

Experimental and Numerical Investigation of GRP Pipe Failure Buried in Dense and Loose Sandy Soils

Mohammad Rauf AliPouriani¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2*}, AllahReza MoradiGarooosi³, Mohammad Reza Ghotb⁴

1- Ph.D. Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

4-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT

Underground pipelines are considered critical infrastructure, primarily used for the transport of energy and other fluids. One of the major earthquake-related threats to these pipelines is fault displacement occurring along their paths. Therefore, examining the behavior of these pipelines in various soils under seismic impact is of paramount importance. This study investigates the behavior of buried GRP pipes in dense and loose sandy soils through experimental and numerical approaches. Full-scale tests were conducted, with a constant pipe diameter and thickness of 200 mm and 4.9 mm, respectively, across two models. Following loading, the pipe's displacement during loading and failure, as well as the applied force, were measured. Subsequently, numerical studies based on a validated model were carried out to assess the impact of pipe diameter and thickness on the results. A simplified failure equation was proposed based on numerical results to facilitate easier calculations. Finally, the influence of pipe variables on the outcomes was evaluated. Findings indicate that increasing the pipe's diameter and thickness led to higher displacement at the moment of failure and increased failure force. The pipe's failure moment was calculated based on strain, yielding a value of approximately 1.5% in both dense and loose sand. The most influential variable on the failure force and maximum absolute displacement was the pipe diameter. The effect of pipe thickness on maximum displacement was found to be more significant in loose sandy soils than in dense sands.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 November 2024

Revise Date: 13 December 2024

Accept Date: 06 January 2025

Keywords:

GRP pipes

Lifelines

Experimental and Numerical analysis

Dense and loose sand

Soil-pipe interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.487227.3564](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.487227.3564)

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari

Email address: tahamouli@iauksh.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی شکست لوله GRP مدفون در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و غیر متراکم

محمدرئوف علی‌پوریانی^۱، مهرزاد تحمیلی‌رودسری^{۲*}، الله‌رضا مرادی‌گروسی^۳، محمدرضا قطب^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

خطوط لوله‌ی زیرزمینی به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی شناخته می‌شوند و عمدتاً در انتقال انرژی و سایر سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از بزرگ‌ترین تهدیدات ناشی از زلزله برای این خطوط لوله، پدیده‌ی جابجایی گسل‌هایی است که در مسیر آن‌ها قرار دارند. به همین دلیل، بررسی رفتار این خطوط لوله در خاک‌های مختلف تحت تأثیر زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار لوله‌های مدفون از جنس GRP در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و غیرمتراکم، به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در مقیاس کامل انجام شد و قطر و ضخامت لوله در دو مدل ثابت و به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۴/۹ میلی‌متر بود. پس از بارگذاری، تغییر مکان لوله در طول بارگذاری و لحظه‌ی شکست، همچنین نیروی وارده به آن محاسبه شد. سپس، مطالعات عددی بر اساس مدل صحت‌سنجی به‌منظور بررسی تأثیر قطر و ضخامت لوله بر این نتایج انجام گرفت. برای محاسبه‌ی ساده‌تر شکست لوله، بر اساس نتایج عددی، یک معادله پیشنهاد شد. نهایتاً شدت اثرگذاری متغیرهای لوله بر نتایج آن ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش قطر و ضخامت لوله موجب افزایش جابجایی موردنیاز در لحظه‌ی شکست و نیروی شکست می‌شود. لحظه شکست لوله بر اساس کرنش آن محاسبه گردید و مقدار آن در ماسه‌ی متراکم و غیرمتراکم تقریباً برابر با ۱/۵٪ به دست آمد. تأثیرگذارترین متغیر لوله بر نیروی شکست و جابجایی مطلق حداکثر آن، قطر لوله بود. تأثیر ضخامت لوله بر جابجایی حداکثر آن در خاک‌های ماسه‌ای غیرمتراکم بیشتر از خاک‌های متراکم است.

کلمات کلیدی: لوله GRP، شریان‌های حیاتی، تحلیل آزمایشگاهی و عددی، ماسه متراکم و غیرمتراکم، اندرکنش خاک و لوله.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.487227.3564	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.487227.3564	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۰/۱۷	۱۴۰۳/۱۰/۱۷	۱۴۰۳/۰۹/۲۳	۱۴۰۳/۰۸/۲۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				مهرزاد تحمیلی‌رودسری		
				tahamouli@iauksh.ac.ir		

۱- مقدمه

با توجه به رشد فزاینده نیاز جهانی به منابع انرژی، خطوط لوله مدفون که برای انتقال سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند، پتانسیل بالایی برای بهبود و توسعه قابل توجه دارند. این خطوط لوله، که معمولاً در شرایط سخت و تحت فشار بالا فعالیت می‌کنند، پیش‌بینی عمر مفید و ارزیابی ایمنی آن‌ها را با چالش‌های بزرگی مواجه کرده است. در نتیجه، تحقیقات اساسی پیرامون مکانیسم‌های خرابی این خطوط باید به سرعت گسترش یابد تا به بهبود عملکرد و ایمنی آن‌ها کمک شود [۱، ۲]. در سال‌های اخیر، ایمنی خطوط لوله مدفون در برابر تغییر شکل‌های ماندگار زمین، نظیر حرکت‌های گسلی و لغزش‌های زمین، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در مواجهه با این مسائل خاص، خطوط لوله اغلب تحت تأثیر تغییر شکل‌های پلاستیک شدید قرار می‌گیرند که به دلیل اعمال نیروهای اضافی محوری، برشی و خمشی ایجاد می‌شود. این تنش‌ها و کرنش‌های شدید ممکن است در نقاط بحرانی منجر به فروپاشی موضعی یا کماتش پلاستیک شود. همچنین ویژگی‌های محلی نظیر نوع خاک و ساختار لایه‌بندی آن از عوامل تأثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای محسوب می‌شوند [۳].

تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای تأثیر گذار بر خطوط لوله مدفون انجام گرفته است که در این بخش به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. ژنگ^۱ و همکاران [۴] به بررسی مکانیسم‌های خرابی خطوط لوله مدفون تحت تأثیر تغییر شکل‌های غیریکنواخت ناشی از رانش زمین پرداخته‌اند. آن‌ها ابتدا علل خرابی دو حادثه مرتبط با رانش زمین را از طریق آزمایش‌های فرکتوگرافی^۲ تحلیل کرده و سپس مدل اجزای محدود بهبود یافته بر اساس الگوریتم تثبیت غیرخطی برای پیش‌بینی توان تحمل لوله‌های مدفون ارائه کردند. لیو و همکاران [۵] یک برنامه تحلیل لرزه‌ای تصادفی غیرخطی برای سیستم‌های خطوط لوله مدفون بر اساس روش تکامل چگالی احتمال توسعه دادند. در این مدل، لوله‌ها با المان‌های تیر دوبعدی و خاک اطراف با فنرهای خطی و غیرخطی شبیه‌سازی شدند. با استفاده از روش تکامل چگالی احتمال و متغیرهای تصادفی، پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله پیش‌بینی و میدان تصادفی حرکات زمین شبیه‌سازی شد. رحمان و تانیاما [۶] به بررسی رفتار خطوط لوله مدفون، که برای حمل نفت، آب، فاضلاب و گاز طبیعی استفاده می‌شوند، تحت تأثیر حرکت گسل پرداختند. آن‌ها از روش عناصر گسسته سه‌بعدی برای شبیه‌سازی استفاده کردند و ذرات کروی برای شبیه‌سازی خاک و لوله‌های توخالی در عمق کم قرار دادند. رابطه نیرو-جابجایی بین لوله و ذرات تحلیل شد و تأثیرات مهمی در نقاط شکست مشخص شد. همچنین، مطالعه پارامتری برای ارزیابی پاسخ‌ها انجام گرفت. ژانگ و همکاران [۷] یک مدل محاسباتی عددی برای بررسی پاسخ تنش-کرنش لوله مدفون با فشار داخلی تحت انفجار سطحی ایجاد کردند. آن‌ها اثرات فشار داخلی، مقدار مواد منفجره، ضخامت دیواره و عمق دفن را بر تنش و کرنش لوله مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ناحیه تنش بالا به سمت لوله بالایی گسترش یافته و با افزایش فشار داخلی، ناحیه تنش بالا کاهش می‌یابد. این یافته‌ها می‌تواند به ارزیابی ایمنی و نگهداری خطوط لوله نفت و گاز کمک کند. چودری و همکاران [۸] یک مدل محاسباتی عددی برای بررسی پاسخ تنش-کرنش لوله مدفون با فشار داخلی تحت انفجار سطحی ایجاد کردند. آن‌ها اثرات فشار داخلی، مقدار مواد منفجره، ضخامت دیواره و عمق دفن را بر تنش و کرنش لوله مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ناحیه تنش بالا به سمت لوله بالایی گسترش یافته و با افزایش فشار داخلی، ناحیه تنش بالا کاهش می‌یابد. این یافته‌ها می‌تواند به ارزیابی ایمنی و نگهداری خطوط لوله نفت و گاز کمک کند. مانولیس و همکاران [۹] به بررسی رفتار دینامیکی لوله‌های مدفون تحت لرزش‌های زمین پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل موج‌بر در دینامیک الاستیک، لوله را به‌عنوان یک سازه تیرمانند پیوسته مدل‌سازی کردند که تحت ارتعاشات محوری و خمشی قرار دارد. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، تأثیر ناهمگنی و پیچیدگی خاک اطراف بر پاسخ دینامیکی لوله تحلیل و آماره‌های مرتبط مانند میانگین و واریانس محاسبه شد. برتون و همکاران [۱۰] با بهره‌گیری از دستگاه سانتریفیوژ، شبیه‌سازی کماتش جانبی اعمال شده به لوله و اندرکنش آن با خاک جانبی را انجام دادند. فنگ و همکاران [۱۱] یک خط لوله آزمایشی گاز را با استفاده از روش میدانی و قرار دادن آن در شیروانی تحت اثر زمین‌لغزش بررسی کردند. ژنگ و همکاران [۱۲] با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ، رفتار لوله مدفون در شیب‌های ناپایدار ماسه‌ای را مطالعه کرده و تأثیر عمق دفن و زاویه شیروانی را بر رفتار لوله مورد تحلیل قرار دادند. همچنین، مطالعات عددی توسط اورورک [۱۳] با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، مدل‌سازی لوله انجام شد. وانگ و همکاران

1-Zheng

2-fractographic

[۱۴] به بررسی مشکلات نشت یا شکست لوله‌های انتقال گاز طبیعی آمیخته با هیدروژن ناشی از ساخت و ساز، خوردگی و تردی هیدروژنی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که فشار اولیه و درصد آمیختگی هیدروژن تأثیر مستقیمی بر مشخصات جریان نشت داشته و نشت گاز با افزایش آمیختگی هیدروژن کاهش می‌یابد. درویشی و همکاران [۱۵] به بررسی عددی مشکل لغزش زمین-لوله در زلزله پرداختند. نتایج نشان داد که پارامترهای کالیبره شده این مدل قادر به پیش‌بینی نتایج آزمایشات سه‌محوری و جابه‌جایی شیب هستند. وجود لوله‌های مدفون در شیب می‌تواند جابه‌جایی سطح شیب را تا ۵۰ درصد کاهش دهد و با افزایش عمق دفن، تنش محوری بر روی لوله کاهش می‌یابد. ژو و همکاران [۱۶] یک مدل اجزای محدود جامع ایجاد کردند که غیرخطی بودن خاک و اندرکنش لوله-خاک را در نظر می‌گیرد تا پاسخ لوله‌های مدفون تحت تحریکات افقی یکنواخت و غیریکنواخت را بررسی کنند. نتایج نشان می‌دهند که تنش و نیروی محوری لوله تحت تحریک دوبعدی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از تحریک یک‌بعدی است. همچنین، مشاهده شد که مقطع لوله تحت تحریک یک‌بعدی تنها بیضوی جانبی و تحت تحریک دوبعدی هم بیضوی جانبی و هم بیضوی عمودی را تجربه می‌کند. ژانگ و همکاران [۱۷] پاسخ مکانیکی لوله‌های مدفون تحت بار ترافیکی را از طریق آزمایش میدانی و بررسی عددی مطالعه کردند. چودری و همکاران [۱۸] یک راه‌حل نیمه‌تحلیلی برای لوله‌های مدفون تحت تأثیر تغییر شکل عرضی افقی زمین ارائه کرد. احمدی و همکاران [۱۹] در مطالعات خود اثرات لرزه‌ای بر خطوط لوله مدفون را به دو بخش تقسیم می‌کنند: اثرات انتشار امواج و تغییر مکان پایدار زمین. برای تعیین آسیب‌های لرزه‌ای، مهم‌ترین معیار حداکثر کرنش در خطوط لوله است. این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس روشی برای محاسبه حداکثر کرنش در لوله‌های فولادی مدفون بر اساس پارامترهای انرژی لرزه‌ای ارائه کرده است و رابطه میان حداکثر کرنش و پارامترهای زلزله بررسی شد. ژائو و همکاران [۲۰] رفتار دینامیکی و خرابی لوله‌های گاز مدفون را با توجه به نوع اتصال لوله تحت تأثیر امواج لرزه‌ای انفجاری بررسی کردند.

در سال‌های اخیر تمرکز بیشتر محققان بر روی تاثیر جنس لوله‌های مدفون و همچنین جنس خاک بر عملکرد آن بود. ژائو و همکاران [۲۱] رابطه جدیدی برای ارزیابی شکنندگی لوله‌های چدنی با اتصالات سربی تحت تأثیر امواج لرزه‌ای معرفی کرده‌اند. در این مطالعه، مدل‌های اجزای محدود دوبعدی با طول ۱۶۰۰ متر برای لوله‌های مدفون در ماسه توسعه‌یافته و تحلیل‌های پارامتری برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر تخمین آسیب‌ها انجام شده است. همچنین، مدل پیش‌بینی نرخ تعمیرات طراحی شده است که کارایی بالایی در تخمین خسارت ناشی از امواج لرزه‌ای نشان می‌دهد. تحملی‌رودسری و همکاران [۲۲] روشی جدید برای ارزیابی اندرکنش لوله‌های مدفون و خاک ماسه‌ای تحت تأثیر گسل امتدادلغز ارائه دادند. آذین و تحملی‌رودسری [۲۳] به‌صورت عددی و آزمایشگاهی، اندرکنش جانبی لوله پلی‌اتیلن مدفون و خاک ماسه‌ای را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که سختی و ظرفیت تسلیم فرهای معادل خاک، کمتر از مقادیر ارائه‌شده توسط استانداردهای مربوطه است. کیانیان و شیرینی [۲۴] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اندرکنش خط لوله، خاکریزی و گودال بر مکانیسم‌های شکست جانبی و مقاومت خاک در شرایط دفن کم‌عمق و عمیق در خاک رس پرداختند. این پژوهش با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات، جابجایی‌های خاک را به‌صورت مستقیم مشاهده کرد و شرایط نیمه‌زهکشی را برای تقویت اثرات تعامل به کار گرفت. نتایج نشان داد که این تعامل باعث کاهش مقاومت نهایی خاک شده و مکانیسم‌هایی را که پیش‌تر نادیده گرفته شده بودند، آشکار ساخت. ژانگ و همکاران [۲۵] با ارائه دو روش ساده‌سازی بر پایه کنترل جابجایی و تنش، تأثیر حفاری‌های زیرزمینی مانند تونل‌سازی و گودبرداری عمیق را بر خطوط لوله مدفون در خاک رس بررسی کردند. این روش‌ها با استفاده از تغییر شکل و تنش آزاد خاک، آشفستگی ناشی از حفاری و نشست‌های نامتقارن را تحلیل کرده و اندرکنش خاک و سازه مدفون را ارزیابی کردند. صحت این روش‌ها با داده‌های عددی، آزمایشگاهی و میدانی تأیید شده و دقت بالایی نشان داده است.

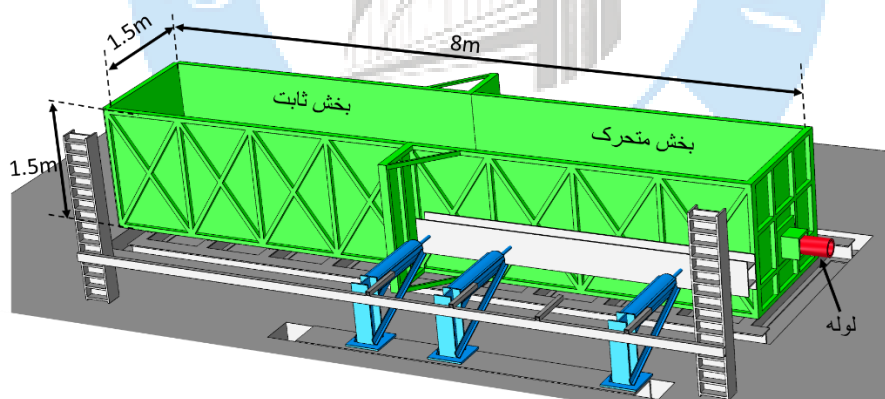
تحملی‌رودسری و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی ضوابط شکست لوله GRP^3 مدفون پرداختند. در این تحقیق رفتار لوله در شرایط بیرون از خاک تست شد. سپس با مدلسازی عددی لوله در خاک، ضوابطی برای شکست لوله ارائه گردید [۲۶]. ملاحظه شد که در مطالعات گذشته، به رفتار لوله‌های مدفون از جنس GRP در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و غیرمتراکم کمتر پرداخته شده است. همچنین، ضوابط شکست آن‌ها و اندرکنش خاک و لوله به‌طور آزمایشگاهی مورد توجه قرار نگرفته است. به همین منظور، این تحقیق به‌صورت عددی و آزمایشگاهی به تحلیل رفتار این لوله‌ها در هر دو نوع خاک ماسه‌ای پرداخته است. در واقع نوع آوری این مقاله بررسی آزمایشگاهی

³ Glass Reinforced Plastic pipe

مقیاس کامل رفتار لوله های GRP مدفون در خاک ماسه ای و محاسبه ضوابط شکست آنها تحت اثر گسل امتداد لغز است. ابتدا، مطالعات آزمایشگاهی روی لوله‌ای با قطر و ضخامت ۲۰۰ و ۴/۹ میلی‌متر در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و غیرمتراکم انجام شد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت شبه‌استاتیکی در تراز لوله اعمال شد و جابجایی مطلق لوله و نیروی اعمال شده در طول بارگذاری محاسبه گردید. سپس، مطالعات عددی برای بررسی تأثیر ضخامت و قطر لوله بر تغییر شکل و نیروی شکست آن انجام شد. برای محاسبه نیروی شکست لوله، یک معادله‌ی تقریبی بر اساس برازش منحنی و نتایج عددی ارائه گردید که محاسبات را تسهیل می‌کند. تأثیرگذارترین متغیرهای لوله، یعنی ضخامت و قطر آن، بر نیروی شکست لوله و جابجایی حداکثر آن ارزیابی شدند.

۲- چیدمان آزمایشگاهی

در این بخش، جزئیات نمونه آزمایشگاهی و ابزارهای مورد استفاده معرفی شده است. به منظور شبیه‌سازی تأثیر گسل امتداد لغز، از یک جعبه مکعبی استفاده گردید که لوله درون آن مدفون می‌شود. ابعاد جعبه به گونه‌ای تعیین شد که تأثیری بر تغییر شکل لوله نداشته باشد و با افزایش ابعاد، نتایج ثابت باقی بمانند. به همین منظور مطالعات عددی زیادی با نرم‌افزار آباکوس انجام شد که نتایج نشان داد ابعاد $1/5 \times 1/5 \times 8$ متر برای جعبه، ابعاد مناسبی به شمار می‌آید [۲۲]. از آنجایی که سختی لوله فولادی بسیار بیشتر از لوله GRP است، ابعاد انتخاب شده برای دستگاه آزمایش، برای لوله GRP نیز مناسب خواهد بود. این جعبه از هشت بخش ۱ متری ساخته شده و در آزمایشگاه تحقیقات سازه دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه نصب گردیده است. این جعبه شامل دو بخش ثابت و متحرک بود که هر دو ابعاد یکسانی دارند، در شکل ۱ جزئیات بیشتر آن نشان داده شده است. برای اینکه بخش متحرک، قابلیت حرکت داشته باشد، چرخ‌های فولادی زیر آن تعبیه شد. برای جلوگیری از حرکت بخش ثابت، متوقف کننده‌هایی در راستای طولی آن قرار داده شد، به طوری که تا انتهای بارگذاری جابجایی آن تقریباً صفر باشد. تمامی قطعات این جعبه از فولاد A36 ساخته شده و به طور محافظه‌کارانه طراحی شده‌اند تا نیروی اعمالی را تحمل کنند.



شکل ۱: تجهیزات آزمایشگاهی و ابعاد آن

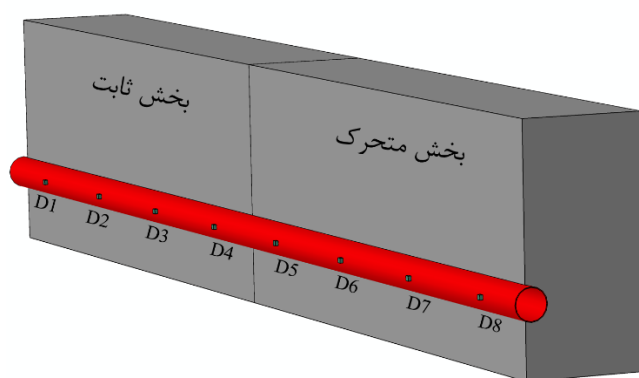
برای اعمال نیرو به بخش متحرک، از سه جک هیدرولیکی با ظرفیت کلی ۱۰۵۰ کیلونیوتن استفاده شد. کنترل جک‌ها به طور خودکار توسط دیتالاگر ۳۲ کاناله انجام می‌گرفت. هر جک به یک مبدل پتانسیومتری خطی (LPT⁴) مجهز بود و تنظیمات به گونه‌ای انجام شد که تفاوت جابجایی بین جک‌ها در هر لحظه کمتر از ۰.۵ میلی‌متر باشد. سرعت بارگذاری جک‌ها برابر ۵ میلی‌متر بر دقیقه بود که موجب شد هیچگونه ارتعاشی در نتایج مشاهده نشود، به طوری که نتایج حاصله کاملاً استاتیکی بود. به این ترتیب فقط پارامترهای استاتیکی بر

⁴ - Linear Potentiometer Transducer

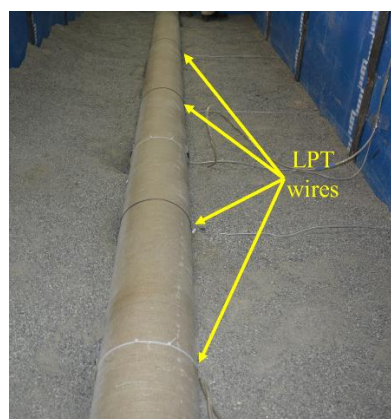
روی مدل تاثیرگذار بودند. جک‌ها در همان سطح لوله‌ی مدفون، به بخش‌های تقریباً صلب روی بدنه‌ی جعبه متصل شدند (شکل ۲-الف). هشت نقطه از لوله (در فواصل ۰/۵، ۱/۵، ... و ۷/۵ متر) نیز با سیم به LPT‌های بیرونی متصل بودند و جابجایی با دقت ۰/۲٪ در هر لحظه اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۲-ب). این نقاط به ترتیب از جهت ثابت لوله، از D1 تا D8 نام‌گذاری شدند (شکل ۲-ج). از این اطلاعات برای به دست آوردن تغییر شکل مطلق لوله و منحنی تغییر شکل آن استفاده شد. هر جک به یک سلول بار مجهز بود تا نیروی وارد شده در هر لحظه ثبت شود. بارگذاری نمونه‌ها به صورت یک جهته انجام گرفت. به طوری که نرخ اعمال جابجایی نسبت به زمان، ثابت بود. در نزدیکی گسل و در فاصله‌ی ۱ متری از آن، دو کرنش‌سنج در هر مقطع لوله نصب شد. لوله در وسط جعبه و ۴۵۰ میلی‌متر بالاتر از کف قرار داده شد که معادل عمق دفن ۱ متری بود. به منظور رعایت شرایط مرزی لوله، در هر دو انتهای آن درپوش‌هایی نصب شد؛ به طوری که برای انتهای ثابت، از جابجایی‌های طولی، عرضی و عمودی جلوگیری می‌کرد. همچنین برای طرف متحرک، جابجایی‌های عرضی و عمودی انتهای لوله محدود شد (شکل ۳-الف). برای تشخیص شکست لوله، داخل آن با آب پر شد و فشار آن در طول بارگذاری پایش گردید که فشارسنج در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همچنین یک LPT برای اندازه‌گیری جابجایی محوری انتهای متحرک لوله نصب شد. درزهای کوچک بین بخش‌های یک متری با نوارهای پلاستیکی پوشانده شدند تا از نشت خاک جلوگیری شود. در این مطالعه، دو مدل آزمایشی مورد بررسی قرار گرفتند که هر دو دارای مشخصات یکسانی برای لوله‌ها بودند و تنها تفاوت آن‌ها در نوع خاک مصرفی است. در مدل اول از خاک ماسه‌ی متراکم‌شده و در مدل دوم از خاک ماسه‌ی غیرمتراکم استفاده شد. در نهایت، شبکه‌هایی با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر بر روی سطح ماسه با استفاده از گچ ایجاد شد تا تغییر شکل سطحی ماسه پس از شکست به وضوح مشخص گردد (شکل ۳-ب).



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۲: الف) جزئیات جک‌های هیدرولیکی (ب) محل قرارگیری LPT نقاط D1 تا D8



(ب)



(الف)

شکل ۳: الف) جزئیات فشارسنج و انتهای لوله (ب) شبکه‌بندی فوقانی خاک

۲-۱ مشخصات لوله GRP

برای هر دو مدل آزمایشگاهی، قطر و ضخامت لوله GRP ثابت و به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۴/۹ میلی‌متر بود. مشخصات این لوله مطابق تحقیقات تحملی رودسری و همکاران [۲۶] می‌باشد به طوری که از یک کارخانه سازنده تهیه شده‌اند. مشخصات مصالح این لوله‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح لوله GRP [۲۶]

مقدار	مشخصه
۴/۹	ضخامت (میلی‌متر)
۲۰۰	قطر (میلی‌متر)
۰/۳	ضریب پواسون
۸۲۰۰	طول (میلی‌متر)
۱۲/۹۱	مدول ینگ (GPa)
۲۱۳۷	چگالی (kg/m^3)

۲-۲ خاکریزی مدل‌ها

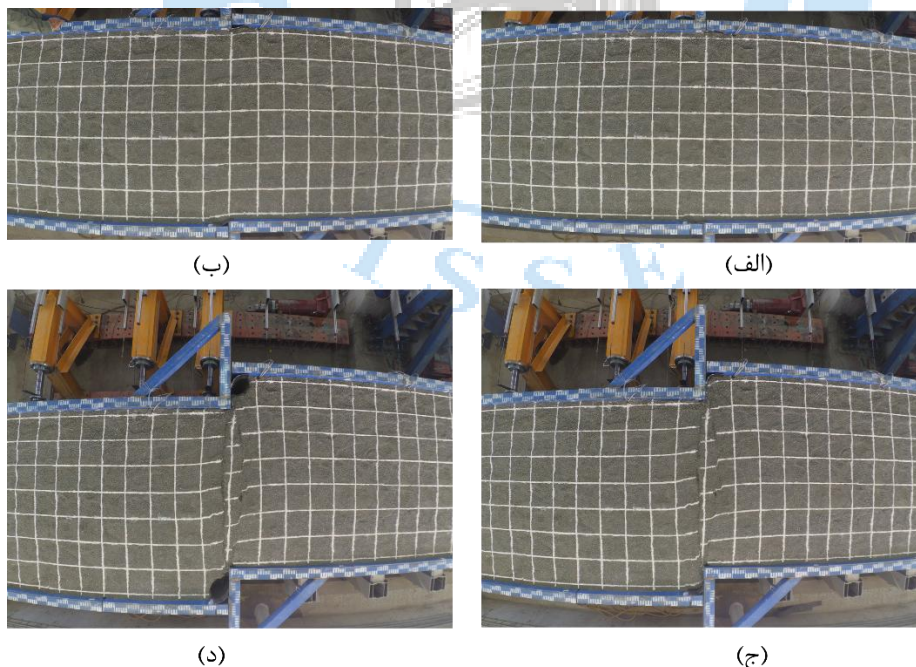
در این بخش، مراحل انجام خاکریزی برای دو مدل تشریح شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، خاک استفاده شده برای دو مدل شامل ماسه متراکم و غیر متراکم بود. در این مطالعه از ماسه اتاوا با وزن مخصوص ۱۶۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. خاکریزی زیر لوله در دو لایه با ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد و برای تراکم این لایه‌ها از کمپکتور دستی استفاده گردید، به گونه‌ای که تراکم‌سازی تا دستیابی به تراکم مطلوب ادامه یافت. پس از این مرحله، محل دقیق لوله مشخص شد و جابجایی‌سنج‌ها نیز با فاصله ۱ متر از یکدیگر تعبیه گردیدند. در ادامه، خاکریزی روی لوله به صورت لایه‌های ۲۰۰ میلی‌متر تا انتها انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای بررسی میزان تراکم هر لایه، ۳ نمونه آزمایش شده و میانگین نتایج به عنوان معیار در نظر گرفته شد. مشخصات تراکم لایه‌های ماسه متراکم و غیر متراکم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج درصد تراکم ماسه متراکم و غیر متراکم

لایه	درصد تراکم	نمونه اول		نمونه دوم		نمونه سوم		میانگین
		متراکم	غیرمتراکم	متراکم	غیرمتراکم	متراکم	غیرمتراکم	
۱	۹۳	۷۷	۹۵	۸۰	۹۳	۷۳	۹۴	۷۶/۶
۲	۸۶	۸۰	۹۰	۸۳	۸۲	۷۶	۸۶	۷۹/۶
۳	۸۱	۸۳	۸۷	۷۸/۵	۸۸	۷۶	۸۵	۷۹/۱
۴	۹۰	۷۷	۸۸	۸۲	۹۵	۷۸	۹۱	۷۹
۵	۸۵	۷۶	۹۳	۷۰	۸۹	۷۸	۸۹	۷۴/۶
۶	۹۵	۷۶	۹۳	۶۹	۹۵	۷۲	۹۴	۷۲/۳

۳ بارگذاری و بررسی نتایج

جک‌های هیدرولیکی قابلیت اعمال جابجایی تا ۶۰۰ میلی‌متر را داشتند. بارگذاری مدل‌ها تا جایی ادامه یافت که لوله دچار گسیختگی گردد. به این ترتیب، هر سه جک به‌طور هم‌زمان و با جابجایی تقریباً یکسان به قسمت متحرک مدل نیرو وارد کردند. در هر لحظه، تغییر شکل شبکه‌های فوقانی گچی و همچنین فشار آب داخل لوله پایش شد. این کار توسط چهار دوربین انجام گرفت، به طوری که یک دوربین در بالای مدل و یک دوربین در روبروی فشارسنج قرار داشتند و پس از هر مرحله بارگذاری، عکس‌برداری انجام می‌شد. شکل ۴ تغییر شکل خاک در طول بارگذاری را در چهار حالت مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، مشخص است که تغییر شکل در مرز غسل به‌صورت کاملاً برشی و به‌صورت امتداد لغز رخ داده است.



شکل ۴: تغییر شکل خاک در جابجایی (الف) صفر (ب) ۴۲ (ج) ۱۱۲ (د) ۲۲۵ میلی‌متر

پس از گسیختگی لوله، فشار آب درون آن به شدت کاهش یافت. شکل ۵ کاهش فشار آب در داخل لوله را قبل و بعد از گسیختگی آن نشان می‌دهد. پس از گسیختگی، مشاهده می‌شود که فشار آب داخل لوله به صفر رسیده است.



(ب)

(الف)

شکل ۵: فشار داخل لوله (الف) قبل و (ب) بعد از گسیختگی لوله

پس از بارگذاری و خارج نمودن ماسه از دستگاه، شکست لوله به صورت شکل ۶ حاصل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود گسیختگی در دو مقطع از لوله و در طرفین امتداد لغزش رخ داده است.

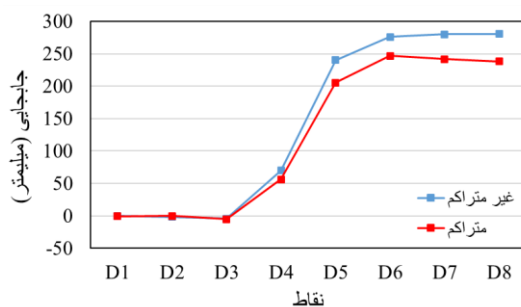


(ب)

(الف)

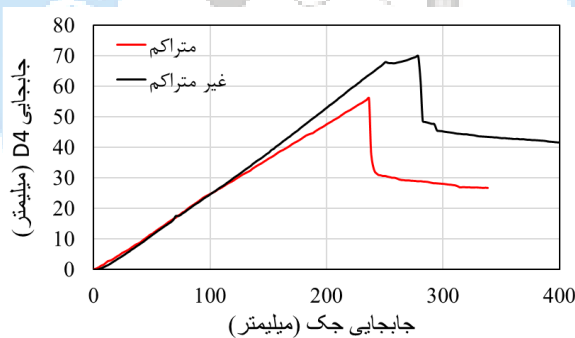
شکل ۶: گسیختگی لوله (الف) در نمای نزدیک به گسل (ب) در نمای کلی

شکل ۷ جابجایی مطلق نقاط D1 تا D8 که در فواصل یک متری در طول لوله قرار دارند را نشان می‌دهد. در این شکل، نتایج هر دو مدل ماسه‌ی متراکم و ماسه‌ی غیرمتراکم در لحظه‌ی گسیختگی لوله نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در لحظه‌ی گسیختگی لوله، تغییر شکل بیشتری در ماسه‌ی غیرمتراکم رخ داده است؛ به طوری که حداکثر جابجایی لوله در ماسه‌ی غیرمتراکم برابر با ۲۸۰ میلی‌متر و در ماسه‌ی متراکم برابر با ۲۴۶ میلی‌متر بوده است. در ماسه‌ی غیرمتراکم، لوله قابلیت نفوذ بیشتری به ماسه‌ی طرفین خود داشته است و این موضوع باعث شده است که تغییر شکل بیشتری را تا لحظه‌ی گسیختگی متحمل شود.



شکل ۷: تغییر شکل مطلق لوله در لحظه شکست

در شکل ۲-ج، مشاهده شد که نزدیکترین نقطه در بخش ثابت به محل شکست لوله، نقطه D4 بود. به این ترتیب، تاریخچه جابجایی این نقطه برای هر دو مدل نسبت به جابجایی جک در شکل ۸ نشان داده شده است. پس از گسیختگی لوله، نقطه مورد نظر به دلیل تردی لوله تمایل به بازگشت ناگهانی به حالت اولیه خود دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو نتایج پس از گسیختگی لوله افت قابل توجهی در لحظه شکست لوله ایجاد گردیده است. این افت جابجایی با گسیختگی لوله به صورت هم‌زمان رخ داد که در دو مدل بین ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر بود. جابجایی جک در لحظه شکست لوله در مدل با ماسه غیر متراکم برابر ۲۷۸ میلی‌متر و در مدل با ماسه غیر متراکم ۲۳۶ میلی‌متر بود. نسبت جابجایی جک به جابجایی نقطه D4 در لحظه شکست لوله، به ترتیب در ماسه متراکم و غیر متراکم برابر ۴/۲ و ۳/۹۸ حاصل گردید.



شکل ۸: تاریخچه جابجایی نقطه D4

در طول بارگذاری مدل‌ها، از آنجاکه جابجایی جک‌ها تقریباً یکسان بود، نیروی اعمالی آن‌ها نیز تقریباً برابر بود. مجموع نیروی جک‌ها در لحظه شکست به ترتیب برابر با ۲۱۳/۴۶ و ۶۵/۷۸ کیلونیوتن برای خاک ماسه متراکم و غیر متراکم به دست آمد. مشاهده می‌شود که اختلاف قابل توجهی بین این دو وجود دارد. در ماسه متراکم، چفت و بست دانه‌های ماسه به هم بیشتر است و در نتیجه اصطکاک بیشتری ایجاد می‌شود، که باعث می‌شود نیروی بیشتری برای جابجایی نیاز باشد. خلاصه نتایج حاصل از دو نمونه آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: خلاصه نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل ماسه متراکم	مدل ماسه غیر متراکم	
۲۴۶	۲۸۰	حداکثر جابجایی مطلق لوله (میلی‌متر)
۲۳۶	۲۷۸	جابجایی جک در لحظه شکست (میلی‌متر)

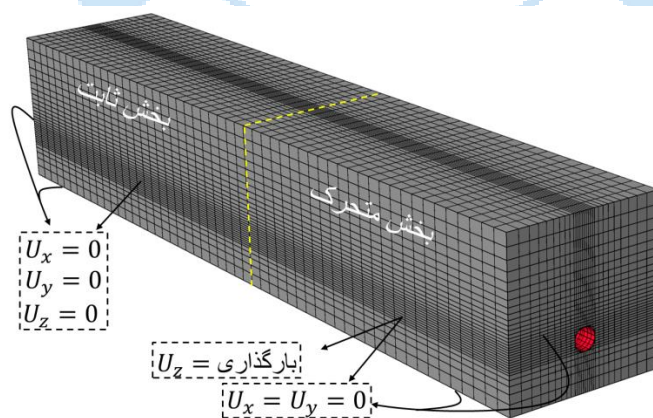
۴- مطالعات پارامتریک

در این بخش، مدل سازی و صحت سنجی مدل های اجزای محدود توصیف شده است. این مطالعه عددی، با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده و مدل ها با نرم افزار ABAQUS [۲۷] توسعه داده شده اند. تحلیل های انجام گرفته در این مطالعه به روش استاتیکی غیرخطی انجام گرفت.

۴-۱ صحت سنجی مدل عددی

در این بخش، صحت سنجی مدل عددی انجام گرفت. به این ترتیب برای مدل سازی ماسه از المان های حجمی^۵ استفاده شد. این المان ها هشت گره ای بوده و هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی است. به دلیل اینکه ضخامت لوله نسبت به دیگر ابعاد آن کمتر از یک دهم است [۲۸]، مدل سازی آن با المان صفحه^۶ انجام گرفت. برای خاک، رفتار پلاستیک بر اساس مدل موهر-کولمب [۲۹] لحاظ شده و همچنین رفتار پلاستیک فولاد با معیار فون میزز و سخت شوندهگی ایزوتروپیک در نظر گرفته شد [۳۰، ۳۱]. در شکل ۹، شرایط مرزی مدل عددی نمایش داده شده است. این شرایط مرزی بر اساس شرایط نمونه ها در آزمایشگاه تعیین شده اند؛ به طوری که در بخش متحرک، شرایط مرزی لوله در جهت اعمال نیرو آزاد در نظر گرفته شد، در حالی که درجه آزادی آن در انتهای ثابت مقید بود. در این مدل، اندرکنش میان خاک و لوله به صورت hard contact در نظر گرفته شد. تحلیل مدل به صورت شبه استاتیکی^۷ در نرم افزار آباکوس انجام شد و تحلیل به صورت کنترل-جابجایی بود، به طوری که بارگذاری تال لحظه گسیختگی ادامه یافت.

برای افزایش دقت مدل عددی و کاهش حجم محاسبات، ابعاد مش بندی خاک با توجه به فاصله از لوله متغیر در نظر گرفته شد. به طوری که در دورترین فاصله از لوله، ابعاد مش بندی برابر با ۸۰ میلی متر و در نزدیک ترین فاصله به لوله و خود لوله، ابعاد مش بندی ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد. همچنین در راستای طول مدل نیز ابعاد مش بندی برابر با ۸۰ میلی متر تعیین گردید. این ابعاد مش بندی بر اساس آنالیز حساسیت محاسبه شده است.



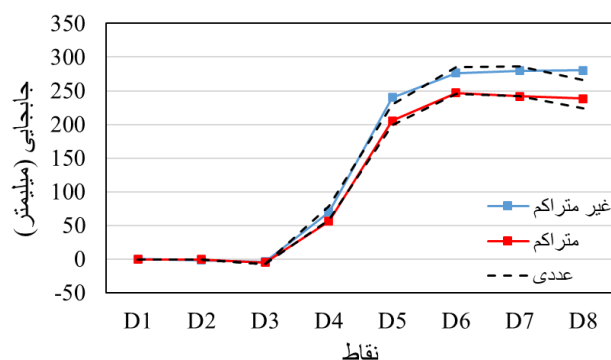
شکل ۹: مدل عددی مش بندی شده به همراه شرایط مرزی آن

⁵ -Solid

⁶ -Shell

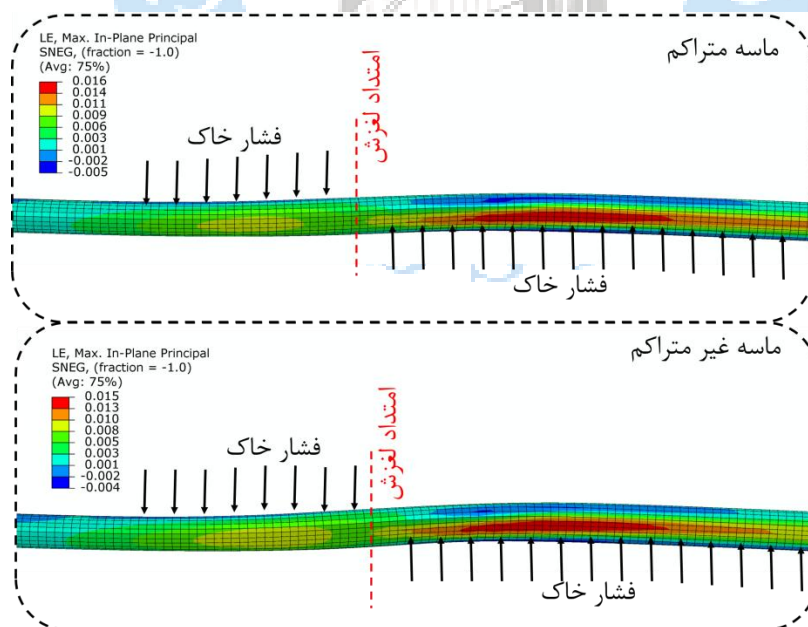
⁷ -Quasi-Static

از آنجاکه جابجایی هر سه جک تقریباً یکسان بود، در مدل عددی، بارگذاری بخش متحرک به طور یکنواخت تا لحظه شکست لوله ادامه یافت. سپس، منحنی جابجایی لوله با نتایج آزمایشگاهی در نقاط D1 تا D8 مقایسه شد. در مدل عددی، جابجایی مرکز لوله به عنوان جابجایی آن مقطع در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ مقایسه جابجایی مطلق نقاط D1 تا D8 در نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مطابقت قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. نیروی لحظه‌ای گسیختگی در مدل عددی برای ماسه متراکم و غیرمتراکم به ترتیب برابر با ۲۲۳ و ۶۶/۵ کیلونیوتن محاسبه شد که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

پس از تحلیل مدل‌ها کرنش لگاریتمی در لحظه شکست در هر دو مدل محاسبه شد که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. این نتایج مربوط به انتهای بارگذاری یعنی لحظه شکست لوله‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این لحظه، کرنش لگاریتمی (LE) حداکثر در مدل ماسه متراکم و غیرمتراکم به ترتیب برابر ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۵ محاسبه شده است. همچنین حداکثر تنش وان میسر در این مدل‌ها به ترتیب ۲۱۱ و ۲۱۷ مگاپاسگال محاسبه شد.



شکل ۱۱: نتایج کانتور LE در لحظه شکست لوله

۴-۲ معرفی و تحلیل مدل‌های عددی

در این بخش، مطالعات عددی به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار لوله انجام گرفت. هدف از این بخش، بررسی تأثیر قطر و ضخامت لوله بر تغییر شکل و نیروی شکست آن است. به این ترتیب، مدل‌های معرفی شده در جدول ۴ به عنوان مدل‌های اصلی تعریف شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس قطر لوله، ضخامت لوله و نوع ماسه انجام شده است. مدل‌ها در سه قطر و چهار ضخامت مختلف در نظر گرفته شدند، به طوری که نسبت قطر به ضخامت آن‌ها ثابت باشد. در این مدل‌ها، تحلیل به صورت جابجایی-کنترل انجام گرفت، به گونه‌ای که جابجایی تا رسیدن کرنش در مدل‌ها به ۱/۵۵٪ (کرنش میانگین در شکل ۱۱) ادامه یافت. سپس، تغییر شکل و نیروی شکست لوله محاسبه شد.

نتایج نیروی شکست حاصل از تحلیل‌های عددی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل‌های دارای ماسه غیرمتراکم، قطر و ضخامت لوله تأثیر زیادی بر نیروی شکست آن نداشته است. اما در مدل‌های با ماسه متراکم، نتایج حساسیت بیشتری نسبت به قطر و ضخامت لوله نشان داده‌اند. در مدل با ماسه متراکم، افزایش قطر و ضخامت لوله به ترتیب از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌متر و از ۲ به ۱۶ میلی‌متر باعث افزایش ۷/۸ برابری نیروی شکست شده است، در حالی که این افزایش نیرو در مدل مشابه با خاک غیرمتراکم برابر با ۱/۴۴ است.

به دلیل اهمیت این نتیجه از مدل، بر اساس برآزش منحنی، دو معادله تقریبی استخراج شد تا محاسبه آن را ساده‌تر کند. یکی از مزایای این معادله، پیوستگی نتایج آن است (برخلاف نتایج عددی) [۳۲، ۳۳]. معادلات ۱ و ۲ به ترتیب برای محاسبه نیروی شکست لوله در خاک ماسه متراکم و غیر متراکم پیشنهاد شد. لازم به ذکر است که در این معادلات ابعاد باید بر حسب میلی‌متر وارد شوند. در این معادلات d و t به ترتیب معرف قطر و ضخامت لوله می‌باشد. در آخرین ستون جدول ۴ میزان خطای نتایج معادلات پیشنهادی نسبت به مدل عددی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت قابل قبولی بین دو نتایج وجود دارد. بر اساس این معادلات، نیروی لحظه شکست نمونه‌های آزمایشگاهی برای ماسه متراکم و غیر متراکم به ترتیب برابر ۲۱۹/۵ و ۶۵/۵ کیلونیوتن حاصل می‌شود که اختلاف آن با نتایج آزمایشگاه کمتر از ۳٪ است.

$$F_d = 0.2d \times t + 0.5d - 15.6t \quad (1)$$

$$F_L = 0.0065d \times t + 7.1d^{0.4} \quad (2)$$

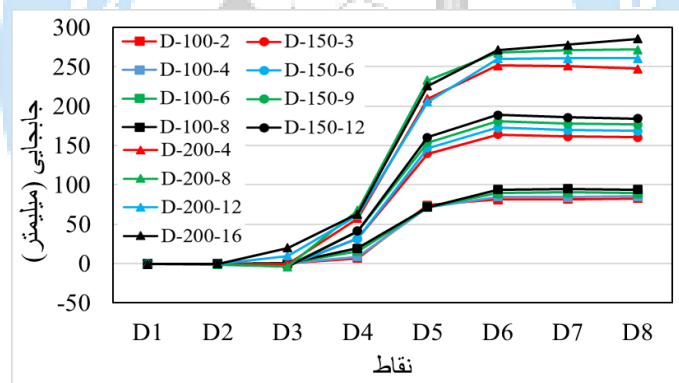
جدول ۴: معرفی مدل‌های پارامتریک

نام مدل	قطر لوله (میلی‌متر)	ضخامت لوله نسبت قطر به (میلی‌متر)	نوع ماسه	نتایج عددی نیروی شکست (کیلونیوتن)	نتایج معادلات تقریبی (کیلونیوتن) (%)	خطا
D-100-2	۱۰۰	۲	متراکم	۶۰/۷	۵۸/۸	۳/۱۳
L-100-2	۱۰۰	۲	غیر متراکم	۴۵	۴۶/۱	۲/۴۴
D-100-4	۱۰۰	۴	متراکم	۶۸/۴	۶۷/۶	۱/۱۷
L-100-4	۱۰۰	۴	غیر متراکم	۴۷/۵	۴۷/۴	۰/۲۱
D-100-6	۱۰۰	۶	متراکم	۷۵/۱	۷۶/۴	۱/۷۳
L-100-6	۱۰۰	۶	غیر متراکم	۴۹/۴	۴۸/۷	۱/۴۲
D-100-8	۱۰۰	۸	متراکم	۸۱/۸	۸۵/۲	۴/۱۶
L-100-8	۱۰۰	۸	غیر متراکم	۵۱	۵۰	۱/۹۶
D-150-3	۱۵۰	۳	متراکم	۱۲۲/۲	۱۱۸/۲	۳/۲۷
L-150-3	۱۵۰	۳	غیر متراکم	۵۵/۹	۵۵/۶۱	۰/۵۲
D-150-6	۱۵۰	۶	متراکم	۱۶۲	۱۶۱/۴	۰/۳۷
L-150-6	۱۵۰	۶	غیر متراکم	۵۹/۶	۵۸/۵۴	۱/۷۸

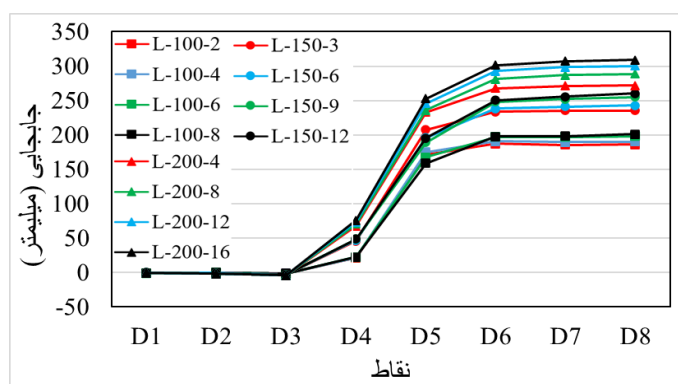
۱/۳۹	۲۰۴/۶	۲۰۱/۸	متراکم	۱۶/۶۶	۹		D-150-9
۱/۸۲	۶۱/۴۶	۶۲/۶	غیر متراکم	۱۶/۶۶	۹		L-150-9
۲/۵۷	۲۴۷/۸	۲۴۱/۶	متراکم	۱۲/۵	۱۲		D-150-12
۱/۳۹	۶۴/۳۹	۶۵/۳	غیر متراکم	۱۲/۵	۱۲		L-150-12
۲/۴۷	۱۹۷/۶	۲۰۲/۶	متراکم	۵۰	۴	۲۰۰	D-200-4
۰/۶	۶۴/۳۱	۶۴/۷	غیر متراکم	۵۰	۴		L-200-4
۰/۰۳	۲۹۵/۲	۲۹۵/۳	متراکم	۲۵	۸		D-200-8
۰/۷	۶۹/۵۱	۷۰	غیر متراکم	۲۵	۸		L-200-8
۱/۲۴	۳۹۲/۸	۳۸۸	متراکم	۱۶/۶۶	۱۲		D-200-12
۰/۱۵	۷۴/۷۱	۷۴/۶	غیر متراکم	۱۶/۶۶	۱۲		L-200-12
۲/۰۲	۴۹۰/۴	۴۸۰/۷	متراکم	۱۲/۵	۱۶		D-200-16
۱/۱۵	۷۹/۹۱	۷۹	غیر متراکم	۱۲/۵	۱۶		L-200-16

پس از تحلیل مدل‌های عددی، نتایج تغییر شکل مطلق لوله در لحظه شکست برای تمامی مدل‌ها محاسبه شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در مدل‌های با قطر لوله بیشتر، جابجایی گسل در لحظه شکست بیشتر بوده است. همچنین، افزایش ضخامت نیز موجب افزایش جابجایی مورد نیاز در لحظه شکست لوله شده است. بر اساس آیین‌نامه ASCE [۳۴]، معادله ارائه شده برای جابجایی حداکثر لوله ارتباط مستقیم با قطر آن دارد به طوری که این نتیجه در شکل ۱۲ نیز قابل مشاهده است.

پس از انجام تحلیل‌های عددی، کرنش تمامی مدل‌ها در لحظه نهایی یکسان بود، زیرا این کرنش به عنوان کرنش شکست در نظر گرفته شده و بارگذاری تا رسیدن به این مقدار ادامه یافت. در این مدل‌ها مشاهده شد که تنش حداکثر و همچنین محدوده آن در لوله برای تمامی مدل‌ها با اختلاف کمی تقریباً یکسان بود، به طوری که در محدوده شکل ۱۱ قرار داشتند.



(الف)

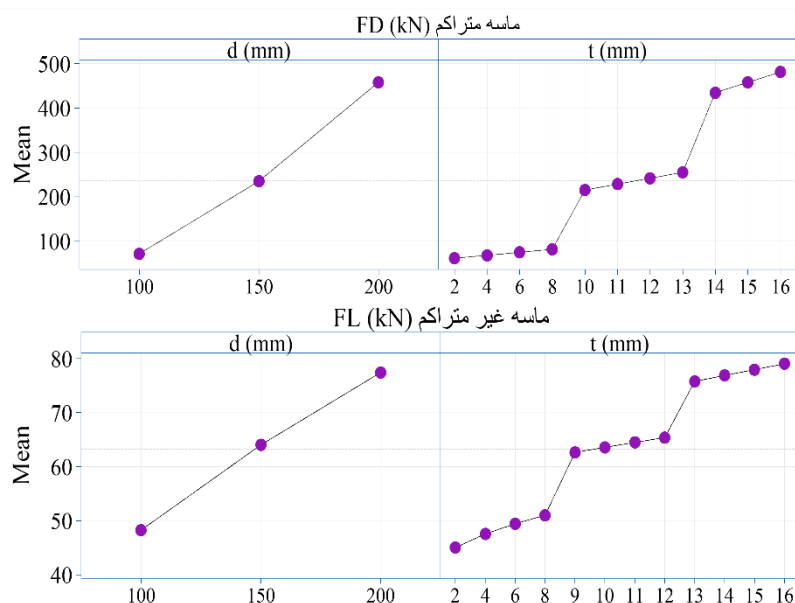


(ب)

شکل ۱۲: جابجایی مطلق لوله در لحظه شکست مربوط به مدل‌های دارای (الف) ماسه متراکم (ب) ماسه غیر متراکم

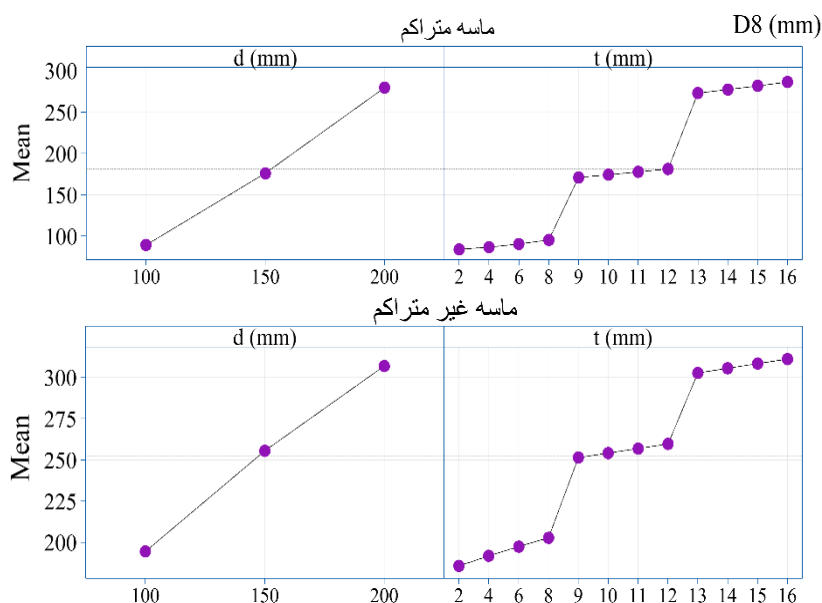
۳-۴ حساسیت نتایج به متغیرها

یکی از نکات اساسی در لوله‌های مدفون، حساسیت متغیرهایی مانند قطر و ضخامت بر نتایج آن‌ها است. دو نتیجه اصلی در این مدل‌ها، نیروی لحظه شکست و حداکثر جابجایی در لحظه شکست لوله است. در این بخش، حساسیت قطر و ضخامت لوله بر نیروی شکست و جابجایی در نقطه D8 بررسی می‌شود. در این نمودارها دو نکته مهم وجود دارد: اول، هرچه شیب خط متغیرها بیشتر باشد، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن متغیر بر نتایج است؛ دوم، اگر شیب مثبت مثلثاتی باشد، نشان می‌دهد که افزایش آن متغیر باعث افزایش نتایج خواهد شد [۳۵]. شکل ۱۳ شدت تأثیر قطر و ضخامت لوله را بر نیروی شکست لوله نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ماسه متراکم و غیرمتراکم، شیب نتایج قطر بیشتر از ضخامت است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن است. تأثیر ضخامت لوله بر نتایج مدل با خاک ماسه غیرمتراکم بیشتر از ماسه متراکم بوده است. همچنین تأثیر ضخامت در مدل‌های با ماسه غیرمتراکم بیشتر از ماسه متراکم است.



شکل ۱۳: نمودارهای شدت تأثیر متغیرها بر نیروی شکست لوله

شکل ۱۴ تأثیر قطر و ضخامت بر جابجایی نقطه D8 را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان مشاهده کرد که تأثیر ضخامت لوله در مدل با ماسه غیرمتراکم بیشتر از ماسه متراکم است. تأثیر قطر لوله در مدل‌های با ماسه متراکم و غیرمتراکم تقریباً یکسان است. در هر دو مدل، تأثیر قطر لوله بیشتر از ضخامت لوله بوده است.



شکل ۱۴: نمودارهای شدت تاثیر متغیرها برای جابجایی نقطه D8

۵- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی رفتار لوله‌های مدفون در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و غیرمتراکم در گسل‌های امتدادلغز پرداخت. در ابتدا، دو نمونه آزمایشگاهی شامل یک لوله GRP با قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۵ میلی‌متر در دو ماسه متراکم و غیرمتراکم تحت بار شبه‌استاتیکی بررسی شد. پس از بارگذاری این نمونه‌ها توسط سه جک هیدرولیکی، جابجایی مطلق لوله و نیروی وارده محاسبه شد. ادامه تحلیل مدل‌ها به صورت عددی و با هدف محاسبه تأثیر قطر و ضخامت لوله بر نیروی شکست لوله و تغییر شکل مطلق آن انجام گرفت. این تحلیل‌ها با استفاده از مدل صحت‌سنجی شده انجام شدند. پس از محاسبه نیروی شکست لوله برای ابعاد مختلف لوله، یک معادله تقریبی بر اساس برازش منحنی ارائه شد که طبق آن می‌توان با داشتن قطر و ضخامت لوله، نیروی شکست آن را تخمین زد. در نهایت، تأثیرگذارترین متغیرهای لوله بر نیروی شکست و جابجایی حداکثر آن ارزیابی شد. خلاصه نتایج این تحقیق در بندهای زیر ارائه شده است:

- ۱- نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی شکل ۷ نشان داد که جابجایی مطلق لوله در لحظه شکست در ماسه غیرمتراکم بیشتر از ماسه متراکم است. نیروی شکست لوله در ماسه متراکم ۳/۲۴ برابر نیروی شکست لوله در ماسه غیرمتراکم بود. نتایج شکل ۸ نشان داد جابجایی جک نسبت به جابجایی نقطه D4 در لحظه شکست لوله، به ترتیب در ماسه متراکم و غیرمتراکم برابر با ۴/۲ و ۳/۹۸ به دست آمد.
- ۲- نقاط شکست لوله در شکل ۶ در نمونه آزمایشگاهی در دو طرف امتداد لغزش و در فاصله‌ای کمتر از نیم‌متر از آن قرار داشتند. این نواحی در مدل عددی حداکثر کرنش را تجربه کردند که مقدار آن ۱/۵۵٪ محاسبه شد. این میزان کرنش، معیار قابل قبولی برای شکست لوله به شمار می‌رود.
- ۳- نتایج مدل‌های عددی در جدول ۴ نشان داد که افزایش قطر و ضخامت لوله باعث افزایش نیروی شکست می‌شود. این افزایش در خاک‌های متراکم بیشتر از خاک‌های غیرمتراکم است، به طوری که با ثابت ماندن نسبت قطر به ضخامت لوله، دو برابر شدن قطر لوله باعث شد نیروی شکست در ماسه متراکم ۴/۶۶ برابر و در ماسه غیرمتراکم ۱/۵ برابر افزایش یابد. معادلات ۱ و ۲ برای محاسبه این نیرو، دقت قابل قبولی نسبت به نتایج عددی داشتند و می‌توان برای محاسبه ساده‌تر آن مورد استفاده قرار گیرند.

- ۴- نتایج شکل ۱۲ نشان داد تغییر شکل لوله در لحظه شکست در ماسه غیرمتراکم بیشتر از ماسه متراکم بود، به طوری که افزایش ضخامت و قطر لوله باعث افزایش تغییر شکل آن در لحظه شکست شد.
- ۵- یافته‌های شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در ماسه متراکم و غیرمتراکم، تأثیر قطر لوله بر جابجایی نقطه D8 بیشتر از تأثیر ضخامت لوله است. این تأثیر در مدل‌های با ماسه غیرمتراکم به وضوح بیشتر از مدل‌های با ماسه متراکم است، به طوری که ضخامت لوله در شرایط غیرمتراکم تأثیر بیشتری دارد. همچنین، در هر دو مدل، تأثیر قطر لوله تقریباً یکسان است، اما به طوری که، اثر قطر در مقایسه با ضخامت در هر دو نوع ماسه غالب می‌باشد.
- ۶- در این مطالعه، روابط و نتایج ارائه شده برای لوله‌های GRP با قطر ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر برقرار است. از این رو، نیاز به مطالعات بیشتر با استفاده از مدل‌های عددی برای تکمیل نتایج در لوله‌های با قطر بالاتر وجود دارد که توسط نویسندگان مقاله در حال انجام است.

مراجع

- [1] nekoeei, m., Sarioletlagh Fard, S., VataniOskouei, A., Azimi Nejad, A. (2020). The behavior of horizontally bent buried pipes along faults slip with numerical and experimental modelling. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 7(Special Issue 3), pp. 167-184. [10.22065/jsce.2019.148084.1657](https://doi.org/10.22065/jsce.2019.148084.1657).
- [2] Parviz, M., Aminnejad, B., Fiouz, A., Alizadeh Elizei, M.H. (2018). Numerical Modelling of the explosion effect on buried transporting water, oil and gas pipelines in different soils by ALE Method. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 5(1), pp. 88-108. [10.22065/jsce.2017.80123.1114](https://doi.org/10.22065/jsce.2017.80123.1114).
- [3] Fadaei, F., Hassani, N., Saffari, H. (2019). Soil longitudinal variation effects on seismic behavior of buried pipelines. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 6(4), pp. 23-37. [10.22065/jsce.2018.108454.1391](https://doi.org/10.22065/jsce.2018.108454.1391).
- [4] Zheng, J.Y., Zhang, B.J., Liu, P.F., Wu, L.L. (2012). Failure analysis and safety evaluation of buried pipeline due to deflection of landslide process. *Engineering Failure Analysis*. 25, pp. 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.05.011>.
- [5] Liu, W., Sun, Q., Miao, H., Li, J. (2015). Nonlinear stochastic seismic analysis of buried pipeline systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 74, pp. 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.03.017>.
- [6] Rahman, M.A., Taniyama, H. (2015). Analysis of a buried pipeline subjected to fault displacement: A DEM and FEM study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 71, pp. 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.011>.
- [7] Zhang, L., Liang, Z., Zhang, J. (2016). Mechanical Response of a Buried Pipeline to Explosion Loading. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 16(4), pp. 576-582. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0121-2>.
- [8] Chaudhuri, C.H., Choudhury, D. (2020). Buried pipeline subjected to seismic landslide: A simplified analytical solution. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 134, pp. 106155. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106155>.
- [9] Manolis, G.D., Stefanou, G., Markou, A.A. (2020). Dynamic response of buried pipelines in randomly structured soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 128, pp. 105873. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105873>.
- [10] Bruton, D., White, D., Cheuk, C., Bolton, M., Carr, M. *Pipe/Soil Interaction Behavior During Lateral Buckling, Including Large-Amplitude Cyclic Displacement Tests by the Safebuck JIP*. in *Offshore Technology Conference*. 2006.
- [11] Feng, W., Huang, R., Liu, J., Xu, X., Luo, M. (2015). Large-scale field trial to explore landslide and pipeline interaction. *Soils and Foundations*. 55(6), pp. 1466-1473. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.011>.
- [12] Zhang, W., Askarinejad, A. (2019). Behaviour of buried pipes in unstable sandy slopes. *Landslides*. 16(2), pp. 283-293. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1066-1>.

- [13] O'Rourke, T. *Critical aspects of soil-pipeline interaction for large ground deformation*. in *Proc., 1st Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities*. 1988.
- [14] Wang, L., Chen, J., Ma, T., Ma, R., Bao, Y., Fan, Z. (2024). Numerical study of leakage characteristics of hydrogen-blended natural gas in buried pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 49, pp. 1166-1179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.293>.
- [15] Darvishi, R., Lashgari, A., Jafarian, Y. (2024). Predictive models for assessment of buried pipeline response under seismic landslides in Iran. *Transportation Geotechnics*. 45, pp. 101208. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101208>.
- [16] Guo, Z., Han, J., Hesham El Naggar, M., Hou, B., Zhong, Z., Du, X. (2023). Numerical analysis of buried pipelines response to bidirectional non-uniform seismic excitation. *Computers and Geotechnics*. 159, pp. 105485. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105485>.
- [17] Zhang, D., Liu, X., Yang, Y., Shi, N., Jiang, J., Chen, P., Wu, X., Gao, H., Zhang, H. (2022). Field experiment and numerical investigation on the mechanical response of buried pipeline under traffic load. *Engineering Failure Analysis*. 142, pp. 106734. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106734>.
- [18] Chaudhuri, C.H., Choudhury, D. (2021). Semianalytical Solution for Buried Pipeline Subjected to Horizontal Transverse Ground Deformation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 12(4), pp. 04021038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000541](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000541).
- [19] Ahmadi, J., Goharrokhi, A., Nankeli, A., Rasti, R. (2019). Behaviour Verification of Gas Transfer Buried Steel Pipelines by Propagation of Seismic Waves in Soil Types. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 6(Issue 2), pp. 177-190. [10.22065/jsce.2018.99586.1338](https://doi.org/10.22065/jsce.2018.99586.1338).
- [20] Zhao, K., Jiang, N., Zhou, C., Li, H., Cai, Z., Zhu, B. (2022). Dynamic behavior and failure of buried gas pipeline considering the pipe connection form subjected to blasting seismic waves. *Thin-Walled Structures*. 170, pp. 108495. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108495>.
- [21] Zhao, N., Li, D.-Q., Gu, S.-X., Du, W. (2024). Analytical fragility relation for buried cast iron pipelines with lead-caulked joints based on machine learning algorithms. *Earthquake Spectra*. 40(1), pp. 566-583. <https://doi.org/10.1177/87552930231209195>.
- [22] Tahamouli Roudsari, M., Hosseini, M., Ashrafy, M., Azin, M., Nasimi, M., Torkaman, M., Khorsandi, A. (2022). New Method to Evaluate the Buried Pipeline– Sandy Soil Interaction Subjected to Strike Slip Faulting. *Journal of Earthquake Engineering*. 26(1), pp. 89-112. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1662343>.
- [23] Azin, M., Tahamouli Roudsari, M. (2022). Evaluation of polyethylene pipe–sandy soil interaction subjected to strike-slip faulting. *Geotechnical Research*. 10(1), pp. 19-32. <https://doi.org/10.1680/jgere.22.00010>.
- [24] Kianian, M., Shiri, H. (2021). Experimental study of trench effect on lateral failure mechanisms around the pipeline buried in clay. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 1(2), pp. 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.01.009>.
- [25] Zhang, Z., Zhang, M., Zhao, Q. (2015). A simplified analysis for deformation behavior of buried pipelines considering disturbance effects of underground excavation in soft clays. *Arabian Journal of Geosciences*. 8(10), pp. 7771-7785. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1773-4>.
- [26] Tahamouli Roudsari, M., Samet, S., Nuraie, N., Sohaei, S. (2017). Numerically Based Analysis of Buried GRP Pipelines under Earthquake Wave Propagation and Landslide Effects. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 61(2), pp. 292-299. <https://doi.org/10.3311/PPci.9339>.
- [27] Hibbitt, K., Sorensen, I, *ABAQUS/Standard user's Manual Volumes I-III and ABAQUS CAE Manual*. 2014, Version.
- [28] Cheraghi, K., Tavana, M.H., Aghayari, R. (2023). Investigating the Effect of Low-Yield Yielding Dampers on the Seismic Behavior of Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 67(3), pp. 925-935. <https://doi.org/10.3311/PPci.21804>.
- [29] Hosseini, M., Roudsari, M.T. (2015). Minimum Effective Length and Modified Criteria for Damage Evaluation of Continuous Buried Straight Steel Pipelines Subjected to Seismic Waves. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 6(4), pp. 04014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000193](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000193).

- [30] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Cheraghi, K. (2024). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of D-Shape yielding damper. *Structural Engineering and Mechanics*. 89(4), pp. 411. <https://doi.org/10.12989/sem.2024.89.4.411>.
- [31] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Analytical and numerical investigation of the cyclic behavior of angled U-shape damper. *Steel and Composite Structures*. 51(3), pp. 325-335. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.51.3.325>.
- [32] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S. (2023). Numerical and analytical investigation of U-shape dampers and its effect on steel frames. *Structures*. 55, pp. 498-509. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.037>.
- [33] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Numerical and analytical study of cyclic behavior of TADAS and the impact of axial force on its performance. *Steel and Composite Structures*. 53(2), pp. 195-208. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.53.2.195>.
- [34] Engineers, A.S.o.C., *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*. 1984,, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline.
- [35] Evans, M. (2009). Minitab manual. *University of Toronto ISBN: 0-7167-2994-6*.

