

چکیده

در مطالعات مهندسی مرسوم، برای شبیه‌سازی رفتار لوله در برابر حرکات گسل از الگوی عددی ساده‌شده تیر- فنر استفاده می‌شود. از طرف دیگر به دلیل سهولت شبیه‌سازی، بیشتر شبیه‌سازی‌ها متمرکز بر روی گسل‌های امتدادلغز بوده است. در مطالعه حاضر، از نمونه اجزای محدود سه‌بعدی و در قالب محیط پیوسته جهت شبیه‌سازی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس استفاده شده است. جهت انطباق هر چه بهتر شبیه‌سازی با ویژگی‌های رفتاری لوله و خاک از عناصر پوسته‌ای^۱ و عناصر حجمی^۲ به ترتیب برای شبیه‌سازی لوله و خاک استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن الگوی رفتاری کشسان - خمیری برای لوله و خاک، رفتار غیرخطی مصالح آن‌ها شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، ضمن نقد و بررسی روش مرسوم تیر- فنر، اثر نسبت قطر به ضخامت لوله، زاویه شیب گسل و زاویه اتساع خاک بر پاسخ لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش تیر- فنر مرسوم تنها در جابه‌جایی‌های کوچک گسل پاسخ‌های منطقی می‌دهد. افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله، کاهش زاویه شیب گسل و افزایش زاویه اتساع خاک سبب افزایش مقادیر کرنش‌های فشاری ایجادشده در لوله می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله با الگوی تغییر شکل لوله رابطه دارد.

واژگان کلیدی: لوله مدفون، گسل معکوس، روش عددی، نرم‌افزار ABAQUS، اندرکنش خاک و لوله.

شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس

امین منشی‌زاده نایین

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی،
دانشگاه فردوسی مشهد

سید احسان سیدی حسینی نیا (نویسنده مسئول)

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد،

esevedi@um.ac.ir

۱- مقدمه

ایران، ترکیه و تایوان از جمله تجاربی هستند که تأثیر وقوع گسل بر لوله‌ها را به وضوح نشان می‌دهند. از آن جمله می‌توان به کمانش خطوط لوله تأمین آب در زلزله ۱۹۹۰ منجیل ایران به دلیل رخداد گسلش معکوس، نشست آب از لوله فولادی با قطر ۲/۲ متری در زلزله ۱۹۹۹ کوچالی ترکیه به دلیل وقوع گسل امتدادلغز با سه متر جابه‌جایی و صدمات واردشده به لوله‌های مدفون به دلیل وقوع گسلش عادی طی زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان اشاره کرد [۱].

به‌طور کلی سه نوع گسیختگی برای لوله‌های مدفون ممکن است رخ بدهد. نوع اول که نوع غالب گسیختگی به شمار می‌آید، کمانش موضعی نام دارد. این نوع گسیختگی که در اثر

به‌طور کلی ساخت‌وساز در محل و نزدیکی گسل ریسک بالایی دارد. عبور خطوط لوله نیز از امتداد گسل‌ها احتمال آسیب و خرابی لوله را بسیار بالا می‌برد. ولی گاهی به‌ناچار مسیر لوله از این مناطق عبور داده می‌شود. به‌عنوان مثال، بسیاری از شهرها بر روی تعداد زیادی گسل بنا شده‌اند و مناطق مسکونی نیازمند دسترسی به گاز، آب و فاضلاب می‌باشند. لذا در این مورد لازم است که مواد موردنیاز از طریق لوله و با عبور از روی گسل به این مناطق انتقال داده شوند. پدیده گسلش با توجه به نوع حرکت گسل می‌تواند به طرق مختلفی بر خط لوله اثر گذاشته و آسیب‌های جدی به آن‌ها وارد نماید. صدمات واردشده به لوله‌های گذرنده از گسل‌های فعال در زلزله‌های

نیروهای فشاری ایجاد شده در لوله پدید می‌آید، سبب وقوع تغییر شکل‌های ناگهانی در مقطع لوله و بروز چین خوردگی در مقطع آن می‌شود. نوع دیگری از گسیختگی که تحت نیروهای کششی به وقوع می‌پیوندد، گسیختگی کششی نام دارد. نوع سوم گسیختگی مشهور به کمانش کلی است. در این نوع گسیختگی که تحت نیروهای فشاری به وقوع می‌پیوندد، لوله شبیه به یک تیر که تحت بار عرضی قرار گرفته کمانش پیدا می‌کند. در این نوع گسیختگی لوله دچار شکست کامل نمی‌گردد، اما وقوع آن احتمال خرابی لوله را افزایش می‌دهد [۲].

در حال حاضر محدودیت شدید و فقدان اطلاعات مفید و دقیق ثبت شده از تاریخچه اثر گسلش بر خطوط لوله وجود دارد [۳]. همین امر ارزیابی نتایج تحقیقات نظری و تحلیلی صورت گرفته در این موضوع را دشوار کرده است. محققان به منظور پر کردن این خلأ، متوجه به کارگیری روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی از این پدیده شده‌اند. از سال ۲۰۰۳ میلادی به بعد، تحقیقات قابل توجهی در آمریکا و ژاپن و با حمایت ادارات و سازمان‌هایی همچون شرکت گاز توکیو، انجمن شریان‌های حیاتی آمریکا، بنیاد ملی علوم در آمریکا، مرکز تحقیقاتی مهندسی زلزله و نظایر آن در این راستا آغاز گردید. با وجود اینکه گسل‌های عادی و معکوس فراوانی بیشتری در طبیعت نسبت به گسل‌های امتدادلغز دارند [۴]، اغلب شبیه‌سازی‌های عدی صورت گرفته در این زمینه [۵-۷]، به دلیل سهولت شبیه‌سازی، متمرکز بر گسلش امتدادلغز و عادی بوده است [۴]. در واقع نحوه حرکت گسل‌های عادی و امتدادلغز سبب ایجاد کشش در مقطع لوله می‌شود و به همین دلیل مقطع لوله ناپایداری‌هایی را نظیر چین خوردگی که ناشی از نیروهای فشاری هستند، تجربه نمی‌کند و لذا در شبیه‌سازی گسلش عادی و امتدادلغز با پیچیدگی‌هایی که در شبیه‌سازی پاسخ لوله‌های مدفون در برابر گسلش معکوس وجود دارد، برخورد نمی‌شود. با این مقدمه، ضرورت مطالعه پاسخ لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل در سراسر دنیا روشن است. از طرف دیگر،

شرایط موجود در کشور ایران یعنی واقع شدن بر روی کمربند زلزله و دارا بودن هزاران کیلومتر خطوط لوله شامل آب، نفت و بخصوص خطوط لوله گاز، طبیعی (۲۸۰۰۰ کیلومتر خط لوله فشارقوی برون‌شهری گاز، ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر خط لوله شهری [۴]) که تأمین‌کننده نیاز داخلی و همچنین صادراتی کشور است، اهمیت تحقیق در این زمینه را در کشور ایران بیش از پیش روشن می‌سازد.

۲- شرح مسئله

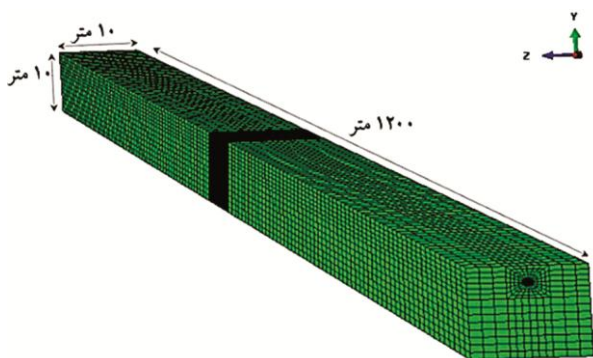
اهمیت خطوط لوله مدفون و آسیب پذیری آن‌ها در برابر حرکات گسل، محققان زیادی را به بررسی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل وادار نموده است. مطالعات انجام شده توسط نیومارک و هال [۸] را می‌توان از اولین تلاش‌ها در پیش‌بینی پاسخ مکانیکی لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل دانست. آن‌ها [۸] در سال ۱۹۷۵ لوله را به صورت یک کابل شبیه‌سازی نمودند و رفتار آن‌را در برابر حرکات گسل‌های امتدادلغز و عادی مورد مطالعه قرار دادند. نیومارک و هال [۸] در روش ساده شده خود از مقاومت جانبی خاک و سختی خمشی خط لوله صرف‌نظر کردند. کندی و همکاران [۹] در سال ۱۹۷۷، کار نیومارک را با در نظر گرفتن مقاومت جانبی خاک ادامه دادند، ولی همچنان از سختی خمشی لوله صرف‌نظر کردند. روش‌های تحلیلی با مطالعات وانگ و یه [۱۰] و کارامیتروس و همکاران [۱۱] ادامه یافت. وانگ و یه [۱۰] با هدف در نظر گرفتن سختی خمشی لوله در محاسبات خود، لوله را به چهار قسمت تقسیم کردند که در آن، دو قسمت دارای انحنای بالا (در دو طرف محور گسل) به صورت قوس دایره‌ای و دو قسمت خارج از این منطقه به صورت تیر بر روی بستر کشسان شبیه‌سازی شده است. روش ارائه شده توسط وانگ و یه [۱۰] به‌طور خاص نمی‌تواند اثر نیروی محوری بر سختی خمشی را محاسبه کند. در کار انجام گرفته توسط کارامیتروس و همکاران [۱۱]، اصلاحاتی برای روش‌های ذکر شده در بالا معرفی گردید به این ترتیب که یک خط لوله به چهار قسمت

گسلش^۴ به شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس گسل معکوس و رجحانی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۲ به شبیه‌سازی سانتریفیوژ گسل معکوس پرداختند. آن‌ها [۱۹ و ۲۰] در مطالعات خود اثر عوامل و متغیرهای مختلف بر تغییر شکل‌های ایجادشده در لوله را مطالعه کردند. جوشی و همکاران [۲۱] نیز در سال ۲۰۱۱ به مطالعه عددی پاسخ لوله‌های مدفون در خاک در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. برای این منظور ایشان با استفاده از یک نمونه اجزای محدود و با در نظر گرفتن عنصر تیر برای لوله و فنرهای غیر خطی مجزا برای شبیه‌سازی خاک تأثیر متغیرهای مختلف بر رفتار لوله‌های مدفون گذرنده از گسل معکوس را به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی نمودند.

با مرور مطالعات گذشته، مشاهده می‌شود که اغلب شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این تحقیقات به دلیل سهولت شبیه‌سازی، متمرکز بر گسلش امتدادلغز و عادی بوده است و تنها تعداد کمی از مطالعات مربوط به گسل معکوس بوده است. در این مقاله، رفتار لوله‌های مدفون در برابر گسل معکوس به صورت سه‌بعدی و پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است تا رفتار لوله‌ها در برابر حرکات این نوع گسل آشکارتر شود. جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی مسئله، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده و سعی شده است که شبیه‌سازی انجام شده بهترین و منطقی‌ترین مطابقت را با واقعیت داشته باشد. جهت تحقق این هدف، به جای استفاده از روش مرسوم تیر-فنر، خاک بصورت یک محیط پیوسته سه‌بعدی (در مقابل فنر) و لوله نیز به صورت یک جسم جدار نازک با رفتار پیوسته‌ای (در مقابل تیر) استفاده شده است. الگوی سه‌بعدی پیوسته و عناصر به کار رفته در این پژوهش امکان شبیه‌سازی پیوسته اندرکنش خاک و لوله و شبیه‌سازی پدیده‌هایی نظیر چین‌خوردگی را به خوبی فراهم می‌نماید. همچنین، در این پژوهش با هدف نقد کارایی روش مرسوم تیر-فنر در شبیه‌سازی پاسخ لوله در برابر حرکت گسل معکوس، ابتدا به تشریح روند شبیه‌سازی سه‌بعدی و مبانی استفاده شده در آن پرداخته شده است و سپس جهت سنجش

تقسیم‌بندی شد که بر اساس نظریه تیر بر روی بستر کشسان و نظریه کشسان تیر تحلیل می‌شود. در زمینه مطالعه رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل‌های عادی و امتدادلغز کارهای آزمایشگاهی قابل توجهی نیز وجود دارد که از آن جمله می‌توان به کارهای انجام شده توسط اورورک و همکاران [۱۲]، ها و همکاران [۱۳] و عبدون و همکاران [۱۴] در شبیه‌سازی گسلش امتداد لغز و کارهای انجام شده توسط ها و همکاران [۱۵] و مرادی و همکاران [۱] در شبیه‌سازی گسلش عادی اشاره نمود که در مطالعات خود اثر عوامل مختلف نظیر زاویه تقاطع لوله و گسل، نسبت عمق دفن، نرخ جابه‌جایی گسل و درصد رطوبت خاک بر پاسخ لوله را در شرایط شتاب بالا (سانتریفیوژ^۳) مورد مطالعه قرار دادند. علاوه بر روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، پژوهشگران بسیاری اقدام به مطالعه این پدیده به کمک روش‌های عددی نمودند که از آن جمله می‌توان به کارهای اریمین و لی [۱۶] در ارزیابی کرنش لوله با کمک روش اجزای محدود، میرسون [۱۷] در مطالعه کرنش لوله در برابر حرکات گسل امتدادلغز، اورورک و لیو [۲] در مطالعه تحلیلی کرنش لوله‌های پیوسته عبوری از گسل‌های عادی و امتدادلغز، تاکادا و همکاران [۱۸] در مطالعه پاسخ لوله در برابر حرکات گسل‌های امتدادلغز و عادی با کمک الگوی تیر-پیوسته و ازورس و همکاران [۵ و ۶] در شبیه‌سازی سه‌بعدی و پیوسته لوله مدفون در خاک تحت حرکات گسل امتدادلغز اشاره نمود. لازم به ذکر است که غالب مطالعات عددی انجام شده توسط محققان مذکور بر اساس روش تیر-فنر ارائه شده توسط کندی و همکاران [۹] و اعمال اصلاحاتی بر آن شکل گرفته است و در آن‌ها اثرات متغیرهای مختلف نظیر نسبت عمق دفن به قطر لوله، زاویه شیب گسل، زاویه تقاطع لوله و گسل، اثر تنش تسلیم خاک بر کرنش خمشی لوله و مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه مطالعه رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس، تعدادی اندکی کار انجام شده است. جلالی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶ با کمک جعبه دوبخشی شبیه‌ساز

هر مطالعه وجود دارد. واقعیت این است که در بحث لوله‌های مدفون گذرنده از گسل، با توجه به حضور نقاط مهار در دو سمت خط لوله، طول‌های متفاوتی برای مسئله می‌تواند وجود داشته باشد که وابسته به عوامل مختلفی نظیر جنس لوله، نوع خاک، نوع حرکت گسل، زاویه شیب گسل و مقدار جابه‌جایی گسل است؛ در تحقیق حاضر سعی شده است تا پاسخ لوله تحت حرکت گسل بدون اثرگذاری شرایط مرزی و نقاط مهارشدگی بر نتایج، مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین لازم بود تا نقاط مهار به اندازه کافی از محور گسل دور انتخاب شوند تا نیروهای ایجادشده در لوله در حین گسلش تنها به وسیله نیروی اصطکاک بین لوله و خاک خنثی شوند. به همین منظور و با توجه به ابعاد نمونه‌های ارائه‌شده توسط پژوهشگران پیشین (۱۱)، (۱۸)، در طی یک روش سعی و خطا و با در نظر گرفتن نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت به بررسی اثر حرکات گسل بر کرنش‌های ایجادشده در لوله و همچنین نیروهای ایجادشده در نقاط مهارشدگی پرداخته شد. نتایج روش تکرار و خطا نشان داد که با انتخاب نمونه‌ای به طول ۱۲۰۰ متر مقادیر نیروهای ایجادشده در نقاط مهار به حداقل می‌رسد و از آن طول به بعد، تغییر طول نمونه تأثیر چندانی بر مقادیر کرنش‌های ایجادشده در لوله نمی‌گذارد. همچنین نتایج روش تکرار و خطا نشان داد که با انتخاب نمونه‌ای با مقطع ۱۰ متر در ۱۰ متر برای توده خاک، می‌توان از تأثیر گذاشتن مرزهای نمونه در نتایج جلوگیری نمود. شکل (۱) نمونه ساخته‌شده و ابعاد آن را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام‌شده با نرم‌افزار و ابعاد آن.

صحت شبیه‌سازی انجام شده و بررسی کارایی روش تیر- فنر، نتایج شبیه‌سازی با نتایج نمونه آزمایشگاهی جلالی و همکاران [۱۹] و نمونه عددی جوشی و همکاران [۲۱] مقایسه شده است و پس از اطمینان از صحت و کارایی روش شبیه‌سازی پیوسته سه‌بعدی، به مطالعه حساسیت متغیرهای مختلف پرداخته شده است.

۳- تشریح مبانی و روند شبیه‌سازی اجزای محدود

همان‌طور که پیش‌ازاین ذکر شد، هدف از این مقاله شبیه‌سازی سه‌بعدی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل‌های معکوس فعال است. این شبیه‌سازی از دو بخش اصلی لوله فولادی و خاک پیرامون تشکیل شده است. این شبیه‌سازی با استفاده از مفاهیم روش اجزای محدود در شبیه‌سازی عددی، انجام گردیده است. پس از ترسیم حجم هندسی اولیه و شبکه‌بندی ریزتر در مکان‌هایی با تمرکز تنش بیشتر، عنصرها^۵ به نمونه^۶ اختصاص داده شده‌اند. خاک با عنصرهای حجمی توپر و لوله فولادی با توجه به ماهیت و رفتار آن با عنصرهایی موسوم به عنصر پوسته شبیه‌سازی شده است. این عنصرها، این قابلیت را دارند که رفتار مصالح غیرخطی به آن‌ها اختصاص داده شود و تحت انواع تحلیل‌های تعریف شده در نرم‌افزار قرار گیرند.

۳-۱- شبیه‌سازی هندسی

برای شبیه‌سازی گسل از دو قطعه مجزا و متقارن استفاده شده است تا با اعمال حرکت نسبی بین قطعات شبیه‌سازی شده، جابه‌جایی گسل شبیه‌سازی گردد. با توجه به ماهیت سه‌بعدی حرکات گسل، هر یک از قطعات گسل به صورت یک مکعب - مستطیل شبیه‌سازی شده است که یکی از وجوه آن دارای شیبی است که شبیه‌ساز زاویه شیب گسل است. از ترسیم سه‌بعدی حجمی جهت شبیه‌سازی قطعات گسل و از ترسیم سه‌بعدی پوسته جهت شبیه‌سازی لوله استفاده شده است تا علاوه بر مطابقت هر چه بهتر با ماهیت سه‌بعدی گسل، بتوان رفتار سه‌بعدی لوله‌ها تحت چین‌خوردگی را نیز شبیه‌سازی نمود.

تعیین ابعاد مسئله یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که در

۳-۲- انتخاب روش تحلیل و مراحل آن

نرم‌افزار آباکوس با توجه به نوع مسئله مورد مطالعه، از روش‌های تحلیلی گوناگونی شامل استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌کند. با توجه به اینکه حرکت گسل تابع زمان است، روش استاتیکی نمی‌تواند حرکت گسل را لحاظ کند. نکته دیگر اینکه در پدیده گسلش، لوله دچار کماتش و چین خوردگی شده که تحلیل لوله در این حالت، با روش تحلیل استاتیکی بدلیل عدم همگرایی در جواب امکان پذیر نیست. به همین دلیل، حرکت گسل به عنوان حرکتی شبه استاتیکی شناخته شده است [۵، ۲۱] و در این مقاله هم، مسئله لوله‌های مدفون گذرنده از روش شبه استاتیکی برای تحلیل گسل‌های فعال استفاده می‌گردد. در این مطالعه از تحلیل صریح دینامیکی^۷ جهت مطالعه رفتار لوله‌های مدفون تحت حرکات گسل استفاده شده است تا بتواند نیازهای مسئله موجود را به خوبی برطرف کند. تحلیل دینامیکی صریح، مخصوص تحلیل‌های با ابعاد بزرگ، تحلیل‌هایی با ناپیوستگی زیاد و همچنین تحلیل مسائل با درجه غیرخطی بالا است. این نوع تحلیل توانایی تعریف اندرکنش‌های^۸ مختلف و استفاده از تغییر شکل‌های بزرگ را فراهم می‌کند [۲۲]. از دیگر علل استفاده از تحلیل دینامیکی صریح، توانایی مناسب این روش در تحلیل غیرخطی رفتار پس-کوماتش است. این روش تحلیلی همچنین از وقوع مشکلات همگرایی که عموماً در تحلیل مسائل پس-کوماتش با سایر روش‌های تحلیل نظیر تحلیل دینامیکی ضمنی^۹ و استاتیکی عمومی^{۱۰} رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند [۲۲].

مهم‌ترین و برجسته‌ترین ویژگی روش صریح، عدم نیاز به حل یک دستگاه معادلات است که این امر ناشی از عدم وجود ماتریس سختی کلی است. این ماتریس در روش ضمنی مورد نیاز است. از طرف دیگر به دلیل اینکه متغیرهای هر حالت به‌طور صریح محاسبه می‌شوند، در این روش تکرار و خطا صورت نمی‌گیرد [۲۲].

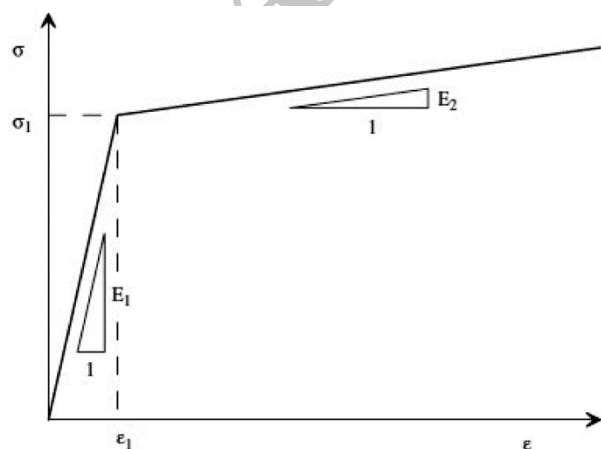
لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، تحلیل مسئله در دو

گام انجام شده است. در گام نخست به منظور فراهم آوردن شرایط تنش برجا، نیروی گرانش به کل محیط اعمال می‌شود و سپس در گام بعدی حرکت گسل به نمونه اعمال می‌شود.

۳-۳- ویژگی مصالح خاک و لوله

جهت شبیه‌سازی رفتار خاک در این پژوهش، از الگوی رفتاری مور-کولمب جهت شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. این الگوی رفتاری از دو بخش رفتار کشسان خطی و خمیری کامل تشکیل شده است. برای بخش رفتار کشسان، از دو پارامتر مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) استفاده شده و برای بخش رفتاری خمیری، پارامترهای مورد نیاز، چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (φ) و زاویه اتساع (ψ) هستند.

لوله فولادی مورد استفاده در این مطالعه از نوع API5L-X65 در نظر گرفته شده است که غالباً برای انتقال آب، نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت پیش‌بینی رفتار غیرخطی مصالح لوله، رفتار مصالح آن به‌صورت یک ماده کشسان-خمیری در نظر گرفته شده است که دارای منحنی کرنش-سخت‌شوندگی دوخطی مطابق شکل (۲) است. سایر مشخصات فولاد رده X65 مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است.



شکل (۲): منحنی تنش و کرنش دوخطی برای فولاد X65 [۱۱].

جدول (۱): مشخصات فولاد X65 مورد استفاده در این مطالعه [۱۱].

تنش تسلیم (σ_1)	۴۹۰ مگاپاسکال
تنش گسیختگی (σ_2)	۵۳۱ مگاپاسکال
کرنش گسیختگی (ε_2)	۰٫۴٪
مدول یانگ کشسان (E_1)	۲۱۰ گیگاپاسکال
کرنش تسلیم ($\varepsilon_1 = \sigma_1/E_1$)	۰٫۲۳۳٪
مدول یانگ خمیری ($E_2 = (\sigma_2 - \sigma_1/\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$)	۱/۰۸۸ گیگاپاسکال
چگالی	۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب
نسبت پواسون	۰٫۳

واقعیت داشته باشد. در عنصر S4R حرف S بیانگر این است که این عنصر از خانواده پوسته^{۱۱} است و رقم ۴ بیانگر تعداد گره‌های آن و حرف R بیانگر این است که انتگرال گیری آن‌ها از نوع کاهش‌یافته^{۱۲} است. در خصوص عنصر C3D8R نیز حرف C بیانگر این است که این عنصر از خانواده پیوسته^{۱۳} است و 3D بیانگر سه‌بعدی^{۱۴} بودن عنصر و رقم ۸ نشان‌دهنده تعداد گره‌های آن است و حرف R نیز بیانگر این است که انتگرال گیری آن‌ها از نوع کاهش‌یافته است.

مطالعات عددی متعدد انجام شده در پژوهش حاضر نشان داد که عمده تغییرات کرنش و بیشینه مقادیر آن‌ها در فاصله حدوداً ۱۰ متری از طرفین محور گسل رخ می‌دهد و به تدریج این مقادیر و تغییرات آن کاهش می‌یابد، به طوری که از فاصله ۲۰ متری در طرفین محور گسل تغییرات اندکی در مقادیر کرنش و در طول مسیر لوله مشاهده می‌شود. به همین دلیل طول ۱۲۰۰ متری لوله جهت شبکه‌بندی به سه ناحیه تقسیم گردید. ناحیه نخست دارای طول کلی ۳۰ متر (۱۵ متر در هر طرف از محور گسل) است. از آنجایی که بیشینه مقادیر کرنش در نزدیکی گسل و در این محدوده رخ می‌دهد از اجزای ریزتری در این ناحیه استفاده شده است. به منظور تعیین اندازه اجزا در این ناحیه تحلیل‌های متعددی انجام گرفت. بدین ترتیب که اجزا به تدریج ریزتر شدند تا جایی که اختلاف مقادیر کرنش‌ها پس از هر بار تحلیل به کمتر از ۱۵ الی ۲۰ درصد برسد. پس از انجام تحلیل‌های متعدد، از اجزایی به طول ۰٫۲۵ متر در ناحیه اول استفاده شد. ناحیه دوم بلافاصله پس از ناحیه اول آغاز و تا فاصله ۳۰ متری از طرفین گسل ادامه دارد. برای ناحیه دوم نیز به طریق مشابه عمل گردید و اجزای بزرگ‌تری و به طول ۰٫۵ متر انتخاب گردید. ناحیه سوم که بقیه طول لوله در طرفین گسل را تشکیل می‌دهد دارای اجزایی به طول ۲/۵ متر است. محیط لوله نیز جهت شبکه‌بندی به ۴۰ قسمت مساوی تقسیم گردید. این اندازه شبکه نیز بر اساس مطالعات همگرایی متعدد و مشابه حالات قبل تعیین شد؛ اما علاوه بر لوله، خاک اطراف آن نیز

اگرچه اورورک [۲] تشخیص داد که رفتار مصالح لوله در جهت طولی و شعاعی اندکی با هم متفاوت هستند، با این وجود، در تمامی نمونه‌ها فرض بر این بوده که رفتار فولاد لوله‌ها همسان است. دو معیار تسلیم ترسکا و فن-میسز برای بررسی رفتار مکانیکی فلزات در قالب کشسان-خمیری کامل مناسب هستند [۲۳]. به همین دلیل و با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، در این مطالعه و از میان معیارهای ذکر شده از الگوی سخت شونده همسان فن-میسز برای پیش‌بینی رفتار مصالح لوله استفاده شده است.

۳-۴- تعیین نوع عناصر و شبکه‌بندی مسئله

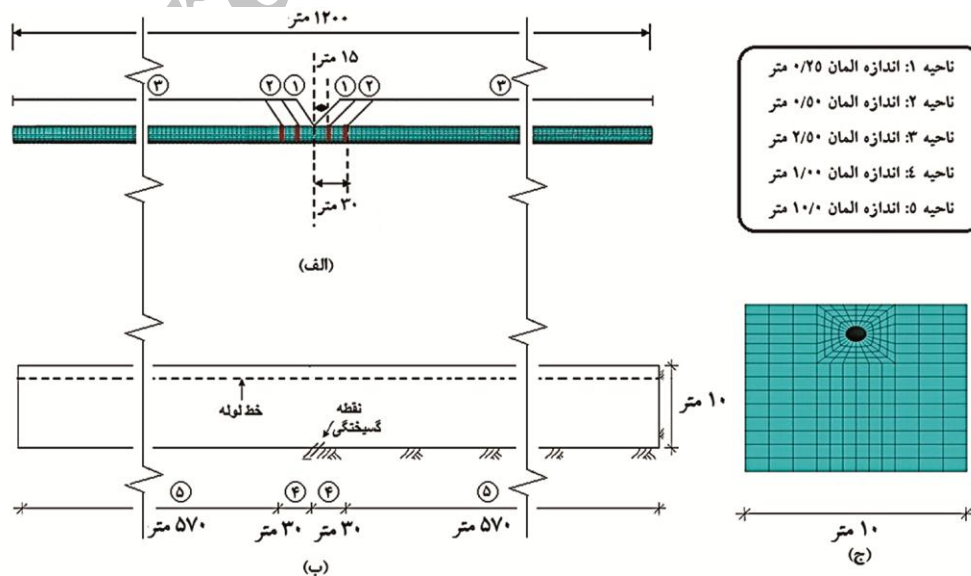
طیف وسیعی از عناصر در آباکوس قابل استفاده است که از این جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را شبیه‌سازی کرده و تحلیل نماید. با توجه به مهم بودن نوع شبکه‌بندی و نیز نوع عنصر مورد استفاده، کاربر باید از عنصرهایی که بهترین مطابقت را با واقعیت دارند، جهت شبیه‌سازی استفاده نماید. به همین منظور در مقاله حاضر از عنصر پوسته‌ای S4R جهت شبیه‌سازی بخش استوانه‌ای لوله و از عنصر حجمی توپر C3D8R برای شبیه‌سازی خاک پیرامونی لوله استفاده شده است تا شبیه‌سازی انجام شده منطقی‌ترین تطابق را با

یکی سطح رویه لوله و دیگری سطح در تماس با خاک است که لوله داخل آن قرار دارد. برای در نظر گرفتن اندرکنش لوله و خاک، در این مطالعه از اندرکنش تماسی سطح به سطح^{۱۵} استفاده شده است. در این نوع از اندرکنش، دو سطح بصورت اصطکاکی عمل کرده و معیار لغزش بر اساس معیار کولمب تعریف می‌شود. رابطه کلی کولمب بصورت $\tau_f = \mu p$ است که در آن τ_f مقاومت برشی بین دو سطح، p تنش فشاری بر روی سطح تماس و μ ضریب اصطکاک بین دو سطح است. اگر تنش برشی بسیج شده بر روی سطح از τ_f بیشتر باشد، لغزش رخ می‌دهد. ضریب اصطکاک بین لوله و خاک در آیین‌نامه طراحی لوله‌های فولادی مدفون وابسته به انجمن شریان‌های حیاتی آمریکا (ALA)^{۱۶} [۲۴] به صورت رابطه تانژانتی ($\mu = \tan \delta$) تعریف شده است که در آن δ زاویه اصطکاک بین خاک و لوله برابر با حاصلضرب زاویه اصطکاک داخلی خاک ϕ در ضریب اندود سطحی^{۱۷} f است ($\delta = \phi \cdot f$). ضریب f (ضریب اندود سطحی) بر اساس آیین‌نامه مذکور [۲۴] تابعی از نوع اندود سطحی (زبری) لوله است که در تحقیق حاضر با فرض اندود سطحی سخت برای لوله ضریب f بر اساس ALA [۲۴] برابر ۰/۸ انتخاب شده است. همچنین، خاطر نشان می‌شود که در تعریف

نیازمند بررسی اندازه شبکه است. برای شبکه‌بندی خاک نیز مشابه قسمت قبل عمل گردید و پس از انجام تحلیل‌های متعدد، محیط خاک از هر طرف محور گسل، به دو قسمت ۳۰ و ۵۷۰ متری تقسیم‌بندی شد و برای هر قسمت اجزایی با اندازه‌های متفاوت در نظر گرفته شد. از آنجایی که جابه‌جایی‌های بزرگی در زمین و هم‌چنین در لوله در نزدیکی محور گسل رخ می‌دهد رفتار اندرکنشی خاک و لوله در این ناحیه پیچیده‌تر خواهد بود، لذا لازم است از اجزایی با اندازه کوچک‌تر در نواحی نزدیک به گسل استفاده شود. به همین منظور در این پژوهش از اجزایی به طول یک متر تا فاصله ۳۰ متری از طرفین گسل استفاده شده است و پس از آن و تا انتهای لوله (۵۷۰ متر در طرفین محور گسل) که لوله در محدوده کشسان باقی می‌ماند، از اجزایی به طول ۱۰ متر استفاده شده است. در مقطع خاک نیز از اجزای کوچک‌تری در نزدیکی لوله و سطح عملکرد آن استفاده شده است و با فاصله گرفتن از لوله ابعاد اجزا نیز بزرگ‌تر اختیار شده‌اند. شکل (۳)، اندازه و ابعاد شبکه‌بندی به کاررفته در مسئله حاضر را نشان می‌دهد.

۳-۵- شبیه‌سازی اندرکنش خاک و لوله

با توجه به عناصر پوسته‌ای لوله و عناصر حجمی خاک شبیه‌سازی شده، دو سطح برای اعمال اندرکنش وجود دارد.



شکل (۳): نحوه تقسیم‌بندی، ابعاد و اندازه شبکه در الف) راستای طولی لوله، ب) مقطع طولی خاک و ج) مقطع عرضی خاک.

گردید. در سال ۲۰۱۶ جلالی و همکاران [۱۹] به شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. آن‌ها اقدام به ساخت دستگاه دویخشی شبیه‌ساز با ابعاد بزرگ‌تر نمودند تا با فراهم کردن شرایط شبه استاتیکی، رفتار لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا API-5L Grade B را تحت شبیه‌ساز گسلش معکوس و به صورت بزرگ‌مقیاس مورد مطالعه قرار دهند. در مقاله حاضر، برای شبیه‌سازی سه‌بعدی آزمایش جلالی و همکاران [۱۹]، ابتدا شرایط هندسی آزمایش مطابق جدول (۲) شبیه‌سازی گردید.

الگوی رفتاری اختصاص یافته به لوله API-5L Grade B مورد استفاده در آزمایش نیز بر اساس رابطه رمبرگ-اسگود اختیار گردید که رابطه تنش-کرنش آن به صورت زیر است:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_i} \left[1 + \frac{n}{(r+1)} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^r \right] \quad (1)$$

در رابطه اخیر ε کرنش، σ تنش، r و n ضرایب رمبرگ-اسگود، E_i مدول کشسانی اولیه و σ_0 تنش مؤثر جاری شدن است. مقادیر این پارامترها در جدول شماره (۳) آورده شده است. ویژگی‌های خاک ریز ماسه‌ای استفاده شده در آزمایش نیز مطابق جدول (۴) است.

جدول (۳): پارامترهای رابطه رمبرگ-اسگود لوله API-5L Grade B

r	n	σ_0 (مگاپاسکال)	E_i (مگاپاسکال)
۹/۳	۱۷/۸۹۶	۳۲۰	۲۱۰۰۰۰

اندرکنش این مقاله، از تماس میان خاک و لوله به صورت کششی صرف نظر شده است.

۴- استخراج نتایج

در این مقاله ابتدا به منظور اطمینان از صحت نمونه عددی تهیه شده، به مقایسه نتایج حاصل از روش اجزای محدود این تحقیق با نتایج به دست آمده از آزمایش صورت گرفته توسط جلالی و همکاران [۱۹] و شبیه‌سازی عددی انجام شده توسط جوشی و همکاران [۲۱] پرداخته شده است و سپس تأثیر نسبت ضخامت به قطر لوله (D/t) ، زاویه شیب گسل و تغییر زاویه انشاع خاک بر پاسخ لوله مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور لوله در معرض گسل معکوسی با جابه‌جایی حداکثر ۴ متر و با نموهای ۰/۵ متری قرار گرفت تا روند تغییرات کرنش در حین جابه‌جایی گسل و تحت هر یک از عوامل ذکر شده، مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است با توجه به حجم سنگین محاسبات، بخشی از اجرای محاسبات به کمک رایانه دارای ۱۶ هسته و ۱۶ گیگابایت حافظه دسترسی تصادفی^{۱۸} (RAM) و بخشی دیگر به کمک رایانه‌ای دارای ۳۲ هسته و ۱۰ گیگابایت حافظه دسترسی تصادفی (RAM) که به ترتیب به همت مرکز محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد و مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد فراهم شده بود، انجام شده است.

۴-۱- صحت سنجی

جهت صحت سنجی شبیه‌سازی انجام شده با نرم‌افزار آباکوس، نتایج آن با نمونه آزمایشگاهی جلالی و همکاران [۱۹]

جدول (۲): مشخصات هندسی آزمایش جلالی و همکاران [۱۹].

ابعاد نمونه (متر) طول × عرض × ارتفاع	میزان جابه‌جایی گسل (میلی‌متر)	زاویه شیب گسل (درجه)	نسبت عمق دفن به قطر	عمق دفن (متر)	نسبت قطر به ضخامت	ضخامت (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)
۲ × ۱/۷ × ۸	۶۰۰	۶۱	۸/۸	۱	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳

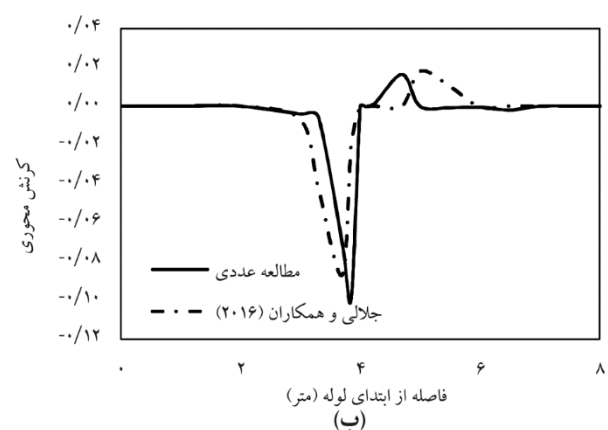
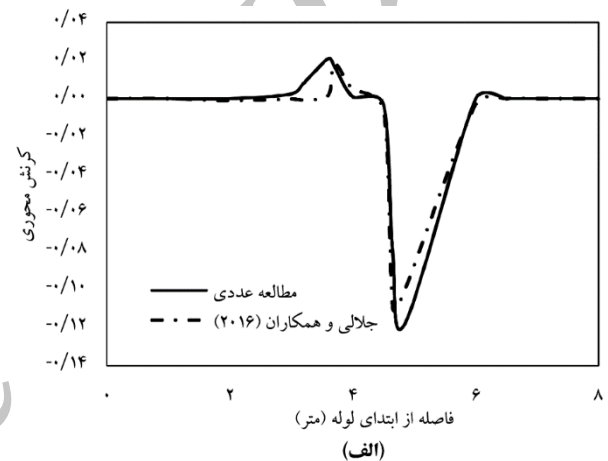
جدول (۴): مشخصات خاک ریز ماسه‌ای آزمایش [۱۹].

ضریب انحنای C_c	ضریب یکنواختی C_u	اندازه متوسط دانه‌ها D_{50} (میلی‌متر)	زاویه اصطکاک (درجه)	چگالی دانه‌های جامد G_s	وزن مخصوص خشک خاک γ_d (کیلو نیوتن بر مترمکعب)
۱/۰۱	۶/۶۹	۱/۱	۳۳/۵	۲/۵۶	۱۷/۹

دارد. این تطابق، نشان دهنده صحیح بودن نحوه شبیه‌سازی عددی در پژوهش حاضر است. لازم به ذکر است، همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد کرنش‌های فشاری مقادیر بزرگ‌تری از کرنش‌های کششی دارند که این امر نشان‌دهنده بحرانی‌تر بودن کرنش‌های فشاری در حرکت گسل معکوس است. علاوه بر روش آزمایشگاهی جلالی و همکاران [۱۹]،

مقایسه‌ای بین نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه و روش عددی جوشی و همکاران [۲۱] انجام شده است تا ضمن اطمینان کامل از صحت نحوه شبیه‌سازی، مقایسه‌ای بین روش تیر-فنر و روش پیوسته سه‌بعدی انجام شود. جوشی و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۱ به مطالعه عددی لوله‌های مدفون در خاک در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. برای این منظور ایشان با استفاده از یک الگو اجزای محدود و با در نظر گرفتن عنصر تیر برای لوله و فنرهای غیرخطی مجزا برای شبیه‌سازی خاک تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار لوله‌های مدفون گذرنده از گسل معکوس را به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند. جوشی و همکاران [۲۱] از لوله X65 که دارای منحنی تنش-کرنش دوخطی مطابق با شکل ۲ و مشخصات مندرج در جدول (۱) است، جهت شبیه‌سازی استفاده کردند. مطابق با شبیه‌سازی انجام شده توسط جوشی و همکاران [۲۱]، لوله در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط که دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و وزن مخصوص ۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب است، مدفون شده است و فاصله تاج لوله از سطح زمین برابر ۱/۳ متر است همچنین ضریب اصطکاک بین خاک و لوله برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. شکل (۵) مقایسه بین بیشینه کرنش‌های فشاری به دست آمده از شبیه‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام شده توسط جوشی و همکاران [۲۱] را برای دو زاویه شیب گسل (β) ۴۰ و ۷۰ درجه نشان می‌دهد.

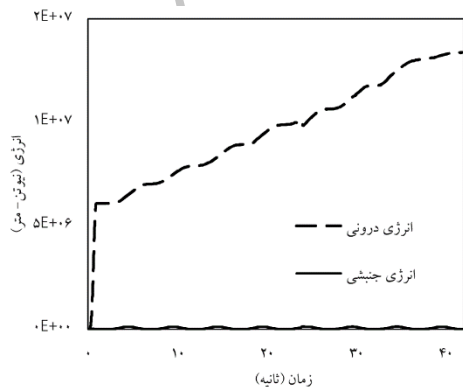
شکل (۴)، مقایسه مقادیر کرنش‌های محوری در بالا و پایین راستای لوله، برای نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی انجام شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است لوله مورد مطالعه در آزمایش جلالی و همکاران [۱۹] تحت حرکت گسل معکوس و نیروهای فشاری ناشی از آن دچار چین خوردگی شده بود.



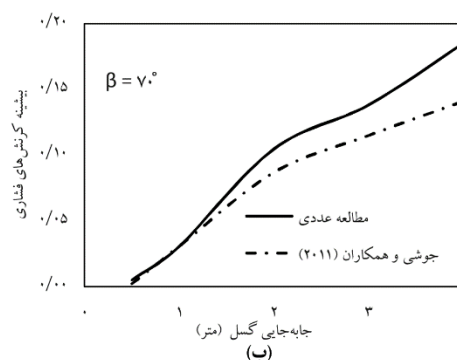
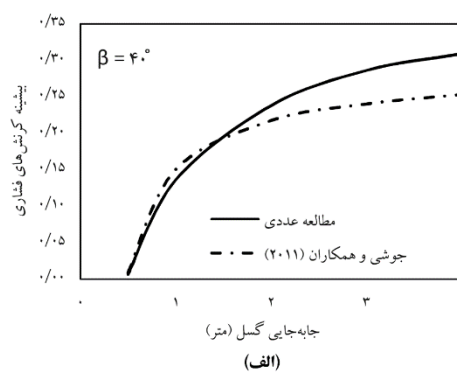
شکل (۴): تغییرات کرنش محوری برای الف) سطح پایین لوله و ب) سطح بالای لوله.

همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار و شبیه‌سازی انجام شده توسط جلالی و همکاران [۱۹] وجود

بارگذاری است که در مسئله حاضر در قالب سرعت حرکت گسل مطرح می‌شود. در تحلیل انجام شده در مقاله حاضر نیز، با علم به این موضوع، سعی شد تا شرایط شبه استاتیکی حرکت گسل [۲۱] در مسئله پیاده شود تا نرخ کرنشی که در لوله رخ می‌دهد منطبق بر نرخ کرنشی باشد که لوله مدفون در زمان حرکت گسل در طبیعت، آن را تجربه می‌کند. جهت تامین شرایط شبه استاتیکی نیز لازم است جابه‌جایی گسل به آرامی و طی گام‌های ملایم ۱۹ انجام شود تا پاسخ‌های به‌دست آمده تحت تأثیر اثرات دینامیکی و اینرسی قرار نگیرند [۲۲] به همین دلیل برای حرکت گسل زمانی ۴۰ ثانیه‌ای در نظر گرفته شده است که طی گام‌های ملایم به مدل اعمال شده است. لازم به ذکر است به‌طور کلی برای اثبات شبه استاتیکی بودن تحلیل، انرژی جنبشی سازه تغییر شکل یافته باید کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد انرژی درونی در حین شبیه‌سازی باشد [۲۲]. شکل (۶) تاریخچه زمانی تغییرات انرژی جنبشی و داخلی را برای لوله مدفون در خاک ماسه‌ای متراکم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، مقادیر انرژی جنبشی کمتر از ۵ درصد مقادیر انرژی درونی در حین حرکت گسل به دست آمده است؛ بنابراین بازه زمانی در نظر گرفته شده برای اعمال حرکت گسل به اندازه کافی بزرگ و مناسب است و تحلیل در حالت شبه استاتیکی باقی مانده است. لازم به ذکر است اجرای هر یک از تحلیل‌های انجام شده در این مقاله با کمک رایانه‌های محاسبات سنگین، حدود هفت شبانه‌روز زمان برده است.



شکل (۶): تاریخچه زمانی انرژی جنبشی و انرژی درونی لوله مدفون در خاک ماسه‌ای متراکم.



شکل (۵): تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله برای زاویه شیب الف) ۴۰ درجه و ب) ۷۰ درجه.

همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج به‌دست آمده از هر دو روش شبیه‌سازی، به‌خصوص در جابه‌جایی‌های کوچک گسل وجود دارد. بنابراین، شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر از صحت کامل برخوردار است. علت بروز اختلاف در مقادیر کرنش‌های فشاری در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل، در ادامه شرح داده خواهد شد. لازم به ذکر است نوع شبیه‌سازی، روش تحلیل و عناصر استفاده شده برای هر دو نمونه ساخته شده جهت صحت سنجی، مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیشین است.

شایان ذکر است نرخ کرنش لوله وابسته به شرایط محیطی حاکم بر مسئله است. به همین دلیل در پژوهش حاضر سعی شده است در انتخاب ویژگی‌های خاک و لوله، نوع، ابعاد و اندازه مسئله، عناصر و روش تحلیل به طریقی عمل شود که شرایط تحلیل عددی منطبق بر واقعیت باشد. علاوه بر مشخصات خاک و لوله که می‌تواند در نرخ کرنش ایجاد شده در لوله تأثیر گذار باشد یکی از مهمترین عوامل اثر گذار بر نرخ کرنش، سرعت

۴-۲- مقایسه روش سه‌بعدی پیوسته و روش تیر- فنر

همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد در جابه‌جایی‌های کوچک گسل، تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش سه‌بعدی و روش تیر- فنر جوشی و همکاران [۲۱] وجود دارد، اما با افزایش جابه‌جایی گسل، بین مقادیر اختلافاتی پدید می‌آید. علت این امر به متفاوت بودن نحوه شبیه‌سازی مسئله برمی‌گردد. همان‌طور که پیش‌ازین نیز ذکر شد، در روش تیر- فنر از عناصر تیر جهت شبیه‌سازی لوله استفاده می‌شود، حال آنکه این عناصر توانایی شبیه‌سازی کمانش موضعی را ندارند و تنها می‌توانند کمانش کلی را به‌خوبی شبیه‌سازی نمایند [۲۱] و [۲۵]. از آنجایی که در حالت وقوع کمانش کلی کرنش‌ها در سطح وسیعی توزیع می‌شوند (برخلاف کرنش موضعی که کرنش‌ها در یک محدوده کوچک تجمع می‌یابند)، مقادیر کرنش‌ها چندان بزرگ نیستند. به همین دلیل، در محدوده تغییر شکل‌های کوچک گسل که به دلیل پایین بودن سطح کرنش‌ها کمانش کلی به وقوع می‌پیوندد، تطابق خوبی بین روش تیر- فنر و روش سه‌بعدی برقرار است، اما در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل که مقادیر کرنش‌ها افزایش می‌یابد و کمانش موضعی در لوله به وقوع می‌پیوندد، اختلافاتی بین مقادیر مشاهده می‌شود. این در حالی است که گسیختگی از نوع کمانش موضعی مد غالب گسیختگی به شمار می‌آید و گزارش‌های کمی از گسیختگی به‌صورت کمانش کلی گزارش شده است [۲]؛ بنابراین استفاده از نتایج روش تیر- فنر، به دلیل عدم توانایی این روش در شبیه‌سازی کمانش موضعی، در تغییر شکل‌های بزرگ گسل چندان قابل استناد نیست. اما روش سه‌بعدی پیوسته استفاده شده در این مقاله به‌خوبی می‌تواند با کمک عناصر پیوسته کمانش موضعی و تغییر شکل‌های ایجادشده در مقطع لوله را شبیه‌سازی نماید.

لازم به ذکر است وقوع کمانش کلی یا کمانش موضعی تابع عوامل مختلفی از جمله نسبت D/t ، عمق دفن زاویه لوله و گسل، زاویه شیب گسل، جنس مصالح و موارد دیگر است [۲۱] و به همین دلیل تعیین معیاری مشخص برای وقوع کمانش

موضعی یا کمانش کلی چندان آسان نیست. اما در برخی مراجع آورده شده است که استفاده از لوله‌های با جدار ضخیم یا مدفون در عمق کم می‌تواند احتمال وقوع کمانش موضعی را کاهش و در مقابل احتمال وقوع کمانش کلی را افزایش دهد [۲، ۲۴]. لحظه وقوع کمانش موضعی بر اساس پیشنهاد ارائه‌شده توسط آیین‌نامه ASCE آمریکا^{۲۰} [۲۶]، 0.25 تا 0.5 برابر کرنش نظری (ϵ_t) به‌دست آمده از رابطه زیر است:

$$\epsilon_t = 0.6 \times \frac{t}{R} \quad (2)$$

که برای لوله‌ای با مشخصات مورد مطالعه در این بخش و با نسبت ضخامت به شعاع 0.028 برابر 0.0042 تا 0.0084 خواهد بود. اگرچه رابطه پیشنهادشده برای لوله‌های با جدار ضخیم محافظه‌کارانه و دست بالا است [۲]، اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود کرنش‌های موضعی در مقادیر بسیار کوچک کرنش احتمال وقوع دارند و لذا استفاده از روشی مانند روش تیر- فنر که قابلیت شبیه‌سازی چنین پدیده‌ای را ندارد برای برآورد دقیق پاسخ‌ها، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. از دیگر نواقص روش تیر- فنر می‌توان به محدودیت‌های آن در شبیه‌سازی اندرکنش خاک و لوله و نیروهای به وجود آمده در سطح اندرکنش اشاره نمود. همان‌طور که پیش‌ازین ذکر شده بود شبیه‌سازی اندرکنش خاک و لوله در روش تیر- فنر با کمک فنرهای معادل خاک انجام می‌شود. اما این فنرها در فواصل معینی اتصال بین خاک و لوله را شبیه‌سازی می‌کنند که این امر سبب می‌شود شبیه‌سازی اندرکنش به‌صورت پیوسته انجام نپذیرد. این در حالی است که در روش تماسی و پیوسته، عناصر اندرکنش خاک و لوله در همه سطح تماس، متصل به لوله بوده و در نتیجه مشکل روش تیر- فنر را ندارد.

لازم به ذکر است در روش تیر- فنر امکان شبیه‌سازی تنش‌های برجای موجود در محل قبل از وقوع گسلش، وجود ندارد، اما در روش سه‌بعدی، می‌توان با اعمال نیروی گرانش به کل محیط در مرحله‌ای قبل از اعمال حرکت گسل، این تنش‌ها را در محیط ایجاد نمود.

۳-۴- بررسی اثر نسبت قطر به ضخامت بر پاسخ لوله

در این بخش به منظور بررسی اثر نسبت قطر به ضخامت لوله بر رفتار لوله، نسبت‌های قطر به ضخامت (D/t) ۱۴۴، ۷۲، ۴۸ و ۳۶ مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین ترتیب که برای لوله X65 مورد مطالعه قطری ثابت و معادل ۰/۹۱۴۴ متر (۳۶ اینچ) در نظر گرفته شد که در خاک ماسه‌ای متراکم ($\nu=0.3$, $E=75\text{MPa}$)، $c=5\text{KPa}$ ، $\psi=0$ و $\phi=45$) مدفون شده است و ضخامت لوله به مقادیر ۶/۳۵ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ)، ۱/۲۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ)، ۱۹/۰۵ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) و ۲۵/۴ میلی‌متر (۱/۰ اینچ) تغییر داده شده است. هم‌چنین لوله در معرض گسل معکوسی با زاویه شیب ۴۰ درجه و حداکثر جابه‌جایی ۲ متر قرار داده شده است و این جابه‌جایی با نمونه‌های مساوی ۰/۵ متری به نمونه اعمال گردیده است. تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری و کششی به‌دست آمده در حین حرکت گسل در شکل ۷ قابل مشاهده است. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

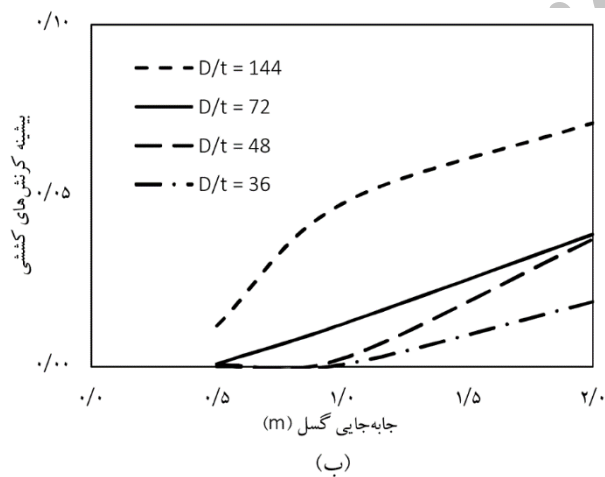
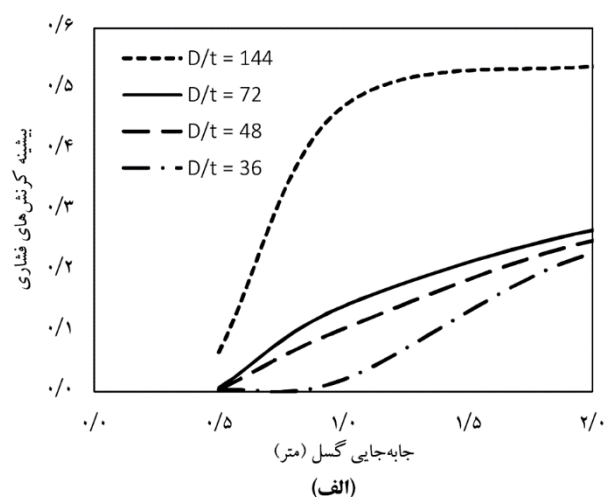
۱- به‌طور کلی با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل، مقادیر بیشینه کرنش‌های فشاری و کششی برای انواع حالات D/t افزایش می‌یابد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، در جابه‌جایی‌های کوچک گسل، تغییرات کرنش‌های فشاری در لوله‌های با ضخامت کمتر با شیب بیشتری انجام می‌شود که این امر به دلیل تسلیم زود هنگام مقطع لوله‌های جدار نازک در هنگام وقوع گسلش است. اما در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر گسل که لوله دچار چین خوردگی شده است، شیب تغییرات کرنش در انواع نسبت‌های D/t کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش نسبت D/t مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابند. علت این امر کاهش ضخامت لوله و ضعیف شدن مقطع آن در برابر نیروهای ایجاد شده در لوله است.

۳- در نسبت‌های بزرگ D/t مقادیر کرنش‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این مقادیر حتی در جابه‌جایی کوچک گسل نیز بسیار قابل توجه هستند بنابراین اکیداً توصیه می‌شود از استفاده از لوله‌های جدار نازک در

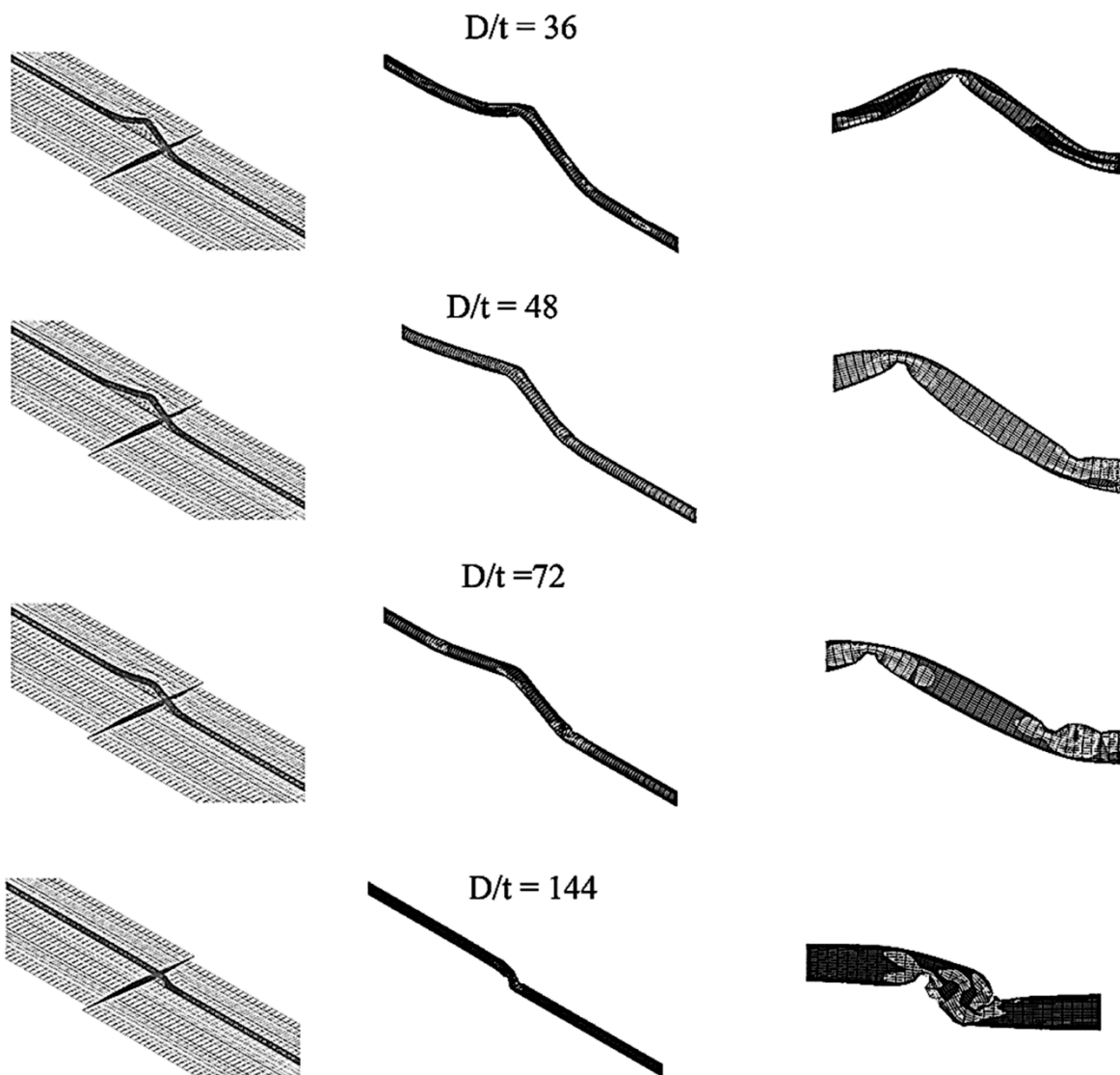
محل تلاقی لوله و گسل خودداری شود.

۴- در جابه‌جایی‌های یکسان گسل، بیشینه کرنش‌های کششی مقادیر کوچک‌تری در مقایسه با بیشینه کرنش‌های فشاری دارند. بنابراین کرنش‌های فشاری بحرانی‌تر هستند و تحت حرکت گسل معکوس، کمانش موضعی زودتر از گسیختگی کششی رخ خواهد داد.



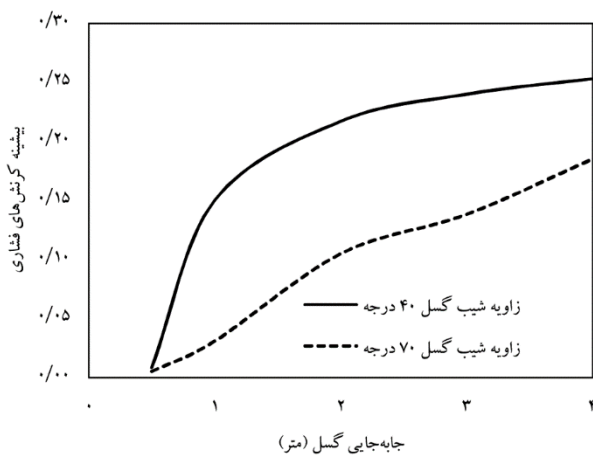
شکل (۷): اثر نسبت قطر به ضخامت لوله بر کرنش‌های ایجاد شده در لوله (الف) بیشینه کرنش‌های فشاری و (ب) بیشینه کرنش‌های کششی.

نحوه تغییر شکل لوله در داخل خاک، به ازای مقادیر مختلف D/t در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با تغییر نسبت D/t، نحوه تغییر شکل لوله در داخل توده خاک نیز دستخوش تغییرات می‌شود.


 شکل (۸): تغییر شکل لوله برای نسبت‌های مختلف D/t .

حرکت گسل معکوس مقاومت می‌کند و نیروهای فشاری ناشی از حرکت گسل معکوس در طول بیشتری از لوله توزیع و در نتیجه قبل از وقوع کمانش موضعی، طول بیشتری از لوله دچار تغییر شکل می‌شود. اما در نسبت $D/t = 144$ به دلیل نازک بودن جدار لوله، در جابه‌جایی‌های کوچک گسل نیز مقطع لوله دچار چین‌خوردگی می‌شود و در نتیجه در مقطع لوله تمرکز تنش بوجود می‌آید که سبب می‌شود لوله از محل چین‌خوردگی شروع به جمع شدن و پیچش کند و بقیه طول لوله به صورت نسبتاً صلب باقی و در تحمل نیروهای فشاری ایجاد شده نقشی نداشته

با مقایسه شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌شود که تغییر نسبت D/t سبب ایجاد تغییراتی در الگوی تغییر شکل لوله شده است و نحوه تغییر شکل لوله نیز بر مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در آن تاثیر گذاشته است. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد لوله با نسبت $D/t = 36$ جابه‌جایی عمودی بیشتری در مقایسه با سایر انواع نسبت‌های D/t دارد. در واقع ضخیم‌تر شدن جدار لوله سبب شده لوله مقاومت بیشتری در برابر نیروهای فشاری از خود نشان دهد و مقطع آن به راحتی دچار چین‌خوردگی و تمرکز تنش نشود و در نتیجه طول بیشتری از لوله در برابر



شکل (۹): اثر زاویه شیب گسل بر کرنش‌های فشاری ایجادشده در لوله.

نتایج به‌دست آمده در شکل (۹) نشان می‌دهد که:

۱- برای هر دو زاویه شیب گسل، با افزایش میزان جابه‌جایی گسل مقادیر کرنش‌های فشاری ایجادشده در لوله نیز به علت اعمال جابه‌جایی بیشتر به لوله افزایش می‌یابد. اما نرخ تغییرات کرنش در آن‌ها متفاوت است. در واقع در گسل با زاویه شیب ۴۰ درجه، با افزایش جابه‌جایی گسل، نرخ تغییرات کرنش نسبتاً ثابت می‌ماند حال آنکه در گسل با زاویه شیب ۷۰ درجه با افزایش جابه‌جایی گسل، نرخ تغییرات کرنش کاهش می‌یابد. علت این رفتار نیز می‌تواند ناشی از تفاوت الگوی تغییرشکلی لوله در داخل خاک باشد.

۲- با افزایش زاویه شیب گسل (زاویه صفحه گسل با سطح افق) مقادیر کرنش‌های فشاری ایجادشده در لوله کاهش می‌یابند. بنابراین تا جایی که امکان دارد باید از تلاقی لوله‌های مدفون با گسل‌های با زاویه شیب کم جلوگیری نمود.

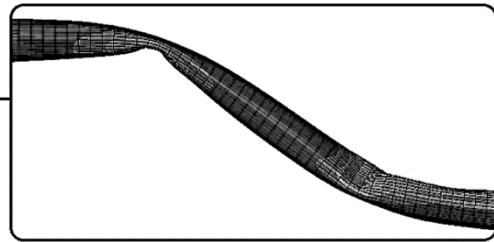
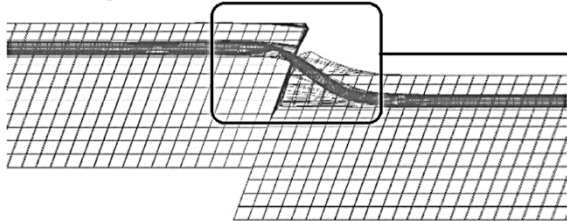
شکل (۱۰) نیز نحوه تغییر شکل لوله در داخل توده خاک برای دو زاویه شیب ۴۰ و ۷۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش زاویه شیب گسل سبب می‌شود که تغییر شکل‌های شدیدتری در لوله ایجاد شود و در نتیجه آسیب بیشتری به آن وارد شود.

باشد که این رفتار نهایتاً منجر به افزایش چشم‌گیر کرنش‌ها در مقطع لوله می‌شود. در نسبت قطر به ضخامت ۴۸ و ۷۲ نیز مشاهده می‌شود که الگوی تغییرشکلی آن‌ها تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد و تنها به واسطه نازک‌تر شدن جدار لوله تغییر شکل‌های شدیدتری در محل چین‌خوردگی پدید آمده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مشابه بودن الگوی تغییر شکل در لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت ۴۸ و ۷۲ سبب شده است که مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در آن‌ها نیز اختلاف زیادی با یکدیگر نداشته باشند و از الگوی نسبتاً ثابتی پیروی کنند. بنابراین چنین می‌توان نتیجه گرفت که میزان کرنش‌های ایجاد شده در لوله و الگوی رفتاری آن‌ها تابعی از نحوه تغییر شکل لوله در داخل توده خاک است. همچنین در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت D/t فاصله محل چین‌خوردگی از محور گسل کاهش می‌یابد به طوری که در نسبت‌های بسیار بزرگ آن (نظیر $D/t = 144$) محل چین‌خوردگی دقیقاً منطبق بر محور گسل است. دانستن این نکته به شناسایی محل آسیب‌دیده بر اساس نسبت D/t و جهت انجام تعمیرات احتمالی، کمک شایانی می‌نماید.

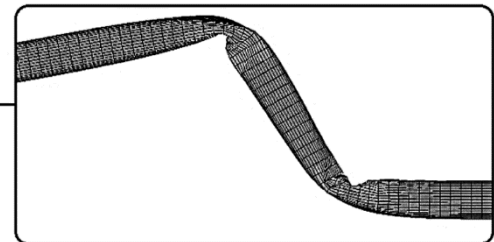
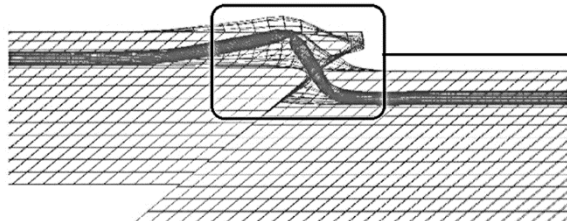
۴-۴- بررسی اثر زاویه شیب گسل بر پاسخ لوله

به‌منظور بررسی اثر زاویه شیب گسل، لوله فولادی X65 مدفون در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط ($\nu=0.3$, $E=40\text{MPa}$, $c=5\text{KPa}$ و $\psi=0$ و $\phi=35$)، تحت حرکت گسل‌هایی با شیب‌های متفاوت ۴۰ و ۷۰ درجه قرار گرفت. هر دو نوع گسل دارای حداکثر میزان جابه‌جایی ۴ متر فرض شدند که حرکت آن‌ها در نمونه‌های مساوی ۰/۵ متری اعمال می‌شود. لوله مورد مطالعه دارای قطر ۰/۹۱۴۴ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر است و فاصله سطح زمین از تاج لوله برابر ۱/۳ متر و ضریب اصطکاک بین خاک و لوله برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. شکل (۹) تغییرات بیشینه کرنش فشاری برای دو زاویه شیب گسل ۴۰ و ۷۰ درجه را نشان می‌دهد.

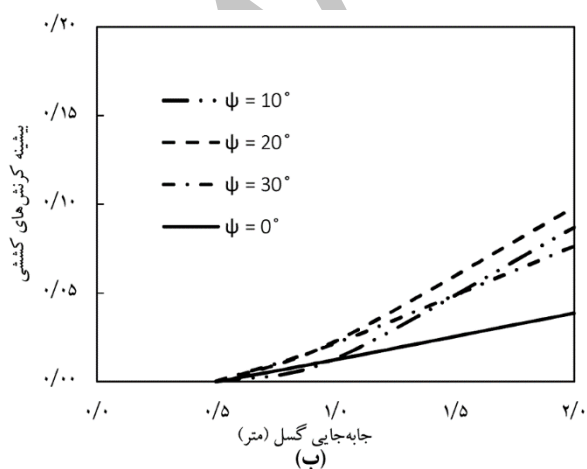
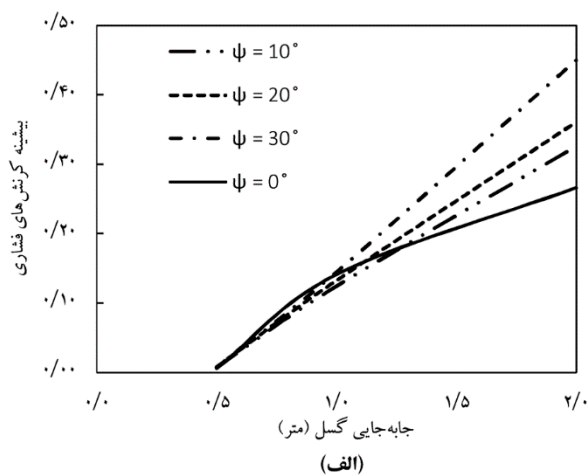
زاویه شیب گسل : ۷۰ درجه



زاویه شیب گسل : ۴۰ درجه



شکل (۱۰): نحوه تغییر شکل لوله در داخل توده خاک برای دو زاویه شیب ۷۰ و ۴۰ درجه.



شکل (۱۱): اثر زاویه اتساع خاک بر کرنش‌های ایجاد شده در لوله (الف) بیشینه کرنش‌های فشاری و (ب) بیشینه کرنش‌های کششی.

۴-۵- بررسی اثر زاویه اتساع خاک بر پاسخ لوله

به منظور بررسی اثر زاویه اتساع خاک، زوایای صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای ماسه متراکم ($c=5\text{KPa}$, $v=0.3$, $E=75\text{MPa}$) و $\phi=45$ در نظر گرفته شد. لوله X65 مورد مطالعه دارای قطر ۰/۹۱۴۴ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر و عمق دفن ۱/۳ متر است که تحت جابه‌جایی گسل معکوسی با حداکثر جابه‌جایی ۲ متر قرار گرفته است. شکل ۱۱-الف تغییرات بیشینه کرنش فشاری و شکل ۱۱-ب تغییرات بیشینه کششی ایجاد شده در لوله را تحت مقادیر مختلف از جابه‌جایی گسل را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج به دست آمده در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که:

۱- با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل، برای انواع زوایای اتساع خاک، مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر شیب نمودار در خاک با زاویه اتساع صفر درجه، اندکی با سایر انواع خاک‌های مورد مطالعه متفاوت است.

۲- بیشینه کرنش‌های کششی مقادیر بسیار کوچک‌تری در مقایسه با بیشینه کرنش‌های فشاری دارند. بنابراین در حین وقوع گسلش احتمال گسیختگی از نوع کمانش موضعی بیشتر از گسیختگی کششی خواهد بود.

شبه‌سازی این نوع از گسیختگی است. همچنین مطالعات انجام شده نشان داد که لوله‌های با نسبت D/t بزرگ، کرنش‌های بسیار بزرگ تری را در مقایسه با لوله‌های با جدار ضخیم تجربه می‌کنند که این امر به دلیل ضعیف شدن مقطع لوله در تحمل نیروها با کاهش ضخامت آن است. این امر به خصوص در لوله‌های جدار نازک که تحت نیروهای فشاری قرار گرفته‌اند بسیار قابل توجه است؛ زیرا مقطع نازک این لوله‌ها تحمل نیروهای فشاری ایجاد شده را ندارد و در نتیجه در جابه‌جایی‌های کوچک گسل نیز دچار شکست و چین‌خوردگی می‌شود. از طرف دیگر بررسی الگوی تغییر شکل لوله در داخل خاک نشان داد که نحوه تغییر شکل لوله (که ناشی از شرایط محیطی حاکم بر مسئله است) بر مقادیر کرنش‌های رخ داده اثر گذار است. همچنین نتایج نشان داد که گسل‌های با زاویه شیب کمتر کرنش‌های بزرگ تری را در لوله ایجاد می‌کنند. علت این امر نیز به نحوه ایجاد تغییر شکل لوله تحت جابه‌جایی گسل بر می‌گردد، در واقع در زاویه شیب کمتر گسل، نوع حرکت گسل و موقعیت قرارگیری لوله درون توده خاک سبب می‌شود که تغییر شکل‌های شدیدتری در مقطع لوله پدید آید و در نتیجه لوله آسیب بیشتری ببیند. بررسی اثر زاویه اتساع خاک نیز نشان داد که به طور کلی، در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل، افزایش این زاویه می‌تواند سبب افزایش مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله شود.

مراجع

1. Moradi, M., Rojhani, M., Galandarzadeh, A. and Takada, S. (2013) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to normal faulting. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12, 155-164.
2. O'Rourke, M. J. and Liu, X. (1999) *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*. Monograph Series, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), University at Buffalo, Buffalo, NY 14261.

۳- همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود تغییر زاویه اتساع خاک در جابه‌جایی‌های کوچک گسل تأثیر چندانی بر مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در لوله ندارند اما به‌طور کلی خاک با زاویه اتساع صفر درجه مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی کمتری در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل تجربه می‌کند. بنابراین حضور خاک‌های با زاویه اتساع صفر درجه در محل تلاقی لوله و گسل مناسب‌تر است.

۴- در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل، با افزایش زاویه اتساع مقادیر کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله افزایش می‌یابند حال آنکه افزایش زاویه اتساع از ۱۰ تا ۳۰ درجه تأثیر چندانی بر مقادیر کرنش‌های کششی ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف شبه‌سازی رفتار خطوط لوله مدفون در برابر حرکات گسل معکوس اقدام به شبه‌سازی اجزای محدود این پدیده گردید. به همین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای شبه‌سازی استفاده شد. برخلاف مطالعات پیشین، در این پژوهش به جای استفاده از روش ساده‌شده تیر-فنر از روش سه‌بعدی و پیوسته استفاده شد و سعی شد با تمرکز بر نحوه شبه‌سازی، ضمن تشریح روند شبه‌سازی و مبانی استفاده شده در این تحقیق، روشی جدید جهت شبه‌سازی رفتار لوله در برابر حرکات گسل معکوس ارائه شود تا بر خلاف مطالعات گذشته که به دلیل سهولت روش شبه‌سازی غالباً متمرکز بر گسل‌های امتدادلغز و عادی بوده‌اند، رفتار لوله‌ها تحت گسلش معکوس نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش سه‌بعدی پیوسته با روش تیر-فنر نشان داد که در جابه‌جایی‌های کوچک گسل به دلیل رخداد کمانش کلی در لوله هر دو روش جواب‌های یکسانی ارائه می‌دهند اما با افزایش جابه‌جایی گسل و بروز کمانش موضعی (چین‌خوردگی) در مقطع لوله، اختلافاتی در نتایج پدید می‌آید که ناشی از عدم توانایی روش تیر-فنر در

- buried pipe. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4**(1), 69-73.
13. Ha, D., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., and Stewart, H.E. (2008) Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(10), 1501-1515.
 14. Abdoun, T. and Dobry, R. (2002) Evaluation of pile foundation response to lateral spreading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9-12), 1051-1058.
 15. Ha, D., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., and Stewart, H.E. (2008) Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting—a centrifuge investigation. *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(12), 1733-1742.
 16. Ariman, T. and Lee, B. (1989) On beam mode of buckling of buried pipelines. *Proceedings of the 2nd US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, Buffalo, NY
 17. Meyersohn, W.D. (1991) *Analytical and Design Considerations for the Seismic Response of Buried Pipelines*. Cornell University.
 18. Takada, S., Hassani, N., and Fukuda, K. (2001) A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. **30**(8), 1243-1257.
 19. Jalali, H.H., Rofooei, F.R. Attari, N.K. and Samadian, M. (2016) Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **86**, 1-14.
 20. Rojhani, M, Moradi, M, Galandazadeh, A, Takada, S. (2012) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(6), 659-670.
 21. Joshi, S., Prashant, A., Deb, A. and Jain, S.K. (2011) Analysis of buried pipelines subjected to
 3. Choo, Y.W., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., and Ha, D. (2007) Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(12), 1043-10554.
 4. Moradi, M., Galandazadeh, A, Rojhani, M. and Takada, S. (2010) Centrifuge modeling of buried pipelines subjected to faulting. *4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran (in Persian).
 5. Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas, P. (2010) Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(11), 1361-1376.
 6. Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas, P. (2012) Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **41**, 164-180.
 7. Trifonov, O.V. (2014) Numerical Stress-Strain Analysis of Buried Steel Pipelines Crossing Active Strike-Slip Faults with an Emphasis on Fault Modeling Aspects. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **6**(1).
 8. Newmark, N.M. and Hall, W.J. (1975) Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement, *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.
 9. Kennedy, R., Chow, A., and Williamson, R. (1977) Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, **103**, 617-633.
 10. Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H. (1985) A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **13**(1), 75-96.
 11. Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., and Kouretzis, G.P. (2007) Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 200-211.12.
 12. O'Rourke, M., Gadicherla, V., and Abdoun, T. (2005) Centrifuge modeling of PGD response of

- Pipe Coating Factor ۱۷- ضریب اندود سطحی
- Random-Access Memory (RAM) ۱۸- حافظه دسترسی تصادفی
- Smooth Steps ۱۹- گام‌های ملایم
- American Society of Civil Engineers (ASCE) ۲۰- انجمن مهندسان عمران آمریکا
- reverse fault motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(7), 930-940.
22. Dassault Systemes Simulia Corp. (2012) *Abaqus 6.12 User's Manual*. Providence, USA.
23. Sadrnejad, S.A. (Ed.) (2011) *Soil Plasticity and Modeling*. K.N. TOOSI University of Technology, Tehran (in Persian).
24. ALA: American Lifelines Alliance (2001) *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*. ASCE, New York, USA
25. Xie, X., Symans, M.D., O'Rourke, M.J., Abdoun, T.H., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C. (2013) Numerical modeling of buried HDPE pipelines subjected to normal faulting: a case study. *Earthquake Spectra*, **29**, 609-632
26. ASCE: American Society of Civil Engineers (1984) *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline. ASCE, New York, USA.

واژه‌نامه

- Shell Elements ۱- عناصر پوسته‌ای
- Solid Elements ۲- عناصر حجمی
- Centrifuge ۳- سانتریفیوژ
- Split-Box ۴- جعبه دوبخشی شبیه‌ساز گسلش
- Elements ۵- عنصرها
- Model ۶- نمونه
- Explicit Dynamics Analysis ۷- تحلیل صریح دینامیکی
- Interaction ۸- اندرکنش
- Implicit Dynamics Analysis ۹- تحلیل دینامیکی ضمنی
- General Static ۱۰- استاتیکی عمومی
- Shell ۱۱- پوسته
- Reduced ۱۲- کاهش یافته
- Continuum ۱۳- پیوسته
- 3-Dimension ۱۴- سه بعدی
- Surface to Surface ۱۵- سطح به سطح
- American Lifeline Alliance (ALA) ۱۶- انجمن شریان‌های حیاتی آمریکا