

مدل سازی لرزه‌ای خطوط لوله مدفون با روانگرایی بخشی از خاک

سهیل مهدوی عمران، کارشناس ارشد عمران، گرایش زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت
علیرضا میرزا گل تبار روشن (نویسنده مسؤول)، استادیار گروه عمران، گرایش سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل،
Email: ar-goltabar@nit.ac.ir

چکیده: تلاش برای ایجاد یک زندگی راحت‌تر، جامعه‌ی بشری را به دنیای پیشرفته‌ی امروزی رهنمون کرده است؛ اما انسان امروزی هنوز خود را در مقابل بلایای طبیعی آسیب‌پذیر نشان می‌دهد و تلاش مجموعه‌ی بشر برای کاهش اثرات بلایای طبیعی چون سیل، آتش‌فشان و زلزله همچنان ادامه دارد. در این میان گروهی از سازه‌ها و تأسیسات به علت نیاز فوری پس از وقوع زلزله باید مورد توجه خاص قرار گیرند. راه‌ها، خطوط برق و مخابرات و خطوط لوله که شریان‌های حیاتی نامیده می‌شوند، از آن جمله‌اند. در میان شریان‌های حیاتی، سازه‌های مدفون به دلیل گستردگی در محیط شهری و تأمین نیازهای حیاتی شهروندان از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردارند. خطوط لوله که در انتقال گاز و سایر سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌طور گسترده‌ای تمام مناطق را پوشانده‌اند. این خطوط به دلیل عبور از مناطق پرجمعیت اکثراً به‌صورت پیوسته و مدفون در خاک اجرا می‌شوند. رفتار لرزه‌ای این لوله‌ها به علت اندرکنش بین خاک و لوله، متفاوت از سازه‌های رو زمینی است. در این تحقیق، نحوه‌ی مدل‌سازی اثر روانگرایی خاک بر روی لوله به این صورت است که دو فنر برشی و یک فنر نرمال بین خاک و لوله تعریف می‌شوند که در حالت روانگرایی مقاومت برشی فنرهای اصطکاکی به حداقل میل داده می‌شود. عملکرد لوله و خاک در مقابل زلزله به پارامترهای زیادی بستگی دارد. به‌طور کلی با افزایش قطر لوله، ضخامت لوله، عمق دفن، سختی خاک و اضافه شدن شاخه‌های فرعی، تنش و جابه‌جایی در وسط لوله کاهش یافته و با افزایش طول ناحیه‌ی روانگرایی تنش و جابه‌جایی وسط لوله افزایش پیدا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: خط لوله مدفون، شبکه، روانگرایی خاک، زلزله

۱- مقدمه

در حین وقوع زلزله پدیده‌هایی همچون انتشار امواج زلزله و حرکات بزرگ زمین، زمینه‌ی آسیب‌رسانی به لوله‌ها را فراهم می‌آورد که در این میان حرکات بزرگ زمین همچون حرکات گسل، زمین‌لغزش و روانگرایی خاک از مهم‌ترین عوامل به شمار می‌آید [۳]. حرکات بزرگ زمین می‌تواند ناشی از پدیده‌هایی چون گسل، زمین‌لغزش و روانگرایی خاک باشد. در واقع خطر اصلی زلزله برای خطوط

پدیده‌ای که طی آن مقاومت برشی خاک کاهش یابد، روانگرایی خاک نامیده می‌شود. عامل اصلی این پدیده افزایش فشار آب حفره‌ای و به تبع آن کاهش تنش مؤثر خاک در اثر بارگذاری در شرایط زهکشی نشده است [۱]. اصطلاح روانگرایی برای اولین بار توسط هازن استفاده شد تا شکست سد کالاوراس کالیفرنیا را در سال ۱۹۱۸ توضیح دهد [۲].

سید و همکاران [۷] یک روند تحلیل تنش مؤثر ارائه نمودند که قادر به مدل‌سازی تأثیرات افزایش فشار آب منفذی بر روی سختی برشی توده خاک بود. همچنین آنها یک فرمول‌بندی یک‌بعدی برای تعیین میزان زایل شدن فشار آب منفذی در پروسه‌ی تحلیل عددی پیشنهاد کردند. در این پروسه از دو سازوکار مجزا برای تولید و زایل شدن فشار منفذی استفاده گردید.

مسئله‌ی روانگرایی موضوع تحقیقات وسیعی قرار گرفت و توصیه و استانداردهایی در خصوص تبیین روانگرایی بر اساس داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی ارائه شد [۸].

وانگ و یه [۹] جهت تحلیل لوله‌های مدفون تحت اثر پدیده‌ی روانگرایی با تفکیک دو ناحیه‌ی روانگرا شده و نشده، یک مدل تیر ستون برای خط لوله مدفون پیشنهاد نمودند. آنگاه به روش تفاضلات محدود محاسبات انجام گرفته و ضمن مقایسه با نتایج دیگران، مطالعه‌ی پارامتریک را جهت بررسی فرآیند تأثیرپذیری و حساسیت پارامترها انجام داده است. در این مدل‌سازی خواص هندسی، مشخصات مصالح، سختی خاک، سرعت انتشار امواج برشی، اثرات خمشی و محوری، جرم و قطر لوله، جرم خاک و اثر شناوری منظور گردید.

نیشیو [۱۰] کرنش‌های دینامیکی در خط لوله مدفون ناشی از روانگرایی خاک را مورد تحلیل قرار داد. وی در یک مطالعه‌ی تجربی و ساخت مدل آزمایشگاهی پدیده‌ی روانگرایی خاک را مورد آزمایش قرار داد، سپس بر اساس نتایج تجربی حاصله یک مدل تحلیلی جهت محاسبات تئوریک ارائه نمود. در این مدل قسمتی از زمین در طول لوله که خاک روانگرا می‌شود و در مدل سازوکار شکست لوله دخالت داده شده و با به کار بردن این مدل، کرنش‌های دینامیکی محاسبه می‌شوند. نتایج وی نشان می‌دهند تحت شرایط روانگرایی قسمتی از خاک، کرنش‌های بسیار زیاد در لوله تولید می‌شوند.

هامادا و همکاران [۱۱] با به‌کارگیری نقشه‌ها و تصاویر با نقشه‌برداری هوایی قبل و بعد از زلزله‌ی سال ۱۹۸۳

لوله شامل حرکت گذرای زمین و تغییر مکان‌های ماندگار آن است. حرکت گذرای زمین سبب انتشار امواج نشأت گرفته از منبع آزادسازی انرژی، تشدید آن در اثر توپوگرافی زمین و شرایط خاک محلی می‌شود. جابه‌جایی ماندگار زمین بیانگر شکست و گسیختگی در زمین در اثر پدیده‌هایی مانند گسلش سطحی، حرکت شیروانی‌ها و زمین‌لغزش، حرکت جانبی توده‌ی خاک در اثر روانگرایی، نشست ناهمگون و ... می‌باشد. تحقیقات بعد از زلزله نشان داده که بیشترین آسیب لرزه‌ای به خطوط لوله‌ی پیوسته فولادی مدفون نفتی و گازی توسط تغییر مکان ماندگار زمین صورت می‌گیرد و تنها تعداد کمی از این آسیب‌ها ناشی از پدیده‌ی انتشار امواج است. تغییر مکان ماندگار به‌صورت شبه استاتیکی به خط لوله وارد می‌گردد و الزاماً دارای شدت زیادی نیست؛ اما ممکن است با این وجود باعث آسیب جدی خط لوله گردد. چنین آسیب‌هایی در تعداد زیادی زلزله گزارش شده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به زلزله‌های ۱۹۶۴ نیگاتا و زلزله‌ی منجیل در ایران و زلزله‌ی آلاسکا اشاره نمود [۴].

ماتسو و همکاران [۵] در مقدمه‌ی تجزیه و تحلیل خود مشاهده کردند همان‌طور که در زلزله‌های ۱۹۷۶ وانگشان در چین و زلزله‌ی ۱۹۸۳ نیهونکایی چوبو در ژاپن نشان داده شد، عامل خرابی زیاد در خطوط لوله‌ی مدفون، روانگرایی لایه‌های ماسه‌ای یا سیلتی در طی زلزله بوده است. عوامل خرابی می‌تواند به دو دسته تقسیم‌بندی شود: ۱- گسیختگی سایت و ۲- انتشار امواج زمین‌لرزه‌ای که پاسخ دینامیکی زمین‌لرزه خطوط لوله مدفون در طی پدیده‌ی روانگرایی را مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. آنها در مدل‌سازی رفتار ارتعاش محوری و نیز جانبی خطوط لوله در یک محیط خاک روانگرا تحت تحریک امواج زلزله با زاویه برخورد را بررسی نمودند.

هانگ و زینکوویچ [۶] با استفاده از تجربیات قابوسی یک برنامه‌ی کامپیوتری چند منظوره برای حل مسائل مکانیک خاک و به‌خصوص تحلیل روانگرایی تهیه کردند.

۲- مدل‌سازی و معرفی نرم‌افزار

در این تحقیق از نرم‌افزار المان محدود abaqus نسخه ۶/۱۳ استفاده شده که در ابتدا مدل‌های اولیه خاک و لوله در ماژول part با اندازه‌های معین و عمق دفن معین لوله مدل‌سازی شده، سپس در ماژول property مشخصات مصالح خاک و لوله (مدول الاستیسیته، نسبت پواسن و چگالی)، مشخصات خاک (سختی خاک در جهت x، سختی خاک در جهت y، سختی خاک در جهت z)، مشخصات هندسی لوله (قطر و ضخامت لوله) به نرم‌افزار مذکور معرفی گردیده است و سپس بعد از آن مشخصات معرفی شده به مقاطع خاک و لوله اختصاص داده شدند. بعد از این مرحله باید مدل‌های ساخته شده اولیه را در ماژول assembly با هم ترکیب کرده تا مدل نهایی خاک و لوله به دست آید. معیارهای خروجی که از نرم‌افزار خواسته می‌شوند باید در ماژول step تعریف شوند که از جمله‌ی آنها می‌توان به تنش وسط لوله، کرنش، و تغییر مکان وسط لوله اشاره کرد. در ضمن مشخصات رکوردهای شتاب زلزله و میزان خطا و غیره در این قسمت تعریف می‌شوند. در ماژول interaction اندرکنش‌های مکانیکی و حرارتی بین نواحی مدل یا بین ناحیه‌ای از یک مدل با اطراف آن مشخص می‌شوند. برای در نظر گرفتن اندرکنش میان خاک و لوله از المان‌های تماسی استفاده گردیده و رفتار تماسی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. در این حالت تنها پارامتر مورد نیاز، ضریب اصطکاک بین سطوح است که بر اساس نتایج باوان‌پوری و همکاران [۱۴] ضریب ۰/۴ انتخاب گردید. البته برای قسمت‌هایی که خاک در تماس با لوله است این ضریب تعریف می‌شود و برای مناطق روانگرا که به جای خاک از فنر استفاده شده این ضریب تماسی مصداق ندارد. در ماژول load به معرفی بارهای استاتیکی و دینامیکی وارده به مدل پرداخته می‌شود که شامل وزن خاک و لوله و نیروی uplift و رکوردهای زلزله است. در ضمن برای مدل‌سازی نیروی زلزله از رکوردهای هفت زلزله‌ی نزدیک گسل لوماپریتا، سانفرانسیسکو، طیس، آنزا، قوجالیلی، کویوته و لاندیس استفاده شده است. سپس باید مدل را در ماژول mesh، مش‌بندی نمود.

نیهونکایی چوبو و اندازه‌گیری‌ها و جابه‌جایی‌های بزرگ زمین ناشی از پدیده‌ی روانگرایی خاک را بر روی نقشه‌ها مشاهده و مورد ارزیابی قرار دادند.

وانگ و همکاران [۱۲] پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله‌ی مدفون در طی پدیده‌ی روانگرایی خاک از انتشار امواج در جهات مختلف محوری و جانبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در یک تحلیل تئوریک و محاسباتی پاسخ خط لوله نسبت به موج زلزله‌ای در یک محیط خاک میعانی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در مدل خود تنش مؤثر خاک و اثر شناوری را در نظر گرفتند و از یک سیستم فنر خاک و لوله جهت شبیه‌سازی استفاده کردند.

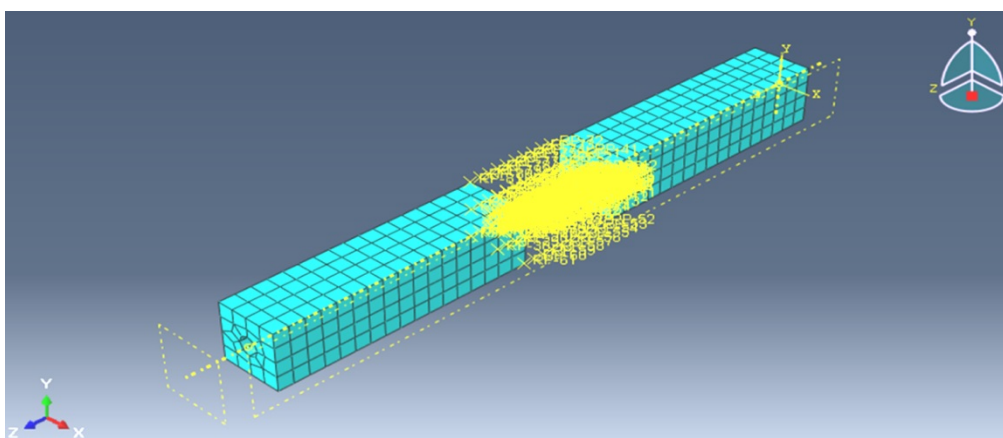
فولو [۱۳] دو روش استاتیکی جهت بررسی مسئله‌ی روانگرایی و تأثیر آن بر خط لوله‌ی مدفون ارائه کرد. خطوط لوله ممکن است تحت تأثیر روانگرایی ماسه در طی وقوع زلزله ناشی از تحریک امواج P و S قرار بگیرد. در روش اول فرض می‌شود خط لوله مستقیم تحت تأثیر روانگرایی خاک ماسه‌ای دچار تغییر شکل شده و از تئوری تیر بر بستر الاستیک جهت فرمول‌بندی مسئله استفاده شد. در روش دوم مدل‌سازی، نقطه‌ای از انحنای لوله به عنوان نقطه عطف در نظر گرفته می‌شود که در آنجا مشتق دوم تغییر مکان صفر بوده و به اعتقاد او می‌توان به عنوان یک تیر با تکیه‌گاه ساده در نظر گرفت و با حل آن می‌توان تغییر مکان و دوران در نقاط مختلف را به دست آورد.

در این پژوهش اثر روانگرایی خاک بر روی خط لوله‌ی مدفون با در نظر گرفتن دو فنر برشی و یک فنر نرمال مدل‌سازی و تعریف می‌شوند که در حالت روانگرایی مقاومت برشی فنرهای اصطکاک‌ی به حداقل تنزل داده می‌شود. عملکرد لوله و خاک در مقابل زلزله به پارامترهای زیادی بستگی دارد. بررسی‌های حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد به‌طور کلی با افزایش قطر لوله، ضخامت لوله، عمق دفن، سختی خاک و اضافه شدن شاخه‌های فرعی، تنش و جابه‌جایی در وسط لوله کاهش و با افزایش طول ناحیه روانگرایی، تنش و جابه‌جایی وسط لوله افزایش پیدا می‌کند.

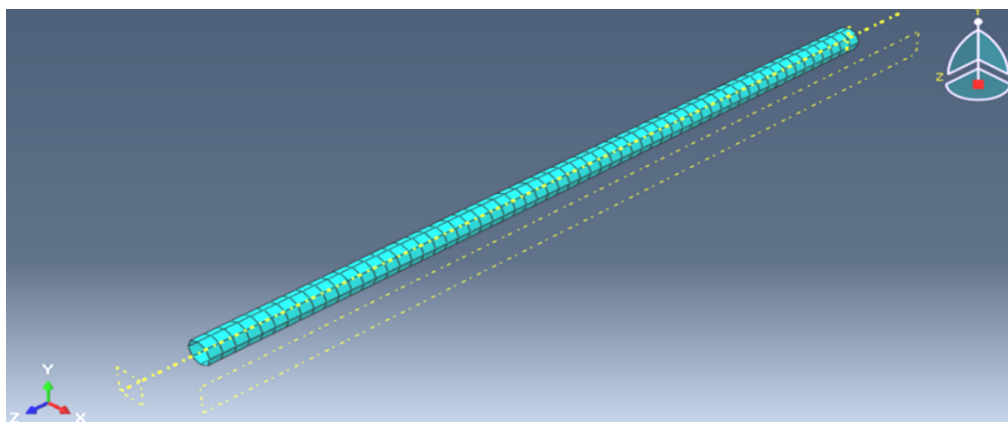
فرضیه‌هایی که برای مدل کردن لوله به کار می‌روند به این شرح هستند: ۱- از تئوری تیر بر بستر ارتجاعی برای مدل کردن استفاده می‌شود. ۲- از وزن سیال داخل لوله صرف نظر می‌شود، این فرض در مورد خط لوله‌ی گاز بیشتر مصداق پیدا می‌کند. ۳- فشار سیال داخل لوله ناچیز فرض می‌شود. ۴- از میرایی و لغزش بین خاک و لوله به علت کوچکی صرف نظر می‌شود.

تاکادا و تانابه [۱۵] در پژوهش خود از میرایی و لغزش به دلیل کوچکی صرف نظر کرد و در این تحقیق نیز با استناد به این مرجع به دلیل ناچیز بودن اثرات آن از میرایی و لغزش بین خاک و خط لوله صرف نظر شده است. ضمناً می‌توان در مدل‌سازی‌ها میرایی لوله را با میرایی خاک اطراف و حتی میرایی بین خاک و لوله را جدا در نظر گرفت؛ اما بسیاری از محققین از میرایی بین خاک و لوله صرف نظر نمودند.

نوع المان‌ها در این ماژول مشخص می‌شوند که برای معرفی خاک از المان Solid نوع C3D8R یعنی المان حجمی هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته استفاده شده است و برای معرفی لوله المان Shell نوع S4R یعنی المان چهار گره‌ای با انتگرال کاهش یافته مطابق شکل‌های (۱) و (۲) به کار رفته است. ماهیت این المان‌ها به گونه‌ای است که می‌توانند رفتارهای پیچیده‌ی غیرخطی، مانند اعوجاج ایجاد شده در لوله را مدل‌سازی کنند. در نهایت در ماژول job یک محیط تحلیلی برای تحلیل مدل تعریف می‌شود و در ماژول visualization می‌توان نتایج و خروجی‌ها را مشاهده کرد. اتصال بین لوله و خاک اطراف با انواع فنرهای نرمال و برشی مدل‌سازی گردید و با توجه به اینکه روانگرایی به معنی از دست رفتن مقاومت برشی می‌باشد در مدل‌سازی، سختی فنرهای برشی در ناحیه‌ی روانگرا نزدیک به صفر فرض گردید.



شکل (۱): المان لوله و خاک استفاده شده در نرم‌افزار.



شکل (۲): المان لوله استفاده شده در نرم‌افزار.

۳- اطلاعات ورودی به نرم‌افزار

مشخصات نمونه‌ای از لوله فولادی و خاک ماسه‌ای

سست به این شرح است:

- طول شاه‌لوله = ۶۰ متر

- قطر شاه‌لوله = ۲ متر

- ضخامت لوله = ۰/۰۱ متر

- مدول الاستیسیته لوله = ۲۰۰۰۰۰ پاسکال

- ضریب پواسون لوله = ۰/۳

- ضریب پواسون خاک = ۰/۳۵

- مدول الاستیسیته خاک = ۱۰۰۰ پاسکال

- زاویه اصطکاک داخلی خاک = ۳۰ درجه

- دانسیته خاک = ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- دانسیته لوله = ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- ابعاد المان خاک = ۴×۴×۶۰ مترمکعب

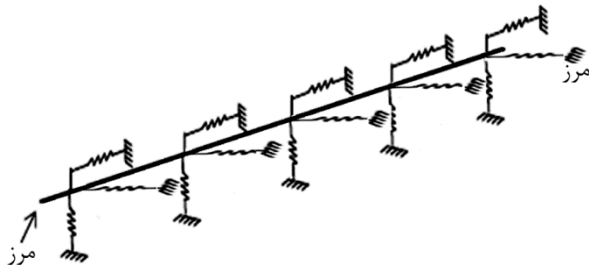
- عمق دفن لوله = ۱ متر

۴- فنرهای اتصال خاک به لوله

مقررات ASCE برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و

لوله، سختی فنرهای معادل خاک (فنرهای وینکلر) را مطابق

جدول (۱) به صورت غیرخطی ارائه کرده که مدلی تقریبی از رفتار واقعی خاک است. سختی این فنرها به پارامترهایی مانند نوع خاک، تراکم و چگالی خاک، ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک، قطر و جنس لوله و عمق دفن لوله در خاک بستگی دارد (شکل ۳).



شکل (۳): مدل اجزاء محدود لوله مدفون در خاک.

در جدول (۱)، H و D به ترتیب قطر و عمق دفن لوله، C چسبندگی خاک و $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص مؤثر است. N_{qh} و N_{ch} با استفاده از نمودارهایی توسط آیین‌نامه‌ی ALA به‌دست می‌آیند. N_q ، N_c و N_γ ، ضرایب ظرفیت باربری خاک بوده و توسط آیین‌نامه‌ی ALA ارائه شده‌اند [۱۶]. در مورد انواع مدل‌های تئوری موجود درباره‌ی روانگرایی در بخش‌های قبل تحقیق توضیح داده شد. یکی از رایج‌ترین مدل‌ها، استفاده از

جدول (۱): پارامترهای فنرهای غیرخطی.

فنر	نیروهای نهایی خاک	جابه‌جایی تسلیم خاک
محوری	$t_u = \pi D \alpha C + \pi D H \bar{\gamma} \frac{HKo}{2} \tan \delta$ $\alpha = 0.608 - 0.123C - \frac{0.274}{C^2 + 1} + \frac{0.695}{C^3 + 1}$	$\Delta_t = 0.05 \text{ cm}$
جانبی افقی	$p_u = N_{ch}CD + N_{qh}\bar{\gamma}HD$	$\Delta_p = 0.04(H + D/2) \leq (0.1 - 0.15)D$
جانبی قائم	<p>حرکت به سمت بالا:</p> $Q_u = \begin{cases} N_{ch}CD & \text{برای رس} \\ N_{qh}\bar{\gamma}HD & \text{برای ماسه} \end{cases}$ $N_{cv} = 2(H/D) \leq 10$ $N_{qh} = 2\left(\frac{\phi H}{44D}\right) \leq N_q$ <p>حرکت به سمت پایین:</p> $Q_d = N_cCD + N_q\bar{\gamma}HD + N_r\bar{\gamma}\frac{D^2}{2}$	<p>حرکت به سمت بالا:</p> <p>برای رس</p> $\Delta q_u = (0.1 - 0.2)H < 0.2D$ <p>برای ماسه</p> $\Delta q_u = (0.01 - 0.02)H < 0.1D$ <p>حرکت به سمت پایین:</p> <p>برای رس</p> $\Delta q_u = 0.2D$ <p>برای ماسه</p> $\Delta q_u = 0.1D$

که به کل حجم المان خاک و لوله اعمال می شود. بار دیگری که به المان لوله وارد می شود، فشار همه جانبه از طرف خاک روانگرا است و برآیند این نیروها همان نیروی uplift است که لوله را از پایین به بالا رانده و عکس نیروی ثقلی می باشد. در ادامه قیدهایی که محیط اطراف خاک و لوله را بسته و در جهات مختلف برای وارد کردن نیروی زلزله باز و بسته می شوند، تعیین می گردند. در نهایت نیروی زلزله با وارد کردن رکودهای شتاب-زمان هم پایه شده هفت زلزله نزدیک گسل (لوما پریتا، سانفرانسیسکو، طیس، آنزا، قوجایلی، کویوته و لاندرس) در جهات مختلف وارد می شوند تا بخش دینامیکی مدل فعال شود. در ضمن محل اعمال تحریک توسط شتاب زلزله کف المان خاک و لوله تعیین شده است.

۷- مطالعه پارامتریک

پارامترهایی که در این بخش بررسی می شوند تغییرات قطر و ضخامت لوله هستند. تغییر این پارامترها و تأثیر آنها بر پاسخ سازه روی شبکه‌ی لوله در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها، با افزایش قطر و ضخامت لوله، پاسخ سازه و تنش در وسط لوله کاهش می یابد، در ضمن خاک نیز از جنس ماسه‌ی سست است. همچنین مقادیر تنش در طول لوله در شکل (۷) و نمایش گرافیکی توزیع تنش در شکل (۸) نشان داده شده اند. همچنین این شکل‌ها نشان می دهند مقادیر تنش در منطقه‌ی روانگرا بیشتر از اطراف لوله است.

المان تیر برای لوله و فنر معادل برای اندرکنش خاک و لوله است. در این پژوهش خاک روانگرا در ۲۰ متر وسط اطراف لوله به صورت متقارن قرار دارد که برای مدل سازی آن از فنرهای معادل خاک با مقاومت برشی ناچیز استفاده می شود. در هر نقطه از لوله سه فنر در راستاهای محوری، عرضی-افقی و عرضی-عمودی در نظر گرفته شده اند. برای به دست آوردن سختی فنرهای خاکی در سه جهت از نتایج هدایتی و همکاران [۱۶] استفاده می شود.

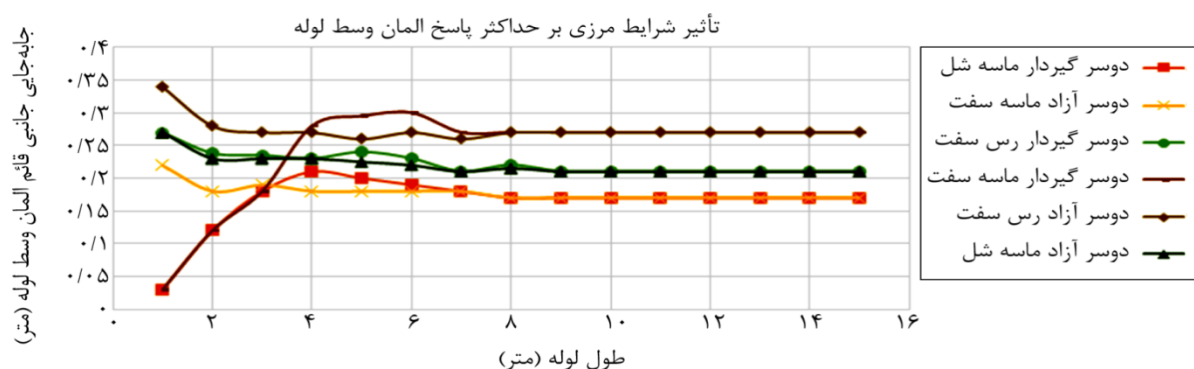
برای فنر محوری و جانبی افقی که بیانگر مؤلفه‌ی برشی خاک روانگراست عدد ۰/۱ نیوتن بر متر و برای فنرهای جانبی قائم عدد ۲۸۴۹۰۰ نیوتن بر متر در نظر گرفته شده که این عدد از ضرب سختی خاک در مساحت مؤثر مجموع پارتیشن‌های لوله محاسبه می شود. ضمناً مقادیر سختی فنر برای تغییر مکان‌های زیاد غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی نیز کاربرد دارند.

۵- تأثیر شرایط مرزی بر پاسخ لوله

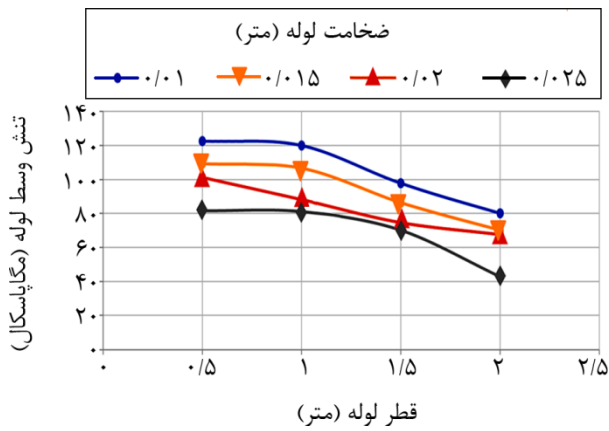
شکل (۴) تأثیر شرایط مرزی بر حداکثر پاسخ المان وسط لوله را نشان می دهد. مطابق این شکل در طول ۴ متر پاسخ لوله در حالت‌های دو سر آزاد و گیردار به هم نزدیک شده و در طول ۷ متر به طور کامل بر هم منطبق می شوند که این موضوع به دلیل بی تأثیر شدن شرایط مرزی نقاط دور بر پاسخ المان وسط لوله است [۱۷].

۶- بارهای اعمالی به مدل

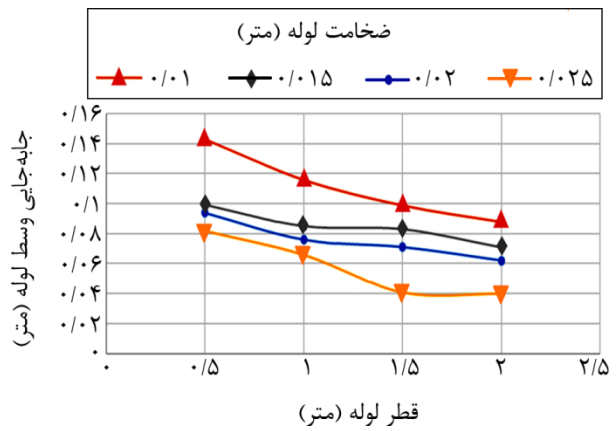
در این قسمت به معرفی وزن خاک و لوله پرداخته می شود



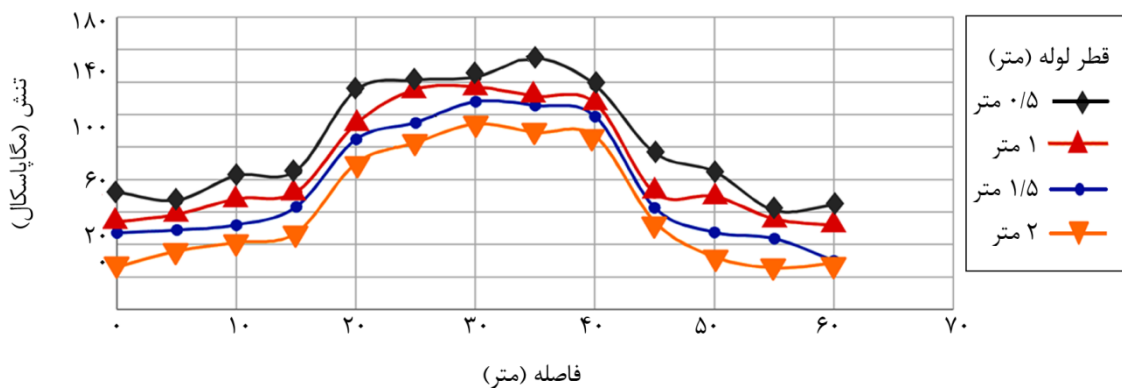
شکل (۴): تأثیر شرایط مرزی بر حداکثر پاسخ المان وسط لوله [۱۶].



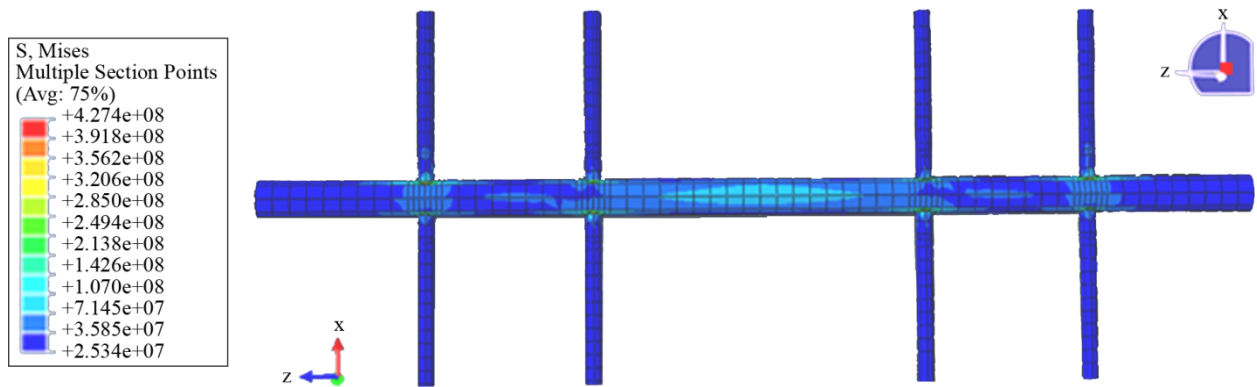
شکل (۶): نمودار تغییرات قطر و ضخامت لوله نسبت به تنش وسط لوله.



شکل (۵): نمودار تغییرات قطر و ضخامت لوله نسبت به جابه‌جایی وسط لوله.



شکل (۷): نمودار تغییرات تنش در طول لوله (قطر لوله ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر).



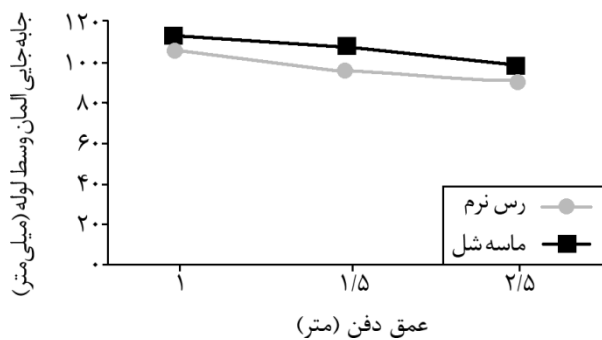
شکل (۸): عملکرد توزیع تنش در طول لوله (قطر لوله ۲ متر).

جابه‌جایی‌های نسبی ناشی از انتشار امواج و مشخصه‌های غیریکنواختی خاک اطراف لوله دارد که باید یکی از فاکتورهای مهم طراحی مقاومت زلزله‌ای لوله‌های مدفون در زمین و خاک روانگرا در نظر گرفته شود [۱۲]. پارامترهای دیگری که بر رفتار لوله می‌توانند تأثیرگذار

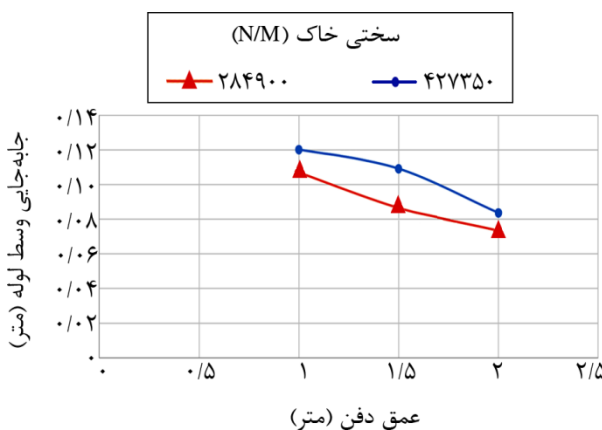
در شکل (۸)، در ناحیه‌ی روانگرا مقدار تنش بیشتر از مناطق غیر روانگرا است که این موضوع مسئله‌ی روانگرایی را بهتر و واضح‌تر نشان می‌دهد. بررسی‌های به‌عمل‌آمده روی فرآیند شکست خطوط لوله نشان می‌دهد تنش‌های وارده به لوله عامل اصلی شکست لوله بوده و تأثیر بیشتری از

پژوهش پرداخته می‌شود. جهت ملاحظه تأثیر عمق دفن لوله بر پاسخ، سه عمق متفاوت در نظر گرفته شده و تأثیر آن بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود افزایش عمق دفن لوله باعث کاهش پاسخ لوله و کاهش جابه‌جایی المان وسط لوله می‌شود. همچنین جهت بررسی تأثیر سختی خاک بر پاسخ المان وسط لوله از دو نوع خاک با سختی‌های متفاوت استفاده شده که پس از تحلیل نرم‌افزاری مشخص می‌گردد با افزایش سختی خاک، کاهش پاسخ لوله بسیار قابل توجه است. بررسی‌ها در جهات دیگر نیز نتایج مشابه فوق را نشان می‌دهد.

مشاهده‌ی همخوانی مناسب بین نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای ترسیم‌شده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) بر اساس مشاهدات صورت گرفته در تحقیقات عبدالحی [۱۷] و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در این تحقیق، نشان می‌دهد

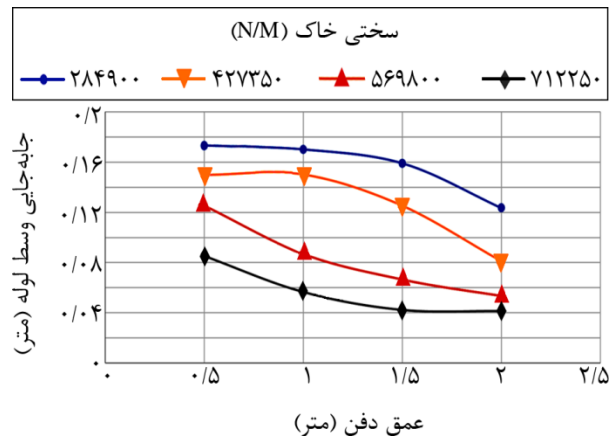


شکل (۱۱): مقایسه پارامترهای سختی خاک و عمق دفن لوله توسط مرجع [۱۷].

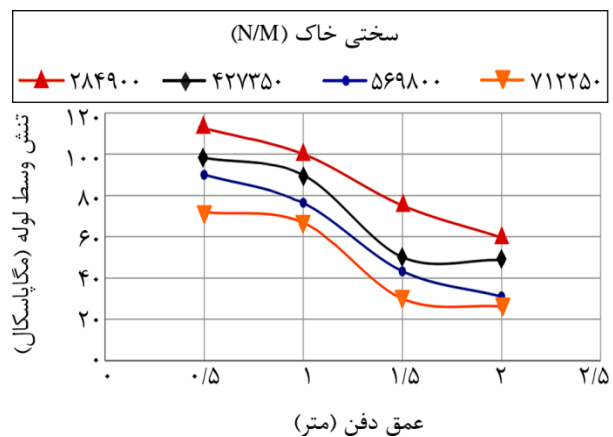


شکل (۱۲): مقایسه پارامترهای سختی خاک و عمق دفن لوله توسط پژوهش فوق.

باشد، عمق دفن لوله و سختی خاک است. اثر تغییر این پارامترها و تأثیر آنها بر پاسخ سازه بر روی شبکه لوله در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند که بر مبنای این گراف‌ها ملاحظه می‌شود با افزایش عمق دفن و سختی خاک، پاسخ سازه و تنش در وسط لوله کاهش می‌یابد.



شکل (۹): نمودار تغییرات عمق دفن و سختی خاک نسبت به جابه‌جایی وسط لوله



شکل (۱۰): نمودار تغییرات عمق دفن و سختی خاک نسبت به تنش وسط لوله.

۸- صحت‌سنجی

در این بخش به اعتبارسنجی مدل ساخته‌شده با مدل دیگر محققان پرداخته می‌شود. در این پژوهش از شرایط مشابه مدل‌سازی تحقیقات عبدالحی [۱۷] استفاده شده است. در ادامه به مقایسه پارامترهای سختی خاک و عمق دفن لوله توسط تحقیقات عبدالحی [۱۷] با نتایج مدل‌سازی این

برای طراحی لرزه‌ای خطوط لوله نفت و گاز. تهران: مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

3. Liang, J. and Sun, S. (2000) Site Effects on Seismic Behavior of Pipeline. *Pressure Vessel Tech.*, ASME, **122**, 469-475.

۴. گزارش تحلیلی شماره ۱ زلزله رودبار و منجیل ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ (۱۳۷۰) مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

5. Matsuo, O., Nishi, K., and Uzuoka, R. (1997) Numerical simulation of embankments founded on liquefied soil. *Proc. of 4th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Wuhan, 1807-1812.

6. Huang, M. and Zienkiewicz, O.C. (1998) New unconditionally stable staggered solution procedures for coupled soil-pore fluid dynamic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **43**, 1029- 1052.

7. Seed, H.B., Idris, I.M., and Arango, I. (1967) evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **109**(3), 458-482.

۸. حسینی، م.، درخشندی، م. (۱۳۸۵) راهنمای مقاوم-سازای زمین‌های سست در برابر روانگرایی. تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران).

9. Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H. (1989) Combined effect of soil liquefaction and ground displacement to buried pipelines. *P.V.P.*, **162**, 43-51.

10. Nishio, N. (1989) Dynamic strains in buried pipelines due to soil. *P.V.P.*, **162**, 83-88.

11. Hamada, M., Kubo, K., and Saito, K. (1985) Large Ground Displacement and Buried Pipe Failure by Soil Liquefaction during 1983 Nihonlai-Chubu Earthquake. *P.V.P.*, **98**(4), 11-18.

12. Wang, G., Wei, H., and Jianguo. (1995) Seismic response of buried pipelines during liquefactional. *Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, **2**, 1343-1351, Iran.

13. Fu-Lu, M. (1983) Earthquake response of

که با افزایش عمق دفن لوله و سختی خاک، جابه‌جایی وسط لوله کاهش می‌یابد و با پذیرش درصد اندکی خطا می‌توان صحت مدل عددی استفاده شده در این بخش را تأیید کرد.

۹- نتیجه‌گیری

عملکرد لوله و خاک در مقابل زلزله به پارامترهای زیادی از جمله ضخامت لوله، قطر لوله، عمق دفن لوله، سختی خاک، طول ناحیه‌ی روانگرایی و غیره بستگی دارد. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

۱. با افزایش قطر و ضخامت لوله، جابه‌جایی و تنش المان وسط لوله کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش ممان اینرسی مقطع لوله است.

۲. افزایش عمق دفن لوله، سختی خاک را افزایش می‌دهد و به همین دلیل جابه‌جایی و تنش المان وسط لوله کاهش می‌یابد.

۳. افزایش سختی خاک اطراف لوله، باعث کاهش جابه‌جایی و تنش المان وسط لوله می‌شود.

۴. لوله‌های قرار گرفته در مناطق روانگرا، آسیب‌پذیرتر از لوله‌های قرار گرفته در مناطق غیر روانگرا می‌باشند در نتیجه با افزایش طول منطقه روانگرایی لوله، جابه‌جایی و تنش المان وسط لوله افزایش می‌یابد.

در حقیقت نتیجه کاربردی پژوهش فوق شناخت رفتار خطوط لوله‌ی مدفون در خاک روانگرا است تا با استفاده از آن بتوان طراحی‌های دقیق‌تر و ایده‌آل‌تری برای خط لوله مدفون در محیط روانگرا مانند عبور لوله‌ها از خاک‌های لجن و یا ماسه‌ای و در مجاورت با آب و در برابر زلزله انجام داد.

مراجع

1. Baska, D.A. (2002) *An Analytical/Empirical Model for Prediction of Lateral Spread Displacements*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Washington, Washington.

۲. حسینی، محمود و مهران، تیو (۱۳۷۶) رهنمودهایی

fluid-filled pipeline in soil. *P.V.P.*, 77, 196-201.

۱۴. باوان پوری، حامد، خزایی، جهانگیر، و شرفی، حسن (۱۳۹۱) بررسی و مطالعه عددی تأثیر روانگرایی ناشی از زلزله بر لوله‌های مدفون گاز. دومین کنفرانس ملی سازه-زلزله-ژئوتکنیک، مازندران.

15. Takada, S. and Tanabe, K. (1985) Three dimensional response analysis of buried continuous or jointed pipeline. *P.V.P.*, 98(4), 35-42.

۱۶. هدایتی، جواد، سلطانی محمدی، مسعود، و یزدانی، محمود (۱۳۹۱) رفتار کمانشی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا. چاپ بیست و سوم، شماره دو.

۱۷. عبدالحی، مسعود (۱۳۹۰) بررسی رفتار لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون نفت. نشریه مقاوم‌سازی و بهسازی صنعت.