مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره هفدهم، شماره ۲، سال ۱۳۹۲



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: [۹٤/۱۲/۲۰]

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 می شود. با توجه به محدودیت روش های تحلیلی، انجام مطالعات شبیهسازی عددی و ارزیابی دقیق تر بازتاب لولههای مدفون ضروری به نظر می رسد. در این پژوهش، اثر جابهجایی قابل انتظار گسلهای معکوس روی پاسخ خطوط لوله فولادی پیوسته مدفون با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی تحلیل می شود. 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 می گیرد. در ادامه، راهکارهای متعددی برای کنترل و یا کاهش میزان خرابی در خط لوله ناشی از اثر گسلش ارائه می شود.

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

۱- مقدمه

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 تاثیر 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 می شوند شامل نیروها و

تاريخ پذيرش: [٩٤/١٠/٢٧]

تغییر شکل های ناشی از حرکت زمین و اثر انتشار امواج می-شوند. بررسی زلزله های گذشته نشان داده است که سهم اصلی خسارات ناشی از زلزله روی لوله های مدفون به علت ایجاد جابه جایی های ماندگار در زمین بوده و سهم مربوط به تأثیر امواج بسیار کمتر است. جابه جایی ماندگار زمین به تغییر شکل-های غیرقابل برگشت ناشی از گسلش، زمین لغزش، نشست یا گسترش جانبی ناشی از روانگرایی اطلاق می شود.

موارد متعددی از خرابی ناشی از گسلش سطحی طی زلزلههای گذشته گزارش شده است. از جمله آنها می توان به زلزلههای ۱۹۷۱ سان فرناندو ⁽(آمریکا)، ۱۹۹۵ کوبه^۲(ژاپن)،

۱۹۹۹ ازمیت^۱(ترکیه)، ۱۹۹۹ چی-چی^۲(تایوان) و ۲۰۰٤ نیگاتا^۳(ژاپن) اشاره نمود [3-1]. بررسیها نشان میدهد که تغییرشکل دائمی زمین ناشی از گسلش میتواند سبب کرنش-های محوری و خمشی نسبتا 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، نیومارک³و هال[°]خطوط لوله مدفون تحت اثر تغییرمکان گسل امتدادلغز را با استفاده از مدل کابل تحليل نمودند [4]. در اين تحليل، از مقاومت جانبي خاک و جابهجایی نسبی لوله و خاک چشمپوشی شده است. سپس، ايده نيومارك-هال با اضافه كردن آثار فشار جانبي خاك، اندرکنش خاک و لوله و نیز سختی خمشی لوله توسعه داده شد [6, 5]. برگی و هروی بر مبنای روش های تحلیلی فوق، اثر پدیده گسلش را روی خطوط لوله گاز مدفون بررسی کردهاند [7]. همچنین، وجیوکاس و همکاران لوله های 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 سانفرناندو به روش احتمالاتی توصیف شد [9]، به تازگی کارامیتروس^۷و 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 بهدست می آید [11 , 10]. علاوه بر روشهای تئوری، مطالعات آزمایشگاهی متعددی برای بررسی اثر گسلش روی لولههای مدفون صورت گرفته است [14–12].

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

68

سال های اخیر بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است [17-15]. لیکن در پژوهش های مرتبط با گسل معکوس، معمولا لوله و خاک با رفتار الاستیک مدل شده است و یا در صورت لحاظ کردن رفتار غیرخطی، آثار کمانش موضعی و تغییر شکل مقطع لوله به ندرت در شبیه سازی منظور شده است. این آثار که بر عملکرد لوله های مدفون در تغییر مکان های 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، ویژگی های سطح خارجی لوله، مشخصات خاک پیرامون لوله و عمق دفن لوله ارزیابی می شود. سپس، بر مبنای نتایج حاصل از تحلیل ها، توصیه های لازم برای کاهش و یا کنترل میزان خرابی ارائه می-شود.

۲- مبانی طراحی خط لوله تحت اثر گسلش در مواقعی که بزرگی زلزله به اندازه کافی زیاد باشد جابه-جایی ناشی از گسل میتواند به سطح زمین برسد و موجب ایجاد شکستگی در سطح زمین شود. گسل ها با توجه به جهت جابه جایی نسبی قسمت های 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 می-دهد. ولی در گسل امتدادلغز، لغزش در جهت افقی رخ می دهد و بر اساس زاویه تقاطع، نیروی کششی و یا فشاری در خط لوله ایجاد میشود. بنابر رخدادهای پیشین، گسل معکوس به دلیل ایجاد تنش های 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^مو همکاران ارائه

¹ Ismit

² Chi-Chi

³ Niigata 4 Newmark

⁶ Vougioukas

⁷ Karamitros

⁸ Youngs

لوله با گروه کاربری III و IV معمولا به ٤ درصد محدود می-شود. این محدودیت در ناحیه اتصالات و خمها برابر ۱ درصد است. به علاوه، بیشینه کرنش فشاری برابر کرنش در آستانه چروکیدگی لوله، ٤، پیشنهاد شده است که مقدار آن از رابطه ۳ به دست می آید.

 $\varepsilon_{c} = 0.175 \frac{t_{p}}{R}$ (۳) که در آن *R* شعاع لوله و t_{p} ضخامت اسمی دیواره لوله است. در صورتیکه عبور لوله از گسل اجتناب ناپذیر باشد، توصیه اکید می شود لوله از گسل به گونه ای عبور داده شود که حرکت گسل در لوله ایجاد فشار نکند.





طراحی خط لوله برای برآوردهسازی تقاضاهای فرایندی و مکانیکی از قبیل فشار، دما، نوع سیال و بارهای بهرهبرداری انجام می شود 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 می شود. اگر چه در غیاب یک تحلیل دقیق می توان از روابط محاسباتی ساده در مراجع ذی صلاح برای محاسبه کرنش لوله در طراحی اولیه استفاده نمود. با این حال، آیین نامههای معتبر توصیه می کنند در طراحی خطوط لوله مهم (گروه کاربری III و VI) از روش تحلیل اجزای محدود با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی 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 بزرگای ۲ تا ۲۰٪ حدود ۵۰٪ و برای بزرگای ۲۰۵ این احتمال بیش از ۹۰٪ برآورد می شود. از طرف دیگر، روابط تجربی متعددی برای تخمین تغییرمکان محتمل گسل ها به وسیله پژوهشگران پیشنهاد شده است. ولز ¹و کاپراسمیت ^۲با استفاده از یک بانک اطلاعاتی نسبتا جامع شامل ۲۲۱ رویداد معروف لرزهای در سراسر جهان، نسبتا جامع شامل ۲۱۱ رویداد معروف لرزهای در سراسر جهان، میزان جابه جایی 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 می توان برای تحلیل سازههای در معرض گسل معکوس استفاده نمود به شرح زیر است.

- $\log(\Delta_{avg}) = -0.74 + 0.08 M_w$ (1)
- $Log (\Delta_{max}) = -1.84 + 0.29 M_w$ (r)

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

در حالت کلی، لوله های پیوسته عبور کننده از یک گسل فعال ممکن است در اثر کشش و یا کمانش ناشی از نیروی فشاری دچار گسیختگی شود. تنش های کششی شدید باعث گسیختگی جداره لوله به ویژه در قسمت های جوش شده و معیوب می شوند، و تنش های فشاری منجر به کمانش موضعی (چروکیدگی) در جداره لوله و یا کمانش کلی³(تیرگونه) می-شود. لازم به گفتن است که حالت حدی کمانش کلی برای لوله با عمق دفن کم تر از حدود یک متر و یا خطوط لوله فراساحل امکان وقوع دارد [17].

آیین نامه های طراحی، خطوط لوله را از نظر اهمیت و نوع کاربری به چهار گروه تقسیم میکنند [22-20]. در این طبقه-بندی، برای گروه کاربری I نیازی به درنظر گرفتن ملاحظات لرزهای نیست ولی در مورد گروه های II. III و VI دوره بازگشت زلزله طرح به ترتیب برابر ۲۵۵، ۹۷۵ و ۲۵۷۵ سال درنظر گرفته می شود. بر اساس آیین نامه ها، کرنش کششی ناشی از بارهای بهرهبرداری و تغییر شکل ماندگار زمین در خطوط

¹ Wells

² Coppersmith

⁴ Beam buckling

تحليل اجزاء محدود لولههاي مدفون در برابر جابهجايي...

 $\Delta_{\mathcal{V}} = \Delta \cos(\psi) \cos(\beta) \tag{0}$

(٦)

$$\Delta_{\chi} = \Delta sin(\psi)$$

با توجه به امتداد قرار گیری 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 تعییرمکان گسل معکوس قرار می-گیرد، 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 نطوط لوله فولادی، این مود گسیختگی از رواج بیشتری نسبت به گسیختگی کششی بر خوردار است. همان گونه که در بخش-های بعدی بحث میشود طراحان سعی میکنند با تمهیداتی از قبیل ایجاد زاویه تقاطع مناسب، نیروی فشاری قابل ملاحظه در لوله ناشی از لغزش گسل به وجود نیاید.

۲-۲- مدل سه بعدی اجزاء محدود

در این بخش، مدل سه بعدی سیستم شده مطالعه در نرمافزار آباکوس ³با فرض رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی ارائه شده است [24]. شكل (۳) نماي كلي مدل اجزاء محدود سیستم خاک و لوله را نمایش می دهد. پیرو مطالعات پارامتری صورت گرفته در پژوهشهای پیشین، طول خط لوله ٦٠ متر (تقریبا ٦٠ برابر قطر لوله) و همچنین ابعاد مدل در راستای y و ۲. به ترتیب برابر ۱۰ و ۵ متر درنظر گرفته می شود [3, 15]. همچنین، فرض شده است که گسل معکوس از وسط خط لوله عبور کند. در شبکه اجزاء محدود، ابعاد المان های خاک و لوله در نزدیکی گسل به دلیل قویتر بودن آثار تغییرمکان ناشی از گسل ریزتر درنظر گرفته می شود تا تنش و کرنش خمیری ایجاد شده در این مناطق با دقت بیشتری در تحلیل رفتار لحاظ شود. مصالح لوله و خاک بهصورت الاستو پلاستیک مدل شده است. لوله فولادي از جنس API 5L-X65 و با المانهاي پوسته S4R درنظر گرفته می شود. به عنوان یک تخمین مناسب، مدل ساختاري رامبر گ-اوسگود ،براي بيان رفتار الاستيک-

۳- تحلیل خط لوله مدفون تحت اثر حرکت گسل

محدودیت و فرضیه های ساده روش های تحلیلی سبب شده است تا روش های حل عددی به شکل گسترده در ارزیابی بازتاب خطوط لوله مدفون به کار گرفته شود. در پژوهش هایی 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 جهت های طولی، جانبی و قائم با فنرهای غیرخطی و خط لوله به صورت المان تیر مدل می شود. با توجه به عدم درنظر گرفتن پدیده کمانش موضعی و اثر تغییر شکل مقطع بر رفتار لوله به وسیله روش وینکلر، مدل پیوسته اجزاء محدود در سال های اخیر بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مدل، المان های پوسته و حجمی آبه ترتیب خایگزین المان های تیر و فنر در روش وینکلر می شوند. در این عوامل موثر بر عملکرد لوله بحث و بررسی می شود.

۳-۱- تغییرمکان خط لوله در تقاطع با گسل معکوس

وضعیت تغییرشکل یک لوله مدفون تحت اثر حرکت گسل معکوس در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، Δ تغییرمکان 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 تغییرمکان در راستای محورهای مختلف برای یک گسل معکوس از روابط (٤-٦) محاسبه میشود. در این مقاله از روابط تجربی بیان شده در بخش قبل برای تخمین تغییرمکان Δ استفاده میشود. با استفاده از رابطه ۲، جابه جایی بیشینه گسل مانند چند بزرگی زلزله قابل انتظار در جدول (۱)

$$\Delta_{\chi} = \Delta \cos(\psi) \sin(\beta)$$
 (5)

1 Winkler

/0

⁵ Ramberg-Osgood

² Shell 3 Solid

به منظور افزایش دقت مدل اجزاء محدود برای تحلیل، درنظر 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 حاک و لوله استفاده شده دو نوع تماس اصطکاکی و تماس عمودی بین سطوح مشترک اصطکاک کولمب تبعیت میکند، از روش پنالتی با ضریب اصطکاک بین خاک و لوله برابر ۸/۰ استفاده شده است [12]. در تماس عمودی بین سطوح نیز از روش پنالتی و تماس سخت استفاده شده است.

۳-۳- روش تحليل

مروری بر مطالعات تحلیلی و نیز آزمایش های انجام شده در گذشته نشان می دهد که در لوله های مدفون بر خلاف سازه-های روزمینی، آثار اینرسی ناشی از وزن لوله و محتویات آن نسبتا بدون اهمیت بوده و با تقریب قابل قبولی از نیروی اینرسی چشم پوشی می شود. ضمنا، 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 جابه-جایی ماندگار ناشی از حرکت گسل برخوردار باشد. به عبارت دیگر، سرعت پایین لغزش گسل بر تنش و کرنش ایجاد شده در خطوط لوله مدفون تاثیر چندانی ندارد و بنابراین تحلیل رفتار لوله میتواند در حالت استاتیکی صورت گرفته و از پاسخ بسیار ناچیز دینامیکی خط لوله چشم پوشی نمود.

تحلیل استاتیکی غیرخطی سیستم خاک و لوله در دو گام مجزا انجام میشود. در گام نخست، بارگذاری ثقلی اعمال می-شود و در گام بعدی، حرکت گسل با افزایش تدریجی تغییرمکان 1/وارد میشود. گرههای کف و سطوح مرزی قائم در بخش ثابت مدل (گرههای خاک و لوله) در سه جهت انتقالی پلاستیک فولاد بهکار میرود [20]. معادله (۷) ارتباط تنش– کرنش مصالح مصرفی در لوله را نشان میدهد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{EP} \left[l + \frac{n}{l+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right]$$
(V)

که در آن \mathcal{F} کرنش، σ تنش، E_p 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 دراکر– پراگر اصلاح شده برای تعریف رفتار غیرخطی خاک استفاده میشود [26]. جداول (۲ و \mathcal{T}) مشخصات لوله فولادی و خاک پیرامون آن را در مدل مورد مطالعه نشان میدهد.

معكوس.	حرکت گسل	جایی ناشی از	بيشينه جابه	جدول ۱–
M_w	5.0	6.0	7.0	8.0
∆(m)	0.41	0.79	1.55	3.02
Table 1. I	Maximum d	isplacemen	t due to re	verse fault
		movement.		

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



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

حسین تحقیقی و همکاران

بسته شده است. یک تغییرمکان یکنواخت ناشی از حرکت گسل به موازات صفحه گسل بر گرههای خارجی بخش متحرک مدل (گرههای خاک و لوله) به عنوان ورودی درنظر گرفته می شود. به علاوه، گرههای کف و سطوح مرزی قائم در بخش متحرک سیستم خاک-لوله در جهت افقی لا بسته است.





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

٤– 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 فولادي استفاده شده [۲۵].

Yield stress (σ_l)	490 MPa
Failure stress (σ_2)	531 MPa
Failure strain (ε_2)	4.0%
Elastic young's modulus (<i>E</i> ₁)	210 GPa
Yield strain $(\varepsilon_l = \sigma_l / E_l)$	0.233%
Plastic young's modulus ($E_2=(\sigma_2-\sigma_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)$)	1.088 GPa
Diameter (D)	0.9144 m
Thickness (t)	0.0119 m
Length (<i>L</i>)	60 m

Table 2. Steel pipeline properties [25]

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 ۹۱۶/۰ متر و ضخامت جداره ۱۲ میلیمتر واقع در دو نوع خاک دانهای با مشخصات جدول (۳) درنظر گرفته شده است. تحلیل پاسخ لوله تحت اثر تغییرمکان گسل معکوس تا ۹۳=1 انجام می-شود. شایان ذکر است که زلزلهی مشخصهی گسل با این مقدار تغییر مکان، طبق رابطه (۲) دارای بزرگای ۸/۶ ریشتر است.

۴–۱– تأثیر زاویه تقاطع گسل با لوله

با درنظر گرفتن عمق دفن برابر ۲ متر از بالاترین نقطه خط لوله، تأثير زاويه تقاطع eta بر مقادير كرنش محوري لوله برآورد شده است. شکل (٤) میزان تغییرات کرنش محوری فشاری در مقابل جابهجایی اعمال شده به لوله واقع در ماسه سست را به ازای مقادیر ۳۰ و ۲۰ درجه برای زاویه eta و مقدار ٤٠ درجه برای زاویه شیب گسل / 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 (٤) نیز می توان انتظار داشت که خط لوله با امتداد نزدیک به عمود بر راستای یک گسل معکوس با زاویه شیب معین، تحت تاثیر مولفه تغییرمکان محوری و یا کاهش طول قابل ملاحظه قرار می گیرد. همچنین در شکل (٤)، مقادیر بیشینه کرنش لوله به وسیله مدل اجزای محدود با نتایج روش وینکلر حاصل از مرجع [27] مقايسه شده است. ملاحظه می شود که مدل وينکلر در محدودهی وسیعی از تغییرمکان گسل با نتایج روش دقیق اجزای محدود هماهنگی بسیار خوبی دارد.

نوع خاک	چگالی	مدول الاستيسيته	زاويه اصطكاك	زاويه اتساع	ضريب پواسون
	(Kg/m^3)	(MPa)	$\Phi\left(^{\mathrm{o}} ight)$	Ψ (°)	ν
ماسه سست	1850	8	30	0	0.3
ماسه متراكم	2100	50	40	0	0.3

جدول ۳- مشخصات خاک استفاده شده

Table 3. Physical parameters of the soil

۲-۴- تأثیر زاویه شیب گسل

شکل (۵) تأثیر زاویه شیب // بر مقادیر بیشینه کرنش محوری فشاری را نشان می دهد. در این شکل، تغییرات کرنش در برابر مقادیر مختلف حابه جایی گسل و با درنظر گرفتن دو زاویه ی مختلف شیب گسل به ترتیب برابر ٤٠ و ٧٠ 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 (٤-٦) نیز می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه شیب، مؤلفه ی جابه جایی گسل معکوس در راستای محور خط لوله کاهش یافته و در نتیجه کرنش محوری لوله رو به کاهش می رود.

۴-۳-تأثير 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 می شود. مطابق شکل (٦)، با افزایش عمق دفن لوله میزان بیشینه کرنش محوری افزایش یافته است. نتایج شکل (٦) نشان می دهد که با افزایش عمق دفن لوله و به دنبال آن افزایش میزان اصطکاک در واحد طول لوله، اندرکنش خاک لوله افزایش یافته و در نتیجه کرنشهای محوری بیشتری در تا حدی که مجاز باشد می تواند پاسخ لوله ناشی از جابهجایی گسل را کاهش دهد. اگر چه در خاکهای دانهای، کاهش عمق دفن بر اساس فقط بار مرده تا مقدار 6/6 برای پوشش خط لوله امکان پذیر است [28]، لیکن باید توجه نمود که بارهای زنده و سایر عوامل محیطی نیز در تعیین مقدار مجاز پوشش

شکل ٤– اثر زاویه تقاطع بر بیشینه کرنش فشاری در ماسه سست بهازای



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



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- تأثير نوع خاك

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

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

۴-۵-تأثير پوشش خارجي لوله

در این بخش، تاثیر کیفیت پوشش سطح خارجی لوله یا میزان اصطکاک بین خاک و لوله بر عملکرد خط لوله ارزیابی می شود. شکل های (۸ و ۹) روند تغییرات بیشینه کرنش های فشاري به ازاي دو نوع يوشش متفاوت براي سطح خارجي 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 يوشش مخصوص در بدنه لوله استفاده نشده باشد، اين ضريب مشابه سایر بخش های مقاله برابر ۸/۰ درنظر گرفته شده است [21]. ملاحظه میشود سطوح زبرتر 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 می توان میزان کرنش ها را نیز کاهش داد. همچنین، با توجه به مقایسه نرخ کاهش مقادیر کرنش در شکلهای (۸ و ۹)، استفاده از یوشش صیقلی برای لوله واقع در خاک متراکم از کارایی بیشتری برخوردار است.

۴-۶- تأثير نسبت قطر به ضخامت لوله

در این بخش تأثیر نسبت قطر به ضخامت برای لوله فولادی به قطر ۱۹۸۲، متر به ازای ضخامتهای مختلف از ۲ تا ۲۰ میلی متر ارزیابی می شود. این مقادیر نسبت قطر به ضخامت لوله از ٤٦ تا ١٥٢ را پوشش می دهد. نتایج تحلیل برای دو نوع خاک دانه ای سست و متراکم در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. فرض می شود کمانش موضعی در لوله موقعی اتفاق بیافتد که فرض می شود کمانش موضعی در لوله موقعی اتفاق بیافتد که برسد. شکل (۱۰) بطور مشخص جابه جایی بحرانی گسل، ۲۰ مقیاس شده به وسیله قطر لوله را بر حسب نسبت قطر به ضخامت لوله نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش نسبت به قطر به ضخامت لوله، مقدار جابه جایی بحرانی به طور

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

در شکل (۱۱)، کرنش فشاری بحرانی در آستانه چروکیدگی، *Ecr* به ازای نسبتهای متفاوت قطر به ضخامت لوله نمایش داده شده است. این شکل نشان می دهد که لولههای با ضخامت کمتر در مقادیر کرنش بحرانی کوچکتری دچار کمانش می شوند. لازم به گفتن است که نتایج عددی مذکور با دادههای آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [29] هماهنگی دارد.



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



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

شده که این موضوع نشاندهنده شروع چروکیده شدن در لوله است. با توجه به شکل، کرنش آستانه چروکیدگی، مانند جابه-جایی ۲۳/۰ متر، حدود ۰/۰۰۷ تخمین زده می شود. از طرف دیگر، کرنش چروکیدگی لوله مفروض بنا بر رابطه ۳ در حدود ۰/۰۰۵ محاسبه می شود. پس، نتایج به دست آمده از شبیه سازی در این مقاله هماهنگی خوبی با استانداردهای طراحی دارد.

از شکل (۱۲) می توان نتیجه گرفت که پس از چروکیدگی جداره لوله در مجاورت گسل معکوس، مقادیر کرنش در این ناحیه به سرعت افزایش می باید به طوری که به ازای جابه جایی بیش از ۲ متر برای گسل، مقدار کرنش به بیش از ۵ درصد می رسد. در حالی که، کرنش های لوله در سایر نواحی به مراتب کم تر و تقریبا هم مقدار است. این نتیجه هماهنگی بسیار خوبی با یافته های سایر پژوهشگران دارد [30]. قابل ذکر است که انحنای حاصل از کرنش های بزرگ در مجاور گسل می تواند سبب پارگی و نشت در لوله شود.

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس



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

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



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

٤-٧- كمانش خط لوله

با فرض تامین عمق دفن بیش از یک متر، خطوط لوله در برابر تنشهای فشاری بزرگ اصولا به شکل موضعی دچار کمانش میشوند. شکل (۱۲) توزیع کرنش محوری فشاری در سراسر طول لوله را به ازای چند جابهجایی مختلف گسل شامل ۱، ۰/۱ و ۲ متر نشان میدهد. ضمنا، 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 تغییرمکان گسل تا مقدار ۲۳/۰ متر، کرنش فشاری لوله نسبتا محدود است ولی با اعمال جابهجایی فراتر از ۲۳/۰ متر، مقدار کرنش فشاری دچار افزایش ناگهانی فراتر از ۲۳/۰ متر، مقدار کرنش فشاری دچار افزایش ناگهانی شکل ۱۳– تغییرات کرنش فشاری در امتداد لوله نزدیک به محل عبور







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



با توجه به بررسی های صورت گرفته در پژوهش حاضر، روش های مختلفی برای کاهش خسارت لرزهای در خطوط لوله مدفون ناشی از برخورد گسل قابل پیشنهاد است. این روش ها شامل انتخاب مسیر مناسب برای خطوط لوله در حوالی گسل، استفاده از لوله با مصالح قوی تر و جداره ضخیم تر، کاهش نیروی منتقل شده به لوله ناشی از حرکت گسل و استفاده از مصالح و اتصالات شکل پذیر می شوند. در ادامه، به هر یک از موارد مذکور به اختصار اشاره می شود.



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 $(\beta=30^{\circ}, \psi=70^{\circ}, \text{ Loose sand}, H=2\text{m}).$

نتایج حاصل از شبیهسازی عددی در این نوشتار به شرح

۱- در لولههای مدفون تحت حرکت گسل معکوس، مقادیر

كرنش فشارى ايجاد شده همواره نسبت به كرنش كششى

۲- با نزدیک شدن راستای خط لوله به امتداد گسل معکوس

از شدت یاسخ در لوله کاسته می شود. ضمنا، در شرایطی که

به عنوان راهکار نخست می توان 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 می شود دوری کرد. بنابراین توصیه می شود که گسل های معکوس در یک زاویه تقاطع تا حد امکان کوچک به وسیله خط لوله قطع شوند تا تنش های فشاری در لوله کمینه شود.

استفاده از لوله با ضخامت بیشتر، مصالح با شکل پذیری زیاد و یا مقاومت بالا، عملکرد لوله را ارتقا داده و میزان آسیب لرزهای به خط لوله مدفون را کاهش می دهد. از طرف دیگر، می توان از گزینه های 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 می تواند 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 می شود 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 می تواند در کاهش کرنش های محوری و به دنبال آن در بهبود

استفاده از اتصالات انعطاف پذیر در خطوط لوله هنگام عبور از گسلهای فعال از جمله دیگر اقدامات موثر در کاهش خسارات ناشی از جابه جایی ماندگار زمین محسوب شود. این اتصال می تواند تغییرمکان گسل را در تمامی جهتها دفع کرده و مانع از انتقال نیروی محوری به بدنه لوله شود. نکته حائز اهمیت در خصوص کاربرد اتصالات انعطاف پذیر، تعیین محل مناسب قرارگیری و نیز قابلیت شکل پذیری متناسب با میزان تغییرمکان گسل در آنها می باشد. بدیهی است در صورتی که محل تعبیه اتصال انعطاف پذیر در امتداد لوله منطبق بر محدوده جرکت گسل نباشد، این اتصال عملکرد خوبی نخواهد داشت. جزئیات بیشتر در خصوص چگونگی استفاده و عملکرد این

ود. خط لوله امتداد گسل را با زاویه نزدیک به قائم قطع کند، ن با شکلپذیری زیاد داده و میزان آسیب داده و میزان آسیب دهد. از طرف دیگر، ۳- با نزدیک تر شدن خط لوله مدفون به سطح زمین و یا کاهش مهد. از طرف دیگر، ۳- با نزدیک تر شدن خط لوله مدفون به سطح زمین و یا کاهش کل برای کنترل میزان می تواند کرنش لوله می تواند کرنش می یابد و در نتیجه احتمال ایجاد کمانش به مراتب بیشتر می شود. می توله برای تحمل می توله برای تحمل

٦- نتيجه گيري

زير جمعبندي مي شود.

بحراني تر هستند.

کرنش های به وجود آمده در لوله دارد. در واقع با افزایش تراکم خاک، اندرکنش خاک و لوله بیشتر شده و در نتیجه مقادیر کرنش های محوری رو به افزایش میرود. ۲- ویژگی های 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.
- 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

تحلیل اجزاء محدود لولههای مدفون در برابر جابهجایی...

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.
- IITK-GSDMA, "Guidelines for seismic design of buried pipelines", National Information Center of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2008.
- 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 ppelines against earthquake hzards", 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.
- 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 Scoiety of Civil Engineers (ASCE), "Differential gound 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.

- 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.
- Bargi, Kh., Heravi, GhR., "Earthquake effect on the burried gas pipeline", J. of Faculty of Eng., University of Tehran, 1995, pp. 22-38 (In Persian).
- Vougioukas, E.A., Theodossis, C., Carydis, P.G., "Seismic analysis of buried pipelines subjected to vertical fault movement", ASCE, 1979, 105, pp. 432–41.
- 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.
- 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 highdensity polyethylene pipelines subjected to normal and strikeslip faulting-a centrifuge investigation", Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45, pp.1733-42.
- 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.
- 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.
- Vazouras, P., Dakoulas, P., Karamanos, S.A., "Pipesoil 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