

## بررسی رفتار دینامیکی لوله‌های مدفون خم‌دار افقی به روش عددی و آزمایشگاهی

### تحت اثر گسل امتدادلغز

سهند سریع‌الاطلاق<sup>۱</sup>، مسعود نکویی<sup>۲\*</sup>، اصغر وطنی اسکویی<sup>۳</sup>، آرمین عظیمی‌نژاد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده

با توجه به اهمیت زیاد خطوط لوله‌های مدفون حامل انرژی در شبکه شریان‌های حیاتی، بررسی رفتار اینگونه سازه‌ها در برابر تحریکات دینامیکی ناشی از حرکت شدید زمین لازم می‌باشد. در این مقاله رفتار لرزه‌ای بخشی از یک لوله مدفون با خم افقی تحت اثر رکورد زلزله بم به صورت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است. لوله با استفاده از المان سه بُعدی چهار گره‌ای پوسته‌ای (Shell) و خاک با خواص الاستوپلاستیک مدلسازی شده است. در پی تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با اعمال رکورد زمین لرزه بم، مطالعات پارامتریک گسترده‌ای با توجه به قطر و ضخامت‌های مختلف لوله فولادی انجام و مقادیر کرنش محوری و پلاستیک لوله خم‌دار افقی در محل نصب کرنش‌سنج‌ها با نتایج عددی در طول لوله مقایسه شده‌اند. همچنین فاصله تشکیل مفصل پلاستیک در لوله‌ها تا امتداد خط گسل نسبت به پارامترهای قطر و ضخامت بررسی و رابطه ریاضی برای تعیین محل مفصل پلاستیک ارائه گردیده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند غالباً در لوله‌های مدفون با خم افقی، بیشترین میزان کرنش محوری، کرنش پلاستیک و تنش در لوله، در گوه ثابت خاک و در نزدیکی محل گسل رخ می‌دهد. در لوله خم‌دار افقی با افزایش نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ )، فاصله تشکیل محل مفصل پلاستیک از محل گسل دورتر و نسبت کرنش محوری لوله فولادی به کرنش برشی خاک ( $\epsilon_p/s$ )، کمتر می‌شود. مقدار کرنش‌های برشی در خاک با افزایش نسبت  $D/t$  لوله کاهش ولی وسعت توزیع آنها در قسمت میانی لوله و در محل تلاقی با گسل افزایش می‌یابد. با توجه به تحلیل نیروها و کرنش‌های حاصل از آزمایشات و مدل‌های عددی مشخص می‌گردد مکانیسم خرابی لوله‌های مورد مطالعه به سبب کرنش محوری در لوله‌ها می‌باشد. تغییرشکل‌های طولی بوجود آمده در مدل‌ها به صورت  $S$  شکل و با افزایش نسبت  $D/t$ ، کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تحلیل دینامیکی، تحلیل غیرخطی، لوله خم‌دار افقی، اندرکنش خاک و لوله، تحلیل اجزای محدود، آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.148084.1657	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.148084.1657	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۲	۱۳۹۷/۱۰/۱۱	۱۳۹۷/۰۶/۱۸
			*نویسنده مسئول:		
			پست الکترونیکی:		
			nekooei@srbiau.ac.ir		

## The behavior of horizontally bent buried pipes along faults slip with numerical and experimental modelling

masoud nekooei\*<sup>1</sup>, Sahand Sarioletlagh Fard<sup>2</sup>, Asghar VataniOskouei<sup>3</sup>, Armin Azimi Nejad<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Earthquake and Structure Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, ShahidRajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Earthquake and Structure Engineering Department

### ABSTRACT

Considering the high importance of energy-carrying buried pipelines in lifeline network, it is vital to understand this kind of structures against seismic dynamic excitations. In this paper, seismic behavior in some part of a buried pipe with horizontal bend under Bam earthquake record effect (2003, Iran) is studied experimentally and numerically using ABAQUS software. In the numerical model, the pipe is modelled via a three-dimensional four-node shell system, and the soil is modeled using elastoplastic properties. As non-linear dynamic analysis, with applying Bam earthquake record effects, a thorough parametric studied are performed on different pipe diameter and thicknesses, and then the axial strain and plastic strain values obtained from the strain gauges along the horizontally-bent pipe are compared with the numerical model results. Also, a correlation is obtained which relates the location of plastic hinge formation point on the pipe to the pipe diameter and thickness. The comparison of numerical model and experimental results show that in buried horizontally-bent pipes, the most axial strain, plastic strain, and stress in the pipe take place in the fixed wedge and near to the fault line. In the buried horizontally-bent pipes, with increasing the pipe diameter to thickness ratio this location will get more distance from the fault line. Also, the pipelines with larger diameters have lower pipe-soil strain ratio ( $\epsilon_p/s$ ) values causing lower axial and plastic strains.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 09 September 2018

**Revise Date:** 01 January 2019

**Accept Date:** 12 January 2019

### Keywords:

dynamic analysis , non-linear analysis , horizontal bent pipe , pipe-soil interaction , finite element analysis , ABAQUS

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.148084.1657

\*Corresponding masoud nekooei

Email address: nekooei@srbiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

لوله‌های مدفون بعنوان یکی از شریان‌های حیاتی نقش پر اهمیت و اساسی را در چرخه زندگی بشری ایفا می‌کنند. با توجه گسترده‌گی و توسعه شبکه لوله‌های نفت و گاز و عدم امکان شناسایی تمامی گسل‌های فعال، همواره شبکه خطوط لوله‌ها در اثر خطرهای گسلش، زمین لغزش، تغییر مکان‌های ناشی از روانگرایی و حرکت‌های شدید زمین، در معرض آسیب قرار دارند. ایجاد شرایط ایمن، حفظ ایمنی محیط زیست و حفاظت از سرمایه‌گذاری‌های کلان، نیازمند بررسی رفتار و طراحی مناسب شبکه خطوط لوله‌های مدفون در برابر پدیده‌هایی چون زمین‌لرزه می‌باشد. برای نیل به این هدف لازم است با استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی نسبت به بررسی رفتار لوله‌های مدفون و منشأ آسیب‌پذیری آنها در برابر بارهای وارده اقدام گردد.

بررسی رفتار لوله‌های مدفون در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران مختلفی انجام و نتایج ارزشمندی از آنها بدست آمده است. عمده این پژوهش‌ها در خصوص بررسی و رفتار لوله‌های مدفون مستقیم (بدون خم) در خاک بوده است. وازوراس و همکارانش با استفاده از روش اجزای محدود به صورت پارامتریک رفتار خطوط لوله مدفون مستقیم، عبوری از گسل‌های امتدادلغز را شبیه‌سازی و نسبت قطر به ضخامت لوله را بررسی نموده‌اند. همچنین تاثیر شرایط ابتدایی و انتهای لوله در خاک و رفتار لوله تحت اثر حرکت گسل امتدادلغز با استفاده از روابط عددی تخمین زده شده است [۱]. در تحقیقی دیگر آنها، رفتار لوله‌های صاف را تحت اثر گسل امتداد لغز با زاویه نسبت به راستای طولی لوله بررسی و جابه‌جایی بحرانی برای لوله‌ها را بر اساس معیارهای پذیرش مختلف ارائه نمودند. آن‌ها دریافتند در صورتی که زاویه بین صفحه نرمال گسل و امتداد طولی خط لوله نزدیک به صفر باشد، لوله تحت اثر کرنش محوری قرار می‌گیرد. ولی چنانچه این زاویه بزرگ‌تر شود، کرنش‌های کششی و فشاری به عنوان مود خرابی اصلی خواهد بود. در مطالعات تکمیلی بعدی ایشان به بررسی اندرکنش خاک-لوله و رفتار خطوط لوله‌های صاف تحت حرکت گسل امتدادلغز پرداختند. در این مقاله آنها با روش‌های حل بسته CFS، رابطه‌ای میان نیرو و تغییر مکان لوله مدفون نسبت به محور طولی لوله را پیشنهاد دادند. نتایج بدست آمده از این رابطه برای لوله‌های مدفون، انطباق بسیار مناسبی با نتایج تحلیل اجزای محدود در حالتی که لوله به صورت تیر و خاک به صورت فنر در طول لوله مدل شده است را بیان می‌کند. استفاده از این معادلات، مشخص نمود که تغییر مکان و مقاومت برشی تماسی لوله، تاثیر بسزایی بر بزرگای کرنش طولی لوله دارند [۲].

وازوراس و همکارانش در مطالعات خود با در نظر گرفتن شرایط مرزی ابتدایی و انتهای لوله‌های صاف بررسی‌های خود را ادامه دادند. آنها به مطالعه رفتار لوله با انتهای محدود و نامحدود تحت اثر بارهای مختلف کششی و همچنین تحلیل لوله تحت حرکت جانبی گسل امتدادلغز با زوایای مختلف پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که لوله‌های تحت حرکت گسل امتدادلغز با زاویه صفر (در جابه‌جایی‌های کوچک)، دچار کمناش موضعی میشوند. با افزایش میزان جابه‌جایی گسل، بیضی‌شدگی (Ovalization)، در محل تشکیل کمناش موضعی بوجود می‌آید. برای گسل‌های با زاویه بیش از ۱۰ درجه، به دلیل ایجاد نیروی کششی در لوله، کمناش رخ نداده و لذا عملکرد لوله بهتر و لوله ظرفیت تحمل جابه‌جایی بیشتری از طرف گسل را خواهد داشت. همچنین با افزایش زاویه گسل و به تبع آن افزایش نیروی کششی در طول لوله، مقدار جابه‌جایی بحرانی گسل، کاهش می‌یابد [۳].

شکیب و همکارانش، پاسخ لوله‌های فولادی مدفون صاف تحت اثر حرکت سه بُعدی گسل با در نظرگیری هندسه و مصالح غیرخطی را بررسی نمودند. برای این منظور لوله به چند قسمت تقسیم و هر قسمت با المان تیر، مدل گردید. خاک اطراف لوله به وسیله فنرهای غیرخطی، گسل به شکل مورب و هر دو انتهای لوله نیز به صورت گیردار فرض شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که هرچه میزان جابه‌جایی گسل بیشتر شود، وسعت توزیع کرنش‌های محوری در طول لوله بیشتر خواهد شد. همچنین کاهش عمق دفن لوله باعث افزایش ظرفیت تحمل نیروی لوله و باربری خاک می‌گردد. کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز ظرفیت تحمل بار لوله را افزایش می‌دهد [۴].

وطني اسکویی و همکارانش در پژوهشی به بررسی رفتار لوله مدفون صاف در محل عبور از گسل امتداد لغز با استفاده از تئوری اجزا محدود پرداختند. اندرکنش بین خاک و سازه و رفتار الاستوپلاستیک مصالح، در مدلسازی لحاظ گردیده است. جابه‌جایی گسل با فرض اعمال حرکت افقی دو بلوک خاک نسبت به هم، مدلسازی شده و با توجه به قطرو ضخامت لوله، مشخصات خاک و همچنین میزان جابه‌جایی گسل، مطالعات پارامتریکی جهت تحلیل رفتار لوله انجام گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مکانیسم اصلی خرابی، کمانش موضعی جداره و کمانش محوری در طول لوله می‌باشد. همچنین در خاک دانه‌ای در شرایط زمین سست ظرفیت تغییر شکل لوله بالا و در شرایط زمین سخت میزان جابه‌جایی بحرانی لوله‌ها کاهش یافته است. با توجه به افزایش جابه‌جایی لوله در خاک‌های سست می‌توان از تکیه‌گاه‌هایی با ظرفیت شکل‌پذیری زیاد در دو طرف خط گسل استفاده نمود. به علت تقید بالای خاک اطراف لوله‌های مدفون در هر سه جهت، جابه‌جایی‌های بزرگ تاثیر بیشتری بر پاسخ لوله خواهد داشت [۵].

اورورک و همکارانش در پژوهشی در خصوص آسیب‌پذیری لوله‌های مدفون مستقیم نشان دادند که اکثر خسارات جدی وارده بر خطوط لوله مدفون به علت جابه‌جایی‌های ماندگار زمین بوده و تعداد کمی از این آسیب‌ها ناشی از پدیده انتشار امواج می‌باشد [۶].

کارامیتروس و همکارانش به صورت تحلیلی، تغییرات تنش و کرنش در لوله‌های فولادی مدفون مستقیم در محل تلاقی با گسل‌های امتداد لغز را به دست آوردند. آنها با استفاده از معادلات تعادل و سازگاری تغییر مکان‌ها، نیروی محوری وارد به لوله را تحلیل و با بکارگیری ترکیبی از معادلات تئوری تیر ارتجاعی، لنگر خمشی وارده بر لوله را محاسبه نمودند. در این روش خصوصیات غیرخطی مصالح به طور غیرمستقیم وارد محاسبات شده و با استفاده از توزیع واقعی تنش بر مقطع لوله، کرنش بیشینه محاسبه گردیده است [۷].

کندی و همکارانش، پژوهش‌هایی را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و لوله‌های صاف در جهت عرضی و طولی انجام دادند. آنها با در نظر گرفتن سختی خمشی لوله، روش ساده شده‌ای برای به دست آوردن کرنش بیشینه در لوله‌های فولادی عبوری از گسل‌ها را ارائه نمودند. در روش بکار گرفته شده خصوصیات غیرخطی مصالح نیز لحاظ گردیده است [۸].

رحیم زاده و همکارانش در یک کار آزمایشگاهی پاسخ خطوط لوله فولادی مستقیم مدفون را تحت گسل معکوس، مورد مطالعه قرار دادند. گسل، عمود بر خط لوله با زاویه ۶۰ درجه و در جهت قائم تغییر مکان می‌دهد که سبب ایجاد تنش‌ها و کرنش‌هایی در دیواره خط لوله می‌شود. مدلسازی سیستم خاک-لوله به طور دقیق با استفاده از المان‌های محدود با لحاظ رفتار غیرخطی مصالح انجام شده است. در پژوهش آنها، رفتار خطوط لوله فولادی در دو نوع خاک رس با تراکم کم و متراکم تحت جابه‌جایی گسلش نرمال مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر نسبت قطر به ضخامت لوله و نوع خاک بر پاسخ خط لوله‌ها مطالعه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مود خرابی برای لوله مدفون در خاک‌های مورد بررسی به صورت کمانش موضعی در دیواره لوله مشاهده شده است. با کاهش نسبت قطر به ضخامت لوله و شرایط خاک نرم‌تر، ظرفیت تحمل تغییر شکل لوله افزایش و خط لوله قادر به تحمل تغییر مکان‌های بزرگتری خواهد بود [۹].

تاری نژاد و همکارانش در مقاله‌ای به بررسی رفتار پاسخ لوله مدفون صاف تحت جابه‌جایی گسل معکوس با در نظرگیری مقادیر مختلف جابه‌جایی و شرایط مختلف خاک پرداختند. تحلیل رفتار لوله نیز تحت سه زاویه مختلف گسل معکوس (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) انجام گردیده است. هنگامی که گوه متحرک به سمت پایین حرکت کند، گسل از نوع نرمال بوده و حرکت آن موجب ایجاد نیرو و تنش کششی محوری در لوله خواهد شد و هنگامی که گوه بالا جابجا می‌شود، گسل از نوع معکوس و حرکت آن باعث ایجاد نیروی فشاری در لوله می‌گردد. از نتایج بدست آمده مشخص گردید افزایش زاویه بین لوله و امتداد صفحات گسل، بیشترین تاثیر را بر روی کاهش تنش در لوله در لحظه گسیختگی در خاک‌های چسبنده سست دارد [۱۰].

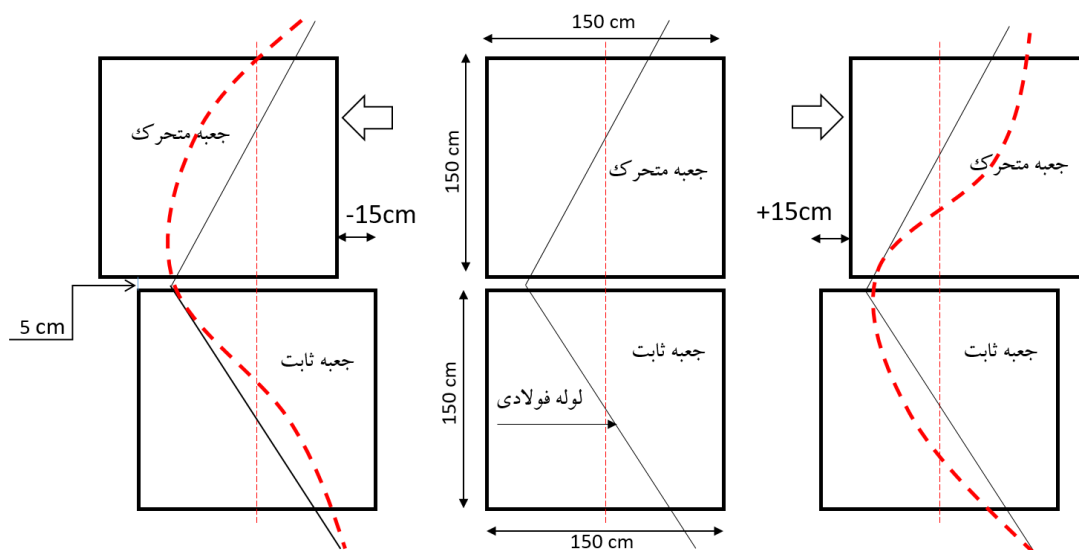
آبدوان و همکارانش رفتار مکانیکی لوله‌های انتقال گاز پلی‌اتیلن مدفون عبوری از گسل امتداد لغز برای شرایط متفاوت خاک را بررسی کردند. از نتایج این تحقیق می‌توان به اثر مستقیم افزایش سختی خاک اطراف لوله و افزایش اندرکنش خاک-لوله و میزان تنش‌ها در لوله اشاره نمود [۱۱ و ۱۲].

یوشیزاکی و همکارانش در یک کار آزمایشگاهی اثر جابجایی را بر روی لوله های مدفون صاف مطالعه نمودند. آنها در مدلسازی از خاک های شن دار با ماسه خشک و اشباع استفاده کردند. تغییر شکل لوله ها در حالت آزمایشگاهی و اجزای محدود تا حد مناسبی مطابق هم بودند. همچنین در این تحقیق مدل های تحلیلی برای شبیه سازی عملکرد واقعی رفتار خاک با شن و ماسه خشک و با شن و ماسه اشباع با فاکتورهای اصلاح شده، ارائه گردیده است. این مدل های تحلیلی می تواند در جهت افزایش مقاومت خطوط لوله های مدفون تحت اثر جابجایی های بزرگ این خاک ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۳].

با توجه به بیشینه تحقیقات و بررسی های انجام شده بر روی رفتار لوله های مستقیم در اثر گسلش، در این تحقیق به علت اجتناب ناپذیر بودن وجود خم در خطوط لوله و عدم شناسایی تمامی گسل های فعال، سعی شده است که اثر پدیده گسلش در محل خم لوله مورد مطالعه قرار گیرد. در این تحقیق رفتار و توزیع کرنش ها، تنش ها در لوله و خاک، همچنین تغییر شکل لوله های خم دار افقی تحت اثر جابجایی های ناشی از گسل های امتداد لغز بررسی شده است. با توجه به اینکه مطالعات انجام شده قبلی پیرامون لغزش زمین بوده، از اینرو در این مقاله با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی و میز لرزان جهت مدلسازی گسل امتداد لغز به بررسی رفتار دینامیکی لوله های مدفون خم دار در خاک با اعمال رکورد زلزله بم پرداخته شده است. در انتها نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدلسازی عددی مقایسه شده اند.

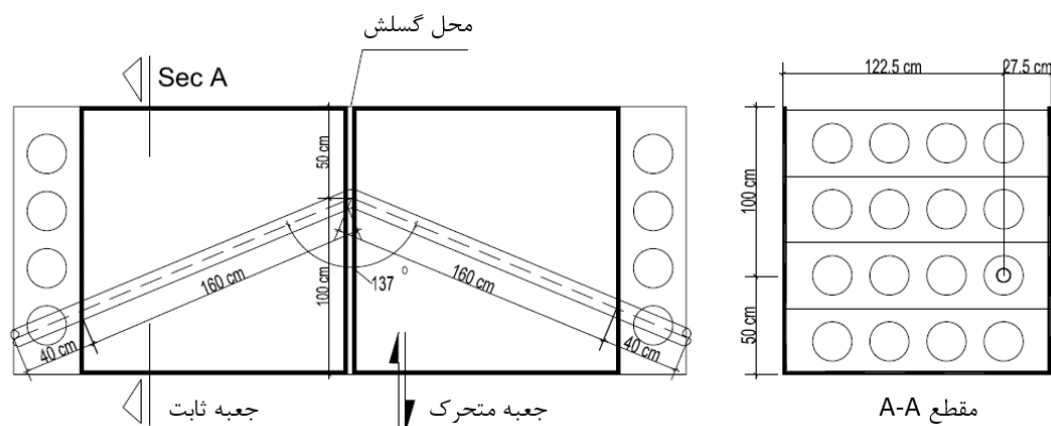
## ۲- آماده سازی مدل آزمایشگاهی

در این مقاله رفتار لوله های مدفون با خم افقی در دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت انجام مدل آزمایشگاهی از یک میز لرزان تک مولفه ای با امکان مدلسازی حرکت گسل امتداد لغز استفاده شده است. این میز لرزان شامل دو جعبه فولادی، یکی به صورت ثابت و دیگری به صورت متحرک میباشد (شکل ۱). برای اعمال بار دینامیکی از یک اکچواتور استفاده شده و وجوه بیرونی جعبه ها نیز به گونه ای طراحی شده که لوله می تواند در ارتفاع و مختصات مشخص در داخل آن قرار گیرد. جهت جلوگیری از ایجاد مقاومت تماسی، جعبه ها با فاصله ۵ سانتیمتری از یکدیگر قرار گرفته اند. ابعاد جعبه های فولادی ثابت و متحرک مشابه یکدیگر با طول، عرض و ارتفاع برابر ۱۵۰ سانتیمتر می باشد. همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، متناسب با طول جک آزمایش، جعبه ها می توانند حداکثر ۱۵ سانتیمتر نسبت به هم در هر حرکت رفت و برگشتی جابجا شوند.



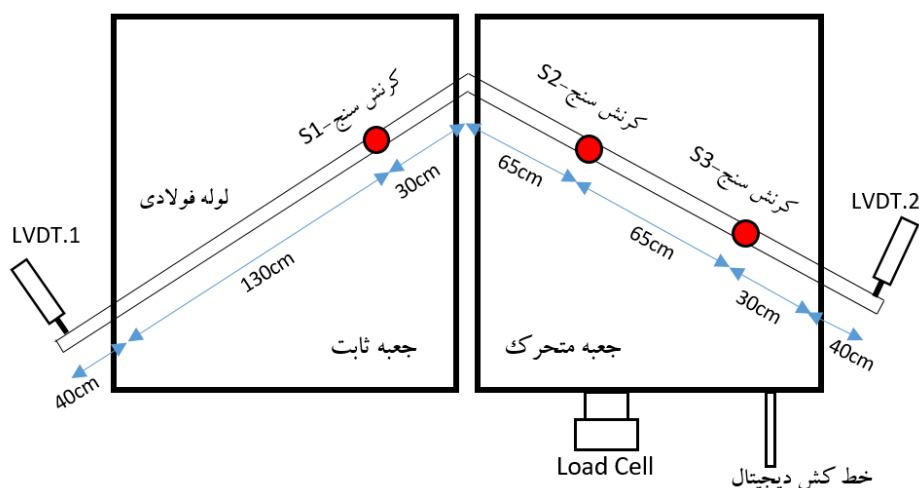
شکل ۱- مدل شماتیک دستگاه میز لرزان با دو جعبه ثابت و متحرک

در صفحات بیرونی جعبه ها و در دو سمت ورودی و خروجی لوله ها، سوراخ هایی جهت امکان قرارگیری لوله ها در مختصات های مختلف تعبیه شده است. در شکل ۲ پلان جانمایی لوله خم دار در جعبه ها نشان داده شده است.



شکل ۲: نحوه قرارگیری لوله مدفون با خم افقی درون خاک

جهت ثبت کرنش و تغییر مکان ها از سه عدد کرنش سنج و دو دستگاه LVDT با ظرفیت اندازه گیری ۱۰ سانتیمتر در دو انتهای لوله استفاده شده است. یک عدد لُدسل با ظرفیت ۵۰ تن جهت ثبت نیروی وارده و یک خط کش دیجیتال به قابلیت اندازه گیری ۳۰ سانتیمتر، جهت اندازه گیری جابجایی های جعبه متحرک، نصب گردیده اند (شکل ۳). تمامی اطلاعات فوق توسط دستگاه دیتالاگر ثبت و ذخیره میشود.



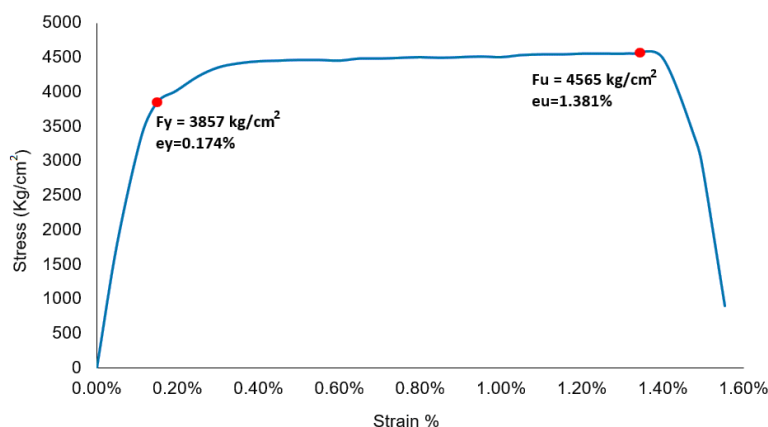
شکل ۳- نحوه قرارگیری لوله ها در جعبه های خاک و تجهیزات آزمایش

لوله های مورد آزمایش از نوع فولادی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال، جرم حجمی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون ۰/۳ می باشد. طول لوله ها متناسب با ابعاد جعبه ها، برابر ۴ متر با قطرهای و ضخامت های مشخص شده در جدول ۱، مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۴].

جدول ۱- مشخصات قطر و ضخامت لوله‌ها

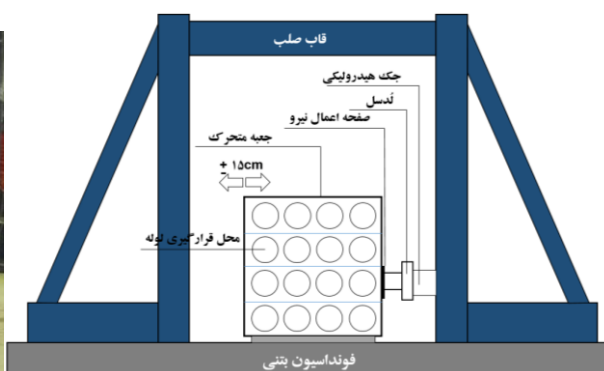
شماره لوله	قطر خارجی (میلیمتر)	ضخامت (میلیمتر)
P1	۴۸/۳	۳/۶۸
P2	۶۰/۳	۳/۹۱
P3	۱۱۴/۳	۶/۰۲

آزمایشات لازم جهت تعیین مشخصات مکانیکی فولاد مطابق با دستورالعمل ASTM-D638-14 [۱۵] انجام گردیده و نتایج مربوط به تنش و کرنش تسلیم و نهایی فولاد در شکل ۴ نمایش داده شده است.



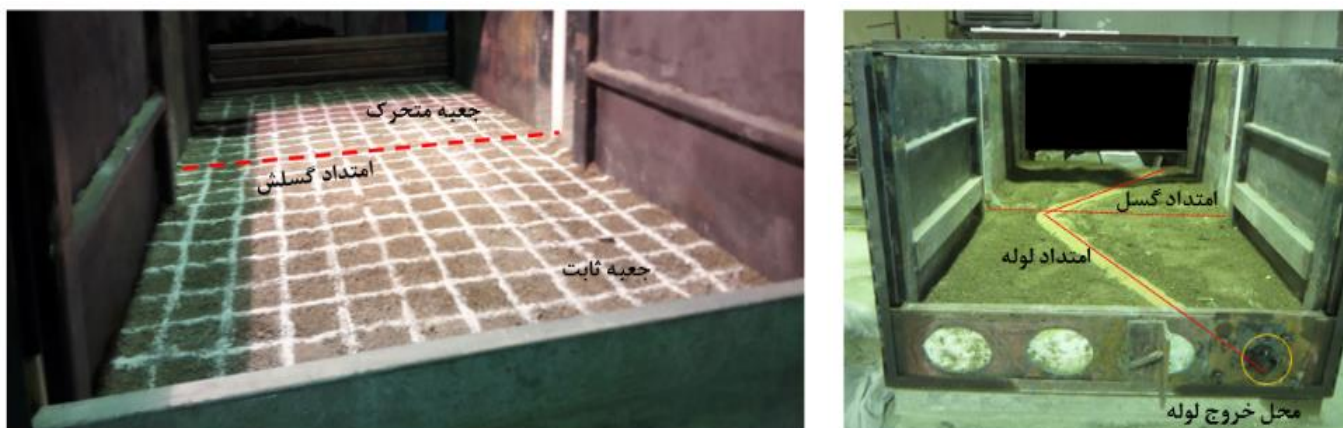
شکل ۴: نمودار تنش-کرنش لوله فولادی مورد آزمایش

همچنین از خاک ماسه‌ای ریزدانه رس دار SC، با چسبندگی ۰/۱۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، ضریب اصطکاک داخلی ۲۸ درجه و وزن مخصوص ۱۹۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، جهت ایجاد یک بستر نیمه الاستیک، استفاده شده است. پس از نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی جداره بیرونی لوله، لوله‌ها در عمق ۱ متری از سطح فوقانی جعبه فولادی دفن می‌گردند. جهت توزیع بهتر تنش‌ها و اندرکنش میان خاک و لوله، خاک در لایه‌های ۳۰ سانتیمتری تا رسیدن به درصد تراکم مناسب، با کامپکتور دستی کوبیده می‌شود. در شکل ۵، تجهیزات آزمایش و نحوه قرارگیری جعبه‌ها در قاب صلب، نمایش داده شده است.



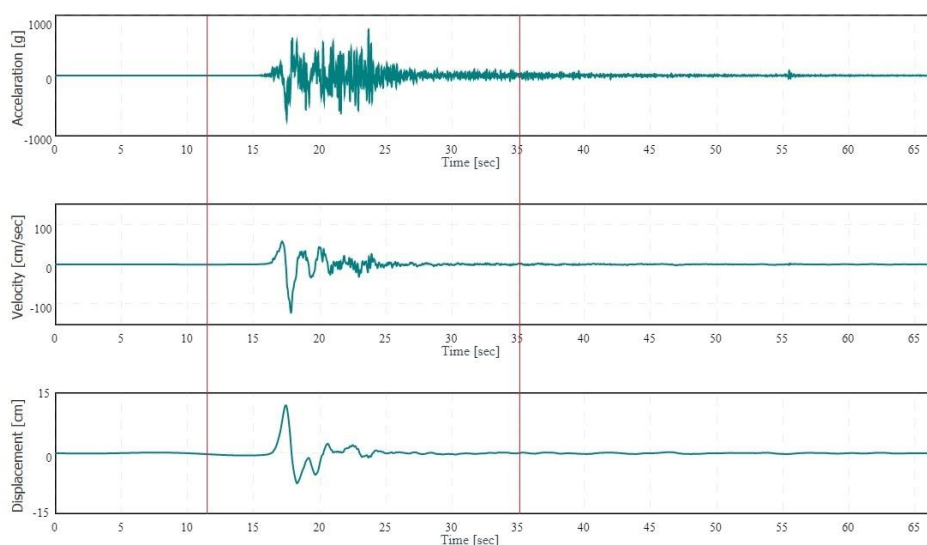
شکل ۵- مدل شماتیک تجهیزات آزمایش و نحوه قرارگیری جعبه‌ها در قاب صلب (آزمایشگاه سازه-دانشگاه شهید رجایی)

لوله‌های با زاویه خم ۱۳۷ درجه همانند شکل ۶، در داخل خاک مدفون می‌گردد. سطح رویه خاک مطابق با شکل ۶ به صورت شطرنجی با چشمه‌های مربعی ۱۰ سانتیمتری شبکه‌بندی می‌گردد تا تغییرشکل‌های رویه‌های خاک پس از اعمال بارگذاری قابل رویت و اندازه‌گیری باشد.



شکل ۶- جانمایی لوله در داخل جعبه‌ها و شبکه بندی سطح رویه خاک

پس از آماده سازی نمونه، رکورد مولفه X زلزله بم، (سال ۲۰۰۳ میلادی، شماره رکورد ۳۱۶۸/۰۲ مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی) مطابق با شکل ۷، توسط اکچواتور به جعبه متحرک اعمال و تغییرات کرنش، نیرو و جابجایی بوسیله دیتالاگر در هر لحظه ثبت می‌گردد [۱۶].



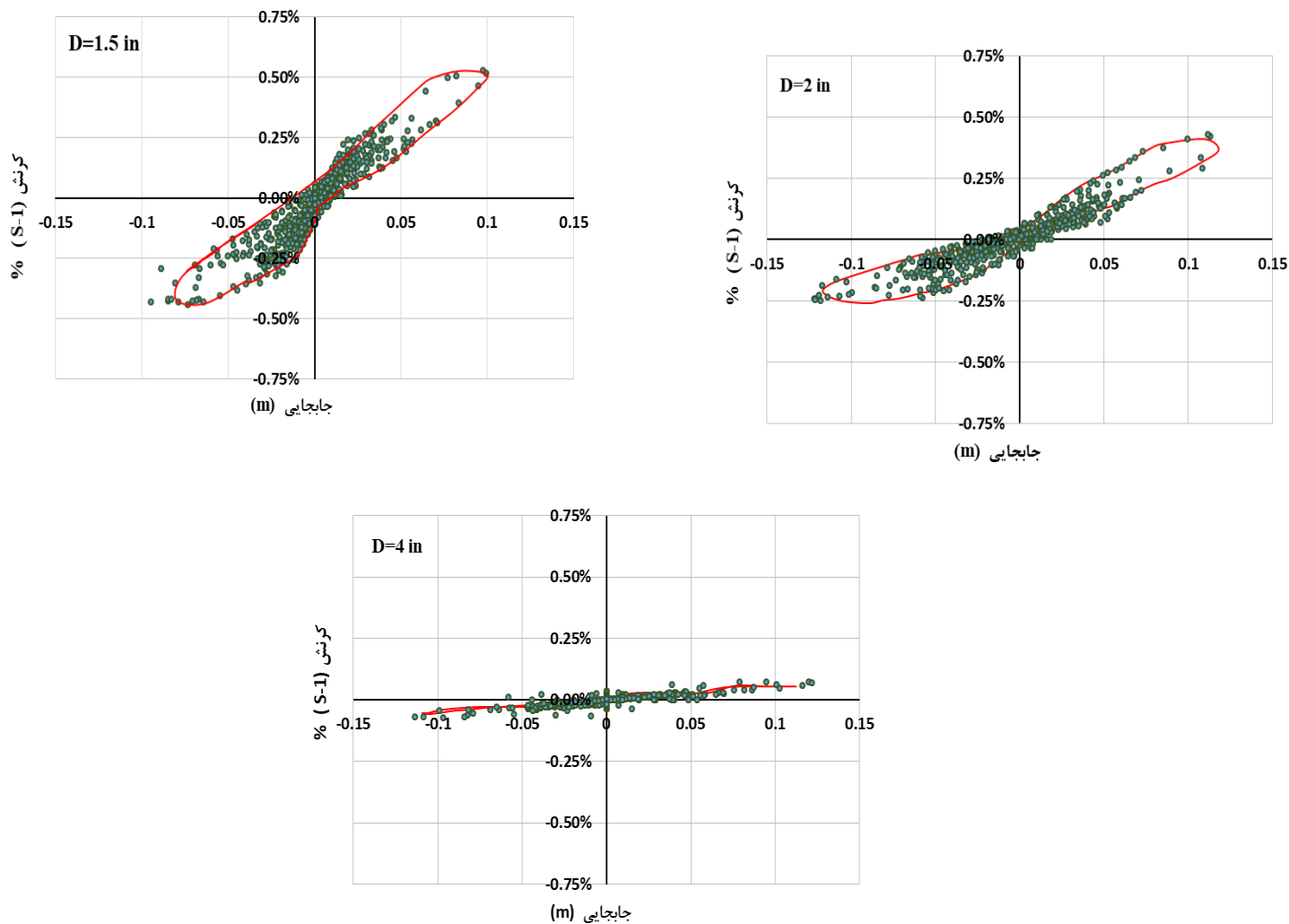
شکل ۷- رکورد جابجایی، سرعت و شتاب مولفه X زلزله بم [۱۶]

با توجه به اینکه حداکثر شتاب و جابجایی‌های در فاصله زمانی ۱۰ تا ۳۵ ثانیه رخ می‌دهد، رکورد فوق در فاصله زمانی مذکور به سیستم اعمال شده است.



## ۳- بررسی نتایج آزمایشگاهی

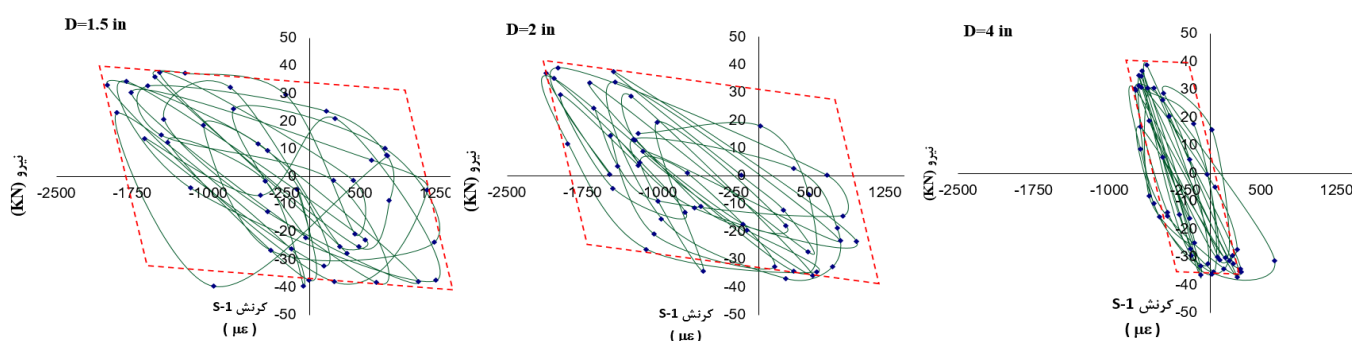
با بررسی کرنش‌ها و جابجایی‌های ثبت شده در آزمایش تحت اثر بار دینامیکی برای لوله‌ها با قطرهای ۱.۵، ۲ و ۴ اینچی مشخص می‌گردد بیشترین مقدار کرنش‌های محوری لوله در کرنش‌سنج شماره S-1 ایجاد می‌گردد، نمودار تغییرات کرنش محوری در محل کرنش-سنج مذکور نسبت به جابجایی گسل، در شکل ۸، ترسیم گردیده است.



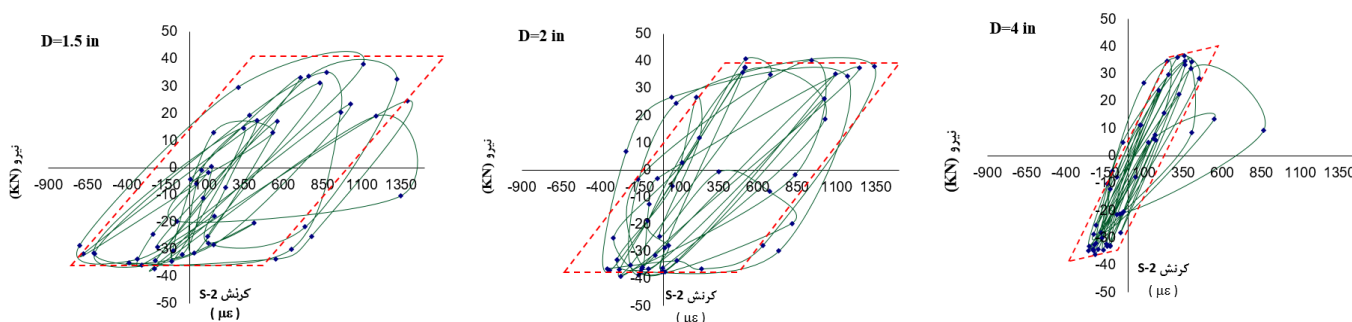
شکل ۸- نمودار کرنش محوری ثبت شده توسط کرنش سنج S-1 نسبت به جابجایی گسل به ترتیب برای لوله‌های با قطر ۴، ۲ و ۱.۵ اینچ

با توجه به نمودارهای کرنش-جابجایی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، مشخص می‌گردد، افزایش کرنش‌های محوری در لوله‌ها با قطر آنها نسبت عکس دارد. با افزایش قطر و ضخامت لوله میزان کرنش‌ها کاهش یافته به طوری که برای لوله به قطر ۴ اینچی حداکثر کرنش محوری ثبت شده برابر ۰.۰۷٪ می‌باشد. این مقدار برای لوله‌های با قطر ۲ اینچ و ۱.۵ اینچی به ترتیب به مقادیر ۰.۴۲٪ و ۰.۵۱٪ رسیده است (شکل ۸).

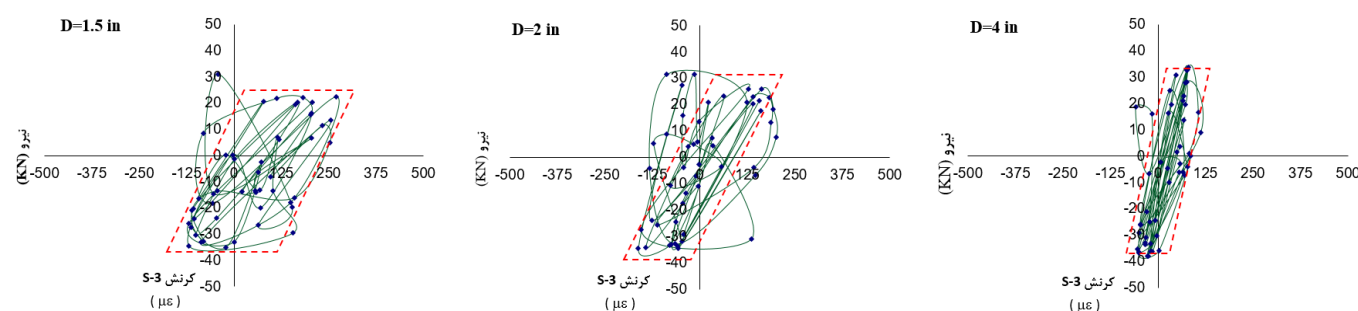
نمودارهای کرنش-نیرو نیز برای آزمایشات فوق در محل نصب کرنش‌سنج‌های S-1 و S-2 و S-3 نشان دهنده تغییرات مقدار کرنش محوری نسبت به مقدار نیروی اعمال شده توسط جک هیدرولیکی آزمایش می‌باشد. در شکل ۹ الف، ب و ج نمودار کرنش-نیرو برای کرنش‌سنج‌های S1، S2 و S3 رسم شده است.



شکل ۹-الف - نمودار کرنش-نیرو برای لوله‌های با قطر ۲.۴ و ۱.۵ اینچ، ثبت شده توسط کرنش سنج S-1



شکل ۹-ب - نمودار کرنش-نیرو برای لوله‌های با قطر ۲.۴ و ۱.۵ اینچ، ثبت شده توسط کرنش سنج S-2



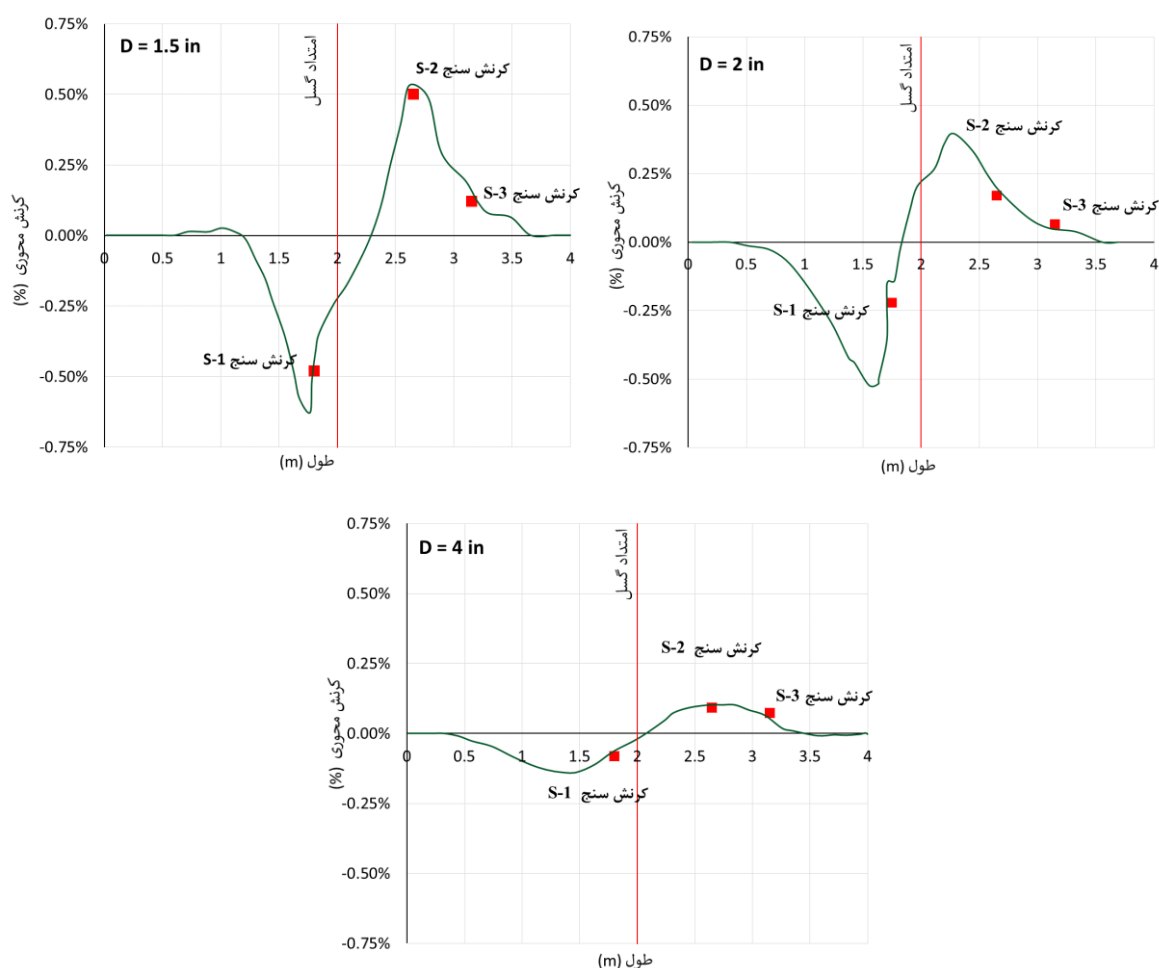
شکل ۹-ج - نمودار کرنش-نیرو برای لوله‌های با قطر ۲.۴ و ۱.۵ اینچ، ثبت شده توسط کرنش سنج S-3

تغییرات کرنش - نیرو در کرنش‌سنج‌های S-2 و S-3 با شیب مشابه و در نمودارهای مربوط به کرنش‌سنج S-1 با شیب معکوس به دست آمده است که نشانگر تغییر رفتار کششی به فشاری در نیمه انتهایی (گوه متحرک) و ابتدایی لوله (گوه ثابت) می‌باشد. مقادیر ثبت شده توسط کرنش‌سنج S-1 (گوه ثابت)، نسبت به مقادیر ثبت شده در کرنش‌سنج‌های S-2 و S-3 بیشتر می‌باشد. این امر به سبب بیشتر بودن لنگر خمشی در لوله فولادی در گوه ثابت خاک است. با مقایسه سطح داخلی نمودارهای کرنش-نیرو میتوان اظهار نمود میزان شکل-پذیری در لوله‌های با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد.

#### ۴- مدلسازی عددی

در این مقاله علاوه بر مدلسازی آزمایشگاهی جهت بررسی پاسخ‌های لوله با خم افقی (زاویه ۱۳۷ درجه)، مدلسازی نمونه‌ها مطابق با جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) انجام و نتایج تحلیلی عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه

گردیده‌اند [۱۷]. خاک به صورت Solid با استفاده از المان هشت گره‌ای با انتگرال کاهشی C3D8R و لوله فولادی نیز به صورت پوسته‌ای نازک Shell و بکارگیری المان چهار گره‌ای پوسته با انتگرال کاهش یافته S4R، مدل‌سازی شده است. مشخصات هندسه لوله‌ها، ابعاد جعبه‌ها (گوه های خاک)، مشخصات مکانیکی مصالح برای لوله های فولادی و خاک و همچنین رکورد بارگذاری، دقیقاً طبق مشخصات شرایط آزمایش در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده برای کرنش محوری برای قطرهای مختلف لوله‌ها در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



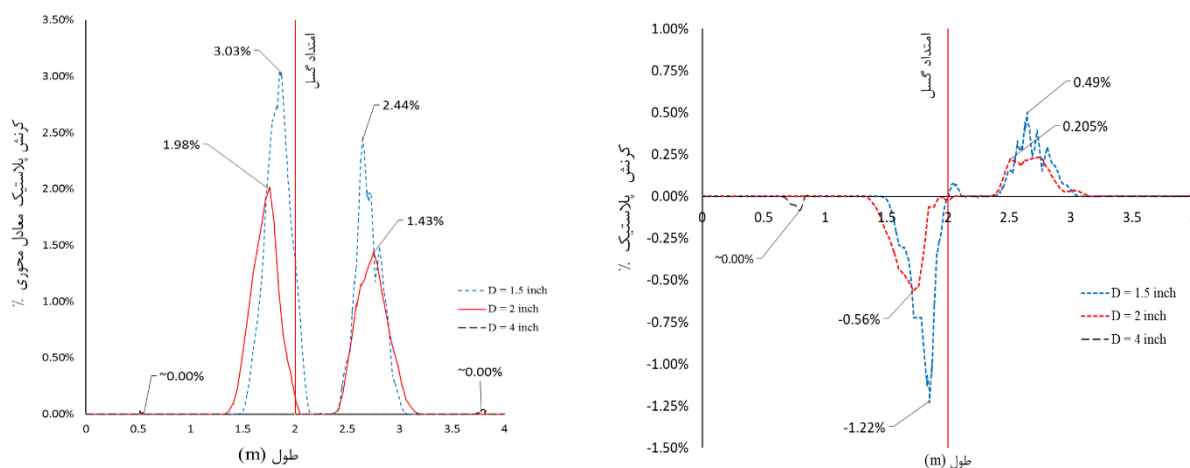
شکل ۱۰- نمودار کرنش نرمال محوری لوله در لحظه حداکثری شتاب زلزله برای لوله‌های با قطر ۱.۵، ۲ و ۴ اینچ

در نمودارهای فوق، نقاط S-1، S-2 و S-3 محل نصب کرنش‌سنج‌ها و نمودار تغییرات کرنش محوری در طول لوله در لحظه حداکثر شتاب زلزله، نشان داده شده است. در جدول ۲، نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه و میزان اختلاف آنها ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر بدست آمده از کرنش محوری لوله‌ها در دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

کرنش محوری (کرنش سنج S-3)			کرنش محوری (کرنش سنج S-2)			کرنش محوری (کرنش سنج S-1)			قطر لوله (in)			
میانگین انحراف	میزان انحراف	مدل عددی	مدل آزمایشگاهی	میزان انحراف	مدل عددی	مدل آزمایشگاهی	میزان انحراف	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی		
٪۹/۱۵	٪۱۱/۶۷	٪۰/۱۳۷	٪۰/۱۲۱	٪۶/۷	٪۲/۵	٪۰/۵۰۴	٪۰/۴۹۱	٪۱۲/۵	٪۱۰/۵	٪۰/۰۵۷	٪۰/۰۵۱	۱.۵
	٪۹/۱۸	٪۰/۰۴۶	٪۰/۰۵۱		٪۶/۳	٪۰/۱۹۱	٪۰/۱۷۹		٪۱۴/۸	٪۰/۰۲۷	٪۰/۰۲۳	۲
	٪۶	٪۰/۰۶۱	٪۰/۰۶۶		٪۱۱/۳	٪۰/۱۱۵	٪۰/۱۰۲		٪۱۲/۳	٪۰/۰۷۱	٪۰/۰۸۱	۴

در نمودارهای شکل ۱۱ به ترتیب تغییرات کرنش پلاستیک محوری و کرنش پلاستیک معادل در طول لوله در لحظه حداکثر شتاب زلزله ترسیم شده است.



شکل ۱۱- نمودار کرنش پلاستیک محوری و کرنش پلاستیک معادل لوله‌ها در لحظه حداکثری شتاب زلزله برای لوله‌های با قطر ۱.۵، ۲ و ۴ اینچ

چنانچه در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود، لوله‌های با قطر ۱/۵ اینچ، نسبت به سایر قطرها به سبب سختی کمتر، کرنش‌های بزرگتری دارند. کرنش در نزدیکی خط گسل در جعبه ثابت بیشتر می‌باشد. هرچه نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ ) لوله افزایش می‌یابد، فاصله تشکیل مفصل پلاستیک (محل ایجاد حداکثر کرنش محوری) از خط گسل در گوه ثابت، بیشتر خواهد شد. در جدول ۳، حداکثر مقادیر کرنش محوری و کرنش پلاستیک در لوله در هر دو گوه خاک با یکدیگر مقایسه و نسبت کرنش‌های محوری لوله به کرنش برشی خاک محاسبه گردیده است. با توجه به جدول ۳، نسبت کرنش لوله به کرنش برشی خاک ( $\epsilon_p/s$ ) با افزایش نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ ) در مدل‌ها کاهش یافته است.

جدول ۳- مقادیر حداکثر کرنش محوری، پلاستیک و پلاستیک معادل در هر دو گوه خاک و لوله

نسبت حداکثر کرنش محوری پلاستیک لوله به حداکثر کرنش برشی خاک در گوه ثابت $\epsilon_p/s$		حداکثر کرنش محوری پلاستیک در لوله فولادی مدفون خمدار		نسبت حداکثر کرنش نرمال محوری لوله به حداکثر کرنش برشی خاک در گوه ثابت $\epsilon_p/s$		حداکثر کرنش نرمال محوری در لوله فولادی مدفون خمدار		حداکثر کرنش برشی خاک		نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t)	قطر لوله فولادی (in)
گوه متحرک	گوه ثابت	گوه متحرک	گوه ثابت	گوه متحرک	گوه ثابت	گوه متحرک	گوه ثابت	گوه متحرک	گوه ثابت		
۰/۰۸۷۱	۰/۲۰۳	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۲۲	۰/۰۹۲۴	۰/۱۰۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۶۳	۰/۰۵۶۳	۰/۰۵۹۹	۱۲/۳۴	۱/۵
۰/۰۴۰۳	۰/۱۰۹	۰/۰۰۲۰۵	۰/۰۰۵۶	۰/۰۷۶۹	۰/۰۹۹۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۵۱	۰/۰۵۰۷	۰/۰۵۱۲	۱۴/۹۸	۲
---	---	~۰/۰۰	~۰/۰۰	۰/۰۳۶۳	۰/۰۴۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۳۰۳	۰/۰۳۱۶	۱۸/۸۸	۴

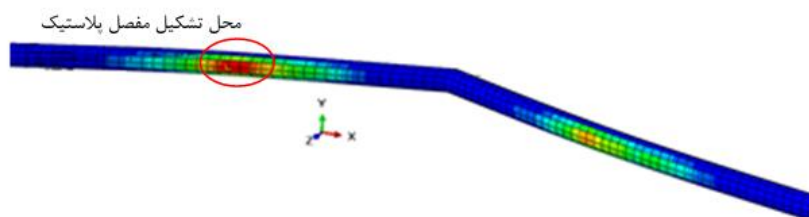
با توجه به مقادیر جدول ۳ مشاهده می‌شود نسبت کرنش محوری لوله به کرنش برشی خاک ( $\epsilon_p/s$ )، در لوله‌های با کاهش نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t)، افزایش می‌یابد. در این حالت می‌توان گفت مقاومت لوله در برابر جابجایی خاک بسیار کمتر بوده و در حقیقت لوله و خاک به صورت یک سیستم یکپارچه تحت اثر نیروهای وارده جابجا می‌شوند، بنابراین تمام جابجایی‌های خاک به لوله منتقل و آسیب‌پذیری لوله افزایش می‌یابد و بالعکس هر چه این نسبت افزایش می‌یابد، مقاومت لوله در برابر جابجایی‌های تحمیلی از سوی خاک بیشتر و نهایتاً تغییر شکل‌های لوله و کرنش‌های ایجاد شده در خاک نیز کمتر می‌شود. همچنین با افزایش قطر لوله‌ها، به سبب افزایش سطح تماس جداره لوله و خاک، مقادیر کرنش‌های برشی ایجاد شده در خاک کاهش ولی وسعت توزیع این کرنش در ناحیه میانی لوله و محل تلاقی با گسل، افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج حاصله از تحلیل عددی برای لوله‌های با قطر ۱/۵، ۲ و ۴ اینچ، مشاهده گردید که بیشترین میزان کرنش برشی خاک، در محل تماس لوله و خاک و نزدیکی گسل ایجاد می‌گردد. میزان حداکثر تنش مایسز در خاک برای لوله‌های با قطر ۱/۵ اینچ برابر ۰/۵۶ مگاپاسکال است که این مقدار تنها در یک محدوده کوچک از خاک و چند ثانیه قبل از لحظه بیشینه زلزله رخ می‌دهد. توزیع کرنش‌های برشی خاک در اطراف لوله و در نزدیکی محل گسل نیز نشان می‌دهد که حرکت لوله درون خاک می‌تواند مهم‌ترین عامل ایجاد کرنش برشی و تغییر شکل در خاک می‌باشد. مقدار تنش محوری کششی در لوله ۴۱۳۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و تنش فشاری محوری ۴۳۲۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بدست آمده است. برای لوله با قطر ۲ اینچ بیشترین میزان تنش مایسز در خاک برابر با ۰/۵۳ مگاپاسکال می‌باشد. در این مدل نیز، بیشتر از ۹۰ درصد نقاط خاک، تنشی کمتر از ۰/۲۵ مگاپاسکال دارند. کرنش‌های برشی در خاک نیز همانند مدل لوله‌های ۱/۵ اینچی، فقط در اطراف لوله و در نزدیکی محل گسل رخ داده است. با بررسی خروجی‌های مدل عددی، مقدار تنش محوری کششی در لوله ۴۰۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، تنش فشاری محوری ۴۲۱۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع حاصل گردیده است. مقدار این تنش‌ها از تنش جاری شدن لوله، بیشتر است. لذا می‌توان اظهار نمود که مکانیسم خرابی در لوله‌های با قطر ۱/۵ و ۲ اینچ، تحت اثر نیروی محوری و رخداد کمانش محوری در لوله می‌باشد. تنش برشی در لوله نیز در محدوده الاستیک قرار دارد.

در مدل مربوط به لوله با قطر ۴ اینچ، حداکثر تنش مایسز در خاک برابر با ۰/۳۲ مگاپاسکال در قسمت میانی لوله و تلاقی با گسل بدست آمده است. در این مدل نیز، بیشتر از ۹۰ درصد نقاط خاک، تنشی کمتر از ۰/۲۰ مگاپاسکال را تجربه کرده‌اند. کرنش‌های برشی نیز در خاک، تنها در اطراف لوله و در نزدیکی محل گسل رخ داده است. توسعه کرنش‌های برشی خاک در لوله ۴ اینچی بیشتر از مدل‌های ۲ و ۱/۵ اینچی است. در این لوله‌ها، بیشترین مقدار تنش، مربوط به تنش‌ها در راستای محوری لوله می‌باشد که مقدار آن در حدود ۳۶۴۰

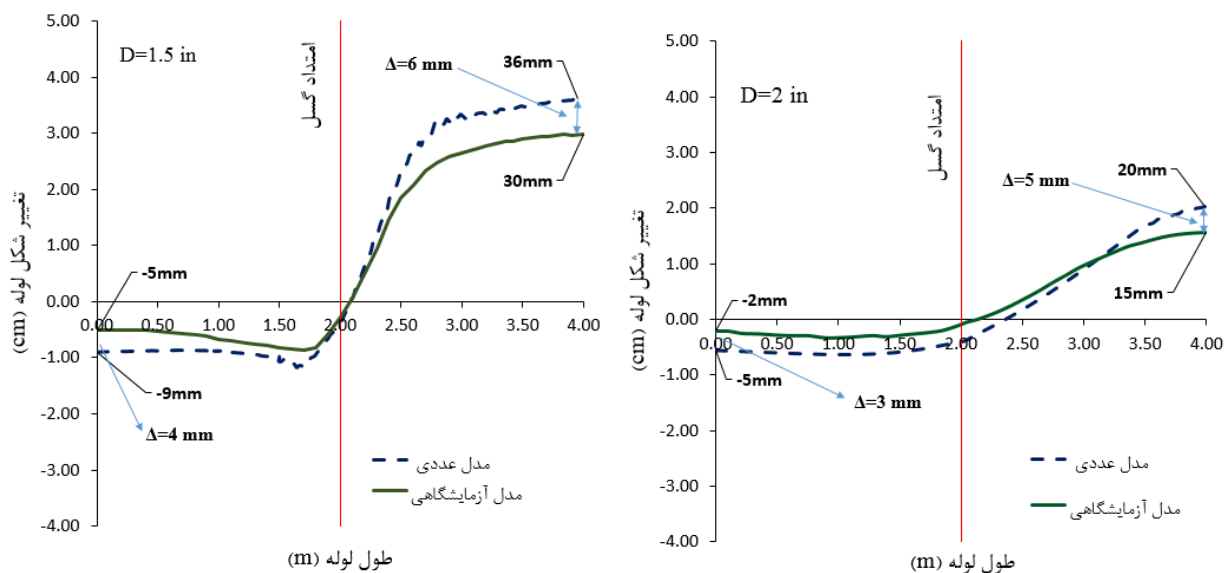
کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و به صورت فشاری است. مقدار تنش محوری کششی نیز ۳۲۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بدست آمده است. مقادیر بدست آمده از تنش جاری شدن فولاد کمتر می باشند. بنابراین رفتار لوله در ناحیه الاستیک و هیچ مکانیسم خرابی مشاهده نمیگردد.

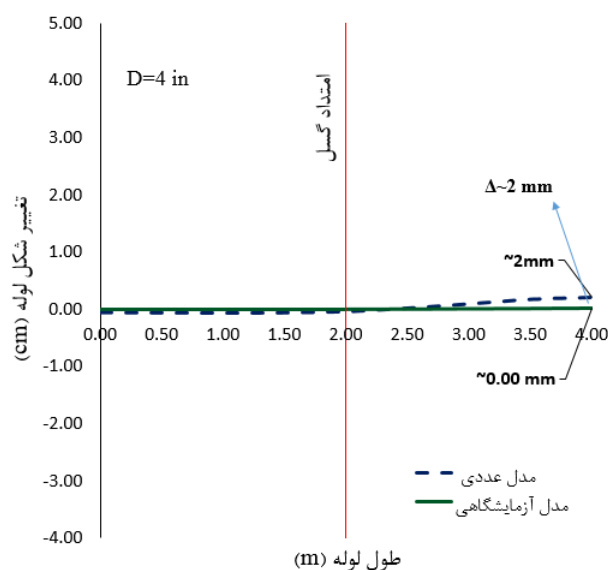
اعوجاجها و تغییرشکل های بوجود آمده در طول لوله ها تنها در آزمایش لوله با قطر ۱.۵ و ۲ اینچ مشهود می باشد. این اعوجاج در محل های نزدیک به تشکیل مفصل پلاستیک رخ داده است. محل تشکیل مفاصل پلاستیک برای لوله با قطر ۲ اینچ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ - کانتور رنگی کرنش پلاستیک معادل لوله ۲ اینچ

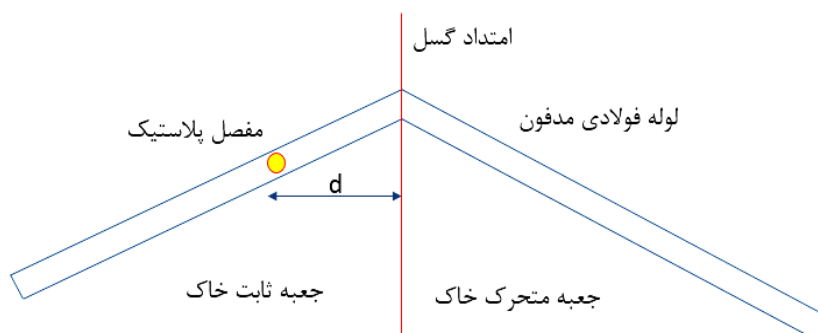
با توجه به مقادیر بدست آمده از تغییرشکل لوله ها در مدل های آزمایشگاهی و عددی، نمودار تغییرشکل لوله ها نسبت به طول در شکل ۱۳، نشان داده شده است. تغییرشکل لوله های با قطر ۱/۵ و ۲ اینچ تقریباً مشابه یکدیگر و به شکل S می باشد. در لوله های ۴ اینچ به علت رفتار الاستیک لوله، در مدل آزمایشگاهی و عددی، تغییرشکل های ماندگار تقریباً برابر صفر می باشد.





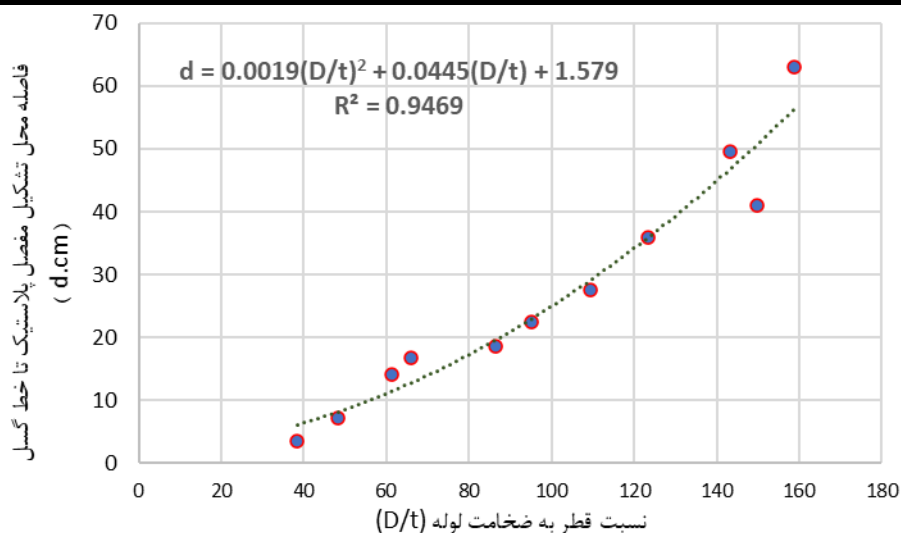
شکل ۱۳- منحنی تغییر شکل لوله‌ها در دو حالت مدل آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

فاصله تشکیل مفصل پلاستیک در لوله‌ها نسبت به خط گسلش به جهت تعیین شاخص مکانیسم خرابی لوله‌ها می‌تواند پارامتری مهم در تحلیل‌های دینامیکی انجام شده باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- فاصله محل تشکیل مفصل پلاستیک از خط گسل

برای بدست آوردن روند تغییرات فاصله تشکیل مفصل پلاستیک از خط گسل، تحلیل دینامیکی برای لوله‌ها با نسبت قطر به ضخامت مختلف ( $D/t < 160$ ) تحت اثر رکورد مولفه X زلزله بم (سال ۲۰۰۳ میلادی، شماره رکورد ۳۱۶۸/۰۲ مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی) انجام و فاصله محل تشکیل مفصل پلاستیک ( $d$ ) برای نسبت‌های مختلف ( $D/t$ ) لوله، بدست آمده است. این تغییرات در نمودار شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵ - نمودار فاصله محل تشکیل مفصل پلاستیک از خط گسل متناظر با نسبت (D/t) لوله

با توجه به نمودار شکل ۱۵ که بر اساس نتایج مدلسازی عددی بدست آمده است، تغییر فاصله مفصل پلاستیک ایجاد شده تا خط گسل (d) بر اساس نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t) به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$d = 0.0019(D/t)^2 + 0.0445(D/t) + 1.579 \quad (1)$$

رابطه فوق با تقریب بسیار خوبی ( $R^2=0.9469$ ) نسبت به نقاط نمودار، برازش شده است. همانطور که مشخص است با افزایش نسبت D/t لوله‌ها به سبب افزایش سختی لوله، محل تشکیل مفصل از صفحه گسل در گوه ثابت دور می‌شود.

## ۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار لوله خمدار مدفون در خاک با گسل امتدادلغز در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی (نرم افزار آباکوس) مورد بررسی قرار گرفته است. لوله‌های فولادی با قطرهای ۱/۵، ۲ و ۴ اینچ و خاک از نوع ماسه ای ریزدانه رس دار SC می‌باشد. جهت انجام آزمایش از یک میز لرزان تک مولفه ای جهت شبیه سازی گسل امتداد لغز استفاده و بار دینامیکی با الگوی رکورد زلزله بم به سیستم اعمال گردیده است. با توجه به خروجی‌های بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی، می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

با توجه به جدول ۲ و شکل ۸ میتوان انطباق قابل قبولی را میان نتایج بدست آمده از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی مشاهده نمود.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات و مدلسازی‌های عددی (شکل ۸، ۱۱ و ۱۳) می‌توان بیان نمود در لوله‌های مدفون با خم افقی، تقریباً در کلیه مدل‌ها حداکثر کرنش محوری و تنش محوری در لوله، در گوه ثابت و در نزدیکی محل گسل رخ می‌دهد. کرنش‌های برشی خاک نیز در اطراف لوله و در نزدیکی محل گسل پدیدار می‌گردند.

با بررسی نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، تغییر شکل در طول لوله‌ها به صورت منحنی S شکل بوده و با افزایش قطر لوله تغییر شکل نهایی آن نیز کمتر می‌شود. برای لوله با ۴ اینچ، منحنی تغییر شکل به صورت خطی بدست آمده که نشانگر رفتار الاستیک لوله می‌باشد.



با توجه به تحلیل نیروها و کرنش‌های بدست آمده از آزمایشات (شکل ۹) مشخص می‌گردد در لحظه حداکثری زلزله، قسمتی از لوله که در سمت گوه ثابت قرار دارد دچار تنش فشاری و در سوی دیگر گوه امکان حرکت دارد دچار تنش کششی می‌شود. میزان تنش ها و کرنش های محوری فشاری همواره از تنش ها و کرنش های محوری کششی بیشتر است.

مکانیسم خرابی در لوله های با قطر ۱/۵ و ۲ اینچ به سبب نیروی محوری فشاری و کمانش محوری در لوله میباشد. در لوله با قطر ۴ اینچ به سبب رفتار خطی لوله، خرابی در آن مشاهده نگردید.

با افزایش نسبت  $D/t$  در لوله ها، لولای حرکت از صفحه گسلش دور و به محل خروج لوله از گوه ثابت خاک نزدیک می‌شود. این موضوع موجب می‌گردد که لوله، خاک را در طول بیشتری جابجا کند بنابراین وسعت توزیع کرنش های برشی در اطراف لوله و دو سوی خط گسل افزایش یابد. همچنین محل تشکیل مفصل پلاستیک از محل گسل دور و به محل خروج لوله از گوه ثابت نزدیک شود.

در مدل لوله با قطر ۴ اینچ، لوله با حرکت خود به هر سمت، خاک را به سمت بالا متورم می‌نماید. وجود خم افقی در لوله، موجب می‌گردد که لوله در محل ورود و خروج به محیط خاکی، در وسط خاک قرار نگرفته و علاوه بر قسمت‌های میانی، قسمت‌های کناری خاک را نیز به سمت بالا حرکت دهد. لذا در مجموع مساحت بیشتری از سطح خاک را نسبت به لوله های مستقیم جابجا می‌نماید.

با توجه به شکل ۱۵ و رابطه ۱، هرچه نسبت قطر به ضخامت لوله ( $D/t$ ) بیشتر می‌شود، فاصله تشکیل مفصل پلاستیک و یا محل ایجاد بیشترین مقدار تنش‌ها و کرنش‌ها از سطح گسلش (در گوه ثابت)، بیشتر می‌شود.

با افزایش نسبت  $D/t$  در لوله ها، مقدار کرنش برشی در خاک و تنش های مایسز در خاک در هر دو گوه ثابت و متحرک کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول ۳، نسبت کرنش محوری لوله به کرنش برشی خاک ( $\epsilon_{p/s}$ )، در مدل‌های با نسبت  $D/t$  کمتر، افزایش می‌یابد. این موضوع بدان معناست که با کاهش نسبت  $D/t$  لوله، نرخ افزایش کرنش های برشی در خاک نسبت به میزان افزایش کرنش های محوری لوله، کمتر میباشد. همچنین میتوان بیان نمود با کاهش نسبت  $D/t$ ، مقاومت لوله در برابر جابجایی خاک کمتر شده و در حقیقت لوله و خاک به صورت یک سیستم یکپارچه تحت اثر نیروهای وارده جابجا می‌شوند، بنابراین تمام جابجایی‌های خاک به لوله منتقل و آسیب‌پذیری لوله افزایش می‌یابد و بالعکس هر چه نسبت کرنش محوری لوله به کرنش برشی خاک ( $\epsilon_{p/s}$ )، کاهش یابد، مقاومت لوله در برابر جابجایی‌های تحمیلی از سوی خاک بیشتر و نهایتاً تغییر شکل‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در خاک نیز کمتر می‌شود.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همفکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] Vazouras, P., Dakoulas, P., Karamanos, S.A.: Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72 (2015), pp.48-75, doi: [10.1016/j.soildyn.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.014).
- [2] Vazouras, P., Karamanos, S. A., Dakoulas, P.: Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacement, *Soil dynamic and earthquake engineering*, 30 (2010), pp.1361-1376, doi: [10.1016/j.soildyn.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.011).
- [3] Vazouras, P., Karamanos, S. A., Kakoulas, P.: Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41(2012), pp.164-180, doi: [10.1016/j.soildyn.2012.05.012](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012).

- [4] Shakib, H & Zia-Tohidi, R.: Response of steel buried pipelines to three-dimensional fault movement by considering material and geometrical non-linearities. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver*, pp. 1-6, 2004.
- [5] Vatani Oskouie, A., Bahman Nia, P.: Investigating the seismic behavior of gas buried pipe under active fault. *6<sup>th</sup> National Civil Engineering Conference*, Iran, Semnan, pp. 35-41. 2012.
- [6] O'Rourke, M., Liu, X.: Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, 1999.
- [7] Karamitros, D., Bouckovalas, G., Kouretzis, G.: Stress Analysis of Buried Steel Pipelines at Strike-Slip Fault Crossings. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 27 (2007), pp.200-211, doi: [10.1016/j.soildyn.2006.08.001](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.08.001).
- [8] Kennedy, P.R., Chow, W. A.: Fault movement effects on buried oil pipeline, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 103 (2007), pp. 617-633.
- [9] Rofooei, F. R., Attari, K. N & Alavi, M.: Full-Scale Experimental Testing of Buried Pipelines Subjected to Permanent Ground Displacement Caused by Reverse Faulting, *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon*, pp. 166-177, 2012.
- [10] Tarinejad, R., Mahdavi, A., Jahangir, N.: Buried Pipeline Response Analysis to Reverse-Slip Fault Displacements. *15<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon*, pp. 121-129, (2012).
- [11] Abdoun, T.H., Ha, D., O'Rourke, M.J., Symans, M.D.: Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (2009) 3, pp. 415-427, doi: [10.1016/j.soildyn.2008.04.006](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.04.006).
- [12] Xie, X., Symans, M.D., O'Rourke, M.J., Abdoun, T.H., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., Stewart, H.E.: Modeling of Buried HDPE Pipelines Subjected to Strike-Slip Faulting, *Journal of Earthquake Engineering*. 15 (2010) 8, pp.1273-1296, doi: [10.2208/jscseeee.20.1s](https://doi.org/10.2208/jscseeee.20.1s).
- [13] Yoshizaki, K., O'Rourke, T.D. and Hamada, M.: Large Scale Experiments of Buried Steel Pipelines with Elbows Subjected to Permanent Ground Deformation. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*. 20 (2003), pp.1-11, doi: [10.2208/jscseeee.20.1s](https://doi.org/10.2208/jscseeee.20.1s).
- [14] API, American Petroleum Institute, Guidelines for the design of buried steel pipe, (2001).
- [15] ASTM- D368-14 (2014). Standard test method for tensile properties of plastics, American Society for Testing and Materials, 1850 M Street, NW Suite 1030, Washington, DC 20036, USA.
- [16] The earthquake catalogues, Building and housing Research Center (BHRC), [www.bhrc.ac.ir](http://www.bhrc.ac.ir), (2012).
- [17] ABAQUS. (2011) Users' manual, version 6.7. Providence, RI, USA