

بررسی رفتار لوله‌های فولادی مدفون توزیع گاز در انواع خاک‌ها در اثر انتشار امواج لرزه‌ای

جمال احمدی^{۱*}، علی گوهررخی^۲، علی نانکلی^۲، رضا راستی اردکانی^۴

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در مطالعات انجام شده، اثرات زلزله بر روی خطوط لوله مدفون به دو دسته اثر انتشار امواج (آثار دینامیکی) و اثر تغییر مکان پایدار زمین (آثار استاتیکی) تقسیم بندی می‌شوند. به عبارتی خطرات لرزه ای به دو دسته خطرات ناشی از انتشار امواج و تغییر مکان دائمی زمین (PGD) تقسیم می‌شوند. خطر تغییر مکان پایدار زمین (PGD) بر اساس کرنش ایجاد شده در لوله به علت لغزش، نشست زمین یا روانگرایی ناشی از گسترش جانبی مشخص می‌شود و خرابی‌های ناشی از آن معمولاً در ناحیه محدودی از شکست زمین اما به شکل شدیدی اتفاق می‌افتد. مهمترین پارامتر برای تعیین سطح عملکرد و میزان خرابی خطوط لوله مدفون در هنگام وقوع زلزله، مقدار حداکثر کرنش می‌باشد. آئین‌نامه های شریان‌های حیاتی نیز با بررسی مقدار حداکثر کرنش، به بررسی رفتار لرزه ای خطوط لوله مدفون پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار Abaqus روشی برای محاسبه حداکثر کرنش به وجود آمده در لوله های فولادی مدفون انتقال گاز در خاک بر حسب پارامترهای محتوی انرژی زلزله مانند شدت آریاس و شدت طیفی هاوژنر که با استفاده از شتاب نگاشت ها بدست می آید ارائه شده است. سپس به منظور ارائه یک رابطه واحد برای نمایش ارتباط بین حداکثر کرنش لوله های فولادی و پارامترهای محتوی انرژی زلزله (SI, AI, PGV*te/PGD) از پارامتر T/L (نسبت پیروی امواج برشی خاک به طول لوله) استفاده گردید و مقادیر a و b (ضرایب نمودارهای برازش داده شده) در هر بخش بر اساس این پارامتر بیان شده است.

کلمات کلیدی: شریان‌های حیاتی، حداکثر کرنش، لوله مدفون، امواج لرزه‌ای، انواع خاک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.99586.1338	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.99586.1338	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۲/۰۳	۱۳۹۶/۱۲/۰۳	۱۳۹۶/۱۰/۱۰	۱۳۹۶/۰۷/۰۵
			جمال احمدی	*نویسنده مسئول:	
			j_ahmadi@znu.ac.ir	پست الکترونیکی:	

Behaviour Verification of Gas Transfer Buried Steel Pipelines by Propagation of Seismic Waves in Soil Types

Jamal Ahmadi^{1*}, Ali Goharrokhi², Ali Nankeli³, Reza Rasti⁴

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Ph.D Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The most important parameter for determining the level of performance and breakdown of buried pipes in the case of earthquake is the maximum value of strain. Vital arteries code, while studying the maximum value of strain, have addressed the seismic behavior of buried pipelines. Static methods don't have the ability to consider the transient strain effect in their results, so it is necessary to consider another method in determining maximum strain. From the suggested methods to determine the maximum strain in buried pipes during earthquake is nonlinear dynamic analysis of pipes and the soil around it. In this study, using Abaqus software, we have presented a method to calculate the maximum strain of buried steel pipes for gas transfer in soil according to the parameters including earthquake energy like Arias intensity and Housner spectral intensity and using accelerograms. Analyses performed according to dynamic method is nonlinear and modeling has been done for three different lengths of gas transfer buried steel pipes in soil, with the internal pressure using different accelerograms for types of soil in Iran 2800 code. Then, in order to present a united relation to show the relationship between maximum strain of steel pipes and parameters including earthquake energy, in order to apply the considered relation for buried pipes with different lengths and different soils, we have used T/L parameter and the values of a and b (coefficients of fitted diagrams) in each section is expressed according to this parameter.

ARTICLE INFO

Received: 27/09/2017

Revised: 31/12/2017

Accepted: 22/02/2018

Keywords:

Vital arteries,
Maximum strain,
Buried pipe,
Accelerogram,
Seismic behaviour.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.99586.1338

*Corresponding author: Jamal Ahmadi

Email address: j_ahmadi@znu.ac.ir

۱- مقدمه

در مطالعات انجام شده، اثرات زلزله بر روی خطوط لوله مدفون به دو دسته اثر انتشار امواج (آثار دینامیکی) و اثر تغییر مکان پایدار زمین (آثار استاتیکی) تقسیم بندی می‌شوند. به عبارتی خطرات لرزه ای به دو دسته خطرات ناشی از انتشار امواج و تغییر مکان دائمی زمین (PGD) تقسیم می‌شوند. خطر تغییر مکان پایدار زمین (PGD) براساس کرنش ایجاد شده در لوله به علت لغزش، نشست زمین یا روانگرایی ناشی از گسترش جانبی مشخص می‌شود و خرابی‌های ناشی از آن معمولاً در ناحیه محدودی از شکست زمین اما به شکل شدیدی اتفاق می‌افتد؛ در حالی که خطرات انتشار امواج بوسیله کرنش تولید شده در لوله به علت اثرات انتقال موج مشخص می‌شود و خرابی‌های ناشی از آن در نواحی گسترده تری رخ می‌دهد که موجب آسیب در شبکه خطوط لوله های مدفون می‌شود [۱].

علیرغم اینکه در برخی موارد نظیر خرابی‌های Mexico City در زلزله Michoacan (1985) خرابی‌های لوله تنها به علت انتشار امواج بوده است، اما در بیشتر موارد، خرابی خطوط لوله به علت ترکیب این خطرهاست. برای نمونه O'Rourke اشاره می‌کند که حدود نیمی از شکست لوله‌ها در زلزله ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو به علت جابجایی جانبی ناشی از روان‌گرایی بوده است در حالی که نیمی دیگر در ناحیه‌ای اتفاق افتاده که انتشار امواج عامل اصلی بوده است. به هر حال و بر اساس مستندات موجود خرابی‌های PGD معمولاً در ناحیه محدودی از زمین و به شکل شدیدی اتفاق می‌افتند در حالی که خرابی ناشی از انتشار امواج در نواحی گسترده‌تر اما با نسبت خرابی کمتر روی می‌دهد [۲].

Eguchi (1983) میزان شکست لوله‌ها را برای چند زلزله در آمریکا براساس MMI (شدت مرکالی اصلاح شده) خلاصه کرد و روابط شکنندگی (fragility relations) را برای شش نوع لوله با مصالح مختلف در برابر انتشار امواج ارائه داد [۴]. Eguchi در سال ۱۹۹۱ روابط خود را اصلاح کرد و یک منحنی خطی بدست آورد که نشان می‌داد میزان خرابی در زلزله‌های با شدت مرکالی بیشتر از ۸ با شدت کمتری نسبت به زلزله‌های کمتر از ۸ مرکالی افزایش می‌یابد [۳].

Barenberg (1988)، بر اساس اطاعات سه زلزله آمریکا (پاگت ساند^۱، سانتا رزا^۲ و سانفرانندو^۳) یک رابطه تجربی بین خرابی‌های ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای در لوله‌های چدن و حداکثر تغییر مکان یا سرعت زمین بدست آورد [۳]. یکی از مواردی که باید در مورد خرابی لوله‌ها مد نظر قرار داد، رابطه آن با حداکثر سرعت زمین است، چرا که کرنش زمین و در نتیجه کرنش لوله تابعی از V_{max} است. با استفاده از اطاعات سه زمین لرزه دیگر (کالینگا^۴، میچاکن^۵ و لاهاک^۶) O'Rourke & Ayala (1993) نموداری برای میزان خرابی ناشی از انتشار امواج در مقابل حداکثر سرعت زمین ارائه دادند. در این مطالعات جنس خطوط لوله از نوع لوله های چدنی، لوله‌های بتنی، لوله‌های پیش تنیده بتنی و لوله‌های آریست سیمانی بود. این منحنی‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۴].

همانطور که از نمودار شکل ۱ مشاهده می‌شود، بهترین خط برازش داده شده O'Rourke & Ayala میزان خرابی بیشتری را نسبت به Barenberg نشان می‌دهد. بالا بودن میزان خرابی در منحنی O'Rourke & Ayala به علت وجود انواع مختلف لوله‌ها نبوده بلکه احتمالاً به علت اثر خوردگی و شرایط مرزی متغییر می‌باشد.

محققان مختلفی اخیراً روابط تجربی ناشی از انتشار امواج را گسترش داده‌اند و برای لوله‌های با جنس مختلف و قطرهای گوناگون روابطی ارائه کرده‌اند. Jeon and O'Rourke T. (2005) رابطه‌ای را برای شکست لوله‌ها، نظیر شکل ۱ برای زلزله Northridge (1994) ارائه کرده‌اند. تفاوت عمده‌ای که بین برآورد نرخ خرابی با این روابط وجود دارد احتمالاً به علت نوع انتشار امواج است. در شکل ۱ از امواج سطحی اولیه استفاده شده در حالی که در مورد زلزله Northridge از امواج حجمی استفاده شده است [۵].

¹ Puget Sound

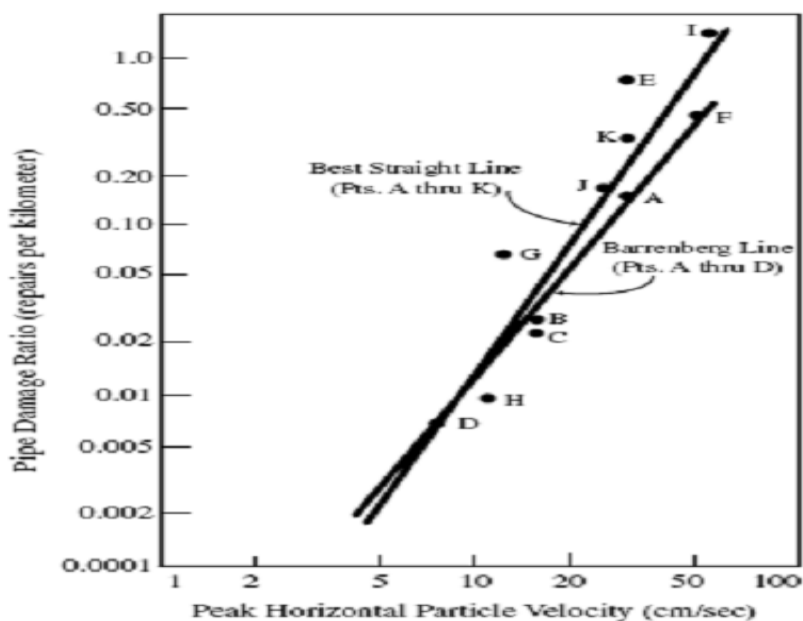
² Santa Rosa

³ San Fernando

⁴ Coalinga

⁵ Michoacan

⁶ Tlahuac



شکل ۱: خرابی‌های ناشی از انتشار امواج بر سیستم‌های معمول لوله‌های آب در مقابل مولفه افقی سرعت [۴]

مهم‌ترین پارامتر برای بررسی معیارهای خرابی و سطوح عملکرد خطوط لوله‌های مدفون و تعیین سطح خرابی آن‌ها، حداکثر کرنش ایجاد شده در طول خط لوله می‌باشد. آئین‌نامه‌های شریان‌های حیاتی نیز اساس روش‌های طراحی لرزه‌ای و بهسازی خطوط لوله مدفون خود را بر مبنای حداکثر کرنش قرار داده‌اند [۶]. در حال حاضر روابط موجود برای تعیین ماکزیمم کرنش، بر اساس روش‌های تقریبی است که توسط افرادی همچون نیومارک ارائه شده‌اند. روابط آئین‌نامه‌ای نیز بر اساس تحلیل‌های استاتیکی و با فرض چشم پوشی لغزش بین لوله و خاک می‌باشند [۷].

لازم بذکر است که روش‌های استاتیکی توانایی لحاظ نمودن اثر کرنش گذارا را در نتایج خود ندارد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که روش دقیق‌تری را برای تعیین ماکزیمم کرنش ایجاد شده در نظر گرفته شود. از روش‌های پیشنهاد شده برای محاسبه دقیقتر ماکزیمم کرنش بوجود آمده در لوله مدفون، تحلیل‌های دینامیکی لوله و خاک اطراف آن می‌باشد. از آنجائیکه تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی لوله و خاک به علت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه و وجود مرزهای جاذب انرژی به منظور جلوگیری از انعکاس امواج، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد ارائه روابطی ساده شده بر اساس این نوع تحلیل‌ها و با توجه به اهمیت خطوط لوله مدفون ضروری به نظر می‌رسد.

در دو دهه اخیر بررسی رابطه بین محتوی انرژی شتابنگاشت‌ها و میزان خرابی وارد بر لوله‌های مدفون بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. از پارامترهای مهم که بیانگر محتوی انرژی شتابنگاشت‌ها می‌باشد، شدت طیفی هاوزنر و شدت آریاس می‌باشد. محققین ژاپنی در این زمینه مطالعات قابل توجهی انجام داده و از پارامترهای مبتنی بر محتوی انرژی در طراحی شریان‌های حیاتی استفاده کرده‌اند [۸].

۲- اهمیت و روش تحقیق

در این پژوهش تلاش گردیده تا روشی برای محاسبه ماکزیمم کرنش لوله‌های فولادی بر حسب پارامترهای محتوی انرژی شتابنگاشت‌ها ارائه شود. برای این منظور با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی به بررسی اندرکنش خاک و سازه پرداخته شده است. بر اساس مطالعه پارامتری انجام شده، پارامترهای ترکیبی بی‌بعد مثل $PGV \cdot te / PGD$ و همچنین پارامترهای مرتبط با انرژی (شدت آریاس و شدت طیفی هاوزنر) به عنوان شاخصی از نیاز لرزه‌ای و همچنین ماکزیمم کرنش ایجاد شده در لوله به عنوان پارامتر مربوط به پاسخ لوله، انتخاب شده است.

از پنج شتاب نگاشت برای تحلیل دینامیکی خطوط لوله فولادی پیوسته با قطر ۴۰۰ میلیمتر و طول‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ متر و فشار داخلی ۶۰ psi محصور در دو نوع خاک آئین‌نامه ۲۸۰۰ استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل به صورت توابعی از خصوصیات سازه و موج ارائه گردیده است. لازم بذکر است که با استفاده از نتایج ارائه شده تعیین حداکثر کرنش لوله‌های فولادی با سهولت و سرعت بیشتری قابل محاسبه می‌باشد.

۳- مدل سازی و تحلیل

۳-۱- انتخاب شتاب نگاشت

از آنجا که هدف پژوهش حاضر بررسی رابطه بین انرژی زلزله با ماکزیمم کرنش بوجود آمده در خطوط لوله مدفون می‌باشد، ۵ شتاب نگاشت زلزله با محتوی انرژی متفاوت انتخاب شده و پس از مقیاس کردن و فیلترینگ رکورد ورودی، برای تحلیل دینامیکی و بررسی اثر زلزله بر سازه مورد استفاده قرار گرفته اند. دلیل انتخاب ۵ رکورد زلزله، لزوم موجود بودن حداقل ۵ نقطه برای برازش قابل قبول نمودارها می‌باشد. همچنین برای از هر دو زلزله‌های حوزه دور و نزدیک استفاده شده است تا طیف وسیعی از زلزله‌ها را در برگیرد. به همین دلیل از زلزله‌های ایران زلزله‌های طیس و منجیل و همچنین از زلزله‌های کوبه، سانفرانندو و نورث‌ریج در این مطالعات استفاده گردیده، که در طی این زلزله‌ها آسیب‌های بسیاری به شریان‌های حیاتی مخصوصاً خطوط لوله وارد شده است. با توجه به اینکه نرم‌افزار انتخابی برای تحلیل خطوط لوله مدفون در این مطالعه برنامه المان محدود Abaqus می‌باشد و در این نرم‌افزار زمان انجام تحلیل بسیار طولانی می‌باشد، به همین دلیل از زمان مؤثر رکوردها استفاده شده است.

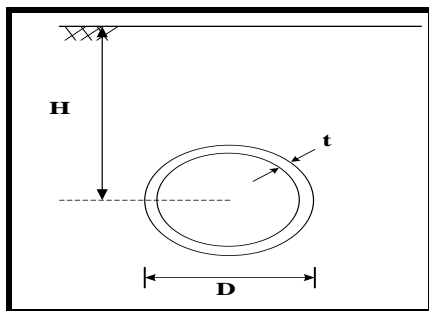
۳-۲- مدلسازی خاک و لوله مدفون انتقال گاز

• مدلسازی لوله فولادی

بدلیل اینکه رفتار خطوط لوله مدفون انتقال گاز در داخل شهرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در این تحقیق از خط لوله با قطر (D) ۴۰۰ میلی‌متر و فشار داخلی ۶۰ psi استفاده شده است. این خطوط شبکه لوله‌های فرعی می‌باشد که در خیابان‌های اصلی شهرها وجود دارد. مشخصات مکانیکی لوله فولادی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$E = 200 \text{ Gpa} \quad \rho = 7850 \text{ Kg/m}^3 \quad \nu = 0.3$$

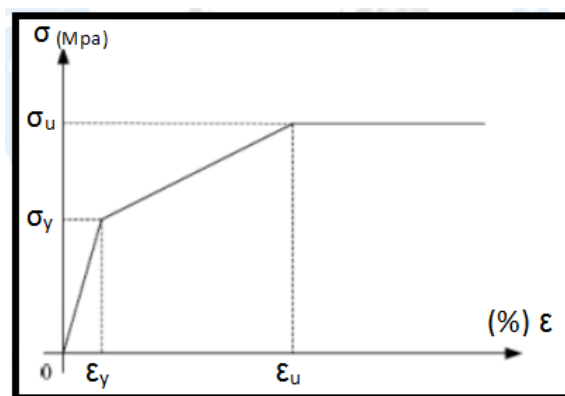
با توجه به روابط راهنمای پیشنهادی آمریکا در مرجع [۷] اگر طول لوله حداکثر به اندازه ۱۲۰ برابر قطر لوله در نظر گرفته شود همه رفتار مکانیکی خط لوله را به طور کامل نشان می‌دهد، بنابراین طول مدل برابر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ متر انتخاب شده است. عمق دفن لوله (H) برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است و همچنین ضخامت لوله (t) با توجه به روابط پیشنهادی این راهنما (یک هفتادم قطر لوله) ۶ میلیمتر در نظر گرفته شده است (پارامترهای فوق در شکل ۲ نشان داده شده است). همچنین مشخصات رفتاری ارتجاعی و غیر ارتجاعی خط لوله مدفون در نظر گرفته شده در تحلیل دینامیکی در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است [۶].



شکل ۲: مقطع خط لوله مورد بررسی

جدول ۱: مشخصات تنش و کرنش لوله فولادی

Pipe type	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
(a) For tension				
400A (X52)	344.12	0.17	446.20	5.00
(b) For compression				
400A (X52)	255.46	0.15	318.72	1.80



شکل ۳: نمودار تنش و کرنش لوله فولادی

• مدلسازی خاک

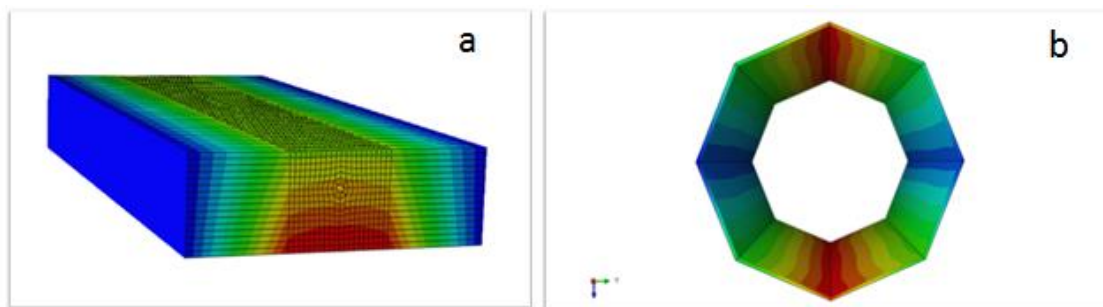
در این تحقیق خاک به صورت مستطیلی با ارتفاع ۵ متر و عرض ۴ متر در صفحه و طول ۳۰، ۴۵ و ۶۰ متر برابر طول لوله مورد بررسی در نظر گرفته شده است. همچنین عمق کارگذاری لوله همانگونه که عنوان شد برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی رفتار الاستوپلاستیک مصالح خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب با فرض قانون جریان غیر همراه ($\Psi=0.1$) استفاده شده است. همچنین با توجه به نوع خاک اکثر مناطق شهری کشور و به ویژه تهران از خاک‌های نوع II و III مطابق آئین نامه ۲۸۰۰ ایران برای تحلیل‌ها استفاده شده است (خاک نوع I بیشتر شامل زمین‌های سنگی و خاک نوع IV مربوط به زمین‌های لجنی می باشد).

• فرضیات مدل‌سازی (در برنامه تحلیلی المان محدود Abaqus)

برای تحلیل دینامیکی لوله و خاک در حالت با مرز جاذب انرژی (لایزمر) از تحلیل *Implicit* استفاده شده است. تحلیل‌ها براساس رفتار پلاستیک مصالح انجام گرفته است. رفتار پلاستیک خاک بر اساس معیار موهرکولمب و رفتار پلاستیک فولاد بر اساس معیار فون میسز با سخت شوندگی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار میرایی برابر ۵ درصد لحاظ گردیده است. لوله و خاک که بصورت جداگانه ساخته شده بودند با هم ترکیب شده تا شکل مدل اصلی بدست آید و ماتریس‌های سختی از مختصات محلی به مختصات کلی (*Global*) انتقال یابد. سپس مرزهای لایزمر برای خاک تولید شد تا رفتار خاک به واقعیت نزدیک شود (المان‌های *Infinite*). لازم به ذکر است که خاک و لوله بصورت سه بعدی مدل شدند. اندرکنش خاک و لوله از نوع نرمال و بصورت *Hard contact* و فرمول بندی تماس بر اساس روش پنالتی در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب روش پنالتی $\tan 2\phi/3$ است که ϕ زاویه اصطکاک خاک می باشد. مقدار میرایی نیز برای اندرکنش لحاظ گردیده است.

بدلیل آنکه کرنش حداکثر در تاج لوله اتفاق می افتد (شکل ۴) و فقط در حالتی که شتاب زلزله در جهت *Y* در نظر گرفته شود چنین حالتی رخ می دهد، شتاب زلزله تنها در راستای *Y* بر خاک وارد می شود و فقط مؤلفه‌های در راستای *Y* شتابنگاشت‌ها در آنالیزها بکار

می روند. در اکثر مطالعات نیز اینچنین در نظر گرفته شده است [۱]. شرایط مرزی که برای سطح پایینی خاک (بستر خاک) اعمال می شود از نوع تغییر مکان و در حالت تحلیل استاتیکی بصورت $U_1=U_2=U_3=0$ و در حالت تحلیل دینامیکی $U_1=U_3=0$ تعریف شده است. همچنین شرایط مرزی که برای سطح جلو و عقب خاک اعمال می شود، بصورت $U_1=0$ می باشد. شتاب زلزله نیز به کف مدل (بستر خاک) وارد می شود.



شکل ۴: طریقه وارد شدن شتاب زلزله به کف مدل (a) و مقدار کرنش نهایی لوله مدفون در مقطع (b)

در انتها نیز بعد از اتمام تحلیل، خروجی ها را که پوش ماکزیمم کرنش بوجود آمده در لوله می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود مقدار حداکثر کرنش در تاج لوله اتفاق می افتد.

۴- ارائه نتایج

همانگونه که عنوان شد، طی مطالعه پارامتری انجام شده، پارامترهای ترکیبی بی بعد مثل $PGV*te/PGD$ و پارامترهای مرتبط با انرژی (شدت آریاس (AI) و شدت طیفی هازنر (SI)) به عنوان شاخصی از نیاز لرزه ای و همچنین ماکزیمم کرنش ایجاد شده به عنوان پارامتر مربوط به پاسخ خط لوله در نظر گرفته شده است. برای خاکهای نوع دو و سه و برای هر کدام از خطوط لوله مورد بررسی، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی هر رکورد بصورت نمودار کرنش بر حسب پارامترهای بی بعد لرزه ای ترسیم و سپس منحنی $y = ax^b$ بر روی این نمودارها برازش شده است.

به منظور ارائه یک رابطه واحد برای نمایش ارتباط بین ماکزیمم کرنش لوله فولادی و پارامترهای معرفی شده (SI , AI)، به گونه ای که رابطه مورد نظر برای لوله ها و خاک های مختلف قابل کاربرد باشد، از پارامتر T/L (نسبت پریود امواج برشی خاک به طول لوله) استفاده گردیده که مقادیر a و b در هر بخش بر اساس این پارامتر بیان شده است. بر اساس روابط موجود، پریود امواج برشی خاک از رابطه (۱) زیر محاسبه می شود:

$$T = 4 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{V_{s_i}} \quad (1)$$

در این رابطه H ارتفاع لایه خاک بر حسب متر و V_s سرعت موج برشی لایه مورد نظر بر حسب متر بر ثانیه می باشد.

جدول ۲: تعیین پریود امواج برشی خاک در حالت پلاستیک

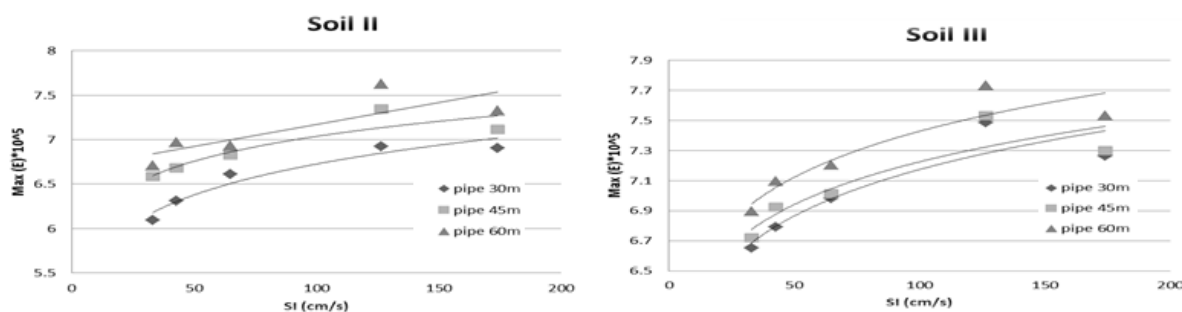
Soil type	Vs (m/s)	H (m)	T=4*(H/Vs)
Soil2	600	4	0.0266
Soil3	375	4	0.0426

حداکثر کرنش های بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیر خطی خاک در رکوردهای زمین لرزه های مورد اشاره در جدول ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است.

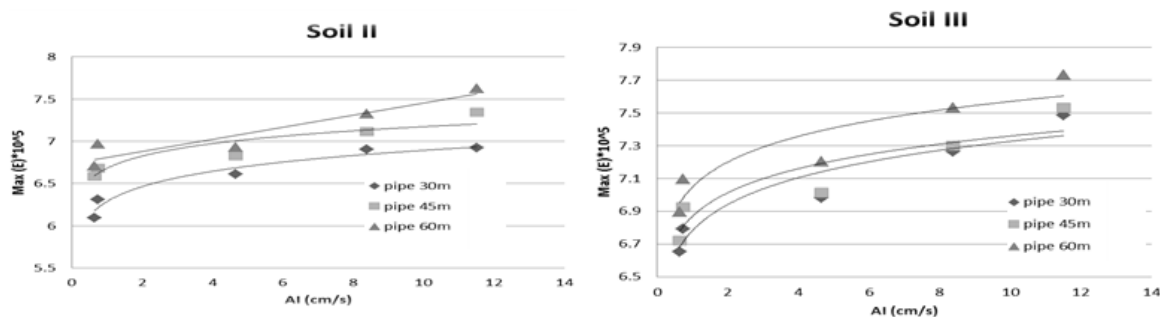
جدول ۳: حداکثر کرنش در لوله به طول ۳۰، ۴۵ و ۶۰ متر

Earthquake	$Max(E) * 10^{-5}$					
	$l=30m$		$l=45m$		$l=60m$	
	Soil II	Soil III	Soil II	Soil III	Soil II	Soil III
Kobe	6.905	7.266	7.112	7.301	7.112	7.301
San Fernando	6.096	6.654	6.586	6.721	6.586	6.721
Manjil	6.611	6.983	6.829	7.014	6.829	7.014
Tabas	6.923	7.487	7.346	7.531	7.346	7.531
Northridge	6.312	6.792	6.679	6.925	6.679	6.925

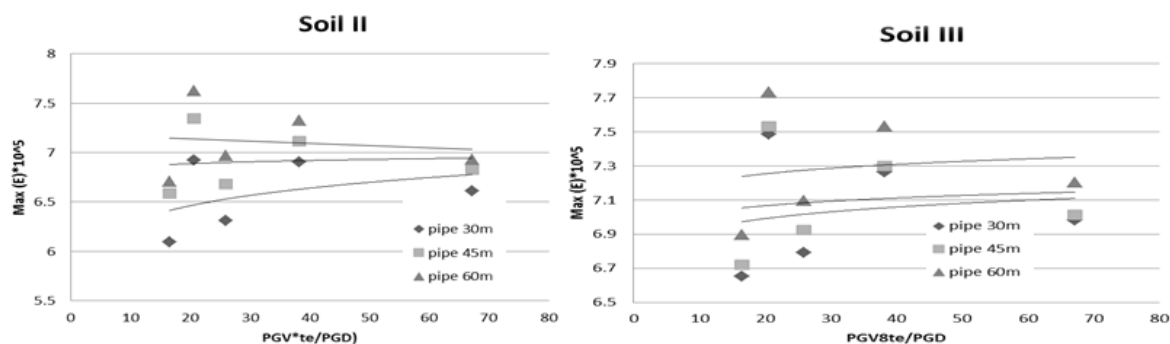
با توجه به جدول ۳ و همچنین مشخصات لرزه‌ای رکورد، نمودارهای مربوطه به حداکثر کرنش ایجاد شده بر اساس شدت طیفی آریاس و هارزبر در شرایط مختلف در اشکال ۵، ۶ و ۷ ارائه شده اند. شدت طیفی هارزبر و شدت طیفی آریاس شاخص های مناسبی برای بیان انرژی زلزله می باشند. که برای محاسبه آنها از نرم افزار SeismoSignal استفاده شده است. در این نرم افزار از روابط ارائه شده توسط هارزبر برای محاسبه شدت طیفی هارزبر استفاده شده است. بر اساس تعریف هارزبر سطح زیر منحنی طیف سرعت بین پیرودهای ۰٫۱ تا ۲٫۵ ثانیه شدت طیفی هارزبر نامیده می شود که در واقع این پارامتر از انتگرال گیری در حوزه فرکانس حاصل می شود. شدت طیفی آریاس نیز شاخصی جهت تعیین قدرت حرکت زمین می باشد که توسط آریاس ارائه در سال ۱۹۷۰ ارائه شده است این شاخص که کل انرژی ذخیره شده در یک نوسان گر ساده در کل مدت حرکت زمین را نشان می دهد.



شکل ۵: نمودار کرنش- انرژی برای معیار شدت طیفی هارزبر در زلزله های مختلف برای لوله های مدفون در خاک نوع II و III



شکل ۶: نمودار کرنش- انرژی برای معیار شدت آریاس در زلزله های مختلف برای لوله های مدفون در خاک نوع II و III



شکل ۷: نمودار کرنش-انرژی بر حسب $PGV*te/PGD$ در زلزله‌های مختلف برای لوله‌های مدفون در خاک نوع II و III

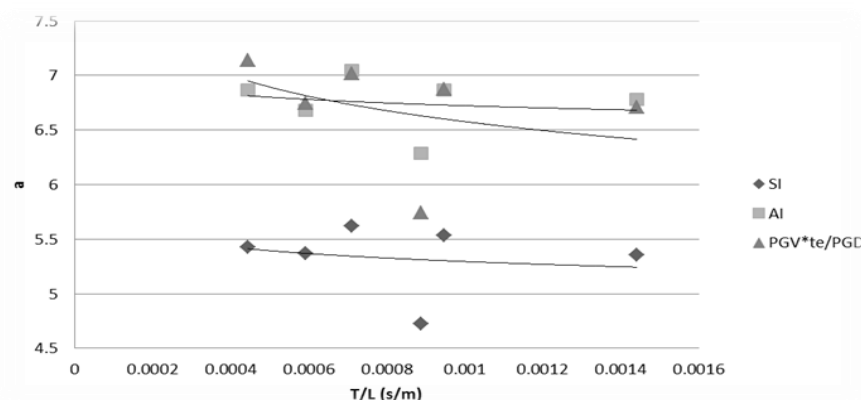
۴-۱- تعیین رابطه بین ضرایب نمودار (کرنش-انرژی) و رابطه T/L

در نمودارهای ترسیم شده اشکال ۵ تا ۷، تابع معادله به صورت $y = ax^b$ می‌باشد. مقادیر ضرایب نمودارهای برازش داده شده برای سه طول مختلف لوله و دو نوع خاک حاصل از نمودارهای رسم شده در جدول ۴ جمع بندی و ارائه شده است.

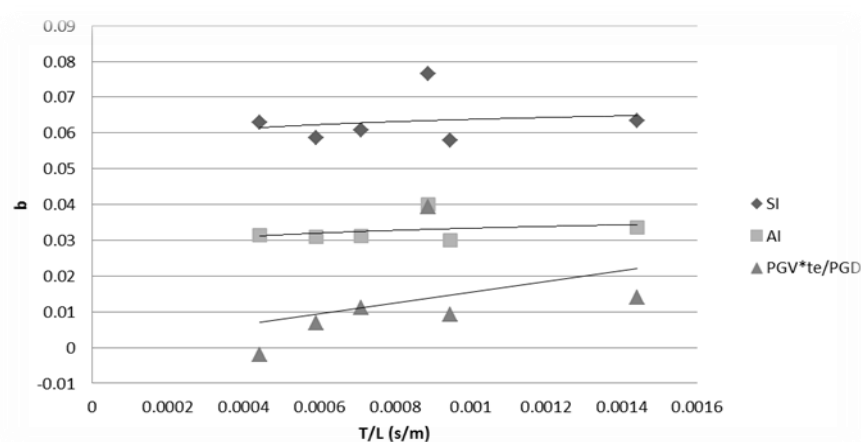
جدول ۴: حداکثر کرنش در لوله به طول ۴۵ متر

$L=30m$	$T/L*10^{-4}$	SI		AI		$PGV*te/PGD$	
		a	b	a	b	a	b
Soil II	8.888	4.7266	0.0765	6.286	0.0399	5.7435	0.0393
Soil III	14.422	5.3551	0.0635	6.7808	0.0336	6.7058	0.0139
$L=45m$	$T/L*10^{-4}$	SI		AI		$PGV*te/PGD$	
		a	B	a	b	a	b
Soil II	5.926	5.3723	0.0586	6.6797	0.0309	6.7471	0.0068
Soil III	9.481	5.5351	0.0579	6.868	0.03	6.8727	0.0093
$L=60m$	$T/L*10^{-4}$	SI		AI		$PGV*te/PGD$	
		a	B	a	b	a	b
Soil II	4.444	5.424	0.0629	6.8667	0.0314	7.1398	-0.002
Soil III	7.111	5.6174	0.0607	7.0458	0.0312	7.0198	0.011

همچنین برای تعیین رابطه بین ضرایب a و b با پارامتر T/L ، از شکل‌های ۸ و ۹ استفاده شده است.



شکل ۸: ضریب a بر حسب T/L در مقیاس‌های SI, AI و PGV*te/PGD



شکل ۹: ضریب b بر حسب T/L در مقیاس‌های SI, AI و PGV*te/PGD

در نهایت با استفاده از نمودارهای بالا جدول ۵ برای محاسبه حداکثر کرنش بر حسب پارامترهای مشخص شده (SI, AI, PGV*te/PGD) بدست آمده است.

جدول ۵: محاسبه حداکثر کرنش لوله‌های مدفون در خاک بر حسب پارامترهای مشخص شده

$y=ax^b$			ضرایب
PGV*te/PGD	AI	SI	
$-0.141\ln(T/L)+3.394$	$-0.141\ln(T/L)+5.9412$	$-0.141\ln(T/L)+4.3324$	a
$0.0166\ln(T/L)+0.1321$	$0.0028\ln(T/L)+0.0532$	$0.0031\ln(T/L)+0.0857$	b

استفاده از روابط جدول ۵ باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات شده و بدون محاسبات زیاد و وقت گیر می توان مقدار حداکثر کرنش را بدست آورد. این روابط پیشنهادی با روابط موجود در راهنماهای آمریکا و هند برای یک لوله با طول و قطر مشخص در شهر تهران با خاک نوع II مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۶ آمده است (جزئیات محاسبات دستی با توجه به حجم بودن محاسبات و عدم لزوم ارائه در متن مقاله در پیوست شماره ۱). همانطور که مشاهده می شود، حداکثر کرنش به روش ارائه شده دارای پاسخ کمتری نسبت به روش های دیگر می باشد زیرا که یک فضای واقعی از محیط خاک با جذب امواج منعکس شده توسط مرز لایزمر فراهم شده است.

جدول ۶: مقادیر حداکثر کرنش بر اساس روش‌های مختلف

مقدار حداکثر کرنش	روش محاسبه
$8.36e-5$	بر اساس راهنمای پیشنهادی آمریکا [۷]
$8.35e-5$	بر اساس راهنمای پیشنهادی هند [۹]
$7.13e-5$	بر اساس روش پیشنهادی

همانگونه که ملاحظه می شود روش پیشنهادی در این پژوهش قادر است مقدار حداکثر کرنش ایجاد شده در خطوط لوله مدفون را با دقت قابل قبول و در زمان کمتری محاسبه نماید.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

به طور کلی، ترکیبی از ویژگی‌های خاک، خط لوله و زلزله در نوع عملکرد لرزه ای خطوط لوله مدفون در خاک مؤثرند. از مهم‌ترین این پارامترها می توان به جنس زمین، مشخصات میرایی خاک، جرم معادل زمین و لوله، عمق دفن، اتصالات و شرایط انتهایی خط لوله اشاره کرد. همچنین شتاب، سرعت، دامنه، فرکانس، زاویه برخورد موج و مدت زمان ارتعاش زلزله از دیگر مشخصات مؤثر بر رفتار خطوط لوله مدفون می باشد. به دلیل این که پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه ای لوله‌ها زیاد می باشند لازم است تا رفتار لرزه‌ای این خطوط با دقت بیشتری بررسی شوند. بر مبنای نتایج بدست آمده در این تحقیق موارد زیر را می توان جمع بندی و ارائه کرد:

- روش ارائه شده در این پژوهش برای محاسبه مقدار کرنش در لوله‌ها (با استفاده از جدول ۵) بدون نیاز به انجام محاسبات حجیم مقدار کرنش حداکثر ایجاد شده را با دقت قابل قبولی برآورد می نماید.

- حداکثر کرنش به روش ارائه شده در این تحقیق که حاصل تحلیل دینامیکی غیر خطی با مرز لایزمر است، در مقایسه با تحلیل دینامیکی غیر خطی معمولی (بدون مرز لایزمر) و تحلیل دینامیکی خطی دارای پاسخ کمتری است.

- بر اساس تحلیل های انجام شده، مقدار کرنش حداکثر در خطوط لوله مدفون در تاج لوله اتفاق می افتد. همچنین با افزایش طول لوله مدفون مقدار حداکثر کرنش بدست آمده افزایش یافته است.

- بر اساس نتایج بدست آمده حداکثر کرنش بدست آمده از تحلیل ها در خاک نوع III از خاک نوع II بیشتر است. با بررسی مقدار حداکثر کرنش‌های بدست آمده از تحلیل دینامیکی مشاهده می شود که تغییرات نوع خاک نسبت به تغییرات طول لوله دارای اثرات بیشتری در مقدار حداکثر کرنش ایجاد شده می باشد.

مراجع

- [1] PoorArbabi, A. (1388) *Buried pipelines and influence of earthquake*. The third National Conference on Earthquake Engineering. (in Persian)
- [2] Michael, J. (2000) *Earthquake engineering handbook (Buried Pipelines)*, Hawaii University.
- [3] Eguchi, R. (1991) *Seismic hazard input for lifeline systems*, Structural Safety 10, 193-198.
- [4] O'Rourke, M., Ayala, G. (1993) *Pipeline damage due to wave propagation*, Journal of Geotechnical Engineering, 1490-1498.
- [5] Jeon, S., O'Rourke, T. (2005) *Northridge Earthquake Effects on Pipelines and Residential Buildings*, Bulletin of the Seismological Society of America, 294-318.
- [6] Abbasi, R. (1389) *The relationship between spectral intensity with maximum strain of steel buried pipes*, master thesis, University of Water and Power, Tehran. (in Persian)
- [7] American Lifeline Alliances, (2005) *Guidelines for design of buried steel pipes*, American society of civil engineering, New York.
- [8] Hassani, N., shadabfar, M. (2013) *Effects of Crossing Angle on the Behavior of Buried Steel Pipelines Crossing Fault*, Applied Mechanics and Materials, 630-636.
- [9] IITK-GSDM, (2007) *Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines*, Indian institute of technology Kanpur.

- [10] Alamation, E. Ghadamkhyr, K. Karimpour, B. (2013) *Investigation Depth of Buried Pipeline on Stress*, International Symposium on Advances in Science and Technology, 7th SASTech.
- [11] Barenberg, M. (1988) *Correlation of pipeline damage with ground motions*, Journal of Geotechnical Engineering, 706-711.
- [12] Eguchi, R. (1983) *Seismic vulnerability models for underground pipes*, Int. Symp. on Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment; American Society of Mechanical Engineers, New York, 368-373.
- [13] Porter, K. Scawthorn, C. Honegger, D. O'Rourke, T. Blackburn, F. (1991) *Performance of water supply pipelines in liquefied soil*, 4th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems Gaithersburg, NIST Special Publication 840, U.S. Dept. of Commerce, 3-17.

پیوست ۱

بررسی عددی روش پیشنهادی با روابط موجود

بررسی صحت روابط جدول ۵ در قالب مثالی عددی در زیر ارائه شده است. همچنین نتایج حل این مثال با راهنماهای آمریکا و هند مقایسه می‌شود.

مثال: تعیین حداکثر کرنش طراحی خطوط لوله انتقال مدفون در خاک با فرض طول طراحی ۴۵ متر و قطر ۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر، در خاکی با ارتفاع ۴ متر از سنگ بستر و عمق کارگذاری لوله ۱/۵ متر واقع در شهر تهران با مشخصات خاک نوع II و فرض PGV برابر ۵۲ سانتی متر بر ثانیه، و فرض رخداد زلزله‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله می‌باشد.

الف - محاسبه حداکثر کرنش بر اساس راهنمای پیشنهادی شریان حیاتی آمریکا:

مطابق راهنمای ALA [۷] مقدار کرنش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \text{Min} \left(\frac{PGV}{C}, \frac{t_u \lambda}{4EA} \right) \quad (2)$$

در رابطه فوق t_u ماکزیمم نیروی اصطکاکی در واحد طول در سطح مشترک لوله و خاک، λ طول موج ظاهری امواج لرزه‌ای در سطح زمین، A مساحت مقطع عرضی لوله و E مدول الاستیسیته مصالح لوله می‌باشد. t_u از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$t_u = \frac{\pi D}{2} \bar{\gamma} H (1 + K_0) \tan \phi \quad (3)$$

در رابطه فوق D قطر خارجی لوله، H عمق خاک بالای مرکز لوله، $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و k ضریب زاویه اصطکاک لوله و برای لوله‌های صاف برابر ۰/۷ می‌باشد.

در این مثال مقدار قطر خارجی (D) برابر ۴۰۰ میلی‌متر و عمق بالای لوله (H) ۱/۵ متر و وزن مخصوص خاک برابر ۱۹۰۰۰ و K_0 برابر ۰/۴۲۶ می‌باشد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۳) داریم:

$$t_u = 31.032519 \text{ KN/m}$$

با جایگذاری مقدار فوق در رابطه (۲) داریم:

$$E = \text{Min} \left(\frac{52.0}{600}, \frac{31032.5194 \times 4 \times 4}{4 \times 2 \times 11 \times \pi \times ((0.2)^2 - (0.194)^2)} \right) = 8.36e - 5$$

بنابراین ماکزیمم کرنش در لوله فولادی در روش ارائه شده در راهنمای آمریکا $\epsilon = 8.36e - 5$ می‌باشد.

ب- محاسبه ماکزیمم کرنش بر اساس راهنمای پیشنهادی هند:

بر اساس جدول (۲-۵-۳) راهنمای هند [۹] ضریب اهمیت لوله فولادی کلاس سوم با دوره بازگشت ۴۷۵ سال عدد یک می باشد.

جدول ۱: جدول محاسبه ضریب اهمیت لوله فولادی مدفون در خاک در راهنمای هند

Pipe class	Probability exceedance in 50 years	Return period (years)
I	2%	2475
II	5%	975
III	10%	475
IV	No seismic design consideration required	

جدول ۲: ضریب اهمیت لوله فولادی در راهنمای هند

Class of pipeline	Wave propagation	Faulting	Transverse and Longitudinal PGD	Landslide
I	1.5	2.3	1.5	2.6
II	1.25	1.5	1.35	1.6
III	1.0	1.0	1.0	1.0
IV	*	*	*	*

*Seismic conditions not be considered

$$\epsilon_s = \frac{V_s}{\alpha_s C} = \frac{PGV \times L_p}{\alpha_s C_s} = \frac{52.0 \times 1}{2 \times 600} = 33.4e-4 \quad (4)$$

ماکزیمم کرنش در لوله مدفون با در نظر گرفتن اثر اندرکنش لوله و خاک:

$$\epsilon_s \leq \frac{t_u \lambda}{4EA} \quad (5)$$

در رابطه فوق t_u ماکزیمم نیروی اصطکاکی در واحد طول در سطح مشترک لوله و خاک، λ طول موج ظاهری امواج لرزه‌ای در سطح زمین، A مساحت مقطع عرضی لوله و E مدول الاستیسیته مصالح لوله می باشد. از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_u = \pi DC\alpha + \pi DH\bar{\gamma} \left(\frac{1+K_c}{2} \right) \tan \delta' \quad (6)$$

در رابطه فوق D قطر خارجی لوله، C ضریب چسبندگی خاک، H عمق خاک بالای مرکز لوله، $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص خاک و δ' زاویه اصطکاک سطح مشترک لوله و خاک است که از حاصلضرب زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب اصطکاک لوله (f) حاصل می شود. ضریب فشار خاک در حالت سکون می باشد، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$K_c = 1 - \sin \phi = 426.0 \quad (7)$$

α فاکتور چسبندگی می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\alpha = 0.608 - 0.123C - \frac{0.274}{C^2 + 1} + \frac{0.695}{C^2 + 1} \quad (8)$$

در رابطه فوق C چسبندگی خاک می باشد و مقدار آن بر اساس $KPa/100$ می باشد. برای خاک نوع II چسبندگی $10 KPa$ پس

مقدار $c = 0.1$ در نتیجه مقدار $\alpha = 0.19/1$ حاصل می شود.

از جایگزینی مقادیر فوق در رابطه t_u مقدار زیر بدست می آید.

$$t_u = 31.032647 \text{ KN/m}$$

$$\varepsilon_s \leq \frac{t_u \lambda}{4EA} = \frac{31032.647 \times (4 \times 4)}{4 \times 2 \times 10^{11} \times \pi((0.2)^2 - (0.194)^2)} = 8.35 \times 10^{-5} \quad (9)$$

بنابراین ماکزیمم کرنش در لوله فولادی در روش ارائه شده راهنمای هند $\varepsilon = 8.35 \times 10^{-5}$ می باشد.

ج- محاسبه بر اساس روش پیشنهادی:

سرعت موج برشی در خاک نوع II ۶۰۰ متر بر ثانیه می باشد.

با فرض بار زلزله منجیل تحلیل را انجام می دهیم.

$$\frac{T}{L} = \frac{(4 \times 4)}{600 \times 45} = 5.926 \times 10^{-4}$$

ج-۱- محاسبه ماکزیمم کرنش بر اساس شدت آریاس:

$$a = -0.114 * \ln(T/L) + 5.9412 = -0.114 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 5.9412 = 6.788$$

$$b = 0.0028 * \ln(T/L) + 0.0532 = 0.0028 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 0.0532 = 0.0323$$

$$E = a * (AI)^b = 6.788 * (4.656)^{0.0323} = 7.134 \times 10^{-5}$$

ج-۲- محاسبه ماکزیمم کرنش بر اساس شدت طیفی:

$$a = -0.141 * \ln(T/L) + 4.3324 = -0.141 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 4.3324 = 5.380$$

$$b = 0.0031 * \ln(T/L) + 0.857 = 0.0031 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 0.857 = 0.063$$

$$E = a * (SI)^b = 5.380 * (64.902)^{0.063} = 6.997 \times 10^{-5}$$

ج-۳- محاسبه ماکزیمم کرنش بر اساس $PGV * t_e / PGD$:

$$a = -0.463 * \ln(T/L) + 3.394 = -0.463 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 3.394 = 6.834$$

$$b = 0.0166 * \ln(T/L) + 0.1321 = 0.0166 * \ln(5.926 \times 10^{-4}) + 0.1321 = 0.0087$$

$$E = a * (PGV * t_e / PGD)^b = 6.834 * (67.269)^{0.0087} = 7.089 \times 10^{-5}$$

بنابراین مقدار نهایی حداکثر سه مقدار فوق می باشد.

$$\text{Max}(7.134 \times 10^{-5}, 6.997 \times 10^{-5}, 7.089 \times 10^{-5}) = 7.134 \times 10^{-5}$$