



# Development Application of Wave Connection to Prevention of Local Buckling on Buried Gas Pipelines Due to Strike-slip Faulting

Seyed Mohamad Seyed Kolbadi<sup>1\*</sup>, Nemat Hassani<sup>2</sup>, Mohammad Safi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Department of Structure and Earthquake Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
And Faculty member, Department of civil engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

<sup>2,3</sup>Associate Professor, Department of Structure and Earthquake Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

Received: 03.15.2023

Revised: 06.07.2023

Accepted: 08.13.2023

### Keyword:

Buried Steel Pipe  
Wave Connection  
Strike-slip Fault  
Optimal Pipe Length  
Local Buckling

### \*Corresponding Author:

Seyed Mohamad Seyed Kolbadi

### Email:

[S\\_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir](mailto:S_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir)

## ABSTRACT

One of the most challenging gas pipeline transition industries is preserving the pipeline due to the hazard of ground motions such as fault movements. Wave connection can create a rotational deflection by its deformation capacity to limit the failure area of the pipeline. In this research, the application of wave connection in cross-gas transmission pipes with faults was developed. Wave bonding with high ductility capacity shows the behaviour of the plastic joint with the difference that without a significant increase in plastic strain, it will be able to provide axial, shear and rotational displacements. One of the influential parameters in the response of buried pipes is the length of the modelled pipe and soil. This length depends on relative soil-pipe stiffness. In the present research, the length of the optimized model was considered to be more than 3 times the length of the model recommended in previous studies. The results showed that this change in length will change the tube response by approximately 20%. In addition, four-node shell elements and eight-node solid elements were intended for pipes and soil, respectively. One of the greatest damages to the pipe is local buckling. The results showed that the use of wave connection will result in the complete elimination of this damage and also an 80% reduction in strain values.



---

**EXTENDED ABSTRACT**


---

### Introduction

One of the greatest challenges in the gas pipeline transition industry is preserving pipelines due to the hazard of ground motions such as fault movements. Wave connection can create a rotational deflection by its deformation capacity to limit failure area of pipeline. In the present research, the application of wave connection in cross-gas transmission pipes with faults was developed. Wave bonding with high ductility capacity shows the behaviour of the plastic joint with the difference that without a significant increase in plastic strain, it will be able to provide axial, shear and rotational displacements. One of the influential parameters in the response of buried pipes is the length of the modelled pipe and soil. This length depends on relative soil-pipe stiffness. In this study, the length of the optimized model was considered to be more than 3 times the length of the model recommended in previous studies.

### Methodology

The government equation on buckling of a part of the pipe was obtained through the following equation in which the axial external force or temperature increase compressive thermal strains was taken into account.

$$EIy'''' + Py'' + W = 0 \quad (1)$$

According to equation (1),  $W$ ,  $P$ ,  $EI$  and  $y$  equal weight in length, compression force, elastic stiffness and deformation, respectively. The mechanical properties of the soil were considered as elastic-perfect plastic behaviour with the Mohr-Columb model including cohesion  $C = 50kpa$ , internal friction coefficient  $\phi = 0^\circ$ , elastic modulus  $E=25Mpa$  and Poisson's ratio  $\nu_s = 0.3$ . In addition, pipe diameter and thickness of  $D=0.914m$  and  $t=8mm$  were chosen for a common buried gas transmission pipe.

### Results and discussion

The optimal length of the numerical model is the length of the model so that the relative displacement at the end of the model tends toward zero. At a distance of more than 100 meters from the centre of the fault, the relative displacement of the pipe and soil was almost negligible. Therefore, the length of 200 meters can be considered as the optimal length of pipe and soil modelling. To better compare the performance of straight pipe and pipe with wave connections, the values of the plastic strain in two critical tensile and compressive regions were compared. Figure (1) shows the values of plastic strain in the compressive and tensile critical regions, which were compared in two straight pipes and pipes with wave joints and in the fault displacement ( $d$ ) with lengths of 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 and 120 cm were extracted.

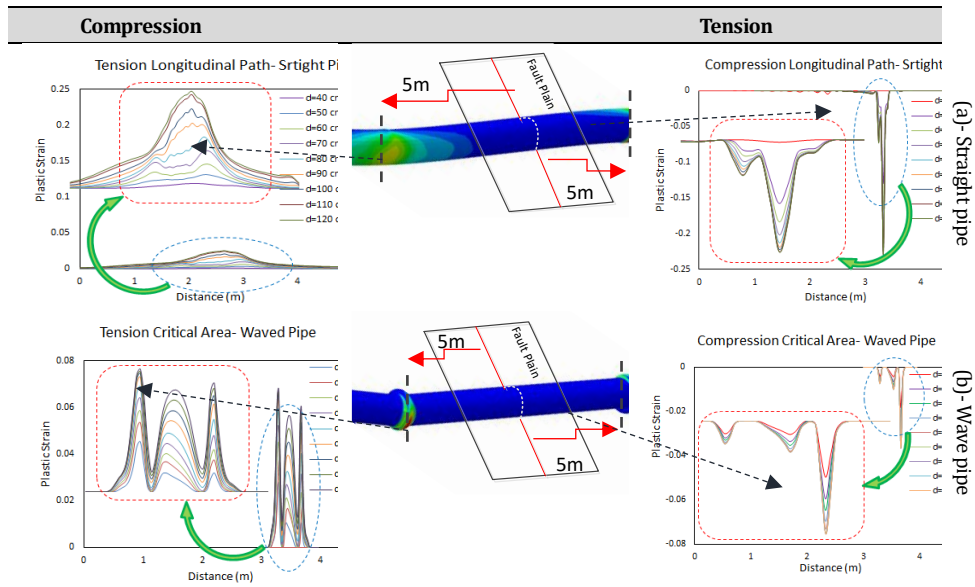
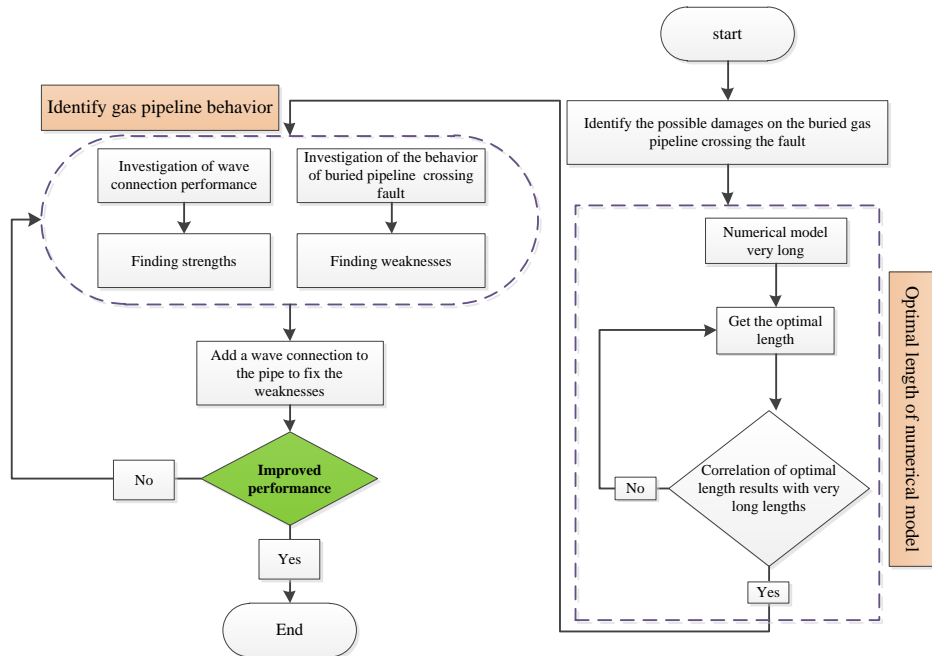


Figure 1. Comparison of plastic strain results in the critical region.

According to the results of Figure (1), it can be concluded that in addition to removing the buckling phenomenon, the wave connection could reduce the amount of plastic strain significantly and bring a smaller area of the pipe into the plastic phase.

The steps to achieve the results of this article are shown in the flowchart of Figure (2). First, it was necessary to obtain the optimal length of the tube to achieve the correct results. Then, the behaviour of the straight pipe was investigated and its weak points (buckling areas) were obtained. Finally, by placing corrugated connections in these areas, the improvement of pipe performance were evaluated.



**Figure 2. Step-by-step flowchart of the process to achieve improved performance of cross-fault buried gas pipelines with wave connection.**

## Conclusion

In the present study, the behaviour of buried pipelines in crossing a strike-slip fault with an intersection angle of 90 degrees was investigated. The results showed the extraordinary performance of the corrugated connection in removing the pipe buckling area, reducing the strain values, limiting the critical area under the influence of faulting, and not interrupting the service of the gas pipe after permanent deformation of the ground.

In addition, the wave joint was capable of absorbing energy and creating a plastic joint, reducing the significant 5 m length of pipe that entered the plastic zone under the influence of fault movement to about 80 cm. In this case, the cross section of the pipe remained completely healthy and round.

The reduction of the maximum values of plastic strain in the corrugated tube without buckling reached 80%, meaning that the wave joint can hold the pipe after the fault moves. The maximum values of plastic strain in the pipe with wave joint occurred after 2 m of fault displacement, while the straight pipe approached its final values due to buckling with a small fault displacement (about 40 cm).

## گسترش کاربرد اتصالات موجی برای جلوگیری از کماتش‌های موضعی لوله‌های مدفون گاز متقاطع با گسل‌های امتداد لغز

سیدمحمد سیدکلبادی<sup>۱\*</sup>، نعمت حسنی<sup>۲</sup>، محمد صافی<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
و عضو هیات علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.  
۲ و ۳- دانشیار، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت خطوط توزیع لوله‌های مدفون گاز، محافظت آنها در برابر حرکات زمین همچون جابجایی گسل می‌باشد. اتصالات موجی می‌توانند با تغییر شکل‌های دورانی، ناحیه آسیب دیده را محدود نمایند. در این مقاله گسترش کاربرد اتصالات موجی در لوله‌های گازی مدفون متقاطع با گسل با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اتصالات موجی می‌تواند بدون افزایش شدید مقادیر کرنش پلاستیک در ناحیه بحرانی، منجر به تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از نیروهای برشی، خمشی و محوری گردد. در مدل‌سازی‌های عددی، یکی از کمیت‌های تاثیرگذار بر پاسخ لوله، طول اندرکنشی لوله و خاک است. این طول وابسته به سختی نسبی لوله و خاک دارد به طوری که طول کم موجب نتایج دور از واقعیت و طول زیاد موجب افزایش هزینه مدل‌سازی خواهد شد. در این مقاله طول بهینه مدل‌سازی ۳ برابر طول پیشنهاد شده در مطالعات گذشته به دست آمده است که منجر به تغییرات پاسخ لوله به میزان ۲۰ درصد می‌شود. همچنین استفاده از اتصالات موجی علاوه بر کاهش ناحیه بحرانی ناشی از پدیده کماتش، مقادیر کرنش را حدود ۸۰ درصد کاهش می‌دهند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

### کلید واژگان:

لوله‌های مدفون فولادی  
اتصالات موجی  
گسل امتداد لغز  
طول بهینه مدل‌سازی لوله و خاک  
کوماتش موضعی لوله

\* نویسنده مسئول: سیدمحمد سیدکلبادی

پست الکترونیکی:

[S\\_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir](mailto:S_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir)

## مقدمه

شرکت‌های انرژی با چالش‌های ناشی از مسائل زیست محیطی، اجتماعی و قانونی مواجه هستند. کاهش اثرات منفی بر محیط زیست و جامعه با حفظ توسعه پایدار، بر شکل‌گیری استراتژی‌های توسعه جدید و معرفی فناوری‌های نوین تأثیر می‌گذارد [۱].

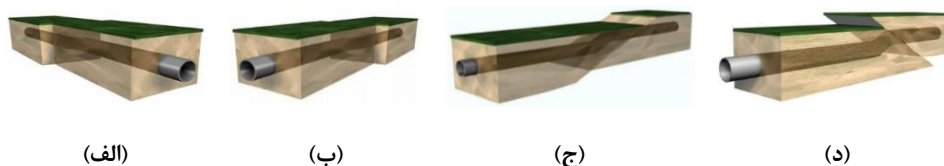
توسعه حیات جوامع بشری مستلزم ارائه خدمات در گستره وسیع جغرافیایی است. دسترسی انسان به انرژی یکی از ضروریات توسعه است. بنابراین وجود حامل‌های انرژی مانند خطوط لوله نفت و گاز ضروری خواهد بود.

خطوط لوله سوخت فولادی مدفون در فواصل طولانی گسترش می‌یابند، بنابراین عبور از گسل‌های تکتونیکی ممکن است اجتناب‌ناپذیر باشد. فاصله از گسل یکی از عوامل اصلی آسیب به خطوط لوله در اثر حرکات لرزه‌ای محسوب می‌شود [۲]. با توجه به اهمیت خطوط لوله، تلاش‌های مستمری برای ارائه راه‌حلی برای محافظت از خطوط لوله در برابر پیامدهای حرکت گسل‌ها در حال انجام است. اقدامات مربوط بر کاهش خطر کمانش موضعی دیواره لوله و شکستگی‌های کششی جوش‌های محیطی، که دو حالت اصلی شکست در چنین مواردی هستند، تمرکز دارد.

با توجه به ملاحظات فنی در طراحی، ایمنی و بهره‌برداری، لوله‌های انتقال گاز از فولاد با اتصالات جوشی ساخته می‌شوند. از آنجایی که چنین لوله‌هایی به صورت مدفون در خاک اجرا می‌شوند، خطرات قابل توجه آنها به دلیل حرکات ثابت خاک اطراف، مانند هرگونه ناپایداری شیب‌های خاکی و جابه‌جایی گسل‌ها است. لوله‌های مدفون از جمله سازه‌های بلندی هستند که می‌توانند از چندین گسل در مسیر خود عبور کنند.

در سال ۲۰۲۱ مجموعه آزمایش‌های توسعه‌یافته‌ای با استخراج روابط مقیاس شده و کمیت‌های بدون بعد برای پاسخ‌های حاکم بر لوله‌های متقاطع با گسل توسط دیمیرسی<sup>۱</sup> و همکاران انجام شد. نتایج نشان داد که کرنش طولی لوله تحت حرکت گسل امتداد لغز بسیار وابسته به شش کمیت است: (الف) جابه‌جایی گسل نرمال (به‌وسیله  $\delta/D$  ارائه شده است). به‌طوری که  $\delta$  جابه‌جایی گسل و  $D$  قطر لوله در موقعیت زون گسلش است؛ (ب) نسبت قطر لوله به ضخامت دیواره ( $D/t$ )؛ (ج) زاویه برخورد لوله با گسل ( $\beta$ )؛ (د) سختی نسبی خاک و لوله ( $4kD/EI$ )؛ (ه) نسبت عمق دفن به قطر لوله ( $H/D$ ) و (و) شرایط انتهایی لوله [۳].

اقدامات مختلفی توسط صنعت برای کاهش اصطکاک لوله و خاک انجام می‌شود، از جمله افزایش ضخامت دیواره لوله، ارتقای عیار فولاد و محصور کردن لوله با ژئوتکستایل<sup>۲</sup> [۴]. دفن خط لوله در خاک نرم، انتخاب زاویه مناسب محور لوله با صفحه گسل، تعریف خم‌ها (مثلاً زانویی) در فاصله‌ای از زون گسلش برای افزایش انعطاف‌پذیری و غیره. مطابق شکل (۱)، گسل‌ها را می‌توان به چهار نوع با توجه به نوع حرکت آنها تقسیم‌بندی کرد. هر نوع حرکات گسل می‌تواند تأثیر متفاوتی بر سازه‌هایی که از آن عبور می‌کند، داشته باشد.



شکل ۱. حالات مختلف حرکتی گسل متقاطع با لوله؛ (الف) حرکت گسل امتداد لغز به سمت چپ، (ب) حرکت گسل امتداد لغز به سمت راست، (ج) حرکت گسل نرمال و (د) حرکت گسل معکوس [۵].

<sup>1</sup> Demirci

<sup>2</sup> Geotextile

موارد (الف) و (ب) شکل (۱) جایی که نوع غسل امتداد لغز است، ناشی از جابه‌جایی عرضی، لوله در طول خود خمیده می‌شود. در این حالت کمانش موضعی در ناحیه فشاری لوله در فاصله‌ای از صفحه‌ی غسل که بیشترین انحنا را دارد، اتفاق می‌افتد. بسته به زاویه برخورد لوله با غسل، الگوی خرابی کمانشی می‌تواند به الگوی کششی تبدیل شود [۶]. الگوی پیچشی نیز توسط ها<sup>۱</sup> تحقیق شد [۷].

برطبق شکل (۱)، الگوهای آسیب دیدگی بر روی لوله‌های مدفون متأثر از نوع حرکت زمین است. بدترین نوع آسیب ناشی از جابه‌جایی زمین، کمانش و چروکیدگی است که در این خصوص مطالعات زیادی صورت گرفته است. در غسل‌های معکوس، دو ناحیه خمیدگی ناشی از بارگذاری خاک به‌وجود می‌آید. این شرایط بارگذاری به دلیل تفاوت بین برآمدگی نهایی و مقاومت خاک برابر ایجاد می‌شود. در بیشتر موارد، کرنش‌های خمشی بزرگ‌تر در خط لوله در سمت دیواره پای غسل معکوس ایجاد می‌شوند [۸]. تاکنون مطالعات زیادی در مورد پاسخ لوله‌های مدفون متقاطع با غسل انجام شده است، اما مطالعات کمی برای ارائه راه حل عملی برای ایمن نگه داشتن لوله‌های مدفون انجام شده است. استفاده از اتصال موج می‌تواند راه حل خوبی برای حل این مشکلات باشد [۹].

آنچه این مقاله به دنبال انجام آن است، ارائه راه حلی برای از بین بردن آسیب‌های وارده به لوله‌های مدفون ناشی از حرکت غسل است. نتایج این مطالعه می‌تواند راه حل خوبی برای جابه‌جایی‌های دائمی زمین مانند زمین لغزش نیز باشد. با این حال، آنچه مهم است این است که راه حل پیشنهادی باید عملی، بدون پیچیدگی و مقرون به صرفه باشد تا بتواند کارفرمایان صنعت نفت و گاز را به خود جذب کند. اتصال موجی می‌تواند بدون افزایش قابل توجه تنش و کرنش دیواره لوله و حذف پدیده کمانش موضعی، ظرفیت شکل‌پذیری بسیار بالایی در جهات محوری، برشی و دورانی ایجاد کند، مسیری کاملاً جدید و کاربردی و همچنین مفید برای صنعت نفت و گاز که ایده آن برای اولین بار توسط وام<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ ارائه شد [۱۰]. اما این ایده تنها برای تغییر شکل‌های بزرگ محوری در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفت. در مقاله حاضر، کاربرد این اتصال در لوله‌های مدفون که متقاطع با غسل هستند، توسعه داده شده است. اتصالات موجی می‌تواند از جنس خود لوله تأمین و با جوشکاری به لوله فلزی متصل شود. بنابراین هزینه اتصال و اجرای آن بسیار راحت و سریع خواهد بود.

برای تعیین تأثیر اتصال موج بر پاسخ لوله مدفون، توجه به کمیت‌هایی مانند خواص مکانیکی و هندسی خاک و لوله، الگوی حرکت غسل و موقعیت اتصال نسبت به غسل مهم است. از آنجایی که این مقاله به ارائه توسعه کاربرد اتصال موجی و نقش آن در ایمن نگه داشتن لوله از طریق کاهش مقادیر کرنش و حذف کمانش موضعی می‌پردازد، بررسی جامع آن می‌تواند در اولویت‌های پژوهشی بعدی انجام شود. برای این که در مقاله حاضر به وضوح بر نقش اتصال موجی در بهبود عملکرد لوله‌های مدفون متمرکز شود، تنها یک نوع لوله صنعتی معمولی، یک نوع خاک و یک نوع حرکت غسل بررسی شده است. همچنین کرنش پلاستیک به عنوان مهمترین پارامتری که در نتایج بررسی می‌شود، انتخاب شده است.

مهم‌ترین پارامتر حاکم بر رفتار خطوط لوله متقاطع با غسل، سختی نسبی خاک-لوله است [۸]. برطبق مطالعات وزوراس<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱]، طول مدل در نظر گرفته شده ۶۵ برابر قطر لوله پیشنهاد شده است. اما در این مطالعه، پاسخ لوله تفاوت قابل توجهی با نتایج مدل پیشنهادی وزوراس دارد. نتایج صحیح مبتنی بر واقعیت با مدل‌سازی با طول بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود. از طرفی مدل‌سازی با طول بسیار زیاد هزینه‌های تحلیل را افزایش می‌دهد. در این شرایط بهترین راه، انتخاب طول بهینه است به طوری که هم صحت نتایج خدشه‌دار نشود و هم زمان تحلیل به حداقل برسد. طول بهینه مدل‌سازی در بخش ۳-۳ به وضوح مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>1</sup> Ha

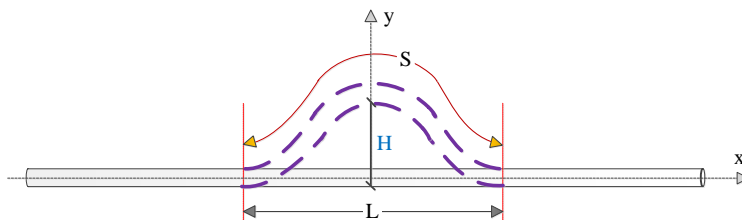
<sup>2</sup> Wham

<sup>3</sup> Vazouras

## مواد و روش‌ها

## نظریهٔ کمانش ناگهانی لوله‌های مدفون

ساده‌ترین مدل برای مطالعهٔ کمانش ناگهانی لوله‌ها، خواباندن آروی بستر صلب است (شکل ۲). در این حالت، هیچ نیرویی از طرف خاک به لوله وارد نمی‌شود. این شرایط برای اولین بار توسط کرول<sup>۱</sup> [۱۲] برای کمانش‌های عمودی حرارتی برای خطوط راه آهن تحقیق شد. این موضوع مجدداً توسط کر<sup>۲</sup> [۱۳] مورد آزمایش قرار گرفت. اخیراً هابز<sup>۳</sup> [۱۴]، و کیریکیدز<sup>۴</sup> [۱۵] روابطی را برای مدل ساده‌ای از کمانش لوله ارائه دادند.



شکل ۲. کمانش لوله بر روی بستر صلب.

در اینجا  $S$  طول خم شده لوله،  $H$  ارتفاع دامنهٔ بلند شدگی در راستای محور  $y$  است. معادلهٔ حاکم بر کمانش قسمتی از لوله توسط معادلهٔ زیر به دست آمده است. به طوری که نیروی خارجی محوری یا افزایش دما که موجب کرنش‌های حرارتی فشاری می‌گردد، در نظر گرفته شده است [۱۵].

$$EIy'''' + Py'' + W = 0 \quad (1)$$

$W$  وزن در واحد طول،  $P$  نیروی فشاری،  $EI$  سختی الاستیک و  $y$  جابجایی معادله است. معادلهٔ تغییر شکل لوله،  $y(x)$  با شرایط مرزی انتهای بسته در هر دو انتها به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۵].

$$y = \left( \frac{WEI}{P^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{v^2 L^2}{8} \right) - \left( \frac{v^2 x^2}{2} \right) - \frac{\cos(vx)}{\cos(vL/2)} \right] \quad (2)$$

در اینجا  $v$  عدد موج مستخرج از معادله زیر است [۱۵].

$$v^2 = P/EI \quad (3)$$

<sup>1</sup> Croll

<sup>2</sup> Kerr

<sup>3</sup> Hobbs

<sup>4</sup> Kyriakides

## اتصالات انعطاف‌پذیر

یکی از راه‌های کاهش خسارت به لوله‌ها ناشی از پدیده گسلش، رفتار انعطاف‌پذیر در طول لوله است. مطالعه حاضر مبتنی بر ایده ارائه شده توسط بکی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۲ است [۱۶]. هدف از این ایده ارائه شده توسط محققان، متمرکز کردن کرنش منتشر شده لوله در مناطق محدود است [۱۷].

ملیسیانوس<sup>۲</sup> [۱۸] از یک مدل عددی شبیه‌سازی شده برای مطالعه رفتار لوله‌ها در تقاطع با گسل استفاده کرد. علاوه بر مطالعه رفتار لوله با اتصالات انعطاف‌پذیر در مواجهه با گسل‌های نرمال، انواع زوایای عبور لوله از گسل نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مدل تجربی عبور لوله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹]. این مدل تجربی در مورد مقایسه رفتار لوله‌های با اتصالات انعطاف‌پذیر در مواجهه با جابه‌جایی‌های عرضی است که نتیجه آن با لوله پیوسته بدون اتصالات انعطاف‌پذیر مقایسه شد. این مطالعه نشان می‌دهد که لوله با اتصال انعطاف‌پذیر می‌تواند تغییر شکل را جذب کرده و کرنش محوری را کاهش دهد و از آسیب دیدگی لوله جلوگیری کند.

وام و همکاران در سال ۲۰۱۷ پیشنهاد اتصالات شکل‌پذیر لوله را با در نظر گرفتن سطح موجی شکل بر روی دیواره لوله با مطالعه آزمایشگاهی تغییر داد [۱۰]. بنابراین، طی یک مطالعه آزمایشگاهی، مکانیسم تغییر شکل محوری بزرگ در لوله را بررسی کرد. در این مطالعه لوله بدون فشار داخلی با اتصال موجی ناشی از جابه‌جایی محوری مورد بررسی قرار گرفت. این نوع اتصال به دلیل وجود تنها یک ناحیه موجی، علاوه بر ایجاد شکل پذیری لوله، می‌تواند از پدیده بیضی شدن لوله در فشارهای بالا جلوگیری کرده و همچنین طول قسمت ناهموار را برای تجمع آلاینده‌های گاز کاهش دهد. در این تحقیق ظرفیت شکل‌پذیری محوری لوله با استفاده از اتصال موجی بررسی شده است.

سیدکلبادی [۲۰] در سال ۲۰۲۱، از این ایده برای بررسی کاهش آسیب‌پذیری لوله‌های متقاطع با گسل و تأثیر آن بر روی کمانش موضعی لوله‌های مدفون گاز استفاده کرد. این مطالعه با هدف شناخت اولیه بر روی تغییر شکل لوله و کمانش موضعی نواحی بحرانی متمرکز بود تا جایی که مقادیر کمی حرکت گسل صرفاً در سه حالت در نظر گرفته شد. نتایج مقاله فوق نشان دهنده کاهش مقادیر کرنش پلاستیک با حذف کمانش موضعی در نواحی نزدیک به گسل بود. یکی از مهم‌ترین اهداف اصلی مقاله حاضر بررسی جامع‌تر عددی عملکرد اتصال موجی انعطاف‌پذیر در پدیده تقاطع خط لوله با گسل است. نتایج مورد انتظار علاوه بر دامنه‌های حرکتی بیشتر باید به نتایج واقع‌بینانه نزدیک‌تر باشد. یکی از ارکان اصلی مدل‌سازی عددی تقاطع لوله با گسل در نظر گرفتن طول سیستم لوله-خاک است که در این زمینه در بخش ۳-۳ بررسی مبسوطی به عمل آمده است. در مقاله حاضر نتایج مدل عددی مبتنی بر این واقعیت باز استخراج شدند<sup>۳</sup>. مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی که در بخش ۳ ذکر شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، نواحی بحرانی لوله مستقیم به دلیل کمانش موضعی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس از اتصالات موجی در مناطق بحرانی استفاده شد و در نهایت مقادیر کرنش پلاستیک هر دو مدل عددی با هم مقایسه شدند. اتصالات انعطاف‌پذیر در لوله‌ها به دلیل ظرفیت تغییر شکل خود می‌توانند آسیب‌های برشی، فشاری و کششی را تا حد زیادی از بین ببرند.

<sup>1</sup> Bekki

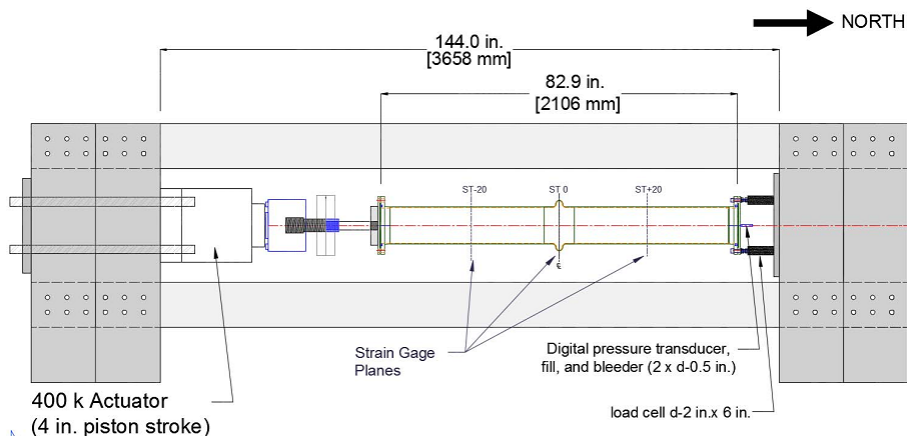
<sup>2</sup> Melissianos

<sup>3</sup> Re-extraction

## تحلیل عددی

## صحت سنجی

در سال ۲۰۱۷ وام و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد محوری اتصالات موجی ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ انجام دادند. شکل (۳) نمای پلان آزمایش فشار بر روی لوله را نشان می‌دهد. یک جک هیدرولیک و لودسل<sup>۱</sup> در انتهای جنوبی لوله جهت اعمال بار و اندازه‌گیری فشار نصب شدند. چهار لودسل در انتهای شمالی لوله برای اندازه‌گیری نیروهای دیگر تعبیه شدند [۱۰]. در این مطالعه تجربی، با اعمال یک جابه‌جایی محوری زیاد توسط جک بر روی لوله فولادی با قطر ۲۰ سانتی متر، مدول الاستیسیته ۲۱۷ گیگا پاسکال و تنش تسلیم ۳۰۹ مگاپاسکال، داده‌های کرنش توسط کرنش سنج و جابه‌جایی ثبت شد.

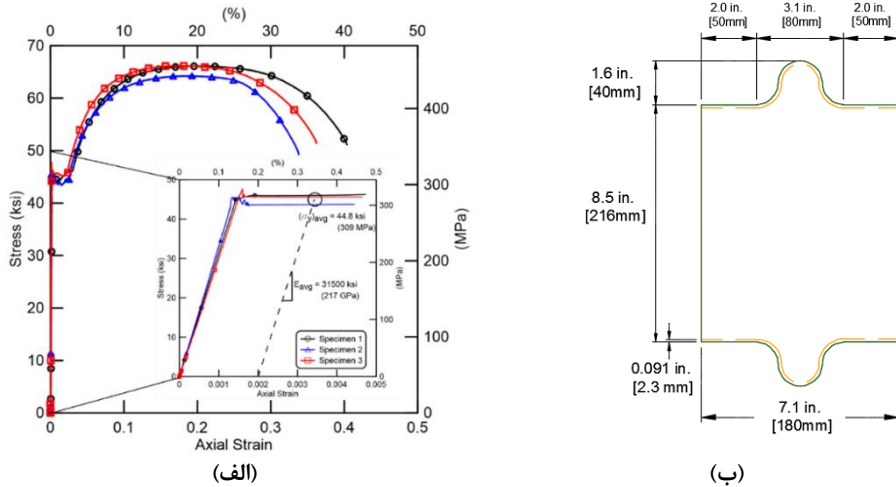


شکل ۳. نمای دو بعدی آزمایش فشار محوری بر لوله با اتصال موجی [۴].

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، در مجموع ۲۰ کرنش سنج در قسمت بیرونی نمونه در سه صفحه، با نام‌های ST-۲۰، ST ۰، ST+۲۰ و ST+۲۰ نصب شده است. در هر صفحه، گیج‌ها در موقعیت ساعت ۱۲، ۳، ۶ و ۹ قرار داشتند. گیج‌ها دو راستای محوری و محیطی در ST ۰ و ST+۲۰ جهت دهی شدند و گیج‌های محوری در ST-۲۰ قرار گرفتند [۴].

در مطالعه ذکر شده، نتایج نیرو-جابه‌جایی، کرنش‌های محوری و محیطی به دست آمد. همچنین اثر جابه‌جایی محوری لوله بر تغییر شکل سطح موج دار لوله نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

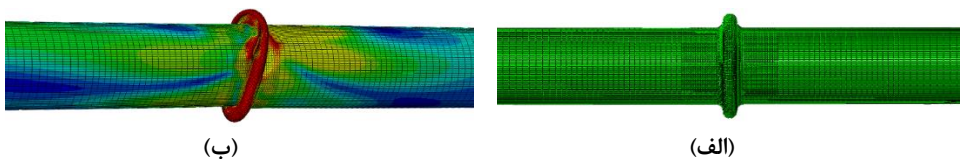
<sup>1</sup> Load cell



شکل ۴. مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال مورد آزمایش قرار گرفته، (الف) منحنی تنش-کرنش برای نمونه کششی و (ب) نمای ۲ بعدی سطح مقطع طولی اتصال موجی [۱۰].

مطالعه آزمایشگاهی مذکور مبنایی برای اعتبارسنجی مدل شبیه سازی عددی در مقاله حاضر است. در این مدل عددی با توجه به اتصال موجی و شرایط مرزی محصور انتهای لوله و همچنین با در نظر گرفتن المان پوسته‌ای برای لوله، جابه‌جایی ۱۶ سانتی متری در جهت محوری روی لوله اعمال شد. خواص هندسی و مکانیکی در شکل (۴) نشان داده شده است.

مدل اجزای محدود نیز بر اساس ویژگی‌های مکانیکی و هندسی مدل آزمایشگاهی که قبلاً ذکر شد شبیه‌سازی شده است. شرایط تکیه‌گاه لوله در انتهای شمالی به صورت متقارن<sup>۱</sup> و در انتهای جنوبی تحت فشار جک قرار می‌گیرد. همچنین از ۲۱۳۱۸ المان پوسته<sup>۲</sup> ۴ گرهی برای مدل‌سازی استفاده شده است. سطح مقطع لوله به ۳۲ قسمت تقسیم شده است. بنابراین، هر اندازه از تقسیم بندی محیطی لوله ۹ سانتی متر است. همچنین، در مجاورت صفحه گسل، اندازه مش در جهت طولی حدود ۲ سانتی متر کوچک‌تر شده است تا نتایج و تغییر شکل‌های دقیق‌تر به دست آید (شکل ۵).



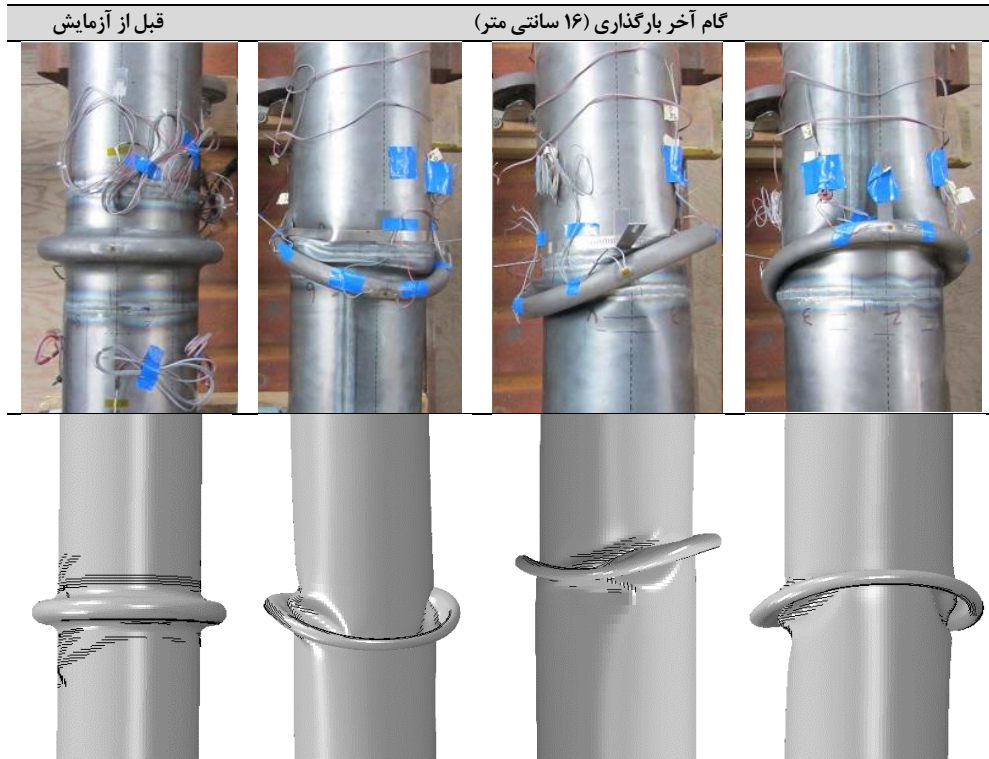
شکل ۵. مدل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس ورژن ۶.۱۹، (الف) قبل از انجام آزمایش و (ب) بعد از انجام آزمایش.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، لوله در ناحیه موجی فشرده و مجاله می‌شود. علت این پدیده فرو رفتن لبه سمت چپ لوله به سمت راست آن است. از آنجایی که در حین عملیات اتصال موج به لوله، محوری لوله در

<sup>1</sup> Symmetric

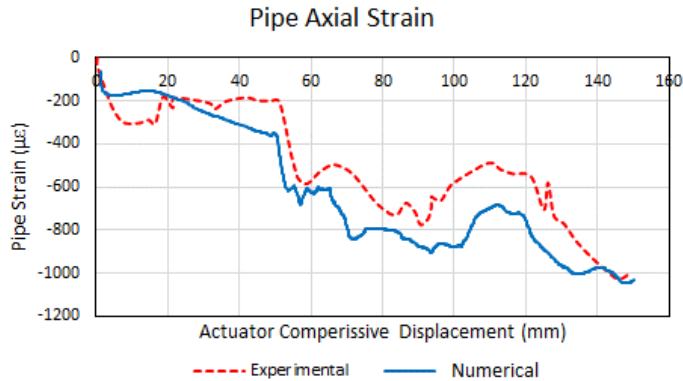
<sup>2</sup> Actuator

سمت چپ و راست اتصال موج کاملاً منطبق برهم نیستند، بنابراین چروکیدگی ایجاد شده در اتصال موج به صورت نامتقارن ایجاد می‌شود. برای صحت سنجی کیفی مدل عددی با یک مدل آزمایشگاهی، نتایج تغییر شکل آنها در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶. مقایسه تغییر شکل لوله آزمایشگاهی (۱۰) با نمونه مدل عددی (مقاله حاضر).

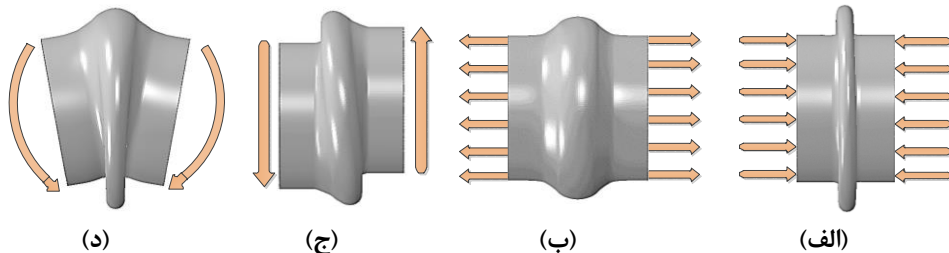
به نظر می‌رسد مدل عددی از نظر تغییر شکل ظاهری با الگوی تغییر شکل مدل آزمایشگاهی تطابق زیادی دارد. برای مقایسه کمی نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل‌های عددی، مقدار کرنش محوری در صفحات گیب جنوبی (ST-۲۰) که در شکل (۳) نشان داده شده است با هم مقایسه شدند (شکل ۷).



شکل ۷. مقایسه مقادیر کرنش-جابجایی محوری مدل آزمایشگاهی با مدل عددی.

### ارزیابی اتصال موجی بر روی عملکرد لوله

در این مقاله، کاربرد این اتصال موجی انعطاف‌پذیر در بهبود عملکرد لوله‌های مدفون متقاطع با گسل مورد بحث قرار گرفته است (شکل ۸). در این راستا با تحلیل یک لوله مستقیم<sup>۱</sup> متأثر از پدیده گسلس، نقاط ضعف آن شناسایی می‌شود. برای بهبود عملکرد لوله از اتصال موجی در آن مناطق استفاده شده است. سپس با ارائه نمودارهای کرنش پلاستیک-جابجایی محوری، دو لوله مستقیم و لوله موج دار با یکدیگر مقایسه شدند.

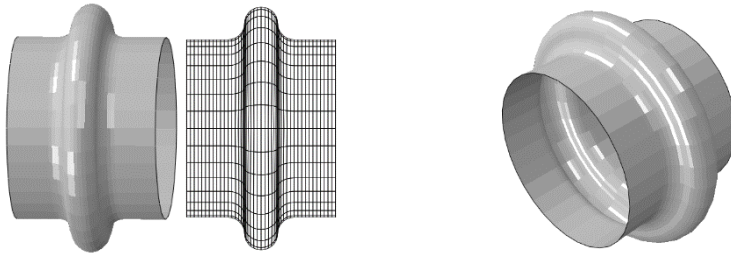


شکل ۸. ظرفیت شکل‌پذیری اتصال موجی، (الف) دورانی، (ب) برشی، (ج) کشش محوری و (د) فشار محوری.

برای شبیه‌سازی مدل تقاطع لوله با گسل امتداد لغز از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی لوله، به دلیل نازک بودن دیواره لوله، از المان پوسته‌ای ۴ گره کاهش یافته یکپارچه<sup>۲</sup> (نوع S4R)، در مجموع ۲۴ المان محیطی و ۱۸۰۰۰ المان برای کل لوله (شکل ۹) در نظر گرفته شده است.

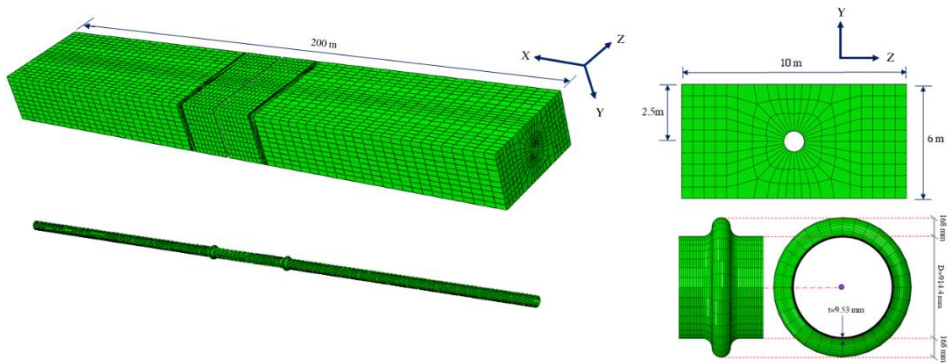
<sup>1</sup> Straight pipe

<sup>2</sup> Reduced 4-node integral shell element



شکل ۹. موج ایجاد شده در مدل عددی.

همچنین برای مدل‌سازی خاک از عنصر حجیم<sup>۱</sup> هشت گرهی، انتگرال کاهش‌یافته (C<sup>2</sup>DAR) در مجموع از ۵۴۰۸ عنصر استفاده شده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. مشخصات هندسی مدل عددی لوله مدفون گاز با اتصال موجی.

برای مصالح فولادی از مدل کرنش‌های بزرگ پلاستیک<sup>۲</sup> با سخت شوندگی همگن<sup>۳</sup> استفاده شده است. لوله‌های فولادی در خاک نرم رسی در شرایط زهکشی نشده مدفون شده است [۱۱]. برطبق پیشنهاد وزوراس و همکاران، مشخصات مکانیکی خاک به صورت رفتار الاستیک-پلاستیک<sup>۴</sup> کامل با مدل رفتاری موهر-کلمب<sup>۵</sup> شامل چسبندگی  $C = 50 \text{ kpa}$ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک  $\varphi = 0^\circ$ ، مدول الاستیسیته  $E = 25 \text{ Mpa}$ ، و ضریب پواسون  $\nu_s = 0.3$  در نظر گرفته شده است [۱۱]. در این مقاله زاویه اتساع<sup>۶</sup> خاک صفر در نظر گرفته شد. اندرکنش بین سطح خارجی لوله و خاک پیرامونی آن بر اساس الگوریتم تماس<sup>۷</sup> با اجازه جدانشدگی لوله و خاک شبیه سازی و ضریب زاویه اصطکاک<sup>۸</sup>  $\mu = 0.5$  در نظر گرفته شده است [۱۱]. مدل اصطکاک کولمب، رفتار اصطکاک بین سطوح تماس را با

<sup>1</sup> Solid

<sup>2</sup> Large-strain plasticity

<sup>3</sup> Isotropic hardening

<sup>4</sup> Elastic-perfectly plastic

<sup>5</sup> Mohr-Columb

<sup>6</sup> Dilation angle

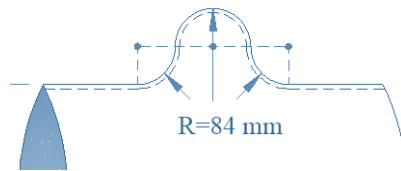
<sup>7</sup> Contact algorithm

<sup>8</sup> Friction coefficient

استفاده از یک ضریب اصطکاک  $\mu$  مشخص می‌کند. در ابتدا ضریب اصطکاک پیش فرض برابر صفر می‌باشد و لذا جابه‌جایی مماسی صفر خواهد بود تا زمانی که کشش سطحی از یک مقدار بحرانی برای تنش برشی، تجاوز کند، که بستگی به فشار تماس عمودی دارد و مطابق معادله (۴) زیر تعیین می‌گردد [۲۱]:

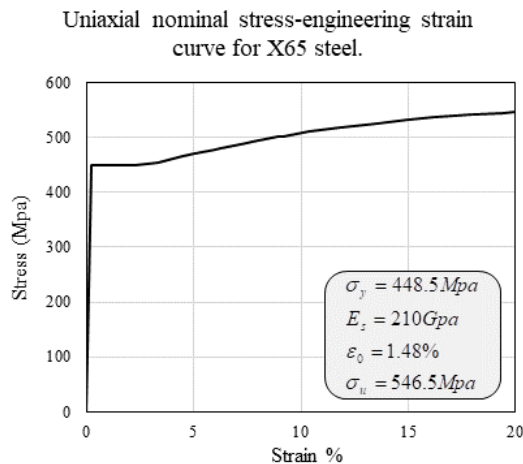
$$\tau_{crit} = \mu \rho \quad (4)$$

که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک و  $\rho$  فشار تماس بین دو سطح می‌باشد. این معادله مقدار حدی تنش برشی را برای سطوح تماس شرکت کننده در برخورد مشخص می‌کند. سطوح تماس، لغزشی بر روی هم نخواهند داشت تا زمانی که تنش برشی در بین آنها برابر تنش برشی اصطکاکی حدی شود. بدین ترتیب، سطح خارجی لوله و سطح داخلی خاک پیرامونی لوله به عنوان ۲ سطح در تماس با یکدیگر انتخاب شدند. بر اساس الگوریتم تماس استفاده شده در مقاله حاضر، جسم سخت‌تر به عنوان سطح اولیه قابلیت نفوذ در سطح ثانویه به عنوان جسم نرم‌تر را خواهد داشت. همچنین قطر لوله  $D=0.914m$  و ضخامت لوله  $t=8mm$  برای یک لوله متداول انتقال گاز مدفون انتخاب شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. مشخصات هندسی موج به کار رفته در مدل عددی.

نمودار تنش- کرنش مصالح فولادی لوله انتقال گاز بر اساس شکل (۱۲) متناسب با استاندارد API 5L [۲۲] و رده X65 از خطوط لوله در نظر گرفته شد [۲۳].



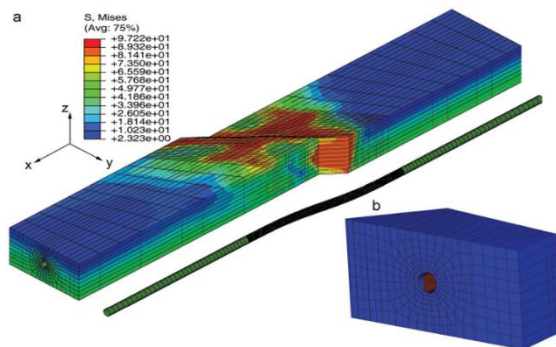
شکل ۱۲. مشخصات مکانیکی لوله بر اساس API 5L X65 استفاده شده در مدل عددی [۲۲].

بر طبق شکل (۱۲)،  $\sigma_y$ ،  $E_s$  و  $\epsilon_0$  و  $\sigma_{II}$  به ترتیب تنش جاری شدگی، مدول الاستیسیته، کرنش متناظر با تنش نهایی و تنش متناظر با کرنش نهایی برای لوله  $\Delta L$  API X۶۵ می‌باشد.

### اعتبار سنجی مدل عددی لوله-خاک

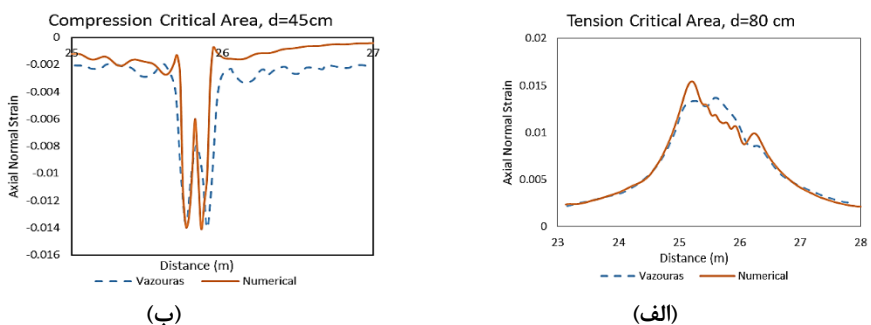
در بخش ۱-۳، مدل عددی لوله و پاسخ ناشی از تغییر شکل اتصال موجی آن با مدل آزمایشگاهی مقاله آقای وام [۱۰] صحت سنجی<sup>۱</sup> شد. در این بخش رفتار مدل عددی لوله-خاک با مقاله به چاپ رسیده در مجله علمی معتبری<sup>۲</sup> توسط آقای وزوراس [۱۱] اعتبار سنجی می‌شود.

در ابتدا مدل عددی مبتنی بر مشخصات هندسی و مکانیکی مقاله آقای وزوراس شبیه‌سازی شد که اطلاعات آن در بخش ۲-۳ آورده شده است. بعد از اعتبار سنجی<sup>۳</sup> نتایج مدل عددی با نتایج مقاله فوق، اتصال موجی به آن اضافه شده و تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۳. مدل عددی مقاله آقای وزوراس (زاویه برخورد ۹۰ درجه لوله با صفحه گسل مورد اعتبارسنجی قرار گرفت) [۱۱].

نتایج کرنش محوری-جابجایی در ناحیه کمانشی با نتایج ارائه شده در مقاله آقای وزوراس مقایسه شدند.



شکل ۱۴. مقایسه نتایج کرنش محوری-جابجایی دو مدل عددی مقاله حاضر با مدل عددی ارائه شده توسط وزوراس در ناحیه کمانشی؛ (الف) وجه کششی، (ب) وجه فشاری.

<sup>1</sup> Verification

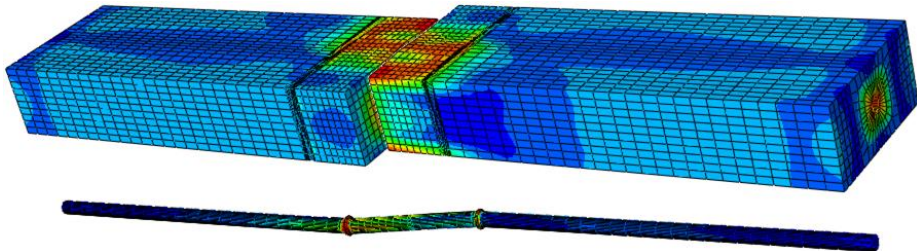
<sup>2</sup> Soil Dynamics and Earthquake Engineering

<sup>3</sup> Validation

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر کرنش محوری با نتایج ارائه شده مقاله آقای وزوراس در دو وجه کششی و فشاری ناحیه بحرانی (محل کماتش موضعی)، تطابق مناسبی دارند. لذا می‌توان به اعتبار نتایج مدل عددی مقاله حاضر استناد نمود.

### به‌دست آوردن طول بهینه مدل لوله-خاک

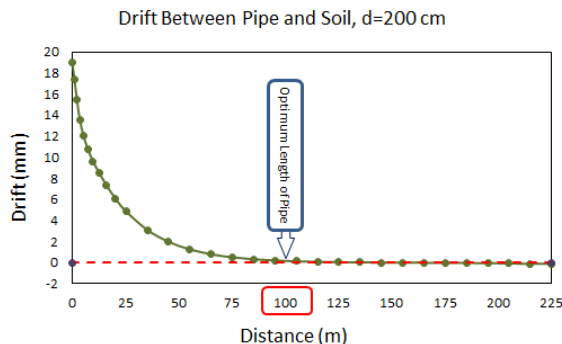
در این مقاله، مشخصات هندسی و مکانیکی مدل‌های عددی بر اساس مقاله‌ای است که در سال ۲۰۱۲ توسط وزوراس و همکاران منتشر شد [۱۱]. در مقاله مذکور که به صورت تحلیل پارامتریک بر روی عوامل مهم مؤثر بر پاسخ لوله متقاطع با گسل با جابه‌جایی تا حدود ۲ متر انجام شده است، سعی شده تا درک جامعی از رفتار لوله‌های مستقیم ناشی از پدیده گسلس ارائه شود. با توجه به این مفهوم که افزایش طول مدل‌سازی باعث افزایش هزینه محاسباتی و کاهش سرعت تحلیل می‌شود و از طرفی کاهش طول مدل‌سازی به دلیل شرایط مرزی باعث کاهش دقت نتایج می‌شود، بنابراین سیستم لوله-خاک نیاز به مدل‌سازی با طول بهینه دارد. طول بهینه مدل عددی با در نظر گرفتن جابه‌جایی نسبی بین لوله و خاک به دست می‌آید. به دلیل وجود اصطکاک بین لوله و خاک، با دور شدن از صفحه گسل، انتظار می‌رود جابه‌جایی نسبی بین لوله و خاک کاهش یابد تا جایی که این جابه‌جایی تقریباً به صفر می‌رسد. طول بهینه مدل عددی، طول مدلی است که جابه‌جایی نسبی در انتهای مدل به صفر میل کند. در این حالت، شرایط مرزی دو سر لوله بر پاسخ لوله تأثیری ندارند. در این راستا مدلی از خاک و لوله با اتصال موجی به طول خیلی زیاد ۵۰۰ متر در معرض جابه‌جایی جانبی ۲ متری حرکت گسل قرار گرفت (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. کانتور تنش وون میسز<sup>۱</sup> مدل عددی برای لوله با اتصال موجی متقاطع با گسل.

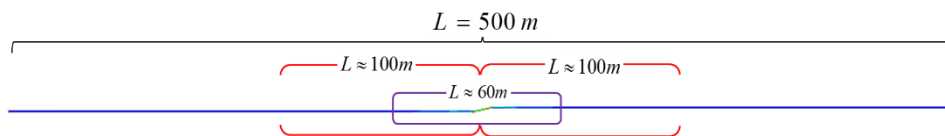
شکل (۱۵) تغییر شکل سیستم لوله-خاک و کانتور تنش وون میسز را پس از اعمال جابه‌جایی گسل نشان می‌دهد. طول مناسب لوله برای مدل‌سازی تحلیل عددی بسته به سختی نسبی خاک-لوله متفاوت است [۲۴]. بنابراین، در نظر گرفتن طول لوله یکسان برای هر شرایطی صحیح نیست. این سؤال وجود دارد که چقدر طول برای مدل‌سازی سیستم لوله خاک مناسب است؟ طولی از لوله برای مدل‌سازی مناسب است که در انتهای لوله جابه‌جایی محوری نسبی لوله و خاک در هر دو طرف انتهایی به صفر میل کند. در این حالت افزایش طول بیش از حد مذکور تأثیری در نتایج نخواهد داشت. بنابراین، بهترین طول مدل عددی که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، طول بهینه مدل خواهد بود.

<sup>۱</sup> Von Mises stress

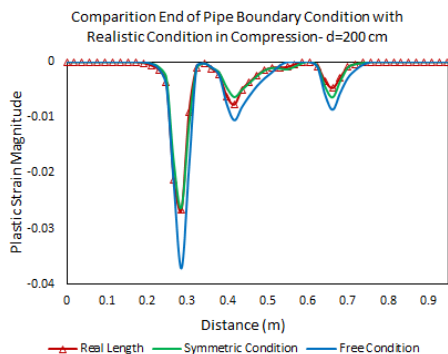


شکل ۱۶. طول بهینه خاک و لوله مدل سازی شده بر اساس جابه جایی نسبی لوله و خاک.

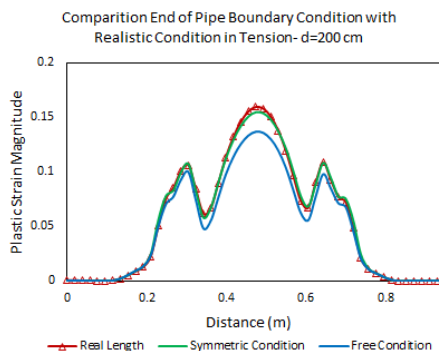
با توجه به شکل (۱۶)، مشاهده می شود در فاصله بیش از ۱۰۰ متر از مرکز گسل، جابه جایی نسبی لوله و خاک تقریباً ناچیز است. بنابراین، طول ۲۰۰ متر را می توان طول بهینه مدل سازی لوله و خاک در نظر گرفت. در حالی که در سال ۲۰۱۲ وزوراس و همکاران [۱۱] حداقل طول پیشنهادی ۶۵ برابر قطر لوله را دادند. این مقدار در این مقاله حاضر معادل ۶۰ متر است که با در نظر گرفتن شرایط تکیه گاهی آزاد برای دو سر لوله بسیار کمتر از طول بهینه می باشد. ادامه اثر حرکت گسل امتداد لغز (با جابه جایی های ۲ متری بر مقادیر کرنش پلاستیک دیوار لوله در دو مدل با طول بهینه معادل ۲۰۰ متر و طول پیشنهادی وزوراس و همکاران معادل ۶۰ متر، بررسی و نتایج آن دو با مدلی با طول بسیار طولانی معادل ۵۰۰ متر مقایسه شد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. نمای مقایسه ای مدل عددی با پیشنهاد وزوراس (۶۰ متر) و طول بهینه بهینه (۲۰۰ متر) با طول بسیار زیاد (۵۰۰ متر).



(ب)



(الف)

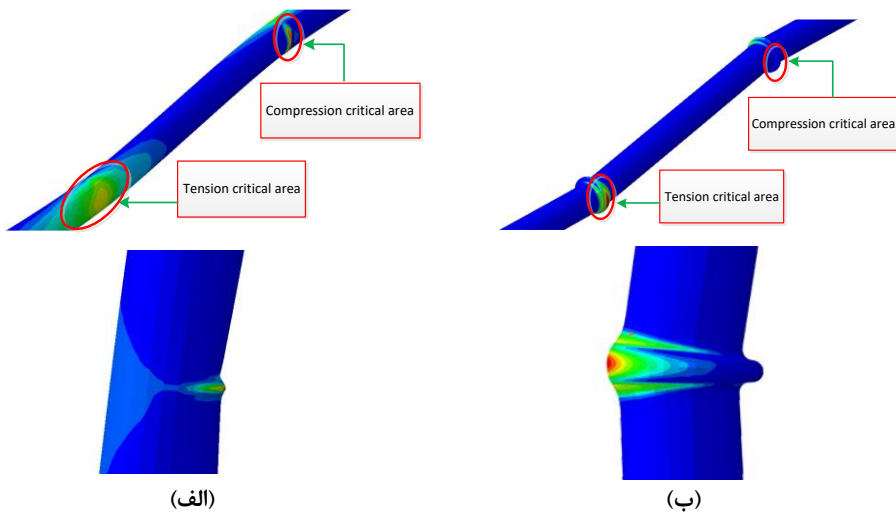
شکل ۱۸. مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک اتصال موجی برای طول های ۶۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ متری: (الف) در ناحیه کششی، (ب) در ناحیه فشاری.

در شکل (۱۸) حداکثر مقادیر کرنش پلاستیکی که در طرف‌های کششی و فشاری لوله وجود دارد، رسم شده است. محور افقی محل کرنش پلاستیک و محور قائم مقادیر کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد. برای نمایش این مقادیر طول ۹۰ سانتی‌متری از این اتصال در نظر گرفته شده است که برای بهتر نشان دادن مقادیر حداکثر کرنش، نمودار باید در وسط شکل‌ها قرار گیرد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، با مقایسه نمودارهای شکل ۱۸، تفاوت معنا دار پاسخ‌ها بین مدل پیشنهادی وزوراس با مقادیر واقع‌بینانه در حدود ۲۰ درصد وجود دارد. در صورتی که نتایج مدل با طول بهینه کاملاً منطبق با طول طولانی لوله است.

### عملکرد اتصال موجی

برای ارزیابی تأثیر اتصال موجی، ناحیه بحرانی از لوله مستقیم (بدون اتصال) متقاطع با گسل تعیین شد. بنابراین اتصال موجی نیز در همین ناحیه برای مقایسه عملکرد لوله نصب شد.



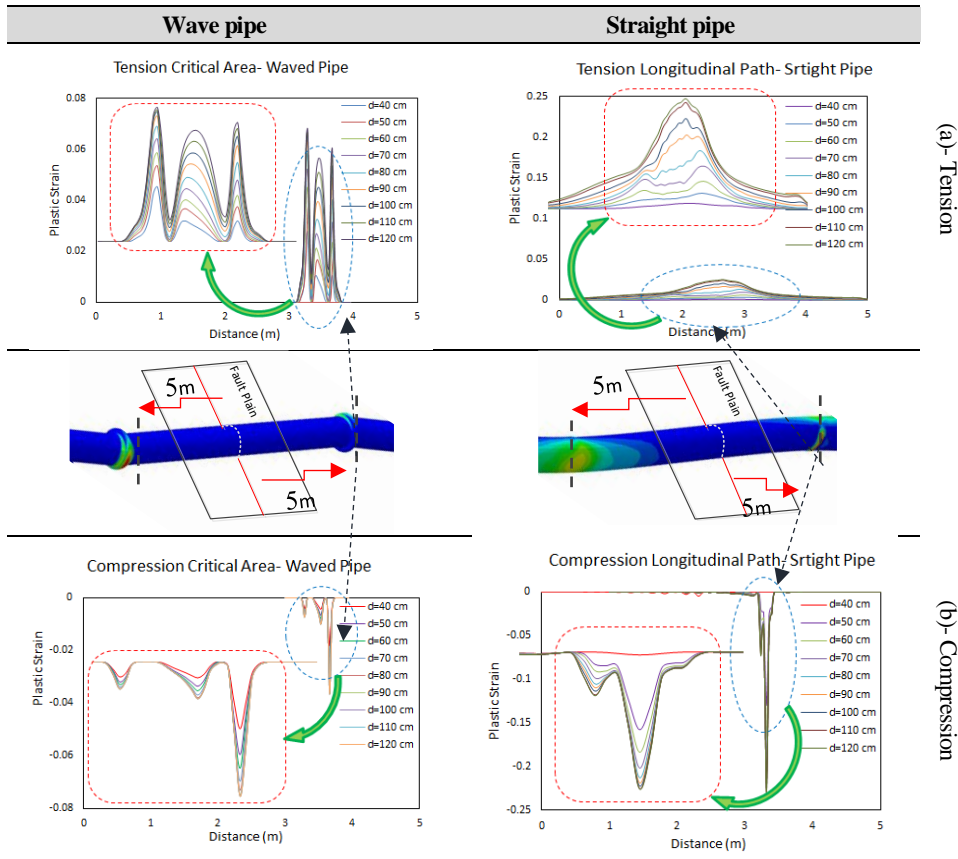
شکل ۱۹. کانتور کرنش پلاستیک ناحیه بحرانی در قسمت کششی و فشاری؛ (الف) لوله صاف بدون اتصال موجی، (ب) لوله با اتصال موجی.

با توجه به شکل (۱۹) یکی از مهم‌ترین نتایج از بین بردن ناحیه کم‌انرژی در لوله است همچنین ناحیه بحرانی نیز در اتصال موجی بسیار محدود شده است.

برای مقایسه بهتر عملکرد لوله مستقیم و لوله با اتصالات موجی، مقادیر کرنش پلاستیک در دو ناحیه بحرانی کششی و فشاری با یکدیگر مقایسه شد. شکل (۱۸) مقادیر کرنش پلاستیک را در مناطق بحرانی فشاری و کششی نشان می‌دهد که در دو لوله مستقیم و لوله با اتصالات موجی مقایسه شده و در جابه‌جایی گسل (d) با طول‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر استخراج شده است.

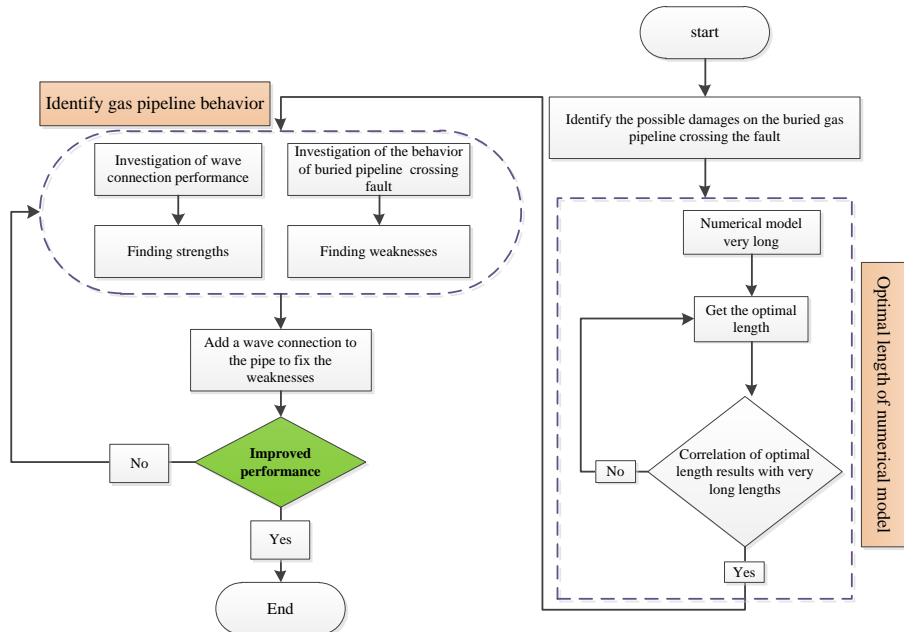
در این مقاله، لوله‌های مستقیم و موجی به ترتیب در امتداد طول خود ۵ متر و ۱ متر مناطق بحرانی دارند. بنابراین برای مقایسه صحیح نتایج این دو مدل، همان محور افقی ۵ متری در نظر گرفته شده است. منحنی‌های نتایج در شکل

(۱۸) نشان داده شده است همچنین مبدأ محور افقی (راستای X) به گونه‌ای در نظر گرفته شده که منحنی‌ها در محل مناسب قرار گیرند تا جزئیات بیشتری را نمایش دهند.



شکل ۲۰. مقایسه نتایج کرنش پلاستیک در ناحیه بحرانی.

با توجه به شکل (۲۰) ناحیه‌های بحرانی لوله صاف در فاصله ۵ متری از گسل اتفاق می‌افتد. حداکثر مقدار کرنش پلاستیک بعد از جابه‌جایی گسل از مقدار ۰/۲۵ برای لوله صاف به مقدار ۰/۰۷ برای لوله با اتصال موجی کاهش می‌یابد. در این حالت بحرانی‌ترین ناحیه لوله صاف در قسمت فشاری به علت ایجاد کمانش موضعی است. با توجه به نتایج شکل فوق می‌توان نتیجه گرفت که اتصال موجی علاوه بر حذف پدیده کمانش، توانسته است هم مقادیر کرنش پلاستیک را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و هم ناحیه کمتری از لوله را وارد مرحله پلاستیک گرداند.



شکل ۲۱. فلوجارت گام به گام فرآیند رسیدن به بهبود عملکرد لوله‌های گازی مدفون متقاطع با گسل با اتصال موجی.

مراحل دستیابی به نتایج این مقاله در فلوجارت شکل (۲۱) نشان داده شده است. در ابتدا لازم است طول بهینه لوله را برای دستیابی به نتایج صحیح داشته باشیم. سپس رفتار لوله مستقیم بررسی و نقاط ضعف آن (مناطق کمانش) به دست آید. در نهایت با قرار دادن اتصالات موجی در این مناطق، میزان بهبود عملکرد لوله، مورد ارزیابی قرار گیرد.

## نتایج

در این مقاله رفتار خطوط لوله مدفون در عبور از گسل امتداد لغز با زاویه تقاطع ۹۰ درجه بررسی شده است. اغلب خطوط لوله مدفون در مسیر خود با گسل‌های فعال برخورد می‌کنند. بنابراین جابه‌جایی گسل یکی از مخاطرات جدی لوله‌های مدفون گاز خواهد بود. در این راستا، مدل عددی با انطباق کامل با مدل تجربی حاصل از پژوهشی‌های معتبری صحت سنجی شده است. مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی مدل عددی حاضر، طول لوله و خاک است. طول پیشنهادی مطالعات قبلی برای مدل‌سازی عددی ۶۵ برابر قطر لوله بود. اما نتایج مدل با این طول در مقایسه با مدل با طول بسیار بلند (حدود ۵۰۰ متر) حدود ۲۰ درصد اختلاف دارد. در این مطالعه طول ۲۰۰ متر لوله و خاک به عنوان طول بهینه به دست آمد. زیرا در طول این طول، جابه‌جایی نسبی دو سر لوله به سمت صفر میل می‌کند و در این حالت، شرایط تکیه گاهی هر دو سر بر پاسخ لوله تأثیری نخواهد داشت.

نتایج نشان‌دهنده عملکرد فوق‌العاده اتصال موجی در حذف ناحیه کمانش لوله، کاهش مقادیر کرنش، محدود کردن ناحیه بحرانی تحت تأثیر گسلش و عدم وقفه در سرویس دهی لوله گاز پس از تغییر شکل‌های ماندگار زمین است. علاوه بر این، اتصال موجی قادر به جذب انرژی و ایجاد یک اتصال پلاستیکی بوده و طول قابل توجه ۵ متری لوله را که تحت تأثیر حرکت گسل وارد ناحیه پلاستیک شده است به حدود ۸۰ سانتی‌متر کاهش می‌دهد. در این حالت سطح مقطع لوله نیز کاملاً سالم و مدور باقی ماند.

کاهش حداکثر مقادیر کرنش پلاستیک در لوله موجی بدون کمانش به ۸۰ درصد می‌رسد. این بدان معنی است که اتصال موج می‌تواند لوله را پس از حرکت گسل حفظ کند. مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک در لوله با اتصال موجی بعد از ۲ متر جابه‌جایی گسل اتفاق می‌افتد، در حالی که لوله مستقیم به دلیل ایجاد کمانش با کمی جابه‌جایی گسل (حدود ۴۰ سانتی متر)، به مقادیر نهایی خود نزدیک می‌شود.

اتصال موجی، می‌تواند یک راهکار بسیار عملی برای ایمن نگه داشتن لوله‌های مدفون شده متقاطع با گسل باشد. نتایج نشان می‌دهد که ناحیه بحرانی کمانش موضعی از بین رفته و مقادیر کرنش پلاستیک دیواره لوله به میزان قابل توجهی حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد اتصال موجی را می‌تواند با هزینه بسیار کم و سرعت بالای نصب و نیز تأثیرات مطلوب بر رفتار لوله، گزینه بسیار جذاب برای کارفرمایان صنعت نفت و گاز باشد.

## References

- [1] Borowski, P. F. (2020). New technologies and innovative solutions in the development strategies of energy enterprises. *HighTech and innovation Journal*, 1(2), 39-58. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-02-01>
- [2] O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2012). *Seismic Design of Buried and Off-Shore Pipelines*. MCEER. [https://www.buffalo.edu/mceer/catalog\\_host.html/content/shared/www/mceer/publications/MCEER-12-MN04\\_detail.html](https://www.buffalo.edu/mceer/catalog_host.html/content/shared/www/mceer/publications/MCEER-12-MN04_detail.html)
- [3] Demirci, H. E., Karaman, M., & Bhattacharya, S. (2021). Behaviour of buried continuous pipelines crossing strike-slip faults: Experimental and numerical study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 92(1), 103980. <https://doi.org/10.1016/j.jngs.2021.103980>
- [4] Gantes, C. J., & Bouckovalas, G. (2013). Seismic Verification of the High Pressure Natural Gas Pipeline Komotini–Alexandroupolis–Kipi in Areas of Active Fault Crossings. *Structural Engineering International*, 23(2), 204-208. <https://doi.org/10.2749/101686613X13439149157164>
- [5] Govind, C. V. (2011). *Numerical Study of Buried Continuous Pipeline Subjected to Large Ground Deformation* [Master, International Institute of Information Technology]. Hyderabad, India.
- [6] Hobbs, R. E. (1981). Pipeline buckling caused by axial loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 1(2), 2-10. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(81\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0143-974X(81)90027-4)
- [7] Ha, K. (2020). Innovative blade trailing edge flap design concept using flexible torsion bar and worm drive. *HighTech and innovation Journal*, 1(3), 101-106. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-03-01>
- [8] Demirci, H. E., Bhattacharya, S., Karamitros, D., & Alexander, N. (2018). Experimental and numerical modelling of buried pipelines crossing reverse faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114(1), 198-214. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.013>
- [9] SeyedKolbadi, S. M., Hassani, N., & Safi, M. (2020). Numerical Evaluation on Improvement Performance of Waved Connection to Reduce Damage on Buried Gas Pipeline. *Shock and Vibration*, 2020(5), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/6680384>
- [10] Wham, B. P., Pariya-Ekkasut, C., Argyrou, C., Stack, M., O'Rourke, T. D., Stewart, H. E., Nakazono, H., & Hasegawa, N. (2017, August 6-9). *Large Axial Deformation Performance of Steel Pipeline Designed for Fault Crossings*. Pipelines 2017: Planning and Design, Phoenix, Arizona. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784480878.010>

- [11] Vazouras, P., Karamanos, S. A., & Dakoulas, P. (2012). Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41(6), 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012>
- [12] Croll, J. G. A. (1997). A simplified model of upheaval thermal buckling of subsea pipelines. *Thin-Walled Structures*, 29(1-4), 59-78. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(97\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(97)00036-0)
- [13] Kerr, A. D. (1972). *On the stability of the railroad track in the vertical plane*. Federal Railroad Administration. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/55706>
- [14] Hobbs, R. E. (1984). In-Service Buckling of Heated Pipelines. *Journal of Transportation Engineering*, 110(2), 175-189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1984\)110:2\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1984)110:2(175))
- [15] Ju, G., & Kyriakides, S. (1988). Thermal buckling of offshore pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 110(4), 355-364. <https://doi.org/10.1115/1.3257073>
- [16] Bekki, H., Kobayashi, K., Tanaka, Y., & Asada, T. (2002). Dynamic behavior of buried pipe with flexible joints in liquefied ground. *Journal of Japan Sewage Association*, 39, 201-208. [https://www.researchgate.net/publication/308395978\\_Dynamic\\_behavior\\_of\\_buried\\_pipe\\_with\\_flexible\\_joints\\_in\\_liquefied\\_ground](https://www.researchgate.net/publication/308395978_Dynamic_behavior_of_buried_pipe_with_flexible_joints_in_liquefied_ground)
- [17] Melissianos, V. E., Vamvatsikos, D., & Gantes, C. J. (2015, July 19-23). *Probabilistic Assessment of Innovative Mitigating Measures for Buried Steel Pipeline-Fault Crossing*. Pressure Vessels and Piping Conference, Boston, Massachusetts, USA. <https://doi.org/10.1115/PVP2015-45345>
- [18] Melissianos, V. E., Korakitis, G. P., Gantes, C. J., & Bouckovalas, G. D. (2016). Numerical evaluation of the effectiveness of flexible joints in buried pipelines subjected to strike-slip fault rupture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 395-410. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.012>
- [19] Melissianos, V. E., Lignos, X. A., Bachas, K. K., & Gantes, C. J. (2017). Experimental investigation of pipes with flexible joints under fault rupture. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 633-648. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.026>
- [20] SeyedKolbadi, S. (2021). The effect of flexible connection on reducing the damage of buried gas pipes due to ground displacement. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 18(1), 99-120. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.131039>
- [21] Dassault Systèmes. (2012). *Abaqus 6.12 Analysis User's Manual Volume V: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions*. [http://abaqusdocs.eait.uq.edu.au/v6.11/pdf\\_books/ANALYSIS\\_5.pdf](http://abaqusdocs.eait.uq.edu.au/v6.11/pdf_books/ANALYSIS_5.pdf)
- [22] American Petroleum Institute. (2007). Petroleum and natural gas industries —Steel pipe for pipeline transportation systems (ISO 3183:2007). API. <https://gasplus.ir/wp-content/uploads/2021/05/5L-2008.pdf>
- [23] O'Donoghue, P. E., Green, S. T., Kanninen, M. F., & Bowles, P. K. (1991). The development of a fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping. *Computers & Structures*, 38(5-6), 501-513. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90002-4)
- [24] American Society of Mechanical Engineers. (2002). Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids (ASME B31.4-2002). ASEM. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/asmе.b31.4.2002.pdf>