



The Effect of Flexible Connection on Reducing the Damage of Buried Gas Pipes Due to Ground Displacement

Seyed Mohammad Seyed Kolbadi^{1*}

¹PhD, 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.

ARTICLE INFO

Received: 07.21.2020

Revised: 09.05.2020

Accepted: 01.16.2021

Keyword:

Buried gas pipeline

Flexible connection

Fault displacement

Pipe buckling

Ductility capacity

***Corresponding Author:**

Seyed Mohammad Seyed Kolbadi

Email:

S_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir

ABSTRACT

One of the major challenges for the oil and gas industry is to keep buried metal pipes safe from faulting. This article discusses a solution to keep buried pipes safe. Wave-shaped joints, by their local deformation, create a rotational joint in a limited area so that other parts of the pipe remain intact. Abacus software was used to model the behavior of buried pipes due to slip direction fault displacement. In order to confirm the validity of the results of the numerical model, the pipe performance due to large axial displacement was compared and validated with the experimental results. An examination of the numerical results indicated that the presence of a wave connection can lead to a very good performance of the pipe in eliminating the buckling area and reducing the amount of plastic strain by approximately 80%.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۱، ۹۷-۱۱۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.131039



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تأثیر اتصال انعطاف‌پذیر بر کاهش آسیب‌های لوله‌های مدفون گاز ناشی از جابه‌جایی زمین

سیدمحمد سیدکلبدی^{۱*}

۱- 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.

چکیده

یکی از معضلات مهم صنعت نفت و گاز، ایمن‌نگه‌داشتن لوله‌های مدفون فلزی ناشی از پدیده گسلش می‌باشد. در این مقاله به بررسی یک راهکار برای ایمن‌نگه‌داشتن لوله‌های مدفون پرداخته می‌شود. اتصالات موجی‌شکل با تغییر شکل موضعی خود باعث ایجاد مفصل دورانی در یک ناحیه محدود می‌گردند؛ به طوری که سایر قسمت‌های لوله، سالم باقی می‌ماند. برای مدل‌سازی رفتار لوله مدفون ناشی از جابه‌جایی گسل راستا لغز، نرم‌افزار آباکوس به خدمت گرفته شده است. برای تأیید اعتبار نتایج مدل عددی، عملکرد لوله ناشی از جابه‌جایی محوری بزرگ با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقاله‌ای معتبر، مقایسه و صحت‌سنجی شده است. با بررسی نتایج عددی، وجود اتصال موجی می‌تواند موجب عملکرد بسیار مطلوب لوله در از بین بردن ناحیه کمانشی و کاهش مقادیر کرنش پلاستیک حدوداً ۸۰ درصدی شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

کلید واژگان:

لوله مدفون انتقال گاز
اتصال انعطاف‌پذیر
جابه‌جایی گسل
کمانش لوله
ظرفیت شکل‌پذیری

*نویسنده مسئول: سیدمحمد سیدکلبدی

پست الکترونیکی:

S_SeyyedKolbadi@SBU.ac.ir



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

یکی از معضلات مهم در صنعت نفت و گاز در تمامی کشورها، در نظر گرفتن تمهیداتی است که برای محافظت از سیستم‌های انتقال انرژی از منع به مقصد است. یکی از پرکاربردترین این‌گونه سیستم‌ها، لوله‌های فلزی مدفون انتقال نفت و گاز می‌باشد که به شریان‌های حیاتی یک جامعه معروف هستند. از آنجا که این لوله‌ها در مسیر خود با گسل‌های زیاد در تقاطع هستند یا هر گونه جابه‌جایی زمین آنها را تحت تأثیر قرار خواهد داد؛ لذا آسیب به این مجموعه علاوه بر خسارات اولیه ناشی از تعویض قطعات آسیب‌دیده، می‌تواند خسارات ثانویه‌ای به جامعه وارد کند [۱].

یکی از معضلات صنعت لوله‌های مدفون، حفظ لوله به دلیل وجود مخاطرات ناشی از حرکت‌های ماندگار زمین نظیر جابه‌جایی گسل می‌باشد. در این مقاله به بررسی یک راهکار بسیار جذاب برای کارفرمایان صنعت نفت و گاز برای ایمن نگه داشتن این تأسیسات پرداخته شده است. در این پژوهش که برای نخستین بار به ارزیابی توسعه کاربرد اتصال موجی در لوله‌های گاز می‌پردازد رفتار لوله مدفون ناشی از جابه‌جایی گسل راستا لغز با زاویه برخورد ۹۰ بررسی شده است. نرم‌افزار آباکوس ورژن ۲۰۱۷ برای شبیه‌سازی پدیده گسلش به کار گرفته شده است. پس از صحت‌سنجی بسیار مناسب رفتار اتصال موجی، مدل عددی با طول بهینه‌ای که در این مقاله معرفی شده است، تحلیل شد. المان ۴ گره‌ای شل و المان ۸ گره‌ای سالیید به ترتیب برای مدل‌سازی لوله و خاک استفاده شدند. همچنین از آنجا که فولاد پس از جاری‌شدگی، کرنش‌های زیادی را پیش از گسیختگی تجربه می‌کند؛ کرنش پلاستیک به عنوان خروجی اصلی این مقاله در نواحی بحرانی کشش و فشار ناشی از جابه‌جایی‌های مختلف گسل راستا لغز، ملاک ارزیابی قرار گرفت. نتایج، نشان‌دهنده عملکرد بسیار مطلوب اتصال موجی در از بین بردن ناحیه کم‌انرژی لوله، کاهش مقادیر کرنش، محدود کردن ناحیه تحت تأثیر لوله ناشی از حرکت گسل و همچنین قطع نشدن خدمت‌رسانی لوله گاز بعد از تغییر شکل‌های محدود زمین می‌باشد. همچنین این اتصال به دلیل سادگی در ساخت و پایین بودن هزینه تمام‌شده نصب می‌تواند به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین گزینه‌های پیش روی کارفرمایان صنعت نفت و گاز برای جلوگیری از مخاطرات و آسیب‌های ناشی از حرکت‌های زمین روی لوله‌های مدفون گردد.

هدف اصلی مقاله حاضر، پیدا کردن روشی برای ایمن نگه داشتن ساختار شبکه خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز و نیز نشدن قطع خدمت‌دهی سیستم حتی پس از وارد آمدن آسیب می‌باشد. مخاطرات خطوط لوله مدفون گاز می‌تواند به سه آسیب برشی (پانچینگ)، آسیب کششی و آسیب فشاری (کمانشی) منجر شود. با انتخاب اتصال اعطاف‌پذیر موجی به‌عنوان یک راه‌حل برای کنترل و کاهش خسارات وارده، سعی از تحقق بخشیدن به اهداف می‌شود.

با توجه به اهمیت شریان‌های حیاتی و لزوم شناخت رفتاری آنها در مقابله با حوادث طبیعی زمین نظیر جابه‌جایی‌های ماندگار، به‌دست آوردن راهکارهایی که قابلیت اجرا داشته باشند امری ضروری به نظر می‌رسد. شایان ذکر است یکی از معضلات مهم شرکت‌های کارفرما در صنعت نفت و گاز، تأمین ایمنی خطوط مدفون لوله‌های فلزی می‌باشد. برای مثال، لوله‌های انتقال گاز و نفت به دلیل طویل بودنشان با گسل‌های موجود در تقاطع هستند. هر گونه آسیب به این لوله‌ها علاوه بر هزینه‌های وارده به خود تأسیسات می‌تواند موجب قطع سرویس‌دهی این مواد پراهمیت انرژی شود؛ بنابراین می‌تواند روند زندگی را در محدوده زمانی مشخصی، معیوب سازد. یکی دیگر از مسائل پیش رو، گازرسانی به روستاهای واقع در کوهپایه‌ها می‌باشد. بدیهی‌ست شیب زمین می‌تواند عاملی باشد تا در صورت وقوع بارندگی‌هایی، خاک شیروانی رانش کند و تأسیسات مدفون انتقال گاز را تحت تأثیر قرار دهد که هر ساله در بسیاری از مناطق، هزینه‌های قابل توجهی را بر دوش شرکت‌های کارفرمای گاز می‌گذارد. در این راستا پس از شناخت مخاطرات لوله‌های مدفون، با انتخاب روشی مناسب، سعی در کنترل و کاهش آسیب‌های وارده به لوله‌های مدفون گاز می‌گردد.

برای خطوط لوله فولادی جوش شده، متداول‌ترین روش برای تحمل حرکت گسل، حداکثر استفاده از توانایی تغییر شکل لوله در محدوده ناکشسان درکشش به‌منظور هماهنگی با تغییر شکل زمین بدون گسیختگی می‌باشد. هرگاه امکان داشته باشد باید قرارگیری خط لوله در تقاطع خط گسل چنان انتخاب شود که خط لوله تحت تأثیر کشش همراه با قدری خمش قرار گیرد و از قرارگیری خط لوله به‌طوری که آن را در فشار قرار دهد باید اجتناب شود؛ زیرا توانایی خط لوله در تحمل تنش‌های فشاری بدون گسیختگی بیار، کمتر از تنش‌های کششی است. روش‌های متعددی برای تحلیل خطوط لوله مدفون در معرض گسلش وجود دارند. این روش‌ها با اصلاحات لازم در مورد شرایط قیدها می‌توانند برای خطوط لوله مدفون و موارد مشابه به کار می‌روند. این روش‌ها عبارتند از:

- روش نیومارک- هال^۱ [۲]

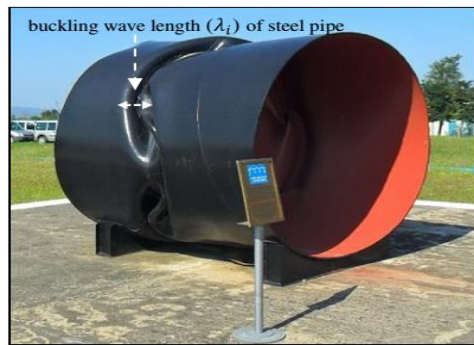
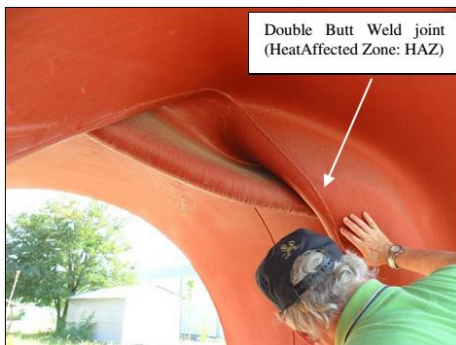
- روش کندی^۲ و همکاران [۳]

- روش اجزا، محدود.

دو روش اول، حرکت گسل را به‌صورتی که در یک صفحه تعریف‌شده منفرد رخ می‌دهد فرض می‌کنند و توده‌های خاک در طرفین گسل را به‌صورت دو جسم صلب متحرک در نظر می‌گیرند.

روش نیومارک- هال [۲] یک برآورد دست پایین^۳ در خط لوله می‌باشد؛ زیرا فرض می‌کند خط، سختی خمشی ندارد و لوله را به‌صورت رفتار یک کابل در نظر می‌گیرد؛ لذا هرگونه قید جانبی را حذف می‌کند. بنابراین خط لوله به‌صورت یک خط مستقیم بین دو نقطه مهارتی تغییر شکل می‌دهد. از سوی دیگر روش کندی [۳] و همکاران منجر به برآورد دست بالا^۴ از تغییر مکان‌های سه‌بعدی ناشی از حرکت گسل شد که بستگی به مؤلفه‌های حرکت گسل امتداد لغز دارند؛ بنابراین جابه‌جایی المان‌های لوله به‌چگونگی قرارگیری خط راستای لوله نسبت صفحه گسل و نیز زاویه قرارگیری امتداد لوله نسبت به سطح زمین بستگی دارد.

بسته به زاویه برخورد لوله با گسل، مکانیزم خرابی کمانشی (شکل ۲) می‌تواند به مکانیزم کششی تبدیل شود. در این صورت المان‌های لوله، تحت کشش قرار خواهند گرفت [۴]. در سال ۲۰۱۷ کایا^۵ [۵]، مکانیزم برشی روی لوله‌ای که در سال ۱۹۹۹ در کواکلیلی^۶ ترکیه بر اثر حرکت گسل آسیب دیده است را به صورت عددی بررسی کرد (شکل ۱).



شکل ۱. پانچینگ در محل تقاطع لوله با گسل (کایا ۲۰۱۷) - زلزله ۱۹۹۹ کواکلیلی با جابجایی جانبی ۳ متر [۶]

¹ Newmark-Hall

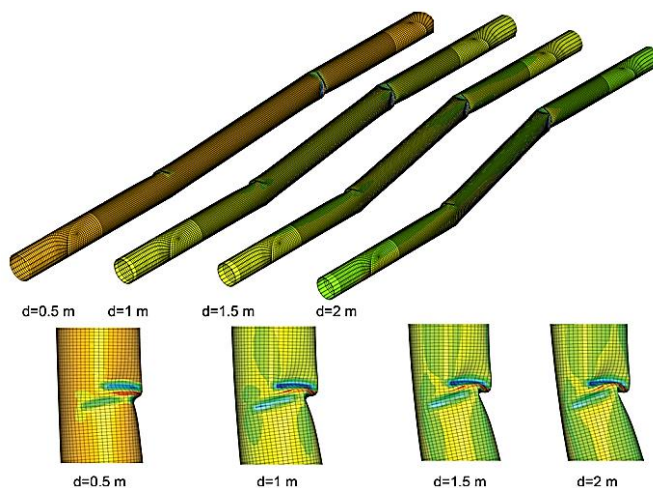
² Kennedy

³ Lower bound

⁴ Upper bound

⁵ kaya

⁶ Kokaali



شکل ۲. کمناش موضعی در ناحیه فشاری [۴]

رفتار لوله‌های فولادی تحت فشار و کمناش، بسیار پیچیده است؛ بنابراین مطالعه موردی روی خرابی دیواره لوله برای درک درست از رفتار واقعی خطوط انتقال در مواجهه با جابه‌جایی‌های ناشی از گسلش، بسیار بااهمیت است. رفتار لوله فولادی در مواجهه با بارگذاری فشاری، مورد توجه محققانی بسیاری بوده است. در این بین، تحقیقات و گزارش‌های رید^۱ [۷] و اخیراً توتونسا^۲ [۸] و همچنین بردی^۳ [۹] و کیریکیدس و جو^۴ [۱۰] خرابی کمناشی لوله‌های فولادی را در مواجهه با فشار خالص محوری و رفتار خمشی ارزیابی کرده‌اند. کارامانوس و تاسولاس^۵ [۱۱] نیز به مطالعه رفتار لوله‌های قطر بالا که به صورت ماریچی جوش خورده‌اند، پرداختند. علاوه بر این، جون^۶ و کیریکیدس [۱۰] تأثیر خاک پیرامونی بر مقاومت کمناشی لوله‌های مدفون را بررسی کرده است.

غالب مطالعات و پژوهش‌های در حوزه لوله‌های مدفون را می‌توان در غالب شناخت وضعیت موجود بیان کرد. در ادامه، دو نوع از راهکارها برای ایمن نگه داشتن لوله‌های مدفون ناشی از پدیده گسلش بیان می‌گردد. چاریس گانتز^۷ [۱۲] (۲۰۱۶) در مطالعه خود تحت عنوان «ارزیابی روشی جهت حفاظت لوله‌های مدفون ناشی از بارهای لرزه‌ای» بیان کرد که باید ناحیه متقاطع با گسل بعد از حفر گسترده، توسط مصالح دانه‌ای مخصوص پر شود تا در هنگام جابه‌جایی گسل، لوله کمتر تحت تأثیر قرار گیرد (شکل ۳). این روش نسبت به روش ارائه شده در این مقاله، پرهزینه‌تر است و نیز نمی‌تواند روشی ثابت برای تمامی انواع الگوهای جابه‌جایی زمین نظیر رانش شیروانی‌های خاکی باشد.

¹ Reid

² Tutunca

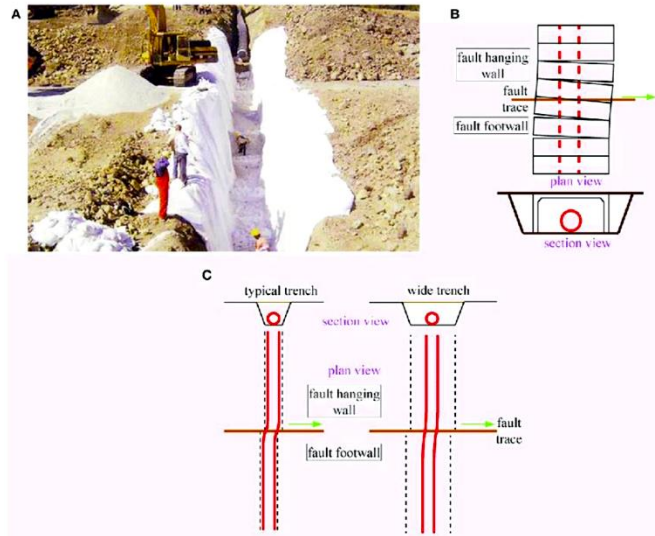
³ Bardi

⁴ Kyriakides and Ju

⁵ Karamanos and Tassoulas

⁶ Yun

⁷ Charis Gantes



شکل ۳. حفر گمانه‌ای عریض جهت نصب لوله [۱۲]

در سال ۲۰۰۳ در آلسکا روشی برای ایمن نگه‌داشتن خط انتقال اجرا شد. بدین ترتیب در ناحیه بحرانی، لوله مدفون به سطح زمین آمده و روی ریل‌های عرضی سوار می‌شود؛ بنابراین می‌تواند آزادانه، روی ریل حرکت کند. این روش که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بسیار پرهزینه می‌باشد. همچنین در این پروژه، بسیاری درختان قطع می‌شود و نیز به نظر می‌رسد قابلیت استفاده در شرایط بسیار محدودی را دارد.



شکل ۴. خط لوله انتقال روغن ترنس-آلسکا در ناحیه متقاطع با گسل دنالی^۱ [۱۳]

^۱ Denali

الگوسازی نظری یا تجربی

مدل کمانشی شامل مشخصات نیرو- جابه‌جایی

تورگارد و نیدلمن [۱۴] قوی‌ترین بحث برای این ادعا که جزئیات غیرخطی نیرو- تغییر شکل خاک، تأثیر به‌سزایی در شروع کمانش لوله مدفون دارد را ارائه کرده‌اند. در حالت شرایط ساده که خاک به‌صورت الاستیک مدل می‌شود و به‌صورت جانبی به لوله، نیرو وارد می‌کند. این نیرو در واحد طول معادل فنری با سختی ثابت k می‌باشد. در این شرایط معادله زیر حاکم است:

$$EIy'''' + Py'' + ky = 0 \quad (۱)$$

نشان دادن اینکه بار بحرانی کمانشی از رابطه زیر به‌دست می‌آید ساده است (برای مثال در این مرجع دیده شود). شایان ذکر است که تمامی کمیت‌هایی که در روابط (۲) الی (۷) استفاده شده، با واحدهای SI بیان شده‌اند.

$$P = 2\sqrt{kEI} \quad (۲)$$

کمانش لوله‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که تنش جداره لوله بیش از تنش حد جاری‌شدگی مصالح شود. حرکت گسل راستا لغز، باعث ایجاد لنگر خمشی در لوله مدفون خواهد شد. روابط تخمینی زیادی وجود دارند که مقدار تنش کمانشی و لنگر ایجاد شده در لوله را تحت خمش توضیح می‌دهند اما هیچ کدامشان فشار داخلی را در نظر نگرفته‌اند. برازیر^۱ [۱۵] یکی از پیشگامان این مسیر در تحلیل غیرخطی سازه‌ها می‌باشد. او دریافت زمانی لوله‌ها خراب می‌شوند که شعاع داخلی تغییرشکل‌یافته لوله به $\frac{1}{9}$ قطر لوله برسد. لنگر خمشی M_{cr1} بر اساس این نوع تغییر شکل به صورت زیر محاسبه شود:

$$M_{cr1} = \frac{\sqrt{2}}{9} \frac{E\pi Dt^2}{\sqrt{1-\nu^2}} \quad (۳)$$

که D قطر لوله، t ضخامت لوله، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون می‌باشد.

تنش خمشی بیشینه σ_{cr} لوله تحت لنگر کمانشی M_{cr} نیز می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود.

$$\sigma_{cr1} = \frac{4M_{cr}}{\pi D^2 t} \quad (۴)$$

اگر تنش کمانشی بحرانی خط لوله تحت خمش، شبیه تنش کمانشی لوله تحت فشار یکنواخت باشد، تنش کمانشی به صورت زیر بیان می‌شود:

^۱ Brazier

$$\sigma_{cr1} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{D} \right) \quad (5)$$

سپس، لنگر کمانشی استخراج شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_{cr2} = \frac{E\pi Dt^2}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

تیموشینکو و گیر^۱ [۱۶] اظهار داشتند که بیشینه تنش فشاری در لنگر کمانشی بحرانی حدود ۳۰ درصد بیشتر از به‌دست‌آمده از معادله (۵) است:

$$M_{cr3} = 0.65 \frac{E\pi Dt^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

در واقع این نظریه‌ها بدون در نظر گرفتن فشار داخلی لوله و مبتنی بر نظریه پلاستیک بیان شدند. حل عددی مؤلفه‌های تنش و کرنش برای لوله با فشار داخلی معمولی را هو و یوان^۲ [۱۷] بررسی کرده‌اند. توزیع تنش و کرنش داخلی لوله می‌تواند با فرمول‌ها به‌دست آورده شود اما آنها در مورد مسئله کمانش تحقیق نکردند. تغییر شکل خمشی لوله‌های مدفون، یک مسئله غیرخطی است. لنگر خمشی در طول محور لوله، یکنواخت نیست. همچنین اندرکنش خاک-لوله، یک عامل مهم برای رفتار کمانشی است. به‌علاوه، لوله، یک سازه پوسته‌ای نازک است. وقتی که تغییر شکل بزرگ روی مقطع عرضی لوله ظاهر شود، اصل سوپروپوزیشن نمی‌تواند برای اندرکنش کرنش محوری و کرنش خمشی استفاده بشود. همچنین ممکن است تنش پسماند و تمرکز تنش برای لوله‌ها وجود داشته باشد؛ بنابراین، حل پاسخ لوله به‌وسیله روش تحلیلی، بسیار سخت و روش اجزای محدود، مناسب‌تر خواهد بود.

از آنجا که کمانش لوله‌ها به دلیل مشخصات هندسی آن می‌تواند به‌صورت محلی خارج از صفحه روی جداره آن اتفاق بیفتند، بررسی رفتار آن به‌صورت تحلیلی، کاملاً پیچیده خواهد شد. از این رو برای بررسی دقیق‌تر این موضوع از روش المان محدود استفاده شده است و برای شبیه‌سازی، نرم‌افزار آباکوس به کار گرفته شد. حرکت گسل به دو زاویه شیب گسل β (زاویه صفحه گسل با افق) و زاویه مقطع عرضی لوله φ (زاویه صفحه گسل با محور لوله) در صفحه عمودی و افقی به ترتیب بستگی دارد [۱۸].

در این مقاله برای تمرکز بیشتر بر گسترش کاربرد اتصال موجی روی عملکرد لوله‌های مدفون گاز تحت تأثیر حرکت گسل راستا لغز، مقادیر φ و β یکسان برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند.

در سال ۲۰۱۷ پارکر و ام^۳ [۱۹] ایده شکل‌پذیری اتصالات لوله را با در نظر گرفتن سطح موجی شکل^۴ در لوله تغییر داد. از این‌رو طی مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی مکانیزم تغییر شکل محوری بزرگ در لوله پرداخت. در این مطالعه، یک لوله بدون فشار داخلی با یک اتصال موجی با اعمال جابه‌جایی محوری بررسی شد. این نوع اتصال به دلیل وجود فقط یک ناحیه موجی، علاوه بر ایجاد ظرفیت شکل‌پذیری لوله می‌تواند از ایجاد پدیده بیضی‌شدگی لوله در

¹ Timoshenko and Gere

² Hu and Yuan

³ Parker Wham

⁴ Waved

فشارهای بالا و نیز با کاهش طول قسمت ناهموار برای انباشته شدن آلاینده‌های گاز، از خوردگی زود هنگام لوله جلوگیری کند. نتایج، حاکی از این است که ظرفیت شکل‌پذیری لوله بدون ایجاد ناحیه کم‌انرژی به شدت افزایش خواهد یافت. در تحقیق یاد شده، صرفاً به بررسی ظرفیت شکل‌پذیری محوری لوله با استفاده از اتصال موجی شکل، پرداخته شده است. اما تا کنون پژوهشی در خصوص نحوه عملکرد این اتصال در پدیده‌های گسلس با جابه‌جایی‌های عرضی و نیز پدیده ناپایداری شیروانی‌های خاکی صورت نگرفته است.

هدف اصلی این مقاله حاضر، بررسی عملکرد یک نوع اتصال انعطاف‌پذیر موجی بر پدیده تقاطع لوله با گسل می‌باشد. اتصالات انعطاف‌پذیر در لوله‌ها می‌تواند با توجه به پتانسیل جابه‌جایی خود، آسیب‌های برشی، فشاری و کششی را تا حد زیادی برطرف کند. در این مقاله به توسعه کاربرد اتصال موجی در لوله‌های گاز مدفون متقاطع با گسل پرداخته شده است. لوله‌های مدفون به دلیل طول زیاد خود غالباً در طول مسیر خود با گسل‌های فعال برخورد می‌کنند؛ لذا جابه‌جایی گسل، همواره یکی از مخاطرات لوله‌های مدفون گاز به‌شمار می‌آید. در این مقاله به بررسی یکی از راهکارهای کاهش مخاطرات جابه‌جایی گسل بر عملکرد لوله پرداخته شده است. راهکار مورد بررسی، استفاده از اتصال موجی در لوله‌ها می‌باشد. این اتصال را اولین بار در سال ۲۰۱۷ پاکر وام پیشنهاد داد و مدل آزمایشگاهی آن را بر تغییر شکل‌های بزرگ محوری ساخت. در مقاله حاضر، با گسترش کاربرد این اتصال، تأثیر آن بر رفتار لوله مدفون گاز متقاطع با گسل ارزیابی شده است. در این راستا، مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی، صحت‌سنجی شد و در ادامه، مدل عددی تقاطع لوله با گسل راستا لغز با زاویه برخورد ثابت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۲۰۱۷، شبیه‌سازی گردید. از آنجا که لوله‌های فولادی می‌توانند کرنش‌های زیادی را پس از جاری‌شدگی تحمل کنند، کرنش پلاستیک به‌عنوان خروجی اصلی مقاله حاضر در نواحی بحرانی کششی و فشاری در نظر گرفته شد و مقادیر آن در دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی مقایسه گردید.

تجزیه و تحلیل عددی

صحت‌سنجی

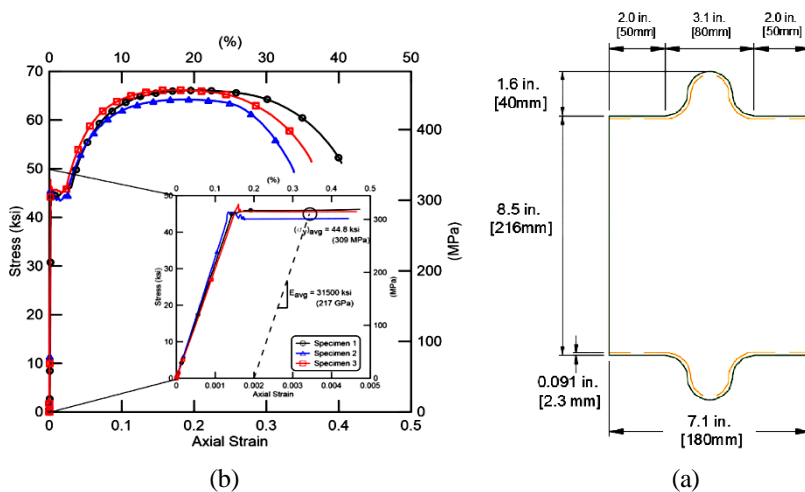
در سال ۲۰۱۷ پاکر وام و همکاران [۱۹] طی مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی عملکرد محوری اتصالات موجی در جابه‌جایی‌های بزرگ پرداختند. در این تحقیق آزمایشگاهی با اعمال جابه‌جایی محوری بزرگ توسط جک^۱ به لوله‌ای فولادی با قطر ۲۰ سانتی‌متر، مدول الاستیسیته ۲۱۷ گیگاپاسکال و تنش جاری‌شدگی ۳۰۹ مگاپاسکال، داده‌های کرنش توسط کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی ثبت شد (شکل ۵).

^۱ Actuator



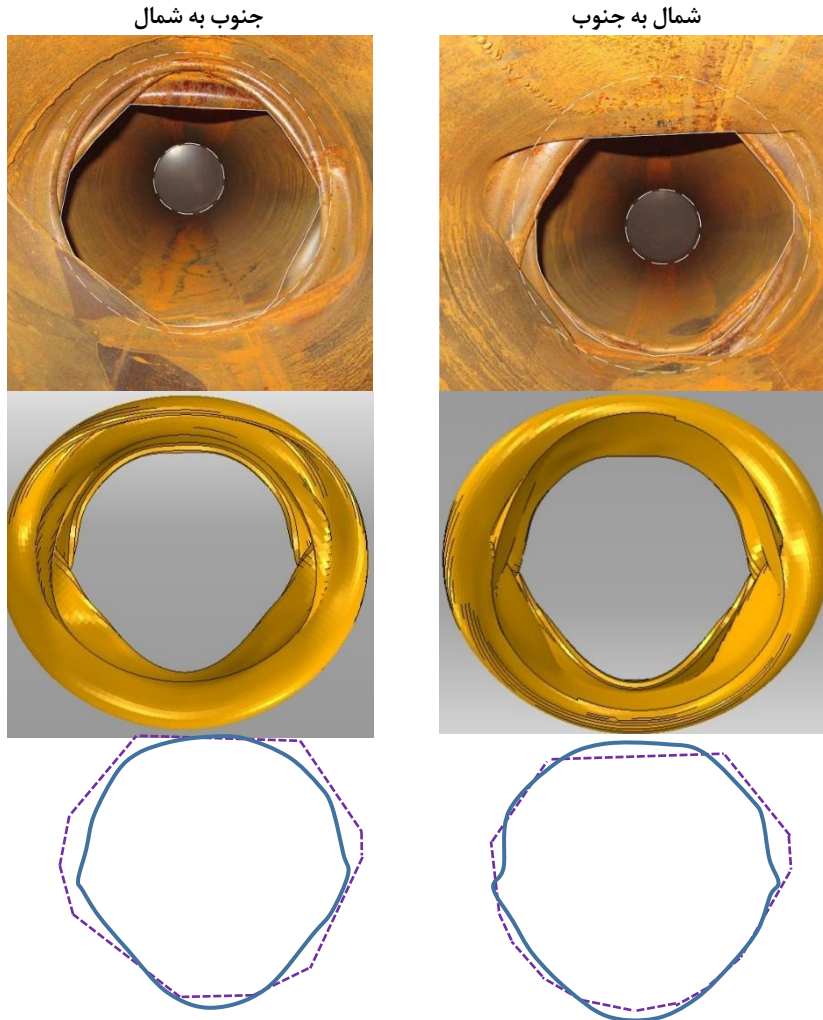
شکل ۵. نمای دو بعدی آزمون آزمایشگاهی فشار محوری لوله با اتصال موجی [۱۹]

مطالعه آزمایشگاهی بیان شده، مبنای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده عددی در مقاله حاضر در نظر گرفته است. در این مدل عددی، با در نظر گرفتن اتصال موجی و شرایط مرزی انتهایی بسته لوله و نیز در نظر گرفتن المان shell برای لوله، جابه‌جایی ۱۶ سانتی‌متری در راستای محوری به لوله اعمال شد. مشخصات هندسی و مکانیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.



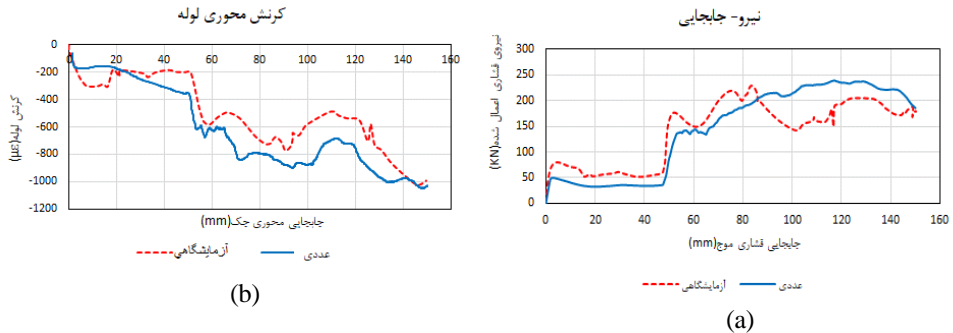
شکل ۶. مشخصات هندسی و مصالح اتصال موجی آزمایش شده (a) نمای هندسی مقطع عرضی اتصال موجی، (b) نمودار تنش- کرنش نمونه کششی [۱۹]

برای صحت‌سنجی کیفی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، نتایج تغییر شکل آنها در شکل (۷) آورده شده است. در هنگام بسته‌شدن دهانه اتصال موجی، اتصال، شروع به مچالگی می‌کند و مقطع آن از حالت دایره‌ای خارج می‌شود.



شکل ۷. مقایسه شکل سطح مقطع تغییر شکل یافته در ناحیه موجی مدل آزمایشگاهی [۱۹] و مدل عددی

انطباق نزدیک بین سطح مقطع تغییر شکل یافته در گام آخر در ناحیه موجی لوله بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می‌شود. این مقایسه در دو نمای شمال به جنوب و جنوب به شمال بررسی شده است. به نظر می‌رسد مدل عددی از نظر تغییر شکل ظاهری توانسته با الگوی تغییر شکل مدل آزمایشگاهی بسیار منطبق عمل کند. برای مقایسه کمی نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، مقادیر نیروی محوری و کرنش محوری لوله بایکدیگر مقایسه شدند (شکل ۸).



شکل ۸. (a) مقایسه نتایج نیرو- جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نیرو- جابه‌جایی، (b) گرنش محوری- جابه‌جایی

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، از نظر کمی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارند؛ لذا سایر نتایج مدل عددی می‌تواند ملاک ارزیابی قابل قبول با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شده در شکل ۸ می‌توان دریافت مدل عددی به‌خوبی توانسته است روند تغییرات نیروی فشاری در برابر جابه‌جایی و نیز گرنش محوری در برابر جابه‌جایی را شبیه‌سازی کند.

ارزیابی عملکرد اتصال موجی بر عملکرد لوله

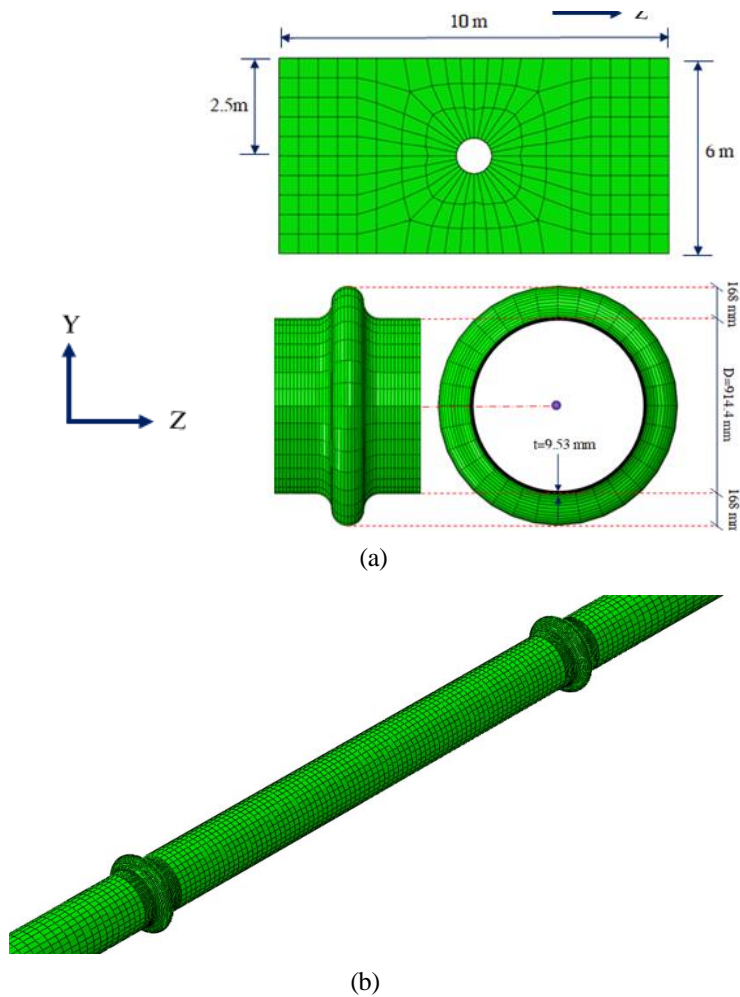
تا به اینجای کار، مدل عددی اتصال موجی بر اساس مدل آزمایشگاهی پاکر وام، به‌صورت کمی و کیفی صحت‌سنجی شده است و می‌توان صحت نتایج آن مورد استناد قرار بگیرد. در این مقاله به‌گسترش کاربرد این اتصال انعطاف‌پذیر موجی در بهبود عملکرد لوله منقطع با گسل پرداخته می‌شود. در این راستا با تحلیل یک لوله صاف متأثر از پدیده گسلش، نقاط ضعف آن مشخص شد و برای بهبود عملکرد لوله، در آن نواحی از اتصال موجی استفاده گردید. در ادامه با ارائه نمودارهای اندازه کرنش پلاستیک در مقایسه با جابه‌جایی گسل، عملکرد دو لوله صاف و لوله با اتصال انعطاف‌پذیر مقایسه می‌شوند.

شایان ذکر است که برای شبیه‌سازی مدل عددی مقاله حاضر از یک کامپیوتر با پردازنده ۴ هسته‌ای Core i7 با رم ۸ گیگابایت و ۶ Cash مگابایت استفاده شده است، با توجه به تعداد المان‌های مدل عددی و نیز قدرت پردازنده، هر تحلیل عددی حدود ۵ ساعت به طول انجامید. برای شبیه‌سازی مدل تقاطع لوله با گسل راستا لغز، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی لوله به دلیل نازک بودن جداره لوله، از المان ۴ گره‌ای شل انتگرال کاهش‌یافته^۱ (type S4R)، مجموعاً به تعداد ۲۴ المان پیرامون محیط لوله و ۱۸۰۰۰ المان برای کل لوله و همچنین برای مدل‌سازی خاک از المان ۸ گره‌ای حجیم^۲ انتگرال کاهش‌یافته (C3D8R) مجموعاً به تعداد ۵۴۰۸ المان به خدمت گرفته شده است. همچنین از آنجا که در این مقاله برای نخستین بار تأثیر اتصال موجی بررسی می‌شود، تأثیر زاویه برخورد لوله با گسل و سایر پارامترهای هندسی و مکانیکی مصالح مطالعه نشده است. با توجه به $\theta = 90^\circ$ و $\rho = 0.3$ در نظر گرفته شده است. لوله در راستای محور x در خاک مدفون شده است. عمق دفن لوله ۲ برابر قطر آن که مطابق با روش مهندسی خط لوله است [۱] و نیز طول لوله و خاک پیرامون با توجه به نتایج به‌دست آمده در این

¹ Reduce integration

² Solid

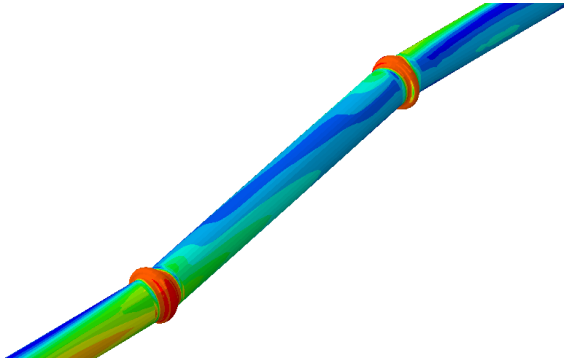
مقاله، ۲۰۰ متر معادل ۲۱۸ برابر قطر لوله به عنوان طول بهینه در راستای x و در راستای‌های y و z با توجه به توصیه وزوراس^۱ [۴] به ترتیب ۶ و ۱۰ برابر قطر لوله (شکل ۹) در نظر گرفته شده است.



شکل ۹. مشخصات هندسی مدل عددی لوله مدفون با اتصال موجی، (a) مقطع و (b) نمای سه بعدی

^۱ Vazouras

دو گام تحلیلی استاتیکی به صورت ترتیبی اعمال شده است. در ابتدا نیروی گرانش به خاک و فشار داخلی لوله اعمال شده است و سپس جابه‌جایی عرضی به یکی از بلوک‌های گسل اعمال شده است. درجات آزادی مربوط به صفحات مرزی، شامل صفحه زیرین و صفحات جانبی بلوک اول ثابت و بلوک دوم در راستای جانبی به صورت یکنواخت جابه‌جا شده است.



شکل ۱۰. کانتور تنش وون میسز مدل عددی لوله با اتصال موجی متقاطع با گسل راستا لغز

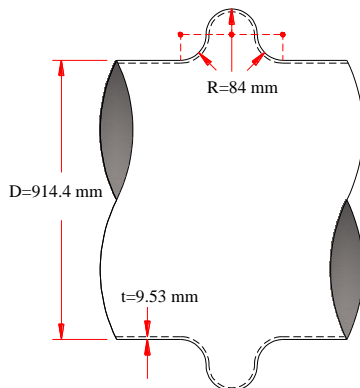
مدل پلاستیسیته کرنش‌های بزرگ^۱ با همگنی سخت‌شونده^۲ برای مصالح فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. خط لوله فولادی، مدفون در خاک نرم رسی از نوع رس نوع I در شرایط زهکشی نشده در نظر گرفته شده است. طبق پیشنهاد وزوراس و همکاران [۴]، مشخصات مکانیکی خاک به صورت الاستیک-پلاستیک کامل^۳ با مدل موهر-کلمب در نظر گرفته شده است که مشخصات آن شامل چسبندگی $C = 50 \text{ kpa}$ ، زاویه اصطکاک داخلی $\phi = 0^\circ$ ، مدول الاستیک $E = 25 \text{ Mpa}$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.5$ ژمی باشد. در این مقاله، زاویه اتساع^۴ نیز برابر صفر در نظر گرفته شده است. اندرکنش بین سطوح بیرونی لوله و خاک پیرامونی آن با الگوریتم تماسی شبیه‌سازی شده است که اجازه جداشدگی لوله و خاک را می‌دهد. همچنین ضریب زاویه اصطکاک مناسب در این حالت $\mu = 0.5$ در نظر گرفته شده است. قطر لوله $D = 0.914$ متر و ضخامت $t = 8$ میلی‌متر که اندازه مرسوم خطوط لوله انتقال گاز می‌باشد، در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

¹ large-strain plasticity model

² Isotropic hardening

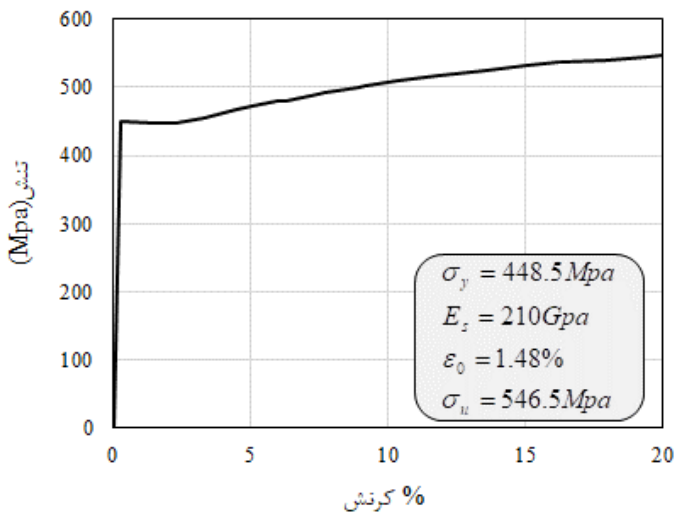
³ Elastic-perfectly plastic

⁴ Dilation angel



شکل ۱۱. مشخصات هندسی اتصال موجی به کار رفته در مدل عددی

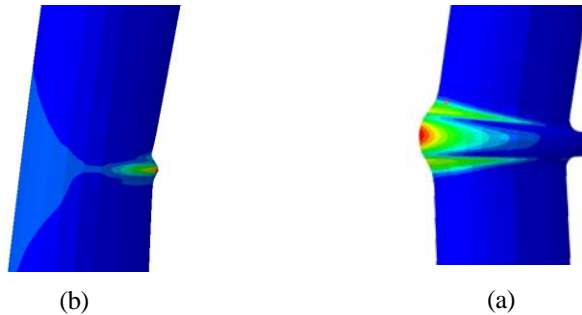
نتایج به دست آمده برای لوله API 5L [۲۰] رتبه X65 از خطوط لوله فولادی می باشد. نمودار تنش- کرنش برای مصالح فولادی لوله های گاز به صورت مرسوم برابر شکل ۱۲ در نظر گرفته شده است. تنش جاری شدگی $\sigma_y = 448.5 \text{ Mpa}$ مدل الاستیسیته 210 Gpa ، ضریب پواسون 0.3 و چگالی برابر 7800 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب اطمینان 0.72 و بیشینه فشار بهره برداری P_{max} این خطوط لوله با توجه به رابطه $P_{max} = 0.72 \times (2\sigma_y t/D)$ به دست آمده است [۲۱؛ ۲۲].



شکل ۱۲. مشخصات مکانیکی فولاد API 5L X65 برای اتصال موجی به کار رفته در مدل عددی

عملکرد اتصال موجی

برای بررسی تأثیر اتصال موجی شکل، ابتدا موقعیت نواحی بحرانی لوله صاف در جابه‌جایی گسل مشخص می‌شود (شکل ۱۳) سپس با جای‌گذاری اتصال موجی در نواحی بحرانی، نتایج دو مدل لوله صاف و لوله با اتصال موجی مقایسه می‌شوند.



شکل ۱۳. کانتور رنگی کرنش پلاستیک نواحی بحرانی فشاری و کششی، (a) لوله با اتصال موجی و (b) لوله صاف بدون اتصال موجی

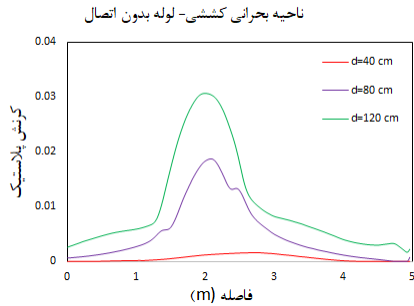
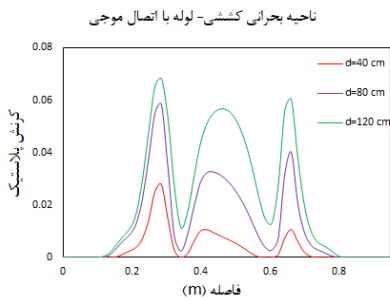
همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود مقادیر کیفی شدت کرنش پلاستیک به‌صورت کانتور رنگی، در دو لوله با اتصال موجی و لوله صاف نمایش داده شده است. به‌وضوح مشخص است که در لوله بدون اتصال کمانش در ناحیه فشاری رخ داده است و در ناحیه‌ای کوچک، مقادیر کرنش پلاستیک محدود شده است که این عامل موجب تمرکز تنش خواهد شد، این در صورتی است که لوله با اتصال موجی با تغییر شکل مناسب، توزیع مناسب‌تری از مقادیر کرنش پلاستیک داشته است.

در شرایط یکسان، لوله با اتصال موجی، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده این است که علاوه بر اینکه هیچ‌گونه ناحیه کمانشی در لوله اتفاق نمی‌افتد، مقادیر کرنش به دو ناحیه کوچک در اتصال موجی شکل محدود می‌شوند (شکل ۱۳).

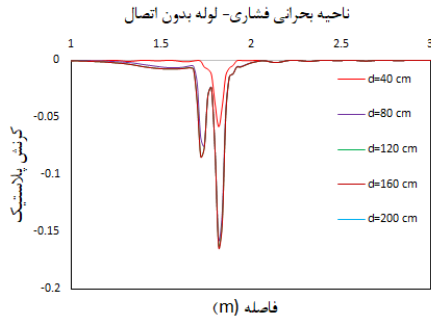
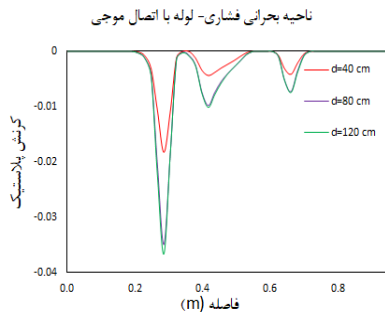
برای مقایسه بهتر عملکرد لوله صاف و لوله با اتصال انعطاف‌پذیر، مقادیر کرنش پلاستیک در دو ناحیه بحرانی کششی و فشاری با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۱۴ بیانگر مقادیر کرنش پلاستیک محوری در نواحی بحرانی فشاری و کششی می‌باشد که این مقادیر در دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقادیر کرنش پلاستیک محوری در جابه‌جایی گسل (d) به طول ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر استخراج شده است.

لوله با اتصال موجی

لوله بدون اتصال



(a) - کشش



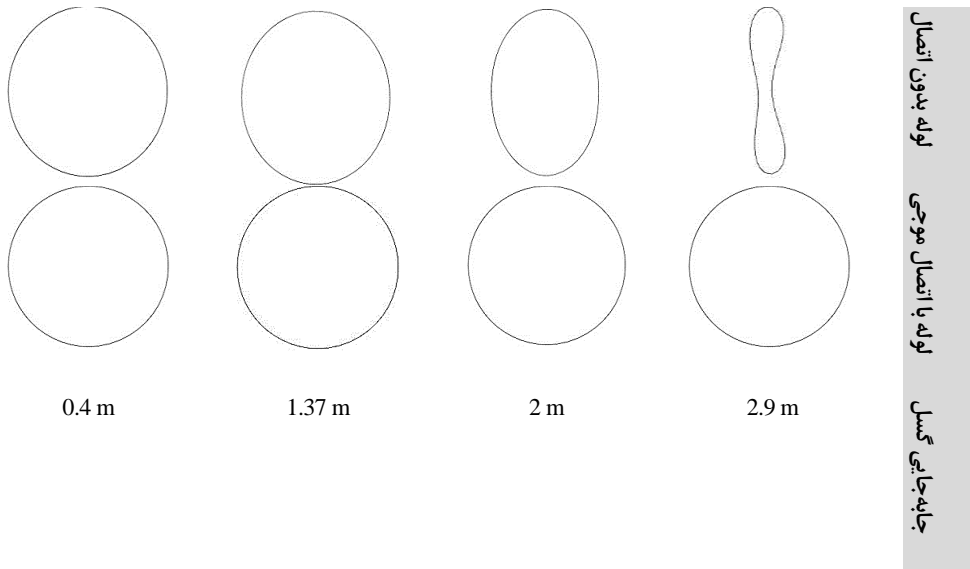
(b) - فشار

شکل ۱۴. مقایسه نتایج کرنش پلاستیک دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی در نواحی بحرانی فشاری و کششی

با توجه به شکل ۱۴ برای مقایسه مناسب بین نمودارها، برای لوله‌های صاف محور افقی که فاصله طولی در ناحیه بحرانی لوله می‌باشد تا ۵ متر و محور قائم تا 0.25 کرنش پلاستیک برای دو حالت کششی و فشاری در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ناحیه کششی لوله صاف متناظر سطر (a) در جابه‌جایی‌های بالای ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و رشد مقادیر کرنش نسبت به افزایش جابه‌جایی گسل بسیار کند است و در جابه‌جایی بیشینه ۱۲۰ سانتی‌متری گسل، حدود 0.04 کرنش می‌یابد. این در صورتی است که در ناحیه فشاری متناظر سطر (b) به دلیل به وجود آمدن کماتش موضعی، مقادیر کرنش پلاستیک پس از جابه‌جایی ۴۰ سانتی‌متری به شدت افزایش می‌یابد و به حدود 0.25 می‌رسد. مقدار کرنش پلاستیک در این حالت، تقریباً معادل کرنش نهایی فولاد می‌باشد؛ لذا جابه‌جایی ۴۰ سانتی‌متری در ناحیه فشاری را می‌توان در این مدل، آستانه کماتش موضعی قلمداد کرد. همچنین برای مقایسه مناسب نمودارهای ناحیه‌های بحرانی در کشش و فشار لوله با اتصال موجی، محور طولی تا فاصله ۵ متری و محور قائم تا کرنش 0.08 در نظر گرفته شده است. ناحیه کششی لوله موجی، متناظر با سطر (a) در جابه‌جایی‌های کمتر از ۴۰ سانتی‌متری گسل، وارد ناحیه پلاستیک شده است و در بیشینه جابه‌جایی گسل (۱۲۰ سانتی‌متر) به مقدار 0.07 رسیده است. هر چند که در این حالت، مقدار کرنش لوله با اتصال موجی حدود دو برابر مقدار لوله صاف است اما تا مقدار کرنش نهایی، فاصله زیادی دارد. ناحیه فشاری متناظر با سطر (b) همچون ناحیه کششی در جابه‌جایی‌های گسل کمتر از ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک شده است که مقدار کرنش پلاستیک در جابه‌جایی بیشینه گسل به 0.04 می‌رسد. کم بودن مقادیر کرنش در ناحیه فشاری لوله با اتصال موجی نشان داده که اتصال موجی به خوبی توانسته است، کماتش محلی را از بین ببرد. همچنین مقادیر کرنش پلاستیک ناحیه فشاری در

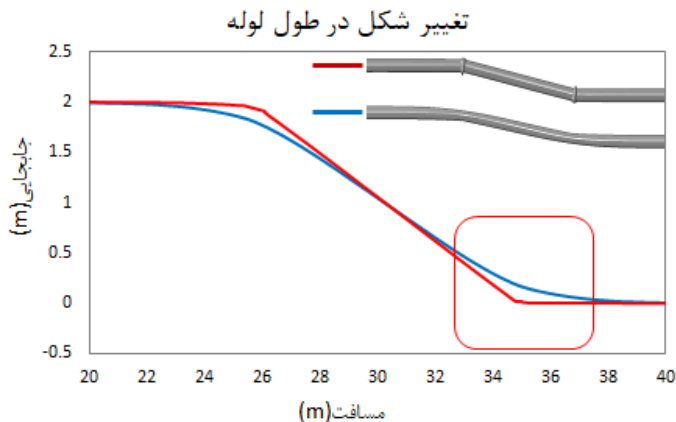
جابه‌جایی‌های بیشینه گسل، کمتر از ناحیه کششی است. دلیل این امر، حرکت جانبی گسل نسبت به امتداد عمودی لوله است. در این حالت، لوله علاوه بر خمش به کشش هم می‌افتد، از این رو بخشی از تغییر شکل لوله در ناحیه فشاری، کاسته می‌شود و به همان نسبت، مقادیر کرنش پلاستیک کمتر خواهد شد. با مشاهده شکل ۱۴، مشخص می‌شود که ناحیه بحرانی در لوله صاف، همان ناحیه فشاری به دلیل وجود کمانش موضعی خواهد بود. این در صورتی است که ناحیه بحرانی در لوله با اتصال موجی، ناحیه کششی خواهد بود. در هر صورت ناحیه فشاری لوله صاف نسبت به بقیه نواحی عملکرد بحرانی‌تری دارد و نیز اتصال موجی توانسته افزایش مقادیر کرنش و محدوده آن را به خوبی کنترل کند.

در جابه‌جایی‌های زیاد گسل راستا لغز، سطح مقطع لوله در ناحیه برخورد با صفحه گسل دچار تغییر شکل می‌شود و به دلیل وجود نیروی برشی در آن ناحیه از حالت دایره‌ای به حالت دنبلی تغییر می‌کند. این نوع تغییر شکل باعث افزایش مقادیر نرخ کرنش و تنش در دیواره لوله خواهد شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات سطح مقطع لوله صاف با لوله موجی شده

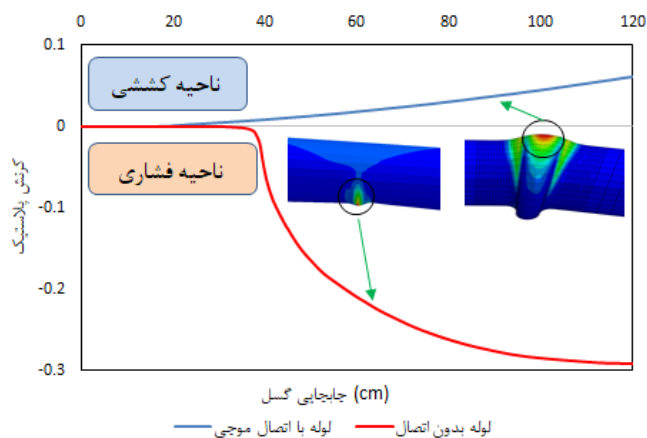
همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، لوله صاف در ناحیه میانی، دچار تغییر شکل سطح مقطع گردیده است؛ به طوری که در جابه‌جایی بیش از ۸۰ سانتی‌متر گسل سطح مقطع دایروی لوله به شکل بیضی و در جابه‌جایی‌های بیش از ۲ متر به شکل دنبلی تغییر شکل می‌یابد اما در لوله با اتصال انعطاف‌پذیر، سطح مقطع لوله، بدون تغییر می‌ماند.



شکل ۱۶. مقایسه تغییر شکل یافته لوله صاف و لوله با اتصال موجی شکل

با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که لوله صاف در طول ۴۰ متر دچار خمیدگی شده است ولی لوله با اتصال موجی با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال موجی، به سه قسمت صاف و بدون انحنای تقسیم شده است. با نصب این اتصال در نواحی بحرانی لوله، انتظار می‌رود علاوه بر کاهش مقادیر تنش و کرنش جداره لوله، موقعیت آسیب احتمالی لوله، قابل پیش‌بینی و محدود گردد.

در لوله‌های انتقال گاز، آسیب یک نقطه از لوله موجب قطع خدمت‌رسانی لوله گاز می‌شود؛ بنابراین با نگاهی ریزبینانه‌تر، علاوه بر نواحی بحرانی در کشش و فشار لوله‌ها، دو نقطه بحرانی در نواحی کششی و فشاری با بیشترین مقدار کرنش پلاستیک نیز انتخاب و با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۱۷. مقایسه تغییر شکل یافته لوله صاف و لوله با اتصال موجی شکل

با توجه به شکل ۱۷ رفتار پلاستیک لوله صاف در ناحیه فشاری تحت جابه‌جایی گسل ۲۵ سانتی‌متری و در ناحیه کششی تحت جابه‌جایی حدود ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. همچنین در جابه‌جایی ۳۸ سانتی‌متری

وارد ناحیه کمانشی می‌شود که در این حالت، مقادیر کرنش پلاستیک، رشد شدیدی پیدا می‌کند. بدین ترتیب مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک ناشی از جابه‌جایی گسل ۱۲۰ سانتی‌متری در ناحیه کششی و فشاری به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۳ می‌باشد. دلیل بیشتر بودن ۱۰ برابری مقادیر کرنش پلاستیک در ناحیه فشاری نسبت به ناحیه کششی، ایجاد کمانش موضعی می‌باشد. از طرفی دیگر، در شکل ۱۷ هر دو نقطه بحرانی در کشش و فشار در جابه‌جایی یکسان گسل ۲۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و البته با افزایش جابه‌جایی گسل، رشد کمتری نسبت به لوله صاف دارند؛ به طوری که با جابه‌جایی ۱۲۰ سانتی‌متری، مقادیر کرنش پلاستیک نقاط بحرانی کشش و فشار به ترتیب به ۰/۰۶ و ۰/۰۴ می‌رسند. بدین ترتیب با مقایسه نتایج فوق اتصال موجی توانسته است، مقادیر کرنش پلاستیک در نقاط بحرانی را نسبت به لوله صاف، در ناحیه فشاری و کششی به ترتیب به اندازه، ۰/۰۳ افزایش و ۰/۲۶ کاهش دهد.

با توجه به شکل ۱۷، مشخص است که بیشترین مقادیر کرنش پلاستیک در نقاط بحرانی برای لوله صاف و لوله با اتصال موجی، به ترتیب در نواحی فشاری و کششی می‌باشد. با مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک در بحرانی‌ترین نقاط لوله صاف و لوله با اتصال موجی می‌توان گفت اتصال موجی توانسته است مقادیر کرنش را به طور قابل توجهی به اندازه ۸۷ درصد کم کند.

نتیجه‌گیری

- ۱- اتصال موجی توانسته با جذب انرژی و ایجاد مفصل پلاستیک، دوران باید و طول قابل توجه ۵ متر از لوله که متأثر از حرکت گسل وارد ناحیه پلاستیک شده است را به حدود ۸۰ سانتی‌متر محدود کند.
- ۲- با استفاده از اتصال موجی در لوله‌های مدفون متقاطع با گسل، پس از جابه‌جایی گسل سطح مقطع لوله کاملاً سالم و به صورت دایره‌ای باقی می‌ماند و بقیه طول لوله بدون افزایش مقادیر کرنش قابل توجه، همچنان در ناحیه الاستیک سالم باقی خواهد ماند.
- ۳- مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک را که در جابه‌جایی ۱۲۰ سانتی‌متری گسل از مقدار کرنش نهایی فولاد به حدود ۸۷ درصد کاهش دهد. این بدان معناست که این اتصال می‌تواند لوله را پس از جابه‌جایی گسل حفظ کند و بدون قطع خدمت‌رسانی لوله گاز، با همان تغییر شکل ماندگار از لوله مدفون استفاده کند.
- ۴- لوله صاف پس از جابه‌جایی گسل، در جابه‌جایی کم حدود ۴۰ سانتی‌متری، وارد ناحیه کمانشی می‌شود و مقادیر کرنش آن به حد نهایی نزدیک شده و موجب خرابی لوله گاز خواهد شد. این خرابی علاوه بر اعمال هزینه تعویض قطعه آسیب‌دیده موجب قطع گاز در بازه زمانی قابل توجه خواهد شد.

References

- [1] O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2012). *Seismic design of buried and offshore pipelines*. MCEER. <https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/12/12-MN04.pdf>
- [2] Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1975, June 18-20). *Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement*. Proceedings of US national conference on earthquake engineering, Ann Arbor Michigan.
- [3] Kennedy, R. P., Williamson, R. A., & Chow, A. M. (1977). Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 103(5), 617-633. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000659>
- [4] 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, 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012>

- [5] Kaya, E. S., Uckan, E., O'Rourke, M. J., Karamanos, S. A., Akbas, B., Cakir, F., & Cheng, Y. (2017). Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing. *Engineering Failure Analysis*, 71, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.10.004>
- [6] Eidinger, J. M., O'Rourke, M., & Bachhuber, J. (2002, July 21-25). *Performance of pipelines at fault crossings*. Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts. <http://www.geengineeringssystem.com/ewExternalFiles/PipeFaultOffset.PDF>
- [7] Reid, S. R. (1993). Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 35(12), 1035-1052. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(93\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(93)90054-X)
- [8] Tutuncu, I. (2001). *Compressive load and buckling response of steel pipelines during earthquakes*. Cornell University. https://books.google.com/books/about/Compressive_Load_and_Buckling_Response_o.html?id=oFpUAAAAYAAJ
- [9] Bardi, F. C., & Kyriakides, S. (2006). Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(8), 830-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.03.005>
- [10] Kyriakides, S., & Ju, G. T. (1992). Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending—I. Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 29(9), 1117-1142. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(92\)90139-K](https://doi.org/10.1016/0020-7683(92)90139-K)
- [11] Karamanos, S. A., & Tassoulas, J. L. (1996). Tubular Members. II: Local Buckling and Experimental Verification. *Journal of Engineering Mechanics*, 122(1), 72-78. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:1\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:1(72))
- [12] Gantes, C. J., & Melissianos, V. E. (2016). Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture. *Frontiers in Built Environment*, 2(34), 12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00034>
- [13] McClymont, A., Ernst, E., Bauman, P., & Payne, N. (2016, September 26–30). *Integrating Geophysical and Geotechnical Engineering Methods for Assessment of Pipeline Geohazards*. 11th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64222>
- [14] Tvergaard, V., & Needleman, A. (1981). On localized thermal track buckling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 23(10), 577-587. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(81\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0020-7403(81)90038-2)
- [15] Brazier, L. G., & Southwell, R. V. (1927). On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 116(773), 104-114. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0125>
- [16] Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (2009). *Theory of Elastic Stability*. Dover Publications. https://books.google.com/books?id=rAk_AwAAQBAJ
- [17] Hu, L., & Yuan, S. (2012). Plastic deformation analysis of thin-walled tube bending under internal pressure. *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, 48(14), 78-83.
- [18] Joshi, S., Prashant, A., Deb, A., & Jain, S. K. (2011). Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 930-940. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.003>
- [19] Wham, B. P., Pariya-Ekkasut, C., Argyrou, C., Stack, M., O'Rourke, T. D., Stewart, H. E., Nakazono, H., & Hasegawa, N. (2017). Large Axial Deformation

- Performance of Steel Pipeline Designed for Fault Crossings. In *Pipelines 2017*. <https://doi.org/10.1061/9780784480878.010>
- [20] American Lifelines Alliance. (2001). *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*. A. S. o. C. E. (ASCE). <https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Update061305.pdf>
- [21] Engineer, T. A. S. O. M. (2013). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems* (ASME B31.8-2012). <https://www.asme.org/getmedia/9d6dc116-b4b3-4dee-9bb2-83fb0055e3c6/33700.pdf>
- [22] Engineers, T. A. S. o. M. (2002). *Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids* (ASME 831.4-2002). [https://www.asme.org/learn/development/find-course/asme-b31-4-pipeline-transportation-systems-liquid-hydrocarbons-liquids-\(1\)/online--mar-21-22nd--2022](https://www.asme.org/learn/development/find-course/asme-b31-4-pipeline-transportation-systems-liquid-hydrocarbons-liquids-(1)/online--mar-21-22nd--2022)