

## FEASIBILITY STUDY OF MODELING BURIED PIPELINES IN SANDY SOILS UNDER SEISMIC WAVE PROPAGATION USING GROUND DISPLACEMENT EXCITATION

Milad Rezaei<sup>1</sup>, Mohammad Sharifipour<sup>2\*</sup>, Mohammad Ashrafy<sup>3</sup>

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah

3- Researcher, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

The safety and stability of buried pipelines, as vital lifeline systems, must be ensured against hazards arising from fault displacements and seismic wave propagation through surrounding soils. Dynamic analyses of such systems are often challenged by the selection of appropriate input excitation, modeling strategy, and numerical solution methods. Despite the widespread availability of recorded accelerograms, their direct application is limited due to the negligible mass of pipelines, the uncertainty of participating mass in dynamic response, and the complex geometry of buried networks. Hence, developing a rational correlation between input displacement excitation and the resulting damage potential can be the key to a realistic seismic performance assessment of buried pipelines. In this study, a three-dimensional dynamic modeling framework was developed using Abaqus, incorporating a beam-spring system on an elastic foundation subjected to displacement-based base excitation. This approach effectively overcomes the limitations of conventional methods and enables practical large-scale and regional seismic wave propagation analyses. To validate the model, a steel pipeline with a diameter of 8 inches and wall thickness of 15.5 mm, made of API X52 steel and embedded in dense sand, was analyzed under base displacements up to 600 mm. Comparison of the 3D nonlinear model and the equivalent beam-on-elastic-foundation model with large-scale experimental data revealed deviations below 5%, demonstrating strong agreement and confirming the model's reliability. The proposed displacement-based excitation framework not only facilitates the definition of performance thresholds but also enhances understanding of the type and extent of potential damage in pipes and joints. This approach provides an effective and practical tool for seismic design, retrofit, and health monitoring of buried pipeline systems.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 11 August 2025

Revise Date: 28 October 2025

Accept Date: 19 November 2025

### Keywords:

Seismic Wave Propagation  
Soil-Pipeline Interaction  
Dynamic Analysis  
Displacement Excitation  
Finite Element Analysis

doi: 10.22065/jsce.2025.538715.3787

\*Corresponding author: Mohammad Sharifipour  
Email address: sharifipour@razi.ac.ir

## بررسی و امکان سنجی مدلسازی خطوط لوله مدفون در خاک های ماسه ای تحت تاثیر

### انتشار امواج لرزه ای با استفاده از تحریک جابجایی زمین

میلاذ رضایی<sup>۱</sup>، محمد شریفی پور<sup>۲\*</sup>، محمد اشرفی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران (نویسنده مسئول)

۲- محقق، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

#### چکیده

حفظ ایمنی و پایداری خطوط لوله مدفون به عنوان شریان های حیاتی در برابر خطرات ناشی از جابجایی مستقیم گسل و انتشار امواج لرزه ای، از الزامات اساسی در طراحی و بهره برداری شبکه های زیرزمینی است. تحلیل دینامیکی رفتار این سامانه ها همواره با چالش هایی نظیر انتخاب تحریک ورودی مناسب، روش مدلسازی و نحوه حل عددی مواجه بوده است. علیرغم فراوانی داده های شتاب نگاری، ویژگی هایی همچون جرم ناچیز لوله، نامشخص بودن جرم مؤثر در پاسخ دینامیکی و هندسه پیچیده شبکه های مدفون، استفاده عملی از این داده ها را محدود کرده است. از این رو، ایجاد رابطه ای منطقی میان میزان تحریک جابجایی ورودی در نقاط مختلف لوله و خسارات محتمل، می تواند کلید اصلی تحلیل واقع بینانه رفتار خطوط لوله در برابر امواج لرزه ای باشد. در این پژوهش با استفاده از مدلسازی دینامیکی سه بعدی در نرم افزار *Abaqus* و به کارگیری ترکیب المان های تیر و فنر بر بستر الاستیک همراه با اعمال تحریک پایه از نوع جابجایی، مشکلات روش های مرسوم برطرف شده است. این رویکرد امکان تحلیل انتشار امواج لرزه ای در مقیاس بزرگ و منطقه ای را به صورت عملیاتی فراهم می کند. به منظور ارزیابی دقت مدل، یک خط لوله فولادی با قطر ۸ اینچ و ضخامت ۱۵.۵ میلی متر از جنس فولاد *API X52* در خاک ماسه ای مترکم مدلسازی و تحت تحریک جابجایی تا ۶۰۰ میلی متر قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل سه بعدی غیرخطی و مدل تیر بر بستر فنری معادل با داده های آزمایشگاهی نشان داد که میزان انحراف کمتر از ۵ درصد بوده و تطابق مناسبی با مشاهدات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس دارد. این نتیجه علاوه بر اعتبار مدل، بیانگر قابلیت استفاده از آن در تعیین حدود عملکردی بر اساس تحریک ورودی است. در این روش، تحریک جابجایی پایه موجب درک بهتر از نوع و میزان تخریب محتمل در لوله و اتصالات شده و می تواند در طراحی لرزه ای، مقاوم سازی و پایش سلامت خطوط لوله مدفون به صورت مؤثر به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: انتشار امواج لرزه ای، اندرکنش خاک لوله مدفون، تحلیل دینامیکی، تحریک جابجایی، تحلیل المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.538715.3787	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.538715.3787	۱۴۰۵/۰۴/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۲۸	۱۴۰۴/۰۸/۲۸	۱۴۰۴/۰۸/۰۶	۱۴۰۴/۰۵/۲۰
محمد شریفی پور sharifipour@razi.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

عبور خطوط لوله مدفون از محیط‌هایی با مشخصات متفاوت و اهمیت قابل توجه در خصوص تامین سطح بالای ایمنی، تحلیل رفتار آنها را در زمره مسائل پرچالش قرار می‌دهد. بررسی آسیب‌های وارده بر خطوط لوله در زلزله‌های پیشین نشان داده است که می‌توان خرابی‌ها را به دو دسته که از جابجایی ماندگار زمین و انتشار امواج نشات می‌گیرند، تقسیم کرد. در این میان پیش‌بینی صحیح رفتار اهمیت شایانی می‌یابد که تحلیل سه بعدی اجزاء محدود خاک-لوله در این میان به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحلیل رفتار جایگاه ویژه‌ای یافته است. با این وجود تحلیل لوله و شبیه سازی خاک و لوله توسط اعضاء حجیم و پوسته‌ای دارای سختی‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی می‌باشد. به همین دلیل استفاده از عضو تیری به عنوان لوله و خاک مجاور با فنرهای گسترده در شبیه سازی‌ها پیشنهاد گردید [۱-۵]. با وجود سادگی شبیه سازی فیزیکی مسأله به روش تیر بر بستر معادل دقت و قابلیت اعتماد به نتایج آن کاملاً وابسته به عوامل متعددی می‌باشد. ماهیت رفتاری غیر همسانگرد و دانه‌ای خاک، وجود خاک‌های لایه‌ای، دقت تخمین سختی خاک و فنرها چالش‌های مهمی در مدلسازی‌ها بوده است. معمولاً به منظور ساده سازی شبیه سازی‌ها، در محاسبات غالباً مقدار متوسطی از سختی خاک در نواحی مجاور لوله بطور ثابت منظور می‌شود. علیرغم فراوانی زیاد خرابی لوله‌ها در محل گسل‌ها، در زلزله‌های بزرگ موارد متعددی از خرابی این خطوط مدفون حتی تا کیلومترها دورتر از مرکز زلزله رخ داده است و این خرابی‌ها متأثر از گسترش و انتشار امواج لرزه‌ای در محیط خاک بوده است. با توجه به اینکه خسارات وارده به لوله‌های مدفون در زلزله سن فرناندو در سال ۱۹۷۱ برجسته‌تر بود محققین را وادار به تنظیم راهنمایی در این زمینه نمود [۱]. عمده‌ی این خسارات پارگی جداره لوله و محل انشعابات، کمانش و بیضی گون شدن لوله، و کمانش تیری بودند. فراوانی این خرابی‌ها در محل‌هایی خارج از تقاطع‌ها گسلی، نشان دهنده ریسک بالای بروز مشکلات ثانویه و تلفات بیشتر در شبکه‌های مترکم بوده و باید در طرح و مهندسی شرکت‌های بهره‌بردار لحاظ گردد. تحقیقات در این زمینه با توجه به تعدد انواع مخاطرات طبیعی موجود و انواع متنوع خطوط لوله (از نظر جنس لوله، ابعاد مقطع، جنس و مشخصات بستر و محیط اطراف لوله و نوع سیال موجود در آن) گستردگی بسیاری را داشته است.

از دیرباز میزان اثرپذیری سازه‌ها و زیرساخت‌ها از انتشار امواج لرزه‌ای مورد سوال بوده است. مورگان و همکاران به بررسی اثرات موج رهسپار (منتشر شونده) زلزله بر سازه‌ها پرداختند [۶]. اما مدلسازی انتشار امواج لرزه‌ای در آن زمان با چالش‌های محاسباتی و عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه شده و عملاً در اولویت قرار نگرفت. لذا و به موازات آن تحقیقات در زمینه تعیین مشخصات فنرهای معادل خاک-لوله توسط نیومارک و همکاران آغاز گردید [۱،۲]. در روش ارائه شده توسط آنها چهار فرض ساده کننده در نظر گرفته شده است.

الف) در نظر گرفتن صرفاً اختلاف زمانی در حرکت موج در لوله

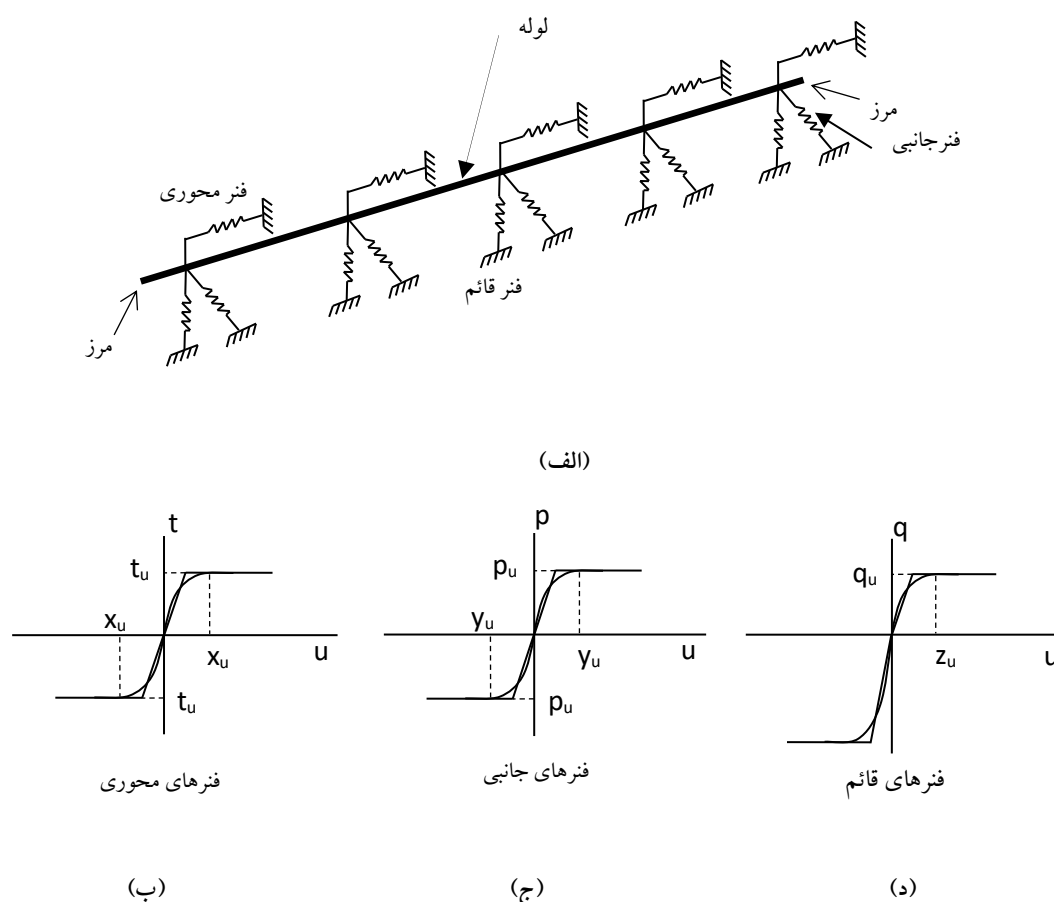
ب) ناچیز بودن جرم لوله

پ) وجود نداشتن تغییر مکان نسبی بین لوله و خاک

ت) منظور نمودن سختی محوری و صرف نظر کردن از مولفه خمشی

درواقع، آنها لوله به عنوان عضوی خمشی بدون امکان تغییر طول (عضو صلب) فرض کرده و بطور طبیعی کرنش‌ها و نیروهای بدست آمده توسط آنها به مراتب بیشتر از مقادیر واقعی تعیین شد و مقادیری برای سختی فنرهای معادل با استفاده از روابط ساده‌ی تئوری الاستیسیته توسط آنها ارائه گردید. استفاده از فنر گسترده معادل خاک بیشتر و از سال ۱۸۶۷ توسط وینکلر به عنوان روشی عمومی در شبیه سازی‌های تحلیلی ژوتوتکنیک مرسوم بوده است. طرح واره‌ای از لوله مدفون در شکل ۱-الف ارائه شده است. همچنین نمودار دوخطی پیشنهادی نیرو-جابجایی فنرهای معادل خاک نیز در اشکال ۱-ب تا ۱-د ارائه شده است. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه تحلیل اندرکنش خاک-لوله مدفون انجام شده است. هدف غالب تحقیقات انجام شده تعیین حداکثر نیروی وارده بر واحد طول لوله ناشی از اندرکنش خاک-لوله بوده است. در تحقیقات نیومن و اودیبرت و کندی [۷،۸] و ارورک و تراومن [۹-۱۱] روابطی برای تخمین نیروی وارده ناشی از جابجایی ماندگار زمین و تغییر مکان نهایی ارائه شد که در تهیه ضوابط ویژه‌ی اندرکنش خاک - لوله نقش بسزایی داشته است. نیومن و اودیبرت نیز مکانیزم خرابی و مقدار تلاش‌های ایجاد شده در لوله را بصورت تابعی از نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) منظور نمودند. متعاقباً یک مدل تحلیلی ساده برای خطوط لوله احاطه شده توسط یک محیط الاستیک بینهایت (خاک) توسط ساکورای و تاکاهاشی توسعه داده شد [۱۲]. آنها از اصلاً دالامبر در دینامیک سازه‌ها برای در نظر گرفتن نیروهای اینرسی استفاده کردند. ونگ و چنگ خطوط لوله قطعه‌ای را بصورت قطعات تیر بر بستر الاستیک و خاک اطراف لوله را با فنرهای ارتجاعی مدل نمودند. در مطالعات آنها لغزشی بین خاک و لوله در راستای محوری

منظور نشده و تغییر مکان در راستای محوری لوله فقط براساس تغییر مکان جانبی در گره‌های مجاور محاسبه گردید [۱۳]. هیندی و نوک سختی فنر معادل را با استفاده از میرایی معادل متریکال ویسکوالاستیک خطی، که مستقل از فرکانس می‌باشد، و مفهوم سختی مختلط خاک تعریف نمودند [۱۴]. آزمایش‌های بزرگ مقیاس روی لوله مدفون فولادی به قطر ۸ و ۱۲ اینچ انجام شد که در آن نیروی افزایشده بصورت استاتیکی و متقارن به دو انتهای لوله اعمال گردید. آنها تقریب دوخطی الاستیک - پلاستیک کامل را برای نمودار نیرو-جابجایی نسبی سیستم خاک - لوله ارائه نمودند. در سال ۱۹۸۴ راهنمای طرح لرزه ای سیستم خطوط نفت و گاز [۳] توسط ASCE منتشر شده و نیروی جانبی وارده بر لوله نیز به عنوان تابعی از جنس و میزان تراکم خاک، قطر لوله، و عمق دفن منظور و محاسبه شده است. همچنین تغییر مکان نسبی نهایی لوله نیز برای خاک ماسه‌ای متراکم مطابق رابطه (۲) بیان گردید. نمودار نیرو-جابجایی جانبی وارد بر لوله از طرف خاک بصورت الاستیک-پلاستیک کامل ارائه شده و رابطه (۳) نیز برای محاسبه سختی اولیه فنرهای معادل خاک ارائه گردید. در راهنمای مذکور، با فرض صلبیت لوله، از تاثیر عوامل دیگر مانند ضخامت جداره و جنس لوله در نیروی اندرکنشی نیز صرف نظر شده است.



شکل ۱- شبیه سازی لوله بصورت تیر بر بستر فنرهای معادل خاک (الف) طرح واره شبیه سازی (ب) منحنی رفتاری فنر محوری (ج) منحنی رفتاری فنر جانبی (د) منحنی رفتاری فنر قائم [۱۵]

ماواریدیس و پیتیلیاکیس [۱۶] با شبیه‌سازی لوله به عنوان یک تیر بر بستری متشکل از فنر و میراگر گسترده و با اعمال یک موج متحرک با اختلاف فاز زمانی، روش تحلیلی خود را برای بررسی انتشار امواج در طول لوله گسترش دادند. در سال ۲۰۰۱ انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE) و مرکز مدیریت شرایط اضطراری آمریکا (FEMA) راهنمای طراحی خطوط لوله فولادی مدفون ارائه نمودند [۴]. روش تحلیل و روابط ارائه شده توسط راهنمای سال ۱۹۸۴ ASCE در این راهنما نیز مورد تأیید قرار گرفت. این راهنما مقدار پارامتر بدون بعد  $N_{qh}$  را از نتایج ارائه شده توسط هنسن در سال ۱۹۶۱ [۱۷] محاسبه نمود. مطالعات دیگری به منظور شبیه‌سازی شرایط گسلش امتداد لغز

روی رفتار لوله‌های چگال پلی اتیلن انجام شد و بیانگر این بود که نیروی وارده بر واحد طول لوله پلی اتیلن به ازای نسبت  $H/D$  برابر ۶ تقریباً ۳۰۰ درصد با مقادیر ارائه شده توسط روابط راهنمای ASCE اختلاف داشته است [۱۸-۲۲]. بارزترین استفاده از مسأله انتشار امواج لرزه‌ای در تخمین تعداد خرابی محتمل در منطقه ای با شتاب تحریک معین با استفاده از نمودارهای شکنندگی بوده است. این نمودارها و توابع بصورت تئوریک و میدانی و معمولاً پس از زلزله های بزرگ ارائه شده‌اند. چن و همکاران مطالعاتی را در مورد خسارات وارده به لوله‌کشی گاز و آب در اثر زلزله چی چی در تایوان انجام دادند و روابط شکنندگی ویژه آن ساختگاه و زلزله خاص را ارائه نمودند [۲۳]. این توابع بسیار احتمالاتی بوده و تنها در ارائه تخمین مهندسی برای واحد های تعمیرات پس از رخداد زلزله کاربرد دارند. وازاروس و همکاران [۲۴] شبیه سازی اجزاء محدود را برای بررسی اثرات فشار داخلی روی کمانش لوله مدفون انجام دادند. همچنین شبیه سازی به منظور بررسی اندرکنش خاک-لوله در گسلش امتداد لغز زاویه دار به کار گرفته شده و میزان بیضی گون شدن (Ovalization) لوله بررسی گردید [۲۵]. حسینی و تحملی رودسری [۲۶] با انجام شبیه سازی مختلف لوله های مدفون و به بررسی حداقل طول لوله متأثر از گسلش و مودهای ارتعاشی سیستم خاک - لوله مدفون پرداختند. این تحقیقات می تواند امکان دخالت فرکانس تحریک و نسبت فرکانس بار وارده به مشخصات مودی سیستم را در آینده فراهم آورد. ویلازاگا و همکاران [۲۷] به ارائه مدل اجزاء محدود لوله مدفون با نقص ذاتی اولیه بصورت تیر برنولی با فرض امکان رخداد تغییر شکل بزرگ و انبساط حرارتی مدل نمودند. شیه و چانگ از بررسی ارتعاش زمین و انتشار امواج را مهمترین عامل خسارت های وارده به خطوط لوله آب را در اثر زلزله چی چی تایوان اعلام نمودند [۲۸, ۲۹]. لی و همکاران [۳۰] به بررسی رفتار لرزه‌ای خطوط مدفون گاز تحت اثر زلزله پرداختند برای این بررسی سه زلزله نورث ریچ، کوبه و زلزله مصنوعی (ACC475(EC8) انتخاب شده و بیشینه پاسخ های لوله ها انتخاب گردید و خاک بصورت فنر معادل مدلسازی شد آنها تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی را برای سیستم خاک-لوله مدفون با لوله های مستقیم و خم با زوایای مختلف انجام دادند. نمودارهای شتاب طیفی برای هر سه مولفه ی حرکت محوری، قائم و عرضی ارائه نمودند. منشی زاده نائین و حسینی نیا [۳۱] آسیب پذیری لوله های مدفون فولادی را در مواجهه با گسلش معکوس را با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود پیوسته در نرم افزار آباکوس بررسی و بیان نمودند که ظرفیت باربری خرابی به میزان قابل ملاحظه ای با کاهش عمق دفن لوله افزایش یافته است. نورزاده و همکاران [۳۲] با تحلیل عددی، آزمایشگاهی و منحنی های شکنندگی شبکه های توزیع گاز تحت اثر انتشار امواج لرزه‌ای بر روی شبکه گاز رسانی پرداختند. دایان و همکاران [۳۳] به بررسی اندرکنش محوری و جانبی خاک-لوله مدفون در خاک های ماسه‌ای پرداختند. مطالعه آنها به روش سانتریفیوژ بوده و نمونه هایی از لوله های تقریباً صلب در صفحه افق و در بستری دانه ای خشک ( ماسه ی خشک) تحت جابجایی افقی مورد آزمایش قرار گرفتند. در سال ۲۰۱۵ شی [۳۴] به مطالعه اثرات امواج لرزه‌ای بر خطوط مدفون و قطعه ای پرداخته است. بر اساس این مطالعه معادلات تحلیلی ساده‌ای برای کاربردهای مهندسی جهت تخمین کرنش حداکثری لوله و جابجایی نسبی اتصالات توسعه داده شد که می تواند در تحلیل سریع رفتار خطوط لوله در مقابل امواج لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ اشرفی و تحملی رودسری [۳۴-۱۵, ۳۶] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار خطوط لوله فولادی و پلی اتیلن تحت گسلش امتداد لغز و زمین لغزش توسط یک دستگاه شبیه‌ساز بزرگ مقیاس پرداختند. اشرفی، تحملی رودسری و همکاران [۳۶-۳۹] نرم افزار مدل اندرکنش خاک-لوله مدفون (BPSIOS) بر مبنای مدل های آباکوس طراحی نموده و داده های بانک اطلاعات را جهت تحلیل به آن ارائه داد. در ۲۰۲۲ اشرفی و همکاران، به بررسی اثرات ضخامت جداره در فنرهای اندرکنشی خاک لوله مدفون پرداختند. در آن تحقیق بانک اطلاعاتی به لوله های دارای شرایط مشابه ولی دارای ضخامت جداره متفاوت تعمیم داده شد. مدلسازی های انجام شده با استفاده از نرم افزار مذکور نشان داد که فنرهای اندرکنشی خاک-لوله فولادی بشدت متأثر از ضخامت جداره لوله نیز می باشند. بنابراین رابطه جدیدی بر اساس ضخامت جداره لوله محاسبه و ارائه شده است. مقدار سختی ثانویه نیز به منظور در نظر گرفتن سخت شوندگی به میزان یک سوم سختی اولیه فنرهای اندرکنشی خاک-لوله منظور شده است. به این جهت از این روابط خاص لوله فولادی و خاک ماسه ای در این تحقیق استفاده شده است.

صفری و همکاران در سال ۱۳۹۸ [۳۷] رفتار خطوط لوله پیوسته عبوری از دو خاک با جنس و سختی متفاوت تحت اثر یک زلزله یکسان برای شاخص های تنش و جابجایی به ازای زاویه های مختلف بین خط لوله و مرز بین دو لایه ی خاک را مورد بررسی قرار دادند که بدین منظور از نرم افزار آباکوس استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین تنش قبل از مرز و در خاک سخت تر ایجاد می شود. هم چنین با افزایش زاویه تقاطع لوله با مرز بین دو لایه، مقدار جابجایی بیشتر شده و مقدار تنش تا زاویه ۳۰ درجه افزایش و سپس کاهش می یابد.

احمدی و همکاران در سال ۱۳۹۸ [۳۸] با استفاده از نرم افزار آباکوس روشی برای محاسبه حداکثر کرنش به وجود آمده در لوله های فولادی مدفون انتقال گاز در خاک بر حسب پارامترهای محتوی انرژی زلزله ارائه نمودند.

نکویی و همکاران در سال ۱۳۹۹ [۳۹] بخشی از یک لوله مدفون با خم افقی تحت را به صورت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با نرم افزار آباکوس تحت رکورد زلزله بم مورد بررسی قرار دادند. مطالعات پارامتریک با توجه به قطر و ضخامت های مختلف لوله فولادی انجام و مقادیر کرنش محوری و پلاستیک در محل نصب کرنش سنج ها با نتایج عددی در طول لوله مقایسه شدند. نتایج نشان داد غالباً در لوله های مدفون با خم افقی، بیشترین میزان کرنش محوری، کرنش پلاستیک و تنش در لوله، در گوه ثابت خاک و در نزدیکی محل گسل رخ می دهد. همچنین آنها در سال ۲۰۱۹ [۴۰] با اعمال رکورد مصنوعی به مدل عددی ساخته شده و آزمایش انجام شده بر روی میز لرزه نشان دادند که مفصل پلاستیک و بیشترین تنش و کرنش در گوه ثابت خاک و در نزدیکی محل گسل رخ می دهد و با افزایش نسبت قطر بر ضخامت لوله محل تشکیل مفصل پلاستیک از خط گسل دور شده است.

کاشیف فورکان اوزتورک در سال ۲۰۲۵ [۴۱] با استفاده از روش المان محدود و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-لوله به بررسی پاسخهای دینامیکی لوله، به بررسی رفتار دینامیکی خطوط لوله گاز طبیعی مدفون تحت تأثیر توالی زلزله های اصلی و پس لرزه ها پرداخت. مطالعه ایشان در شرایط مختلف خاک و تحت اثر زلزله مورد بررسی مبادرت ورزید با وجود تحقیقات گسترده در زمینه اندرکنش خاک و لوله مدفون، که برخی از آنها به اختصار اشاره شده، به دلایل مختلف اعم از:

۱- عدم امکان راستی آزمایشی نتایج مدل های المان محدود با داده های آزمایشگاهی و برداشتهای میدانی.

۲- وابستگی شدید روشهای تحلیلی موجود به تحریک شتاب پایه و محتوای فرکانسی.

۳- عدم تعریف خروجی های مورد نیاز از مدل و عدم قطعیت های ناشی از آن.

۴- کمبود داده های دینامیک خاک، در مقیاس وسیع، برای انواع خاک از نمونه های صحرایی با حداقل دست خوردگی.

۵- باور جمعی جوامع مهندسی مبنی بر عدم تهدید پایداری و ایمنی خطوط لوله بر اثر انتشار امواج لرزه ای.

۶- کم توجهی به اثرات ناشی از انتشار امواج نسبت به اثرات جابجایی ماندگار بر اثر گسلش و زمین لغزش.

مسئله انتشار امواج لرزه ای کمتر مورد توجه بوده و به عنوان یک مسأله فرعی در تحلیل تنش ها و طرح خطوط لوله و شبکه های توزیع مد نظر قرار گرفته و عملاً از فرآیند طراحی خارج شده است. حال آنکه انتشار امواج علاوه بر تحریک مستمر و پیوسته در وسعت بزرگی از خطوط لوله و شبکه های توزیع، با تغییر ماهیت رفتاری خاک می تواند سبب فجایع بسیاری شده و خسارات قابل ملاحظه ای را به همراه داشته باشد. این پدیده در زلزله سال ۲۰۱۰ کرایستچرچ نیوزیلند، علیرغم منظور نمودن ضوابط طرح لرزه ای در برابر گسلش، خسارات بسیاری را به همراه داشته است [۴۲]. لذا در این تحقیق امکان سنجی و بررسی تحلیل انتشار امواج با استفاده از تحریک جابجایی پایه با ملاک قراردادن معیارهای پذیرش جابجایی، برای اعضای جابجایی کنترل سیستم خطوط لوله و شبکه های توزیع (مانند انشعابات و اتصالات و ...)، مد نظر بوده است. همچنین فارغ از محتوای فرکانسی تحریک، اعمال جابجایی به لوله می تواند معرف خوبی از حجم خرابی های محتمل در طول لوله و سطح شبکه باشد و درک بهتری به مدیران و بهره برداران دهد. به این معنی که اعمال جابجایی های بزرگ همواره با رخداد خرابی های قابل ملاحظه مترادف بوده است. حال آنکه در تحریک از جنس شتاب این موضوع فاقد قطعیت لازم می باشد. همچنین مدل های ساخته شده دارای ساختار ساده تری بوده و امکان تحلیل های وسیعتری را فراهم خواهند ساخت.

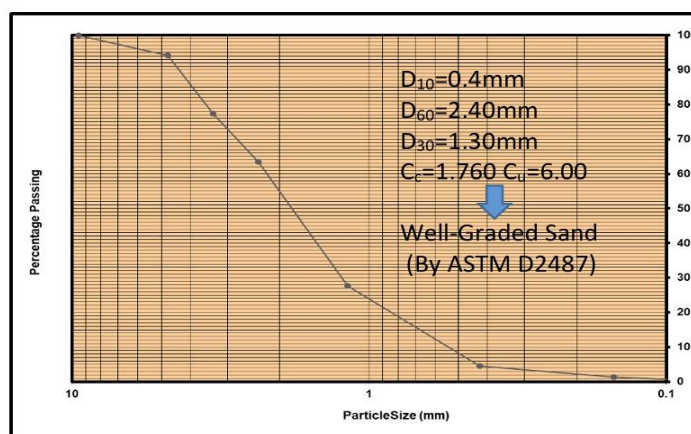
در تحقیق حاضر با توجه به اینکه جرم لوله و سیال ناچیز بوده و توزیع خواص دینامیکی سیستم در طول آن از تحریک جابجایی پایه در تحلیل اندرکنش خاک - لوله برای انتشار امواج استفاده شده است. همچنین اعمال مقدار مشخصی از جابجایی به لوله درک بهتر و مفهومی تری از میزان و نوع تخریب محتمل و مورد انتظار را در لوله و اتصالات ارائه خواهد نمود. این موضوع بطور واضح و عملیاتی برای کارکردهای طراحی، مقاوم سازی، و پایش سلامت شبکه در صنعت کاربرد خواهد داشت.

## ۲- مدلسازی

همانطور که پیشتر بیان شد هدف از پژوهش انجام شده بررسی و امکان‌سنجی تحلیل اندرکنش خاک لوله مدفون تحت اثر جابجایی انتشار یافته توسط امواج زلزله بوده است. به این منظور مدل‌های المان محدود با استفاده از المان‌های سه بعدی حجیم یک لایه (به عنوان توده خاک) و المان پوسته‌ای (به عنوان لوله) به انجام رسیده است. در این مرحله به جای تحریک متداول شتاب از پایه، جابجایی متناظر آن اعمال شده است. مدلسازی انتشار امواج بر اساس تحریک جابجایی، همچنین زمینه را برای ارتباط تحریک ورودی و معیارهای عملکردی پذیرش رفتار خطوط لوله و شبکه‌های توزیع را به همراه خواهد داشت. همچنین امکان ارتقای راهنماهای فعلی طرح خطوط لوله به آئین نامه‌های معتبر و طرح عملکردی این زیرساخت‌ها ممکن خواهد بود. با توجه به رویکرد متداول تحلیل اندرکنش خاک لوله با مدل تیر بر بستر معادل و استفاده از فنرهای معادل سیستم خاک - لوله این تحلیل هم به انجام رسیده و نتایج آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدلسازی در این پژوهش به دوشیوه انجام شده است. در رویکرد اول مدلسازی از نوع سه بعدی غیر خطی (با استفاده از اعضای حجیم و پوسته‌ای) بوده است که آثار غیر خطی رفتار مصالح و تغییرشکل‌های بزرگ در این مدلسازی قابل اعمال و بررسی بوده و اعتبار آن نیز با مدل‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس بررسی و تأیید شده است. مدلسازی در نرم افزار آباکوس و با روش دینامیکی صریح به انجام رسیده است. در رویکرد دوم، به منظور رسیدن به یک روش تحلیل ساده و قابل اعمال در پروژه‌های طرح و مقاوم‌سازی و همچنین امکان اجرای مدل‌های بزرگ و بررسی تمام یا بخشی از یک شبکه وسیع (مانند شبکه‌های شهری) مدلسازی با استفاده از فنرهای معادل سیستم اندرکنش خاک - لوله به انجام رسیده است.

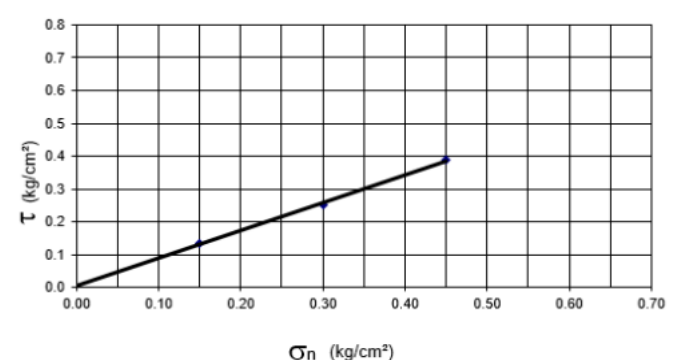
## • مدل مصالح خاک و لوله:

به منظور امکان مدلسازی اصولی ابتدا مطالعه جامعی بر روی انواع خاک‌ها به انجام رسید. با توجه به تمرکز آزمایش‌های بزرگ مقیاس توسط اشرفی و همکاران روی ماسه متراکم خوب دانه بندی شده مشخصات خاک مشابه مدنظر قرار گرفته شد. لذا خاک مورد استفاده ماسه تک لایه از استان کرمانشاه و مجاور منطقه بیلوار بوده است. با توجه به روش استاندارد شده متحد در ASTM D2487 [۴۳] بررسی شده و ماسه‌ی خوب دانه بوده است (منحنی دانه بندی متوسط در شکل ۲ ارائه شده است).



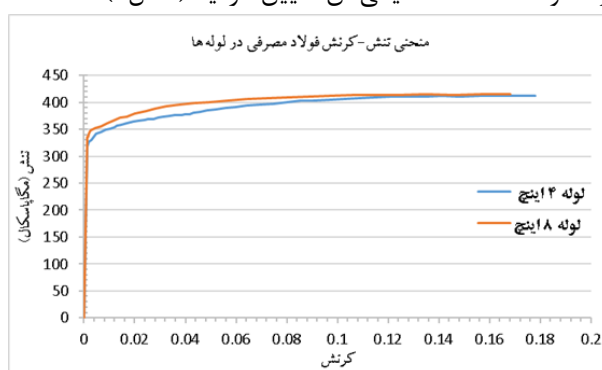
شکل ۲- منحنی دانه بندی متوسط خاک مدلسازی شده

همچنین به منظور تعیین میزان پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آزمایش برش مستقیم در تراکم مورد انتظار معادل ۸۵ درصد پروکتور اصلاح شده مطابق استاندارد ASTM D3080 [۴۴] به انجام رسید و مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر ۴۰ درجه تعیین گردید (شکل ۳). لازم به ذکر است که خاک فاقد چسبندگی بوده است.

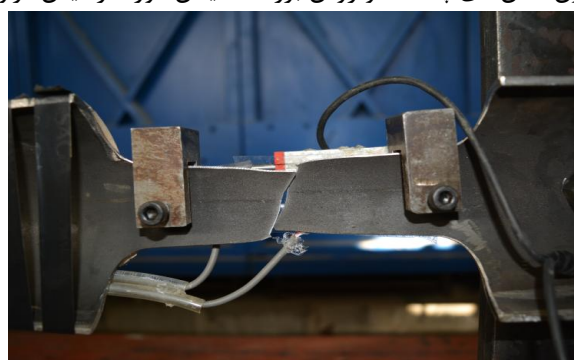


شکل ۳- نمودار تنش برشی برحسب تنش نرمال به ازای تراکم نسبی ۸۵ درصد

مصالح مورد استفاده در لوله قبلاً نیز با استفاده از دستورالعمل مصرح در استاندارد ASTM A370 [۴۵] با حفظ انحنای اولیه و بدون تنش‌های پسماند و روش بزرگ مقیاس مورد آزمایش قرار گرفته و مشخصات مکانیکی آن تعیین گردید (شکل ۴).



(ب)



(الف)

شکل ۴- آزمایش مصالح فولاد لوله (الف) نمونه در حال آزمایش (ب) منحنی تنش کرنش [۱۵]

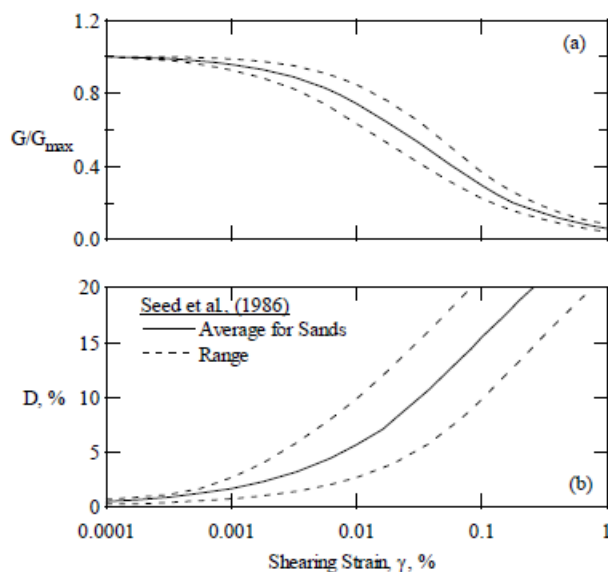
با عنایت به نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط اشرفی و همکاران مشخصات مدل المان محدود مورد صحت سنجی قرار گرفته و مدل ساخته شده با پارامترهای بدست آمده از اعتبار کافی برخوردار بوده‌اند. لذا مشخصات مدل‌های المان محدود سه بعدی مطابق جدول ۱ ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- پارامترهای راستی آزمایشی شده مدل‌های المان محدود

#### مشخصات خاک

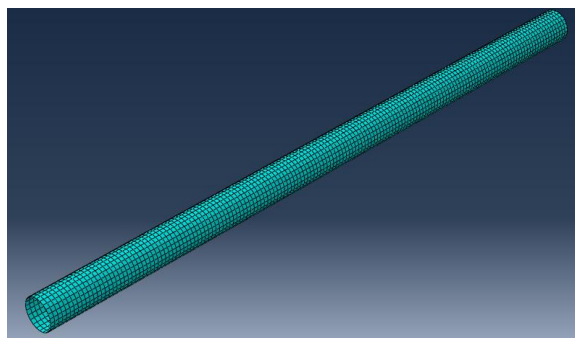
زاویه اتساع	۱۰ درجه	مدول الاستیسیته (Mpa)	۲۷۰
نسبت جریان تنش	۰/۸	نسبت پواسون ν	۰/۴
وزن مخصوص خاک ( $kN/m^3$ )	۱۹/۷۱	ضریب اصطکاک داخلی Φ	۴۰ درجه
مشخصات لایه برهم کنش بین خاک و لوله		مشخصات سخت شونده‌گی فشاری خاک	
نوع لایه برهم کنش	اتصال سخت	تنش تسلیم (kpa)	کرنش پلاستیک مطلق
مدل رفتاری	مماسی	۵۰۰۰	۰
ضریب اصطکاک	۰/۴۰	۶۰۰۰	۰/۱۰
فرمولاسیون اصطکاک	فرمولبندی پنالتی	۵۰۰۰	۰/۴۰
حداکثر بعد شبکه‌بندی خاک	۳۰۰ میلیمتر	نوع شبکه‌بندی خاک و لوله	مربعی
مشخصات لوله فولادی			
نسبت پواسون ν	۰/۳	مدول الاستیسیته (Mpa)	۲۳۳۲۶۱
حداکثر بعد شبکه‌بندی لوله	۳۰ میلیمتر	چگالی فولاد	۷۸۵۰

باتوجه به اینکه تحلیل های انجام شده در این مطالعه بصورت کاملا دینامیکی بوده است اثرات ناشی از نرخ جابجایی (سرعت) نیز بسیار حائز اهمیت بوده است. این اثرات در پارامتر میرایی مصالح خاک متبلور شده است. پژوهش های گذشته [۴۶،۴۷] بیان داشته اند که مشخصات سختی برشی و میرایی خاک وابستگی قوی ای به کرنش برشی و تغییرات آن داشته اند. لذا با استفاده از نمودارهای تجربی-آزمایشگاهی (شکل ۵) ارائه شده در مراجع فوق الذکر با داشتن مشخصات ژئوتکنیکی خاک و فرضیات منطقی برای مدول سختی و میرایی اولیه در فرآیند تحلیل دینامیکی در هر سیکل با توجه به مقدار کرنش برشی لحظه ای مقدار میرایی و مدول برشی اصلاح شده اند. این فرآیند تا حصول همگرایی مد نظر در مدل نرم افزاری ادامه یافته است.

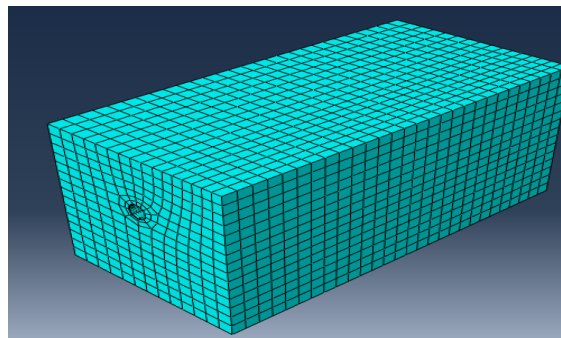


شکل ۵- منحنی تجربی - آزمایشگاهی کاهش مدول برشی نرمال شده و افزایش میرایی برای خاک ماسه ای فاقد چسبندگی [۴۶،۴۷]

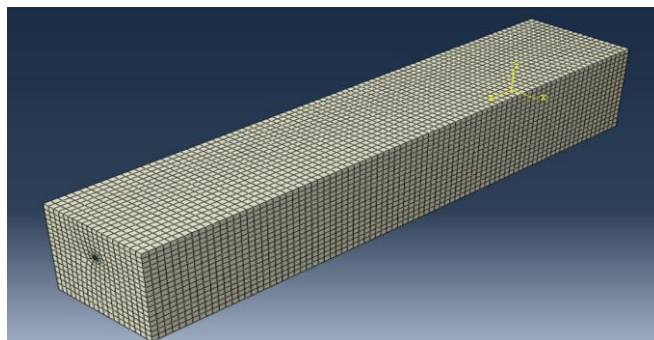
مدلسازی ها در محیط نرم افزار تحلیل المان محدود آباکوس نسخه ۲۰۲۲ به روش غیر خطی دینامیکی صریح (Dynamic/Explicit) به انجام رسیده است. در مدلسازی خاک ماسه ای یک لایه و لوله مطابق شکل ۶ ساخته و سپس روی هم مونتاژ شده اند. جابجایی با الگوی افزایشنده مشابه آزمایش مرجع ولی در تراز زیر خاک (تحتانی ترین مقطع بدون هیچ تماسی با لوله یا خاک در تراز دفن لوله) اعمال شده است. الگوی جابجایی اعمال شده به نیمی از طول لوله در شکل ۷ ارائه شده است. لایه برکنش (interface) میان خاک و لوله دارای رفتار اصطکاک مماسی (Tangential Friction) و رفتار عمود بر راستای لوله بصورت اتصال سخت (hard contact) در نرم افزار آباکوس تعریف شده است. تعریف لایه برکنش به این صورت مطابق تحقیقات پیشین مانند تحملی رودسری و حسینی [۲۶،۴۸] و اشرفی و همکاران [۳۶،۴۹-۱۵،۳۴] با رفتار خاک ماسه ای مترکم (رفتار دانه ای با اصطکاک بالا و فاقد چسبندگی) تطابق مناسبی داشته و بیانگر فیزیک مسئله نیز بوده است.



(ب)

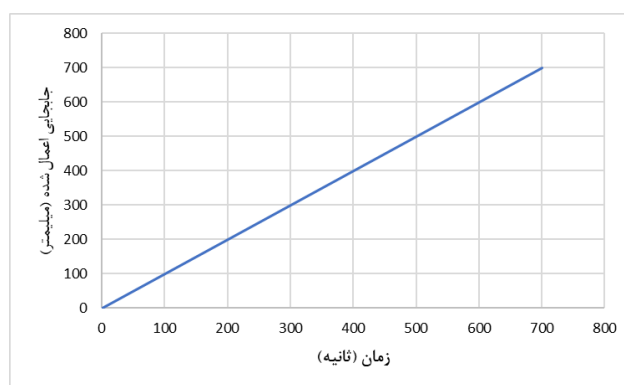


(الف)



(ج)

شکل ۶- اجزای مدل (الف) توده خاک با شبکه بندی منظم (ب) لوله (ج) مونتاژ شده



شکل ۷- الگوی جابجایی اعمال شده در آزمایش و مدل اعتبار سنجی

### ۳- بحث بر روی نتایج

به منظور اعتبار سنجی مدل ارائه شده از داده های یک نمونه پیشتر آزمایش شده توسط اشرفی و همکاران [۱۵,۳۴,۳۵] برای یک لوله ۸ اینچ فولادی استفاده گردید (شکل ۸). پیشتر توسط یک دستگاه شبیه ساز بزرگ مقیاس گسلش امتداد لغز اندرکنش خاک ماسه ای متراکم و لوله ۸ اینچ فولادی مورد آزمایش قرار گرفته است. جزئیات دستگاه آزمایش در مراجع فوق الذکر ارائه شده است. دستگاه آزمایش متشکل از باکس آزمایش به ابعاد  $۱/۵۰ \times ۱/۵۰ \times ۸$  متشکل از ۸ قطعه ماژولار بوده که در شبیه سازی یک گسل امتداد لغز به دو بخش ثابت و متحرک (هر کدام به ابعاد ۴ متر) تقسیم شده است. قسمت متحرک دستگاه توسط سه جک هیدرولیکی، به ظرفیت مجموع ۱۰۵۰ کیلونیوتن تا جابجایی هدف ۷۰۰ میلیمتر جابجا می شود. جابجایی به بدنه دستگاه اعمال شده و توده خاک و لوله تغییر مکانهای متناسب آن را از خود نشان می دهند. ۱۲ مبدل پتانسیلمتری خطی (LPT) در نقاط مختلف جابجایی دستگاه و لوله را بطور مستمر ثبت و پایش نمودند. ضمناً در شش نقطه کرنش لوله مطابق جانمایی ارائه شده در شکل ۹ بررسی و ثبت گردید.

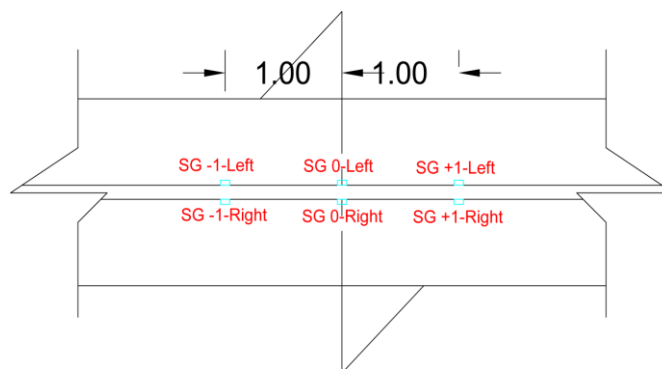


(ب)



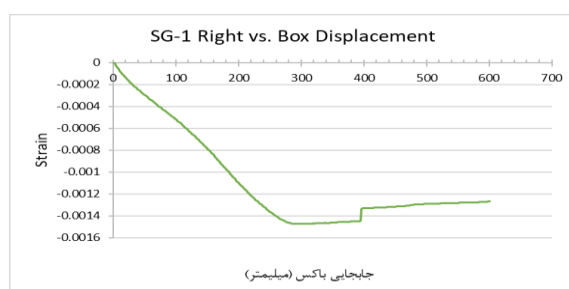
(الف)

شکل ۸- آزمایش انجام شده روی لوله فولادی ۸ اینچ (الف) قبل از شروع تست (ب) وضعیت خرابی خاک در آخرین گام جابجایی

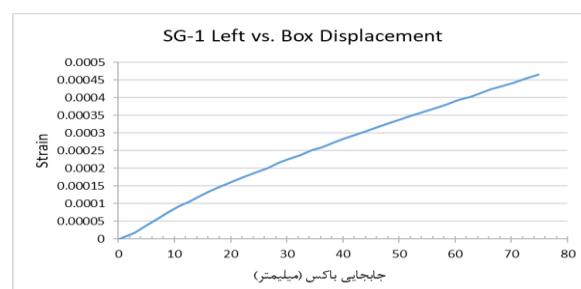


شکل ۹- کرنش سنجهای نصب شده روی لوله

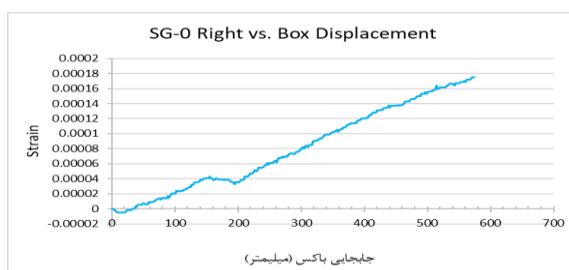
همچنین نمودار کرنش ثبت شده در نقاط مختلف نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می شود که کرنش ها در وسط لوله (صفحه جابجایی) تقریباً ناچیز بوده و نقطه عطف لوله در نزدیکی فاصله یک متری از میانه در دو طرف (به صورت پاد متقارن) قرار گرفته اند.



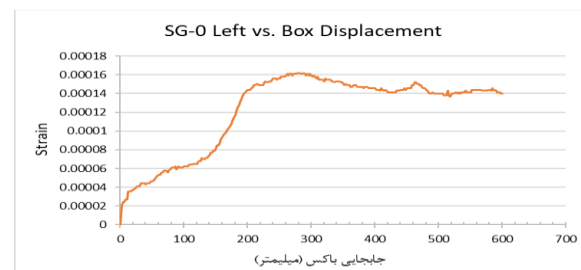
(ب)



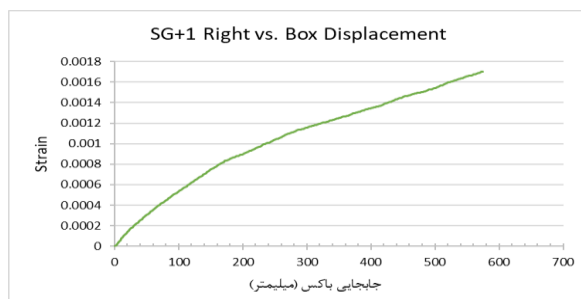
(الف)



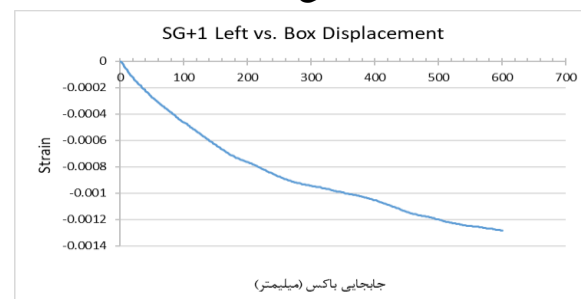
(د)



(ج)



(و)



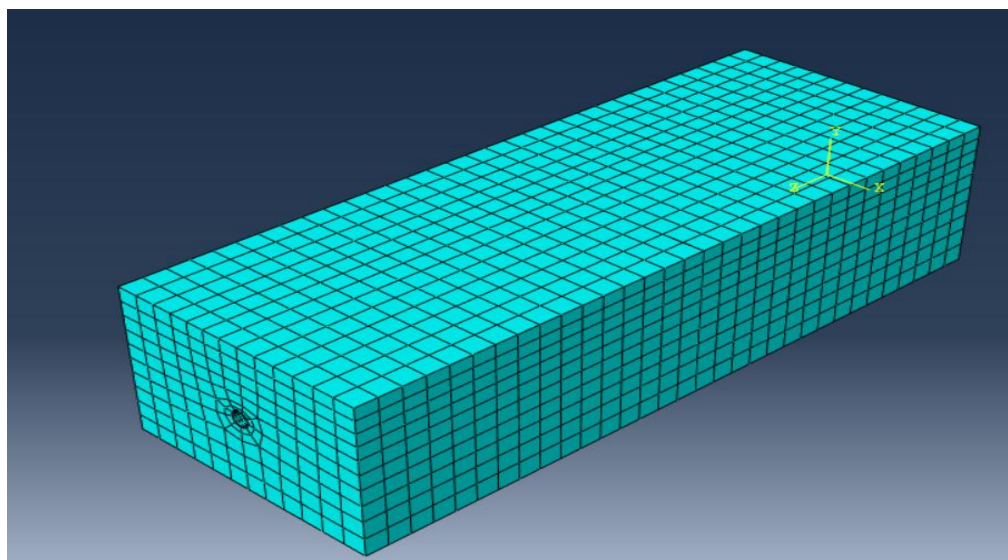
(ه)

شکل ۱۰- دیاگرام های کرنش برحسب تغییر مکان باکس در تست دوم (الف) -1Left (ب) -1Right (ج) 0Left (د) 0Right (ه) +1Left (و) +1Right (ز)

در مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار آباکوس، پیش از اعمال جابجایی پایه شتاب گرانش در یک گام بطور تدریجی به مدل اعمال شده و اثر سربار وزن خاک روی لوله نیز در محاسبات منظور شده است. بارگذاری انجام شده به میزان ۷۰۰ میلیمتر با الگوی جابجایی افزایش یافته مطابق آزمایش انجام شده بوده (شکل ۸) و تحریک به بخشی از خاک و در پایه اعمال گردید. مشخصات لوله آزمایش شده و مورد شبیه سازی شده در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که آزمایش انجام شده در یک محیط کنترل شده شبیه سازی گسلش امتداد لغز بوده و جابجایی مطابق الگوی بارگذاری مخصوص به صورت افزایش یافته در تراز لوله اعمال شده است. نتایج آزمایش با ابعاد مشابه پیشتر در حالت شبه استاتیکی راستی آزمایشی شده و نتایج آن گزارش شده است. در اینجا تعمیم روش اعمال بارگذاری به صورت جابجایی (بصورت دینامیکی و با پروتکل دلخواه) برای مدلسازی مسئله اندرکنش خاک - لوله در مواجهه با انتشار امواج لرزه‌ای مد نظر بوده و به همین دلیل ابعاد مدل اندکی بزرگتر از ابعاد آزمایش منظور شده و جابجایی نیز به صورت تحریک در پایه اعمال شد. درباره صحت سنجی داده های آزمایشگاهی با مدل کاملاً مشابه گسلش در مراجع تحمیلی رودسری و همکاران و [۳۵،۳۶] اشرفی و همکاران [۱۵،۳۴] اطلاعات بیشتری ارائه شده است. شرایط مرزی دو سر لوله نیز مطابق آزمایش انجام شده تنظیم و فرض گردید. براین اساس یک سر لوله امکان حرکت آزاد محوری را داشته و جابجایی محوری آن در زمان آزمایش / تحلیل بطور منظم پایش و ثبت شده است. در انتهای دیگر از جابجایی و دروان جلوگیری به عمل آمده است. مدل ساخته شده در شکل ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه آزمایش شده و مدل راستی آزمایشی شده

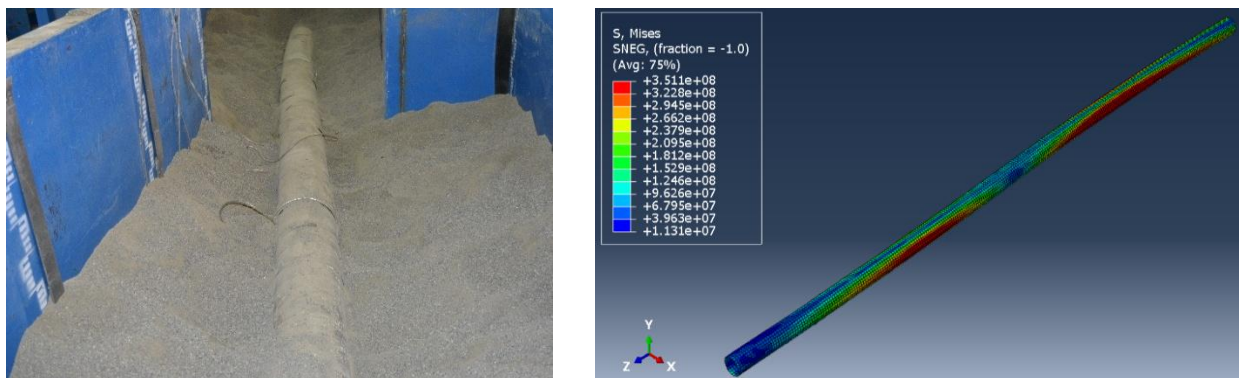
	طبقه بندی مصالح لوله	D (°)	D (mm)	H (mm)	نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D)	t (mm)	D/t	ضخامت خاک بستر (mm)	ابعاد خاک (متر)		
									طول	عرض	ارتفاع
نمونه آزمایش	API5L-X52PSLII	۸	۲۱۸/۵۰	۱۰۰۰	۴/۵۷۷	۵/۱۵	۴۲/۴۳	۳۴۰	۸	۱/۵۰	۱/۵۰
شبیه سازی								۸۹۰	۸	۳/۰	۲/۰



شکل ۱۱- مدل شبیه سازی شده لوله ۸ اینچ فولادی در خاک ماسه ای متراکم در محیط آباکوس

تحلیل المان محدود غیرخطی به روش دینامیکی صریح (Dynamic/Explicit) در محیط نرم افزار آباکوس به انجام رسید. پاسخ جابجایی لوله و کرنش لوله در نقاط مختلف با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق قابل قبولی داشته است (شکل ۱۲). همچنین در مدل ساخته شده لوله بطوری نسبتاً نرم و بدون رخ داد فاحش پدیده چروکیدگی تغییر شکل داده و از این نظر دارای رفتاری مشابه با نمونه پیشتر آزمایش شده داشته است. تغییر مکان جانبی لوله در گامهای مختلف تحلیل با مقادیر ثبت شده در آزمایش مرجع نزدیک بوده و

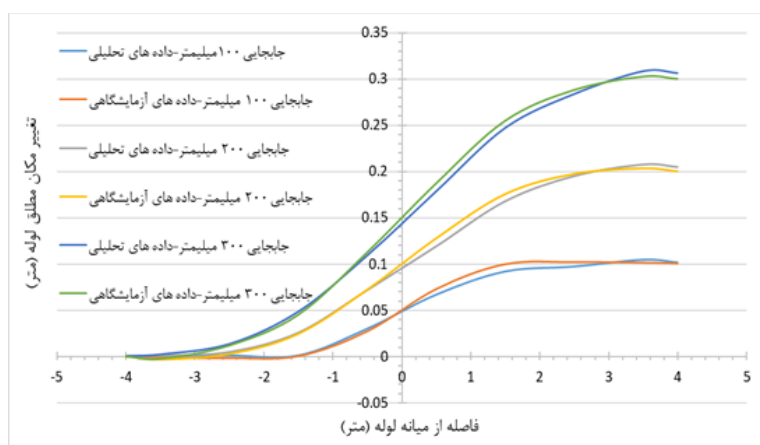
اختلاف موجود بین مدل و نمونه آزمایش شده ناچیز و قابل پذیرش می باشد (شکل ۱۳). تغییر شکل جانبی لوله به صورت میانگین تغییر مکان دو وجه مقابل لوله (چپ و راست) تعیین شده است. مقدار خطای ثبت شده در بدترین حالت زیر ۵ درصد اندازه گیری شده است.



(د)

(ج)

شکل ۱۲- وضعیت انطباق وضعیت مدل و نمونه آزمایش شده قبلی (الف) جابجایی و تنش فون مایسز رخ داده در توده خاک مدل شده در میانه اعمال جابجایی (ب) وضعیت تغییر فرم لوله در نمونه آزمایش شده [۱۵،۳۴،۳۶]



شکل ۱۳- مقایسه تغییر مکان لوله در مدل سه بعدی المان محدود و داده های آزمایشگاهی موجود

لازم به ذکر است که آزمایش انجام شده توسط اشرفی و همکاران و تحملی رودسری [۳۶-۱۵،۳۴] با هدف بررسی دقیق شرایط لوله در ناحیه تقاطع با راستای بدون زاویه یک گسل امتداد لغز بوده و نیروی وارده از جک‌ها به بدنه دستگاه اعمال شده است. همچنین ضخامت خاک زیر لوله (به دلیل اهمیت کم در شرایط باربری گسل) حدوداً ۳۰۰ میلیمتر بوده است (حدوداً یک و نیم برابر قطر لوله). حال آنکه در مدل سه بعدی غیر خطی ساخته شده در تحقیق حاضر تحریک زلزله از نوع جابجایی به تحتانی ترین قسمت مدل اعمال شده و به دلیل اهمیت خاک زیر لوله در مسأله انتشار امواج به ۸۹۰ میلیمتر (حدوداً چهار و نیم برابر قطر لوله) افزایش یافته است. تغییر ابعاد مدل نسبت به دستگاه آزمایش، علیرغم اثبات صحت نتایج و انطباق فرم تغییر شکل یافته لوله به عنوان مهمترین پاسخ سازه، با احتیاط به انجام رسیده که نسبتهای ابعادی حتی الامکان حفظ گردد.

#### • مدلسازی مسأله با مدل تیر بر بستر فنرهای معادل اندرکنش

ارائه مدل‌های ساده سازی شده و قابل در زمینه اندرکنش خاک لوله مدفون همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می باشد. در این بین به عنوان یک روش متعارف در مهندسی ژئوتکنیک از مدل‌های تیر بر بستر فنری (یا فنر و میراگر) از دیرباز مدنظر بوده است. کاربرد این روش پیشتر برای حوزه تقاطع با گسل مورد بهره برداری قرار گرفته است. با توجه به مفهومی بودن تغییر تحریک از شتاب به جابجایی پایه، امکان ارائه این مدل‌های ساده و معتبر برای تحلیل انتشار امواج و همچنین ارائه مدل عمومی اندرکنش خاک لوله وجود داشته و به عنوان یکی از

مزیت‌های استفاده از تحریک جابجایی پایه می‌توان آن را برشمرد. لذا مدل تحلیلی تیر بر بستر فنرهای معادل خاک - لوله برای مسأله تحلیل انتشار امواج لرزه‌ای بصورت ارائه شده در شکل ۱۴ توسعه یافته است. تعیین دقیق مشخصات فنرهای اندرکنشی از مهمترین چالش این روش تعیین مشخصات فنرهای اندرکنشی بوده است. باتوجه به عدم وجود مطالعه مستقل در زمینه تعیین و تدقیق مشخصات تکیه گاهی مذکور (اعم از فنر میراگر) ویژه تحلیل دینامیکی انتشارامواج در این مطالعه از داده‌های ارائه شده توسط اشرفی و همکاران [۱۵,۳۴-۳۶,۴۹] استفاده شده است. فرض مذکور در اعمال مشخصات مشابه با تحقیقات فوق الذکر به دلیل تشابه تحریک ورودی، ساختار مسأله، روش مدل‌سازی، و مصالح خاک و لوله تا حد زیادی به واقعیت نزدیک و در حدود متعارف و متداول قابل پذیرش بوده است. مشخصات سختی اولیه تکیه گاه‌های محوری و جانبی در شکل ۱۵ ارائه شده است. مشخصات فنرهای جانبی اندرکنش خاک - لوله مدفون از روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود. همچنین تغییرات سختی و میرایی نیز مانند فرآیند تحلیلهای حجیم در مشخصات تکیه گاه‌های تعریف شده اعمال گردید.

$$P_y = 55 \times \gamma \times D^{1.514} \times t^{0.718} \quad (1)$$

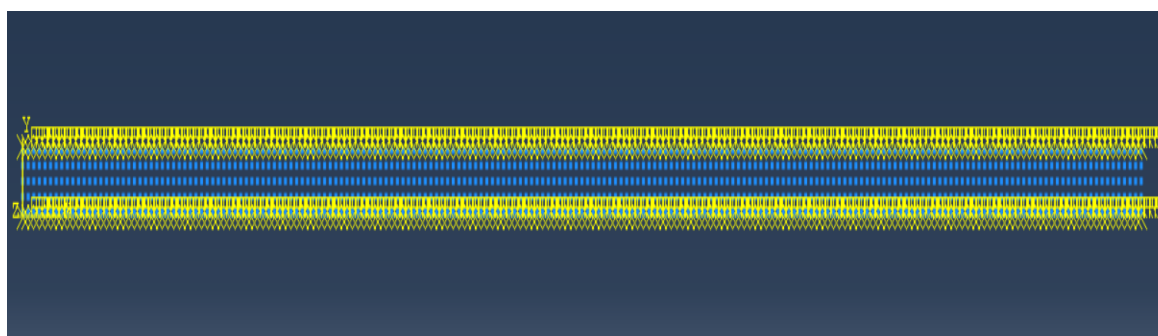
$$Y_y = -0.001346 \times D^{(-1.532)} + 0.06071 \quad (2)$$

$$K_0 = 2 \times \left(\frac{P_u}{Y_u}\right), K_1 = \left(\frac{K_0}{3}\right) \quad (3)$$

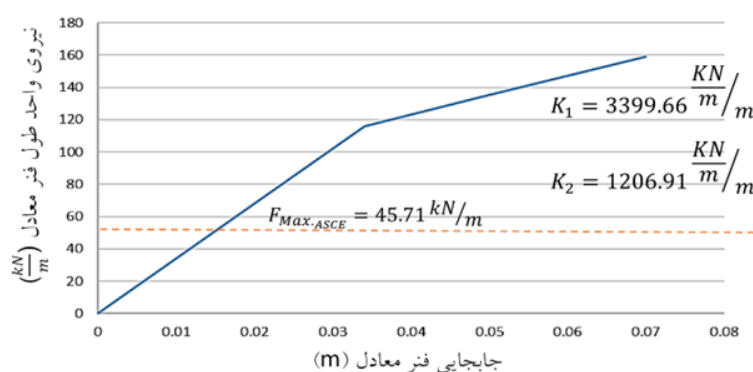
مشخصات فنرهای محوری نیز بر اساس آزمایش‌های فیزیکی انجام شده و تست‌های بیرون کشی لوله و اصطکاک جدار لوله و خاک (با در نظر گرفتن پوشش محافظ متداول لوله) بدست آمده است (روابط ۴ و ۵).

$$\begin{cases} \pi D a S_u \text{ for clay soil} \\ \frac{\pi D}{2} \gamma H (1 + k_0) \tan(\delta) \text{ for sandy soil} \end{cases} \quad (4)$$

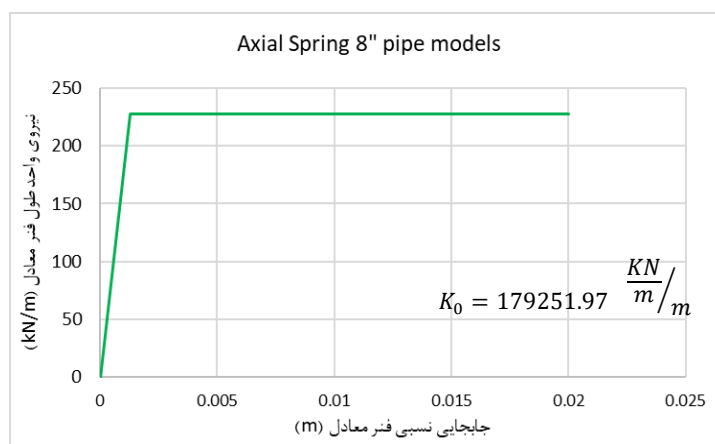
$$K_0 = \frac{t_u}{x_u} \quad (5)$$



شکل ۱۴- مدل اندرکنش خاک لوله به صورت تیر بر بستر فنرهای معادل



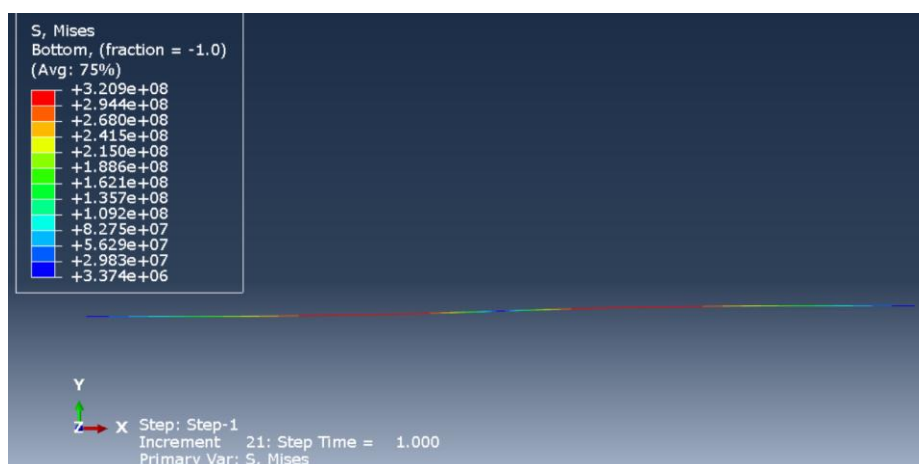
(الف)



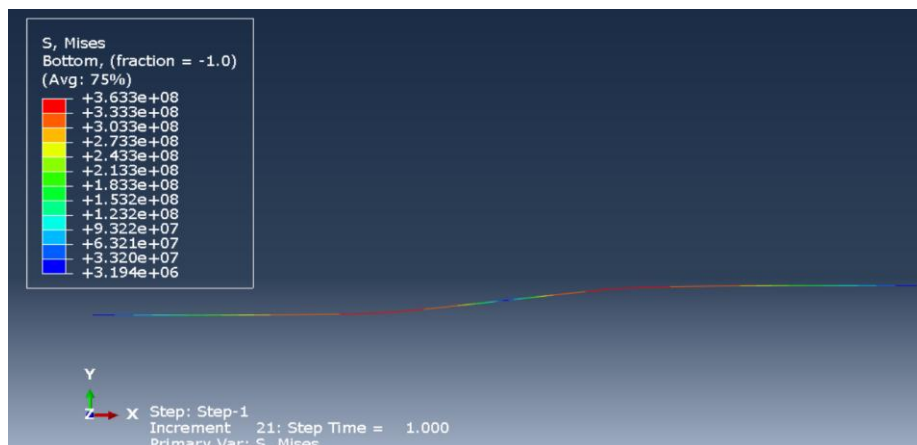
(ب)

شکل ۱۵- فنرهای اندرکنشی خاک لوله مدفون برای لوله سایز ۸ اینچ فولادی مدفون در خاک ماسه ای متراکم مطابق تحقیقات اشرفی و همکاران [۱۵،۳۴،۳۶،۴۹] (الف) فنرهای جانبی - افقی (ب) فنرهای محوری

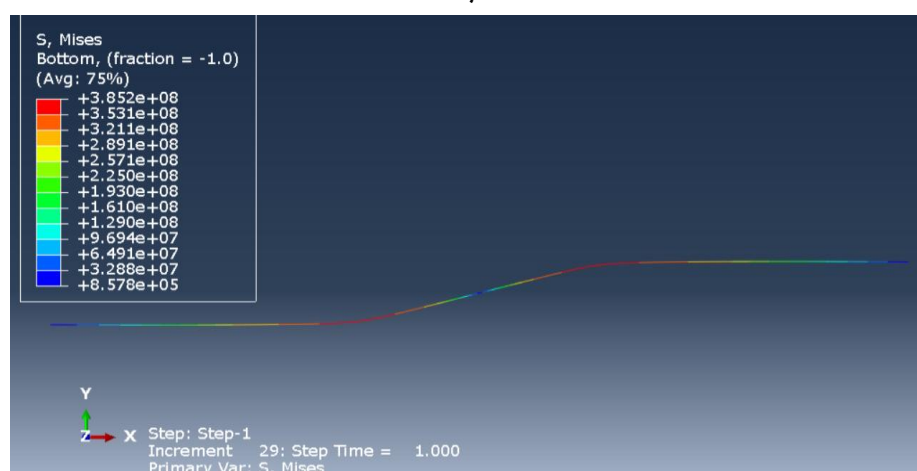
مدل لوله بصورت تیر بر بستر فنرهای اندرکنشی خاک - لوله دقیقاً مطابق مشخصات و هندسه ارائه شده در جدول ۲ ساخته و مورد تحلیل قرار گرفت. مصالح لوله از جنس فولاد بوده و نمودار تنش کرنش ارائه شده در شکل ۴-ب (برای لوله ۸ اینچ) مورد استفاده بوده است. استفاده از مدل‌های ساده سازی شده تیر، مزایای بسیاری در زمینه طراحی داشته و در صنعت خطوط لوله عملیاتی تر بوده است. همچنین مقادیر میانگین تنش‌ها، کرنش‌ها، و تغییر شکل لوله و مقدار دقیق نیروی داخلی و واکنش‌های تکیه گاهی در هر مقطع از آن در این مدل به راحتی قابل محاسبه و تعیین می‌باشد. شکل ۱۶ تغییر شکل لوله در گام‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، تسلیم لوله در مقادیر کم جابجایی اعمال شده رخ داده ولی با اعمال جابجایی‌های بزرگتر طول ناحیه تسلیم شده بیشتر شده است. تطابق نسبی جابجایی‌های ثبت شده در آزمایش با خروجی مدل تیر بر بستر فنرهای معادل در دو گام به عنوان نمونه در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



(الف)

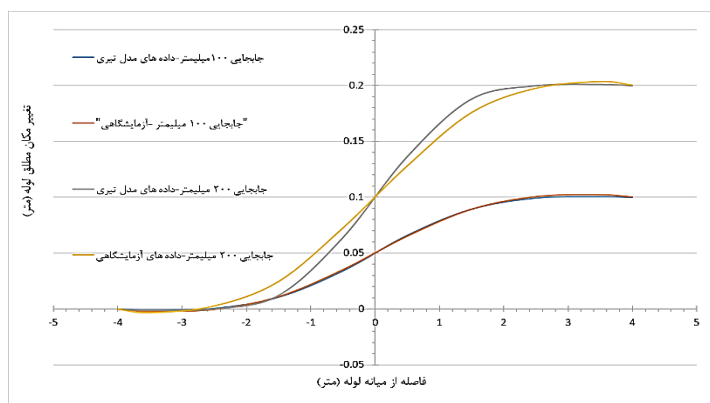


(ب)



(ج)

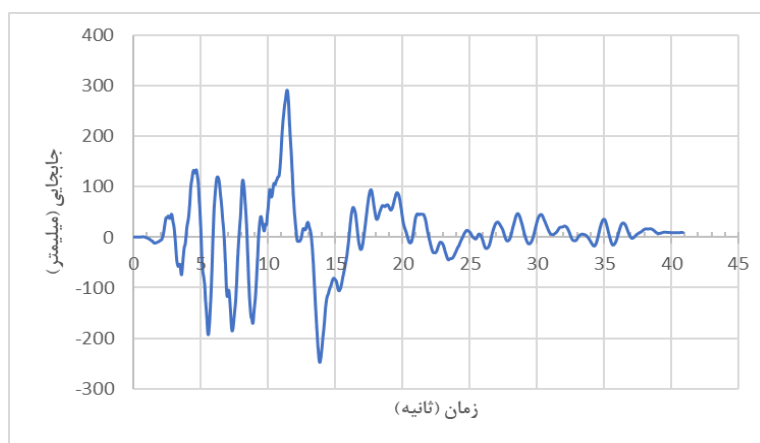
شکل ۱۶- مدل سازی لوله بر بستر فنرهای اندرکنشی خاک - لوله خروجی معیار تنشهای فون مایسنز (الف) جابجایی ۱۰۰ میلیمتر (ب) جابجایی ۳۰۰ میلیمتر (ج) جابجایی ۶۰۰ میلیمتر



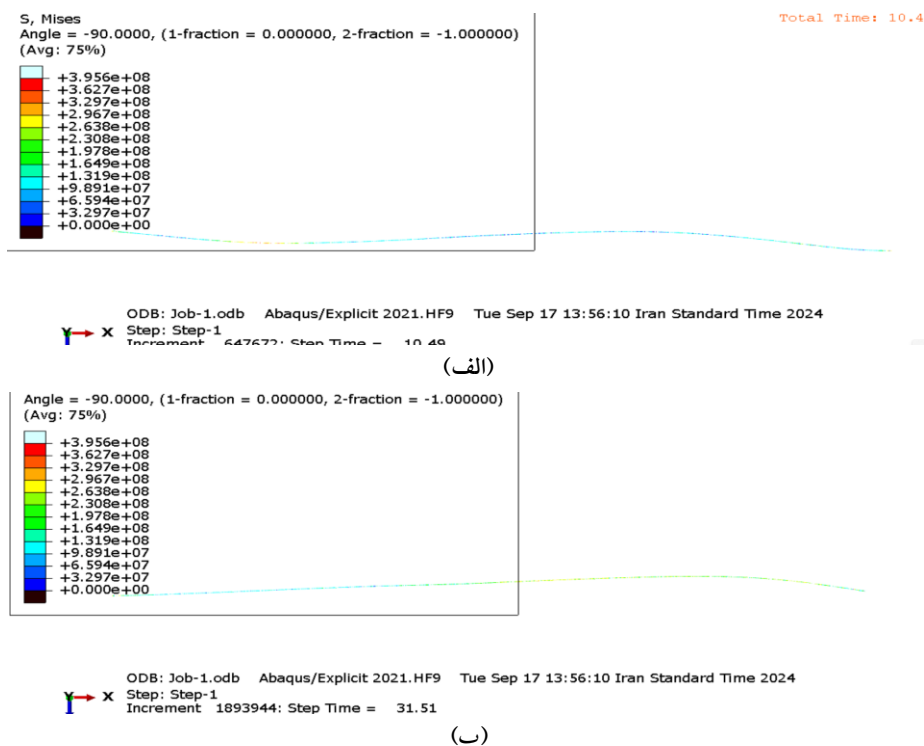
شکل ۱۷- مقایسه تغییر مکان لوله در مدل المان محدود تیر بر بستر فنرهای معادل اندرکنش خاک - لوله و داده های آزمایشگاهی موجود

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می شود، علیرغم اعمال جابجایی بصورت انتشار امواج از پایه، منحنی تغییر شکل یافته ی لوله ثبت شده در مدل تیر بر بستر فنری معادل دارای انطباق مناسبی در محدوده جابجایی های کوچک گسل داشته و در جابجایی های بزرگتر نیز دارای انحراف در محدوده قابل پذیرش بوده است. لذا اعتبار مدل سازی لوله مدفون بصورت تیر بر بستر فنری خاک در مسأله انتشار امواج و تحریک جابجایی قابل تصدیق و اعلان می باشد.

با توجه لزوم تحلیل در ابعاد بزرگتر و بررسی اثر انتشار امواج در طول لوله تحت یک رکورد جابجایی واقعی در بخش دوم مدل‌سازی، به عنوان مثال، یک لوله با استفاده از تحریک جابجایی در رکورد زلزله معروف هانشین ۱۹۹۵ (کوبه) ثبت شده در ایستگاه کوکواوا ژاپن به انجام رسیده است. دلیل انتخاب مولفه مدنظر زلزله هانشین، وجود ایستگاهی با شرایط فاصله مناسب از منبع لرزه‌ای، اجتناب از دخالت حرکت مستقیم و اثرات ناشی از نزدیکی به منبع لرزه‌ای بوده است. همچنین رکورد مورد استفاده در این مثال، در محلی بر روی خاک ماسه‌ای ثبت شده که با فرضیات ارائه شده جهت محاسبات فنرهای معادل خاک در شکل ۱۰ نیز سازگاری داشته است. تحریک ورودی جابجایی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مدل‌سازی انجام شده شامل یک لوله ۱۲ اینچ فولادی در خاک ماسه‌ای متراکم با ابعاد مقطع ۶×۶ متر (متشکل از یک لایه آبرفت) و به طول ۳۰ متر با مشخصات مدل قبلی ولی ساخته و تحت رکورد مذکور در راستای خمشی (عرضی - افقی) تحلیل گردید (مدل ارائه شده در شکل ۱۴). عمق دفن لوله به میزان دو متر از سطح رعایت شده است. همچنین پاسخ تغییر شکل لوله در دو زمان ۱۰ و ۳۱ ثانیه در شکل شماره ۱۹ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- رکورد جابجایی زلزله معروف هانشین ۱۹۹۵ در ایستگاه کوبه



شکل ۱۹- تنش فون ماسیز و تغییر فرم لوله در مدل تحت اثر رکورد جابجایی پایه زلزله کوبه ۱۹۹۵ (الف) در ثانیه ۱۰/۴۶ (ب) در ثانیه ۳۱/۵۱

انتخاب این مولفه در ایستگاه مذکور به دلیل جلوگیری از اثرگذاری حوزه نزدیک گسل و رخداد جابجایی ماندگار ناشی از گسل بوده است. بنابراین تحریک فوق کاملاً بابت اثرات انتشار امواج لرزه ای بوده و منبع دیگری در آن دخالت و مشارکت نداشته است.

#### ۴- نتیجه گیری

قرارگیری کشور ایران در ناحیه فعال لرزه ای منجر به ایجاد آسیب پذیری انواع سازه ها و زیرساخت های حیاتی بر اثر زلزله شده است. از آنجایی که خطوط لوله به عنوان بهترین و پایدارترین ابزار انتقال حامل های انرژی محسوب شده، عملکرد ایمن و بلاوقفه آنها برای توسعه و بقای جامعه ضروریست. علیرغم اینکه تلاقی خطوط لوله با امتدادهای گسلی و نواحی مستعد زمین لغزش تهدید آبی برای پایداری محسوب شده و تبعات بالایی را نیز به همراه داشته، انتشار امواج لرزه ای (در نواحی نسبتاً دورتر از ناحیه گسلش) خرابی های بی شماری در سیستم و شبکه را ایجاد نموده است. موارد فراوانی از خرابی خطوط لوله و شبکه های مدفون تا کیلومترها دورتر از مرکز زلزله ثبت شده است که خدمت دهی شبکه توزیع را مختل نموده است. انجام تحلیل های دینامیکی تحت انتشار امواج لرزه ای دارای پیچیدگی های خاصی بوده که تعیین جرم توده خاک مشارکت کننده و نحوه اعمال تحریک از مهمترین آنها می باشد. در اغلب تحلیل های لرزه ای تحریک از جنس شتاب پایه اعمال شده که برای مسأله انتشار امواج در خطوط لوله مدفون، ضمن صعوبت حل مسأله رابطه مفهومی و دقیقی بین تحریک و خرابی محتمل وجود نداشته است. در این مطالعه به بررسی و امکان سنجی مدلسازی خطوط لوله مدفون در خاک های ماسه ای تحت تاثیر انتشار امواج لرزه ای با استفاده از تحریک جابجایی زمین پرداخته شد و کارایی این روش در تحلیل اندرکنش خاک - لوله مدفون اثبات گردید. نتایج و دستاورد های تحقیق عبارت اند از:

۱- به عنوان یک راهکار جایگزین، از تحریک جابجایی پایه در مسأله تحلیل انتشار امواج لرزه ای و اثرات آن بر خطوط لوله مدفون استفاده و با موفقیت با یک مدل بزرگ مقیاس آزمایشگاهی راستی آزمایی شد. استفاده از این روش در تحریک جابجایی پایه در مدل های سه بعدی غیرخطی حجیم و مدل های تیر بر بستر فنری معادل خاک بررسی و کارایی آن مشخص گردید به نحوی که حداکثر خطای حاصله بین جابجایی لوله در مدل ارائه شده با آزمایش بزرگ مقیاس مرجع ۵٪ بوده است.

۲- مدل تیر بر بستر الاستیک ارائه شده (ترکیب فنر و میراگر) با استفاده از فنرهای با مشخصات تنظیم شده بر حسب کرنش برشی خاک قابلیت و کارایی مناسبی در مدلسازی اندرکنش خاک ماسه ای متراکم و لوله مدفون فولادی تحت انتشار امواج لرزه ای داشته که شامل انواع تحریک های جابجایی و مستقل از محتوای فرکانسی تحریک می باشد.

۳- تحقیق انجام شده نشان داد که استفاده از این رویکرد، صرف نظر از محتوای فرکانسی تحریک، میزان جابجایی اعمال شده در هر لحظه را بر روی لوله محاسبه نموده و می تواند معرف سطح خرابی قابل انتظار در نقاط مختلف خط و شبکه باشد.

۴- انطباق نتایج مدل های ساده سازی شده (شامل جابجایی، کرنش و...) با مدل های سه بعدی و تیر بر بستر معادل نشان دهنده دقت و اعتمادپذیری این روش مدلسازی بوده است (اشکال ۱۳ و ۱۷). خطای نقطه به نقطه در حدود متعارف مهندسی (حدود ۶ درصد) بوده است.

۵- بررسی تحلیل خط لوله تحت اثر رکورد حوزه دور زلزله هانشین (کوبه ۱۹۹۵)، نشان داد که روش ارائه شده برای تحلیل بر پایه جابجایی در شرایط عملیاتی و تحت رکورد دلخواه واقعی کارا بوده و قابلیت پیاده سازی مناسبی برای مسائل تحقیقاتی و عملیاتی صنعت را دارد.

#### مراجع

- [1] Newmark, N. . M., and Rosenblueth, E., 1971, *Fundamental of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Englewood.
- [2] Newmark, N. . M., and Hall, W. J., 1975, "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement," *Proceedings of U.S National Conference on Earthquake Engineering*, PEER/Niees EERC Library, Michigan, pp. 416-425.
- [3] ASCE, 1984, *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, American Society of Civil Engineers (ASCE)-Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline.
- [4] American Lifelines Alliance, 2001, *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*.
- [5] O'Rourke, M. J., and Liu, X., 1999, *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*, MCEER Monograph Series No.3. [Online]. Available: <http://mceer.eng.buffalo.edu>.

- [6] Morgan, J. R., Hall, W. J., and Newmark, N. M., 1979, *Response of Simple Structural Systems to Traveling Seismic Waves*, Department of Civil Engineering, University of Illinois. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=0wIFAQAIAAJ>.
- [7] Audibert, J. M. E., and Nyman, K. J., 1977, "Soil Restraint Against Horizontal Motion of Pipes," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103**(10), pp. 1119–1142. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000500>.
- [8] Kennedy, R. P., Williamson, R. A., and Chow, A. M., 1977, "Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline," *Transportation Engineering Journal of ASCE*, **103**(5), pp. 617–633. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000659>.
- [9] O'Rourke, T. D., and Trautmann, C. H., 1980, *Analytical Modeling of Buried Pipeline Response to Permanent Earthquake Displacements*, Cornell University, School of Civil and Environmental Engineering, Ithaca, New York. <https://doi.org/Grant Number PFR-7823096>.
- [10] Trautmann, C. H., 1983, "Behavior of Pipe in Dry Sand under Lateral and Uplift Loading," PhD Dissertation, Cornell University.
- [11] Trautmann, C. H., and O'Rourke, T. D., 1985, "Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe," *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**(9), pp. 1077–1092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:9\(1077\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1077)).
- [12] Sakurai, A., and Takahashi, T., 1969, "Dynamic Stresses of Underground Pipelines during Earthquakes," *Proc., 4th World Conf. on Earthquake Engineering*.
- [13] Wang, L. R.-L., and Cheng, K.-M., 1979, "Seismic Response Behavior of Buried Pipelines," *J Press Vessel Technol*, **101**(1), pp. 21–30. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3454594>.
- [14] Hindy, A., and Novak, M., 1979, "Earthquake Response of Underground Pipelines," *Earthq Eng Struct Dyn*, **7**(5), pp. 451–476. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290070506>.
- [15] Ashrafy, M., 2020, "Investigation and Correction of Dense Sandy Soil and Steel Buried Pipeline Interaction Equations Subjected to Strike-Slip Faulting," Islamic Azad University, Arak Branch. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31556.04480>.
- [16] Mavridis, G. A., and Pitilakis, K., 1996, "Axial and Transverse Seismic Analysis of Buried Pipelines George," *Proceedings 11th World Conference on Earthquake Engineering*, (1605), pp. 1–8.
- [17] Brinch-Hansen, J., 1961, "The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces," *Geoteknisk Instit.*, Bull.
- [18] O'Rourke, M., Gadicherla, V., and Abdoun, T., 2005, "Centrifuge Modeling of PGD Response of Buried Pipe," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4**(1), pp. 69–73. <https://doi.org/10.1007/s11803-005-0025-8>.
- [19] 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), pp. 1501–1515. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1501\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1501)).
- [20] Abdoun, T. H., Ha, D., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., and Stewart, H. E., 2009, "Factors Influencing the Behavior of Buried Pipelines Subjected to Earthquake Faulting," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(3), pp. 415–427. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.04.006>.
- [21] Xie, X., Symans, M. D., O'Rourke, M. J., Abdoun, T. H., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., and Stewart, H. E., 2013, "Numerical Modeling of Buried HDPE Pipelines Subjected to Normal Faulting: A Case Study," *Earthquake Spectra*, **29**(2), pp. 609–632. <https://doi.org/10.1193/1.4000137>.
- [22] Xie, X., Symans, M. D., O'Rourke, M. J., Abdoun, T. H., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., and Stewart, H. E., 2011, "Numerical Modeling of Buried HDPE Pipelines Subjected to Strike-Slip Faulting," *Journal of Earthquake Engineering*, **15**(8), pp. 1273–1296. <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.569052>.

- [23] Chen, W. W., Shih, B., Chen, Y.-C., Hung, J.-H., and Hwang, H. H., 2002, "Seismic Response of Natural Gas and Water Pipelines in the Ji-Ji Earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9–12), pp. 1209–1214. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00149-5).
- [24] 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), pp. 1361–1376. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.011>.
- [25] Vazouras, P., Karamanos, S. A., and Dakoulas, P., 2012, *Buried Steel Pipelines Crossing Strike-Slip Faults*, Rhodes, Greece.
- [26] Hosseini, M., and Tahamouli Roudsari, M., 2014, "Minimum Effective Length and Modified Criteria for Damage Evaluation of Continuous Buried Straight Steel Pipelines Subjected to Seismic Waves," *J Pipeline Syst Eng Pract*, **6**(4), p. 4014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000193](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000193).
- [27] Villarraga, J. A., Rodríguez, J. F., and Martínez, C., 2004, "Buried Pipe Modeling With Initial Imperfections," *J Press Vessel Technol*, **126**(2), pp. 250–257. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1688369>.
- [28] Chen, W. W., Shih, B. J., Wu, C. W., and Chen, Y. C., 2000, "Natural Gas Pipeline System Damages in the Ji-Ji Earthquake (The City of Nantou)," *Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation. Palm Springs, Riviera Resort, CA*.
- [29] Shih, B.-J., and Chang, C.-H., 2006, "Damage Survey of Water Supply Systems and Fragility Curve of PVC Water Pipelines in the Chi-Chi Taiwan Earthquake," *Natural Hazards*, **37**(1–2), pp. 71–85. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-4657-9>.
- [30] Lee, D. H., Kim, B. H., Lee, H., and Kong, J. S., 2009, "Seismic Behavior of a Buried Gas Pipeline under Earthquake Excitations," *Eng Struct*, **31**(5), pp. 1011–1023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.012>.
- [31] Monshizadeh Naeen, A., and Seyedi Hosseinia, E., 2020, "Numerical Investigation on the Deformational Behavior of Continuous Buried Pipelines Under Reverse Faulting," *Arab J Sci Eng*, **45**(10), pp. 8475–8490. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04766-2>.
- [32] Nourzadeh, D., Mortazavi, P., Ghalandarzadeh, A., Takada, S., Najma, A., and Rahimi, S., 2020, "Numerical, Experimental and Fragility Analysis of Urban Lifelines under Seismic Wave Propagation: Study on Gas Distribution Pipelines in the Greater Tehran Area," *Tunnelling and Underground Space Technology*, **106**(August), p. 103607. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103607>.
- [33] Daiyan, N., Kenny, S., Phillips, R., and Popescu, R., 2011, "Investigating Pipeline–Soil Interaction under Axial–Lateral Relative Movements in Sand," *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(11), pp. 1683–1695. <https://doi.org/10.1139/t11-061>.
- [34] Ashrafy, M., TahamouliRoudsari, M., and Hosseini, M., 2020, "A New Formulation for Establishing the Lateral Interaction Between Buried Steel Pipeline and Sandy Soil Subjected to Strike-Slip Faulting," *J Press Vessel Technol*, **142**(2). <https://doi.org/10.1115/1.4044338>.
- [35] TahamouliRoudsari, M., Ashrafy, M., and Hosseini, M., 2017, *Modification of the Buried Pipeline-Soil Interaction under Strike-Slip Faulting and Landslide and the Case Study of Kermanshah Province - Final Technical Report No. 241277 NIGC -Tech.Report-No.241277-2017*, Kermanshah. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18079.89761>.
- [36] Tahamouli Roudsari, M., Hosseini, M., Ashrafy, M., Azin, M., Nasimi, M., Torkaman, M., and 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>.

- [37] Saffari, H., Fadaei, F., and Hassani, N., 2019, "Soil Longitudinal Variation Effects on Seismic Behavior of Buried Pipelines," *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(4), pp. 23–37.
- [38] Ahmadi, J., Goharrokhi, A., Nankeli, A., and 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**(2), pp. 177–190.
- [39] Nekooei, M., Sarioletlagh Fard, S., VataniOskouei, A., and 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**(3), pp. 167–184.
- [40] Fard, S. S., Nekooei, M., Oskouei, A. V., and Aziminejad, A., 2019, "Experimental and Numerical Modeling of Horizontally-Bent Buried Pipelines Crossing Fault Slip," *Latin American Journal of Solids and Structures*, **16**(3). <https://doi.org/10.1590/1679-78255463>.
- [41] Ozturk, K. F., 2025, "Investigation of the Effects of Mainshock-Aftershock Sequences on the Dynamic Responses of Pipeline Considering Soil-Pipeline Interaction," *Tunnelling and Underground Space Technology*, **155**, p. 106231. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106231>.
- [42] O'Rourke, T. D., Jeon, S.-S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., van Ballegooy, S., and Bouziou, D., 2014, "Earthquake Response of Underground Pipeline Networks in Christchurch, NZ," *Earthquake Spectra*, **30**(1), pp. 183–204. <https://doi.org/10.1193/030413EQS062M>.
- [43] 2017, "Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)." <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.
- [44] ASTM D 3080, 2011, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained*. [https://doi.org/10.1520/D3080\\_D3080M-11](https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-11).
- [45] ASTM A370, 2016, *ASMT A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. <https://doi.org/10.1520/A0370-16>.
- [46] Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K., 1984, *Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils Report No. UCB/EERC-84/14*, Berkeley, Ca.
- [47] Darendeli, M. B., 2001, "Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves," The University of Texas at Austin.
- [48] Roudsari, M. T., Seif, M. A., and Jamshidi, K. H., 2013, "Numerical Study of Pipe-Soil Interaction Subjected to Strike-Slip Faulting," *ICPTT 2013*, pp. 695–704. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784413142.072>.
- [49] Ashrafiy, M., Zibasokhan, H., Rezaei, M., IzadPanah, M., and Aghayari, R., 2025, *The Effects of Seismic Wave Propagation in Behavior, Performance, and Safety of the Steel and HDPE Gas Pipelines and Their Connections after Major Earthquakes Report Number: 241894-REFI03*, Kermanshah.

## فهرست علائم بکاررفته

$C_c$  = ضریب انحنای خاک برای طبقه بندی خاک در روش متحد

$C_u$  = ضریب عدم یکنواختی برای طبقه بندی خاک در روش متحد

$D$  = قطر خارجی لوله (متر)

$D_{10}$  = اندازه برای دانه خاک زمانیکه ۱۰ درصد دانه ها از آن کوچکتر هستند (میلیمتر)

$D_{30}$  = اندازه برای دانه خاک زمانیکه ۳۰ درصد دانه ها از آن کوچکتر هستند (میلیمتر)

اندازه برای دانه خاک زمانیکه ۶۰ درصد دانه ها از آن کوچکتر هستند (میلیمتر) =  $D_{60}$

تنش تسلیم فولاد (مگاپاسگال) =  $F_y$

عمق دفن تا خط میانی لوله (متر) =  $H$

سختی اولیه خاک (کیلونیوتن/متر/متر) =  $K_0$

سختی معادل اولیه خاک-لوله برای واحد طول لوله (کیلونیوتن/متر/متر) =  $K_1$

سختی معادل ثانویه خاک-لوله برای واحد طول لوله (کیلونیوتن/متر/متر) =  $K_2$

عامل ظرفیت باربری (بدون بعد) =  $N_{qh}$

ظرفیت بار تسلیم خاک-لوله برای واحد طول لوله (کیلونیوتن/متر) =  $P_y$

ضخامت جداره لوله (میلیمتر) =  $t$

ظرفیت جابجایی نسبی تسلیم (متر) =  $Y_y$

زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه ای (درجه) =  $\phi$