

تحلیل اجزاء محدود لوله‌های مدفون در برابر جابه‌جایی ناشی از حرکت گسل معکوس

حسین تحقیقی^{۱*}، محمدمهدی حاج‌نوروزی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه کاشان

*tahghighi@kashanu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۲/۲۰]

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۰/۲۲]

چکیده- خطوط لوله موسوم به شریان‌های حیاتی در مقایسه با سایر ابنیه متعارف از اهمیت ویژه‌ای در خدمت‌رسانی به طیف وسیعی از جامعه برخوردار هستند. با مروری بر خرابی‌های ایجاد شده در زلزله‌های گذشته، جابه‌جایی ناشی از حرکت گسل یکی از مخاطرات اصلی برای لوله‌های مدفون قلمداد می‌شود. با توجه به محدودیت روش‌های تحلیلی، انجام مطالعات شبیه‌سازی عددی و ارزیابی دقیق‌تر بازتاب لوله‌های مدفون ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، اثر جابه‌جایی قابل انتظار گسل‌های معکوس روی پاسخ خطوط لوله فولادی پیوسته مدفون با استفاده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی تحلیل می‌شود. در این بررسی، تأثیر عوامل مختلف از جمله زاویه تقاطع لوله با گسل، زاویه شیب گسل، مشخصات خاک پیرامون لوله، عمق دفن و ویژگی‌های سطح خارجی لوله مطالعه شده است. تحلیل رفتار لوله به روش استاتیکی غیرخطی و با لحاظ نمودن اثر اندرکنش لوله و خاک صورت می‌گیرد. در ادامه، راهکارهای متعددی برای کنترل و یا کاهش میزان خرابی در خط لوله ناشی از اثر گسلش ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش خاک-لوله، گسل معکوس، روش اجزاء محدود، عملکرد لوله، تحلیل غیرخطی.

۱- مقدمه

تغییر شکل‌های ناشی از حرکت زمین و اثر انتشار امواج می‌شوند. بررسی زلزله‌های گذشته نشان داده است که سهم اصلی خسارات ناشی از زلزله روی لوله‌های مدفون به علت ایجاد جابه‌جایی‌های ماندگار در زمین بوده و سهم مربوط به تأثیر امواج بسیار کمتر است. جابه‌جایی ماندگار زمین به تغییر شکل‌های غیرقابل برگشت ناشی از گسلش، زمین‌لغزش، نشست یا گسترش جانبی ناشی از روانگرایی اطلاق می‌شود.

موارد متعددی از خرابی ناشی از گسلش سطحی طی زلزله‌های گذشته گزارش شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به زلزله‌های ۱۹۷۱ سان فرناندو (آمریکا)، ۱۹۹۵ کوبه (ژاپن)،

در چند دهه اخیر، خطوط لوله مدفون به عنوان تاسیساتی مهم و مطمئن از طریق انتقال نفت، گاز، آب و سایر سیالات در مقادیر زیاد به رشد اقتصادی جوامع کمک قابل توجهی کرده است. با توجه به پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران، بررسی مخاطراتی که عملکرد این سازه‌های گسترده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیز ارائه راهکار به منظور مقابله و یا کاهش آسیب‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. مخاطرات لرزه‌ای که به شکل مستقیم باعث خرابی خطوط لوله می‌شوند شامل نیروها و

سال‌های اخیر بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است [15-17]. لیکن در پژوهش‌های مرتبط با گسل معکوس، معمولاً لوله و خاک با رفتار الاستیک مدل شده است و یا در صورت لحاظ کردن رفتار غیرخطی، آثار کمانش موضعی و تغییرشکل مقطع لوله به ندرت در شبیه‌سازی منظور شده است. این آثار که بر عملکرد لوله‌های مدفون در تغییر مکان‌های بزرگ گسل حاکم هستند، در تحلیل اجزاء محدود سه بعدی نوشتار حاضر مدنظر قرار گرفته است. در این راستا، تأثیر عوامل مختلف از جمله زاویه تقاطع گسل و لوله، زاویه شیب گسل، ویژگی‌های سطح خارجی لوله، مشخصات خاک پیرامون لوله و عمق دفن لوله ارزیابی می‌شود. سپس، بر مبنای نتایج حاصل از تحلیل‌ها، توصیه‌های لازم برای کاهش و یا کنترل میزان خرابی ارائه می‌شود.

۲- مبانی طراحی خط لوله تحت اثر گسلش

در مواقعی که بزرگی زلزله به اندازه کافی زیاد باشد جابه‌جایی ناشی از گسل می‌تواند به سطح زمین برسد و موجب ایجاد شکستگی در سطح زمین شود. گسل‌ها با توجه به جهت جابه‌جایی نسبی قسمت‌های مجاور یکدیگر در پوسته زمین طبقه‌بندی می‌شوند. در گسل نرمال، بخش متحرک نسبت به بخش ثابت حرکتی رو به پایین دارد و در لوله متقاطع با آن نیروی کششی ایجاد می‌کند. در گسل معکوس، حرکت بخش متحرک به سمت بالا بوده و خط لوله را تحت فشار قرار می‌دهد. ولی در گسل امتدادلغز، لغزش در جهت افقی رخ می‌دهد و بر اساس زاویه تقاطع، نیروی کششی و یا فشاری در خط لوله ایجاد می‌شود. بنابر رخدادهای پیشین، گسل معکوس به دلیل ایجاد تنش‌های فشاری قابل توجه و بروز پدیده ناپایداری کمانشی در خط لوله فولادی نسبت به انواع دیگر گسل از اثر تخریبی بیشتری برخوردار است.

روابط مختلفی در ارتباط با احتمال وقوع گسیختگی سطحی بر حسب بزرگی زلزله به وسیله یانگز^۱ و همکاران ارائه

۱۹۹۹ از میت^۱ (ترکیه)، ۱۹۹۹ چی-چی^۲ (تایوان) و ۲۰۰۴ نیگاتا^۳ (ژاپن) اشاره نمود [3-1]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرشکل دائمی زمین ناشی از گسلش می‌تواند سبب کرنش‌های محوری و خمشی نسبتاً بزرگ و در نتیجه گسیختگی کششی و یا کمانشی در لوله شود. علاوه بر آثار مخرب گسیختگی بر عملکرد این شریان حیاتی، نشت محتویات خطرناک و یا شیمیایی نیز می‌تواند عوارض زیست محیطی فاجعه‌باری را در پی داشته باشد.

برای نخستین مرتبه، نیومارک^۴ و هال^۵ خطوط لوله مدفون تحت اثر تغییر مکان گسل امتدادلغز را با استفاده از مدل کابل تحلیل نمودند [4]. در این تحلیل، از مقاومت جانبی خاک و جابه‌جایی نسبی لوله و خاک چشم‌پوشی شده است. سپس، ایده نیومارک-هال با اضافه کردن آثار فشار جانبی خاک، اندرکنش خاک و لوله و نیز سختی خمشی لوله توسعه داده شد [5, 6]. برگی و هروی بر مبنای روش‌های تحلیلی فوق، اثر پدیده گسلش را روی خطوط لوله گاز مدفون بررسی کرده‌اند [7]. همچنین، وجیوکاس^۶ و همکاران لوله‌های مدفون را با مدل تیر الاستیک در برابر هر دو نوع حرکت افقی و قائم گسل به روش عددی شبیه‌سازی کردند [8]. در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل بازتاب و خرابی لوله‌های قطور آب و گاز مدفون در تقاطع با گسل طی زلزله سان‌فرانسیسکو به روش احتمالاتی توصیف شد [9]. به تازگی کارامیتروس^۷ و همکاران یک روش تحلیلی جدید بر مبنای مدل توسعه یافته نیومارک-هال پیشنهاد دادند که در آن با استفاده از تئوری‌های تیر بر بستر الاستیک و نیز تیر الاستیک نیروی محوری و لنگر خمشی لوله فولادی مدفون در تقاطع با گسل نرمال و امتدادلغز به دست می‌آید [10, 11]. علاوه بر روش‌های تئوری، مطالعات آزمایشگاهی متعددی برای بررسی اثر گسلش روی لوله‌های مدفون صورت گرفته است [12-14].

با پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، روش تحلیل اجزاء محدود در بررسی رفتار غیرخطی خطوط لوله مدفون در

6 Vougioukas
7 Karamitros
8 Youngs

1 Ismit
2 Chi-Chi
3 Niigata
4 Newmark
5 Hall

لوله با گروه کاربری III و IV معمولاً به ۴ درصد محدود می‌شود. این محدودیت در ناحیه اتصالات و خم‌ها برابر ۱ درصد است. به علاوه، بیشینه کرنش فشاری برابر کرنش در آستانه چروکیدگی لوله، ϵ_c ، پیشنهاد شده است که مقدار آن از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\epsilon_c = 0.175 \frac{t_p}{R} \quad (3)$$

که در آن شعاع لوله و ضخامت اسمی دیواره لوله است. در صورتیکه عبور لوله از گسل اجتناب‌ناپذیر باشد، توصیه اکید می‌شود لوله از گسل به گونه‌ای عبور داده شود که حرکت گسل در لوله ایجاد فشار نکند.

شکل ۱- احتمال گسیختگی سطحی بر حسب بزرگی زلزله [۱۸].

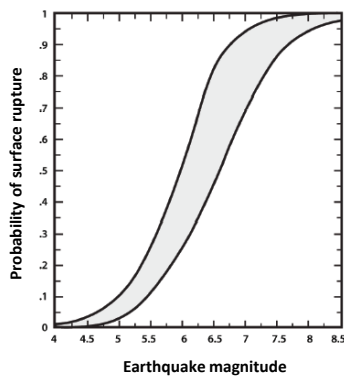


Fig. 1. Probability of surface rupture as a function of earthquake magnitude [18].

طراحی خط لوله برای برآورده‌سازی تقاضاهای فرایندی و مکانیکی از قبیل فشار، دما، نوع سیال و بارهای بهره‌برداری انجام می‌شود که خارج از گستره این مقاله است. خط لوله باید برای همه مخاطرات لرزه‌ای متصور برای آن نیز کنترل شود که در پژوهش حاضر به تحلیل خط لوله مدفون ناشی از گسلش پرداخته می‌شود. اگر چه در غیاب یک تحلیل دقیق می‌توان از روابط محاسباتی ساده در مراجع ذی‌صلاح برای محاسبه کرنش لوله در طراحی اولیه استفاده نمود. با این حال، آیین‌نامه‌های معتبر توصیه می‌کنند در طراحی خطوط لوله مهم (گروه کاربری III و IV) از روش تحلیل اجزای محدود با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در لوله و خاک استفاده شود.

شده است [18]. مطابق شکل (۱)، احتمال ایجاد گسلش برای زلزله با بزرگی ۵ ریشتر کمتر از ۱۰٪، برای بزرگی ۶ تا ۶/۵ حدود ۵۰٪ و برای بزرگی ۷/۵ این احتمال بیش از ۹۰٪ برآورد می‌شود. از طرف دیگر، روابط تجربی متعددی برای تخمین تغییر مکان محتمل گسل‌ها به وسیله پژوهشگران پیشنهاد شده است. ولز و کاپراسمیت با استفاده از یک بانک اطلاعاتی نسبتاً جامع شامل ۴۲۱ رویداد معروف لرزه‌ای در سراسر جهان، میزان جابه‌جایی انواع گسل را بر حسب پارامترهای مختلف شامل بزرگی زلزله، طول گسل، سطح گسل و غیره معرفی کرده‌اند [19]. روابط تجربی پیشنهاد شده به وسیله مرجع [19] که از آن می‌توان برای تحلیل سازه‌های در معرض گسل معکوس استفاده نمود به شرح زیر است.

$$\text{Log}(\Delta_{avg}) = -0.74 + 0.08 M_w \quad (1)$$

$$\text{Log}(\Delta_{max}) = -1.84 + 0.29 M_w \quad (2)$$

که در روابط فوق، M_w بزرگی گشتاوری زلزله، Δ_{max} و Δ_{avg} به ترتیب جابه‌جایی میانگین و بیشینه جابه‌جایی قابل انتظار گسل معکوس بر حسب متر است.

در حالت کلی، لوله‌های پیوسته عبور کننده از یک گسل فعال ممکن است در اثر کشش و یا کماتش ناشی از نیروی فشاری دچار گسیختگی شود. تنش‌های کششی شدید باعث گسیختگی جداره لوله به ویژه در قسمت‌های جوش شده و معیوب می‌شوند، و تنش‌های فشاری منجر به کماتش موضعی^۳ (چروکیدگی) در جداره لوله و یا کماتش کلی^۴ (تیرگونه) می‌شود. لازم به گفتن است که حالت حدی کماتش کلی برای لوله با عمق دفن کم‌تر از حدود یک متر و یا خطوط لوله فراساحل امکان وقوع دارد [17].

آیین‌نامه‌های طراحی، خطوط لوله را از نظر اهمیت و نوع کاربری به چهار گروه تقسیم می‌کنند [20-22]. در این طبقه‌بندی، برای گروه کاربری I نیازی به در نظر گرفتن ملاحظات لرزه‌ای نیست ولی در مورد گروه‌های II، III و IV دوره بازگشت زلزله طرح به ترتیب برابر ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال در نظر گرفته می‌شود. بر اساس آیین‌نامه‌ها، کرنش کششی ناشی از بارهای بهره‌برداری و تغییر شکل ماندگار زمین در خطوط

۳- تحلیل خط لوله مدفون تحت اثر حرکت

گسل

محدودیت و فرضیه‌های ساده روش‌های تحلیلی سبب شده است تا روش‌های حل عددی به شکل گسترده در ارزیابی بازتاب خطوط لوله مدفون به کار گرفته شود. در پژوهش‌هایی که برای بررسی سیستم خاک و لوله تحت اثر گسلش صورت گرفته است، بیشتر از روش متداول وینکلر (مدل تیر و فنر) استفاده شده است [23]. در این روش توده خاک پیرامون لوله در جهت‌های طولی، جانبی و قائم با فنرهای غیرخطی و خط لوله به صورت المان تیر مدل می‌شود. با توجه به عدم در نظر گرفتن پدیده کمانش موضعی و اثر تغییر شکل مقطع بر رفتار لوله به وسیله روش وینکلر، مدل پیوسته اجزاء محدود در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مدل، المان‌های پوسته^۲ و حجمی^۳ به ترتیب جایگزین المان‌های تیر و فنر در روش وینکلر می‌شوند. در این نوشتار، با استفاده از المان‌های حجمی و پوسته در مدل‌سازی، عوامل موثر بر عملکرد لوله بحث و بررسی می‌شود.

۳-۱- تغییر مکان خط لوله در تقاطع با گسل معکوس

وضعیت تغییر شکل یک لوله مدفون تحت اثر حرکت گسل معکوس در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، Δ تغییر مکان گسل معکوس، β زاویه تقاطع خط لوله با گسل و ψ زاویه بین صفحه شکست گسل و سطح افقی است. محورهای x و y و z به ترتیب امتداد خط لوله، عمود بر خط لوله (عرضی) و قائم بر خط لوله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲)، مؤلفه‌های تغییر مکان در راستای محورهای مختلف برای یک گسل معکوس از روابط (۴-۶) محاسبه می‌شود. در این مقاله از روابط تجربی بیان شده در بخش قبل برای تخمین تغییر مکان Δ استفاده می‌شود. با استفاده از رابطه ۲، جابه‌جایی پیشینه گسل مانند چند بزرگی زلزله قابل انتظار در جدول (۱) نشان داده شده است.

$$\Delta_x = \Delta \cos(\psi) \sin(\beta) \quad (4)$$

$$\Delta_y = \Delta \cos(\psi) \cos(\beta) \quad (5)$$

$$\Delta_z = \Delta \sin(\psi) \quad (6)$$

با توجه به امتداد قرارگیری خط لوله نسبت به صفحه گسل و همچنین جهت لغزش در گسل مسبب، تنش محوری کششی و یا فشاری ممکن است در لوله اتفاق بیفتد. هنگامی که یک خط لوله فولادی تحت تاثیر تغییر مکان گسل معکوس قرار می‌گیرد، تنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله قابل توجه بوده و می‌تواند موجب چروکیدگی در جداره آن و در نتیجه بروز حالت حدی ناپایداری کمانشی شود. شایان ذکر است که در خطوط لوله فولادی، این مود گسیختگی از رواج بیشتری نسبت به گسیختگی کششی برخوردار است. همان‌گونه که در بخش‌های بعدی بحث می‌شود طراحی سازه‌ای می‌کنند با تمهیداتی از قبیل ایجاد زاویه تقاطع مناسب، نیروی فشاری قابل ملاحظه در لوله ناشی از لغزش گسل به وجود نیاید.

۳-۲- مدل سه بعدی اجزاء محدود

در این بخش، مدل سه بعدی سیستم شده مطالعه در نرم‌افزار آباکوس^۴ با فرض رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی ارائه شده است [24]. شکل (۳) نمای کلی مدل اجزاء محدود سیستم خاک و لوله را نمایش می‌دهد. پیرو مطالعات پارامتری صورت گرفته در پژوهش‌های پیشین، طول خط لوله ۶۰ متر (تقریباً ۶۰ برابر قطر لوله) و همچنین ابعاد مدل در راستای y و z به ترتیب برابر ۱۰ و ۵ متر در نظر گرفته می‌شود [3, 15]. همچنین، فرض شده است که گسل معکوس از وسط خط لوله عبور کند. در شبکه اجزاء محدود، ابعاد المان‌های خاک و لوله در نزدیکی گسل به دلیل قوی‌تر بودن آثار تغییر مکان ناشی از گسل ریزتر در نظر گرفته می‌شود تا تنش و کرنش خمیری ایجاد شده در این مناطق با دقت بیشتری در تحلیل رفتار لحاظ شود. مصالح لوله و خاک به صورت الاستو پلاستیک مدل شده است. لوله فولادی از جنس API 5L-X65 و با المان‌های پوسته S4R در نظر گرفته می‌شود. به عنوان یک تخمین مناسب، مدل ساختاری رامبرگ-اوسگود^۵ برای بیان رفتار الاستیک-

4 ABAQUS
5 Ramberg-Osgood

1 Winkler
2 Shell
3 Solid

به منظور افزایش دقت مدل اجزاء محدود برای تحلیل، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و لوله ضروری است. در پژوهش حاضر، سطح تماس بین لوله و خاک به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش بین خاک و لوله و همچنین جداافتادگی بین آنها موجود باشد مدل می‌شود. در این روش برای درک بهتر رفتار واقعی اندرکنش لوله-خاک، از المان‌های تماسی برای مدل‌سازی سطح تماس خاک و لوله استفاده شده است. برای اعمال المان سطح تماس در برنامه ABAQUS، دو نوع تماس اصطکاکی و تماس عمودی بین سطوح مشترک در نظر گرفته شده است. در تماس اصطکاکی که از قانون اصطکاک کولمب تبعیت می‌کند، از روش پنالتی با ضریب اصطکاک بین خاک و لوله برابر ۰/۸ استفاده شده است [21]. در تماس عمودی بین سطوح نیز از روش پنالتی و تماس سخت استفاده شده است.

۳-۳- روش تحلیل

مروری بر مطالعات تحلیلی و نیز آزمایش‌های انجام شده در گذشته نشان می‌دهد که در لوله‌های مدفون بر خلاف سازه‌های روزمینی، آثار اینرسی ناشی از وزن لوله و محتویات آن نسبتاً بدون اهمیت بوده و با تقریب قابل قبولی از نیروی اینرسی چشم‌پوشی می‌شود. ضمناً، با توجه به ناچیز بودن جرم لوله مدفون نسبت به سختی آن، دوره تناوب طبیعی نوسان لوله عدد کوچکی است. در این صورت می‌توان فرض کرد که دوره تناوب از مقدار کم‌تری در مقایسه با مدت زمان اعمال جابه‌جایی ماندگار ناشی از حرکت گسل برخوردار باشد. به عبارت دیگر، سرعت پایین لغزش گسل بر تنش و کرنش ایجاد شده در خطوط لوله مدفون تأثیر چندانی ندارد و بنابراین تحلیل رفتار لوله می‌تواند در حالت استاتیکی صورت گرفته و از پاسخ بسیار ناچیز دینامیکی خط لوله چشم‌پوشی نمود.

تحلیل استاتیکی غیرخطی سیستم خاک و لوله در دو گام مجزا انجام می‌شود. در گام نخست، بارگذاری ثقلی اعمال می‌شود و در گام بعدی، حرکت گسل با افزایش تدریجی تغییر مکان Δ وارد می‌شود. گره‌های کف و سطوح مرزی قائم در بخش ثابت مدل (گره‌های خاک و لوله) در سه جهت انتقالی

پلاستیک فولاد به کار می‌رود [20]. معادله (۷) ارتباط تنش-کرنش مصالح مصرفی در لوله را نشان می‌دهد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{Ep} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (7)$$

که در آن ε کرنش، σ تنش، Ep مدول ارتجاعی اولیه، σ_y تنش جاری شدن مصالح لوله، n و r پارامترهای رامبرگ-اوسگود است. پارامترهای رامبرگ-اوسگود از مراجع معتبر مانند API و یا در غیر این صورت به وسیله آزمایش بدست می‌آید [25]. خاک اطراف لوله نیز به وسیله المان‌های حجمی C3D8R مدل‌سازی می‌شود. به طور مشابه با سایر مطالعات، از مدل خمیری دراگر-پراگر اصلاح شده برای تعریف رفتار غیرخطی خاک استفاده می‌شود [26]. جداول (۲ و ۳) مشخصات لوله فولادی و خاک پیرامون آن را در مدل مورد مطالعه نشان می‌دهد.

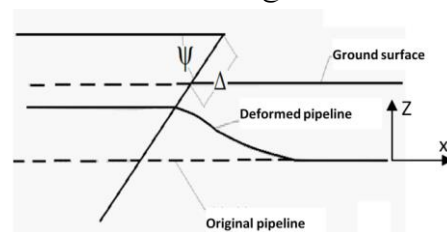
جدول ۱- بیشینه جابه‌جایی ناشی از حرکت گسل معکوس.

M_w	5.0	6.0	7.0	8.0
$\Delta(m)$	0.41	0.79	1.55	3.02

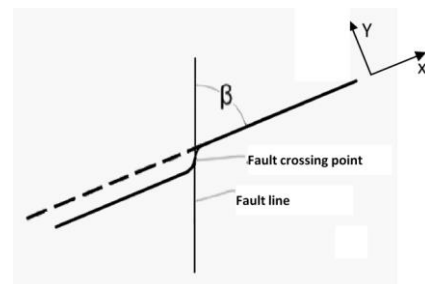
Table 1. Maximum displacement due to reverse fault movement.

شکل ۲- تغییر شکل لوله مدفون ناشی از حرکت گسل معکوس: (الف)

نیمرخ و (ب) پلان.



(الف)



(ب)

Fig. 2. Deformation of buried pipeline due to reverse fault motion: (a) section and (b) plan.

گسل و خط لوله، زاویه شیب گسل، نوع خاک اطراف لوله، عمق دفن، قطر و ضخامت لوله، مصالح لوله و ویژگی‌های سطح خارجی لوله است. لوله مدفون فولادی به قطر خارجی ۰/۹۱۴ متر و ضخامت جداره ۱۲ میلی‌متر واقع در دو نوع خاک دانه‌ای با مشخصات جدول (۳) در نظر گرفته شده است. تحلیل پاسخ لوله تحت اثر تغییر مکان گسل معکوس تا $\Delta=4\text{m}$ انجام می‌شود. شایان ذکر است که زلزله‌ی مشخصه‌ی گسل با این مقدار تغییر مکان، طبق رابطه (۲) دارای بزرگای $8/4$ ریشتر است.

۴-۱- تأثیر زاویه تقاطع گسل با لوله

با در نظر گرفتن عمق دفن برابر ۲ متر از بالاترین نقطه خط لوله، تأثیر زاویه تقاطع β بر مقادیر کرنش محوری لوله برآورد شده است. شکل (۴) میزان تغییرات کرنش محوری فشاری در مقابل جابه‌جایی اعمال شده به لوله واقع در ماسه سست را به ازای مقادیر ۳۰ و ۶۰ درجه برای زاویه β و مقدار ۴۰ درجه برای زاویه شیب گسل ψ نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده حاکی از آن است که زاویه‌ی تقاطع بزرگتر، مقادیر کرنش فشاری بیشتری را در پی دارد. بر اساس رابطه (۴) نیز می‌توان انتظار داشت که خط لوله با امتداد نزدیک به عمود بر راستای یک گسل معکوس با زاویه شیب معین، تحت تأثیر مولفه تغییر مکان محوری و یا کاهش طول قابل ملاحظه قرار می‌گیرد. همچنین در شکل (۴)، مقادیر بیشینه کرنش لوله به وسیله مدل اجزای محدود با نتایج روش وینکلر حاصل از مرجع [27] مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که مدل وینکلر در محدوده‌ی وسیعی از تغییر مکان گسل با نتایج روش دقیق اجزای محدود هماهنگی بسیار خوبی دارد.

بسته شده است. یک تغییر مکان یکنواخت ناشی از حرکت گسل به موازات صفحه گسل بر گره‌های خارجی بخش متحرک مدل (گره‌های خاک و لوله) به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، گره‌های کف و سطوح مرزی قائم در بخش متحرک سیستم خاک-لوله در جهت افقی Δ بسته است.

شکل ۳- مدل اجزاء محدود خط لوله در تقاطع با گسل معکوس: (الف) محیط خاک و گسل، (ب) لوله‌ی فولادی.

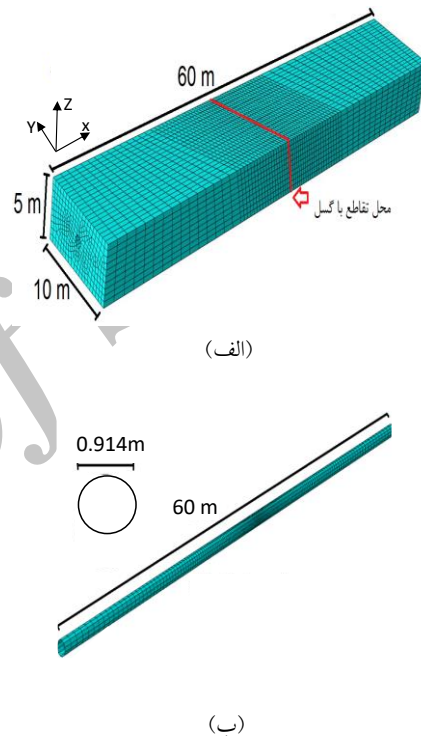


Fig. 3. Finite element model of the (a) soil formation with tectonic fault, and (b) steel pipeline.

۴- نتایج و بحث

عواملی که بر پاسخ یک لوله مدفون هنگام عبور از گسل معکوس مؤثر است شامل مقدار جابه‌جایی گسل، زاویه تقاطع

جدول ۲- مشخصات لوله فولادی استفاده شده [۲۵].

Yield stress (σ_1)	490 MPa
Failure stress (σ_2)	531 MPa
Failure strain (ϵ_2)	4.0%
Elastic young's modulus (E_1)	210 GPa
Yield strain ($\epsilon_1 = \sigma_1/E_1$)	0.233%
Plastic young's modulus ($E_2 = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\epsilon_2 - \epsilon_1)$)	1.088 GPa
Diameter (D)	0.9144 m
Thickness (t)	0.0119 m
Length (L)	60 m

Table 2. Steel pipeline properties [25]

جدول ۳- مشخصات خاک استفاده شده

نوع خاک	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک Φ ($^\circ$)	زاویه اتساع Ψ ($^\circ$)	ضریب پواسون ν
ماسه سست	1850	8	30	0	0.3
ماسه متراکم	2100	50	40	0	0.3

Table 3. Physical parameters of the soil

شکل ۴- اثر زاویه تقاطع بر بیشینه کرنش فشاری در ماسه سست به ازای زاویه شیب گسل $\psi=40^\circ$.

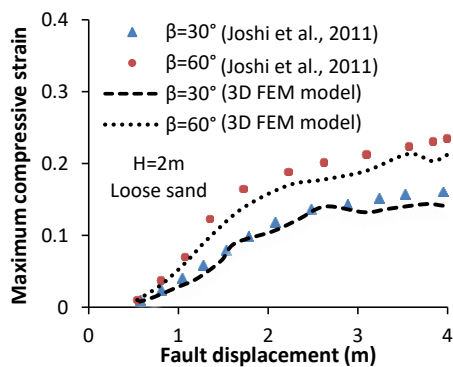


Fig. 4. Effect of crossing angle on the peak pipe compressive strain for loose sand ($\psi=40^\circ$).

شکل ۵- اثر زاویه شیب گسل بر بیشینه کرنش فشاری لوله در ماسه سست به ازای زوایای تقاطع $\beta=60^\circ$ و $\beta=30^\circ$.

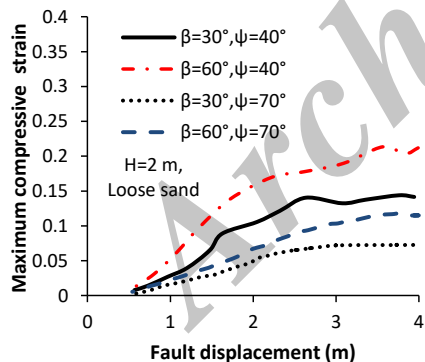


Fig. 5. Effect of fault deep angle on the peak pipe compressive strain for loose sand ($\beta=30^\circ$ and $\beta=60^\circ$).

۴-۴- تأثیر نوع خاک

شکل (۷) تغییرات بیشینه کرنش فشاری خط لوله در برابر جابه‌جایی گسل معکوس برای دو نوع خاک دانه‌ای شامل ماسه سست و متراکم را نشان می‌دهد. افزایش تراکم خاک باعث افزایش سختی محیط پیرامون خط لوله شده و در نتیجه نیروهای اندرکنشی بین لوله و خاک افزایش می‌یابد و این

۴-۲- تأثیر زاویه شیب گسل

شکل (۵) تأثیر زاویه شیب ψ بر مقادیر بیشینه کرنش محوری فشاری را نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات کرنش در برابر مقادیر مختلف جابه‌جایی گسل و با در نظر گرفتن دو زاویه‌ی مختلف شیب گسل به ترتیب برابر 40° و 70° درجه نمایش داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، با افزایش زاویه شیب گسل به ازای یک زاویه تقاطع معین، از مقدار کرنش محوری در لوله کاسته شود. لازم به گفتن است که از روابط (۴-۶) نیز می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه شیب، مؤلفه‌ی جابه‌جایی گسل معکوس در راستای محور خط لوله کاهش یافته و در نتیجه کرنش محوری لوله رو به کاهش می‌رود.

۴-۳- تأثیر عمق دفن لوله

برای بررسی تأثیر عمق دفن لوله بر میزان کرنش‌های محوری، پاسخ خط لوله ناشی از جابه‌جایی گسل در دو عمق متفاوت با هم مقایسه می‌شود. مطابق شکل (۶)، با افزایش عمق دفن لوله میزان بیشینه کرنش محوری افزایش یافته است. نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش عمق دفن لوله و به دنبال آن افزایش میزان اصطکاک در واحد طول لوله، اندرکنش خاک و لوله افزایش یافته و در نتیجه کرنش‌های محوری بیشتری در لوله حاصل می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن میزان عمق دفن کمتر تا حدی که مجاز باشد می‌تواند پاسخ لوله ناشی از جابه‌جایی گسل را کاهش دهد. اگر چه در خاک‌های دانه‌ای، کاهش عمق دفن بر اساس فقط بار مرده تا مقدار $D/6$ برای پوشش خط لوله امکان‌پذیر است [28]، لیکن باید توجه نمود که بارهای زنده و سایر عوامل محیطی نیز در تعیین مقدار مجاز پوشش خاک تأثیر گذار هستند.

قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر لوله‌های با جداره نازک‌تر حتی به ازای جابه‌جایی‌های کوچک نیز در معرض کماتش و شکست قرار خواهند گرفت. به علاوه، وجود خاک متراکم در اطراف لوله عاملی برای کاهش بیشتر در میزان جابه‌جایی بحرانی محسوب می‌شود.

در شکل (۱۱)، کرنش فشاری بحرانی در آستانه چروکیدگی، ϵ_{cr} ، به ازای نسبت‌های متفاوت قطر به ضخامت لوله نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که لوله‌های با ضخامت کمتر در مقادیر کرنش بحرانی کوچکتری دچار کماتش می‌شوند. لازم به گفتن است که نتایج عددی مذکور با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [29] هماهنگی دارد.

شکل ۶- اثر عمق دفن بر بیشینه کرنش محوری لوله در ماسه سست تحت جابه‌جایی گسل معکوس.

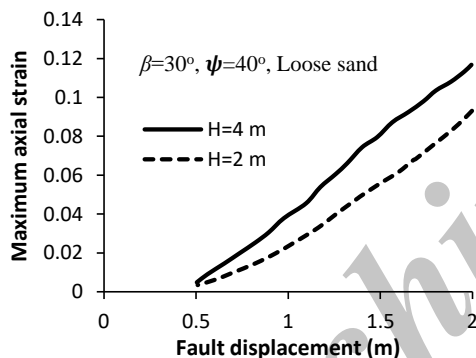


Fig. 6. Effect of burial depth on the maximum axial strain for loose sand.

شکل ۷- اثر نوع خاک بر بیشینه کرنش فشاری لوله تحت جابه‌جایی گسل معکوس.

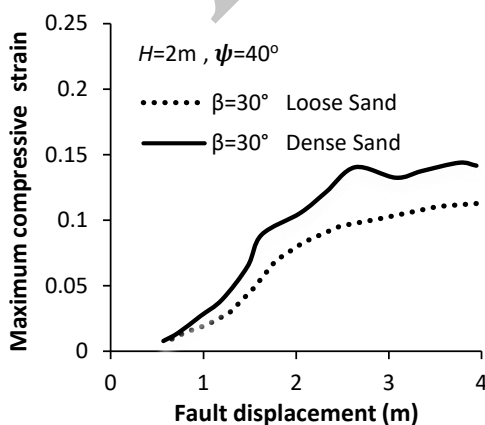


Fig. 7. Effect of backfill type on the maximum compressive strain in the pipeline.

موضوع سبب می‌شود تا کرنش‌های بزرگ‌تری در لوله شکل گیرد. به عبارت دیگر، استفاده از خاکریز با تراکم کمتر اندرکرنش خاک و لوله را کاهش داده و در نتیجه کرنش لوله به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۴-۵- تأثیر پوشش خارجی لوله

در این بخش، تاثیر کیفیت پوشش سطح خارجی لوله یا میزان اصطکاک بین خاک و لوله بر عملکرد خط لوله ارزیابی می‌شود. شکل‌های (۸ و ۹) روند تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری به ازای دو نوع پوشش متفاوت برای سطح خارجی لوله به ترتیب واقع در ماسه سست و متراکم را نشان می‌دهند. در صورت استفاده از پوشش صیقلی و سخت در بدنه لوله، ضریب اصطکاک برابر ۰/۵ فرض می‌شود و برای حالتی که از این پوشش مخصوص در بدنه لوله استفاده نشده باشد، این ضریب مشابه سایر بخش‌های مقاله برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است [21]. ملاحظه می‌شود سطوح زیرتر که ضریب اصطکاک f بیشتری دارند کرنش‌های بزرگتری را نیز ایجاد می‌کنند. به عبارت دیگر، با تعبیه پوشش مناسب در بدنه لوله علاوه بر جلوگیری از فرسوده شدن آن می‌توان میزان کرنش‌ها را نیز کاهش داد. همچنین، با توجه به مقایسه نرخ کاهش مقادیر کرنش در شکل‌های (۸ و ۹)، استفاده از پوشش صیقلی برای لوله واقع در خاک متراکم از کارایی بیشتری برخوردار است.

۴-۶- تأثیر نسبت قطر به ضخامت لوله

در این بخش تأثیر نسبت قطر به ضخامت برای لوله فولادی به قطر ۰/۹۱۴ متر به ازای ضخامت‌های مختلف از ۶ تا ۲۰ میلی‌متر ارزیابی می‌شود. این مقادیر نسبت قطر به ضخامت لوله از ۴۶ تا ۱۵۲ را پوشش می‌دهد. نتایج تحلیل برای دو نوع خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. فرض می‌شود کماتش موضعی در لوله موقعی اتفاق بیافتد که کرنش فشاری به مقدار کرنش چروکیدگی حاصل از رابطه (۳) برسد. شکل (۱۰) بطور مشخص جابه‌جایی بحرانی گسل، Δ_{cr} مقیاس شده به وسیله قطر لوله را بر حسب نسبت قطر به ضخامت لوله نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت به قطر به ضخامت لوله، مقدار جابه‌جایی بحرانی به طور

شده که این موضوع نشان‌دهنده شروع چروکیدگی شدن در لوله است. با توجه به شکل، کرنش آستانه چروکیدگی، مانند جابه‌جایی ۰/۳۲ متر، حدود ۰/۰۰۷ تخمین زده می‌شود. از طرف دیگر، کرنش چروکیدگی لوله مفروض بنا بر رابطه ۳ در حدود ۰/۰۰۵ محاسبه می‌شود. پس، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در این مقاله هماهنگی خوبی با استانداردهای طراحی دارد.

از شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که پس از چروکیدگی جداره لوله در مجاورت گسل معکوس، مقادیر کرنش در این ناحیه به سرعت افزایش می‌یابد به طوری که به ازای جابه‌جایی بیش از ۲ متر برای گسل، مقدار کرنش به بیش از ۵ درصد می‌رسد. در حالی که، کرنش‌های لوله در سایر نواحی به مراتب کم‌تر و تقریباً هم‌مقدار است. این نتیجه هماهنگی بسیار خوبی با یافته‌های سایر پژوهشگران دارد [30]. قابل ذکر است که انحنا حاصل از کرنش‌های بزرگ در مجاور گسل می‌تواند سبب پارگی و نشت در لوله شود.

۴-۸- گسیختگی کششی

همان‌گونه که در بخش ۲ بیان شد، توصیه‌های متعددی برای تخمین میزان ظرفیت کششی انواع لوله به وسیله مراجع ذی‌صلاح ارائه شده است. به عنوان نمونه برای دست‌یابی به سطح عملکردی معادل عدم شکست، دستورالعمل‌های طراحی آیین‌نامه ASCE مقدار کرنش مجاز کششی خطوط لوله نفت و گاز را ۳ تا ۵ درصد در نظر می‌گیرد [31]. شکل (۱۴) نمودار توزیع کرنش کششی لوله در مناطق بحرانی نزدیک گسل را به ازای جابه‌جایی گسل تا مقدار ۳ متر جدول (۱)، زلزله‌ی قابل رخداد با بزرگای ۸ ریشتر نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که میزان کرنش کششی لوله ناشی از حرکت گسل از ۰/۰۵ تجاوز نکرده است. بنابراین بر اساس نتایج حاصل از شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، مشاهده می‌شود که کرنش فشاری نسبت به کرنش کششی در وضعیت بحرانی‌تری قرار دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که کمناش موضعی نسبت به گسیختگی کششی، مود خرابی رایج در لوله‌های مدفون فولادی است.

شکل ۸- اثر ویژگی‌های سطح خارجی لوله بر بیشینه کرنش فشاری (ماسه سست).

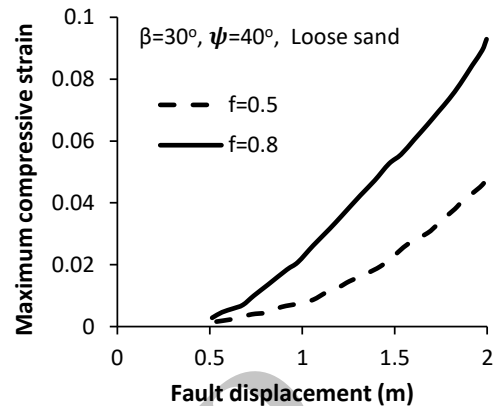


Fig 8. Effect of pipe surface characteristics on the maximum compressive strain for loose sand.

شکل ۹- اثر ویژگی‌های سطح خارجی لوله بر بیشینه کرنش فشاری (ماسه متراکم).

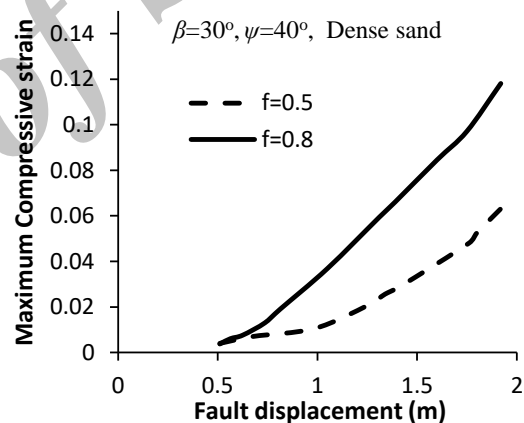


Fig 9. Effect of pipe surface characteristics on the maximum compressive strain for dense sand.

۴-۷- کمناش خط لوله

با فرض تامین عمق دفن بیش از یک متر، خطوط لوله در برابر تنش‌های فشاری بزرگ اصولاً به شکل موضعی دچار کمناش می‌شوند. شکل (۱۲) توزیع کرنش محوری فشاری در سراسر طول لوله را به ازای چند جابه‌جایی مختلف گسل شامل ۱/۵ و ۲ متر نشان می‌دهد. ضمناً، نمودار توزیع کرنش فشاری در طول محدودی از لوله مانند ناحیه بحرانی نزدیک گسل در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که به ازای تغییر مکان گسل تا مقدار ۰/۳۲ متر، کرنش فشاری لوله نسبتاً محدود است ولی با اعمال جابه‌جایی فراتر از ۰/۳۲ متر، مقدار کرنش فشاری دچار افزایش ناگهانی

شکل ۱۳- تغییرات کرنش فشاری در امتداد لوله نزدیک به محل عبور گسل معکوس.

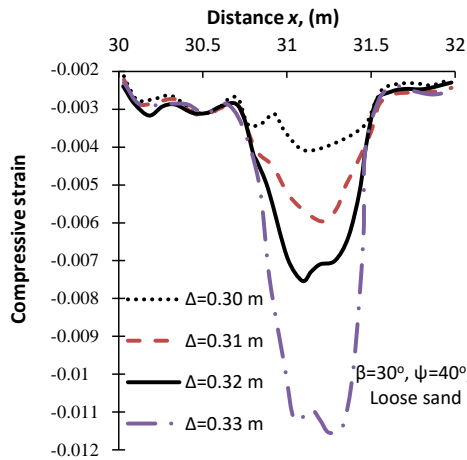


Fig 13. Compressive strain variations along the pipeline close to the reverse fault plane.

شکل ۱۴- تغییرات کرنش کششی لوله در امتداد لوله نزدیک به محل عبور گسل معکوس.

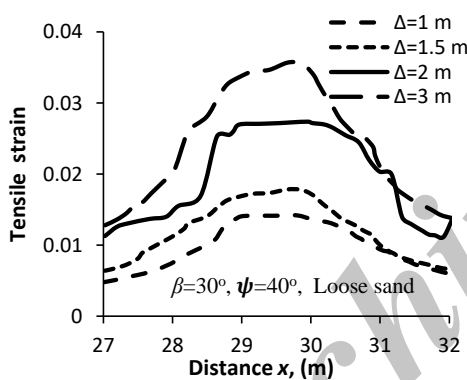


Fig 14. Tension strain variations along the pipeline close to the reverse fault plane.

۵- راهکارهای کنترل و یا کاهش خرابی در لوله

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر، روش‌های مختلفی برای کاهش خسارت لرزه‌ای در خطوط لوله مدفون ناشی از برخورد گسل قابل پیشنهاد است. این روش‌ها شامل انتخاب مسیر مناسب برای خطوط لوله در حوالی گسل، استفاده از لوله با مصالح قوی‌تر و جداره ضخیم‌تر، کاهش نیروی منتقل شده به لوله ناشی از حرکت گسل و استفاده از مصالح و اتصالات شکل‌پذیر می‌شوند. در ادامه، به هر یک از موارد مذکور به اختصار اشاره می‌شود.

شکل ۱۰- جابه‌جایی بحرانی مقیاس شده گسل برحسب نسبت قطر به ضخامت لوله.

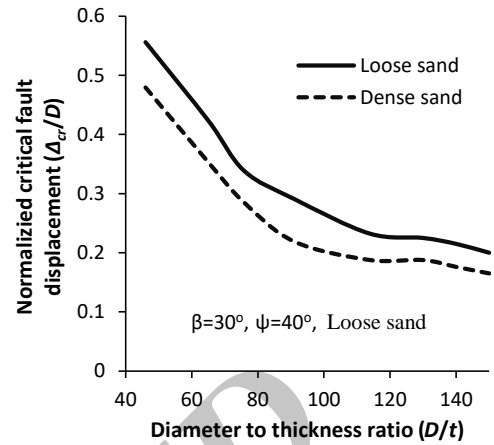


Fig 10. Critical fault movement versus the diameter to thickness ratio.

شکل ۱۱- کرنش بحرانی بر حسب نسبت قطر به ضخامت لوله.

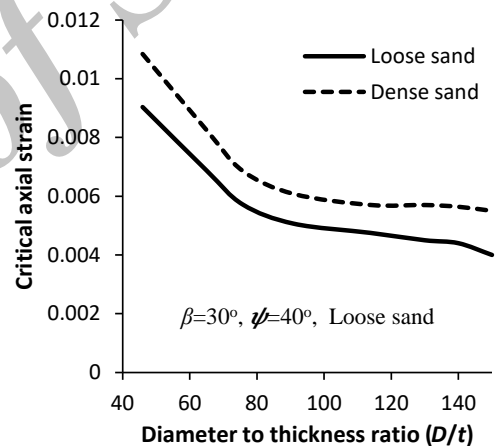


Fig 11. Critical axial strain versus the diameter to thickness ratio.

شکل ۱۲- توزیع کرنش فشاری در لوله ناشی از اعمال جابه‌جایی‌های مختلف گسل (β=30°, ψ=70°, Loose sand, H=2m).

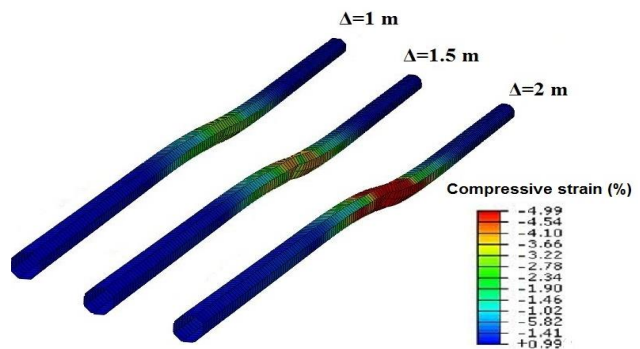


Fig 12. Compressive strain distribution in the deformed pipe (β=30°, ψ=70°, Loose sand, H=2m).

۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در این نوشتار به شرح زیر جمع‌بندی می‌شود.

۱- در لوله‌های مدفون تحت حرکت گسل معکوس، مقادیر کرنش فشاری ایجاد شده همواره نسبت به کرنش کششی بحرانی‌تر هستند.

۲- با نزدیک شدن راستای خط لوله به امتداد گسل معکوس از شدت پاسخ در لوله کاسته می‌شود. ضمناً، در شرایطی که خط لوله امتداد گسل را با زاویه نزدیک به قائم قطع کند، احتمال بروز پدیده کمانش و در نتیجه شکست زود هنگام در لوله افزایش می‌یابد.

۳- با نزدیک‌تر شدن خط لوله مدفون به سطح زمین و یا کاهش ارتفاع خاکریز روی آن، پاسخ لوله در برابر حرکت گسل کاسته می‌شود.

۴- هر چقدر زاویه شیب گسل کمتر باشد، مقادیر کرنش فشاری افزایش می‌یابد و در نتیجه احتمال ایجاد کمانش به مراتب بیشتر می‌شود.

۵- تراکم و سختی خاک اطراف خط لوله نقش مؤثری بر مقادیر کرنش‌های به وجود آمده در لوله دارد. در واقع با افزایش تراکم خاک، اندرکنش خاک و لوله بیشتر شده و در نتیجه مقادیر کرنش‌های محوری رو به افزایش می‌رود.

۶- ویژگی‌های سطح خارجی لوله، رفتار خط لوله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر اندازه که سطح خارجی زبرتر و دارای اصطکاک تماسی بیشتری با توده خاک پیرامون خط لوله باشد، مقادیر پاسخ لوله بیشتر می‌شود.

۷- مراجع

1. EERI, "The Izmit (Kocaeli) Turkey earthquake of August 17, 1999", EERI special earthquake report, 1999.
2. Uzarski, J., Arnold, C., "Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999, Reconnaissance Report", Earthquake Spectra, Professional J EERI, 2001, 17 (Suppl. A).
3. Davoodi Moghaddam, M., "Seismic behavior of buried pipelines due to surface faulting", MSc Thesis, University of Kashan, Iran, 2014, (In Persian).
4. Newmark, N.M., Hall, W.J., "Pipeline design to resist large fault displacement", In Proceedings of

به عنوان راهکار نخست می‌توان با تغییر مسیر خط لوله از تلاقی آن با گسل فعال ممانعت نموده و یا دست کم زاویه تقاطع را به گونه‌ای انتخاب کرد که تاثیر گسل کاهش یابد. در ضمن با توجه به اینکه مقدار تنش کششی مجاز فولاد از تنش فشاری مجاز آن بیشتر است، باید از هرگونه تقاطع خط لوله فولادی با گسل که سبب نیروی فشاری زیاد در لوله می‌شود دوری کرد. بنابراین توصیه می‌شود که گسل‌های معکوس در یک زاویه تقاطع تا حد امکان کوچک به وسیله خط لوله قطع شوند تا تنش‌های فشاری در لوله کمینه شود.

استفاده از لوله با ضخامت بیشتر، مصالح با شکل‌پذیری زیاد و یا مقاومت بالا، عملکرد لوله را ارتقا داده و میزان آسیب لرزه‌ای به خط لوله مدفون را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، می‌توان از گزینه‌های کاهش نیرو و تغییر شکل برای کنترل میزان خرابی در لوله بهره برد. به عنوان مثال، استفاده از ماسه نرم با زاویه اصطکاک داخلی کم در پیرامون لوله می‌تواند کرنش لوله مدفون را در مجاور گسل کاهش دهد. همچنین، استفاده از پوشش صیقلی و سخت اصطکاک خاک و بدنه لوله را در ناحیه گسل کاهش داده و سبب می‌شود تا ظرفیت لوله برای تحمل تغییر مکان بیشتر افزایش یابد. به علاوه، اقداماتی مانند کم کردن عمق دفن لوله تا حد امکان و استفاده از خاکریز با چگالی کمتر می‌تواند در کاهش کرنش‌های محوری و به دنبال آن در بهبود عملکرد خط لوله مؤثر واقع شود.

استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر در خطوط لوله هنگام عبور از گسل‌های فعال از جمله دیگر اقدامات مؤثر در کاهش خسارات ناشی از جابه‌جایی ماندگار زمین محسوب شود. این اتصال می‌تواند تغییر مکان گسل را در تمامی جهت‌ها دفع کرده و مانع از انتقال نیروی محوری به بدنه لوله شود. نکته حائز اهمیت در خصوص کاربرد اتصالات انعطاف‌پذیر، تعیین محل مناسب قرارگیری و نیز قابلیت شکل‌پذیری متناسب با میزان تغییر مکان گسل در آن‌ها می‌باشد. بدیهی است در صورتی که محل تعبیه اتصال انعطاف‌پذیر در امتداد لوله منطبق بر محدوده حرکت گسل نباشد، این اتصال عملکرد خوبی نخواهد داشت. جزئیات بیشتر در خصوص چگونگی استفاده و عملکرد این نوع اتصالات در مرجع [32] گزارش شده است.

- McCalpin, J.P., Dorser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhr, R.L., Knuepfer, P.L.K., Smith, R.B., dePolo, C.M., O'Leary, D.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S., Toro, G.R., "A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA)", *Earthquake Spectra*, 2003, 19(1), pp. 191-219.
19. Wells, D.L., Coppersmith, K.J., "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84 (4), pp. 974-1002.
 20. IITK-GSDMA, "Guidelines for seismic design of buried pipelines", National Information Center of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2008.
 21. The oil ministry of Iran, "Iranian seismic design code for oil industries", (2nd Edition), Pub. No. 038-10, 2010 (In Persian).
 22. American Lifelines Alliance, (ALA)-ASCE, "Guidelines for the design of buried steel pipe", 2001, (with addenda through February 2005).
 23. Tahghighi, H., "On the structural seismic evaluation of pipelines against earthquake hazards", Report on research project, grant-in-aid for scientific research, University of Kashan, 2014.
 24. ABAQUS, "General finite element analysis program", Abaqus manual, Version 6.11, HKS, Inc., 2012.
 25. American Petroleum Institute, API, "Specification for pipeline", 1990.
 26. Shadab Far, M., Hassani, N., Rasti, R., Faraji, J., "A study on the nonlinear behavior of crossing-fault buried pipelines using pushover analysis", *American Journal of Civil Engineering*, 2014, 2(6), pp. 152-157.
 27. Joshi, S., Prashant, A., Deb, A., Jain, S.K., "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31, pp. 930-940.
 28. Moser A.P., "Buried pipe design", 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 2001.
 29. Kyriakides, S., Ju, G.T., "Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending I: experiments", *International Journal of Solids and Structures*, 1992, 29, pp. 1117-42.
 30. Das, S., Cheng, J., Murray, D., and Nazemi, N., "Effects of monotonic and cyclic bending deformations on NPS12 wrinkled steel pipe", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2008, 134 (12), pp. 1810-1817.
 31. American Society of Civil Engineers (ASCE), "Differential ground movement effects on buried pipelines", *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*, 1984, pp. 150-228.
 32. O'Rourke, M.J., Liu, X., "Seismic design of buried and offshore pipelines", MCEER, University at Buffalo, State University of New York, 2012.
- the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1975, pp. 416-25.
5. Kennedy, R.P., Chow, A.W., Williamson, R.A., "Fault movement effects on buried oil pipeline", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 1977, 103, pp. 617-33.
 6. Wang, L.R.L., Yeh, Y., "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, 13, pp. 75-96.
 7. Bargi, Kh., Heravi, GhR., "Earthquake effect on the buried gas pipeline", *J. of Faculty of Eng., University of Tehran*, 1995, pp. 22-38 (In Persian).
 8. Vougioukas, E.A., Theodossis, C., Carydis, P.G., "Seismic analysis of buried pipelines subjected to vertical fault movement", *ASCE*, 1979, 105, pp. 432-41.
 9. Desmond, T.P., Power, M.S., Taylor, C.L., Lau, R.W., "Behavior of large-diameter pipeline at fault crossings", *ASCE, TCLEE*, 1995, 6, pp. 296-303.
 10. Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27, pp. 200-11.
 11. Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., Gkesouli, V. "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31, pp. 1452-1464.
 12. Ha, D., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D, Palmer, M.C., "Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strikeslip faulting-a centrifuge investigation", *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45, pp.1733-42.
 13. Abdoun, T.H., Ha, D., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., Stewart, H., "Factors influencing the behavior of buried pipelines subject to earthquake faulting", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29, pp. 415-427.
 14. Rahimzadeh Rofooei, F., Hojat Jalali, H., Attari, N.K.A., Kenarangi, H., Samadian, M., "Parametric study of buried steel and high density polyethylene gas pipelines due to oblique-reverse faulting", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2015, 42(3), pp. 178-189.
 15. Vazouras, P., Karamanson, S., Dakoulas, P., "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41, pp. 164 -180.
 16. Vazouras, P., Dakoulas, P., Karamanos, S.A., "Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 72, pp. 48 -65.
 17. Tahghighi, H., Hajnorouzi, M.M., "Numerical evaluation of the strike-slip fault effects on the steel buried pipelines", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (under publication)*.
 18. Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A.R., Ake, J.P., Slemmons, D.B.,

Finite Element Analysis of Buried Pipelines Crossing Reverse Fault

H. Tahghighi^{1*}, M.M. Hajnorouzi²

1- Assist. Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Eng., University of Kashan

2- M.Sc., Structural Engineering, University of Kashan

*tahghighi@kashanu.ac.ir

Abstract:

Response evaluation of buried steel pipelines at intersection with active faults is among the top seismic design priorities. This is because the axial and bending strains induced to the pipeline by step-like permanent ground deformation may become fairly large and lead to rupture, either due to tension or due to buckling. Surface faulting has accounted for many pipe breaks during past earthquakes, such as the 1971 San Fernando (USA), the 1995 Kobe (Japan), the 1999 Izmit (Turkey), the 1999 Chi-Chi (Taiwan) events and more recently, the 2004 Mid Niigata earthquake in Japan. Literature review reveals that the analysis of pipeline subjected to fault motion is previously studied on the case of strike-slip fault. Whereas, a 3D large scale finite element analysis is a powerful method and allows a rigorous solution of the problem with minimizing the number of necessary approximations. The aim of present work is to examine and compare the mechanical response of continuous (welded) buried steel pipelines crossing active reverse faults by three dimensional FEM. General-purpose finite element program ABAQUS is employed to accurately simulate the mechanical behaviour of the steel pipe, the surrounding soil medium and their interaction. Meanwhile, non-linear geometry of the soil and the pipe through a large-strain description of the pipeline-soil system and the inelastic material behaviour for both the pipe and the soil are considered. For 3D FEM continuum model, an elongated prismatic model is considered, where the pipeline is embedded in the soil. Four-node reduced-integration shell elements (type S4R) are employed for modeling the pipeline cylinder, whereas eight-node reduced-integration brick elements (C3D8R) are used to simulate the surrounding soil. The analysis is conducted in two steps: gravity loading is applied first and subsequently fault movement is imposed. Seismic fault plane is assumed to be located at the middle cross-section of the pipeline. The steel pipeline was of the API5L-X65 type, with a bi-linear elasto-plastic stress-strain curve given by Ramberg-Osgood model. The mechanical behavior of soil is described through an elastic-perfectly plastic Drucker-Prager constitutive model. A contact algorithm is considered to simulate rigorously soil-pipeline interaction which accounts for large strains and displacements. Analysis proceeds using a displacement-controlled scheme, which gradually increases the fault displacement. Quasi-static analyses were carried out by applying fault offset components to soil block in the continuum FE models through a smooth loading function of time. Buried steel pipelines have been analyzed for reverse fault motion to study the influence of design parameters via: crossing angle, backfill properties, burial depth, pipe surface property, pipe material and cross-section properties on maximum compressive strain, and buckling of the pipeline. The following main conclusions were obtained based on the response of studied pipeline subjected to reverse fault motion using the FEM model.

- For the steel pipeline subjected to reverse fault motion, compressive strain was always found to be more critical than the tensile strain.
- The capacity of the buried pipeline to accommodate the reverse fault offset could be increased by adopting: a loose granular backfill, a shallower burial depth, near-parallel orientation with respect to the fault line, a smooth and hard surface coating, and increasing pipe-wall thickness.
- Finally, the obtained information can provide either guidance for developing improved earthquake-resistant design or countermeasures to mitigate damage to pipelines crossing active reverse faults.

Keywords: Soil-pipe interaction, FEM, Reverse fault, Performance, Non-linear analysis