بررسی اثر گسترش جانبی ناشی از روانگرایی بر لوله‌های مدفون طولی با استفاده از آزمایش‌های میزلرزه 1G

عباس قلندرزاده
دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران
aghaland@ut.ac.ir

محمد احمدی
دانشجوی دکتری عمران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
mo.ahmadi@iiees.ac.ir

مسعود صمدیان
مدیر امور پژوهش، شرکت گاز استان تهران، تهران، ایران
mas_samadian@yahoo.com

خسرو برگی
استاد مهندسی عمران، ، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران
kbargi@ut.ac.ir

رضا دزواره رسنانی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران، ، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران
rdezvareh@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: *گسترش جانبی، مدلسازی فیزیکی 1g، لوله مدفون، میزلرزه، روانگرایی*

چکیده

لوله‌های مدفون در خاک، که بخشی از شریان‌های حیاتی به‌حساب می‌آیند، آسیب‌های گوناگونی را در اثر زلزله می‌توانند متحمل شوند. لذا مطالعه اثرات زلزله بر روی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. گسترش جانبی ناشی از روانگرایی که در سطوح شیب‌دار با شیب‌های بسیار اندک رخ می‌دهد، یکی از این آسیب‌هاست که می‌تواند بسیار مخرب باشد. به دلیل حرکت توده عظیم خاک روانگرا به پایین‌دست شیب در هنگام زلزله، به لوله‌های مدفون نیروهای نسبتاً زیادی وارد گشته که می‌تواند گسیختگی‌هایی را نیز در آن ایجاد کند.

در تحقیق حاضر که با حمایت شرکت گاز استان تهران انجام پذیرفته است، از روش مدل‌سازی فیزیکی برای بررسی پدیده گسترش جانبی بر روی لوله‌های مدفون استفاده گردیده است. برای این امر چند آزمایش با استفاده از دستگاه میزلرزه در محیط 1g برنامه‌ریزی گردید و انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد باوجوداینکه در نمونه‌های آزمایش‌شده گسیختگی لوله مشاهده نگردید بااین‌حال نیروهای زیادی ناشی از حرکت خاک به آن وارد شد که در واقعیت وجود این نیروها می‌تواند باعث گسیختگی لوله‌ها گردند. همچنین مشاهده گردید که دو نوع جابجایی دائمی می‌تواند به لوله آسیب وارد نماید. یکی جابجایی ناشی از حرکت شیب و دیگری نشست زمین در اثر روانگرایی. بررسی اندرکنش لوله و خاک ازجمله دیگر نتایج این تحقیق است.

مقدمه

لوله‌های مدفون در خاک می‌توانند آسیب‌های گوناگونی را در طول زلزله و حتی در بازه کوتاهی پس از وقوع آن متحمل می‌شوند. لوله‌های مدفون در حوزه شریان‌های حیاتی طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به اهمیت شریان‌های حیاتی در زندگی شهری، رفتار لرزه‌ای آن‌ها باید به‌خوبی موردمطالعه قرار گیرد. ایجاد هرگونه آسیب که منجر به مختل شدن عملکرد خطوط و شبکه‌های توزیع گردد، خسارت‌های جبران‌ناپذیر اجتماعی-

اقتصادی را به همراه خواهد داشت. بررسی زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که لوله‌های مدفون در اثر پیامدهای زلزله، خسارت‌های شدیدی را متحمل شده‌اند (O'Rourke, 1996 ; O'Rourke and Palmer, 1996). درنتیجه مطالعه بر روی اثرات زلزله بر لوله‌های مدفون از اهمیت بالایی برخوردار است. در بین خرابی‌هایی که زلزله می‌تواند به خطوط لوله مدفون در خاک وارد نماید، خطر روانگرایی خاک دربرگیرنده لوله بسیار حائز اهمیت است. روانگرایی و اثرات ثانویه آن همچون نشست می‌توانند نقش بسیار زیادی در رفتار چنین لوله‌هایی ایفا نمایند. به‌عنوان نمونه گسترش جانبی در سطوح شیب‌دار که حتی درشیب‌های بسیار اندک نیز می‌تواند رخ دهد، می‌تواند خسارات سنگینی را به لوله‌های مدفون وارد کند. در اثر روانگرایی خاک‌های واقع در سطوح شیب‌دار با زاویه اندک، به دلیل از دست رفتن مقاومت برشی خاک، شیب شروع به حرکت به سمت پایین نموده و تغییر شکل نسبتاً زیادی در خاک رخ می‌دهد. انتقال این جابجایی به لوله‌های مدفون باعث ایجاد نیروهای نسبتاً زیاد در آن گشته و می‌تواند گسیختگی‌هایی را نیز به آن وارد کند. درصورتی‌که لوله در جهت شیب مدفون بوده و حرکت خاک به سمت پایین شیب رخ دهد لذا نیروهای محوری به لوله وارد می‌گردد. از طرفی دیگر به دلیل نشست خاک در طی فرآیند روانگرایی، لوله‌های مدفون دچار خمش گردیده و نیروهای خمشی نیز به آن وارد می‌گردد. خطوط لوله مدفون قابلیت تحمل نیروهای وارده را تا میزان مشخصی دارند. درصورتی‌که نیروهای وارده بیش از مقاومت لوله باشد، گسیختگی در آن می‌تواند به وقوع بپیوندد.

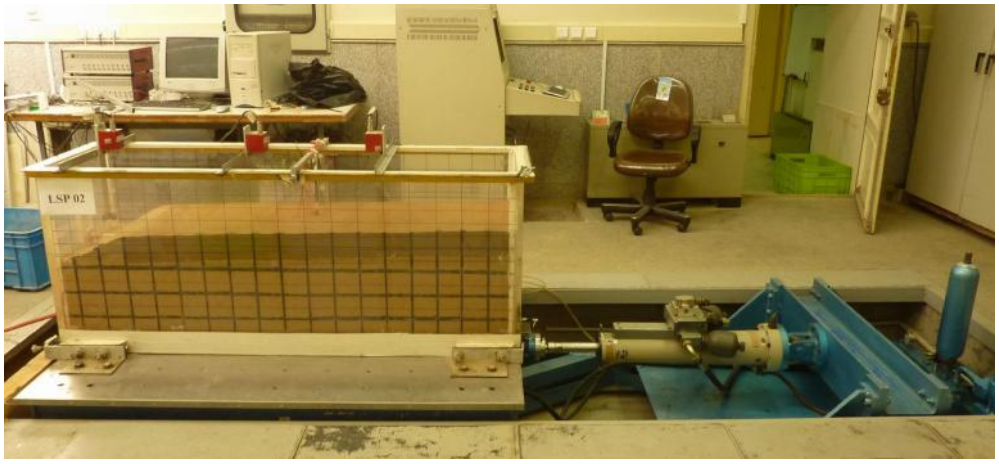
در تحقیق حاضر که با حمایت شرکت گاز استان تهران جهت تهیه آیین‌نامه‌ای برای طراحی لوله‌های مدفون در مناطق با پتانسیل روانگرایی انجام پذیرفته است، از روش مدل‌سازی فیزیکی برای بررسی پدیده گسترش جانبی بر روی لوله‌های مدفون استفاده گردیده است. برای این امر چند آزمایش با استفاده از دستگاه میزلرزه در محیط 1g برنامه‌ریزی و آزمایش گردید و نتایج آن موردمطالعه و بررسی قرار گرفت. در ادامه ابتدا شرحی از نحوه مدل‌سازی و مسائل پیرامون آن خواهد آمد و سپس نتایج حاصله از این آزمایش‌ها تشریح می‌گردند.

انواع مودهای تغییر شکل دائم زمین

تغییر مکان‌های دائمی سطح زمین ناشی از زلزله به شکل‌های گوناگونی می‌تواند رخ دهد. گسلش، رانش زمین، نشست قائم و همچنین پخش‌شدگی جانبی در اثر روانگرایی ازجمله تغییر شکل‌های دائمی زمین هستند. دراین‌بین نشست قائم زمین و پخش‌شدگی جانبی در سطوح از اثرات ثانویه پدیده روانگرایی است. پخش‌شدگی جانبی زمانی اتفاق می‌افتد که خاک ماسه‌ای شلِ اشباع در اثر لرزش زمین روانگرا گردد. روانگرایی باعث می‌شود که خاک مقاومت برشی خود را ازدست‌داده و شروع به جاری شدن و حرکت به سمت پایین‌دست شیب می‌نماید. این پدیده حتی در شیب‌های بسیار کم ۰.۵ تا ۱ درصد نیز رخ می‌دهد. در این حالت خاک نمی‌تواند حتی وزن خود را بر روی شیب تحمل نموده و درنتیجه به سمت پایین‌دست شروع به حرکت می‌نماید. همچنین وقوع روانگرایی باعث ایجاد نشست در سطح زمین نیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که حرکت قائم نیز به همراه پخش‌شدگی جانبی ناشی از روانگرایی اتفاق می‌افتد.

مدل‌سازی فیزیکی

امروزه استفاده از مدل‌های فیزیکی برای درک رفتار ابنیه ژئوتکنیکی به‌عنوان یک ابزار علمی قابل‌اعتماد علاوه بر یافتن رفتار واقعی نمونه اصلی برای ارزیابی و صحت سنجی مدل‌های عددی و تحلیلی نیز کاربرد دارند. آزمایش‌های میزلرزه عمدتاً در میدان جاذبه 1g به‌منظور درک رفتار لرزه‌ای خاک و ساز روی آن انجام می‌شود. *شکل ۱* نمایی از مدل آماده آزمایش را بر روی دستگاه میزلرزه یک‌جهت آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران نشان می‌دهد.



شکل ۱: دستگاه میزلرزه به همراه مدل آماده شده برای آزمایش

– مخزن خاک

مدل‌ها داخل مخزن شفافی از پلکسی گلس ساخته‌شده‌اند تا تغییر شکل‌های مدل در اثر لرزه را بتوان به‌راحتی مشاهده نمود. ابعاد جعبه مورداستفاده برابر با ۱۸۰ سانتی‌متر طول (داخل مخزن)، ۴۵ سانتی‌متر عرض (از داخل مخزن) و ۷۰ سانتی‌متر ارتفاع است و ضخامت پلکسی گلاس ها نیز ۲ سانتی‌متر است. در دو انتهای کف جعبه دو شیر تعبیه‌شده که می‌توان دی‌اکسید کربن (CO_2) و همچنین آب را به نمونه وارد نمود. استفاده از دی‌اکسید کربن برای اطمینان از صد در صد شدن درصد اشباع مدل است.

– حسگرهای مورد استفاده در آزمایش‌ها

پنج سری حسگر جهت ثبت داده‌های ناشی از آزمایش در این آزمایش‌ها پیش‌بینی‌شده است. در این آزمایش‌ها ۵ شتاب سنج مورداستفاده قرار گرفتند که یکی از آن‌ها در بیرون جعبه و نزدیک کف آن قرار می‌گیرد تا شتاب پایه‌ی اعمالی به نمونه را اندازه‌گیری نماید. چهار حسگر دیگر به ترتیب در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر از کف جعبه و درون خاک قرار می‌گیرد تا پاسخ زمین را در نقاط و ارتفاع‌های مختلف نسبت به شتاب اعمالی بسنجد. به کمک داده‌های حاصل از این شتاب سنج‌ها می‌توان نحوه توزیع شتاب و وقوع پدیده روانگرایی را در ترازهای مختلف خاک موردمطالعه قرار داد. برای محاسبه میزان جابجایی لوله مدفون در نقاط دلخواه از LVDTهای کابلی استفاده گردیده است. کابل این حسگرها به کمک گیره‌هایی به نقاط موردنظر بر روی لوله متصل شده و با تغییر مکان لوله و درنتیجه کاهش و یا افزایش طول کابل، مقدار جابجایی ثبت می‌شود. جابجایی لوله در دونقطه توسط این حسگرها ثبت گردیدند. علاوه بر این یکی از LVDTها به کمک قطعه‌ای به درون خاک متصل شده و با حرکت شیب به سمت پایین، میزان این جابجایی را می‌سنجد. همچنین برای محاسبه جابجایی‌های سطح زمین در راستای قائم از LVDTهای میله‌ای استفاده‌شده است. جابجایی سطح زمین توسط سه جابجایی سنج در نقاط مختلف آن اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری میزان فشار آب حفره‌ای در ترازهای مختلف خاک، از حسگرهای فشار آب حفره‌ای استفاده می‌شوند. به کمک داده‌های حاصل از این آزمایش می‌توان از وقوع روانگرایی کامل در ترازهای مختلف خاک اطمینان حاصل نمود. در این سری آزمایش‌ها از ۳ حسگر ثبت فشار آب حفره‌ای در ترازهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر از کف مدل استفاده‌شده است. همچنین برای اندازه‌گیری خمش‌ها و همچنین کشش و یا فشار ایجادشده در لوله مورد آزمایش از کرنش‌سنج استفاده می‌شود. کرنش‌سنج‌ها در سه مقطع از لوله نصب گردیدند.

– خاک مدل شده

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر روانگرایی باید رخ دهد لذا خاک مورداستفاده باید به‌گونه‌ای باشد که این پدیده و به‌تبع آن، پخش‌شدگی جانبی در آزمایش مدل به وقوع بپیوندد. ماسه‌های تمیز با D_{50} کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در مطالعات زیادی مورداستفاده قرارگرفته است. به‌عنوان‌مثال ماسه تویورا در ژاپن و ماسه نوادا در آمریکا تقریباً در اکثر مطالعات مشابه مورداستفاده قرار می‌گیرند. در ایران ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ که به لحاظ دانه‌بندی و مشخصات دیگر، شباهت بسیاری به ماسه‌های نام‌برده شده دارد، در مطالعات مدل مورداستفاده قرار می‌گیرد. با توجه به معرفی این ماسه توسط آزمایشگاه خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، امروزه تقریباً در تمام مطالعات مشابه در ایران این ماسه مورداستفاده قرار می‌گیرد (احمدی، ۱۳۹۰). در *جدول ۱* مشخصات فیزیکی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه آمده است. ازآنجایی‌که در این آزمایش‌ها لوله مدفون در لایه‌ای غیر روانگرا قرار دارد، این لایه از مخلوطی از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ۱۵ درصد رس تشکیل می‌گردد. وجود رس در این خاک باعث می‌گردد که این لایه روانگرا نگردد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ مورداستفاده در آزمایش (احمدی، ۱۳۹۰)

C	φ	درصد ریزدانه (٪)	D_{50}(mm)	e_{min}	e_{max}	G_s
صفر	۳۷ درجه	صفر	۰.۳	۰.۶۰۳	۰.۹۴۳	۲.۶۵۸

– لوله مدل شده

با توجه به محدودیت‌های انتخاب لوله‌ی مدل در بازار و نیاز پروژه به لوله‌ای با ضخامت بسیار اندک، لوله آلومینیومی با مشخصات ارائه‌شده در *جدول ۲* به‌عنوان مناسب‌ترین لوله برای مدل کردن لوله‌ای فولادی به قطر ۱۴ اینچ و ضخامت ۱۷.۸ میلی‌متر در مقیاس واقعی انتخاب گردید. اطلاعات لوله‌ای واقعی با مشخصات ذکرشده در آیین‌نامه API 5L ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی لوله مورداستفاده شده در مدل

جنس لوله	قطر لوله	ضخامت لوله	طول لوله	مدول الاستیسیته
آلومینیومی	۱۰ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر	حدود ۱/۷۰ متر	۷۴ گیگا پاسکال

– قوانین مقیاس

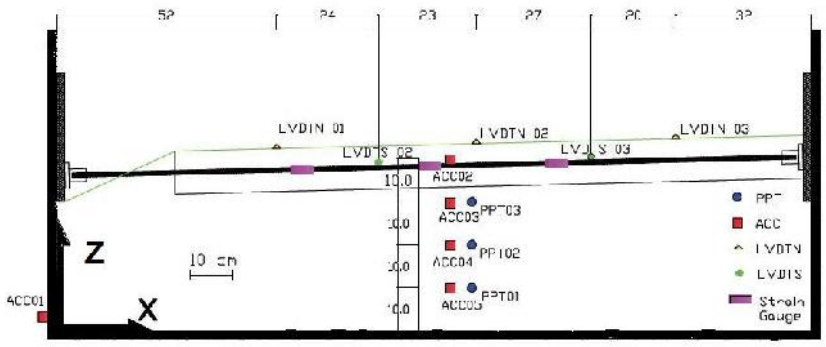
یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی مدل‌های فیزیکی، مدل‌سازی بر اساس قوانین مقیاس است. با توجه به اینکه در مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس در مدل 1g، مدل آزمایش‌شده نمونه‌ای کوچک‌شده از مدل واقعی بوده که به نسبت n کاهش پیدا نموده است، بااین‌حال تنها با کوچک ساختن تمامی مدل نمی‌توان تشابه صحیحی را بین تمام اجزای مدل کوچک‌مقیاس و واقعی برقرار نمود. برای آنکه داده‌های حاصل از آزمایش مدل آزمایشگاهی قابل‌استفاده و تعمیم به مدل واقعی و بزرگ‌مقیاس گردد، مدل‌سازی بر اساس قوانین مقیاس از اهمیت بالایی برخوردار است. در تحقیق حاضر با توجه به ماهیت لرزه‌ای پروژه و همچنین وجود رخداد روانگرایی در آن از قوانین مقیاس ارائه‌شده توسط «یایی» استفاده گردیده است (Iai, 1989). نسبت تشابه در نظر گرفته‌شده در این آزمایش ۳۵ است. همان‌طور که ذکر گردید با این نسبت تشابه لوله مدل شده در آزمایش معرف لوله‌ای فولادی با قطر ۱۴ اینچ و ضخامت ۱۷.۸ میلی‌متر در واقعیت است. *جدول ۳* روابط تشابه مورداستفاده در این آزمایش و مقادیر آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳: قوانین تشابه مورداستفاده در روانگرایی در تحقیق حاضر

پارامتر	ضریب مقیاس	مقادیر ضریب مقیاس
طول	n	۳۵
کرنش خاک	$n^{0.5}$	۵.۹
فشار آب حفره‌ای	n	۳۵
جابجایی	$n^{1.5}$	۲۰۷
شتاب	1	۱
سختی خمشی(در واحد طول)	$n^{4.5}$	۸۸۷۷۸۱۷
سختی محوری(در واحد طول)	$n^{1.5}$	۲۰۷

– هندسه مدل

همان‌طور که اشاره گردید، هدف از این آزمایش‌ها بررسی اثر گسترش جانبی ناشی از روانگرایی بر روی لوله‌های مدفون است. دو حالت برای بررسی چنین پدیده‌ای محتمل است. در حالت اول تمام بخش‌های خاک قابلیت روانگرایی داشته و لوله درون چنین خاکی قرار گرفته است. در این حالت به دلیل حرکت شیب به سمت پایین‌دست نیروهای محوری به لوله وارد می‌شود. از طرفی دیگر به دلیل نشست خاک نیروهای ناشی از خمش در لوله نیز به آن وارد می‌شود. همچنین به دلیل روانگرا شدن خاک و تبدیل آن به یک سیال با چگالی بالا، نیروهای ناشی از غوطه‌وری به آن وارد می‌شود. در حالت دوم لوله درون لایه‌ای از خاک غیر روانگرا قرار نداشته و این لایه بر روی خاک روانگرا شونده قرار دارد لذا پس از رخداد پدیده روانگرایی در لایه‌های زیرین، لایه غیر روانگرا به پایین‌دست حرکت کرده و نیروهای محوری و خمشی در لوله ایجاد می‌شود اما دیگر نیروی ناشی از غوطه‌وری لوله در خاک روانگرا به آن وارد نمی‌شود. در مراجع معتبر به هر یک از این دو حالت اشاره شده است (ALA, 2001). در تحقیق حاضر حالت دوم، یعنی قرارگیری لوله در یک‌لایه نازک خاک غیر روانگرا و واقع شدن این لایه بر بستری روانگرا شونده، موردمطالعه قرار می‌گیرد. جهت حرکت شیب موازی با جهت لوله مدفون بوده درنتیجه تنش‌های محوری در قالب تنش فشاری و کششی و همچنین ممان خمشی در لوله ایجاد می‌گردد. *شکل ۲* هندسه مدل را در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. تنها تفاوت در آزمایش‌ها، شیب سطح زمین بوده و محل حسگرها بدون تغییر باقی می‌ماند. لوله در عمق ۵ سانتی‌متری دفن گردیده که با توجه به نسبت تشابه ۳۵ برابر، در واقعیت در عمقی حدود ۱.۷۵ متری قرار خواهد گرفت که عددی مناسب برای بسیاری از لوله‌های دفن شده در واقعیت می‌باشد. قرار دادن تونل در عمقی کمتر از این مقدار در مدل می‌تواند خطاهایی را در مدل‌سازی وارد نماید.



شکل ۲: هندسه مدل موردمطالعه و محل قرارگیری حسگرها

– ساخت مدل و انجام آزمایش

با توجه به اینکه خاک مورد آزمایش باید به‌گونه‌ای باشد که روانگرایی کامل در آن به وقوع بپیوندد لذا باید از خاک ماسه‌ای بدون چسبندگی و با درصد تراکم پایین استفاده گردد. درصد تراکم حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد برای این خاک در نظر گرفته شد. مدل در یک مخزن خاک انجام می‌شود. خاک‌ریزی و کوبش آن بر اساس روش تراکم مرطوب صورت گرفته است. در این روش برای رسیدن به تراکم موردنظر، به خاک حدود ۵ درصد رطوبت اضافه گشته و به خوبی با خاک مخلوط می‌گردد تا مصالحی یکنواخت تهیه گردد. سپس به ازای حجم مشخصی از مخزن، که در آزمایش حاضر به ازای هر ۵ سانتی‌متر خاک‌ریزی در ارتفاع، جرم خاک موردنیاز محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از کوبه‌های مخصوص تعدادی ضربه‌ی یکنواخت به مدل وارد می‌گردد تا این مقدار خاک در حجم مشخص‌شده متراکم گردد. با این روش می‌توان یک نمونه یکنواخت و با درصد تراکم موردنیاز را ایجاد نمود. استفاده از خطوط ماسه‌های رنگی به‌صورت شبکه‌ای عمود بر هم در سطح خارجی مدل این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان تغییر شکل‌های ایجادشده در مدل را مشاهده نمود. ازآنجایی‌که روانگرایی در خاک‌هایی که درجه اشباع بالایی دارند رخ می‌دهد درنتیجه باید خاک ساخته‌شده به‌وسیله عبور آب اشباع گردد. هوای محبوس بین حفرات خاک به‌راحتی نمی‌توانند در آب حل‌شده و لذا می‌تواند خاک به‌طور کامل اشباع نگردد. عبور گاز CO_2 از مدل به مدت چند ساعت و جایگزینی آن با هوا باعث می‌گردد که پس از عبور آب از نمونه، این گاز در آب حل‌شده و تمام حفرات خاک از وجود آب اشباع گردند. گام انتهایی آزمایش، اعمال لرزه موردنظر به مدل و ثبت داده‌ها به کمک حسگرهای مورداستفاده در آزمایش است. لرزه‌ی وارد به مدل باید در آزمایش‌ها یکنواخت باشد. بارگذاری هارمونیک با دامنه شتاب ۰.۲g و با فرکانس ۳ هرتز به مدل در طی ۵ ثانیه وارد می‌گردد. ۱۵ سیکل بارگذاری وارده به مدل باعث می‌گردد که نمونه به روانگرایی کامل برسد. به علت این بارگذاری و پس از وقوع روانگرایی، شیب شروع به حرکت به سمت پایین‌دست کرده و باعث ایجاد نیرو در لوله مدفون می‌گردد.

– برنامه آزمایش‌ها

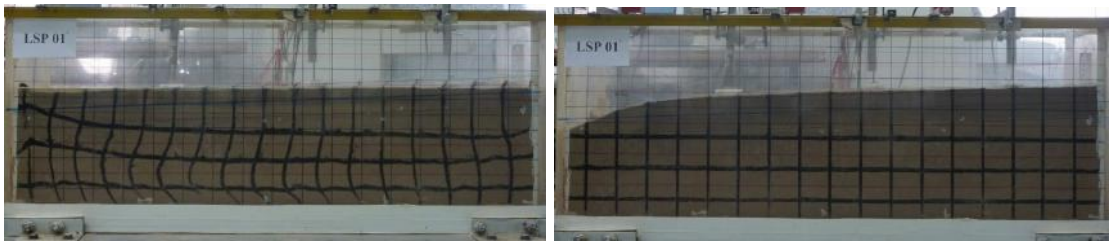
در این مقاله به بررسی ۴ آزمایش انجام‌شده، که در آن‌ها شیب سطح زمین متفاوت است، پرداخته می‌شود. مشخصات هندسی و لرزه اعمالی و همچنین خصوصیات خاک برای هر یک از آزمایش‌ها در *جدول ۴* بیان‌شده است.

جدول ۴: برنامه آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر

نام آزمایش	شیب سطح زمین (٪)	شتاب اعمالی (g)	مدت‌زمان لرزه (s)	فرکانس (Hz)	تخلخل نمونه	تراکم نسبی (٪)
LSP01	۴	۰.۲	۵	۳	۰.۸۷	۲۱
LSP02	۲.۵	۰.۲	۵	۳	۰.۸۹	۱۶
LSP03	۱.۵	۰.۲	۵	۳	۰.۹	۱۳
LSP04	صفر	۰.۲	۵	۳	۰.۹	۱۳

مشاهدات آزمایش‌ها

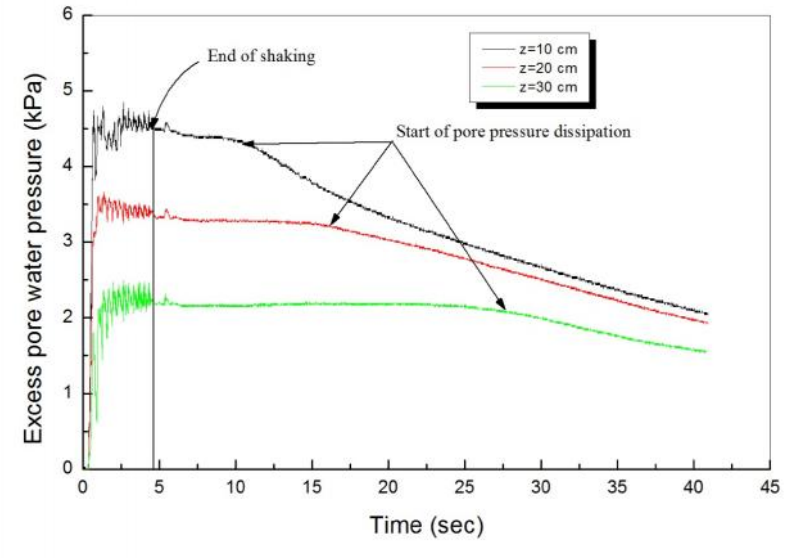
آنچه در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده مشاهده گردیده است، حرکت شیب به سمت پایین شیب پس از اعمال لرزه و وقوع روانگرایی کامل در مدل است. این تغییر مکان به‌وضوح در تصاویر گرفته‌شده از بیرون مخزن خاک و توسط ماسه‌های رنگی نشان داده می‌شود. عمود ماندن لایه‌های ماسه رنگی در لایه بالایی که لوله در آن مدفون است، نشان از عدم روانگرا شدن این لایه می‌دهد. حرکت لایه غیر روانگرا به سمت پایین شیب به دلیل روانگرا شدن خاک زیرین باعث ایجاد نیروهای محوری و همچنین خمشی در لوله‌های مدفون می‌کند. *شکل ۳* نمایی از مدل ساخته‌شده قبل از اعمال لرزه و همچنین تغییر شکل‌های ایجادشده در خاک پس از اعمال لرزه را برای آزمایش LSP01 نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییر شکل‌های ایجادشده در آزمایش LSP01؛ راست: قبل از اعمال لرزه، چپ: پس از اعمال لرزه

با اعمال لرزه به کف مدل ، به دلیل کوچک بودن حفرات موجود در خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای ایجادشده در خاک به سرعت زهکشی نمی‌گردند، لذا اضافه فشار آب حفره‌ای تا حداکثر میزان خود که برابر با تنش مؤثر خاک در آن نقطه است، افزایش می‌یابد. *شکل ۴* نمایی از نحوه

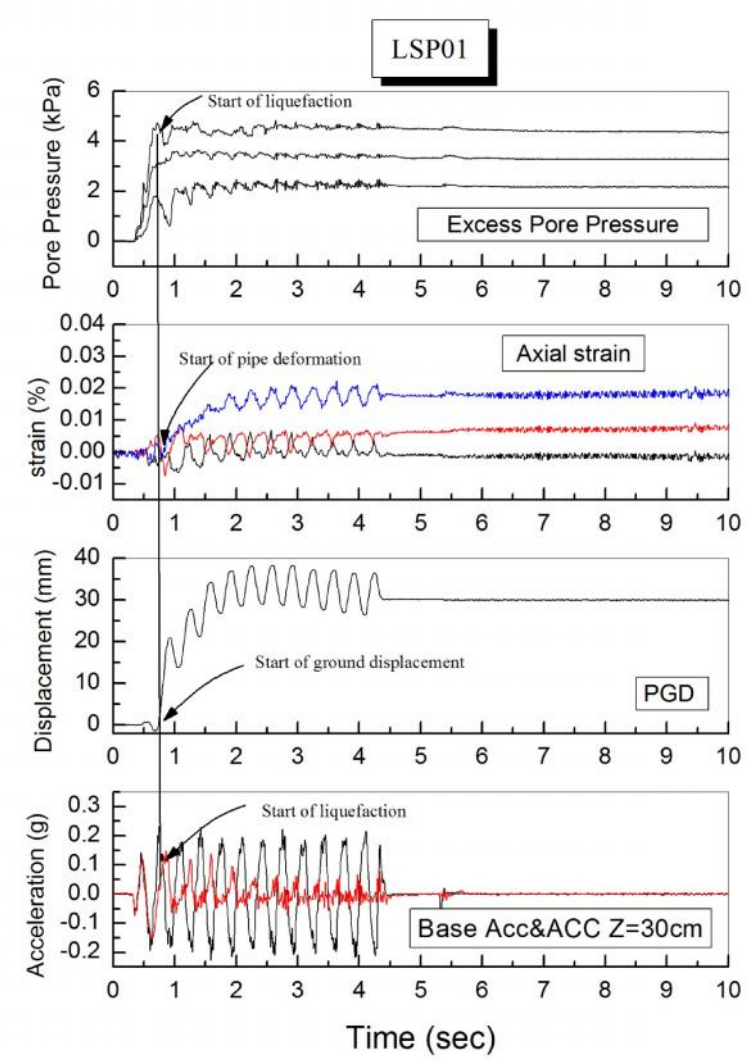
افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای در طول لرزه اعمالی نشان می‌دهد. باوجوداینکه این اضافه فشار در بازه بسیار کمی به حداکثر مقدار خود می‌رسد بااین‌حال محو شدن اضافه فشار آب حفره‌ای با تأخیر فراوان ای پس از اتمام لرزه آغاز گشته و سپس با سرعت بسیار کمی کاهش پیدا می‌کند. متناظر با کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای، بالا زدن آب در سطح مدل و نشست آرام خاک نیز آغاز می‌گردد. *شکل ۴* تاریخچه زمانی اضافه فشار آب حفره‌ای را در سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری مدل نشان می‌دهد.



شکل ۴: تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف در آزمایش LSP01

مشاهدات نشان می‌دهند که با افزایش فشار آب حفره‌ای وقتی مقدار آن به حداکثر می‌رسد، تغییر شکل‌های زیاد و کرنش‌های بسیار بزرگ در خاک ایجاد می‌شوند که منجر به گسیختگی جریانی می‌گردد. تغییر شکل‌های بسیار بزرگ در خاک روانگرا باعث حرکت و تغییر شکل لایه غیرروانگرای فوقانی می‌شود و این امر باعث ایجاد نیروهای محوری و لنگر خمشی در لوله مدفون می‌شود. این موضوع در آزمایش‌هایی که زمین بدون شیب در نظر گرفته‌شده است نیز صادق است (LSP04)، لکن نوع تغییر شکل‌های بزرگ در این آزمایش‌ها نشست است. این نشست که تا بیش از ۱۰٪ عمق لایه روانگرا شده نیز می‌تواند باشد، لوله مدفون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در آزمایش‌های انجام‌شده، نیروهای محوری و لنگر خمشی سیکلی (رفت و برگشتی) و نیز نیروهای محوری و لنگر خمشی ماندگار قابل‌توجهی در لوله مدفون به وجود می‌آید. مقادیر این نیروها توسط حسگرهای مختلف اندازه‌گیری شده و در بررسی‌های کمی موردتوجه قرار خواهد گرفت. اما آنچه در این قسمت مهم است و باید به آن توجه شود، این است که مقادیر لنگر خمشی و نیروهای محوری ماندگار در آزمایش‌ها بسیار قابل‌توجه می‌باشند. هرچند آزمایش‌های حاضر منجر به گسیختگی لوله مورد آزمایش نشده‌اند ولی می‌توان تصور کرد در مواردی که مقادیر تغییر شکل‌های خاک زیادتر گردند، می‌توانند تغییر شکل‌های ماندگار و پلاستیک در لوله‌ها بجا بگذارند. شروع تغییر شکل‌های ماندگار عموماً بعد از رسیدن فشار آب حفره‌ای به مقدار حداکثر و شروع جابجایی دائمی زمین رخ می‌دهد.

شکل ۵ مقایسه داده‌های حاصل از حسگرهای به کار گرفته در آزمایش را نشان می‌دهد. با شروع روانگرایی و پس از اعمال تقریباً دو سیکل بارگذاری، فشار آب حفره‌ای ایجادشده در مدل به حداکثر میزان خود در اعماق مختلف می‌رسد. روانگرایی کامل از این لحظه آغاز می‌گردد. مقایسه شتاب‌نگاشت‌های زلزله ورودی با شتاب‌نگاشت حاصل از شتاب سنج قرارگرفته در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک، نشان می‌دهد که با پیشرفت بارگذاری سیکلی، دامنه شتاب کاهش پیدا می‌کند. این مسئله بیانگر کاهش مقاومت برشی خاک و وقوع روانگرایی کامل است. لازم به ذکر است که موج‌برشی در سیالات نمی‌تواند انتشار پیدا کند و در حالت روانگرایی کامل، خاک همچون سیالی با گرانروی بالا رفتار می‌کند. از طرف دیگر با شروع پدیده روانگرایی و کاهش مقاومت برشی خاک، شیب شروع به حرکت به سمت پایین‌دست می‌کند. بااین‌حال به دلیل ادامه یافتن لرزه‌های وارد بر مدل همچنان حرکت رفت و برگشتی در خاک مشاهده می‌شود. به دلیل حرکت شیب به پایین‌دست، جابجایی ماندگاری در سطح زمین رخ‌داده که این جابجایی پس از اعمال حدود ۶ سیکل بارگذاری به حداکثر مقدار خود در مدل مورد آزمایش می‌رسد لذا می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که بخش مهم جابجایی و متناظر با آن خرابی‌های وارد بر لوله در زمان وقوع زلزله به لوله وارد می‌شود. درواقع دو گونه جابجایی به خاک و لوله وارد می‌شود. جابجایی سیکلی (رفت و برگشتی) که ناشی از وجود لرزه بوده و دیگری جابجایی مونوتونیک خاک به دلیل حرکت شیب به سمت پایین‌دست. به دلیل ترکیب این دو حرکت بیشترین مقدار جابجایی در سیکل‌های انتهایی لرزه به نمونه وارد می‌شود که در آن جابجایی مونوتونیک به حداکثر مقدار خود رسیده و جابجایی سیکلی متناوباً باعث افزایش آن می‌گردد. همچنین تطابق بسیار خوبی بین داده‌های ثبت‌شده برای کرنش محوری در نقاط مختلف لوله با جابجایی‌های افقی شیب مشاهده می‌گردد.



شکل ۵: تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای، کرنش محوری، جابجایی جانبی شیب و شتاب‌های ثبت‌شده در آزمایش LSP01

اثر شیب بر کرنش‌های ایجادشده در لوله‌های مدفون

با توجه به محدودیت‌های استفاده از حسگرها، سه نقطه در بالادست، مرکز و پایین‌دست شیب برای ثبت کرنش‌های محوری انتخاب گردید. حداکثر کرنش محوری ثبت‌شده برای سه آزمایش LSP01 و LSP02 و LSP03، که در آن‌ها شیب به ترتیب برابر با ۴ و ۲.۵ و ۱.۵ درصد است، در *جدول ۵* آورده شده است. حداکثر کرنش‌های ثبت‌شده به‌اندازه‌ای نیست که بتواند در لوله گسیختگی ایجاد نماید. بااین‌حال وقوع چنین پدیده‌ای با افزایش میزان جابجایی وارده به لوله و همچنین در واقعیت بسیار محتمل است. داده‌ها نشان می‌دهد که با کاهش شیب حداکثر کرنش محوری ثبت‌شده در بالادست کاهش می‌یابد. این در حالی است که عکس این مسئله در پایین‌دست شیب رخ می‌دهد.

جدول ۵: حداکثر کرنش محوری ثبت‌شده در نقاط مختلف لوله مدفون در آزمایش‌های با سطح شیب‌دار

آزمایش	شیب (٪)	حداکثر کرنش محوری (٪)		
		بالادست	مرکز	پایین‌دست
LSP 01	۴	۰.۱۸۱	۰.۱۱۰	۰.۰۶۷
LSP 02	۲.۵	۰.۱۵۱	۰.۱۳۵	۰.۱۵۰
LSP 03	۱.۵	۰.۱۳۹	۰.۱۱۱	۰.۱۷۶

نتیجه‌گیری

۱- در آزمایش‌های انجام‌شده، دو نوع تغییر شکل دائمی زمین، یعنی تغییر شکل جانبی ناشی از گسترش جانبی در زمین شیب‌دار و نیز نشست ناشی از روانگرایی مشاهده گردید که تأثیر محرز تغییر شکل‌های زیاد زمین بر لوله مشاهده گردیده است.

۲- در اثر اعمال شتاب به مدل‌ها، خاک دچار روانگرایی شده و لذا نرم شدگی قابل‌توجهی در اثر افزایش فشار آب حفره‌ای در آن‌ها به وجود می‌آید. این نرم شدگی در زمین شیب‌دار منجر به تغییر شکل‌های جانبی قابل‌توجه می‌گردد.

۳- بخش مهم تغییر شکل‌های جانبی در حین اعمال لرزش (وقوع زلزله) و بخش کمتر بعد از خاتمه لرزش تا حصول به مقدار پسماند نهایی رخ می‌دهند.

۴- تغییر شکل‌های ناشی از اعمال لرزش در اثر نیروهای اینرسی ناشی از شتاب زمین از یک‌سو و جابجایی‌های مونوتونیک ناشی از نیروهای ثقلی (در اثر شیب‌دار بودن زمین) ناشی از نرم شدگی متأثر از روانگرایی به وجود می‌آیند.

۵- اندرکنش لوله مدفون با حرکت زمین تحت تأثیر هر دو نوع جابجایی فوق‌الذکر قرار دارد. چون بیشترین مقدار جابجایی در سیکل‌های اول زلزله و در حین اعمال لرزش به وجود می‌آیند، بیشترین جابجایی و تغییر شکل لوله نیز در حین اعمال لرزش رخ می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر حداکثر کرنش اعمالی به لوله در حین زلزله رخ می‌دهد و مقدار این کرنش از کرنش پسماند بعد از خاتمه زلزله بیشتر است. به نظر می‌رسد در همان لحظات وقوع زلزله لوله دچار آسیب خواهد شد.

تشکر و قدردانی

مؤلفین بر خود لازم می‌دانند از امور پژوهش و فن‌آوری شرکت گاز استان تهران به جهت حمایت‌های علمی و مالی انجام‌شده از این پروژه تحقیقاتی، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

مراجع

احمدی م (۱۳۹۰) بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های اجرا شده در خاک با پوشش قطعه‌ای با استفاده از آزمایش‌های میزلرزه 1g، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران

American Lifeline Alliance (ALA) (2001) Guidelines for the design of Buried steel pipe, American Society of Civil Engineering (ASCE)

Iai S (1989) Similitude for shaking Table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field, *Report on the port and harbor research institute*

O'Rourke TD and Palmer MC (1996) Earthquake Performance of Gas Transmission Pipelines, *Earthquake Spectra*, 12(3): 493–527

O'Rourke TD (1996) Lessons Learned for Lifeline Engineering from Major Urban Earthquake, 11th World Conference on Earthquake Engineering