

مدلسازی عددی لوله‌های مدفون تحت ناپایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها

فردین جعفرزاده

دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
fardin@sharif.edu

محمد مهدی شهرابی

کارشناس ارشد ژئوتکنیک، مهندسین مشاور آبگیر، تهران، ایران
mahdi89sh@yahoo.com

هادی فرحی جهرمی

دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
mani_ff@yahoo.com

مسعود صمدیان

رئیس بخش تحقیقات و فناوری، شرکت گاز استان تهران، تهران، ایران

کلید واژه‌ها: لوله‌های مدفون، مدلسازی عددی، ناپایداری شیروانی، مخاطرات لرزه‌ای

چکیده

در این پژوهش، تحلیل سه بعدی رفتار شیروانی‌های خاکی تحت بارگذاری دینامیکی، به منظور بررسی اندرکنش سیستم خاک-لوله صورت پذیرفت. برای مدلسازی رفتار خاک، از رفتار الاستیک خطی معادل با سختی کاهش یافته وابسته به کرنش برشی تناوبی و نیز پلاستیک بر پایه معیار موهر-کولمب استفاده گردید و برای لوله رفتار الاستوپلاستیک در نظر گرفته شد. برای مدلسازی دینامیکی سه بعدی شیروانی‌ها، که بر مبنای نتایج بدست آمده از مدلسازی فیزیکی کوچک مقیاس صحت سنجی شده، و به منظور تحلیل پاسخ لوله‌های مدفون در چنین شرایطی، از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شد. اثر محل قرارگیری لوله‌ها و نیز تغییرات عمق دفن لوله‌ها بررسی شده و بر مبنای این مدل‌های عددی، پیشنهاداتی جهت محل قرارگیری لوله در شیروانی‌ها برای کاهش اثرات ناشی از حرکت لرزه‌ای شیروانی ناپایدار بر روی لوله‌های مدفون ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد لوله‌های جاگذاری شده در بخش‌های مختلف شیروانی دچار کرنش‌های پلاستیک متفاوتی شده‌اند و افزایش عمق دفن در بعضی از آن‌ها می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای در جهت کاهش خسارات احتمالی وارد بر لوله‌ها عمل کند.

مقدمه

خطوط لوله انتقال نفت، گاز، آب و غیره، از مهم‌ترین سازه‌های ساخت بشر می‌باشند که امروزه نقشی تعیین‌کننده در تامین انرژی، سلامت و نیز در زمینه تجارت ایفا می‌کنند. این سازه‌ها از آن جهت اهمیت زیادی دارند که با زندگی روزمره انسان ارتباط تنگاتنگی دارند تا جاییکه تحت عنوان شریان‌های حیاتی نامگذاری شده و جزو زیرساخت‌های مهم دسته بندی می‌شوند. بخشی از این خطوط لوله روی سطح زمین و بخشی دیگر به صورت مدفون در داخل زمین قرار می‌گیرند تا در مقابل شرایط آب و هوایی و مخاطرات سطحی محافظت شوند. موضوع حائز اهمیت در طراحی خطوط لوله مدفون، بررسی عملکرد لوله در برابر مخاطرات زمینی گوناگونی می‌باشد که بر نحوه عملکرد آنها تاثیر می‌گذارند. از همین رو رفتار لوله‌های مدفون حین و پس از وقوع زمین لرزه، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی ایمن آن‌ها می‌باشد. عدم کارکرد صحیح شریان‌های حیاتی پس از وقوع زلزله، به خصوص در محیط‌های شهری، خود موجب ایجاد فجایع ثانویه می‌شود که گاهی از خسارات وارده حین زلزله بیش تر می‌باشند، از جمله آتش سوزی در محل‌های آسیب دیده خطوط لوله گاز و شیوع سریع بیماری ناشی از خرابی و قطع خطوط لوله آب و فاضلاب شهری. مناطق آسیب پذیر لرزه‌ای می‌توانند دور از محل وقوع زلزله واقع شده باشند. در این مناطق خرابی‌های ناشی از زلزله به صورت مستقیم اثر ناچیزی دارند و خسارات وارده به این مناطق بیشتر ناشی از آسیب رسیدن به شریان‌های حیاتی تامین‌کننده

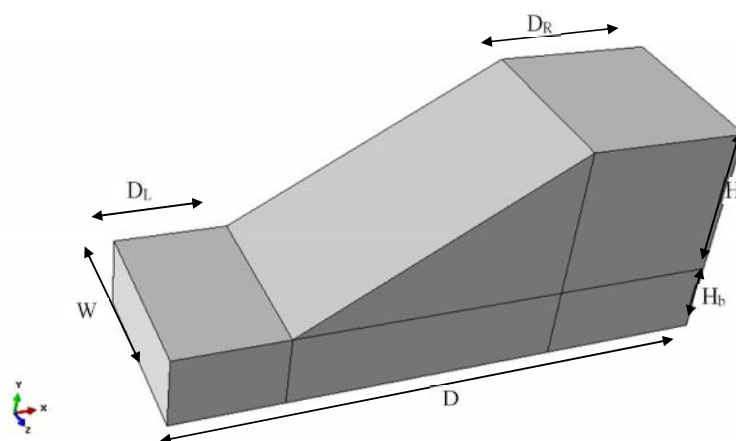
آب و گاز آن‌ها هستند که ممکن است در فواصلی بسیار دور دچار خرابی گردند. از این رو اهمیت لوله‌های مدفون چیزی فراتر از بررسی‌های ریسک لرزه‌ای محلی می‌باشد و تامین ایمنی آنها حتی برای مناطق با لرزه‌خیزی پایین از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از موارد مهم مورد بررسی در رفتار لرزه‌ای شریان‌های حیاتی، پاسخ آن‌ها در برابر ناپایداری دینامیکی شیروانی‌های خاکی می‌باشد. بررسی این مسئله به خصوص با توجه به توپوگرافی خاص شیروانی‌های خاکی و تاثیر آن بر آنالیزهای پاسخ زمین در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای (نحوه انتشار امواج و نیز خرابی‌ها) ضروری می‌نماید. در این پژوهش به دنبال مدلسازی عددی و بررسی رفتار دینامیکی لوله‌های مدفون واقع در شیروانی‌های خاکی حین وقوع زمین لرزه می‌باشیم.

این پژوهش در کنار پروژه شبیه‌سازی رفتار لوله‌های مدفون در شیروانی‌های خاکی تحت بارگذاری لرزه‌ای به وسیله میزلرزه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف تعریف شده است. در این راستا، سعی شده که با استفاده از مدل عددی بزرگ مقیاس که نتایج آن با توجه به آزمایش‌های متناظر فیزیکی میزلرزه واسنجی گردیده است، تاثیر ناپایداری لرزه‌ای شیروانی‌های خاکی با مصالح ماسه‌ای خشک بر رفتار لوله‌های مدفون در بخش‌های مختلف شیروانی با عمق دفن‌های مختلف بررسی گردد.

فرضیات مدلسازی عددی شیروانی خاکی

ابعاد شیروانی: به منظور مدلسازی عددی شیروانی خاکی، از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. ابعاد مدل با توجه به مدل فیزیکی شیروانی روی میزلرزه در دانشگاه صنعتی شریف (Farahi et al., 2013) و بر مبنای مدل بزرگ مقیاس متناظر با آن (با ضریب تشابه هندسی ۱۰) تعیین شده است و آنالیزهای صحت‌سنجی در این زمینه انجام گرفته است (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۲). هندسه شیروانی در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین ابعاد هندسی در جدول ۱ آورده شده است.



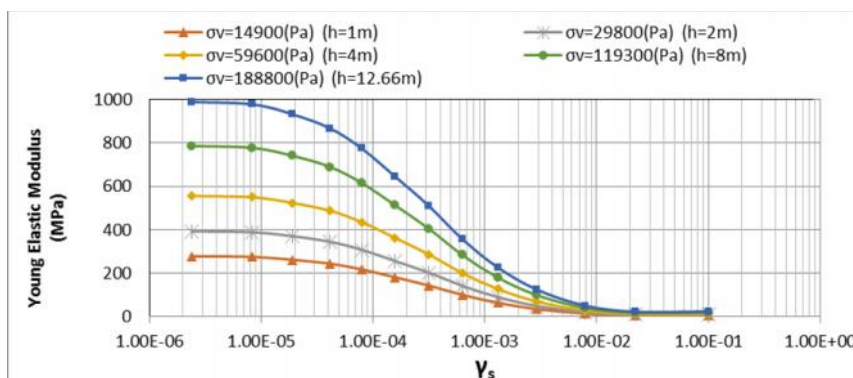
شکل ۱: ابعاد هندسی مدل عددی

جدول ۱: پارامترهای هندسی مدل عددی

i (°)	W (m)	L (m)	L_c (m)	L_t (m)	H_b (m)	H_s (m)
۳۰	۱۰/۰	۳۰/۱۵	۹/۱۵	۶/۰	۴/۰	۸/۶۶

خصوصیات مصالح: مصالح مورد استفاده در مدلسازی عددی بر مبنای پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک ماسه‌ای خشک بابلسر که آزمایش‌های پایه میزلرزه بر روی آن انجام گرفته بود انتخاب شده است (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۲). بر این مبنای خصوصیات الاستیک به صورت خطی معادل وابسته به کرنش برشی (Kramer, 1996) و با توجه به رابطه پیشنهادی EPRI (1996) تعریف گردید. همچنین مدول الاستیک با نسبت مجذور تنش نرمال در هر ارتفاع مدل به صورت متغیر تعریف شد. در شکل ۲ روابط کاهش‌ی الاستیک خطی را که در این مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت مشاهده می‌کنید.

خصوصیات پلاستیک نیز برای مصالح خاکی در نظر گرفته و با توجه به مدل رفتاری موهر-کولمب تعریف شد. پارامترهای متناظر مدل موهر-کولمب بر مبنای نتایج آزمایش‌های انجام گرفته روی خاک ماسه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌های فیزیکی اندازه‌گیری شد که در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



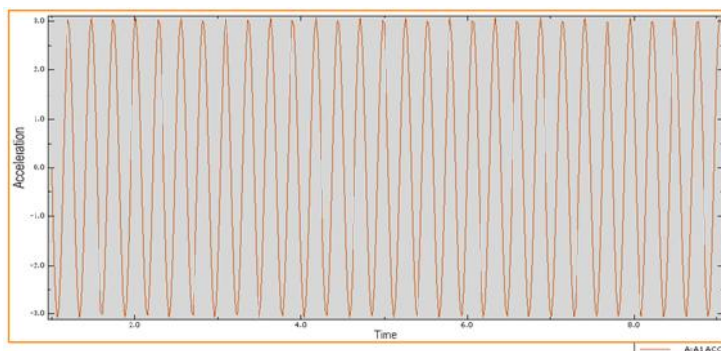
شکل ۲: روابط کاهش‌ی الاستیک خطی معادل مورد استفاده در مدلسازی خاک ماسه‌ای

جدول ۲: پارامترهای هندسی مدل عددی (درخشان غازی، ۱۳۹۲)

زاویه اصطکاک (ا)	زاویه اتساع (ا)	چسبندگی (Pa) - c	دانسیته (kg/m ³) -
۳۰	۰/۱	۶۰۰	۱۵۲۰

شرایط مرزی و خصوصیات بار لرزه‌ای: دو نوع شرایط اولیه پیش از بارگذاری دینامیکی (شرایط تنش برجا) روی شیروانی تعریف شده، وزن خاک و فشار جانبی روی دیواره‌های مدل. وزن خاک با توجه به چگالی 1520 kg/m^3 در جهت قائم و فشار جانبی اعمالی روی صفحات جانبی مدل در حالت ساکن با ضریب k_0 در شرایط اولیه تعریف می‌شود. این فشار با توجه به ارتفاع خاک بالای هر نقطه در مدل محاسبه می‌شود. همچنین بمنظور ایجاد مرزهای جاذب در اطراف مدل، درگام دینامیکی فنرها و میراگرهایی برمبنای مدل‌های مخروطی (Meek and Wolf (1992) در مرزهای مدل و در محل اتصال المانها اعمال شد.

بار دینامیکی اعمالی به صورت شتاب سینوسی به کف مدل اعمال شد. برای تعیین دامنه، فرکانس و تعداد سیکل بارگذاری، از زلزله‌ای با دوره بازگشت ۹۷۵ سال برای شهر تهران استفاده شد (TGC, 2012). به همین منظور ۲۵ سیکل با دامنه 0.32 g (۶۵٪ دامنه حداکثر شتاب افقی پیش بینی شده در سطح زمین) و با فرکانس ۵ هرتز انتخاب شد (شکل ۳).



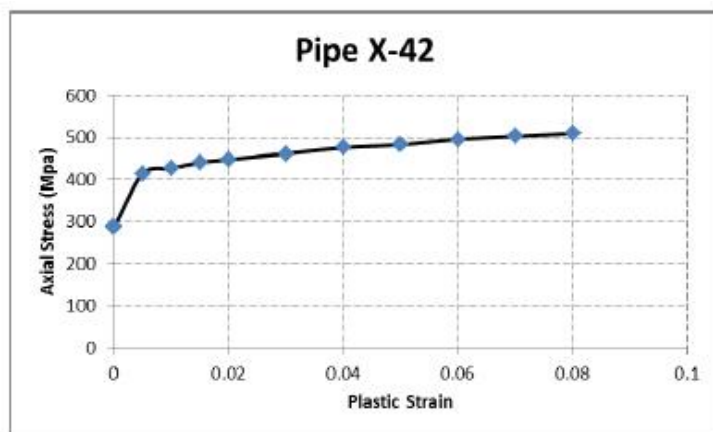
شکل ۳: رکورد شتاب سینوسی اعمالی به مدل عددی

خصوصیات لوله‌های مدفون

جنس و خصوصیات رفتاری لوله: لوله‌های API-5L-X42 مورد استفاده در این مدلسازی بر اساس استاندارد شرکت گاز از نوع لوله‌های فولاد کربنی با تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشند. به منظور تعریف رفتار الاستیک برای لوله، مدول یانگ برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

در مدل رفتاری کلاسیک پلاستیک فلز می‌توان جریان غیرالاستیک یا جاری شدن یک فلز را وقتی تحت بارگذاری یکنواخت است و اثرات خزش مهم نیست نشان داد و از آن استفاده نمود. سطح جاری شدن با استفاده از معیار میسز تعریف می‌شود که با داده‌های مربوط به تنش محوری بر حسب کرنش پلاستیک نظیر آن تعیین می‌گردد. رفتار سخت شوندگی فلز به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود، ولی می‌توان رفتار آن را بدون سخت شوندگی یعنی کاملاً پلاستیک نیز مدل نمود. قانون جاری شدن به این صورت است که وقتی ماده جاری می‌گردد، نرخ تغییرشکل غیر الاستیک در جهت عمود بر سطح جاری شدن می‌باشد. نمودار تنش محوری لوله بر حسب کرنش آن در شکل ۴ نشان داده شده است (یوسفی سیگاری، ۱۳۹۱).





شکل ۴: نمودار تنش-کرنش پلاستیک لوله های API-5L-X42 (یوسفی سیگاری، ۱۳۹۱)

خصوصیات اندرکنشی خاک- لوله: اندرکنش بین سطوح تماسی خاک و لوله شامل دو مولفه می باشد، یک مولفه عمودی بین دو سطح و یک مولفه مماسی. مولفه مماسی شامل لغزش نسبی سطوح بوده و می توان به آن خصوصیات اصطکاکی نسبت داد. برای بیان رفتار اصطکاکی از قانون کولمب استفاده می شود که در آن حداکثر تنش برشی قابل انتقال برابر ضریبی از تنش نرمال است که در اصطلاح به آن ضریب اصطکاک گفته می شود (μ). این ضریب با توجه به جدول ۳ برای لوله پلی اتیلن تعیین شده است که در آن ضریب اصطکاک به صورت $\tan(f*\Phi)$ تعریف می شود و Φ زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

برای اندرکنش لوله و خاک در راستای عمود بین دو سطح، تماس سخت انتخاب شده است. در این حالت، وقتی سطوح با هم در تماس هستند هر فشار تماسی می تواند بین دو سطح (خاک و لوله) منتقل گردد و وقتی دو سطح با هم تماسی نداشته باشند، فشاری بین آن دو منتقل نمی شود. در این حالت نفوذ سطح مغلوب (خاک) به داخل سطح غالب (لوله) که سخت تر است، به کمترین مقدار رسانده شده و اجازه انتقال تنش های کششی بین دو سطح داده نمی شود. به عبارت دیگر، تنش عمودی در محل تماس وقتی فاصله بین دو سطح وجود داشته باشد، صفر خواهد بود و وقتی فاصله بین دو سطح موجود نباشد از نوع فشاری خواهد بود.

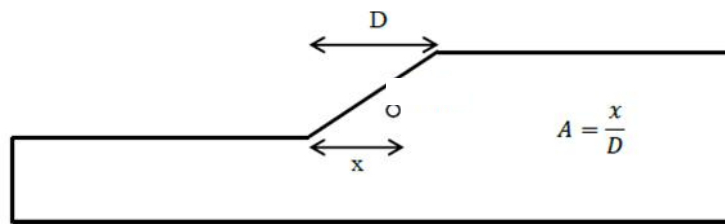
جدول ۳: ثابت اصطکاک بین خاک و لوله بر اساس جنس لوله (Dash, 2007)

پوشش سطح لوله	f (ضریب اصطکاک)
بتن	۱/۰
قیراندود	۰/۹
فولاد زبر	۰/۸
فولاد نرم	۰/۷
اپوکسی	۰/۶
پلی اتیلن	۰/۶

محل قرارگیری لوله ها و عمق دفن: محل قرارگیری لوله ها در مقطع شیروانی مطابق شکل ۵ به صورت رابطه ۱ تعریف میشود:

$$A=x/D \quad (1)$$

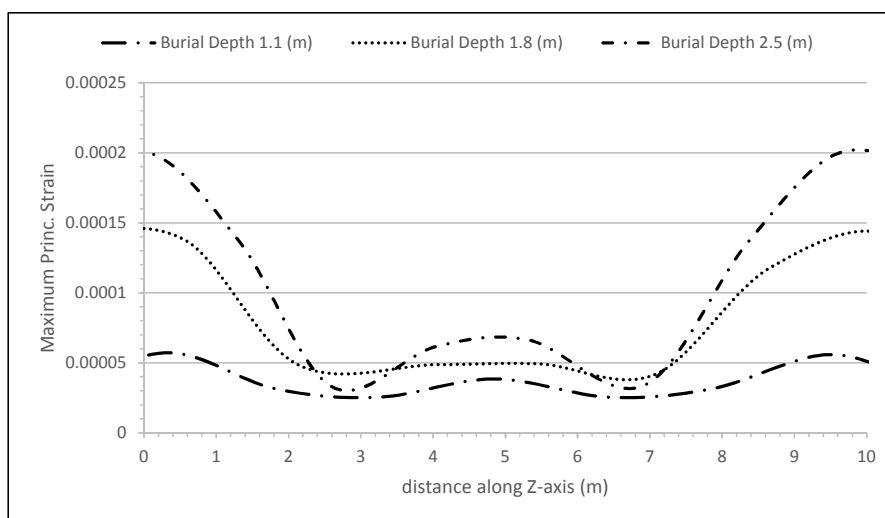
که x فاصله مرکز لوله از پای شیروانی و D طول شیروانی است. در این مدل ها ۴ مقدار مختلف برای A انتخاب شده است که به ترتیب عبارتند از: $۰/۲$ ، $۰/۳۳$ ، $۰/۶۷$ و $۱/۲$. همچنین عمق دفن لوله ها (از روی لوله تا سطح زمین) به ترتیب $۱/۱$ متر، $۱/۸$ متر و $۲/۵$ متر در نظر گرفته شده است.



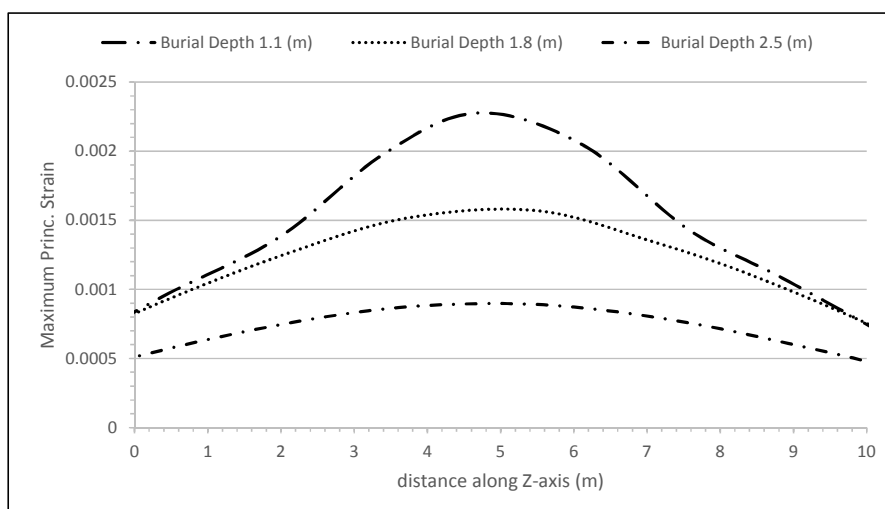
شکل ۵: موقعیت هندسی قرارگیری لوله ها

نتایج کرنش های پلاستیک در طول لوله های مدفون

بر پایه مدل های ساخته شده، در شکل های ۶ تا ۹ کرنش اصلی حداکثر برای لوله های قرار گرفته در بخش های مختلف شیروانی در عمق دفن های متفاوت (۱/۱، ۱/۸، و ۲/۵ متر) مشاهده می شود.

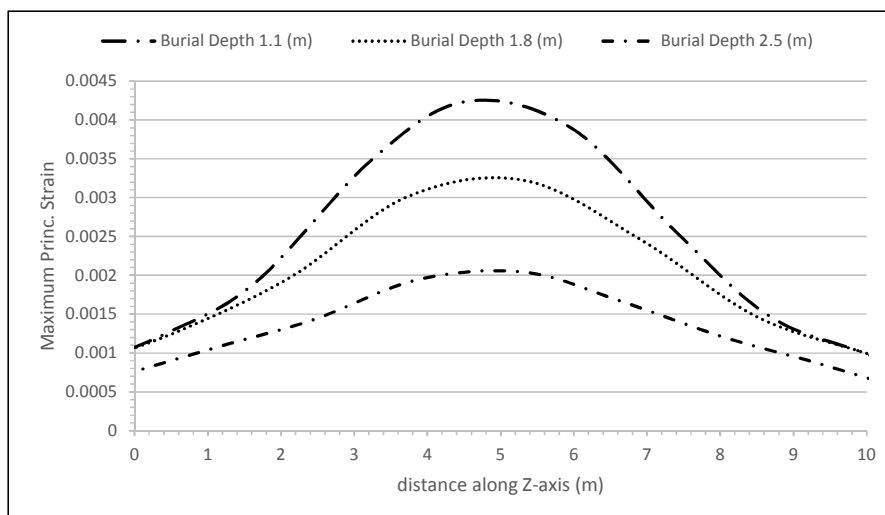


شکل ۶: کرنش اصلی حداکثر در طول لوله در محل استقرار $A=0.2$

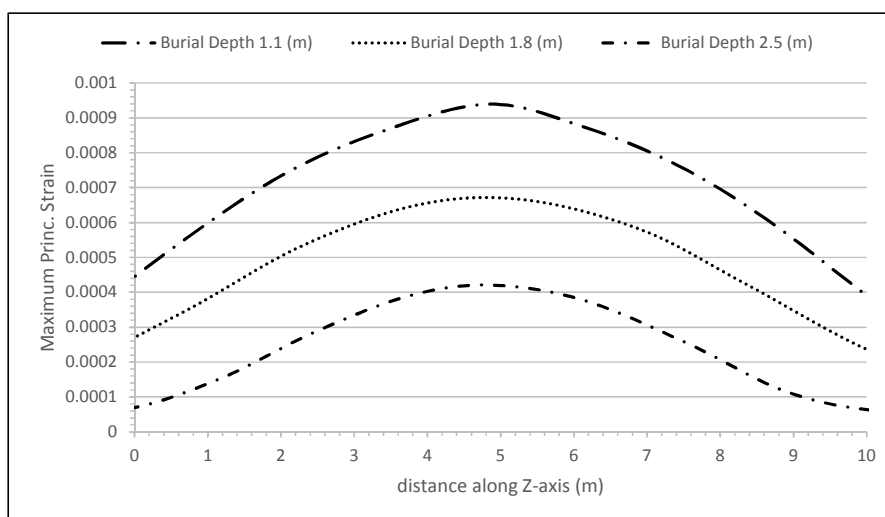


شکل ۷: کرنش اصلی حداکثر در طول لوله در محل استقرار $A=0.33$





شکل ۸: کرنش اصلی حداکثر حداکثر در طول لوله در محل استقرار $A=0.66$



شکل ۹: کرنش اصلی حداکثر حداکثر در طول لوله در محل استقرار $A=1.2$

نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شده که با استفاده از مدلسازی عددی به وسیله نرم افزار المان محدود ABAQUS که نتایج آن با توجه به آزمایش های متناظر فیزیکی میز لرزه واسنجی گردیده است، تاثیر ناپایداری لرزه ای شیروانی های خاکی با مصالح ماسه ای خشک بر رفتار لوله های مدفون در بخش های مختلف شیروانی با عمق دفن های مختلف بررسی گردد. نتایج کلی بدست به صورت زیر خلاصه می گردد:

- بحرانی ترین محل استقرار لوله ها در شیروانی در محل یک سوم بالای سطح شیروانی می باشد.
- همانطور که پیش بینی می شد، افزایش عمق دفن از ۱/۱ متر به ۲/۵ متر، باعث کاهش حداکثر جابجایی در لوله ها می گردد (به جز حالت استقرار در پنجه). این کاهش در محل استقرار یک سوم پایینی شیروانی بیشترین (۰.۹۷٪) و در محل استقرار در تاج کمترین میزان (۰.۷۲٪) را دارد. بنابراین افزایش عمق دفن در صورت جاگذاری لوله در یک سوم پایینی شیروانی مؤثرتر می باشد.
- در حالت استقرار لوله در پنجه شیروانی، افزایش عمق دفن کرنش برشی را افزایش می دهد و این بدین معناست که در پنجه شیروانی افزایش عمق در راستای بهسازی وضعیت لوله ها نمی باشد.
- حداکثر کرنش برشی در لوله مستقر در تاج شیروانی در عمق دفن ۱/۱ متری تقریباً با حداکثر کرنش برشی در محل استقرار لوله ها در یک سوم پایینی شیروانی در عمق دفن ۲/۵ متری برابر است. بدین معنا که با افزایش عمق دفن لوله در یک سوم پایینی شیروانی، می توان پاسخ لوله را در حد جاگذاری لوله در تاج با عمق دفن ۱/۱ متری پایین آورد.

- کرنش به وجود آمده در لوله های مستقر در یک سوم بالای شیروانی در کمترین حالت (عمق دفن ۲/۵ متری)، تقریباً برابر با کرنش به وجود آمده در لوله های مستقر در یک سوم پایینی شیروانی در بیشترین حالت (عمق دفن ۱/۱ متری) می باشد. بنابراین به نظر می رسد در صورت لزوم جایگذاری لوله روی سطح شیروانی، باید آن را تا جای ممکن به یک سوم پایین شیروانی نزدیک کرد و عمق دفن را افزایش داد.

مراجع

یوسفی سیگاری س (۱۳۹۱) بررسی اندرکنش لوله های مدفون و شیروانی های خاکی در برابر لغزش و رانش در اثر زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

جعفرزاده ف، شهرابی م م و فرحی جهرمی ه (۱۳۹۲) مدلسازی عددی ناپایداری شیروانی های خاکی تحت بارگذاری دینامیکی، مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ژئوتکنیک، کرمانشاه، ایران

درخشان غازانی ر (۱۳۹۲) مدلسازی فیزیکی اثر عمق دفن لوله های مدفون در شیروانی های خاکی تحت بارگذاری دینامیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

Dash SR (2007) IITK-GSDMA guidelines for seismic design of buried pipelines, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur (India)

Electric Power Research Institute (EPRI) (1996) Guidelines for determining design basis ground motions, Final Rep. No. TR-102293, Palo Alto, California

Farahi Jahromi H, Joshaghani M, Sehi-Zadeh M and Yousefi S (2013) Comparaison des deformations experimentale sur la pente dynamiquement induite la theorie des blocs glissants de Newmark. Proceedings of 5th International Young Geotechnical Engineering Conference, Paris, France

Kramer SL (1996) Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall

Meek JW and Wolf JP (1992) Cone models for homogeneous soil, I. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 118, 667-685

Tehran Gas Company (TGC) (2012) Geological and seismological reports of Tehran, Tehran, Iran

