تأثیر مشخصات خاک و زاویهٔ عبوری از گسل بر پاسخ لوله‌های مدفون

غلامرضا نوری*؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی مهندسی
مهدی بالو؛ دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۳ **پذیرش** ۹۳/٤/۱٦

چکیده

در این مقاله پارامترهای مؤثر بر رفتار لوله‌های مدفون از جمله طول مهاری، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، زاویهٔ عبوری لوله و میزان جابه‌جایی گسل نرمال بررسی شده است. برای مدل‌سازی لوله و خاک اطراف آن، از مدل تیر- فنر غیرخطی و برای مدل‌سازی خاک نیز از شبیه‌سازی آن با فنرهای غیرخطی در سه جهت محوری، جانبی و عمودی استفاده شده است. پس از تعیین طول مهاری مناسب، تأثیر نوع خاک برحسب تغییر زاویهٔ اصطکاک بررسی شد که نتایج نشان داد با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، میزان کرنش بیشینه و مقادیر نیرو و لنگر افزایش می‌یابند. مقایسهٔ لنگر خمشی برای زوایای اصطکاک ۲۰ و ٤۰ درجه بیان‌گر افزایش حدود ۳۰ درصدی است. هم‌چنین نتایج نشان داد با افزایش زاویهٔ عبوری تا حدود ۵۵ درجه، مقادیر کرنش‌های بیشینه روند نزولی داشته و پس از آن کرنش بیشینه با افزایش زاویهٔ افقی افزایش می‌یابد که این میزان برای زاویهٔ افقی ۸۵ درجه ۲ برابر زاویه ۵۵ درجه است. با توجه به نتایج می‌توان اشاره کرد که با تغییر زاویهٔ عبوری لوله از گسل و انتخاب زاویهٔ مناسب عبوری می‌توان از به‌وجود آمدن کرنش‌های اضافی در لوله‌های مدفون، جلوگیری کرد. از این رو، با بهینه کردن عوامل تأثیرگذار بر رفتار لوله‌های مدفون عبوری از گسل می‌توان از خرابی لوله‌ها هنگام زمین‌لرزه جلوگیری به‌عمل آورد.

واژه‌های کلیدی: لوله‌های مدفون، اندرکنش خاک– لوله، تحلیل غیرخطی، جابه‌جایی گسل، زاویهٔ عبوری لوله

* **نویسنده مسئول** r.nouri@khu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

مقدمه

لوله‌های مدفون در جوامع مدرن از شریان‌های حیاتی به‌شمار می‌آیند و نقشی حیاتی و اساسی را در چرخه زندگی بشری ایفا می‌کنند. در ایران حدود سه هزار کیلومتر خط لولهٔ انتقال نفت و گاز وجود دارد که بـا احتسـاب خطوط لولهٔ بین چاه‌ها، مراکز جمع‌آوری و پالایشگاه‌ها حدود هفتاد هزار کیلومتر خواهد بود [۱]. با توجه به‌این‌که خطوط لوله در سطح وسیعی گسترش می‌یابند، از این رو، در اثر خطرهای گسلش، زمین لغزش، تغییرمکان‌های ناشی از روان‌گرایی، ترک‌های زمین و حرکت‌های شـدید زمـین دچـار آسیب‌دیدگی می‌گردند. فراهم‌آوری خدمت‌های مداوم و ایمن برای افراد جامعه، حفظ ایمنی محیط زیست و حفاظت از سرمایه‌گذاری‌های کلان، نیازمند طراحی شریان‌های حیاتی در برابر پدیده‌هایی چون زمین‌لرزه است. برای نیل به این هدف لازم است بارهای وارد بر خطوط لوله مدفون و منشأ آسیب‌پذیری آن‌ها شناسایی و با استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی، رفتار خطوط لوله مدفون در برابر بارهای وارده بررسی شود.

پس از زمین‌لرزه سن فرناندو (۱۹۷۱) مشاهده شد که آسیب‌پذیری لوله‌های با اتصال‌های صلب بیش‌تر از اتصال‌های شکل‌پذیر است. اغلب آسیب‌های وارده به لوله‌ها به سبب ارتعاش و شکست‌ها از نوع لهیدگی و خمشی در لوله و دررفتگی و شکست برشی در محل اتصال بوده است. هم‌چنین در محل گسل‌ها، شکست ناشی از کمانش نیز به وقوع پیوسته بود [۱]. در بررسی‌های پس از زلزله سانفرانسیسکو (۱۹۰٦) مشاهده شد که شدت خرابی لوله‌ها در اثر حرکت‌های گسل به‌مراتب بیش‌تر از خرابی ناشی از ارتعاش‌های زمین بوده است. در زمین‌لرزه آلاسکا (۱۹٦٤)، حرکت گسل‌ها و نشست‌های ناهم‌گون از عمده‌ترین دلایل شکست لوله‌ها گزارش شده است. پس از زمین‌لرزه گیلان (۱۳٦۹) بیش‌تر آسیب‌های وارد بر لوله‌ها به‌دلیل شکننده و ترد بودن لوله‌ها و قطع گسل‌های سطحی از طرف خط لوله تشخیص داده شد [۲].

در یکی از اولین تحقیقات انجام شده پیرامون لوله‌های عبوری از گسل، کندی و همکاران (۱۹۷۷) نیروهای جانبی اعمالی از جانب خاک به خط لوله را در نظر گرفتند. در این روش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در خط لوله منحصر به تغییر طول محوری است و از سختی خمشی لوله صرف‌نظر شده است. آن‌ها با اصلاح مدل‌های ابتدایی، منحنی تغییر شکل یافته خط لوله را با شعاع انحنای ثابت در نظر گرفتند. در این مدل، نیروهای اصطکاک طولی خاک در قسمت‌های مستقیم متفاوت از آن در نواحی نزدیک خط گسل در نظر گرفته می‌شود [۳]. هرچند مدل کندی و همکاران (۱۹۷۷) ارزشمند است، اما به‌دلیل صرف‌نظر کردن از سختی خمشی، خطای متنابهی را بر نتایج تحمیل می‌کند. وانگ و یاه (۱۹۸۵) با تصحیح مدل کندی تأثیر سختی خمشی را نیز بر پاسخ خط لوله در برابر حرکات گسل اضافه کردند. این پژوهش صرفاً حرکات امتدادی گسل را در بر می‌گرفت. مدل ارائه شدهٔ وانگ و یاه (۱۹۸۵) نسبت به مدل کندی و همکاران (۱۹۷۷) به‌دلیل در نظر گرفتن سختی خمشی منجر به نتایج مناسب‌تری می‌شود و لیکن این نتایج به‌دلیل ثابت انگاشتن انحنای خط لوله همراه با خطا است [٤]. چیو و همکاران (۱۹۹٤) به‌منظور رفع نقیصه مدل وانگ و یاه (۱۹۸۵) با استخراج معادلات دیفرانسیل توابع جابه‌جایی مقاطع لوله، انحنای خط لوله را متغیر فرض کردند. معادلات مذکور در صورت همراهی با معادلات تعادل تشکیل دستگاه معادلات دیفرانسیلی را می‌دهد که به روش‌های عددی قابل حل است [۵].

تاکادا و همکاران (۱۹۹۸) با در نظر گرفتن تغییر شکل مقطع لوله در اثر حرکات گسل، روشی جدید برای محاسبه بیشینه کرنش به‌وجود آمده در جداره لوله متقاطع با گسل ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از مدل تلفیقی تیر- پوسته برای خط لوله، خصوصیات غیرخطی مصالح و هندسی را در نظر گرفتند. مدل‌سازی بخشی از طول لوله که در نزدیکی خط گسل قرار داشت با استفاده از المان‌های پوسته‌ای و در نواحی دورتر از خط گسل با استفاده از المان تیر انجام شده است. مبنای روش ایشان استخراج رابطه میان کرنش بیشینه در جداره لوله و زاویهٔ خمش به‌وجود آمده در نقطه مفروضی از خط لوله در نزدیکی گسل است که موقعیت نقطه مذکور بر اساس روابط ارائه شده در روش کندی و همکاران (۱۹۷۷) به‌دست می‌آید [٦]. عبدون و همکاران (۲۰۰۹) آزمایش‌هایی برای بررسی پاسخ لوله به حرکت‌های گسل انجام داده‌اند. پژوهش آن‌ها شامل نتایج حاصل از پنج آزمایش سانتریفیوژ است که تأثیر پارامترهایی نظیر رطوبت خاک،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

عمق دفن نسبی، نرخ جابه‌جایی گسل و قطر لوله را بر لوله‌های پلی اتیلن با چگالی زیاد بررسی شده است. نتایج نشان داد که پاسخ لوله تحت اثر گسل راستا لغز از محتوای رطوبت خاک و نرخ جابه‌جایی گسل تأثیر نمی‌پذیرد، ولی عمق دفن نسبی و قطر لوله روی کرنش لوله تأثیرگذار است [۷]. در پژوهش‌های جوشی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون به بررسی پاسخ لوله تحت جابه‌جایی ناشی از گسل معکوس پرداخته شده است. نتایج پژوهش‌ها نشان داد در گسل‌های معکوس، انتخاب امتداد موازی با گسل می‌تواند موجب افزایش ظرفیت خط لوله شود. هم‌چنین استفاده از خاک دانه‌ای شل در اطراف لوله و انتخاب روکش صاف و سخت برای لوله موجب عمل‌کرد بهتر آن‌ها در جابه‌جایی‌های ناشی از گسل‌های معکوس می‌شود [۱۰] . وزوراس و همکاران (۲۰۱۰) نیز پاسخ خط لوله تحت جابه‌جایی ناشی از گسل‌های امتداد لغز را بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها زاویهٔ گسل و خط لوله فقط به‌صورت عمودی در نظر گرفته شده و با تغییر مشخصات خاک، پاسخ لوله را بررسی کرده‌اند [۱۱]. ساویدس و همکاران (۲۰۰۵) رفتار لوله تحت گسلش نرمال را با روش المان محدود تحلیل و نشان دادند که استفاده از روش کندی و همکاران (۱۹۷۷) در مقایسه با روش‌های المان محدود، مقادیر بیش‌تری برای کرنش محوری بیشینه به‌دست می‌آید [۱۲].

در *پژوهش‌های گذشته* به تحلیل کرنش‌ها و تلاش‌ها در طول لوله با بهره‌گیری از روش‌های مختلف پرداخته و هر یک به تناسب روش استفاده شده و فرضیات اعمال شده نتایج را ارائه کرده‌اند که به‌علت در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده کننده از دقت نتایج کاسته شده است. در این مقاله از روش آنالیز شبیه‌سازی حرکات سه‌بعدی گسل با اعمال جابه‌جایی‌های معین در پایه فنرهای غیرخطی بهره‌گیری شده است. روابط استفاده شده برای شبیه‌سازی فنرها با آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده‌اند که از روش‌های تحلیل مبتنی بر تئوری، دقیق‌تر است. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل مذکور و بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل طول مهاری لوله، میزان جابه‌جایی گسل، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و زاویهٔ عبوری لوله از گسل عادی، بررسی شده است. برای بررسی عوامل تأثیرگذار بر پاسخ لوله عبوری از گسل از روابط پیشنهادی راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون (ویرایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

۲۰۰۵) برای تطابق شرایط در نرم‌افزار با شرایط واقعی محیطی استفاده شده است. با توجه به‌این‌که در این راهنما از سیستم آحاد انگلیسی برای پارامترهای مختلف استفاده شده است، نتایج حاصل در این تحقیق نیز در سیستم آحاد انگلیسی ارائه شده است [۸].

مدل‌سازی سیستم لوله-خاک

برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و رفتار الاستو-پلاستیک لوله، مدل‌سازی لوله و محیط اطراف در نرم‌افزار المان محدود *ANSYS* انجام شده است. از جنبه‌های اساسی در مدل‌سازی لوله، توجه به منحنی مشخصه مصالح آن است که در این تحقیق منحنی تنش-کرنش مصالح لولهٔ مدفون به‌صورت سه خطی در نظر گرفته شده است. این منحنی متشکل از سه ناحیهٔ کشسان، نیمه‌خمیری و خمیری کامل است. در تمامی مدل‌ها از خصوصیات لوله *X65 API* استفاده شده است که در آن مدول الاستیسته لوله برابر با *ksi* ۳۰۰۰۰، تنش تسلیم *ksi* ٦٧/٥ و هم‌چنین تنش سخت‌شوندگی فولاد برابر با *ksi* ٧٤/٨ است که به‌ازای کرنش ٤٪ قابل دست‌یابی است.

برای مدل‌سازی خاک اطراف لوله مطابق پیشنهاد راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون، از فنر معادل در جهت‌های افقی، جانبی و قائم بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی، یک سر فنر به لوله متصل و سر دیگر آن با شرایط گیردار در نظر گرفته و جابه‌جایی‌های گسل نیز در سمت گیردار فنر اعمال شده است. از سری المان‌های موجود در نرم‌افزار *ANSYS*، المان *COMBIN 39* به‌منظور مدل‌سازی رفتارخاک انتخاب شده که یک المان غیرخطی است و با دو گره ابتدا و انتها تعریف می‌شود. این المان برای جابه‌جایی‌های بزرگ کاربرد داشته و در هر گره از المان امکان تعریف سه درجهٔ آزادی انتقالی وجود دارد. المان تیر استفاده شده در این تحقیق المان *PIPE20* است که در هر یک از گره‌های ابتدایی و انتهایی این المان سه درجهٔ آزادی انتقالی و سه درجهٔ آزادی چرخشی در نظر گرفته شده است. این المان توانایی در نظر گرفتن مشخصات غیرخطی هندسی و مصالح لوله را دارد. المان لوله به‌صورت چهار وجهی مش‌بندی شده و برای هر المان نیز سه فنر معادل برای مدل‌سازی خاک در نظر گرفته

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

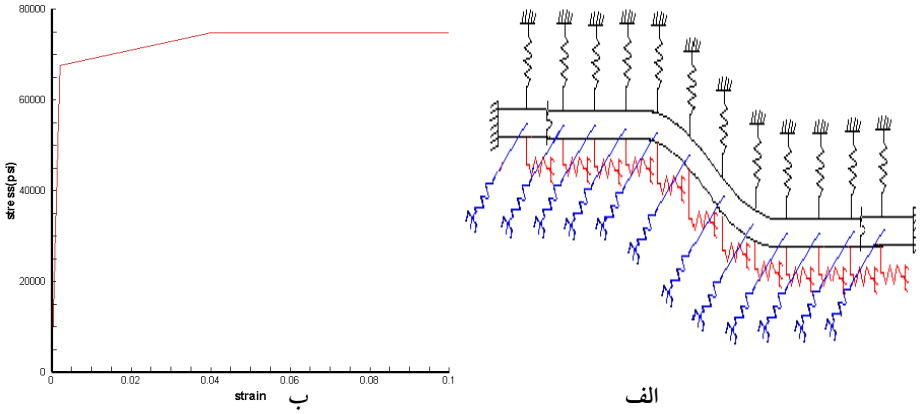
شده است. با تعیین سختی فنرها و مشخصات لوله، تحلیل غیرخطی برای محاسبه تنش‌ها، کرنش‌ها و نیروهای لوله انجام شده است. هم‌چنین از لحاظ مهاری نیز در دو انتها، لوله با تکیه‌گاه گیردار به‌صورت کامل مهار شده است. شکل ۱ الف و ب، به‌ترتیب شکل کلی مدل سیستم لوله-خاک و هم‌چنین رابطه تنش- کرنش مصالح لوله را نشان می‌دهد. با این فرض که خاک اطراف لوله هم‌سان باشد، نیروی عکس‌العمل خاک در برابر حرکت محوری و جانبی مستقل از جهت حرکت است. به‌عبارت دیگر فنرهای افقی و جانبی رفتار مشابهی در کشش و فشار از خود نشان می‌دهند ولی در جهت قائم خاک در کشش و فشار رفتار متفاوتی دارد. هم‌چنین عکس‌العمل خاک اطراف لوله نسبت به حرکت بالارونده لوله کم‌تر از عکس‌العمل آن نسبت به حرکت پائین‌رونده لوله است که نتایج به‌دست آمده از روابط (۲) تا (۵) در شکل ۲ نشان داده شده است. فعالیت گسل باعث جابه‌جایی زمین در جهات x, y و z به مقدار Δx و Δy و Δz شده که محور x به موازات خط لوله و مماس بر سطح زمین و حرکت‌های گسل با اعمال جابه‌جایی در پایه فنرها مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود. تصویر زاویهٔ تقاطع لوله با خط گسل در صفحات قائم و افق به‌ترتیب با نمادهای β و ψ نشان داده شده است. در این مقاله به پارامترهای مذکور به‌ترتیب مؤلفهٔ قائم و مؤلفهٔ افقی زاویه تقاطع گفته می‌شود که از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید:

$$\Delta=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2} \qquad \psi=tg^{-1}\left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right) \qquad \beta=tg^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (۱)$$

برای راستی آزمایی مدل از نمونه مثال راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون، که لوله‌ای با قطر ٤۸ اینچ، طول ۹۰۰ فوت، ضخامت ۰/٤٦۹ اینچ و عمق دفن ۳٦ اینچ در خاک ماسه‌ای با زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و جرم مخصوص ۱۰۰ پوند بر فوت مکعب است، استفاده شده است. نمودار کرنش حاصل از مدل المان محدود در طول لوله با نمودار موجود در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون مقایسه شده است که انطباق قابل قبولی بین دو منحنی وجود دارد (شکل ٤). نحوهٔ اعمال جابه‌جایی گسل در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون و این مطالعه به‌صورت تدریجی است، بدین معنی که جابه‌جایی با رشد یک اینچ اعمال و در پایان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

هر مرحله از جابه‌جایی برای عمود ماندن راستای فنرها بر محور لوله، مکان پایه فنرها اصلاح شده است. این روش در تحقیقات جوشی و همکاران (۲۰۱۱) نیز به‌کار گرفته شده است.



شکل ۱. الف) مدل عناصر محدود سیستم لوله–خاک، ب) نمودار تنش–کرنش مصالح لوله

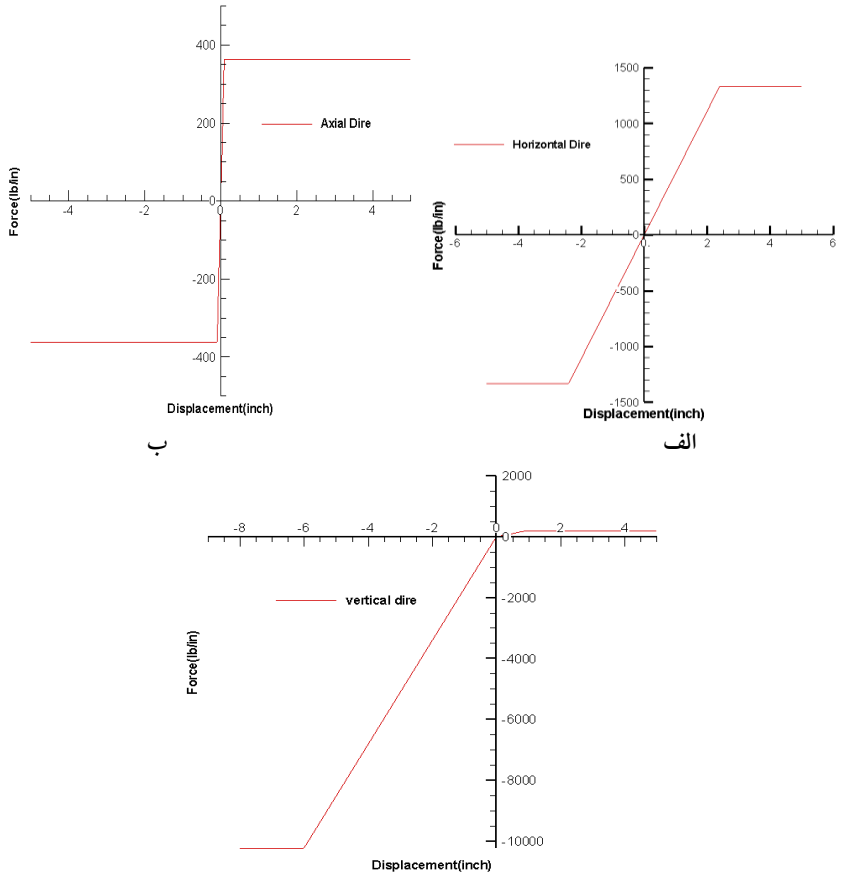
برای مدل‌سازی خاک اطراف لوله با فنر در راستای محوری که نشان‌دهندهٔ عکس‌العمل خاک در برابر جابه‌جایی لوله در راستای محور آن است، حداکثر بار نهایی فنر محوری t_u در معادلهٔ (۲) بیان می‌شود [۸].

$$t_u = \pi DH\bar{\gamma}\frac{1+k_0}{2}tg\,\delta + \pi D\alpha C \qquad (۲)$$

که در آن D، قطر خارجی لوله، C چسبندگی خاک، H فاصلهٔ قائم مرکز لوله تا سطح زمین، δ برابر با زاویهٔ اصطکاک سطحی بین خاک و لوله، $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص مؤثر خاک است. در رابطهٔ (۲) $\delta = f*\phi$ مقادیر f مطابق با پیشنهاد راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون به جنس لوله و سطح ظاهری آن وابسته است و هم‌چنین ϕ زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک است. ضریب α بر حسب ضریب چسبندگی خاک از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید:

$$\alpha = 0.608 - 0.123C - \frac{0.274}{C^2+1} + \frac{0.695}{C^3+1} \qquad (۳)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]



شکل ۲. الف) منحنی مشخصه فنرهای افقی، ب)منحنی مشخصه فنرهای محوری، ج) منحنی مشخصه فنرهای قائم

در روابط مذکور ضریب چسبندگی C برحسب پوند بر فوت مربع است و فرض بر این است که انتقال بار نهایی محوری به‌ازای جابه‌جایی نسبی Δ_{tu} رخ می‌دهد. مقادیر جابه‌جایی نسبی بر حسب نوع خاک در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون ارائه شده است. بار نهایی فنرهای جانبی P_u به‌ازای جابه‌جایی نسبی Δ_{pu} قابل حصول است که در رابطهٔ (٤) بیان می‌شود [۸] :

$$P_u = N_{ch}.C.D + N_{qh}.\bar{\gamma}.H.D \qquad (٤)$$

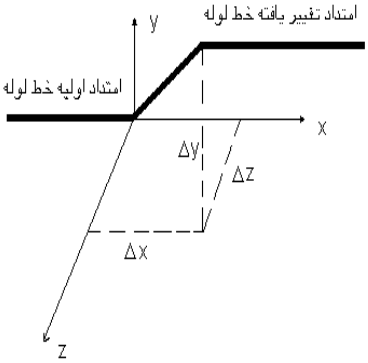
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

که در آن:

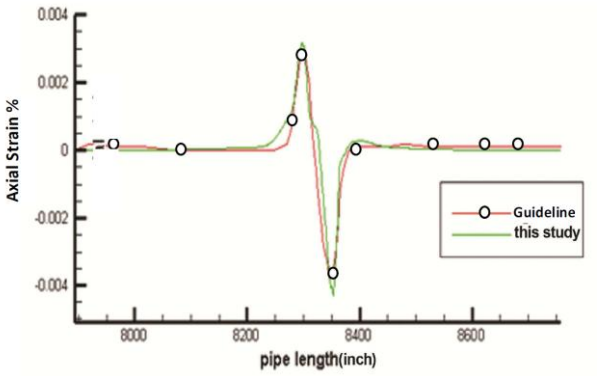
$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9.0$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

$$x = \frac{H}{D}$$



شکل ۳. نمای سه‌بعدی حرکات گسل



شکل٤. مقایسه کرنش در طول لوله برای مدل راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون با مدل المان محدود

ضرایب (a,b,c,d,e) و مقدار جابه‌جایی نسبی مورد نیاز (x) برای نیل به بار نهایی در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های فلزی مدفون ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

بر اساس تحقیقات انجام شده، فنرهای قائم در کشش و فشار به‌صورت متفاوت با یک‌دیگر عمل می‌کند، بنا بر این نیروی عکس‌العمل نهایی خاک در برابر حرکت پائین روندهٔ لوله برابر با q_d و در برابر حرکت بالاروندهٔ لوله برابر با q_u است که بار نهایی q_d به‌ازای جابه‌جایی نسبی Δ_{qd} و بار نهایی q_u به‌ازای جابه‌جایی نسبی Δ_{qu} نتیجه می‌شود. مقادیر پارامترهای تعریف شده از روابط (۵) و (٦) به‌دست می‌آید [۸]:

$$q_d = N_c CD + N_q \bar{\gamma} HD + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{2}$$

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)]\exp[\pi\, tg\,(\phi + 0.001)]tg^2\left(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}\right) \qquad (۵)$$

$$N_q = \exp(\pi\ tg\phi)tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$N_\gamma = e^{0.18\phi - 2.5}$$

$$q_u = N_{cv}.C.D + N_{qv}.\bar{\gamma}\, HD \qquad (٦)$$

$$N_{qv} = \frac{\phi H}{44D} \le N_q$$

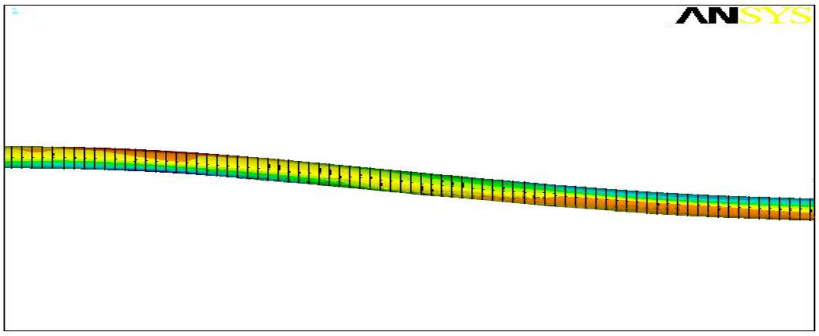
$$N_{cv} = 2\left(\frac{H}{D}\right) \le 10$$

در روابط مذکور، ϕ، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک بر حسب درجه است و مقادیر Δ_{qd} و Δ_{qu} در راهنما ارائه شده‌است. بر اساس روابط ارائه شده برای مدل‌سازی فنرها و نکات ذکر شده در مورد مدل‌سازی لوله به‌روش المان محدود، مدل‌سازی در نرم افزار انجام و نمونه‌ای از نتایج مدل آنالیز شده در شکل ۵ آورده شده است.

به‌طور نمونه محاسبهٔ سختی فنر معادل خاک در حالت حرکت بالارونده لوله برای خاک و لوله‌ای که در راستی آزمایی مدل استفاده شده است، به‌این شرح است. با توجه به رابطهٔ (٦) و مقادیر فرض شده $H=5\ ft$، $D=4\ ft$ و $\gamma = 1000\ {}^{lb}/_{ft^3}$ مقدار $\mathrm{N_{qv}} = 0.994$ به‌دست آمده و سپس مقدار نیروی نهایی $q_u = 1988\ {}^{lb}/_{ft}$ ، به‌دست می‌آید. با توجه به‌این‌که طبق پیوست B راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون برای ماسه چگالی متوسط، حداکثر نیرو تحت جابه‌جایی ۰٫۱ اینچ به‌دست می‌آید، با معلوم بودن جابه‌جایی و نیرو سختی فنر محاسبه و در نرم‌افزار استفاده می‌شود. توضیح این‌که در محاسبهٔ سختی هر فنر فرض شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

است که حداکثر نیرو تحت جابه‌جایی مشخص برای انواع خاک‌ها و فنرها به‌دست می‌آید. چنان‌که در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون اشاره شده است، مقادیر این جابه‌جایی در انواع حالت‌ها مشخص و محاسبه مقادیر حداکثر نیرو نیز بر اساس روابط(۲) تا (٦) است.



شکل ۵. کرنش محوری الاستیک موجود در لوله تحت جابه‌جایی ۳۰ اینچ گسل، زاویهٔ عبوری ۹۰، با مشخصات ذکر شده برای خاک و لوله در مدل راستی آزمایی

عوامل مؤثر بر پاسخ لوله

در اثر حرکت‌های بزرگ زمین، تنش ایجاد شده در خط لوله از حد تسلیم فراتر رفته و مصالح لوله وارد مرحلهٔ غیرخطی شده و در نتیجه استفاده از معیارهای غیرخطی مصالح و هندسی را ایجاب می‌کند. در حالت کلی حرکات گسل باعث به‌وجود آمدن نیروهای داخلی محوری، برشی، خمشی و پیچشی در خط لوله می‌شود. مقاومت لوله‌های مدفون در برابر حرکت‌های گسل به‌عوامل بسیاری وابسته است. از جمله این عوامل می‌توان به‌میزان جابه‌جایی و نوع گسل، زاویهٔ عبوری لوله از گسل، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و طول مهاری آن اشاره کرد که در ادامه به‌بررسی تأثیر ٤ مورد از پارامترهای اشاره شده می‌پردازیم. مشخصات لوله و خاک و هم‌چنین پارامترهای متغیر به شرح جدول ۱ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

جدول ۱. مشخصات لوله-خاک و پارامترهای متغیر

زوایای افقی و قائم عبوری از گسل (درجه)	میزان جابه‌جایی (اینچ)	زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک(درجه)	وزن مخصوص خاک (پوند بر فوت مکعب)	عمق دفن (اینچ)	طول لوله (فوت)	قطر لوله (اینچ)	ضخامت لوله (اینچ)
۵، ۲۵، ٤۰، ۵۵، ۷۰ و ۸۵	۱۰۰،۸۰،۷۰،٦۰،۵۰،٤۰،۳۰،۲۰، ۱۲۰و ۱۳۵	٤۰،۳۰،۲۵،۲۰	۳۰	۳٦	۹۰۰	٤۸	۰/٤٦۹

۱. طول مهار شدهٔ لوله

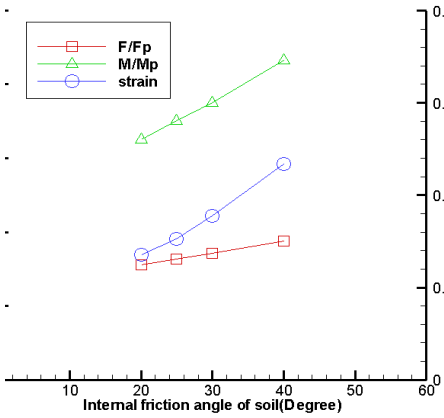
یکی از عوامل مؤثر بر پاسخ لوله به حرکت‌های گسل، طول مهاری آن در طرفین گسل است که در عمل این طول می‌تواند با موقعیت خم‌های خط لوله، سه‌راهی‌ها و پی‌هایی که به‌صورت گیردار به خط لوله متصل شده است، تحت تأثیر قرار گیرد. طول مهاری در مدل‌های کندی و همکاران [۳]، وانگ و یاه [٤]، چیو و همکاران [۵]، هر کدام به‌یک میزان مشخص در نظر گرفته شده است. تاکادا و همکاران [٦]، نتایج تحقیق خود را به‌ازای طول کوتاهی از مدل ارائه کرده‌اند و در نتیجه از تأثیر طول مهاری بر پاسخ لوله که در برخی موارد بسیار چشم‌گیر است، صرف‌نظر کرده‌اند. در این مقاله برای بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار لوله‌ها، ابتدا طول مهاری مؤثر یعنی طولی از لوله که پاسخ، تابعی از آن نباشد، تعیین شده است. به‌این منظور تغییرات کرنش بیشینه برای لوله‌های با طول‌های متفاوت محاسبه و ترسیم شده است. بر اساس شکل ٦ مشاهده می‌شود تغییرات کرنش بیشینه در لوله‌های با طول کوتاه تابعی از طولاست اما با افزایش طول لوله میزان پاسخ نیز کاهش و بعد از طول معینی پاسخ تابعی از طول نخواهد بود. براساس نمودار، طول ۵۰۰ فوت به‌عنوان طول مؤثر به‌دست آمده است که برای اطمینان در مدل‌ها از طول ۹۰۰ فوت استفاده شده است.

۲. زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک

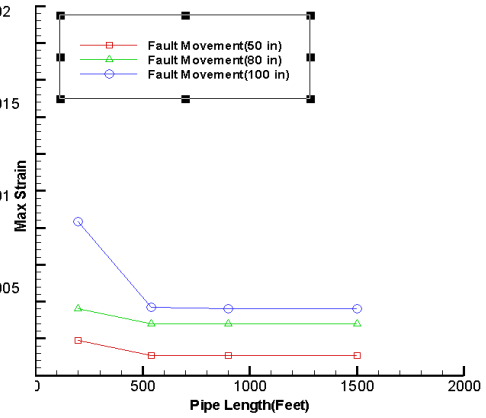
از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر پاسخ لوله، نوع خاک اطراف لوله و زاویهٔ اصطکاک داخلی آن است. بر اساس روابط ارائه شده در راهنمای طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک تأثیر مستقیمی بر مقادیر نیروهای اندرکنشی دارد و با افزایش زاویهٔ اصطکاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

داخلی، نیروهای اعمالی از جانب خاک به لوله بیش‌تر و هم‌چنین سختی فنرهای جانبی نیز افزایش می‌یابد. چنان‌که در شکل ۷ نشان داده شده افزایش نیروهای اندرکنشی بر افزایش سختی برتری داشته و با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی مقادیر کرنش بیشینه، نیرو و لنگر نرمال شده نیز افزایش می‌یابد. مقایسهٔ لنگر خمشی نرمال شده برای زوایای اصطکاک ۲۰ و ٤۰ درجه بیان‌گر افزایش حدود ۳۰ درصدی است. هم‌چنین میزان کرنش بیشینه در این حالت حدود ۱۰۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. توجه به روابط راهنمای طرح لرزه‌ای نشان می‌دهد که میزان تغییرات نیروهای فنرهای قائم و جانبی ناشی از تغییر در زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک به‌مراتب بیش‌تر از تغییر در نیروی فنرهای افقی است. بنا بر این تغییر زاویهٔ اصطکاک داخلی برای تغییرات نیروی محوری تأثیر کم‌تری در مقایسه با کرنش بیشینه و لنگر دارد.



شکل ۷. پاسخ لوله به حرکات گسل بر حسب زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک



شکل ٦. تغییرات کرنش بیشینه بر حسب جابه‌جایی‌های مختلف گسل در طول لوله

۳. جابه‌جایی گسل

عامل دیگری که در پاسخ لوله به حرکت‌های گسل بسیار مؤثر است، میزان جابه‌جایی گسل است. تغییرات لنگر خمشی بیشینه موجود در مقطع لوله نسبت به‌جابه‌جایی گسل در تحقیقات نیومارک و هال (۱۹۷۵)، کندی و همکاران (۱۹۷۷) و وانگ و یاه (۱۹۸۵) رفتارهای متفاوتی را نشان داده است. در مدل نیومارک و هال (۱۹۷۵) [۹] کرنش بیشینه در خط لوله

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

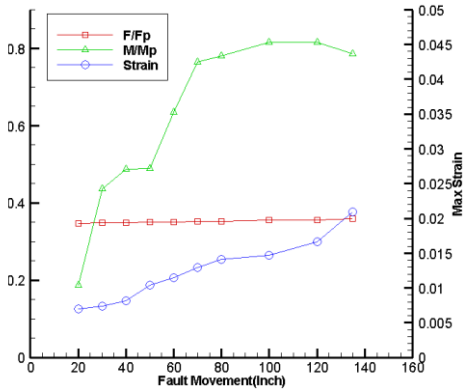
تنها ناشی از نیروی محوری به‌وجود آمده در مقطع لوله در اثر حرکات گسل در نظر گرفته شده است. کندی و همکاران (۱۹۷۷) از سختی خمشی لوله صرف‌نظرکرده و کرنش بیشینه به‌وجود آمده در خط لوله را ترکیبی از کرنش محوری و کرنش خمشی ناشی از انحنای خط لوله در نزدیکی گسل دانستند. در مدل‌های این مقاله همهٔ نیروهای وارد بر لوله و هم‌چنین سختی محوری، خمشی و پیچشی لوله نیز در نظر گرفته شده است. براساس نمودار شکل ۸ کرنش بیشینه در لوله با افزایش جابه‌جایی گسل روندی افزایشی دارد به‌طوری‌که با افزایش میزان جابه‌جایی گسل از ۲۰ به ۱٤۰ اینچ میزان کرنش ۱۹۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین نیروی محوری با افزایش میزان جابه‌جایی گسل تقریباً مقدار ثابتی دارد که نشان می‌دهد نیروی محوری در لوله از افزایش جابه‌جایی گسل تأثیر چندانی نمی‌پذیرد. بررسی تغییرات مقادیر لنگر خمشی بیان‌گر این است که لنگر خمشی ابتدا افزایش و سپس در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر روند کاهشی دارد. مقایسهٔ لنگر نرمال شده در جابه‌جایی ۲۰ و ۱٤۰ اینچ نشان از افزایش ۲/۷۵ برابری دارد.

٤. زوایهٔ عبوری لوله از گسل

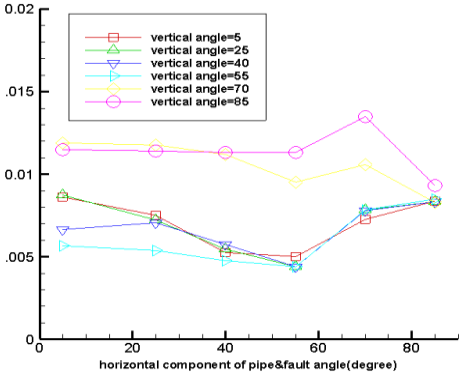
زاویهٔ عبوری لوله از گسل از دیگر عوامل مؤثر در پاسخ لوله است. برای یافتن زاویهٔ عبوری مناسب، ترکیبی از زاویه‌های افقی و قائم بررسی شده است. شکل ۹ تغییرات کرنش بیشینه را در طول لوله بر حسب تغییرات مؤلفهٔ افقی زاویهٔ عبور لوله از گسل با ثابت نگه داشتن مؤلفهٔ قائم زاویهٔ عبوری نشان می‌دهد. نتایج بیان‌گر آن است که در زوایای قائم کم‌تر از ۵۵ درجه با تغییر زاویهٔ افقی تا حدود ۵۵ درجه میزان کرنش بیشینه لوله مدفون روند کاهشی داشته و پس از زاویهٔ افقی ۵۵ درجه با افزایش زاویهٔ افقی، کرنش نیز افزایش می‌یابد که این افزایش در زاویهٔ ۸۵ درجه در مقایسه با زاویهٔ ۵۵ درجه حدود دو برابر خواهد بود. هم‌چنین با افزایش مؤلفهٔ قائم زاویهٔ عبوری (زوایای قائم ۷۰ و ۸۵ درجه) افزایش چشم‌گیری در کرنش بیشینه حتی در زوایای افقی کم مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه این است که در زاویه‌های قائم ۷۰ و ۸۵ درجه با افزایش زاویهٔ افقی تا حدود ۵۵ درجه میزان کرنش بیشینه ثابت مانده و بعد از آن تا زاویهٔ افقی ۷۰ درجه روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. با توجه به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

نتایج می‌توان گفت تعیین زاویهٔ عبوری مناسب در طراحی و اجرای لوله‌های مدفون بسیار حائز اهمیت است. با توجه به زوایای مختلف که در این تحلیل به‌کار گرفته شده است. زاویهٔ افقی حدود ۵۵ درجه و زاویهٔ قائم ۵ تا ۵۵ درجه کم‌ترین کرنش بیشینه را دارند.



شکل ۸. تغییرات کرنش بیشینه، لنگر خمشی و نیروی محوری بر حسب میزان جابه‌جایی گسل



شکل ۹. تغییرات کرنش بیشینه بر حسب مؤلفهٔ افقی و قائم زاویهٔ عبوری از گسل

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله زاویهٔ عبوری لوله از گسل، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و میزان گسلش بر پاسخ غیرخطی لوله‌های مدفون با استفاده از تحلیل المان محدود بررسی شده است. مدل‌سازی خاک با استفاده از روابط موجود در راهنمای طرح لرزهای لوله‌های مدفون و با به‌کارگیری فنر معادل در سه امتداد انجام و جابه‌جایی گسل نیز با اعمال جابه‌جایی در پایه فنرهای معادل شبیه‌سازی شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی از ۲۰ به ٤۰ درجه موجب افزایش ۱۰ ٠درصدی کرنش بیشینه در خط لوله می‌شود. هم‌چنین با افزایش این پارامتر نیروی‌های اندرکنشی حاصل از فشار خاک اطراف لوله افزایش یافته و مقادیر نیرو و لنگر نرمال شده نیز افزایش می‌یابند. مقایسهٔ لنگر خمشی نرمال شده برای زوایای اصطکاک ۲۰ و ٤۰ درجه بیان‌گر افزایش حدود ۳۰ درصدی است. به‌طوری‌که با افزایش میزان جابه‌جایی گسل از ۲۰ به ۱٤۰ اینچ میزان کرنش ۱۹۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

بر اساس نتایج می‌توان گفت افزایش جابه‌جایی گسل از ۲۰ به ۱٤۰ اینچ موجب افزایش ۱۹۰ درصدی کرنش‌ها در لوله می‌گردد ولی تأثیر چندانی در مقدار نیروی محوری ندارد. هم‌چنین بررسی تأثیر زاویهٔ تقاطع لوله با گسل که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار پاسخ لوله در هنگام وقوع زمین‌لرزه است، با ثابت نگه داشتن مؤلفهٔ قائم زاویهٔ عبوری در زوایای کم‌تر از ۵۵ درجه با افزایش زاویهٔ افقی تا حدود ۵۵ درجه، میزان کرنش‌های بیشینه روند کاهشی داشته و پس از آن، کرنش بیشینه افزایش می‌یابد. براساس نتایج، میزان کرنش بیشینه در زاویهٔ افقی ۸۵ درجه ۲ برابر مقدار آن در زاویه ۵۵ درجه است. با بررسی زاویه‌های ختلف برای تقاطع لوله با گسل، زاویهٔ بحرانی دارای بیش‌ترین مقدار کرنش مشخص شده و ضروری است در طراحی و اجرای مسیرهای لوله‌های مدفون عبوری از گسل از این زوایا اجتناب گردد.

از راهکارهای اساسی مقابله با تأثیرات مخرب گسل بر خطوط لوله مدفون کاهش مقدار نیروهای اندرکنشی لوله- خاک است. توصیه می‌شود در نواحی نزدیک پهنهٔ گسل از خاک‌های شل تا نیمه متراکم استفاده شود زیرا کاهش وزن مخصوص و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک باعث کاهش نیروهای اندرکنشی خاک- لوله و در نتیجه موجب افزایش مقاومت خط لوله به حرکات گسل می‌شود. این نتیجه با پژوهش‌های جوشی و همکاران (۲۰۱۱) سازگار است.

۵. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
	فوت	جابه‌جایی افقی
	فوت	جابه‌جایی جانبی
	فوت	جابه‌جایی قائم
D	فوت	قطر خارجی لوله
C	پوند بر فوت مربع	چسبندگی خاک
H	فوت	فاصله قائم مرکز لوله تا سطح زمین
δ	درجه	زاویه اصطکاک خاک با لوله
$\overline{\gamma}$	پوند بر فوت مکعب	وزن مخصوص مؤثر خاک
f		ضریب وابسته به جنس لوله
t_u	پوند	بار نهایی فنر محوری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

نماد		واحد	شرح
Δ_{tu}			جابه‌جایی نسبی
q_d		پوند	بار نهایی فنر جانبی
Δ_{pu}			جابه جایی نسبی
q_u		پوند	بار نهایی کششی فنر قائم
Δ_{qd}		پوند	بار نهایی فشاری فنر قائم
Δ_{qu}			جابه‌جایی نسبی
			جابه‌جایی نسبی

منابع

۱. بیات ح.، شکیب ح.، *تحلیل و طرح لرزه‌ای لوله‌های مدفون*، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۳).

۲. زلزله منجیل–رودبار ۳۱ خرداد– ۱۳۶۹.، گزارش تحلیلی شماره یک، تهران، مؤسسهٔ بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷۰).

3. Kennedy R., Chow A., Wlliam R., "Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline", Transport Engineering Journal, ASCE, 103 (1977) 617-633.

4. Wang L., Yeh Y., "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13 (1985) 75-96.

5. Chiou Y., Chi S., Chang H., "A study on buried pipeline response to fault movement", Pressure Vessel Technology, ASME, 116 (1994) 36-41.

6. Takada S., Liang J., Li T., "Shell-mode response of buried pipelines to large fault movements", Structural engineering, JSCE, 44A (1998) 1637-1646.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]

7. Abdoun T., Da ha A., O'Rourke M., Symans M., O'Rourke T., Palmer M., Harry E., Stewart B., "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake Faulting", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29 (3) (2010) 415-427.
8. "American Lifelines Alliance-ASCE", Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe (2005).
9. Newmark N., Hall W., "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement", Proceedings of U.S National Conference on Earthquake Engineering, University of Michigan (1975) 416-425.
10. Joshi S., Prashant A., Deb A., Jain S.K., "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (2011) 930-940.
11. Vazouras p., Karamanos s., Dakoulas P., "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30 (2010)1361-1376.
12 Savidis S., Schepers W., Nomikos S., Papadakos G., "Design of a Natural Gas Pipeline Subjected to Permanent Ground Deformation at Normal Faults: A Parametric Study on Numerical vs", Semi-Analytical Procedures . 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago, Chile (2011).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.8.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3051]