

بررسی نحوه‌ی انتشار امواج P در رفتار لرزه‌ی خطوط لوله‌ی مستقیم فولادی در خاک‌های لایه‌ی

Original Article

امین غزنوی اسکونی* (دانشجوی دکتری)

اصغر وطنی اسکونی (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی‌ عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

سازه‌های مدفون به علت طول و پیوسته بودن، شرایط خاص تحلیلی دارند. خطوط لوله در شرایط طبیعی از خاک با لایه‌ها و ویژگی‌های متفاوت عبور می‌کند. هدف از انجام آنالیز، بررسی تأثیر انتشار موج طولی P بر روی مقادیر کرنش‌های خط لوله فولادی است. برای انجام آنالیزهای عددی از نرم‌افزارهای آباکوس و متلب استفاده شد. یکی از روش‌های متداول مدل‌سازی خطوط لوله، استفاده از سیستم اندرکنشی فتر - لوله است. اما مشکل روش مذکور، عدم توانایی مدل‌سازی انتشار امواج در خاک‌های لایه‌ی ناموازی است. در نوشتار حاضر با مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه، ایجاد شرایط مرزی مناسب و بررسی نحوه‌ی انتشار امواج و موج‌های برگشتی فراهم شده است. اختلاف روش مورد استفاده در مدل‌سازی با روش استاندارد فتر - لوله برابر با ۳٫۴٪ است. همچنین موج برگشتی در مدل مذکور برابر با ۵٪ بوده است. همچنین مشخص شد با مدل‌سازی خاک‌های لایه‌ی، مقادیر کرنش تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خطوط لوله‌ی فولادی، آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی، آنالیز غیرهم‌فاز، بسامد ارتعاش، انتشار امواج طولی، خاک‌های لایه‌ی.

amin.ghaznavi@gmail.com
asvatani@gmail.com

۱. مقدمه

خطوط لوله‌ی نفت و گاز مدفون، یکی از آسیب‌پذیرترین زیرساخت‌های موجود شریان‌های حیاتی هستند. تجربیات زلزله‌های گذشته نشان داده است که خطوط لوله‌ی انتقال‌دهنده در حالت‌های مختلف می‌توانند تحت تأثیر زلزله قرار گیرند. شاید یکی از مهم‌ترین آثار زلزله در خطوط لوله در محل تقاطع با گسل‌ها باشد. بر اساس مطالعات برخی پژوهشگران^[۱] مشخص شد که بیشترین مقادیر آسیب مربوط به ناحیه‌ی تلاقی گسل‌ها با خطوط لوله‌ی انتقال نفت و گاز است. پژوهشگران بسیاری به بررسی تأثیر گسل در خطوط لوله و نیز به بررسی خرابی‌هایی که در اثر جابه‌جایی گسل‌ها ایجاد می‌شوند، پرداخته‌اند.^[۳-۱] در سال ۱۹۹۹، در بررسی مطالعات پیشین انجام شده در زمینه تأثیر زلزله در خطوط لوله مشخص شد که اگرچه پژوهش‌های بسیاری در زمینه تأثیر گسل‌ها در خطوط لوله انجام شده است، اما تأثیر ارتعاش‌های تصادفی و موردی زلزله بر روی خطوط لوله کمتر بررسی شده است.^[۲] خطوط لوله می‌توانند با زاویه‌های متفاوت، از گسل‌های مختلفی عبور کنند. در بررسی‌های مختلف، تأثیر گسل‌های نرمال بررسی شده است.^[۴-۶] مطالعات تحلیلی و عددی فولانی^[۵-۶] بر روی خطوط لوله انجام و مشخص شده است که مقادیر آیین‌نامه‌ی کرنش و تنش در محل تقاطع با گسل‌ها، تطبیق خوبی با مقادیر عددی و تحلیلی دارند. در بررسی تأثیر انتشار امواج P بر روی تونل‌ها نیز مشخص شد که تنش‌های

در یک بررسی آزمایشگاهی (۲۰۱۶)، در ارتباط با تأثیر گسل‌های معکوس در رفتار لرزه‌ی خطوط لوله مشخص شد که اگرچه مقادیر نیروهای گسترش یافته در خط لوله در تغییر مکان‌های مختلف گسل، مشابهت قابل قبولی با روابط ALA دارند، اما مقادیر نیروی بالابرنده و نیروهای خمشی بیش از مقادیر ALA به دست آمده است.^[۱۴] سپس روابط تحلیلی برای حالت‌های مختلف طول لوله و گسل و زاویه‌ی برخورد لوله و گسل گسترش داده شد.^[۱۵-۱۶] اگرچه با توجه به زلزله‌های گذشته مشاهده شد که خطوط لوله در نواحی خارج از تقاطع با گسل نیز آسیب‌دیدگی‌های فراوانی داشته‌اند که به علت انتشار امواج در محیط‌های خاکی اطراف خطوط لوله بوده است.^[۹-۱۸] همچنین در بررسی تأثیر انتشار امواج در لوله‌های خمیده مشخص شد که بیشترین میزان افزایش کرنش‌های محوری در ناحیه‌ی خمیدگی خطوط لوله‌ی نفت و گاز در زاویه‌ی ۱۳۵ درجه بیش از زاویه‌ی خم ۹۰ درجه است.^[۱۵-۱۶] در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۶، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۲۱

DOI:10.24200/J30.2018.1665.1916

در نوشتار حاضر، روش مدل‌سازی میدان آزاد در خاک‌های تک‌لایه و لایه‌ی تحت تحریک از یک سمت بوده و نیز نحوه‌ی انتشار امواج بررسی شده است.

۲. بیان مسئله

یکی از مسائل بسیار اساسی در روند طراحی خطوط لوله‌ی نفت و گاز، عدم یکنواختی مشخصات خاک زیر لوله و پیرامون آن به علت طول بسیار زیاد خطوط لوله است. در نتیجه خطوط لوله از خاک‌های مختلفی عبور می‌کنند. آسیب‌دیدگی خطوط لوله، علل متفاوتی دارد. یکی از علل آسیب‌ها، انتشار امواج در خاک و بالطبع انتشار امواج در خطوط لوله و ایجاد اختلاف فاز بین خاک و لوله است. در نتیجه، تغییر جنس خاک می‌تواند تأثیر زیادی در روند نتایج داشته باشد. در بیشتر مطالعات از خاک‌های یکنواخت در طراحی و آنالیز استفاده شده است. در صورت بررسی تأثیر خاک‌های لایه‌ی، به علت استفاده از روابط ریاضی برای به‌دست آوردن پارامترهای انتشار امواج، معمولاً از خاک‌های لایه‌ی منظم استفاده شده است. با توجه به عبور خطوط لوله از نواحی کوهستانی، دشت، دره، تپه و ...، لایه‌های خاک می‌توانند لزوماً موازی خطوط لوله نباشند و این نامتقارنی می‌تواند باعث شکست امواج و ایجاد آثار ثانویه در خطوط لوله شود. در پژوهش حاضر، ابتدا به بررسی تأثیر نوع خاک در نحوه‌ی انتشار موج P و سپس به بررسی تأثیر خاک‌های لایه‌ی غیرهمگون در رفتار لرزه‌ی خطوط لوله پرداخته شده است. یکی از راه‌های متداول مدل‌سازی انتشار امواج در خاک‌های لایه‌ی، استفاده از مدل‌های دو و سه بعدی است. بزرگ‌ترین مشکل به‌وجود آمده در مدل‌سازی دو و سه بعدی، بحث انتشار موج بازگشتی از مرزهاست. روش مدل‌سازی انتشار امواج و تلاش برای کاهش موج برگشتی، یکی از روش‌های نوین در زمینه‌ی مدل‌سازی بوده و به نحوه‌ی انتشار موج P از یک سمت با توجه به موانع مدل‌سازی، کمتر توجه شده است. یکی از راه‌ها، افزایش ابعاد مدل است تا موج انعکاسی تأثیر قابل ملاحظه‌ی در نتایج نداشته باشد. اما با توجه به افزایش بسیار زیاد المان‌ها و زمان آنالیز بسیار زیاد، امکان افزایش ابعاد مدل در حد محدود وجود دارد. همچنین با توجه به سرعت انتشار موج در خاک، زمان رفت و برگشت موج تا نقطه‌ی موردنظر کوتاه است. در نتیجه، در آنالیزهایی که زمان تحریک زیاد است، می‌تواند مشکلات فراوانی ایجاد شود که باعث عدم قطعیت نتایج می‌شود. در نوشتار حاضر، تلاش شده است با روش‌های جدید مورد استفاده در مدل‌های انتشار امواج، مشابه‌سازی شرایط انتشار موج در خاک و خط لوله صورت پذیرد. همچنین ابتدا مدل تحت آنالیز میدان آزاد قرار گرفته است، تا مقادیر امواج برگشتی مشخص شود. پس از صحت‌سنجی و مقایسه‌ی نتایج، آنالیزها با روش جدید انجام شده‌اند.

۱.۲. کرنش طراحی

مقادیر کرنش محوری در مطالعات گوناگونی بررسی و روابط متنوعی برای مقادیر کرنش پیشنهاد شده است. رابطه‌ی ۱، در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد شده است: [۲۱]

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{V_{RP}}{C_p} \quad (1)$$

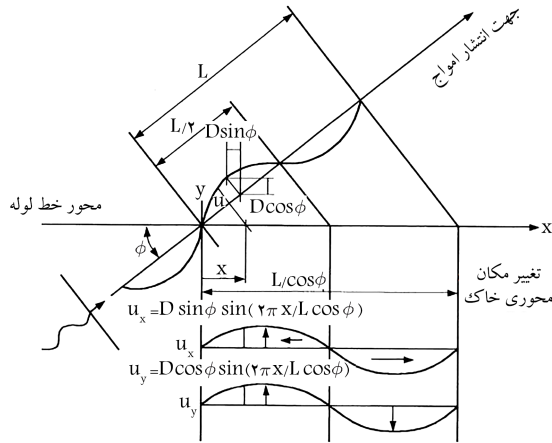
که در آن، V_{RP} بیشترین مقدار سرعت جنبش زمین در هنگام حرکت موج P و برابر با $V_{max,V} \times 0.681$ است. همچنین C_p برابر با بیشینه‌ی مقادیر سرعت حرکت موج P در خاک و $V_{max,V}$ بیشینه‌ی مقدار سرعت جنبشی زمین در جهت افقی هستند. در صورتی که زاویه‌ی برخورد متفاوت باشد، از رابطه‌ی ۲ می‌توان استفاده

سال ۲۰۱۱، نیز در بررسی تأثیر انتشار امواج رایلی به‌صورت دو بعدی مشخص شد که امواج رایلی باعث ایجاد کرنش محوری بیشتر و کاهش مقادیر کرنش حلقه‌ی در مقایسه با موج S می‌شوند. [۱۷] همچنین در سال ۲۰۰۷، در مورد تأثیر انتشار امواج در اثر امواج حاصل از انفجار، مطالعاتی صورت گرفته است. [۱۹] در برخی مطالعات نیز روش‌های متنوعی برای نحوه‌ی مدل‌سازی انتشار امواج در سازه‌ها بررسی شده است. [۲۰-۲۶] ابتدا روش‌ها مبتنی بر مدل‌سازی خاک به‌صورت خطی بودند و از تئوری انتشار امواج در محیط نیمه بی‌نهایت لایه‌ی استفاده می‌شد. [۲۰، ۲۱]

سپس برای بررسی تأثیر انتشار امواج در شبکه‌ی لوله‌های نیروگاه‌های هسته‌ی (که غالباً شرایط تکیه‌گاهی متفاوتی در دو سر لوله داشتند)، با استفاده از تحریک ناهمسان تکیه‌گاه‌ها آنالیز انجام شده است. [۲۲] و نیز در سال ۲۰۱۴، به بررسی انواع روش‌های مدل‌سازی خاک به‌صورت سه بعدی پرداخته شد. [۲۳] برای مدل‌سازی هم‌زمان خاک و لوله، نیز روش‌های مختلفی از جمله استفاده‌ی هم‌زمان از روش‌های اجزاء محدود و روش‌های المان مرزی استفاده شده است. [۲۵] یکی از روش‌های ساده شده‌ی ذکر شده، استفاده از فنر برای مدل‌سازی خاک پیرامون لوله بوده است. [۲۶، ۱۶، ۱۵] با توجه به بحث انتشار امواج در مدل‌سازی، نیاز به مدل کردن طول بسیاری از لوله است تا تأثیر شرایط انتهایی لوله در نتایج آنالیز ناچیز شود. کمیته‌ی طول لوله‌ی موردنیاز با توجه به جنس خاک اطراف لوله در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ به‌دست آمد. [۲۷] عمده‌ترین آسیب‌های وارده بر خطوط لوله‌ی انتقال دهنده‌ی نفت و گاز در هنگام وقوع زلزله تحت امواج P و S، رایلی و لاو ایجاد می‌شود. البته طبق یک قاعده‌ی کلی می‌توان فرض کرد که سازه‌های واقع در محدوده‌ی ۲ تا ۵ برابر عمق کانونی تحت تأثیر امواج حجمی قرار می‌گیرند و در سازه‌های فراتر از محدوده‌ی ۵ برابر عمق کانونی امواج سطحی حاکم هستند. در سال ۱۹۸۵، نمودارهایی برای تغییرات سرعت امواج رایلی در پروفیل‌های خاک لایه‌ی که در آن‌ها سرعت موج برشی با عمق افزایش می‌یابد، ارائه شده است. [۲۸]

از بین امواج سطحی، فقط امواج رایلی در مطالعات اثر انتشار امواج بر لوله‌های مدفون در نظر گرفته می‌شوند. زیرا امواج لاو فقط باعث ایجاد کرنش خمشی در لوله می‌شوند که برای قطرهای معمولی، اهمیت دارد. در حالی که مؤلفه‌ی طولی امواج رایلی، موازی امتداد انتشار است و باعث ایجاد کرنش محوری در لوله‌ی هم‌راستا با مسیر انتشار موج می‌شود. از آنجایی که امواج رایلی جزء امواج سطحی هستند و در سطح زمین منتشر می‌شوند، سرعت ظاهری انتشار امواج رایلی در سطح زمین با سرعت انتشار آن‌ها یکسان است. در لایه‌ی یکنواخت با سرعت موج برشی یکسان در عمق، سرعت موج رایلی کمی از سرعت موج برشی کمتر است. اما در لایه‌های خاک عادی که در آن سختی خاک در عمق افزایش می‌یابد، سرعت انتشار امواج رایلی برخلاف امواج بدنه‌ی، تابع تغییرات سرعت موج برشی در عمق و همچنین تابعی از بسامد هستند. از آنجایی که کرنش خمشی در اثر انتشار امواج لرزه‌ی محوری در خطوط لوله‌ی مستقیم، اهمیت چندانی ندارد، فقط کرنش‌های محوری در لوله تحت اثر مذکور در نظر گرفته می‌شود. همچنین در بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی خطوط لوله‌ی نفت و گاز، ضرایب اهمیت در نظر گرفته شده در بخش طراحی در خاک‌های سست، بیشتر از خاک‌های سخت است. [۲۹]

با توجه به اینکه در بیشتر مدل‌سازی‌های واقعی نمی‌توان از روش دو بعدی با مدل‌سازی خاک بهره برد؛ لذا در پژوهش حاضر، هدف بررسی تأثیر امواج P در مقادیر کرنش در لوله در دو حالت مدل‌سازی ساده شده‌ی جرم - فنر - لوله و مدل مبسوط دو بعدی خاک و لوله بوده است. تحلیل‌های بسیاری با فرض خاک‌های لایه‌ی و در حالت تحریک از کف مدل انجام شده است. [۳۰، ۳۱] اما تحریک از یک سمت و تحت موج P کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مسائل مطرح شده



شکل ۱. نحوه انتشار امواج و برخورد با لوله و نحوه گسترش موج طولی در لوله [۲]

ارائه شده بوده است. براساس گزارش‌های آزمایشگاهی که توسط نیومارک و همکاران ارائه شده است، اولین نشانه‌های کمانش موضعی در محدوده‌ی رابطه‌ی ۵ ایجاد می‌شود: [۳۸،۳۷]

$$0.15 \frac{t}{R} < \varepsilon < 0.2 \frac{t}{R} \quad (5)$$

به گونه‌یی که شعاع لوله و t برابر با ضخامت جداره‌ی لوله است. براساس نتایج یک رساله‌ی دکتری در سال ۲۰۱۱، رابطه‌ی جدیدی برای بررسی نقطه‌ی آغازین کمانش موضعی برای خاک‌های ماسه‌ی ارائه شده است (رابطه‌های ۶ و ۷)، که رابطه‌ی ۶ برای خاک‌های ماسه‌ی متراکم و رابطه‌ی ۷ برای خاک‌های ماسه‌ی غیرمتراکم است. [۳۹]

$$0.17 \frac{t}{R^{1.5}} < \varepsilon < 0.26 \frac{t}{R^{1.5}} \quad (6)$$

$$0.15 \frac{t}{R^{1.1}} < \varepsilon < 0.34 \frac{t}{R^{1.1}} \quad (7)$$

با توجه به قطر لوله برابر با ۱ متر و ضخامت برابر با ۱ سانتی‌متر، مقادیر کمیته‌ی کرنش برای کنترل کمانش موضعی برابر با ۰.۰۳ به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، چون هدف بررسی تأثیر انتشار موج P در رفتار لرزه‌ی خطوط لوله‌ی فولادی بوده است، لذا به بررسی موج برخوردی با زاویه‌ی برخورد صفر درجه پرداخته شده است. همچنین آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی تأسیسات و سازه‌های صنعت نفت، رابطه‌ی ۸ را برای مقادیر کرنش فشاری بیشینه پیشنهاد می‌کند. [۲۹] همچنین برای انتشار امواج

جدول ۱. مقادیر بیشینه‌ی کرنش‌های طولی مجاز طراحی برای امواج مختلف.

| رکورد شتاب‌نگاشت مورد استفاده | | | | | نوع خاک | |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|
| لوماپریتا ^۱ | کوبه ^۲ | امیر یال ولی ^۳ | نورثریج ^۴ | منجیل ^۵ | | |
| ۱/۲۱ | ۰/۸۰ | ۱/۰۰ | ۰/۹۲ | ۰/۳۴ | V_g | |
| ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۴۶ | ۰/۰۰۰۱۷ | $I \sim IV$ | $\varepsilon_\alpha (ASCE - ALA)$ |
| ۰/۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۰۰۱۰ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۳۴ | $I(C_p = 1000 m/s)$ | $\varepsilon_\alpha (HASHASH)$ |
| ۰/۰۰۱۵ | ۰/۰۰۱۰ | ۰/۰۰۱۲۵ | ۰/۰۰۱۱۵ | ۰/۰۰۰۴۲ | $I(C_p = 800 m/s)$ | $\varepsilon_\alpha (HASHASH)$ |
| ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۰۰۰۷۶ | $I(C_p = 450 m/s)$ | $\varepsilon_\alpha (HASHASH)$ |
| ۰/۰۰۴۹ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۰۰۱۴ | $I(C_p = 250 m/s)$ | $\varepsilon_\alpha (HASHASH)$ |

^۱LomaPrieta

^۲Kobe

^۳ImperialValley

^۴Northridge

^۵Manjil

کرد:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{V_{RP}}{C_p} \cos^2 \theta + r \frac{a_p}{C_p} \sin \theta \cos^2 \theta \quad (2)$$

که در آن، زاویه‌ی θ همان زاویه‌ی برخورد موج، a_p برابر با بیشینه‌ی شتاب ایجاد شده در اثر جنبش زمین و r برابر با شعاع لوله یا تونل است. همچنین مقادیر کرنش طراحی بر طبق مطالعات انجام شده برابر با رابطه‌ی ۳ هستند: [۳۳،۳۲]

$$\varepsilon_\alpha = \frac{V_{RP}}{C_p} \quad OR \quad \varepsilon_\alpha = \frac{V_{RS}}{C_R} \quad (3)$$

که در آن، V_{RP} و V_{RS} به ترتیب برابر با بیشترین مقدار سرعت موج برشی عمودی S_V برابر با $1/2 \times V_{max,V}$ و بیشترین مقدار سرعت موج P است و C_R برابر با بیشینه‌ی مقادیر سرعت حرکت موج S در خاک است. براساس آیین‌نامه‌ی ۲۰۰۵ ASCE-ALA طراحی لرزه‌ی خطوط لوله مدفون براساس بیشینه‌ی مقادیر کرنش محوری است و مقادیر تقریبی براساس رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید: [۳۵،۳۴]

$$\varepsilon_\alpha = \frac{V_g}{\alpha \times C_a} \quad (4)$$

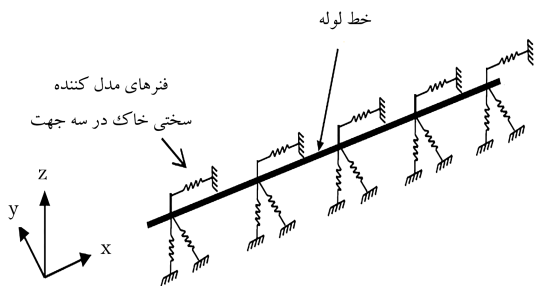
که در آن، V_g برابر با سرعت بیشینه‌ی جنبش زمین برابر با $V_{max,V}$ و C_a برابر با ۲۰۰۰ متر بر ثانیه فارغ از جنس نوع خاک و به عنوان سرعت انتشار امواج در خاک بستر استفاده می‌شود. همچنین پارامتر α برای امواج رابلی و فشاری P برابر با ۱ و برای امواج S برابر با ۲ فرض می‌شود. در نتیجه مقادیر بیشینه‌ی کرنش مطابق با V_g ایجاد شده توسط طیف‌های مختلف زلزله همانند جدول ۱ است.

با توجه به طولی بودن خطوط لوله، عبور خطوط لوله‌ی نفت و گاز از مناطق با خاک‌های گوناگون امری طبیعی است. با توجه به طبقه‌بندی خاک‌ها به ۴ دسته در بیشتر آیین‌نامه‌ها و از جمله استاندارد ۲۸۰۰ ایران، تمامی آنالیزها در ۴ رده‌ی خاک انجام شده است. [۳۶] شایان ذکر است تمامی روابط ذکر شده بر مبنای زاویه‌ی برخوردی که بیشترین نیروی فشاری محوری را ایجاد می‌کند، لحاظ شده است. در حالت واقعی، حالت برخورد موج لحاظ شده، یکی از انواع حالت‌هاست. در شکل ۱، نحوه‌ی برخورد موج بر لوله و زوایای آن با لوله مشاهده می‌شود.

همچنین مقادیر تجزیه‌شده‌ی موج سینوسی به دو مؤلفه‌ی موج در راستای لوله و موج در راستای عمود بر لوله در شکل ۱ نمایان است. [۳۴] شایان ذکر است مقادیر ارائه شده توسط روابط در جدول ۱ بر مبنای زلزله‌ی طرح استاندارد است و قاعدتاً در فواصل نزدیک به گسل، مقادیر کرنش بیشتر خواهد شد. در تمامی حالت‌های مورد بررسی، مقادیر حدی کرنش محوری محاسبه شده توسط ALA (زیرا با فرض سرعت انتشار موج در بستر برابر با $200 m/s$ فرض می‌شود)، کمتر از سایر روابط

اثر خاک به صورت سه بعدی نیاز به اتصال سه فنر در سه جهت اصلی است. با توجه به ماهیت متفاوت رفتار خاک زیر لوله (در جهت عمودی) در هنگام حرکت به سمت بالا و پایین، مشخصات فنر غیرخطی مدل شده در جهت قائم، در کشش و فشار متفاوت است.

۲. روش دیگر، استفاده از المان PSI است. المان PSI المان اندرکنشی خاک و لوله است و المان اختصاصی برای مدل‌سازی رفتار خاک پیرامون لوله است. المان PSI، مزایای فراوان از جمله: قابلیت انجام مش‌بندی لوله‌ی غیریکنواخت، و قابلیت استفاده از فنر خطی و غیرخطی و ... دارد. در صورت استفاده از المان PSI می‌توان پارامترهای خاک موردنظر را وارد کرد تا مشخصات فنرهای غیرخطی توسط آباکوس بر طبق روابط ALA به دست آید. [۲۹، ۳۵] در نوشتار حاضر، از المان PSI استفاده شده است. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. مقادیر سختی فنرها و میزان جابه‌جایی آن‌ها توسط آیین‌نامه‌ی ALA برآورد شده است. [۳۵] برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه‌ی خاک با استفاده از فنرهای غیرخطی مدل شده است (شکل ۲). برای مدل‌سازی خاک، از دو نوع خاک ماسه‌بی و رسی استفاده شده است و هر کدام از انواع خاک‌ها با توجه به میزان تراکم و سرعت انتشار امواج به ۴ رده تقسیم شده‌اند. مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. [۲۷، ۲۹، ۳۶] در جدول ۲ مشخصات خاک ماسه‌بی و در جدول ۳ مشخصات خاک رسی مورد استفاده ملاحظه می‌شود که در آن‌ها، ϕ ضریب اصطکاک داخلی ماسه، k ضریب کاهش اصطکاک لوله و خاک، K ضریب مقاومت جانبی خاک، S_u مقاومت برشی زهکشی



شکل ۲. نحوه‌ی مدل‌سازی خط لوله به همراه فنر در جهت‌های مختلف.

در خاک، مقادیر 50° تا 100° درصد کرنش به دست آمده از رابطه‌ی ۸ در نظر گرفته می‌شود:

$$\varepsilon < 0,175 \frac{t}{R} \quad (8)$$

۲.۲. مدل‌سازی عددی خاک

مدل‌سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۱ صورت گرفته است. [۴۱] روند کلی مدل‌سازی‌های انجام شده در گذشته بر دو اصل کلی استوار بوده است:

۱. استفاده از سیستم جرم و فنر و لوله که برای مدل‌سازی سختی خاک از فنر معادل استفاده می‌شود. در هنگام مدل‌سازی انتشار امواج در روش ذکر شده، باید معادله‌ی حرکتی موج در خاک به دست آید و برای هر تکیه‌گاه، جداگانه موج ورودی ایجاد و اعمال شود. در نتیجه به تعداد فنرهای مدل شده، موج ورودی موردنیاز است. اما به علت تک‌بعدی بودن المان‌ها، آنالیزها زمان‌بر نیستند و امکان انجام آنالیزهای فراوان و همچنین آنالیز تاریخی زمانی وجود دارد. در روش مذکور، متأسفانه تأثیر خاک‌های لایه‌بی قابل اعمال نیست و برای وارد کردن تأثیر خاک‌های لایه‌بی باید مدل‌سازی کاملاً در سایر نرم‌افزارها انجام و خروجی برای هر گره به عنوان ورودی در انتهای فنرها اعمال شود. روش دیگر مدل‌سازی خاک به صورت کامل و توسط المان‌های SHELL است. در این حالت با توجه به طول بودن خطوط لوله و داشتن محیط بی‌نهایت خاک می‌توان از مدل‌سازی دو بعدی کمک گرفت. از محاسن روش مذکور، انتشار دقیق تر موج در لایه‌های خاک است. همچنین عمده‌ترین مشکل در روش ذکر شده، مدل‌سازی مهار موج‌های انعکاسی بوده و میرا کردن موج‌های بازگشتی بدون میرا کردن موج اصلی است. از دیگر مشکلات روش مذکور، به علت ماهیت طولی بودن خطوط لوله، وجود تعداد بسیار زیاد المان در آنالیز است که باعث افزایش بسیار زیاد زمان آنالیز می‌شود. در نتیجه، تعداد آنالیزهای صورت گرفته توسط روش مذکور بسیار محدودتر است. در بخش اول نوشتار حاضر، مدل‌سازی با استفاده از سیستم فنر و لوله انجام شده است، که در آن مدل‌سازی با استفاده از فنرهای غیرخطی صورت پذیرفته است. برای به دست آوردن مشخصات فنر غیرخطی، لوله باید مش یکنواخت داشته باشد. زیرا در صورت غیریکنواخت بودن اندازه‌ی مش لوله، پارامترهای به دست آمده برای فنر متفاوت می‌شود. برای مدل‌سازی

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌بی مورد استفاده.

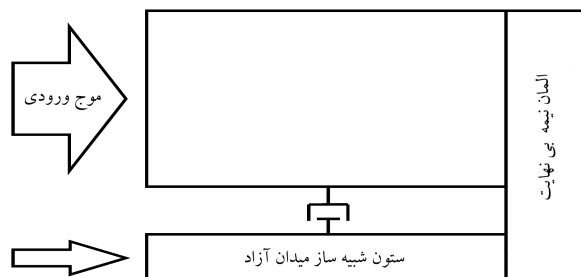
| نمونه | نوع خاک | $\phi(^{\circ})$ | $\gamma(N/m^3)$ | K | K_0 | T_s | $V_S(m/S)$ | $V_P(m/s)$ | $\lambda(m)$ |
|-------|---------|------------------|-----------------|------|-------|-------|------------|------------|--------------|
| Ps-۱ | I | ۳۵ | ۲۱۰۰ | ۰,۷ | ۱,۵ | ۰,۴ | ۶۲۵ | ۱۰۰۰ | ۲۵۰ |
| Ps-۲ | II | ۳۳ | ۲۰۰۰۰ | ۰,۶۵ | ۱,۲ | ۰,۵ | ۵۰۰ | ۸۰۰ | ۲۵۰ |
| Ps-۳ | III | ۳۱ | ۱۹۰۰۰ | ۰,۵۵ | ۰,۸ | ۰,۷ | ۲۷۵ | ۴۵۰ | ۱۹۲۵ |
| Ps-۴ | IV | ۳۰ | ۱۸۰۰۰ | ۰,۵۰ | ۰,۵ | ۱,۰ | ۱۵۰ | ۲۵۰ | ۱۵۰ |

جدول ۳. مشخصات خاک ماسه‌بی مورد استفاده.

| نمونه | نوع خاک | $\gamma(MN/m^3)$ | $S_u(N/m^2)$ | T_s | $V_S(m/s)$ | $V_P(m/s)$ | $\lambda(m)$ |
|-------|---------|------------------|--------------|-------|------------|------------|--------------|
| Ps-۵ | I | ۲۱۰۰ | ۱,۵ | ۰,۴ | ۶۲۵ | ۱۰۰۰ | ۲۵۰ |
| Ps-۶ | II | ۲۰۰۰۰ | ۱,۲ | ۰,۵ | ۵۰۰ | ۸۰۰ | ۲۵۰ |
| Ps-۷ | III | ۱۹۵۰۰ | ۰,۸ | ۰,۷ | ۲۷۵ | ۴۵۰ | ۱۹۲,۵ |
| Ps-۸ | IV | ۱۹۰۰۰ | ۰,۵ | ۱,۰ | ۱۵۰ | ۲۵۰ | ۱۵۰ |

جدول ۴. مشخصات خاک مورد استفاده در مدل‌سازی دو بعدی.

| نمونه | نوع خاک | مدول کشسانی (Kpa) | ν | $\gamma(N/m^3)$ | $V_S(m/s)$ | $V_P(m/s)$ | $C(Kpa)$ | $\phi(^{\circ})$ |
|-------|---------|-------------------|-------|-----------------|------------|------------|----------|------------------|
| PS-۹ | I | ۱۴۱۷ | ۰٫۳۳۳ | ۲۱ | ۶۲۵ | ۱۰۰۰ | ۲ | ۳۵ |
| PS-۱۰ | II | ۸۶۴ | ۰٫۳۳۳ | ۲۰ | ۵۰۰ | ۸۰۰ | ۳ | ۳۳ |
| PS-۱۱ | III | ۲۰۵ | ۰٫۳۳۳ | ۱۹ | ۲۷۵ | ۴۰۰ | ۴ | ۳۱ |
| PS-۱۲ | IV | ۴۸ | ۰٫۳۳۳ | ۱۸ | ۱۵۰ | ۲۵۰ | ۵ | ۳۰ |



شکل ۳. نحوه‌ی مدل‌سازی دو بعدی و چیدمان المان نیمه بی‌نهایت و ستون شبیه‌ساز میدان آزاد.

جدول ۵. ضرایب تصحیح مرزهای ویسکوکشسان در محیط‌های مستطیلی.

| ضریب پیشنهادی | دامنه‌ی قابل قبول | ضریب تصحیح |
|---------------|-------------------|------------|
| α_N | $۱٫۰-۲٫۰$ | ۱٫۳۳ |
| α_T | $۰٫۵-۱٫۰$ | ۰٫۶۷ |

در مدل و ستون شبیه‌سازی شده یکسان شود. [۴۴] نحوه‌ی مدل‌سازی در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

البته از روش ستون شبیه‌ساز حرکت بیشتر برای مدل‌سازی فضای نیمه‌بی‌نهایت پیرامونی استفاده می‌شود. در نوشتار حاضر، به بررسی تأثیر روش ذکر شده هنگام استفاده در کف مدل و انتشار امواج از سمت چپ مدل و به صورت عرضی پرداخته شده است. با توجه به ماهیت بسیار زمان‌بر مدل با تعداد المان بالا، در بخش کنونی به آنالیز و بررسی تحت موج سینوسی پرداخته شده است. مبنای میراگرهای انتخابی در مدل‌سازی، روابط بسط داده شده‌ی مرز ویسکوکشسان لیو و دوو است که در رابطه‌ی ۹ مشاهده می‌شود. [۴۶-۲۵، ۲۴]

همچنین مطابق جدول ۵، ضرایب تصحیحی برای استفاده از مرزهای ارائه شده در محیط‌های مستطیلی شکل ارائه شده است. ضرایب فنر و میراگر برای جهت‌های مختلف از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید. در رابطه‌ی مذکور، جهت‌های ۱ و ۲ مماس بر سطح و جهت ۳ عمود بر سطح هستند، به‌گونه‌ی که R برابر با عمق مدل و α ضریب تصحیح است. ضرایب G و A به ترتیب مدول برشی مصالح بستر و مساحت مؤثر المان در محل مرز است. مرزهای ارائه شده توسط لیو و دوو، فقط برای بستر خنثی ارائه شده است.

$$K_1 = K_2 = \frac{\alpha_T G}{R} A, \quad K_3 = \frac{\alpha_N G}{R} A$$

$$C_1 = C_2 = \rho c_s A, \quad C_3 = \rho c_p A \quad (9)$$

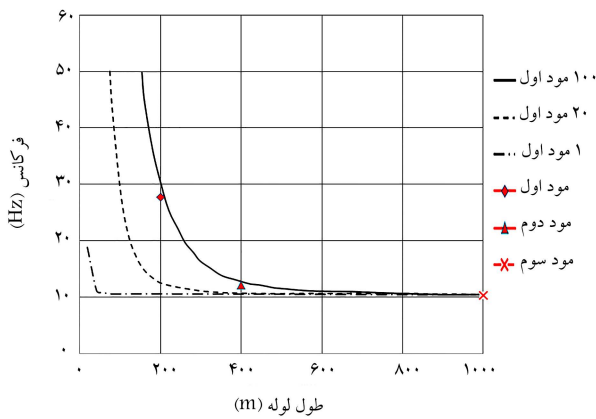
در شکل ۴، مدل‌های مورد استفاده در بخش حاضر مشاهده می‌شود. در مدل اول، به بررسی مدل با خاک تک‌لایه پرداخته شده است (PS-۹ ~ PS-۱۲) و در مدل دوم، به بررسی تأثیر لایه‌های خاک موازی (مدل PS-۱۳) و در مدل سوم به بررسی تأثیر لایه‌های خاک غیرموازی پرداخته شده است (PS-۱۴).

نشده‌ی خاک محصور شده بر حسب $T, N/m^2$ دوره‌ی تناوب دینامیکی خاک بر حسب ثانیه، V_S سرعت موج برشی در خاک بر حسب m/s و λ طول موج بر حسب متر است. [۳۹]

نوع آنالیزهای به‌کار رفته در بخش اول، تاریخچه‌ی زمانی بوده و نحوه‌ی انتشار امواج در لوله و خاک بررسی شده است. برای لحاظ کردن آثار تغییر محتوای بسامدی، از ۵ طیف مختلف زلزله استفاده شده است. هدف به دست آوردن تأثیر انتشار امواج در مقادیر کرنش‌های طولی تحت اثر موج P است. روند اعمال بار به‌گونه‌ی بوده است که تأثیر موج P در لوله مشخص شود. ابتدا تمامی طیف‌ها به شتاب مبنای $1g$ هم‌پایه شده‌اند، تا فقط تأثیر تغییر محتوای بسامدی بررسی شود. سپس طیف‌های هم‌پایه شده با توجه به شرایط تکیه‌گاهی و نحوه‌ی مش‌بندی توسط نرم‌افزار متلب استفاده و به‌عنوان شرایط تکیه‌گاهی برای تک‌تک المان‌های لوله معرفی شدند و مقادیر تغییرمکان با توجه به طول لوله تغییر کرد و در طی روند حل با توجه به زمان، تمامی مقادیر تغییرمکان اعمالی در تمامی گره‌های خاک اعمال شدند.

در بخش دوم نوشتار حاضر، برای بررسی تأثیر خاک‌های لایه‌ی در رفتار لرزه‌ی خطوط لوله‌ی فولادی، به مدل‌سازی دو بعدی پرداخته شده است. مشخصات مدل‌های استفاده شده در بخش حاضر در جدول ۴ مشاهده می‌شود. در بخش حاضر، برای مدل‌سازی خاک از المان CPE۴R استفاده شده است. بزرگ‌ترین مشکل در روش مدل‌سازی ذکر شده، انتشار امواج تابشی از مرزهاست. در نتیجه برای عملکرد بهتر در انتهای مدل از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت C1NPE۴ که قادر به جذب امواج هستند، استفاده شده است. مدل‌های فراوانی برای بررسی صحت عملکرد المان C1NPE۴ ساخته و مشخص شد که المان‌های مذکور معمولاً قادر به جذب امواج موازی المان هستند و در صورت برخورد امواج با زاویه، باعث انعکاس مقادیر کمی از امواج می‌شوند.

علت عدم استفاده از المان نیمه‌بی‌نهایت در کف مدل، ایجاد میرایی در موج اصلی ورودی به مدل است. به‌گونه‌ی که دامنه‌ی موج ورودی در نیمه‌های مدل نسبت به ابتدای مدل کاهش می‌یافت. در نتیجه برای حذف امواج تابشی از کف مدل از روش دیگری استفاده شده است که در آن از میراگرهایی که انتهای مدل را به یک ستون دیگر در زیر مدل متصل می‌کنند، استفاده شده است. اتصال میراگر بین ستون معادل و انتهای مدل باعث عملکرد بهتر میراگر می‌شود و موج برگشتی به میزان کمی می‌رسد. شایان ذکر است در نوشتار حاضر فرض بر این بوده است که سنگ بستر پایین‌تر از عمق ۱۵۰ متر مورد استفاده در مدل‌سازی است. زیرا در صورت قرارداشتن سنگ بستر در عمق ۱۵۰ متری، نیازی به مدل‌سازی میراگر در پایین مدل نیست. روش استفاده از ستون شبیه‌ساز حرکت، روشی متداول در مدل‌سازی انتشار امواج است. [۴۱] روش ستون شبیه‌ساز حرکت، ابتدا برای انتشار امواج تک‌بعدی توسط برخی پژوهشگران استفاده شده است. [۴۳ و ۴۲] سپس در مورد انتشار امواج دو بعدی از کف نیز استفاده شده است. برای انتشار یکسان موج در ستون شبیه‌سازی شده می‌توان مقادیر سختی و چگالی ستون شبیه‌سازی شده را بسیار بیشتر در نظر گرفت. اما مقادیر باید به‌گونه‌ی باشند که سرعت انتشار امواج



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج صحت‌سنجی به‌دست آمده و مدل‌سازی حسینی و همکاران [۳۹]

$$\bar{\omega}_i = (1 + \beta) \sqrt{\frac{k_u}{m}}$$

$$\beta = \frac{m}{2k_u} \omega_i^2 \quad (12)$$

در صورتی که طول لوله به سمت بی‌نهایت میل کند، β نیز به سمت صفر میل می‌کند. در غیر این صورت، کمینه‌ی طول موردنیاز (l) تا درصد خطای قابل قبول β از رابطه‌ی ۱۳ به‌دست می‌آید: [۳۹]

$$l = \sqrt[4]{\frac{EI\alpha_i^4}{2\beta K_u}} \quad (13)$$

روابط ۱۴ و ۱۵، توسط حسینی و همکاران با استفاده از روابط ASCE و رابطه‌ی ۱۱، روابطی را برای کمینه‌ی طول خطوط لوله در خاک‌های ماسه‌یی و رسی پیشنهاد کرده‌اند:

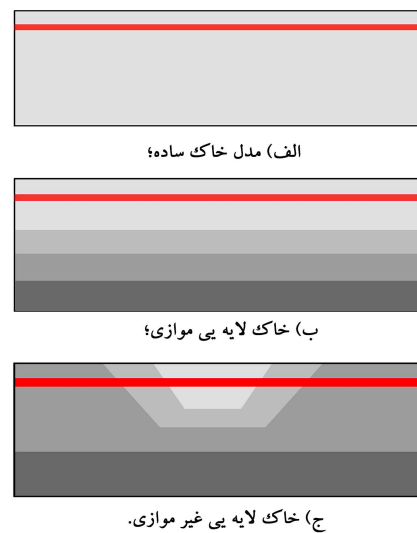
$$l = \sqrt[4]{\frac{\pi\alpha_i^4 \xi Et R^2}{\lambda\beta \gamma N_{qh}} \left(1 + \frac{R}{H}\right)} \quad (14)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{\pi\alpha_i^4 \xi Et R^2}{\lambda\beta S_u N_{ch}} (H + R)} \quad (15)$$

که در آن‌ها، H عمق دفن، N_{qh} ضریب بدون بعد و ξ ضریب بدون بعدی است که برای ماسه‌ی متراکم در حدود ۰٫۲، برای ماسه‌ی سست در حدود ۰٫۱، برای رس سخت در حدود ۰٫۳ و برای رس نرم در حدود ۰٫۵ است. با توجه به روابط ارائه شده از طول برابر با ۱۰۰۰ متر، در هر دو بخش از نوشتار حاضر برای بالاتر بردن دقت آنالیزها استفاده شده است.

۴.۲. صحت‌سنجی مدل‌سازی

برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی بخش اول نوشتار حاضر، به بررسی مقادیر بسامد در مدل مورد مطالعه با مدل‌های حسینی و همکاران پرداخته شده است. در مدل‌های حسینی و همکاران، نتایج تحلیل مودال برای ۱ تا ۱۰۰ مود اول به‌دست آمده و نمودار آن برای خاک ماسه‌یی نوع I و نتایج آنالیز مودال برای نمونه‌های مورد استفاده در نوشتار حاضر در شکل ۵، ارائه شده است. برای صحت‌سنجی، سه مدل با طول‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ متر ساخته شد و مقادیر بسامد با در نظر گرفتن ۱۰۰ مود به‌دست آمد و مشخص شد در نمونه با طول ۲۰۰ متر، نتایج ۷٫۹٪ اختلاف دارند و در نمونه با طول ۴۰۰ متر، اختلاف برابر با ۵٫۸۶٪ است و در



شکل ۴. مدل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی دو بعدی.

۳.۲. مدل‌سازی لوله

لوله مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع فولادی و از رده‌ی X۶۰ بوده است، که یکی از متداول‌ترین لوله‌های انتقال نفت و گاز در ایران است. برای به‌دست آوردن مقادیر کرنش از رابطه‌ی ۱۰ رامبرگ - اسگود استفاده شده است: [۳۸،۳۹]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (10)$$

به‌گونه‌یی که برای لوله‌ی X۶۰، مقادیر n ، r و σ_y به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۲ و ۴۱۳ مگاپاسکال هستند. [۳۸،۳۹] طول لوله‌ی مورد استفاده در مدل‌سازی باید به‌گونه‌یی باشد که شرایط مرزی انتهایی، تأثیری در روند به‌دست آوردن مقادیر کرنش و یا تنش در المان میانی لوله نداشته باشند. با توجه به مطالعات صورت گرفته مشخص شد که کمینه‌ی طول لوله‌ی موردنیاز برابر با ۲٫۸ در خاک‌های چسبنده و برابر با ۴٫۸ متر در خاک‌های دانه‌یی است. [۳۹] در پژوهش حاضر، با توجه به اینکه بیشینه‌ی مقادیر طول موج برابر با ۲۵۰ متر است، از طول لوله‌ی ۱۰۰۰ متر برای هر دو نوع خاک استفاده شده است و نیز با توجه به اینکه مدل‌سازی با نرم‌افزارهای اجزاء محدود لوله‌یی با طول ۱۰۰۰ متر با المان‌های پوسته‌یی و مدل سه بعدی خاک بسیار زمان‌بر است، از المان PIPE برای مدل‌سازی لوله استفاده شده است که نوعی المان تیر است. در نتیجه تنها راه کنترل کماتش موضعی در لوله، کنترل مقادیر کرنش‌های بیشینه است.

برای محاسبه‌ی کمینه‌ی طول لوله‌ی موردنیاز می‌توان با توجه به آنالیز مودال خطوط لوله در خاک، به بررسی تأثیر طول لوله پرداخت. در اثر مطالعات صورت گرفته‌ی حسینی و همکاران، تأثیر طول خطوط لوله در مدهای بالاتر بررسی شد. [۳۹] همچنین مشخص شد در صورتی که طول لوله بی‌نهایت فرض شود، مقادیر حالت حدی بسامد زاویه‌یی از رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آید:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \bar{\omega}_i = \sqrt{\frac{k_u}{m}} \quad (11)$$

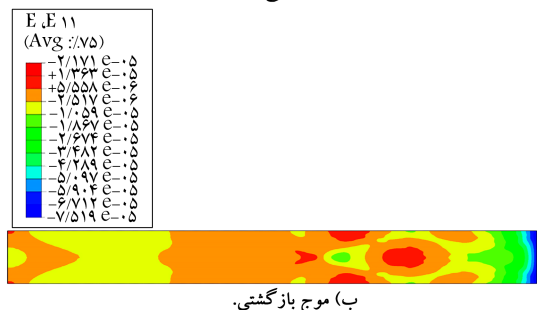
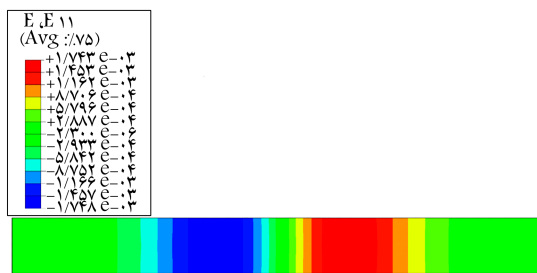
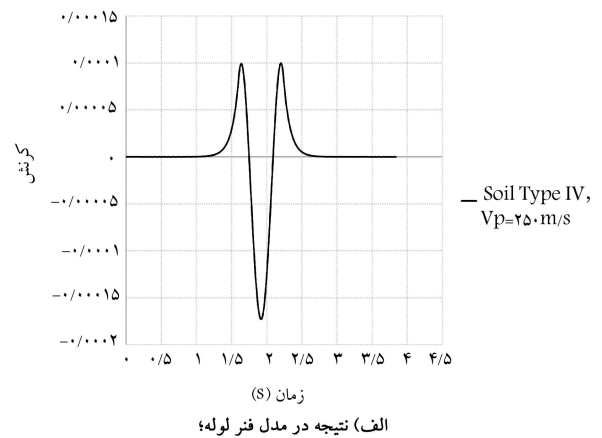
همچنین مشخص شد در صورتی که طول لوله بی‌نهایت نباشد، مقادیر $\bar{\omega}_i$ ، درصد اختلافی برابر با β دارد (رابطه‌ی ۱۲): [۳۹]

کرده و به علت قرار داشتن مرز جاذب موج ارسال شده، بخش برگشتی بسیار ناچیزی داشته است. البته به دلیل در نظر گرفتن طول زیاد لوله، تأثیر زیادی در نتایج نداشته است. برای جلوگیری از شکست موج از المان‌های 1×1 متر استفاده شده است. پژوهش‌های بسیاری وابستگی اندازه‌ی المان بر روی نتایج را بررسی کرده‌اند. [۲۷] ناحیه‌ی عملکرد مناسب المان‌های مذکور برای امواج با طول موج بیش از ۸ متر است که با توجه به مشخصات خاک و با توجه به ابعاد مش انتخابی برابر با ۱ m می‌توان گفت مدل‌سازی قابلیت انتقال امواج تا بسامد $12/5$ هرتز را دارد. بازه‌ی زمانی تحلیل باید به گونه‌ی انتخاب شود که پایداری و دقت در آنالیزها در نظر گرفته شود. ناپایداری عددی می‌تواند باعث عدم هم‌گرایی در نتایج شود. همچنین در صورتی که بازه‌های زمانی بسیار کوتاه در نظر گرفته شود، نوسان‌های غیرواقعی ایجاد می‌شود (پدیده‌ی Gibbs). محاسبات به دست آوردن بازه‌ی زمانی بستگی به ابعاد المان‌ها دارد، که رابطه‌ی آن در سال 2002 بیان شده است. [۲۸] در نوشتار حاضر از پیشینه‌ی پیشنهادی بازه‌ی زمانی $0/0012$ ثانیه، استفاده شده است. [۲۸]

تعداد المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی خاک 150000 بوده است. به دلیل استفاده از المان‌های دو بعدی، زمان آنالیز بسیار طولانی شد. با توجه به آنالیز مذکور مشخص شد نتایج به دست آمده از آنالیز لوله و فنر، مطابقت خوبی با نمونه‌های دو بعدی دارند. به علت طول زیاد لوله برای بررسی نتایج از طولی برابر با 10 متر استفاده شد. همچنین برای تأثیرگذاری کمتر شرایط مرزی در نتایج، ناحیه‌ی انتخابی در میان خط لوله واقع شده است. در شکل ۶، به مقایسه‌ی مقادیر کرنش در خط لوله در هر دو مدل پرداخته و مشخص شد مقادیر کرنش ایجاد شده در لوله در دو نمونه، پیشینه‌ی اختلافی برابر با $3/4\%$ دارند. برای بررسی نحوه‌ی انتشار موج در میدان آزاد به بررسی یکی از مدل‌ها تحت پالس سینوسی پرداخته شده است و مقادیر پاسخ‌ها در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در واقع هدف در بخش حاضر، بررسی نحوه‌ی عملکرد مرزهای جاذب در عدم انتشار امواج بازگشتی بوده است. لذا مشخص شد که نحوه‌ی انتشار امواج به درستی در خاک رخ داده است. همچنین مقادیر موج برگشتی بسیار ناچیز و نسبت دامنه‌ی موج اعمالی به موج برگشتی برابر با $0/5$ بوده است.

نمونه با 1000 متر طول لوله، میزان اختلاف برابر با $2/22\%$ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر اختلاف در طول لوله‌ی زیاد، بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن است. به همین علت از طول لوله‌ی 1000 متر در آنالیزها استفاده شده است.

برای صحت‌سنجی نتایج بخش دوم، ابتدا به بررسی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای آنالیز تحت موج سینوسی در دو مدل دو بعدی و مدل فنر - لوله پرداخته شده است (شکل ۶). برای مقایسه‌ی بیشتر به بررسی مدل‌سازی دو بعدی توسط المان‌های صفحه‌یی برای گسترش امواج پرداخته شده است. به عنوان نمونه، یکی از تحلیل‌ها با خاک نوع IV تحت موج سینوسی آنالیز شد. مقادیر کرنش به دست آمده برای نمونه‌ی مذکور، اختلاف زیر 5% با نمونه‌های مدل شده توسط لوله را نشان داد. برای جلوگیری از انعکاس امواج از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت در نقاط مرزی استفاده شده است. همچنین مقادیر تحریک ورودی از یک سمت انجام شده و موج ایجاد شده توسط سختی خاک با سرعت مناسب از سمت چپ به سمت راست حرکت



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج صحت‌سنجی به دست آمده در آنالیزهای فنر - لوله و مدل‌سازی دو بعدی.

شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج صحت‌سنجی به دست آمده در آنالیزهای دو بعدی.

جدول ۶. مشخصات بیشینه‌ی مقادیر کرنش به دست آمده برای خاک‌های ماسه‌یی در طیف‌های مختلف.

| شتاب‌نگاشت | نمونه | $V_P (m/s)$ | ε_a |
|-------------|-------|-------------|-----------------|
| لوماپریتا | PS-۱ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۱۲۶ |
| | PS-۲ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۱۹۷ |
| | PS-۳ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۲ |
| | PS-۴ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۱۳۷ |
| کوبه | PS-۱ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۸۱ |
| | PS-۲ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۰۱ |
| | PS-۳ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۱۲۱ |
| | PS-۴ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۸۸ |
| امپریال‌ولی | PS-۱ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۸۳ |
| | PS-۲ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۱۰۳ |
| | PS-۳ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۱۴۳ |
| | PS-۴ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۸۴ |
| نورث‌ریج | PS-۱ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۳۱ |
| | PS-۲ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۰۳۷ |
| | PS-۳ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۳۹ |
| | PS-۴ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۳۲ |
| منجیل | PS-۱ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۲۸ |
| | PS-۲ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۰۳۳ |
| | PS-۳ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۴۴ |
| | PS-۴ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۰۶ |

جدول ۷. مشخصات بیشینه‌ی مقادیر کرنش به دست آمده برای خاک‌های رسی در طیف‌های مختلف.

| شتاب‌نگاشت | نمونه | $V_P (m/s)$ | ε_a |
|-------------|-------|-------------|-----------------|
| لوماپریتا | PS-۵ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۱۷۶ |
| | PS-۶ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۲۷۵ |
| | PS-۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۲۸ |
| | PS-۸ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۲ |
| کوبه | PS-۵ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۸۲ |
| | PS-۶ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۱۰۱ |
| | PS-۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۱۹۳ |
| | PS-۸ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۱۶ |
| امپریال‌ولی | PS-۵ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۸۳ |
| | PS-۶ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۱۰۳ |
| | PS-۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۱۴۵ |
| | PS-۸ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۱۳۳ |
| نورث‌ریج | PS-۵ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۳۸ |
| | PS-۶ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۰۴۵ |
| | PS-۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۴۷ |
| | PS-۸ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| منجیل | PS-۵ | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۳۸ |
| | PS-۶ | ۸۰۰ | ۰/۰۰۰۴۶ |
| | PS-۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۰۰۴۸ |
| | PS-۸ | ۲۵۰ | ۰/۰۰۰۰۶ |

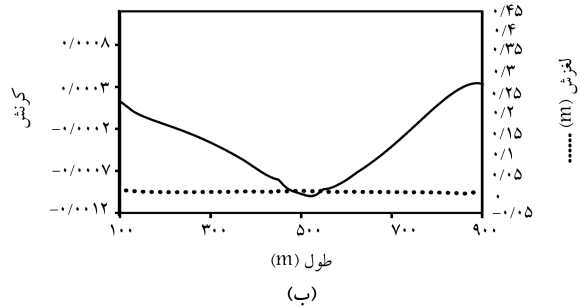
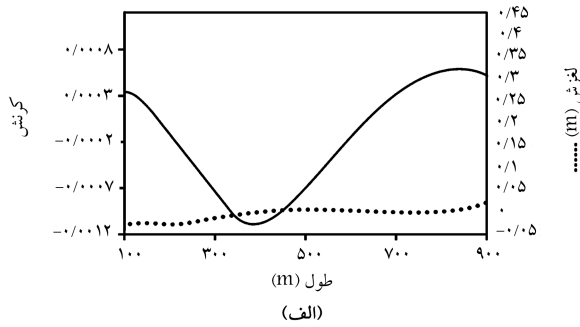
۳. بررسی نتایج

در بخش اول به بررسی تأثیر سرعت انتشار امواج با اعمال ۵ شتاب‌نگاشت زلزله بر روی خطوط لوله پرداخته شده است. نتایج بیشینه‌ی مقادیر کرنش ایجاد شده در طول هر ۵ رکورد زلزله در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، اگرچه همه‌ی رکوردهای زلزله، شتاب یکسان ۱g داشتند، اما در رکورد لوماپریتا (که سرعت بیشینه‌ی موج بیشتر از سایر رکوردها و سرعت موج برابر با $۱/۲۱ m/s$ بوده است)، مقادیر کرنش‌های حاصل بیشتر از سایر رکوردها و برابر با $۰/۰۰۲۸$ بوده است. همچنین رکورد منجیل با سرعت بیشینه‌ی $۰/۳۴ m/s$ (که کمترین میزان سرعت در بین رکوردها را دارد)، کمترین میزان کرنش محوری ($۰/۰۰۰۲۸$) را داشته است. این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر بسیار زیاد محتوای بسامدی در مقادیر پاسخ‌هاست، به‌گونه‌یی که بیشینه‌ی مقدار کرنش نسبت به کمینه‌ی مقدار آن ۱۰ برابر بیشتر است. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر کرنش در دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی و تحت یک رکورد خاص مشخص شد که مقادیر کرنش در خاک رسی بیشتر از خاک ماسه‌یی است. به‌طور مثال، در زلزله‌ی لوماپریتا نسبت کرنش ایجاد شده در خاک ماسه‌یی به خاک رسی در خاک تیپ II برابر با $۰/۶۲۵$ بوده است. همچنین برای شتاب‌نگاشت‌های کوبه، امپریال ولی، نورث‌ریج، و منجیل به‌ترتیب برابر با $۰/۶۲۷$ ، $۰/۹۸۷$ ، $۰/۸۲۹$ و $۰/۹۲$ بوده است. در هر دو نمونه‌ی خاک رسی و ماسه‌یی،

بیشترین کرنش در خاک‌های نوع III (که سرعت انتشار موج طولی برابر با $۴۵۰ m/s$ دارند) و همچنین مقادیر کمینه‌ی کرنش‌ها در خاک نوع I با سرعت انتشار امواج $۱۰۰۰ m/s$ رخ داده است.

همچنین مشخص شد که مقادیر بیشینه‌ی سرعت جنبش زمین، تأثیر بسیار زیادی دارد. به‌گونه‌یی که روند تغییر مقادیر کرنش در شتاب‌نگاشت منجیل که کمترین میزان سرعت در مقایسه با سایر طیف‌ها را دارد ($V_g = ۰/۳۴ m/s$) با سایر شتاب‌نگاشت‌ها متفاوت است. شایان ذکر است تحلیل‌های صورت گرفته، فقط با در نظر گرفتن انتشار امواج P است.

نسبت مقادیر کرنش کمینه به بیشینه‌ی کرنش ایجاد شده در خاک‌های رسی مختلف (نوع I تا نوع IV) در شتاب‌نگاشت‌های لوماپریتا، کوبه، امپریال ولی، نورث‌ریج، و منجیل به‌ترتیب برابر با $۰/۵۵$ ، $۰/۴۲$ ، $۰/۵۷$ ، $۰/۸۱$ و $۰/۶۳$ و در خاک‌های ماسه‌یی به‌ترتیب برابر با $۰/۶۳$ ، $۰/۶۷$ ، $۰/۵۸$ ، $۰/۷۹$ و $۰/۴۷$ بوده است. با توجه به تنوع طیف‌های انتخابی در صورت میانگین‌گیری در مقادیر کاهش‌یافته‌ی کرنش‌ها می‌توان در مورد خاک‌های رسی مقدار کاهش کرنش مساوی $۰/۵۹۲$ و در خاک‌های ماسه‌یی به‌طور میانگین مقدار کاهش را مساوی $۰/۶۲۸$ در نظر گرفت. به‌طور میانگین می‌توان گفت مقادیر کرنش در خاک‌های نوع I نسبت به نوع III مساوی $۰/۶۱$ است. البته در صورت استفاده از طیف‌های بیشتر، نسبت‌های دقیق‌تر به دست می‌آید در بخش دوم به بررسی نتایج مدل‌سازی دو بعدی پرداخته



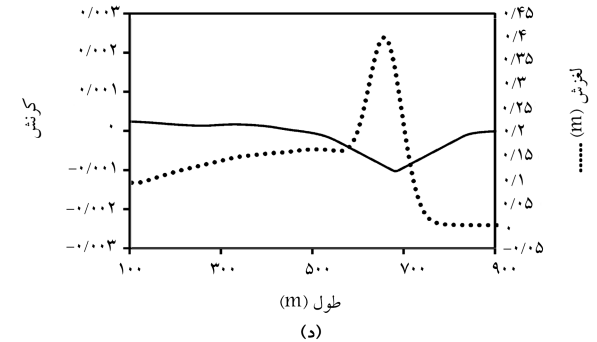
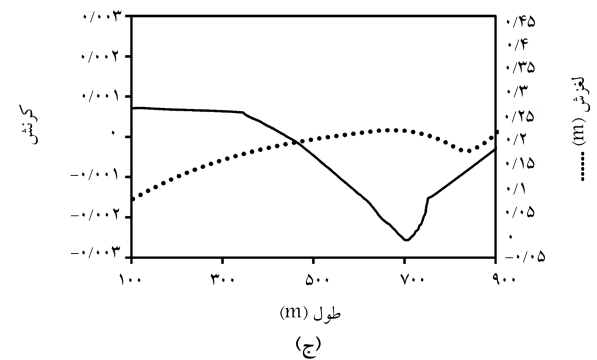
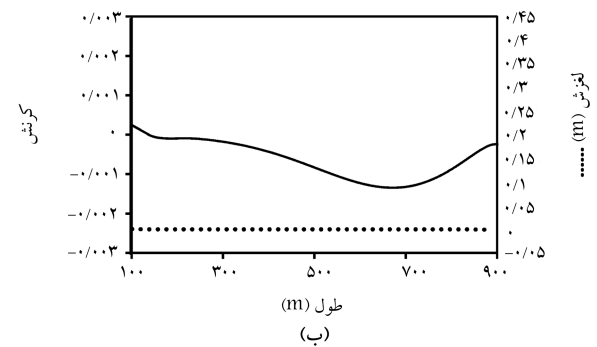
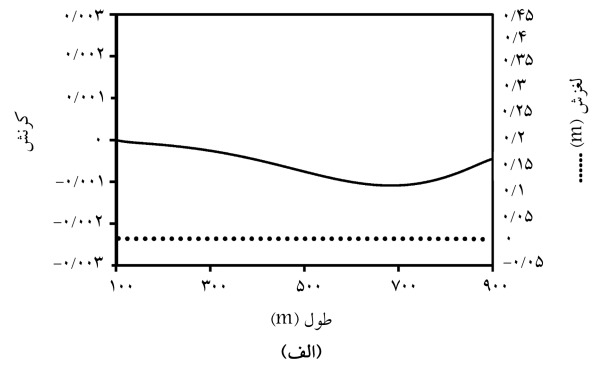
شکل ۹. نمودارهای پوش کرنش به دست آمده برای مدل‌های PS-۱۳ و PS-۱۴ (نمودار سمت راست لغزش لوله نسبت به خاک و نمودار سمت چپ مقادیر کرنش است).

جدول ۸. نتایج تنش و کرنش به دست آمده برای مدل‌های PS-۹ الی PS-۱۴.

| نمونه | کرنش | تنش (N/mm^2) |
|-------|---------|---------------------|
| PS-۹ | ۰٫۰۰۰۱۰ | ۲۲۸٫۶ |
| PS-۱۰ | ۰٫۰۰۰۱۳ | ۲۸۳٫۲ |
| PS-۱۱ | ۰٫۰۰۰۲۶ | ۳۴۰٫۷ |
| PS-۱۲ | ۰٫۰۰۰۰۱ | ۲۱۵٫۷ |
| PS-۱۳ | ۰٫۰۰۰۱۱ | ۲۲۳٫۵ |
| PS-۱۴ | ۰٫۰۰۰۱۲ | ۲۵۳٫۸ |

کمتر است و در نتیجه تغییرات کرنش به صورت تقریباً یکنواخت بوده و بیشینه مقدار کرنش با سخت‌تر شدن خاک کاهش یافته است. اما در مدل PS-۱۱ که خاک نوع III دارد، جدا شدن خاک از لوله بسیار زیاد و برابر با بیشینه مقدار ۲۲٫۵ سانتی‌متر بوده است. در نتیجه باعث رفتار نامتعادل خط لوله شده و مقادیر کرنش در ناحیه‌یی که لغزش بیشینه بوده است، به میزان بیشینه رسیده است.

همین روند در مورد مدل PS-۱۲ که خاک نوع IV دارد، نیز تکرار شده است. در مدل مذکور، بیشینه مقدار لغزش برابر با ۴۰ سانتی‌متر است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، لغزش بین خاک و لوله تأثیر بسیار زیادی در روند نتایج و مقادیر کرنش بر جای می‌گذارد. در ادامه، به بررسی تأثیر خاک‌های لایه‌یی در مقادیر کرنش خطوط لوله در مدل‌های PS-۱۳ و PS-۱۴ پرداخته شده است (شکل ۹). در مدل PS-۱۳ خط لوله در خاک نوع IV قرار دارد، ولی امواج با عبور سریع‌تر از لایه‌های پایینی به صورت موج برشی نیز در لوله اثر می‌کنند. در نتیجه، مقادیر کرنش فشاری بیشینه برابر با ۰٫۰۰۱۱ است، که ۱۰٪ بیش از مدل خاک IV است. اگرچه ورود امواج برشی باعث تغییر ماهیت تغییر شکل لوله شده است.



شکل ۸. نمودارهای پوش کرنش به دست آمده برای مدل‌های PS-۹ الی PS-۱۲ (نمودار سمت راست لغزش لوله نسبت به خاک و نمودار سمت چپ مقادیر کرنش است).

شده است. ابتدا نتایج برای مدل‌های PS-۹ الی PS-۱۲ که خاک تک‌لایه دارد، بررسی شده است (شکل ۸). در شکل مذکور، مقادیر لغزش خاک و لوله در هر نمودار در سمت راست و با نقطه‌چین و مقادیر پوش کرنش نیز در هر نمودار از سمت چپ و با خط پر نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، در نمونه‌های PS-۱۰ و PS-۹ که خاک سخت‌تری دارند، مقادیر لغزش و جدایش خاک از لوله

- کرنش‌ها می‌توان در مورد خاک‌های رسی مقدار کاهش کرنش برابر با 0.592 و در خاک‌های ماسه‌یی برابر با 0.628 را در نظر گرفت. به‌طور میانگین می‌توان گفت مقادیر کرنش در خاک‌های نوع I نسبت به نوع III مساوی 0.61 است. البته در صورت استفاده از طیف‌های بیشتر، نسبت‌های دقیق‌تر به‌دست می‌آید.
- یکی از روش‌های دقیق مدل‌سازی انتشار امواج، استفاده از المان‌های دو بعدی است. نتایج مدل‌سازی دو بعدی در مقایسه با روش متداول استفاده از جرم و فنر با اختلاف 3.4% در کرنش و با بیشینه‌ی موج برگشتی برابر با 0.5% بوده است.
 - جدایی خاک از لوله در خاک‌های سست بیشتر است و در خاک نوع III مساوی 22.5 سانتی‌متر و در خاک IV مساوی 40 سانتی‌متر بوده است. اما در خاک‌های سخت، لغزش بین خاک و لوله تقریباً ناچیز بوده است.
 - یکی از مشکلات استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی، لحاظ نکردن تأثیر لایه‌های خاک به‌صورت ناموازی است. زیرا خطوط لوله اکثراً از نواحی با لایه‌های ناموازی عبور می‌کنند. برای مدل‌سازی دقیق رفتار لرزه‌یی خطوط لوله، در واقعیت باید مدل‌سازی با در نظر گرفتن نقشه‌های توپوگرافی و مشخصات لایه‌های خاک صورت پذیرد. در مدل‌های با خاک لایه‌یی با لایه‌های ناموازی افزایش کرنش به‌وجود آمده مساوی 20% بوده است، که ناشی از شکست امواج در برخورد با سطوح ناموازی لایه‌های خاک است. در صورتی که افزایش کرنش در خاک‌های لایه‌یی موازی مساوی 10% بوده است.

در مدل PS-14، نیز به علت شکست موج در ناحیه‌ی مرز دو خاک و موازی نبودن لایه‌های خاک، مقادیر کرنش افزایش یافته و مساوی 0.12 شده است. مقدار افزایش نسبت به خاک یکنواخت برابر با 20% است. در هیچ‌کدام از دو مدل مذکور، جدایی بین لوله و خاک رخ نداده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، لایه‌یی بودن خاک تأثیر به‌سزایی در رفتار و نحوه‌ی عملکرد خطوط لوله‌دار گذاشته است. اما متأسفانه به علت زمان‌بر بودن آنالیزها، معمولاً از مدل‌سازی خاک‌های لایه‌یی با توجه به توپوگرافی محل عبور لوله صرف‌نظر شده است. حال آنکه با توجه به نتایج مشخص شد که نحوه‌ی چیدمان لایه‌های خاک، تأثیر به‌سزایی در مقادیر کرنش طراحی دارد. مقادیر کرنش و تنش برای نمونه‌های بخش دوم ($PS - 9 \sim PS - 14$) در جدول ۸ مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

- سرعت حرکت ذرات در هنگام زلزله و بسامد ارتعاش ایجاد شده ناشی از زمین لرزه، تأثیر بسیار زیادی در مقدار پاسخ‌ها دارد. لذا برای مطالعه و بررسی بیشتر، از ۵ شتاب‌نگاشت زلزله با سرعت‌های بیشینه‌ی حرکت ذره‌ی مختلف استفاده شد و این نتایج به‌دست آمد:
- با توجه به تنوع طیف‌های انتخابی در صورت میانگین‌گیری در مقادیر کاهش یافته‌ی

پانویس

1. Abaqus

منابع (References)

- Kennedy, R.P., Chow, A.M. and Williamson, R.A. "Fault movement effects on buried oil pipeline", *Transportation engineering journal of the American Society of Civil Engineers*, **103**(5), pp. 617-633 (1977).
- Choo, Y.W., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J. and et al. "Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(12), pp. 1043-1055 (2007).
- Datta, T.K. "Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review", *Nuclear Engineering and Design*, **192**(2), pp. 271-284 (1999).
- Moradi, M., Rojhani, M., Galandarzadeh, A. and et al. "Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to normal faulting", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(1), pp. 155-164 (2013).
- Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D. and Kouretzis, G.P. "Stress analysis of buried steel pipelines at strike slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(3), pp. 200-211 (2007).
- Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P. and et al. "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(11), pp. 1452-1464 (2011).
- Kouretzis, G.P., Andrianopoulos, K.I., Sloan, S.W. and et al. "Analysis of circular tunnels due to seismic P-wave propagation, with emphasis on unreinforced concrete liners", *Computers and Geotechnics*, **55**, pp. 187-194 (2014).
- Kouretzis, G.P., Sloan, S.W. and Carter, J.P. "Effect of interface friction on tunnel liner internal forces due to seismic S-and P-wave propagation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **46**, pp. 41-51 (2013).
- Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y.M.A. and et al. "Contact interface in seismic analysis of circular tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(4), pp. 482-490 (2009).
- Yu, H., Yuan, Y. and Bobet, A. "Seismic analysis of long tunnels: A review of simplified and unified methods", *Underground Space*, **2**(2), pp. 73-87 (2017).
- Joshi, Sh., Prashant, A., Deb, A. and Jain, S.K. "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion",

- Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(7), pp. 930-940 (2011).
12. Baziar, M.H., Nabizadeh, A., Mehrabi, R. and et al. "Evaluation of underground tunnel response to reverse fault rupture using numerical approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **83**, pp. 1-17 (2016).
 13. Jalali, H.H., Rofooei, F.R., Attari, N.Kh.A. and et al. "Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **86**, pp. 1-14 (2016).
 14. Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P. and et al. "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(11), pp. 1452-1464 (2011).
 15. Saberi, M., Behnamfar, F. and Vafaeian, M. "A semi-analytical model for estimating seismic behavior of buried steel pipes at bend point under propagating waves", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **11**(5), pp. 1373-1402 (2013).
 16. Saberi, M., Halabian, A.M. and Vafaeian, M. "Numerical analysis of buried steel pipelines under earthquake excitations", *Pan-Am CGS Geotechnical Conference* (2011).
 17. Kouretzis, G.P., Bouckovalas, G.D. and Karamitros, D.K. "Seismic verification of long cylindrical underground structures considering Rayleigh wave effects", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**(6), pp. 789-794 (2011).
 18. Di, H., Zhou, Sh., He, Ch. and et al. "Three-dimensional multilayer cylindrical tunnel model for calculating train-induced dynamic stress in saturated soils", *Computers and Geotechnics*, **80**, pp. 333-345 (2016).
 19. Kouretzis, G.P., Bouckovalas, G.D. and Gantes, Ch.J. "Analytical calculation of blast-induced strains to buried pipelines", *International Journal of Impact Engineering*, **34**(10), pp. 1683-1704 (2007).
 20. Ewing, W.M., Jardetzky, W.S. and Press, F. "Elastic waves in layered media", *Physics Today*, **10**, p. 27 (1957).
 21. Kuesel, T.R. "Earthquake design criteria for subways", *Journal of the Structural Division* (1969).
 22. Leimbach, K.R. and Sterkel, H.P. "Comparison of multiple support excitation solution techniques for piping systems", *Nuclear Engineering and Design*, **57**(2), pp. 295-307 (1980).
 23. O'Rourke, M.J. and El Hmadi, K. "Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16**(6), pp. 917-929 (1988).
 24. Ezzat yazdi, P. and Jahankhah, H. "Practical suggestions for 2d finite element modelling of soil-structure interaction problems", *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, pp. 25-29 (2014).
 25. Manolis, G.D., Tetepoulidis, P.I., Talaslidis, D.G. and et al. "Seismic analysis of buried pipeline in a 3D soil continuum", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **15**(4), pp. 371-394 (1995).
 26. Hosseini, M. and Ajideh, H. "Seismic analysis of buried jointed pipes considering multi-node excitations and wave propagation phenomena", *Proceedings of the Pipelines, 2001 Conference, ASCE*, San Diego, USA (2001).
 27. Hosseini, M. and Tahamouli Roudsari, M. "Minimum effective length and modified criteria for damage evaluation of continuous buried straight steel pipelines subjected to seismic waves", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **6**(4), pp. 04014018-1 - 04014018-13 (2014).
 28. O'Rourke, M.J. and El-Hmadi, K. "Earthquake ground wave effects on buried piping", *Proceedings of the 1985 Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic Performance of Pipelines and Storage Tanks* (1985).
 29. Iranian Seismic Design Code for petroleum Facilities, 3rd Edition (2016).
 30. Lin, G., Lu, Sh. and Liu, J. "Transmitting boundary for transient analysis of wave propagation in layered media formulated based on acceleration unit-impulse response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **90**, pp. 494-509 (2016).
 31. Lin, K.C., Hung, H.H., Yang, J.P. and et al. "Seismic analysis of underground tunnels by the 2.5 D finite/infinite element approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **85**, pp. 31-43 (2016).
 32. Power, M.S., Rosidi, D. and Kaneshiro, J. "Screening, evaluation and retrofit design of tunnels", Report Draft, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, 3, pp. 212-215 (1996).
 33. St. John, C.M. and Zahrah, T.F. "Aseismic design of underground structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **2**(2), pp. 165-197 (1987).
 34. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B. and et al. "Seismic design and analysis of underground structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**(4), pp. 247-293 (2001).
 35. American Lifelines Alliance (ALA), "Seismic guidelines for water pipelines", (Mar., 2005).
 36. INBC (Iranian National Building Code), "Effective load on buildings", Topic 6, MMSI, NASHR, Iran (2006).
 37. Rosenblueth, E. and Newmark, N.M. "Fundamentals for earthquake engineering", Prentice Hall (1971).
 38. O'Rourke, M.J. and Liu, X. "Response of buried pipelines subject to earthquake effects", (1999).
 39. Roudsari, M.T. "Using neural network for reliability assessment of buried pipelines subjected of earthquake", Ph.D. Thesis, Science and Research Branch of the Islamic Azad Univ., Tehran, Iran (2011).
 40. ABAQUS [Computer software], Hibbitt, Karlsson, & Sorensen.
 41. Nielsen, A.H. "Absorbing boundary conditions for seismic analysis in ABAQUS", In Proc. of the 2006 ABAQUS Users' Conference, Cambridge, Massachusetts, pp. 23-25 (2006).
 42. Wolf, J. and Hall, W. "Soil-structure-interaction analysis in time domain", No. LCH-BOOK-2008-037, A Division of Simon & Schuster (1988).

43. Zienkiewicz, O.C., Bicanic, N. and Shen, F.Q. "Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions", In *Advances in Computational Nonlinear Mechanics*, pp. 109-138, Springer Vienna (1989).
44. Ebrahimian, M. "The effect of foundation flexibility on total response of soil-structure systems", MSc Thesis, Sharif University of Technology (2009).
45. Liu, J.-B., Gu, Y. and Du, Y.-X. "Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements", *Yantu Gongcheng Xuebao (Chinese Journal of Geotechnical Engineering)*, **28**(9), pp. 1070-1075 (2006).
46. Du, X. and Zhao, M. "A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), pp. 937-946 (2010).
47. Rapti, I., Modaressi-Farahmand-Razavi, A., Foucault, A. and et al. "Coupled S-P wave propagation in nonlinear regularized micromorphic media", *Computers and Geotechnics*, **77**, pp. 106-114 (2016).
48. Zerwer, A., Cascante, G. and Hutchinson, J. "Parameter estimation in finite element simulations of Rayleigh waves", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, **128**(3), pp. 250-261 (2002).