

مطالعه حالت‌های تغییر شکل خطوط لوله مدفون تحت جابجایی ماندگار زمین در محل گسل فعال

محسن عقابی

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

مهدی خوش وطن*

کارشناس ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۵/۰۸/۲۵

چکیده

رفتار لوله‌های مدفون تحت جابجایی گسل موضوعی پیچیده است. در زلزله‌های گذشته جابجایی ۲/۱ و ۳ و ۴ متر گسل گزارش شده است. مرور تحقیقات نشان می‌دهد، شناخت حالت‌های خرابی لوله تحت جابجایی‌های بزرگ گسل، یک چالش است. در این مقاله، تاثیر پارامتر ضخامت لوله، بر رفتار لوله در تقاطع لوله و گسل بررسی شده است. رفتار لوله با تمرکز بر جابجایی‌های بزرگتر از ۱ متر گسل، مورد بررسی قرار گرفته است. با تحلیل دینامیکی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک و لوله با نرم‌افزار المان محدود ABAQUS شبیه‌سازی انجام شده است. ابعاد مدل خاک و لوله و خصوصیات مصالح در تمامی نمونه‌های تحلیل، ثابت بوده و مقدار جابجایی گسل (۰/۲ تا ۳ متر) و ضخامت لوله (از ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر) پارامترهای متغیر مقاله حاضر است. برای دو متغیر مقدار جابجایی گسل و ضخامت لوله تحلیل انجام گرفته است. مقدار حداکثر کرنش محوری و حالت‌های تغییر شکل لوله تحت جابجایی گسل مورد بحث قرار گرفته است. همچنین، اثر ضخامت لوله و مقدار جابجایی گسل بر مقدار کرنش جداره لوله در تحلیل عددی در نتایج آورده شده است. در جابجایی کمتر از ۱ متر، تغییر شکل لوله شبیه به حرف S بوده و کمانش موضعی در لوله رخ می‌دهد. در جابجایی از ۱/۵ متر و بیشتر تغییر شکل لوله شبیه حرف Z است و چروکیدگی در لوله رخ می‌دهد. در جابجایی بیشتر از ۱/۵ متر، تغییر شکل لوله بصورت اعوجاج و چروکیدگی است. در جابجایی بیشتر از ۱ متر با افزایش ضخامت لوله، کرنش کاهش می‌یابد. تغییر ضخامت لوله، می‌تواند حالت خرابی لوله را تغییر دهد.

کلید واژگان: جابجایی گسل، ضخامت لوله، حالت خرابی لوله، تغییر شکل لوله

۱. مقدمه

به استناد گزارش تعدادی از زلزله‌های مخرب رخ داده در جهان، خطوط لوله مدفون همواره در معرض عوامل آسیب‌رسانی مانند: تغییر شکل دائمی زمین و انتشار امواج زمین‌لرزه قرار دارند. تغییر شکل‌های دائمی زمین منجر به گسترش جانبی به علت روانگرایی، حرکت گسل، زمین لغزش و نشست لرزه‌ای می‌شود. [۴-۱]

خطوط لوله فولادی، یک گزینه اصلی برای انتقال گاز از برای مسیرهای طولانی است. در چند دهه اخیر استفاده از لوله‌های با قطر بالا در انتقال نفت و گاز استفاده می‌شود. عبور لوله از مناطق مختلف با خاک‌ها و محیط زیست پیچیده، لوله را در معرض آسیب‌های گسترده و متنوعی قرار می‌دهد. از میان عمده آسیب‌های مرتبط، عبور لوله از گسل فعال یکی از خطرناک‌ترین خطرات برای لوله‌های مدفون نفت و گاز است [۵]

در زلزله‌های سان فرانسیسکو (۱۹۰۶) و (۱۹۷۱) با بزرگ‌های گشتاوری (۷٫۸) و (۶٫۶) آسیب زیادی به مخازن و خطوط لوله مدفون وارد آمد. در یک مورد جابجایی خاک در محل تلاقی گسل با لوله (۲٫۵) متر بود [۴]. در زلزله نورتریج (۱۹۹۴) با بزرگای گشتاوری (۶٫۷) در حدود ۱۰۰۰ شکست و خرابی در لوله مشاهده شد [۶]. در زلزله چی چی (۱۹۹۹) با بزرگای گشتاوری (۷٫۷) نزدیک به ۸۰۰۰ کیلومتر از خطوط لوله توزیع آب به شدت آسیب دید و ۲۰۰ شکست در لوله‌های گاز رخ داد، جابجایی گسل تا ۴ متر گزارش شد [۷]. زلزله کوبه (۱۹۹۹) با بزرگای گشتاوری (۶٫۹) خرابی وسیعی در لوله‌ها رخ داد و منجر به آتش‌سوزی بدلیل نشت گاز از لوله‌های گاز شهری و قطع آب حدود ۱ میلیون نفر شد، در مواردی گسل حدود ۲٫۱ متر جابجایی در تلاقی با لوله داشت [۸]. در زلزله آلاسکا (۲۰۰۲) طول گسلش حدود ۳۵۰ کیلومتر بود و در ۸ مکان لوله در محل جابجایی گسل بود [۹].

با مروری بر آسیب زلزله‌ها بر روی خطوط لوله می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حرکت گسل ناشی از زلزله یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی لوله‌ها است. در ادامه به مروری از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

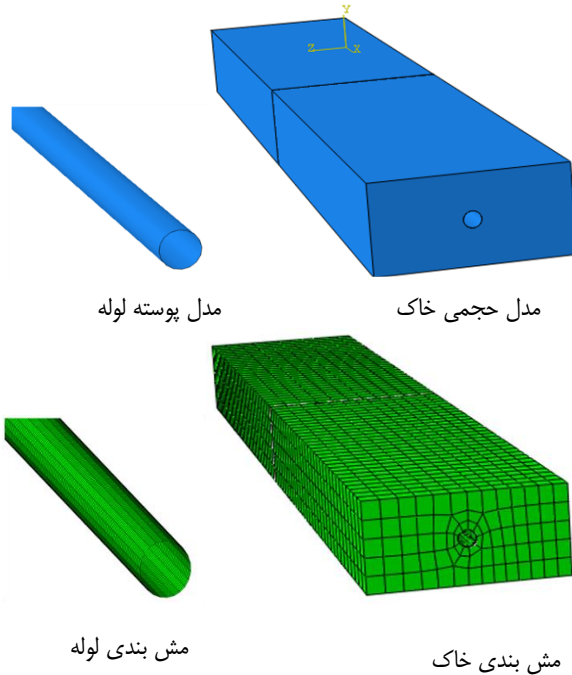
۲. پیشینه تحقیق

کارامیتوس و همکاران (۲۰۰۷) با نظریه تیر بر بستر الاستیک روشی برای محاسبه کرنش‌های خمشی و محوری در دو طرف لوله بدست آوردند [۱۰]. لیو و همکاران (۲۰۰۸) با المان پوسته و به روش المان محدود توزیع محوری کرنش لوله را با استفاده از مدل کارامیتوس و همکاران (۲۰۰۷) بدست آوردند و در شبیه‌سازی اعمال کردند [۱۱]

در سال ۲۰۱۰ مدلسازی عددی خطوط لوله فولادی تحت حرکت گسل امتداد لغز توسط وازوراس و همکاران انجام شد. زاویه گسل و خط لوله بصورت عمودی فرض شد. اثر جنس خاک را بر پاسخ لوله سنجیدند. نتیجه‌گیری کردند، در جابجایی ۰/۶۷ متر در خاک رس چسبنده کماتش در لوله رخ می‌دهد [۱۲]. ساویدیس و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی مدل کندی به روش المان محدود نتیجه‌گیری کردند که روش کندی و همکاران (۱۹۷۷) در مقایسه روش المان محدود مقادیر کرنش حداکثر بیشتری را نشان می‌دهد [۱۳]. در تحقیق جوشی و همکاران (۲۰۱۱) پاسخ لوله تحت حرکت گسل معکوس بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد؛ در گسل‌های معکوس انتخاب امتداد موازی با گسل می‌تواند ظرفیت خط لوله را افزایش دهد و انتخاب خاک دانه‌ای نرم در اطراف و روکش سخت روی لوله باعث عملکرد بهتر لوله می‌شود [۱۴]. تعدادی از محققین المان پوسته را برای مدلسازی خط لوله، المان با قابل اعتماد و با دقت بالا معرفی کردند [۱۵] وازوراس و همکاران (۲۰۱۲) اثر زاویه عبور لوله از گسل برای زوایای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. با تمرکز بر اثر جابجایی و مقادیر زاویه بین لوله و گسل نتیجه‌گیری کردند در زوایای منفی عبوری لوله از گسل کماتش موضعی عامل اصلی خرابی است و فشار داخلی اثر مثبتی و چند درصدی بر تغییر شکل لوله دارد [۱۶]. ابولمالی و همکاران (۲۰۱۳) آزمایشات مقیاس کاملی را برای مطالعه اثر خاکریز بر پاسخ لوله انجام دادند [۱۷]. ویجی ویکرم و همکاران (۲۰۱۴) آزمایشاتی برای بررسی خروج از محوریت لوله در خاک، با هدف برآورد پاسخ لوله تحت جابجایی خاک انجام دادند [۱۸].

تعدادی از محققین روشهای تحلیلی قوی را برای تحلیل لوله تحت حرکت گسل پیشنهاد داده‌اند. از نمونه این تحقیقات می‌توان تیترو و همکاران (۲۰۱۰) را بر شمرد [۱۹] آنها یک مدل عددی سه بعدی با دو نوع گسل برای تحلیل تنش و کرنش را بررسی کرد.

شد. بدین منظور از الگوریتم تماس^۱ برای شبیه سازی سطح مشترک بین خاک اطراف لوله و سطح بیرونی لوله استفاده شده است. از الگوریتم اصطکاکی^۲ با ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شده است. ماهیت شبه‌استاتیکی^۳ حرکت گسل باعث شد که از تحلیل شبه استاتیکی استفاده شده است. برای اعمال جابه‌جایی، یک بلوک خاک ثابت و بلوک دیگر در جهت Z جابجا شد. جابه‌جایی از طریق گره‌ها بر یک بلوک خاک و انتهای لوله اعمال شد. جابجایی از ۰/۲ تا ۳ متر بصورت کنترل شده در خاک و لوله انجام شد و اثر مقادیر جابه‌جایی با بررسی مقادیر عددی با هم مقایسه شد. با توجه به پارامترهای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت لوله، مقادیر متفاوت ضخامت در لوله و مقادیر مختلف جابجایی گسل، تحلیل‌های نرم افزاری حدود ۸۰ بار انجام شد. شکل ۱ مدل المان محدود خاک و لوله و گسل را نشان می‌دهد [۲۷].



شکل ۱: مدل المان محدود خاک و لوله [۲۷]

۱.۳. المانها و ابعاد مدل لوله و خاک

تحقیقات نشان داده که استفاده از المان پوسته دارای دقت بالایی در مدلسازی تغییر شکل لوله است. به استناد مراجع [۲۸-۱۵-۱۱] المان پوسته دارای دقت بالایی در مدلسازی تغییر

بریدن و همکاران (۲۰۱۴) اندرکنش خاک و لوله را برای لوله‌های انعطاف‌پذیر را بصورت ۳ بعدی و به روش المان محدود با دستگاه سانتیفریوژ تست کردند و نتیجه گرفتند که، پاسخ لوله در روش آزمایشگاهی با روش عددی تفاوت دارد. [۲۰]. آکباس و همکاران (۲۰۱۵) مدلسازی لوله تحت گسلس را برای دو متغیر مقدار جابجایی و طولی از لوله که تاثیر می‌پذیرد از جابجایی گسل انجام دادند و نتیجه گرفتند که کرنش بحرانی در جابجایی حدوداً دو برابر قطر لوله، رخ می‌دهد. منظور از جابجایی بحرانی، جابجایی است که مفاصل پلاستیک در لوله تشکیل می‌شود. [۲۱]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) رفتار خمشی بخشی از خط لوله فولادی را تحت لغزش و جابجایی گسل معکوس بررسی کردند [۲۲]. ژیاوبین و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی حالت‌های خرابی لوله‌های مدفون تحت حرکت گسل معکوس پرداختند. آنها نتیجه گیری کردند حالت خرابی مرحله اول کمانش و در مرحله دوم چروکیدگی است [۲۳]. وازلیوس و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عملکرد مبتنی بر حفاظت لوله‌های تحت حرکت گسل پرداختند [۲۴]. خواجه عطاری و همکاران لوله‌های فولادی تحت گسلس را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه‌گیری کردند که فشار داخلی تاثیر چندانی بر ظرفیت تغییر شکل لوله ندارد؛ به گونه‌ای که بیشینه تغییرات تغییر مکان بحرانی با فشار برای هر دو نوع خاک حدود ۵ درصد است [۲۵].

سنجیدن پاسخ لوله تحت جابجایی‌های بزرگ و تا حدود ۳ متر (با توجه به مقدار جابجایی چند متری گسل در زلزله‌های پیشین) مسئله مهمی می‌باشد. در مقاله حاضر رفتار لوله‌های فولادی تحت جابجایی زمین در محل تقاطع لوله و گسل برای دو پارامتر مقدار جابجایی گسل (۰/۲ تا ۳ متر) و ضخامت لوله (از ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. روش تحقیق و مدلسازی

در پژوهش حاضر، برای مدلسازی رفتار لوله تحت حرکت گسل، از نرم‌افزار المان محدود پیشرفته ABAQUS [۲۶] استفاده شده است. در مطالعه حاضر از اثر ریزش خاک اطراف روی لوله در حین جابجایی گسل صرف نظر شده است و مصالح خاک و لوله همگن فرض شده است. به استناد تعدادی از تحقیقات بدلیل تاثیر ناچیز فشار داخلی خط لوله، متغیر پر و خالی بودن لوله در نظر گرفته نشده است [۲۵-۱۶]. برای تعریف رفتار پلاستیک خاک از مدل الاستو-پلاستیک کامل با معیار گسیختگی موهرکولمب استفاده شده است. از خاک با ترکیب ماسه و رس استفاده شده است. مدلسازی اندرکنش خاک و لوله باید طوری باشد که در سطح مشترک اجازه جدا شدن لوله و خاک اطراف لوله را فراهم کند، با سعی و خطا این امر فراهم

¹ Contact

² Friction

³ Quasi Static

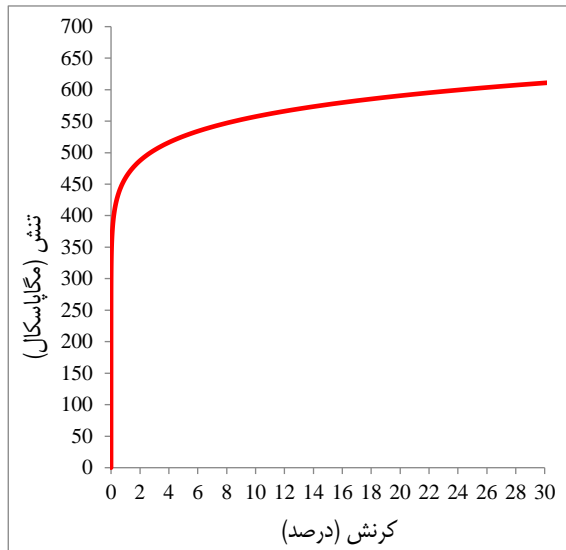
جدول ۲: پارامترهای رامبرگ اسگود لوله فولادی

| پارامتر r | پارامتر n | درجه بندی لوله |
|-------------|-------------|----------------|
| 100 | 10 | گرید B |
| 32 | 15 | x-42 |
| 10 | 9 | x-52 |
| 12 | 10 | x-60 |
| 16/6 | 5/5 | x-70 |

برای تنش تسلیم ۴۴۵ مگاپاسکال خط لوله و رابطه ۱ برای لوله‌های X-60 مقدار ضریب r برابر ۱۲ و مقدار ضریب n برابر ۱۰ بدست می‌آید. با جای‌گذاری معلومات در رابطه ۱ رامبرگ اسگود، رابطه ۲ تنش کرنش لوله فولادی را نشان می‌دهد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{210 \cdot E9} \left[1 + \frac{10}{1+12} \left(\frac{\sigma}{450 \cdot E6} \right)^{12} \right]$$

(۲)



شکل ۲: نمودار تنش کرنش لوله با رفتار رامبرگ اسگود [29]

۲.۳. مدلسازی اندرکنش بین خاک و لوله

در آیین‌نامه شریان‌های حیاتی آمریکا مدل سه بعدی خاک و لوله بصورت شکل ۳ پیشنهاد شده است [۳۳]. سختی فنرهای مورد استفاده در مدلسازی آیین‌نامه شریان‌های حیاتی آمریکا در سه جهت محوری، افقی و عمودی روی لوله قرار می‌گیرند که در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۳].

شکل لوله است. برای مدلسازی خاک از المان حجمی استفاده می‌شود. برای کاهش حجم محاسبات و به استناد [۳۰-۳۲] بطور متداول ابعاد طول، عرض و ارتفاع مدل خاک به ترتیب برابر ۶۰، ۱۰ و ۵ متر در نظر گرفته می‌شود. لوله‌ی انتقال گاز فولادی به قطر خارجی ۰/۹۱۴ متر و ضخامت دیواره بین ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷].

۲.۳. ویژگی مصالح خاک و لوله

ویژگی رفتاری خاک با مدل رفتاری خاک با مدل موهرکولمب مدلسازی شده و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای خاک

| مقدار | پارامتر | ردیف |
|-------------|-----------------------|------|
| ماسه رس دار | جنس خاک | ۱ |
| ۱۸۵۰ | چگالی | ۲ |
| ۲۰ | مدول الاستیسیته (mpa) | ۳ |
| ۳۳/۵ | زاویه اصطکاک | ۴ |
| ۵ | چسبندگی (kpa) | ۵ |
| ۰/۳ | ضریب پواسون | ۶ |

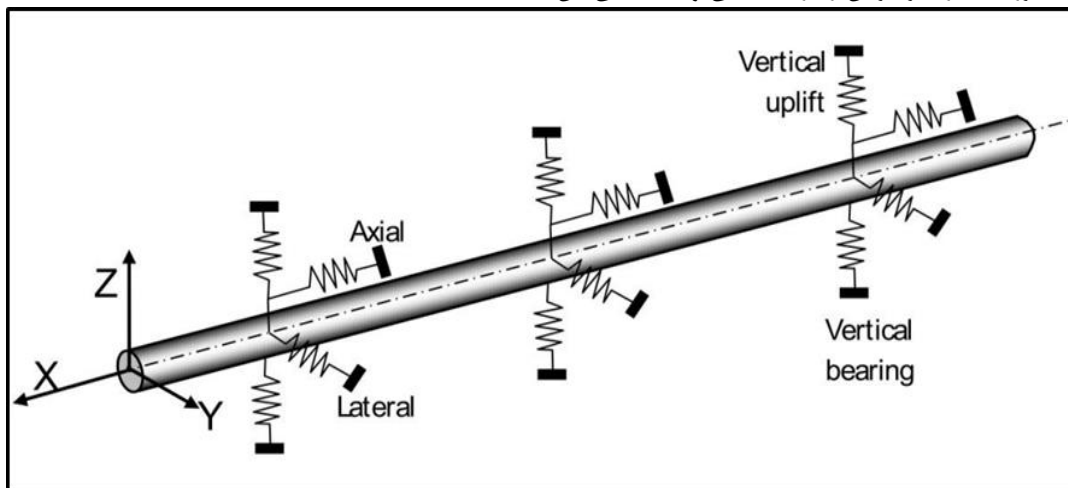
برای لوله مدل رفتاری رامبرگ اسگود مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲ نمودار تنش کرنش لوله با رفتار رامبرگ اسگود نشان داده است [۲۹]. رابطه تنش کرنش لوله فولادی را نشان می‌دهد. در شکل ۲ نمودار تنش کرنش لوله فولادی تحقیق حاضر با فرض رفتار رامبرگ اسگود آورده شده است.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_p} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (1)$$

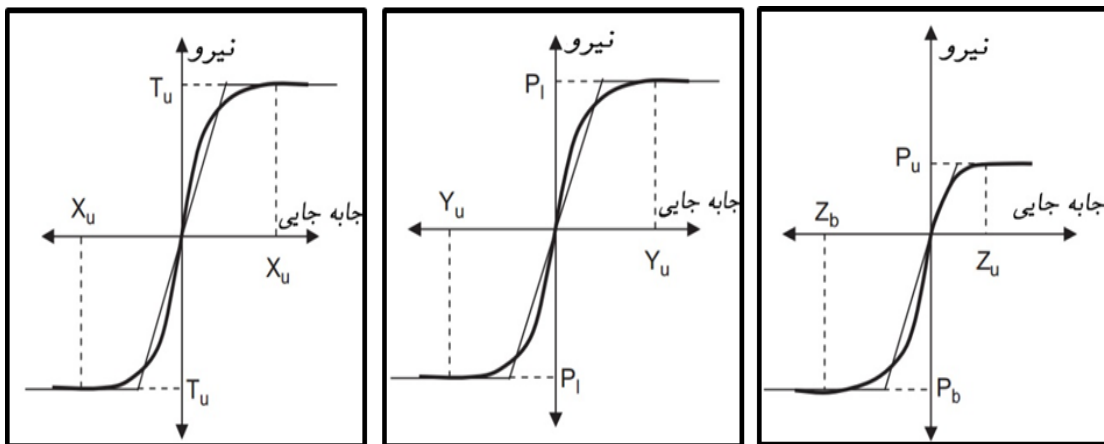
در رابطه ۱: پارامتر E_p مدول ارتجاعی اولیه، σ_y تنش جاری شدن لوله، ε کرنش، σ تنش، n و r پارامترهای رامبرگ اسگود بوده و از جدول ۳ بدست می‌آید.

خط لوله و خاک وجود دارد. با سعی و خطا این امر فراهم شد. از الگوریتم اصطکاکی تماس با ضریب اصطکاک $0/3$ برای شبیه‌سازی سطح مشترک بین خاک اطراف لوله استفاده شده است [۳۰-۳۲].

مدلسازی تماس و اندرکنش خاک و لوله موضوع پیچیده‌ای است. در مدلسازی باید تلاش کرد اندرکنش بین خاک و لوله، رفتار اصطکاک بین خط لوله و خاک، همچنین جدا شدگی خاک از لوله در نظر گرفته شود. با توجه به مطالعات اخیر [۳۲-۳۰-۱۶-۱۲] روشی دقیق برای تماس خاک و لوله، جهت مدلسازی اندرکنش خط لوله و خاک، تحت تاثیر تغییر شکل های بزرگ با در نظر گرفتن رفتار اصطکاکی و جدا شدگی بین



شکل ۳: مدل ایده آل لوله و خاک به استناد آیین نامه شریان های حیاتی آمریکا (۲۰۰۱) [33]



الف) فنرهای محوری (ب) فنرهای افقی (ج) فنرهای عمودی

شکل ۴: رابطه نیرو جابجایی فنرهای خاک به استناد آیین نامه شریان های حیاتی آمریکا [33]

مصالح خاک و لوله تغییر می‌کند. با افزایش میزان جابجایی گسل لوله وارد فاز غیرخطی می‌شود و رفتار پلاستیک در خاک رخ می‌دهد. در تعدادی از مراجع تغییر شکل لوله برای جابجایی گسل بعنوان پارامتر اصلی بررسی رفتار لوله مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲-۲۱-۱۶-۱۲]. عمده تحقیقات مرتبط با لوله و گسل بصورت استاتیکی غیر خطی انجام گرفته است. آنها اثرات اینرسی لوله را در مدلسازی لحاظ نموده‌اند.

۴.۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی

از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای مدلسازی استفاده شده است. بارگذاری بصورت کنترل جابجایی انجام گرفته است. در تحلیل دینامیکی غیر خطی الگوی بارگذاری بصورت تابع کنترل جابجایی و با تابع ramp انجام گرفته است. نحوه در نظرگیری غیر خطی به این صورت است که با اعمال جابجایی گسل بصورت کنترل شده (از $0/2$ تا ۳ متر) رفتار

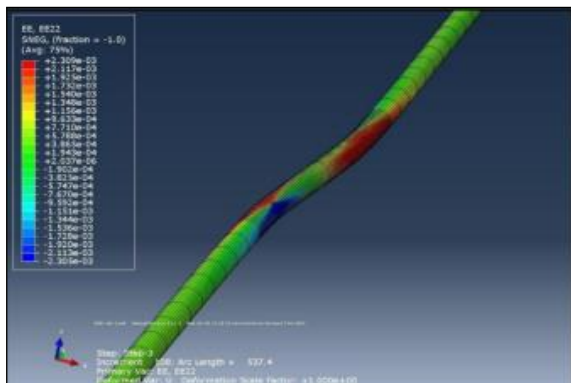
در محیط لوله تعداد مش‌ها ۲۲ المان پوسته در نظر گرفته شد. در جهت محوری لوله مش به طول ۰/۱۳ متر مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع از ۲۵۳۵ المان پوسته برای مش‌بندی لوله استفاده شد.

۴. مقایسه نتایج حاضر با دیگر پژوهش‌ها

در ادامه مقایسه‌ای بین تغییر شکل لوله و مقادیر کرنش محوری ایجاد‌ی در جداره لوله در تحقیق حاضر و تعدادی از منابع دیگر صورت گرفته است.

۴.۱. مقایسه نتایج تغییر شکل لوله

نحوه تغییر شکل لوله در معرض جابجایی گسل عاملی مهم در دقت مدل است. کوچک‌ترین خطا در مدلسازی مانند شرایط تکیه‌گاهی و اعمال جابه‌جایی منجر به تغییر شکل‌های غیر متعارف و جواب‌های اشتباه می‌شود. لذا برای تایید صحت نتایج در جابجایی حدود ۱/۵ متر، تغییر شکل لوله و کرنش‌های کششی و فشاری به وجود آمده در دو طرف لوله مقایسه شده است. شکل ۶ تغییر شکل لوله در مطالعه حاضر و در شکل ۷ تغییر شکل لوله مرجع [۳۱] را نشان داده شده است. در تحقیق حاضر و مرجع [۳۱] تطابق خوبی از نظر الگوی توزیع کرنش‌های فشاری و کششی در لوله وجود دارد.



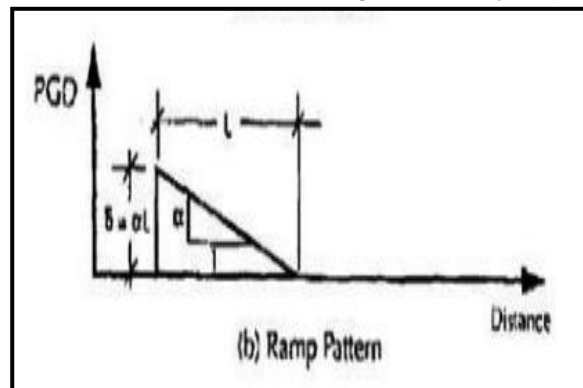
شکل ۶: تغییر شکل لوله در جابجایی ۱/۵ متر در تحقیق حاضر

اما در مقاله حاضر، از تحلیل دینامیکی استفاده شده است. در تحلیل دینامیکی اثرات اینرسی و جرم لوله و خاک در تحلیل لحاظ می‌شود. در تحلیل حاضر اثرات غیرخطی به دو نوع لحاظ شده است:

- غیرخطی بودن رفتار مصالح در نرم‌افزار مدل شده است، خاک با معیار غیرخطی موه‌ر کلمب و لوله با رفتار رامبرگ اسکودود
- غیرخطی بودن تغییر شکل در جابجایی‌های بزرگ (تغییر شکل‌های غیرخطی هندسی)

۳.۵. شرایط تکیه‌گاهی

حرکت گسل از طریق جابجایی تکیه‌گاه‌های یک بخش خاک و لوله بر مدل اعمال می‌شود. درجات آزادی بخش ثابت خاک (در جهت X, Y, Z, گیردار) و بخش ثابت لوله در جهت X و Y مقید می‌شود، تغییر مکان از طریق درجه آزادی در جهت Z به بلوک متحرک خاک و لوله اعمال می‌شود. پروتکل اعمال بارگذاری بصورت خطی و با تابع RAMP انجام شده و در شکل ۵ نشان داده شده است [۵].



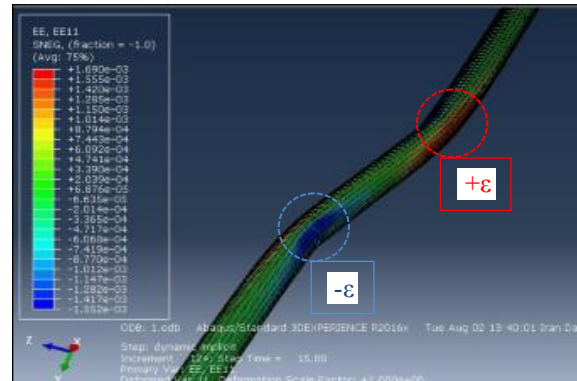
شکل ۵: تابع بارگذاری در مطالعه حاضر [۵]

۳.۵. مش‌بندی

برای مش‌بندی خاک، مدل ۸ گرهی خطی آجری شکل کاهش یافته (C3D8R) با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی^۴ با تغییرشکل‌های بزرگ و از مدل‌های غیرخطی برای مصالح استفاده شده است. مدل المان ۴ گرهی با انتگرال کاهش یافته (S4R) از نوع پوسته، با سطوح تسلیم همگن با تئوری وون میسز^۵ برای لوله استفاده شده است.

⁴ Hour Glass
⁵ Von Misses

تحقیق حاضر با نرم افزار ABAQUS تحلیل Dynamic Implicit غیر خطی، ابعاد $5 \times 10 \times 60$ متر، قطر لوله 0.914 متر از جنس فولاد، جنس خاک ماسه چسبیده، برای مقدار جابجایی ۱ متر گسل و نسبت قطر به ضخامت ۷۰، کرنش 0.013 و در جابجایی ۱ متر و نسبت قطر به ضخامت ۷۶ مقدار کرنش 0.016 بدست آمد. در جابجایی $1/2$ متر و نسبت قطر به ضخامت ۷۶ مقدار کرنش 0.027 بدست آمد اختلاف کرنش در جابجایی ۱ متر با کار وازوراس و همکاران (۲۰۱۰) برای خاک ماسه‌ای نسبت قطر به ضخامت ۷۰ مقدار $1/15$ درصد، برای نسبت قطر به ضخامت ۷۶ اختلاف برابر $1/09$ درصد است. اختلاف کرنش با کار ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) برای نسبت قطر به ضخامت ۷۰ برابر $1/23$ درصد است.



شکل ۷: تغییر شکل لوله در جابجایی $1/5$ متر در مرجع آبکاس و همکاران (۲۰۱۵) [۳۱]

برای صحت‌سنجی مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق حاضر و تعدادی از پژوهش‌های معتبر انجام گرفته انجام شده و در جدول ۳ آمده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تعدادی از مراجع برای جابجایی ۱ متر

| ردیف | پارامتر | وازورس و همکاران (۲۰۱۰) [12] | مقاله حاضر | ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) [1] | وازورس و همکاران (۲۰۱۰) [32] | مقاله حاضر |
|------|-------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| ۱ | نرم افزار | ABAQUS | ABAQUS | ABAQUS | ABAQUS | ABAQUS |
| ۲ | نوع تحلیل | Non-Liner Static | Non-Liner Dynamic Implicit | Non-Liner Static | Non-Liner Static | Non-Liner Dynamic Implicit |
| ۳ | ابعاد مدل (متر) | $60 \times 10 \times 5$ | $60 \times 10 \times 5$ | $60 \times 10 \times 5$ | $60 \times 10 \times 5$ | $60 \times 10 \times 5$ |
| ۴ | جنس خاک | Soft clay | Cohesive sand | Cohesive sand | Sand | Cohesive sand |
| ۵ | جنس لوله | steel | steel | steel | steel | steel |
| ۶ | قطر به ضخامت | 72 | 70 | 72 | 72 | 76 |
| ۷ | جابجایی گسل (متر) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ۸ | کرنش لوله | 0/013 | 0/0131 | 0/0161 | 0/015 | 0/0164 |

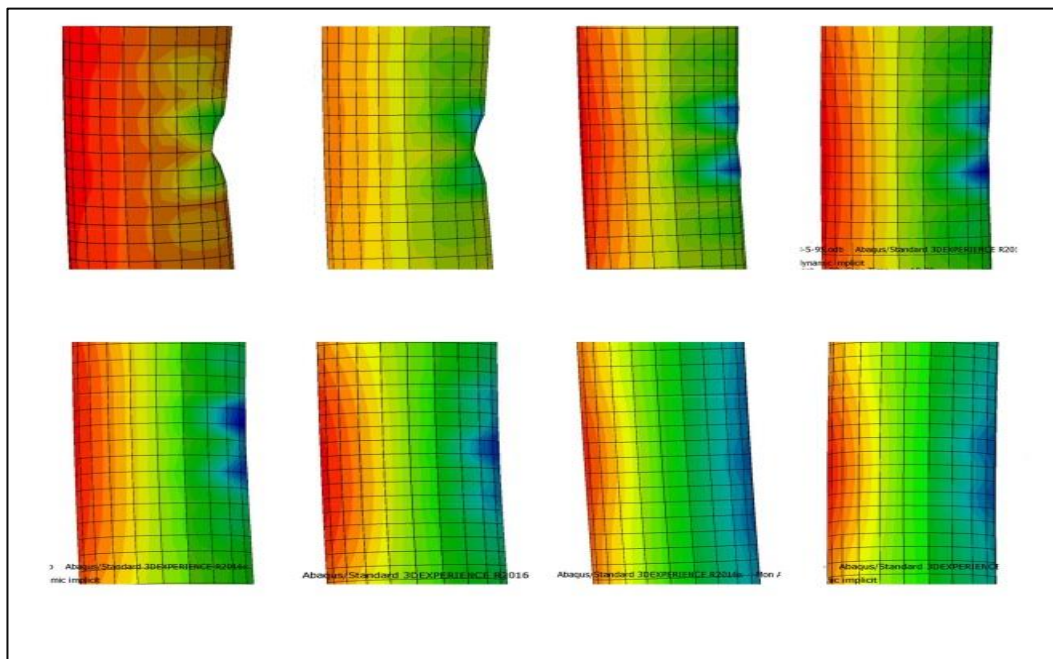
۵. نتایج

گسل است و تنش در اطراف خط گسل بیشتر از دیگر بخش‌های لوله است. خرابی در دو ناحیه در نزدیکی خط گسل رخ می‌دهد.

۵.۱. تاثیر جابجایی گسل

مقدار جابه‌جایی گسل، پارامتری مهم در تعیین نوع و حالت و مقدار خرابی لوله است. در ضخامت ثابت، با افزایش جابه‌جایی تنش و تغییر شکل در لوله افزایش می‌یابد. در شکل ۸ تغییر شکل لوله برای

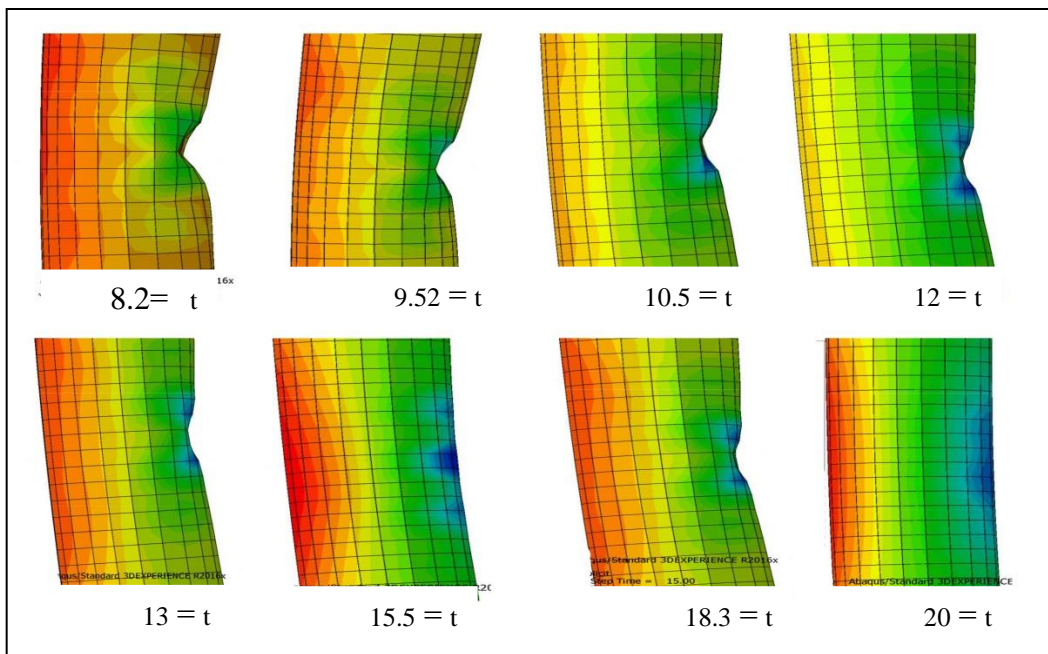
در این بخش، با استفاده از مدل‌سازی عددی بخش قبل، نتایج برای مقادیر جابجایی گسل از ۰/۲ تا ۳ متر و ضخامت ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر خط لوله مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تئوری وون میسر کرنش لوله به ازای مقادیر مختلف جابه‌جایی بدست می‌آید. تحت حرکت گسل برای ایجاد تغییر شکل بزرگ در لوله دو نقطه به وجود می‌آید. حداکثر تنش وون میسر در اطراف آن دو نقطه محتمل در لوله رخ می‌دهد. اغلب مهم‌ترین مکان خط لوله در نزدیکی خط



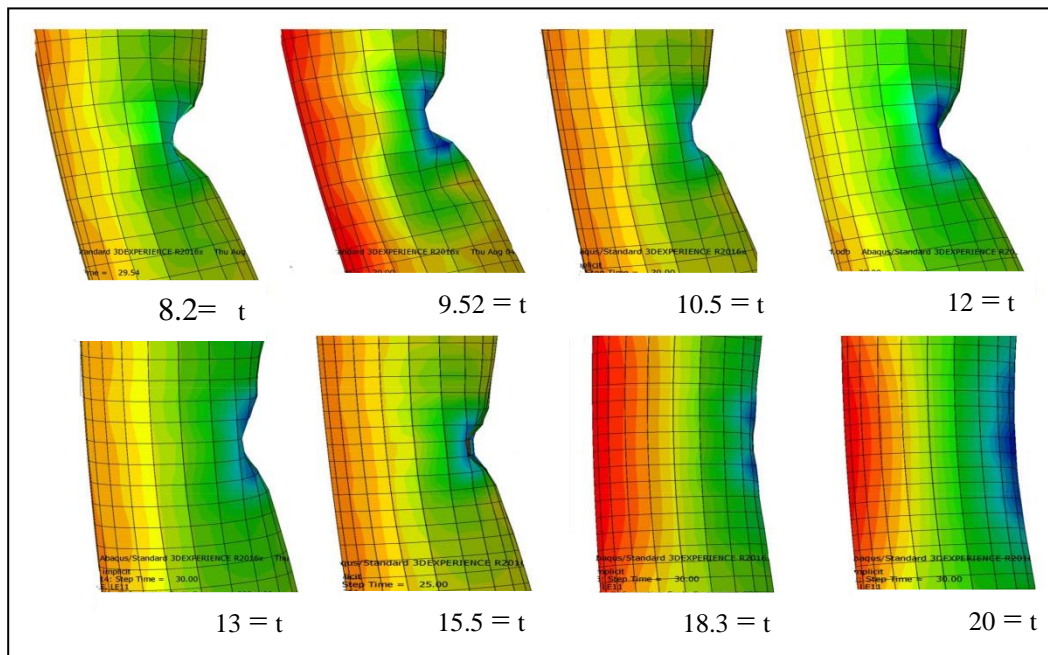
شکل ۸: نمای نزدیک تغییر شکل لوله خط لوله در جابجایی ۱ متر گسل برای ضخامت‌های ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای ضخامت‌های مختلف از ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر لوله، بعد از جابجایی گسل تغییر شکل لوله با توجه به مقدار ضخامت لوله تغییر می‌کند. بعنوان نمونه چروکیدگی لوله در ضخامت ۸/۲ میلیمتر کاملاً مشخص است اما در ضخامت ۲۰ میلیمتر تغییر شکل لوله بصورت کم‌انرژی موضعی در لوله رخ می‌دهد.

جابجایی ۱ متر و ضخامت لوله ۸/۲ تا ۲۰ نشان داده شده است. تغییر شکل لوله برای جابجایی ۱/۵ متر گسل، و ضخامت لوله ۸/۲ تا ۲۰ در شکل ۹ نشان داده شده است. تغییر شکل لوله برای جابجایی ۳ متر گسل، و ضخامت لوله ۸/۲ تا ۲۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمای نزدیک تغییر شکل لوله خط لوله در جابجایی ۱/۵ متر گسل برای ضخامت های ۸/۲ تا ۲۰ میلیمتر

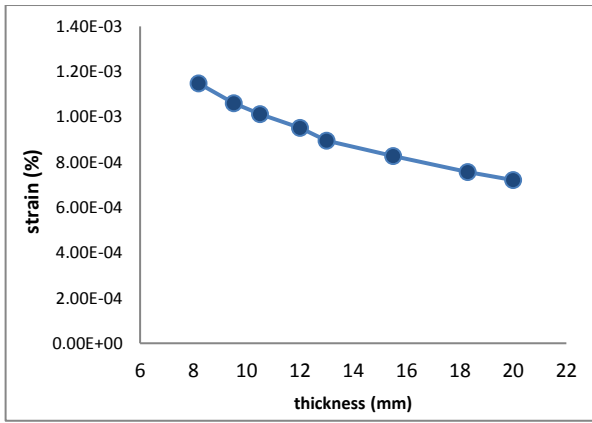


شکل ۱۰: نمای نزدیک تغییر شکل لوله خط لوله در جابجایی ۳ متر گسل برای ضخامت های ۸،۲ تا ۲۰ میلیمتر

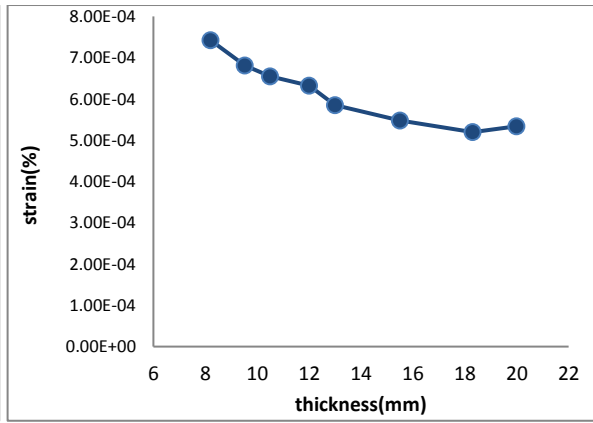
۲،۵. تاثیر ضخامت خط لوله

متر نشان داده شده است. در شکل ۱۳ نمودار مقدار کرنش لوله برای جابجایی ۱ و ۱/۲ متر نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نمودار مقدار کرنش لوله برای جابجایی ۱/۵ و ۲ متر نشان داده شده است. در شکل ۱۵ نمودار مقدار کرنش لوله برای جابجایی ۲/۵ و ۳ متر نشان داده شده است. همانطور که در نمودارها مشخص است، افزایش ضخامت منجر به کاهش کرنش محوری لوله می‌شود.

افزایش ضخامت لوله، اثر مثبتی در رفتار لوله دارد. در جابجایی‌های بزرگ، رفتار لوله غیرخطی می‌شود. با وقوع رفتار غیرخطی، افزایش ضخامت منجر به کاهش کرنش لوله می‌شود. شکل ۱۱ نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۰/۲ و ۰/۴ متر نشان داده شده است. در شکل ۱۲ نمودار مقدار کرنش لوله برای جابجایی ۰/۶ و ۰/۸

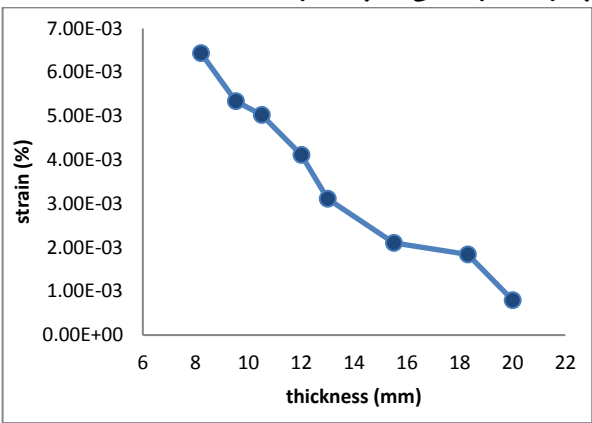


جابجایی گسل: ۰/۲ متر

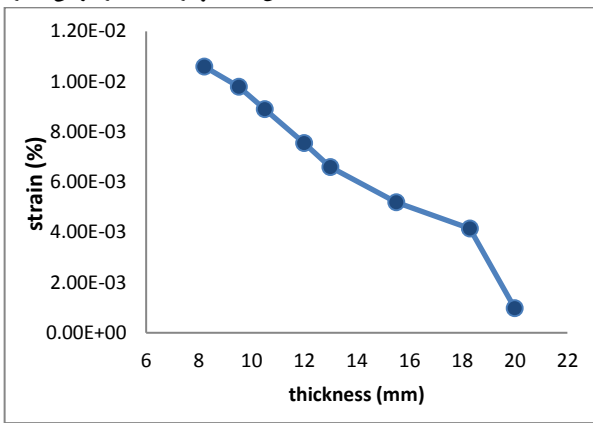


جابجایی گسل: ۰/۴ متر

شکل ۱۱: نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۰/۲ و ۰/۴ متر

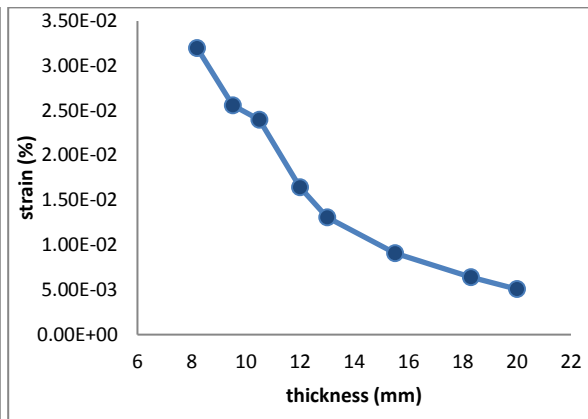
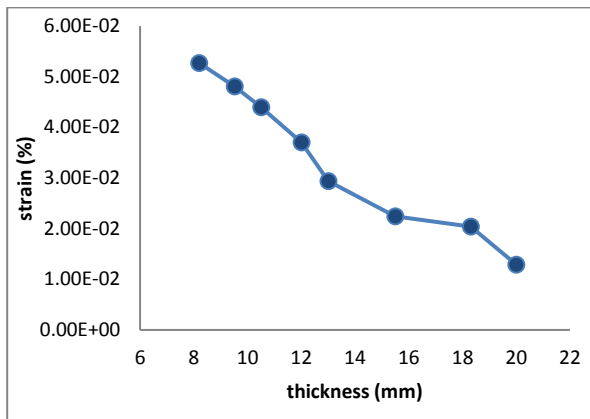


جابجایی گسل: ۰/۶ متر

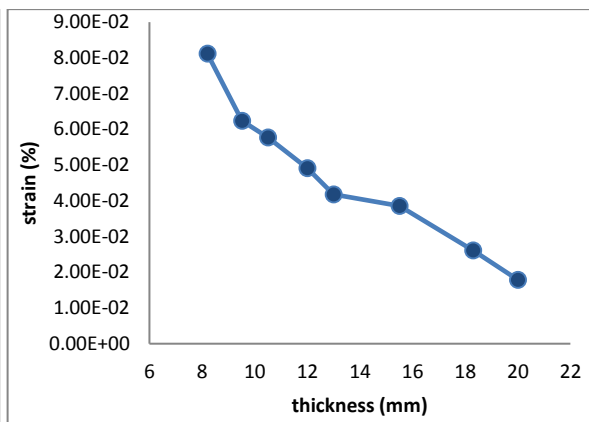
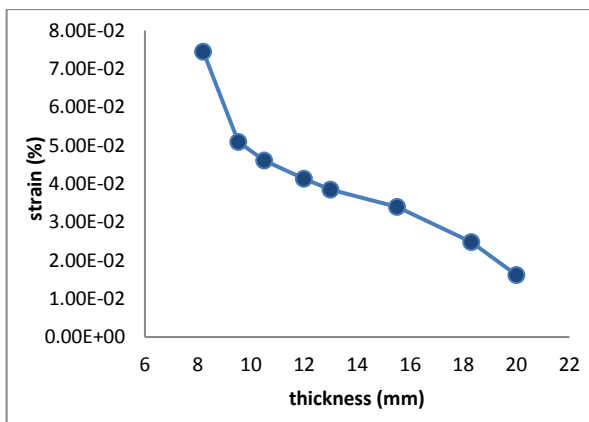


جابجایی گسل: ۰/۸ متر

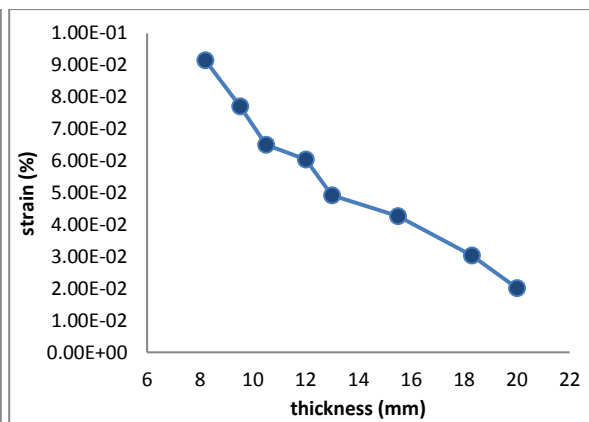
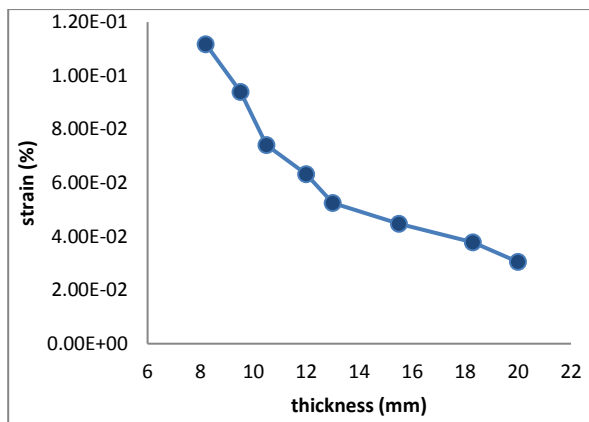
شکل ۱۲: نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۰/۶ و ۰/۸ متر



جابجایی گسل: ۱ متر
 شکل ۱۳: نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۱ و ۱/۲ متر



جابجایی گسل: ۱/۵ متر
 شکل ۱۴: نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۱/۵ و ۲ متر



جابجایی گسل: ۲/۵ متر
 شکل ۱۵: نمودارهای مقدار کرنش جداره لوله برای مقادیر جابجایی ۲/۵ و ۳ متر

- در جابجایی ۱/۵ متر و بیشتر گسل (تا ۳ متر)، حالت خرابی لوله چروکیدگی می‌باشد. حالت خرابی لوله چروکیدگی می‌باشد.
- کرنش لوله برای مقادیر ثابت حرکت گسل، در تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی به هم نزدیک است.
- کرنش فشاری عامل آسیب و خرابی لوله است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه در تابستان ۱۳۹۵ در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام پذیرفت. در اینجا لازم میدانم از همه کسانی که در به انجام رساندن این کار تحقیقاتی بنده را یاری نمودند، مراتب سپاسگزاری خود را اعلام دارم.

مراجع

[۱] عشقی، ساسان. و همکاران. زلزله منجیل رودبار. خرداد ۱۳۶۹. گزارش تحلیلی شماره ۱. تهران پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. ۱۳۷۰.

- [2] China Association of Earthquake Engineering(2008). 2008 M8 Sichuan, China Earthquake, Field Investigation Report..2008
- [3] EERI. The Izmit (Kocaeli), Turkey Earthquake of August 17, 1999. EERI Special Earthquake Report, 1999.
- [4] O'Rourke, M. J., and Liu, X. Response of buried pipelines subjected to earthquake effect, Monograph Series MCEER. 1999.
- [5] O'Rourke, Michael J., and X. Jiu. "Seismic design of buried and offshore pipelines." (2012).
- [6] Anshel J.Schiff. Northridge earthquake lifeline performance and post-earthquake response, Technical council on Lifeline Earthquake Engineering,1995.
- [7] Uzarski J, Arnold C. Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999, Reconnaissance Report. Earthquake Spectra, Professional J EERI 2001;17(Suppl. A).
- [8] The January 17, 1995 Kobe Earthquake, An EQE Summary Report, 1995
- [9] Trans-Alaska Pipeline System Performance in the 2002 Denali Fault, Alaska Earthquake. Douglas G. Honegger, M.EERI, Douglas J. Nyman, M.EERI, Elden R. Johnson, M.EERI, Lloyd S. C.

۳,۵. حالت‌های خرابی لوله تحت جابجایی گسل

با افزایش جابه‌جایی گسل، تغییر شکل لوله بصورت خم شدن لوله است و تغییر شکل در ضخامت‌های بیشتر بصورت حرف S و در ضخامت‌های کمتر حرف لوله شبیه حرف Z می‌شود. زمانی که جابجایی گسل کم است، تغییر شکل لوله صاف و هموار خواهد بود، به عبارت دیگر، حرکت گسل در مقادیر جابه‌جایی کم (کمتر از ۵۷/۵ سانتی متر)، آسیب زیادی به لوله وارد نمی‌کند. اما در مقادیر جابجایی بالا، تغییر شکل های بزرگ در خط لوله بصورت کمانش (در جابجایی ۱ متر) و چروکیدگی در جابجایی ۱/۵ متر) لوله در محل‌های خم شدن خط لوله، از نمای بالای خط لوله مشخص بوده و شبیه به حرف Z می‌باشد.

در اثر حرکت گسل دو نوع کرنش فشاری و کرنش کششی در دو طرف لوله در تقاطع گسل و لوله به وجود می‌آید. عامل خرابی لوله تجمع کرنش‌های فشاری در محل کمانش یافته لوله است. در شکل ۱۷ حالت های خرابی لوله تحت جابجایی مختلف گسل نشان داده شده است.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

- در مقاله حاضر، مطالعه تغییر شکل لوله‌های مدفون تحت حرکت ماندگار زمین در محل گسل انجام شد. تحلیل‌های عددی برای مقادیر مختلف جابجایی از ۰/۲ تا ۳ متر و ضخامت‌های ۸/۲ تا ۲۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج عبارتند از:
- روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS در شبیه‌سازی لوله مدفون تحت حرکت گسل محدودیت عدم در نظر ریزش گرفتن خاک اطراف لوله بعد از جابه‌جایی گسل را دارد.
 - مقدار کرنش بحرانی با جابجایی گسل نسبت مستقیم دارد.
 - تقریباً در اکثر موارد ثابت شد افزایش ضخامت لوله اثری مثبت بر کاهش کمانش موضعی و چروکیدگی جداره لوله و همچنین کاهش تنش در جداره لوله می‌شود.
 - پارامتر تعیین‌کننده تغییر شکل لوله، ضخامت لوله است و پارامتر کنترل‌کننده حالت خرابی لوله، مقدار جابجایی گسل می‌باشد.
 - در جابه‌جایی کمتر از ۱ متر گسل، تغییر شکل لوله شبیه حرف S است.
 - در جابجایی بیشتر از ۱ متر گسل، تغییر شکل لوله شبیه حرف Z است.
 - در جابجایی ۱ متر گسل، حالت خرابی لوله کمانش موضعی می‌باشد.

- Centrifuge and numerical investigations." *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000442, 04014091.2014.
- [21] Uckan, E, B. Akbas. A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings. *Soil Dyn Earthq Eng*;75: 55–65. 2015.
- [22] Zhang, J., et al. "Numerical simulation of buckling behavior of the buried steel pipeline under reverse fault displacement." *Mechanical Sciences* 6.2 (2015): 203-210. 18-21-32-33
- [23] Liu, Xiaoben, et al. "Buckling failure mode analysis of buried X80 steel gas pipeline under reverse fault displacement." *Engineering Failure Analysis* 77 (2017): 50-64.
- [24] Vasileios E. Melissianos□, Dimitrios Vamvatsikos, Charis J. Gantes. "Performance-based assessment of protection measures for buried pipes at strike-slip fault crossings" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 101 (2017) 1–11
- [۲۵] خواجه احمد عطاری، نادر. و همکاران. بررسی رفتار لرزه ای لوله های مدفون فولادی تحت اثر گسلش نرمال. *مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس دوره شانزدهم، شماره ۱، فروردین ۱۳۹۵.*
- [26] ABAQUS 6.14 Analysis user's Guide, Vol.4, Dassault Systèmes Simulia Corp. 2014
- [۲۷] خوش وطن؛ مهدی. عقابی؛ محسن؛ تعیین پاسخ لرزه ای خطوط لوله مدفون فولادی تحت حرکت گسل امتداد لغز؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ۱۳۹۵.
- [28] Takada S, Hassani N, Fukuda K. A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake Eng Struct Dyn*; 2001.30:1243–57.
- [29] Ramberg, W. and Osgood, W., Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics 1943, 28p.
- [30] Vazouras P, Karamanos SA, Dakoulas P. Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements. *Soil Dyn Earthq Eng* 2015 ;72: 48–65.
- [10] Karamitros Dk, Bouckovalas Gd, Kouretzis Gp. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*;27:200–11.2007.
- [11] Liu, M., Wang, Y.-Y., and Yu, Z. "Response of pipelines under fault crossing." *Proc., Int. Offshore and Polar Eng. Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers, Mountain View, CA.2008.*
- [12] Vazouras P, Karamanos SA, Dakoulas P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*;30(11):1361–76. 2010.
- [13] Savidis S., Schepers W., Nomikos S., Papadakos G., "Design of a Natural Gas Pipeline Subjected to Permanent Ground Deformation at Normal Faults: A Parametric Study on Numerical vs", *Semi-Analytical Procedures . 5th International Conference on Earthquake Geotechnical.2011.*
- [14] Joshi. S et al. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*;31: 930–940.2011.
- [15] X. Xie, M. D. Symans, M. J. O'Rourke, T. H. Abdoun, T. D. O'Rourke, Numerical modeling of buried HDPE Pipelines subjected to strike-slip faulting. *J. Earthq. Eng.* 15(2011), 1273-1296.
- [16] Vazouras P, Karamanos SA, Dakoulas P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dyn Earthq Eng*;41: 164–180. 2012.
- [17] Abolmaali, A., and Kararam, A. "Nonlinear finite-element modeling analysis of soil-pipe interaction." *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000196, 197–204.2013.
- [18] Wijewickreme, D., and Weerasekara, L. "Analytical modeling of field axial pullout tests performed on buried extensible pipes." *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000388, 04014044.2014.
- [19] Trifonov, Oleg V. "Numerical stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active strike-slip faults with an emphasis on fault modeling aspects." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 6.1 (2014): 04014008.
- [20] Bryden, P., El Naggar, H., and Valsangkar, A. "Soil-structure interaction of very flexible pipes:

- [31] Akbas B, O'Rourke M, Uckan E, Shen J, Caglar M. Performance-based design of buried steel pipes at fault crossings. In: Proceedings of the ASME 2015 pressure and vessels & piping conference PVP45662-2015; July 2015, 19-23
- [32] Zhang L. Zhao X. Yan X. Yang X. A new finite element model of buried steel pipelines crossing strike-slip faults considering equivalent boundary springs. Soil Dyn Earthq Eng; 2016; 123:30-44
- [33] American Lifelines Alliance-ASCE. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, July 2001. with addenda through 2005

The Study of Deformation Modes of Buried Pipelines under the Permanent Land Displacement at the Site of an Active Fault

Mohsen Oghabi

Assistant Professor, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran

Mehdi Khoshvatan

Master of Science in Civil Engineering, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran

Abstract

The behavior of the buried pipes under the fault displacement is a complex issue. In the past earthquakes, fault displacement of 2.1, 3 and 4 meters have been reported. A review on the literature shows that understanding failure modes of buried pipelines under big fault displacement is considered as a challenge. In this paper, the objective is to investigate the influence of the thickness parameters of the pipe on pipe behavior at pipe intersection and fault. The behavior of the pipe is studied focusing on fault displacements greater than 1 meter. Using finite element ABAQUS software, the simulation was performed through dynamic analysis regarding to pipe-soil interaction. Pipe and soil Dimensions and material properties of the soil and pipe are fixed in all analyzed samples and, the fault displacement (0.2 to 3 meters) and the pipe thickness (from 8.2 to 20 mm) are variable parameters of this article. An analysis has been conducted for the two variables (fault displacement and the thickness of the pipe). Maximum axial strain values and pipe deformation modes under fault displacement are discussed. Likewise, the influence of pipe thickness and the amount of fault displacement on the value of strain of the pipe wall is indicated in numerical analysis in the result. In the displacement of less than 1 meter, the pipes are like the letter S and local buckling occurs in the pipeline. In the displacement of 1.5 meters and more, they are like the letter Z, and pipe deformation and wrinkling occur in the pipeline. In the displacement of more than 1.5 meters, distortion, and wrinkling pipe is deformed. In the displacement of more than 1 m, the strain decreases with increasing pipe thickness. Through the change of the pipe thickness, the pipe failure mode changes.

Keywords: fault displacement, pipe thickness, pipe failure modes, pipe deformation.