

Experimental and numerical investigation of lateral interaction between buried polyethylene pipe and sandy soil subjected to strike-slip faulting

Milad Azin¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2*}

1- Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2- Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Buried pipelines are vital infrastructures and are mostly used to transport energy and other essential commodities. One of the most important seismic hazards on buried pipelines is movement of faults crossed by them. In general, pipeline can be simplified as a beam, while pipe-soil interaction can be represented by soil springs in the axial, horizontal and vertical direction. Although this method has been implemented previously by ASCE and ALA guidelines the specifications of these springs are not well-defined. In this study, a full-scale tests were carried out on polyethylene pipe buried in dense sandy soil (with 120.5 mm of diameter). The response of the system (such as displacements and reaction loads) were recorded during the tests. A computer program was developed to optimize the specifications of the equivalent springs using Python scripts in MATLAB and ABAQUS environments. In this way, the deformation of the pipe along its length would have the highest level of congruence with the experimental results. Using the proposed approach, the initial stiffness and maximum soil-pipe interaction force have been calculated and compared to the criteria recommended by ASCE and ALA standards. The results showed that the value of yield force capacity and stiffnesses for the soil lateral equivalent springs, provided by ASCE and ALA codes, are determined to be in a great value of error. For polyethylene pipe at the condition of strike-slip faulting, these values were too smaller than the values put forth by ASCE and ALA .

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 October 2021

Revise Date: 26 March 2022

Accept Date: 15 April 2022

Keywords:

Polyethylene pipe

Strike-slip faulting

Pipe-soil interaction

Full-scale test

Finite element analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.307292.2593>

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari.

Email address: Tahamouli@iauksh.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی اندرکنش جانبی لوله پلی اتیلن مدفون و خاک ماسه ای متراکم در شرایط گسل امتداد لغز

میلاذ آذین^۱، مهرزاد تحملی رودسری^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

خطوط لوله مدفون زیرساخت های حیاتی هستند و بیشتر برای انتقال انرژی و سایر کالاهای اساسی مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از مهمترین مخاطرات لرزه ای خطوط لوله مدفون، حرکت گسل هایی است که از آنها عبور می کند. بطور کلی، خطوط لوله را می توان به عنوان یک تیر بر بستر فنر مدلسازی کرد. در حالی که اندرکنش لوله و خاک را می توان با استفاده از فنرهای معادل خاک در جهت محوری، افقی و عمودی نشان داد، که مقادیر سختی این فنرها قبلاً توسط آیین نامه *ASCE* و *ALA* ارائه شده است. در این تحقیق، یک آزمایش در مقیاس کامل بر روی لوله پلی اتیلن ۸ متری به قطر ۱۲۰/۵ میلی متر، مدفون در خاک ماسه ای متراکم، در محل گسل امتداد لغز انجام شد. برای شبیه سازی اثر گسل، جابجایی ۶۰۰ میلی متر، بصورت عمود بر محور لوله به آن اعمال شد. جابجایی ۸ نقطه در طول لوله که از هم فاصله ۱ متر داشتند، در هر لحظه از بارگذاری ثبت شد. یک برنامه کامپیوتری برای بهینه سازی مشخصات فنرهای معادل با استفاده از اسکرپت های پایتون در محیط های متلب و آباکوس، طراحی شد. تا بدین ترتیب، تغییر شکل لوله در طول آن بیشترین انطباق را با نتایج آزمایش داشته باشد. بر این اساس، سختی اولیه و حداکثر نیروی اندرکنش خاک-لوله محاسبه شد و با معیارهای ارایه شده توسط استاندارد *ASCE* و *ALA* مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مقدار ظرفیت نیروی تسلیم و سختی فنرهای جانبی معادل خاک، در مقایسه با آیین نامه *ASCE* و *ALA* مقدار زیادی خطا دارد. مقادیر مذکور برای لوله پلی اتیلن در شرایط گسل امتداد لغز، بسیار کوچکتر از مقادیر ارائه شده توسط *ASCE* و *ALA* بود.

کلمات کلیدی: لوله پلی اتیلن، گسل امتداد لغز، اندرکنش خاک-لوله، آزمایش در مقیاس کامل، تحلیل المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.307292.2593	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.307292.2593	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۰۱/۲۶	۱۴۰۱/۰۱/۲۶	۱۴۰۱/۰۱/۰۶	۱۴۰۰/۰۸/۰۴
				*نویسنده مسئول:		
				مهرزاد تحملی رودسری		
				Tahamouli@iauksh.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

خطوط لوله عموماً به منظور حفظ ایمنی و زیبایی محیط، و هم چنین شرایط اقتصادی، در زمین دفن می شوند. از این رو اهمیت خرابی در این خطوط، چندین برابر تاسیسات سطحی است. گذر از مناطق جغرافیایی وسیع همراه با شرایط متنوع خاک، خطوط لوله را با خطرات گوناگونی مواجه ساخته است. یکی از جدی ترین مخاطرات، خطر زمین لرزه است. مطالعات محققان نشان داده است که تقریباً همه آسیب های وارد بر خطوط لوله مدفون ناشی از حرکت های بزرگ زمین (مانند گسلش Faulting، رانش زمین Landslide، گسترش جانبی ناشی از روانگرایی Liquefaction) و یا حرکت غیر یکنواخت زمین بوده است [1-7]. در زلزله های اخیر، خسارت های زیادی به خطوط لوله مدفون گزارش شده است. به عنوان مثال، در زلزله سال ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو، بیش از نیمی از خطوط لوله از کار افتادند [8]. خرابی لوله های مدفون در زمین لرزه های دیگر مانند ۱۹۸۹ لوما پریتا، ۱۹۹۴ نورتریج، ۱۹۹۹ چی چی تایوان و ۲۰۱۰ کریستچرچ گزارش شده است [9-12]. بدون شک تحلیل لرزه ای خط لوله مدفون نیاز به ارزیابی صحیح از اندرکنش بین لوله و خاک دارد. پیشنهاد یک روش ساده که در ارزیابی های مهندسی دقت قابل قبولی داشته باشد، همواره هدف بسیاری از تحقیقات بوده است. نخستین تحقیقات در مورد محاسبه نیروی اندرکنش لوله- خاک توسط نیومارک و روزنبلوت، نی مارک و هال [13,14] و کندی و همکاران انجام شد [15]. آنها با استفاده از مشخصات فشار هیدرواستاتیک جانبی خاک، نیروی اندرکنش طول واحد لوله را محاسبه کردند. تراتمن و اورورک در سال ۱۹۸۵، اندرکنش لوله- خاک را با انجام آزمایش بر روی لوله های فولادی ۴ و ۱۲ اینچ در باکس آزمایش به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 2/3$ متر بررسی کردند [8]. واگنر و همکاران در سال ۱۹۸۹، اندرکنش خاک- لوله مدفون را در دستگاهی به ابعاد $1/6 \times 1/8 \times 12/5$ متر بررسی کردند [16]. در سال ۱۹۹۶، ژو و موری معادلات تغییر شکل خطوط لوله مدفون را با توسعه یک تیر بر روی بستر فتری ارزیابی کردند [17]. یوشیزاکی و همکاران در سال ۲۰۰۳، اثر جابجایی دائمی خاک بر روی لوله های قطعه ای (segmented) را از طریق یک مطالعه تجربی در مقیاس کامل ارزیابی کردند [18]. گو و استول در سال ۲۰۰۵، تأثیر مقیاس مدل آزمایشگاهی را بر نتایج اندرکنش خاک و لوله بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیر اندازه قطر و عمق دفن لوله می بایست در ارزیابی حداکثر نیروی اندرکنش خاک- لوله لحاظ شود و نهایتاً رابطه ای نیز ارائه کردند [19]. عبدون و همکاران در سال ۲۰۰۹، از طریق یک سری آزمایش سانتریفیوژ بر روی لوله های پلی اتیلن و خاک ماسه ای متراکم، عوامل مؤثر بر اندرکنش خاک- لوله مدفون را تحت تأثیر گسل امتداد لغز بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که نسبت H/D به نحو موثری در مقدار و محل کرنش ها و نیروهای حداکثر لوله موثر است. هم چنین نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t) نیز در رده موثرترین پارامترهای رفتاری در اندرکنش خاک- لوله مدفون قرار گرفت [20]. ابوالمالی و همکاران در سال ۲۰۱۳، تغییر شکل لوله های مدفون پلی اتیلن را ارزیابی کردند. آنها مودهای مختلف تغییر شکل لوله را تفکیک و ارائه کردند [21]. در سال ۲۰۱۴، المهاکری و همکاران با استفاده از تست آزمایشگاهی در مقیاس کامل، اثر خمش در لوله های فولادی مدفون را بررسی کردند. ابعاد دستگاه آزمایش $2 \times 2 \times 4$ متر بود. نتایج تحقیق، نشان از اثرگذاری بالای H/D در نیروی وارد بر لوله داشت [22]. در سال ۲۰۱۵، رحمان و تانیاما روشی تحلیلی را برای بررسی تنش خطوط لوله فولادی کم عمق در معرض جابجایی گسل ارائه کردند [23]. در سال ۲۰۱۹ ژنگ و همکاران یک روش تحلیلی جدید را برای تخمین کرنش و تغییر شکل لوله مدفون در معرض جابجایی گسل ارائه کردند [24].

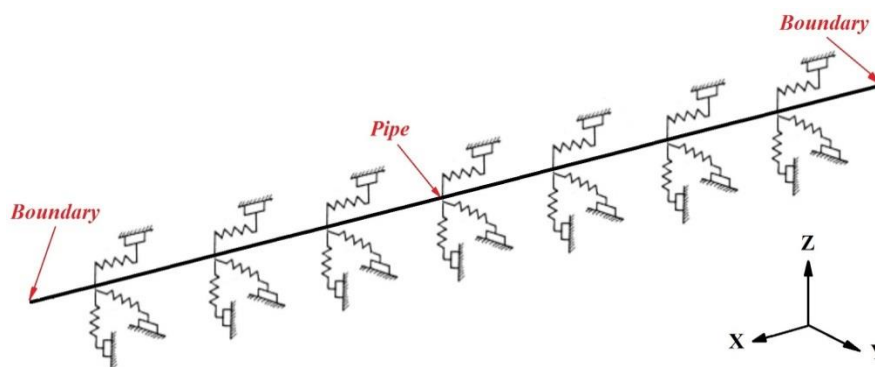
معادلات پیشنهادی آیین نامه ASCE^۱ در خصوص اندرکنش خاک- لوله، برای انواع مختلف تحریک مانند انتشار موج یا گسلش و انواع مختلف لوله (فولادی، پلی اتیلن، بتنی و ...) بطور یکسان در نظر گرفته شده است. در حالی که به نظر می رسد این معادلات می بایست متفاوت باشند. زیرا اندرکنش خاک- لوله به نوع تحریک نیز وابسته است. مطالعات متعدد برخی از عدم قطعیت ها را آشکار ساخت. یمسیری و همکاران با محاسبه نیروی ماکزیمم وارد بر لوله در خاک های ماسه ای تحت تغییر مکان قائم و جانبی، ادعا کردند که مقدار نیرویی که استاندارد (ASCE 1984) در حالت استقرار عمیق لوله ($10 < H/D < 20$) ارائه کرده است، فاقد دقت کافی بوده و بعضاً با خطایی

1. American Society of Civil Engineers

در حدود ۱۰۰٪ همراه است [25]. مطالعات عبدون و همکاران بر روی خطوط لوله مدفون پلی اتیلن تحت اثر گسلش نشان داد که مقاومت طولی ارائه شده در ASCE برای مقادیر H/D بالا، انطباق مناسبی با نتایج بدست آمده از تست های سانتریفیوژ ندارد. به عنوان مثال برای $H/D=6$ ، نیروی تعیین شده در آزمایش با نیروی داده شده توسط آیین نامه ASCE، در حدود ۳۰٪ خطا داشت [20]. سایر ارزیابی های عددی نیز نتایج آزمون انجام شده توسط عبدون و همکاران را تأیید کرد [26]. دقت مدل سازی و صحت نتایج تحلیل بدون شک با نحوه تعریف اندرکنش بین خاک و لوله، ارتباط مستقیم دارد. به نظر می رسد که ماهیت فنرهای معادل، برای مدلسازی اندرکنش خاک-لوله ایده ای مناسب باشد. ولی دقت روابط ارائه شده خصوصاً برای لوله های پلی اتیلن ممکن است مناسب نباشد. در این تحقیق، اندرکنش خاک ماسه ای متراکم و لوله پلی اتیلن مدفون در محل گسل امتداد لغز، با استفاده از یک روش جدید مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که نیروی جانبی وارد بر لوله با تغییر شکل آن ارتباط مستقیم دارد، در این روش اساس اندرکنش لوله و خاک بر اساس تغییر شکل لوله در نظر گرفته شد. بدین ترتیب با محاسبه نیروی جانبی وارد بر لوله، مشخصات فنرهای جانبی معادل خاک تعیین گردید. بدین منظور در ابتدا تست تجربی مقیاس کامل بر روی لوله پلی اتیلن در محل گسل امتداد لغز انجام شد. گسل در راستای عمود بر خط لوله و در جهت افقی اعمال شد. جابجایی هشت نقطه بر روی لوله در کل فرآیند بارگذاری ثبت گردید. در ادامه به کمک یک الگوریتم بهینه سازی که بر اساس روش المان محدود تهیه شده بود، مشخصات فنرهای معادل خاک محاسبه شد. اساس کار الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر، همگرایی تغییر شکل لوله در مدل عددی با تغییر شکل بدست آمده از تست تجربی بود. بدین ترتیب، مشخصات فنرهای معادل بر اساس تغییر شکل جانبی لوله بهینه شدند. نتایج بدست آمده در این مطالعه از نظر سختی و حداکثر نیروی اندرکنش خاک و لوله، با آنچه که توسط استانداردها (ASCE 1984، ALA² 2001) پیشنهاد شده است، متفاوت بود.

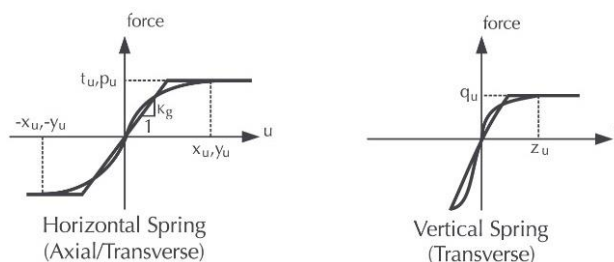
۲- روش های مدل سازی خط لوله در آیین نامه ها

مدل مهندسی معمول، یک مدل دو بعدی یا سه بعدی است که در آن لوله با استفاده از المان beam مدل شود. هم چنین اندرکنش بین خاک و لوله با استفاده از فنرهای طولی دو خطی معادل که توسط ASCE یا نهادهای مشابه پیشنهاد شده است، انجام می شود (شکل ۱).



شکل ۱: روش معمول برای مدل سازی لوله های مدفون [27]

اعتبار نتایج تحلیل تا حد بسیار زیادی به نحوه تعریف مشخصات فنرهای معادل خاک وابسته است. آیین نامه ASCE منحنی رفتاری اندرکنش لوله-خاک را با استفاده از فنرهای دو خطی الاستو پلاستیک کامل ارائه کرده است (شکل ۲) [28].



شکل ۲: رفتار واقعی خاک و فنرهای دوخطی معادل آن [28]

آیین نامه ASCE روابط زیر را برای تعیین نیروی اعمالی بر طول واحد لوله (P_y) و جابجایی نهایی (Y_u) و جابجایی تسلیم (Y_y) ارائه کرده است [28].

$$P_y = N_{qh} \times \gamma \times H \times D \quad (1)$$

$$Y_u = (0.02 \sim 0.03) \times (H + \frac{D}{2}) \quad (2)$$

$$Y_y = \frac{Y_u}{2} \quad (3)$$

در روابط ارائه شده D ، γ و H به ترتیب معرف قطر لوله، وزن مخصوص ماسه و عمق دفن لوله بودند. N_{qh} ضریب ظرفیت باربری ماسه می باشد که به زاویه اصطکاک داخلی خاک، عمق دفن و قطر لوله وابسته است.

۳- مطالعه آزمایشگاهی

قبل از ساخت دستگاه آزمایش، مدل آزمایشگاهی با مطالعه عبدون و همکاران صحت سنجی گردید [20]. تغییر شکل خط لوله به عنوان پارامتر اصلی تعیین ابعاد مناسب دستگاه آزمایش با قابلیت شبیه سازی گسل امتداد لغز در نظر گرفته شد. بدین منظور، در سه بعد طول، عرض و ارتفاع دستگاه تغییر ایجاد شد، تا زمانی که تغییر شکل خط لوله متأثر از ابعاد دستگاه آزمایش نگردد. به عبارت دیگر با افزایش ابعاد دستگاه، نتایج هیچ تغییری را تجربه نکنند. با انجام تعداد بالای تحلیل المان محدود، طول، عرض و ارتفاع دستگاه به ترتیب ۸، ۱/۵ و ۱/۵ متر انتخاب گردید. دستگاه آزمایش از دو بخش کاملاً مجزای ۴ متری، یکی ثابت و دیگری متحرک، با استفاده از فولاد St37 طراحی و ساخته شد. یک آزمایش در مقیاس کامل بر روی لوله پلی اتیلن به قطر ۱۲۰/۵ میلی متر و طول مشابه ۸ متر انجام شد (مطابق با جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات لوله

D (mm)	t (mm)	L (mm)	H(mm)	H/D	D/t
۱۲۰/۵	۱۰/۵	۸۰۰۰	۱۰۰۰	۸/۳	۱۱/۴۸

شبیه سازی اثر گسل با اعمال جابجایی ۶۰۰ میلی متر (به روش شبه استاتیک) در تراز لوله و بصورت عمود بر محور آن، به بخش متحرک دستگاه انجام شد. بدین منظور از سه عدد جک هیدرولیکی با ظرفیت کلی ۱۰۵۰ کیلونیوتن استفاده شد (شکل الف-۳). حرکت جک ها

بطور خودکار با استفاده از یک دیتالاگر ۳۲ کاناله کنترل شد. برای جلوگیری از چرخش باکس، یک مبدل پتانسیومتر خطی (LPT^۳) بر روی هر جک نصب شد. آنها به گونه ای کنترل شدند تا اختلاف جابجایی سه جک نسبت به یکدیگر در هر لحظه کمتر از ۰/۵ میلی متر باشد. برای ثبت نیروی اعمالی توسط جک ها، از سه عدد نیروسنج (Load Cell) فشاری استفاده شد (شکل الف-۳). برای به حداقل رساندن نیروهای اصطکاک سطح، بخش متحرک با استفاده از چرخ های فولادی روی یک ریل جابجا شد (شکل ب-۳). لایه اول خاک مطابق شکل ج-۳ برای جانمایی لوله اجرا شد. در طول بارگذاری، جابجایی جانبی لوله در هر لحظه با استفاده از LPT ها ثبت شد. برای این منظور، هشت نقطه روی لوله به عنوان نقاط مرجع در فاصله ۷/۵، ...، ۲/۵، ۱/۵، ۰/۵ متر در امتداد لوله توسط کابل های پیش تنیده مستقیم به LPT ها در خارج از باکس متصل شدند و بدین ترتیب جابجایی لوله در هر لحظه و با حداکثر خطای ۰/۲٪، ثبت شد (شکل د-۳). به منظور تثبیت نمودن لوله، دو کپ نگهدارنده در دو انتهای لوله نصب شد. هم چنین به کمک چهار عدد پیچ و اتصال محکم آن به کپ فلزی از حرکت انتهای لوله برای درجات آزادی انتقالی جلوگیری به عمل آمد (شکل ه-۳). در نهایت پس از پر کردن باکس آزمایش و تراز کردن خاک، یک شبکه ۲۰۰×۲۰۰ میلی متر بر روی آخرین لایه خاک با گچ ترسیم شد (شکل و-۳).



(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(ه)



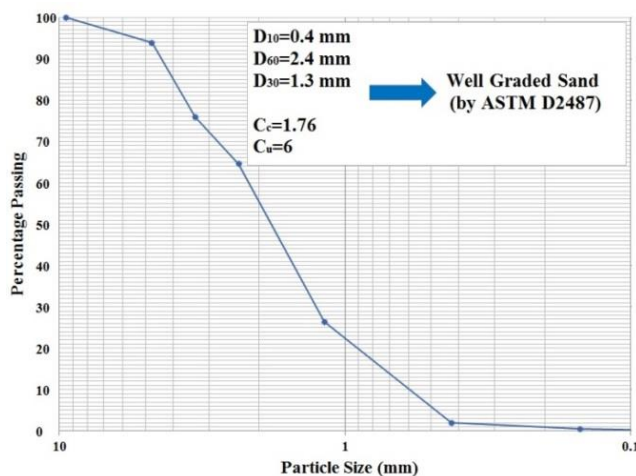
(و)

شکل ۳: آماده سازی آزمایش: (الف) نصب جک های هیدرولیکی، نیروسنج ها و LPT ها ، (ب) پایه فولادی در بخش ثابت دستگاه

(ج) چرخ های فولادی قرار گرفته در زیر باکس و بر روی ریل ، (د) نصب سیم ها متصل به LPT به لوله

(ه) اتصال انتهای لوله به کپ نگهدارنده ، (و) اجرای مش بر روی سطح خاک

بر اساس روش طبقه بندی متحد [29]، خاک مورد استفاده در آزمایش، ماسه خوب دانه بندی شده بدون خاک رس و لای تعیین شد (شکل ۴).



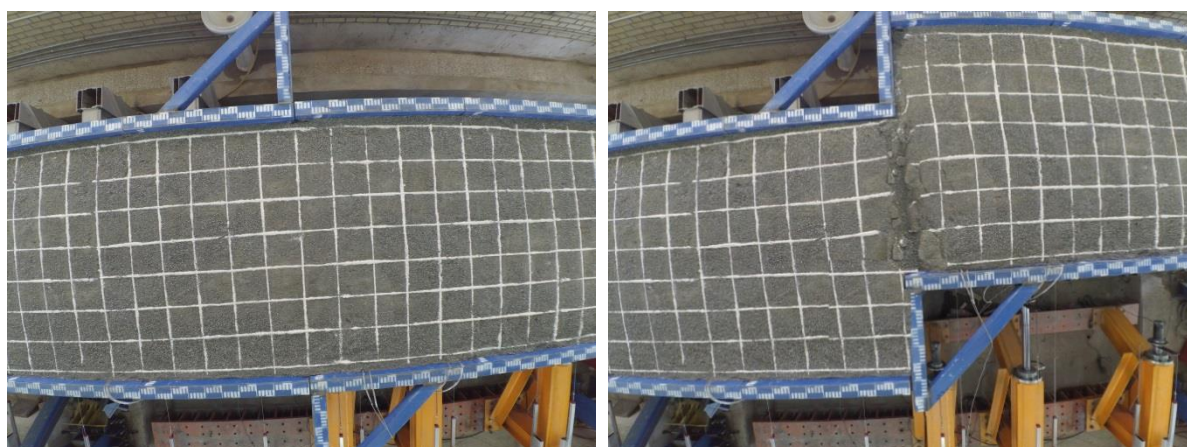
شکل ۴: منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در آزمایش ها

مشخصات تراکم نسبی و چگالی خاک بر اساس میزان ارتفاع آن مطابق با جدول ۲ بدست آمد. بدین منظور از آزمایش مخروط ماسه (صحرایی) [30] استفاده شد. هر لایه با استفاده از یک کامپکتور الکتریکی روغنی متشکل از صفحه ای به ابعاد ۴۰۰×۴۰۰ میلی متر تا فشردگی نسبی ۸۵٪ تا ۹۵٪ متراکم شد. آزمایش برش مستقیم بر روی خاک با درصد تراکم نسبی متفاوت انجام شد [31]. برای تراکم حدود ۹۰٪، زاویه اصطکاک داخلی (Φ) ، ۴۰ درجه تعیین شد. بر اساس آزمون پروکتور اصلاح شده [32]، حداکثر چگالی خاک برای رطوبت بهینه ۱۰/۷٪، برابر ۲۲۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد.

جدول ۲: مقادیر تراکم نسبی و چگالی خاک با توجه به ارتفاع آن

ارتفاع خاک (mm)	تراکم نسبی (%)	چگالی خاک (Kg/m^3)
۰ - ۲۵۰	۸۸/۴۵	۱۹۶۸
۲۵۰ - ۵۰۰	۸۸/۱۲	۱۹۶۰/۷۲
۵۰۰ - ۸۰۰	۹۵/۷۹	۲۱۳۱/۴۵
۸۰۰ - ۱۱۵۰	۹۰/۵۸	۲۰۱۵/۴۹
۱۱۵۰ - ۱۵۰۰	۹۳/۷۴	۲۰۸۵/۶۳

وضعیت خاک پیش از جابجایی باکس و در انتهای آزمایش به ترتیب مطابق با شکل الف-۵ و ب-۵ ارائه شد. اولین ترک به ازای جابجایی ۱۶۸ میلی متر در محل گسل رخ داد. در ادامه با افزایش جابجایی، ترک ها بیشتر شدند. حداکثر طول از هم پاشیدگی خاک در هر دو طرف محل گسل، تقریباً ۲۰۰ میلی متر بود. در پایان آزمایش، حجم خاک قرار گرفته بر روی لوله به آهستگی و با دقت بالا برداشته شد. تا بدین ترتیب تغییر شکل لوله دستخوش تغییر نگردد. مشاهده شد که تغییر شکل لوله در محدوده ۱ متر میانی گسل رخ داده است (شکل ۶).



(الف)

(ب)

شکل ۵: وضعیت خاک: (الف) پیش از جابجایی باکس، (ب) پایان آزمایش

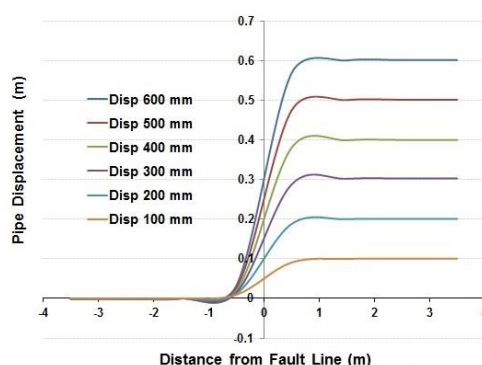


(الف)

(ب)

شکل ۶: تغییر شکل لوله: (الف) در محل غسل، (ب) در طول باکس

منحنی تغییر شکل مطلق لوله بر اساس جابجایی های ثبت شده توسط LPT ها مطابق با شکل ۷ ارائه شد. جابجایی های بدست آمده، تقارن معکوس تغییر شکل لوله را تایید کرد. از این منحنی برای محاسبه مشخصات فنرهای معادل خاک استفاده شد.

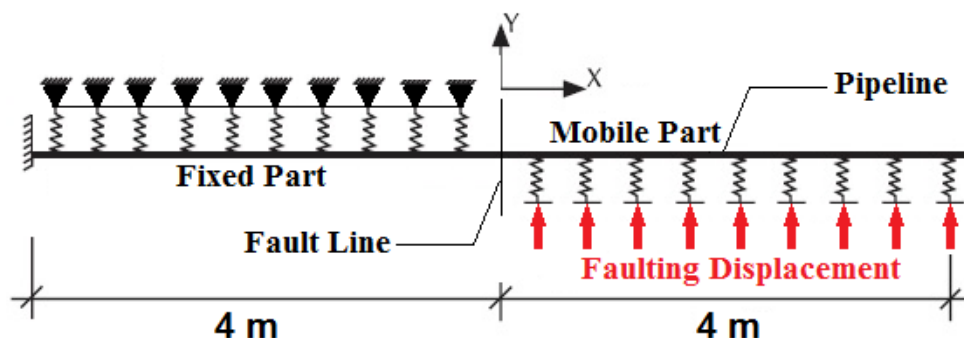


شکل ۷: مقادیر آزمایشگاهی تغییر شکل مطلق لوله

۴- معرفی نرم افزار

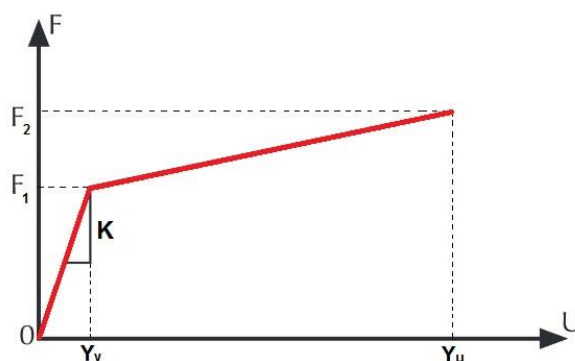
نیروی جانبی وارد بر لوله با تغییر شکل لوله ارتباط مستقیم دارد. از منحنی تغییر شکل لوله برای محاسبه مشخصات فنرهای معادل خاک استفاده شد. نرم افزار بهینه سازی اندرکنش لوله و خاک، با همین هدف تهیه شد. در ابتدا نتایج آزمایش، شامل جابجایی باکس و تغییر شکل مطلق لوله در هر مرحله از بارگذاری، طبقه بندی شده و به عنوان ورودی به نرم افزار بهینه سازی داده شد. هدف از نرم افزار، محاسبه سختی فنرها در مدل های عددی بود. تا بدین ترتیب تغییر شکل لوله در طول، بیشترین انطباق را با تغییر شکل بدست آمده از آزمایش داشته باشد. به عبارت دیگر، هدف ارزیابی سختی اولیه و ثانویه و هم چنین نیروی تسلیم فنرهای مورد استفاده برای مدلسازی خاک بود. در جابجایی های نسبی کوچک، این پارامترها را می توان بدون نیاز به در نظر گرفتن تأثیر فنرهای طولی خاک محاسبه کرد. بنابراین، فنرهای طولی در فرایند مدل سازی گنجانده نشدند. هم چنین، پارامترهای رفتاری فنرهای معادل، یعنی شیب های اولیه و ثانویه در منحنی نیرو-جابجایی فنرها، و هم چنین نیروی تسلیم فنرهای جانبی به صورت ثابت در نظر گرفته شدند. از آنجا که جابجایی نسبی بین خاک و لوله تغییر می کند، نیروی جانبی وارد بر لوله نیز متغیر خواهد بود. نخستین مرحله، ساخت مدل دو بعدی خط لوله- فنر در آباکوس بود. این مدل مطابق با شرایط آزمایش تهیه شد. در مدل سازی لوله از المان تیر (beam) استفاده شد. انتخاب المان beam در مدل سازی های عددی همراه با روند تحلیل تکرار شونده، بسیار رایج می باشد. زیرا زمان تحلیل را بسیار کوتاه کرده و در عین

حال از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است. فنرهای انتقالی در راستای طولی لوله و در فاصله ۵۰ میلی متر نسبت به یکدیگر مستقر شدند. حرکت فنرها در بخش ثابت لوله مقید گردید. جابجایی یکنواخت بصورت کنترل تغییر مکان (Displacement Control) به پایه فنرها در بخش متحرک مدل اعمال شد. اندازه مش بندی لوله پس از آنالیز میزان حساسیت مش بندی، ۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. شماتیک خط لوله- فنر مطابق با شکل ۸ ارائه شد. در هر مرحله از بارگذاری، اطلاعات آزمایش شامل جابجایی باکس و تغییر شکل مطلق لوله، به عنوان ورودی به نرم افزار داده شد.



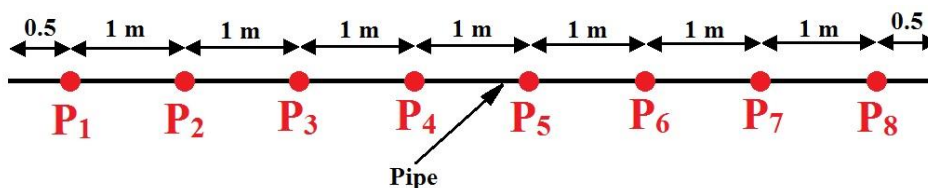
شکل ۸: نمای شماتیک خط لوله همراه با فنرهای معادل خاک

رفتار جابجایی نسبی- نیروی فنرهای عرضی معادل خاک بصورت دو خطی در نظر گرفته شد (شکل ۹). در الگوی پیشنهادی برای فنرهای معادل، K شیب ناحیه خطی، F_1 و F_2 نیروی فنر در ناحیه غیر خطی، Y_y و Y_u به ترتیب جابجایی تسلیم و نهایی بودند. نرم افزار برای هر یک از پارامترها، مقدار دلخواهی را در نظر گرفته و برای بدست آوردن نتایج مطلوب اقدام می کرد.



شکل ۹: الگوی دو خطی جابجایی نسبی- نیروی فنرهای معادل خاک

در مرحله بعد، تغییر مکان ۶۰ سانتی متر، به پایه فنرها در مدل ساخته شده در آباکوس اعمال شد. سپس مقادیر تغییر شکل لوله در جابجایی های ۵، ۱۰، ۱۵، ...، ۵۵، ۶۰ سانتی متر توسط نرم افزار قرائت شد. پس از آن، تغییر شکل مطلق هشت نقطه روی لوله در جابجایی های ۵، ۱۰، ۱۵، ...، ۵۵، ۶۰ سانتی متر (شکل ۱۰) با داده های ثبت شده در طول آزمایش مقایسه شد. این نقاط محلی بودند که LPT ها در طول آزمایش به آن متصل شدند.



شکل ۱۰: نمای شماتیک موقعیت قرار گیری نقاط مرجع ۱ تا ۸ بر روی مدل لوله توسط نرم افزار بهینه سازی

با استفاده از مقادیر ذخیره شده توسط LPT های متصل به نقاط P_1 تا P_8 بر روی لوله، هشت خطای جداگانه برای جابجایی ۵، ۱۰، ۱۵، ...، ۵۵، ۶۰ سانتی متر بدست آمد و سپس برای محاسبه خطای کلی استفاده شد. به عنوان مثال در جابجایی ۵ سانتی متر، خطا E_{5cm} با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد، که در آن D_i و d_i به ترتیب جابجایی های آزمایش و عددی نقطه i بودند. به طور مشابه، برای جابجایی های ۱۰، ۱۵، ...، ۵۵، ۶۰ سانتی متر، به همین روش خطاهای E_{10cm} ، E_{15cm} ، ...، E_{55cm} ، E_{60cm} محاسبه شد.

$$E_{5cm} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (D_i - d_i)^2} \quad (4)$$

در مرحله بعدی، الگوریتم مقادیر K ، F_1 و F_2 را اصلاح می کرد. بر اساس نرم افزار بهینه سازی تهیه شده، برنامه بطور خودکار تعیین می کرد که مقادیر این سه پارامتر را افزایش یا کاهش دهد، که منجر به کاهش تدریجی خطای بدست آمده از معادله ۵ گردد.

$$Er_n = \sqrt{(E_{5cm})^2 + (E_{10cm})^2 + \dots + (E_{60cm})^2} \quad (5)$$

این روند تا زمانی ادامه داشت که با تغییر مقادیر K ، F_1 و F_2 ، دیگر نتوان خطا را کاهش داد. در خاتمه، مقادیر نهایی K ، F_1 و F_2 بر روی صفحه چاپ می شد و تحلیل خاتمه می یافت.

۵- صحت سنجی نرم افزار

به منظور صحت سنجی نرم افزار، یک لوله فولادی $X60$ به طول ۸ متر، قطر ۱۱۰ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر مطابق با موارد اشاره شده در بخش قبل مدلسازی شد. مشخصات مکانیکی مصالح لوله با استفاده از مدل رامبرگ-اسگود بر اساس رابطه ۶ در نظر گرفته شد [33].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (6)$$

در رابطه ارائه شده ε کرنش مهندسی، σ تنش کششی تک محوره، E مدول الاستیسیته، σ_y تنش تسلیم بودند. پارامترهای رامبرگ-اسگود (r و n) مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد [33].

جدول ۳: پارامترهای مدل رامبرگ-اسگود برای لوله فولادی $X60$

لوله	E (MPa)	σ_y (MPa)	n	R
فولادی $X60$	$2/1 \times 10^5$	۴۱۳	۱۰	۱۲

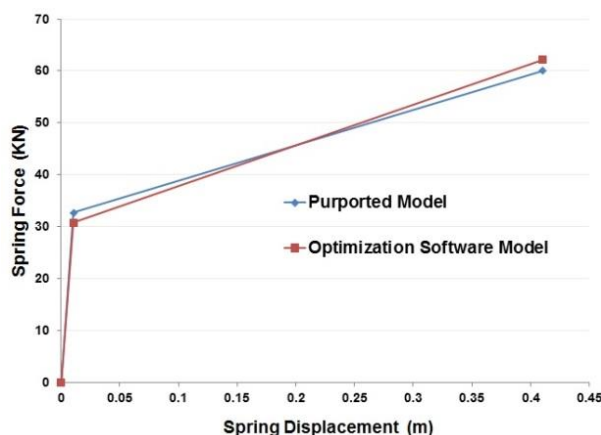
چگالی و ضریب پواسون فولاد به ترتیب ۷۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳ فرض شدند. سخت شدگی لوله، Isotropic Hardening تعیین شد. نوع تحلیل Static General در نظر گرفته شد. فنرهای عرضی معادل خاک با استفاده از المان اتصال محوری غیرخطی (مطابق شکل

۹) تعریف گردید. مشخصات اولیه فنرهای معادل خاک مطابق سطر دوم جدول ۴ به نرم افزار آباکوس معرفی شد. فنرها در فواصل ۵۰ میلی متر به لوله متصل شدند. نقاط پایه فنرها در قسمت ثابت باکس آزمایش در برابر حرکت انتقالی ثابت شد و در قسمت متحرک مدل، حرکت تنها در امتداد گسل در هر مرحله از تحلیل آزاد در نظر گرفته شد. جابجایی مطلق لوله در هشت نقطه مرجع (شکل ۱۰) با اعمال جابجایی یکنواخت ۵، ۱۰، ۱۵، ...، ۳۵، ۴۰ سانتی متر به پایه فنرهای متصل به لوله بدست آمد. به این ترتیب، تغییر شکل لوله در مراحل مختلف بدست آمد. فرض گردید که این تغییر شکل ها، نتایج بدست آمده از آزمایش هستند. بر این اساس، نرم افزار بهینه سازی با داشتن این تغییر شکل ها می بایست مشخصات فنر معادل خاک را بیابد. در ادامه با فراخوانی نرم افزار بهینه سازی تهیه شده، مقادیر تغییر شکل لوله به عنوان ورودی به نرم افزار داده شد. همان طور که قبلاً ذکر شد، هدف نرم افزار، محاسبه سختی فنر معادل خاک در هر مرحله از بارگذاری بود تا بدین ترتیب بیشترین انطباق بین تغییر شکل های بدست آمده از نرم افزار و مقادیر تغییر شکل ورودی بدست آید. در نهایت با انجام تحلیل های متعدد توسط نرم افزار، مشخصات نیرو-جابجایی فنرهای معادل خاک، مطابق سطر سوم جدول ۴ تعیین شد.

جدول ۴: مشخصات اولیه و محاسبه شده فنرهای معادل خاک

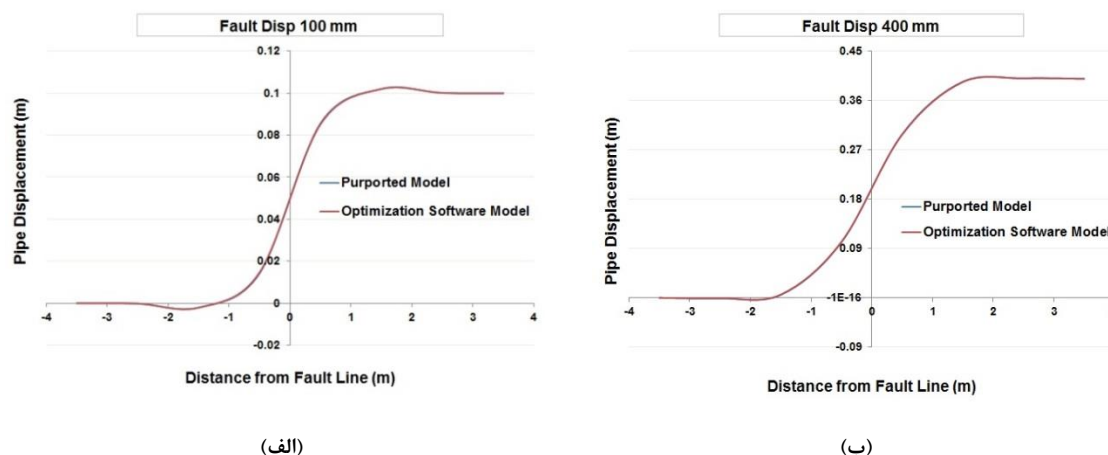
مشخصات فنرهای معادل خاک	K (N/m ²)	F ₁ (N)	F ₂ (N)
اولیه	۳۰۸۲۶۴۱/۵۱	۳۲۶۷۶	۶۰۰۰۰
محاسبه شده توسط نرم افزار	۳۰۸۲۶۴۳/۶	۳۲۶۷۶/۰۲	۶۰۰۰۰/۸۲

دقت نرم افزار در محاسبه سه پارامتر K، F₁ و F₂ به ترتیب ۹۴٪، ۹۴٪ و ۹۶/۵٪ بود. مشخصات فنر معادل خاک و مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار در شکل ۱۱ با یکدیگر مقایسه شد.



شکل ۱۱: مقایسه مشخصات نیرو-جابجایی فنرهای معادل خاک در دو مدل فرض شده و مدل محاسبه شده توسط نرم افزار بهینه سازی

بسته به مشخصات اولیه فنرهای معادل خاک، نتیجه تحلیل نرم افزار بهینه سازی اندرکنش لوله و خاک به جواب منحصر به فردی نخواهد رسید. ولی همه جواب ها به سمت جواب واقعی میل خواهد کرد و می تواند با دقت قابل قبولی به جواب واقعی نزدیک شود. بنابراین از نظر تحلیل های مهندسی جواب بدست آمده قابل قبول می باشد. برای ارزیابی بیشتر، منحنی تغییر شکل مطلق لوله به ازای ۱۰۰ و ۴۰۰ میلی متر جابجایی در مدل عددی و مدل بدست آمده از نرم افزار بهینه سازی در شکل ۱۲ با یکدیگر مقایسه شد. به دلیل تطابق مناسب مشخصات نیرو-جابجایی فنرهای معادل خاک در دو مدل (شکل ۱۱) و هم چنین تطابق بسیار بالای منحنی های تغییر شکل لوله (شکل ۱۲)، عملکرد مناسب نرم افزار تایید شد.



شکل ۱۲: مقایسه تغییر شکل لوله در مدل های عددی و نرم افزار به ازای تغییر مکان: (الف) ۱۰۰ میلی متر، (ب) ۴۰۰ میلی متر

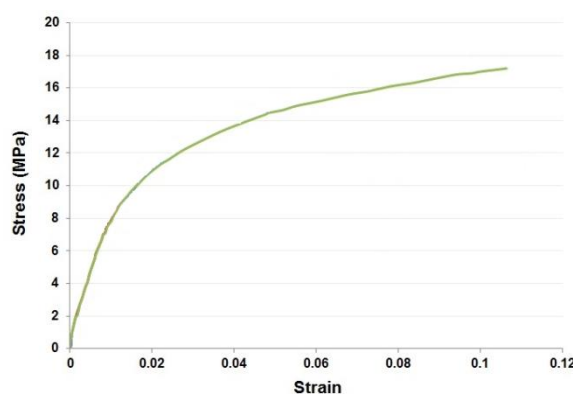
عملکرد نرم افزار با استفاده از نمونه های متعدد تأیید شد. در هر نمونه، مقادیر دلخواه برای مشخصات جابجایی نسبی- نیروی فنرهای معادل خاک انتخاب شد. سپس با ایجاد یک مدل در آباکوس (مشابه شکل ۸)، تحت جابجایی گسل قرار گرفت. در همه نمونه ها، نرم افزار بهینه سازی توانست رفتار جابجایی نسبی- نیروی فنرهای معادل خاک را با دقت بیش از ۹۰٪ محاسبه کند. بر این اساس، دقت بالای نرم افزار به اثبات رسید. هم چنین ارتباط مستقیم تغییر شکل مطلق لوله با سختی فنرها تأیید شد.

۶- محاسبه مشخصات فنرهای معادل خاک در آزمایش

یک لوله پلی اتیلن ۸ متری در آباکوس با استفاده از المان beam (شکل ۸) مدل سازی شد. چگالی و ضریب پواسون پلی اتیلن به ترتیب برابر ۳۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳ در نظر گرفته شد. منحنی تنش- کرنش لوله پلی اتیلن بر اساس استاندارد ISO-527-2-2012 بدست آمد (شکل ۱۳).



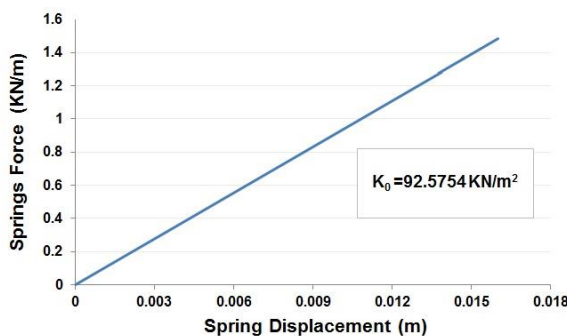
(الف)



(ب)

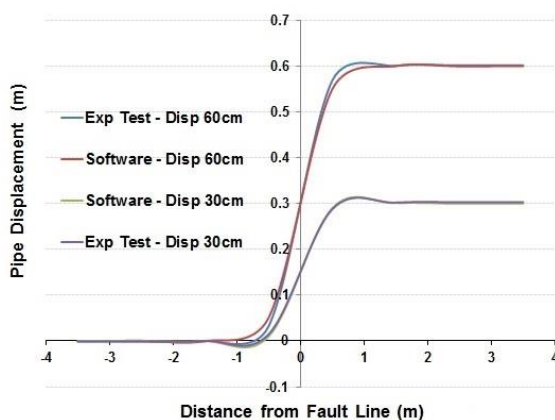
شکل ۱۳: آزمایش کشش: (الف) دستگاه آزمایش، (ب) منحنی تنش- کرنش لوله پلی اتیلن

سایر فرآیند مدل سازی، مشابه بخش قبل (صحت سنجی نرم افزار) انجام شد. با این تفاوت که میزان جابجایی گسل ۶۰۰ میلی متر بود که به پایه فنرها و انتهای لوله اعمال شد. با انجام تحلیل های عددی متعدد توسط نرم افزار، مشخصات نیرو- جابجایی فنرهای معادل خاک برای آزمایش تعیین شد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: دیاگرام جابجایی - نیروی فنر معادل خاک آزمایش

مشاهده شد که تغییر مکان تسلیم فنرها خیلی به سمت راست حرکت کرده و عملاً فنر معادل خاک خطی شد. این بدان معناست که تحت جابجایی گسل، فنرهای بهینه از ناحیه خطی به غیر خطی منتقل نمی شود. در حالی که الگوریتم بهینه سازی برای در نظر گرفتن کلیه محدوده های رفتاری فنرهای معادل طراحی شده بود. نیروی ایجاد شده بین خاک و لوله آنقدر زیاد نبود که منجر به ورود فنر به ناحیه غیر خطی شود. هم چنین به نظر می رسد که به دلیل تغییر شکل موضعی لوله، تنها بخش کوچکی از آن دچار تغییر شکل شده است. بدیهی است که نیروی اندرکنش خاک- لوله به جنس لوله نیز وابسته است. در لوله های فولادی، سختی بالای لوله منجر به گسیختگی خاک می شود. بنابراین، خاک به راحتی به ناحیه غیر خطی وارد می شود. در حالی که به دلیل مصالح ضعیف تر، لوله های پلی اتیلن نمی توانند باعث گسیختگی خاک شوند. منحنی تغییر شکل مطلق لوله در آزمایش و هم چنین مدل عددی مربوطه مطابق با شکل ۱۵ ارائه شد. به دلیل تطابق بسیار مناسب، سختی فنرهای محاسبه شده توسط نرم افزار بهینه سازی تأیید شد.

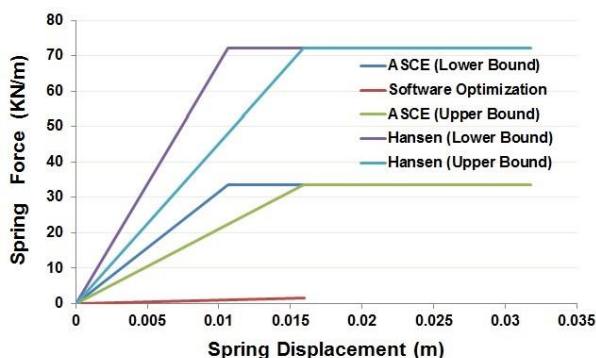


شکل ۱۵: مقایسه منحنی تغییر شکل مطلق لوله آزمایش و نرم افزار بهینه سازی

۷- مقایسه نتایج با استاندارد ASCE و ALA^۴

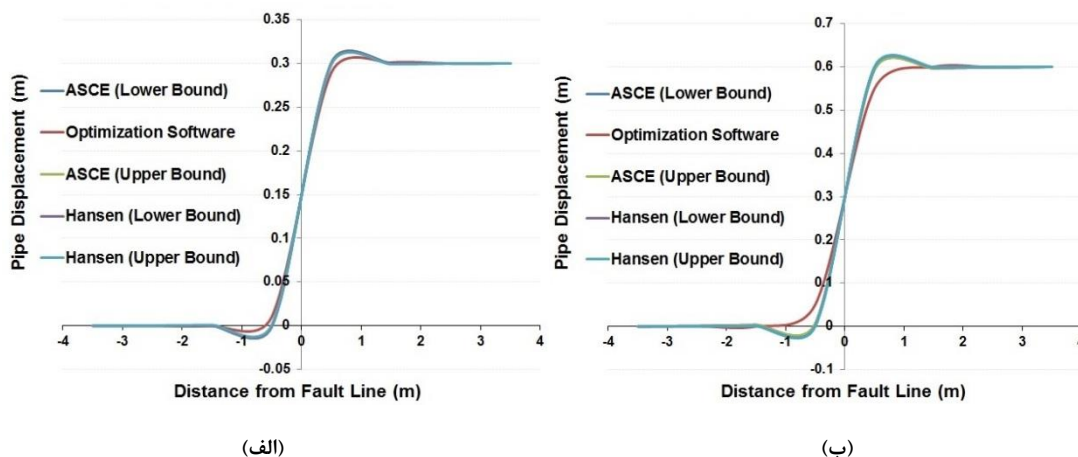
در این بخش نمودار فنر معادل خاک به دست آمده از نرم افزار بهینه سازی (شکل ۱۴) با روابط ارائه شده توسط استانداردهای ASCE1984 [34] و ALA2001 [35] مقایسه شد. بدین منظور بر اساس زاویه اصطکاک خاک و نسبت عمق دفن به قطر لوله، ضریب N_{qh} از گراف های ارائه شده توسط اوروک [28,36,37] و هانسن [36,37] تعیین شد. هم چنین با توجه به وزن مخصوص ماسه، H و D ، حداکثر نیروی فنر معادل، حد بالا و پایین جابجایی نهایی و جابجایی تسلیم، به ترتیب با استفاده از معادلات ۱، ۲ و ۳ محاسبه شد. در نهایت نمودار جابجایی نسبی- نیروی فنر معادل خاک بر اساس مطالعات اوروک و هانسن تعیین شد (شکل ۱۶).

4. American Lifelines Alliance



شکل ۱۶: مقایسه جابجایی نسبی - نیروی فنر بر اساس استاندارد ASCE، ALA و نتایج نرم افزار بهینه سازی

مقدار نیروی محاسبه شده برای فنرها بسیار کمتر از مقادیر ارائه شده توسط ASCE و ALA بود. سختی محاسبه شده برای فنرها حدوداً ۱۶ برابر با مقدار پیشنهادی ASCE متفاوت بود. این اختلاف پیش از این توسط عبدون و همکاران مشاهده شد [20]. به طوری که برای $H/D=6$ ، نیروی تعیین شده در آزمایش با نیروی ارائه شده توسط ASCE، حدوداً سه برابر اختلاف داشت. در مطالعه حاضر (مطابق جدول ۱) $H/D=8.3$ بود. هم چنین پارامترهای اندرکنش لوله و خاک بیشتر بر اساس مطالعاتی که پیش از این بر روی لوله های فولادی انجام شده، ارائه شده است. تست های مشابهی توسط دستگاه آزمایش بر روی لوله های فولادی انجام شد. در آن مطالعات اختلاف قابل توجهی بین نتایج و روابط ASCE مشاهده نگردید [38]. هم چنین سختی بدست آمده برای فنرها با مقدار پیشنهادی هانسن اختلاف بسیار چشمگیری از ASCE داشت. لذا جنس لوله پارامتر بسیار تعیین کننده ای در اندرکنش لوله و خاک می باشد. برای مقایسه مناسب تر، منحنی تغییر شکل لوله (بدست آمده از نرم افزار) با منحنی های متناظر از ASCE و ALA مقایسه شد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: مقایسه منحنی تغییر شکل لوله در نرم افزار و استاندارد ASCE و ALA به ازای جابجایی: (الف) ۳۰ سانتی متر، (ب) ۶۰ سانتی متر

با توجه به متفاوت بودن منحنی تغییرشکل لوله با منحنی های ASCE و ALA برای جابجایی ۳۰ و ۶۰ سانتی متر، به نظر می رسد که نرم افزار بهینه سازی، بهتر توانسته است که مشخصات سختی فنر معادل خاک را اصلاح کند. به عبارت دیگر، آیین نامه های ASCE و ALA که بر گرفته از مطالعات اوروک [28,36,37] و هانسن [36,37] می باشند، در تعیین مشخصات فنر معادل خاک برای لوله پلی اتیلن تا حدودی خطا دارند. روابط ارائه شده ASCE و ALA بیشتر بر اساس مطالعاتی که پیش از این بر روی لوله های فولادی انجام شده، ارائه گردیده است. نیروی وارد بر لوله (رابطه ۱) با توجه به پارامترهایی مانند D و H لوله، وزن مخصوص خاک و ضریب N_{qh} که به ضریب اصطکاک خاک و H/D وابسته است، تعیین شده است. بنابراین جنس لوله پارامتر بسیار مهم و تعیین کننده ای می باشد. زیرا جنس لوله با تغییرشکل لوله ارتباط مستقیم دارد. و تغییرشکل لوله ارتباط مستقیم با نیروی وارد بر لوله دارد. در این مطالعه، یک روش جدید برای ارزیابی اندرکنش بین خاک و لوله در اثر جابجایی گسل امتداد لغز ارائه شد. جمع آوری داده های جامع مستلزم انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتر است. مطالعات در آزمایشگاه تحقیقات سازه دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه در حال انجام است. این تحقیق نشان داد که سختی اولیه و حداکثر نیروی اندرکنش خاک-لوله با مقادیر متناظر ارائه شده از سوی آیین نامه ASCE و ALA تفاوت دارد.

۸- نتیجه گیری

چالش بزرگ در آنالیز خطوط لوله مدفون ارزیابی صحیح اندرکنش خاک-لوله است که با استفاده از فنرهای دو خطی معادل انجام می شود. برخی تحقیقات صحت روابط برای فنرهای دو خطی معادل خاک ارائه شده توسط آیین نامه های مختلف مانند ASCE یا ALA را مورد تردید قرار داده است. هدف از این تحقیق، ارائه روش جدیدی برای ارزیابی اندرکنش جانبی بین خاک ماسه ای و لوله های پلی اتیلن مدفون در محل گسل امتداد لغز بود. بدین منظور، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی لوله پلی اتیلن با قطر ۱۲۰/۵ میلی متر تحت گسل امتداد لغز انجام شد. در هر مرحله از آزمایش، جابجایی هشت نقطه در طول لوله در کل بارگذاری ثبت شد. نرم افزار بهینه سازی اندرکنش خاک-لوله در محیط آباکوس و متلب برای انجام محاسبات برنامه ریزی شد. و این امکان را فراهم کرد که رفتار غیر خطی فنرهای معادل را با استفاده از جابجایی نقاط مرجع مذکور تعیین کرد. نرم افزار بهینه سازی به تدریج سختی فنرها را تغییر داد، تا بدین ترتیب بیشترین انطباق بین نتایج عددی و آزمایش بدست آید. با توجه به این که تغییرشکل، جنس و هندسه لوله و نیروی وارد بر آن با هم مرتبط هستند، این نوع بهینه سازی می توانست منجر به برآورد دقیق نیروی اندرکنش خاک-لوله شود. نتایج مطالعه نشان داد که برخلاف آنچه که در آیین نامه ASCE بیان شده است، ظرفیت نیروی فنر معادل خاک در لوله های پلی اتیلن بسیار پایین تر از مقادیر محاسبه شده توسط معادلات ASCE است. سختی محاسبه شده برای لوله پلی اتیلن حدوداً ۱۶ برابر کوچکتر از مقدار پیشنهادی ASCE بود. هم چنین، نیروی تسلیم فنر معادل خاک برای لوله های پلی اتیلن، با معیار ALA اختلاف فاحش تری داشت. از طرف دیگر، شکل خطی نمودار نیرو-جابجایی فنر معادل خاک بیانگر این امر بود که میزان نیروی ایجاد شده در لوله (و در نتیجه فنرها) آنقدر زیاد نیست که بتواند فنر را به ناحیه غیر خطی منتقل کند.

۹- مراجع

- [1] Ariman, T., and Muleski, G. E., 1981, "A Review of Seismic Response of Buried Pipelines Under Seismic Excitations," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 9, pp. 133-151.
- [2] Sun, S., 1979, "Earthquake Damage to Pipelines," *Proceedings, 2nd U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Stanford, pp. 61-67.
- [3] Katayama, T., and Isoyama, R., 1980, "Damage to Buried Distribution Pipe-lines During the Miyagiken-Okii Earthquake," *PVP-Vol. 43, ASME*, pp. 97-104.
- [4] Satake, M., Kishino, Y., and Asano, T., 1982, "Consideration on Earthquake Resistance of Pipeline Buried in Non-Uniform Ground," *Proceedings, 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo*, pp. 1905-1912-in Japa-nese!
- [5] Kitaura, M., and Miyajima, M., 1996, "Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake: Damage to Water Supply Pipelines," *Soils and Foundations, Special Issue*, pp. 325-333.

- [6] O'Rourke M.J. and Liu X., Response of buried pipelines subjected to earthquake effect, MCEER, 1999.
- [7] Liang, j., Sun, S. "Site Effects on Seismic Behaviour of Pipeline", Pressure Vessel Tech., ASME, Vol. 122, pp 469-475, 2000.
- [8] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1077)
- [9] Petak, W. J., and Elahi, S., 2001, "*The Northridge Earthquake, USA and Its Economic and Social Impacts*", EuroConferenc on Global Change and Catastrophe Risk Management Earthquake Risks in Europe, IIASA, p. 28.
- [10] 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. DOI: 10.1193/030413EQS062M
- [11] O'Rourke, T. D., and Holzer, T. L., 1992, "*The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989--Marina District*", U.S. Geological Survey professional paper ; 1551-F, p. 215 p.
- [12] Bruneau, M., Buckle, I., Chang, S., Flores, P., O'Rourke, T., Shinozuka, M., and Soong, T., 2000, The Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER). ISSN: 1520-295X
- [13] Newmark, N. . M., and Rosenblueth, E., 1971, "*Fundamental of Earthquake Engineering*", Prentice-Hall Englewood.
- [14] 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.
- [15] Kennedy, R. P., Chow, A. M., and Williamson, R. A., 1977, "*Fault Movement Effects On Buried Oil Pipeline*". ASCE Transp Eng J, 103, pp. 617-633.
- [16] Wagner, D. A., Murff, J. D., Brennodden, H., and Sveegen, O., 1989, "*Pipe-Soil Interaction Model*", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 115(2), pp. 205-220. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:2(205)
- [17] Zhou, Z., and Murray, D. W., 1996, "*Pipeline Beam Models Using Stiffness Property Deformation Relations*", Journal of Transportation Engineering, 122(2), pp. 164-172. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:2(164)
- [18] YOSHIZAKI, K., O'Rourke, T. D., and HAMADA, M., 2003, "*Large Scale Experiments Of Buried Steel Pipelines With Elbows Subjected To Permanent Ground Deformation*", STRUCTURAL ENGINEERING / EARTHQUAKE ENGINEERING, 20(1), pp. 1s-11s. DOI: 10.2208/jscesee.20.1s
- [19] Guo, P.J., Stolle, D.F.E. "*Lateral Pipe-Soil Interaction in Sand with Reference to Scaleeffect*", ASCEJ.GeotechnicalandGeo environmentalEng.Vol.131,No.3, pp 338-349, 2005.
- [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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.04.006
- [21] Abolmaali A, Kararam A. 2013. "*Nonlinear finite-element modeling analysis of soil-pipe interaction*[J]". International Journal of Geomechanics, ASCE, 13(3): 197-204. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000196
- [22] Mohamed Almahakeri, M.ASCE; Amir Fam, M.ASCE; and Ian D. Moore, M.ASCE., "*Experimental Investigation of Longitudinal Bending of Buried Steel Pipes Pulled through Dense Sand*", ASCE, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice ,Volume 5 Issue 2 - May 2014
- [23] Rahman, M. A., and 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.01.011
- [24] Zeng, X., Dong, F. fei, Xie, X. dong, and Du, G. feng, 2019, "*A New Analytical Method of Strain and Deformation of Pipeline under Fault Movement*", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 172(February), pp. 199-211. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.03.005
- [25] S. Yimsiri, K. Soga, K. Yoshizaki, G. R. Dasari, and T. D. O'Rourke, "Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions," Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, vol. 130, no. 8, pp. 830-842, 2004.
- [26] 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. DOI: 10.1061/9780784413142.072
- [27] 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", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 6(4), p. 4014018. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000193
- [28] 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. ISBN: 978-0-87262-428-3

- [29] ASTM D2487, 2011, ASTM D2487-11, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering " Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2487-11
- [30] ASTM D-1556, 2015, ASTM D1556 / D1556M-15e1, " Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method", ASTM International, West Conshohocken, PA., DOI: 10.1520/D1556_D1556M-15E01
- [31] ASTM D 3080, 2011, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained". DOI: 10.1520/D3080_D3080M-11
- [32] ASTM D1557, 2012, ASTM D1557 , "Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effor t", Pennsylvania, USA. DOI: 10.1520/D1557-12E01
- [33] O'Rourke, M. J., and Liu. X. (2012), "Seismic Design of Buried and offshore Pipeline," *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER)*, MCEER-12-MN04.
- [34] American Lifelines Alliance, "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe". ASCE, 1984.
- [35] Seismic Guidelines for Water Pipelines, "American Lifelines Alliance", 2001.
- [36] Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) Monograph, "Seismic Design of Buried and offshore Pipeline", Michael J. O'Rourke and (Jack) X. Liu. November 28,2012. MCEER-12-MN04.
- [37] Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) Monograph, "Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects", M. J. O'Rourke and X. Liu. MCEER Monograph No. 3. ISBN 0-9656682-3-1.
- [38] Ashrafy, Tahamouli Roudsari, Hosseini. (2019), "A new formulation for establishing the lateral interaction between buried steel pipeline and sandy soil subjected to strike-slip faulting," *Journal of Pressure Vessel Technology*. doi:10.1115/1.4044338.