

طول فعال خطوط لوله‌ی انتقال گاز در برابر زمین‌لغزش

سهیل هممتی (دانشجوی دکتری)

اکبر وانفی* (دانشیار)

پژوهشکده‌ی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۲/۱، ص. ۳-۱۵، (پژوهشی)

در صورت رخداد زمین‌لغزش در محل عبور خط لوله‌ی انتقال گاز، تغییرشکل لوله و خاک اطراف آن اجتناب‌ناپذیر است. طولی که از خط لوله که در اثر تغییرشکل‌های زمین جابه‌جا می‌شود، طول فعال نام دارد؛ که مجموع طول‌های مهاری به علاوه‌ی عرض زمین‌لغزش است. در پژوهش حاضر، طول مهاری خط لوله تحت اثر زمین‌لغزش و مقایسه‌ی آن با روابط آیین‌نامه‌یی مطالعه شده است. با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ANSYS و در نظر گرفتن زاویه‌ی قرارگیری خط لوله‌یی به طول ۱۵۰ متر عمود بر جهت رانش، طول مهاری برای ۴ قطر مختلف لوله تحت فشارهای داخلی متفاوت در دو نوع خاک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند طول مهاری براساس آیین‌نامه‌های طراحی، به دلیل تخمین کم نیروی محوری ایجاد شده در مقطع لوله، ۳۵٪ کمتر از طول مهاری حاصل از تحلیل بوده و رابطه‌ی جایگزینی برای آن پیشنهاد شده است که میانگین خطای آن نسبت به نتایج تحلیل، ۴٪ است.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، خط لوله‌ی انتقال گاز، طول فعال، طول مهاری، شکست، تحلیل اجزاء محدود.

۱. مقدمه

خطوط لوله‌ی انتقال گاز، نقش بسیار مهمی در زندگی بشر دارند و به دلیل همین نقش پر رنگ آن‌ها در جامعه، جزء شریان‌های حیاتی شمرده می‌شوند. با توجه به اینکه خطوط لوله‌ی انتقال گاز در سطوح وسیعی گسترش می‌یابند، لذا در اثر خطراتی مانند: گسلش، زمین‌لغزش، نشست، تغییر مکان‌های ناشی از روان‌گرایی و تحریک‌های لرزه‌یی، دچار آسیب می‌شوند و خسارت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی به بار می‌آورند. تأثیر زمین‌لغزش در شبکه‌ی انتقال گاز می‌تواند بسیار نامطلوب و پراکنده باشد. رخداد اختلالی طولانی‌مدت در خط لوله‌ی انتقال گاز ناشی از زمین‌لغزش می‌تواند پیامدهای اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم به صورت محلی و سراسری با توجه به موقعیت قرارگیری شبکه‌ی انتقال گاز داشته باشد. آمار تعداد کاربران شبکه‌ی گاز که دچار اختلال در خدمات و وقفه‌ی زمانی بعد از وقوع زمین‌لغزش شده‌اند را می‌توان در گزارش‌های مختلف مشاهده کرد.^[۱]

زمین‌لغزش معمولاً با حرکت‌های بزرگ زمین همراه است که باعث تغییرشکل قابل توجه خط لوله و خاک اطراف آن می‌شود. جابه‌جایی توده‌ی خاک در اثر لغزش، موجب جابه‌جایی خط لوله و ایجاد تنش در آن می‌شود؛ که با افزایش ابعاد زمین‌لغزش و یا افزایش جابه‌جایی، نیروی وارده به خط لوله افزایش می‌یابد و منجر به آسیب دیدگی خط لوله‌ی انتقال گاز می‌شود.^[۲] مطالعات مختلف نشان می‌دهند

* نویسنده مسئول

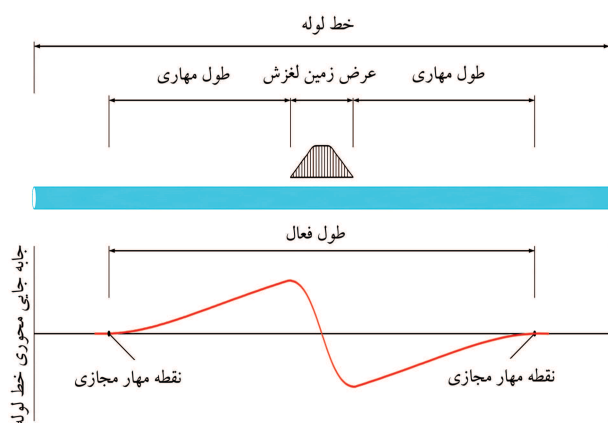
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۲، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۹.

DOI:10.24200/J30.2022.59429.3049

soheil.hemmati@stu.iiees.ac.ir
vasseghi@iiees.ac.ir

که زمین‌لغزش در آمار خرابی خطوط لوله‌ی گاز در سراسر جهان سهم بالایی داشته است. براساس گزارش گروه حوادث خط لوله‌ی گاز اروپا^۱، در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳، سهم زمین‌لغزش از حوادث رویداده در خطوط لوله‌ی انتقال گاز تحت اثر تغییرشکل‌های دائمی زمین^۲، ۸۵٪ و از کل حوادث رخ داده در خطوط لوله‌ی انتقال گاز، حدود ۱۱٪ بوده است.^[۳] همچنین گزارش شده است که حدود ۵۰٪ از خرابی‌های خطوط لوله‌ی انتقال گاز در رشته‌کوه‌های آند در آمریکای جنوبی ناشی از رانش زمین است.^[۴] کشورهای زیادی در سال‌های گذشته تحت خسارت‌های متعددی در اثر خرابی خطوط لوله‌ی انتقال گاز عبوری از مناطق مستعد زمین‌لغزش قرار گرفته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به انفجار خط لوله‌ی گاز ۲۴ اینچ در کشور آرژانتین در سال ۲۰۱۰ و خط لوله‌ی گاز ۱۴ اینچ در کشور پرو بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ اشاره کرد.^[۵]

زمین‌لغزش‌ها انواع مختلف دارند که برحسب عوامل مختلفی، مانند حرکت، نیروی جاذبه، زلزله، راه‌سازی، باران یا فشار منفذی سیال‌ها، سبک‌سازی توده‌ی پایین دست و بسیاری عوامل دیگر رخ می‌دهند. طبقه‌بندی‌های متفاوتی برای زمین‌لغزش‌ها ارائه شده است. وارنز^۳ (۱۹۷۸)، نوعی طبقه‌بندی برای زمین‌لغزش‌ها ارائه کرده است که علاوه بر سادگی، براساس ویژگی‌هایی استوار است که پس از وقوع یک زمین‌لغزش نیز حفظ و با گذشت زمان، کمتر دستخوش تغییر می‌شود و از این رو به عنوان ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع دسته‌بندی زمین‌لغزش‌ها در سراسر دنیا به کار رفته است.^[۶] طبقه‌بندی اخیر بر دو مبنای: الف) نوع حرکت توده، و ب) نوع مصالح درگیر در

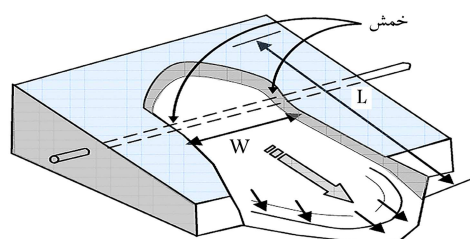


شکل ۲. طول فعال و مهار خط لوله.

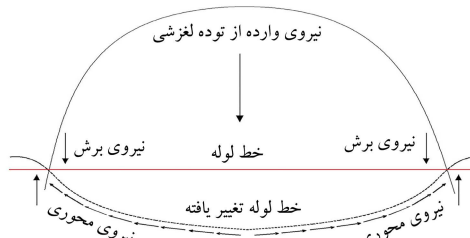
است. هدف پژوهش حاضر، تعیین طولی از خط لوله است که تحت تأثیر زمین لغزش قرار گرفته و نیز ارائه‌ی رابطه‌ی برای طول فعال خط لوله مبتنی بر مطالعات تحلیلی است که تاکنون در مطالعه‌ی به آن پرداخته نشده است. به منظور نیل به هدف مذکور، با فرض زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ی عمود بر جهت رانش زمین، به کمک روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ANSYS، تحلیل برای خط لوله‌ی به طول ۱۵۰۰ متر با در نظر گرفتن چهار قطر لوله‌ی: ۱۲، ۲۰، ۳۰ و ۴۸ اینچ تحت فشارهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ (psi) و حالت بدون فشار در عمق دفن (از سطح خاک تا روی لوله) ۱/۲۰ متر انجام شده است.

۲. مروری بر مطالعات انجام شده

با توجه به اینکه گزارش‌های متعدد نشان می‌دهند که طول فعال خط لوله‌ی انتقال هنگام رانش زمین مستعد آسیب است، لذا منطقه‌ی ذکر شده در زمان طراحی و اجرا، باید کنترل ویژه‌ی شود. دقت بالا در جوشکاری، قرار نگرفتن تجهیزات کنترل و بهره‌برداری، نداشتن خم در لوله، قرار نگرفتن اتصالات و ... از مواردی است که باید در طول فعال خط لوله مورد توجه قرار گیرد، تا در زمان حادثه، خط لوله‌ی گاز دچار آسیب بیشتر از محدودیت‌های آیین‌نامه‌ی نشود. زمین‌لغزش سال ۲۰۰۸ در کشور ونزوئلا که منجر به نشت گاز و آتش‌سوزی در منطقه‌ی کوهستانی شده است، به علت کیفیت پایین جوش در طول فعال خط لوله بوده است.^[۵] مطالعه‌ی لی^۸ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۱] به موارد متعددی از خرابی خط لوله‌ی انتقال گاز در محدوده‌ی طول فعال تحت اثر زمین‌لغزش اشاره می‌کند. درخصوص تعیین طول فعال و طول مهار خط لوله، مطالعات تحلیلی مختلفی انجام شده است که عمده‌ی آن‌ها تحت اثر گسلش بوده است. در مدل‌کنی^۹ و همکاران (۱۹۷۷)،^[۱۲] که به بررسی خط لوله در برابر گسلش پرداخته‌اند، با فرض مقداری بلند برای طول مهار نتیجه‌گیری کرده‌اند که طول مهار وابسته به زاویه‌ی بین خط لوله و گسل است. در مطالعه‌ی وانگ و یاه^{۱۰} (۱۹۸۵)،^[۱۳] و چپو^{۱۱} و همکاران (۱۹۹۴)،^[۱۴] با در نظر گرفتن یک میزان مشخص برای طول مهار، پیشنهاد شده است که طول مهار باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا پاسخ خط لوله تحت تأثیر طول آن قرار نگیرد. لیو و اورورک (۱۹۹۷)،^[۱۵] به بررسی طول مهار در خط لوله برای حالت‌های مختلف تغییر شکل دائمی زمین پرداخته و درخصوص زمین‌لغزش عنوان کرده‌اند که طول خط لوله در مدل باید دست‌کم ۴۰۰ متر انتخاب شود، تا پاسخ‌ها تابعی از آن نباشند. ضمناً آنان محل نقطه‌ی مهار مجازی را جایی فرض کرده‌اند که تنش



الف) نیروی خمشی در ابتدا و انتهای زمین لغزش؛



ب) نیروی محوری و برشی ایجاد شده.

شکل ۱. نیروهای وارد بر خط لوله تحت اثر زمین‌لغزش.^[۹]

حرکت استوار است. ایشان پنج نوع حرکت توده‌ی، شامل: سقوط، واژگونی، لغزش (دورانی و انتقالی)، گسترش جانبی و روانه‌ها را بیان کرده است که هر یک بسته به نوع مصالح، به سه دسته خاک: ریزدانه، درشت‌دانه (واریزه) و سنگ تقسیم‌بندی می‌شوند.^[۷] آرورک و لیو^۴ (۲۰۱۲)، اظهار داشته‌اند بیشترین موارد خسارت به خطوط لوله‌ی انتقال از ناحیه‌ی زمین‌لغزش‌هایی با نوع حرکت لغزشی و گسترش جانبی بوده است.^[۸]

شناخت مکانیزم نیروهای وارد بر خط لوله از اصلی‌ترین موارد در شناخت آسیب خط لوله‌ی انتقال در برابر زمین‌لغزش است. در شکل ۱، نیروی وارد بر خط لوله‌ی عمود بر جهت رانش زمین مشاهده می‌شود که مطابق آن در ابتدا و انتهای زمین‌لغزش، لنگر خمشی وجود دارد. لنگر خمشی ذکر شده ناشی از نیروی برشی است که از دو سمت خاک به خط لوله وارد می‌شود.^[۹] ضمن آنکه نیروی محوری ناشی از اصطکاک بین خاک و خط لوله نیز در داخل خط لوله ایجاد می‌شود. نیروی مذکور وابسته به قطر لوله، ضخامت جداره‌ی آن و جنس مصالح لوله است. در لوله‌های مدفون، بخش اعظم لوله توسط خاک مهار می‌شود و طول قابل توجهی از خط لوله نسبت به عرض زمین‌لغزش، در اثر جابه‌جایی زمین حرکت می‌کند، که باعث فعال شدن اصطکاک بین خاک و خط لوله می‌شود. اگر نیروی اصطکاک در طول لوله برای مقابله با جابه‌جایی کافی باشد، حرکت خود به خود متوقف می‌شود. طولی از خط لوله که در آن جابه‌جایی اتفاق می‌افتد، طول فعال نام دارد. به نقطه‌ی که در اثر اصطکاک با خاک، جابه‌جایی مذکور صفر می‌شود، نقطه‌ی مهار مجازی^۵ گفته می‌شود. در واقع، طول فعال همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی مهار مجازی است، که مجموع دو طول مهار به اضافه‌ی عرض زمین‌لغزش است. طول مهار^۶ (L) در خط لوله، به طولی از لوله‌ی مدفون، که تحت اثر زمین‌لغزش نسبت به خاک حرکت می‌کند، گفته می‌شود.^[۱۰] تعیین مقدار عددی طول فعال کمک زیادی به مهندسان فعال در حوزه‌ی طراحی و اجرای خطوط لوله‌ی انتقال گاز می‌کند، تا تمهیدات لازم را جهت کاهش آسیب به‌کار گیرند.

در مطالعه‌ی حاضر، به کمک روش اجزاء محدود و بکارگیری مدل تیر و فنر وینکار^۷، طول مهار خط لوله‌ی انتقال گاز و عوامل مرتبط با آن، نظیر: قطر لوله، مقاومت لوله، نوع خاک، و فشار گاز داخل لوله تحت اثر زمین‌لغزش بررسی شده

۳. مدل سازی عددی

۱.۳. فرضیات مدل سازی زمین لغزش

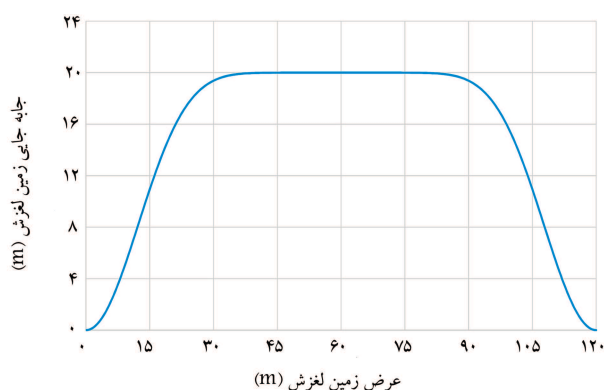
با بررسی نتایج به دست آمده از زمین لغزش های اتفاق افتاده براساس طبقه بندی متحد^[۱۶] زمین لغزش تا حجم ۲۰۰۰ مترمکعب جزء زمین لغزش کوچک، تا ۳۵۰۰۰ مترمکعب جزء زمین لغزش متوسط و تا ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب جزء زمین لغزش بزرگ در نظر گرفته می شود. درخصوص میزان جابه جایی زمین لغزش، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. پژوهشگران از توابع تجربی مختلفی برای بیان پیشینه جابه جایی جانبی زمین به عنوان شرایط مرزی در تحلیل های خود استفاده کرده اند. به عنوان مثال، ارورک (۱۹۸۸)^[۲۴] تابع چگالی احتمال بتا را برای تغییر شکل تقریبی خاک پیشنهاد کرده است. همچنین ارورک (۱۹۸۹)^[۲۵] تابع کسینوسی را برای پیشینه جابه جایی جانبی زمین در نظر گرفته است. سوزوکی^{۱۷} و همکاران (۱۹۸۸)^[۲۶] پیشینه جابه جایی جانبی زمین را به صورت تابع کسینوسی به توان n به صورت رابطه ۱ پیشنهاد کرده اند که در آن، $y(x)$ جابه جایی به عنوان تابعی از x در محدوده لغزش، x فاصله در منطقه تغییر شکل، δ مقدار جابه جایی، W_s عرض زمین لغزش و n عددی صحیح و مثبت است.

$$y(x) = \delta \left[1 - \left(\cos \frac{\pi x}{W_s} \right)^n \right] \quad (1)$$

آیین نامه ی PRCI^[۱۰] نیز رابطه ی ۱ را به عنوان الگوی جابه جایی زمین تحت اثر زمین لغزش پیشنهاد کرده است. با فرض عرض زمین لغزش برابر ۱۲ متر، پیشینه جابه جایی جانبی ۲۰ متر و $n = ۱۰$ جابه جایی زمین طبق شکل ۳ است. عرض ۱۲ متر زمین لغزش طبق روابط ارائه شده در مطالعه ی دومج^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۰)^[۲۷] معادل با توده یی به حجم ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب بوده و جزء زمین لغزش های بزرگ دسته بندی می شود.

۲.۳. مشخصات خاک، مصالح لوله

برای مدل سازی، چهار قطر لوله ی: ۱۲، ۲۰، ۳۰ و ۴۸ اینچ در عمق دفن ۱/۲۰ متری در نظر گرفته شده اند. پس از کارگذاری لوله، دور لوله با ماسه ی نرم و سپس با خاک حاصل از حفاری پر شده است. دو نوع خاک نرم (رس نرم^{۱۹}) و سخت (ماسه ی متراکم^{۲۰}) در نظر گرفته شده است که در جدول ۱، خصوصیات خاک های مذکور و ماسه ی نرم استفاده شده برای پرکردن کانال حفاری شده ارائه



شکل ۳. میزان جابه جایی جانبی زمین در مسیر خط لوله در اثر زمین لغزش.

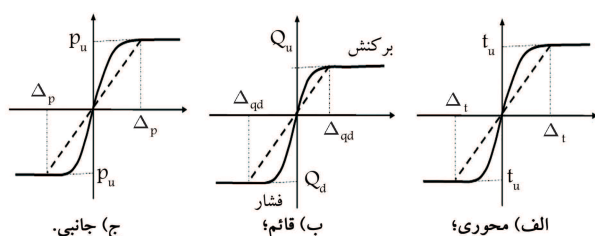
خمشی مقطع لوله کمتر از $10^{-5} \times 1$ باشد. اوروک و لیو (۲۰۱۲)^[۸] در ادامه ی مطالعات خود درخصوص خطوط لوله ی مدفون در برابر حرکت های زمین اعلام کرده اند که تنش ها و کرنش ها در محل نقطه ی مهار مجازی، باید مقداری نزدیک به صفر داشته باشند. در راهنمای ساخت و ساز خطوط لوله ی گاز و هیدروکربن های مایع عبوری از مناطق مستعد نشست و زمین لغزش^[۱۰] که توسط شورای بین المللی تحقیقات خط لوله^{۱۲} منتشر شده و به آیین نامه ی PRCI معروف است، اعلام شده است که در مدل سازی، طول خط لوله ی خارج از منطقه ی حرکت زمین، به زاویه ی قرار گرفتن خط لوله در برابر زمین لغزش بستگی دارد. طول خط لوله باید به اندازه ی کافی بزرگ باشد تا اطمینان حاصل شود که تغییر شکل های ایجاد شده در مناطق قبل و بعد از زمین لغزش، کرنش های طولی ایجاد شده در محدوده ی زمین لغزش را تغییر نمی دهند. آیین نامه ی PRCI، رابطه یی برای طول مهار ی خط لوله براساس شکل ۲ ارائه کرده است که در بیشتر مطالعات و طراحی های خطوط لوله تا به امروز استفاده شده است. در مطالعه ی وازوراس^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۶] برای خطوط لوله تحت تأثیر گسل امتداد لغز نشان داده شده است که طول مهار ی تأثیر بسزایی در جابه جایی خط لوله و کرنش محوری آن دارد و این محققان با پیشنهاد شرایط مرزی معادل در کل طول خط، نسبت به کنترل جابه جایی خط لوله اقدام کرده اند. در مطالعه ی تیان و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۷] با بررسی خط لوله ی گاز عبوری از منطقه ی ساحلی تحت اثر گسلش عنوان شده است که طول مهار ی به نوع خاک وابسته است و در خاک های ساحلی طول مهار ی، بسیار بلند می باشد که باید نسبت به کنترل حرکت های خط لوله در مناطق اخیر اقدام شود. بانوشی و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۸] با در نظر گرفتن یک مدل پیوسته در برابر گسلش به بررسی طول مهار ی در خط لوله ی انتقال پرداخته و اعلام کرده اند که طول مهار ی کوتاه منجر به افزایش چشمگیر نیروی محوری وارد شده به لوله می شود. همچنین آنان تأکید کرده اند که وسایل کنترل و بهره برداری به دلیل اعمال نیروی محوری و برشی زیاد به خط لوله، باید در فاصله ی مناسبی از نقطه ی مهار مجازی قرار گیرند. در مطالعه ی یون^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۹] تحلیل شکنندگی برای لوله های با گرید ۲۱۰۵ در شرایط مختلف خاک انجام شده و طول خط لوله تقریباً بلند (۲۱۰۵ متر) در نظر گرفته شده است، تا تأثیری در نتایج خاک های مختلف نداشته باشد. همچنین ایشان اعلام داشته اند که شرایط مرزی و طول نامناسب خط لوله در نتایج تحلیل موثر است. واقعی و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۰] با بررسی رخداد زمین لغزش در شهرستان طالقان استان البرز در سال ۱۳۹۷، خاطرنشان ساخته اند که طول مهار ی به دست آمده از تحلیل، بیشتر از طول مهار ی به دست آمده از روابط آیین نامه یی بوده و به نظر می رسد رابطه ی آیین نامه ی PRCI به علت عدم تخمین مناسب نیروی محوری ناشی از زمین لغزش دچار اشکال بوده و انجام مطالعات بیشتری در زمینه ی اخیر ضروری است. دمیرچی و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۱] به بررسی آزمایشگاهی خط لوله در برابر گسلش پرداخته اند و طبق فرضیات مدل کندی (۱۹۷۷)^[۲۲] برای طول مهار ی خط لوله، مقدار بزرگی در نظر گرفته شده است، تا آثار شرایط مرزی حذف شود. برای ساخت مدل آزمایشگاهی نیز از اتصال دهنده های سیلیکونی به عنوان فشر استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که در صورت کاهش طول خط لوله، پاسخ به دست آمده با نتایج تحلیلی و مطالعات پیشین، اختلاف زیادی دارد. در مطالعه ی فو^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۳] به بررسی پاسخ خط لوله ی گاز در برابر زمین لغزش های ساحلی پرداخته و عنوان شده است که به دلیل نبود رابطه یی قابل اعتماد برای تعیین طول خط لوله تحت تأثیر زمین لغزش، طول خط لوله بسیار بزرگ در نظر گرفته می شود، تا آثار شرایط مرزی در پاسخ ها ناچیز باشد؛ هر چند زمان تحلیل بیشتر و تحلیل نیز دشوارتر می شود.

جدول ۱. مشخصات خاک.

نوع خاک	$\gamma (KN/m^3)$	ϕ (درجه)	$c (KN/m^2)$
نرم	۱۶/۵	-	۴۰
سخت	۱۹/۵	۴۰	-
ماسه نرم	۱۶/۵	۳۵	-

جدول ۲. مشخصات هندسی و فیزیکی لوله‌های بررسی شده.

قطر (اینچ)	ضخامت جداره (میلی متر)	گرید لوله	مقاومت (MPa)		مورد انتظار
			تسلیم (F_y)	نهایی (F_u)	تسلیم (F_{ye})
۱۲	۶	X۴۲	۲۹۰	۴۱۴	۳۴۸
۲۰	۷/۵	X۴۲	۲۹۰	۴۱۴	۳۴۸
۳۰	۹	X۵۲	۳۵۹	۴۶۲	۴۳۱
۴۸	۱۲	X۶۵	۴۴۸	۵۳۱	۵۳۸



شکل ۴. دیاگرام رفتاری فنرهای خاک. [۳۱]

لوله‌های فولادی مدفون، که توسط انجمن شریان‌های حیاتی آمریکا (ALA) [۲۳] منتشر شده، ارائه شده است. [۲۹]
در دستورالعمل ALA [۲۹]، بیشینه نیروی محوری زمین در طول خط لوله‌ی مدفون طبق رابطه‌ی ۳ پیشنهاد شده است:

$$T_u = \pi D \alpha c + \pi D H \gamma \left(\frac{1 + K_0}{2} \right) \tan \delta \quad (3)$$

که در آن، D قطر لوله، α ضریب چسبندگی، c چسبندگی خاک در تماس با لوله، H عمق از سطح خاک تا مرکز لوله، γ وزن مخصوص خاک، K_0 ضریب فشاری حالت سکون خاک، δ زاویه‌ی قرارگیری لوله و خاک (برابر با ϕ ، $\delta = \phi \times f$)، f ضریب پوشش لوله و ϕ بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک خاک در تماس با لوله است. در راهنمای طراحی لوله‌ی انتقال نفت و گاز [۳۰] مقادیر K_0 و δ برابر 0.37° و 31° پیشنهاد شده است. دستورالعمل ALA [۲۹]، برای بیشینه‌ی نیروی جانبی وارد شده به لوله در طول خط، رابطه‌ی ۴ را پیشنهاد کرده است:

$$P_u = N_{ch} c D + N_{qh} \gamma H D \quad (4)$$

که در آن، N_{ch} ضریب ظرفیت باربری جانبی وابسته به چسبندگی، N_{qh} ضریب ظرفیت باربری جانبی وابسته به اصطکاک داخلی و بقیه‌ی پارامترها همانند رابطه‌ی ۳ هستند. دستورالعمل مذکور، برای بیشینه‌ی نیروی قائم برکش خاک، رابطه‌ی ۵ را پیشنهاد کرده است:

$$Q_u = N_{cv} c D + N_{qv} \gamma H D \quad (5)$$

شده است. در جدول مذکور، γ وزن مخصوص خاک، ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی و c چسبندگی خاک است. در راهنمای طراحی لوله‌ی خطوط لوله‌ی مدفون که توسط مؤسسه‌ی تکنولوژی کانپور [۲۱] هندوستان، [۲۹] منتشر شده است، توصیه شده است که خاک دور لوله از نوع نرم و در صورت امکان مقاومت برشی بالایی داشته باشد، تا نیروهای وارد بر خط لوله کاهش یابد. در مطالعه‌ی حاضر، نیز ماسه‌ی نرم متعارف در پروژه‌های اجرایی به عنوان خاک دور لوله در نظر گرفته شده است.

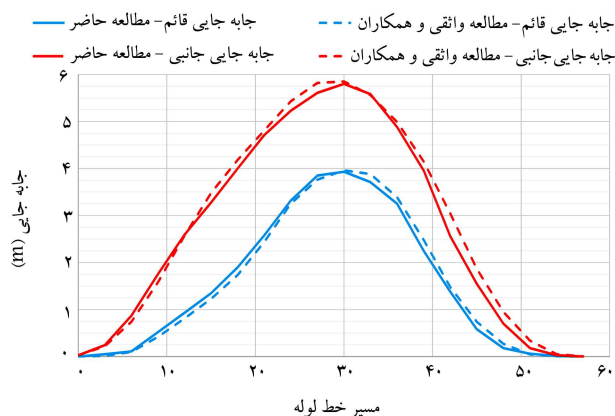
با توجه به مؤثر بودن پارامتر مقاومت لوله در بررسی آسیب خط لوله در برابر زمین‌لغزش، با انتخاب مصالح لوله از نوع فولاد API-5L برای هر قطر لوله، یک گرید خاص در نظر گرفته شده است. مدول کشسانی مصالح فولاد $200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ، و وزن مخصوص فولاد نرمه (7850 N/m^3) و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ است. میزان مقاومت تسلیم (F_y) و مقاومت نهایی (F_u) طبق گزارش ATC/DOT/۱۹۹۹ [۲۸]، 20% بالاتر از مقاومت اسمی در نظر گرفته شده است. طبق توضیحات گزارش، مصالح فولاد تا رسیدن به مقاومت تسلیم (محدوده‌ی کشسان)، طبق قانون هوک عمل می‌کند و در ناحیه‌ی پس از مقاومت تسلیم (محدوده‌ی خمیری)، مقاومت طبق رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود که در آن: σ_t مقدار تنش، ϵ_p مقدار کرنش خمیری، K ضریب مقاومت و n ضریب کرنش سخت‌شوندگی است: [۲۸]

$$\sigma_t = K \epsilon_p^n \quad (2)$$

در جدول ۲، مقادیر قطر، ضخامت جداره‌ی لوله و مقاومت فولاد لوله برای انجام تحلیل ارائه شده است.

۳.۳. اندرکنش خاک - لوله

برای مدل‌سازی خاک اطراف لوله از مدل تیر و فنر وینکالر استفاده شده که در آن، خاک به صورت فنرهایی در جهت‌های محوری، قائم و جانبی در نظر گرفته شده است. دیاگرام رفتاری هر فنر در شکل ۴ مشاهده می‌شود. نیرو و جابه‌جایی فنرهای وینکالر که وابسته به مشخصات خاک و مصالح لوله هستند، در دستورالعمل طراحی



شکل ۵. مقایسه‌ی جابه‌جایی خط لوله و خاک در مطالعه‌های حاضر و واقعی.

۱۰۰۰ psi) به عنوان فشار داخلی لوله در نظر گرفته شده‌اند. جهت قرارگیری خط لوله، عمود بر جهت رانش زمین در نظر گرفته شده است. تحلیل اجزاء محدود از نوع استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن روش نیوتن - رافسون بوده که در دو مرحله انجام می‌شود: در مرحله‌ی اول، فقط فشار داخلی در لوله‌ها بدون جابه‌جایی خاک اعمال و با ۱۰۰ گام زمانی انجام می‌شود. در ادامه، جابه‌جایی ناشی از زمین لغزش به انتهای فنرها اعمال شده و تحلیل ادامه می‌یابد. به منظور در نظر گرفتن آثار غیرخطی هندسی و مصالح، تحلیل با فرض جابه‌جایی‌های بزرگ انجام شده است.

۵.۳. صحت‌سنجی مدل

مدل ساخته شده براساس مدل‌سازی انجام شده در مطالعه‌ی واقعی و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰] می‌باشد. در مطالعه‌ی واقعی و همکاران، همان‌طور که پیشتر اشاره شد، علل انفجار خط لوله‌ی گاز ۱۶ اینچ با فشار ۲۵۰ psi در برابر زمین‌لغزش رخ داده در شهرستان طالقان بررسی شده است. علت انفجار، گسیختگی لوله به دلیل وجود خم در مسیر در محدوده‌ی طول فعال و به فاصله‌ی ۱۲۰ متر پس از انتهای زمین‌لغزش بیان شده است. با برداشت اطلاعات جغرافیایی و ژئوتکنیکی از محل وقوع حادثه، میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش و حجم آن برآورد شده و با مدل‌سازی خط لوله به کمک مدل تیر و فنر وینکلر، نتایج نشان دادند که وجود خم در محدوده‌ی طول فعال باعث افزایش نیروی برشی و گسیختگی خط لوله می‌شود که این موضوع منطبق با نتایج واقعی است. با توجه به اینکه مدل ساخته شده توسط واقعی و همکاران اعتبار مناسبی جهت تحلیل دارد، در مطالعه‌ی حاضر نیز سعی شده است تا با استفاده از همان مدل تحلیل انجام شود. در شکل ۵، نتایج جابه‌جایی قائم و جانبی خط لوله در مقایسه با مدل نوشتار واقعی و همکاران مشاهده می‌شود. خط لوله در نوشتار واقعی و همکاران، ۵/۸۶ متر به صورت جانبی و ۳/۹۹ متر به صورت قائم جابه‌جا شده است. [۲۰] در مدل ساخته شده برای پژوهش حاضر، جابه‌جایی جانبی خط لوله ۵/۸۰ متر و جابه‌جایی قائم آن ۳/۹۳ متر ثبت شده است. مشاهده می‌شود که جابه‌جایی خط لوله در هر دو جهت قائم و جانبی منطبق با نتایج واقعی و همکاران است. شکل جابه‌جایی خط لوله نیز همانند مطالعه‌ی واقعی و همکاران بوده و اختلاف اندک موجود به دلیل تفاوت‌های جزئی در پارامترهای در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل است. انطباق مناسب جابه‌جایی خط لوله و دیگر پارامترها، نظیر: تنش، کرنش خمیری، نیروی محوری و لنگر خمشی در مقطع لوله با نتایج نوشتار واقعی و همکاران،

جدول ۳. مشخصات فنرهای خاک.

فتر	نیرو (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	نیرو (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	نیرو (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	نیرو (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)
خاک نرم - ۱۲ اینچ	$T_v = 26/4$	$\Delta_v = 5$	خاک سفت - ۱۲ اینچ	$T_v = 21/2$	$\Delta_v = 5$	خاک نرم - ۲۰ اینچ	$T_v = 67/2$	$\Delta_v = 5$
معمولی	$T_v = 26/4$	$\Delta_v = 5$	معمولی	$T_v = 21/2$	$\Delta_v = 5$	خاک سفت - ۲۰ اینچ	$T_v = 55/9$	$\Delta_v = 5$
جانبی	$P_v = 245/4$	$\Delta_p = 46$	جانبی	$P_v = 1042/1$	$\Delta_p = 78$	جانبی	$P_v = 1766/4$	$\Delta_p = 97$
قائم کششی	$Q_v = 234/6$	$\Delta_v = 61$	قائم کششی	$Q_v = 122/9$	$\Delta_v = 16$	قائم کششی	$Q_v = 424/3$	$\Delta_v = 181$
قائم فشاری	$Q_v = 208/7$	$\Delta_v = 61$	قائم فشاری	$Q_v = 6291/6$	$\Delta_v = 152$	قائم فشاری	$Q_v = 13065/8$	$\Delta_v = 122$
خاک نرم - ۲۰ اینچ	$T_v = 26/4$	$\Delta_v = 5$	خاک سفت - ۲۰ اینچ	$T_v = 21/2$	$\Delta_v = 5$	خاک نرم - ۴۸ اینچ	$T_v = 166/9$	$\Delta_v = 5$
معمولی	$T_v = 26/4$	$\Delta_v = 5$	معمولی	$T_v = 21/2$	$\Delta_v = 5$	خاک سفت - ۴۸ اینچ	$T_v = 55/9$	$\Delta_v = 5$
جانبی	$P_v = 245/4$	$\Delta_p = 46$	جانبی	$P_v = 1042/1$	$\Delta_p = 78$	جانبی	$P_v = 1766/4$	$\Delta_p = 97$
قائم کششی	$Q_v = 234/6$	$\Delta_v = 61$	قائم کششی	$Q_v = 122/9$	$\Delta_v = 16$	قائم کششی	$Q_v = 424/3$	$\Delta_v = 181$
قائم فشاری	$Q_v = 208/7$	$\Delta_v = 61$	قائم فشاری	$Q_v = 6291/6$	$\Delta_v = 152$	قائم فشاری	$Q_v = 13065/8$	$\Delta_v = 122$

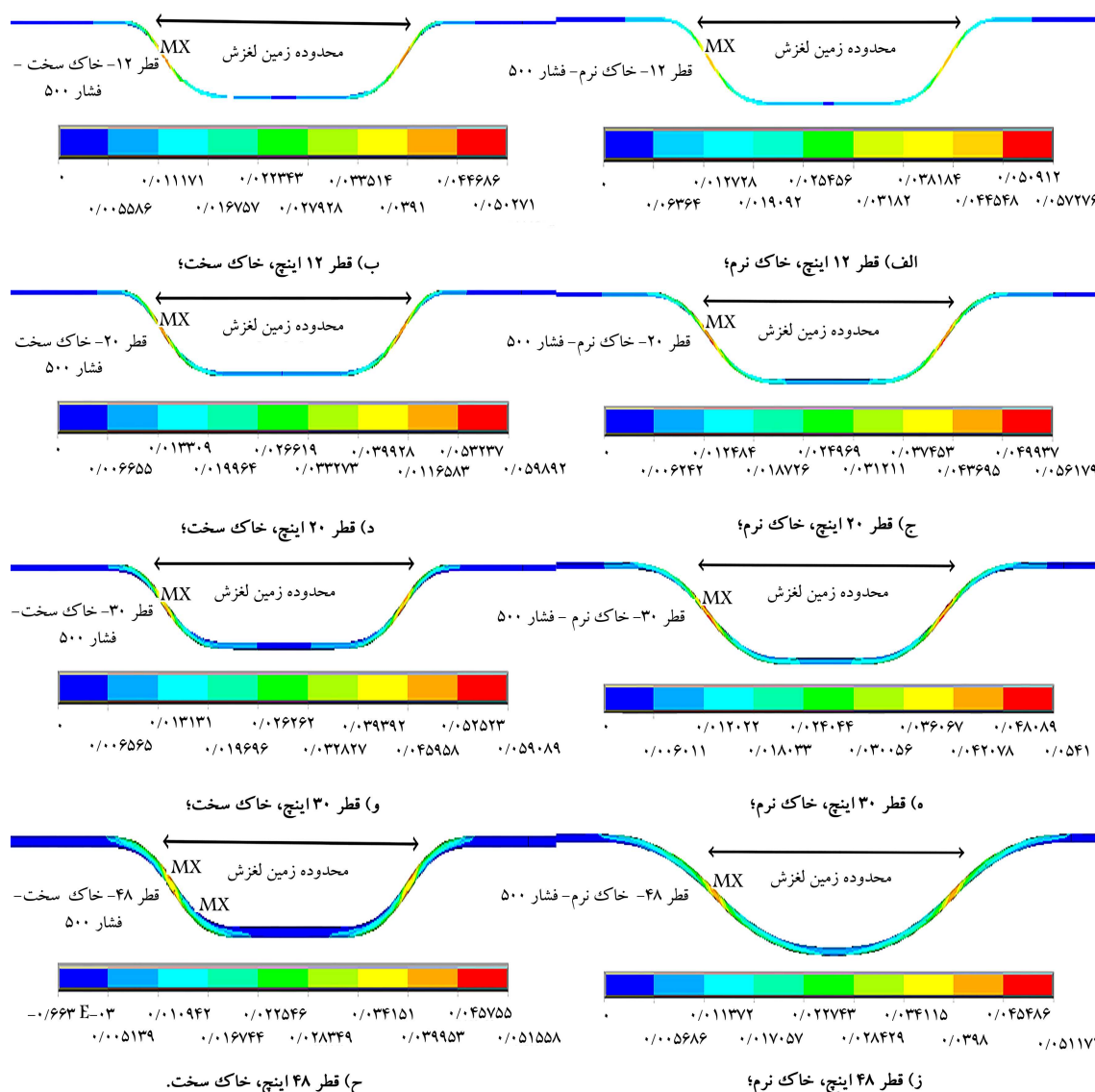
که در آن، N_{cv} ضریب ظرفیت باربری برکش وابسته به چسبندگی و N_{qv} ضریب ظرفیت باربری برکش وابسته به اصطکاک داخلی است. بیشینه‌ی نیروی برکش (Q_u) در جابه‌جایی رخ داده و گزارش شده است که از $1H$ تا $2H$ در ماسه‌های متراکم و متخلخل و از $1H$ تا $2H$ برای رس‌های مختلف متغیر است. [۲۹] بیشینه‌ی نیروی قائم فشاری خاک به صورت رابطه‌ی ۶ پیشنهاد شده است:

$$Q_d = N_c c D + N_q \gamma H D + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{\gamma} \quad (6)$$

که در آن N_c ، N_q و N_γ ضرایب باربری خاک هستند. [۲۹] در جدول ۳، مقدار نیرو و جابه‌جایی برای فنرها در قطرهای مختلف، براساس روابط ۳ تا ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است الزام‌های طراحی برای خطوط لوله‌ی انتقال گاز به‌طور کلی در استاندارد B31/8 انجمن مهندسان مکانیک آمریکا (ASME) تعریف شده است. [۳۱] طبق استاندارد مذکور، زمانی که خط لوله در معرض مخاطرات طبیعی مانند زمین لغزش قرار می‌گیرد، باید اقدامات احتیاطی برای حفاظت از خط لوله انجام شود. با این حال، استاندارد اخیر، معیارهای طراحی خاصی برای خط لوله ارائه ن داده است تا بتواند در برابر جابه‌جایی‌های بزرگ زمین مقاومت کند و از این رو ضوابط دستورالعمل ALA استفاده شده است.

۴.۳. تحلیل

تحلیل به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS انجام شده است. طول خط لوله برابر ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده که به ۵۰۰ المان با طول ۳ متر تقسیم‌بندی شده است. المان در نظر گرفته برای لوله از نوع PIPE288 (المان دو گره‌یی با قابلیت احتساب فشار داخلی) می‌باشد. لوله از نوع جدار ضخیم و رفتار تابع شکل المان به صورت خطی در نظر گرفته شده است. مقطع لوله نیز با تعداد تقسیم‌بندی محیطی ۱۶ در نظر گرفته شده است. جابه‌جایی خاک به انتهای فنرها اعمال می‌شود. برای مدل‌سازی فنرها در نرم‌افزار از المان COMBIN39 که معرف رفتار فنر است، استفاده شده است. با توجه به اینکه خطوط لوله‌ی انتقال گاز، فشار داخلی دارند، تأثیر عامل مذکور باید بررسی شود. ۳ مقدار: صفر (بدون فشار)، $1 \times 10^6 N/m^2$ (۳۷۷ psi) و $1 \times 10^6 N/m^2$ (۸۹۵ psi) (معادل



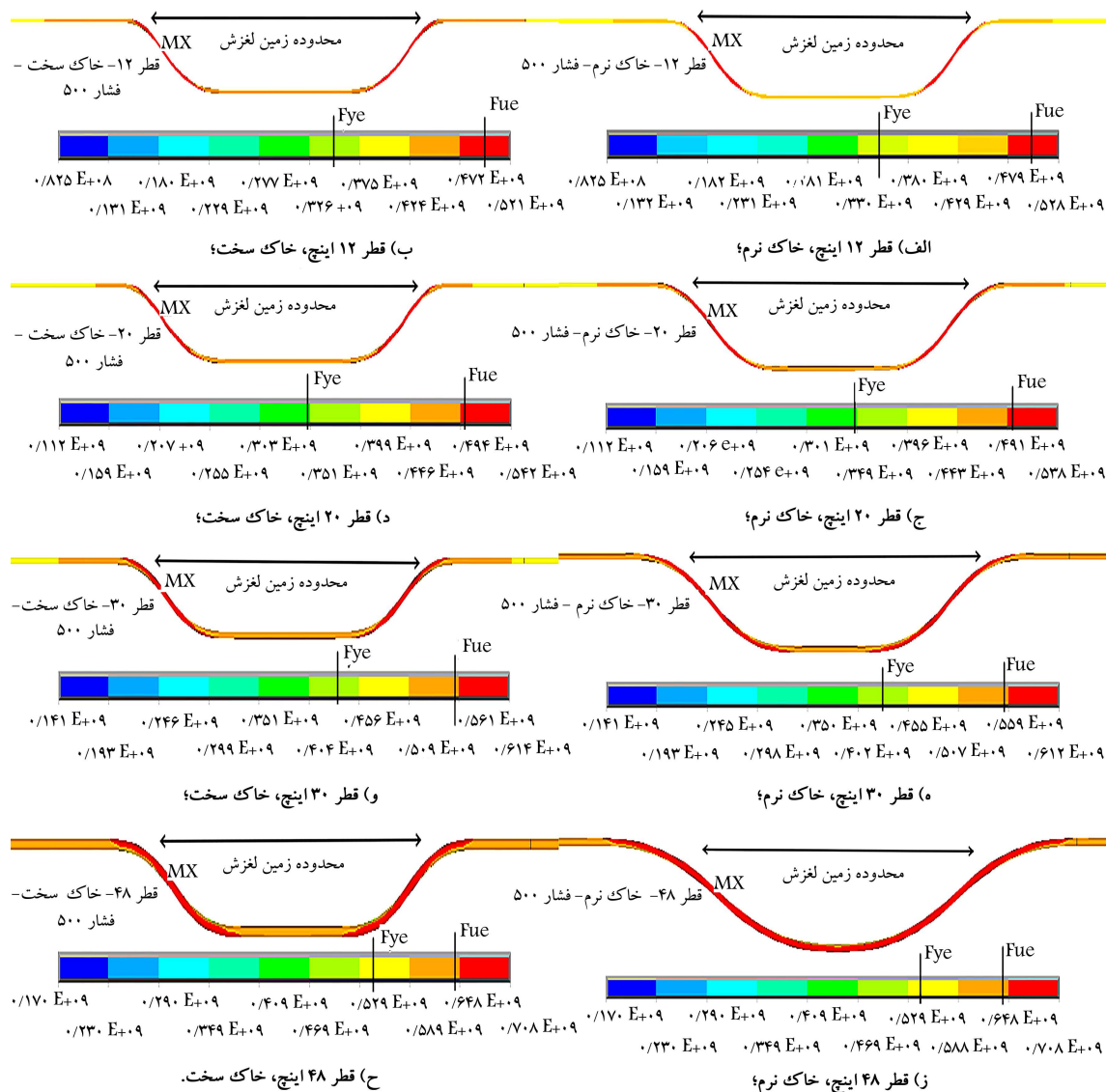
شکل ۶. توزیع کرنش پلاستیک محوری آسیب دیدگی در طول خط لوله با فشار ۵۰ psi.

عنوان شده در دستورالعمل ALA، در سطح عملکردی به ۲٪ و در سطح عدم نشت گاز به ۴٪ محدود می‌شود.^[۲۹] برای بررسی آسیب خط لوله، نتایج برای کرنش خمیری محوری ۵٪ که بیانگر شکست در خط لوله می‌باشد، بررسی شده است. در شکل ۶، نتایج کرنش خمیری محوری در طول خط لوله برای قطرهای مختلف لوله در دو خاک سخت و نرم در فشار ۵۰ psi مشاهده می‌شود که مطابق آن در همه‌ی حالت‌های تحلیل، کرنش خمیری ایجاد شده در خط لوله در محل آغاز و پایان زمین لغزش به مقدار بیشینه رسیده و طبق مکانیزم تعیین شده در شکل ۱ است. شکل کرنش در طول خط لوله نیز از الگوی بار اعمالی تبعیت می‌کند. بررسی شدت تنش^{۲۶} در طول خط لوله نشان می‌دهد که در تمامی حالت‌های تحلیل، خط لوله جاری شده و تنش از حد نهایی تعیین شده برای فولاد عبور کرده است. در شکل ۷، شدت تنش برای قطرهای ۱۲ تا ۴۸ اینچ تحت فشار ۵۰ psi در دو خاک نرم و سخت مشاهده می‌شود که مطابق آن، در همه‌ی حالت‌های تحلیل، تنش ایجاد شده در محدوده‌ی زمین لغزش از مقاومت نهایی فولاد عبور کرده و تنش ایجاد شده در ابتدا و انتهای زمین لغزش، به میزان بیشینه

صحت مدل ساخته شده را تأیید کرده و تحلیل‌ها براساس همین مدل انجام شده است.

۴. بررسی نتایج

پس از تحلیل اولیه، کنترل کرنش خمیری محوری در طول خط لوله در ارزیابی خط لوله به منظور بررسی آسیب ایجاد شده در خط لوله ضروری است. سطح خطرپذیری موردنظر برای پذیرش کرنش در دستورالعمل ALA، در دو سطح عملکردی (OL)^{۲۴} و سطح عدم نشت گاز (PI)^{۲۵} معرفی شده است. در سطح عملکردی هیچ خرابی نباید اتفاق بیفتد و عملکرد بلافاصله بعد از رخداد حادثه از سرگرفته شود. در سطح عدم نشت گاز، حد مورد انتظار این است که خط لوله دچار تغییرشکل‌های بزرگ شود، ولی محتویات آن نشت پیدا نکند. مود خرابی خط لوله در حالت قرارگیری لوله‌ی عمود بر جهت زمین لغزش، همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پارگی کششی است و از این رو ملاک کنترل کرنش، کشش است. محدودیت کرنش کششی



شکل ۷. توزیع شدت تنش در طول خط لوله با فشار ۵۰° psi.

بوده، که با شکل ۱ تطابق دارد. همچنین در محدوده‌ی زمین لغزش و قبل و بعد از آن، تنش ایجاد شده در لوله از تنش تسلیم عبور کرده و رفتار مصالح به صورت غیرخطی است (در حالت‌های بدون فشار و فشار ۱۰۰° psi نیز، رفتار خط لوله در کرنش خمیری محوری و شدت تنش همانند فشار ۵۰° psi بوده و از ارائه‌ی شکل‌ها برای این دو حالت به جهت خلاصه شدن نوشتار، صرف‌نظر شده است). کرنش خمیری و شدت تنش در خط لوله با تغییر جنس خاک تغییر محسوسی نکرده و تمرکز تنش ایجادشده در همان محل‌های شروع و پایان زمین لغزش بوده است. تفاوت ایجاد شده با تغییر نوع خاک در کرنش خمیری و شدت تنش، شکل نمودار می‌باشد که در خاک نرم، نمودار کمی نرم‌تر است.

$$L_a = \frac{\pi D t F_y}{T_u} \quad (7)$$

که در آن، D قطر لوله، t ضخامت جداره‌ی لوله، F_y تنش تسلیم مصالح لوله و T_u بیشینه‌ی نیروی محوری زمین طبق رابطه‌ی ۳ است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد طول مهار برای یک قطر لوله، در خاک‌ها و فشارهای مختلف متفاوت است.

شکل ۹ که نمایانگر جابه‌جایی محوری خط لوله تحت فشار ۵۰° psi در تمامی حالت‌های تحلیل است، این موضوع را تأیید می‌کند. این در حالی است که رابطه‌ی ۷ برای هر قطر، فقط یک عدد را نمایش می‌دهد. در شکل ۱۰، توزیع نیروی

محوری در طول مهار محوری خاک به مقدار بیشینه‌ی نیروی خود می‌رسند، طول مهار خط لوله تعریف می‌شود. در شکل ۸، جابه‌جایی محوری خط لوله و نیروی فنرهای محوری برای قطر ۳۰ اینچ در خاک سخت تحت فشار ۵۰° psi مشاهده می‌شود، که مشخص است طول مهار طبق هر دو تعریف، مقدار یکسانی دارد. طول مهار خط لوله، طبق رابطه‌ی ۷ که در آیین‌نامه‌ی PRCI^[۱۰] ارائه شده است، تعیین شده است.

۱.۴. طول مهار خط لوله

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، شروع طول مهار، نقطه‌ی مهار مجازی است که در آن جابه‌جایی محوری لوله نزدیک به صفر است. در مدل وینکلر، طولی

نیروی محور فنرها وجود دارد و دلیل آن جاری شدن خط لوله در منطقه‌ی مذکور است.

مقایسه‌ی طول مهارى به‌دست آمده از نتایج تحلیل و مقایسه با رابطه‌ی ۷ مطابق شکل ۱۱ نشان می‌دهد که طول مهارى به دست آمده براساس رابطه‌ی ۷، بسیار کمتر از نتایج به‌دست آمده از تحلیل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی حالت‌های فشار و در تمامی قطرها، طول مهارى در خاک نرم بیشتر از خاک سخت بوده است. در حالت فشار ۵۰۰ psi، مقادیر طول مهارى به اندازه‌ی متوسط ۳٪ نسبت به حالت بدون فشار افزایش پیدا کرده است. در حالت فشار ۱۰۰۰ psi، میزان طول مهارى نسبت به فشار ۵۰۰ psi به طور متوسط ۱/۵٪ افزایش یافته است. با افزایش قطر لوله، میزان طول مهارى افزایش می‌یابد؛ در حالی که افزایش فشار، تأثیری در طول مهارى خط لوله ندارد. نوع خاک نیز تأثیر بیشتری در طول مهارى خط لوله داشته و به طور متوسط در خاک نرم، ۱۰٪ بیشتر از خاک سخت می‌باشد. این موضوع در قطرهای بالاتر مشهودتر است. به طور کل، طول مهارى تعیین شده از رابطه‌ی ۷ به‌طور میانگین ۳۵٪ کمتر از طول مهارى تعیین‌شده از تحلیل بوده، که این موضوع نشان می‌دهد رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی PRCI، مقدار مناسبی برای این پارامتر مهم ارائه نمی‌دهد.

۲.۴. بررسی نیروی محوری و لنگر خمشی در خط لوله

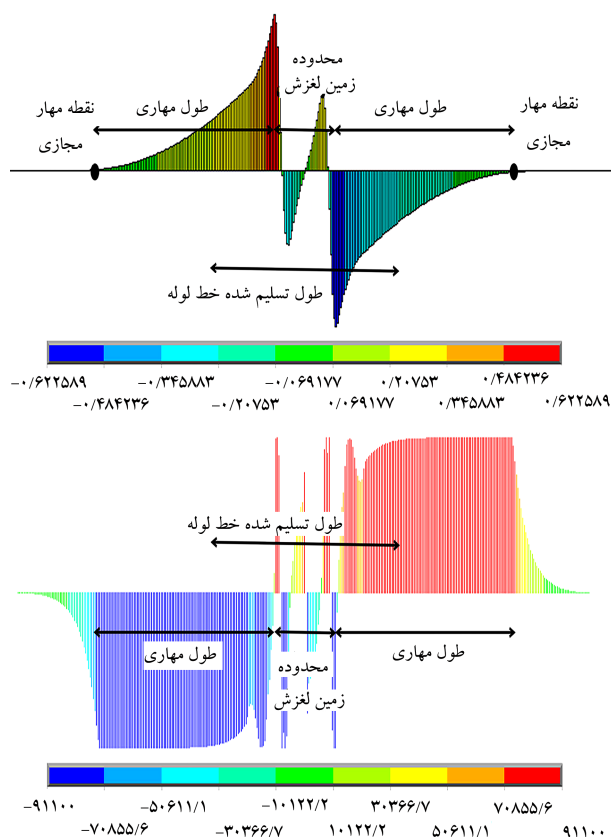
با بررسی نیروی محوری و لنگر خمشی ایجاد شده در خط لوله، رفتار خط لوله در برابر زمین‌لغزش بهتر مشخص می‌شود. در شکل ۱۲، توزیع نیروی محوری در طول خط لوله در همه‌ی حالت‌های تحلیل برای فشار داخلی ۵۰۰ psi مشاهده می‌شود. به جهت مقایسه‌ی بهتر، نیروی مذکور طبق رابطه‌ی ۸ نرمال شده است.

$$F_{norm} = \frac{F}{A \times F_{ue}} \quad (8)$$

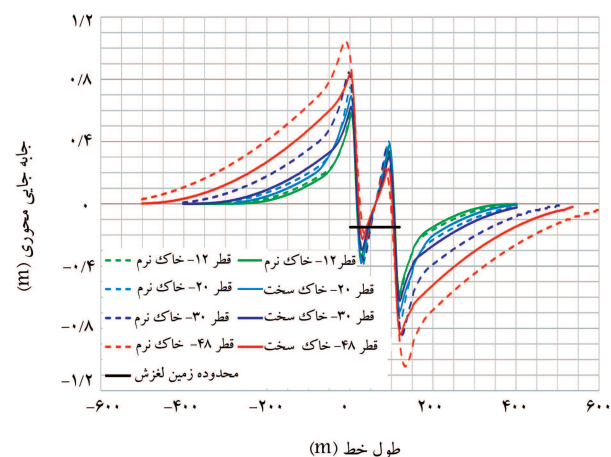
که در آن، F نیروی ایجاد شده در خط لوله، A سطح مقطع لوله و F_{ue} تنش نهایی موردانتظار مصالح لوله طبق جدول ۲ است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع نیروی محوری برای تمامی تحلیل‌ها تقریباً مشابه است. اثر فشار گاز درون لوله نیز در ابتدا و انتهای خط لوله مشخص است. نیروی محوری ایجاد شده در خاک نرم بیشتر از خاک سخت است. بیشینه‌ی نیروی محوری ایجاد شده، در محل زمین‌لغزش بوده که به مقدار ظرفیت مقطع رسیده است. علاوه بر این، نیروی محوری در هر تحلیل به تفکیک فشار داخلی لوله در نمودار شکل ۱۳ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، عدم تأثیرگذاری فشار در نیروی محوری خط لوله با توجه به اندک بودن نرخ افزایش نیروی محوری بین فشار ۵۰۰ و ۱۰۰۰ psi مشهود است. در قطرهای یکسان، تفاوت چندانی بین نیروی محوری مشاهده نمی‌شود. زمانی که فشار درون خط لوله وجود دارد، بیشینه‌ی نیروی محوری به ظرفیت مقطع رسیده و حتی فراتر از آن نیز رفته است که دلیل آن، وجود نیروی فشار در لوله و ترکیب تنش ناشی از فشار داخلی و حرکت لوله تحت معیار فون مایز است، که امکان باربری سطح مقطع را تا ۱/۲ برابر تنش تسلیم افزایش می‌دهد. وجود فشار درون لوله نیز باعث افزایش ظرفیت مقطع لوله می‌شود.

در شکل ۱۴، نمودار توزیع لنگر خمشی در طول خط لوله در همه‌ی حالت‌های تحلیل برای فشار داخلی ۵۰۰ psi مشاهده می‌شود. به جهت مقایسه‌ی بهتر، لنگر

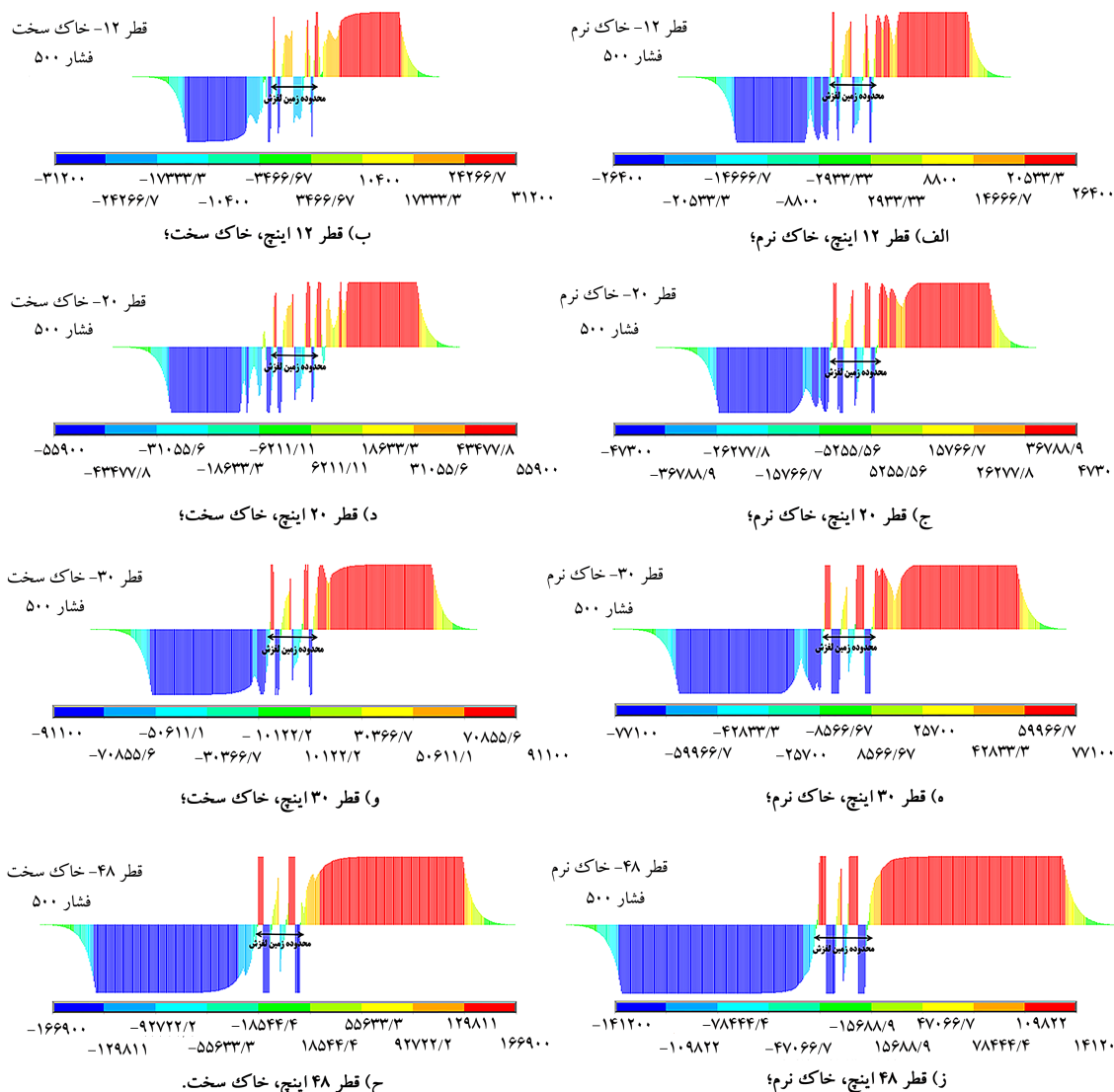


شکل ۸. جابه‌جایی محوری خط لوله و نیروی فنرهای محوری در خط لوله‌ی ۳۰ اینچ تحت اثر زمین‌لغزش در خاک نرم و فشار ۵۰۰ psi.



شکل ۹. مقایسه‌ی جابه‌جایی محوری خط لوله‌ی اینچ تحت اثر زمین‌لغزش در فشار ۵۰۰ psi برای حالت‌های مختلف تحلیل.

اصطکاک در فنرهای محوری برای قطرهای ۱۲ تا ۴۸ اینچ تحت فشار ۵۰۰ psi تحت اثر زمین‌لغزش برای دو خاک نرم و سخت مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل بیانگر این موضوع است که در طول نسبتاً طولی از خط لوله، فنرهای محوری به بیشینه‌ی نیروی تعیین شده رسیده‌اند. با افزایش قطر لوله، تعداد فنرهایی که به بیشینه‌ی نیرو رسیده‌اند، بیشتر شده و طول مهارى افزایش می‌یابد. با مقایسه‌ی نیروی ایجاد شده در فنرها در خاک‌های نرم و سخت مشاهده می‌شود که در خاک سخت، فنرهای کمتری به بیشینه‌ی نیرو رسیده‌اند. در محل زمین‌لغزش، نوسان بیشتری در



شکل ۱۰. توزیع نیروی اصطکاک در فتر محوری در طول خط لوله با فشار ۵۰۰ psi.

خمشی طبق رابطه‌ی ۹ نرمال شده است.

$$M_{norm} = \frac{M}{Z \times F_{ue}} \quad (9)$$

$$Z = \frac{1}{6} (D_o^3 - D_i^3) \quad (10)$$

که در آن، M لنگر ایجاد شده در خط لوله، Z اساس مقطع خمیری لوله (که مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود) و F_{ue} تنش نهایی موردانتظار مصالح لوله است. در رابطه ۱۰، D_o قطر خارجی مقطع لوله، D_i قطر داخلی مقطع لوله برابر با $D_i = D_o - 2t$ و t ضخامت جداره‌ی لوله است. مطابق شکل مذکور، در قطرهای ۱۲ و ۲۰ اینچ، میزان لنگر خمشی ایجاد شده تحت اثر زمین لغزش، به علت کم بودن سختی خمشی مقطع لوله، بسیار اندک و نزدیک به صفر است؛ اما میزان لنگر خمشی در قطرهای ۳۰ و ۴۸ اینچ، بیشتر است. سهم لنگر از نیروی ایجاد شده در مقطع کم بوده و مشاهده می‌شود که فقط در طول ۳۰۰ متر از خط لوله، لنگر خمشی وجود دارد.

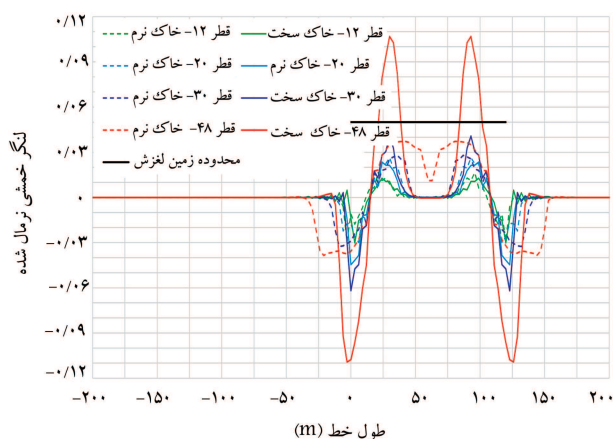
در شکل ۱۵، مقایسه‌ی لنگر خمشی در هر تحلیل به تفکیک فشار داخلی

لوله مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش فشار، لنگر خمشی درون لوله افزایش یافته و میزان لنگر خمشی در خاک سخت بیشتر از خاک نرم است. با وجود فشار در لوله، مقدار لنگر خمشی به مقدار اندکی در مقطع افزایش پیدا کرده است. در مجموع سهم لنگر خمشی از اختصاص ظرفیت مقطع در بیشترین حالت، نزدیک به ۱۱٪ است که سهم بسیار ناچیزی است.

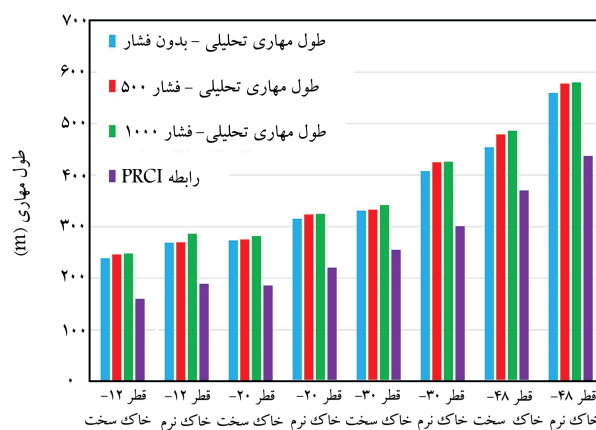
با تغییر نوع خاک، لنگر خمشی ایجاد شده در سطح مقطع لوله بیشتر شده است. این در حالی است که نیروی محوری ایجاد شده در سطح مقطع لوله‌ی مدفون در خاک نرم به اندازه‌ی ۸٪ بیشتر از خاک سخت می‌باشد. طول مهاره‌ی خط لوله‌ی مدفون در خاک نرم نیز به طور میانگین ۱۰٪ بیشتر از خاک سخت بوده، که دلیل آن نیز تأثیر اندک لنگر خمشی در تنش ایجاد شده در سطح مقطع لوله و اختصاص سهم زیادی از ظرفیت مقطع به نیروی محوری است.

۳.۴. رابطه‌ی پیشنهادی طول مهاره‌ی

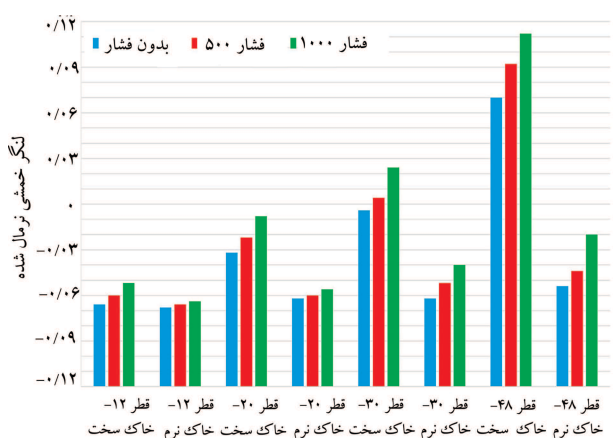
با توجه به اینکه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ نشان می‌دهد پارامتر



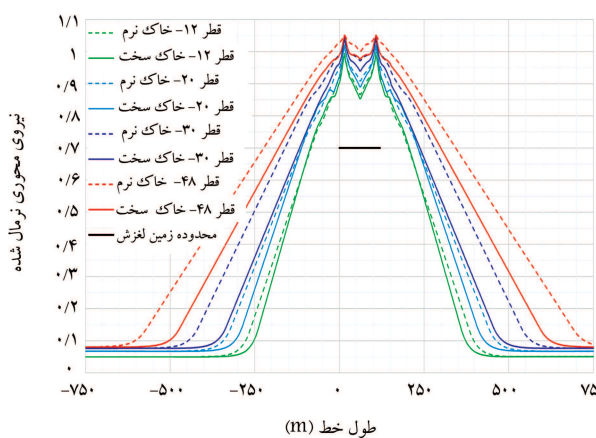
شکل ۱۴. توزیع لنگر خمشی در طول خط لوله تحت اثر زمین لغزش در فشار داخلی 500°psi .



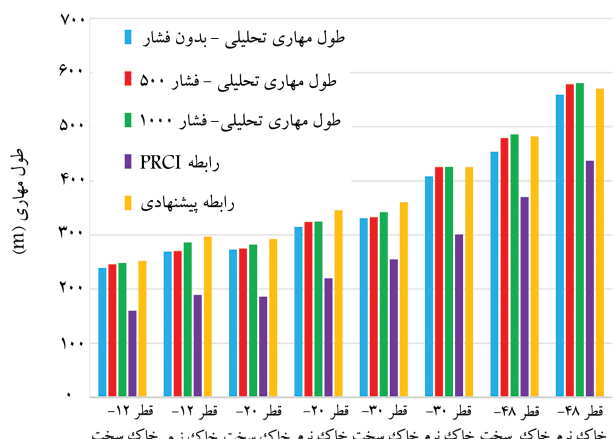
شکل ۱۱. مقایسه طول مهارتی از آیین نامه‌ی PRCI و تحلیلی در قطره‌های مختلف لوله تحت زمین لغزش.



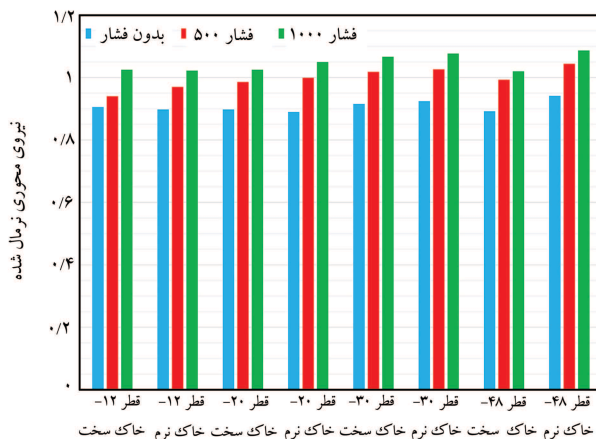
شکل ۱۵. مقایسه لنگر خمشی نرمال شده تحت فشارهای مختلف در خاک و قطره‌های مختلف تحت اثر زمین لغزش.



شکل ۱۲. توزیع نیروی محوری در طول خط لوله تحت اثر زمین لغزش در فشار 500°psi .



شکل ۱۶. مقایسه طول مهارتی به دست آمده از رابطه ۱۱ و نتایج تحلیل در قطره‌های مختلف لوله تحت اثر زمین لغزش.



شکل ۱۳. مقایسه نیروی محوری نرمال شده تحت فشارهای مختلف در خاک و قطره‌های مختلف تحت اثر زمین لغزش.

مؤثر به نظر می‌رسد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تنش نهایی فولاد 20% افزایش یافته است. برای آنکه بتوان از تنش نهایی اسمی (F_u) استفاده کرد، ضریب $1/2$ در مقدار میانگین نسبت طول مهارتی به دست آمده از تحلیل به طول مهارتی به دست آمده از رابطه‌ی ۷ ضرب می‌شود که حاصل آن رابطه‌ی ۱۱

فشار، تأثیری در طول مهارتی خط لوله ندارد، پارامتر فشار کنار گذاشته می‌شود. همچنین در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود که تنش ایجاد شده در سطح مقطع لوله، از تنش نهایی (F_u) تعیین شده عبور کرده است؛ لذا، جایگزینی مقاومت نهایی به جای مقاومت تسلیم (F_y) در بهبود رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی PRCI

جدول ۴. میزان خطای ایجاد شده در طول مهارى به دست آمده از رابطه‌ی ۱۱ با طول مهارى تحليلی.

قطر لوله	نوع خاک	فشار داخلی (Psi)	طول مهارى تحليلی (متر)	طول مهارى طبق رابطه‌ی پيشنهادهی (متر)	خطا (%)
۱۲	سخت	صفر	۲۳۹	۲۵۲	-۵/۴۴
۱۲	سخت	۵۰۰	۲۴۶	۲۵۲	-۲/۴۴
۱۲	سخت	۱۰۰۰	۲۴۸	۲۵۲	-۱/۶۱
۲۰	سخت	صفر	۲۷۳	۲۹۲	-۶/۹۶
۲۰	سخت	۵۰۰	۲۷۵	۲۹۲	-۶/۱۸
۲۰	سخت	۱۰۰۰	۲۸۲	۲۹۲	-۳/۵۵
۳۰	سخت	صفر	۳۳۱	۳۶۰	-۷/۶۸
۳۰	سخت	۵۰۰	۳۳۳	۳۶۰	-۸/۱۱
۳۰	سخت	۱۰۰۰	۳۴۲	۳۶۰	-۵/۲۶
۴۸	سخت	صفر	۴۵۴	۴۸۲	-۶/۱۷
۴۸	سخت	۵۰۰	۴۷۹	۴۸۲	-۰/۶۳
۴۸	سخت	۱۰۰۰	۴۸۶	۴۸۲	-۰/۸۲
۱۲	نرم	صفر	۲۶۹	۲۹۷	-۱۰/۰۴
۱۲	نرم	۵۰۰	۲۷۰	۲۹۷	-۱۰/۰۰
۱۲	نرم	۱۰۰۰	۲۸۶	۲۹۷	-۳/۸۵
۲۰	نرم	صفر	۳۱۵	۳۴۶	-۹/۸۴
۲۰	نرم	۵۰۰	۳۲۴	۳۴۶	-۶/۷۹
۲۰	نرم	۱۰۰۰	۳۲۵	۳۴۶	-۶/۴۶
۳۰	نرم	صفر	۴۰۸	۴۲۵	-۴/۱۷
۳۰	نرم	۵۰۰	۴۲۵	۴۲۵	۰
۳۰	نرم	۱۰۰۰	۴۲۶	۴۲۵	۰/۲۳
۴۸	نرم	صفر	۵۵۹	۵۷۰	-۱/۹۷
۴۸	نرم	۵۰۰	۵۷۸	۵۷۰	۱/۳۸
۴۸	نرم	۱۰۰۰	۵۸۰	۵۷۰	۱/۷۲

است:

(۱۱)

$$L_{a-proposed} = 1/1 \times \frac{\pi D t F_u}{T_u}$$

می‌شود؛ که نمایانگر تخمین مناسب رابطه‌ی پیشنهادی در تعیین طول مهارى خط

لوله است.

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، با انجام تحليل اجزاء محدود، علاوه بر بررسی اثر پارامترهای فشارگاز داخل لوله و نوع خاک، رابطه‌ی برای طولی از خط لوله که تحت تأثیر زمین لغزش قرار می‌گیرد، ارائه شده است. با توجه به مطالب عنوان شده در بخش‌های قبل، می‌توان نتایج را به این صورت دسته‌بندی کرد:

- پس از بررسی فشار درون لوله، می‌توان نتیجه گرفت که فشارگاز تأثیری در طول مهارى خط لوله تحت اثر زمین لغزش ندارد.
- قطر لوله در تعیین طول مهارى خط لوله، تأثیر زیادی دارد. با افزایش قطر، طول

در جدول ۴، میزان خطای رابطه‌ی ۱۱ نسبت به نتایج تحليل ارائه شده است که تمامی خطاها کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. علامت منفی در میزان خطا، نشان می‌دهد که طول مهارى به دست آمده از رابطه‌ی پیشنهادی بیشتر از نتایج به دست آمده از تحليل است و حاشیه‌ی امنی را نیز ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است ملاک محاسبه‌ی خطا، اختلاف طول مهارى به دست آمده از رابطه‌ی ۱۱ و طول مهارى ناشی از تحليل نسبت به طول مهارى تحليلی می‌باشد. میانگین خطای ایجاد شده ۴٪ است و به نظر می‌رسد رابطه‌ی ۱۱ به عنوان پیشنهادی برای جایگزینی رابطه‌ی آیین‌نامه‌ی PRCI مناسب باشد. در شکل ۱۶، طول به دست آمده از رابطه‌ی ۱۱ در مقایسه با طول مهارى تحليلی برای حالت‌های مختلف تحليل مشاهده

کرده است، به کارگیری تنش نهایی برای تعیین طول مهارى منطقی‌تر به نظر می‌رسد. رابطه‌ی ۱۱، با به کارگیری مقاومت نهایی، تخمین دقیق‌تری از طول مهارى خط لوله ارائه می‌دهد، که به طور متوسط ۴٪ خطا نسبت به نتایج به دست آمده از تحلیل دارد.

- توصیه می‌شود در محدوده‌ی طول فعال خط لوله در برابر زمین لغزش، از نصب هرگونه تجهیزات کنترلی و یا تغییر مسیر خط لوله اجتناب شود. نمودارهای تنش نشان می‌دهند که در منطقه‌ی مذکور، خط لوله از تنش نهایی عبور کرده است و احتمال خرابی آن وجود دارد.

مهارى خط لوله افزایش می‌یابد. نوع خاک نیز در تعیین طول مهارى مؤثر است. طول مهارى خط لوله در خاک نرم به طور متوسط ۱۰٪ بیشتر از خاک سخت است.

- رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی PRCI، مقدار طول مهارى را به طور متوسط ۳۵٪ کمتر از طول مهارى به دست آمده از تحلیل نشان می‌دهد و علت آن تخمین کم نیروی محوری ایجاد شده در مقطع لوله است.
- با توجه به اینکه تنش ایجاد شده در مقطع لوله از تنش نهایی مصالح لوله عبور

پانوشته‌ها

1. European gas pipeline incident data group
2. permanent ground deformation (PGD)
3. Varnes
4. O'Rourke & Liu
5. virtual anchor point
6. anchor length
7. Winkler
8. Lee
9. Kennedy
10. Wand & Yeh
11. Chiou
12. pipeline research council international (PRCI)
13. Vazouras
14. Yoon
15. Fu
16. unified classification
17. Suzuki
18. Domej
19. loose clay
20. dense sand
21. Indian institute of technology kanpur
22. Poisson's ratio
23. American lifelines alliance (ALA)
24. operable limits (OL)
25. pressure integrity limits (PI)
26. stress intensity

منابع (References)

1. Mori, S., Chiba, K. and Koike, T. "Seismic performance analysis of the transmission gas pipeline in the 2011 great east Japan earthquake", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal (2012).
2. Zheng, J.Y., Zhang, B.J., Liu, P.F. and et al. "Failure analysis and safety evaluation of buried pipeline due to deflection of landslide process", *Engineering Failure Analysis*, **25**, pp. 156-168 (2012).
3. European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas pipeline incidents", 9th EGIG Report 1970-2015 (2015).

4. Esford, F., Porter. M. and Savigny. K.W. "A Risk assessment model for pipelines exposed to geohazards", *IPC 2004, International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada* (2004).
5. Kunert. H.G., Marquez. A.A., Fazzini. P. and et al., *Chapter 5. Failures and Integrity of Pipelines Subjected to Soil Movements*, Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry, Elsevier Ltd, pp. 105-122 (2016).
6. Planning and Budget Organization, "Guideline for study and implementation of landslide stabilization operation (Vol1.Landslides Behavior Study)", Planning and Budget Organization, (In Persian) (2020).
7. Hunger. O., Leroueil. S. and Picarelli, L. "The Varnes classification of landslide types, an update", *Landslides*, **11**(2), pp. 167-194 (2014).
8. O'Rourke. M.J. and Liu. X. "Seismic design of buried and offshore pipeline", MCEER-12-MN04, University at Buffalo, University of New York, USA (2012).
9. Indian Institute of Technology, "Guidelines for seismic design of buried pipelines", Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur (2007).
10. PRCI, "Pipeline integrity for ground movement hazards", Houston: Pipeline Research Council International (2009).
11. Lee. E.M., Fookes. P.G. and Hart. A.B. "Landslide Issues Associated with Oil and Gas Pipelines in Mountainous Terrain", *Quarterly Journal of Eng. Geology and Hydrogeology*, **49**(2), pp. 125-131 (2016).
12. Kennedy, R., Chow. A. and Williamson. R. "Fault movement effects on buried oil pipelines", *Transport Engineering Journal, ASCE*, **103**, pp. 617-633 (1977).
13. Wang, L. and Yeh, Y. "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**(5), pp. 75-96 (1985).
14. Chiou, Y., Chi, S. and Chang, H. "A Study on buried pipeline response to fault movement", *Pressure Vessel Technology, ASME*, **116**(3), pp. 36-41 (1994).

15. Liu, X. and O'Rourke, M.J. "Behavior of continuous pipeline subject to transverse PGD", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(10), pp. 989-1003 (1997).
16. Vazouras, P., Dakoulas, P. and Karamanos, S.A. "Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **72**(8), pp. 48-65 (2015).
17. Thebian, L., Sadek, S., Najjar, S. and et al. "Finite element analysis of offshore pipelines overlying active reverse fault rupture", *36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Trondheim, Norway (2017).
18. Banushi, G. and Squeglia, N. "Seismic analysis of a buried operating steel pipeline with emphasis on the equivalent-boundary conditions", *J. of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **9**(3), pp. 8005-8030 (2018).
19. Yoon, S., Lee, D.H. and Jung, H.J. "Seismic fragility analysis of a buried pipeline structure considering uncertainty of soil", *J. of Pressure Vessels and Piping*, **175**, pp. 1039-1071 (2019).
20. Vasseghi, A., Haghshenas, E., Soroushian, A. and et al. "Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide", *Engineering Failure Analysis*, **119**, pp. 9-30 (2021).
21. Demirci, H.E., Karaman, M. and Bhattacharya, S. "Behavior of buried continuous pipelines crossing strike-slip faults: Experimental and study", *J. of Natural Gas Science and Engineering*, **92**(10), pp. 103980-104002 (2021).
22. Fu, C., Nian, T., Guo, X. and et al. "Investigation on responses and capacity of offshore pipelines subjected to submarine landslide", *J. of Applied Ocean Research*, **117**, pp. 102904-102913 (2021).
23. Li, Y. and Mo, P. "A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review", *Geomorphology*, **340**, pp. 67-83 (2019).
24. O'Rourke, T. "Critical aspects of soil-pipeline interaction for large ground deformation", First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, Tokyo, Japan (1988).
25. O'Rourke, M. "Approximate analysis procedures for permanent ground deformation effects on buried pipelines", 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, New York, USA (1989).
26. Suzuki, N., Arata, O. and Suzuki, I. "Parametric study of deformation analysis of welded pipeline subject to liquefaction-induced permanent ground displacement", First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, Tokyo, Japan (1988).
27. Domej, G., Bourdeau, C., Lenti, L. and et al. "Shape and dimension estimations landslide rupture zones via correlations of characteristic parameters", *Geosciences*, **98**(10), pp. 1-23 (2020).
28. Haggag, F.M. "Nondestructive determination of yield strength and stress-strain curves of In-service transmission pipelines", Advanced Technology Corporation (ATC), Oak Ridge, Tennessee (1993).
29. American Lifelines Alliance, "Guidelines for the design of buried steel pipe", American Society of Civil Engineers, Washington, D.C. (2005).
30. ASCE, "Guidelines for the seismic design of oil and GPS pipeline systems", American Society of Civil Engineers, New York (1984).
31. ASME, "Gas transmission and distribution piping systems, ANSI standard B31.8", American Society of Mechanical Engineers, New York (1995).