



شبیه‌سازی عددی تغییر مکان عرضی لوله مدفون بر اثر ناپایداری شیروانی‌ها

ریحانه نوری، سید احسان سیدی حسینی نیا*

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۲۲
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۱۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

لوله مدفون
ناپایداری شیروانی
مدل‌سازی عددی
نرم‌افزار FLAC 3D
اندرکنش خاک و لوله

خلاصه: خطوط لوله‌ی مدفون برای انتقال آب، سوخت مایع، گاز، نفت و غیره کاربرد دارند که ممکن است بر روی شیروانی مستقر باشند. خطر این لوله‌ها، ناپایداری شیروانی بوده که منجر به اعمال تغییر شکل‌های بزرگ به لوله می‌شود. برای مدل‌سازی این مسئله، عمدتاً از روش‌های تیر-فنر و تحلیلی استفاده می‌شود و کمتر، روش‌های عددی مبتنی بر محیط پیوسته بکار گرفته شده است. ضرورت توجه به این مسئله، دقت این روش‌ها در تخمین رفتار لوله است. در این مقاله، از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار سه بعدی FLAC 3D استفاده شده است. ابتدا روش محیط پیوسته با روش تیر-فنر و روابط تحلیل مقایسه شده و سپس، به شبیه‌سازی یک مسئله واقعی پرداخته شده و نتایج جهت بررسی دقت روش، مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با سایر روش‌ها نشان می‌دهد که روابط ساده موجود می‌تواند رفتار تغییر شکل لوله تحت بار جانبی را با تقریب تخمین بزند. ولی مدل‌سازی عددی می‌تواند تغییر مکان و کرنش‌های بوجود آمده را با دقت بیشتری پیش بینی کند. با توجه به سه بعدی بودن مسئله، تنها کافی است طول کوچکی از لوله که در طرفین منطقه رانش قرار گرفته است، در مدل‌سازی لحاظ شود. مطالعات حساسیت نشان می‌دهد با انجام اقداماتی نظیر افزایش قطر لوله و افزایش ضخامت جداره لوله، می‌توان تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در لوله را تا حدی کاهش داد. با افزایش تغییر مکان زمین، کرنش بیشینه لوله به طور خطی افزایش یافته و از تغییر مکان بحرانی به بعد، کرنش بیشینه لوله ثابت می‌ماند.

۱- مقدمه

جابه‌جایی می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ دائمی در سطح زمین^۱ (PGD) شده و خسارت‌هایی بر روی لوله‌های مدفون وارد کند. دو روش برای مدل‌سازی نیروهای اندرکنشی خاک-لوله وجود دارد. در روش اول از فنرهای معادل خاک جهت مدل‌سازی این اندرکنش استفاده شده و در روش دوم محیط خاک به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و اندرکنش بین خاک و لوله به صورت عنصر تماسی مدل‌سازی می‌شود. تغییر شکل ماندگار زمین به دو صورت طولی و عرضی رخ می‌دهد؛ هنگامی که حرکت زمین عمود بر محور لوله باشد،

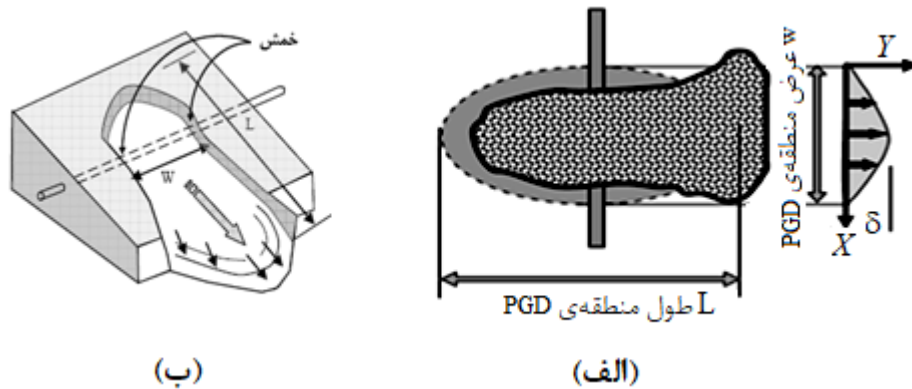
به علت گستردگی خطوط لوله‌ی مدفون و عبورشان از نواحی مختلف، این سیستم در معرض خطرات زیادی قرار دارند. در برخی مناطق به دلیل شرایط توپوگرافی و جغرافیایی، خطوط لوله‌ی مدفون از دامنه‌ی شیروانی‌ها عبور می‌کنند، هر عاملی که سبب ناپایداری و ریزش شیروانی گردد، بر رفتار لوله نیز تأثیرگذار خواهد بود. شیروانی‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند زلزله، زمین‌لغزش و روانگرایی ناپایدار شده و این ناپایداری موجب حرکت توده‌ی خاک شیب می‌شود. این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: eseyedi@um.ac.ir

1 Permanent Ground Displacement

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. لوله‌ی مدفون تحت تغییرمکان ماندگار عرضی زمین؛ (الف) حالت دو بعدی، (ب) حالت سه بعدی
Fig. 1. Buried pipeline under permanent transverse displacement of the ground; (a) two-dimensional model, (b) three-dimensional model

معکوس پرداخت. در بعضی موارد به دلیل بزرگ بودن ابعاد مسئله، مدل‌سازی کوچک مقیاس آزمایشگاهی نمی‌تواند نتایج خوبی به دست دهد. بدین منظور مدل‌سازی به صورت سانتریفیوژ^۱ انجام می‌شود. برتون و همکاران [۶] با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، کمانش جانبی وارد بر لوله و اندرکنش جانبی خاک و لوله را شبیه‌سازی کردند. ونکای و همکاران [۷] در روش میدانی، یک خط لوله آزمایشی گاز را در شیروانی تحت زمین‌لغزش مورد بررسی قرار دادند. ژنگ و همکاران [۸] با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ، رفتار لوله‌ی مدفون را در شیب‌های ناپایدار ماسه‌ای مطالعه کرده و تأثیر عمق دفن لوله و زاویه شیروانی را بر روی رفتار لوله بررسی کردند. برخی از مطالعات عددی نیز مانند اورورک [۹] با روش عددی اجزای محدود به مدل‌سازی لوله پرداخت. سوزوکی و همکاران [۱۰] و کوبایاشی و همکاران [۱۱]، از مدل‌سازی خط لوله به روش اجزای محدود استفاده کردند. لیو و اورورک [۱] با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، نتایج خود را در قالب گراف‌هایی ارائه دادند. کالوتی و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۴، اندرکنش خاک و لوله را با استفاده از روش عناصر مجزا بررسی کردند. بدو و همکاران [۱۲] با استفاده از روش اختلاف محدود، اندرکنش خاک-لوله در خاک ماسه‌ای را بررسی کرده و با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی اورورک و ترامن [۲] مقایسه کردند. جعفرزاده و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ و با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS لوله‌ی مدفون در شیروانی تحت زمین‌لغزش را به صورت دو بعدی مدل‌سازی

تغییرشکل عرضی بوده و اگر حرکت زمین در راستای محور لوله باشد، تغییرشکل طولی است. طبق تحقیقات گذشته، تغییرشکل ماندگار عرضی نسبت به تغییرشکل ماندگار طولی آسیب‌های جدی‌تری به لوله وارد می‌کند. لوله‌ی مدفون تحت تغییرشکل ماندگار زمین در حالت عرضی در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن عرض W منطقه‌ی PGD و δ تغییرمکان عرضی بیشینه است. اگر لوله تحت زمین‌لغزش یا روانگرایی قرار گیرد، توزیع تغییرمکان مطابق شکل ۱ رخ می‌دهد.

اصلی‌ترین نوع گسیختگی لوله‌های پیوسته‌ی فولادی عبارت است از: گسیختگی ناشی از کشش محوری، کمانش موضعی ناشی از فشار محوری و کمانش کلی. اگر عمق دفن لوله کم باشد، لوله تحت فشار ممکن است رفتار کمانش کلی از خود نشان دهد. در واقع، برای لوله‌های پیوسته‌ی مدفون در عمق یک متر و بیش‌تر از آن، گسیختگی غالباً از نوع کششی و کمانش موضعی است [۱]. روش‌های مختلف آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی برای بررسی پاسخ لوله مدفون به تغییرمکان ماندگار عرضی زمین، توسط محققان ارائه شده است. طبق مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، در سال ۱۹۸۵، اورورک و ترامن [۲] رفتار لوله‌ی مدفون را در برابر بار جانبی با استفاده از دستگاه کرنش مستوی مدل‌سازی کردند. کالوتی و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۴، اندرکنش خاک و لوله را در برابر رانش زمین بررسی کردند. اورورک [۴] در سال ۲۰۱۰، با استفاده از جعبه‌ی دو بخشی، رفتار لوله‌ی مدفون را در برابر تغییرمکان ماندگار زمین بررسی نمود. منشی‌زاده و سیدی حسینی نیا [۵] به بررسی رفتار لوله در اثر گسلش

$$\varepsilon_{elastic} = \begin{cases} \frac{\pi\delta}{2} \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta D}{W^2}, \delta \leq \delta_{cr} \\ \frac{\pi\delta_{cr}}{2} \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta D}{W^2}, \delta > \delta_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

در روش تحلیلی اورورک [۱۴]، کرنش محوری لوله با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه شده است. در این رابطه δ تغییرمکان بیشینه لوله و w عرض منطقه‌ی PGD است.

$$\varepsilon_a = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{\delta}{w}\right)^2 \quad (5)$$

در روش تحلیلی اورورک [۱۴]، کرنش خمشی لوله با استفاده از رابطه‌ی ۶ برای شرایط لوله انعطاف‌پذیر و عرض گسترده‌ی ناحیه PGD محاسبه شده است. همچنین با استفاده از رابطه‌ی ۷ برای لوله سفت و عرض باریک ناحیه PGD کرنش خمشی لوله به دست آمده است.

$$\varepsilon_b = \pm \frac{\pi^2\delta D}{W^2} \quad (6)$$

برای عرض باریک ناحیه PGD و لوله‌ی سفت، با توجه به حداکثر نیروی عرضی در واحد طول p_u ، در سطح مشترک لوله و خاک، لوله در هر طرف به عنوان تیر مدل شده است (به عنوان مثال، تیر دو سر ثابت). برای این مورد تنش محوری ناشی از اثرات طول قوس، کوچک و نادیده گرفته شده است. از این رو، حداکثر کرنش در لوله از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_b = \pm \frac{p_u W^2}{3\pi Et D^2} \quad (7)$$

در این روابط، δ تغییرمکان بیشینه لوله، w عرض منطقه‌ی PGD، E مدول الاستیسیته لوله، t ضخامت لوله، D قطر لوله، t_u مقاومت بیشینه طولی و p_u مقاومت بیشینه عرضی است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی و مطالعه رفتار لوله‌های مدفون بر روی شیروانی است که تحت تغییر شکل بزرگ جانبی (PGD) قرار می‌گیرند. خاطر نشان می‌شود روابط تقریبی و تحلیلی اشاره شده در بالا، برای شرایط کلی بوده و لازم است کاربرد این روابط برای تغییرمکان‌های شیروانی نیز بررسی شود. بدین منظور، از شبیه‌سازی عددی و پیوسته سه بعدی استفاده شده است و سعی شده تا گسیختگی شیروانی با وجود یک خط لوله در جسم آن مدل‌سازی شود و سپس، رفتار لوله بر اساس تنش‌ها و کرنش‌های اعمالی بر آن مطالعه شود. خاطر نشان می‌شود با اینکه ظاهراً خط لوله در یک

کردند. ساتسیس و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل عددی اجزای محدود، رفتار لوله مدفون را تحت لغزش شیروانی بررسی کردند. محققان از مدل‌های ریاضی متنوعی برای بررسی رفتار خطوط لوله‌ی مدفون استفاده کرده‌اند. برای پیش‌بینی پاسخ لوله‌ی مدفون در برابر تغییرشکل‌های عرضی ماندگار زمین، در سال ۱۹۸۸، اورورک [۹] با استفاده از تابع چگالی احتمال بتا، تغییرشکل‌های عرضی خاک اطراف لوله را تخمین زد که با رابطه ۱ نشان داده شده است:

$$y(x) = \delta [s/s_m]^{r-1} [(1-s)/(1-s_m)]^{r-r-1} \quad 0 < s < 1 \quad (1)$$

که در آن، s فاصله‌ی بین دو ناحیه PGD که با w عرض منطقه‌ی PGD نرمال شده، s_m فاصله‌ی بین دو ناحیه PGD که با δ (تغییرمکان عرضی بیشینه) نرمال شده و در این جا 0.5 در نظر گرفته شده است. τ و r ثابت‌های مدل بوده که به ترتیب 5 و $2/5$ فرض شده‌اند.

سوزوکی و همکاران [۱۰] و بعد از ایشان، کوبایاشی و همکاران [۱۱] تغییرشکل عرضی خاک را با استفاده از یک تابع نمایی صعودی کسینوسی با توان n که به صورت رابطه ۲ آمده است، تقریب زدند.

$$y(x) = \delta \cdot \left(\cos \frac{\pi x}{w}\right)^n \quad (2)$$

در این رابطه، x فاصله از مرکز ناحیه‌ی PGD، w عرض ناحیه‌ی PGD و n پارامتری به عنوان توان رابطه است.

اورورک [۱۴] با استفاده از روش تحلیلی ساده و دو فرض لوله منعطف و سفت، با استفاده از مدل‌سازی ریاضی تابع کسینوسی، روابطی را برای محاسبه‌ی تغییرمکان عرضی لوله به دست آورد و رابطه‌ی ۳ را برای تخمین PGD عرضی ارائه نمود:

$$y(x) = \frac{\delta}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{w}\right) \quad (3)$$

که در آن، x فاصله از حاشیه‌ی منطقه‌ی PGD و w عرض منطقه‌ی PGD است.

لیو و اورورک [۱] با فرض لوله به صورت کابلی منعطف، روابط تغییرشکل و نیروی محوری را برای دو حالت لوله‌ی سفت و منعطف ارائه دادند. کرنش‌های بیشینه در یک لوله الاستیک به علت اثرات ترکیبی کشش محوری (رفتار کابل مانند) و انعطاف‌پذیری (رفتار تیر) بوده و توسط رابطه ۴ بیان می‌شود:

صفحه تغییرمکان می‌دهد، ولی مسئله مورد نظر سه بعدی بوده و نمی‌توان از تحلیل دوبعدی برای مطالعه آن استفاده کرد. زیرا اولاً تغییرمکان لوله در خارج از صفحات مقطع لوله متفاوت است، بطوریکه مطابق شکل ۱-الف، مقدار کمینه آن در جداره ها و مقدار بیشینه در وسط ناحیه PGD رخ می‌دهد. دوم اینکه این تغییرمکان های لوله می‌تواند منجر به کمانش موضعی کند که با تحلیل دوبعدی، امکان بررسی آن نیست. نکته دیگر آن که با اینکه شکل ناحیه PGD متقارن است، ولی بدلیل محدودیت های شرایط مرزی برای لوله در نرم افزار FLAC3D، تمام مدل (بجای نصف آن) استفاده شده است. در این پژوهش، لوله‌ی فولادی و شیروانی خاکی دو بخش اصلی این مدل‌سازی هستند. مدل های شبیه‌سازی شده با مدل عددی لیو و اورورک [۱] و مدل میدانی ونکای و همکاران [۷] مقایسه شده اند.

۲- شبیه‌سازی های عددی

با توجه به این‌که معمولاً رانش لوله در شیروانی در ابعاد بزرگی رخ می‌دهد، استفاده از روش عددی یکی از بهترین روش‌ها برای شبیه‌سازی رفتار لوله و اندرکنش خاک و لوله در برابر حرکات عرضی زمین است. در این پژوهش، از نرم‌افزار FLAC 3D که برای شبیه‌سازی مسائل ژئوتکنیک طراحی شده، بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار بر اساس روش تفاضل محدود صریح نوشته شده و بر پایه تحلیل لاگرانژی عمل می‌کند و می‌تواند تغییرمکان های بزرگ بوجود آمده ناشی از ناپایداری شیروانی را در نظر بگیرد [۱۵].

در این پژوهش، رفتار لوله‌های مستقر بر روی یک شیروانی مدل سازی می‌شود که بر اثر ناپایداری شیروانی، تغییرشکل بزرگ جانبی بر لوله وارد می‌گردد. ابتدا ابعاد هندسی مدل و شبکه‌بندی آن تعریف شده و سپس، مدل رفتاری و مشخصات مصالح معرفی شده و با ایجاد شرایط مرزی و اولیه، تنش‌های در جای محیط معرفی می‌شود. بعد از به تعادل رساندن محیط، تغییرات مورد نیاز برای ناپایداری شیروانی (تغییرات سطح آب) اعمال می‌گردد. خاطر نشان می‌شود با رجوع به شکل ۱، تغییرمکان‌های بوجود آمده بر روی شیروانی بصورت سه بعدی است؛ بدین صورت که لوله مدفون در دو طرف خود بداخل زمین مهار شده و درعوض، بخش های میانی لوله در وسعت‌های مختلف تحت تاثیر جابجایی و رانش خاک قرار می‌گیرد. لذا، نمی‌توان حل این مسئله را بصورت دوبعدی در نظر گرفت و لازم است از تحلیل

سه بعدی بهره گرفت.

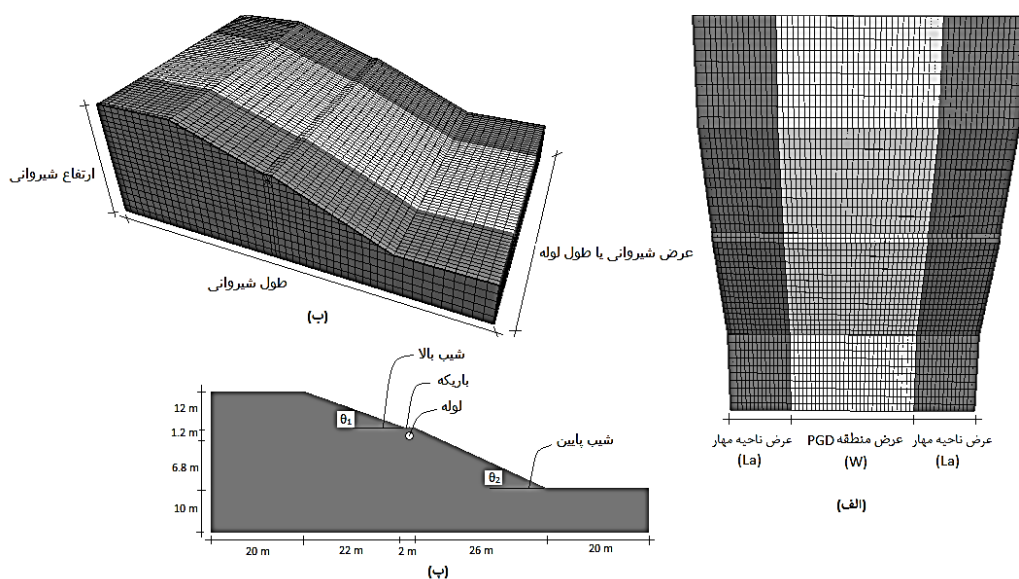
مدل‌های عددی در نظر گرفته در این پژوهش شامل موارد زیر است:
الف- شبیه سازی یک لوله مستقر در داخل یک شیروانی ناپایدار: لیو و اورورک [۱] یک لوله مدفون در خاک را بصورت تیر- فنر در نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته و رفتار آن را مطالعه کردند. آنها فرض کردند که لوله در عمق ۱/۲ متری از سطح زمین قرار گرفته است. در این بخش، رفتار این لوله که داخل یک شیروانی ناپایدار مستقر شده، مطالعه شده و نتایج آن، با نتایج روش تیر- فنر مقایسه می‌شود.

ب- شبیه سازی یک مسئله واقعی زمین لغزش: سعی شده است با توجه به نکات گفته شده، یک مسئله واقعی با روش‌های عددی و تحلیلی تحلیل شده و نتایج مقایسه شوند.

۱-۲- شبیه سازی لوله مستقر در شیروانی ناپایدار

یک شیروانی با هندسه فرضی مطابق شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود که طبق آن، عرض شیروانی شامل منطقه‌ی تغییرشکل جانبی (W) و ناحیه‌ی مهار (برای لوله) از هر طرف (L_p) است. یک لوله در عمق ۱/۲ متری از سطح شیروانی در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی شیروانی و لوله مطابق جدول ۱ است. تحلیل پایداری این شیروانی با روش تعادل حدی نشان داد که وجود باریکه‌ی^۱ خاکی در دامنه‌ی شیب، علاوه بر نقطه نظر اجرایی بودن آن، باعث افزایش ضریب اطمینان می‌شود. عرض این باریکه پس از انجام تحلیل‌های متعدد، دو متر انتخاب شد. شیروانی به روش تعادل حدی بیشاپ اصلاح شده با نرم‌افزار SLOPE/W تحلیل شد. در روش تعادل حدی، با فرض چندین سطوح دایروی گسیختگی و تقسیم آن به بلوک‌های قائم، ضریب اطمینان شیروانی در مقابل لغزش محاسبه شده و کمترین ضریب اطمینان به دست می‌آید. ضریب اطمینان شیروانی در حالت خشک $F.S=1.9$ به دست آمد که نشان از پایدار بودن این شیروانی دارد.

برای ناپایداری‌سازی این شیروانی، فرض می‌شود که در اثر عوامل محیطی، این شیروانی اشباع شود. در این حالت، ضریب اطمینان پایداری این شیروانی به روش‌های مختلف بررسی شد. روش تعادل حدی با بیشاپ اصلاح شده نشان داد که ضریب اطمینان به $F.S=0.8$



شکل ۲. هندسه یک شیروانی فرضی شبیه‌سازی شده؛ (الف) پلان، (ب) نمای عرضی و (پ) مقطع شیروانی

Fig. 2. The geometry of an assumed slope; (a) Transverse view, (b) Plan (c) Slope section

برای محاسبه‌ی ضریب اطمینان پایداری شیب ارائه دادند. با کمک این روش، ضریب اطمینان شیروانی برابر $F.S=0.75$ به دست می‌آید. بر اساس نتایج به دست آمده، اطمینان حاصل می‌شود که شیروانی در نظر گرفته شده، ناپایدار است.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در نرم افزار FLAC 3D برای حالتی که شیروانی اشباع فرض شده است نیز نشان می‌دهد که خاک و لوله دچار تغییرشکل‌های بزرگی از نوع جریان خمیری شده و شیروانی دچار گسیختگی می‌شود. جهت شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل رفتاری کشسان-خمیری مور-کولمب استفاده شده است. جنس مصالح خاکی ماسه‌ی نسبتاً متراکم با چسبندگی ناچیز بوده که مدل مور-کولمب به خوبی می‌تواند رفتار خاک موردنظر را شبیه‌سازی نماید. به منظور ایجاد ناپایداری شیروانی و ریزش توده‌ی خاک آن، شیروانی مانند شکل ۲ به سه بخش مختلف تقسیم شده است. در بخش‌های کناری یا مرزی، خاک دارای پارامترهای مقاومتی بالا بوده و این سبب می‌شود پایداری شیروانی حفظ گردد. این در حالی است که بخش میانی دارای پارامترهای مقاومتی ضعیف‌تر بوده و همین سبب ریزش این ناحیه می‌شود. رانش خاک در ناحیه‌ی میانی سبب ایجاد حرکت عرضی خاک و لوله شده است. ناحیه‌ی میانی، ناحیه‌ای است که تحت تغییرمکان عرضی ماندگار زمین یا PGD قرار گرفته است. پارامترهای مختلف خاک برای نواحی مرزی و PGD در جدول

جدول ۱. مشخصات هندسی شیروانی و لوله برای مدل‌های شبیه‌سازی شده

Table 1. Slope and pipe geometrical characteristics for simulated models

مقدار	مشخصات هندسی
۰/۶۱	قطر لوله (متر) - D
۰/۰۰۹۵	ضخامت لوله (متر) - t
۶۰	عرض شیروانی یا طول لوله (متر)
۹۰	طول شیروانی (متر)
۳۰	ارتفاع شیروانی (متر)
۲۰	شیب بالا (درجه) - θ_1
۲۵	شیب پایین (درجه) - θ_2
۳۰	عرض ناحیه PGD (متر) - W
۱۵	عرض ناحیه مهارشده از هر طرف (متر) - L_a
۲	عرض باریکه (متر)
۱/۲	عمق مدفون لوله (متر)

کاهش پیدا می‌کند. میکالوسکی [۱۶] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش تعادل حدی، نمودارهایی را برای محاسبه‌ی ضریب اطمینان پایداری شیروانی بر اساس پارامترهایی نظیر ارتفاع شیروانی، زاویه‌ی شیب و مشخصات ژئوتکنیکی خاک ارائه داد. ضریب اطمینان شیروانی با این روش برابر $F.S=0.85$ به دست می‌آید. در روشی دیگر، بیشاپ و مورگن استرن [۱۷] با استفاده از روش معمولی قطعه، پایداری شیروانی خاکی را در شرایط تراوش پایدار تحلیل کرده و جداولی را

جدول ۲. پارامترهای خاک مدل‌های شبیه‌سازی شده

Table 2. Soil parameters of simulated models

پارامتر	مقدار در نواحی مرزی	مقدار در ناحیه PGD
مدول حجمی (مگا پاسکال)	۲۵×۱۰ ^۶	
چسبندگی (کیلو پاسکال)	۵،۳	۱ ≤ c ≤ ۵
جرم مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۸/۷	
زاویه اتساع (درجه)	۵	
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵	
مدول برشی (مگا پاسکال)	۱۱/۵×۱۰ ^۶	
حد کششی (کیلو پاسکال)	۷/۱، ۴/۲	۱/۷ ≤ t ≤ ۴/۱

جدول ۳. مشخصات مکانیکی فولاد X52

Table 3. Mechanical specifications of steel X52

جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت پواسون	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	تنش نهایی (مگا پاسکال)	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	نوع فولاد
۷۸۵۰	۰/۲۵	۲۱۰	۴۶۰	۳۶۰	X52

۲ ارائه شده است.

مشخصات لوله‌ی مدفون در مدل‌های شبیه‌سازی شده مطابق با آنچه در مدل عددی لیو و اورورک [۱] بوده است، در نظر گرفته شده است. جنس لوله فولادی و از نوع API 5L PSL1 با نام تجاری X52 در نظر گرفته شده است. این لوله‌ها برای انتقال آب، گاز و مواد نفتی کاربرد دارند. مدل رفتاری فولاد در شبیه‌سازی حاضر، مدل کشسان-خطی است زیرا تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در لوله کمتر از مقادیر حد تسلیم فولاد بوده و رفتار فولاد در منطقه‌ی کشسان باقی می‌ماند. رفتار فولاد در شبیه‌سازی عددی، ایزوتروپ و همگن در نظر گرفته شده است. هم‌چنین ویژگی‌های مکانیکی لوله فولادی به عنصر سازه‌ای شمع در نرم افزار FLAC 3D اختصاص می‌یابد. مشخصات مکانیکی فولاد X52 در جدول ۳ آمده است.

به منظور شبیه‌سازی سطح مشترک بین خاک و لوله، نیروهای اندرکنشی در اطراف لوله در سه جهت محوری، افقی و قائم به وسیله‌ی فنرهایی با خاصیت رفتار غیرخطی و سختی‌هایی مطابق مشخصات خاک موردنظر اعمال شده است. رفتار برشی سطح مشترک بین لوله و خاک به صورت یک سیستم فنری لغزنده مدل شده و پارامترهایی نظیر سختی برشی سطح مشترک در جداره و دو انتهای لوله (SK)،

مقاومت چسبندگی سطح مشترک در جداره و دو انتهای لوله (SC)، مقاومت اصطکاک سطح مشترک در جداره و دو انتهای لوله (SF) معرفی می‌شوند. مقادیر این پارامترها از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$SK = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (8)$$

$$SC = \pi Dc \quad (9)$$

$$SF = (\frac{2}{3} \sim \frac{3}{4})\varphi \quad (10)$$

در این رابطه‌ها، G مدول برشی خاک، t ضخامت سطح مشترک، D قطر لوله، c چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک است [۱۵]. در پژوهش حاضر، مقاومت اصطکاک سطح مشترک φ 0.7 در نظر گرفته شده است. برای محاسبه‌ی ضخامت سطح مشترک از رابطه‌ی ۱۱ استفاده می‌شود [۱۸]:

$$t = (2.4 \sim 3.6)D_{50} \quad (11)$$

در رابطه‌ی ۱۱، D_{50} قطری است که ۵۰ درصد ذرات خاک از آن ریزتر هستند. در این پژوهش ضخامت سطح مشترک $3D_{50}$ در نظر

جدول ۴. مشخصات سطح مشترک بین لوله و خاک برای مدل‌های شبیه‌سازی شده

Table 4. Pipe-soil interface characteristics for simulated models

مقاومت اصطکاکی در جداره (درجه)	مقاومت چسبندگی در جداره (پاسکال)	سختی برشی در جداره (پاسکال)
۲۵	$5/75 \times 10^3$	$1/1 \times 10^6$

پارامترهای مقاومتی ضعیف خاک، رانش زمین رخ داده و خاک و لوله تحت تاثیر PGD قرار می‌گیرند. هم‌چنین نواحی کناری که خاک آن‌ها دارای مقاومت برشی بیش‌تر بوده و با داشتن تغییرشکل‌های ناچیز به عنوان تکیه‌گاه مرزی عمل می‌کنند. به منظور شبیه‌سازی لوله از المان سازه‌ای شمع استفاده شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل رفتاری مور-کولمب استفاده شده است. مشخصات خاک در ناحیه‌ی تحت رانش زمین و خارج از ناحیه رانش زمین متفاوت در نظر گرفته شده که این مشخصات در جدول ۶ آمده است.

لوله‌ی مدفون در مدل شبیه‌سازی شده با مدل میدانی ونکای و همکاران [۷] از جنس فولاد و از نوع L245NB با تنش تسلیم ۲۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده که مشخصات آن در جدول ۷ ارائه شده است. برای جنس لوله، از مدل رفتاری کشسان خطی - خمیری کامل با معیار فون میسز استفاده شده است.

با توجه به پارامترهای مقاومتی خاک در هر ناحیه، مقادیر سختی برشی خاک و سطح مشترک، مقاومت چسبندگی و مقاومت اصطکاکی سطح مشترک برای هر منطقه جداگانه محاسبه شده‌اند. مقادیر اندرکنش بین لوله و خاک در جدول ۸ آمده است.

در شبیه‌سازی مدل عددی، از اختصاص شرایط مرزی استفاده شده است. کف مدل در هر سه جهت گیردار فرض شده است. مرزهای جانبی در طول شیروانی و مرزهای جانبی در عرض شیروانی در هر سه جهت گیردار فرض شده‌اند. دو انتهای لوله نیز در مرزهای جانبی، به صورت آزاد در نظر گرفته شده‌اند.

مطابق با آنچه ونکای و همکاران [۷] انجام دادند، حفاری مرحله به مرحله سبب ایجاد رانش زمین در شیروانی گردید. در مدل عددی شبیه‌سازی شده، پس از رسیدن مدل به تعادل اولیه، برای ایجاد ریزش شیروانی، بدون شبیه‌سازی دیوار نگهدارنده‌ی گود و در منطقه‌ی تحت رانش زمین، از حفاری مرحله به مرحله‌ی خاک استفاده شده است. چهار مرحله حفاری انجام شده که در هر مرحله، تحلیل تا زمانی

گرفته شده است. طبق روابط ارائه شده، مقادیر محاسبه شده برای اندرکنش بین لوله و خاک برای مدل‌های شبیه‌سازی با مدل عددی لیو و اورورک [۱] در جدول ۴ آمده است.

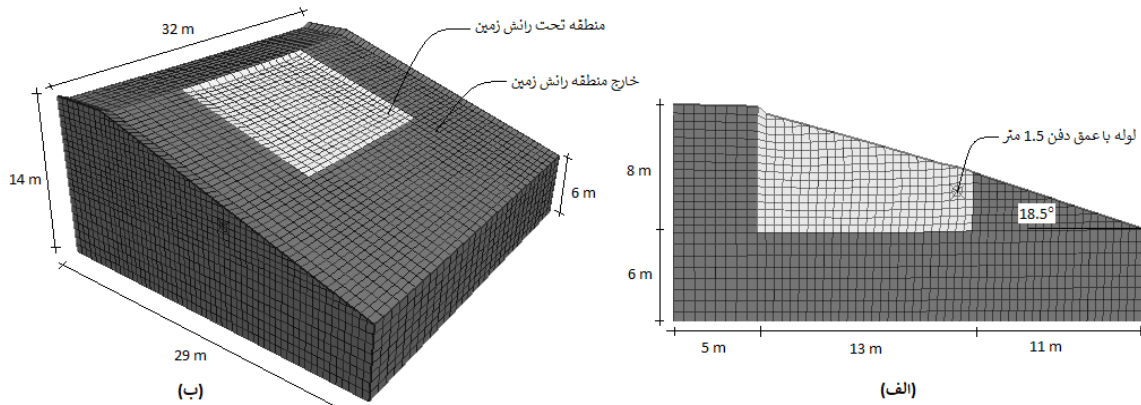
در شبیه‌سازی حاضر، شرایط مرزی مورد نیاز تعریف شده‌اند. فشار آب حفره‌ای در مرزها به صورت افزایش خطی با عمق در نظر گرفته شده است. تغییرمکان مرزهای جانبی در راستای افقی بسته شده‌اند. هم‌چنین، فشار آب حفره‌ای در نقاط گره‌ای واقع در مرزها ثابت شده‌اند. کف مدل در هر سه جهت گیردار فرض می‌شود. دو انتهای لوله مدفون شده در مرزهای جانبی، در هر سه جهت انتقالی و دورانی گیردار در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور ایجاد رانش زمین و ریزش شیروانی، پس از رسیدن به تعادل اولیه، از تحلیل جریان استفاده شده است. با افزایش سطح آب در شیروانی، تحلیل جریان و مکانیکی به صورت مجزا^۱ انجام شد که برای شبیه‌سازی ریزش خاک، فرض شد با افزایش سطح آب در مدل، جریان پایدار^۲ در شیروانی پدید آید. به این صورت که وجود آب، باعث کاهش چسبندگی خاک در ناحیه‌ی میانی شیروانی و کاهش مقاومت خاک شده و این موضوع سبب ریزش شیروانی می‌شود. این روش برای چسبندگی‌های مختلف ناحیه‌ی میانی شیروانی انجام می‌شود.

۲-۲- شبیه‌سازی یک مسئله واقعی زمین لغزش

ونکای و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵، رفتار شیروانی تحت زمین‌لغزش را در مقیاس بزرگ با یک خط لوله آزمایشی گاز که تحت فشار یکسان قرار داشت، مورد بررسی قرار دادند. هندسه‌ی مدل شبیه‌سازی شده با مدل میدانی مطابق با شکل ۳ است. سایر مشخصات هندسی آن در جدول ۵ آمده است. شبکه عددی اطراف لوله یک متری انتخاب شده و طول لوله به ناحیه‌های یک متری تقسیم شده است. در این مدل‌سازی از دو ناحیه خاک با مشخصات مقاومتی مختلف استفاده شده است. ناحیه‌ی میانی که در آن به دلیل وجود

- 1 uncoupled
- 2 Steady state



شکل ۳. مشخصات هندسی مدل عددی شبیه‌سازی شده با مدل میدانی ونکای و همکاران [۷]، (الف) مقطع شیروانی و (ب) نمای سه بعدی شیروانی
 Fig. 3. Geometrical characteristics of the numerical model for the slope of Wenkaia et al. [7], (a) slope section; (b) three-dimensional slope view

انجام شده است که تغییر مکان‌های ایجاد شده در خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده در برداشت میدانی یکسان باشد. مطابق با شکل ۴، در مرحله اول، حفاری از فاصله‌ی ۲۰ متری از ابتدای مدل، با ابعاد پنج متر در جهت طولی و سه متر در جهت عمودی انجام شده، در مرحله دوم عمق حفاری سه متر بیش‌تر شده است. در مرحله سوم، مکان حفاری به محل لوله‌ی مدفون نزدیک‌تر شده و در فاصله ۱۸ متری از ابتدای مدل و با ابعاد شش متر در جهت طولی و دو متر در جهت عمودی حفاری انجام شده است. در ادامه و در مرحله چهارم عمق حفاری چهار متر بیش‌تر حفر شده است. با حفاری در هر مرحله، خاک تغییر شکل یافته، مکان لوله نیز جابه‌جا شده و سبب ایجاد تنش و لنگر در لوله شده است. در پژوهش میدانی ونکای و همکاران [۷]، برای قرائت مقادیر تغییر مکان و تنش، عمق‌سنج‌ها و گیج‌هایی در طول لوله و در نقاط مختلف خاک نصب شده است. شکل ۴ مکان عمق‌سنج N3 در مقطع $x=9$ m و عمق‌سنج N5 در مقطع $x=4$ m را نشان می‌دهد. مقادیر تغییر مکان افقی خاک در هر مقطع، قبل از حفاری و در مراحل مختلف آن، توسط عمق‌سنجی که در خاک قرار داده شده قرائت شده است.

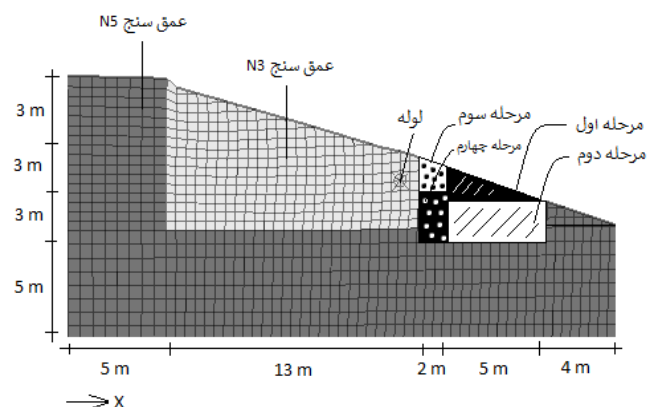
۳- بررسی نتایج و صحت سنجی

در این بخش، به مقایسه نتایج عددی مسئله با نتایج مدل عددی لیو و اورورک [۱] و پژوهش میدانی ونکای و همکاران [۷] پرداخته می‌شود.

جدول ۵. مشخصات هندسی مدل شبیه‌سازی شده با مدل میدانی ونکای و همکاران [۷]

Table 5. Geometrical characteristics of the simulated model with wenkaia et al. field model [7]

۰/۳۲۵	قطر لوله (متر)
۰/۰۰۸	ضخامت لوله (متر)
۳۲	طول لوله (متر)
۱۶	عرض ناحیه PGD (متر)
۸	عرض ناحیه مهارشده از هر طرف (متر)



شکل ۴. مراحل حفاری شیروانی جهت ایجاد حرکت عرضی زمین

Fig. 4. Slope excavating steps to create transverse movement of the ground

جدول ۶. مشخصات خاک برای مدل شبیه‌سازی شده با مسئله ونکای و همکاران [۷]

Table 6. Soil characteristics of the simulated model with wenkaia et al. field model [7]

پارامتر	مقدار در ناحیه رانش زمین	مقدار در ناحیه خارج رانش زمین
مدول حجمی (مگا پاسکال)	$2/8 \times 10^6$	$3/5 \times 10^6$
چسبندگی (کیلو پاسکال)	۵/۰۳	۱۳/۷۳
جرم مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۲۰/۹۸	۱۸/۹۵
زاویه اتساع (درجه)	۰	۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳/۵	۴/۹
مدول برشی (مگا پاسکال)	۱/۱	۱/۶
حد کششی (کیلو پاسکال)	۴۲	۱۶۰

جدول ۷. مشخصات مکانیکی فولاد L245NB

Table 7. Mechanical specifications of steel L245NB

جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت پواسون	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	تنش نهایی (مگا پاسکال)	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	نوع فولاد
۷۸۵۰	۰/۲۵	۲۱۰	۴۱۵	۲۴۵	L245NB

جدول ۸. مشخصات سطح مشترک بین لوله و خاک برای مدل شبیه‌سازی شده با مدل میدانی ونکای و همکاران [۷]

Table 8. Pipe-soil interface characteristics in the simulated model of Wenkaia et al. field test [7]

پارامتر	مقدار در ناحیه تحت رانش زمین	مقدار در ناحیه خارج رانش زمین
سختی برشی در جداره (پاسکال)	$5/7 \times 10^7$	$8/2 \times 10^9$
مقاومت چسبندگی در جداره (کیلو پاسکال)	۵/۱۴	۱۴
مقاومت اصطکاکی در جداره (درجه)	۲/۵	۳/۵

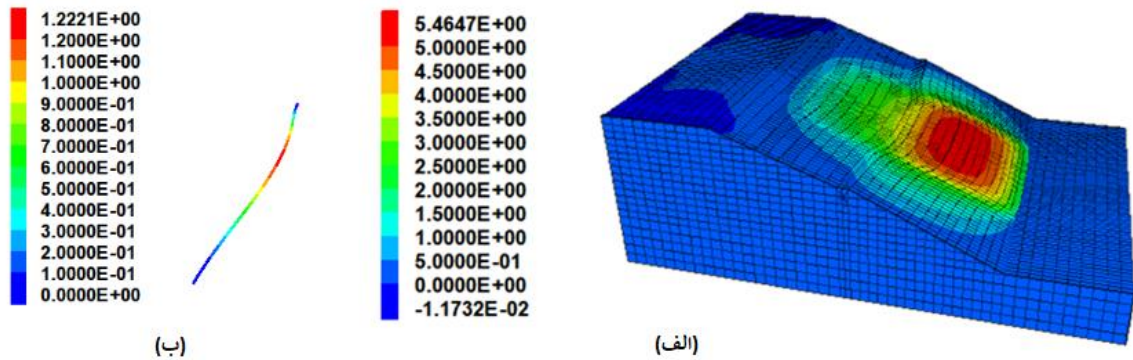
۱-۳- مقایسه روش عددی سه بعدی با روش ساده شده تیر- فتر

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی شیروانی فرضی با مسئله ساده شده با کمک تیر- فتر توسط لیو و اورورک [۱] مقایسه شده است. شکل ۵ تغییرمکان شیروانی و لوله حاصل از حرکت عرضی زمین را در نرم‌افزار FLAC 3D نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، تغییرمکان بیشینه زمین بر روی شیروانی و در مرکز مدل رخ داده است. با توجه به این که مرزهای جانبی مدل گیردار فرض شده‌اند، با افزایش فاصله از مرکز مدل به طرف حاشیه‌ها، از مقدار تغییرمکان خاک کاسته شده و این مقدار در حاشیه‌های مدل به صفر می‌رسد. تغییرمکان خاک شیروانی سبب ایجاد جابه‌جایی در لوله شده است. بیشینه تغییرمکان

در لوله در مرکز آن رخ داده و در حاشیه‌ها به صفر می‌رسد.

شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با مدل عددی لیو و اورورک [۱] در دو حالت مختلف انجام شده است. به عنوان مثال، در حالت اول شبیه‌سازی، چسبندگی اولیه خاک سه کیلو پاسکال فرض شده، سپس مقدار چسبندگی ناحیه‌ی میانی به یک کیلو پاسکال کاهش داده تا رانش زمین رخ دهد. در چنین حالتی تغییرمکان وسط لوله به ۱/۲۵ متر می‌رسد، جدول ۹ حالت‌های مختلف را برای مسئله نشان می‌دهد.

مقایسه تغییرمکان زمین و لوله در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی به همراه نتایج مدل عددی لیو و اورورک [۱] در شکل ۶ نشان



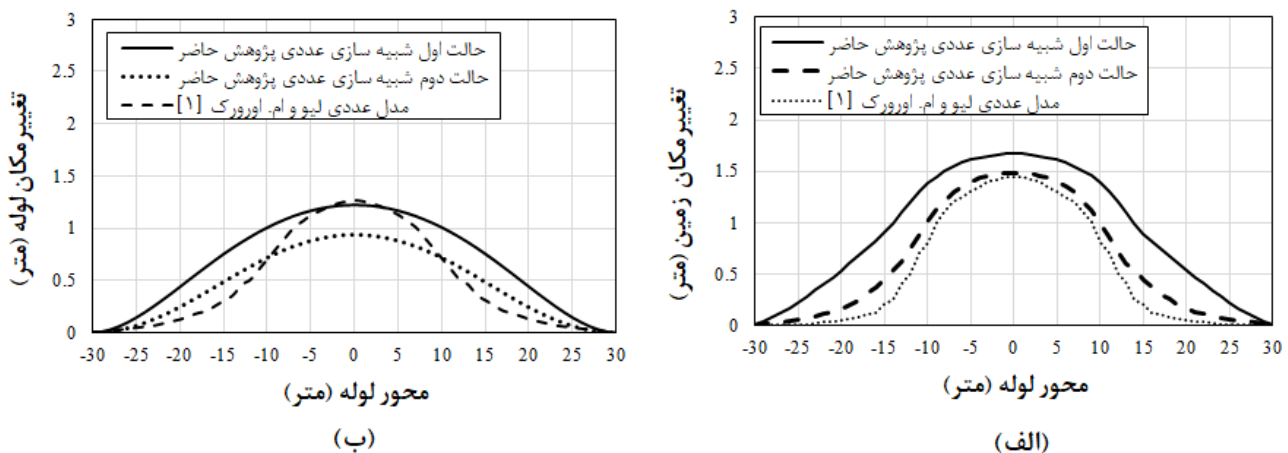
شکل ۵. تغییرمکان (الف) شیروانی و (ب) لوله برای مدل شبیه‌سازی شده با مدل عددی لیو و اورورک [۱] (بر حسب متر)

Fig. 5. The displacement of (a) the pipe and (b) the slope for the simulated model with Liu and O'Rourke [1] (in meters)

جدول ۹. حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر برای $\phi=35^\circ$

Table 9. Different modes of numerical simulation in the present study for $\phi=35^\circ$

حالت	چسبندگی اولیه خاک (کیلو پاسکال)	چسبندگی ثانویه خاک (کیلو پاسکال)	بیشینه تغییرمکان زمین (متر)	بیشینه تغییرمکان لوله (متر)
۱	۳	۱	۱/۶۵	۱/۲۵
۲	۵	۱	۱/۵	۱

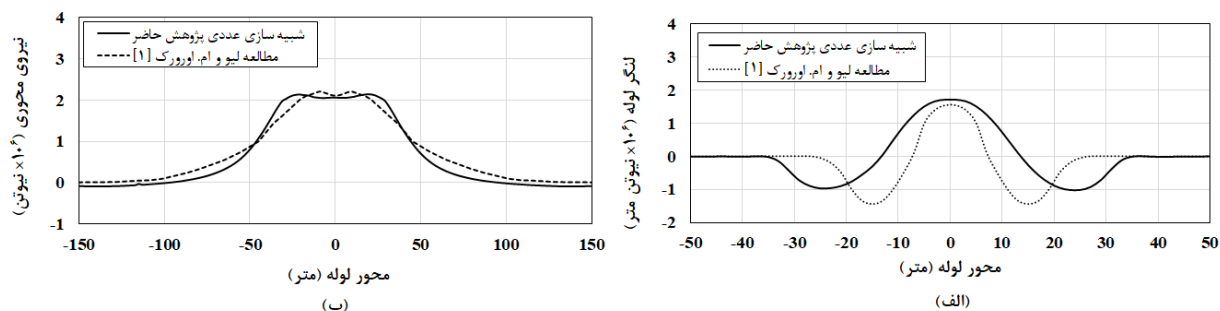


شکل ۶. مقایسه حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی با مدل عددی لیو و ام. اورورک [۱]. تغییرمکان عرضی (الف) زمین و (ب) لوله

Fig. 6. Comparison of different modes of numerical simulation with Liu and O'Rourke [1] numerical model: transverse displacement of (a) ground and (b) pipe

خاک جابه‌جا می‌شود، چون چسبندگی اولیه خاک در حالت اول کمتر است، تغییرمکان‌های به‌وجود آمده در این حالت بیشتر (با درصد خطای نسبی ۱۷٪) بوده و سبب ایجاد تغییرمکان بزرگتر در لوله شده است. نمودار تغییرمکان خاک در حالت دوم تطابق بهتری (با درصد خطای نسبی ۶٪) با نمودار مدل عددی لیو و اورورک [۱] دارد. در

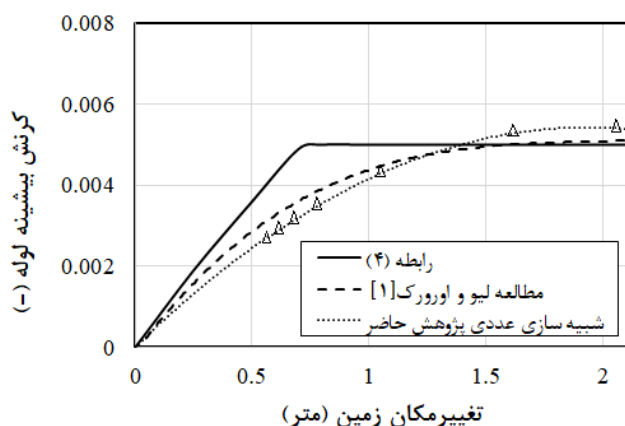
داده شده است. با مقایسه نمودارهای شکل ۶، می‌توان بیان کرد که تغییرمکان خاک در حالت دوم کمتر از حالت اول است؛ در خاک دارای چسبندگی بیشتر، مقاومت کششی خاک نیز بیشتر بوده و این سبب کاهش تغییرمکان زمین می‌شود؛ در هر دو حالت شبیه‌سازی، با افزایش سطح آب، توده‌ی خاک شیروانی حرکت کرده و



شکل ۷. توزیع مقادیر لنگر و نیرو در طول لوله برای حالت اول و $\delta = \delta_{cr}$ (الف) لنگر خمشی (M_z) و (ب) نیروی محوری (F_x)

Fig. 7. Distribution of (a) bending moment (M_z) and (b) axial force (F_x) along the pipe for the first case and $\delta = \delta_{cr}$

شکل ۸ نمودار بیشینه تغییرمکان زمین در محل لوله در برابر کرنش بیشینه در لوله را نشان داده و شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر را با روش‌های عددی و تحلیلی مقایسه می‌کند. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، لیو و اورورک [۱] رابطه‌ی ۴ را برای محاسبه‌ی کرنش‌های بیشینه محوری در لوله الاستیک پیشنهاد کردند. با مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۸ می‌توان بیان کرد که در هر سه نمودار، با افزایش تغییرمکان زمین، کرنش بیشینه در لوله نیز بزرگ‌تر می‌یابد. در روش تحلیلی، با افزایش تغییرمکان زمین، کرنش بیشینه لوله به طور خطی و با شیب بزرگتری (حدود ۱/۵ برابر روش‌های عددی) افزایش یافته و از تغییرمکان ۰/۷ متر به بعد، ثابت می‌ماند. این در حالی است که در روش‌های عددی، با افزایش تغییرمکان زمین، کرنش بیشینه لوله ابتدا به صورت تقریباً خطی و سپس به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. روند تغییرات این دو روش عددی

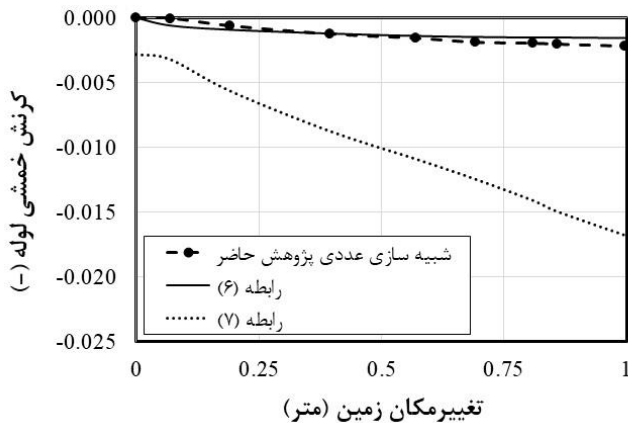


شکل ۸. مقایسه شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با روش‌های عددی و تحلیلی لیو و اورورک [۱]

Fig. 8. Comparison of Numerical Simulation of the Present Study with that of Liu and O'Rourke [1]

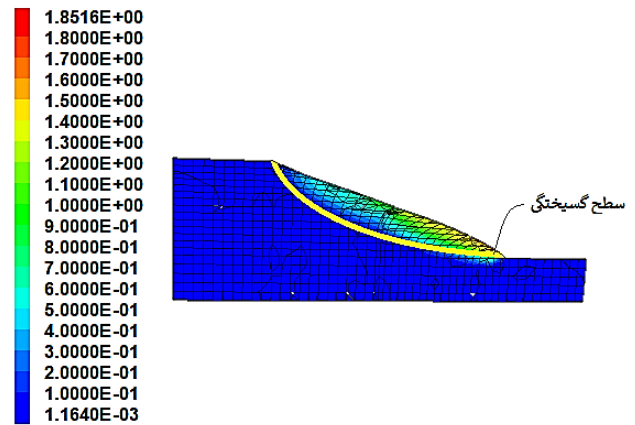
هر دو مدل، نمودار زنگوله‌ای شکل بوده و خاک ناحیه‌ی میانی نسبت به خاک اطراف، تغییرشکل‌های بزرگتری دارد. تغییرمکان بیشینه‌ی خاک و لوله در مرکز ناحیه PGD رخ داده و در حاشیه‌ها به صفر می‌رسد. هم‌چنین نمودار تغییرمکان خاک و لوله نسبت به مرکز ناحیه PGD متقارن است.

شکل ۷ توزیع لنگر خمشی و نیروی محوری در لوله را برای عرض ۳۰ متر ناحیه‌ی PGD و عرض ۲۰۰ متر ناحیه‌ی مهار شده از هر طرف، در مقایسه با روش لیو و اورورک [۱] نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با مدل لیو و اورورک [۱] بیان می‌دارد که در هر دو نمودار، هرچه از مرکز ناحیه‌ی PGD فاصله گرفته، از مقادیر لنگر خمشی و نیروی محوری کاسته شده تا آن‌جایی که در حاشیه‌ها به صفر می‌رسد. نمودار لنگر خمشی و نیروی محوری در طول لوله و برای هر دو روش عددی، نسبت به مرکز ناحیه PGD متقارن است. در هر دو روش، مقادیر لنگر مثبت و بیشینه در لوله در اطراف مرکز ناحیه PGD رخ داده، در حالی که مقادیر لنگر منفی در نواحی کناری رخ می‌دهد. مقادیر لنگر مثبت بیشینه در روش عددی اختلاف محدود حدود ۱۳ درصد بیش‌تر از روش اجزای محدود است، در حالی که مقادیر لنگر منفی بیشینه در روش اجزای محدود حدود ۵۰ درصد بیشتر از روش اختلاف محدود است. نمودار روش اختلاف محدود نسبت به روش اجزای محدود، کشیده‌تر بوده و در نواحی دورتری نسبت به مرکز ناحیه PGD به صفر می‌رسد. بطور کلی، تطابق بهتری برای مقادیر نیروی محوری لوله بین دو روش دیده می‌شود، بطوریکه بیشترین اختلاف مشاهده شده میان این دو روش حدود ۱۲ درصد در مرز منطقه PGD و دو طرف آن است.



شکل ۱۱. کرنش خمشی لوله در برابر تغییر مکان زمین

Fig. 11. Bending strain of pipe against ground displacement



شکل ۹. کرنش برشی در مقطع میانی شیروانی

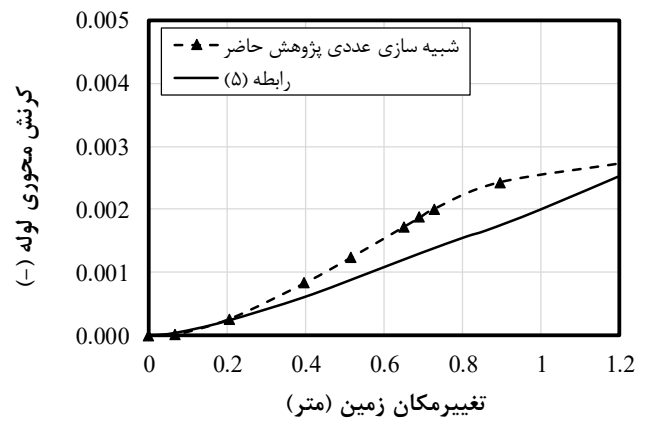
Fig. 9. Distribution of shear strain in the middle section of the pipe

برای عرض ۳۰ متر ناحیه‌ی PGD و برای حالت دوم مسئله نشان می‌دهد که بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با FLAC 3D و روش تحلیلی اورورک [۱۴] (رابطه‌ی ۵) رسم شده‌اند. در هر دو روش، روند صعودی مشاهده می‌شود و مقادیر کرنش حاصل از شبیه‌سازی سه بعدی، بزرگتر از رابطه تحلیلی (با اختلاف نسبی حدود ۶۰٪) بدست آمده است.

در شکل ۱۱، کرنش خمشی لوله در برابر تغییر مکان زمین برای عرض ۳۰ متر ناحیه‌ی PGD با روش تحلیلی اورورک [۱۴] و در حالت دوم شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. در روش تحلیلی اورورک [۱۴]، کرنش خمشی لوله با استفاده از رابطه‌ی ۶ برای شرایط لوله انعطاف‌پذیر و عرض گسترده‌ی ناحیه PGD محاسبه شده است. همچنین با استفاده از رابطه‌ی ۷ برای لوله سفت و عرض باریک ناحیه PGD کرنش خمشی لوله بدست آمده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مطابق انتظار، شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با رابطه‌ی ۶ که برای لوله‌ی منعطف و عرض گسترده‌ی ناحیه‌ی PGD بدست آمده، مطابقت خوبی دارد. در صورتی که استفاده از رابطه‌ی ۷ برای لوله‌ی های سفت، نتیجه خوبی را نشان نمی‌دهد (اختلاف بیش از پنج برابر).

۳-۲- مقایسه روش‌های عددی و تحلیلی با برداشت‌های میدانی

در این بخش، مدل شبیه‌سازی شده با روش میدانی ونکای و همکاران [۷] که در نرم‌افزار FLAC 3D تحلیل شده، بررسی



شکل ۱۰. کرنش محوری لوله در برابر تغییر مکان زمین

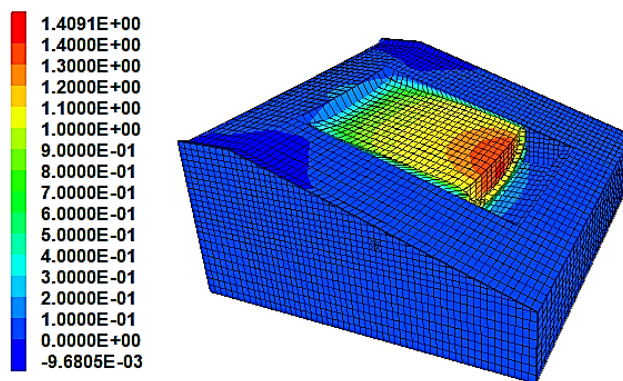
Fig. 10. Axial strain of the pipe against ground displacement

با یکدیگر تطابق داشته و با یکدیگر حدود پنج درصد اختلاف دارند. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی کرنش‌های برشی ایجاد شده در شیروانی است که هرچه به مرکز شیروانی نزدیک‌تر شده، مقادیر کرنش برشی افزایش می‌یابد. دایره‌ی گسیختگی در این شکل از پای شیروانی عبور کرده است که در تأیید مطالعات سینگ است [۱۹]. طبق نتایج او، در خاک با زاویه اصطکاک داخلی بزرگ‌تر از سه درجه، گسیختگی از پای شیروانی رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، لوله در دایره‌ی گسیختگی قرار دارد و با ایجاد تغییر مکان خاک، مکان لوله نیز جابه‌جا می‌شود. با شروع گسیختگی، کاهش کرنش‌های برشی افزایش یافته و تغییر مکان لوله بیش‌تر می‌شود.

شکل ۱۰ نمودار کرنش محوری لوله را در برابر تغییر مکان زمین

ابتدا و انتهای لوله در هر دو روش دارای تغییرمکان منفی هستند؛ با تغییرمکان ناحیه‌ی میانی خاک به سمت جلو، لوله نیز به سمت جلو حرکت کرده، خاک اطراف ناحیه‌ی PGD مقاومت بیشتری از خود نشان داده و به دلیل ثابت نبودن ابتدا و انتهای لوله، سبب می‌شود که لوله در نواحی مرزی به سمت عقب حرکت کند. اختلاف نتایج شبیه‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌ها حدود ۱۲ درصد است. این در حالی است که شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر تغییرمکان عمودی لوله را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کند. دلیل عدم تطابق تغییرمکان عمودی لوله در شبیه‌سازی حاضر با برداشت میدانی را می‌توان ایجاد تغییرمکان‌های موضعی در خاک و لوله در پشت دیوار نگهدارنده زمین در برداشت میدانی دانست. در کار میدانی ونکای و همکاران [۷]، پس از حفاری مراحل اول و دوم، آب در پشت دیوار نگهدارنده نفوذ پیدا می‌کند و باعث ایجاد نشست قائم در خاک شده و سپس مراحل سوم و چهارم حفاری انجام می‌شود. حال آن که در شبیه‌سازی حاضر، نفوذ آب در پشت دیوار نگهدارنده مدل نشده است و این موضوع را می‌توان دلیل اختلاف مقادیر تغییرمکان عمودی مسئله با برداشت میدانی دانست.

شکل ۱۴ تنش موجود در طول لوله را برای روش عددی، تحلیلی و برداشت میدانی نشان می‌دهد. مقایسه‌ی روش عددی و میدانی نشان می‌دهد که روند صعودی و نزولی بودن در هر دو نمودار با یکدیگر مطابقت دارد. تنش بیشینه کششی در هر دو نمودار، در مرکز مدل رخ داده و مقدار آن در نواحی مرزی مدل به صفر می‌رسد. به دلیل

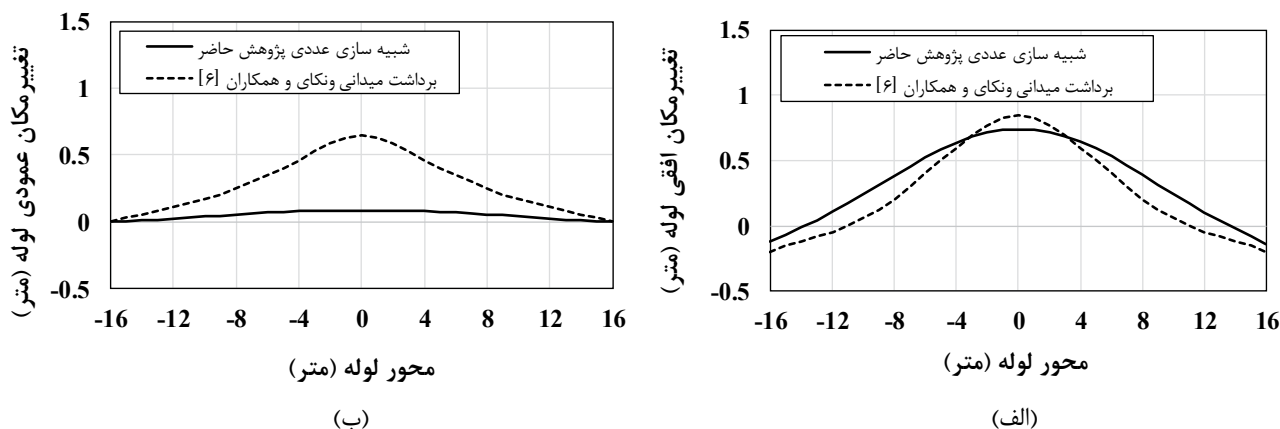


شکل ۱۲. تغییرمکان مدل شبیه‌سازی شده با برداشت میدانی ونکای و همکاران [۷] (بر حسب متر)

Fig. 12. Displacement of the simulated model according to the field model of Wenkaia et al. [7] (in meters)

می‌شود. شکل ۱۲ تغییرمکان خاک و لوله را در پایان حفاری مرحله دوم نشان می‌دهد. حفاری در منطقه‌ی میانی انجام شده و این منطقه تحت رانش زمین قرار می‌گیرد، مناطق کناری که خارج از ناحیه‌ی رانش زمین هستند، دارای پارامترهای مقاومتی بالا بوده و تقریباً ثابت فرض شده‌اند. دو انتهای لوله در مرزهای کناری ثابت در نظر گرفته شده و دارای مقادیر تغییرمکان هستند.

شکل ۱۳ تغییرمکان افقی و عمودی لوله را در طول آن حاصل از شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با برداشت میدانی ونکای و همکاران [۷] را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، در هر دو روش، تغییرمکان افقی بیشینه‌ی لوله در مرکز ناحیه رخ داده و نمودار زینی شکل است.

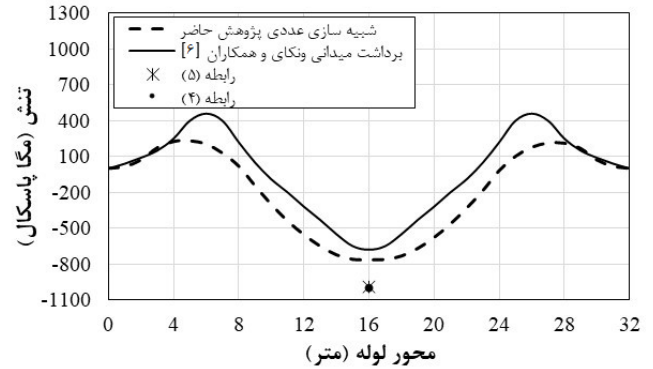


شکل ۱۳. تغییرمکان در طول لوله؛ (الف) تغییرمکان افقی و (ب) تغییرمکان عمودی

Fig. 13. Displacement along the pipe; (A) horizontal displacement and (b) transverse displacement

کرنش محاسبه شده در رابطه‌ی تنش-کرنش، مقدار تنش لوله ۱۰۰۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. نتیجه این دو روش تحلیلی مشابه هم بوده، با این حال، مقدار تنش حاصل شده نسبت به مقدار اندازه گیری شده در مرکز لوله بیش از ۵۰ درصد بزرگتر تخمین زده شده است. بطور کلی، می‌توان گفت نتایج شبیه سازی عددی برای وسط لوله کمترین خطا را داشته و روابط تحلیلی موجود، غیر قابل اعتماد (با خطای بیش از ۵۰ درصد) هستند.

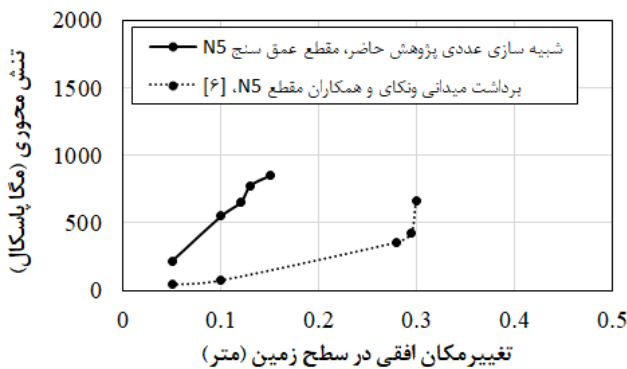
شکل ۱۵ نمودار تنش محوری را در برابر تغییر مکان افقی سطح زمین برای هر دو روش عددی و میدانی نشان می‌دهد. در این نمودار، مقادیر تنش در پایان هر مرحله محاسبه شده و در برابر تغییر مکان افقی رسم شده است. با توجه به شکل ۱۵ می‌توان بیان کرد که هرچه مراحل حفاری رو به جلو پیش می‌رود، مقدار تنش محوری در لوله و تغییر مکان افقی سطح زمین افزایش می‌یابد. در پایان مرحله چهارم حفاری، مقدار تنش محوری و تغییر مکان افقی سطح زمین به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نمودار روش عددی و میدانی هر دو مقطع، دارای یک روند افزایشی برای تنش محوری لوله در برابر تغییر مکان سطح زمین است. به دلیل بیش‌تر بودن مقادیر تغییر مکان افقی در مقطع N3، نمودارهای مربوط به آن کشیده‌تر از نمودارهای مربوط به مقطع N5 بوده، در حالی که در مقطع N5، مقادیر تغییر مکان کمتر و به یک‌دیگر نزدیک‌تر است. در هر حال، روش شبیه سازی عددی، مقادیر تنش محوری بزرگتری (حدود دو تا چهار برابر) را تخمین می‌زند.



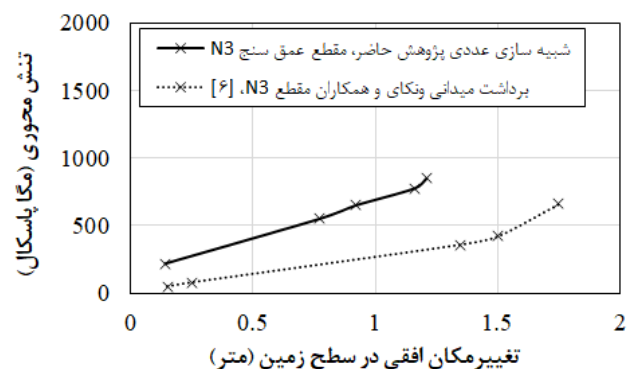
شکل ۱۴. تعیین تنش در طول لوله با روش‌های مختلف

Fig. 14. Determination of stress along the pipe by different methods

تفاوت در پارامترهای مقاومتی ناحیه‌ی PGD و کناری، مقادیر تنش در مرز بین این دو ناحیه به صفر رسیده و در نواحی کناری تغییر علامت داده و از نوع فشاری می‌شود. برخلاف پیش بینی صحیح روند تغییرات، مقادیر حاصل از شبیه سازی عددی اختلاف زیادی با مقادیر اندازه گیری شده دارند. بطور متوسط، مقدار تنش در طول لوله ۵۰ درصد بزرگتر تخمین زده شده است، ولی این خطا برای مرکز لوله کمتر شده و به ۱۲ درصد می‌رسد. در صورت استفاده از رابطه‌ی ۵ توسط اورورک [۱۴]، کرنش محوری در مرکز لوله محاسبه شده و با استفاده از رابطه‌ی تنش-کرنش، مقدار تنش بیشینه لوله ۹۹۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. هم چنین در روش تحلیلی لیو و اورورک [۱]، با استفاده از رابطه‌ی ۴ کرنش لوله به دست می‌آید. با جای‌گذاری



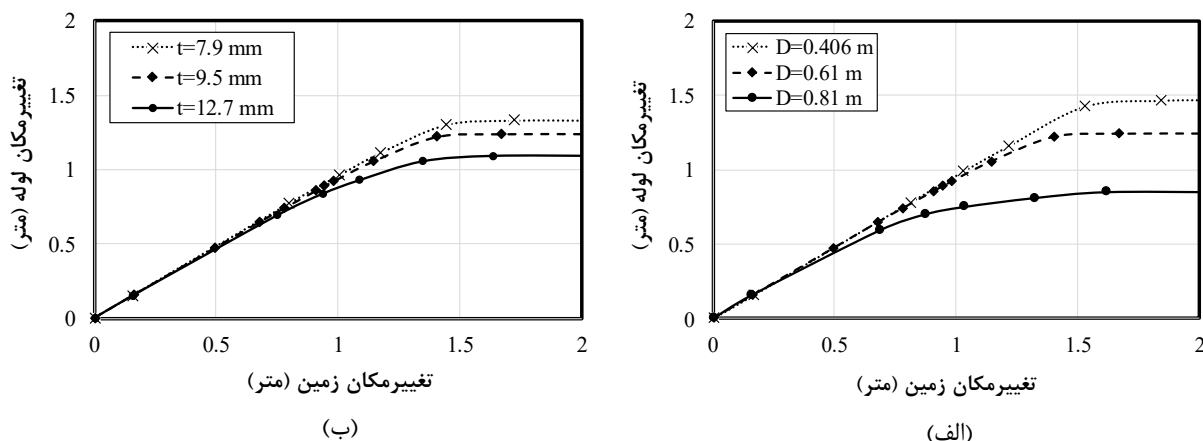
(ب)



(الف)

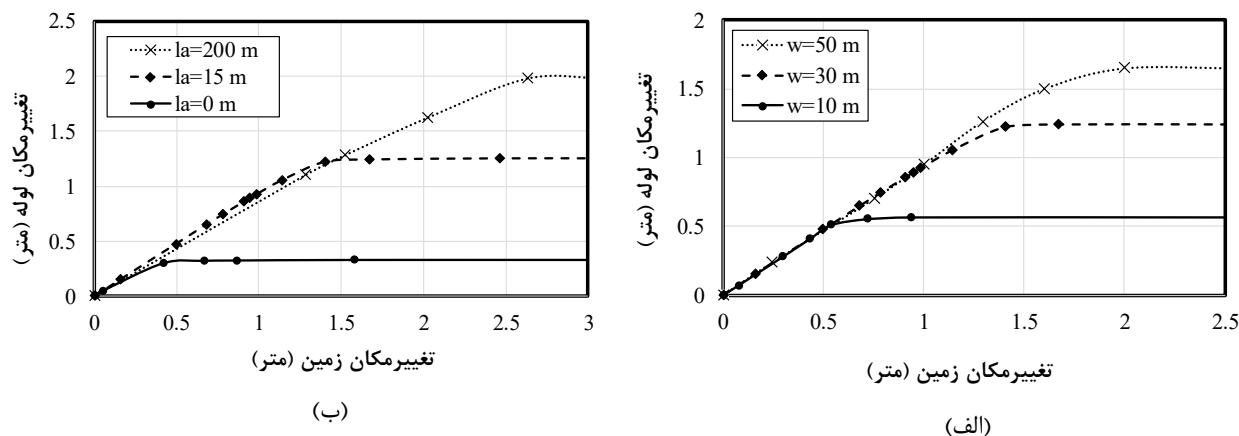
شکل ۱۵. تنش محوری لوله در برابر تغییر مکان افقی سطح زمین

Fig. 15. Axial stress of the pipe against horizontal displacement of the ground surface



شکل ۱۶. نمودار تغییر مکان لوله در برابر تغییر مکان زمین در شرایط $L_a=15\text{ m}$ ، $W=30\text{ m}$: (الف) تأثیر قطر لوله و (ب) تأثیر ضخامت لوله

Fig. 16. Diagram of pipe displacement versus ground displacement at $W = 30\text{ m}$, $L_a = 15\text{ m}$; (a) the effect of pipe diameter and (b) the effect of pipe thickness



شکل ۱۷. نمودار تغییر مکان لوله در برابر تغییر مکان زمین؛ (الف) برای عرض‌های مختلف منطقه‌ی PGD و $L_a=15\text{ m}$ ، (ب) برای عرض‌های مختلف ناحیه مهار شده و $W=30\text{ m}$

Fig. 17. Pipe displacement diagram versus ground displacement; (a) for different widths of PGD and $L_a = 15\text{ m}$, (b) for different widths of restrained area and $W = 30\text{ m}$

۴- مطالعه حساسیت

با افزایش قطر و ضخامت لوله، حالت خطی تغییر مکان‌ها کمتری شده و سپس ثابت می‌شود. با افزایش قطر و ضخامت لوله، تغییر مکان لوله کاهش می‌یابد؛ با افزایش قطر و ضخامت لوله، سطح مقطع لوله بیش‌تر شده و سطح اندرکنش خاک و لوله افزایش می‌یابد. افزایش سطح مقطع لوله باعث افزایش سختی آن شده و سبب می‌شود که در لوله تغییر شکل کمتری رخ دهد. از طرف دیگر، با افزایش سطح اندرکنش خاک و لوله، لوله در برابر تغییر مکان زمین نیز مقاومت بیش‌تری (تا ۳۰ درصد) از خود نشان داده و سبب کاهش تغییر مکان زمین می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهایی مانند قطر و ضخامت لوله، عرض منطقه‌ی PGD، طول مهار شده از هر طرف و زاویه شیروانی بر روی پاسخ لوله مدفون در مدل‌های شبیه‌سازی شده با مدل عددی لیو و اورورک [۱]، از مدل‌هایی با مشخصات هندسی مختلفی استفاده شده است. شکل ۱۶ تأثیر قطر و ضخامت لوله را بر پاسخ آن به تغییر مکان ماندگار زمین نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد با افزایش تغییر مکان زمین، تغییر شکل لوله افزایش یافته و این روند افزایشی ابتدا به صورت خطی بوده و سپس ثابت می‌شود. هم چنین

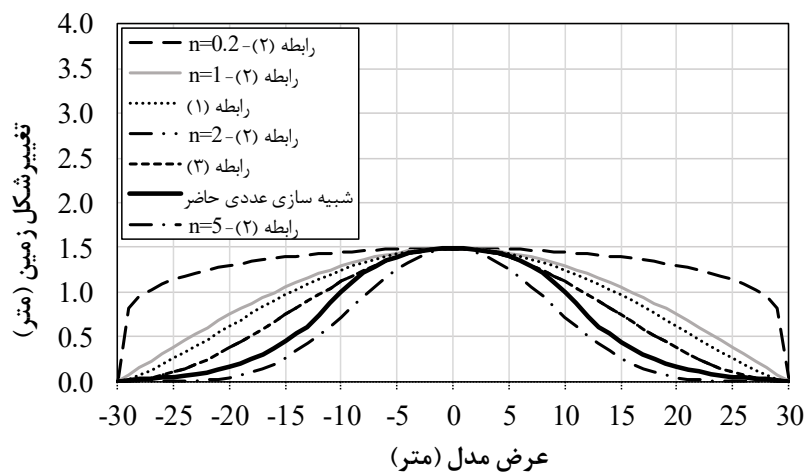
تغییرمکان خاک و لوله بیش تر می شود.

شکل ۱۸ مقایسه شبیه سازی عددی پژوهش حاضر را با روابط تحلیلی محققان مختلف نشان می دهد. همان طور که در بخش مقدمه بیان شد، محققان مختلف با ارائه روابط تحلیلی ۱ تا ۳، تغییر شکل عرضی زمین را محاسبه کردند. با توجه به شکل ۱۸، در همه ی مدل ها، بیشینه ی تغییر شکل عرضی زمین در مرکز ناحیه رخ داده و این مقدار در حاشیه ها به صفر می رسد. شبیه سازی پژوهش حاضر با رابطه ۳، روش عددی اورورک [۱۴] و رابطه ۲- $n=5$ ، روش سوزوکی [۱۰] بیش ترین تطابق را دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به شبیه سازی عددی ناپایداری لوله تحت بارگذاری جانبی ناشی از رانش زمین پرداخته شد. در ادبیات فنی، رفتار لوله بدون توجه به شیب سطح زمین بررسی شده است حال آنکه، ممکن است لوله بر روی شیروانی ناپایدار شده قرار گرفته باشد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی امکان شبیه سازی رفتار لوله و همچنین، بررسی شرایط امکان استفاده از روابط تجربی و تحلیلی موجود بوده است. در ادامه، به منظور ارائه راه کارهایی جهت کاهش شدت صدمات وارد شده به لوله های مدفون در برابر تغییرمکان عرضی زمین، برخی از عوامل هندسی و مکانیکی خاک و لوله که پاسخ لوله را در برابر تغییرمکان عرضی ماندگار زمین تحت تاثیر قرار می دهد، مورد بررسی قرار گرفتند. تاثیر پارامترهای مختلف هندسی شیروانی و لوله همانند

شکل ۱۷ مقایسه پاسخ لوله به تغییرمکان عرضی زمین را برای عرض های مختلف منطقه PGD و طول ناحیه مهار شده نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۷-الف می توان نتیجه گرفت که افزایش تغییرمکان زمین سبب افزایش تغییر شکل لوله می شود. با افزایش عرض ناحیه PGD، نمودار در تغییرمکان های بیش تری از حالت خطی بودن خارج شده و سپس ثابت می شود. همچنین با کاهش عرض ناحیه PGD، تغییرمکان لوله کاهش می یابد؛ به سبب باریک شدن عرض منطقه، طول لوله در منطقه در حال لغزش نیز کاهش یافته و از انعطاف پذیری آن کاسته می شود؛ در نتیجه تغییرمکان خاک و لوله کاهش می یابد. با افزایش طول ناحیه مهار شده از هر طرف (L_p)، عرض شیروانی و همچنین طول لوله افزایش می یابد. به دلیل آن که مرز مدل ثابت فرض شده، تغییرمکان آن صفر در نظر گرفته می شود. با افزایش طول لوله، فاصله بین مرکز و حاشیه ی ثابت مدل نیز افزایش یافته و لوله رفتار انعطاف پذیرتری همانند کابل نشان می دهد، به این ترتیب، تغییرمکان خاک و لوله هر دو افزایش می یابد. برای بررسی تاثیر عرض ناحیه مهار شده از هر طرف (L_p)، مقادیر مختلف L_p ، صفر، ۱۵ و ۲۰۰ متر و سایر شرایط هندسی و مکانیکی خاک و لوله یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۷ (ب)، با افزایش تغییرمکان زمین، تغییرمکان لوله افزایش می یابد. با افزایش عرض ناحیه مهار از هر طرف، عرض شیروانی و طول لوله نیز افزایش می یابد. با افزایش طول لوله و فاصله ی بین مرکز و حاشیه ی ثابت مدل، لوله رفتار انعطاف پذیرتری مانند کابل از خود نشان داده و



شکل ۱۸. مقایسه تغییر شکل عرضی زمین حاصل از PGD عرضی در روش های تحلیلی مختلف

Fig. 18. Comparison of transverse deformation of the ground resulting from transverse PGD in different analytical methods

- [3] F. Calvetti, C.D. Prisco, R. Nova, Experimental And Numerical Analysis Of Soil-Pipe Interaction, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering 130(12) (2004) 1292-1299.
- [4] T.D. O'Rourke, Geohazards And Large, Geographically Distributed Systems, Geotechnique, 60(7) (2010) 505-543.
- [5] A. Monshizadeh Nain, E. Seyedi Hosseininia, Three-dimensional FEM simulation of buried pipelines against Reverse faulting displacements, Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 3(3) (2018) 49-66.
- [6] D. Bruton, D. White, C. Cheuk, M. Bolton, M. Carr, Pipe-Soil Interaction Behavior During Lateral Buckling, Including Large-Amplitude Cyclic Displacement Tests by the Safebuck JIP, in: Offshore Technology Conference in Houston, Texas, U.S.A, 2006.
- [7] F. Wenkaia, H. Runqiu, L. Jintao, X. Xiangtao, L. Minb, Large-scale Field Trial To Explore Landslide And Pipeline Interaction, Soils And Foundations, 55(6) (2015) 1466-1473.
- [8] W. Zhang, A. Askarinejad, Behaviour of buried pipes in unstable sandy slopes, Landslides, (2018).
- [9] T.D. O'Rourke, Critical Aspects Of Soil-pipeline Interaction For Large Ground Deformation, Proc. 1 st Japan-U.S. workshop on Liquefaction , Large Ground Deformation and their Effects on Lifeline Facilities, (1988) 118-126.
- [10] I. Suzuki, O. Arata, N. Suzuki, Subject to liquefaction-induced permanent ground displacement, Proc. 1 st Japan-U.S. workshop on Liquefaction , Large Ground Deformation and their Effects on Lifeline Facilities, (1988) 155-162.
- [11] T. Kobayashi, N. Suzuki, H. Nakane, M. Ishikawa, Modelling Of Permanent Ground Deformation For Buried Pipelines, Proc. 2nd U.S. Japan Workshop on Liquefaction Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, (1989) 413-425.
- [12] K. Badv, K.E. Daryani, An Investigation Into The

قطر لوله، ضخامت لوله، عرض ناحیه‌ی PGD، عرض ناحیه‌ی مهار شده از هر طرف و شیب شیروانی بر روی پاسخ لوله به تغییرمکان عرضی ماندگار زمین مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی شده با مطالعات تحلیلی، عددی و میدانی موجود نشان می‌دهد که بطور کلی، تطابق خوبی میان نتایج این روش‌ها وجود دارد. با این حال، مدل سازی عددی به روش سه بعدی و محیط پیوسته (بجای استفاده از مدل تیر و فنر)، اطلاعات دقیق تری را نتیجه می‌دهد. مهمترین نتایج عبارتند از:

۱- تغییرمکان بیشینه‌ی زمین و لوله در مرکز ناحیه‌ی PGD رخ می‌دهد و در حاشیه‌ها به صفر می‌رسد. با توجه به تقارن مدل، مقادیر لنگر خمشی و نیروی محوری در طول لوله نسبت به مرکز ناحیه‌ی PGD متقارن است. همچنین مقادیر بیشینه‌ی نیرو در لوله در اطراف مرکز ناحیه‌ی PGD رخ می‌دهد.

۲- با افزایش تغییرمکان زمین، کرنش بیشینه لوله به طور خطی افزایش یافته و از حدی به بعد که تغییرمکان بحرانی نام دارد، با افزایش تغییرمکان زمین، کرنش بیشینه لوله ثابت می‌ماند.

۳- با افزایش قطر و یا ضخامت لوله، تغییرمکان لوله کاهش می‌یابد. در نتیجه، با انجام اقداماتی نظیر افزایش قطر لوله و افزایش ضخامت جداره لوله می‌توان تغییرمکان‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در لوله را تا حدی کاهش داد و لوله‌ها را در برابر حرکات عرضی زمین مقاوم‌سازی نمود.

برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود تأثیر رفتار خاک شامل در نظر گرفتن اثرات نرم‌شوندگی و سخت‌شوندگی، اثر زلزله، سربار و ترافیک، رفتار لوله‌های فولادی ناپیوسته و یا دارای اتصالات، خم یا زانویی، لوله‌های با جنس متفاوت نظیر لوله‌های بتنی یا پلیمری بر روی پاسخ لوله‌ی مدفون در برابر حرکات عرضی زمین بررسی گردند.

مراجع

- [1] X. Liu, M.J. O'Rourke, Behaviour Of Continuous Pipeline Subject To Transverse PGD, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 26 (1997) 989-1003.
- [2] C.H. Trautmann, T.D. O'Rourke, Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe, Journal of Geotechnical Engineering, 111(9) (1985) 1077-1092.

- [15] FLAC3D, Online Manual Table of Contents. Itasca Consulting Group Inc., in.
- [16] R.L. Michalowski, Stability Charts for Uniform Slopes, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering ASCE 128(4) (2002) 351-355.
- [17] A.W. Bishop, N.R. Morgenstern, Coefficients For Earth Slopes, Geotechnique, 10(4) (1960) 129-150.
- [18] R.J. Jardine, Z.X. Yang, B.T. Zhu, P. Foray, C.H.C. Tsuha, Sand Grain Crushing and Interface Shearing During Displacement Pile Installation in Sand, Geotechnique, 60 (2010) 469-482.
- [19] B.M. Das, Principles Of Geotechnical Engineering 2002.
- Upward And Lateral Soil-Pipeline Interaction In Sand Using Finite Difference Method, Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, 34 (2010) 433-445.
- [13] A. Tsatsis, F. Gelagoti, G. Gazetas, Buried pipelines subjected to landslide-induced actions, in: 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, Chania, Greece, 2016.
- [14] M.J. O'Rourke, Approximate Analysis Procedures For Permanent Ground Deformation Effects On Buried Pipeline, Proc 2nd US_Japan Workshop on Liquefaction Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, (1989) 336-347.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Nouri, E. Seyedi Hosseininia, *Numerical Simulation of Transverse Deformations of Buried Pipelines Due to Slope Instability*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 1187-1204.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15283.5870](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15283.5870)

