

مطالعه عددی اثر گسلش معکوس بر پاسخ لوله‌های مدفون در خاک

امین منشی زاده نائین^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^{۲*}

۱- دانش آموخته، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*eseyedi@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۲/۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۴/۲۴]

چکیده

خطوط لوله مدفون به واسطه طول زیاد خود ناگزیر از عبور از گسل‌هایی هستند که حرکات بزرگ آن‌ها می‌تواند باعث بروز شکست و گسیختگی در لوله‌های مدفون شود. این حرکات بزرگ ممکن است در یک زمین لرزه رخ دهد و یا اینکه بر اثر حرکت خزننده گسل که در طول عمر بهره‌برداری خط لوله اتفاق می‌افتد، بوجود آید. بنابراین ضروری است رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل مورد مطالعه قرار گیرد. در ادبیات فنی موجود، تمرکز بیشتر بر مطالعه رفتار خطوط لوله در گذر از گسل‌های نرمال و امتدادلغز بوده است. در مطالعه حاضر، رفتار لوله‌های مدفون گذرنده از گسل معکوس با کمک نرم‌افزار آباکوس مطالعه شده است. ابتدا نحوه و روند شبیه‌سازی‌های انجام شده با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر مقایسه شده است که نشان از صحت نتایج دارد. سپس مطالعه حساسیت بر روی تأثیر نوع خاک و پارامترهای ژئوتکنیکی آن و همچنین اثر نسبت عمق دفن به قطر لوله انجام گرفته است. مطالعات عددی انجام شده نشان می‌دهد که کرنش‌های فشاری علت اصلی وقوع گسیختگی لوله‌ها در گسلش معکوس هستند و استفاده از خاک‌های نرم و با تراکم کم و همچنین کاهش عمق دفن لوله سبب کاهش مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در لوله می‌شوند. این در حالی است که تغییر مدول الاستیسیته خاک تأثیر چندانی بر مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله ندارد. همچنین، افزایش زاویه اتساع خاک در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل سبب افزایش مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله می‌شود.

واژگان کلیدی: لوله مدفون، گسل معکوس، مدل عددی، نرم‌افزار ABAQUS، اندرکنش خاک و لوله

۱- مقدمه

پرداخت، می‌توان از نیومارک و هال^۱ [1] نام برد که در سال ۱۹۷۵ لوله را به صورت کابل فرض کردند و فقط تغییر شکل محوری را در نظر گرفتند و از مقاومت جانبی خاک و سختی خمشی خط لوله صرف نظر کردند. از این روش، برای لوله در گذر از گسل

اهمیت خطوط لوله به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی زندگی بشر امروزی، محققان را به انجام مطالعات زیادی در زمینه رفتار لوله‌های گذرنده از گسل وادار نموده است. از اولین پیشگامانی که به پیش‌بینی رفتار مکانیکی خطوط لوله تحت جابه‌جایی گسل

1 Newmark and Hall

نرمال استفاده می‌شود. کندی و همکاران¹ [2] در سال ۱۹۷۷، کار نیومارک را با در نظر گرفتن مقاومت جانبی خاک ادامه دادند و توانستند برای لوله‌های گذر از امتدادلغز و نرمال روشی را ارائه دهند. در این روش، همچنان از سختی خمشی لوله صرف‌نظر شده است. این مدل‌های تحلیلی با کار وانگ و یه^۲ [3] و کارامیتروس و همکاران^۳ [4] برای گسل امتدادلغز ادامه یافت. طرح اتخاذ شده توسط وانگ و یه^۳ [3] بر اساس تقسیم لوله به چهار قسمت بود: دو قسمت در ناحیه انحنای بالا در دو طرف خط گسل به عنوان قوس دایره‌ای و دو قسمت خارج از این منطقه به صورت تیر بر روی بستر الاستیک است. به‌طور خاص، این مدل نمی‌تواند اثر نیروی محوری بر سختی خمشی را محاسبه کند. کار انجام گرفته توسط کارامیتروس [4] به معرفی تعدادی اصلاحات روش‌های ذکر شده بالا پرداخت. یک خط لوله به چهار قسمت تقسیم‌بندی شد که بر اساس نظریه تیر بر روی بستر الاستیک و نظریه الاستیک تیر تحلیل شده است.

علاوه بر روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی مدرن مبتنی بر اساس روش‌های المان محدود، اجازه انجام تحلیل‌های جزئی را به مهندسان و محققان می‌دهد. از جمله روش‌های عددی انجام گرفته با کمک نرم‌افزارهای مبتنی بر روش عددی المان محدود، می‌توان به کارهای اریمن و لی^۴ [5] در ارزیابی کرنش لوله تحت خمش با کمک مدل المان محدود و میرسون^۵ [6] در مطالعه کرنش لوله با کمک نرم‌افزار المان محدود یونی پیپ^۶ و مطالعات تحلیلی و عددی انجام شده بر روی لوله‌های پیوسته توسط اوروک و لیو^۷ [7] برای گسل امتدادلغز اشاره کرد. تاکادا و همکاران^۸ [8] در سال ۲۰۰۱ به مطالعه رابطه بین بیشینه کرنش ایجاد شده در لوله و زاویه خمیدگی لوله گذرنده از گسل امتدادلغز با کمک روش المان محدود پرداختند. برای این منظور، آن‌ها شرایط مختلفی از لوله و گسل را مورد مطالعه قرار دادند. وازورس

و همکاران^۹ [۱۰، ۹] در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ به مدل‌سازی لوله مدفون در خاک تحت حرکات گسل امتدادلغز و با کمک نرم‌افزار آباکوس پرداختند و اثر پارامترهایی چون جهت‌گیری لوله نسبت به گسل، نسبت عمق دفن به قطر لوله و تنش تسلیم خاک بر کرنش خمشی لوله را، مورد بررسی قرار دادند. جوشی و همکاران^{۱۱} [11] در سال ۲۰۱۱ به مطالعه عددی لوله‌های مدفون در خاک در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. برای این منظور ایشان با استفاده از یک مدل المان محدود و با در نظر گرفتن المان تیر برای لوله و فرم‌های غیر خطی مجزا برای شبیه‌سازی خاک تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار لوله‌های مدفون گذرنده از گسل معکوس را به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی نمودند. جلالی و همکاران^{۱۲} [14] در سال ۲۰۱۶ با کمک جعبه دویخی^{۱۲} شبیه‌ساز گسلش به مدل‌سازی بزرگ مقیاس گسل معکوس پرداختند و اثر پارامترهای مختلف بر تغییر شکل‌های ایجاد شده در لوله را مطالعه قرار دادند.

۲- مدل‌سازی المان محدود

در این تحقیق با کمک نرم‌افزار آباکوس [13] به مدل‌سازی سه بعدی لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس اقدام شده است. از المان حجمی^{۱۳} نوع C3D8R برای مدل‌سازی خاک و از المان پوسته نوع S4R، برای مدل‌سازی لوله استفاده شده است تا بتواند رفتارهای پیچیده غیرخطی، مانند چین خوردگی ایجاد شده در لوله را مدل‌سازی کنند. در مورد لوله‌های مدفون ابعاد مدل باید به نحوی تعیین شود که شرایط تکیه‌گاهی و نقاط مرزی تأثیری بر پاسخ لوله نداشته باشد. بنابراین لازم است تا نقاط مهار به اندازه کافی از محور گسل دور انتخاب شوند تا نیروهای ایجاد شده در لوله در حین گسلش تنها به وسیله نیروی اصطکاک بین لوله و خاک خنثی شوند و نقاط مهار بر پاسخ تأثیری نداشته باشند. به همین منظور و با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان پیشین [8، 14]، با در نظر گرفتن

1 Kennedy et al.

2 Wang and Yeh

3 Karamitros et al.

4 Ariman and Lee

5 Meyersohn

6 Unipip

7 O'Rourke and Liu

8 Takada et al.

9 Vazouras et al.

10 Joshi et al.

11 Jalali et al.

12 Split-box

13 Solid

شکل ۲. نحوه تقسیم‌بندی، ابعاد و شبکه‌بندی در (الف) راستای طولی لوله، (ب) مقطع طولی خاک و (ج) مقطع عرضی خاک

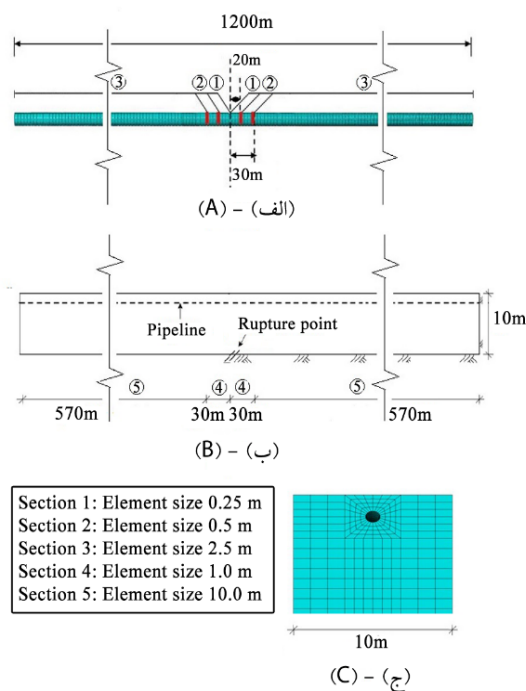


Fig. 2. Division, dimensions and meshing style of (A) longitudinal direction of the pipe (B) Longitudinal section of soil profile (C) cross section of soil.

۳- سنجش صحت مدل‌سازی

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی، مدلی مطابق با توضیحات بخش قبل ساخته شد و نتایج مدل‌سازی عددی، با مدل‌سازی انجام‌شده توسط جوشی و همکاران [11] مقایسه گردید. مطابق با مدل‌سازی انجام‌شده توسط جوشی و همکاران [11]، لوله در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط که دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر مترمکعب است، مدفون شده است و فاصله تاج لوله از سطح زمین برابر ۱/۳ متر است. ضریب اندود سطحی بین خاک و لوله برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. در این مدل عددی، از لوله X65 استفاده شده است که دارای منحنی تنش-کرنش دوخطی مطابق با شکل (۳) و مشخصات مندرج در جدول (۱) است.

مدل‌هایی با طول‌های متفاوت و طی چند مرحله تکرار و خطا به بررسی اثر حرکات گسل بر کرنش‌های ایجاد شده در لوله و همچنین نیروهای ایجاد شده در نقاط مهار پرداخته شد. نتایج نشان داد که با انتخاب مدلی به طول ۱۲۰۰ متر مقادیر نیروهای ایجاد شده در نقاط مهار به حداقل می‌رسد و از آن طول به بعد تغییر طول مدل تأثیر چندانی بر مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله نمی‌گذارد. همچنین انجام مطالعات عددی متعدد بصورت تکرار و خطا و بررسی توزیع تنش ایجاد شده در مقطع خاک و مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در لوله، نشان داد که انتخاب مدلی با مقطع ۱۰ متر در ۱۰ متر برای توده خاک، می‌تواند تأثیر مرزهای مدل در نتایج به‌دست‌آمده را ناچیز کند.

شکل (۱) مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود انجام‌شده با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

شکل (۱) مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار

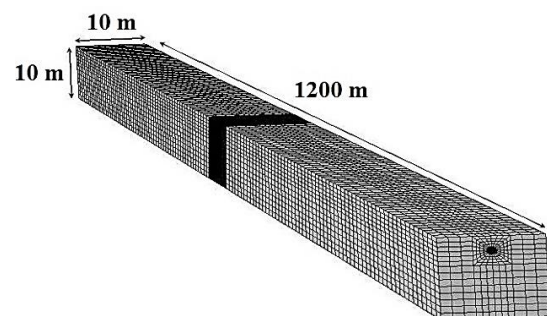


Fig. 1. 3D software model

شکل (۲) نیز نحوه تقسیم‌بندی مسئله، اندازه و ابعاد شبکه‌بندی به‌کاررفته برای لوله و خاک را نشان می‌دهد که بر اساس مطالعات عددی متعدد بصورت تکرار و خطا به‌دست آمده است. لازم به ذکر است در این پژوهش جهت شبیه‌سازی رفتار کشسان-خمیری خاک از مدل رفتاری مور کولمب استفاده شده است که با پارامترهای چسبندگی c ، زاویه اصطکاک ϕ ، مدول الاستیسیته E و نسبت پواسون ν توصیف می‌شود.

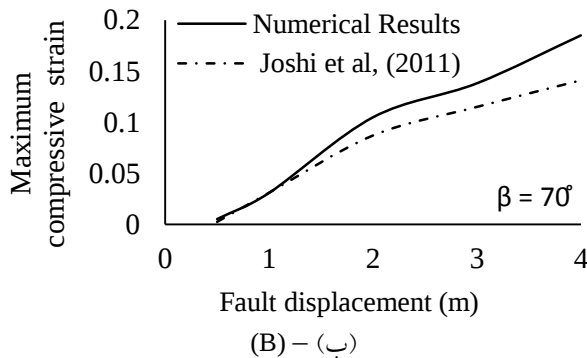


Fig. 4. Variations of the maximum compressive strains on the pipe for the dip angle (A) 40 degrees (B) 70 degrees

همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد، در جابه‌جایی‌های کوچک گسل تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل سه‌بعدی و مدل تیر-فنر جوشی و همکاران وجود دارد. اما در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل اختلافاتی بین نتایج مشاهده می‌شود. علت این امر آن است که در مدل تیر-فنر از المان‌های تیر جهت مدل‌سازی لوله استفاده می‌شود، حال آنکه این المان‌ها توانایی مدل‌سازی کماتش موضعی (چین‌خوردگی) را ندارند و تنها می‌توانند کماتش کلی را به‌خوبی مدل‌سازی نمایند [15,11]. از آنجایی‌که در حالت وقوع کماتش کلی کرنش‌ها در سطح وسیعی توزیع می‌شوند (برخلاف کرنش موضعی که کرنش‌ها در یک محدوده کوچک تجمع می‌یابند)، مقادیر کرنش‌ها چندان بزرگ نیستند. به همین دلیل، در محدوده تغییر شکل‌های کوچک گسل که به دلیل پایین بودن سطح کرنش‌ها کماتش کلی به وقوع می‌پیوندد، تطابق خوبی بین مدل تیر-فنر و مدل سه‌بعدی برقرار است، اما در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل که مقادیر کرنش‌ها افزایش می‌یابد و کماتش موضعی در لوله به وقوع می‌پیوندد، اختلافاتی بین مقادیر مشاهده می‌شود. در ادامه، به‌منظور اطمینان بیشتر از صحت مدل‌سازی، سعی شد تا با رویکردی مشابه، یک آزمایش فیزیکی نیز شبیه‌سازی شود و نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردد. بدین منظور، از آزمایش بزرگ‌مقیاس جلالی و همکاران [12] استفاده شد. در سال ۲۰۱۶ جلالی و همکاران [12] به مدل‌سازی بزرگ‌مقیاس رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. آن‌ها برخلاف روش‌های رایج مدل‌سازی به کمک سانتریفیوژ، اقدام

شکل (۳) رابطه تنش - کرنش دوخطی برای فولاد X65

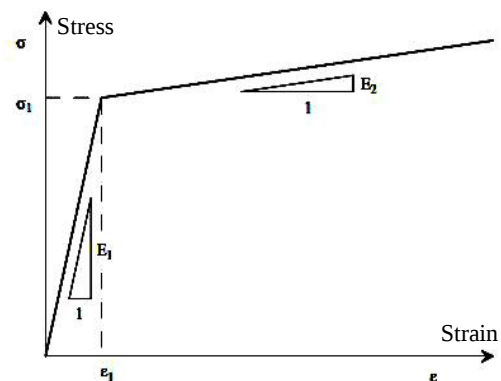


Fig. 3. Bilinear stress-strain relationship for the X65 steel

جدول (۱) مشخصات فولاد X65 مورد استفاده در این تحلیل

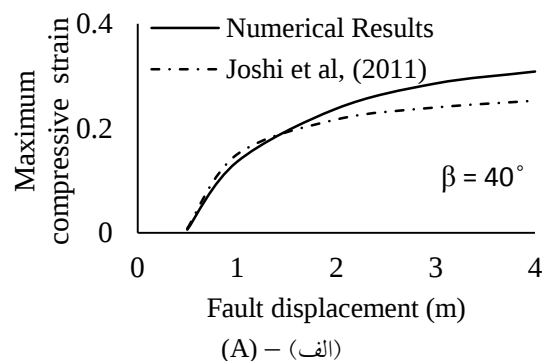
عددی	
Yield stress (σ_1)	490 MPa
Failure stress (σ_2)	531 MPa
Failure strain (ϵ_2)	4.0%
Elastic Young's modulus (E_1)	210 GPa
Yield strain ($\epsilon_1 = \sigma_1/E_1$)	0.233%
Plastic Young's modulus ($E_2 = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\epsilon_2 - \epsilon_1)$)	1.088 GPa

Table (1) X65 steel properties considered in the numerical analyses

شکل (۴) مقایسه مقادیر بیشینه کرنش‌های فشاری به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی انجام‌شده با نرم‌افزار و مدل‌سازی انجام‌شده توسط جوشی و همکاران [11] را برای زاویه شیب گسل (۴۰ و ۷۰ نشان می‌دهد).

شکل (۴) تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله برای زاویه

شیب (الف) ۴۰ درجه (ب) ۷۰ درجه



(A) - (الف)

جدول (۴) مشخصات خاکریز ماسه‌ای آزمایش بزرگ مقیاس
جلالی و همکاران [۱۲]

C_c , dry unit weight	1.01
C_u , coefficient of uniformity	6.69
D_{50} , average particle size (mm)	1.1
ϕ , friction angle (degree)	33.5
C , cohesion (KPa)	5
G_s , specific gravity	2.56
γ_d , dry unit weight ($\frac{KN}{m^3}$)	17.9

Table (4) Material properties for sand backfill of the Jalali et al.'s experiment

شکل (۵) نتایج مقایسه مدل عددی و مدل آزمایشگاهی جلالی و همکاران [12] را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی انجام‌شده در پژوهش حاضر و مدل آزمایشگاهی جلالی و همکاران [12] وجود دارد که این امر نشان‌دهنده صحیح بودن نحوه مدل‌سازی عددی انجام شده در پژوهش حاضر است.

شکل (۵) تغییرات کرنش محوری برای (الف) سطح پایین لوله و (ب) سطح بالای خط لوله

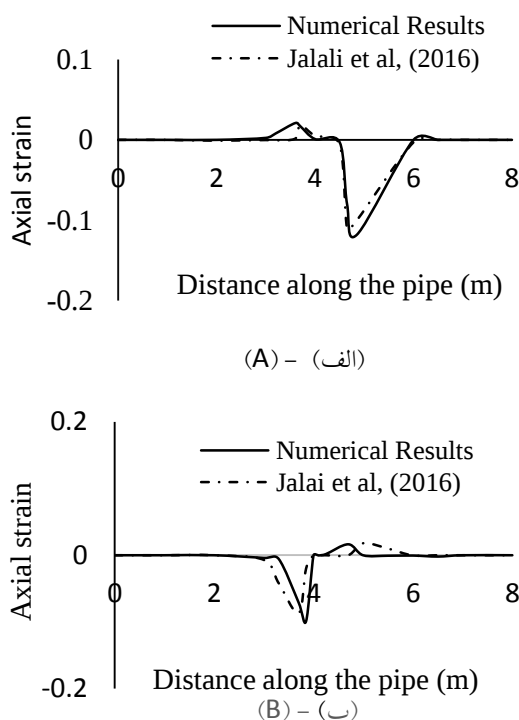


Fig. 5. Variations of the longitudinal strain for (A) invert and (B) crown of the pipeline

به ساخت دستگاه دوبخشی شبیه‌ساز با ابعاد بزرگ‌تر کردند تا با فراهم کردن شرایط شبه استاتیکی، رفتار لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا طبق مشخصات API-5L Grade B [16] را تحت شبیه‌ساز گسلش معکوس و به‌صورت بزرگ‌مقیاس مورد مطالعه قرار دهند.

مدل رفتاری اختصاص‌یافته به لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا API-5L Grade B بر اساس رابطه رمبرگ-اسگود^۱ است که رابطه تنش کرنش آن به‌صورت زیر است:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_i} \left[1 + \frac{n}{(r+1)} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^r \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱) ε کرنش، σ تنش و E_i مدول کشسانی اولیه برحسب مگا پاسکال، r و n نیز ضرایب ثابت رمبرگ و اسگود هستند. جدول ۲ پارامترهای رمبرگ و اسگود لوله پلی‌اتیلن API-5L Grade B مورد آزمایش را نشان می‌دهد. جدول (۳) نیز مشخصات فیزیکی آزمایش جلالی و همکاران [12] را نشان می‌دهند. مشخصات خاک مدل‌سازی شده نیز که منطبق بر خاکریز ماسه‌ای آزمایش جلالی و همکاران [12] است، در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۲) پارامترهای منحنی تنش - کرنش رمبرگ-اسگود برای لوله فولادی API-5L grade B [۱۲]

E_i (MPa)	σ_0 (MPa)	n	r
210000	320	17.896	9.3

Table (2) Parameters of the Ramberg-Osgood stress-strain curve for API-5L grade B steel pipe

جدول (۳) مشخصات آزمایش جلالی و همکاران [۱۲]

Height × Width × Length (m)	2×1.7×8
Fault displacement (mm)	600
Fault dip angle (degree)	61
H/D	8.8
H (m)	1
D/t	26
t (mm)	4.4
D (mm)	114.3

Table (3) Properties of the Jalali et al.'s experiment

۴- مطالعه حساسیت بر رفتار لوله

به منظور بررسی پاسخ لوله در برابر حرکت گسل معکوس تأثیر عوامل مختلف نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول الاستیسیته خاک، نسبت پواسون خاک و نسبت عمق دفن به قطر لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. واضح است که بررسی دقیق رفتار لوله در برابر گسلش نیازمند اطلاعات دقیق از هندسه، مقدار جابه‌جایی گسل و همچنین ویژگی‌های نوع خاک محل است که کسب این اطلاعات نیاز به مطالعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و انجام تحقیقات محلی در ساختگاه دارد. با این وجود، در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن محدوده مناسب و متنوعی از نوع خاک‌ریز، عمق و قطر لوله، پاسخ لوله و عملکرد آن تحت حرکت گسل معکوس مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه نتایج حاصل از این مطالعه آورده شده است.

۴-۱- بررسی اثر پاسخ لوله در خاک‌های چسبنده

برای بررسی اثر نوع خاک چسبنده، رفتار لوله فولادی X65 که دارای قطر ۰/۹۱۴۴ متر (۳۶ اینچ) و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) در دو نوع خاک رس نرم و رس سفت تحت شرایط زهکشی نشده مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات دو نوع خاک رسی مورد مطالعه تحت بارگذاری در شرایط زهکشی نشده در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵) مشخصات خاک‌های رسی مورد مطالعه

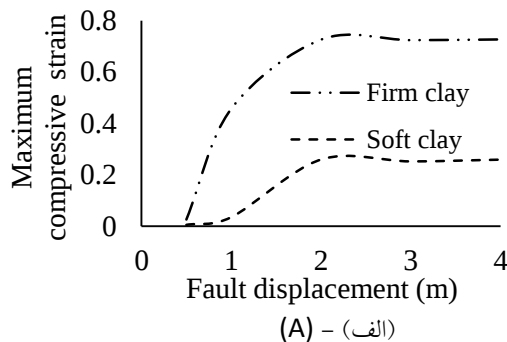
Soil properties	Firm clay	Soft clay
E , Young's modulus (MPa)	100	25
ν , poisson ratio	0.49	0.49
ψ , dilation angle (degree)	0	0
ϕ , friction angle (degree)	0	0
C , cohesion (kPa)	200	50
γ , unit weight (kN/m ³)	18	18

Table (5) Properties of under the study clay soils

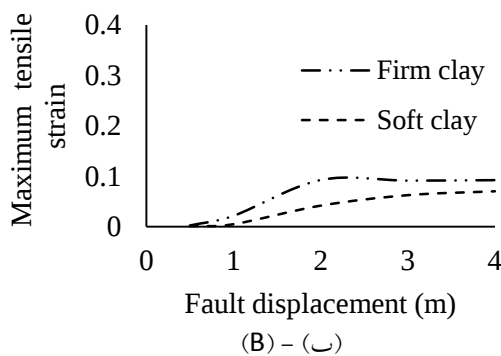
شکل (۶-الف) و ب به ترتیب تغییرات بیشینه کرنش فشاری و کششی کلی ایجادشده در لوله را برای دو نوع خاک رسی چسبنده نرم و سفت تحت مقادیر مختلف از جابه‌جایی گسل را نشان می‌دهد.

شکل (۶) اثر نوع خاک چسبنده بر کرنش‌های ایجادشده در لوله (الف)

بیشینه کرنش‌های فشاری (ب) بیشینه کرنش‌های کششی



(الف) - (A)



(ب) - (B)

Fig. 6. Effect of the type of cohesive soil on the pipe strain (A) maximum compressive strains (B) maximum tensile strains

لازم به ذکر است در مدل‌سازی انجام شده در این بخش، از اثر مقاومت کششی خاک‌های رسی صرف‌نظر شده است. همچنین فرض شده است تاج لوله در عمق ۱/۳ متری قرار دارد. گسل مورد مطالعه دارای شیب ۴۰ درجه نسبت به راستای افقی است و در هر تحلیل جابه‌جایی کلی به مقدار ۴ متر برای گسل در نظر گرفته شده است که در نمونه‌های مساوی ۰/۵ متری اعمال می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با افزایش جابه‌جایی گسل، بیشینه هر دو دسته کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابد. روند رشد افزایشی کرنش‌ها تا جابه‌جایی گسل به اندازه ۲ متر زیاد بوده، ولی در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۲ متر، شیب تغییرات ملایم و تقریباً ثابت می‌شود. این پدیده ناشی از وقوع گسیختگی در لوله و ایجاد چین‌خوردگی در مقطع آن است. از طرف دیگر، با مقایسه شکل‌های (۶-الف) و ب مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش‌های فشاری خیلی بزرگ‌تر از مقادیر کرنش‌های کششی است؛

جدول (۶) مشخصات خاک‌های ماسه‌ای مورد مطالعه

Soil properties	Medium dense sand	Dense sand	Loose sand
E, Young's modulus (MPa)	40	75	10
ν , poisson ratio	0.3	0.3	0.3
ψ , dilation angle (degree)	0	0	0
Φ , friction angle (degree)	35	45	30
C, cohesion (kPa)	5	5	5
γ , unit weight (kN/m ³)	18	18	18

Table (6) Properties of the under the study granular soils

شکل (۷) اثر نوع خاک دانه‌ای بر کرنش‌های ایجادشده در لوله (الف)

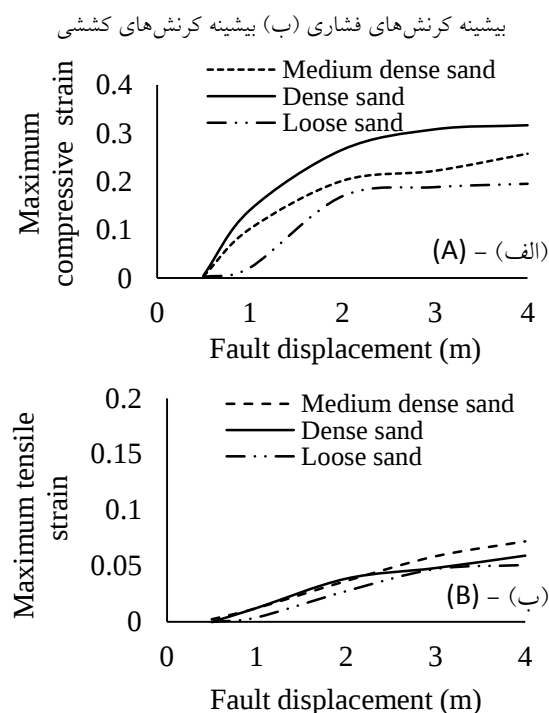


Fig. 7. Effect of the type of granular soil on the pipe strain (A) maximum compressive strains (B) maximum tensile strains

همچنین، مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش‌های فشاری بیشتری در مقایسه با کرنش‌های کششی در لوله ایجاد می‌شود. بنابراین احتمال گسیختگی لوله تحت کرنش‌های فشاری (گسیختگی از نوع کمانش موضعی) بسیار بیشتر از وقوع گسیختگی کششی است. در خصوص تأثیر تراکم خاک احاطه کننده بر پاسخ لوله، می‌توان گفت که با افزایش تراکم خاک

بنابراین کرنش‌های فشاری کرنش‌های بحرانی محسوب می‌شوند و احتمال گسیختگی لوله تحت این کرنش‌ها و وقوع گسیختگی از نوع کمانش موضعی بیشتر از احتمال وقوع گسیختگی کششی تحت کرنش‌های کششی است. نکته دیگر این است که نوع خاک تأثیر بیشتری بر کرنش فشاری نسبت به کرنش کششی داشته است، بدین صورت که در جابجایی‌های بزرگ گسل، بیشینه کرنش فشاری در رس سفت نسبت به رس نرم سه برابر (۳۰۰٪) شده، در صورتی که این افزایش برای بیشینه کرنش کششی ۴۰٪ بوده است. به عبارت دیگر، نرم‌تر شدن خاک پیرامون لوله تأثیر بیشتری در کنترل کرنش‌های فشاری (کمانش موضعی) دارد. بروز این رفتار را می‌توان این‌گونه شرح داد که لوله در خاک رس نرم، راحت‌تر جابه‌جا می‌شود و در نتیجه نیروهای اندرکنشی کمتری بر لوله وارد می‌شود و مقادیر کرنش‌ها کاهش می‌یابد.

۴-۲- بررسی اثر پاسخ لوله در خاک‌های دانه‌ای

به منظور مطالعه رفتار لوله در خاک‌های دانه‌ای، سه نوع خاک ماسه‌ای سست، با تراکم متوسط و متراکم در نظر گرفته شد. در این قسمت نیز مشابه بخش قبل لوله‌ای با قطر ۹۱/۴۴/۰ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد که تحت گسل معکوسی با زاویه شیب ۴۰ درجه و با جابه‌جایی حداکثر ۴ متر قرار دارد. در تمامی حالات مدل‌سازی از لوله فولادی X65 استفاده شده و ارتفاع خاک بالای لوله برابر ۱/۳ متر اختیار شده است. مشخصات مصالح مورد مطالعه در این بخش در جدول (۶) آورده شده است.

در شکل (۷)، تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری (شکل ۷-الف) و تغییرات بیشینه کرنش‌های کششی (شکل ۷-ب) ایجادشده در لوله تحت مقادیر مختلف از جابه‌جایی گسل نشان داده شده است. مشابه با حالت خاک چسبنده، مشاهده می‌شود که کرنش‌های ایجادشده در لوله چه در ناحیه تحت فشار و چه در ناحیه تحت کشش، با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب تغییرات کرنش در جابه‌جایی‌های بزرگ گسل مخصوصاً برای کرنش فشاری، کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۸- الف و ۸- ب) به ترتیب مقادیر بیشینه کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در لوله را در سه نوع خاک ماسه‌ای متراکم و تحت حرکت گسل معکوس نشان می‌دهد.

لوله فولادی X65 مورد مطالعه در این بخش دارای قطر ۰/۹۱۴۴ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر است که ارتفاع خاک بالای آن ۱/۳ متر است. گسل معکوس نیز دارای زاویه شیب ۴۰ درجه و با حداکثر جابه‌جایی ۴ متر است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود تغییر مدول الاستیسیته خاک تأثیری چندانی بر مقادیر کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله و در مقادیر مختلف از جابه‌جایی گسل ندارد. البته افزایش مدول الاستیسیته سبب کاهش ناچیز بیشینه کرنش‌های کششی شده است. بنابراین چنین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مدول الاستیسیته خاک می‌تواند در افزایش احتمال گسیختگی کششی لوله کمک کند. ولی تأثیری بر گسیختگی فشاری لوله ندارد. اگرچه در گسلش معکوس عامل اصلی گسیختگی کرنش‌های فشاری به شمار می‌آیند اما در مورد گسل‌های نرمال و امتدادلغز که تحت حرکت خود باعث ایجاد کشش در لوله می‌شوند، بستر سست ماسه‌ای می‌تواند باعث عملکرد بهتر لوله‌های مدفون تحت حرکات گسل‌های مذکور گردد. همچنین با مقایسه به دست آمده از نتایج شکل‌های (۷ و ۸) چنین می‌توان نتیجه گرفت که عامل تأثیرگذار در تفاوت رفتار لوله‌های مدفون در خاک‌های دانه‌ای در برابر حرکات گسل، زاویه اصطکاک داخلی خاک است. علت این امر نیز به تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر نیروهای اندرکنشی ایجاد شده در سطح تماس لوله و خاک بر می‌گردد.

۴-۴- بررسی اثر زاویه اتساع خاک بر پاسخ لوله

به منظور بررسی اثر زاویه اتساع خاک، زوایای صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای ماسه متراکم مندرج در جدول ۶ در نظر گرفته شد. لوله X65 مورد مطالعه دارای قطر ۰/۹۱۴۴ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر و عمق دفن ۱/۳ متر است که تحت جابه‌جایی گسل معکوسی با حداکثر جابه‌جایی ۲ متر قرار گرفته است. شکل (۹) اثر زاویه اتساع خاک بر کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در لوله

ماسه‌ای، بیشینه کرنش فشاری نیز افزایش چشمگیری داشته است ولی تغییر چندانی در بیشینه کرنش کششی نداشته است. به نظر می‌رسد علت این امر، راحت‌تر جابه‌جا شدن لوله در داخل خاک‌های با تراکم کمتر و در نتیجه کمتر بودن نیروهای مقاوم در حین این جابه‌جایی است. بنابراین با توجه به بحرانی‌تر بودن مقادیر کرنش‌های فشاری (از نظر مقدار) در مقایسه با کرنش‌های کششی، می‌توان گفت که عبور لوله‌ها از محلی که دارای بستر سست و با تراکم کمتر در محل تلاقی لوله و گسل است، به کمتر شدن خسارات کمک بیشتری می‌کند.

۴-۳- بررسی اثر مدول الاستیک بر پاسخ لوله

جهت بررسی اثر مدول الاستیسیته خاک بر رفتار لوله‌های مدفون گذرنده از گسل‌های فعال، رفتار لوله مدفون در سه خاک ماسه‌ای متراکم با مدول الاستیسیته متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور سه نوع ماسه متراکم با مدول‌های الاستیسیته ۷۵، ۵۵ و ۳۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. سایر مشخصات این ماسه‌ها منطبق بر مشخصات ماسه متراکم مندرج در جدول (۶) است.

شکل (۸) اثر مدول الاستیسیته خاک بر کرنش‌های ایجاد شده در لوله

(الف) بیشینه کرنش‌های فشاری (ب) بیشینه کرنش‌های کششی.

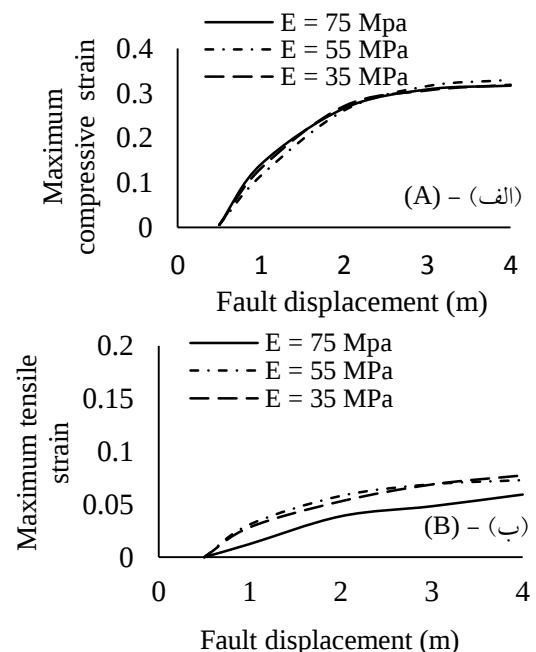


Fig. 8. The effect of elasticity modulus on the pipe strains (A) maximum compressive strains (B) maximum tensile strains

نشان را می‌دهد.

شکل (۹) اثر زاویه اتساع خاک بر کرنش‌های ایجادشده در لوله (الف) بیشینه

کرنش‌های فشاری (ب) بیشینه کرنش‌های کششی.

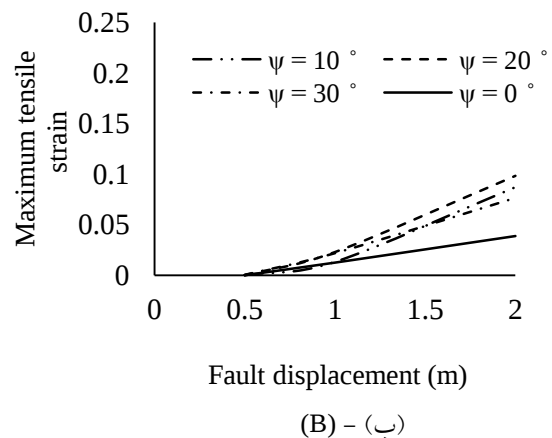
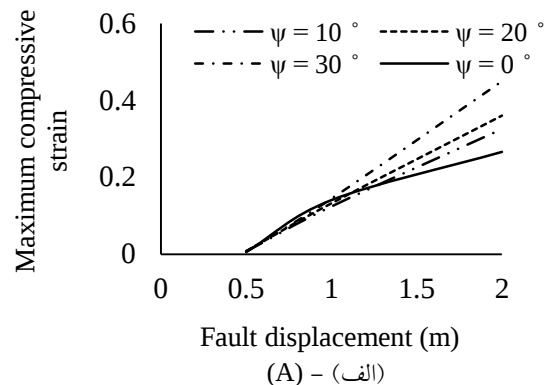


Fig. 9. The effect of dilation angle on the pipe strain (A) maximum compressive strains (B) maximum tensile strains

به‌طور کلی می‌توان گفت که زاویه اتساع در جابجایی‌های کوچک گسل (تا ۱ متر) نقشی نداشته، بلکه اثر آن در جابجایی‌های بزرگتر مشهود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اتساع، بیشینه کرنش‌های فشاری افزایش می‌یابد. این تأثیر افزایشی برای بیشینه کرنش‌های کششی تا $\psi = 20^\circ$ ادامه داشته و سپس کاهش داشته است. در هر حال، مشاهده می‌شود که وجود کمی اتساع در خاک، تأثیر بسزایی در رفتار کششی لوله می‌گذارد. شایان ذکر است که مفهوم زاویه اتساع، به رفتار افزایشی حجم خاک در اثر اعمال بارگذاری برشی مربوط است. در خاک‌های دانه‌ای، زاویه اتساع با افزایش تراکم و همچنین، با تیز گوشگی شکل ذرات نسبت مستقیم دارد. با توجه به توضیحات داده شده، می‌توان نتیجه گرفت که خاک محاط کننده لوله باید از مصالح ریز و با شکل گردگوشه باشد تا از خسارت‌های احتمالی وارد بر لوله (در هر دو حالت

گسیختگی فشاری و کششی) جلوگیری شود.

۴-۵- بررسی اثر نسبت عمق دفن به قطر بر پاسخ لوله

برای بررسی اثر نسبت عمق دفن به قطر لوله، لوله‌ای به قطر ۰/۹۱۴۴ متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد که تحت گسل معکوسی با شیب ۶۰ درجه و حداکثر جابه‌جایی ۲ متر قرار گرفته است. با تغییر عمق خاک ماسه‌ای مترام بالا‌ی تاج لوله به مقادیر ۰/۵، ۱/۰، ۱/۳ و ۲ متر، نسبت‌های عمق دفن به قطر لوله (H/D) ۱/۱، ۱/۶، ۱/۹ و ۲/۷ مورد مطالعه قرار گرفتند.

شکل (۱۰) اثر نسبت عمق دفن به قطر لوله بر کرنش‌های ایجاد شده در

لوله (الف) بیشینه کرنش‌های فشاری (ب) بیشینه کرنش‌های کششی.

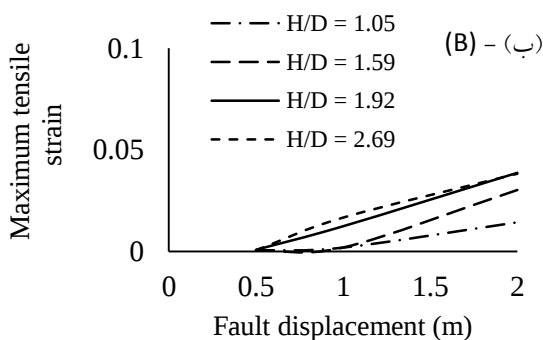
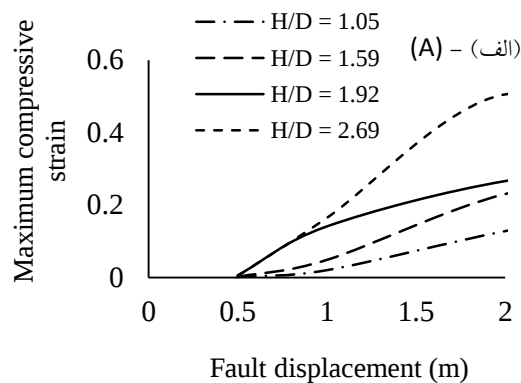


Fig. 15. The effect of burial depth to pipe diameter ratio (H/D) on the pipe strains (A) maximum compressive strains (B) maximum tensile strains

تغییرات بیشینه کرنش‌های فشاری و کششی به‌دست‌آمده در حین حرکت گسل نیز در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش میزان جابه‌جایی گسل برای تمام نسبت‌های عمق دفن، هر دو مقدار کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابد. از نظر مقدار، بیشینه

کرنش‌های کششی خیلی کوچک‌تر از بیشینه کرنش‌های فشاری (کمتر از ۰/۱) هستند. بنابراین می‌توان گفت که در حرکت گسل معکوس وقوع کمانش محتمل‌تر خواهد بود. ولی در هر صورت، با افزایش نسبت H/D مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابند. به عبارت دیگر، در صورتی که لوله‌ها به صورت سطحی‌تر قرار گرفته باشند، تحت کرنش‌های کوچک‌تر فشاری و کششی قرار می‌گیرند. علت این امر این است که در اعماق دفن کمتر، لوله راحت‌تر می‌تواند خاک فوقانی خود را به حرکت درآورد و در نتیجه نیروهای کمتری از جانب خاک به آن وارد می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود که در محل تلاقی لوله و گسل عمق دفن لوله را کاهش داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه عددی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس پرداخته شد. در ابتدا صحت نحوه مدل‌سازی با مقایسه نتایج با مدل‌های معتبر آزمایشگاهی و عددی سنجیده شد. مقایسه میان نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده مناسب بودن شبیه‌سازی‌ها است. سپس به مطالعه رفتار لوله در دو نوع خاک چسبنده و سه نوع خاک دانه‌ای پرداخته شد تا پاسخ لوله تحت شرایط مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بررسی شود. در این تحقیق، مطالعه حساسیت بر روی پارامترهای مختلف خاک شامل زاویه اتساع و مدول الاستیسیته خاک بر رفتار لوله‌های مدفون مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر تغییر نسبت عمق دفن بر پاسخ لوله مطالعه شد. خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش در ادامه آمده است:

۱- به‌طور کلی، با افزایش میزان جابه‌جایی گسل، مقادیر کرنش‌های ایجادشده در لوله اعم از فشاری و کششی افزایش می‌یابد. علت آن، افزایش نیروهای وارد از طرف خاک به لوله در اثر افزایش میزان جابه‌جایی گسل است.

۲- به‌طور کلی، تحت حرکت گسل معکوس، کرنش‌های فشاری که در لوله ایجاد می‌شود، مقادیر بسیار بزرگ‌تری نسبت به کرنش‌های کششی دارند. بنابراین گسیختگی تحت کرنش‌های فشاری زودتر رخ خواهد داد و لذا احتمال وقوع کمانش

موضعی در گسل معکوس بیشتر از گسیختگی کششی است. ۳- نتایج مطالعات نشان داد که با افزایش میزان جابه‌جایی گسل تا حدی، در ابتدا شیب تغییرات کرنش‌های فشاری زیاد بوده و از آن حد به بعد، شیب کاهش می‌یابد. علت وقوع این امر ناشی از گسیختگی لوله در جابه‌جایی‌های بزرگ و وقوع چین‌خوردگی در مقطع لوله‌ها است.

۴- مطالعه رفتار لوله در خاک‌های چسبنده رسی نشان داد که حضور خاک رس نرم در محل در مقایسه با خاک رس سفت سبب کاهش کرنش‌های ایجادشده در لوله می‌شود. درواقع شرایط بستر نرم‌تر این امکان را برای لوله فراهم می‌کند که تحت حرکت گسل راحت‌تر درون توده خاک جابه‌جا شود و در نتیجه نیروهای مقاوم کمتری از طرف خاک به آن وارد شود. این امر منجر به کاهش کرنش‌های ایجادشده در لوله و در نتیجه افزایش ظرفیت تغییر شکل‌پذیری لوله می‌شود.

۵- به‌طور مشابه، مطالعه رفتار لوله در خاک‌های دانه‌ای نشان داد که با کاهش تراکم خاک، مقادیر کرنش‌های ایجادشده در لوله نیز کاهش می‌یابد و لذا لوله‌های مدفون در بستر ماسه‌ای سست در مقایسه با خاک‌های ماسه‌ای متراکم‌تر، جابه‌جایی‌های بزرگ‌تری از گسل را قبل از وقوع گسیختگی می‌توانند تحمل کنند.

۵- مطالعه انجام‌شده بر روی مدول الاستیسیته خاک نشان داد که تغییر این پارامتر ژئوتکنیکی تأثیر کمی بر مقادیر کرنش‌های کششی ایجادشده در لوله ندارد، هرچند تأثیری بر کرنش‌های فشاری ندارد.

۶- بررسی‌ها نشان داد که زاویه اتساع خاک در جابه‌جایی‌های کوچک گسل تأثیری بر مقادیر کرنش‌های ایجادشده در لوله ندارد، اما با افزایش میزان جابه‌جایی گسل، لوله‌های مدفون در خاک‌های با زاویه اتساع بزرگ‌تر کرنش‌های فشاری و کششی بزرگ‌تری را تجربه می‌کنند.

۷- بررسی نتایج نشان داد که با افزایش عمق دفن لوله و بالا رفتن نسبت H/D مقادیر کرنش‌های فشاری و کششی افزایش می‌یابد. زیرا لوله‌های مدفون در عمق کم، خاک بالای خود را راحت‌تر جابه‌جا کرده و در نتیجه نیروی کمتری از طرف خاک به آن‌ها وارد می‌شود.

- 10- Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas, P. 2012 Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **41**, 164-180.
- 11- Joshi, S., Prashant, A., Deb, A. and Jain, S.K. 2011 Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31** (7), 930-940.
- 12- Jalali, H.H., Rofooei, F.R., Attari, N.K.A. and Samadian, M. 2016 Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **86**, 1-14.
- 13- Corp., D.S.S. 2012 Abaqus 6.12 User's Manual. Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, USA.
- 14- Karamitros, D., Bouckovalas, G., Kouretzis, G. and Gkesouli, V. 2011 An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31** (11), 1452-1464.
- 15- Xie, X., Symans, M.D., O'Rourke, M.J., Abdoun, T.H., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C. et al. 2013 Numerical modeling of buried HDPE pipelines subjected to normal faulting: a case study. *Earthquake Spectra*, **29** (2), 609-632.
- 16- API. 2004 Specification for Line Pipe. In *API Specifications 5L*, American Petroleum Institute.

References

۶ مراجع

- 1- Newmark, N.M. and Hall, W.J. Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement.
- 2 Kennedy, R., Chow, A. and Williamson, R. 1977 Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline, Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol. 103, NO. TE5, pgs 617-633.
- 3- Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H. 1985 A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake engineering & structural dynamics*, **13** (1), 75-96.
- 4- Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D. and Kouretzis, G.P. 2007 Stress analysis of buried steel pipelines at strike slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27** (3), 200-211.
- 5- Ariman, T. and Lee, B. On beam mode of buckling of buried pipelines, pp. 26-29.
- 6- Meyersohn, W.D. 1991 *Analytical and design considerations for the seismic response of buried pipelines*. Thesis, Cornell University.
- 7- O'Rourke, M.J. and Liu, X. 1999 Response of buried pipelines subject to earthquake effects.
- 8- Takada, S., Hassani, N. and Fukuda, K. 2001 A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake engineering & structural dynamics*, **30** (8), 1243-1257.
- 9- Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas, P. 2010 Finite element analysis of buried steel pipelines under strike slip fault displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30** (11), 1361-1376.

Numerical Investigation of Reverse Faulting Effect on the Response of Buried Pipes

Amin Monshizadeh naeen¹, Seyed Ehsan Seyed Hosseini^{*}

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Eng., Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Prof. of Geotechnical Eng., Faculty of Civil Eng., Ferdowsi University of Mashhad

*eseyedi@um.ac.ir

Abstract:

Pipelines are considered as lifelines, because they are used for transportation of different fluids such as natural gas, oil and water on which, the human life depends their existence. The damages to the pipelines are usually associated with human fatalities, financial losses and also environmental pollution. Earthquake wave propagation and permanent ground displacement (PGD) caused by surface faulting are potentially devastating natural events which threaten buried pipelines. Although small regions within the pipeline network are affected by faulting hazards, the rate of the damage is very high since fault movement imposes large deformation on pipelines. On the contrary, the whole of pipeline network is influenced by the wave propagation hazards, but the damage rate is lower which leads to lower pipe breaks and leaks per unit length of the pipe. On the other hand, buried pipelines due to their long length, have to pass through active faults which their large movements may lead to failure and rupture of the buried pipes. It is, therefore, essential to investigate the behavior of buried pipelines against fault displacements in order to mitigate the losses caused by these natural events and to try to keep them in service under various situations. Over the years, many researchers have attempted to analyze pipeline behavior via numerical, analytical and experimental modeling, but most of these works were designed to assess pipe response to strike-slip faulting and some were implemented to recognize the behavior of pipelines under normal faulting with right deformation angles. In the present study, In order to understand the behavior of the pipelines under reverse fault movements, the effects of different geotechnical and geometric conditions on the response of the pipes is examined. Numerical simulations have been conducted using the software ABAQUS based on finite element method. In most of the previous studies, a simplified beam-spring model was used to simulate the behavior of the pipes, but in this study a 3-D continuum model is employed to simulate the behavior of the buried pipes against reverse fault movements. In order to increase the accuracy of the analysis, it is tried to use the elements that the solution has best match with reality of the nature of soil and pipe behavior and the interaction between them. The results of the numerical study confirmed that the compressive strains in pipe caused by reverse faulting are larger than tensile strains, thus compressive strains are considered as the main cause of the failure of the buried pipes in the reverse fault motions. Investigating the pipes behavior in different soil types demonstrated that the buried pipelines in loose and soft soils experience less amount of strain in comparison with those buried in other types of the soils. This is due to the fact that the displacement of the pipeline in loose and soft soils is easier and there is less soil resistance against pipe displacement. The assessment of the effect of soil dilatation angle illustrated that in large fault displacements, the amounts of pipe strain decline with the reduction in the dilatation angle, while changing the modulus of elasticity of the soil has no impact on the response of the pipes. The results also showed that by reducing the burial depth, the level of strain induced in the buried pipes decreases.

Keywords: Buried Pipe, Reverse Fault, Numerical Model, ABAQUS Software, Pipe-Soil-Interaction.