

Numerical-Interaction Analysis of Buried Pipes Crossing Reverse Faults and Comparison with Code Relationships

Sahar Jalili¹

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran. E-mail: saharjalili.c@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2025-03-31
Received in revised form
2025-05-23
Accepted
2025-06-21
Available online
2025-07-01

Keywords:
Pipeline,
Earthquake,
Reverse Fault,
Buried Depth,
code Relationships

ABSTRACT

Pipeline systems are the most important means for transporting gas and other liquid fuels. Most of these pipelines are buried underground and are highly susceptible to sudden ground movements caused by earthquakes and landslides. Severe damages inflicted on pipelines during such events can lead to joint failures and consequently significant economic losses. With each ground movement, the pipeline is subjected to one or all types of axial, bending, and shear loads. These loads may result in large compressive stresses, which can lead to local or global buckling. In this study, the interaction between the pipeline and the surrounding soil due to sudden ground movement is investigated using a coupling model between the pipeline and soil, incorporating nonlinear soil response, nonlinear material behavior, and nonlinear geometry. The most critical parameter for determining the performance level and extent of damage in buried pipelines during an earthquake is the maximum strain. Vital infrastructure codes (such as ALA and APA) also evaluate the seismic behavior of buried pipelines by examining the maximum strain. Using code-based relationships, stress and strain values were derived and compared with results obtained from Abaqus software. The most influential factor identified in this study is the pipe thickness. As the pipe thickness increases, the strain and stress values decrease, and the deformation mode also changes. The burial depth of the pipeline does not significantly affect the applied stress values but does influence the strain values. At shallow burial depths, the strain is not highly sensitive to the pipe diameter. However, as the burial depth increases, the strain values become more sensitive to increases in pipe diameter. Additionally, for larger thicknesses, an increase in pipe diameter leads to a noticeable rise in strain values. For several model cases, stress and strain values were calculated using code-based relationships. Comparing these results with those obtained from finite element analysis, it can be concluded that both stress and strain values are overestimated in the codes.

Cite this article: Sahar, Jalili. (2025). Numerical-Interaction Analysis of Buried Pipes Crossing Reverse Faults and Comparison with Code Relationships. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 137-148.

DOI: 10.22126/amcen.2025.10547.1007



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.10547.1007

Publisher: Razi University

Introduction

Pipelines are commonly buried underground to enhance safety and durability, particularly in seismic regions. However, this configuration exposes them to complex loading conditions, especially in areas intersected by active faults. Historical events such as the 1971 San Fernando earthquake and the 2011 Japan earthquake have shown extensive damage to buried pipelines due to fault movement, highlighting the urgent need for robust seismic design methodologies. This study addresses the seismic vulnerability of pipelines crossing reverse faults by evaluating their mechanical response under varying parameters using numerical simulations.

Method

A three-dimensional finite element model is developed in ABAQUS/Explicit, where the soil is modeled using the Mohr-Coulomb elasto-plastic model and the pipe is simulated using API X65 grade steel shell elements. The interaction between soil and pipe is defined using surface-to-surface contact with a friction coefficient of 0.6. Simulations consider multiple pipe diameters (914.4 mm to 1600.2 mm), wall thicknesses (6 mm to 14 mm), and burial depths (1.5 m to 2.5 m). Soil types include both sandy and clayey materials. The seismic loading is applied in the form of fault-induced displacement corresponding to a magnitude 6.5 earthquake.

In addition to the finite element simulations, analytical estimations of stress and strain are performed using codified relationships from standards including ALA, APA, and Iran's Seismic Design Guidelines for Oil and Gas Pipelines (Publication 038). Key formulas include the Ramberg-Osgood model for material behavior and fault-induced deformation estimation based on empirical relations.

Results

Soil Type Influence: Stress and strain levels are generally higher in sandy soils than in clayey soils, due to lower cohesion and higher stiffness.

Wall Thickness: A significant reduction in both hoop stress and longitudinal strain is observed as wall thickness increases.

Burial Depth: While burial depth has minimal influence on stress, it affects strain considerably—particularly at greater pipe diameters.

Diameter Effect: At constant wall thickness, increasing pipe diameter results in higher stress and strain. The effect is amplified at greater burial depths.

Code Comparison: Analytical results from codes (ALA, APA) consistently overpredict stresses and strains compared to finite element results. This conservative approach, though safe, may lead to excessive design thickness and increased construction costs.

Conclusions

The study demonstrates that finite element analysis offers a more accurate and optimized understanding of buried pipeline behavior under fault-induced movements compared to codified equations. Pipe wall thickness is the most effective parameter in controlling strain, and an optimized balance between diameter and burial depth is crucial. The overestimation of

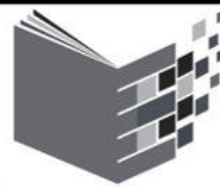
stress/strain by codes suggests that numerical simulations should be integrated into the design process to improve economic efficiency without compromising safety.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تحليل عددی-اندرکنشی لوله های مدفون عبوری از گسل معکوس و مقایسه با روابط

آیین نامه ای

سحر جلیلی^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه عمران دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saharjalili.c@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰ کلیدواژه ها: خطوط لوله، زلزله، گسل معکوس، عمق مدفون، روابط آیین نامه ای	سیستم های خط لوله مهمترین ابزار برای انتقال گاز و سایر سوخت های مایع می باشند. اکثر این خطوط لوله در زیر زمین مدفون شده اند و به شدت تحت تاثیر حرکات ناگهانی زمین که ناشی از زلزله و زمین لغزش می باشند، قرار دارند. خسارات اعمال شده به خط لوله در طی هر یک از این رخدادها اگر شدید باشند، منجر به شکسته شدن اتصالات و در نتیجه ضررهای اقتصادی زیادی می شوند. با هر حرکت زمین خط لوله در معرض یک و یا همه انواع بارهای محوری، خمشی و برشی قرار دارد. این بارها ممکن است منجر به تنش های فشاری بزرگ شوند که در واقع منجر به کمانش محلی و یا کلی می شوند. در این کار اندرکنش بین لوله و خاک اطراف به علت حرکت ناگهانی زمین، با یک نوع ارتباط بین خط لوله و خاک، پاسخ غیر خطی خاک، پاسخ غیر خطی مواد و هندسه غیر خطی مطالعه شده است. مهمترین پارامتر برای تعیین سطح عملکرد و میزان خرابی خطوط لوله مدفون در هنگام وقوع زلزله، مقدار حداکثر کرنش می باشد. آیین نامه های شریان های حیاتی (ALA, APA) نیز با بررسی مقدار حداکثر کرنش، به بررسی رفتار لرزه ای خطوط لوله مدفون پرداخته اند که با استفاده از روابط آیین نامه مقادیر تنش و کرنش را بدست آورده شده و با نتایج حاصل از نرم افزار Abaqus مقایسه شده اند. موثرترین عامل شناخته شده در این مطالعه ضخامت لوله است که هرچه ضخامت لوله بیشتر باشد مقادیر کرنش و تنش کمتر خواهند بود و نوع تغییر شکل نیز متفاوت خواهد بود. عمق مدفون لوله تاثیر زیادی روی مقادیر تنش اعمالی به لوله ندارد ولی روی مقادیر کرنش تاثیر دارد. در عمق های مدفون پایین کرنش نسبت به قطر لوله حساسیت چندانی ندارد ولی وقتی عمق مدفون بزرگتر باشد، مقادیر کرنش نسبت به افزایش قطر لوله حساسیت بیشتری پیدا می کنند. همچنین در ضخامت های بزرگتر نیز افزایش قطر لوله باعث افزایش چشمگیر مقادیر کرنش می شود. برای چند مورد از نمونه مدل ها مقادیر تنش و کرنش با استفاده از روابط آیین نامه ای محاسبه شد. با مقایسه این نتایج با مقادیر حاصل از تحلیل اجزا محدود می توان نتیجه گرفت که هم مقادیر تنش و هم مقادیر کرنش در آیین نامه دست بالا در نظر گرفته می شوند.

استناد: جلیلی، سحر. (۱۴۰۴). تحلیل عددی-اندرکنشی لوله های مدفون عبوری از گسل معکوس و مقایسه با روابط آیین نامه ای. مجله مدل سازی

پیشرفته در مهندسی عمران، ۱۳۷-۱۴۸، (۱)۲. DOI: 10.22126/amcen.2025.10547.1007



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

شبکه‌های عظیمی از خطوط لوله هم روی ساحل و هم خارج از ساحل برای انتقال مواد سوختی، گاز و آب استفاده می‌شوند. بخاطر مسائل امنیتی این خطوط معمولاً در زیر زمین مدفون می‌شوند، هرچند استثناً هم ممکن است وجود داشته باشد. فاصله مبدا و مقصد برای خطوط لوله از چند متر تا هزاران متر تغییر می‌کند، بنابراین خط لوله تحت شرایط مختلف آب و هوایی، مخاطرات طبیعی و انواع مختلف نیروها قرار می‌گیرد. به عنوان مثال دما می‌تواند از ۰ تا ۱۰۰ درجه فارنهایت تغییر کند، خاک ممکن است از نوع سنگ سخت باشد یا از نوع ماسه با چسبندگی کم و همچنین بارها ممکن است از نوع فشار خارجی، بار وسایل نقلیه، پل‌ها، سازه‌ها و یا خاک باشند. علاوه بر این لوله‌های مدفون احتمالاً تحت زمین لغزش، زمین لرزه، تغییر شکل دائمی زمین، جابجایی گسل و یا روانگرایی خاک قرار می‌گیرند [۱]. حوادث زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد لوله‌های مدفون در اثر حرکت ناگهانی زمین گسیختگی‌هایی را تجربه کرده‌اند. در زلزله اوکی میاگیکن ژاپن [۲] هزاران نفر از مردم به مدت چندین روز به خاطر ۳۵۰ شکستگی در نقاط مختلف لوله‌های مدفون بدون آب بودند. در سال ۱۹۷۱ در زلزله سن فرناندو ۴۵۰ نقطه شکستگی در لوله آب زیرزمینی و ۵۲ نقطه شکست در یک لوله انتقال ۶ مایلی و همچنین بخش‌های کمانش یافته بیشماری به وجود آمد. علاوه بر این خسارت در لوله‌های گاز و نفت منجر به تلفات جانی و زیان‌های اقتصادی می‌شود. از فوریه ۲۰۱۱ تا ژوئن ۲۰۱۲ حادثه فقط در لوله‌های انتقال گاز در اثر حرکات زمین در ایالات متحده اتفاق افتاد که منجر به خسارت مالی بالغ بر ۷ میلیون دلار شد [۳]. همه این‌ها نشان می‌دهند که لازم است طراحی لوله‌ها و ساخت آن‌ها به دقت بیشتری انجام بگیرد.

۲. مطالعات گذشته

نیومارک و هال [۴] یکی از نخستین کارها روی این موضوع را انجام دادند و پاسخ مکانیکی لوله‌های مدفون تحت جابجایی گسل امتداد لغز را مورد مطالعه قرار دادند. موضوع مورد مطالعه آن‌ها تعیین ظرفیت باربری لوله عبوری از گسل در عمق‌های مدفون مختلف و همچنین لوله‌های با ضخامت‌های مختلف بود.

مطالعه نیومارک و هال توسط کندی و همکارانش [۵] بهبود بخشیده شد. آن‌ها روی لوله‌های مدفون کم عمق با جابجایی‌های افقی و قائم بزرگتر تمرکز کردند. چند تا بهبود در این فرآیند تحلیلی صورت گرفت در این مطالعات برخلاف مطالعات قبلی اصکاک غیر یکنواخت بین لوله و خاک در نظر گرفته شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که حضور فشار داخلی باعث افزایش کرنش‌های خمشی همراه با تغییرات ناچیزی در کرنش محوری می‌شود.

بعد از مدتی، مطالعه کندی و همکارانش، توسط وانگ و یه [۶] با وارد کردن سختی خمشی مواد تشکیل دهنده لوله بهبود بخشیده شد. آن‌ها لوله‌های مدفون کم عمق را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که زاویه‌های عبور بزرگتر، عمق‌های مدفون کوچکتر، لوله‌های با قطر کوچکتر و زاویه‌های اصطکاک کوچکتر پارامترهای مناسبی برای تعیین ظرفیت لوله هستند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) [۷]، رفتار کمانشی لوله‌های مدفون تحت حرکت گسل امتداد لغز را تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که لوله مدفون بدون فشار در لایه سنگی از نظر گسیختگی مستعدتر از لوله موجود در لایه خاکی است و با افزایش جابجایی گسل تغییر شکل لوله مدفون بدون فشارافزایش می‌یابد. با افزایش نسبت شعاع به ضخامت کمانش لوله مدفون جدی‌تر است. کرنش محوری لوله با افزایش فشار داخلی افزایش می‌یابد. شرفی و پارسا [۸]، خطوط لوله مدفون در زمین‌های کم عمق در خاک‌های روانگرا را با نرم افزار FLAC2D شبیه سازی لرزه‌ای کردند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهای خاک همچون زاویه اصطکاک، قطر لوله و عمق دفن مدفون لوله اثر مهمی بر کاهش نیروی رانش دارند.

۳. مدل‌سازی خاک و لوله مدفون

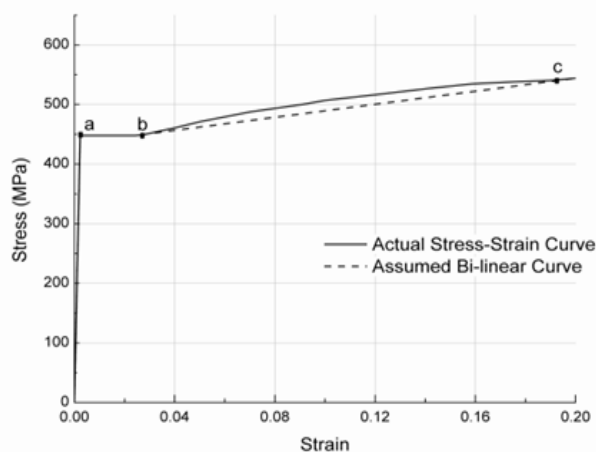
۳-۱. خاک

در این تحقیق خاک به صورت مستطیلی با ارتفاع ۵ متر و عرض ۱۰ متر در صفحه و طول ۶۰ متر که برابر طول لوله می‌باشد مدل‌سازی شده است. همچنین برای لوله سه عمق کارگذاری ۲/۵، ۱/۵ و ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). برای مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک مصالح خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. همچنین از دو نوع خاک رس و ماسه‌ای در مدل‌سازی

۳-۳. مش بندی

بنابراین، برای مش بندی خاک از المان‌های پیوسته هشت گره‌ای سه بعدی (C3D8R) استفاده شده است بطوری که در اطراف محل گسل از مش‌های ریزتری استفاده شده است. تعداد کل المان‌ها برای خاک ۶۲۹۸۵ است (شکل ۳).

لوله با المان‌های پوسته‌ای چهارگره‌ای (S4R) و مش یک دست مش بندی شده است. که مجموعاً ۹۹۴۱۲ المان به لوله اختصاص داده شده است که در شکل نشان ۳ داده شده است. یکی از دلایل استفاده از المان‌های پوسته‌ای [۹] این است که اتصال روی یک طرف پوسته است. به عبارت دیگر، المان‌های پیوسته برای ارتباط هر دوطرف پوسته مفیدترند.



شکل ۲. منحنی تنش کرنش فولاد مورد استفاده

جدول ۲. تنش تسلیم فولاد در سطوح کرنش پلاستیک مختلف

نقطه	تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک
a	450	0
b	450	0.0279
c	548	0.1679

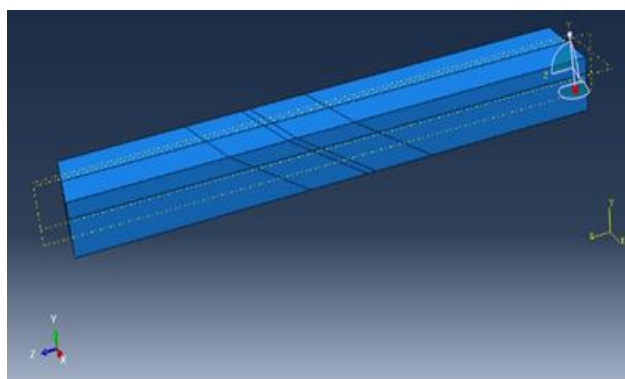
۴-۳. بارگذاری و شرایط مرزی

سیستم خط لوله به سه قسمت قطعه تقسیم می‌شود: یک قطعه متحرک، یک خط گسل کم عرض و یک قطعه ثابت که در شکل

استفاده شده است. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

۲-۳. لوله

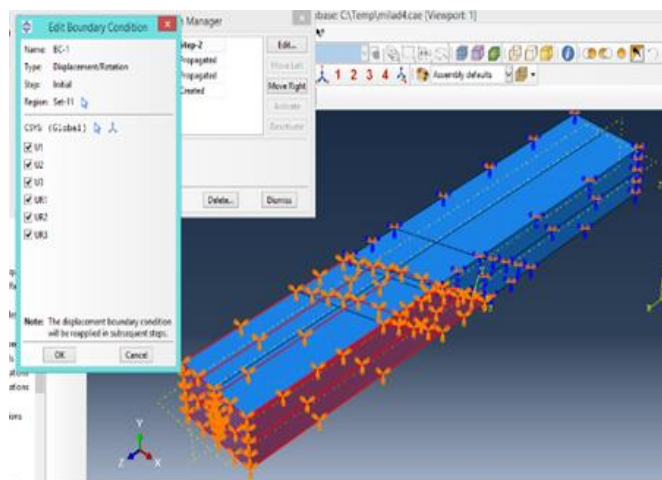
بر اساس آیین نامه ۳۱.۸B ASME گریدهای مختلفی برای لوله‌ها بر اساس کاربردهای مختلف، محل‌های مختلف و سوخت‌های مختلف داخلی وجود دارد. در این تحقیق از یک لوله گاز عبوری از محل نوع ۱ استفاده شده است. یک لوله با فولاد گرید $API X65$ مدول یانگ و نسبت پواسون برای این نوع لوله به ترتیب برابر $210GPa$ و 0.3 هستند. چگالی $2000 Kg/m^3$ می‌باشد. منحنی آزمایشگاهی برای این نوع فولاد در شکل ۲ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی‌ها منحنی به صورت تقریبی به شکل پلاستیک کامل از a تا b و سپس سخت شوندگی خطی از b تا c است. پارامترهای رفتار غیر الاستیک فولاد مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱. خاک مدل‌سازی

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

مشخصات خاک	رس	ماسه
چگالی	$1800Kg/m^3$	$1800Kg/m^3$
مدول یانگ	$25MPa$	$50MPa$
نسبت پواسون	0.3	0.3
چسبندگی	$50kPa$	0
زاویه اصطکاک	0	40
زاویه اتساع	0	0



شکل ۵. شرایط مرزی مدل

۴. نتایج مدل سازی

۴-۱. نتایج تحلیل اجزای محدود

در این بخش نتایج حاصل از مدل سازی عددی برای پارامترهای مختلفی همچون قطر لوله، ضخامت لوله، عمق مدفون لوله و همچنین نوع خاک آورده شده است. در این کار برای لوله بر اساس لوله های موجود ۴ نوع قطر با سه ضخامت مختلف در نظر گرفته شده است، که قطر ها (میلی متر) و ضخامت ها (میلی متر) بترتیب عبارتند از: ۹۱۴.۴، ۱۱۴۳، ۱۳۷۱.۶ و ۱۶۰۰.۲ برای قطر و نیز ضخامت های ۶، ۱۰ و ۱۴ که در نهایت از تحلیل ها نتایج زیر به دست آمده اند. ابتدا با توجه به تمام نتایج مشخص شد که در همه حالت های مختلف مقادیر تنش و کرنش در خاک ماسه ای از خاک رس بیشتر است، که نمونه ای از آن ها در جدول های ۴ و ۵ آورده شده است.

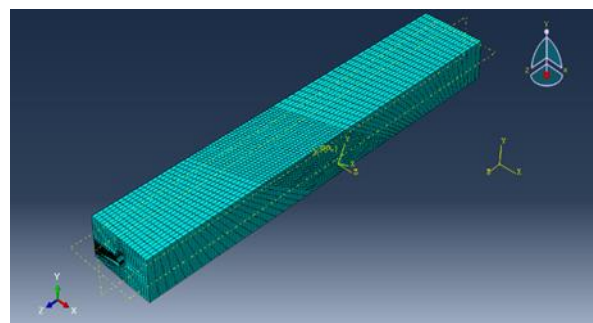
جدول ۴. مقادیر کرنش برای لوله به قطر ۹۱۴.۴ در ضخامت ها و عمق های مدفون مختلف

قطر	ضخامت	نوع خاک	عمق مدفون		
			1.5	2	2.5
914.4	6	ملسبه	8.83	38.4	46.8
		رس	6.59	27.3	13.2
	10	ملسبه	6.38	21.8	24.1
		رس	4.52	14.3	11.2
	14	ملسبه	5.33	13.4	14
		رس	3.99	10.1	8.14

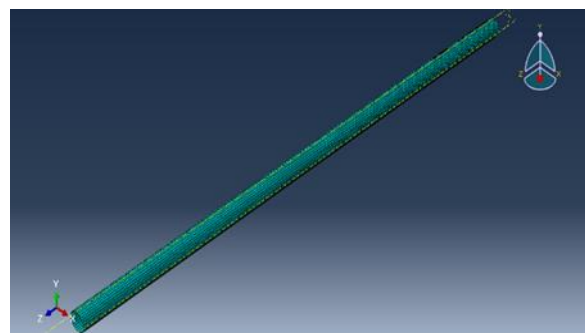
نشان داده شده است. قطعه سمت چپ (S) ثابت است در حالی که قطعه سمت راست (M) تحت تاثیر حرکت گسل معکوس مورب است. به علت این حرکت، یک ناحیه باریک تحت تغییر شکل های مختلفی است. که مقدار این ناحیه باریک ۰.۳ متر در نظر گرفته شده است. مطالعه پارامتری توسط وازورانس و همکارانش [۱۰] نشان داد که مقدار این عرض تاثیری بر پاسخ لوله مدفون ندارد. ارتباط بین خاک و لوله با تعریف رفتار لوله به عنوان سطح مستر و خاک به عنوان سطح اسلیو ارتباط سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰.۶ در آباکوس تعریف می شود.

جدول ۳. مشخصات فولاد استفاده شده در مدل سازی

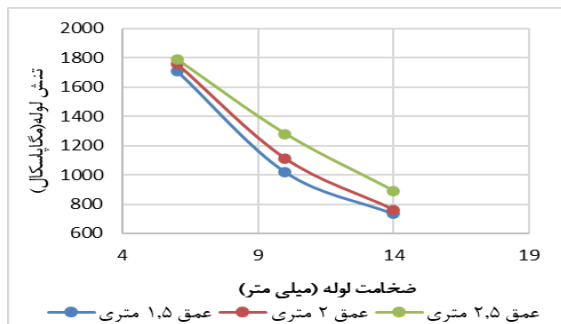
چگالی	2000Kg/m ³
مدول یانگ	210GPa
نسبت پواسون	0.3



شکل ۳. مش بندی خاک مدل شده

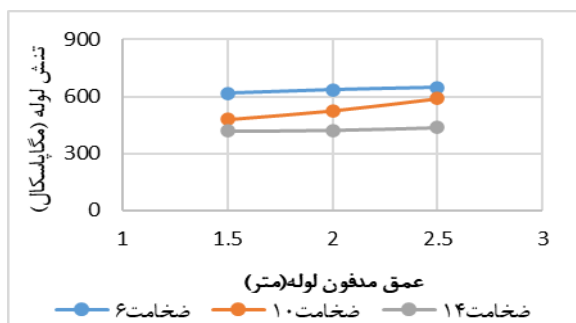


شکل ۴. مش بندی لوله مدل سازی شده



شکل ۷. مقایسه مقادیر تنش در ضخامت‌های مختلف در سه عمق مدفون برای خاک رس

حساسیت مساله به قطر های مختلف و عمق های مدفون مختلف در ضخامت ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود در ضخامت ثابت افزایش عمق مدفون تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر تنش در جداره لوله ندارد. این امر دارای توجیه مکانیکی است، چرا که فشار داخلی می‌تواند تا حدی با اثر خاک اطراف لوله خنثی شود. بنابراین گاهی با افزایش عمق لوله اثرات فشار داخلی کمتر شده و این امر در کاهش تنش داخلی در جدار لوله خود را نشان می‌دهد. این پدیده در جایی که عامل اصلی تنش‌های داخلی لوله، ناشی از وزن سربار خاک و ترافیک است، می‌تواند بطور معکوس نیز دیده شود، یعنی با افزایش فشار داخلی لوله، بخشی از اثرات آن عوامل خنثی شده و به کاهش تنش داخلی جدار لوله منجر شود. ولی در ضخامت ثابت افزایش قطر لوله باعث افزایش مقدار تنش در جداره لوله می‌شود و در عمق های مدفون بالاتر حساسیت تغییر تنش به افزایش قطر لوله بیشتر است.



شکل ۸. مقادیر تنش در عمق‌های مدفون مختلف در ضخامت‌های مختلف برای خاک ماسه‌ای

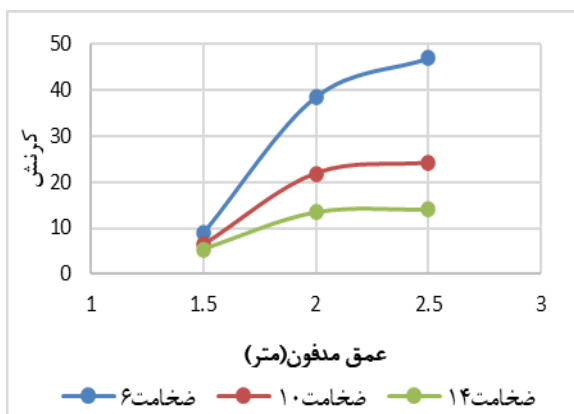
جدول ۵ مقادیر تنش برای لوله به قطر ۱۱۴۳ در ضخامت‌ها و عمق‌های مدفون مختلف

قطر	ضخامت	نوع خاک	عمق مدفون		
			1.5	2	2.5
1143	6	ماسه	1098	1143	1195
		رس	779	729	750
	10	ماسه	907	921	959
		رس	684	709	469
	14	ماسه	675	585	525
		رس	359	379	462

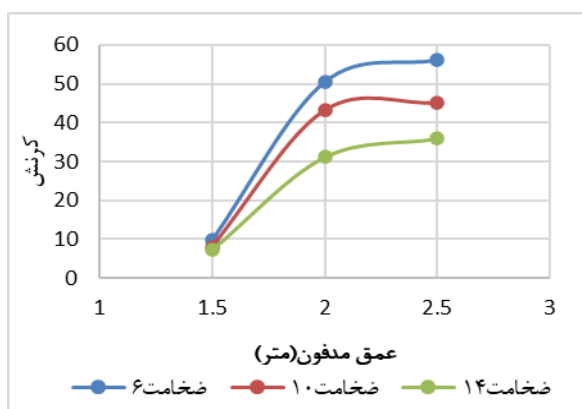
در شکل‌های ۶ و ۷ عمق مدفون و قطر لوله ثابت فرض شده و تغییرات تنش نسبت به افزایش ضخامت لوله برای خاک ماسه‌ای و خاک رس رسم شده است. همانطور که نمودارها نشان می‌دهند مقادیر تنش در جداره لوله با تغییرات ضخامت نسبت عکس دارد و با افزایش ضخامت تنش لوله کاهش پیدا می‌کند. و همانگونه که مشخص است در عمق‌های مدفون ۲ متری تغییرات تنش محسوس‌تر از دو عمق دیگر است.



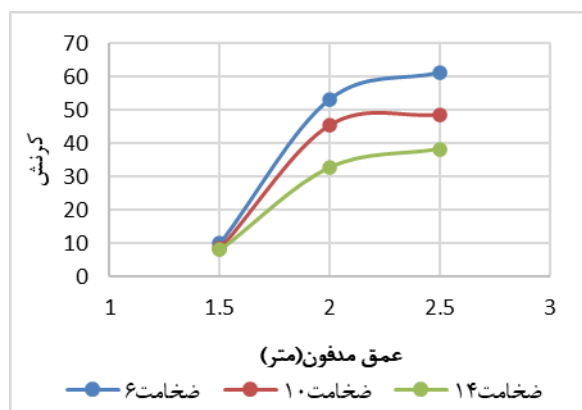
شکل ۶. مقایسه مقادیر تنش در ضخامت‌های مختلف در سه عمق مدفون برای خاک ماسه‌ای



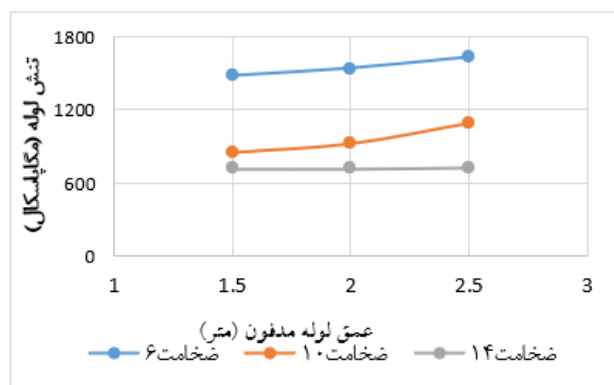
شکل ۱۱. مقایسه مقادیر کرنش در عمق های مدفون مختلف در لوله به قطر ۹۱۴.۴



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر کرنش در عمق های مدفون مختلف در لوله به قطر ۱۱۴۳

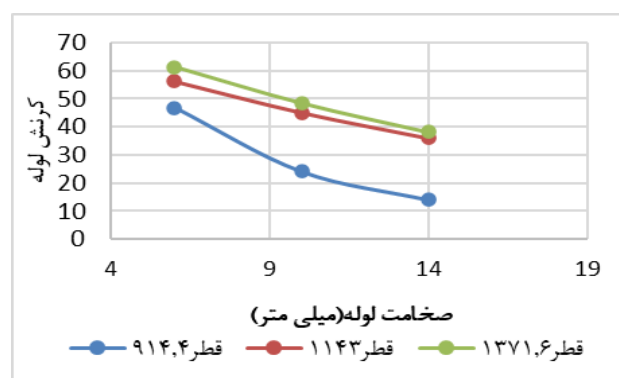


شکل ۱۳. مقایسه مقادیر کرنش در عمق های مدفون مختلف در لوله به قطر ۱۳۷۱.۶



شکل ۹. مقایسه مقادیر تنش برای عمق های مدفون مختلف برای خاک رس

با افزایش ضخامت لوله مقادیر کرنش کاهش می یابد و هرچه که قطر لوله بزرگتر باشد تغییرات کرنش کمتر است، به عبارتی دیگر در قطرهای بزرگ با افزایش ضخامت تاثیر زیادی بر کاهش مقدار کرنش ندارد که این قضیه به علت افزایش نسبت D/t می باشد.



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر کرنش در ضخامت های مختلف

در شکل های ۱۰ الی ۱۳ مقادیر کرنش (مقادیر کرنش بصورت درصدی و هزار برابر بیان شده است) برای عمق های مدفون مختلف در ضخامت های ثابت با هم مقایسه شده اند. با توجه به نمودارها می توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق مدفون کرنش نیز افزایش می یابد. از این شکل ها یک نتیجه مهم دیگری نیز می توان گرفت که در عمق مدفون ۱/۵ متر افزایش ضخامت تاثیر چندانی بر تغییرات مقادیر کرنش ندارد. به عبارتی دیگر عمق ۱/۵ متر یک عمق بهینه برای لوله مدفون می باشد.

۲-۴. نتایج تحلیل آیین نامه‌ای

در این بخش ابتدا روابط آیین نامه‌ای که در ایران برای طراحی لوله‌ها استفاده می‌شود را معرفی می‌کنیم. در ایران آیین نامه طراحی لرزه‌ای تاسیسات و سازه‌های صنعت نفت موسوم به نشریه ۰۳۸ در سال ۱۳۸۶ توسط وزارت نفت به چاپ رسیده که قسمتی از آن به ضوابط طراحی خطوط لوله مدفون اختصاص یافته است. این آیین نامه مطابق استانداردهای ALA (اتحادیه شریان‌های حیاتی آمریکا) [۱۱]، APA (انستیتو نفت آمریکا، مربوط به مشخصات خط لوله) [۱۲]، ASCE (انجمن مهندسی عمران آمریکا) [۱۳]، FEMA (اجرای سیستم‌های خط لوله گاز و سوخت مایع مقاوم در زلزله، تنظیم شده توسط دولت فدرال و آژانس فدرال مدیریت امور اضطراری) [۱۴]، Eurocode ۲۰۰۴ (آیین نامه اروپا) [۱۵]، می‌باشد.

وقتی رابطه تنش-کرنش برای مصالح لوله تعریف نشده باشد، می‌توان آن را به صورت تقریبی از رابطه رامبرگ-اوسگود استفاده کرد:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (۱)$$

E : کرنش مهندسی

σ : تنش لوله

E : مدول یانگ اولیه

σ_y : تنش تسلیم مصالح لوله

r و n پارامترهای رامبرگ-اوسگود (جدول)

تنش طولی لوله در اثر فشار داخلی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$S_P = \frac{PD\mu}{2t} \quad (۲)$$

P : ماکزیمم فشار داخلی عملیاتی لوله

D : قطر خارجی لوله

μ : ضریب پواسون مصالح لوله

t : ضخامت اسمی جداره لوله

تنش ناشی از خاک در لوله

$$S_S = 1.4 \frac{c_d \gamma B_d^2 E_{tr}}{E t^3 + 2.6 P r^3} \quad (۳)$$

C : چسبندگی خاک ترانشه

γ : وزن مخصوص خاکریز

E : مدول الاستیسیته مصالح لوله

t : ضخامت اسمی جداره لوله

P : فشار داخلی لوله

R : شعاع متوسط لوله $\frac{(D-t)}{2}$

B_d : عرض ترانشه در تراز تاج

ε_u : کرنش خرابی لوله در کشش:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c-pgd} &= 0.88 \frac{t}{R} \\ \varepsilon_{c-wave} &= 0.75 \left[0.5 \frac{t}{D'} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{PD}{2Et} \right)^2 \right] \\ D' &= \frac{D}{1 - \frac{3}{D}(D - D_{min})} \end{aligned} \quad (۴)$$

D_{min} : حداقل قطر داخلی لوله، قطر خارجی لوله منهای ضخامت

جداره لوله، تغییر مکان گسل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

برای گسل معکوس:

$$\log \delta_{fr} = -0.74 + 0.08M \quad (۵)$$

M : بزرگای زلزله که در این مقاله از یک زلزله با بزرگی ۶.۵ ریشتر

هم در تحلیل دقیق و هم در تحلیل تقریبی استفاده شده است.

تغییر مکان گسل در راستای محوری خط لوله برابر است با:

$$\delta_{fax-design} = \delta_{fax} \times I_p \quad (۶)$$

تغییر مکان گسل طرح در راستای عرضی خط لوله برابر است با:

$$\delta_{ftr-design} = \delta_{ftr} \times I_p \quad (۷)$$

تغییر مکان گسل طرح در امتداد قائم بر خط لوله:

$$\delta_{fvt-design} = \delta_{fvt} \times I_p \quad (۸)$$

کرنش ناشی از عبور از گسل

کرنش متوسط لوله در نتیجه عبور از گسل را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

مدفون ضخامت لوله را بر اساس تنش وارد شده به لوله در نظر می گیرند، بنابراین استفاده از روابط آیین نامه ای باعث در نظر گرفتن ضخامت های بالا می شود، که این امر از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست.

جدول ۶. مقادیر تنش حاصل از روابط آیین نامه ای

عمق مدفون	ضخامت	قطر لوله			
		914.4	1143	1371.6	1600.2
۲ متر	6	1432	1385	1290	1100
	10	1325	1314	1223	1053
	14	1260	1215	1136	996

جدول ۷. مقادیر کرنش محاسبه شده از روابط آیین نامه ای

قطر لوله	ضخامت	عمق مدفون		
		1.5	2	2.5
914.4	6	0.038	0.0513	0.064
	10	0.019	0.034	0.041
	14	0.006	0.0222	0.025

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، پاسخ لوله های مدفون به حرکات ناگهانی زمین با استفاده از روش اجزا محدود و همچنین با استفاده از روابط آیین نامه ای مطالعه شده است. این کار با استفاده از نرم افزار ABAQUS/Explicit انجام شده است. این مطالعه برای تشخیص پارامترهایی که روی پاسخ لوله مدفون اثر می گذارند و پیشنهادهایی برای بهبود طراحی لوله انجام شده است. تحلیل در دو بخش انجام شده است: بخش اول تحلیل با استفاده از روش اجزا محدود و در بخش دوم تحلیل با استفاده از روش آیین نامه ای و این دو روش با هم مقایسه شده اند.

موثرترین عامل شناخته شده در این مطالعه ضخامت لوله است که هرچه ضخامت لوله بیشتر باشد مقادیر کرنش کمتر خواهند بود و نوع

$$\varepsilon = 2 \left[\frac{\delta_{fax-design}}{2L_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_{ftr-design}}{2L_a} \right)^2 \right] \quad (9)$$

L_a : طول لوله مهار نشده است و طول مهار نشده را می توان به صورت زیر در نظر گرفت هنگامی که هیچ خم، بست یا هر نوع مقیدکننده ای در خط لوله در نزدیکی پهنه گسل وجود نداشته باشد، طول مهار نشده خط لوله را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$L_a = \frac{E_i E_y \pi D t}{t_u} \quad (10)$$

E_y : کرنش تسلیم مصالح لوله

E_i : مدول الاستیسیته مصالح لوله

D : قطر لوله

t : ضخامت لول

t_u : نیروی اصطکاکی نهایی وارده در امتداد محور لوله:

$$t_u = \pi D c a + \pi D H \bar{\gamma} \frac{1+K_0}{2} \tan \delta' \quad (11)$$

D : قطر خارجی لوله

C : ضریب چسبندگی خاکریز روی لوله و اطراف آن

H : عمق خاک روی لوله نسبت به مرکز خط لوله

$\bar{\gamma}$: وزن موثر واحد حجم خاک

a : ضریب پیوستگی (ضریب اتصال و بهم آمیختگی)

حسب $a = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.695}{c^3+1}$ که در آن c بر حسب $KPa/100$ و δ' : زاویه اصطکاک حد فاصل خاک و لوله که برابر است با $\delta' = f \times \phi$ که ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، f : ضریب اصطکاک برای انواع مختلف لوله (جدول)، K_0 : ضریب فشار خاک در حالت سکون. که مقدار آن را می توان از طریق جدول و یا فرمول زیر به دست آورد.

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (12)$$

نتایج تحلیل تقریبی برای لوله مدفون در قطر ۲ متری در جدول های ۶ و ۷ آمده است. با توجه به جدول می توان نتیجه گرفت که مقادیر تنش در لوله های مدفون با استفاده از روابط آیین نامه دست بالا در نظر گرفته می شوند که با توجه به اینکه شرکت های طراحی لوله های

- pipelines in shallow ground. Arab J Geosci (2016) 9: 215. doi:10.1007/s12517-015-2025-y
- [9] Manual, A. U. (2013). Version 6.13-2. Dassault Systmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA.
- [10] Vazouras, Polynikis, Spyros A. Karamanos, and Panos Dakoulas. "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 41 (2012): 164-180.
- [11] آیین نامه طراحی خطوط لوله فولادی زیرزمینی، اتحادیه شریان‌های حیاتی آمریکا، ۲۰۰۵ (ALA).
- [12] مشخصات خطوط لوله، انستیتو نفت آمریکا، چاپ دوم ۱۹۹۰
- [13] آیین نامه طراحی لرزه‌ای سیستم‌های خطوط لوله نفت و گاز، کمیته شریان‌های حیاتی گاز و سوخت مایع، انجمن مهندسی عمران آمریکا، شماره ۱۱، ژوئای ۱۹۹۷
- [14] اجرای سیستم‌های خط لوله گاز و سوخت مایع مقاوم در زلزله، تنظیم شده توسط دولت فدرال و آژانس فدرال مدیریت امور اضطراری، کاهش خطر زلزله، سری ۶۷-۱۹۹۲
- [15] آیین نامه اروپا، ضوابط طراحی برای سازه مقاوم در زلزله. بخش ۴: سیلوها، مخازن و خطوط لوله، کمیته اروپایی برای استاندارد نمودن. چاپ ۳۴، دسامبر ۲۰۰۴
- تغییر شکل نیز متفاوت خواهد بود. عمق مدفون لوله تاثیر زیادی روی مقادیر تنش اعمالی به لوله ندارد ولی روی مقادیر کرنش تاثیر دارد. در عمق‌های مدفون پایین کرنش نسبت به قطر لوله حساسیت چندانی ندارد ولی وقتی عمق مدفون بزرگتر باشد، مقادیر کرنش نسبت به افزایش قطر لوله حساسیت بیشتری پیدا می‌کنند. و همچنین در ضخامت‌های بزرگتر نیز افزایش قطر لوله باعث افزایش چشمگیر مقادیر کرنش می‌شود. برای چند مورد از نمونه مدل‌ها مقادیر تنش و کرنش با استفاده از روابط آیین نامه‌ای محاسبه شد. با مقایسه این نتایج با مقادیر حاصل از تحلیل اجزا محدود می‌توان نتیجه گرفت که هم مقادیر تنش و هم مقادیر کرنش در آیین نامه دست بالا در نظر گرفته می‌شوند.

منابع

- [1] American Society of Mechanical Engineers. Gas transmission and distribution piping system. ANSI/ASME 2014; B31:8.
- [2] Liang, J., & Sun, S. (2000). Site effects on seismic behavior of pipelines: a review. *Journal of pressure vessel technology*, 122(4), 469-475.
- [3] All Reported Pipeline Incidents- Listing by Cause. US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.
- [4] Newmark NM, Hall WJ. Pipeline design to resist large fault displacement. In: Proceedings of U.S. national conference on earthquake engineering, 1975. p.41625.
- [5] Kennedy RP, Chow AW, Williamson RA. Fault movement effects on buried oil pipeline. *ASCE Journal of Transportation Engineering* 1977;103:61733.
- [6] Wang LRL, Yeh YA. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1985;13:7596
- [7] Zhang, J., Z. Liang, and C. J. Han. "Buckling behavior analysis of buried gas pipeline under strike-slip fault displacement." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 21 (2014): 921-928.
- [8] Sharafi, H. & Parsafar, P. Seismic simulation of liquefaction-induced uplift behavior of buried