



مقاله پژوهشی

تأثیر امواج زمین لرزه بر لوله های مدفون در شیروانی خاکی نامحدود به روش عددی

غلامحسین رنجبر^{*}، محمود ساریخانی خرمی^۱

۱- گروه معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد صفاشهر، صفاشهر، ایران

(دریافت: مهر ۱۴۰۱، پذیرش: تیر ۱۴۰۲)

چکیده

خط لوله های مدفون یکی از شریان های مهم و تأثیرگذار از جنبه پیشرفت اقتصادی و اجتماعی جوامع توسعه یافته و در حال توسعه از طریق انتقال انرژی مانند گاز، نفت و آب می باشند. تجربیات گذشته از آسیب های خط لوله های مدفون نشان می دهد که برخی از این آسیب های قابل توجه که باعث بروز مشکلات مختلف شده است ناشی از امواج زمین لرزه ها می باشند. تأثیرات زمین لرزه بر روی لوله های مدفون شامل تغییر شکل گذرای زمین و تغییر شکل دائمی زمین همراه با شکست های ممکن، که نتیجه جابجایی های گسل های فعال، زمین لغزش و نشست یا حرکت های جانبی ناشی از روانگرایی می باشند. اکثر آسیب های گزارش شده تا اکنون بدلیل تغییر شکل های دائمی است، هر چند که مستندات معتبری نشان می دهد که انتشار امواج با درصد کمتری در آسیب لوله ها سهیم بوده است. با گسترش روش های عددی و دقت این روش ها در شبیه سازی رفتار خط لوله های مدفون به تغییر شکل های ناشی از زمین لرزه، در دهه های اخیر استفاده از این روش ها بیشتر توسط محققین به کار گرفته شده است. در این مطالعه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و با بکارگیری نرم افزار $FLAC^{2D}$ به بررسی و تحلیل خط لوله های مدفون فولادی در یک شیروانی خاکی نامحدود قرار گرفته شده بر روی سنگ بستر پرداخته شده است و تأثیر زمین لغزش ایجاد شده در این لایه ی خاکی ناشی از بار زمین لرزه بر روی لوله مدفون ارائه شده است. همچنین تحلیل حساسیت رفتار لوله مدفون تحت بار دینامیکی زمین لرزه به پارامترهای مهم و تأثیرگذار در رفتار مقاومتی یک شیروانی نامحدود شامل زاویه شیب، ضخامت و سطح آب زیرزمینی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش سطح آب زیرزمینی و زاویه شیروانی نامحدود، جابجایی های لایه خاکی و لوله مدفون بصورت نمایی افزایش می یابد که این جابجایی ها باعث ایجاد تغییر شکل های بیضوی در سطح مقطع لوله شده است. هر چند که تأثیر ضخامت لایه خاکی بر روی این تغییر شکل ها قابل نادیده گرفتن است.

کلمات کلیدی

خط لوله مدفون، زمین لرزه، شیروانی نامحدود، روش عددی

*عهده دار مکاتبات: engineerranjbar@yahoo.com

DOI: 10.22034/ANM.2023.18740.1572

۱- مقدمه

به مجموعه سازه‌ها، تأسیسات و تجهیزاتی که وظیفه‌ی ذخیره، تأمین، انتقال و توزیع نیازهای حیاتی شامل آب، برق، گاز و یا جمع‌آوری، ذخیره و تصفیه یا بازیافت فاضلاب و مواد زائد و یا برقراری ارتباط شامل تلفن ثابت و همراه، اینترنت و داده را دارند، شریان‌های حیاتی گفته می‌شود. خطوط لوله‌های مدفون به‌عنوان شریان‌های حیاتی مهم و مطمئن از طریق انتقال نفت، گاز، آب و سایر سیالات در مقادیر زیاد به رشد اقتصادی جوامع کمک قابل‌توجهی کرده است [۱]. مخاطرات لرزه‌ای که به شکل مستقیم باعث خرابی خطوط لوله می‌شوند شامل نیروها و تغییر شکل‌های ناشی از حرکت زمین و اثر انتشار امواج می‌باشند. تجربیات گذشته نشان می‌دهد که خط لوله‌های مدفون تحت تأثیر زمین‌لرزه‌ها قرار گرفته‌اند که این تأثیرات به دو گروه اصلی خطرات زمین بر اساس طبیعت گذرای منابع آسیب تقسیم می‌شوند:

- تغییر شکل گذرای زمین^۱ به دلیل انتشار موج زمین‌لرزه

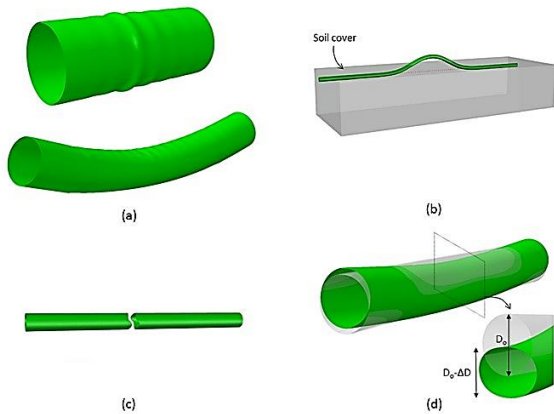
- تغییر شکل دائمی زمین^۲ همراه با شکست‌های ممکن که نتیجه جابجایی‌های گسل‌های فعال، زمین‌لغزش و نشست یا حرکت‌های جانبی ناشی از روانگرایی است [۲]. سهم اصلی خسارات ناشی از زلزله روی لوله‌های مدفون به علت ایجاد جابه‌جایی‌های ماندگار در زمین بوده و سهم مربوط به تأثیر امواج بسیار کمتر است. پنج حالت آسیب متمایز برای خط لوله‌های فولادی جوش شده به هم ناشی از تغییر شکل‌های زمین محتمل است (شکل ۱) [۲]:

- خمیدگی پوسته‌ای^۳ - خمیدگی تیری^۴ - گسیختگی کششی^۵ - شکست خمشی^۶ - تغییر شکل بیضوی مقطع عرضی لوله^۷

ساکورایی و تاکاناشی^۸ یکی از مطالعات اولیه در تحلیل تنش‌های دینامیکی خط لوله‌های مدفون به‌وسیله‌ی آزمایش‌های میدانی در طول زمین‌لرزه ماتسوشیرو^۹ ارائه دادند. آن‌ها مشاهده کردند که تغییر شکل‌های محوری لوله در زمانی که شدت زمین‌لرزه به‌اندازه کافی در ایجاد لغزش پایین است، مطابق با مقادیر تغییر شکل زمین است و این موضوع را به‌وسیله‌ی روابط مورداستفاده در مدل تیر بر روی پی وینکلر غیرخطی^{۱۰} اثبات کردند [۳].

شینوزوکا و کویکی^{۱۱} نتایج گرفته‌شده از تحقیق قبلی را برای محاسبه فاکتورهای تبدیل بین کرنش‌های محوری

القاشده در لوله و خاک همگن به دلیل انتشار امواج فشاری و رایلی موازی با محور لوله توسعه دادند؛ که این نتایج شامل در نظرگیری امکان لغزش و یا رفتار غیرخطی اندرکنش سطح تماسی لوله و خاک است. مقایسه بین فاکتورهای تبدیل دینامیکی و شبه استاتیکی نشان داد که اینرسی خط لوله تأثیر ناچیزی دارد [۴].



شکل ۱: مکانیسم شکست عمومی در خط لوله‌های مدفون فولادی پیوسته (a) - خمیدگی پوسته‌ای (b) - خمیدگی تیری (c) - شکست کششی (d) - تغییر شکل بیضوی مقطع تیر [۲].

لی^{۱۲} و همکاران از روابط پوسته استوانه‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک برای خطوط لوله مدفون تحت فشار در یک محیط همگن الاستیک بر اساس تئوری جریان پلاستیک ساده جهت ارزیابی پایداری تعادل دینامیکی لوله استفاده کردند. آنها اندرکنش سطح تماسی لوله - خاک در جهت محوری نادیده گرفتند و فنرهای شعاعی الاستیک جهت ارائه مقاومت جانبی خاک، فرض کردند. نتایج نشان داد که تحلیل تنش و کرنش خمشی بحرانی متقارن محوری لوله تحت شرایط دینامیکی مانند شرایط استاتیکی بسیار ضروری است [۵].

وانگ^{۱۳} و همکاران یک خط لوله طویل مدفون در خاک با رفتار همگن الاستیک تحت امواج سطحی و حجمی با زاویه برخورد مایل در شرایط سه‌بعدی در نظر گرفتند. آنها به یک راه‌حل تحلیلی از روابط الاستودینامیک دست یافتند که حرکت برهم‌کنش خاک و لوله را به‌وسیله‌ی بسط تابع اصلی پتانسیل امواج تشریح می‌کند. در این روش، اندرکنش سینماتیکی و اینرسی سطح تماسی خاک-لوله و پراکندگی امواج به‌وسیله‌ی سطح آزاد را شامل می‌شود [۶].

اورورک و الهامادی^{۱۴} رفتار محوری خط لوله الاستیک پیوسته در خاک الاستیک همگن تحت انتشار امواج رایلی در

از خط لوله‌ها تحت تغییر شکل‌های گذرای زمین ناشی از زمین‌لرزه ارائه دادند [۱۱].

نوری و همکاران به شبیه‌سازی عددی تغییر شکل‌های عرضی خط لوله‌های مدفون به دلیل ناپایداری شیب زمین پرداختند و تأثیرات پارامترهای هندسی لوله و شیب به ترتیب شامل قطر و ضخامت لوله و عرض شیب و پارامترهای مقاومتی خاک شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک بر روی این تغییر شکل‌ها را بررسی کردند [۱۲].

نیکولاس^{۲۰} و همکاران به بازنگری تحقیقات پیشین مرتبط با خط لوله‌های فولادی انتقال گاز طبیعی تحت لرزش ناشی از زمین‌لرزه پرداختند و تقاضای میدانی موجود جهت تحلیل و طراحی لرزه‌ای و ارزیابی ارتجاعی این نوع از خط لوله‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند [۲].

وانگ و همکاران به تحلیل احتمالاتی شکست دینامیکی شبکه خط لوله گاز شهری پرداختند و اصول این نوع تحلیل را پیشنهاد دادند [۱۳].

الشش^{۲۱} و همکاران به بررسی پوشش لوله‌های صلب مدفون با استفاده از سیستم‌های ژئوگریدی تسلیح خاک که تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته است پرداختند [۱۴].

در این مطالعه به بررسی رفتار لوله مدفون در لایه خاکی با شیروانی نامحدود قرار گرفته بر روی سنگ‌بستر تحت بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و به کارگیری نرم‌افزار FLAC^{2D} پرداخته شده است. ابتدا صحت سنجی مدل عددی با استفاده از روش‌های تحلیلی انجام و سپس تأثیر زاویه شیروانی نامحدود، سطح آب زیرزمینی و ضخامت لایه خاکی بر روی رفتار لوله مدفون تحت شرایط بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل عددی

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که فضای مسئله را به صورت پیوسته با المان‌هایی که در گره‌ها به هم متصل هستند، مدل می‌کند. نرم‌افزار دوبعدی FLAC^{2D} یک برنامه تفاضل محدود است که توسط شرکت آیتسکا ارائه شده و بر اساس محاسبات لاگرانژی توسعه یافته است. در این نرم‌افزار برای تحلیل تنش و تغییر مکان، مواد

جهت محور خط لوله را مطالعه کردند. رفتار اصطکاک الاستیک - پلاستیک کامل در سطح مشترک لوله و خاک را در نظر گرفتند. آنها همچنین یک روش طراحی بر اساس همبستگی بین کرنش محوری زمین و کرنش اصطکاک سطح مشترک پیشنهاد دادند. به کارگیری این روش بر روی یک مورد خط لوله فولادی مدفون نشان داد که کرنش محوری لوله ناشی از یک موج ریلی با شتاب بیشینه ۰/۳۵ برابر شتاب گرانشی زمین به ۳۵ درصد کرنش تسلیم می‌رسد [۷].

کورتزیس^{۱۵} از روابط پوسته الاستیک برای تحلیل توزیع کرنش محوری و حلقه‌ای سازه‌های استوانه‌ای بلند در لایه خاکی الاستیک یکنواخت واقع بالای سنگ‌بستر که تحت لرزش بیرون از فاز^{۱۶} ناشی از امواج هارمونیک برشی با زاویه برخورد مایل قرار گرفته‌اند، استفاده کردند. بهینه‌سازی راه‌حل‌های شکل بسته^{۱۷} نسبت به تغییرات زاویه برخورد منجر به ارائه روابط کرنش بحرانی برای طراحی لرزه‌ای شده است [۸].

صابری و همکاران یک مدل سه‌بعدی هیبریدی تیر-پوسته برای خط لوله فولادی استفاده کردند که بخش خمش با المان‌های پوسته‌ای و بخش محوری با المان‌های تیر مدل‌سازی شد. اندرکنش سطح تماسی لوله و خاک با استفاده از مدل‌های فنر در نظر گرفته شده در دستورالعمل انجمن مسیر زندگی آمریکا (ALA)^{۱۸} برای خاک یکنواخت و لوله با رفتار غیرخطی و فنرهای جهت مدل‌سازی اتصالات لوله‌ها در نظر گرفته شد. تحلیل تاریخچه واکنش غیرخطی در هر سه جهت با استفاده از رکوردهای واقعی جابجایی زمین که دارای اختلاف فاز هستند، انجام شد [۹].

نورزاده با استفاده از مدل تیر بر روی پی وینکلر غیرخطی (BNWF) ترکیب شده با فنرهای ALA خاک به بررسی عددی پارامتری واکنش لوله فولادی انتقال گاز طبیعی به حرکت لرزه‌ای در هر سه جهت پرداختند. نتایج نشان داد که خمیدگی‌های موضعی در خط لوله‌ها برای مقادیر بیشینه شتاب بزرگ‌تر از ۰/۶ برابر شتاب گرانشی زمین (g) اتفاق افتاده است [۱۰].

گریگوریس^{۱۹} و همکاران به ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله‌های مدفون انتقال گاز طبیعی به دلیل انتشار امواج زمین‌لرزه پرداختند. آنها ابتدا روابط شکنندگی موجود در تحلیل این نوع آسیب‌پذیری را بازنگری و مورد نقد قرار دادند و سپس روش‌های منتخب جهت تحلیل شکنندگی این نوع

بر نتایج پاسخ شیروانی نامحدود و لوله مدفون تحت بار دینامیکی، مرزهای جانبی مدل عددی در فاصله تقریباً ۲۹ برابر قطر لوله از مرکز لوله و مرز پایینی بین ۲۸ تا ۳۹ برابر از مرکز لوله برای هندسه‌های مختلف مورد تحلیل، در نظر گرفته شد که با توجه به موارد ذکر شده، طول مدل عددی ۷۰ متر در جهت محور x و ارتفاع مدل عددی حداکثر برابر با ۵۰ متر است.

۲-۳- شبیه‌سازی عددی رفتار خاک و لوله فولادی

خاک دانه‌ای غیر چسبنده با رفتار الاستیک - پلاستیک کامل در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی رفتار خاک از شبکه‌های دوبعدی چند گره‌ای با مدل رفتاری الاستیک خطی - پلاستیک کامل مطابق با معیار مور - کولمب که عمومی‌ترین مدل مورد استفاده در کارهای ژئوتکنیکی است، استفاده شد. تابع تسلیم و پتانسیل پلاستیک این معیار به صورت روابط (۱) و (۲) است [۱۵].

$$f = p \sin \varphi + \sqrt{I_2} \cos \theta - \sqrt{\frac{I_2}{3}} \sin \varphi \sin \theta - C \cos \varphi \quad (1)$$

$$g = p \sin \psi + \sqrt{I_2} \cos \theta - \sqrt{\frac{I_2}{3}} \sin \varphi \sin \theta \quad (2)$$

که C و φ و ψ به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع خاک و p و θ و I_2 به ترتیب تنش میانگین و زاویه بارگذاری و اینواریانت دوم تنش دوپاتوریک است که به صورت روابط (۳) و (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$p = \sigma_{ii} / 3 \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad \text{where } S_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \times \frac{I_3}{I_2^{3/2}} \right), \quad I_3 = \frac{S_{ij} S_{ij} S_{ij}}{3} \quad (5)$$

پارامترهای مکانیکی متناظر معیار مور - کولمب برای لایه خاک در جدول ۱ آورده شده است. مشخصات هندسی و مکانیکی لوله مدفون فولادی در جدول ۲ بیان شده است. از المان‌های لاینر با رفتار الاستیک خطی برای شبیه‌سازی لوله فولادی که برای سازه‌های فولادی در مدل‌های عددی

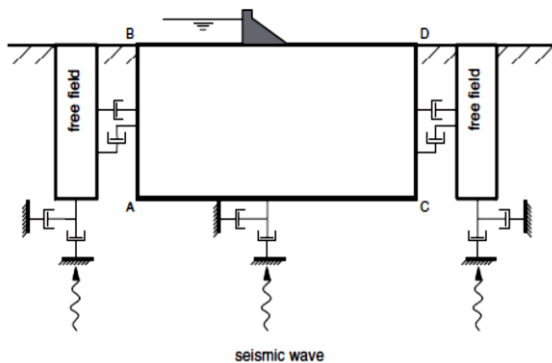
به صورت شبکه‌های دوبعدی که از المان‌های چند گره‌ای تشکیل شده‌اند، تعریف می‌شوند. هر المان مطابق با یک قانون تنش - کرنش خطی و یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می‌کند. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی محیط پیوسته توسعه یافته است. ولی می‌توان تعداد محدودی از سطوح ناپیوستگی و یا سطوح لغزش را نیز مدل‌سازی کرد. این نرم‌افزار می‌تواند به خوبی رفتار سازه‌های ساخته شده در یا بر روی توده سنگ و خاک را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی کند. روش تحلیل غیرخطی کامل دینامیکی مورد استفاده در نرم‌افزار مبتنی بر روش تفاضل محدود صریح در حل معادلات کامل حرکت دوبعدی است. این معادلات با استفاده از جرم‌های معادل در نقاط گره‌ای مدل عددی به دست آمده از چگالی واقعی زون‌های اطراف این گره‌ها حل می‌شوند. امکان ترکیب این فرمولاسیون با المان‌های سازه‌ای در این نرم‌افزار، تحلیل اندرکنش سازه - خاک تحت تکانه‌های زمین را به محقق فراهم می‌کند. همچنین امکان جفت‌شدگی تحلیل مکانیکی با تحلیل جریان آب، محاسبه تغییرات وابسته به زمان فشار آب حفره‌ای را امکان‌پذیر ساخته است. تحلیل عددی مورد استفاده در این مطالعه شامل سه مرحله است:

- ۱- تحلیل ژئواستاتیک جهت تعیین تنش‌های اولیه ناشی از نیروی ثقلی در مدل عددی
- ۲- تحلیل استاتیکی برداشت المان‌های خاک ناحیه لوله مدفون و قرار دادن لوله در مدل عددی جهت تعیین توزیع تنش‌های القایی در محیط اطراف لوله و نیروهای القایی داخل لوله ناشی از برداشت المان‌های خاک و نصب لوله
- ۳- اعمال بار دینامیکی زمین‌لرزه به مدل عددی و تحلیل دینامیکی

۲-۲- مشخصات هندسی مدل عددی

ابعاد و مشخصات هندسی سازه یا فضای زیرزمینی، نوع تحلیل، شرایط و نوع بارگذاری نقش مهمی در تعیین محدوده تأثیر سازه زیرزمینی یا بارگذاری اعمال شده و انتخاب ابعاد مدل عددی دارد. مکان مرزهای مدل عددی باید طوری انتخاب شوند که بر روی نتایج و پاسخ سازه تأثیری نداشته باشند. جهت تعیین ابعاد مدل عددی از روابط تحلیلی و تحلیل حساسیت عددی می‌توان استفاده کرد. در این مطالعه با استفاده از تحلیل حساسیت عددی تأثیر مرزها

برشی و نرمال جهت شبیه‌سازی مرزهای ساکن متصل می‌شوند و نیروهای غیرتعادلی نقاط گره‌ای میدان آزاد به گره‌های مرز اصلی اعمال می‌شوند (شکل ۲) [۱۵].



شکل ۳: مدل عددی برای تحلیل سازه‌های سطحی و نمایش المان‌های میدان آزاد [۱۵].

روابط مورد استفاده برای این شرایط مرزی به صورت روابط (۶) و (۷) است [۱۵].

$$F_x = -[\rho C_p(v_x^m - v_x^{ff}) - \sigma_{xx}^{ff}] \Delta S_y \quad (6)$$

$$F_y = -[\rho C_s(v_y^m - v_y^{ff}) - \sigma_{xy}^{ff}] \Delta S_y \quad (7)$$

ΔS_y میانگین اندازه عمودی المان در نقاط گره‌ای مرز مدل عددی، v_x^m سرعت نقاط گره‌ای مرز چپ اصلی مدل عددی در جهت محور x ، v_y^m سرعت نقاط گره‌ای مرز چپ اصلی مدل عددی در جهت محور y ، v_x^{ff} سرعت نقاط گره‌ای مرز چپ میدان آزاد در جهت محور x ، v_y^{ff} سرعت نقاط گره‌ای مرز چپ میدان آزاد در جهت محور y ، σ_{xx}^{ff} تنش افقی میانگین در نقاط گره‌ای میدان آزاد، σ_{xy}^{ff} تنش برشی میانگین در نقاط گره‌ای میدان آزاد است.

در هنگام مدل‌سازی دینامیکی با استفاده نرم‌افزار FLAC، امکان چرخش مرز پایینی مدل به دلایل زیر وجود دارد:

- بارگذاری دینامیکی در مرز پایینی مدل اعمال شده است.

- شرایط مرزی در مرز پایین مدل سکون در نظر گرفته شده است.

- مرزهای میدان آزاد در طول مرزهای جانبی مدل اعمال شده است

یکی از روش‌های جلوگیری از چرخش مدل، افزایش عمق مدل بوده، هرچند که این روش زمان محاسبات را افزایش داده و شاید برای تحلیل‌های عملی غیرقابل قبول

مناسب و توسط اکثر محققین در نظر گرفته شده، استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک مورد مطالعه [۱۶]

مشخصات مکانیکی خاک	
۳۵	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)
۰٫۳	ضریب پواسون
۰	چسبندگی
۳۵	زاویه اصطکاک (درجه)
۶	زاویه اتساع (درجه)
۲۰۰۰	چگالی خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)
مشخصات هیدرولیکی خاک	
۰٫۴۲۴	تخلخل
$۲٫۲ \times 10^{-6}$	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)

جدول ۲: خصوصیات هندسی و مکانیکی لوله فولادی مدفون

مقدار	مشخصات لوله
۱۲۰	قطر داخلی (سانتیمتر)
۱	ضخامت (سانتیمتر)
۲۰۰	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۰٫۳	ضریب پواسون
۷۸۵۰	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۳۵۰	تنش تسلیم (مگا پاسکال)

۲-۴- شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مدل عددی

شرایط تکیه‌گاهی مرزهای جانبی در مراحل یک و دو تحلیل (ژئواستاتیکی و استاتیکی) به صورت غلطکی در نظر گرفته شد که در این شرایط اجازه جابجایی در جهت افقی به گره‌های مرزی مدل عددی داده نمی‌شود، ولی گره‌ها در جهت عمودی جابجا می‌شوند. شرایط تکیه‌گاهی مرز پایینی در تمام مراحل تحلیل به صورت صلب در نظر گرفته شد که اجازه جابجایی به گره‌ها در جهت‌های افقی و عمودی داده نمی‌شود.

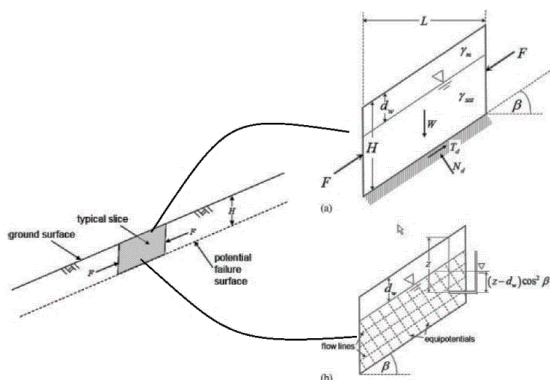
در مرحله تحلیل دینامیکی مدل عددی از مرزهای میدان آزاد در مرزهای جانبی استفاده شد. المان‌های میدان آزاد در فواصل کافی جهت حداقل کردن انعکاس امواج به داخل مدل عددی ایجاد می‌شوند. نقاط گره‌ای مرزهای جانبی مدل عددی به گره‌های میدان آزاد به وسیله المان‌های میراگری

$$\Delta l < \frac{1}{10}\lambda \text{ to } \frac{1}{8}\lambda \quad (9)$$

λ طول موج متناظر با بالاترین مؤلفه فرکانس موج ورودی و Δl بزرگ‌ترین اندازه المان مورد استفاده در مدل عددی است [۱۵]. یکی از نکات مهم در آنالیزهای دینامیکی انتخاب مقدار و مکانیسم میرایی است. از آن جهت که در مصالح سنگی و خاکی، میرایی تابعی از کرنش است و نه فرکانس، میرایی هیستریزس مدل واقعی تر از رفتار را ارائه می‌دهد. در این تحقیق از نوعی میرایی ثابت هیستریزس که در نرم‌افزار به‌عنوان میرایی محلی معرفی شده است، استفاده شد که مقدار میرایی ۸ درصد برای فرکانس ۳ هرتز انتخاب شد [۱۶].

۲-۷- صحت سنجی مدل عددی

گرفیث^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۱۰ با مطالعه تحلیلی و عددی بر روی شیب‌های بی‌نهایت و طولانی نشان دادند که فاکتور ایمنی یک شیروانی نامحدود که در شکل ۴ نشان داده شده است از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۷].



شکل ۴: نمایی از شیروانی نامحدود و نیروهای اعمالی به برشی از این شیب و وضعیت خطوط جریان آب زیرزمینی در لایه خاکی [۱۷].

$$FS = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos \beta \sin \beta} + \left(1 - \frac{r_u}{\cos^2 \beta}\right) \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (10)$$

$$r_u = \frac{(H - d_w) \gamma_w \cos^2 \beta}{H \gamma_{sat}} \quad (11)$$

که C چسبندگی خاک، γ_{sat} وزن مخصوص اشباع، H ارتفاع شیروانی نامحدود، ϕ زاویه اصطکاک، β زاویه شیروانی نامحدود، d_w عمق سطح آب زیرزمینی است؛ بنابراین فاکتور ایمنی برای لایه خاکی غیر چسبنده

باشد. یکی از روش‌های کاربردی دیگر که در این مطالعه استفاده شده، این است که نیروهای عکس‌العمل مرزهای میدان آزاد جهت دستیابی به شرایط تعادل مدل عددی، در طول مراحل اجرای حل عددی تصحیح شود [۱۵].

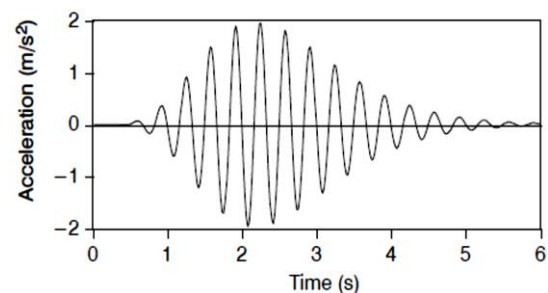
۲-۵- بارگذاری دینامیکی

تابع بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه شتاب نگاشتی است که با رابطه (۸) بیان می‌شود. این نوع بارگذاری دارای دو خصوصیت عمده است. نخست اینکه حتی المقدور شبیه به شتاب نگاشت‌های تولید شده در حین زلزله است، یعنی به تدریج بر دامنه آن افزوده شده و دوباره کاهش می‌یابد و ثانیاً دارای پارامترهای اساسی زلزله است که می‌توان به راحتی آن‌ها را تغییر داده و پاسخ سازه را بررسی نمود [۱۶].

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{\beta} \cdot e^{-\alpha t} \cdot t^{\zeta} \sin(2\pi f t) \quad (8)$$

در رابطه فوق f و t به ترتیب فرکانس و زمان بارگذاری و α ، β و ζ پارامترهای بارگذاری بوده که به ترتیب برابر با ۵۵ و ۵/۵ و ۱۲ انتخاب شده‌اند.

در این مطالعه موج ورودی به مدل عددی با شتاب ماکسیمم $0.2g$ و فرکانس ۳ هرتز و با استفاده از رابطه (۸) در گره‌های داخلی در سطح یک متر بالاتر از مرز پایینی اعمال شده است (شکل ۳).



شکل ۳: مقادیر شتاب نگاشت ورودی به مدل عددی [۱۶].

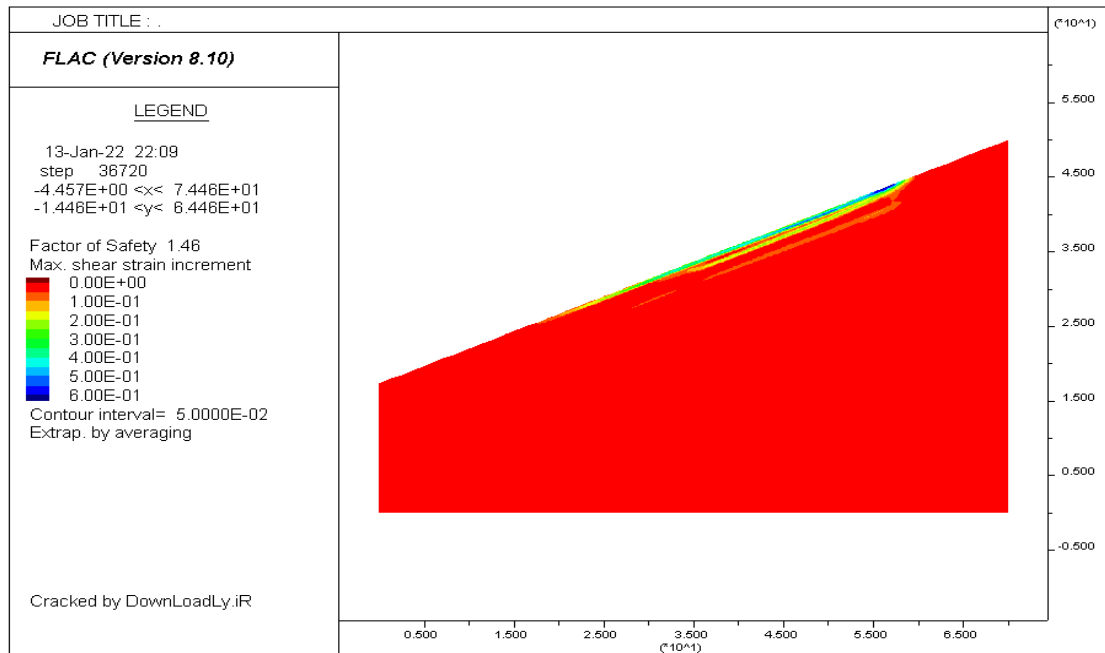
۲-۶- انتشار موج در داخل مدل عددی

فرکانس موج منتشر شده در مدل عددی و سرعت انتشار آن بر روی دقت عددی انتشار موج در مدل عددی تأثیر می‌گذارد. در سال ۱۹۷۳ لایسمر و همکاران نشان دادند که برای انتشار دقیق موج در داخل مدل عددی باید بزرگ‌ترین اندازه المان از رابطه (۹) پیروی کند.

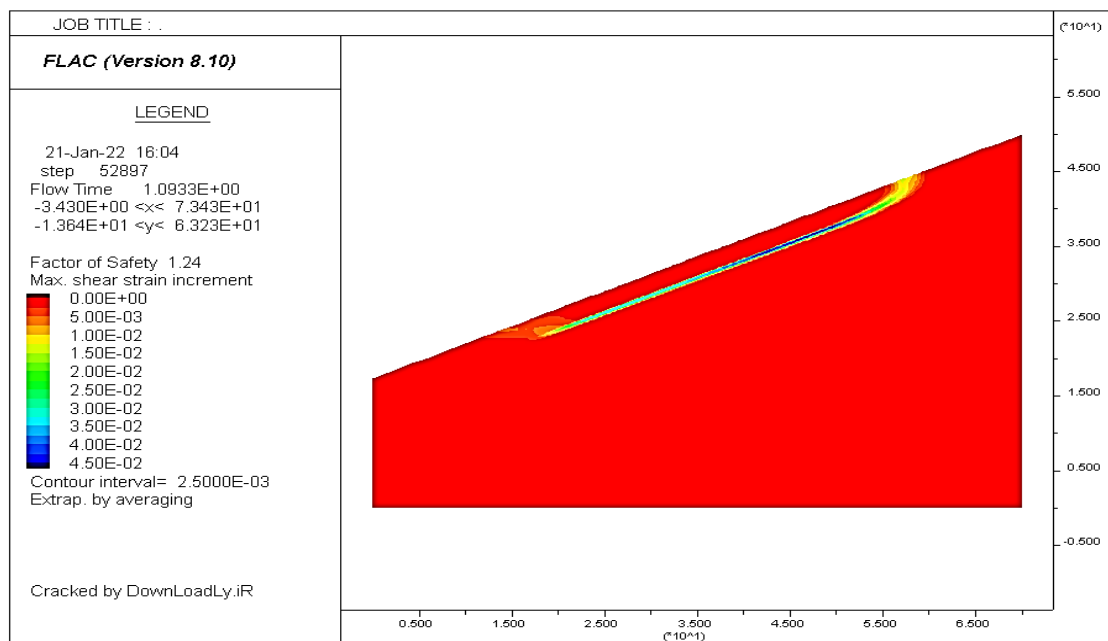
$$FS = \frac{\tan\varphi}{\tan\beta} = \frac{\tan(35)}{\tan(25)} = 1.5 \quad (12)$$

محاسبه فاکتور ایمنی برای حالتی که سطح آب زیرزمینی در عمق ۲ متر از سطح زمین قرار گرفته است از روش‌های تحلیلی و عددی به ترتیب برابر ۱٫۲۹ و ۱٫۲۴ محاسبه شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج روش تحلیلی و عددی وجود دارد.

(چسبندگی صفر) با شیروانی نامحدود در شرایط خشک از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود که با توجه به اینکه زاویه اصطکاک لایه خاکی برابر با ۳۵ درجه و شیروانی نامحدود ۲۵ درجه است، مقدار فاکتور ایمنی برابر با ۱٫۵ محاسبه شد. مقدار محاسبه‌شده فاکتور ایمنی با روش عددی برابر ۱٫۴۶ در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: مقدار فاکتور ایمنی و کرنش برشی القایی در مدل عددی



شکل ۶: مقادیر فاکتور ایمنی و کرنش برشی محاسبه‌شده

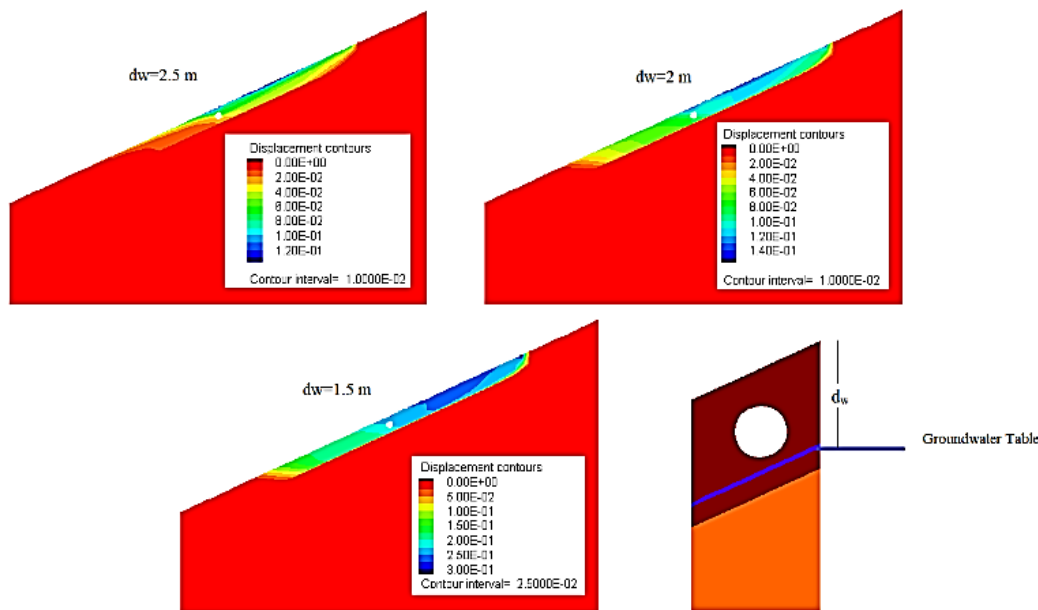
۲-۸- تحلیل تأثیر سطح آب زیرزمینی

مشخصات هندسی، مدل رفتاری و خصوصیات مکانیکی مدل عددی مورد استفاده در این تحلیل مشابه هندسه بیان شده در حالت صحت سنجی با لایه خاکی به شیب ۲۵ درجه و ارتفاع ۳ متر است. سطح آب زیرزمینی برای زمانی که عمق آن از سطح زمین ۲، ۲،۵، ۱،۵ متر است، جهت ارائه این تأثیر مورد بررسی قرار گرفت. هر چند که برای عمق پایین‌تر (۱ متر) مدل‌سازی عددی انجام گرفت که نتایج نشان داد برای اعماق برابر یا کمتر از یک متر سطح آب زیرزمینی، شیب از نظر ژئواستاتیک ناپایدار بوده و امکان تحلیل دینامیکی آن وجود ندارد. بعد از صحت سنجی مدل عددی مورد نظر برای شبیه‌سازی رفتار لایه خاکی با شیروانی نامحدود، شبیه‌سازی عددی برای مقادیر سطح آب زیرزمینی (dw) برابر با ۲، ۲،۵ و ۱،۵ متر انجام و بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه صورت گرفت. با توجه به شکل ۷ نتایج نشان داد که جابجایی‌های لایه خاک با

شیروانی نامحدود تحت بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه به عمق سطح آب زیرزمینی بسیار وابسته است و همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده است درصد تغییرات جابجایی افقی در حالت‌های بیان شده نسبت به حداکثر جابجایی‌ها در حالت خشک با افزایش سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که برای حالت dw برابر با ۱،۵ متر این درصد با شیب بالایی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده از دست رفتن مقاومت لایه خاکی در برابر نیروی القایی ناشی از زمین‌لرزه و شکست لایه خاکی است.

جدول ۳: مقادیر درصد تغییرات جابجایی افقی نسبت به حداکثر جابجایی‌ها در حالت خشک برای حالت‌های مختلف سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی (dw)	$\left(\frac{\Delta Disp}{Disp_{dry}}\right) \times 100$
۲،۵ متر	۲۰
۲ متر	۴۰
۱،۵ متر	۲۰۰



شکل ۷: جابجایی‌های لایه خاکی با شیروانی نامحدود برای حالت‌های مختلف dw (بر حسب متر).

نیاز به بررسی کرنش‌های مجاز برای این نوع تغییر شکل‌ها است. با توجه به تحقیقات محققین پیشین تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله از دو جنبه بایستی مورد تحلیل قرار گیرد که شامل تحلیل شکست و تحلیل ظرفیت سرویس‌دهی لوله ناشی از این تغییر شکل‌ها است که در این مطالعه به بررسی تغییر شکل‌های بیضوی جهت بررسی شکست لوله پرداخته شده است. شکل ۹ تغییرات مکانی سطح مقطع لوله برای نودهای عددی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی لوله نشان داده شده

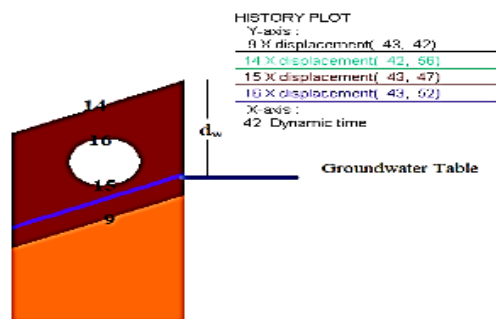
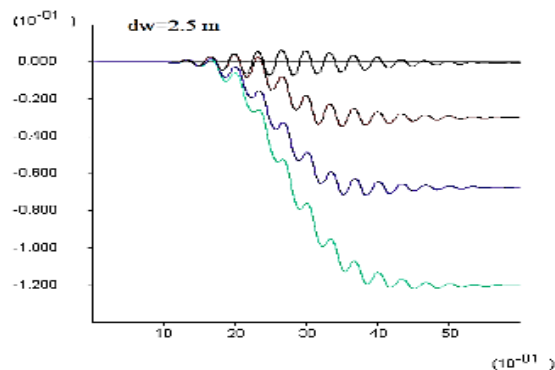
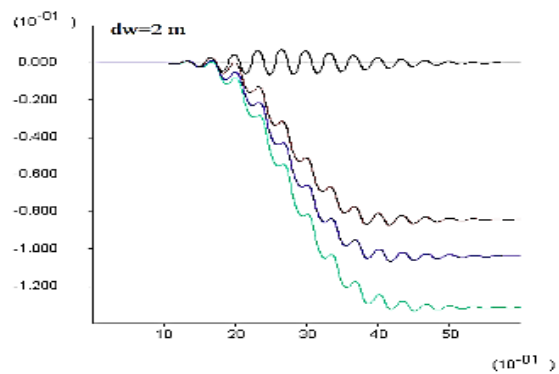
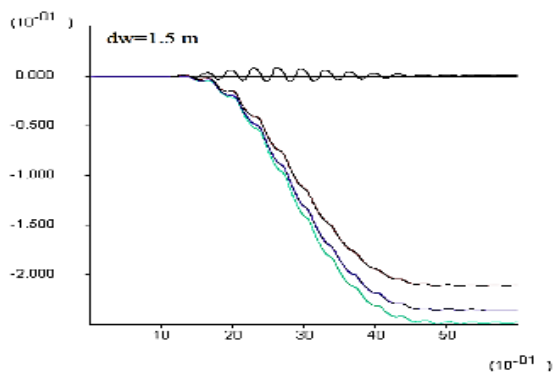
در شکل ۸ نمودار جابجایی‌های افقی در پایین لایه خاکی و سطح زمین و همچنین در پایین و بالای لوله نشان داده شده است که نتیجه می‌شود با افزایش زمین‌لرزه، جابجایی‌ها به تدریج افزایش تا به یک مقدار ثابت می‌رسند، هر چند که به دلیل در نظر نگرفتن اندرکنش سطح تماس بین لایه خاکی و سنگ‌بستر، شکل جابجایی‌ها در این سطح مشترک مانند جابجایی‌های سنگ‌بستر است و اختلاف در مقادیر جابجایی در پایین و بالای لوله نشان‌دهنده تغییر شکل‌های بیضوی در سطح مقطع لوله و

سطح آب، این مقدار کمتر از ۰/۳۳ است (جدول ۴)، نشان می‌دهد که شکست برای تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع در لوله اتفاق نمی‌افتد هرچند که ظرفیت سرویس‌دهی لوله تغییر می‌کند.

جدول ۴: نسبت تغییرات قطر لوله به قطر لوله ناشی از بار زمین لرزه برای حالت‌های مختلف سطح آب زیرزمینی

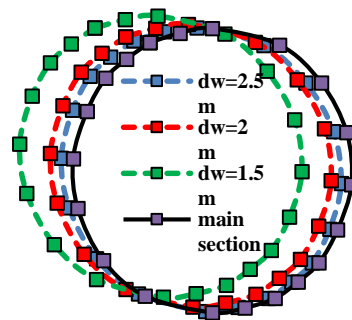
$\Delta D/D$	dw
۰/۰۳۳	۲/۵ متر
۰/۰۲۶	۲ متر
۰/۰۳۳	۱/۵ متر

است. با توجه به این شکل نتیجه شد که برای تمام حالت‌ها سطح مقطع بیضوی در لوله ایجاد شده است که برای این شکل بیضوی، قطر بزرگ‌تر در جهت شیب لایه و با زاویه تقریبی ۴۵ درجه است و با افزایش سطح آب زیرزمینی، جابجایی سطح مقطع لوله نسبت به حالت اصلی افزایش یافته است. هرچند که با توجه به مقادیر نسبت حداکثر تغییرات قطر لوله به قطر لوله که در جدول ۴ آورده شده است و معیار شکست لوله برای تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع در نظر گرفته می‌شود، این نسبت به سطح آب زیرزمینی وابسته نیست. با توجه به اینکه مقدار مجاز ارائه شده برای این نسبت ۰/۱۵ و برای حالت‌های مختلف



شکل ۸: تاریخچه جابجایی نقاط مختلف لوله مدفون و لایه خاکی با شیروانی نامحدود (بر حسب متر و ثانیه).

تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله باعث القای نیروها و ممان‌ها به داخل سطح مقطع لوله می‌شود. شکل ۱۰ نیروهای محوری و ممان‌های القاء شده در مقطع عرضی سطح مقطع لوله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود حداکثر ممان و نیروی محوری در زاویه تقریباً ۴۵- و ۴۵+ از خط قائم عبوری از مرکز لوله در لوله القاء می‌شود که مقدار حداکثر ممان و نیروی محوری القاء شده در سطح مقطع لوله در جدول ۵ آورده شده است. از مقادیر این جدول نتیجه می‌شود که مقدار ممان القاء شده در لوله مدفون در لایه خاکی

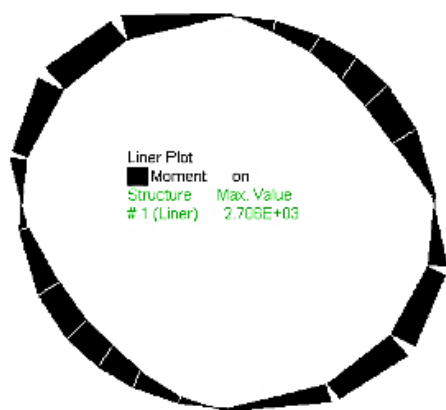


شکل ۹: تغییرات مکانی سطح مقطع لوله تحت بار زمین لرزه برای حالت‌های مختلف سطح آب زیرزمینی.

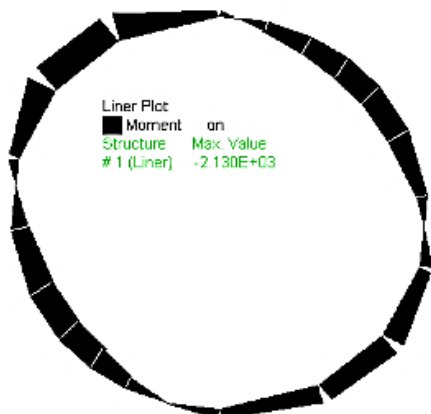
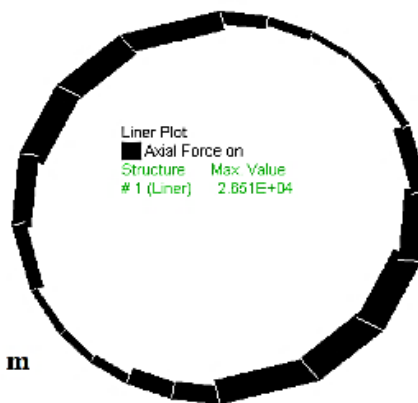
جدول ۵: مقادیر حداکثر ممان و نیروی محوری القاء شده در مقاطع سطح مقطع لوله برای حالت‌های مختلف سطح آب زیرزمینی

مقدار نیروی محوری KN	مقدار ممان (KN.m)	dw(متر)
۲۶,۵	۲,۷	۲,۵
۲۹,۴	-۲,۱	۲
۳۷,۶	-۲,۷	۱,۵

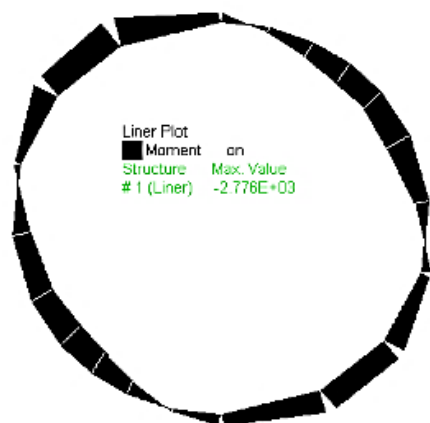
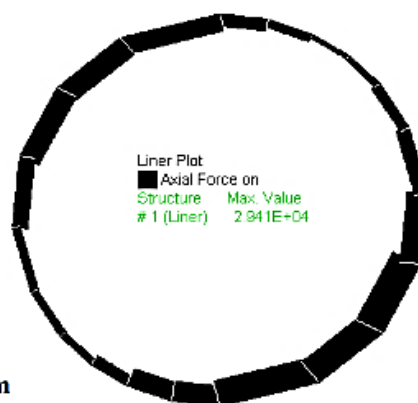
با شیروانی نامحدود با افزایش سطح آب زیرزمینی، مقدار نیروی محوری افزایش می‌یابد، اما مقدار ممان برای زمانی که سطح آب زیرزمینی حداکثر است برای مقطعی که در زاویه ۴۵ قرار می‌گیرند حداکثر و زمانی که سطح آب زیرزمینی حداقل است برای مقطعی که در زاویه ۴۵- قرار می‌گیرند حداکثر است.



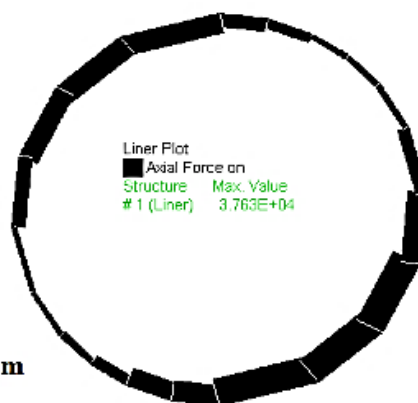
dw=2.5 m



dw=2 m



dw= 1.5 m



شکل ۱۰: کانتور مقادیر ممان (N.m) و نیروی محوری (N) القاشده در سطح مقطع لوله.

۲-۹- تجزیه و تحلیل تأثیر زاویه شیروانی نامحدود بر روی رفتار شیروانی نامحدود و لوله مدفون

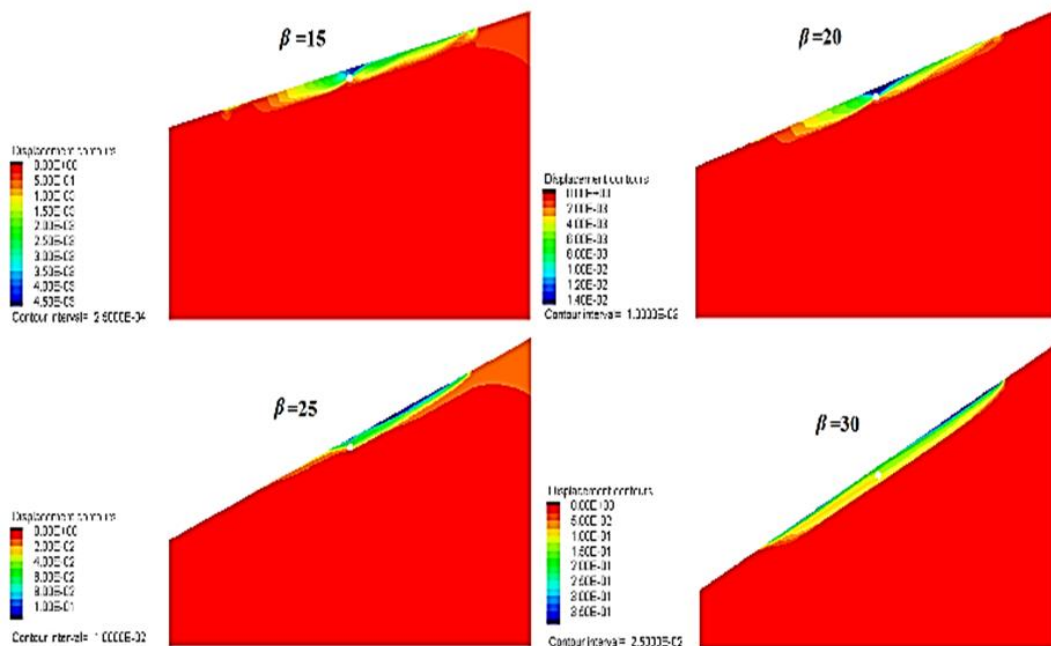
جهت تجزیه و تحلیل این تأثیر بر اساس بار زمین لرزه، چهار مقدار ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه زاویه شیروانی نامحدود انتخاب، مدل‌سازی عددی انجام و رفتار شیروانی نامحدود و لوله مدفون تحت بارگذاری زمین لرزه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. قابل ذکر است تنها شیروانی نامحدود متغیر و تمام شرایط مدل‌سازی و خصوصیات لوله مدفون و لایه خاکی مشابه موارد ذکر شده در قسمت قبل و در نظر گرفتن شرایط خشک برای لایه‌ی خاکی است. در شکل ۱۱ کانتور جابجایی‌های شیروانی نامحدود نشان داده شده است. با توجه به این شکل نتیجه می‌شود که برای شیب‌های ۱۵ و ۲۰ درجه حداکثر جابجایی لایه خاکی بسیار کم و در بالای لوله اتفاق می‌افتد اما برای شیب‌های ۲۵ و ۳۰ درجه، بیشینه جابجایی‌ها در محدوده بالاتر از لوله از شیروانی نامحدود اتفاق می‌افتد که کانتور جابجایی برای شیب ۲۵ نشان از این است که لوله به صورت مانعی در برابر زمین لغزش عمل کرده است، هرچند که برای زاویه شیب ۳۰ درجه نیروی مقاومتی لوله در برابر جابجایی لایه خاک ناچیز و جابجایی کف لایه خاکی نشان می‌دهد که جابجایی‌ها به علت مقاومت پایین خاک در برابر زمین لغزش است.

در شکل ۱۲ تاریخچه جابجایی افقی در سطح زمین و سنگ‌بستر، قسمت بالای لوله و پایین آن نشان داده شده

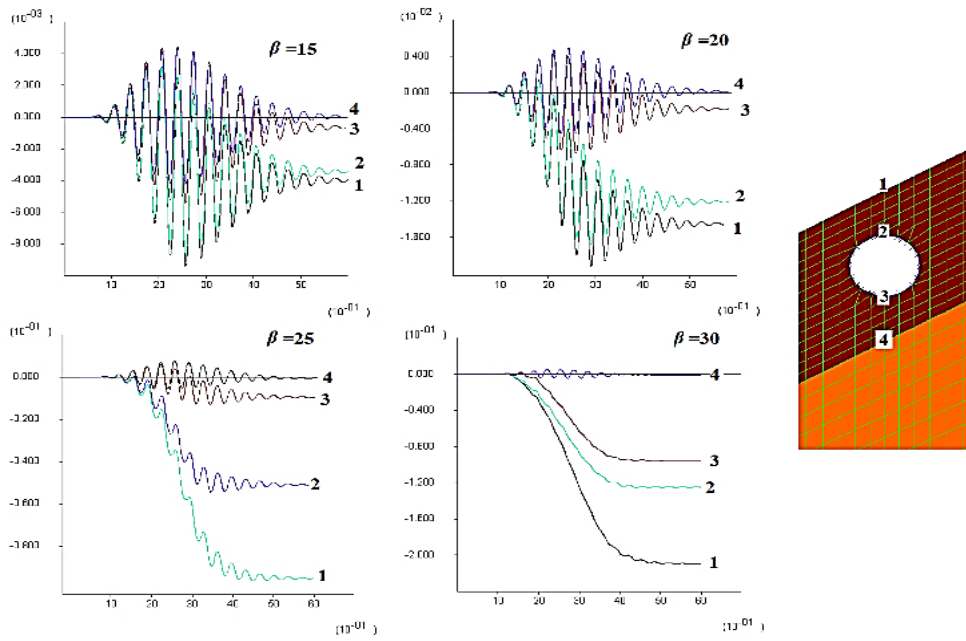
است. با توجه به شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که جابجایی‌ها نسبت به زمان افزایش تا به یک مقدار ثابت می‌رسد و با افزایش عمق در لایه خاکی جابجایی‌ها کاهش می‌یابد، همچنین جابجایی حداکثر در لایه خاکی از مقدار جابجایی اتفاق افتاده بعد از اتمام بارگذاری زلزله برای زاویه‌های شیب ۱۵ و ۲۰ درجه بیشتر است. در شکل ۱۳ نمودار بیشینه جابجایی نسبت به زاویه شیروانی نامحدود نشان داده شده است که نتیجه می‌دهد رابطه بین این دو پارامتر به صورت نمایی است که با افزایش زاویه شیروانی نامحدود، بیشینه جابجایی‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۴ تغییر شکل سطح مقطع لوله نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است برای حالت‌های لایه خاکی با شیب ۱۵ و ۲۰ درجه این تغییر شکل‌ها بسیار ناچیز و تقریباً برابر صفر است. هرچند که تغییر شکل برای زاویه ۲۵ و ۳۰ درجه تقریباً برابر و به ترتیب برابر ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۷ به دست آمده است.

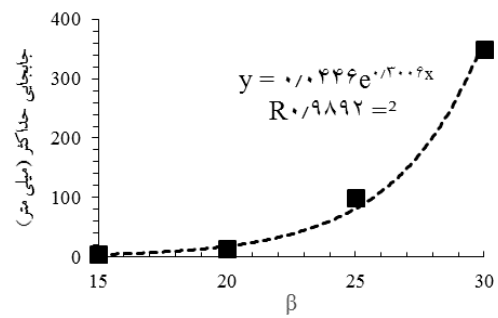
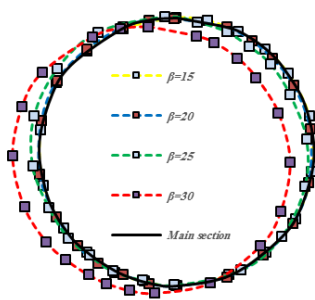
کانتور نیروها در لوله در شکل‌های ۱۵ نشان داده شده است. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که برای زاویه شیب ۱۵ و ۲۰ درجه مقادیر نیروها در تمام مقاطع محیط لوله تقریباً برابر و به ترتیب ۱۶/۷ و ۲۱/۸ کیلو نیوتن است ولی برای زاویه شیب حداکثر و حداقل نیروی محوری در زاویه تقریباً ۴۵ نسبت به خط قائم عبوری از مرکز لوله در لوله القاء می‌شود.



شکل ۱۱: کانتور جابجایی‌های خاک ناشی از زمین لرزه برای حالت‌های مختلف زاویه شیروانی خاکی نامحدود (بر حسب متر).



شکل ۱۲: تاریخچه جابجایی‌ها در قسمت‌های مختلف لایه خاکی برای زاویه شیب‌های متفاوت (برحسب متر و ثانیه).



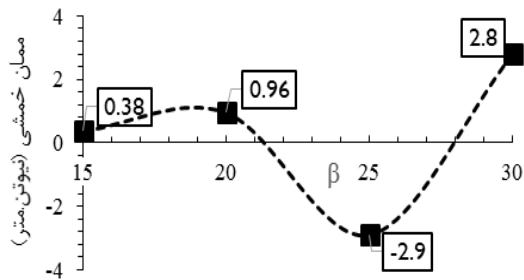
شکل ۱۴: تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله برای حالت‌های مختلف مقدار شیب لایه‌ی خاکی تحت بار زمین‌لرزه.

شکل ۱۳: نمودار جابجایی بیشینه نسبت به زاویه شیروانی خاکی نامحدود.



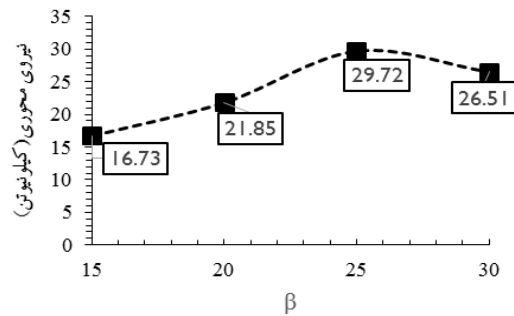
شکل ۱۵: کانتور نیروی محوری (N) القایی در سطح مقطع لوله ناشی از تغییر شکل‌های بیضوی ایجادشده به وسیله‌ی بار زمین‌لرزه.

شکل ۱۷ و ۱۸ به ترتیب نمودار و کانتور ممان‌های القاء شده در مقاطع محیطی لوله ناشی از تغییر شکل‌های بیضوی ایجاد شده به وسیله‌ی بار زمین لرزه را نشان می‌دهد؛ که نتیجه می‌شود ممان خمشی برای مقادیر زاویه شیب ۱۵ و ۲۰ درجه نسبت به زاویه شیب‌های ۲۵ و ۳۰ درجه بسیار ناچیز است.

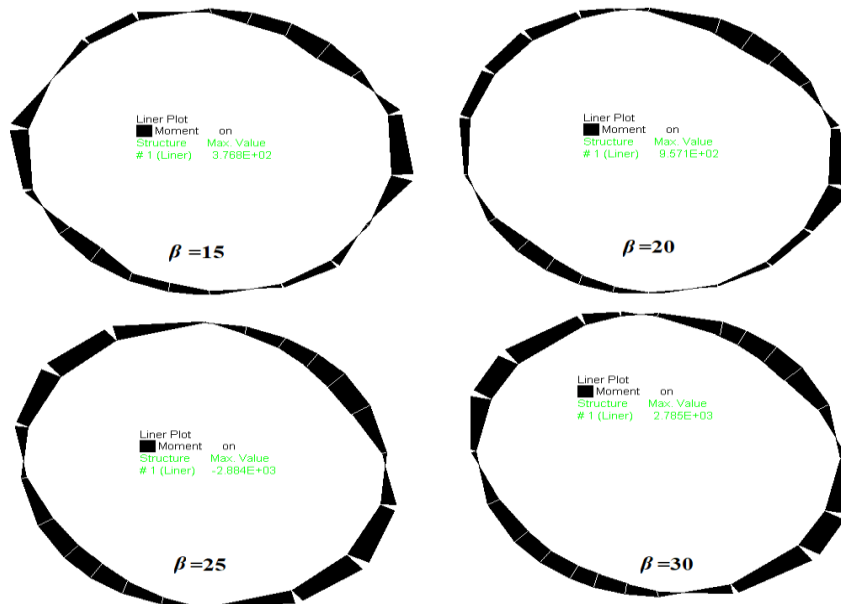


شکل ۱۷: نمودار ممان خمشی در سطح مقطع لوله نسبت به زاویه شیروانی خاکی نامحدود.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است نیروی محوری حداکثر در سطح مقطع لوله نسبت به افزایش شیروانی نامحدود روند افزایشی تقریباً خطی تا زاویه شیب ۲۵ درجه دارد و سپس برای شیب ۳۵ مقدار نیرو کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶: نمودار نیروی محوری القایی در سطح مقطع لوله نسبت به زاویه شیروانی خاکی نامحدود.

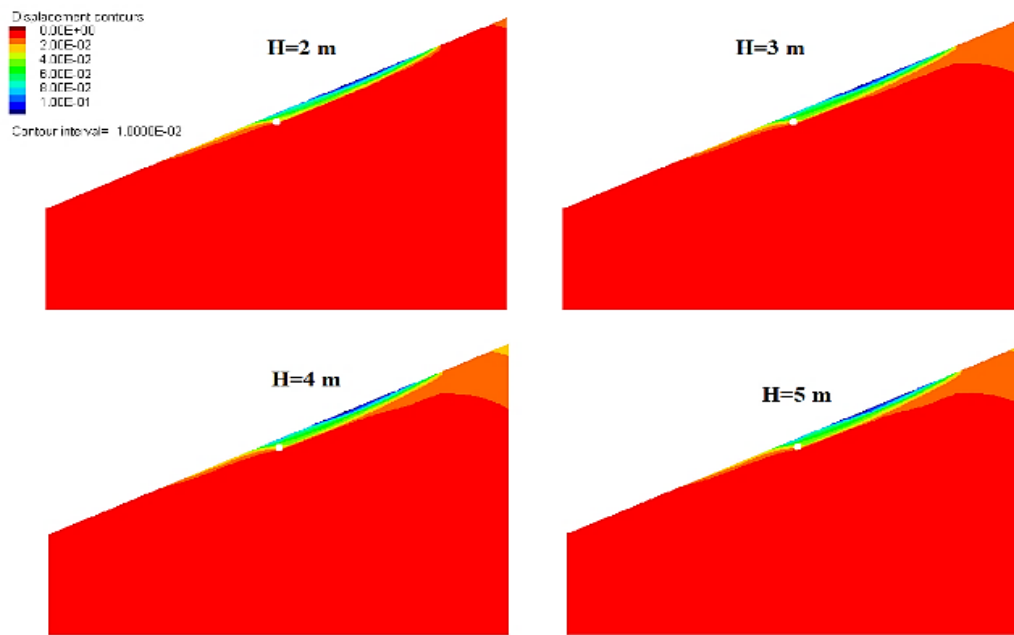


شکل ۱۸: کانتور ممان خمشی (N.m) القایی در سطح مقطع لوله برای حالت‌های مختلف زاویه شیروانی نامحدود ناشی از تغییر شکل‌های بیضوی ایجاد شده در مقطع لوله به وسیله‌ی بار زمین لرزه.

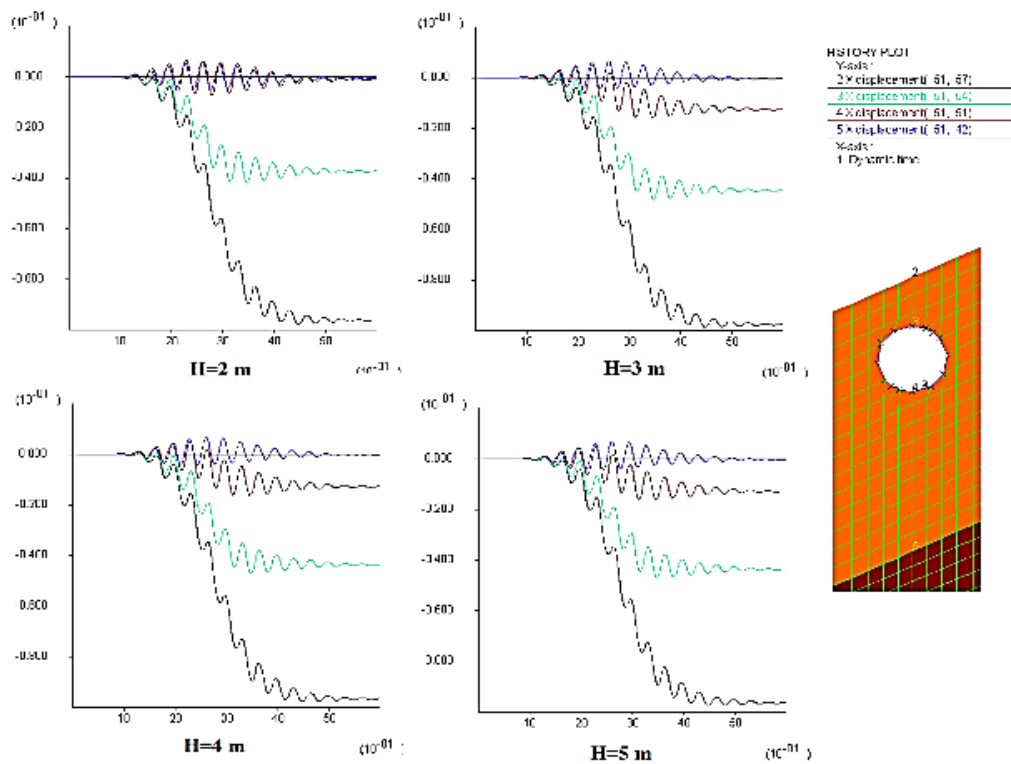
نتیجه می‌شود که لایه شیروانی نامحدود تأثیری بر مقدار جابجایی‌ها ندارد. همچنین با توجه به شکل ۲۰ نتیجه می‌شود به دلیل اینکه نصف سطح مقطع لوله در سنگ‌بستر قرار گرفته است، تاریخچه جابجایی قسمت پایینی لوله با ضخامت‌های دیگر لایه خاکی متفاوت است و این موضوع بر روی مقادیر ممان خمشی و نیروی محوری سطح مقطع لوله تأثیر بسزایی گذاشته است (شکل‌های ۲۱ و ۲۲).

۲-۱- تجزیه و تحلیل رفتار لوله مدفون در لایه‌ی خاکی با ضخامت‌های متفاوت تحت بار زمین لرزه

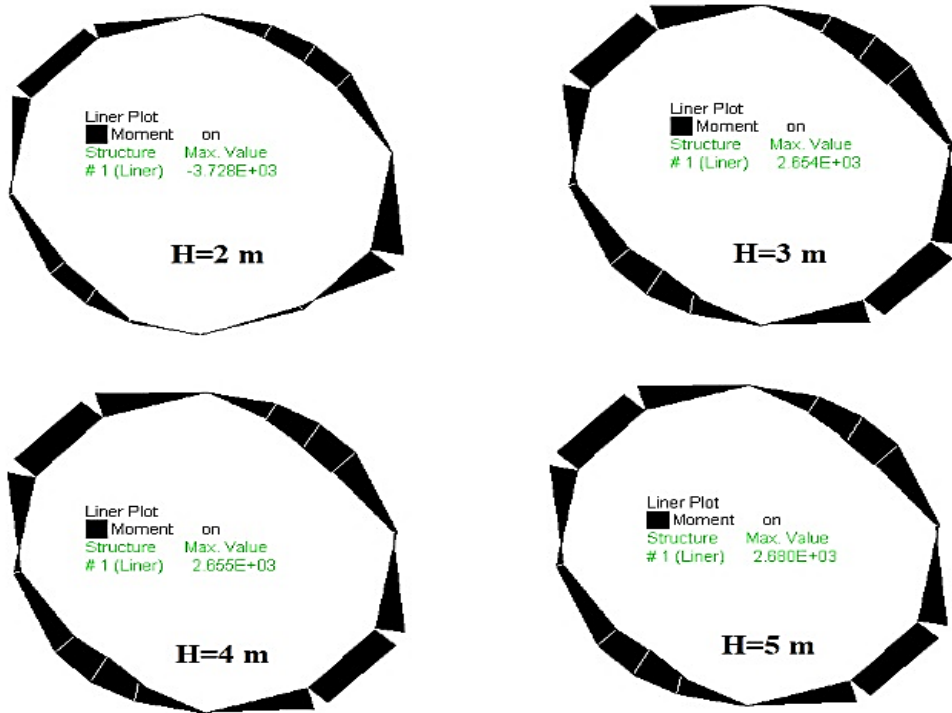
جهت تعیین تأثیر ضخامت لایه خاکی، مقادیر ۲، ۳، ۴ و ۵ متر برای این پارامتر انتخاب شد. زاویه شیروانی نامحدود لایه خاکی ۲۵ درجه و عمق لوله مدفون ۱٫۵ متر و خصوصیات و پارامترهای هندسی، مکانیکی و هیدرولیکی مدل عددی مانند بخش قبل در نظر گرفته شد. شکل ۱۹ کانتور جابجایی مدل عددی را نشان می‌دهد. از این شکل



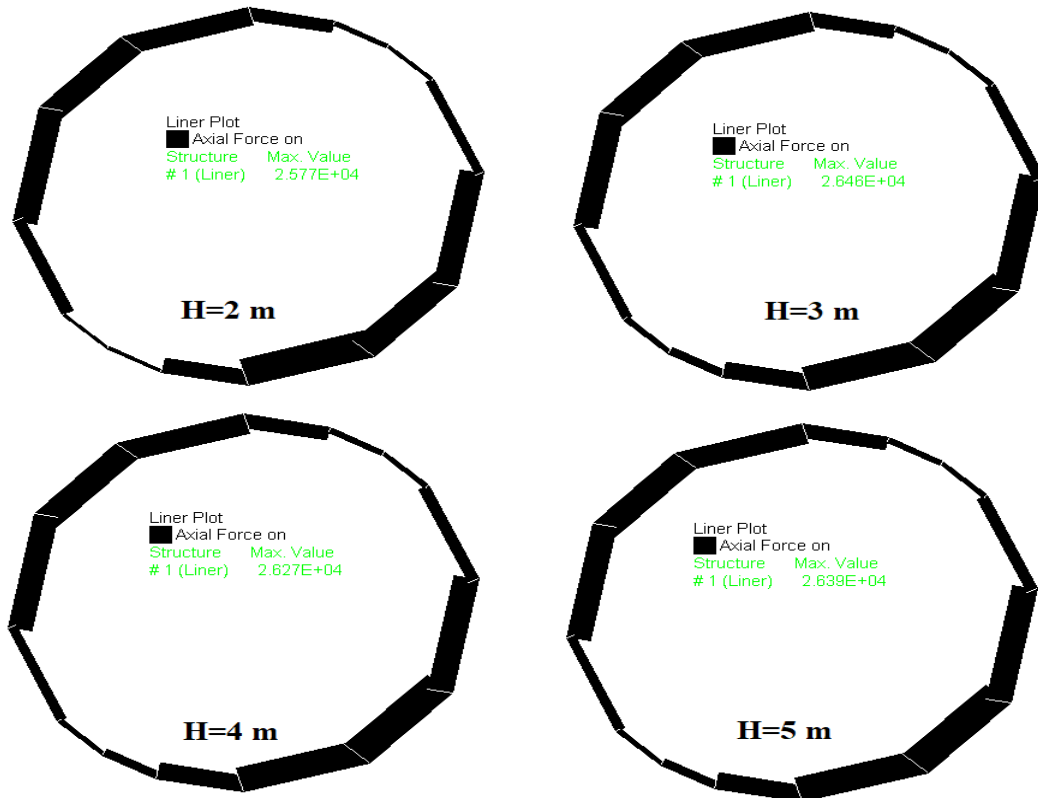
شکل ۱۹: کانتور جابجایی‌ها در مدل عددی (برحسب متر)



شکل ۲۰: تاریخچه جابجایی‌ها در کف شیروانی خاکی نامحدود و سطح زمین و همچنین در قسمت بالا و پایینی لوله برای مقادیر مختلف ضخامت لایه خاکی (برحسب متر).



شکل ۲۱: کانتور ممان خمشی (N.m) القایی در سطح مقطع لوله برای حالت‌های مختلف ضخامت شیروانی خاکی نامحدود ناشی از تغییر شکل‌های بیضوی ایجادشده در مقطع لوله به وسیله‌ی بار زمین لرزه.



شکل ۲۲: کانتور نیروی محوری (N) القایی در سطح مقطع لوله ناشی از تغییر شکل‌های بیضوی ایجادشده به وسیله‌ی بار زمین لرزه.

۳- نتایج

نتایج بررسی‌ها نشان داد که:

- جابجایی‌های لایه‌ی خاکی با شیروانی نامحدود تحت بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه به عمق سطح آب زیرزمینی بسیار وابسته است و مقدار جابجایی‌ها با افزایش سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که هرچه سطح آب زیرزمینی بیشتر باشد، جابجایی‌ها نسبت به افزایش سطح آب زیرزمینی با شیب بالاتری افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده از دست رفتن مقاومت لایه خاکی در برابر نیروی القایی ناشی از زمین‌لرزه و ایجاد کرنش‌های پلاستیک و نهایتاً شکست در لایه خاکی است.

- جابجایی‌ها در لایه خاکی با شیروانی نامحدود قرارگرفته بر روی سنگ‌بستر از کف لایه تا سطح زمین به تدریج باگذشت زمان دینامیکی افزایش می‌یابد و کرنش‌های پلاستیک و جابجایی دائمی در لایه خاکی اتفاق می‌افتد. اختلاف در مقادیر جابجایی در پایین و بالای لوله نشان‌دهنده تغییر شکل‌های بیضوی در سطح مقطع لوله و نیاز به بررسی کرنش‌های مجاز برای این نوع تغییر شکل‌ها است.

- برای تمام حالت‌های سطح آب زیرزمینی، سطح مقطع بیضوی در لوله ایجادشده است که برای این تغییر شکل بیضوی، قطر بزرگ‌تر در جهت شیب لایه و با زاویه تقریبی ۴۵ درجه است و با افزایش سطح آب زیرزمینی، جابجایی سطح مقطع لوله نسبت به حالت اصلی افزایش یافته است. هرچند که با توجه به مقادیر نسبت حداکثر تغییرات قطر لوله به قطر اولیه لوله که به‌عنوان معیار شکست برای تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله در نظر گرفته می‌شود، این نسبت به سطح آب زیرزمینی وابسته نیست. با توجه به اینکه مقدار مجاز ارائه شده برای این نسبت ۰/۱۵ و برای حالت‌های مختلف سطح آب، این مقدار کمتر از ۰/۳۳ است، نشان می‌دهد شکست به علت تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع در لوله اتفاق نمی‌افتد هرچند که ظرفیت سرویس‌دهی لوله تغییر می‌کند.

- تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله باعث القای نیروها و ممان‌ها به داخل جداره لوله می‌شود. حداکثر ممان و نیروی محوری در زاویه تقریباً ۴۵- و ۴۵+ درجه از خط قائم عبوری از مرکز لوله در جداره لوله القاء می‌شود. با افزایش سطح آب زیرزمینی، مقدار نیروی محوری افزایش

می‌یابد، اما مقدار ممان برای زمانی که سطح آب زیرزمینی حداکثر است برای مقاطعی که در زاویه ۴۵ درجه قرار می‌گیرند حداکثر و زمانی که سطح آب زیرزمینی حداقل است برای مقاطعی که در زاویه ۴۵- قرار می‌گیرند حداکثر است.

- برای شیب‌های ۱۵ و ۲۰ درجه لایه خاکی، حداکثر جابجایی لایه خاکی بسیار کم و در بالای لوله اتفاق می‌افتد اما برای شیب‌های ۲۵ و ۳۰ درجه، بیشینه جابجایی‌ها در محدوده بالاتر از لوله برای شیروانی نامحدود اتفاق می‌افتد که کانتور جابجایی برای شیب ۲۵ درجه نشان از این است که لوله به‌صورت مانعی در برابر زمین‌لغزش عمل کرده است، هرچند که برای زاویه شیب ۳۰ درجه نیروی مقاومتی لوله در برابر جابجایی لایه خاک ناچیز و جابجایی کف لایه خاکی نشان می‌دهد که جابجایی‌ها به علت مقاومت پایین خاک در برابر نیروهای ایجادکننده زمین‌لغزش است. رابطه بین بیشینه جابجایی و زاویه شیروانی نامحدود به‌صورت نمایی است که با افزایش زاویه شیروانی نامحدود، بیشینه جابجایی‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.

- جابجایی‌ها در لایه خاکی برای تمام حالت‌های زاویه شیب در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی، نسبت به زمان افزایش تا به یک مقدار ثابت می‌رسد و با افزایش عمق لایه خاکی جابجایی‌ها کاهش می‌یابد، همچنین جابجایی حداکثر در لایه خاکی از مقدار جابجایی اتفاق افتاده بعد از اتمام بارگذاری زلزله برای زاویه‌های شیب ۱۵ و ۲۰ درجه بیشتر است.

- تغییر شکل‌های بیضوی سطح مقطع لوله برای حالت‌های لایه خاکی با شیب ۱۵ و ۲۰ درجه بسیار ناچیز و تقریباً برابر صفر است. هرچند که تغییر شکل برای زاویه ۲۵ و ۳۰ درجه تقریباً برابر و به ترتیب برابر ۰/۲۶ و ۰/۲۷ به‌دست آمده است. برای زاویه شیب ۱۵ و ۲۰ درجه مقادیر نیروها در تمام مقاطع محیط لوله تقریباً برابر ولی برای زاویه شیب ۲۵ و ۳۰ درجه حداکثر و حداقل نیروی محوری در زاویه تقریباً ۴۵ درجه نسبت به خط قائم عبوری از مرکز لوله، در لوله القاء می‌شود. نیروی محوری حداکثر در سطح مقطع لوله نسبت به افزایش شیروانی نامحدود، روند افزایشی تقریباً خطی تا زاویه شیب ۲۵ درجه دارد و سپس برای شیب ۳۰ درجه مقدار نیرو کاهش می‌یابد.

- ضخامت لایه شیروانی نامحدود تأثیری بر مقدار جابجایی‌ها ندارد.

مراجع

- [10] Nourzadeh, D., S. Takada. "Response of Gas Distribution Pipelines Network to Seismic Wave Propagation in Greater Tehran Area, Iran." 6th China-Japan-US Trilateral Symp Lifeline Earthquake Engineering, no.10 (2013): 237-244 .
- [11] Tsinidisa, G., D. S. Luigi, A. Sextosc, and P. Furtner. "A critical review on the vulnerability assessment of natural gas pipelines subjected to seismic wave propagation. Part 1: Fragility relations and implemented seismic intensity measures." Tunnelling and Underground Space Technology, no.86 (2019): 279-296 .
- [12] Nouri, R., E. Seyedi Hosseininia. "Numerical Simulation of Transverse Deformations of Buried Pipelines Due to Slope Instability." Amirkabir Journal of Civil Engineering, no.52 (2020): 301-304 .
- [13] Wang, W., D. Mou, F. Li, C. Dong, and F. Khan. "Dynamic failure probability analysis of urban gas pipeline network." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, no.72 (2021): 1-12 .
- [14] Elshesheny, A., M. Mohamed, and T. Sheehan. "Protection of buried rigid pipes using geogrid-reinforced soil systems subjected to cyclic loading." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, no.135 (2020): 1-19 .
- [15] "Flac2d version 8.1 user's guid manual." Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA, 2019.
- [16] Bathurst, R., and K. Hatami. "Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall." geosynthetics international, no.5 (1998): 127-166 .
- [17] Griffiths, D. V., J. Huang, and G. F. deWolf. "Numerical and analytical observations on long and infinite slopes." international journal for numerical and analytical methods in geomechanics, no.35 (2011): 569-585 .
- [1] Tahghighi, H., M. Hajnorouzi. "Finite Element Analysis of Buried Pipelines Crossing Reverse Fault." Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J), no.2 (2017): 67-79 .
- [2] Psyrras, N., A. Sextos. "Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, no.106 (2018): 254-277 .
- [3] Sakurai, A., T. Takanashi. "Dynamic Stresses of Underground Pipelines During Earthquakes." Santiago, Chile, the 4th World Conference Earthquake engineering, 1969 .
- [4] Shinozuka, M., T. Koike. "Estimation of structural strains in underground lifeline pipes." National Science Foundation, Washington, DC. Engineering and Applied Science, 24 p, March 1979 .
- [5] Lee, L., T. Ariman, and C. Chen. "Elastic-plastic buckling of buried pipelines by seismic excitation." soil dynamics and earthquake engineering, no.4 (1984): 168-173 .
- [6] Wong, K., S. Datta, and A. Shah. "Three-dimensional motion of buried Pipeline. I: analysis." engineering mechanics, no.112 (1986): 1319-1337 .
- [7] O'Rourke, M., K. E. Hmadi. "Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects." Earthquake engineering & structural dynamics, no.6 (1988): 917-929 .
- [8] Kouretzis, G., G. Bouckovalas, and C. Gantes. "3-D shell analysis of cylindrical underground structures under seismic shear (S) wave action." soil dynamics and earthquake engineering, no.10 (2006): 909-921 .
- [9] Saberi, M., F. Behnamfar, and M. Vafaeian. "A semi-analytical model for estimating seismic behavior of buried steel pipes at bend point under propagating waves." earthquake engineering, no.11 (2013): 1373-1402.

¹² Lee¹³ Wong¹⁴ O'Rourke and El Hmadi¹⁵ Kouretzis¹⁶ Out of phase¹⁷ Closed-form¹⁸ American lifeline alliance (ALA)¹⁹ Grigorios²⁰ Nikolaos²¹ Elshesheny²² Griffiths¹ Transient ground deformation² Permanent ground deformation³ Shell-mode buckling⁴ Beam-mode buckling⁵ Pure tension rupture⁶ Bending failure⁷ Cross section ovalization⁸ Sakurai and Takanashi⁹ Matsushiro¹⁰ Beam on nonlinear winkler foundation (BNWF)¹¹ Zuka and Koike