

DOI: 10.48303/bese.2021.246220

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تحلیل تنش‌های ناشی از زلزله و بررسی اثرات ناشی از فشار خاک بر لوله‌های مدفون از چالش‌برانگیزترین مباحث مطرح در طرح لرزه‌ای شریان‌های حیاتی می‌باشد. خطوط لوله مدفون سازه‌های طویل مستقر در محیط نیمه‌بی‌نهایت خاک محسوب شده و به صورت تیرهایی بر بستر فشرده‌ای معادل خاک شبیه‌سازی می‌شوند. مشخصات فنرهای بستر نیز از روابط آئین‌نامه‌ای (مانند ASCE1984 و ALA2001) تعیین می‌شوند. مشخصات فنرهای معادل خاک - لوله در آئین‌نامه‌ها فقط تابع قطر لوله و مشخصات خاک است. تحقیقات متعدد نشان داده است که اندرکنش خاک - لوله تابع عوامل دیگری مانند ضخامت جداره لوله، جنس مصالح لوله و شرایط بارگذاری نیز می‌باشد. در این تحقیق ابتدا دو آزمایش بزرگ مقیاس روی لوله‌های فولادی پیوسته مدفون در خاک ماسه‌ای متراکم به انجام رسید. شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، راستی‌آزمایی گردید. در ادامه یک بانک اطلاعاتی مشتمل بر ۲۴ شبیه‌سازی اجزای محدود از لوله‌های مدفون ایجاد شد. نتایج مدل‌های عددی به نرم‌افزار BPSIOS وارد شد تا مشخصات فنرهای اندرکنشی خاک لوله محاسبه گردد. با در نظر گرفتن اثر ضخامت جداره لوله، رابطه جدیدی برای اندرکنش خاک ماسه‌ای متراکم و لوله فولادی در شرایط گسلش امتدادلغز ارائه شد. نتایج نشان داد که نیروی اندرکنش خاک و لوله و سختی‌های اولیه و ثانویه فنرهای اندرکنشی به شدت متأثر از ضخامت جداره لوله می‌باشند.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک لوله، لوله مدفون فولادی، تحلیل اجزای محدود، ضخامت جداره لوله، گسل امتدادلغز.

اثر ضخامت جداره بر اندرکنش جانبی لوله فولادی مدفون و خاک ماسه‌ای متراکم در گسلش امتدادلغز

محمد اشرفی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

مهرداد تحملی رودسری (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، Tahamouli@iauksh.ac.ir

محمود حسینی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

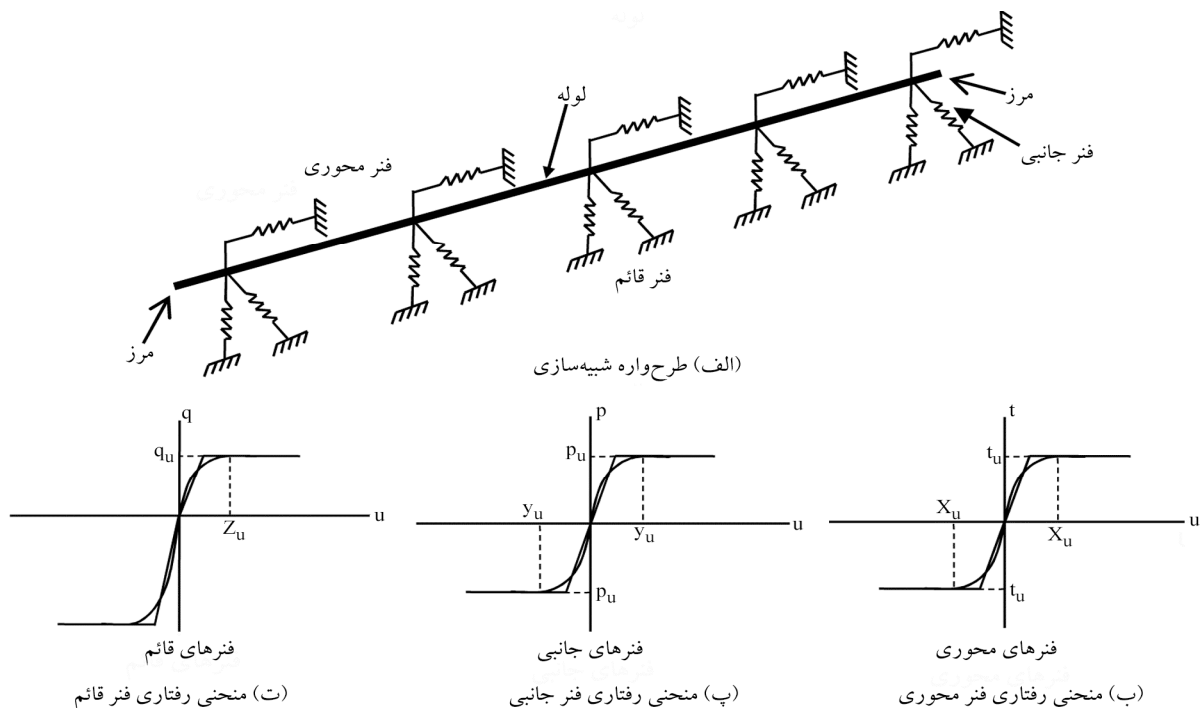
۱- مقدمه و مروری بر ادبیات

لوله توسط اعضای حجیم^۳ و پوسته‌ای دارای مشکلات و عدم قطعیت‌های فراوانی می‌باشد. به همین دلیل استفاده از عضو تیری به عنوان لوله و خاک مجاور با فنرهای گسترده در شبیه‌سازی‌ها پیشنهاد شد. ارائه روشی ساده و مهندسی برای شبیه‌سازی فیزیکی مسئله با دقت قابل قبول از مهم‌ترین دلایل ارائه این روش بوده است. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت رفتاری غیر همسانگرد و دانه‌ای خاک، سختی خاک و فنرهای اندرکنشی تابعی از کرنش خاک و جابه‌جایی لوله بوده است. منظور نمودن این پدیده عملاً ممکن نبوده و به منظور ساده‌سازی شبیه‌سازی‌ها، در محاسبات غالباً مقدار متوسطی از سختی خاک

تحلیل تنش در خطوط لوله مدفون جزو چالش‌برانگیزترین مسائل این حوزه از مهندسی بوده است. این مسئله با در نظر گرفتن عبور لوله از محیط‌هایی با مشخصات متفاوت و لزوم تضمین سطح بالای ایمنی پیچیده‌تر نیز می‌شود. بنا بر مشاهدات خرابی‌های رخ داده در خطوط لوله در زلزله‌های پیشین، خسارات ناشی از زلزله به طور عمده به دو دسته خسارات ناشی از جابه‌جایی ماندگار زمین^۱ و انتشار امواج^۲ تقسیم شده‌اند. تحلیل سه‌بعدی اجزای محدود خاک - لوله بدون تردید به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحلیل تنش در لوله مورد پذیرش است؛ اما تحلیل لوله مدفون با طول کافی و شبیه‌سازی خاک و

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. تحقیقات اودیبرت و نیمین [۵]، تروتمن و ارورک [۶]، تروتمن [۷]، ارورک و تروتمن [۸] منتج به ارائه روابطی برای تخمین نیروی وارده ناشی از جابه‌جایی ماندگار زمین و تغییر مکان نهایی و تسلیم متناظر آن گردید. این تحقیقات در تهیه ضوابط ویژه‌ی اندرکنش خاک-لوله نقش بسزایی داشته است. اودیبرت و نیمین [۵] همچنین مکانیسم خرابی را به صورت تابعی از نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) منظور نمودند. آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس روی لوله مدفون فولادی به قطر ۸ و ۱۲ اینچ (۱۰۲ و ۳۲۴ میلی‌متر) با دستگاهی به ابعاد $۱/۲۰ \times ۲/۳۰ \times ۱/۲۰$ متر انجام شد. در این آزمایش‌ها نیروی افزایشنده به صورت استاتیکی و متقارن به دو انتهای لوله اعمال شد. آنها تقریب دو خطی الاستیک-پلاستیک کامل را برای نمودار نیرو-جابه‌جایی نسبی سیستم خاک-لوله ارائه نمودند. در ۱۹۸۴ راهنمای طرح لرزه‌ای سیستم خطوط نفت و گاز [۹] توسط ASCE منتشر شده و روش تحلیل لوله‌های مدفون به صورت تیر بر بستر فنرهای معادل

در نواحی مجاور لوله به طور ثابت منظور می‌شود. خسارات وارده به لوله‌های مدفون در زلزله سان‌فرانسیسکو ۱۹۰۶ و سان‌فرناندو ۱۹۶۱ برجسته‌تر بوده و محققین را وادار به تنظیم آئین‌نامه‌هایی در این زمینه نمود [۱]. عمده‌ی این خسارات پارگی جداره لوله و محل انشعابات، کمانش و بیضی‌گون شدن لوله و کمانش تیری بودند. 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. اولین تحقیقات در زمینه تعیین مشخصات فنرهای معادل خاک-لوله توسط نیومارک و هال [۲] نیومارک و روزنبلوت [۳] انجام گردید. آنها با استفاده از روابط ساده تئوری الاستیسیته مقداری برای سختی فنرهای معادل ارائه شد. استفاده از فنر گسترده معادل خاک پیش‌تر و از ۱۸۶۷ توسط وینکلر [۴] به عنوان روشی عمومی در شبیه‌سازی‌های تحلیلی ژئوتکنیک مرسوم بوده است. طرح‌واره‌ای از لوله مدفون در شکل (۱-الف) ارائه شده است. همچنین نمودار دوخطی پیشنهادی نیرو-جابه‌جایی فنرهای معادل خاک نیز در شکل‌های (۱-ب) تا (۱-ت) ارائه شده است.



شکل (۱): شبیه‌سازی لوله به صورت تیر بر بستر فنرهای معادل خاک.

نقاطی به فاصله حدوداً ۱/۵۰ متر قبل و بعد از محل تلاقی خط گسلش و محور لوله رخ داده است. همچنین بیان نمودند که مقدار آزمایشگاهی 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 در حالی که در نسبت H/D برابر ۲/۸۰ نیروی محاسبه شده در آزمایش تقریباً معادل نیروی راهنمای ASCE بوده است. وازوراس و همکاران [۱۷] شبیه‌سازی اجزای محدود را برای بررسی اثرات فشار داخلی روی کمانش لوله مدفون انجام دادند. آنها شبیه‌سازی را برای دو سطح مختلف از فشار داخلی سیال (فشار بهره‌برداری) با ضخامت جداره متناسب، به انجام رساندند. همچنین شبیه‌سازی اجزای محدود به منظور بررسی اندرکنش خاک-لوله در گسلش امتدادلغز زاویه‌دار به کار گرفته شده و میزان بیضی گون شدن^۴ لوله بررسی گردید [۱۸]. ژری و همکاران [۱۹] در یک مطالعه عددی رفتار لوله‌های پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) در برابر گسلش نرمال را بررسی نمودند. تحلیل‌ها با استفاده از رویکرد تیر بر بستر فنرهای معادل خاک-لوله انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با تحلیل‌های سه‌بعدی با عضو پوسته‌ای (برای شبیه‌سازی لوله) راستی آزمایی گردید. حسینی و تحملی رودسری [۲۰] با انجام شبیه‌سازی مختلف لوله‌های مدفون به بررسی حداقل طول لوله متأثر از گسلش پرداختند. آنها همچنین ضوابط جدیدی برای پدیده بیضی گون شدن در لوله‌های فولادی مدفون ارائه نمودند. جانگ و همکاران [۲۱] با انجام یک مطالعه تئوری و راستی‌آزمایی آن با داده‌های آزمایشگاهی به بررسی اندرکنش خاک-لوله مدفون پرداختند. آنها روابطی را برای لوله مدفون پلی اتیلن در شرایط گسلش امتدادلغز ارائه دادند. منشی‌زاده نائین و سیدی حسینی‌نیا [۲۲] آسیب‌پذیری لوله‌های مدفون فولادی در مواجهه با گسلش معکوس را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود پیوسته در نرم‌افزار آباکوس بررسی نمودند. تحلیل‌های آنها نشان داد که مود کمانش موضعی و چروکیدگی به شدت از تسلیم کششی لوله حساس تر می‌باشد. آنها همچنین بیان نمودند که ظرفیت

خاک به طور رسمی پذیرفته شد. نیروی جانبی وارده بر لوله نیز به عنوان تابعی از جنس و میزان تراکم خاک، قطر لوله و عمق دفن منظور و از رابطه (۱) 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 به صورت الاستیک-پلاستیک کامل ارائه شده و رابطه (۳) نیز برای محاسبه سختی اولیه فنرهای معادل خاک ارائه شد.

$$P_u = N_{qh} \cdot \gamma \cdot D \cdot H \quad (1)$$

$$Y_u = (0.02 \sim 0.03) \times (H + D / 2) \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{2 \times P_u}{Y_u} \quad (3)$$

اگرچه ارائه راهنمای ASCE تحولی بزرگ در تحلیل خطوط لوله به شمار می‌آید، اما در محاسبات نیروی وارده فقط قطر لوله به عنوان فاکتور مؤثر مشارکت داده شد. همچنین اثرگذاری عوامل دیگر مانند ضخامت جداره و جنس لوله در نیروی اندرکنشی نیز صرف نظر شده است. ماواریدیس و پیتلاکیس [۱۰] به ارائه روش تحلیلی جدیدی با شبیه‌سازی لوله به عنوان یک تیر بر بستری متشکل از فنر و میراگر گسترده در طول لوله پرداختند. همچنین آنها 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 بحران (FEMA) راهنمای طراحی خطوط لوله فولادی مدفون ارائه نمودند [۱۱]. 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 برینچ-هنسن در ۱۹۶۱ [۱۲] محاسبه نمود. مطالعات دیگری به منظور شبیه‌سازی شرایط گسلش امتدادلغز به روش سانتریفیوژ در مؤسسه پلی تکنیک رنسلیر روی رفتار لوله‌های پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به انجام رسید [۱۲-۱۶]. مطالعات آنها نشان داد که کرنش حداکثر، دقیقاً در محل خط گسل رخ نداده و در

گاز طبیعی در آنها با ابعاد و در حجم بالا اجرا می شود بسیار حیاتی و مهم خواهد بود.

در این تحقیق ابتدا دو آزمایش بزرگ مقیاس روی لوله های فولادی به قطرهای ۴ و ۸ اینچ (۱۱۳/۸۶ و ۲۱۸/۵۰ میلی متر) مدفون در خاک ماسه ای متراکم در محل تقاطع با یک گسل امتداد لغز انجام شد. سپس با استفاده از نتایج این آزمایش ها شبیه سازی اجزای محدود راستی آزمایی شده و بانک اطلاعاتی متشکل از ۲۴ شبیه سازی با قطرها، ضخامت های جداره و اعماق دفن مختلف تشکیل شده و تحلیل گردید. در ادامه داده های جابه جایی نقاط مختلف لوله قرائت شده و بر اساس بهینه سازی، مشخصات فزهای خاک- لوله معادل برای تمام شبیه سازی های بانک اطلاعات محاسبه شد. سپس روابطی برای نیروی جانبی در واحد طول لوله در نقطه تسلیم سیستم و جابه جایی متناظر آن ارائه گردید. این روابط با نگرشی جامع و کاربردی به اندرکنش خاک- لوله مدفون اثر ضخامت جداره لوله به عنوان یک عامل مؤثر جدید لحاظ شد. همچنین روابط ارائه شده برای لوله های فولادی مدفون در خاک ماسه متراکم و شرایط گسلش امتداد لغز معتبر می باشند.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

به منظور بررسی دقیق وضعیت اندرکنش لوله فولادی مدفون در خاک ماسه ای متراکم دو آزمایش بزرگ مقیاس روی دو لوله فولادی به قطرهای ۴ و ۸ اینچ (۱۱۳/۸۶ و ۲۱۸/۵۰ میلی متر) و به طول ۸ متر در محل آزمایشگاه تحقیقاتی سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه به انجام رسید. با انجام آزمایش کشش مستقیم روی نمونه تهیه شده از لوله طبق استاندارد ASTM A370 [۳۱]، مصالح لوله از نوع API5L-X52 [۳۲] تعیین گردید. مشخصات لوله های مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. برای تحقق شرایط واقعی در آزمایشگاه، مشابه خطوط لوله نفت و گاز، لوله های مورد آزمایش دارای پوشش قیری به ضخامت ۶ میلی متر همسان با پوشش متعارف و استاندارد در این صنایع بوده اند.

باربری خرابی به میزان قابل ملاحظه ای با کاهش عمق دفن لوله افزایش یافته است. نورزاده و همکاران [۲۳] به تحلیل عددی، آزمایشگاهی و منحنی های شکنندگی شبکه های توزیع گاز تحت اثر انتشار امواج لرزه ای پرداختند. مطالعه آنها روی شبکه گازرسانی تهران متمرکز بود. لذا در بخش اول آن تحقیق تحریک ورودی شبکه توزیع گاز تهران بزرگ بررسی شده و سپس مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای بررسی انتشار امواج و تعیین منحنی های شکنندگی به انجام رسید.

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه اندرکنش خاک و لوله مدفون که برخی از آنها به اختصار اشاره شده، روابط ارائه شده توسط راهنمای ASCE برای تمامی حالات مخاطرات لرزه ای (مانند انواع گسلش، زمین لغزش، روانگرایی و ...) یکسان است؛ در حالی که برای هر نوع مخاطره ای باید روابط خاصی با دقتی مناسب تر ارائه شود. علاوه بر این، روابط اندرکنش خاک- لوله با فرض لوله مدفون به صورت یک شالوده صلب بیشتر تابعی از مشخصات و پروفیل فشار در خاک بوده و به جز قطر لوله، هیچ مشخصات دیگری از لوله در روابط مشارکت داده نشده اند. با توجه به گستردگی مشخصات لوله های مصرفی استاندارد در صنایع (از نظر جنس، قطر و ضخامت جداره) و ضرورت تضمین ایمنی آنها بررسی جامع اندرکنش خاک- لوله بیش از پیش مطرح شده است. خرابی های متعدد در خطوط لوله انتقال و شبکه های توزیع در زلزله های نورثریج ۱۹۹۴ [۲۴-۲۶]، کوجائلی ۱۹۹۹ [۲۷]، چی چی تایوان ۱۹۹۹ [۲۸]، شیلی ۲۰۱۰ [۲۹] و کرایست چرچ نیوزلند ۲۰۱۰ [۳۰] گزارش شده که خسارات مالی و تلفات جانی قابل ملاحظه ای نیز به همراه داشته اند. این خرابی ها به طور عمده شامل شکست لوله و انشعابات آن، کمانش و لهیدگی شدید لوله در محل برخورد خط گسل بوده اند.

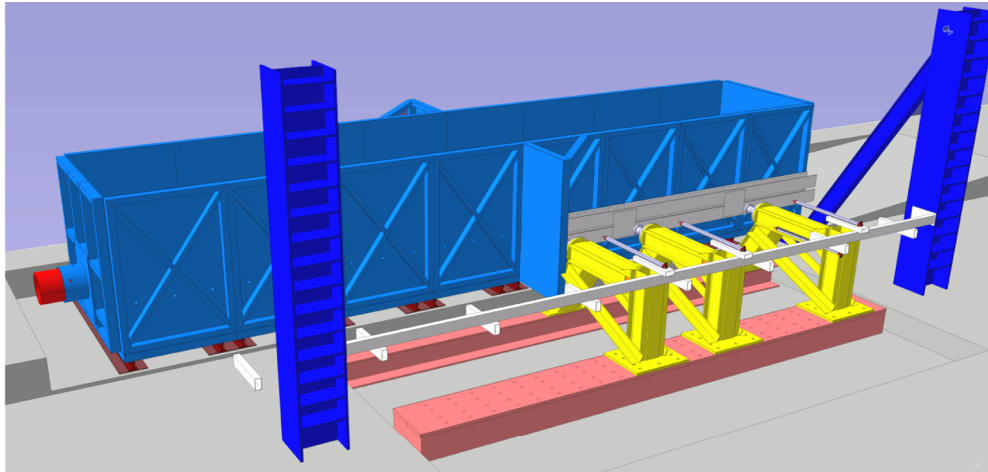
عدم کفایت روابط مربوط به تخمین نیروی حداکثر وارد بر لوله در محل گسلش و عدم جامعیت آن را می توان به عنوان یکی از دلایل این خرابی های گسترده برشمرد. این موضوع علی الخصوص برای مناطق نفت خیز جهان که خطوط لوله نفت و

جدول (۱): مشخصات لوله‌های مورد آزمایش.

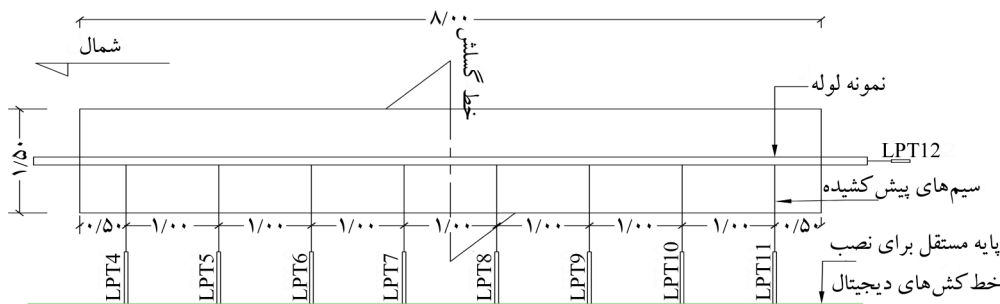
| شماره نمونه | طبقه‌بندی مصالح لوله | D (اینچ) | D (میلی‌متر) | H (میلی‌متر) | نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) | t (میلی‌متر) | D/t | ضخامت خاک بستر (میلی‌متر) | نوع پوشش سطحی روی لوله |
|-------------|----------------------|----------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------|-------|---------------------------|------------------------|
| ۱ | API5L-X52PSLII | ۴ | ۱۱۳/۸۶ | ۱۰۰۰ | ۸/۷۸۳ | ۴/۴۹ | ۲۵/۳۶ | ۳۹۳ | پوشش قیری (۶ میلی‌متر) |
| ۲ | API5L-X52PSLII | ۸ | ۲۱۸/۵۰ | ۱۰۰۰ | ۴/۵۷۷ | ۵/۱۵ | ۴۲/۴۳ | ۳۴۰ | پوشش قیری (۶ میلی‌متر) |

پیش از انجام آزمایش‌ها، ابعاد و طول محفظه آزمایش به صورتی تعیین شد که تأثیر ابعاد دستگاه در پاسخ سیستم ناچیز باشد. شانزده تحلیل اجزای محدود غیرخطی به روش دینامیکی صریح^۵ در محیط نرم‌افزار آباکوس و با ابعاد مختلف به انجام رسید. کمترین تأثیر گذاری ابعاد جعبه آزمایش در نتایج شبیه‌سازی‌ها، به ازای ابعاد حداقل دستگاه آزمایش $۱/۵۰ \times ۱/۵۰ \times ۸$ متر محقق گردید. دستگاه آزمایش، متشکل از هشت قسمت یک متری، شبیه‌ساز شرایط گسلش امتدادلغز مستقیم (بدون زاویه) می‌باشد (شکل ۲- الف). دستگاه شامل دو بخش ثابت و متحرک به طول ۴ متر می‌باشد. دستگاه از فولاد

پیش از انجام آزمایش‌ها، ابعاد و طول محفظه آزمایش به صورتی تعیین شد که تأثیر ابعاد دستگاه در پاسخ سیستم ناچیز باشد. شانزده تحلیل اجزای محدود غیرخطی به روش دینامیکی صریح^۵ در محیط نرم‌افزار آباکوس و با ابعاد مختلف به انجام رسید. کمترین تأثیر گذاری ابعاد جعبه آزمایش در نتایج شبیه‌سازی‌ها، به ازای ابعاد حداقل دستگاه آزمایش $۱/۵۰ \times ۱/۵۰ \times ۸$ متر محقق گردید. دستگاه آزمایش، متشکل از هشت قسمت یک متری، شبیه‌ساز شرایط گسلش امتدادلغز مستقیم (بدون زاویه) می‌باشد (شکل ۲- الف). دستگاه شامل دو بخش ثابت و متحرک به طول ۴ متر می‌باشد. دستگاه از فولاد



شکل (الف) طرح‌واره



(ب) پلان موقعیت نصب LPT ها

شکل (۲): دستگاه آزمایش.

به طور مجزا کالیبره شدند. محل LPTها به صورت نمادین در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. کلیه فواصل مابین قسمت‌های دستگاه با استفاده از نوارهای لاستیکی درزگیری شده بود. همچنین لودسل‌های فشاری نیروی اعمال شده جک‌ها در سیستم را به طور لحظه‌ای ثبت نمودند.

خاک ریزی و آماده‌سازی جعبه آزمایش در شش مرحله انجام شده و هر لایه به ضخامت متوسط ۲۵۰ میلی‌متر خاک ریزی و توسط تراکم‌کننده الکتریکی صفحه‌ای تا تراکم نسبی ۸۵ الی ۹۰ درصد (نسبت به تراکم حداکثر ممکن) تراکم گردید. در تراز دفن لوله، طبق روش متعارف در جاگذاری لوله‌های مدفون، شیاری حفر شده و لوله در آن قرار گرفت. فضای اطراف لوله نیز پس از نصب کرنش‌سنج‌ها و سیم‌های اتصال با ماسه تراکم پر گردید. پس از اجرای آخرین لایه از خاک و تسطیح آن شبکه به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر روی سطح خاک گچ‌ریزی و رسم گردید. شکل (۳) بخش‌های مختلف دستگاه آزمایش و مراحل مختلف آماده‌سازی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

کلیه اجزای مرکز جک‌های هیدرولیکی در ارتفاع ۴۵۰ میلی‌متر از کف جعبه آزمایش مستقر بوده و هدایت آن با استفاده از اطلاعات مبدل‌های پتانسیل متری خطی^۶ نصب شده روی جک‌ها و توسط دستگاه هدایت‌کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی^۷ به صورت خودکار به انجام رسید. همچنین هشت نقطه از لوله (در ۰/۵۰، ۱/۵۰، ۲/۵۰، ... و ۷/۵۰ متر در طول لوله) به واسطه کابل‌های از پیش کشیده شده به LPTهایی در بیرون از جعبه آزمایش وصل شده و تغییر مکان مطلق نقاط مذکور به طور مستقیم حین آزمایش قرائت و ثبت گردید. دو انتهای لوله توسط دو قطعه نگهدارنده به جعبه آزمایش متصل شده بود. این قطعات علاوه بر جلوگیری از ریزش خاک از دو انتها وظیفه تأمین شرایط مرزی برای لوله مورد آزمایش را به عهده دارند. در انتهای لوله در بخش متحرک جعبه یک مبدل پتانسیل متری خطی (LPT) نصب شد تا در هر لحظه از آزمایش میزان جابه‌جایی محوری لوله را ثبت و گزارش نماید. با استفاده از LPTها منحنی تغییر شکل لوله در هر لحظه از آزمایش به طور مستقیم و بدون واسطه به ثبت می‌رسد. پیش از شروع آزمایش‌ها هر کدام از LPTها



(ب) نمای کلی دستگاه



(الف) بخش ثابت دستگاه آزمایش



(ت) ایجاد شیار برای قرار گرفتن لوله



(ب) اجرای لایه اول خاک ریزی

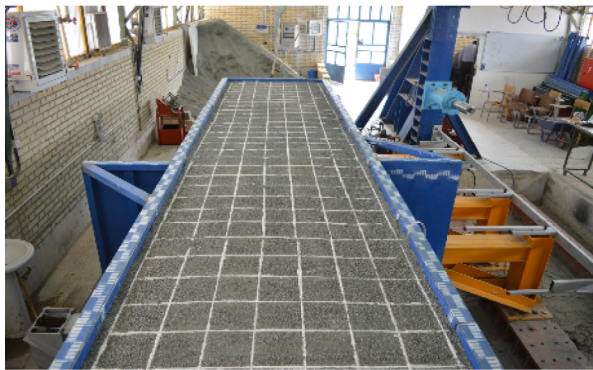
شکل (۳): مراحل انجام آزمایش.



(ج) خاک ریزی لایه روی لوله



(ث) وضعیت لوله پس از نصب کرنش‌سنج‌ها و LPTها



(ح) اجرای شبکه نهایی روی سطح خاک

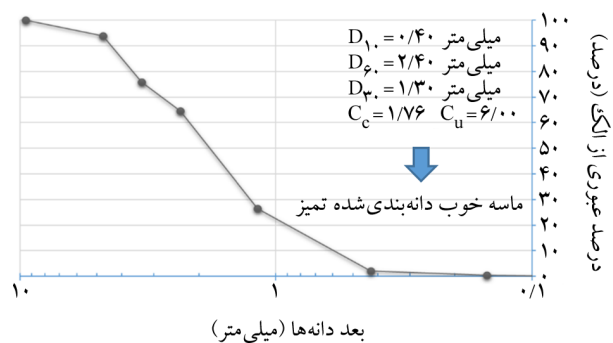


(چ) خاک ریزی لایه آخر خاک

ادامه شکل (۳).

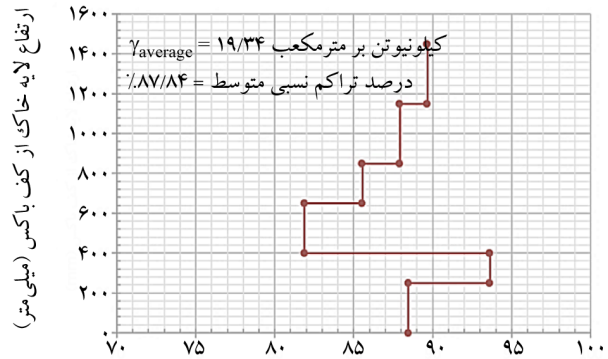
مقدار ارزش ماسه‌ای متوسط خاک موجود در دپو نیز طبق روش متعارف و استاندارد ASTM D2419 [۳۴] حدوداً ۹۳ درصد تعیین شد. ریزدانه موجود در خاک دپو شده، از حیث ترکیبات معدنی، دارای ترکیبی مشابه ماسه بوده است. پس از اجرای هر لایه و تسطیح آن، آزمایش تراکم صحرائی به روش مخروط ماسه [۳۵] در سه نقطه انجام شده و متوسط مقادیر به‌عنوان چگالی متوسط لایه انتخاب گردید. برای تعیین درصد تراکم نسبی متوسط هر لایه و مقایسه نتایج تراکم صحرائی به‌دست آمده، آزمایش تراکم به روش پروکتور اصلاح شده مطابق ASTM D1557 [۳۶] به انجام رسید. بنا بر نتایج آزمایش پروکتور حداکثر وزن مخصوص خاک ۲۱/۷۸ کیلونیوتن بر مترمکعب بوده که به ازای درصد رطوبت بهینه ۱۰/۷۰ درصد به دست آمده است. درصد تراکم نسبی صحرائی به‌صورت نسبت وزن مخصوص متوسط هر لایه به مقدار حداکثر آن تعریف گردید. پروفیل درصد تراکم نسبی در عمق خاک، برای هر دو آزمایش، تعیین شده است (شکل ۵).

خاک مورد استفاده، ماسه‌ی شکسته و تیز گوشه با محدوده دانه‌بندی صفر تا ۵ میلی‌متر و فاقد ریزدانه رسی و لای از منطقه کامیاران (در مرز استان‌های کرمانشاه و کردستان) بوده و پس از انجام آزمایش‌های مختلف ۵۲ تن از خاک به آزمایشگاه منتقل شده و دپو گردید. آزمایش دانه‌بندی با استفاده از الک‌های استاندارد مطابق ASTM D2487 [۳۳] انجام و منحنی دانه‌بندی رسم شد (شکل ۴). خاک مورد استفاده در آزمایش ماسه خوب دانه‌بندی شده تمیز و فاقد هر گونه رس و لای بوده است.

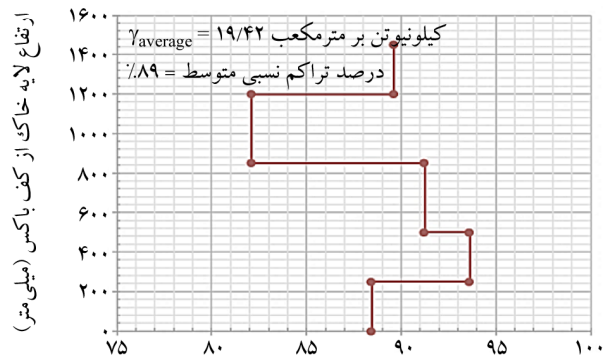


شکل (۴): منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش.

آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D3080 [۳۷] روی نمونه‌های دست خورده با درصد‌های تراکم نسبی مختلف انجام شده و مشخصات مکانیکی خاک مورد آزمایش تعیین شد. برای تراکم متوسط به دست آمده در پروفیل‌های خاک ارائه شده در آزمایش (شکل ۵)، میزان زاویه اصطکاک داخلی (Φ) حدوداً برابر ۴۰ درجه به دست آمده است. تعیین مشخصات فولاد مصرفی لوله نیز با انجام آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM A370 [۳۱] انجام شد. فولاد مصرفی از کلاس API 5L-X52 بوده و مقادیر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته آن به ترتیب برابر ۳۱۸/۵۰ و ۲۳۳/۲۶ گیگاپاسکال می‌باشد. همچنین مقدار نسبت پواسون فولاد مصرفی نیز تا پایان ناحیه خطی برابر ۰/۳۰ به دست آمد. شکل (۶) منحنی تنش کرنش فولاد مصرفی در دو لوله مورد آزمایش و شکل‌های (۷) و (۸) نیز به ترتیب مراحل مختلف آزمایش‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. تغییر شکل نقاط مختلف لوله حین آزمایش‌ها به طور پیوسته توسط LPT‌های متصل به لوله ثبت شده و منحنی تغییر شکل لوله‌های مورد آزمایش به ازای جابه‌جایی‌های متفاوت گسل در شکل (۹) نشان داده شده است.



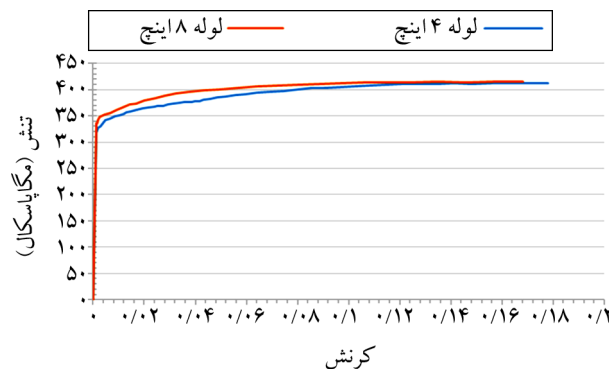
الف) آزمایش ۱



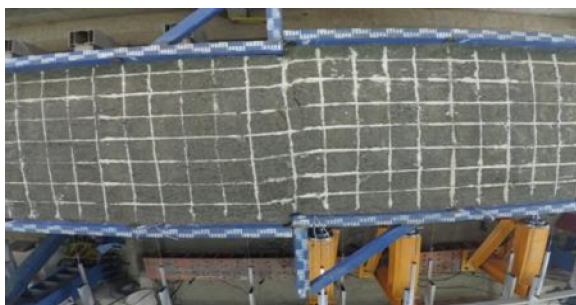
ب) درصد تراکم نسبی خاک (درصد)

ب) آزمایش ۲

شکل (۵): پروفیل درصد تراکم نسبی لایه‌های خاک نسبت به ارتفاع لایه از کف جعبه آزمایش.



شکل (۶): منحنی تنش - کرنش فولاد مصرفی در لوله‌های مورد آزمایش.

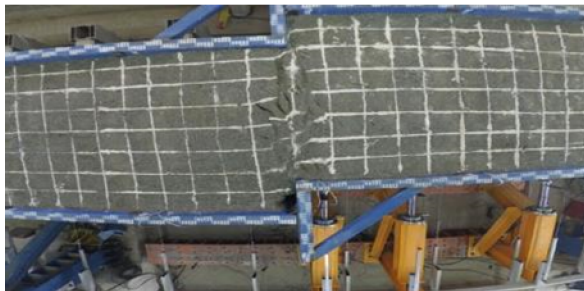


ب) پس از ۱۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی

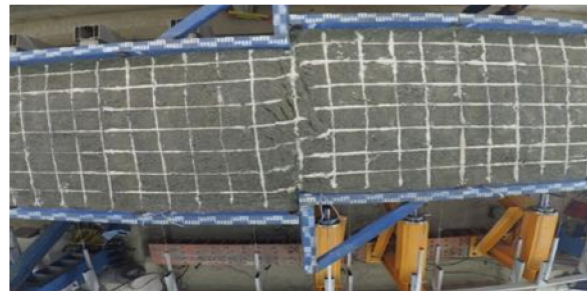


الف) قبل از جابه‌جایی جعبه آزمایش

شکل (۷): مراحل آزمایش یک.



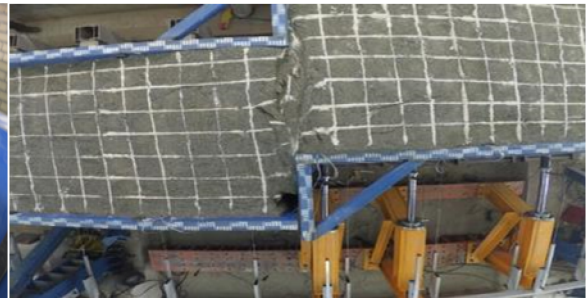
(ت) پس از ۳۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی



(پ) پس از ۲۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی

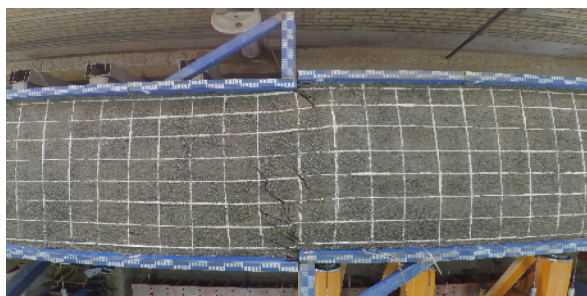


(ج) تغییر شکل ماندگار در لوله پس از برداشت خاک

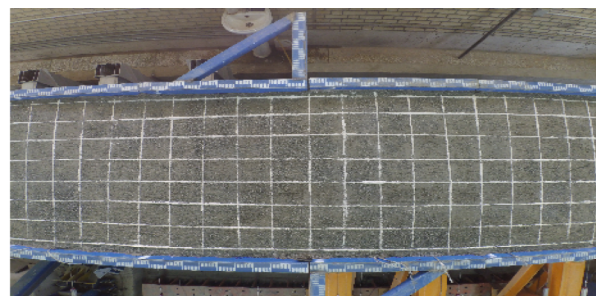


(ث) در جابه‌جایی انتهای بارگذاری

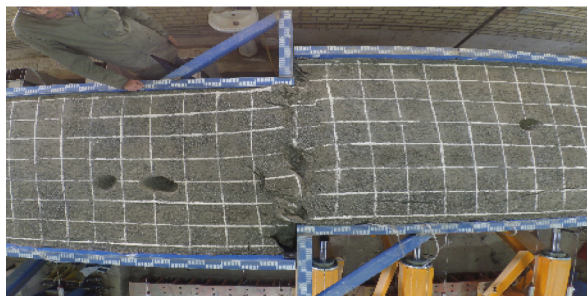
ادامه شکل (۲).



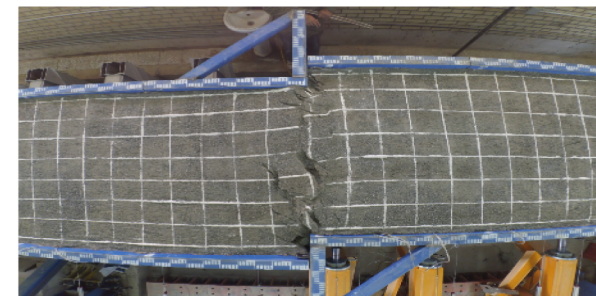
(ب) پس از ۱۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی



(الف) قبل از جابه‌جایی جعبه آزمایش



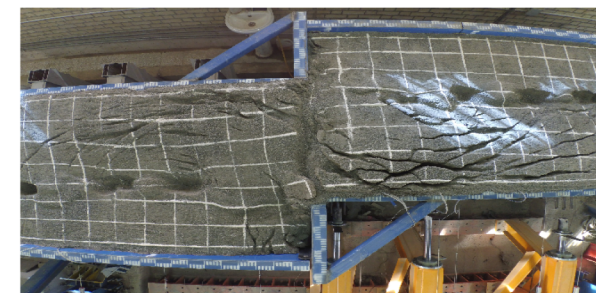
(ت) پس از ۳۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی



(پ) پس از ۲۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی

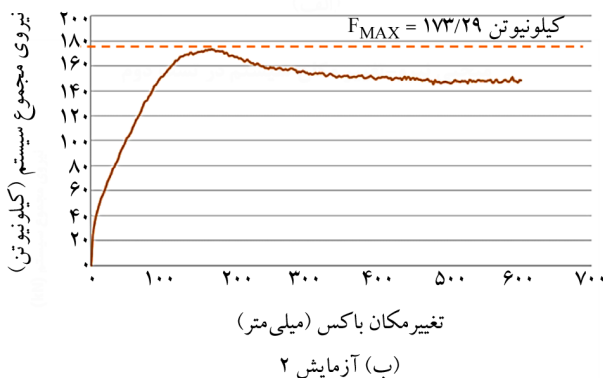
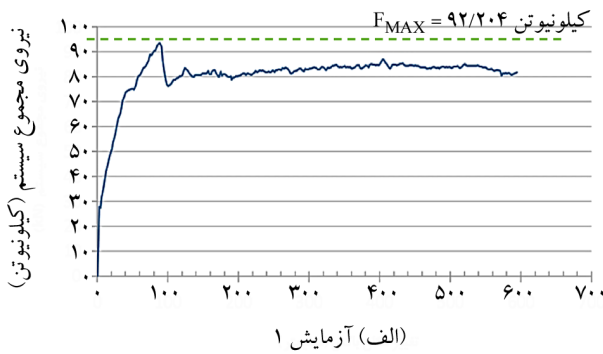


(ج) تغییر شکل ماندگار در لوله پس از برداشت خاک



(ث) در جابه‌جایی انتهای بارگذاری

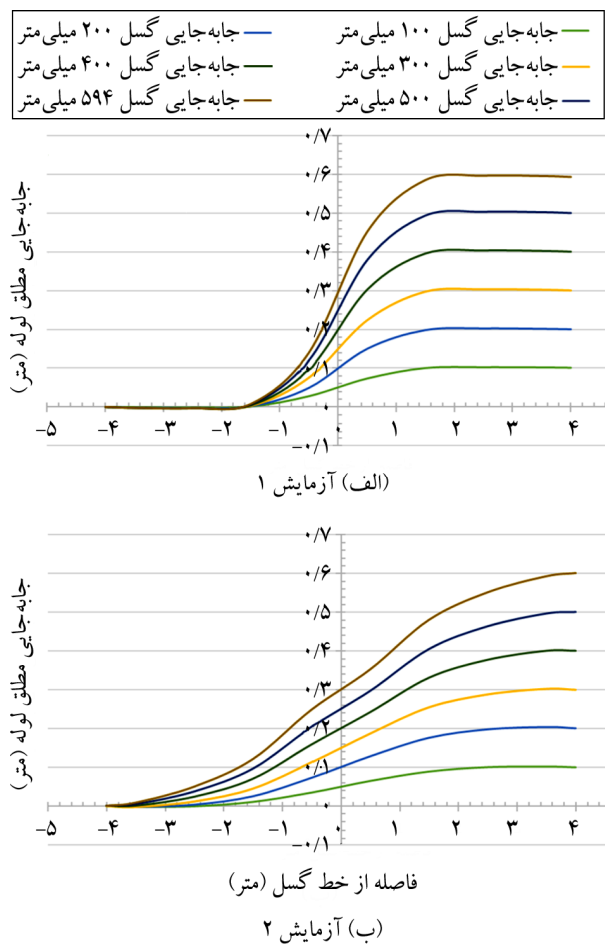
شکل (۸): مراحل آزمایش دو.



شکل (۱۰): منحنی مجموع نیروی اعمال شده به سیستم از طرف جک‌ها بر حسب جابه‌جایی گسل.

۳- مطالعات عددی و توسعه نرم‌افزار

برای تعیین ظرفیت سیستم خاک لوله پس از انجام مطالعه آزمایشگاهی، نرم‌افزار سامانه بهینه‌سازی اندرکنش خاک-لوله مدفون (BPSIOS) تهیه شد. شبیه‌سازی لوله‌های مدفون به صورت تیر بر روی بستر فنی به شرطی معتبر است که تغییر شکل لوله با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشته باشد. در صورت تطابق تغییر شکل لوله شبیه‌سازی شده با تغییر شکل واقعی آن نیروی وارد شده بر لوله (اعم از مقدار نیرو و الگوی اعمال آن در طول لوله) تطابق خواهد داشت. برای تعیین مشخصات فنرهای معادل خاک ابتدا داده‌های مربوط به جابه‌جایی هشت نقطه بر روی لوله در چند گام از بارگذاری به‌عنوان داده پیش فرض به نرم‌افزار BPSIOS داده می‌شود. هدف نرم‌افزار این است که سختی فنرهای معادل خاک را طوری به دست آورد که تغییر شکل مطلق لوله با داده‌های آزمایشگاهی یکسان شود. به این منظور کل جابه‌جایی گسل در ۱۲ گام مجزا با جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر تقسیم شده و جابه‌جایی به صورت گام‌به‌گام به پای

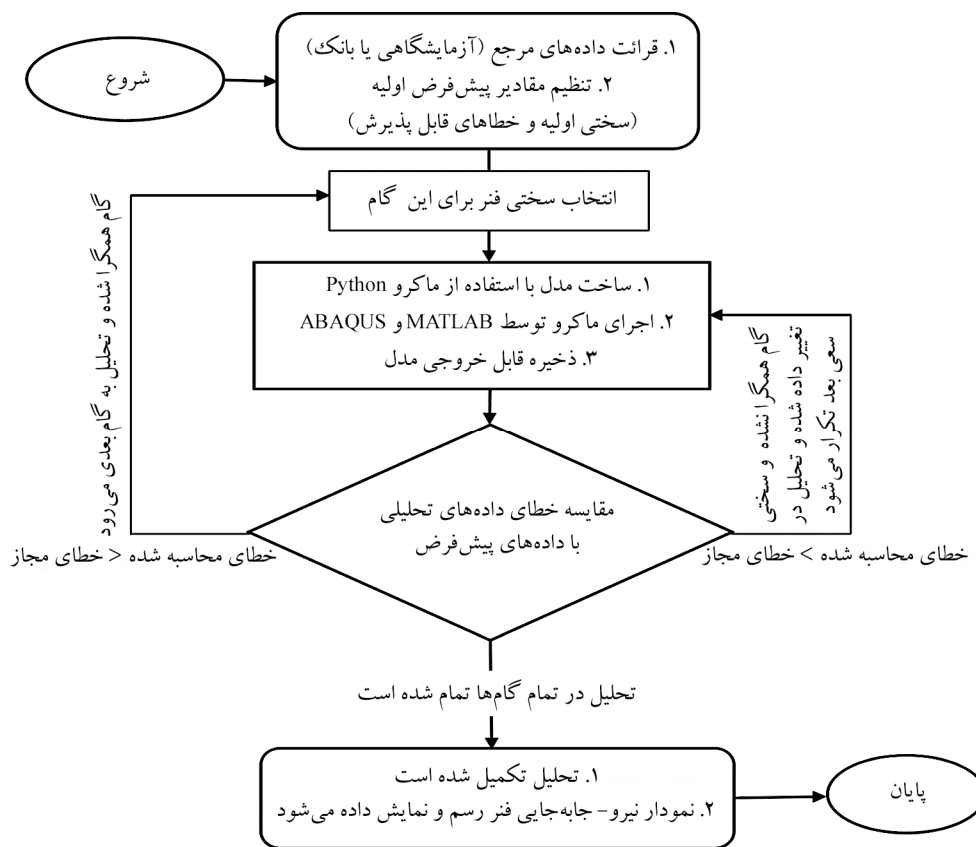


شکل (۹): منحنی تغییر شکل لوله به ازای جابه‌جایی مختلف گسل.

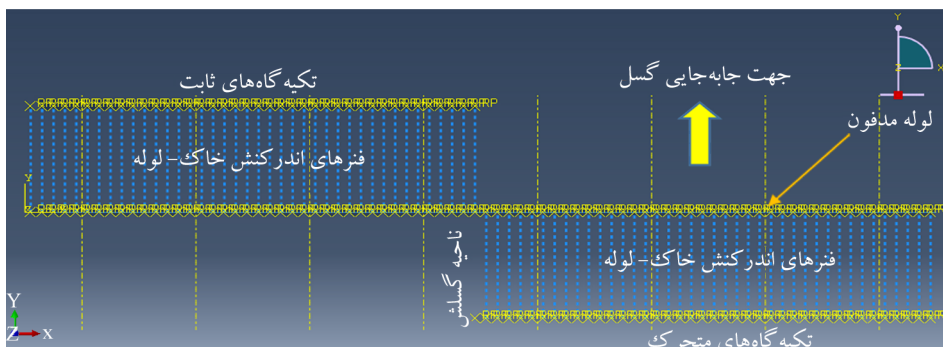
نیروهای اعمال شده از طرف جک‌های هیدرولیکی به سیستم در هر لحظه حین آزمایش توسط سه عدد لودسل فشاری اندازه‌گیری و ثبت گردید. مجموع نیروهای اعمال شده از طرف جک‌های هیدرولیکی بر حسب تغییر مکان گسل برای آزمایش‌های یک و دو در شکل (۱۰) ارائه شده است. از آنجایی که تغییر شکل لوله در راستای آن ثابت نبوده است نیروها و تنش‌های رخ داده در نقاط مختلف آن نیز یکسان نخواهد بود. همچنین علاوه بر نیروی اندرکنش خاک-لوله مدفون در سیستم نیروهای دیگری نیز اثر می‌کنند (مانند مقاومت برشی داخل خاک در مقطع گسل و اصطکاک اجزای سیستم)؛ بنابراین نیروی قرائت شده را نمی‌توان به‌عنوان نیروی اندرکنش خاک-لوله پذیرفت. در ادامه رویکرد دیگری برای تعیین فنرهای معادل ارائه شده است.

شده توسط BPSIOS به فواصل ۱۰۰ میلی‌متر مش شده و به هر یک از گره‌های تعریف شده یک فنر متصل شده است. پس از انجام شبیه‌سازی در آباکوس جابه‌جایی هشت نقطه مورد نظر توسط MATLAB قرائت شده خطا در آن گام محاسبه می‌شود. در صورتی که میزان انحراف محاسبه شده از مقدار خطای مجاز کمتر باشد گام اول همگرا شده است در غیر این صورت با تغییر سختی و مشخصات فنرها، در سعی‌های مختلف، تحلیل به حدی تکرار می‌شود که تحلیل در گام اول همگرا شود.

فنرها در بخش متحرک اعمال می‌شود (فلوچارت شکل ۱۱). در گام اول مقدار اولیه دلخواهی برای سختی فنر معادل خاک-لوله فرض شده و سپس یک کد دستوری از پیش طراحی شده در نرم‌افزار کد نویسی پایتون^۸ فراخوانده شده و توسط آباکوس اجرا می‌گردد. آباکوس یک شبیه‌سازی از تیر بر روی بستر فنی به طول ۸ متر و با ابعاد واقعی مقطع ساخته و جابه‌جایی گسل را به پای فنرها اعمال می‌کند. شکل (۱۲) یک طرح‌واره از سازه شبیه‌سازی شده توسط BPSIOS را نشان می‌دهد. لوله شبیه‌سازی



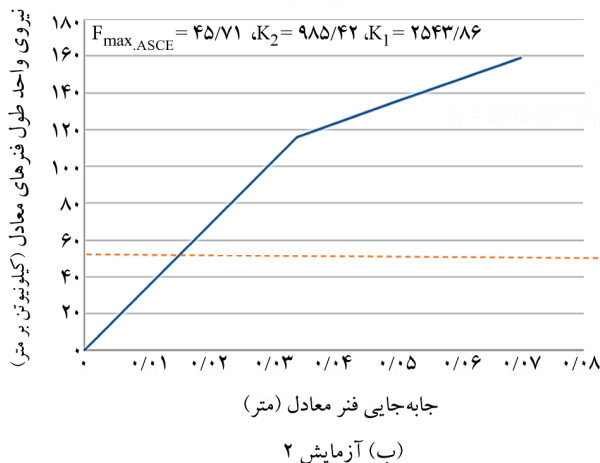
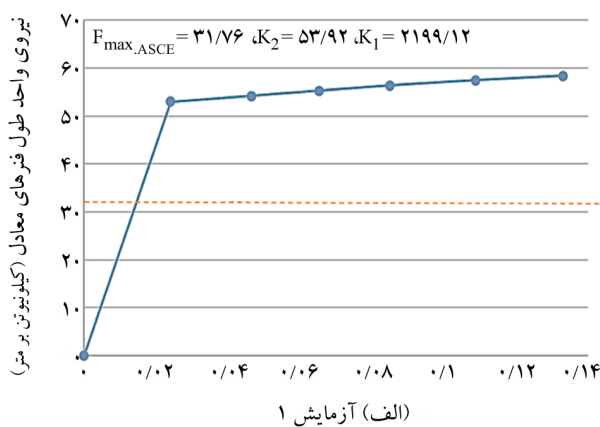
شکل (۱۱): فلوچارت نرم‌افزار BPSIOS.



شکل (۱۲): طرح‌واره تیر بر بستر فنی ساخته شده توسط BPSIOS در محیط ABAQUS.

منحنی های نیرو- جابه جایی فنرهای تکیه گاهی، برای نمونه های مورد آزمایش، توسط نرم افزار تحلیل و در شکل (۱۳) ارائه شده است. نرم افزار قادر است مشخصات فنرهای تکیه گاهی را به نحوی تعیین کند که تغییر شکل تحلیلی لوله با داده های آزمایشگاهی تطابق بسیار بالایی داشته باشد. به عنوان نمونه تطابق بین شبیه سازی تحلیل شده توسط BPSIOS و آزمایش ۲ به ازای جابه جایی های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی متر گسل نشان داده شده است (شکل ۱۴).

به منظور مقایسه، نتایج روش تحلیلی BPSIOS نیروی جانبی حداکثر اندرکنش خاک- لوله مدفون با استفاده از روابط آئین نامه ای محاسبه شده و به صورت خط چین در شکل (۱۳) آمده است. مقادیر نیروی تسلیم تحلیلی به دست آمده از خروجی BPSIOS از مقادیر نیروی حداکثر ارائه شده توسط آئین نامه ASCE بیشتر بوده است. عدم تأثیرپذیری نیروی ارائه شده در آئین نامه ASCE از مشخصات لوله (مانند جنس و ضخامت جداره لوله) و الگوی جابه جایی اعمال شده را می توان از دلایل این اختلاف دانست.



شکل (۱۳): منحنی نیرو- جابه جایی فنرهای معادل خاک.

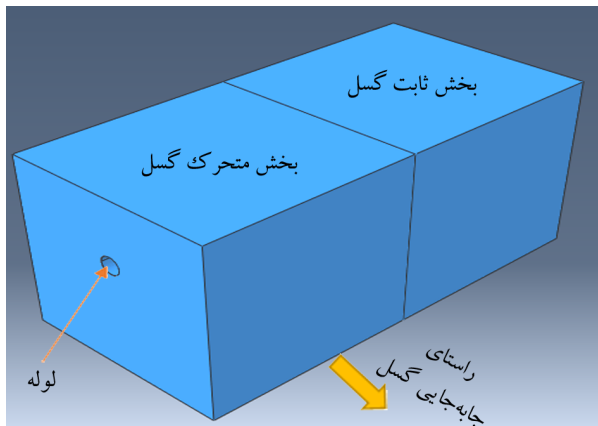
در گام دوم مقدار سختی ابتدا برابر مقدار همگرا شده در گام قبل منظور شده و محاسبات مانند گام اول تا همگرایی کامل ادامه خواهد داشت. نرم افزار BPSIOS می تواند مشخصات فنر معادل خاک را به نحوی تعیین نماید که منحنی تغییر شکل لوله شبیه سازی شده دقیقاً با شرایط واقعی مسئله انطباق داشته باشد. BPSIOS قادر است تحلیل را در ۱۰۰۰ گام به انجام برساند که در هر گام نیز ۱۰۰۰ سعی قابل انجام بوده و بهینه سازی به طور مناسبی قابل انجام است. مشخصات شبیه سازی ساخته شده اعم از هندسه لوله (شعاع مقطع، طول لوله و ضخامت جداره آن) و مشخصات تنش- کرنش مصالح لوله دقیقاً با نمونه واقعی انطباق داشته و در هر سعی، خطا به صورت جذر مجموع مربعات انحراف جابه جایی های محاسبه شده (رابطه ۴) در شبیه سازی با مقادیر جابه جایی پیش فرض در آن گام می باشد. این تحلیل گام به گام تا همگرایی آخرین گام تعریف شده ادامه می یابد. با همگرایی هر گام از تحلیل مشخصات نیرو- جابه جایی نسبی فنرهای معادل خاک لوله محاسبه شده و نهایتاً به صورت یک نمودار چند خطی ارائه می گردد. در ادامه به منظور ساده سازی این نمودار با دو خطی معادل معادل سازی خواهد گردید. مشخصات فنرهای منظور شده در طول لوله ثابت فرض شده است، ولی نیروی اعمال شده به لوله متناسب با تغییر شکل لوله در طول آن متفاوت خواهد بود.

$$\text{خطای مجموع محاسبه شده در هر سعی} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (D_i - d_i)^2} \quad (4)$$

D_i : جابه جایی پیش فرض نقطه آام ارائه شده در همان گام

d_i : جابه جایی نقطه آام در هر سعی از تحلیل

لازم به ذکر است که نرم افزار BPSIOS هیچ فرض اولیه ای برای مشخصات فنرهای تکیه گاهی منظور نکرده و تنها با دریافت مقدار اولیه سختی و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی منحنی نیرو- جابه جایی فنرهای معادل خاک تعیین می شود. با توجه به انطباق تغییر شکل لوله با مقادیر واقعی، به ازای تحریک جابه جایی گسل، مشخصات تعیین شده فنرهای تکیه گاهی با واقعیت انطباق دارد. همچنین صحت نتایج و همگرایی الگوریتم ارائه شده در BPSIOS با حل مثال های عددی بررسی و با داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی های اجزای محدود سه بعدی راستی آزمایی گردید.

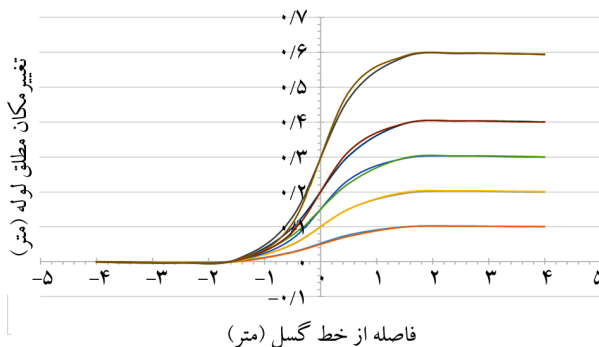


شکل (۱۵): طرح‌واره‌ی شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی اجزای محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس.

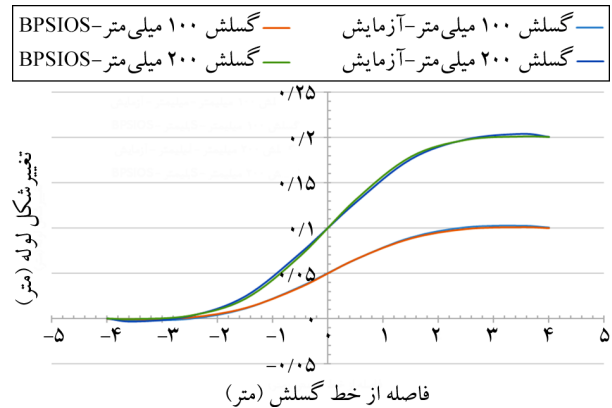
جدول (۲): مشخصات راستی‌آزمایی شده مصالح در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود.

| مشخصات خاک | |
|---|-----------------------------------|
| زاویه اصطکاک داخلی (Φ): ۴۰ درجه | زاویه اتساع: ۱۰ درجه |
| نسبت پواسون (ν): ۰/۴۰ | نسبت جریان تنش: ۰/۸۰ |
| وزن مخصوص: ۱۹/۳۳۵ کیلو نیوتن بر مترمربع | مدول الاستیسیته: ۲۷۰ مگاپاسکال |
| مشخصات سخت‌شوندگی فشاری خاک | |
| کرنش پلاستیک مطلق | تنش تسلیم (کیلو پاسکال) |
| ۰ | ۵۰۰۰ |
| ۰/۱۰ | ۶۰۰۰۰ |
| مشخصات فولاد لوله | |
| چگالی: ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب | مدول الاستیسیته: ۲۳۳۲۶۱ مگاپاسکال |
| حداکثر بعد شبکه‌بندی: ۳۰ میلی‌متر | نسبت پواسون (ν): ۰/۳ |

| داده‌های تحلیلی | داده‌های آزمایشگاهی |
|-------------------|---------------------|
| گسلش ۱۰۰ میلی‌متر | گسلش ۱۰۰ میلی‌متر |
| گسلش ۲۰۰ میلی‌متر | گسلش ۲۰۰ میلی‌متر |
| گسلش ۳۰۰ میلی‌متر | گسلش ۳۰۰ میلی‌متر |
| گسلش ۴۰۰ میلی‌متر | گسلش ۴۰۰ میلی‌متر |
| گسلش ۶۰۰ میلی‌متر | گسلش ۶۰۰ میلی‌متر |



شکل (۱۶): منحنی مقایسه‌ای تغییر شکل لوله آزمایش ۱ از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده.



شکل (۱۴): مقایسه نتایج تغییر شکل مطلق لوله در آزمایش ۲ و خروجی BPSIOS در دو جابه‌جایی ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر گسل.

۴- مدل‌سازی المان محدود و ایجاد بانک اطلاعات

در ادامه بانک اطلاعاتی متشکل از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود سه‌بعدی دقیقاً با شرایط آزمایش فوق در محیط نرم‌افزار آباکوس ساخته و به روش دینامیکی صریح^۹ تحلیل شد. منحنی تنش-کرنش لوله مشابه شکل (۶) منظور گردید. فرم طرح‌واره شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی در محیط آباکوس (برای صحت‌سنجی داده‌های آزمایشگاهی و ایجاد بانک اطلاعاتی) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مشخصات راستی‌آزمایی شده از شبیه‌سازی‌های صحت‌سنجی در جدول (۲) ارائه شده است. این پارامترها در تمام شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده خواهد شد.

لایه مرزی بین خاک و لوله نیز به صورت اتصال سخت و با در نظر گرفتن اصطکاک روی جداره بیرونی لوله شبیه‌سازی شد. با توجه به داده‌های تغییر مکان محوری انتهای آزاد لوله (ثبت شده توسط LPT12) که ضریب اصطکاک سطحی لایه تماس محاسبه و برابر ۰/۴۰ منظور گردید. برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، آزمایش یک (لوله به قطر ۱۱۳/۸۶ میلی‌متر) شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس با استفاده از مقادیر جدول (۲) شبیه‌سازی گردید. شکل (۱۶) منحنی مقایسه‌ای تغییر شکل لوله آزمایش یک در شبیه‌سازی عددی و آزمایش را در گام‌های مختلف تحلیل نشان می‌دهد. لذا می‌توان بیان نمود که با تنظیم عوامل مؤثر در شبیه‌سازی مطابق جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی تا گسلش ۴۰۰ میلی‌متر دارای انطباق مناسبی با واقعیت می‌باشد.

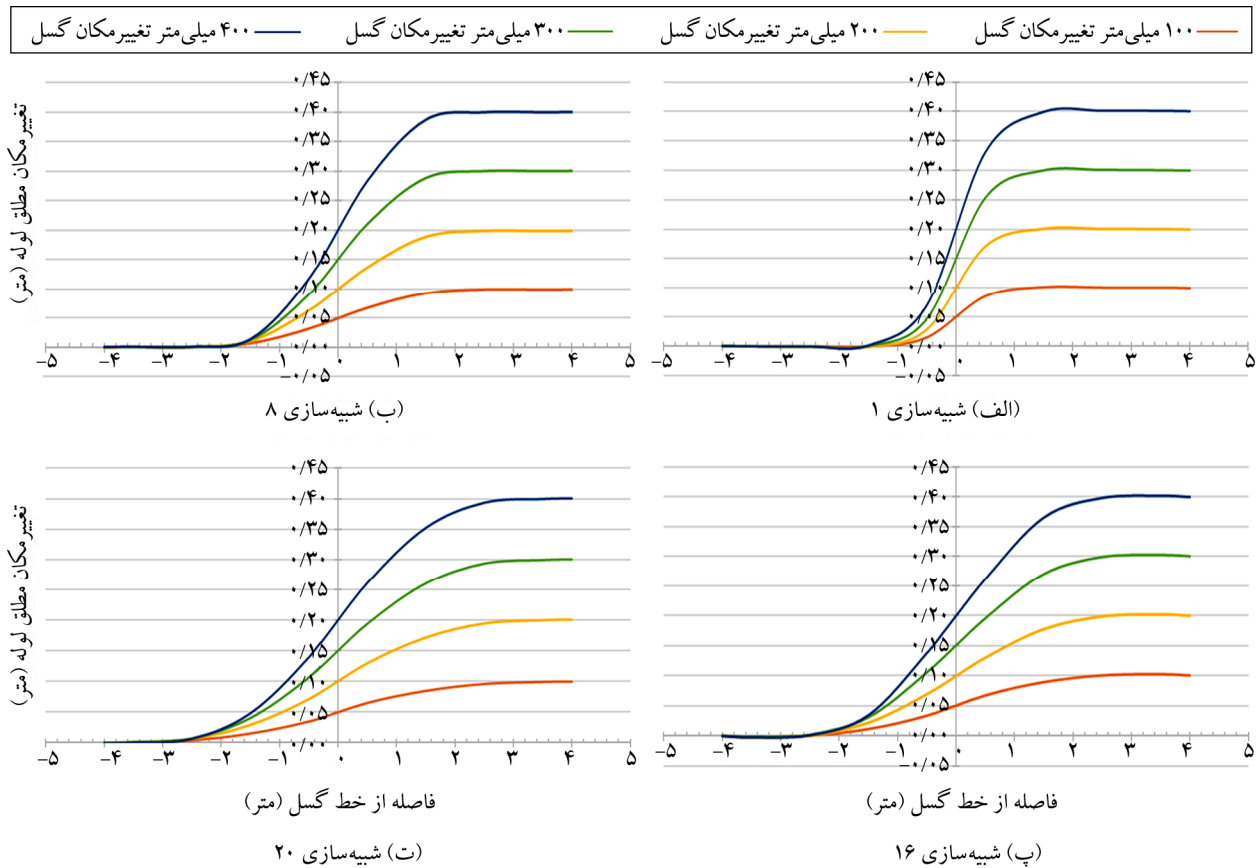
H/D ثابت و برابر ۸ باشد. به منظور اطمینان از عدم تأثیر گذاری ابعاد خاک شبیه سازی شده ابعاد خاک در تمام شبیه سازی ۴۰۰۰×۴۰۰۰×۸۰۰۰ میلی متر منظور و با اعضای حجیم شبیه سازی گردید. همچنین لوله با استفاده از اعضای پوسته ای (Shell) شبیه سازی شد.

تمامی شبیه سازی های ارائه شده در بانک اطلاعاتی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده و تا جابه جایی هدف ۴۰۰ میلی متر تحلیل شدند. شکل های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب جابه جایی لوله به ازای جابه جایی های مختلف گسل و فرم تغییر شکل یافته لوله در شبیه سازی های مختلف را نشان می دهند. این جابه جایی، متوسط جابه جایی سمت راست و چپ لوله در آن مقطع از لوله بوده است.

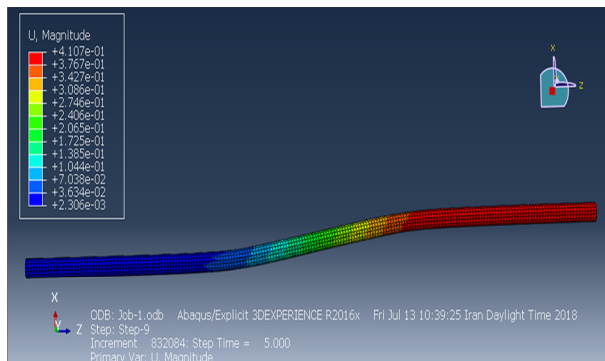
در ادامه یک بانک اطلاعاتی متشکل از ۲۴ شبیه سازی اجزای محدود با ابعاد مندرج در جدول (۳) و مشخصات راستی آزمایی شده مصالح (جدول ۲) ساخته شد. کلیه شبیه سازی ها به روش دینامیکی صریح در محیط نرم افزار آباکوس تحلیل شدند. بانک اطلاعاتی مذکور متشکل از لوله های پیوسته فولادی در چهار قطر مختلف ۴، ۸/۶۲۵، ۱۲/۷۵ و ۱۶ اینچ (به ترتیب معادل ۱۰۱/۶، ۲۱۹/۱۰، ۳۲۳/۹۰ و ۴۰۶/۴ میلی متر) و در هر قطر شش ضخامت جداره مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. ضخامت های جداره به نحوی تنظیم شد که نسبت های D/t نیز در یک محدوده قرار گیرند. همچنین کلیه لوله های شبیه سازی شده دارای استاندارد ابعادی مورد استفاده در صنایع نفت و گاز بوده و مطابق جداول API 5L [۳۲] انتخاب شده اند. عمق دفن لوله ها به نحوی تعیین شد که نسبت

جدول (۳): مشخصات شبیه سازی بانک اطلاعات.

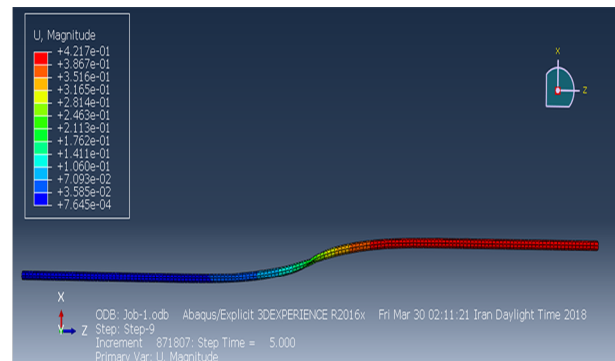
| D/t | H/D | ضخامت جداره لوله (میلی متر) | ضخامت جداره لوله (اینچ) | عمق دفن لوله H (میلی متر) | ابعاد خاک (میلی متر) | | | D (میلی متر) | قطر اسمی لوله (اینچ) | شماره شبیه سازی |
|--------|-----|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------|------|--------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | ارتفاع | عرض | طول | | | |
| ۴۸/۱۹۳ | ۸ | ۲/۱۱ | ۰/۰۸۳ | ۸۱۲/۸ | ۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۱۰۱/۶ | ۴ | St-t-1 |
| ۳۲/۰۰۰ | | ۳/۱۸ | ۰/۱۲۵ | | | | | | | St-t-2 |
| ۲۸/۳۶۹ | | ۳/۵۸ | ۰/۱۴۱ | | | | | | | St-t-3 |
| ۲۳/۲۵۶ | | ۴/۳۷ | ۰/۱۷۲ | | | | | | | St-t-4 |
| ۱۷/۶۹۹ | | ۵/۷۴ | ۰/۲۲۶ | | | | | | | St-t-5 |
| ۱۲/۵۷۹ | | ۸/۰۸ | ۰/۳۱۸ | | | | | | | St-t-6 |
| ۴۵/۸۷۸ | ۸ | ۴/۷۸ | ۰/۱۸۸ | ۱۷۵۲/۶ | ۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۲۱۹/۰۸ | ۸/۶۲۵ | St-t-7 |
| ۳۴/۵۰۰ | | ۶/۳۵ | ۰/۲۵ | | | | | | | St-t-8 |
| ۲۷/۶۴۴ | | ۷/۹۲ | ۰/۳۱۲ | | | | | | | St-t-9 |
| ۲۳/۰۰۰ | | ۹/۵۳ | ۰/۳۷۵ | | | | | | | St-t-10 |
| ۱۷/۲۵۰ | | ۱۲/۷۰ | ۰/۵ | | | | | | | St-t-11 |
| ۱۱/۹۹۶ | | ۱۸/۲۶ | ۰/۷۱۹ | | | | | | | St-t-12 |
| ۴۵/۳۷۴ | ۸ | ۷/۱۴ | ۰/۲۸۱ | ۲۵۹۰/۸ | ۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۳۲۳/۸۵ | ۱۲/۷۵ | St-t-13 |
| ۳۴/۰۰۰ | | ۹/۵۳ | ۰/۳۷۵ | | | | | | | St-t-14 |
| ۲۹/۱۱۰ | | ۱۱/۱۳ | ۰/۴۳۸ | | | | | | | St-t-15 |
| ۲۲/۶۸۷ | | ۱۴/۲۷ | ۰/۵۶۲ | | | | | | | St-t-16 |
| ۱۷/۰۰۰ | | ۱۹/۰۵ | ۰/۷۵ | | | | | | | St-t-17 |
| ۱۲/۰۰۶ | | ۲۶/۹۷ | ۱/۰۶۲ | | | | | | | St-t-18 |
| ۴۶/۵۱۲ | ۸ | ۸/۷۴ | ۰/۳۴۴ | ۳۲۵۱/۲ | ۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۶/۴ | ۱۶ | St-t-19 |
| ۳۴/۱۱۵ | | ۱۱/۹۱ | ۰/۴۶۹ | | | | | | | St-t-20 |
| ۲۸/۴۷۰ | | ۱۴/۲۷ | ۰/۵۶۲ | | | | | | | St-t-21 |
| ۲۳/۲۵۶ | | ۱۷/۴۸ | ۰/۶۸۸ | | | | | | | St-t-22 |
| ۱۷/۰۵۸ | | ۲۳/۸۳ | ۰/۹۳۸ | | | | | | | St-t-23 |
| ۱۲/۸۰۰ | | ۳۱/۷۵ | ۱/۲۵ | | | | | | | St-t-24 |



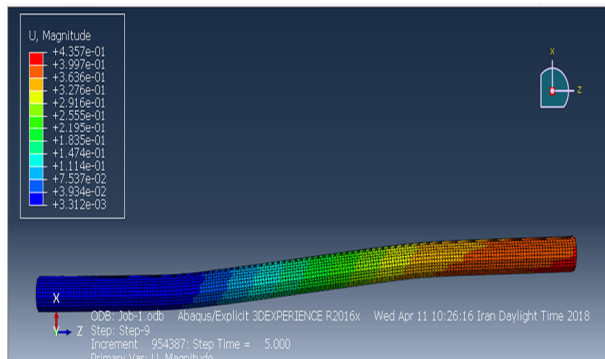
شکل (۱۷): تغییر شکل مطلق لوله در مراحل مختلف گسلش.



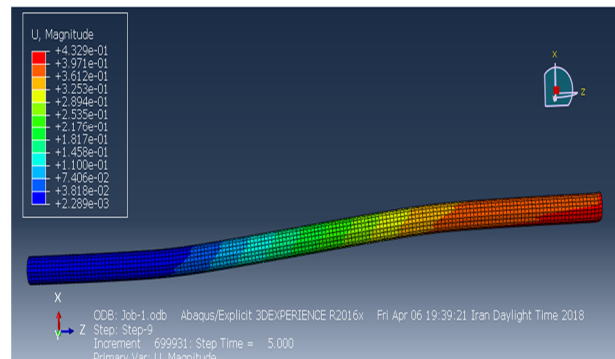
شبه‌سازی ۸ (ب)



شبه‌سازی ۱۶ (الف)



شبه‌سازی ۲۰ (ت)



شبه‌سازی ۴۰ (پ)

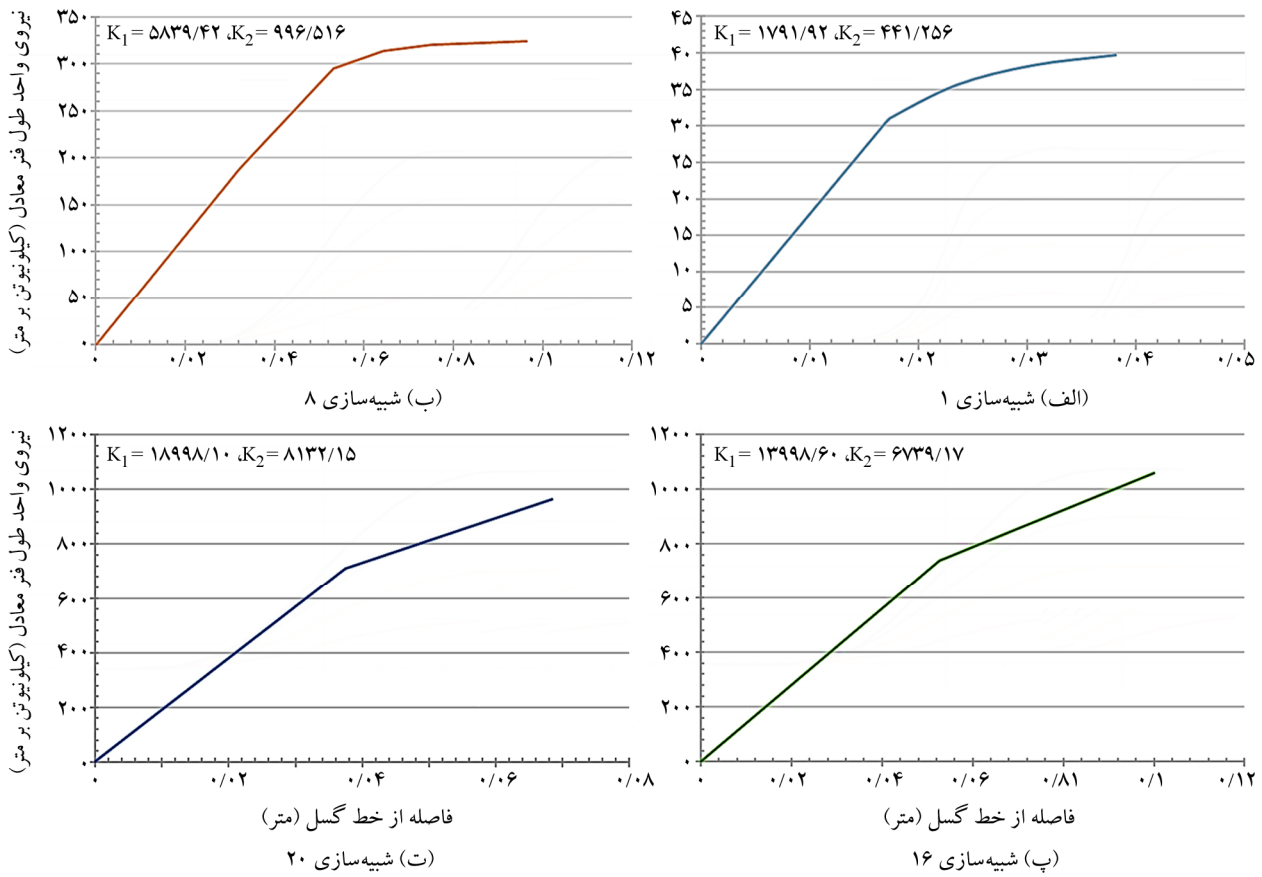
شکل (۱۸): تغییر شکل لوله در آخرین لحظه از گسلش در محیط نرم‌افزار آباکوس.

و به نرم افزار BPSIOS وارد گردید. شکل (۱۹) منحنی نیرو-جابه‌جایی نسبی فنرهای معادل خاک را برای برخی از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. همچنین تقریب دو خطی نیز روی نمودارها اعمال شده و مشخصات مربوط به فنرها و تقریب دو خطی آن در جدول (۴) ارائه شده است.

برای تکمیل داده‌های بانک اطلاعاتی و امکان مقایسه مشخصات فنرهای اندرکنشی تحلیلی با آئین‌نامه ASCE نتایج شبیه‌سازی‌های عددی غیرخطی سه‌بعدی با نرم‌افزار BPSIOS تحلیل شدند. به این منظور مقادیر متوسط جابه‌جایی لوله (در همان هشت نقطه مرجع) از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی قرائت شده

جدول (۴): مشخصات فنرهای معادل خاک و تقریب دو خطی آن برای شبیه‌سازی‌های بانک اطلاعاتی.

| شماره شبیه‌سازی | قطر لوله (اینچ) | قطر لوله (میلی‌متر) | عمق دفن لوله H (میلی‌متر) | ضخامت جداره لوله (میلی‌متر) | H/D | D/t | نیروی تسلیم فنرهای خاک Py (کیلو نیوتن بر متر) | جابه‌جایی تسلیم فنرهای خاک Yy (متر) | سختی اولیه فنرهای خاک K1 (kN/m/m) | سختی ثانویه فنرهای خاک K2 (kN/m/m) |
|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|-----|-------|---|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| St-t-1 | ۴ | ۱۰۱/۶ | ۸۱۲/۸ | ۲/۱۱ | ۸ | ۴۸/۱۹ | ۳۰/۳۲ | ۰/۰۱۷ | ۱۷۹۱/۹۲ | ۴۴۱/۲۵۶ |
| St-t-2 | | | | | | ۳۲/۰۰ | ۴۴/۸۷ | ۰/۰۱۷ | ۲۶۹۹/۷۳ | ۶۴۴/۴۸۶ |
| St-t-3 | | | | | | ۲۸/۳۶ | ۵۰/۳۹ | ۰/۰۱۴ | ۳۵۲۰/۶۲ | ۱۰۸۸/۸۱ |
| St-t-4 | | | | | | ۲۳/۲۵ | ۶۰/۰۷ | ۰/۰۱۷ | ۳۵۶۰ | ۱۶۴۷/۳۱ |
| St-t-5 | | | | | | ۱۷/۶۹ | ۷۵/۵۵ | ۰/۰۱۸ | ۴۱۳۹/۵۹ | ۸۲۰/۱۲۱ |
| St-t-6 | | | | | | ۱۲/۵۷ | ۹۵/۲۹ | ۰/۰۲۱ | ۴۴۹۹/۵۵ | ۱۱۹۲/۷۶ |
| St-t-7 | ۸/۶۲۵ | ۲۱۹/۰۸ | ۱۷۵۲/۶ | ۴/۷۸ | ۸ | ۴۵/۸۷ | ۱۷۱/۷ | ۰/۰۳۱ | ۵۵۹۹/۴۴ | ۲۲۴۴/۶۰ |
| St-t-8 | | | | | | ۳۴/۵۰ | ۲۷۴/۹ | ۰/۰۴۷ | ۵۸۳۹/۴۲ | ۹۹۶/۵۱۶ |
| St-t-9 | | | | | | ۲۷/۶۴ | ۲۸۳/۷ | ۰/۰۴۶ | ۶۱۹۹/۳۸ | ۷۱۲/۶۸۴ |
| St-t-10 | | | | | | ۲۳/۰۰ | ۳۷۰/۵ | ۰/۰۵۹ | ۶۲۹۹/۳۷ | ۲۷۹/۹۵ |
| St-t-11 | | | | | | ۱۷/۲۵ | ۴۲۵/۲ | ۰/۰۶۱ | ۶۶۸۱/۷۹ | ۹۰۴/۲۲ |
| St-t-12 | | | | | | ۱۲/۰۰ | ۴۴۴/۶ | ۰/۰۵۱ | ۸۷۹۹/۱۲ | ۴۲۵۱/۸۵ |
| St-t-13 | ۱۲/۷۵ | ۳۲۳/۸۵ | ۲۵۹۰/۸ | ۷/۱۴ | ۸ | ۴۵/۳۷ | ۳۵۰/۸۹۶ | ۰/۰۳۵ | ۹۸۹۹/۰۱ | ۴۵۹۳/۹۱ |
| St-t-14 | | | | | | ۳۴/۰۰ | ۳۸۸/۵۵۲ | ۰/۰۳۶ | ۱۰۶۹۸/۹ | ۵۷۱۹/۳۸ |
| St-t-15 | | | | | | ۲۹/۱۱ | ۶۰۱/۷۳۷ | ۰/۰۵۲ | ۱۱۴۹۸/۸ | ۳۵۲۴/۵۵ |
| St-t-16 | | | | | | ۲۲/۶۹ | ۷۳۷/۸۰۲ | ۰/۰۵۳ | ۱۳۹۹۸/۶ | ۶۷۳۹/۱۷ |
| St-t-17 | | | | | | ۱۷/۰۰ | ۸۶۶/۴۰۱ | ۰/۰۵۴ | ۱۵۹۹۸/۴ | ۲۱۲۱/۷۰ |
| St-t-18 | | | | | | ۱۲/۰۱ | ۱۰۵۵/۲۱۰ | ۰/۰۵۶ | ۱۸۹۹۸/۱ | ۹۹۵۲/۷۸ |
| St-t-19 | ۱۶ | ۴۰۶/۴ | ۳۲۵۱/۲ | ۸/۷۴ | ۸ | ۴۶/۵۱ | ۶۷۰/۹۵۸ | ۰/۰۳۶ | ۱۸۶۹۸/۱ | ۷۸۷۸/۱۶ |
| St-t-20 | | | | | | ۳۴/۱۲ | ۷۱۱/۴۵۰ | ۰/۰۳۷ | ۱۸۹۹۸/۱ | ۸۱۳۲/۱۵ |
| St-t-21 | | | | | | ۲۸/۴۷ | ۱۰۸۶/۰۱۹ | ۰/۰۵۴ | ۱۹۹۹۸ | ۱۵۶۶/۷۰ |
| St-t-22 | | | | | | ۲۳/۲۵ | ۱۱۹۶/۶۷۱ | ۰/۰۵۵ | ۲۱۴۹۷/۸۵ | ۱۵۸۶/۹۳ |
| St-t-23 | | | | | | ۱۷/۰۶ | ۱۶۰۵/۹۴۱ | ۰/۰۵۵ | ۲۸۹۹۷/۱ | ۵۸۷۷/۸ |
| St-t-24 | | | | | | ۱۲/۸۰ | ۱۸۲۶/۵۳۴ | ۰/۰۵۷ | ۳۱۹۹۶/۸ | ۱۹۳۰۸/۹ |



شکل (۱۹): منحنی نیرو-جاب‌جایی فنر معادل خاک.

به دست آمده در تحلیل به مراتب از نیروی تسلیم ارائه شده در راهنمای ASCE1984 بیشتر است. همچنین با تغییر ضخامت جداره لوله میزان نیروی تسلیم لوله نیز متغیر است. میزان تغییرات رخ داده به ازای تغییرات ضخامت جداره لوله تا سه برابر است. تغییر مکان متناظر نقطه تسلیم در همه شبیه‌سازی‌ها در محدوده ارائه شده توسط آئین‌نامه ASCE قرار داشته است. علاوه بر اختلاف بالای مقادیر نیرو و سختی ارائه شده با مقادیر محاسباتی راهنمای ASCE در اغلب موارد نمودار نیرو جابه‌جایی فنرهای معادل خاک دارای سختی ثانویه قابل ملاحظه‌ای بوده‌اند و فرض نمودار دو خطی الاستیک-پلاستیک کامل با شیب ثانویه صفر برای آنها منطقی نخواهد بود. مقدار این سختی در برخی موارد به میزان یک‌سوم سختی اولیه بوده و قطعاً در پاسخ فرا ارتجاعی لوله بشدت تأثیرگذار می‌باشد. به همین منظور از رگرسیون چند متغیره برای ایجاد روابط جدید اندرکنش جانبی لوله مدفون فولادی و خاک ماسه‌ای متراکم در شرایط گسلش امتدادلغز استفاده شد.

۵- بحث بر روی نتایج و ارائه روابط اندرکنش خاک لوله مدفون تحت گسلش امتدادلغز

در بخش‌های قبل ابتدا دو آزمایش بزرگ‌مقیاس روی لوله‌های ۴ و ۸ اینچ فولادی مدفون به انجام رسیده و یک بانک اطلاعاتی مشکل از ۲۴ شبیه‌سازی اجزای محدود ایجاد گردید. سپس داده‌های جابه‌جایی لوله به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار BPSIOS (که در بخش قبل الگوریتم آن تشریح گردید) ارائه شد. در ادامه ابتدا مشخصات فنرهای اندرکنشی خاک لوله طبق راهنمای ASCE1984 [۹] محاسبه شده و با مقادیر به دست آمده از تحلیل‌های بهینه‌سازی مقایسه گردید. این نتایج در جدول (۵) و شکل (۲۰) ارائه شده‌اند.

با توجه به اختلاف شدید مقدار محاسبه شده ASCE1984 اندرکنشی خاک-لوله با نتایج تحلیل‌های بهینه‌سازی BPSIOS لزوم ارائه روابط جدید برای اندرکنش خاک لوله مدفون بیش از گذشته مطرح می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروهای

جدول (۵): مقایسه خروجی نتایج شبیه‌سازی‌های تحلیلی بانک اطلاعات و مقادیر ارائه شده توسط ASCE.

| ASCE Y _y (متر) | ASCE P _y (کیلو نیوتن بر متر) | BPSIOS Y _y (متر) | BPSIOS P _y (کیلو نیوتن بر متر) | H/D | عمق دفن لوله H (میلی متر) | D/t | ضخامت جداره (میلی متر) | قطر لوله (میلی متر) | شماره شبیه‌سازی |
|------------------------------|--|--------------------------------|--|-----|------------------------------|--------|---------------------------|------------------------|--------------------|
| ۰/۰۰۸~۰/۰۱۷ | ۲۷/۳۰۶ | ۰/۰۱۷ | ۳۰/۳۱۶ | ۸ | ۸۱۲/۰۸ | ۴۸/۱۹۳ | ۲/۱۱ | ۱۰۱/۶۰ | St-t-1 |
| | | ۰/۰۱۷ | ۴۴/۸۶۹ | | | ۳۲/۰۰۰ | ۳/۱۸ | | St-t-2 |
| | | ۰/۰۱۴ | ۵۰/۳۹۲ | | | ۲۸/۳۶۹ | ۳/۵۸ | | St-t-3 |
| | | ۰/۰۱۷ | ۶۰/۰۷۰ | | | ۲۳/۲۵۶ | ۴/۳۷ | | St-t-4 |
| | | ۰/۰۱۸ | ۷۵/۵۵۳ | | | ۱۷/۶۹۹ | ۵/۷۴ | | St-t-5 |
| | | ۰/۰۲۱ | ۹۵/۲۹۱ | | | ۱۲/۵۷۹ | ۸/۰۸ | | St-t-6 |
| ۰/۰۱۹~۰/۰۳۷ | ۵۸/۸۷۹ | ۰/۰۳۱ | ۱۷۱/۶۸۱ | ۸ | ۱۷۵۲/۶۰ | ۴۵/۸۷۸ | ۴/۷۸ | ۲۱۹/۰۷۵ | St-t-7 |
| | | ۰/۰۴۷ | ۲۷۴/۹۵۰ | | | ۳۴/۵۰۰ | ۶/۳۵ | | St-t-8 |
| | | ۰/۰۴۶ | ۲۸۳/۶۷۲ | | | ۲۷/۶۴۴ | ۷/۹۲ | | St-t-9 |
| | | ۰/۰۵۹ | ۳۷۰/۴۹۴ | | | ۲۳/۰۰۰ | ۹/۵۳ | | St-t-10 |
| | | ۰/۰۶۱ | ۴۲۵/۱۶۰ | | | ۱۷/۲۵۰ | ۱۲/۷۰ | | St-t-11 |
| | | ۰/۰۵۱ | ۴۴۴/۵۶۷ | | | ۱۱/۹۹۶ | ۱۸/۲۶ | | St-t-12 |
| ۰/۰۲۸~۰/۰۵۵ | ۸۷/۰۳۹ | ۰/۰۳۵ | ۳۵۰/۸۹۶ | ۸ | ۲۵۹۰/۸۰ | ۴۵/۳۷۴ | ۷/۱۴ | ۳۲۳/۸۵ | St-t-13 |
| | | ۰/۰۳۶ | ۳۸۸/۵۵۲ | | | ۳۴/۰۰۰ | ۹/۵۳ | | St-t-14 |
| | | ۰/۰۵۲ | ۶۰۱/۷۳۷ | | | ۲۹/۱۱۰ | ۱۱/۱۳ | | St-t-15 |
| | | ۰/۰۵۳ | ۷۳۷/۸۰۲ | | | ۲۲/۶۸۷ | ۱۴/۲۷ | | St-t-16 |
| | | ۰/۰۵۴ | ۸۶۶/۴۰۱ | | | ۱۷/۰۰۰ | ۱۹/۰۵ | | St-t-17 |
| | | ۰/۰۵۶ | ۱۰۵۵/۲۱۰ | | | ۱۲/۰۰۶ | ۲۶/۹۷ | | St-t-18 |
| ۰/۰۳۵~۰/۰۶۹ | ۱۰۹/۲۲۶ | ۰/۰۳۶ | ۶۷۰/۹۵۸ | ۸ | ۳۲۵۱/۲۰ | ۴۶/۵۱۲ | ۸/۷۴ | ۴۰۶/۴۰ | St-t-19 |
| | | ۰/۰۳۷ | ۷۱۱/۴۵۰ | | | ۳۴/۱۱۵ | ۱۱/۹۱ | | St-t-20 |
| | | ۰/۰۵۴ | ۱۰۸۱/۰۱۹ | | | ۲۸/۴۷۰ | ۱۴/۲۷ | | St-t-21 |
| | | ۰/۰۵۶ | ۱۱۹۶/۶۷۱ | | | ۲۳/۲۵۶ | ۱۷/۴۸ | | St-t-22 |
| | | ۰/۰۵۵ | ۱۶۰۵/۹۴۱ | | | ۱۷/۰۵۸ | ۲۳/۸۳ | | St-t-23 |
| | | ۰/۰۵۷ | ۱۸۲۶/۵۳۴ | | | ۱۲/۸۰۰ | ۳۱/۷۵ | | St-t-24 |

رویه سه بعدی برای نیروی تسلیم واحد طول فترهای معادل خاک (P_y) بر حسب قطر لوله (D) و ضخامت جداره لوله (t) با توجه به فرم مورد نظر در رابطه (۵) و داده های جدول (۴) در شکل (۲۱) ترسیم شده است.

عوامل و ضرایب رگرسیون چند متغیره با انجام درونیابی و تحلیل های حساسیت محاسبه شده است. سپس محدوده منطقی برای هر کدام از عوامل رابطه (۵) تعیین گردید. میزان ضریب همبستگی (ضریب R²) در عملیات رگرسیون، برای تعیین دامنه

برای تشکیل یک رابطه جدید، نتایج تحلیل های بهینه سازی روی شبیه سازی های بانک اطلاعات (جدول ۴) و پارامترهای اساسی شبیه سازی مانند قطر و ضخامت لوله و وزن مخصوص خاک در نرم افزار MATLAB وارد شده و با استفاده از MATLAB Curve fitting Toolbox رابطه سازی برای ظرفیت نیرویی فتر معادل خاک-لوله انجام گردید. فرم عمومی رابطه نیروی تسلیم فتر معادل خاک نیز به صورت رابطه (۵) ارائه شد.

$$P_y = \alpha \times \gamma \times D^\beta \times t^\delta \quad (5)$$

در این رابطه، γ : وزن مخصوص خاک بر حسب کیلونیوتن بر مترمکعب، D : قطر لوله بر حسب متر و t : ضخامت جداره لوله بر حسب متر است.

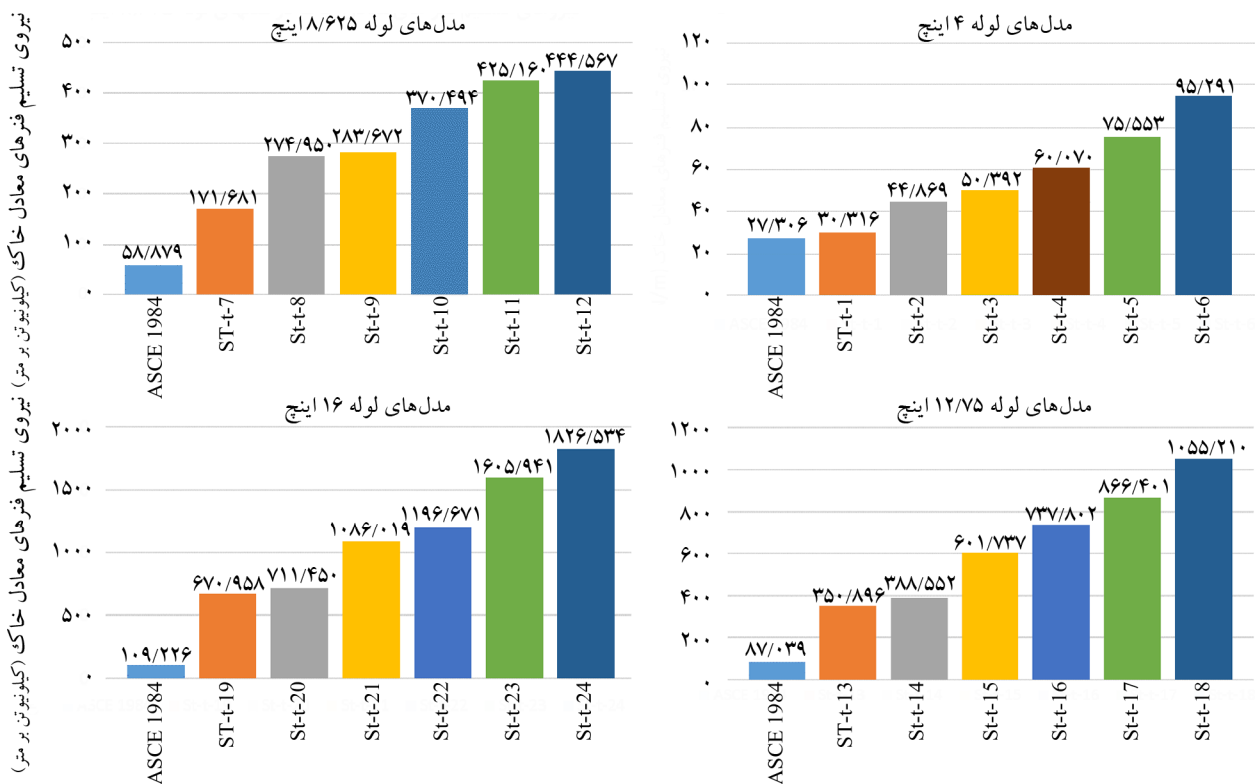
رابطه (۶) اثر هم‌زمان قطر لوله و ضخامت جداره لوله را در نیروی جانبی اندرکنش خاک-لوله مدفون منظور نموده و از این نظر در مطالعاتی که تاکنون در حوزه اندرکنش خاک-لوله ارائه شده، منحصر به فرد می‌باشد. رابطه‌ی (۶) به‌طور ویژه برای اندرکنش

منطقه‌ی ضرایب، حدوداً ۹۸ درصد بوده است. سپس میزان انطباق نیروی اندرکنشی خاک لوله در محدوده تعیین شده ضرایب بررسی شده و ضرایب رابطه عمومی (۵) به‌صورت زیر ارائه شده است.

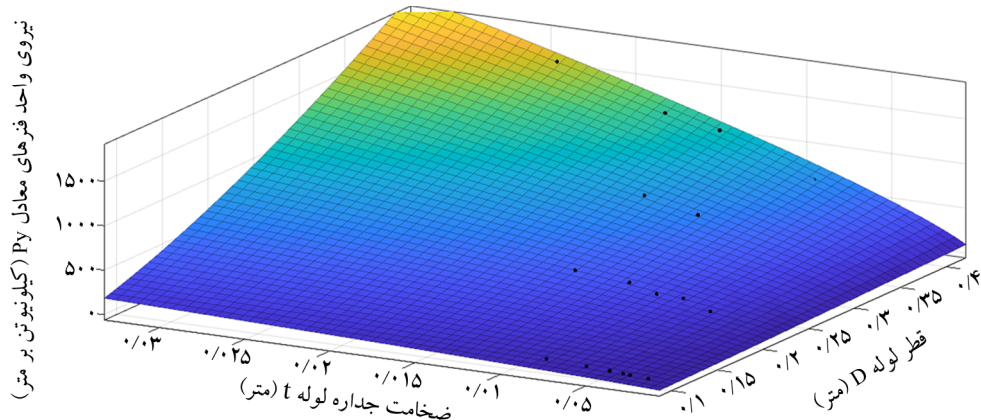
$$\alpha \approx 55000; \beta = 0.70 \approx \frac{\sqrt{2}}{2}; \delta = 1.42 \approx \sqrt{2}$$

بنابراین رابطه (۵) به‌صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌شود.

$$P_y = 55000 \times \gamma \times D^{\frac{\sqrt{2}}{2}} \times t^{\sqrt{2}} \quad (6)$$



شکل (۲۰): نمودار ستونی مقایسه نیروی تسلیم فترهای معادل خاک برای لوله‌های با ضخامت‌های مختلف.



شکل (۲۱): رویه سه‌بعدی نیروی تسلیم فتر معادل خاک بر حسب قطر و ضخامت لوله.

در هر لحظه از آزمایش به‌طور مستقیم ثبت گردید. روش شبیه‌سازی اندرکنش خاک-لوله مدفون با استفاده از فنرهای معادل خاک به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های مهندسی شبیه‌سازی خطوط لوله مدفون همواره مد نظر بوده است. بررسی میزان انطباق نتایج شبیه‌سازی با واقعیت و تطبیق آن باعث اعتبار بیشتر آن و افزایش اعتماد عمومی به نتایج آن می‌شود. شبیه‌سازی لوله مدفون به‌صورت تیر بر بستر فنری زمانی معتبر است که به ازای جابه‌جایی رخ داده در پای فنر، تغییر شکل تیر شبیه‌سازی شده با تغییر شکل لوله در واقعیت انطباق داشته باشد. لذا با توسعه نرم‌افزار BPSIOS و منظور نمودن این اصل بدیهی به‌عنوان پایه و اساس الگوریتم نرم‌افزار، از داده‌های تغییر شکل لوله به‌منظور بهینه‌سازی مشخصات فنرهای معادل خاک لوله استفاده شد. برای تحقیق میزان دقت روابط آئین‌نامه، ابتدا داده‌های آزمایشگاهی با نرم‌افزار BPSIOS تحلیل شده و مشخصات فنرهای معادل خاک محاسبه گردید. اختلاف قابل توجهی میان مشخصات محاسباتی و مقادیر ارائه شده توسط راهنمای ASCE مشاهده شد. این مطلب ضرورت ارائه روابط جدیدی را برای اندرکنش لوله فولادی مدفون در خاک ماسه‌ای، در شرایط گسلش امتدادلغز را بیان داشت. در بخش دوم، بانک اطلاعاتی متشکل از ۲۴ شبیه‌سازی اجزای محدود از لوله‌های مدفون فولادی با قطرهای و ضخامت‌های مختلف تشکیل گردید. شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی غیرخطی، با شرایطی مشابه آزمایش، در نرم‌افزار آباکوس و با مشخصات راستی‌آزمایی شده انجام گردید. در شبیه‌سازی‌ها، خاک و لوله به ترتیب با اعضای حجیم و پوسته‌ای شبیه‌سازی شدند. تغییر شکل میان‌تار لوله در هر لحظه، به‌عنوان ورودی اولیه برای بهینه‌سازی مشخصات فنرهای معادل خاک، ثبت گردید. در ادامه داده‌های شبیه‌سازی‌های بانک اطلاعات توسط نرم‌افزار BPSIOS نیز مورد تحلیل قرار گرفته و مشخصات فنرهای معادل خاک برای آنها تعیین شد. نتایج نشان داد که نیروی تسلیم فنرهای معادل خاک به‌شدت وابسته به ضخامت جداره لوله بوده‌اند. همچنین جابه‌جایی متناظر نقطه تسلیم فنرهای معادل خاک در محدوده پیشنهاد شده توسط آئین‌نامه ASCE [۹] بوده و عملاً

خاک ماسه‌ای متراکم و لوله مدفون فولادی در شرایط گسلش امتدادلغز و بر اساس نتایج بانک اطلاعاتی متشکل از ۲۴ شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه شده و از ارائه یک رابطه عمومی (که غالباً فاقد دقت لازم هستند) خودداری شده است. لازم به ذکر است که گسترش بیش از پیش نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی در خصوص اندرکنش خاک-لوله مدفون برای لوله‌های فولادی و خاک ماسه‌ای متراکم برای ارتقاء میزان دقت در تخمین ضرایب رابطه (۶) در آینده ضروری بوده و تعمیم آن به حالات دیگر (خاک‌های ماسه‌ای با میزان تراکم متفاوت و ...) را ممکن خواهد ساخت. بدیهی است که انجام تحلیل‌های بیشتر و مطالعات روی منابع عدم قطعیت و مطالعات قابلیت اعتماد برای اطمینان از صحت روابط و ضرایب ارائه شده ضرورت داشته که در تحقیقات آینده باید به آنها رسیدگی شود. همچنین علیرغم سادگی ظاهر و حفظ مزیت سادگی روش، کلیه مقادیر نیروها و سختی‌های مبنای آن دارای مبانی آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس و بهینه‌سازی بوده و تضمین قاطع‌تری برای انطباق پاسخ‌ها با واقعیت وجود خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

اندرکنش خاک-لوله مدفون تحت اثر جابه‌جایی ماندگار زمین ناشی از گسلش از چالشی‌ترین مسائل حوزه خطوط لوله مدفون می‌باشد. برای شبیه‌سازی لوله در خاک از فنرهای معادل ارائه شده توسط آئین‌نامه ASCE1984 [۹] استفاده می‌شود. روابط ارائه شده در این آئین‌نامه بیشتر بر پایه توزیع تنش در خاک بوده و پارامترهایی مانند جنس و ضخامت جداره لوله در آن نقشی نداشته‌اند. اهمیت بالای خطوط لوله و خطرپذیری لرزه‌ای بالای آنها سبب گردید که در این تحقیق اثر ضخامت جداره لوله در اندرکنش خاک-لوله تحت اثر جابه‌جایی ماندگار ناشی از گسلش امتدادلغز بررسی گردد. در اولین گام، به‌منظور بررسی شرایط واقعی، دو نمونه لوله فولادی به ضخامت‌های ۴ و ۱۸ اینچ (۱۱۳/۸۶ و ۲۱۸/۵۰ میلی‌متر) به‌صورت بزرگ‌مقیاس و در شرایط مشابه گسلش امتدادلغز آزمایش شدند. منحنی تغییر شکل یافته لوله

7. Trautmann, C.H. (1983) *Behavior of Pipe in Dry Sand under Lateral and Uplift Loading*. Ph.D. Dissertation, Cornell University.
8. 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.
9. 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.
10. Mavridis, G.A. and Ptilakis, K. (1996) Axial and transverse seismic analysis of buried pipelines george. *Proceedings 11th World Conference on Earthquake Engineering*, (1605), 1-8.
11. American Lifelines Alliance (2001) *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*. ASCE-FEMA Joint Committee, New York, United States of America.
12. Brinch-Hansen, J. (1961) *The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces*. Geoteknisk Instit., Bull.
13. O'Rourke, M., Gadicherla, V., and Abdoun, T. (2005) Centrifuge modeling of PGD response of buried pipe. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 4(1), 69-73, doi:10.1007/s11803-005-0025-8.
14. Ha, D. (2007) *Evaluation of Ground Rupture Effect on Buried HDPE Pipelines*. Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
15. Ha, D., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., and Stewart, H.E. (2008) Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(10), 1501-1515, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1501).
16. 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. ارتباط ملموسی با ضخامت جداره لوله نداشته است. با استفاده از ابزار انطباق منحنی در محیط متلب^{۱۰} و رابطه عمومی (۵)، رابطه‌ی جدیدی برای نیروی تسلیم فنر معادل خاک با در نظر گرفتن اثر ضخامت جداره لوله ارائه گردید. ضرایب این رابطه نیز با دقت بالا و انجام تحلیل‌های حساسیت تعیین و در رابطه (۶) ارائه شد. همچنین در اغلب موارد سختی ثانویه فنرهای معادل خاک نیز مقداری قابل توجه هستند. در بیشتر موارد این سختی ثانویه مقداری بیش از یک‌سوم سختی اولیه را به خود اختصاص داده است. در نظر گرفتن سختی ثانویه می‌تواند به بالا بردن دقت نتایج تحلیل‌ها و انطباق بهتر آنها با شرایط واقعی مسئله کمک نماید. همچنین پیشنهاد می‌گردد اثر ضخامت جداره لوله بر روی اندرکنش خاک لوله تحت جابه‌جایی ماندگار ناشی از گسلش امتدادلغز برای لوله‌های مدفون با جنس مصالح دیگر و انواع خاک نیز بررسی گردد.

مراجع

1. O'Rourke, M.J. and Liu, X. (1999) *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*. MCEER Monograph Series No.3., University of Buffalo NY, USA.
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, 416-425.
3. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. (1971) *Fundamental of Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Englewood.
4. Winkler, C. (1867) Beiträge zur kenntniss des indiums. *Journal für Praktische Chemie*, 102(1), 273-297.
5. Audibert, J.M.E. and Nyman, K.J. (1977) Soil restraint against horizontal motion of pipes. *ASCE Journal of Geotechnical Devision*, 103, 1119-1142, doi:10.1016/0148-9062(78)91731-X.
6. Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D. (1985) Lateral force-displacement response of buried pipe. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(9), 1077-1092, doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1077).

24. Todd, D.R., Carino, N.J., Chung, R.M., Lew, H.S., Taylor, A.W., and Walton, W.D. (1994) *1994 Northridge Earthquake: Performance of Structures, Lifelines and Fire Protection Systems*. US Department of Commerce (NIST).
25. Petak, W.J. and Elahi, S. (2001) The Northridge Earthquake, USA and Its Economic and Social Impacts. *EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management Earthquake Risks in Europe, IIASA, July 6-9, 2000*, Laxenburg, Austria, p. 28.
26. O'Rourke, T.D. and Palmer, M.C. (1994) *The Northridge and California Earthquake of January 17 1994: Performance of Gas Transmission Pipelines*. Buffalo, NY, ISSN 1088-3800.
27. Eidinger, J.M., O'Rourke, M., and Bachhuber, J. (2002) Performance of pipelines at fault crossings. *Proceedings of the 7th US National Conference of Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Boston, Massachusetts, 21-25.
28. 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).
29. Earthquake Investigation Committee of the Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering (2013) *Chile Earthquake of 2010*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA doi: 10.1061/9780784412824.
30. 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), 183-204.
31. ASTM A370 (2016) *ASMT A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/A0370-16.
32. American Petroleum Institute (2004) *API 5L Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(3), 415-427, doi:10.1016/j.soildyn.2008.04.006.
17. Vazouras, P., Karamanos, S.A., and Dakoulas, P. (2010) Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(11), 1361-1376, doi: 10.1016/j.soildyn.2010.06.011.
18. Vazouras, P., Karamanos, S.A., and Dakoulas, P. (2012) *Buried Steel Pipelines Crossing Strike-Slip Faults*. Rhodes, Greece, ISBN: 978-1-880653-94-4.
19. 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), 609-632, doi: 10.1193/1.4000137.
20. 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), 4014018, doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000193.
21. Jung, J.K., O'Rourke, T.D., and Argyrou, C. (2016) Multi-directional force-displacement response of underground pipe in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**(11), 1763-1781, doi: 10.1139/cgj-2016-0059.
22. Monshizadeh Naeen, A. and Seyedi Hosseininia, E. (2020) Numerical investigation on the deformational behavior of continuous buried pipelines under reverse faulting. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **45**(10), 8475-8490, doi: 10.1007/s13369-020-04766-2.
23. 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), 103607, doi: 10.1193/1.4000137.

- Specification for Line Pipe*. American Petroleum Institute (API), Washington, D.C, USA.
33. ASTM D2487 (2011) *ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
34. ASTM D2419 (2014) *ASTM D2419 - 14 Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D2419-14.
35. ASTM D-1556-07 (2007) *ASTM D 1556-07 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method.*, ASTM International, 1-7, Pennsylvania, USA, doi: 10.1520/D1556-07.2.
36. ASTM D1557 (2012) *ASTM D1557 Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. Pennsylvania, USA. doi: 10.1520/D1557-12E01.
37. ASTM D3080 (2011) *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained*. Pennsylvania, USA, doi: 10.1520/D3080_D3080M-11.

واژه‌نامه

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Permanent Ground Displacement | ۱- جابه‌جایی ماندگار زمین |
| Wave Propagation | ۲- انتشار امواج |
| Solid | ۳- حجیم |
| Ovalization | ۴- بیضی‌گون شدن |
| Dynamic/Explicit | ۵- دینامیکی صریح |
| Linear Potentiometer Transducer | ۶- مبدل‌های پتانسیل متری خطی |
| Programmable Logic Controller | ۷- هدایت‌کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی |
| Python | ۸- پایتون |
| Dynamic/Explicit | ۹- دینامیکی صریح |
| MATLAB Curve Fitting Toolbox | ۱۰- ابزار انطباق منحنی در محیط متلب |

Assessment of the Effects of Pipe's Wall Thickness on Lateral Steel Pipe-Dense Sandy Soil Interaction Subjected to Strike-Slip Faulting

Mohammad Ashrafy¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2*} and Mahmood Hosseini³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, *Corresponding Author, email: tahamouli@iauksh.ac.ir
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Seismic stress analysis and investigation of soil's lateral pressure on buried pipelines are among the challenging subjects in the seismic design of lifelines. Buried pipelines are considered as long structures buried in a semi-infinite medium of soil and be modeled as beams on spring support of the soil, in a conventional technique. The specifications of the support springs were determined using the codes' relations (such as ASCE 1984 and ALA2001 guidelines). The specifications of pipe-soil equivalent springs are presented as a function of the diameter of the pipe and soil's mechanical properties. Numerous researches were shown that the pipe-soil interaction is highly dependent on other factors; such as the wall thickness of the pipe, material type of the pipe, and the loading condition as well. In this research, in the first step, two full-scale tests on steel continuous pipes buried in dense sandy soil were done. A computer program (BPSIOS) was developed in MATLAB and ABAQUS to generate the specifications of pipe-soil interaction springs through an optimization algorithm. BPSIOS determined the force-displacement relation for the pipe-soil equivalent springs so that the deformed shapes of the pipe were matched with its real values for any given base displacement. The experimental data were analyzed by BPSIOS to present a comparison with the code's results. The numerical models were validated and verified using the experimental data in the second part of the study. The finite element simulations were employed to develop a numerical database. The database included twenty-four nonlinear 3D shell-solid finite element models. They were constructed and analyzed in ABAQUS. The database consisted of steel buried pipes with four diameters (in the range of 100 to 400 mm) and six-level of wall thickness (from $D/t = 11$ to 48). The pipes were widely used in supply lines in natural gas distribution networks. The results of the models were fed into BPSIOS software to determine the specifications of pipe-soil interaction springs. Considering the wall thickness of the pipe, a new relation was established for lateral pipe-soil interaction of dense sandy soil and steel pipes in place of a strike-slip fault. The sensitivity and 3D regression analyses were done, using MATLAB Curve-fitting Toolbox, to develop a new form of relations for pipe soil interaction. The sensitivity analyses showed that the wall thickness of the pipe had a great level of effect on the exerted lateral force on the pipe. The results of the numerical models, made by BPSIOS, show that the ASCE1984 presented results are only valid in the case of small pipes with $D/t = 48$. However, the ALA2001 guideline presents greater values of the interaction forces, which are closer to the results for moderate pipes. The proposed pipe-soil relation is dependent on the diameter and wall thickness of the pipe and exclusively specified for the material properties of the steel pipe, dense sandy soil, and strike-slip loading condition. It was found that the wall thickness of the pipe had a great effect on the initial and secondary stiffnesses of the pipe-soil equivalent springs. However, the yield displacements were found in the previously presented values for most of the cases.

Keywords: Pipe-Soil Interaction, Steel Buried Pipe, Finite Element Analysis, Wall Thickness of the Pipe, Strike-Slip Faulting.