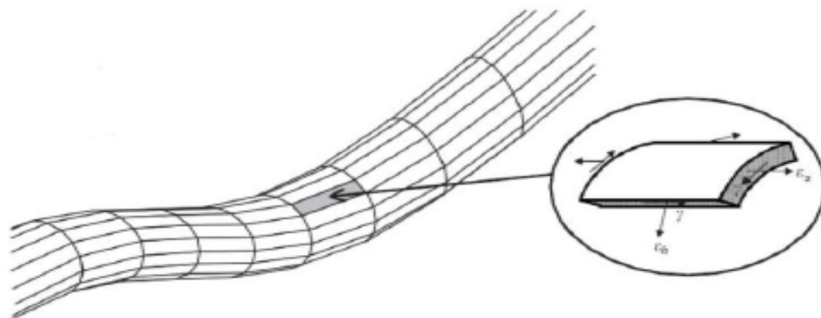
(۲) مدل جرم متمرکز:

در مدل قبلی نقطه‌ضعف اصلی مدل، عدم در نظر گرفتن میرایی و اینرسی در سیستم بود. نواک و همکارانش با در نظر گرفتن اثرات میرایی و اینرسی نشان دادن، اثرات دینامیکی خاک-سازه، باعث کاهش تنش در لوله می‌شود که این کاهش تنش در خاک‌های نرم کاملاً محسوس است (۴۰).

(۳) مدل پوسته:

مشکلی که در مدل قبل ایجاد شد، فرض کردن لوله به صورت یک جرم متمرکز و یا تیر بود. این فرض مانع از توزیع فشار واقعی زمین بر سطح لوله شد؛ بنابراین اعوجاج در سطح مقطع لول را به درستی نشان نمی‌داد. همچنین به دلیل عدم در نظر گرفتن شکل و سطح مقطع، تنش‌های سطح مقطع نیز قابل محاسبه نبودند. یکی دیگر از مشکلات مدل جرم متمرکز، ناتوانی مدل در بیان کماتش و گسیختگی در سطح لوله بود. به همین دلایل در سال ۱۹۷۹، وانگ و همکارانش (۴۱) مدل پوسته را

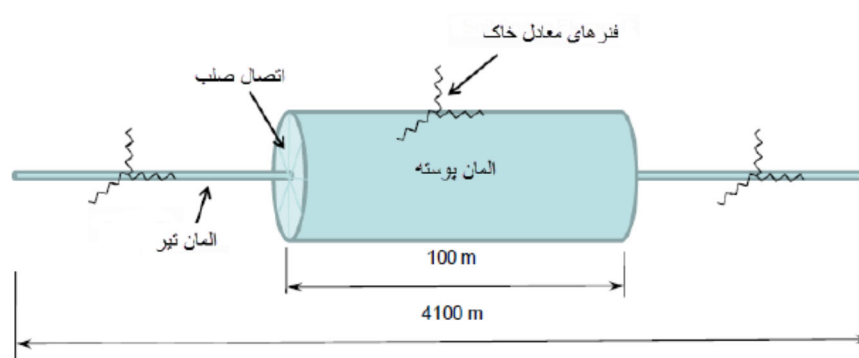
ارائه کردند. بر این اساس لوله توسط پوسته‌ای استوانه‌ای و نازک مدل شد. مصالح این پوسته به صورت ایزوتروپیک و ارتجاعی در نظر گرفته شد. همچنین اندرکنش خاک و لوله توسط مدل وینکلر مدل سازی شد. سپس لوله تحت اثر زلزله با روش شبه استاتیک تحلیل شد.



شکل (۲-۳۴): مدل پوسته استوانه‌ای جدار نازک

۲-۶-۱ لئو و همکاران (۲۷)

در سال ۲۰۰۸ لئو و همکاران لوله را توسط المان پوسته و تیر در نرم افزار اباکوس مدل کردند. لوله در نزدیکی گسل که از حساسیت بیشتری برخوردار بود توسط المان پوسته و در نواحی دورتر از آن توسط المان تیر مدل شد.



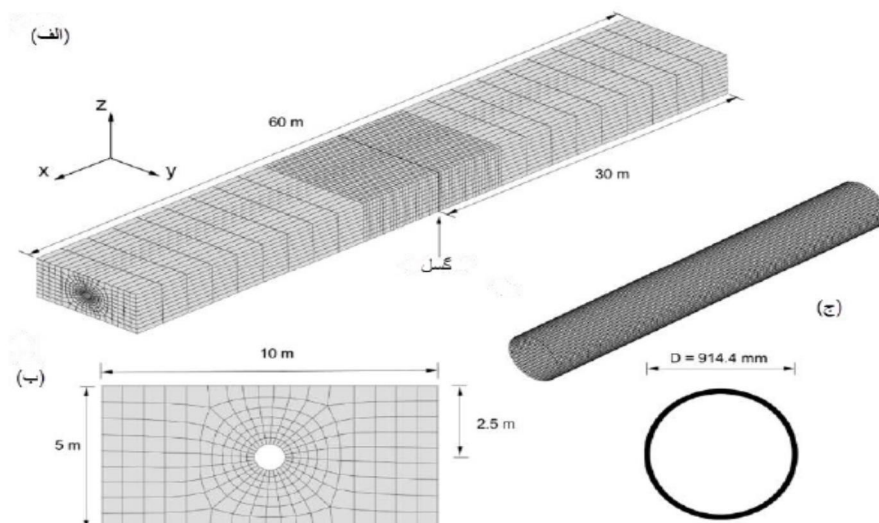
شکل (۲-۳۵): مدل پیشنهادی لئو و همکاران (۲۷)

گسل نیز در صفحه افقی به مقدار 4m و در صفحه عمودی به میزان 1.7 m جابجا شد. همچنین خاک اطراف لوله نیز توسط فنر معادل، مدل سازی شد. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش تأثیر زاویه تقاطع گسل و لوله، مشخصات مصالح، ضخامت دیواره لوله و فشار داخلی بر بیشینه کرنش لوله بود. نتایج به صورت زیر بیان شد:

- ۱- در ابتدای بارگذاری، حرکت گسل باعث ایجاد کمانش موضعی می‌شود که محل این کمانش‌ها بسته به نوع بارگذاری متغیر است.
- ۲- بسته به زاویه بین گسل و لوله تحت اثر حرکت گسل، نیروهای کششی و فشاری در لوله پدید می‌آید. در صورتی که گسل به صورت نرمال باشد این نیروها به صورت فشاری و اگر گسل معکوس عمل کند، این نیروها به صورت کششی خواهد بود.
- ۳- در حالت کششی کمانش موضعی در نزدیکی گسل اتفاق می‌افتد.
- ۴- با توجه به این تحقیق، در زاویه گسل با لوله به صورت ۹۰ درجه، کرنش‌ها حداقل می‌شود؛ که این حالت، حالت بهینه عبور نامیده شد.
- ۵- فشار داخلی باعث افزایش کرنش‌های بیشینه فشاری می‌شود. در رابطه با کرنش‌های بیشینه کششی می‌توانند بسته به زاویه تقاطع گسل با لوله باعث کاهش یا افزایش کرنش شود.

۲-۶-۲ وازوراس و همکاران (۱۱)

ایشان لوله مدفون را توسط نرم‌افزار اباکوس در خاک در گسل امتدادلغز مدفون کرده و خاک را به صورت افقی جابه‌جا کردند. خاک به صورت المان‌های حجمی غیرخطی و لوله به صورت المان پوسته با مصالح ایزوتروپیک و غیرخطی مدل شد. این مقاله به بررسی اثر تغییر مشخصات خاک و لوله، مقاومت برشی و سختی خاک، میزان جابه‌جایی گسل، عرض ناحیه لغزش و همچنین فشار داخلی لوله پرداخت.



شکل (۲-۳۶): مدل پیشنهادی وازوراس و همکاران (۱۱)

الف) شماتیک کلی مدل (ب) المان بندی سطح مقطع خاک (ج) المان بندی و سطح مقطع لوله

خلاصه نتایج مقاله به صورت زیر است:

۱. لوله مدفون شده در ماسه متراکم نسبت به لوله مدفون در ماسه سست نیاز به جا به جایی

کمتری برای رسیدن به کرنش بیشینه دارد.

۲. عرض ناحیه گسل تقریباً در رفتار لوله بی تأثیر است.

۳. افزایش فشار داخلی لوله، کاهش شکل پذیری لوله را در پی دارد.

۲-۶-۳ ژائو و همکاران (۴۲)

ایشان در سال ۲۰۱۰ به بررسی رفتار لوله تحت اثر گسل های نرمال پرداختند. تحلیل با نرم افزار انسیس صورت پذیرفت و اثر عواملی از جمله مد گسیختگی، ضخامت جدار لوله، سختی خاک سربار بر رفتار لوله مورد بررسی قرار گرفت. خاک از نوع ماسه ای و رسی مدل شد و لوله به صورت المان پوسته درون آن مدفون شد.

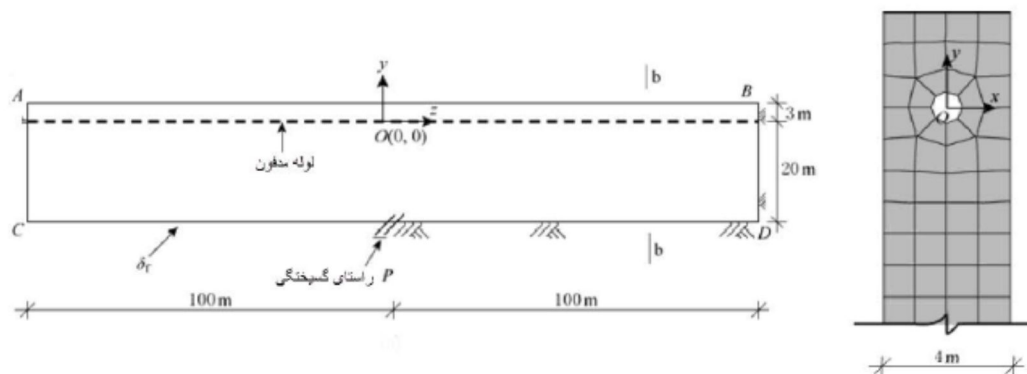
نتایج کار ژائو و همکاران به صورت زیر خلاصه شده است:

۱. ضخامت لایه خاک ریز و سختی خاک بر تغییر شکل های خاک ریز تأثیر گذارند به طوری که با

افزایش ضخامت و سختی خاک ریز، تغییر شکل ها بزرگ تر می شوند.

۲. افزایش سختی خاک باعث می‌شود تا زاویه گسیختگی بزرگ‌تر و سطح گسیختگی باریک‌تر شود.

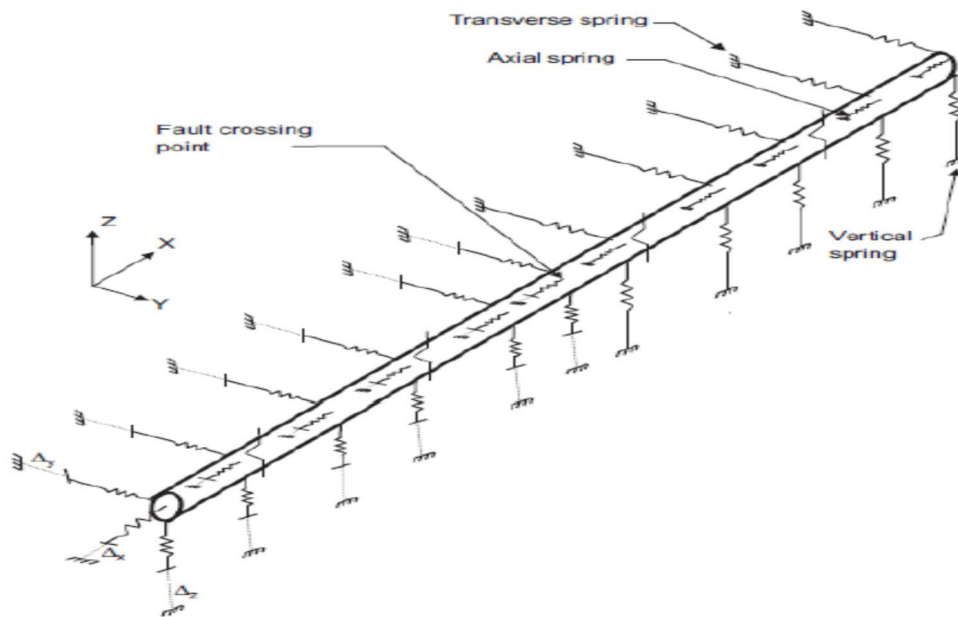
۳. مد گسیختگی در خاک بسته به زاویه گسل متفاوت است به‌طوری‌که در زوایای نزدیک به ۹۰ درجه، گسیختگی به‌صورت ۷ شکل و در زوایای نزدیک به ۴۵ درجه و کمتر، گسیختگی به‌صورت مورب خطی اتفاق می‌افتد.



شکل (۲-۳۷): مدل ارائه‌شده توسط ژنو و همکاران (۴۲)

۲-۶-۴ جوشی و همکاران

در سال ۲۰۱۱ جوشی و همکاران به مدل کردن لوله توسط المان تیر با مصالح غیرخطی پرداختند. آن‌ها همچنین خاک را توسط فنرهای غیرخطی معادل‌سازی کردند که این فنرها در ۳ جهت محوری، عمودی عرضی و افقی عرضی بر روی گره‌های لوله قرار گرفتند. گسل انتخابی در این پژوهش از نوع گسل معکوس بود.



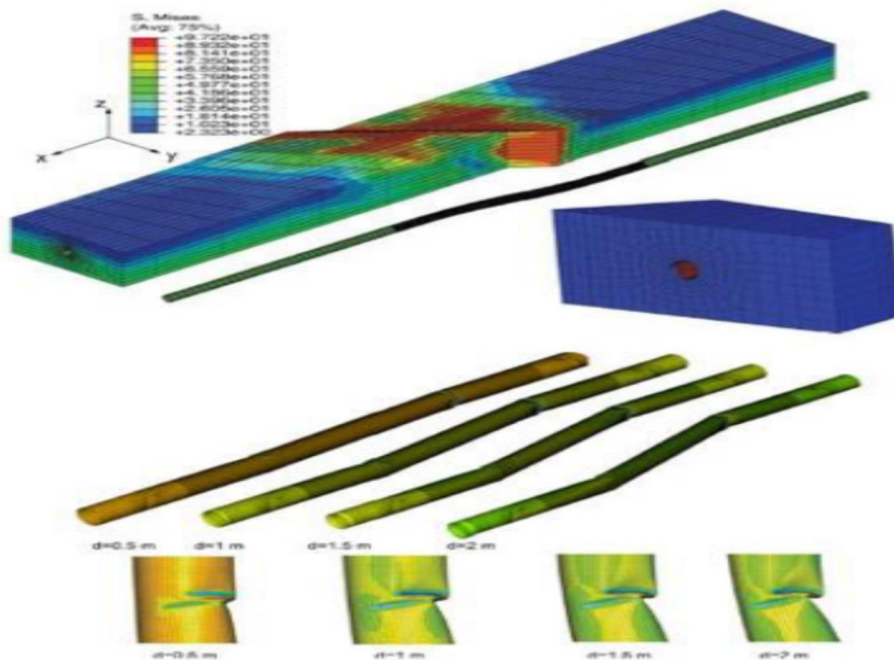
شکل (۲-۳۸): مدل پیشنهادی لوله و فنر جوشی و همکاران (۴۳)

حاصل این مقاله به طور مختصر به صورت زیر است:

- ۱- در گسل معکوس بیشینه کرنش فشاری، بحرانی تر از کرنش کششی است.
- ۲- ظرفیت شکل پذیری لوله در گسل معکوس در حالی افزایش پیدا می کند که لوله به موازات محور گسل از آن عبور کند.
- ۳- عمق دفن کم و استفاده از مصالح سست ریزدانه برای خاک، افزایش ضخامت جدار لوله و افزایش تنش تسلیم لوله باعث افزایش ظرفیت شکل پذیری لوله در گسل معکوس می گردد.

۲-۶-۵ وازوراس و همکاران

در این پژوهش گسل انتخابی از نوع امتداد لغز بود که با نرم افزار المان محدود اباکوس مدل سازی شد. در این مدل خاک و لوله توسط مصالح غیر کشسان مدل شد. لوله توسط المان پوسته و خاک با المان مکعب شکل مدل گردید. این تحلیل در ۲ گام انجام شد. در گام اول نیروی گرانش به تمام مدل اعمال شده و در گام بعد جابه جایی به گسل اعمال شد.



شکل (۲-۳۹): مدل ساخته شده با نرم افزار اباکوس - وازوراس و همکاران (۴۴)

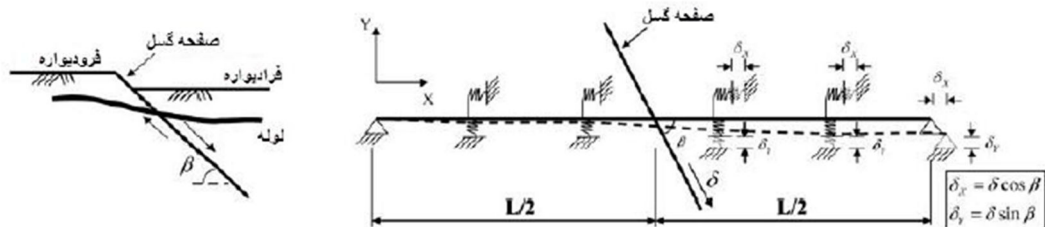
نتایج این پژوهش به صورت زیر است:

۱. در صورتی که زاویه قرارگیری لوله و گسل طوری باشد که نیروی کششی در لوله ایجاد شود، این نیرو باعث ایجاد کرنش در حدود ۳٪ شده و فشردگی مقطع لوله مد اصلی گسیختگی خواهد بود.
۲. نسبت D/t در لوله در رفتار لوله بسیار مؤثر است.
۳. خاکریز سفت در اطراف لوله باعث ایجاد تنش های بیشتر و در نتیجه کرنش های بیشتر در لوله می شود ولی این کرنش ها در طول کمتری اتفاق می افتد.
۴. فشار داخلی باعث می شود تا مقطع لوله دچار اعوجاج و پیچش نشود اما تنش ها را در لوله بالا می برد؛ بنابراین ظرفیت مقاومت خمشی لوله را کاهش می دهد.

۲-۶-۶ ژئ و همکاران

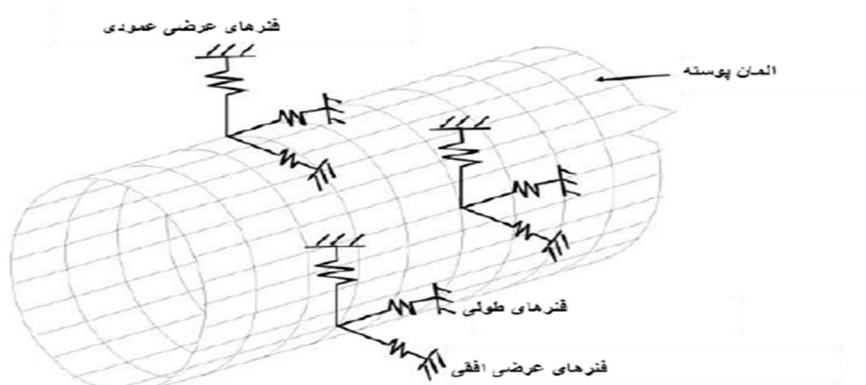
در سال ۲۰۱۳ ژئ و همکاران ۳ مدل را برای رفتار لوله مدفون در گسل نرمال ارائه دادند. این مدل ها توسط نرم افزار آباکوس مدل سازی شدند که از حالت ساده شروع شده و در مدل بعدی تکمیل تر شد.

در مدل اول لوله به صورت یک المان یک بعدی تیر مدل سازی شد. همچنین ارتباط لوله و خاک به صورت فنرهای کشسان تعریف شد.



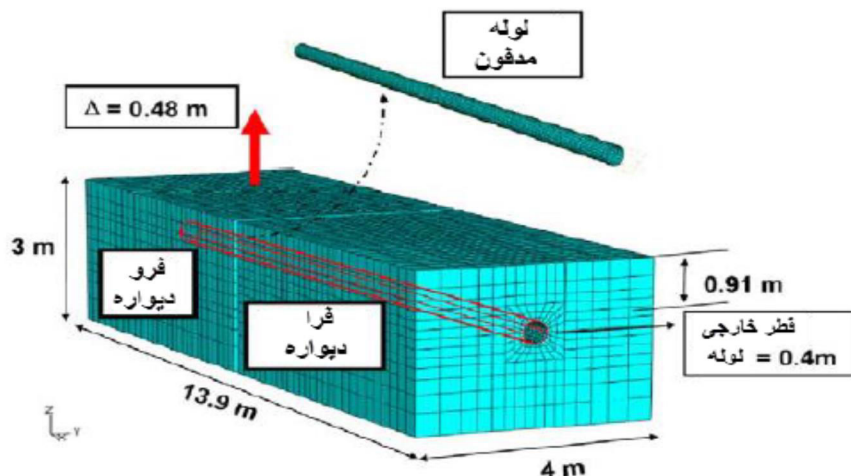
شکل (۲-۴۰): مدل اول ژئ و همکاران (۴۵)

در مدل دوم لوله توسط المان پوسته مدل گردید و خاک نیز توسط فنرهای غیرخطی معادل سازی شد.



شکل (۲-۴۱): مدل دوم ارائه شده توسط ژئ و همکاران (۴۵)

در مدل سوم لوله توسط المان پوسته و به صورت المان ۳ بعدی و خاک نیز توسط المان های توپر ۳ بعدی مدل شد. در این مدل برای اندرکنش خاک و لوله از مدل ۲ بعدی کرنش مسطح به همراه مدل ۳ بعدی پوسته استفاده شد.



شکل (۲-۴۲): مدل سوم ارائه شده توسط ژی و همکاران (۴۵)

نتایج به دست آمده از این مدل با مدل وینکلر و همچنین آزمایش سانتریفیوژ مقایسه شد. همچنین نتایج با مدل آیین نامه ASCE مقایسه شد. خلاصه این نتایج به صورت زیر است:

۱. مقادیر ظرفیت باربری و مقاومت رو به بالا به دست آمده از مدل ۳ بعدی کمتر از مقادیر ASCE بود. علت عنوان شده این بود که در آیین نامه ظرفیت باربری خاک با پی نواری سنجیده شد در حالی که در گسل نرمال با بالا آمدن لوله، مقداری از خاک به زیر لوله ریزش کرده و باعث کاهش مقاومت رو به بالا و کاهش ظرفیت باربری زمین بالا رفته می شود.
۲. ظرفیت باربری در نواحی نزدیک به گسل به صورت قابل توجهی کمتر از نواحی دور از گسل است.
۳. تا زمانی که در مدل وینکلر از ضرایب کاهش مناسب در مقاومت رو به پایین و سختی فنر معادل استفاده شده باشد، این روش نتایج خوبی را ارائه می دهد.
۴. برای نشان دادن کماتش موضعی در لوله ها، مدل ساده تیر و فنر پاسخگو نیست.

فصل سوم:

طراحی دینامیکی خطوط لوله

۳-۱ مقدمه

فصول گذشته اهمیت خطوط لوله مدفون را بر زندگی نشان دادند. همچنین مشخص شد برای حفاظت از این خطوط نیاز به شناخت رفتار خطوط و عوامل آسیب‌رسان به آنها است. مطالعاتی که بر روی این پدیده انجام گرفت مشخص کرد که ادامه دادن این پژوهش‌ها نیازمند روش‌های کامل‌تر و دقیق‌تری است. همچنین این پژوهش‌ها نشان داد روش‌های عددی، روش مناسب‌تری نسبت به روش‌های تحلیل در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار مصالح غیرخطی می‌باشند. در میان روش‌های عددی، روش المان محدود در مسائل مربوط به لوله و خاک کاربرد بیشتری داشته است و محاسبات دقیق‌تری را ارائه کرده است. محاسبات این روش به صورت دستی کاری بسیار سخت و پیچیده بوده و نیازمند استفاده از برنامه‌های کامپیوتری و نرم‌افزارهایی از جمله ABAQUS, NASTRAN, ANSYS, NISA, PIPELINE است. هر کدام از نرم‌افزارهای نام‌برده دارای محدودیت خاصی می‌باشند و تحت شرایط خاصی قادر به حل مسائل هستند.

برای انتخاب نرم‌افزار مناسب برای هر پژوهش فاکتورهای متفاوتی قابل بررسی است. این فاکتورها می‌تواند در زمینه نمایش و رابط کاربری نرم‌افزار بوده و یا بسته به روش حل نرم‌افزار، بر روی شرایط مسئله محدودیت ایجاد کند. با توجه به تحقیقات گذشته و بررسی‌های انجام‌شده، نرم‌افزار ABAQUS از قابلیت خوب رابط کاربری و دامنه حل وسیع مسائل از جمله حل استاتیک، دینامیک و شبه استاتیک مسائل برخوردار است.

در ادامه به توضیح مختصر در رابطه با روش المان محدود، تئوری‌ها، نرم‌افزار آباکوس و روش مدل‌سازی عددی با کمک این نرم‌افزار پرداخته می‌شود.

۳-۲ روش المان محدود

در شبیه‌سازی یک فرایند فیزیکی، ما از یک روش عددی و یک رایانه برای ارزیابی مدل ریاضی فرایند بهره می‌جوییم. روش اجزاء محدود روش قدرتمندی است که برای ارزیابی فرایندهای پیچیده فیزیکی

ایجاد شده است. این روش توسط ۳ ویژگی توصیف می‌گردد:

۱- دامنه مسئله با مجموعه زیر دامنه‌های ساده، به نام اجزا محدود، بیان می‌شود. مجموعه اجزاء محدود را شبکه اجزاء محدود می‌نامند.

۲- فرایند فیزیکی روی هر جزء محدود به وسیله تابع دلخواه (چندجمله‌ای یا نوع دیگر) تقریب زده می‌شود و معادلات جبری ارتباط‌دهنده کمیت‌های فیزیک در نقاط انتخابی به نام گره‌های اجزاء به دست می‌آید.

۳- معادلات اجزاء با استفاده از پیوستگی و (یا) تعادل مقادیر فیزیکی همبست می‌شوند. در مرحله اول هندسه مسئله به اجزاء کوچکی تقسیم می‌شود که به آن المان نیز گفته می‌شود. المان‌ها در کنار هم قرار گرفته و مجموعه المان را تشکیل می‌دهد که همان هندسه شکل است. به نقاط مشترک بین المان‌ها گره گفته می‌شود. همچنین مجموعه المان با گره‌هایش را مش می‌نامند. معادلات تعادل در اجزا محدود برای گره‌ها نوشته می‌شود. المان‌ها در هندسه مدل بسته به نوع و انتخاب و شرایط مسئله می‌توانند به صورت ۲ بعدی و یا ۳ بعدی باشند. المان‌های ۲ بعدی به صورت مثلث، مربع و یا شکل دلخواه است و هندسه المان ۳ بعدی به صورت مکعب، هرم، منشور و یا یک شکل چهاروجهی دیگر است.

پس از مشخص شدن نوع المان و گره‌ها، تابع تقریب برای هر المان تعریف می‌شود. در نرم‌افزار تابع تقریب برای هر المان در ابتدا به صورت خطی و سپس به صورت تابع درجه ۲ و سهمی فرض می‌شود- به علت حجم زیاد محاسبات نرم‌افزار قادر به طور پیش‌فرض امکان در نظر گرفتن تابع تقریب درجه بالاتر را ندارد- پس از فرض اولیه معادله برای هر گره نوشته‌شده، انتگرال‌گیری شده و به فرم معادله جبری درمی‌آید. معادلات جبری به روش‌های متنوعی که در نرم‌افزار تعریف شده حل می‌شوند. سپس با توجه به مصالح تعریف شده و هندسه مدل، سایر موارد از جمله تنش، کرنش، نیرو، جابجایی و پارامترهای مشخص شده (۲۲) به دست می‌آید.

بزرگ بودن حرکات گسل و جابه‌جایی لوله سبب می‌شود تا روابط تغییر شکل‌های بزرگ در تحلیل در نظر گرفته شود. از طرفی رفتار غیرخطی مصالح خاک و منحنی مشخصه مصالح لوله باعث می‌شود

مدل سازی نیز به صورت غیرخطی انجام شود. روش اساسی به کاررفته در مدل پیش رو، استفاده از روش حل نموی گام به گام است. در این روش فرض می شود که جواب برای زمان گسسته t مشخص است و جواب در زمان $t + \Delta t$ مورد نیاز است. چنانچه F_t ، U_t و K_t به ترتیب بردارهای نیرو، جابجایی و ماتریس سختی در زمان t باشد، می توان نوشت:

$$\Delta \varphi^i = \varphi_{t+\Delta t}^i - \varphi_{t+\Delta t}^{i-1} \quad (1-3)$$

$$\varphi_{t+\Delta t}^i = \varphi_{t+\Delta t}^{i-1} + \Delta \varphi^i \quad (2-3)$$

حل معادلات فوق با استفاده از فن نیوتن-رافسون صورت می گیرد. بردار $\varphi_{t+\Delta t}^{i-1} - \varphi_{t+\Delta t}^i$ ، متر با برداری است که هنوز به وسیله تنش ها متوازن نشده است و به همین جهت یک نمو در تغییر مکان های نقاط گرهی مورد نیاز است. این روند به هنگام کردن تغییر مکان های نقاط گرهی در تحلیل تکراری تا آنجا ادامه می یابد که نیروهای خارج از توازن و تغییر مکان های نموی کوچک ناچیز گردند.

۳-۳- معرفی اباکوس

در میان نرم افزارهایی که از روش المان محدود برای حل مسائل مهندسی استفاده می کنند، ABAQUS با قابلیت های منحصربه فرد خود به عنوان یک نرم افزار بسیار دقیق و قوی تحقیقاتی و کاربردی در صنعت و دانشگاه شناخته شده است. سهولت در دستیابی و فهم نحوه کارکرد زیر برنامه های آن باعث شده تا جوامع دانشگاهی بین المللی از آن بیشتر از نرم افزارهای دیگر در مقاله های علمی منتشر شده استفاده کنند. همچنین دقت فراوان آن در حل عددی و مقایسه آن با حل های تحلیلی، موجب شد تا این نرم افزار به عنوان نرم افزار استاندارد دانشگاه لندن و MIT (۴۶) انتخاب شود. تئوری این نرم افزار مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته با استفاده از جدیدترین متد ریاضی است.

از قابلیت های این نرم افزار می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. وجود طیف وسیعی از المان‌های خاک و سازه‌ای که موجب می‌شود هندسه‌های مختلفی را مدل کرد.

۲. وجود حالات بسیار متنوع مدل رفتار ماده

۳. دقت بالا در حل

۴. حل خودکار برخی پارامترها با فرض اولیه توسط خود نرم‌افزار مانند نمو زمانی در تحلیل‌های دینامیکی

۵. امکان ادغام چند هندسه مختلف و اختصاص ماده‌ای متفاوت به هر هندسه

۶. رابط کاربری آسان

به علت دلایل یادشده، این نرم‌افزار در زمینه مسائل ژئوتکنیکی بسیار مناسب است به طوری که تنها با مدل کردن هندسه مسئله و اختصاص خصوصیات ماده و اعمال چند شرط مرزی و اولیه، حل توسط نرم‌افزار شده و پارامترهای درخواستی را محاسبه می‌کند. همچنین در طول حل به طور خودکار در هر مرحله همگرایی جواب بررسی شده و مقادیر برای رسیدن به همگرایی اصلاح می‌شود.

۳ مرحله زیر بیانگر یک تحلیل کامل در نرم افزار اباکوس است:

➤ مرحله پیش پردازش: در این مرحله هندسه و خصوصیات مدل شکل می‌گیرد و مدل خام در فایل با پسوند *.cae ایجاد می‌شود. همچنین دیتای ورودی در این مرحله را می‌توان با ایجاد فایل متنی و توسط زبان برنامه‌نویسی پایتون در اختیار نرم‌افزار قرارداد.

➤ مرحله پردازش: پردازش که به صورت استاندارد و یا صریح صورت می‌گیرد، مرحله‌ای است که اباکوس با دریافت فایل‌های ورودی تحلیل را شروع می‌کند. خروجی‌های حاصل از تحلیل به صورت موقت در فایل‌های binary ذخیره شده و در هر مرحله به روزرسانی می‌شود. زمان تحلیل در این مرحله به نوع تحلیل و قدرت سیستم بستگی دارد و بین چند ثانیه تا چند روز متغیر است.

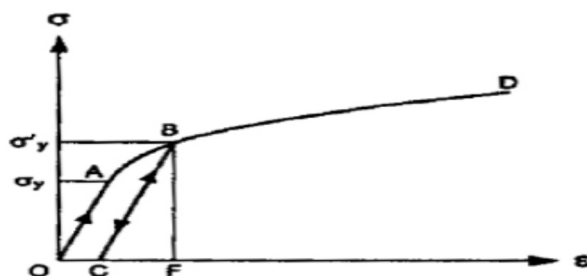
➤ مرحله پس پردازش: پس از انجام تحلیل پارامترهای انتخاب شده در مرحله قبل به صورت دیتابی در فایل ODB* ذخیره می شود. این فایل شامل اطلاعات خروجی با کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییر شکل یافته مدل و پارامترهای معرفی شده از جمله تنش و کرنش است.

با توجه به مقالات کار شده و توانایی های نرم افزار اباکوس، در این پژوهش نیز برای مدل کردن لوله مدفون و مدل سازی حرکات گسل از این نرم افزار استفاده شده است. در ادامه به نحوه حل مسائل در نرم افزار و نحوه پیاده سازی مدل پرداخته می شود.

۳-۴ تئوری ها

مصالح کشسان خمیری

همان طور که در شکل ۳-۱ قابل مشاهده است، نمودار کرنش-تنش در قسمت های مختلف می تواند دارای انحناء مختلفی باشد. این نمودار نمایانگر رفتار یک ماده در محدوده رفتاری الاستیک و پلاستیک است. طبق این نمودار رفتار ماده تا نقطه A به صورت الاستیک بوده و اگر تنش به میزان σ_y برسد، نمودار وارد محدوده پلاستیک می شود (نقطه F) و رفتار به صورت خطی است. در صورتی که در تنش های بیش از σ_y رفتار به صورت غیرخطی است. در فاصله σ_y تا σ'_y ، مصالح سخت تر می شود ولی رفتار مصالح هنوز به صورت خطی باقی می ماند فقط در تنش های بین σ_y تا σ'_y ، با هر بار بارگذاری و باربرداری، کرنش پسماند (OC) در مصالح ایجاد می شود.



شکل (۳-۱): نمودار تنش-کرنش ماده الاستو پلاستیک (۳۳)

مصالحي که افزایش و کاهش بار باعث تغییر در نقطه تسلیم آنها شود، مصالح کشسان خمیری (الاستو پلاستیک) نام دارند. حالتی که سطح تسلیم مصالح در آن رو به افزایش باشد، سخت‌شوندگی و حالتی که رو به کاهش باشد، نرم‌شوندگی نام‌گذاری می‌شود.

کرنش کل به‌صورت مقابل قابل محاسبه است:

$$\varepsilon = \varepsilon^p + \varepsilon^e \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا ε کرنش کل، ε^e کرنش الاستیک و ε^p کرنش پلاستیک است.

۳-۵ نظریه خمیری

در ابتدا بیان دو تعریف برای فرضیات اولیه این نظریه ضروری است.

۱. ماده همگن: ماده‌ای که خواص مکانیکی آن در تمام نقاط ماده مشابه است.
۲. ماده همسان: ماده‌ای که خواص مکانیکی در یک نقطه مشخص در ماده، در جهت‌های مختلف مشابه است.

اصول نظریه پلاستیسیته به‌صورت زیر بیان می‌شود:

تابع تسلیم به‌صورت یک رابطه عددی بین تنش و متغیر کرنش پلاستیک بیان می‌شود. این تابع، رفتار ماده در زمان رسیدن به تنش پلاستیک و بعد از آن را عنوان می‌کند.

تابع تسلیم ممکن است به‌صورت زیر باشد:

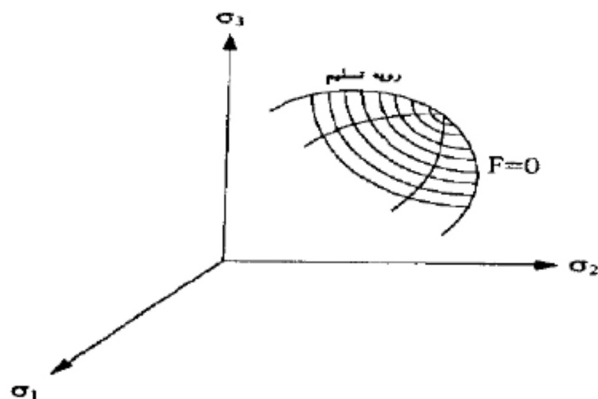
$F > 0$ که نشان‌دهنده رسیدن به میدان پلاستیک است.

$F < 0$ که نشان‌دهنده نرسیدن به میدان پلاستیک و ماندن در حالت الاستیک است.

$F = 0$ در این حالت، رشد تابع مشخص می‌شود $\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)$ که اگر این رشد مثبت و یا برابر صفر

بود تمایل تابع به پلاستیک شدن را نشان می‌دهد و در غیر این صورت ماندن در محدوده الاستیک مشخص می‌شود.

تابع تسلیم را می‌توان با توجه به تنش ناشی از بارگذاری مشخص، در هر نقطه از ماده محاسبه کرد؛ بنابراین اگر این تابع را در فضای ۳ بعدی ترسیم کنیم (۳۸) به شکل زیر می‌رسیم.



شکل (۲-۳): سطح تسلیم در فضای ۳ بعدی تنش‌های اصلی (۴۶)

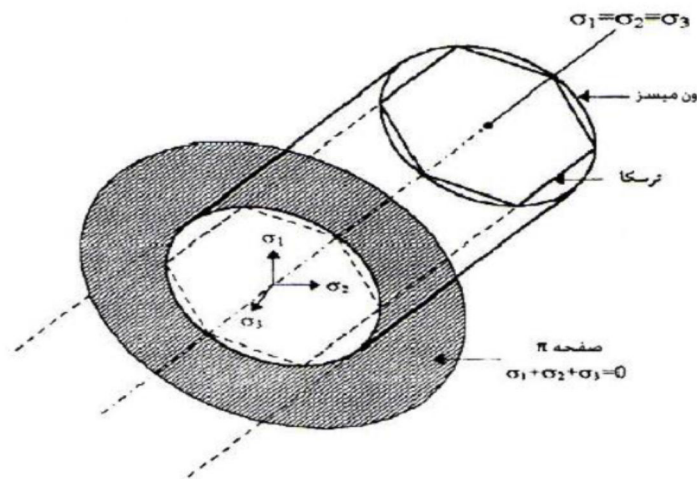
شکل ۲-۳ که در فضای تنش‌های اصلی رسم شده است بیانگر سطح حدی است که به آن حد تسلیم یا سطح تسلیم گفته می‌شود. هر نقطه روی این سطح بیانگر رفتار خمیری ماده در آن میزان تنش است. همچنین نقاط داخل سطح معرف رفتار الاستیک ماده است.

۳-۶ معیار تسلیم فون مایسز

به‌طور کلی تابع فون مایسز، به‌صورت زیر است:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)} \quad (۴-۳)$$

اگر آن را در فضای تنش‌های اصلی رسم کنیم، مقطعی بیضی‌گون حاصل می‌شود که بر استوانه شش‌گوشه ترسیمی معیار ترسکا محیط است؛ بنابراین محور این استوانه همان محور هیدرو استاتیک (۳۸) است.

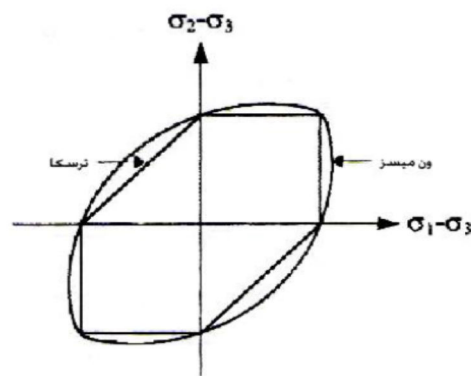


شکل (۳-۳): ترسیم معیار ترسکا و فون میسز در فضای تنش‌های اصلی (۴۶)

معیارهای یادشده بیشتر برای تعیین رفتار فلزات در قالب کشسان-خمیری کامل مناسب هستند بنابراین برای بررسی رفتار لوله از این معیارها استفاده می‌شود و معیارهای متفاوتی برای تعریف رفتار خاک توسط اباکوس تعریف شده است که می‌توان از معیار تسلیم موهر-کولمب یادکرد. در ادامه به معرفی و بررسی معیار تسلیم خاک پرداخته خواهد شد.

۳-۷ معیار تسلیم موهر کولمب

در سال ۱۴۴۳ کولمب بر اساس قانون شکست اصطکاک، ارتباط بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح (۳۸) را به صورت شکل ۳-۶ عنوان کرد:

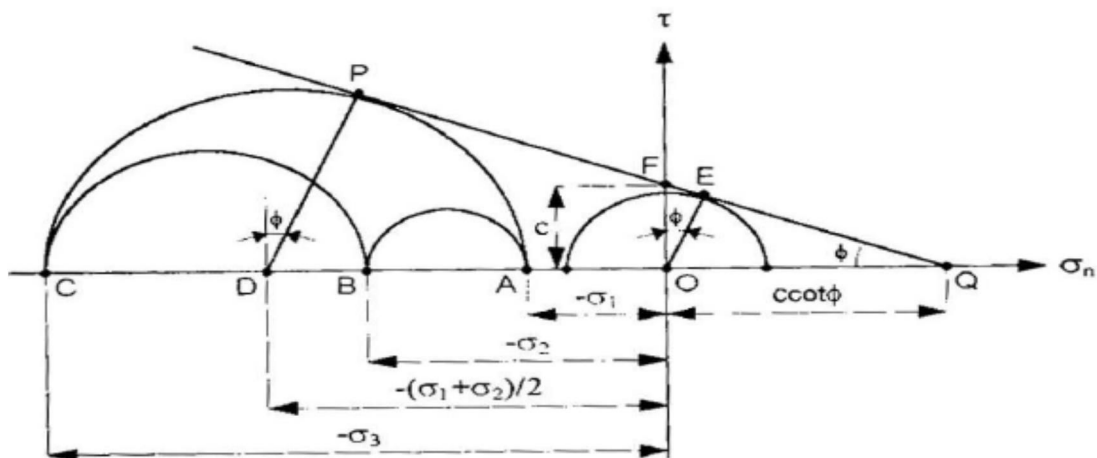


شکل (۴-۳): ترسیم معیار فون میسز و ترسکا در صفحه تنش‌های \$\sigma_1-\sigma_3\$ و \$\sigma_2-\sigma_3\$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (۵-۳)$$

که در رابطه بالا τ تنش برشی، C چسبندگی، σ_n تنش عمود بر سطح و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند.

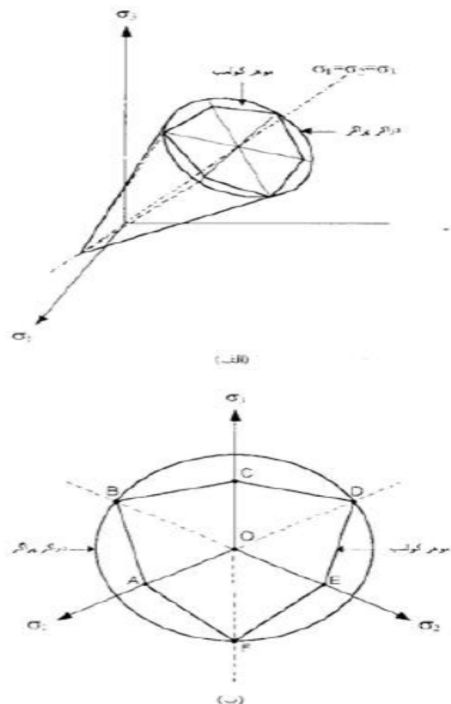
این قانون معیار شکست موهر-کولمب نام‌گذاری شد و در مسائل مربوط به خاک بسیار مورد استفاده قرار گرفت. در صورتی که برای یک خاک معیار تسلیم موهر-کولمب در فضای σ_n - τ رسم شود حالت زیر شکل خواهد گرفت:



شکل (۵-۳): معیار تسلیم موهر کولمب (۴۶)

کولمب عنوان کرد که در صورت که وضعیت تنش‌ها در صفحه به میزان رابطه ۵-۳ برسد، شکست در ماده شروع شده و این تنش‌ها شروع پلاستیک شدن ماده را نشان می‌دهد. معیار تسلیم کولمب با رسم بر روی فضای ۳ بعدی تنش‌های اصلی به صورت زیر به دست می‌آید.

مطابق شکل هرمی باقاعده شش ضلعی ایجاد شده است. در محور هیدرو استاتیک، $\sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1$ است در رابطه بالا φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و C چسبندگی است.



شکل (۳-۶): ترسیم معیار موهر کولمب در فضای ۳ بعدی (۴۶)

۳-۸ دینامیک تماس

پس از بررسی رفتار ماده و معیار تسلیم برای اختصاص دادن به خاک و فولاد، مکانیسم تماس ۲ جسم نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. این مکانیسم مهم است زیرا شرایط تماس ۲ جسم در تحلیل می‌تواند متغیر باشد و با تغییر شرایط بارگذاری و شرایط مرزی تغییر کند. این تغییر شرایط بارگذاری باعث ایجاد تغییر در سختی جسم می‌شود و در نتیجه باعث ایجاد یک مکانیسم غیرخطی در تماس بین ۲ ماده می‌شود. اختصاص المان پوسته به لوله و المان حجمی به خاک باعث ایجاد ۲ سطح تماس بین جدار بیرونی لوله و خاک می‌شود که برای مدل کردن از اندرکنش سطح به سطح استفاده شده است. اصطکاک ایجاد شده بین این ۲ سطح یکی از نیروهای مقاوم در برابر حرکت لوله درون خاک است. تنش اصطکاکی کولمب طبق آیین‌نامه ALA از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\tau = \sigma \times \mu \quad (۳-۶)$$

$$\mu = \tan(\phi) \quad (۳-۷)$$

$$\sigma = \rho \times g \times H \quad (۳-۸)$$

در روابط بالا P تنش فشاری سطح و μ ضریب اصطکاک بین خاک و لوله است. همچنین ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و f ضریب اندود سطحی است. در این پژوهش، ضریب اندود سطحی برای لوله ۰,۶ فرض شده است. در صورتی که تنش ایجاد شده در روی سطح لوله از $2f$ بیشتر باشد، لوله دچار لغزش می‌شود.

در راستای عمود بر جدار لوله نیز شرایط تماس سخت برقرار شده است. این شرایط امکان نفوذ المان‌های ۲ ماده خاک و فولاد در یکدیگر را نمی‌دهد.

۳-۹ مدل سازی عددی

معرفی یک مدل در اباکوس در گام‌های مختلف انجام می‌گیرید. این گام‌ها شامل رسم هندسه مدل، تعریف مدل رفتاری مصالح، نحوه قرارگیری هندسه‌های مختلف در کنار هم نحوه حل مسئله، تعریف تماس قطعات با یکدیگر و شرایط اولیه و بارگذاری است. هریک از گام‌ها به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۱- رسم هندسه مدل

هندسه قسمت‌های مختلف مدل در این قسمت شکل می‌گیرد که بسته به شرایط مسئله این هندسه می‌تواند به صورت ۲ بعدی یا ۳ بعدی و یا متقارن محوری باشد. هرچه هندسه مدل ساده‌تر باشد، سرعت حل، بیشتر است. در مدل سازی گسل با توجه به تفاوت تنش در عمق و صفحه افقی نمی‌توان از مدل‌های ۲ بعدی و تقارن محوری استفاده کرد و باید مسئله به صورت ۳ بعدی مدل شود. مدل تعریف شده برای بررسی در این قسمت شامل ۲ بلوک خاک با ابعاد $30 \times 10 \times 5$ است که به صورت شکل پذیر مدل شده است. لوله نیز به صورت مدل ۳ بعدی و شکل پذیر با قطر 0.09144 m و طول 60 m مدل شده است.

۲- تعریف مصالح

در این قسمت مشخصات مکانیکی هریک از مصالح مورد استفاده برای نرم افزار تعیین می‌شود. نرم افزار به طور پیش فرض معیارهای گسیختگی را در اختیار کاربر قرار داده و کاربر با انتخاب یک معیار ورود

پارامترهای موردنیاز، مصالح را تعریف می‌کند سپس با اختصاص هریک از مصالح به هندسه رسم شده این گام کامل می‌گردد.

با توجه به مدل انتخابی، مدل خاک به صورت پلاستیک و با معیار تسلیم موهر-کولمب مدل شده است. مشخصات خاک‌های انتخابی به صورت زیر است:

جدول (۳-۷): مشخصات خاک مورد استفاده در مدل

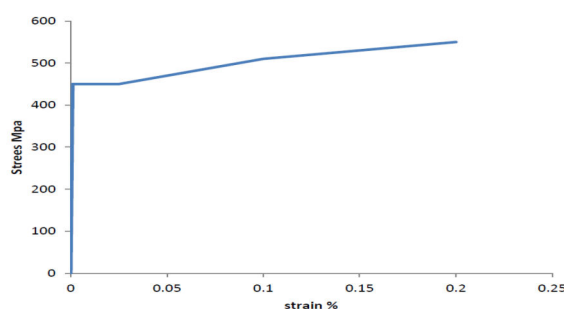
نوع خاک	?	?	?	?	?	?
رس سست	0	0.48	25	$1800 \frac{?}{?^3}$	50	0
رس متراکم	0	0.48	100	$1800 \frac{?}{?^3}$	200	0

فولاد مصرفی از نوع X65 است که نوع رایج در ساخت لوله‌های فولادی خطوط انتقال انرژی است.

مشخصات فولاد و نمودار رفتاری آن به صورت شکل ۳-۱۰ است: (قطر لوله ۰,۹۱۴۴ متر و ضخامت جداره ۱۲,۷ میلی‌متر است).

$$\gamma = 7850 \frac{?}{?^3} \quad ? = 210 \quad = 0.3$$

نمودار (۳-۸): رفتار فولاد X65



۳- شرایط تماس

در این قسمت سطوحی که با یکدیگر در تماس هستند مشخص می‌شود. شناسایی این سطوح می‌تواند به صورت خودکار توسط نرم‌افزار انجام شود اما تعیین مشخصات تماس و اختصاص آن به سطوح توسط کاربر صورت می‌گیرد.

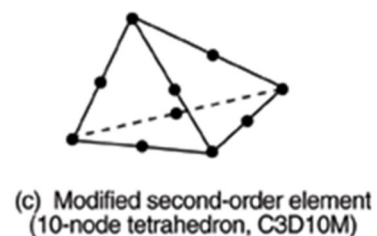
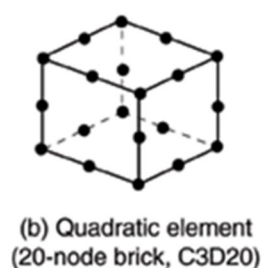
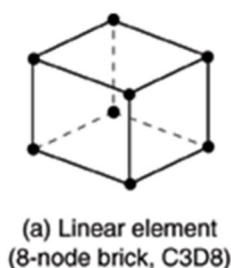
در مدل کارشده سطح داخلی خاک و خارجی لوله مدفون شده در آن به عنوان سطوح تماسی مشخص شده است. سطح ۲ بلوک خاک در لبه گسل به علت جابه جایی و وجود فاصله 33 cm از یکدیگر، باهم تماسی ندارند. ضریب اصطکاک برای لوله فولادی و خاک رسی بین ۰,۲ تا ۰,۴ تعریف می شود که در این مدل این ضریب ۰,۳ تعریف شده است.

۴- شرایط مرزی و بارگذاری مدل

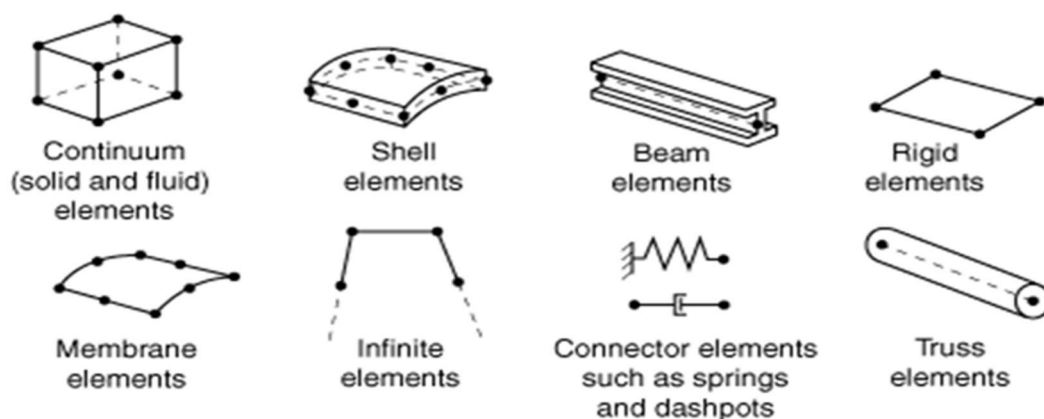
یکی از مهم ترین گام ها در حل مسئله تعریف شرایط مرزی در مسئله است. این شرایط می تواند شامل آزادی های دورانی و انتقالی در مرزهای هندسه مدل باشد. تعیین شرایط صحیح باعث توزیع تنش درست در نقاط مختلف مدل می شود. در مسائل ژئوتکنیک این شرایط می تواند شرایط وجود آب، شرایط خاک خشک، زهکشی یا عدم وجود زهکش در بلوک خاک باشد همچنین معرفی بستر و اعمال شرایط اولیه آن در این قسمت صورت می گیرد. طبق مدل کارشده گسل از نوع امتدادلغز است بنابراین شرایط به گونه ای تعریف شده که توانایی بازسازی مدل حرکتی این گسل را داشته باشد.

۵- المان بندی مدل

همان طور که در تعریف روش المان محدود گفته شد، در این روش هندسه مدل به المان های کوچک و گره ها تقسیم می شود و معادلات حل مسئله بر روی المان ها ایجاد شده و سپس به المان بعدی انتقال داده می شود. در نرم افزار اباکوس المان هایی با تعداد گره های مختلف تعریف شده است. این المان ها به اشکال زیر می باشند.



همچنین نوع المان تعریف شده در نرم افزار به صورت زیر است:

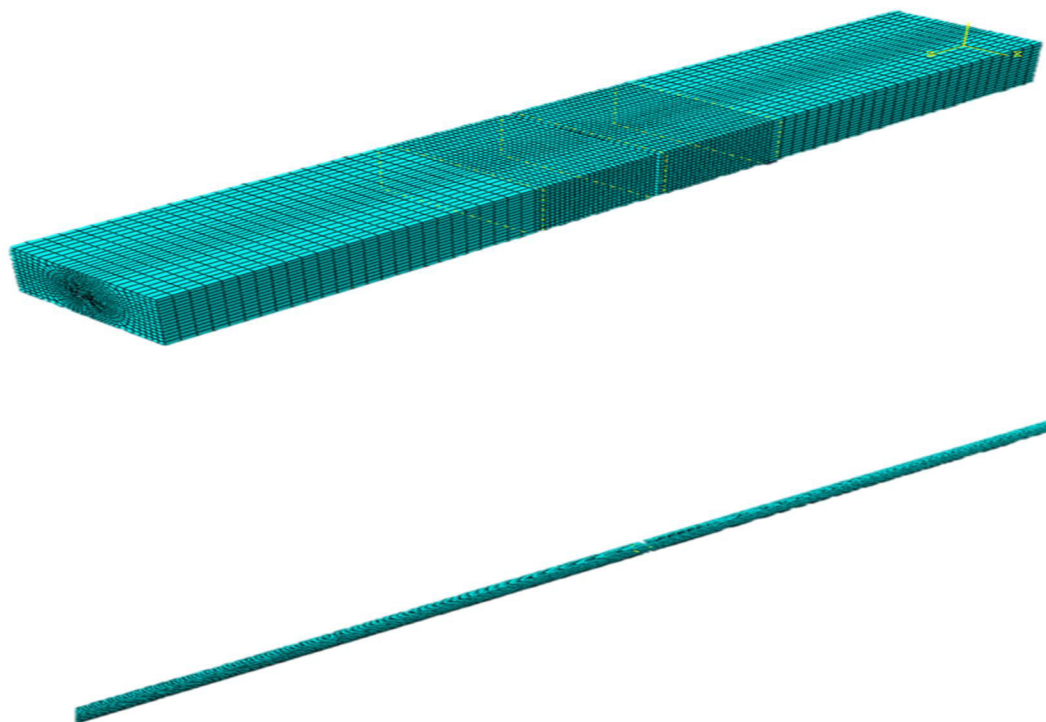


در این مدل بلوک خاک با المان‌های C3D8R مدل شده است. C برای المان‌های پیوسته، 3D نشان‌دهنده ۳ بعدی بودن المان، ۸ نشان‌دهنده تعداد گره‌ها در المان و R نشان‌دهنده استفاده از انتگرال کاهش‌یافته در المان است.

همچنین برای مدل لوله از المان‌های S4R استفاده شده است که S برای المان‌های پوسته، ۴ نشان‌دهنده تعداد گره در المان و R نشان‌دهنده استفاده از انتگرال کاهش‌یافته در المان است.

المان‌های بیان‌شده در بالا در هر گره دارای ۳ درجه آزادی در راستای ۳ گانه اند که در مجموع باعث ایجاد ۲۴ درجه آزادی برای المان می‌شود و دقت کار را بالا می‌برد؛ اما به علت نیمه بی‌نهایت خاک در واقعیت، المان‌های صفحات مرزی در راستای عمود بر صفحه جابه‌جایی نخواهند داشت به همین جهت آزادی المان در جهت عمود بر صفحه محدود خواهد شد اما در ۲ راستای دیگر آزادند.

با استفاده از المان‌های ریز تر و دارای تعداد بیشتر گره مانند المان‌های ۱۵ گره‌ای، دقت کار بسیار بالا می‌رود اما به دلیل استفاده از حجم زیاد حافظه در سیستم، سرعت حل مسئله را به شدت کاهش می‌دهد. در مقابل می‌توان با نزدیک شدن به لبه گسل‌ها از مش‌های ریز تری استفاده کرد تا دقت کار بالا رود و درعین حال سرعت حل تأثیر به‌صورت محسوسی تغییر نکند.



شکل (۹-۳): المان بندی بلوک خاک و لوله

فصل چهارم:

مدل سازی عددی جابه جایی گسل

۴-۱ مدل تک لوله و ۲ بلوک

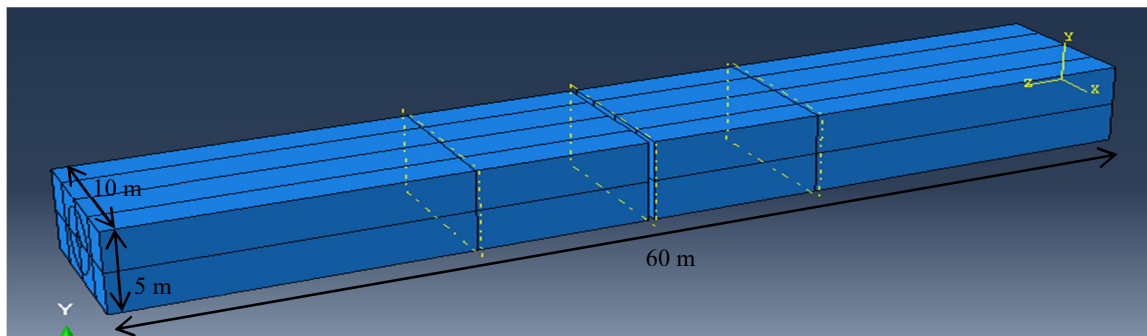
۴-۱-۱ مقدمه

برای شروع و به عنوان اولین مدل، لوله تک تحت اثر حرکت گسل امتدادلغز مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت لوله در عمق ۲٫۵ متری از سطح خاک در بلوکی مدفون شد. پارامتر بررسی شده در این حالت بررسی کرنش طولی لوله در جابه جایی ۱ متر گسل است. این مدل توسط آقای وازاروس در سال ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج در ادامه بیان شده است.

۴-۱-۲ مدل سازی

۴-۱-۲-۱ هندسه مدل

مدل تعریف شده در این قسمت شامل ۲ بلوک خاک با ابعاد $30 \times 10 \times 5$ در طرفین گسل و است که به صورت شکل پذیر مدل شده است. لوله ها نیز به صورت مدل ۳ بعدی و شکل پذیر با قطر 0.9144 m و طول 60 m مدل شده اند. برای شبیه بودن مدل با خطوط اجرایی عبور کرده از گسل، درز ۳۳ سانتی متری در بین گسل ها ایجاد شد.



شکل (۴-۱): هندسه مدل شماره ۱

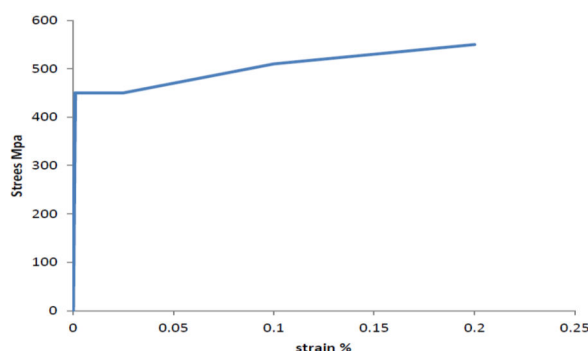
۴-۱-۲-۲ تعریف مصالح

خاک مورد بررسی از نوع رسی نوع ۱ است. همچنین فولاد مصرفی از نوع X65 است. (قطر لوله 0.9144 متر و ضخامت جداره 12.7 میلی متر است).

جدول (۴-۲): مشخصات مصالح مصرفی

مصلح	?	?	?	?	?	?
خاک رس	۰,۴۸	25	$1800 \frac{?}{?^3}$	0	.	50
فولاد	0.3	210	$7850 \frac{?}{?^3}$	-	----	----

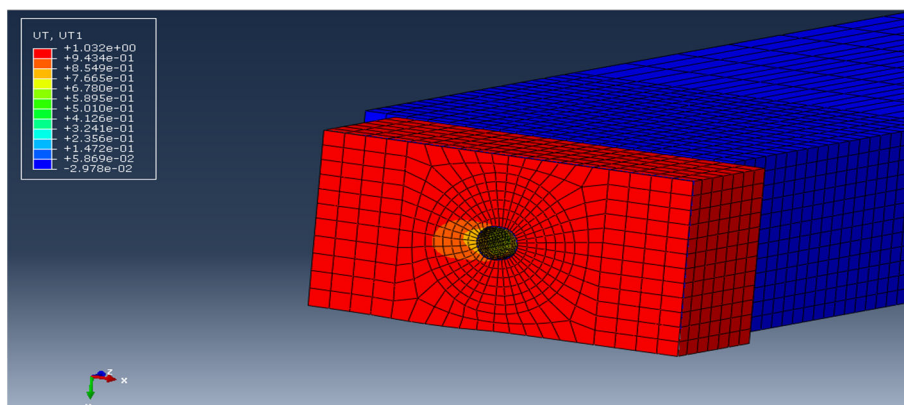
در ادامه نمودار رفتار فولاد X65 در آزمایش تک محوری آورده شده است.



شکل (۴-۳): نمودار رفتار فولاد X65

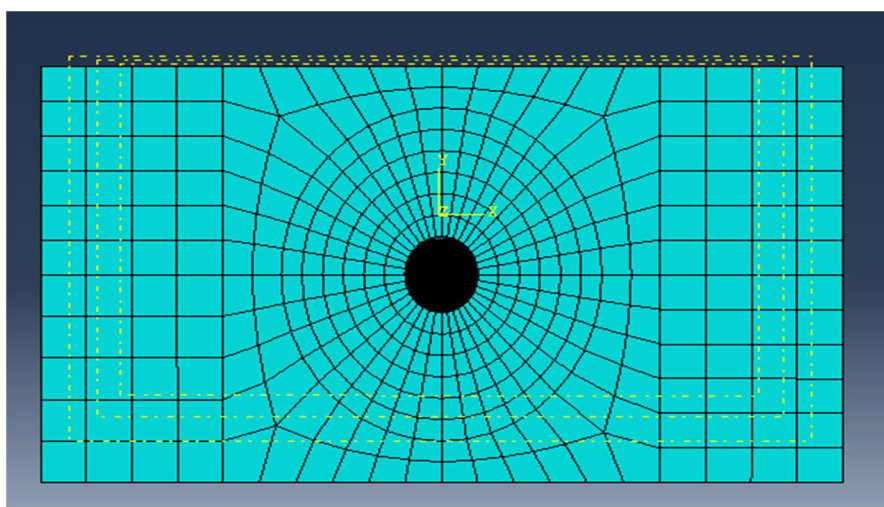
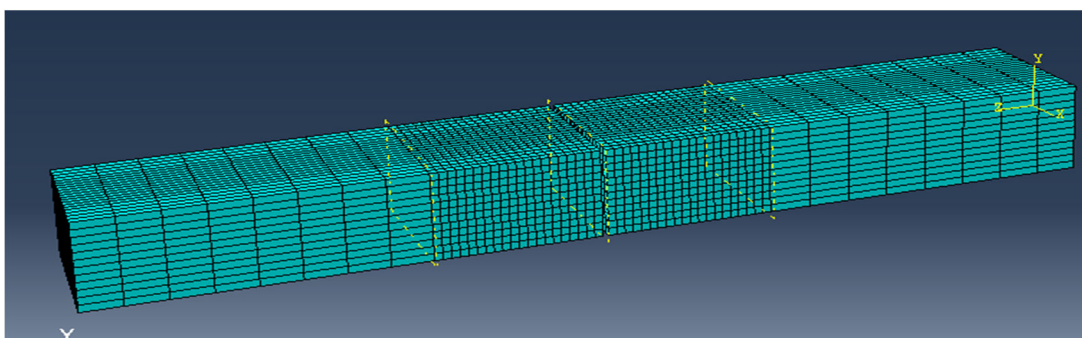
۴-۲-۱-۳ شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

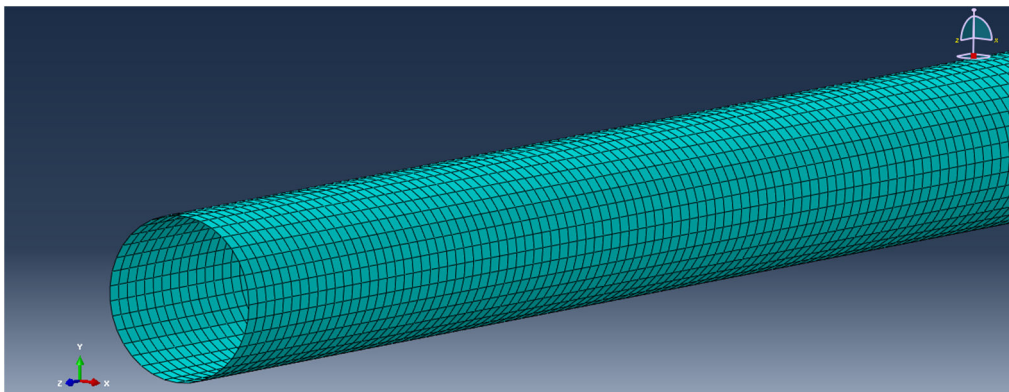
در این مدل ضریب اصطکاک بین جدار خارجی لوله و خاک اطراف جدار ۰,۳ تعریف شده است. گسل در مدل کار شده از نوع امتداد لغز است بنابراین شرایط به گونه ای تعریف شده که توانایی بازسازی مدل حرکتی این گسل را داشته باشد. صفحات خارجی در مدل در راستای افق محدود شده اند همچنین ابتدا و انتهای لوله نیز حرکات صفحات خود را دنبال می کنند. در این مدل ها جابه جایی گسل در حدود D است. جابه جایی لوله به صورت شکل ۴-۳ است.



شکل (۴-۴): برشی از مقطع لوله و خاک پس از جابه‌جایی

مدل بلوک خاک با المان‌های توپر مدل شده است. همچنین برای مدل لوله از المان‌های پوسته‌ای استفاده شده است. همچنین مقطع لوله به ۳۰ المان تقسیم شده است. المان‌ها در محدود نزدیک به گسل ریز تر از فواصل دور از گسل در نظر گرفته شده‌اند. المان بندی بلوک خاک و لوله به صورت شکل ۴-۵ است.



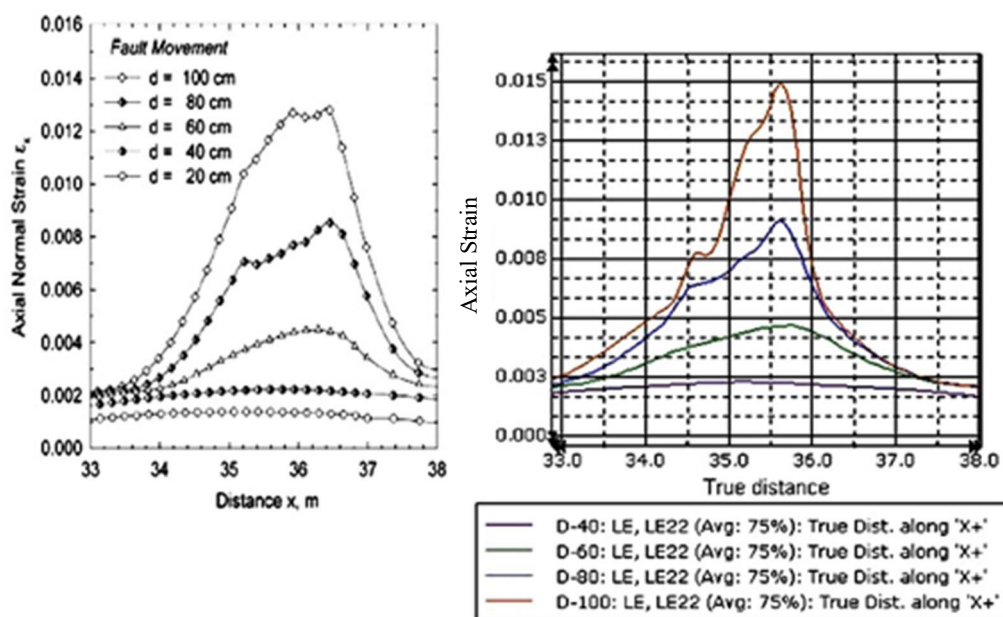


شکل (۴-۵): المان بندی بلوک خاک و لوله و مقطع خاک

۳-۱-۴ مقایسه نتایج با مدل آقای وازاروس

نمودار ۴-۵ نشان‌دهنده رفتار لوله در سمت کششی است. نمودار سمت راست مربوط به لوله مدل شده در جابه‌جایی ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری گسل و نمودار سمت چپ نتایج مدل آقای وازاروس است. در مدل نگارنده مقطع لوله به ۳۵ قسمت و در مدل آقای وازاروس مقطع به ۵۴ قسمت تقسیم شده است. نتایج گرفته‌شده در این بخش برای لوله بدون فشار داخلی و مدفون در خاک رسی نوع ۱ است. همچنین نسبت D/t در این بخش ۷۲ است.

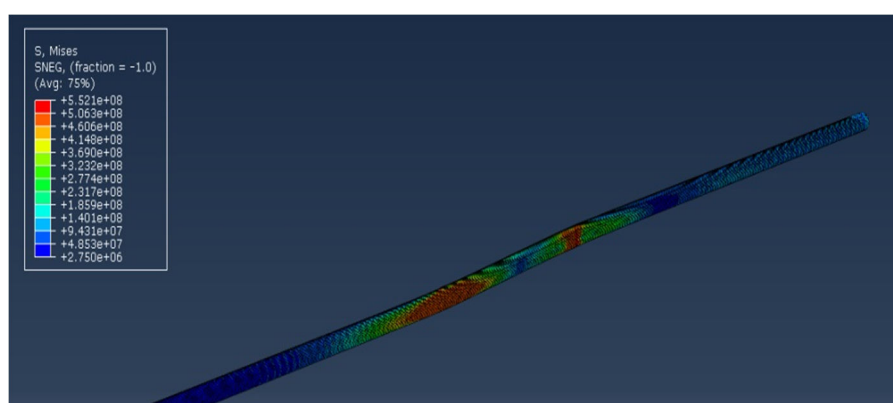
در جابه‌جایی ۱۰۰ سانتی‌متری گسل، شکل ظاهری لوله بدون بزرگ‌نمایی به‌صورت زیر است:



نمودار (۴-۶): مقایسه نتایج حاصل از مدل شماره ۱ با مدل آقای وازاروس

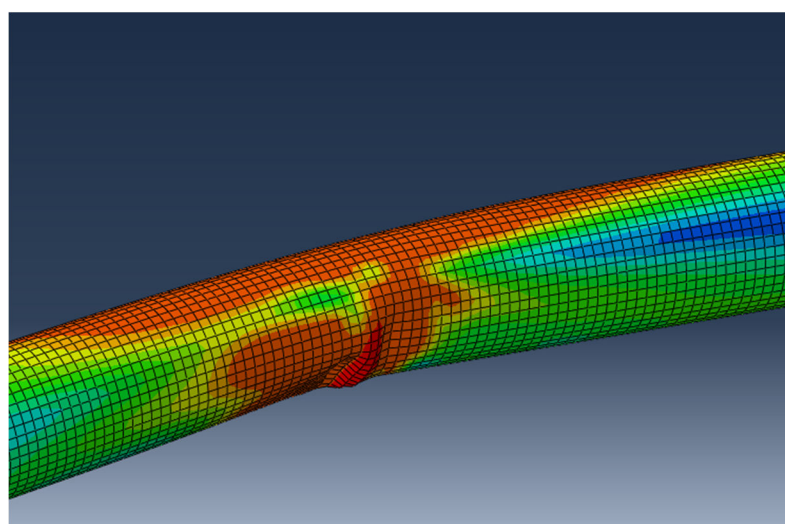
جدول (۴-۷): مقایسه خطای دامنه کرنش‌های محوری در مدل کارشده با مدل آقای وازروس

جابه‌جایی گسل	100Cm	80Cm	60Cm	40Cm
مدل کارشده	0.01465	0.00917	0.004755	0.002438
مدل وازروس	0.01310	0.00856	0.004771	0.002280
درصد خطا	9.5%	6.5%	5.8%	6.4%



شکل (۴-۸): نمایش دهنده توزیع تنش مایسز در طول لوله در مدل شبیه‌سازی شده

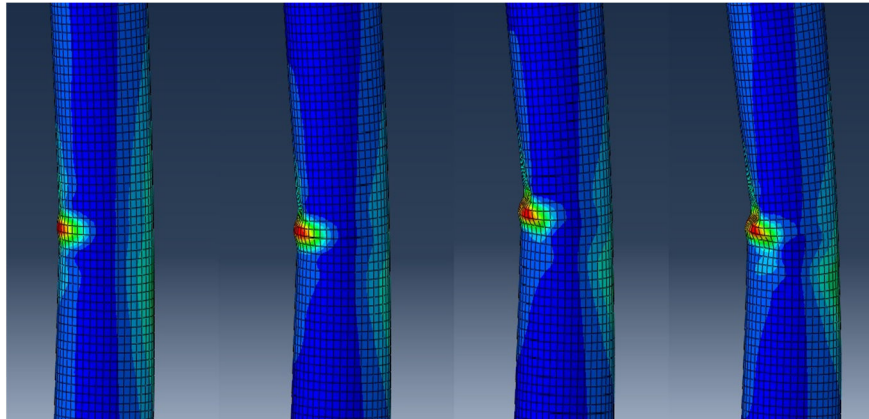
همچنین نمایش کرنش محوری در قبل و بعد از منطقه ایجاد کمانش به صورت شکل ۴-۸ است.



شکل (۴-۹): نمایش توزیع تنش مایسز در محدوده چین‌خوردگی لوله فولادی

همان‌طور که در شکل ۴-۹ مشخص است، در جابه‌جایی ۱۰۰ سانتی‌متر لوله کاملاً کمانش کرده و مقطع آن دچار چین‌خوردگی شده است. در ابتدا کرنش محوری در سطح بزرگ‌تری از لوله رخ داده و با

افزایش جابه‌جایی تمرکز کرنش نیز افزایش پیدا کرده است. در انتها کرنش متمرکز شده و منجر به ایجاد چین‌خوردگی مقطع در نقطه‌ای خاص می‌شود. این روند به صورت شکل ۴-۱۰ است.



شکل (۴-۱۰): بررسی روند تمرکز کرنش محوری و ایجاد چین‌خوردگی

۴-۲ مدل دو یا چند لوله و دو بلوک

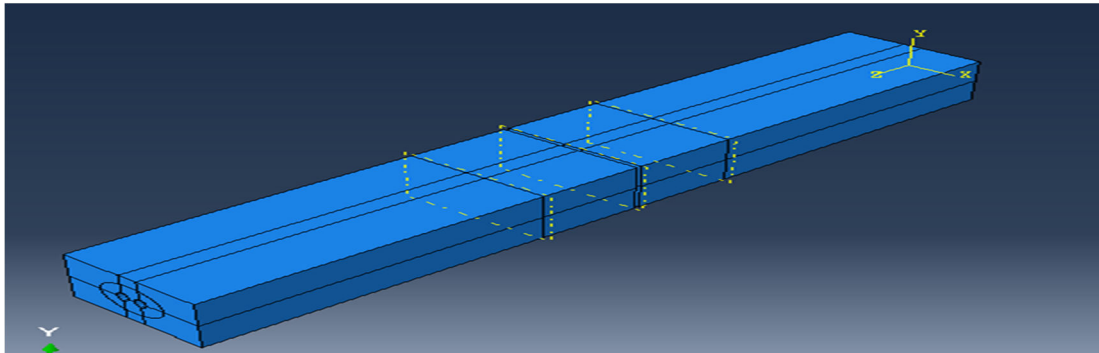
۴-۲-۱ مقدمه

مدل‌های کار شده در مقالات معمولاً به صورت تک لوله‌ای است. تک لوله به معنای این است که یک لوله در محور مرکزی بلوک قرار گرفته و پارامترهای مختلف برای این لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالی که در برخی موارد لوله‌ها به صورت جفت و یا تعداد بیشتر در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این مدل هدف بررسی تعداد بیشتر لوله در یک بلوک خاک است. همچنین پارامترهای تعداد لوله، فاصله لوله‌ها از یکدیگر، نحوه قرارگیری ۲ لوله، آرایش چینش لوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۲ مدل سازی

۴-۲-۲-۱ هندسه مدل

مدل تعریف شده در این قسمت شامل ۲ بلوک خاک با ابعاد $30 \times 10 \times 5$ در طرفین گسل و است که به صورت شکل پذیر مدل شده است. لوله‌ها نیز به صورت مدل ۳ بعدی و شکل پذیر با قطر 9144 و طول 60 m مدل شده‌اند.



شکل (۴-۱۱): نمایش هندسه مدل شماره ۲ و نحوه قرارگیری لوله‌ها

۴-۲-۲-۲ تعریف مصالح

خاک مدل شماره ۱ با مدل شماره ۲ یکسان است. مشخصات خاک انتخابی به صورت زیر است:

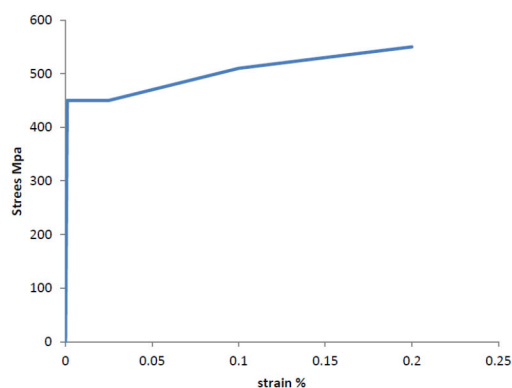
$$\gamma = 1800 \frac{[?]}{[?]^3} \quad [?] = 25 [?] \quad = 0.48 \quad [?] = 0$$

$$[?] = 0 \quad [?] = 50 [?]$$

فولاد مصرفی از نوع X65 است مشخصات فولاد و نمودار رفتاری آن به صورت زیر است: (قطر لوله

۰,۹۱۴۴ متر و ضخامت جداره ۱۲,۷ میلی متر است.)

$$\gamma = 7850 \frac{[?]}{[?]^3} \quad [?] = 210 [?] \quad = 0.3$$



نمودار رفتار فولاد X65

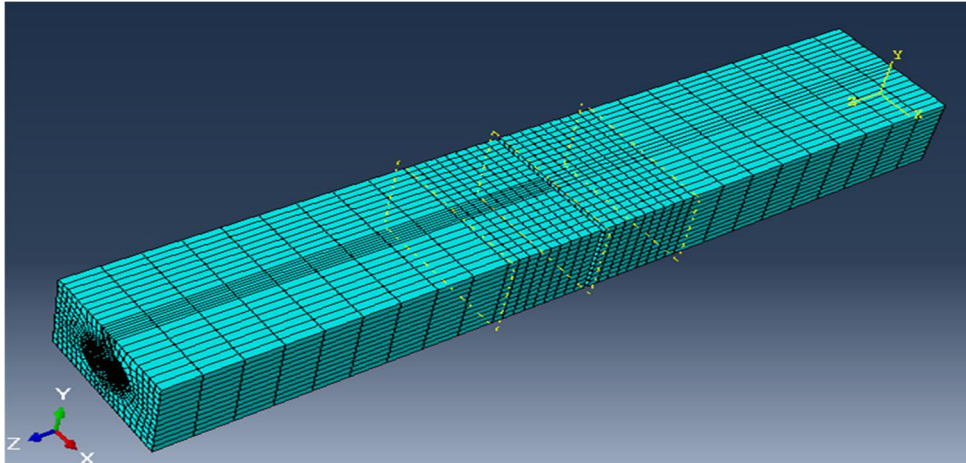
۴-۲-۲-۳ شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

در این مدل ضریب اصطکاک ۰,۳ تعریف شده است. گسل در مدل کار شده از نوع امتداد لغز است

بنابراین شرایط به گونه ای تعریف شده که توانایی بازسازی مدل حرکتی این گسل را داشته باشد.

صفحات خارجی در مدل در راستای افقی محدود شده اند همچنین ابتدا و انتهای لوله نیز حرکات

صفحات خود را دنبال می‌کنند. در این مدل‌ها جابه‌جایی گسل در حدود $0.6 D$ است. مدل بلوک خاک با المان‌های C3D8R مدل شده است. همچنین برای مدل لوله از المان‌های S4R استفاده شده است. همچنین مقطع لوله به ۳۰ المان تقسیم شده است. المان‌ها در محدود نزدیک به گسل ریز تر از فواصل دور از گسل در نظر گرفته شده‌اند. المان بندی بلوک خاک و لوله به صورت شکل ۴-۱۲ است.



شکل (۴-۱۲): نمایش المان بندی بلوک و لوله در مدل شماره ۲

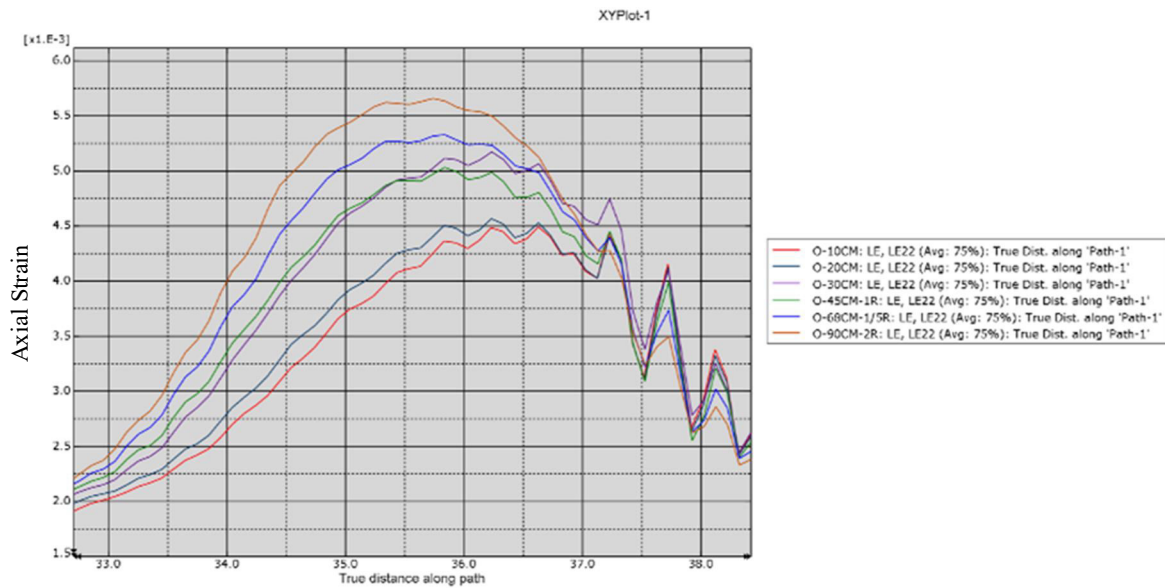
در حالت‌های مختلف مدل شماره ۲، تنها موقعیت و تعداد لوله دچار تغییر شده است. در ادامه به بیان نتایج و بررسی هر یک از پارامترها می‌پردازیم.

۱- تأثیر فاصله افقی:

در این بخش ۲ لوله فولادی به صورت شکل ۴-۱۰، در حالت افقی و در فواصل گوناگون از یکدیگر قرار گرفته است. این فواصل به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متر و پس از آن به میزان R ، $1.5R$ ، $2R$ مدل سازی شده‌اند. فاصله لوله‌ها در هنگام مماس شدن ۲ لوله صفر در نظر گرفته می‌شود. مدل تحت اثر جابه‌جایی گسل به اندازه $0.6 D$ قرار گرفته است. (D قطر لوله است). سپس کرنش محوری در راستای طول لوله در یک سمت برای یک لوله ثابت در ناحیه کشش جداره لوله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به صورت نمودار ۴-۱۳ است.

با توجه به نتایج در آرایش افقی با افزایش فاصله بین لوله‌ها، کرنش محوری در طول لوله در بدنه‌های نزدیک به هم لوله در خاک، افزایش پیدا می‌کند. افزایش فاصله بین ۲ لوله باعث افزایش قطر خاک در

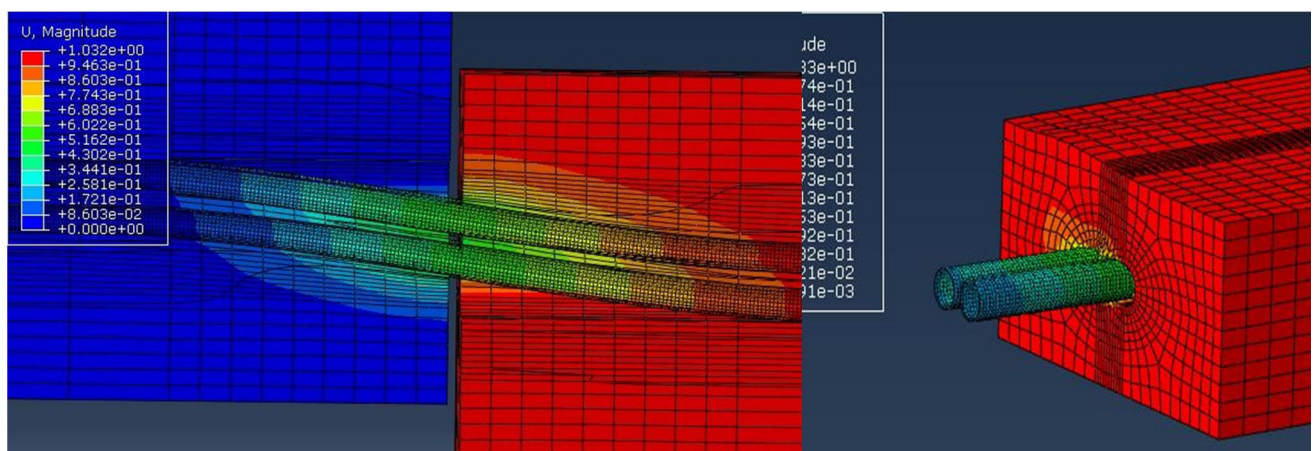
بین ۲ لوله می‌شود. با توجه به اینکه مدول الاستیسیته خاک کمتر از فولاد است، خاک بیشتر از فولاد فشرده می‌شود؛ بنابراین ضخامت بیشتر خاک، فشرده شدن بیشتر و نیروی مقاوم کمتر را در پی دارد؛ بنابراین لوله امکان جابجایی بیشتر پیدا کرده و به همین علت کرنش محوری بیشتری در لوله ایجاد می‌شود.



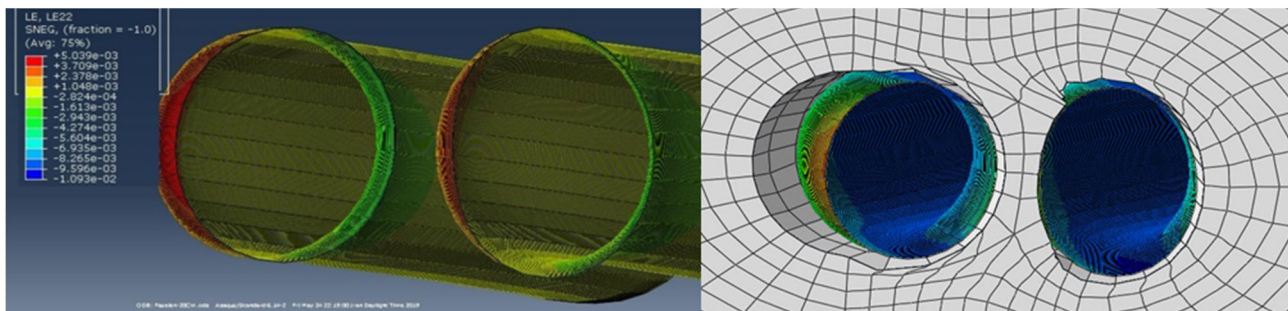
شکل (۴-۱۳): مقایسه نتایج حاصل از بررسی پارامتر فاصله افقی

نکته دیگر در نمودار بالا نرخ تغییر کرنش در فواصل مختلف است. طبق نتایج در مواردی که فاصله

بین ۲ لوله، کمتر از شعاع لوله باشد، نرخ رشد کرنش کمتر از زمانی است که فاصله بین ۲ لوله بیش از شعاع لوله باشد.



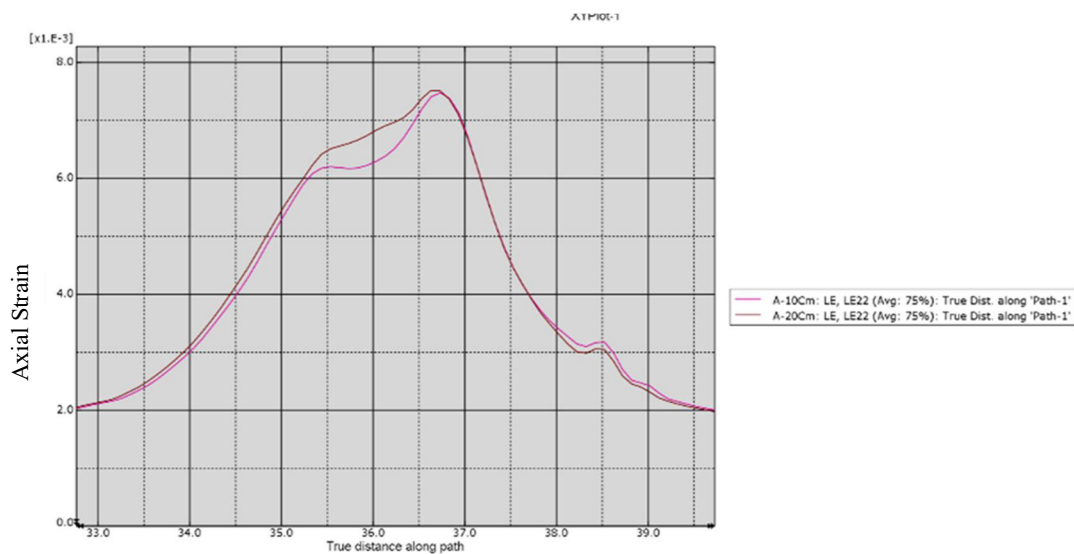
شکل (۴-۱۴): برش مقطع خاک-جابجایی لوله و فشرده‌گی خاک



شکل (۴-۱۵): برش مقطع لوله‌ها و تغییر شکل آن در بلوک خاک

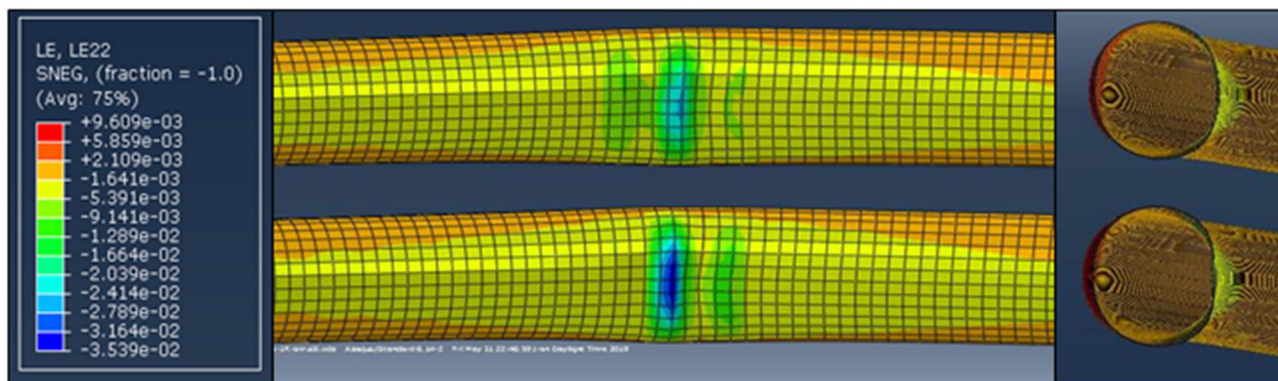
تأثیر فاصله عمودی:

در این بخش ۲ لوله فولادی به صورت عمودی و در فواصل گوناگون از یکدیگر قرار گرفته است. این فواصل به ترتیب، ۱۰، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متر مدل‌سازی شده‌اند. همانند شرایط قبلی کرنش طولی برای یک لوله ثابت اندازه‌گیری شده است. نتایج به صورت نمودار ۴-۱۶ است.

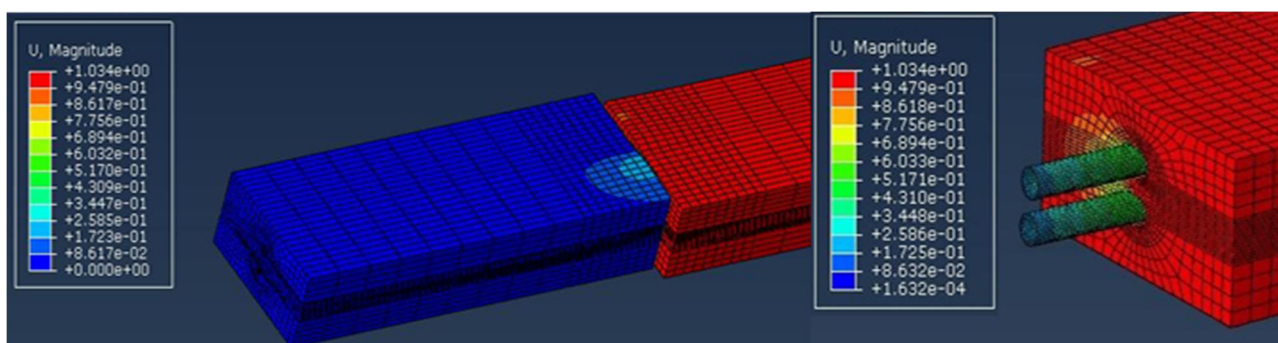


نمودار (۴-۱۶): مقایسه نتایج کرنش محوری لوله در فواصل عمودی بین ۲ لوله

در شرایط آرایش عمودی لوله‌ها، به دلیل حرکت افقی گسل و قرارگیری عمودی لوله، با افزایش تعداد و یا فاصله، نیروی مقاومی در برابر حرکت گسل وجود ندارد. نگارنده بر این باور است دلیل ثبات تقریبی میزان کرنش محوری در لوله همین امر باشد.



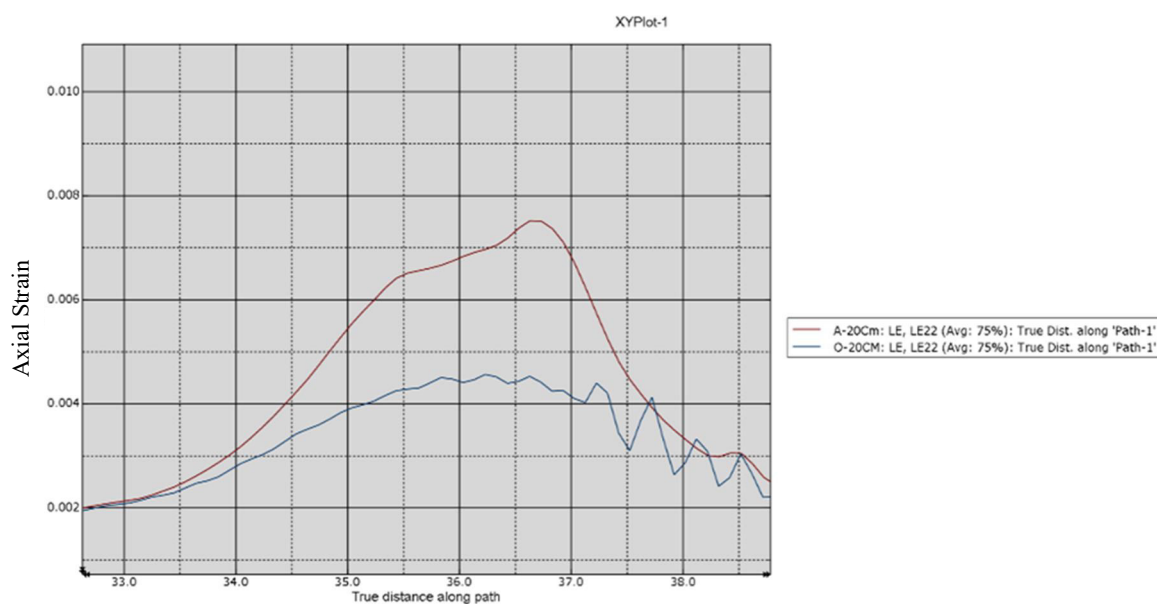
شکل (۴-۱۷): جابه‌جایی گسل در آرایش عمودی لوله‌ها



شکل (۴-۱۸): تغییر شکل مقطع لوله و نمایش کمانش در جدار لوله در آرایش عمودی

۲- آرایش قرارگیری لوله:

در این بخش ۲ لوله فولادی در حالت‌های عمودی، افقی در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته است. این نتیجه مسیر یکسان روی بدنه لوله است.

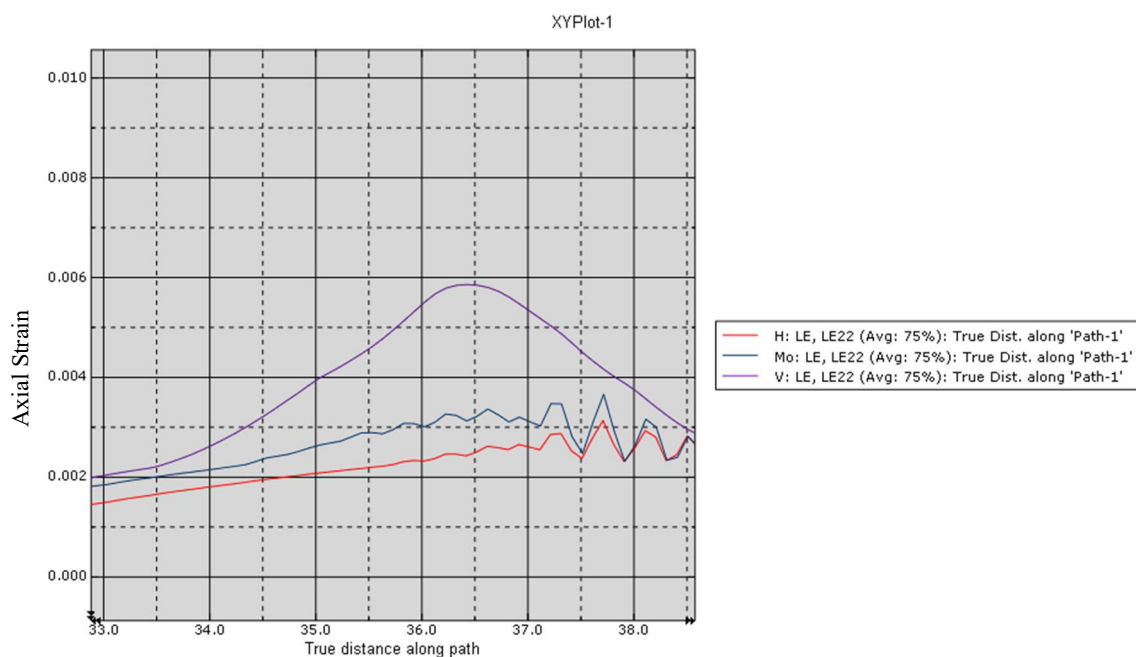


نمودار (۴-۱۹): مقایسه نتایج حاصل از آرایش قرارگیری ۲ لوله

در حالت افقی وجود مقاومت لوله دوم در مقابل حرکت خاک باعث کاهش کرنش محوری در بدنه لوله اول شده است؛ اما در حالت عمودی با توجه به نحوه جابه‌جایی گسل که عمود بر راستای قرارگیری لوله‌ها است، نیروی مقاومی در برابر حرکت لوله نبوده و فقط فشردگی خاک از جابه‌جایی زیاد لوله جلوگیری می‌کند؛ بنابراین کرنش در آرایش عمودی لوله‌ها در بدنه هم‌راستا با حرکت گسل افزایش میابد.

۳- آرایش قرارگیری ۳ لوله به صورت مثلثی، عمودی و افقی

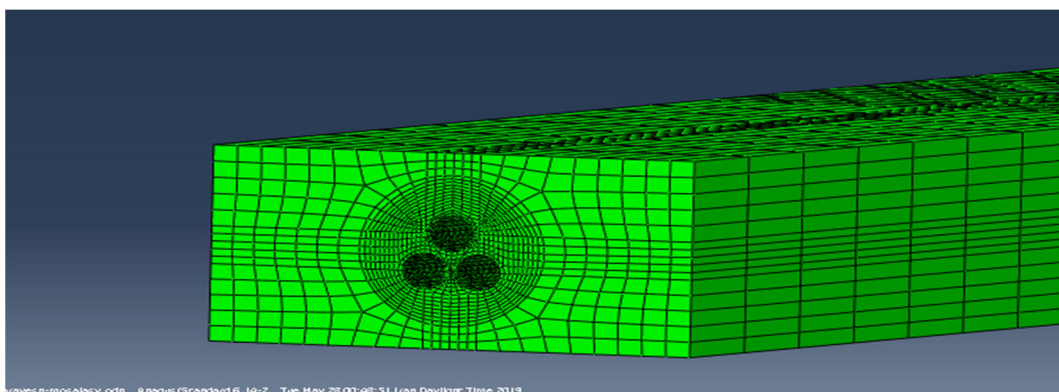
پارامتر بررسی شده در این حالت نحوه قرارگیری لوله‌ها در کنار یکدیگر است. در این حالت ۳ لوله با مشخصات یکسان در بلوک خاک دفن شده و فقط نحوه قرارگیری لوله‌ها از حالت افقی به حالت عمودی و مثلثی تغییر کرده است. برای هر ۳ مدل از یک لوله و از سمت کششی لوله نمودار کرنش محوری برحسب طول لوله رسم شده است. عمق دفن در ۳ لوله خروجی گرفته شده یکسان است.



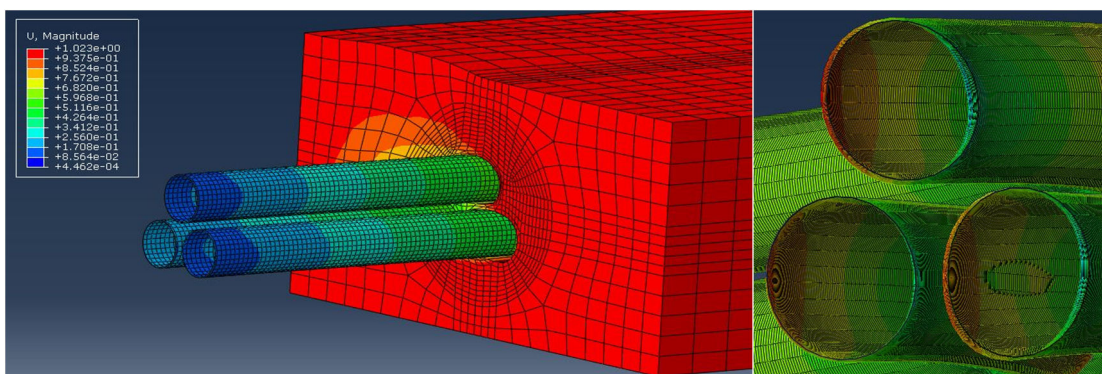
نمودار (۴-۲۰): نتایج حاصل از آرایش قرارگیری ۳ لوله

با توجه به نمودار ۴-۲۰ در حالتی که چینش به صورتی عمودی باشد بیشترین میزان کرنش محوری

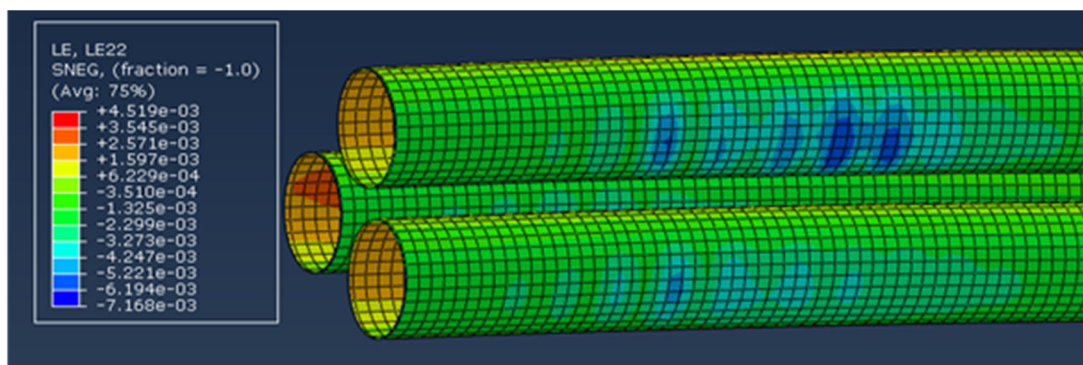
و در حالتی که چینش به صورت افقی باشد میزان کرنش محوری در کمترین حالت است. نگارنده بر این باور است که دلیل روند کاهشی کرنش، وجود لوله در راستای حرکت گسل و مقاومت لوله‌های مجاور در برابر حرکت لوله میانی است. در حالت عمودی با توجه به این که آرایش لوله عمود بر جابه‌جایی است، در راستای حرکت گسل نیروی مقاومی وجود ندارد و تغییر شکل و کرنش‌ها حدوداً برابر حالت تک لوله‌ای است.



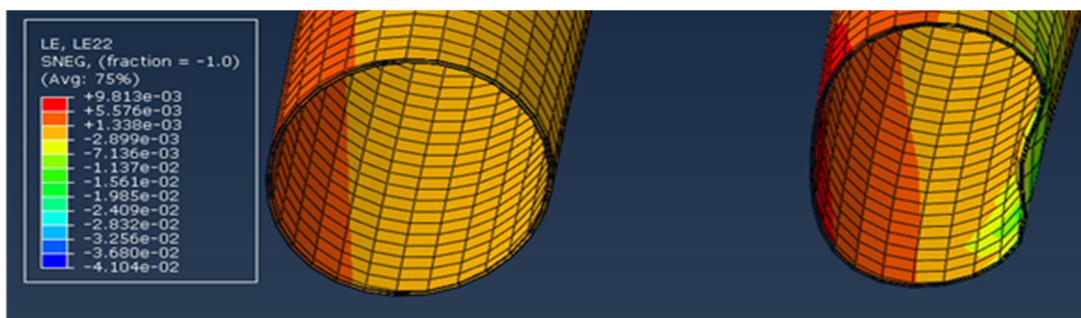
شکل (۴-۲۱): نحوه قرارگیری ۳ لوله با آرایش مثلثی مدفون در خاک



شکل (۴-۲۲): جابه‌جایی گسل و تغییر شکل مقطع لوله در آرایش مثلثی



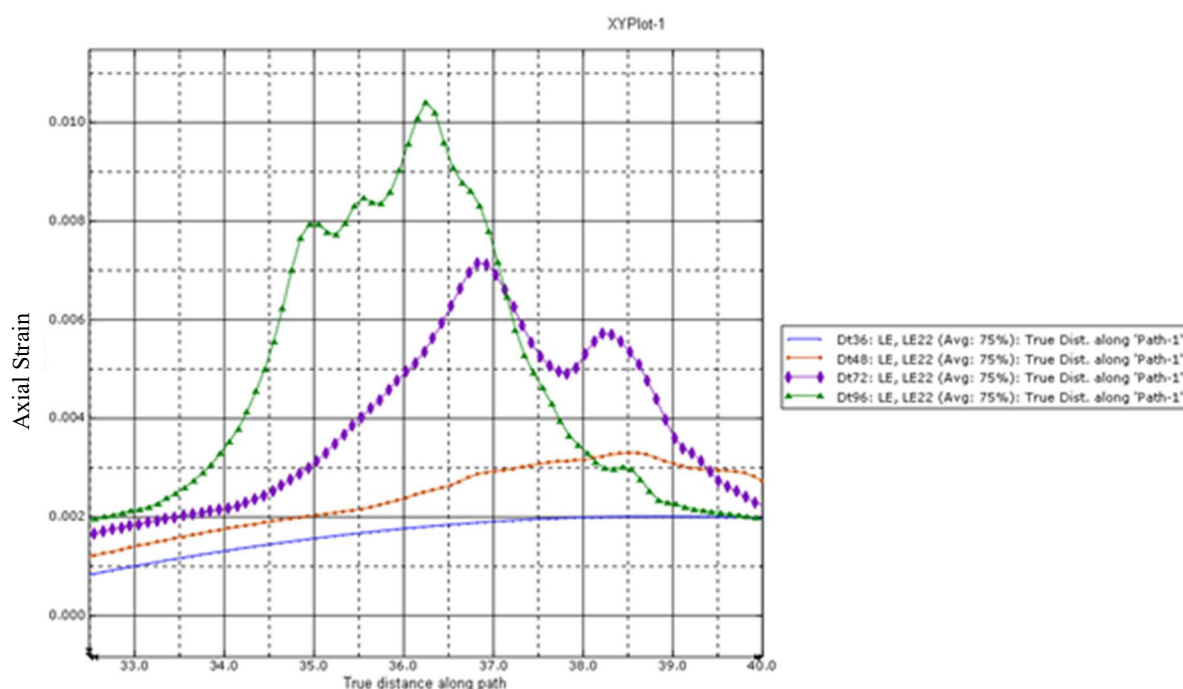
شکل (۴-۲۳): آستانه ایجاد کمانش در لوله در آرایش مثلثی



شکل (۴-۲۴): تغییر شکل مقطع در لوله سمت راست ($D/t=96$) نسبت به لوله سمت چپ ($D/t=72$)

۴- تأثیر نسبت قطر به ضخامت بر رفتار لوله

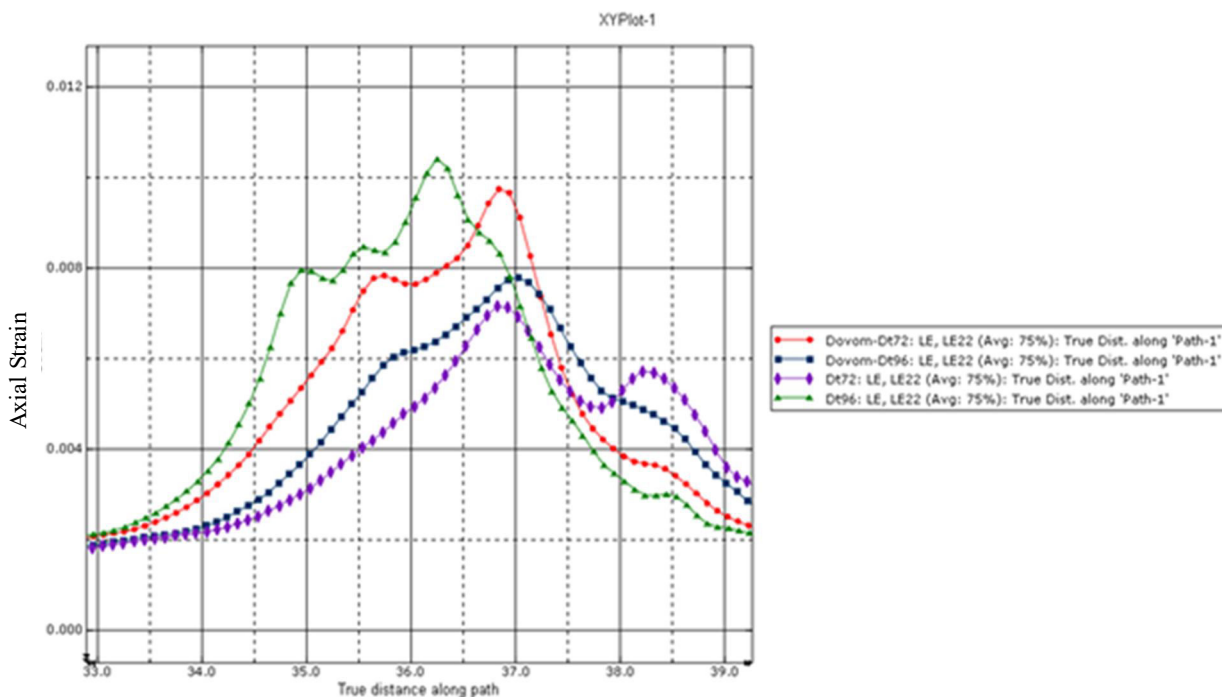
این بخش به بررسی صلبیت لوله با نسبت قطر بر ضخامت جدار لوله می‌پردازد. قطر با D و ضخامت جداره لوله با t مشخص شده است. در تمام حالت‌های قبل قطر لوله ۰٫۹۱۴۴ متر و ضخامت جدار آن ۱۲٫۷ میلی‌متر انتخاب شده بود؛ بنابراین نسبت قطر به ضخامت لوله برابر ۷۲ است که این نسبت به ۳۶٫۴۸ و ۹۶ تغییر پیدا کرد. با افزایش این نسبت، با توجه به ثابت بودن قطر لوله، جدار لوله نازک‌تر می‌شود و سختی خمشی آن نیز کاهش می‌یابد. نمودار ۴-۲۵ بیان می‌کند کاهش سختی لوله باعث افزایش میزان کرنش محوری شده و در نتیجه سطح مقطع لوله بیشتر تغییر شکل پیدا می‌کند. این کرنش در نسبت‌های کوچک‌تر از ۷۲ به شدت کاهش پیدا می‌کند.



نمودار (۴-۲۵): ترتیب قرارگیری لوله‌ها با ضخامت متفاوت و قطر یکسان

۵- تأثیر ترتیب قرارگیری لوله با نسبت قطر به ضخامت مختلف

در تمام مدل‌های کارشده در قسمت قبل هر ۲ لوله از یک صلبیت و سختی خمشی برخوردار بودند و نسبت D/t در هر دو لوله برابر بود اما در این حالت سختی ۲ لوله با یکدیگر متفاوت است. اگر لوله‌ها در جهت حرکت گسل نام‌گذاری کنیم، در مدل اول، اولین لوله دارای نسبت D/t برابر ۹۶ و دومین لوله برابر نسبت D/t برابر ۷۲ است. در مدل دوم این ترتیب برعکس است و اولین لوله دارای نسبت ۷۲ و دومین لوله دارای نسبت ۹۶ است. در هر دو مدل خروجی‌های کرنش محوری بر روی جدار لوله دوم گرفته شده است. نتایج به صورت نمودار ۴-۲۴ است. در این نمودار ۲ حالت ذکرشده در بالا با حالت‌هایی که هر دو لوله دارای نسبت D/t یکسان، برابر ۷۲ و ۹۶، هستند، مقایسه شده است. طبق نمودار کرنش محوری لوله دوم زمانی بیشتر است که دومین لوله نسبت به اولین لوله دارای سختی خمشی بیشتری باشد. علت را می‌توان مقاومت لوله اول در برابر حرکت بلوک خاک و انتقال نیرو و حرکت به لوله دوم دانست؛ بنابراین با افزایش سختی لوله اول، کرنش محوری در لوله دوم کاهش می‌یابد.



نمودار (۴-۲۶): ترتیب قرارگیری ۲ لوله با سختی متفاوت

۳-۴ مدل تک لوله و سه بلوک

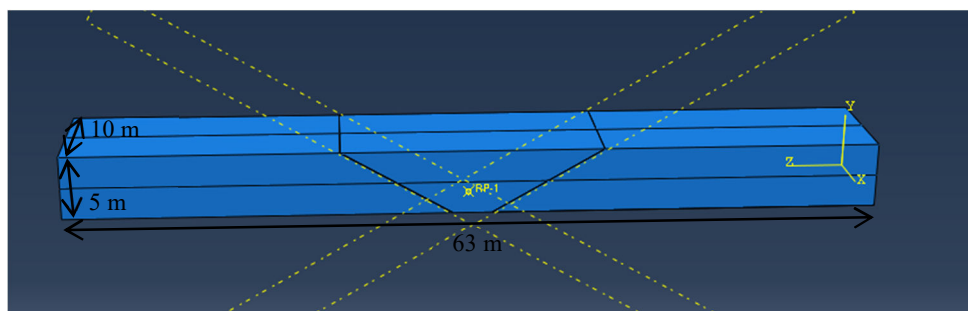
۱-۳-۴ مقدمه

در بیشتر مقالات کار شده لوله تحت تأثیر حرکت دو بلوک خاک بوده و سپس رفتار آن مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که در برخی موارد با پر کردن شکاف بین ۲ گسل توسط خاک و یا بتن، ۳ بلوک ناپیوسته ایجاد می شود. نگارنده مدلی مبنی بر بررسی مدل ۳ بلوکه خاک پیدا نکرده است؛ بنابراین هدف از این مدل بررسی مدل ۳ بلوک خاک است. پارامترهای مورد بررسی در این بخش، پارامترهای بررسی شده در مدل ۲ بلوک خاک است همچنین اثر طول بلوک میانی نیز مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۳-۴ مدل سازی

۱-۲-۳-۴ هندسه مدل

مدل تعریف شده در این قسمت شامل ۲ بلوک خاک با ابعاد $30 \times 10 \times 5$ در طرفین گسل و یک بلوک میانی با ابعاد $3 \times 10 \times 5$ است که به صورت شکل پذیر مدل شده است. لوله نیز به صورت مدل ۳ بعدی و شکل پذیر با قطر $\phi 9144$ و طول 63 m مدل شده است.



شکل (۴-۲۷): نمایش مدل در نرم افزار و نحوه قرارگیری بلوک ها

۲-۲-۳-۴ تعریف مصالح

با توجه به مدل انتخابی، مدل خاک به صورت الاستو پلاستیک و با معیار تسلیم موهر -

کولمب مدل شده است. مشخصات خاک انتخابی به صورت زیر است:

$$\gamma = 1800 \frac{\sigma}{\sigma^3} \quad \sigma = 25 \text{ MPa} \quad = 0.48 \quad \sigma = 0$$

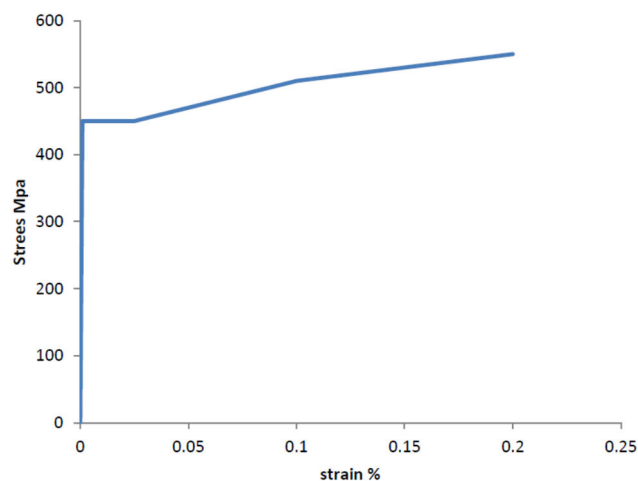
$$\sigma = 0 \quad \sigma = 50 \text{ MPa}$$

فولاد مصرفی از نوع X65 است که نوع رایج در ساخت لوله‌های فولادی خطوط انتقال

انرژی است. مشخصات فولاد و نمودار رفتاری آن به صورت زیر است: (قطر لوله ۰,۹۱۴۴

متر و ضخامت جداره ۱۲,۷ میلی‌متر است.)

$$\gamma = 7850 \frac{\sigma}{\sigma^3} \quad \sigma = 210 \text{ MPa} \quad = 0.3 = 0.3$$



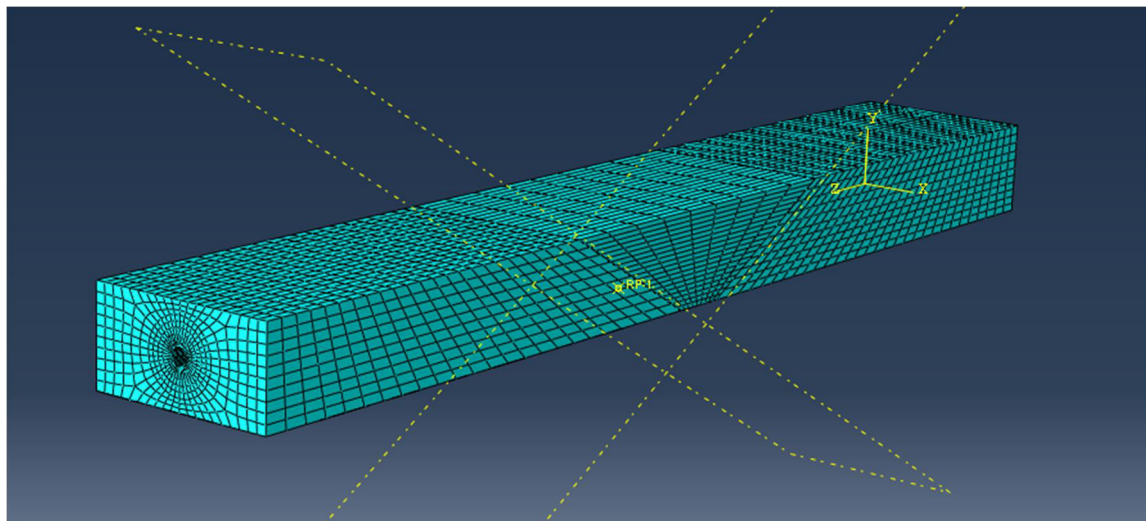
نمودار (۴-۲۸): رفتار فولاد X65

۳-۲-۳-۴ شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

در مدل کارشده سطح داخلی خاک و خارجی لوله مدفون شده در آن به عنوان سطوح تماسی مشخص شده است. ضریب اصطکاک برای لوله فولادی و خاک رسی بین ۰,۲ تا ۰,۴ تعریف می شود که در این مدل این ضریب ۰,۳ تعریف شده است.

گسل در مدل کارشده از نوع معکوس است بنابراین شرایط به گونه ای تعریف شده که توانایی بازسازی مدل حرکتی این گسل را داشته باشد. صفحات خارجی در مدل در راستای افق محدود شده اند همچنین ابتدا و انتهای لوله نیز حرکات صفحات خود را دنبال می کنند. در این مدل بلوک خاک با المان های C3D8R مدل شده است. همچنین برای مدل لوله از المان های S4R استفاده شده است.

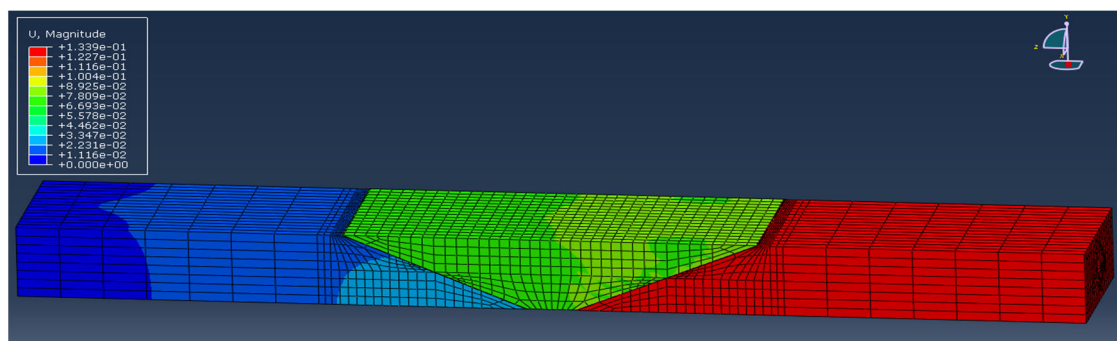
همچنین مقطع لوله به ۲۹ المان تقسیم شده است. المان‌ها در محدود نزدیک به گسل ریز تر از فواصل دور از گسل در نظر گرفته شده‌اند. المان بندی بلوک خاک و لوله به صورت شکل ۴-۲۹ است.



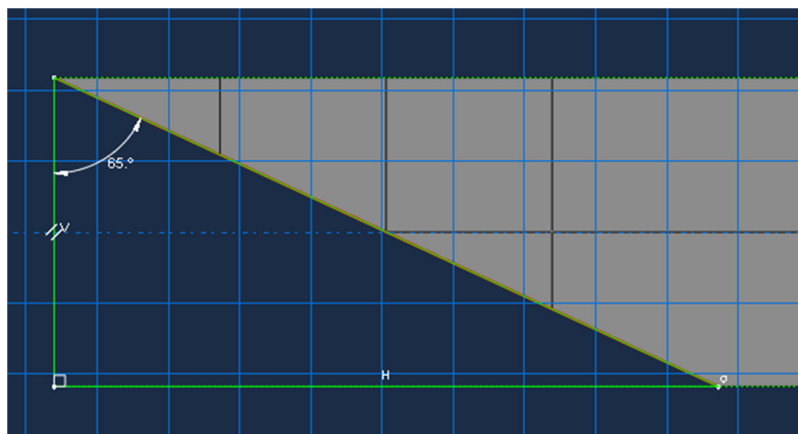
شکل (۴-۲۹): مش بندی در مدل ۳ بلوکه

بررسی اثر زاویه گسل

در این قسمت زاویه بین صفحه گسل با صفحه عمود بر خط لوله مورد تغییر قرار گرفته است. زاویه‌های بررسی شده ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۶۵ درجه است. همچنین جابجایی گسل در راستای افق به میزان ۱۳ سانتی‌متر است. جابه‌جایی به یک بلوک اعمال شده و همه شرایط برای آرایش‌های مختلف در این قسمت یکسان است و فقط زاویه تغییر کرده است. طول پاشنه بلوک میانی ۳ متر و در آزمون‌ها ثابت است. طول لوله نیز ۶۳ متر است.

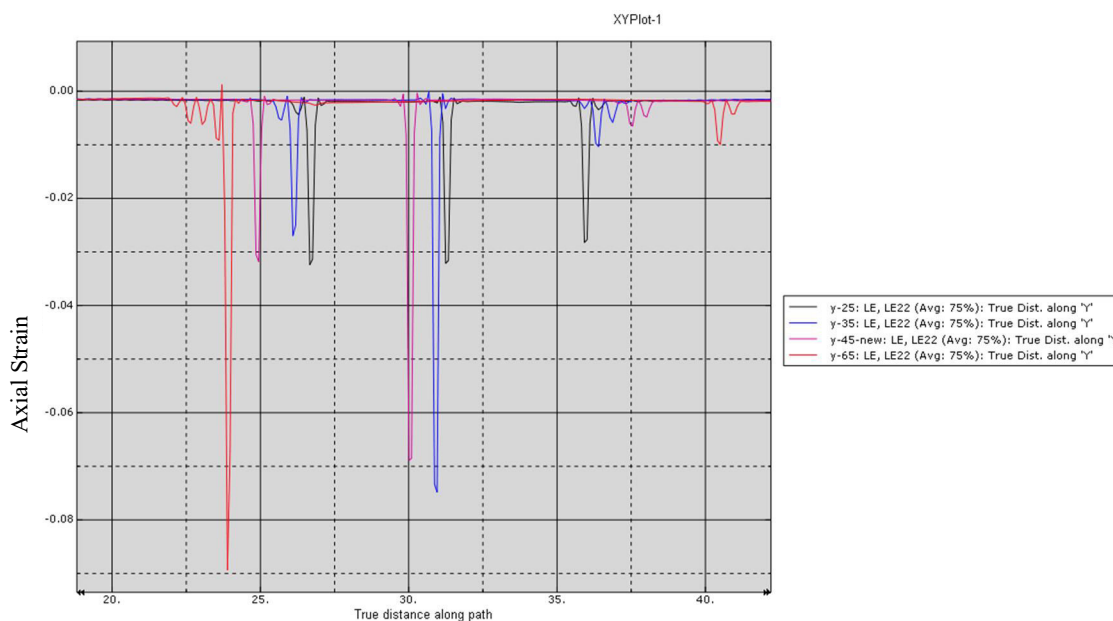


شکل (۴-۳۰): اعمال جابه‌جایی به یک بلوک از بلوک‌های کناری



شکل (۴-۳۱): نمایش اندازه زاویه مورد بررسی در بلوک میانی

در انتها برای هر مدل کرنش در راستای طول لوله برحسب طول لوله و یا فاصله از ابتدای لوله رسم شده است. (مسیر رسم کرنش محوری سمت فشاری لوله است). نتایج به صورت شکل ۴-۳۲ است:



نمودار (۴-۳۲): مقایسه نتایج کرنش محوری در لوله حاصل از بررسی زاویه‌های مختلف در بلوک میانی

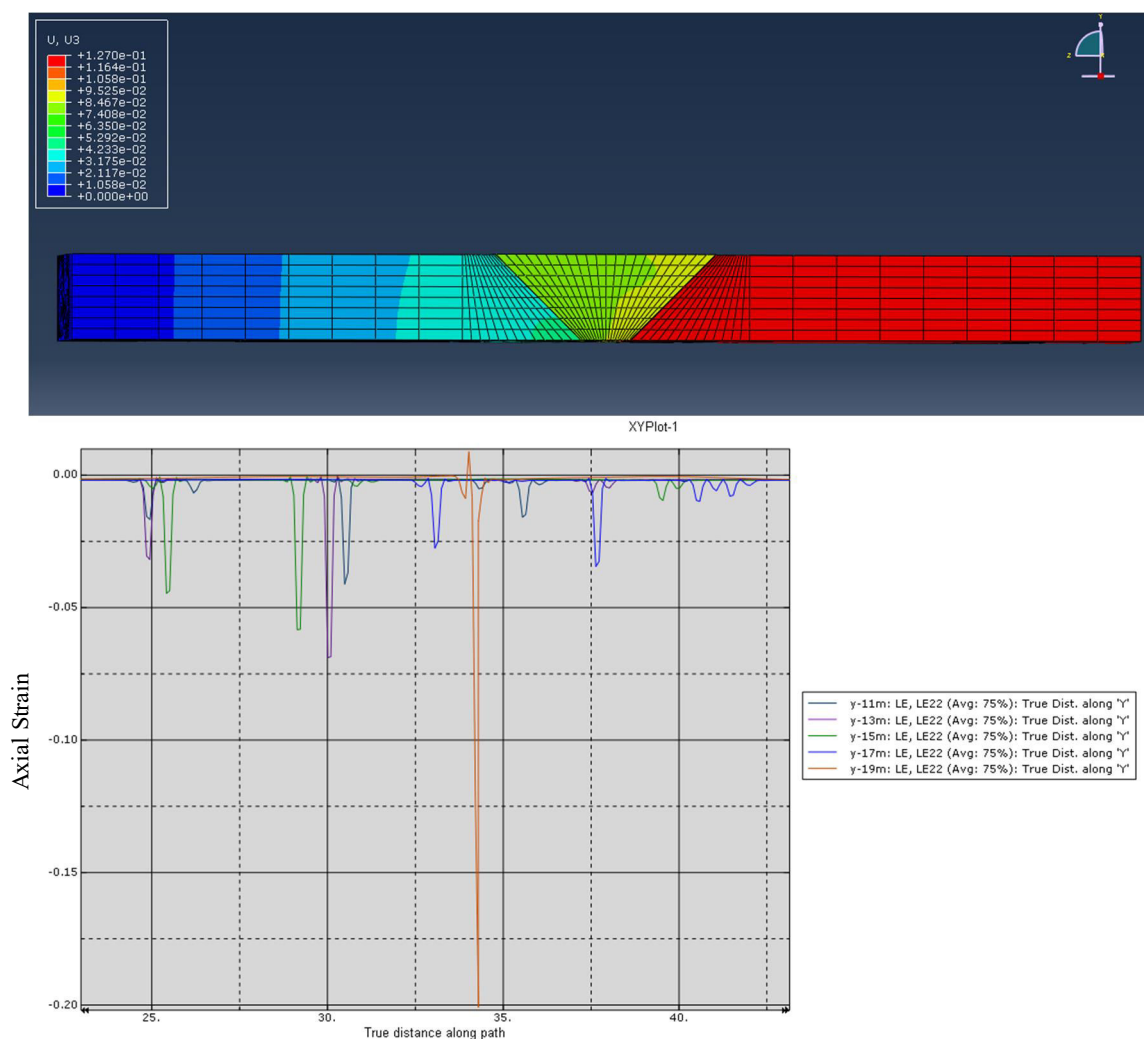
با توجه به طول لوله و بلوک‌ها، در زاویه ۴۵ درجه صفحه گسل در فاصله ۲۷,۵ متری از ۲ سمت لوله قرار دارد. به عبارتی در فواصل ۲۷,۵ و ۳۵,۵ از یک سمت لوله قرار دارند. در زوایای برابر یا کوچک‌تر از ۴۵ درجه در ۳ نقطه لوله وارد محدوده پلاستیک شده و کمانش می‌کند. ۲ قسمت در طرفین گسل و یک قسمت در بلوک میانی واقع شده است. در این حالت افزایش زاویه گسل، باعث افزایش فاصله ۲

کمانش در بلوک میانی و بلوک ثابت می‌شود؛ اما در زاویه بیشتر از ۴۵ درجه کمانشی در بلوک میانی رخ نمی‌دهد و برگ‌ترین کمانش در بلوک متحرک ایجاد می‌شود.

همچنین با افزایش زاویه در تمامی حالات، اختلاف کرنش‌ها در نقاط لوله بیشتر می‌شود. بیشترین کرنش در زوایای کمتر از ۴۵ درجه در بلوک میانی رخ می‌دهد.

بررسی اثر طول بلوک میانی

این حالت نیز به بررسی طول صفحه بالایی بلوک میانی می‌پردازد. در تمامی مدل‌ها زاویه صفحه گسل و طول بلوک‌های ۲ طرف ثابت فرض شده است و تنها بلوک میانی دچار تغییر شده است. طول بررسی شده برای بلوک میانی ۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۱ و ۹ متر است.

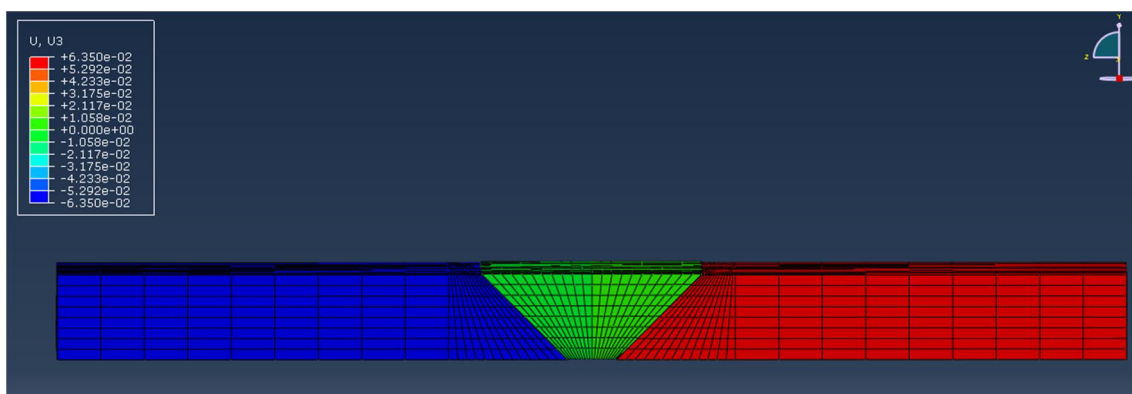


نمودار (۴-۳۳): میزان جابه‌جایی بلوک‌ها و نتایج حاصل از بررسی طول مختلف بلوک میانی

پس از تحلیل هر مدل نمودار کرنش در راستای طول لوله برای سمت تحت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در نمودار ۴-۳۳ آورده شده است.

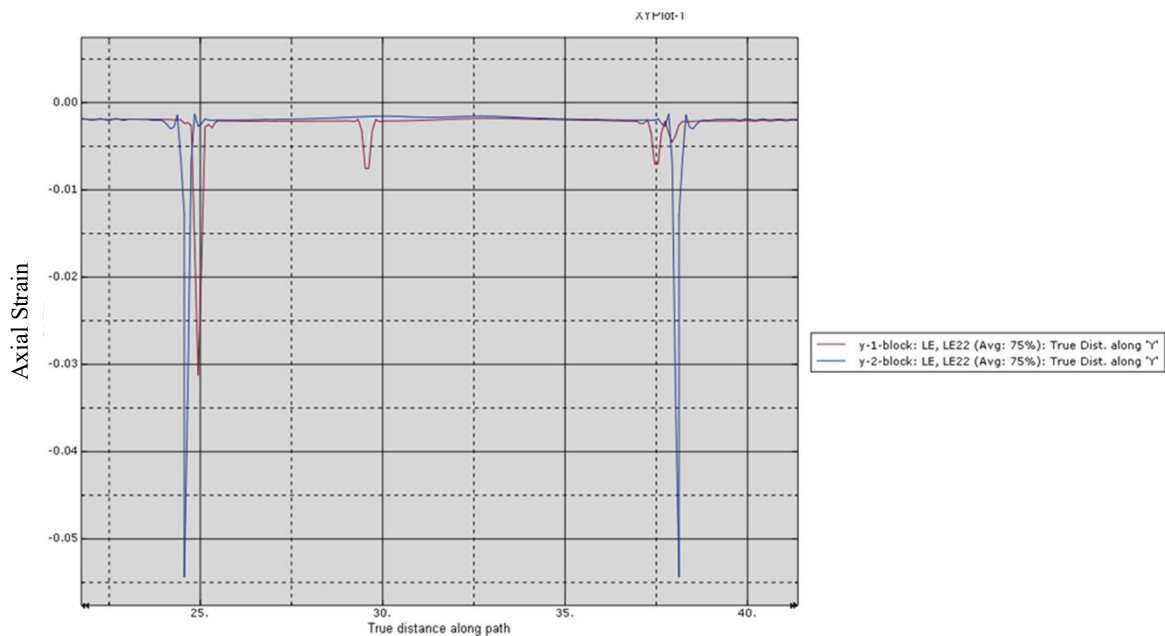
مقایسه اعمال جابه‌جایی به یک بلوک با ۲ بلوک

در این حالت تمام شرایط برابر شرایط اولیه مدل بوده شرایط اعمال جابه‌جایی فرق کرده است. در حالت اول یک بلوک کناری به صورت ثابت تعریف شده و تمام جابه‌جایی به بلوک کناری دیگر اعمال شده است اما در حالت دوم جابه‌جایی نصف شده و به صورت قرینه به هر دو بلوک کناری وارد شده است. جابجایی نسبی هر دو بلوک در انتها حدود ۱۳ سانتی‌متر است. زاویه گسل ۴۵ درجه بوده و طول لوله ۶۳ متر است. خروجی‌ها برای رسم نمودار کرنش محوری برحسب طول لوله در سمت فشاری لوله گرفته شده است. طول بلوک میانی در قسمت میانی بلوک (محل عبور لوله) ۸ متر است.



شکل (۴-۳۴): نمایش اعمال جابه‌جایی به صورت قرینه به هر دو بلوک کناری

همان‌طور که در نمودار ۴-۳۳ مشهود است هنگام اعمال جابه‌جایی به ۲ بلوک شرایط قرینه است بنابراین نمودار تغییر شکل هم به صورت قرینه تشکیل شده است. در این حالت در بلوک میانی کمانشی صورت نمی‌گیرد و کرنش محوری ماکزیمم در نزدیکی گسل و در ۲ بلوک کناری است؛ اما در حالت اعمال جابه‌جایی به یک بلوک، لوله در هر ۳ بلوک کمانش می‌کند؛ اما در این حالت میزان کرنش‌ها بسیار کمتر از حالت قرینه است.



نمودار (۴-۳۵): مقایسه نتایج حاصل از اعمال جابه‌جایی به ۲ بلوک

بررسی اثر نوع خاک

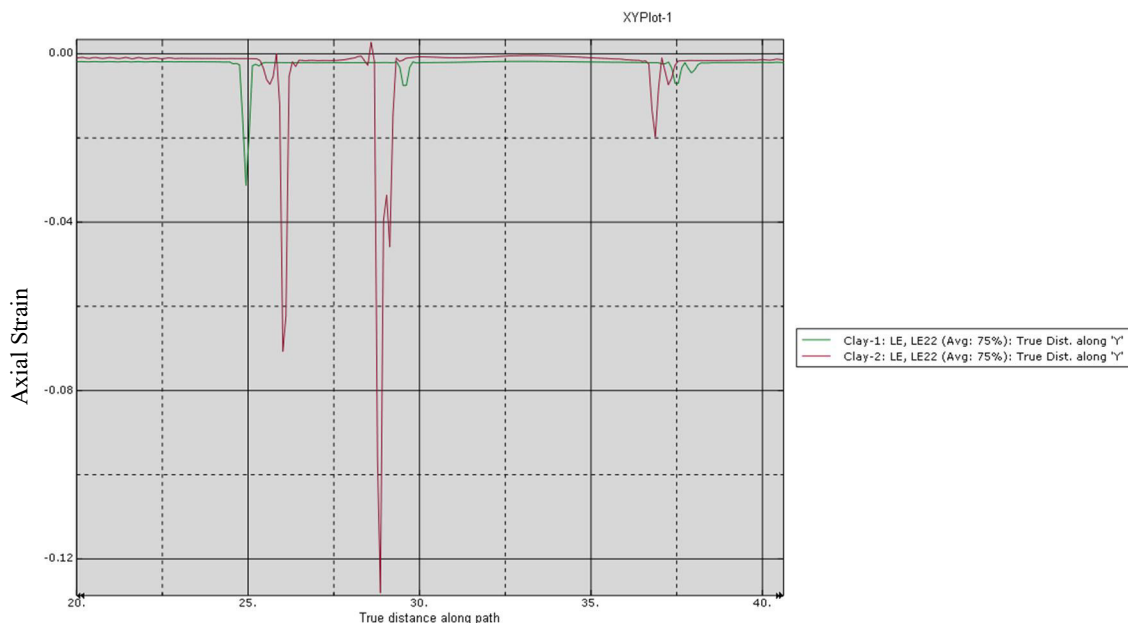
پارامتر متغیر در این بخش مشخصات مکانیکی ۳ بلوک خاک است. دو نوع خاک رس سست و متراکم

با خصوصیات زیر به هر ۳ بلوک تعلق گرفت.

جدول (۴-۳۶): مشخصات مصالح مصرفی در مدل شماره ۲

خاک	وزن حجمی	مدول	ضریب	زاویه اصطکاک	چسبندگی
		الاستیسیته	پواسون	داخلی	
رس سست	1800 Kg/m ³	25 MPa	0.48	0	50 KPa
رس متراکم	1800 Kg/m ³	100 MPa	0.48	0	200 KPa

بقیه مشخصات در هر ۲ مدل یکسان است. نتایج به صورت نمودار ۴-۳۷ است:

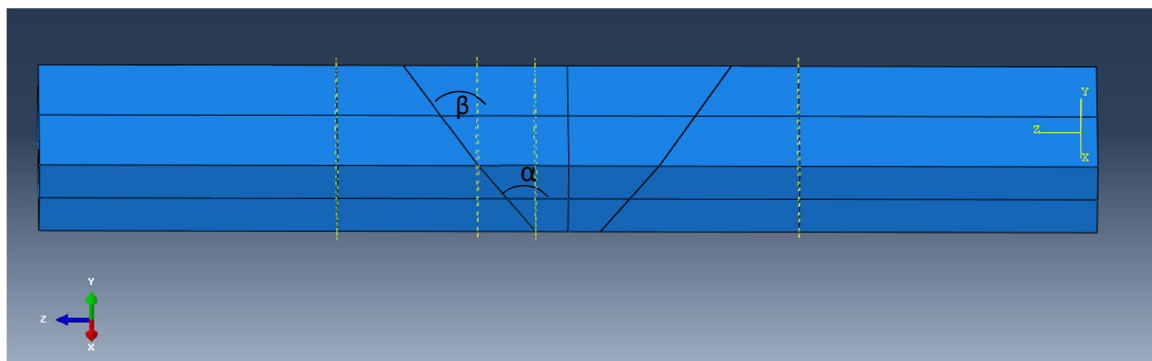


نمودار (۴-۳۷): بررسی اثر نوع خاک بر کرنش محوری در راستای لوله

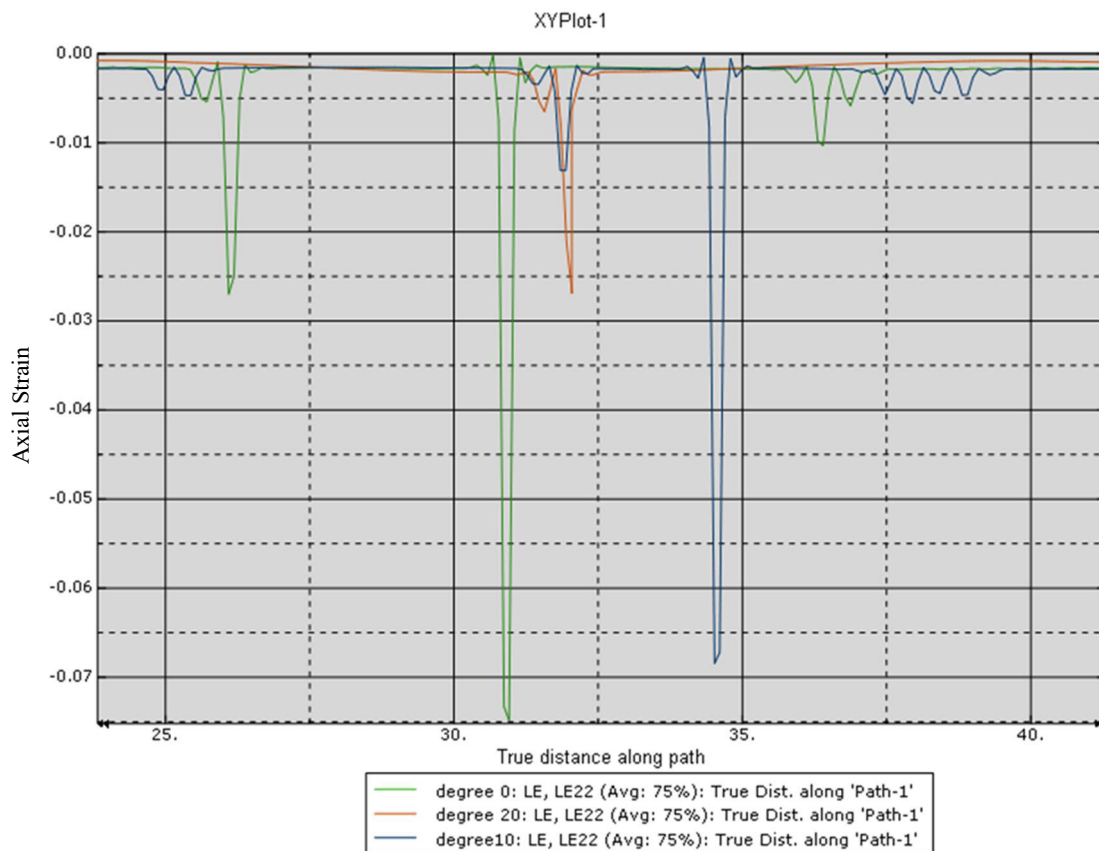
بررسی اثر زاویه تقاطع لوله با گسل

در این قسمت صفحه $X-Y$ در نقطه تقاطع با گسل و خط لوله، حول محور Y دوران می‌کند. دوران β درجه به معنی عمود بودن صفحه $Z-X$ بر صفحه $X-Y$ است. زاویه دوران در شکل زیر با عنوان β نام‌گذاری شده است. همچنین برای ایجاد نیروی بالابرنده در بلوک وسط، شیب ۲ بلوک (α) در تمامی مدل‌ها ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است.

زوایای بررسی شده برای پارامتر β بوده و مقادیر ۰، ۱۰ و ۲۰ درجه را شامل می‌شود.



شکل (۴-۳۸): نمایش زوایای α و β در بلوک میانی مدل شماره ۳



نمودار (۴-۳۹): بررسی اثر زاویه β بر کرنش محوری در لوله فولادی

در نمودار بالا مقادیر کرنش‌های طولی لوله در جابه‌جایی ۱۲٫۵ سانتی‌متری گسل در راستای طول لوله آورده شده است. با توجه به نمودار با افزایش زاویه تقاطع خط لوله با صفحه گسل، مقادیر بیشینه کرنش‌های لوله کاهش پیدا می‌کند و در زاویه ۲۰ درجه کرنش پلاستیک و درنهایت کمانش فقط در بلوک میانی رخ می‌دهد.

فصل پنجم

۵-۱ مقدمه

زلزله با آسیب بر سازه‌های روزمینی و مدفون باعث ایجاد خسارات در مقیاس کوچک و بزرگ می‌شود. در موارد زیست‌محیطی این خسارات به‌سختی قابل‌ترمیم است و تأثیرات آن تا مدت‌ها به‌جا می‌ماند. خطوط لوله مدفون حامل مواد ضروری موردنیاز صنایع از جمله پالایشگاه‌ها است. آسیب به این خطوط علاوه بر هدر رفت مواد، باعث کاهش بازده و ضرر رسانی به آن صنایع می‌شود. در مواردی این خطوط تأمینان یک منطقه را بر عهده‌دارند و آسیب دیدن آن‌ها باعث قطع آب یا انتشار آلودگی در آب خواهد شد.

عوامل بالا باعث شده پیشگیری از وقوع حادثه و خرابی این شریان‌ها یک امر حیاتی برای خطوط لوله مدفون عنوان شود. این امر می‌تواند با پیش‌بینی رفتار لوله در مواجهه با عوامل آسیب‌رسان و مقام سازی خطوط همراه باشد. در فصل‌های قبل عوامل آسیب‌رسان به این خطوط عنوان شد. همچنین در این تحقیق سعی شد تا پارامترهای آسیب‌رسان موردبررسی قرار گیرد. در انتها نیز حالتی از لوله و گسل که کمتر موردتوجه قرار گرفته بود، بررسی شد. در این حالات جابه‌جایی‌هایی بین ۱۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر به گسل اعمال شد. همچنین بلوک خاک به‌اندازه کافی بزرگ فرض شد تا توانایی بازسازی شرایط مسئله را داشته باشد.

۵-۲ نتیجه‌گیری

بررسی پارامترهای بیان‌شده در فصل‌ها قبل و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل، با یکدیگر منجر نتیجه‌گیری موارد زیر شد:

قرارگیری ۲ لوله به‌صورت افقی نسبت به حالت عمودی، باعث کاهش تغییر شکل لوله‌ها خواهد شد. در این موارد در حالت یکسان بودن لوله‌ها، فاصله لوله‌ها از یکدیگر باید در کمترین حالت خود باشد. در موارد قرارگیری ۲ لوله به‌صورت عمودی، فاصله لوله‌ها از یکدیگر بر عملکرد لوله‌ها تأثیری ندارد.

در صورتی که تعداد ۳ لوله و یا بیشتر موجود باشد، اولویت قرارگیری لوله‌ها ابتدا به صورت افقی و پس از آن به صورت مثلثی است. این حالت‌ها باعث کاهش تغییر شکل لوله نسبت به حالت قرارگیری لوله به صورت عمودی است.

در حالت‌هایی ۳ بلوک خاک ایجاد می‌شود. این حالت می‌تواند به صورت مصنوعی ایجاد شده و یا به صورت طبیعی (وجود بلوک خاک با مشخصات مکانیک متفاوت و یا شکاف در ۲ سمت خود) وجود داشته باشد. در این حالت‌ها کاهش زاویه شیب گسل، باعث توزیع یکنواخت‌تر تغییر شکل‌ها در لوله می‌شود.

در موارد ۳ بلوکه مصنوعی، با انتخاب طول بلوک مناسب (در مدل شماره ۳ برابر ۱۹ متر) می‌توان تغییر شکل لوله را در آن بلوک و در یک بخش متمرکز کرد.

در مواردی که ۲ بلوک کناری به صورت قرینه حرکت کنند، تغییر شکل لوله‌ها به صورت قرینه و برابر خواهد بود، در غیر این صورت تغییر شکل‌ها در بلوک متحرک بیشتر از ۲ بلوک دیگر است. افزایش تراکم و سختی خاک در خاک‌های رسی، باعث افزایش تغییر شکل در لوله می‌شود.

در موارد ۳ بلوکه، افزایش زاویه تقاطع لوله با گسل در شیب یکسان، باعث کاهش تغییر شکل لوله می‌شود.

۵-۳ پیشنهادها

تحقیقات انجام شده در مورد خطوط لوله مدفون بسیار محدود است و نمی‌تواند گویای تمامی حالات و احتمالات آسیب به خطوط مدفون باشد. از طرفی تازگی موضوع باعث شده تا در هر مرحله تحقیقات کامل‌تر شده و حالت‌های جدیدتری مورد بررسی قرار گیرد. از حالت‌هایی که می‌توان در موضوعات آینده استفاده کرد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

اثر مصالح مختلف در مدل کردن لوله در خطوط لوله مدفون مورد بررسی قرار گیرد.

تفاوت خطوط لوله پیوسته با خطوط لوله ناپیوسته مدل سازی شود و رفتار آنها در نزدیکی گسل تحلیل گردد.

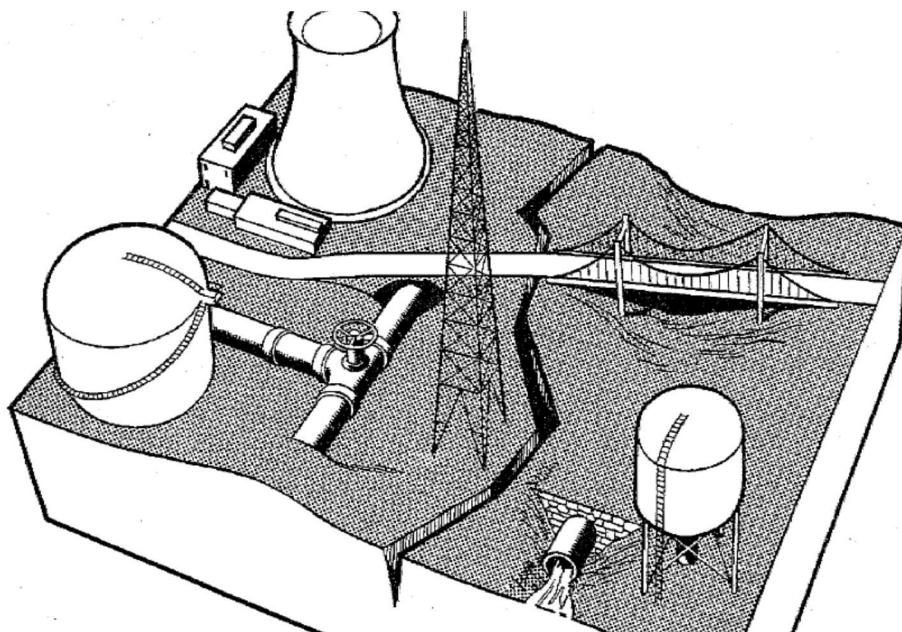
وجود اتصالات لوله در نزدیکی گسل مورد مطالعه قرار گیرد.

اثر وجود خم و یا تغییر مسیر لوله در نزدیکی گسل نیز می تواند بررسی شود.

لایه بندی مختلف خاک در خطوط لوله مدفون مدل سازی شده و تحلیل شود.

اثر خستگی و گسیختگی در اثر بارگذاری سیکلی در خطوط لوله مدفون نزدیک به گسل مورد بررسی قرار گیرد.

پیوست ۱ - اشکال



شکل (۱-۱): شریان‌های حیاتی



شکل (۲-۱): لوله آسیب‌دیده طی زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن (۵۹)



شکل (۳-۱): زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان و تغییر شکل بزرگ سطح مقطع لوله (۶۰)



شکل (۴-۱): فوران آب ناشی از شکست لوله آب در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج

منابع

منابع

۱. منشی‌زاده نائین، حسینی نیا س. (۱۳۹۵)، پایان‌نامه ارشد: "مطالعه عددی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی
۲. حسینی‌م، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "ارزیابی رفتار لوله‌های مدفون در خاک (شبکه فاضلاب شهری) بر اثر زلزله"، دانشگاه آزاد شهرکرد
۳. شوشتری، خواجوی ر، گندمکار س. (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل لرزه‌ای لوله‌های مدفون گاز"، مرکز تحقیقات لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴. شاداب فرم، "پروژه مقاوم‌سازی سامانه‌های ابرسانی شهرستان قزوین در برابر زلزله"، دانشکده عمران، دانشگاه شهید عباسپور
۵. وثوقی فرح، (۱۳۸۳)، "بهسازی لرزه‌ای شبکه‌های تأسیساتی و سامانه‌های لوله‌کشی"، کنفرانس زلزله دانشگاه شهید باهنر کرمان
6. C. Lazarte, (1996), Ph.D. thesis: "The response of earth structures to surface fault rupture", University of California at Berkeley
7. Desmod TP, Power MS, Taylor CL, Lau RW, (1995), "Behavior of large-diameter pipeline at fault crossings". ASCE, TCLEE 1995(6):296–303.
۸. عطرچیان م، مهاجرش، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد: "مدل‌سازی عددی اثر گسل بر روی لوله‌های مدفون در خاک"، دانشگاه آزاد تهران مرکز
9. M. J. O'Rourke, L. R.-L. Wang, G. Castro, S. Singh, R. Pikul, and N. Centola, (1978), "Earthquake response of buried pipeline, in Selected references on seismic behavior of buried pipelines"
10. T.K. Datta, (1999), "Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review", Nuclear Engineering and Design 192 - 271–284
11. P. Vazouras, S. A. Karamanos, and P. Dakoulas, (2010), "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 30, pp. 1361-1376

۱۲. عطرچیان م، مهاجرش، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی عددی اثر گسل بر روی لوله های

مدفون در خاک"، دانشگاه آزاد تهران مرکز

۱۳. خواجه احمد عطاری ن، نیکخو ع، خدابنده لو ع، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: "پدیده اثر گسلش

معکوس در خطوط لوله انتقال گاز مدفون"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و

فرهنگ

۱۴. احمدی ج، راستی ر، نانکلی ع، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "بررسی رفتار لرزه ای لوله های فولادی

مدفون انتقال گاز در انواع خاک"، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان

۱۵. میرزا گل تبار روشن ع، عبدلی ن، عظیمی پور غ، (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد: "بررسی رفتار

خطوط لوله مدفون در خاک ناشی از جابجایی بزرگ و حرکت گسل"، دانشکده فنی و

مهندسی، دانشگاه آزاد تفت

۱۶. خباز تمیمی م، (۱۳۸۴)، "بررسی آسیب پذیری سامانه های خطوط لوله مدفون"، اولین

همایش زلزله و سبک سازی، دانشگاه قم

۱۷. راستی، ر، (۱۳۹۱)، "طراحی لرزه ای و محاسبه آسیب پذیری لوله ها"، جزوه درسی دکتر راستی

، دانشگاه صنعت آب و برق

18. Takada, S., Liang, J., Li, T., (1998) "Shell-mode response of buried pipelines to large fault movements", Structural engineering, JSCE; Vol. 44A: 1637-1646.

۱۹. معماریان ح. (۱۳۸۸)، "زمین شناسی برای مهندسين" مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، تهران

۲۰. مشخصات فنی عمومی کار های خطوط لوله آب و فاضلاب شهری، نشریه شماره ۳۰۳

۲۱. نادر زاده ا، (۱۳۷۴)، "زلزله ۱۷ ژانویه کوبه، ژاپن و درس هایی برای ایران"، معاونت فنی و

عمران شهرداری تهران

22. S. Sun and S. Shien, (1983), "Analysis of Seismic Damages to Buried Pipelines in Tangshan Earthquake," Earthquake behavior and safety of oil and gas storage facilities ,buried pipelines and equipment, PVP-77. New York: American Society of Mechanical Engineers, pp. 365-7

23. Cajina, A., (1973) "Managua earthquake and its effects on the water supply system" *pro earthquake engineering Res* CA, vol2, PP768-790
۲۴. رجیبپور ع، (۱۳۶۰)، پایان نامه ارشد: "برآورد احتمالاتی برای ارتقای ایمنی لرزه‌ای لوله‌های مدفون"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
۲۵. مدنی ح، (۱۳۷۷)، "زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک"، مؤسسه انتشارات جهاد دانشگاهی
26. Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D. and Kouretzis, G.P. (2007). "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings." *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, pp. 200-211.
27. M. Liu, Y.-Y. Wang, and Z.-f. Yu, (2008) "Response of pipelines under fault crossing," in *Proceedings, international offshore and polar engineering conference*, Vancouver, BC, Canada
28. Novak, M., Hindy, A., (1980), seismic analysis of underground Tubular structures, *proc. seventh World conf. Earthquake Eng*, Volume. 8, pp. 287-294.
29. Earthquake Engineering Research Institute. Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17. EERI Special Earthquake Report, 1999.
30. "American Lifeline Alliances, 2005, Guidelines for design of buried steel pipes", New York, American society of civil engineering.
31. Gresnigt AM. Plastic, (1986), "design of buried steel pipes in settlement areas", *HERON* 1986;31(4):1-113.
32. T. Kobayashi, Nakane, H., Suzuki, N., and Ishikawa, M., (1989), "Parametric Study on Flexibility of Buried Pipeline Subject to Large Ground Displacement," *Proceedings of the Second U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, Buffalo, New York, Technical Report NCEER-89-0032, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York. pp. 348-362
33. N. M. Newmark and W. J. Hall, (1975), "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement," in *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*
34. Kennedy, R.P, Chow, A.W. and Williamson, R.A. (1977). "Fault movement effects on buried oil pipeline." *Journal of Transportation Engineering*, Vol.103, pp.617-633.

35. W. Ramberg, W. R. Osgood, and U. S. N. A. C. f. Aeronautics, (1943), "Description of Stress-strain Curves by Three Parameters" vol. 902: National Advisory Committee for Aeronautics
36. Wang, L.R.L and Yeh, Y.A., (1985), "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement." Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics., Vol.13, pp.75-96.
37. P. Vazouras, S. A. Karamanos, and P. Dakoulas,(2007), "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 30, pp. 1361-1376
38. "ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. Differential ground movement effects on buried pipelines. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems", 1984.
39. D. S. Simulia,(2012), "Abaqus 6.12 documentation," Providence, Rhode Island, US
40. Roudsari, M.T., Hosseini, M., (2011), "Using neural network for reliability assessment of buried steel pipelinenetworks subjected to earthquake wave propagation", Journal of Applied Sciences, Volume. 11, pp. 3233-3246.
41. Wong, L. R. L; O'Rourke, M, J;R.R.,(1979), "Seismic Vulnerability Behavior and Design of Buried Pipelines", Tech. No. 9(SVBDVPS), Dept. of Civil Eng R.P.I, Troy,N.Y
42. L. Zhao, C. Cui, and X. Li,(2010), "Response analysis of buried pipelines crossing fault due to overlying soil rupture," Earthquake Science, vol. 23, pp. 111-116
43. S. Joshi, A. Prashant, A. Deb, and S. K. Jain,(2011), "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 31, pp. 930-940
44. P. Vazouras, S. A. Karamanos, and P. Dakoulas,(2012), "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 41, pp. 164-180
45. X. Xie, M. D. Symans, M. J. O'Rourke, T. H .Abdoun, T. D. O'Rourke, M. C. Palmer, et al.,(2013), "Numerical modeling of buried HDPE pipelines subjected to normal faulting: a case study", Earthquake Spectra, vol. 29, pp. 609-632

۴۶. صدر نژاد س، (۲۹۷۳)، "مبانی نظریه خمیری در خاک"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین
طوسی، تهران

ABSTRACT

Buried structures are always subject to earthquake and fault movement damage. They are more likely to fail as they close to the source of the damage. Damage factors include fault movement, which causes adjacent structures, including buried pipelines, lead to deform or break. Therefore, it is necessary to conduct more detailed studies for evaluation of buried pipe response. Numerical modeling of pipelines by software is one of the ways to study pipe behavior subjected to fault movement. In this research, 3-D strike-slip fault movement has been simulated by ABAQUS. The behavior of steel pipe in clayey type 1 soil has been studied. Also the deformation of the pipeline group together and the interaction of the pipes have been studied. According to the results, burying of the pipes, with the horizontal arrangement, reduces the deformation of the cross sections. Also, under certain condition, burying the pipe lines with a triangular arrangement can prevent buckling. Increasing the D / t ratio in the pipes increases the cross-section deformation and, if the D / t ratio is different in the pipes, by burying the pipe with the highest D / t ratio as the first pipe - directed to fault move- the fault, it can reduce other pipes deforming.

KEYWORDS

ABAQUS, Numerical modeling, dynamic analysis, buried pipe line, fault movement



Faculty of Civil Engineering
M.Sc Thesis in Geotechnical Engineering

**Dynamic analysis of buried pipelines subjected to fault
movement**

By: Khashayar khazaei

Supervisor
Dr Reza Naderi

September 2019