

بررسی رفتار لرزه‌ای لوله‌های مدفون فولادی تحت اثر گسلش نرمال

نادر خواجه احمد عطاری^{۱*}، محمدرضا دلجوان انوری^۲، هیمن حجت جلالی^۳، مهدی مؤمنی^۴

۱. استادیار، بخش تحقیقات سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن، شهرسازی

۲. کارشناسی ارشد، پژوهشکده ساختمان و مسکن

۳. دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف

۴. کارشناسی ارشد، کارشناس مقاوم سازی شرکت گاز

attari@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۳/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۴/۴]

چکیده - با توجه به توسعه شهرنشینی و نیاز مردم به انرژی و آب، صنعت خطوط لوله نفت، گاز، آب و فاضلاب نیز پیشرفت کرده است. با توجه به احتمال عبور خطوط لوله از محل گسل‌ها در طول مسیر مطالعات ویژه جهت بررسی پاسخ خطوط لوله عبوری از گسل‌ها احساس می‌شود. مطالعه عددی حاضر پاسخ خطوط لوله فولادی مدفون تحت گسلش نرمال را مورد مطالعه قرار داده است. گسل عمود بر خط لوله بوده و در جهت قائم تغییر مکان می‌دهد که سبب ایجاد تنش‌ها و کرنش‌هایی در دیواره خط لوله می‌شود. مدل‌سازی سیستم خاک - لوله به طور دقیق با استفاده از المان‌های محدود که کرنش‌ها و تغییر مکان‌های بزرگ و رفتار غیر خطی مصالح را در نظر می‌گرفتند، انجام شده است. هدف از این مطالعه تعیین تغییر مکانی از گسل بود که لوله در آن دچار خرابی می‌شد و از آن می‌توان در طراحی خطوط لوله استفاده کرد. نتایج برای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت لوله در نموداری که کرنش بحرانی و تغییر مکان بحرانی گسل را نشان داده‌اند، نمایش داده شده است.

کلید واژگان: گسلش نرمال، خطوط لوله فولادی مدفون، طراحی بر اساس عملکرد.

۱ - مقدمه

یه با در نظر گرفتن سختی خمشی تا حدودی روش کنسیدی و همکاران را اصلاح نمودند تا هم برای لوله‌های تحت تنش فشاری و هم برای لوله‌های تحت تنش کششی قابل استفاده باشد [۳]. روش تحلیلی آن‌ها تنها برای گسل‌های امتدادلغز قابل کاربرد است. تاکادا و همکاران روش ساده شده‌ای برای به دست آوردن کرنش بیشینه در لوله‌های فولادی عبوری از روی گسل‌ها ارائه نمودند که در آن خصوصیات غیرخطی ماده و هندسی در نظر گرفته شده بود [۴]. کارامیتروس و همکاران به صورت تحلیلی تنش و کرنش در لوله‌های فولادی مدفون عبوری از گسل‌های امتدادلغز را به دست آوردند [۵]. آن‌ها با استفاده از معادلات تعادل و سازگاری تغییر مکان‌ها، نیروی محوری وارد به لوله را به دست آورده و با استفاده از ترکیبی از معادلات تیر روی بستر ارتجاعی و تئوری تیرارتجاعی، لنگر خمشی وارد را محاسبه

با توجه به توسعه شهرنشینی و افزایش نیاز مردم به انرژی و آب، خطوط لوله نفت، گاز، آب و فاضلاب نیز توسعه یافته و با افزایش احتمال عبور خطوط لوله از محل گسل‌ها در طول مسیر، نیاز به انجام مطالعات ویژه برای بررسی پاسخ خطوط لوله عبوری از گسل‌ها احساس می‌شود. با مروری بر ادبیات گذشته مشاهده می‌شود که مطالعات انجام شده در زمینه خطوط لوله مدفون به سه دسته کلی تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. نخستین بار نیومارک و هال بدون در نظر گرفتن سختی خمشی لوله و اندرکنش خاک و لوله، روشی تحلیلی را برای پاسخ خطوط لوله تحت اثر گسلش راستالغز ارائه کردند [۱]. کنسیدی و همکاران پژوهش‌های نیومارک و هال را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و لوله در جهت عرضی و در جهت طولی گسترش دادند [۲]. ونگ و

عددی، اقدام به استخراج نیروهای اندرکنشی لوله و خاک کردند [۱۰].

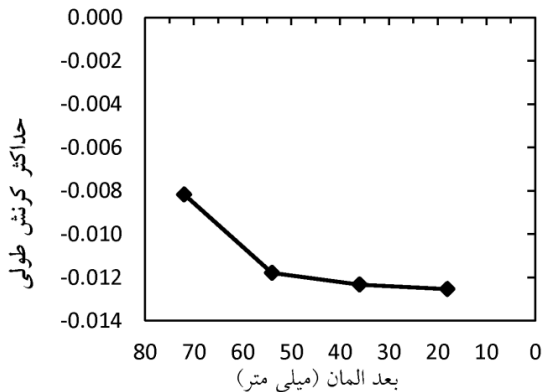
در مطالعه حاضر رفتار خطوط لوله فولادی مدفون در دو نوع خاک رس با تراکم کم و خاک رس متراکم تحت اثر گسلش نرمال بررسی شده است. مدلسازی سیستم خاک لوله به وسیله‌ی اجزاء محدود غیرخطی صورت پذیرفته که در آن رفتار غیرخطی لوله و خاک اطراف، اندرکنش و تماس بین خاک و لوله (شامل اصطکاک و جداشدگی لوله از خاک)، گسترش کرنش‌های غیر الاستیک بزرگ در جداره خط لوله، اعوجاج سطح مقطع لوله و تشکیل کماتش موضعی در نظر گرفته شده است. محور خط لوله افقی و عمود بر گسل فرض شده است. در این مطالعه اثر نسبت قطر به ضخامت، فشار داخلی و نوع خاک بر پاسخ خط لوله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدلسازی عددی

در این مطالعه برای بررسی رفتار خطوط لوله فولادی مدفون از نرم افزار المان محدود پیشرفته آباکوس [۱۱] استفاده شده است. سیستم لوله و خاک در شکل ۱ مشاهده می‌شود. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده طول، عرض و ارتفاع بلوک خاک به ترتیب برابر ۶۰، ۱۰ و ۵ متر در نظر گرفته شده است. لوله‌ای فولادی با قطر خارجی ۹۱۴/۴ میلی‌متر و ضخامت دیواره بین ۹/۵۲۵ میلی‌متر و ۱۵/۸۷۵ میلی‌متر (نسبت قطر به ضخامت، D/t ، بین ۹۶ و ۵۷) در وسط بلوک خاک (حدوداً ۲ برابر قطر) مدفون شده است. صفحه گسلش، عمود بر محور لوله به گونه‌ای در نظر گرفته شده که خاک را به دو قسمت مساوی تقسیم کند (شکل ۱ الف). بدین ترتیب خاک به دو بلوک متحرک و ثابت تقسیم می‌شود. مش بندی به کار گرفته شده برای خاک و لوله به ترتیب در شکل ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است. برای مدلسازی لوله از المان پوسته چهارگره‌ی انتگرال کاهش یافته (S4R) استفاده شده است؛ در حالی که المان‌های مکعبی هشت گره‌ی انتگرال کاهش یافته (C3D8R) برای شبیه‌سازی خاک اطراف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ناحیه میانی مدل، که انتظار می‌رود بیشترین تنش‌ها و کرنش‌ها مشاهده شود، از مش ریزتری استفاده شده است؛ به گونه‌ای که از مجموع ۵۴ المان پوسته در محیط لوله

نمودند. در این روش خصوصیات غیرخطی ماده و غیرخطی هندسی به طور غیر مستقیم وارد محاسبات شده و با استفاده از توزیع واقعی تنش بر مقطع لوله، کرنش بیشینه طراحی محاسبه می‌شود. وازوراس و همکاران رفتار خطوط لوله مدفون عبوری از گسل‌های راست‌الغز را با استفاده از روش اجزا محدود به صورت پارامتریک شبیه‌سازی کردند [۶]. در مطالعه آن‌ها اثر نوع خاک، نسبت قطر به ضخامت لوله، فشار داخلی لوله بر رفتار لوله‌های فولادی مدفون مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهشگران در ادامه، اثر زاویه عبور خط لوله از گسل را نیز مورد بررسی قرار دادند [۷] و جابه‌جایی بحرانی برای لوله‌های مورد مطالعه را بر اساس معیارهای پذیرش مختلف ارائه و گامی اساسی در راستای طراحی عملکردی خطوط لوله مدفون برداشتند. جوشی و همکاران پاسخ خطوط لوله مدفون تحت گسلش معکوس را با استفاده از روش اجزا محدود بررسی کردند که در آن از المان‌های تیر و فنرهای غیر خطی به ترتیب برای مدلسازی لوله و خاک استفاده کردند و تاثیر اثر پارامترهای مختلف طراحی نظیر زاویه عبور، مشخصات خاک اطراف لوله، عمق دفن، خصوصیات سطح لوله، مصالح لوله و مشخصات سطح مقطع در بیشترین کرنش فشاری و کماتش خط لوله بررسی کردند [۸]. نتایج این مطالعه نشان داد که کرنش فشاری خط لوله می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای در محل تقاطع گسل معکوس با انتخاب جهتی تقریباً موازی خط لوله با خط گسل در پلان کاهش یابد. رفوئی و همکاران رفتار خطوط لوله مدفون گاز را تحت اثر گسلش معکوس با زاویه شیب 61° به صورت آزمایشگاهی تمام مقیاس و تحلیل اجزا محدود بررسی نمودند [۹]. در این مطالعه لوله فولادی با قطر ۴ اینچ (۱۱۴/۳ میلی‌متر) در عمق یک متر در خاک ماسه خوب دانه بندی شده با رطوبت ۵٪ دفن شد و تحت جابه‌جایی ۶۰ سانتی‌متر در امتداد گسل قرار گرفت. نتایج آزمایش و تحلیل حاکی از تغییر شکل "S" مانند لوله و کماتش موضعی لوله در دو مقطع، یکی در بخش ثابت مخزن و دیگری در بخش متحرک مخزن، در طول لوله بود. در ادامه رفوئی و همکاران با تکمیل مطالعه قبلی و آزمایش لوله ۶ اینچ (۱۶۸/۳ میلی‌متر) تحت همان جابه‌جایی گسل و راستی‌آزمایی مدل‌های

خاک (c)، زاویه اصطکاک (φ)، مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) توصیف می‌شود و زاویه اتساع خاک (ψ) برابر صفر در نظر گرفته شده است.

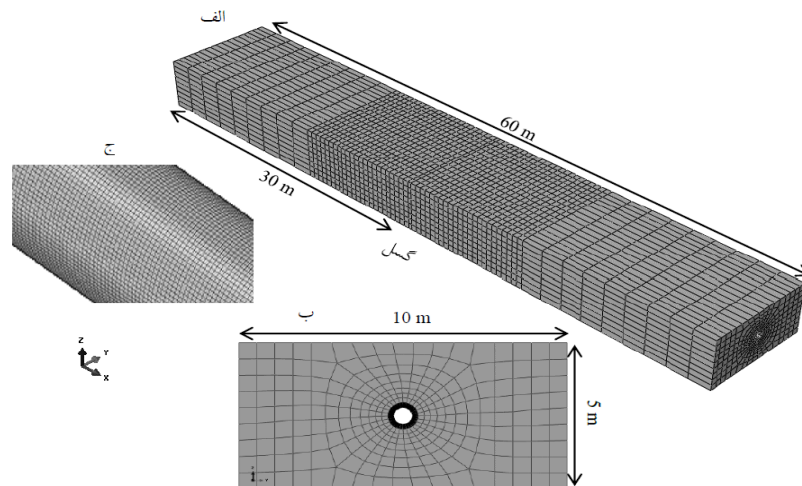


شکل ۲: تاثیر ابعاد مش بر حداکثر کرنش طولی

در مدل‌سازی اندر کنش خاک و لوله از الگوریتم تماس برای شبیه‌سازی سطح مشترک بین سطح بیرونی لوله فولادی و خاک اطراف استفاده شده است. بدین منظور از الگوریتم اصطکاکی با تعریف ضریب اصطکاک مناسب استفاده شده است. در تحلیل‌های انجام شده این ضریب برابر 0.3 در نظر گرفته شده است. باید توجه شود که این ضریب با توجه به تحلیل‌های انجام شده که مقدار μ بین 0.2 و 0.4 بوده و تاثیر ناچیزی بر پاسخ لوله داشته، انتخاب شده است. علاوه بر این، سطح مشترک اجازه جدا شدن لوله و خاک اطراف را فراهم می‌کند. تحلیل در دو گام انجام گرفته است: در گام اول بارهای ثقلی و در گام دوم حرکت گسل اعمال شده است.

برای مش‌بندی برای رسیدن به پاسخ مناسب استفاده شده است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده ابعاد المان‌های پوسته در بخش میانی مدل در جهت طولی مساوی $\frac{1}{26}$ برابر قطر خارجی لوله (D) انتخاب شده، در حالیکه از مش درشت‌تری برای بخش‌هایی از لوله که دورتر از محل گسل قرار دارند، استفاده شده است. به طور مشابه مش المان محدود برای خاک در مناطق نزدیک گسل خیلی ریزتر از مش مناطق دور از گسل است. بدین ترتیب مش‌بندی انجام شده، خاک و لوله را به سه بخش تقسیم می‌کند به شکلی که بخش میانی نسبت به دو قسمت کناری از مش ریزتری برخوردار است. در شکل ۲ تاثیر ابعاد مش لوله بر کرنش طولی حداکثر لوله مشاهده می‌شود. رفتار مصالح برای لوله و خاک، الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده است. لوله به کار برده شده از جنس API-5L X65 که به صورت گسترده در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، است [۱۲]. مدل پلاستیسیته (Von Mises) با سخت شونده همگن برای توصیف رفتار مکانیکی مصالح لوله فولادی به کار برده شده است. در شکل ۳ نمودار دو خطی تنش-کرنش مهندسی که از آزمایش تک محور کششی به دست آمده، نشان داده شده است. تنش جاری شدن برابر 450 مگاپاسکال است که تا کرنش 3% به صورت مسطح ادامه دارد و کرنش سخت شونده با مدول سخت-شونده تقریباً برابر $\frac{E_s}{300}$ است که E_s مدول یانگ مصالح فولادی است.

برای توصیف رفتار خاک از مدل الاستیک-پلاستیک کامل با معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده که به وسیله‌ی چسبندگی



شکل ۱: مدل المان محدود-الف: شکل خاک و گسل ب: سطح مقطع خاک ج: خط لوله فولادی در ناحیه با مش ریز

۳- راستی آزمایشی مدل المان محدود

برای صحت راستی آزمایشی مدل المان محدود از نتایج مرجع [۶] استفاده می‌شود (شکل ۴). با توجه به نتایج لحظه شروع کمانش موضعی در مرجع [۶] در تغییر مکان گسل ۰/۶۷ متر و برای این مطالعه در تغییر مکان گسل ۰/۸۳ متر است. مقدار کرنش متناظر با کمانش موضعی در لوله در بخش نتایج عددی تشریح شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که در میزان کرنش‌ها تفاوت چندانی دیده نمی‌شود و هماهنگی مناسبی بین نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج مرجع [۶] مشاهده می‌شود؛ پس از مدل ساخته شده می‌توان بر مطالعه حاضر استفاده نمود.

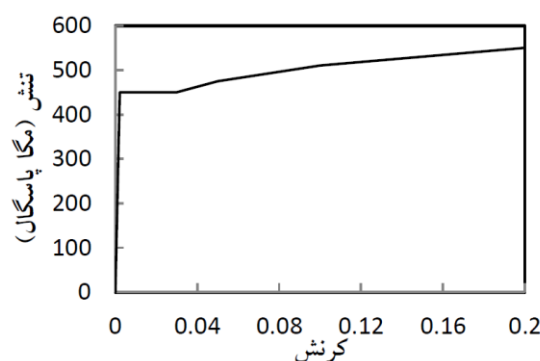
۴- نتایج عددی

در این قسمت با استفاده از مدل‌سازی عددی بیان شده، نتایج برای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت خط لوله تحت گسلش نرمال مورد بررسی قرار می‌گیرد. لحظه ایجاد کمانش موضعی در لوله زمانی در نظر گرفته شده که در نمودار کرنش طولی در سمت فشاری حالت فرورفتگی به وجود آمده است؛ به عبارت دیگر لحظه‌ای که کرنش به شدت افزایش یافته است. نتایج در غالب نمودارهایی که توزیع کرنش طولی در تارهایی که بیشترین کرنش کششی و فشاری در طول لوله را نشان می‌دهند، ارائه شده است. همان‌گونه که در قسمت‌های آینده نشان داده خواهد شد، در بیشتر موارد تحلیل شده، تشکیل کمانش موضعی در تار فشاری قبل از رسیدن تار کششی به کرنش جاری شدن فولاد رخ داده است و در نتیجه کمانش موضعی کنترل کننده مد خرابی لوله است. مشخصات خاک مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک مورد استفاده

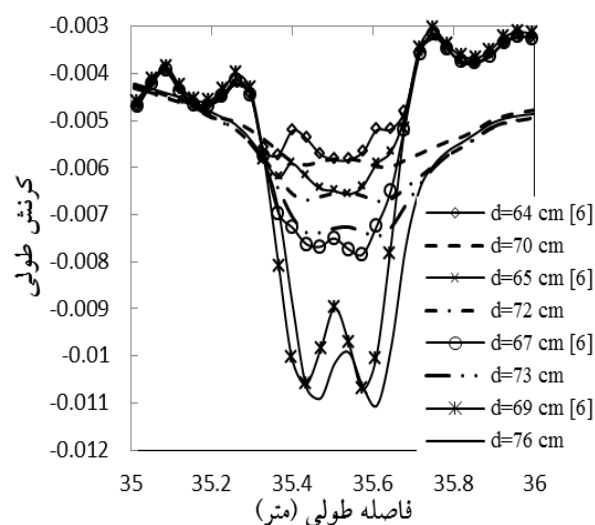
نوع خاک	رس با تراکم کم	رس متراکم
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۲۵	۱۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	۰	۰
ضریب پواسون	۰/۵	۰/۵
چسبندگی (کیلوپاسکال)	۵۰	۲۰۰

گره‌های مرزی عمودی بلوک اول (ثابت) در جهت قائم ثابت باقی مانده‌اند (شامل گره‌های انتهایی خط لوله فولادی) در حالی که تغییر مکان یکنواخت به علت حرکت گسل به گره‌های محیطی بلوک دوم (متحرک) در جهت قائم اعمال شده است. تحلیل با استفاده از روش تغییر مکان کنترل شده انجام گرفته است که به طور تدریجی تغییر مکان گسل، δ افزایش می‌یابد. برای غلبه کردن به مشکلات عددی به وجود آمده به خاطر ناپیوستگی‌هایی



شکل ۲: نمودار تنش - کرنش مهندسی برای فولاد X65

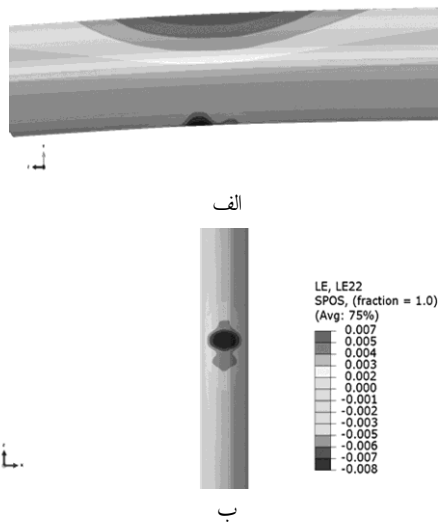
در نزدیکی گسل، طبق مطالعات اخیر اندرکنش گسل سپی [۱۳] و [۱۴] حرکت گسل طولی در نظر گرفته شده است که این حرکت در منطقه باریک به عرض w اتفاق بیفتد. که این عرض برابر ۰/۳۳ متر انتخاب شده است [۶ و ۷] و در هر نمو آنالیز غیر خطی، تنش‌ها و کرنش‌های دیواره لوله ثبت شده‌اند.



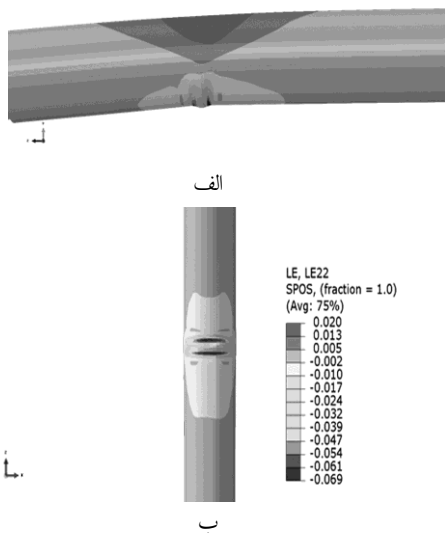
شکل ۳: راستی آزمایشی مدل المان محدود با مرجع [۶]

۴-۱- خط لوله با ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر در خاک رس با تراکم کم و تراکم کم

در این بخش به بررسی پاسخ خط لوله مدفون در خاک رس با تراکم کم و خاک رس متراکم با مشخصات بیان شده در جدول ۱ پرداخته شده است. در شکل ۵ تغییر شکل لوله با نسبت قطر به ضخامت ۷۲ مدفون در خاک رس با تراکم کم در تغییر مکان گسل ۱ متر نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود لوله به صورت S تغییر شکل می‌دهد به گونه‌ای که در دو ناحیه تمرکز تنش و کرنش در بلوک ثابت و متحرک مشاهده می‌شود. در این مدل کرنش‌های فشاری بزرگ ناشی از خمش منجر به کمناش موضعی در فاصله ۳/۴۳ متری از گسل در بلوک ثابت خاک شده‌اند.

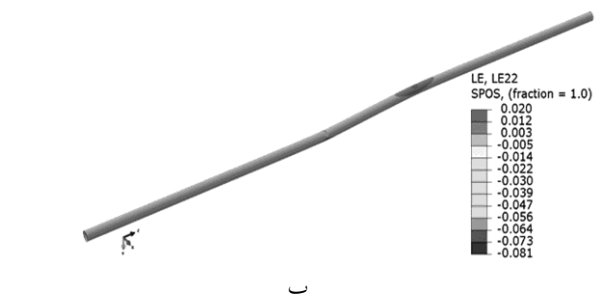
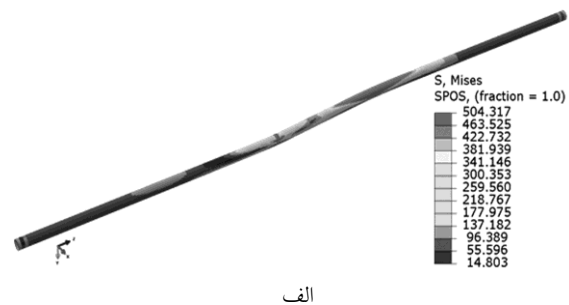


شکل ۵: لحظه شروع کمناش موضعی در جابه‌جایی ۰/۶۴ متر در خط لوله: الف- نمای جانبی و ب- نمای پایین (خاک رس با تراکم کم، نسبت قطر به ضخامت ۷۲، فشار داخلی صفر)



شکل ۶: کمناش خط لوله در جابه‌جایی ۱ متر: الف- نمای جانبی و ب- نمای پایین (خاک رس با تراکم کم، نسبت قطر به ضخامت ۷۲، فشار داخلی صفر)

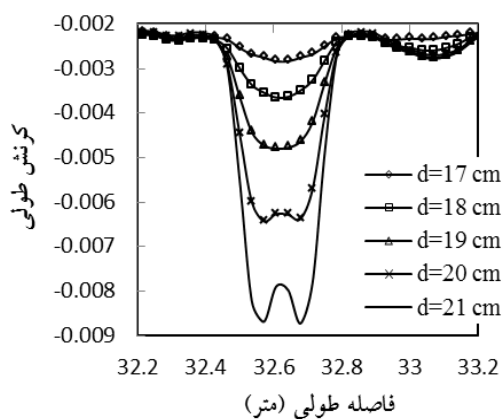
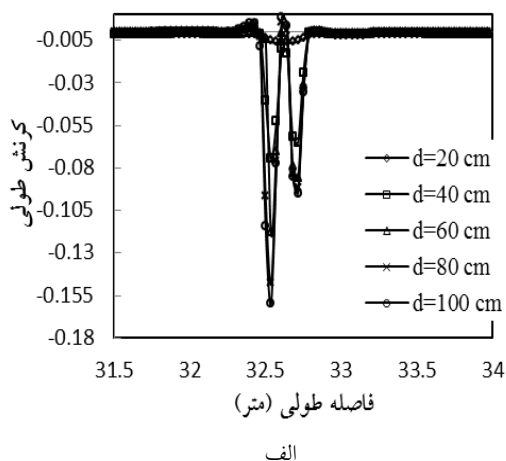
شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار کرنش طولی در تار تحتانی لوله مدفون در خاک رس با تراکم کم و خاک رس متراکم در قسمتی از خط لوله که بیشترین تغییرات کرنش و تنش را دارد، برای تغییر مکان‌های مختلف گسل از ۰/۲ تا ۱ متر راه نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود با افزایش جابه‌جایی گسل کرنش‌های فشاری در هر دو لوله مدفون در خاک رس با تراکم کم و متراکم افزایش می‌یابد؛ اما در خاک رس متراکم کرنش‌های فشاری بزرگتری مشاهده می‌شود.



شکل ۷: تغییر مکان گسل ۱ متر: الف- تنش فون مایسس خط لوله (مگاپاسکال) ب- کرنش طولی به وجود آمده در خط لوله (خاک رس با تراکم کم، نسبت قطر به ضخامت ۷۲، فشار داخلی صفر)

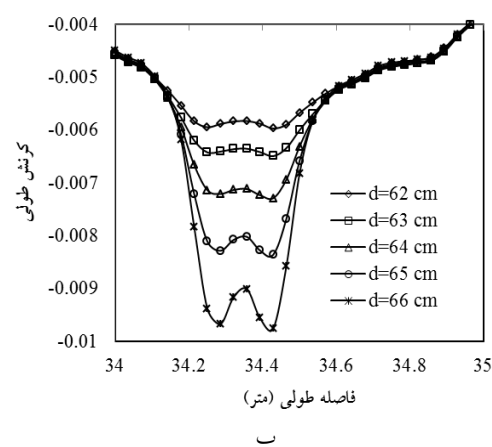
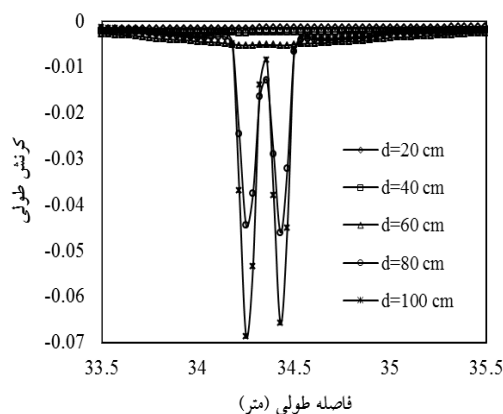
شکل ۶ لحظه شروع کمناش موضعی در جابه‌جایی ۰/۶۴ متر و شکل ۷ کمناش موضعی خط لوله در تغییر مکان گسل ۱ متر را نشان می‌دهد. سازوکار شروع و تشکیل کمناش موضعی با مشاهده آزمایشگاهی پیشین [۱۵ و ۱۶] در خصوص لوله‌های فولادی تحت خمش هماهنگ است. باید توجه داشت که پس از تشکیل کمناش موضعی (شکل ۶) تغییر شکل لوله در اطراف محل کمناش موضعی (شکل ۷) متمرکز می‌شود.

در دو شکل ۸ و ۹ است. شکل ۸-ب کرنش طولی در سمت فشاری خط لوله در خاک رس با تراکم کم برای تغییر مکان گسل از ۰/۶۲ متر تا ۰/۶۶ متر را نشان می‌دهد که در تغییر مکان گسل ۰/۶۴ متر کماتش موضعی در سطح بیرونی خط لوله شروع می‌شود.



شکل ۸: تغییرات کرنش طولی در ناحیه کماتش برای مقادیر مختلف تغییر- مکان گسل در سمت فشاری لوله: الف- حرکت گسل از ۰/۲ متر الی ۱ متر ب- حرکت گسل از ۰/۱۷ متر الی ۰/۲۱ متر (لوله X65، خاک رس متراکم، فشار داخلی مساوی صفر، نسبت قطر به ضخامت مساوی ۷۲)

شکل ۹-ب کرنش طولی در سمت فشاری خط لوله در خاک رس متراکم برای تغییر مکان گسل ۰/۱۷ متر تا ۰/۲۱ متر را نشان می‌دهد که تغییر مکان گسل ۰/۲۰ متر باعث شروع کماتش موضعی می‌شود. این در حالی است که مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کرنش کششی در سمت مقابل سطح مقطع لوله در لحظه کماتش در هر دو نوع خاک هنوز به مقدار بحرانی خود (تقریباً ۰.۵٪) مطابق با آیین نامه‌های مختلف [۱۷-۱۸] نرسیده و فاصله زیادی با این مقدار دارد.



شکل ۷: تغییرات کرنش طولی در ناحیه کماتش برای مقادیر مختلف تغییر- مکان گسل در سمت فشاری لوله: الف- حرکت گسل از ۰/۲ الی ۱ متر ب- حرکت گسل از ۰/۶۲ متر الی ۰/۶۶ متر (لوله X65، رس با تراکم کم، فشار داخلی مساوی صفر، نسبت قطر به ضخامت مساوی ۷۲)

بنابراین می‌توان انتظار داشت که لوله مدفون در خاک رس متراکم در جابه‌جایی کمتری دچار کماتش موضعی می‌شود. این مساله در شکل‌های ۸-ب و ۹-ب به وضوح مشاهده می‌شود. در این دو شکل بعد از ایجاد کماتش موضعی، در نمودار کرنش طولی لوله فرورفتگی ایجاد می‌شود و از این مرحله به بعد اعوجاج قابل ملاحظه‌ای به دلیل کماتش موضعی در سمت فشاری لوله مشاهده می‌شود که با افزایش تغییر مکان گسل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر کماتش موضعی در این مطالعه با حرکت جداره لوله به سمت بیرون در ناحیه حداکثر کرنش فشاری ناشی از خمش آغاز می‌شود. در این لحظه، در رأس مقطع کماتش یافته کرنش‌های کششی قابل ملاحظه‌ای تشکیل می‌شوند که منجر به کاهش کرنش‌های خمشی در تار بیرونی در این محل می‌شود. این مساله بیانگر کاهش کرنش‌های فشاری در محل کماتش موضعی نسبت به ناحیه اطراف

۴-۲- اثر نسبت قطر به ضخامت و فشار داخلی بر پاسخ لوله

برای بررسی بیشتر پاسخ خط لوله مدفون در خاک رس با تراکم کم، نسبت‌های قطر به ضخامت از ۹۶ الی ۵۸ و در خاک رس متراکم به دلیل ظرفیت نسبتاً پایین خط لوله در این نوع خاک، نسبت‌های قطر به ضخامت از ۷۲ الی ۴۸ مورد تحلیل واقع شده‌اند. همچنین فشار داخلی برابر صفر و $p_{max} = 0.28$ در نظر گرفته شده که p_{max} از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$p_{max} = 0.72 * \left(2 * \sigma_y * \frac{t}{D} \right) \quad (1)$$

که:

p_{max} : بیشترین فشار عملیاتی خط لوله (مگاپاسکال)

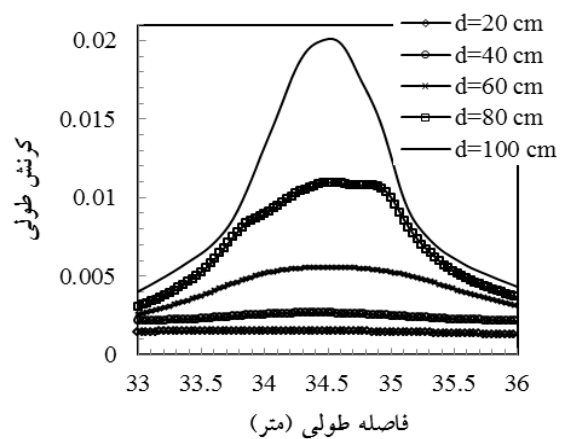
σ_y : تنش جاری شدن خط لوله (مگاپاسکال)

t: ضخامت دیواره خط لوله

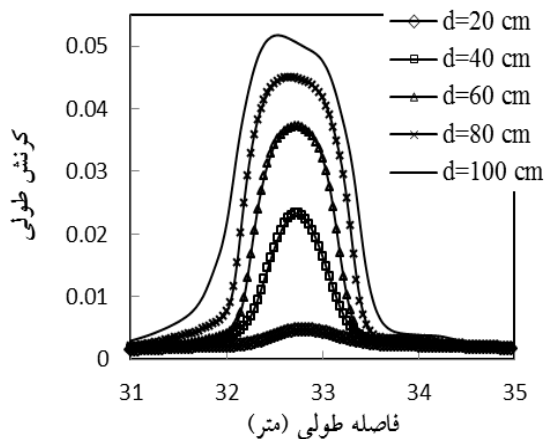
D: قطر بیرونی خط لوله

می باشد.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییر مکان بحرانی گسل و قدر مطلق کرنش طولی در لحظه کمانش موضعی برای دو نوع خاک رس با تراکم کم و متراکم و برای دو حالت بدون فشار داخلی و فشار $p_{max} = 0.28$ برای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که با کاهش نسبت قطر به ضخامت لوله تغییر مکان بحرانی گسل افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر در تغییر مکان گسل بزرگ‌تری لوله دچار کمانش موضعی می‌شود و ظرفیت لوله در تغییر مکان یکسان با کاهش نسبت قطر به ضخامت، افزایش می‌یابد. همچنین با سخت‌تر شدن محیط اطراف لوله ظرفیت خمشی لوله به شدت کاهش پیدا می‌کند و در تغییر مکان بسیار کمتر گسل دچار خرابی می‌شود؛ به گونه‌ای که برای تحلیل‌های انجام شده به طور متوسط تغییر مکان بحرانی به دست آمده برای خاک رس با تراکم کم حدود $3/4$ برابر تغییر مکان بحرانی به دست آمده برای خاک رس متراکم است.



شکل ۹: تغییرات کرنش طولی در ناحیه کمانش برای تغییر مکان گسل از ۰/۲ الی ۱ متر در سمت کششی لوله (لوله X65، رس با تراکم کم، فشار داخلی مساوی صفر، نسبت قطر به ضخامت مساوی ۷۲)



شکل ۱۰: تغییرات کرنش طولی در ناحیه کمانش برای حرکت گسل از ۰/۲ متر الی ۱ متر در سمت کششی لوله (لوله X65، رس با تراکم بالا، فشار داخلی مساوی صفر، نسبت قطر به ضخامت مساوی ۷۲)

هر چند در لوله مدفون در خاک رس متراکم در تغییر مکان گسل ۰/۲ متر (جابه‌جایی معادل کمانش موضعی) کمتر از کران پایین حد بحرانی کرنش کششی، در جابه‌جایی ۰/۴ متر تقریباً برابر کران پایین حد کرنش کششی و در جابه‌جایی ۱ متر، کرنش به کران بالای حد بحرانی کرنش کششی، ۵/۰٪ رسیده و مطابق این معیار نیز دچار خرابی شده است. این در حالی است که در خاک رس با تراکم کم در تغییر مکان گسل ۱ متر، مقدار کرنش کششی به کران پایین حد کرنش کششی رسیده است.

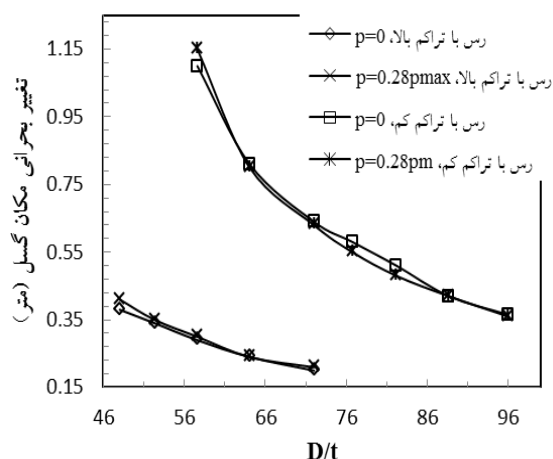
بحرانی با افزایش نسبت قطر به ضخامت برای هر دو نوع خاک کاهش می‌یابد. همچنین به طور متوسط افزایش کرنش بحرانی برای خاک رس با تراکم کم نسبت به خاک رس متراکم حدود ۴۰٪ است.

۵- نتیجه گیری

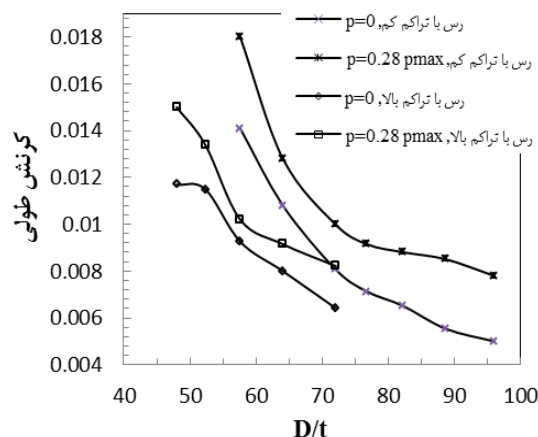
در این مطالعه رفتار خطوط لوله فولادی مدفون عبوری از گسل نرمال با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها برای خاک رس با تراکم کم و متراکم و فشار داخلی خط لوله برابر صفر و p_{max} ۰/۲۸ انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، کماتش موضعی دیواره لوله، مد خرابی برای لوله مدفون در خاک‌های مورد بررسی، است و با کاهش نسبت قطر به ضخامت خط لوله و شرایط نرم‌تر اطراف لوله ظرفیت تحمل تغییر شکل لوله افزایش پیدا می‌کند و خط لوله قادر به تحمل تغییر مکان گسل بزرگتری است و کرنش بحرانی در لحظه کماتش نیز افزایش می‌یابد. به طور متوسط تغییر مکان بحرانی و کرنش بحرانی برای خاک رس با تراکم کم به ترتیب حدود ۳/۴ و ۱/۴ برابر مقادیر متناظر در خاک رس متراکم است. همچنین تحلیل‌های انجام شده نشان داد که برای هر دو خاک رس، 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٪ است.

۶- مراجع

- [1] Newmark, N.M., and Hall, W.J. Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement. *In Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan, U.S., June 18-20, 1975, pp. 416-425.
- [2] Kennedy, R.P., Chow, A.W., and Williamson, R.A. Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Journal of Transportation Engineering*, 1977, 103(TE5): 617-633.
- [3] Wang, L.R.L., and Yeh, Y.H. A Refined Seismic Analysis and Design of Buried Pipeline for Fault Movement. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1985, 13(1): 75-96.
- [4] Takada, S., Liang, J.W., and Li, T. Shell-Mode Response of Buried Pipelines to Large Fault Movements, *Journal of Structural Engineering*, 1998, 44A: 1637-1646.
- [5] Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., and Kouretzis, G.P. Stress analysis of buried pipelines at



شکل ۱۱: تغییر مکان بحرانی گسل برای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت خط لوله با فشار داخلی صفر و p_{max} ۰/۲۸



شکل ۱۲: کرنش طولی خط لوله برای نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت با فشار داخلی صفر و p_{max} ۰/۲۸

شایان گفتن است که با توجه به اینکه مد خرابی در فشار (کوماتش موضعی) کنترل کننده رفتار لوله است، معیار پذیرش برای تغییر مکان بحرانی آغاز کماتش موضعی جداره لوله است. همچنین با افزایش فشار داخلی لوله تغییر مکان بحران لوله چندان تغییر محسوسی نمی‌کند، به گونه‌ای که بیشینه تغییرات تغییر مکان بحرانی با فشار برای هر دو نوع خاک حدود ۵٪ است؛ در صورتی که کرنش طولی بحرانی به دلیل وجود فشار داخلی افزایش پیدا می‌کند؛ به گونه‌ای که با افزایش فشار داخلی کرنش بحرانی حداکثر برای لوله مدفون در خاک رس با تراکم کم و خاک رس متراکم به طور متوسط به ترتیب حدود ۳۵٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد. به طور کلی نرخ تغییرات کرنش

- [12] API Spec 5L, "Specification for Line Pipe, 41th edition," American Petroleum, 1995.
- [13] Anastasopoulos I., Callerio A., Bransby M. F., Davies M. C., Nahas A. El, Faccioli E., Gazetas G., Masella A., Paolucci R., Pecker A., Rossigniol E., "Numerical analyses of fault foundation interaction," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6(4) , 2008, p. 645- 675.
- [14] Gazetas G, Anastasopoulos I, Apostolou M, "Shallow and deep foundation under fault rapture or strong seismic shaking," In: Pitilakis K, editor. *Earthquake Geotechnical Engineering*. Springer, 2007, p. 185-215.
- [15] Gresnigt AM. "Plastic design of buried steel pipes in settlement areas," *HERON*. 31(4):1986; 1-113.
- [16] Kyriakides S, Ju GT. "Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending I: experiments". *International Journal of Solids and Structures*. 29:11; 1992; 17-42.
- [17] American Society of Civil Engineers. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE 1984; Reston, Va.
- [18] American Lifeline Alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe. American Society of Civil Engineering, ALA 2005.
- strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(3): 200-211.
- [6] Vazouras, P., Karamanos, S. A., and Dakoulas, P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(11): 1361-1376.
- [7] Vazouras, P., Karamanos, S.A., and Dakoulas, P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41: 164-180.
- [8] Joshi, Sh. Prashant, A., Deb, A., and Jain, S. K. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(7): 930-940.
- [9] Rofooei, F.R., Hojat Jalali, H., Attari, Nader K.A., and Alavi, M. Full-Scale Laboratory Testing of Buried Pipelines Subjected to Permanent Ground Displacement Caused by Reverse Faulting. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, September 24-28, 2012, Paper No. 4381.
- [10] Rofooei, F. R., Hojat Jalali, H., Attari, Nader K. A., Samadian, M. Assessment of the Behavior of Buried Gas Pipelines Subjected to Reverse Faulting, *Iran-U.S. Joint Seismic Workshop: Urban Earthquake Engineering*, Tehran, Iran 18-20 December, 2012, pp. 105-117.
- [11] ABAQUS. Users' manual. Simulia, Providence, RI, USA; 2011.

Seismic response of buried pipelines subjected to normal faulting

N. K.A. Attari^{*1}, M. D. Anvari², H. Hojatjalali³, M. Momeni⁴

1. Assistant professor, Structural Engineering Department, Building and Housing Research center (BHRC)

2. M.s. Building and housing Research center (BHRC)

3. P.h.D., Sharif University of Technology

4. M.s., Tehran Gas Company

attari@bhrc.ac.ir

Abstracts:

Buried pipelines, commonly used to transport water, gas and oil, are critical elements of the infrastructure of today's modern cities and usually pass through large geographical distances. They are classified as lifelines as they carry materials that are essential to support human life. Due to the importance of maintaining the operability of these lifelines, it is of primary importance to study the effect of different hazards on their behavior in order to be able to mitigate any possible damages. Therefore, they could be subjected to different types of natural hazards such as earthquakes in the form of permanent ground displacement and/or wave propagation. Seismic waves could pose great threats to above ground facilities and perhaps to a lesser content to buried pipelines. Permanent ground displacement is often caused by surface faulting, landslides, or liquefaction. Over the past years, many researchers have attempted to study the behavior of buried pipelines crossing active faults. Many reconnaissance reports show that significant damages are observed in buried steel pipelines crossing active faults. The corresponding ground deformations are applied in a quasi-static manner, and are not necessarily associated with high seismic intensity. During the ground deformation, the pipeline may undergo severe deformation, well beyond the elastic range of pipe material and may cause pipeline failure, i.e. high tensile stresses may result in tensile fracture of the pipe wall, specifically at welds, whereas compressive stresses may cause local buckling or wrinkling of the pipe wall. In case of moderate buckling, deformation of the pipe cross-section can lead to flow restriction and high friction losses, and eventually require line replacement; while for severe buckling high localized strains can lead to pipe rupture, loss of contents, and possible pollution of surrounding soil. The present study investigates the mechanical behavior of buried steel pipelines, crossing normal faults of right angle in loose clay. The pipe is assumed to be normal to the fault plane. The interacting soil-pipeline system is modeled through three-dimensional finite element method, which accounts for large strains and displacements, nonlinear material behavior, friction and gap forming on the soil-pipe interface. The analysis is conducted through an incremental application of fault displacement. Considering steel pipelines of various diameter-to-thickness ratios, and typical steel material for pipeline applications, the present study concentrates on identifying the fault offset at which the pipeline fails considering different performance criteria and to use them for performance-based design purposes. The results are presented in the form of diagram showing the critical fault displacement, and the corresponding critical strain versus the pipe diameter-to-thickness ratio. Results show that for pipelines buried in loose clay, the governing failure mode is local buckling of the pipe wall, which occurs at two locations along the length of the pipeline. The distance between the two locations at which local buckling occurs increases with decreasing pipe diameter-to-thickness ratio. It is shown that with increasing pipe diameter-to-wall thickness ratio, longitudinal compressive strains in the pipe wall increases and consequently the capacity of the pipeline to accommodate the ground deformation decreases significantly.

Keywords: Buried steel pipelines, Normal faulting, performance-based design