

### بررسی تغییر مکان‌های قائم و تنش مؤثر در تحلیل لرزه‌ای لوله‌های کارگذاری شده به روش میکروتونلینگ با استفاده از نرم‌افزار *Plaxis*

#### مقاله پژوهشی

محمد رضا عقیقی<sup>۱\*</sup>؛ حمیدرضا صبا<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی همدان، [aghighi.mr@gmail.com](mailto:aghighi.mr@gmail.com)

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، [hr.saba@tafreshu.ac.ir](mailto:hr.saba@tafreshu.ac.ir)

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

شماره صفحات: ۱ تا ۱۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11782.1449

واژگان کلیدی	چکیده
میکروتونلینگ زلزله خط لوله نرم‌افزار <i>Plaxis</i>	شبکه‌های زیرزمینی مانند خط لوله‌های فاضلاب، آب، گاز، برق و مخابرات نقش بزرگی در پیشرفت کشورها دارند. امروزه در اغلب نقاط دنیا، روش‌های سنتی لوله‌گذاری به‌صورت کانال باز، به دلیل ایجاد خرابی‌های فراوان در سطح شهر و بروز اختلالات بسیار در زندگی شهروندان، وارد آوردن خسارات مختلف به تأسیسات زیر بنایی، صرف زمان زیاد و هزینه‌های گزاف، جای خود را به روش‌های جدید از جمله حفاری به روش میکروتونلینگ داده‌اند. البته این سازه‌ها همانند دیگر سازه‌های زیرزمینی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در برابر بارهای دینامیکی داخلی یا خارجی و یا امواج زلزله مقاومت کنند. در این پژوهش سعی شده با مدل‌سازی نمونه‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار <i>PLAXIS</i> ، خروجی‌های به‌دست‌آمده در بحث نشست و میزان تنش‌های مؤثر با یکدیگر مقایسه گردند. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از رکورد زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد، با افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها، تغییر مکان‌ها و تنش مؤثر کاهش می‌یابد، هر چه مقطع لوله بزرگتر باشد، حساسیت آن به زلزله بیشتر است، هر چه سطح تراز آب بیشتر شود، تغییر مکان‌ها بیشتر می‌شود.

#### ۱- پیش‌گفتار

هم‌اندازه احداث پوشش دائمی صورت می‌گیرد؛ همچنین عدم نیاز به نیروی انسانی در داخل تونل از ویژگی این روش است (Atalah., 2013).

در این روش به‌جای گودبرداری سرتاسری در معابر و خیابان‌ها، در فواصل معینی که با توجه به جنس خاک، نوع کاربری، ابعاد لوله و ویژگی‌های طراحی خطوط انتقال فاضلاب تعیین می‌شود، حفره‌هایی به نام چاه رانش و چاه دریافت با عمق موردنظر ایجاد و پس از تحکیم بستر و دیواره‌های آن، ماشین‌آلات حفاری و جک‌های هیدرولیک ویژه لوله‌رانی به درون آن منتقل می‌شوند و هم‌زمان با حفر کانال در فاصله بین چاه رانش تا چاه دریافت، لوله‌ها یکی

امروزه با فناوری‌های جدید دیگر نیازی به حفاری خیابان‌ها نیست و همین امر از ایجاد ترافیک و صدمه‌زدن به محیط‌زیست جلوگیری می‌نماید و همچنین با به‌کارگیری آخرین فناوری روز دنیا اجرای پروژه‌های لوله‌گذاری برای کابل‌کشی برق، مخابرات، گاز و آب و فاضلاب آسان شده است. حفاری به روش میکروتونلینگ (شکل ۱) جهت اجرای هرگونه خط لوله تأسیسات شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش نیازی به احداث ترانشه یا تونل پیشرو و یا چاه‌های تنفسی نمی‌باشد و حفر تونل هم‌زمان و

\* همدان؛ خیابان شهید فهمیده؛ خیابان مردم؛ دانشگاه صنعتی همدان؛ کدپستی: ۶۵۱۶۹۱۳۷۳۲؛ صندوق پستی: ۵۷۹-۶۵۱۵۵؛ شماره‌ی تلفن:

## ۲- مروری بر مطالعات پیشین

به دنبال آسیب دیدن متعدد خطوط لوله‌ها، پژوهشگران تحقیقات گسترده‌ای را برای در نظر گرفتن اثرهای ناشی از زلزله بر خطوط لوله‌های مدفون انجام دادند. روش‌های ابتدایی بر پایه پیروی کردن خط لوله از تغییر مکان‌های پدید آمده در زمین بود. این روش‌ها با آنکه روشی ساده بودند، ولی به سبب چشم‌پوشی کردن از بسیاری پارامترهای مؤثر، خیلی محافظه‌کارانه بودند. بعدها با کامل‌تر شدن پژوهش‌ها و پیشرفت علم، محققین ضریب پواسون، پیروید طبیعی ارتعاش، سرعت انتشار موج و مدول یانگ توانستند، اقدام به وارد کردن پارامترهای چون قطر، ضخامت، مدول یانگ و پوشش لوله، ویژگی اتصالات و نیز مشخصات زلزله نموده و روش‌های دقیق را بنا نهند. اکثر مطالعات انجام‌شده در ارتباط با لوله‌های مدفون در خاک مربوط به لوله‌های تحت فشار (آب یا گاز) است و لوله‌های که فشار سیال داخل لوله در حد اتمسفر است، مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

در پژوهشی رفتار لوله مدفون در خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش معادلات حاکم، مدل تشکیل‌دهنده خاک و روش المان محدود بررسی شده است. تحلیل با دو مورد آزمایش میز لرزان به وسیله لوله‌های کارگذاری شده در خاک با شتاب  $30 \frac{m}{s^2}$  مقایسه شده‌اند. خاک مورد استفاده شن و ماسه سست نوادا بوده که مستعد روانگرایی است. پاسخ زمین مانند شتاب، فشار اضافی آب حفره‌ای، فشار زمین و نشست بخشی از لوله مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج تجزیه و تحلیل نشان داده شده است. (Wang, et al., 1993)

در پژوهشی با توجه به این‌که بسیاری از مطالعات بر اساس پاسخ به خط لوله مدفون انجام شده است؛ بنابراین سیستم خط لوله در پژوهش مذکور در اصل شامل سه زیرسیستم است. مطالعه دقیق در مورد سه زیرسیستم در پاسخ به خط لوله به دلیل حرکت زلزله انجام شده است. بخش اول اساساً رفتار سیستم خط لوله و بخش دوم به مطالعه اثر پارامترهای مختلف زیرسیستم در پاسخ به خط لوله است (New, et al., 2003).

در پژوهشی با ساختن مدل‌های ساده و مقایسه کردن نتایج تحلیل عددی انجام‌گرفته با روش‌های ریاضی، قدم‌به‌قدم به هدف اصلی که مدل‌سازی می‌باشد نزدیک

پس از دیگری به درون کانال رانده‌شده و با پایان یافتن حفر کانال، کار لوله‌گذاری نیز به اتمام رسیده و دستگاه حفاری از چاه دریافت خارج می‌شود (Boyce, et al., 2010).

این سامانه توانایی حفاری در هر عمق را با طول ۷۰ متر از هر طرف دارد. واحدهای تولید و تأمین نیرو، حفاری و سیستم هدایت‌کننده از جمله قسمت‌های مختلف این سامانه است و بخش هدایت‌کننده، مهم‌ترین بخش و در حقیقت چشم سامانه برای هدایت مته حفاری در مسیرها و شیب‌های مختلف است. سرعت حفاری و لوله‌گذاری این دستگاه ده متر در ساعت است. سامانه هدایت‌کننده که از مدرن‌ترین سامانه‌های روز دنیا است، به دستگاه کمک می‌کند که حفاری در مسیر و شیب دلخواه بدون هیچ‌گونه انحرافی صورت گیرد.



شکل ۱- روش میکروتونلینگ

شریان‌های حیاتی مانند خط لوله‌های آب، گاز، برق، فاضلاب و مخابرات که نقش بزرگی در پیشرفت کشورها دارند، دارای سه ویژگی مهم، گستردگی زیاد، وابستگی عملکرد آن‌ها به یکدیگر و تشدید آسیب‌دیدگی به علت اثر متقابل آن‌ها با سازه‌های دیگر هستند. اختلال در سرویس‌دهی یک شبکه حیاتی ممکن است، باعث تشدید خسارت‌های بعدی مثل حریق، قطع ارتباطات و انفجارهای دیگر با گسترش بیماری‌های واگیردار شود (Atalah, 2013).

امروزه با توجه به ویژگی‌های زندگی شهرنشینی و وابستگی آن به صنعت و فناوری نوین، شبکه خطوط لوله‌ها به سرعت در حال گسترش است. این سازه‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در برابر بارهای دینامیکی داخلی یا خارجی و یا امواج زلزله مقاومت کنند.

می‌شود. برای این منظور ارتباط دامنه و فرکانس موج ورودی با ابعاد مش بهینه موردبررسی قرار گرفته و ارتباط بین این پارامترها مشخص شد؛ همچنین انتشار موج در محیط‌های سه‌بعدی و تأثیر شرایط مرزی بی‌نهایت نیز موردبررسی قرار گرفته است (Seed, et al., 2004).

در پژوهشی ارزیابی کمی آسیب‌پذیری یک خط لوله به‌صورت واقعی است و به این صورت بوده است که بخش مناسبی از خطوط لوله نفت انتخاب‌شده است و مشخصات خاک مسیر لوله نیز با مطالعه دقیق و نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده است و درنهایت، متناسب با سایت خط لوله، از رکورد زلزله استفاده‌شده است. سپس با فترهای الاستو پلاستیک غیرخطی سه‌بعدی و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی از نرم‌افزار المان محدود جهت تحلیل مدل مزبور استفاده‌شده است و مدل هم به این صورت بوده است که در فواصل دو متری، سه المان فنر در سه جهت که بیانگر مشخصات خاک منطقه در سه جهت باشد، قرار داده‌شده است (Wen, et al., 2004).

در پژوهشی مطالعه بر روی تجزیه و تحلیل لرزه‌ای لوله‌های مدفون متصل انجام‌گرفته است که در آن چند گره ورودی، انتشار موج خاک و همچنین خط لوله در نظر گرفته‌شده است. برای این منظور برنامه کامپیوتری، برای سازه‌های دوبعدی تهیه‌شده است که می‌تواند به تغییر شکل محوری، خمشی و تغییر شکل برشی را در بخش‌های مختلف لوله ارائه دهد. با این برنامه همچنین ساختار خاک با مدل‌سازی خاک انجام می‌گیرد و اطراف لوله به‌عنوان جرم و تعدیل‌کننده سیستم‌های که به لوله وصل می‌شوند در نظر گرفته می‌شود (Liu, et al., 2005).

در پژوهشی بر روی خطوط لوله نفت و گاز فراساحل انجام‌شده است که معمولاً از نقطه شروع انتقال تا نقطه انتها تحویل محصول از میان مناطق جغرافیایی وسیع فعال لرزه‌ای می‌گذرند. خرابی لوله‌های نفت و گاز ناشی از زلزله باعث زیان مالی قابل‌توجهی شده که از جمله این زیان‌ها می‌توان توقف در روند سرویس‌دهی، بروز آتش‌سوزی، انفجار و آلودگی محیط‌زیست را نام برد. برای خطوط لوله غیر مدفون، هم انتشار موج زلزله و هم تغییر شکل دائمی زمین می‌تواند در خط لوله با توجه به هندسه خط لوله و سازه‌های متصل خرابی ایجاد کند. گذر از خط گسل از مهم‌ترین

خطرات موجود برای لوله‌های فراساحل چه به‌صورت مدفون و چه به‌صورت غیر مدفون قرار گرفته بر بستر دریا است؛ همچنین انتشار موج ناشی از زمین‌لرزه بسته به شدت زلزله و نوع خاک سایت، می‌تواند به خطوط لوله غیر مدفون و تجهیزات متصل به آن صدماتی را وارد آورد. به‌طور کلی تحلیل زلزله تغییر شکل دائمی زمین برای خطوط لوله مدفون و غیر مدفون و تحلیل زلزله انتشار موج برای خطوط لوله غیر مدفون جهت طراحی سیستم‌های خطوط لازم می‌باشند. با توجه به طبیعت غیرخطی وسیع این مسئله، تحلیل المان محدود کامل‌ترین ابزار جهت طراحی خط لوله زیر دریا تحت بارگذاری ناشی از زلزله است. مدل‌سازی المان محدود غیرخطی توانایی تحلیل دقیق تنش/ کرنش خط لوله در نقاط مختلف در طول مسیر خط لوله با بعد وسیعی از پارامترها را دارا می‌باشد. در این تحقیق اثرات انواع پیامدهای زلزله شامل انواع گسل امتداد لغز، نرمال، معکوس، مورب معکوس و مورب مورب نرمال و همچنین انتشار موج ناشی از زلزله بر روی پاسخ‌های خط لوله فراساحلی غیر مدفون قرار گرفته و بستر دریا تحت زلزله‌های ۵، ۶ و ۷ ریشتر که زلزله‌های محتمل دریا هستند، در دو حالت عدم بهره‌برداری در شرایط بحرانی بررسی شد؛ همچنین اثرات دو نوع خاک محل سایت و نیز اثرات گیرداری انتهای خط لوله در رفتار خط لوله موردبررسی قرار گرفته است.

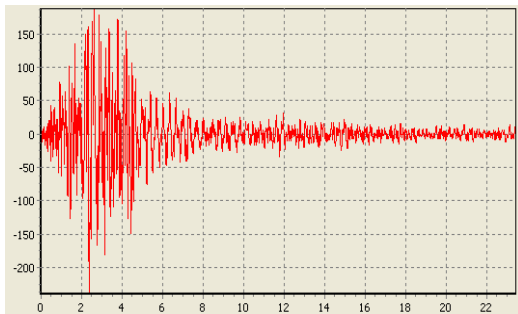
در این پژوهش سعی شده با مدل‌سازی نمونه‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS، خروجی‌های به‌دست‌آمده در بحث نشست و میزان تنش‌های مؤثر با یکدیگر مقایسه گردند.

### ۳- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در

#### مدل‌سازی‌ها

به‌منظور تحلیل دقیق لرزه‌ای از سه شتاب‌نگاشت متفاوت استفاده‌شده است تا بررسی‌های دقیق‌تر صورت پذیرد. شتاب‌نگاشت‌ها مربوط به زلزله ۲۵ شهریور ۱۳۵۷ طبس، زلزله آپلند و زلزله ترکیه می‌باشند.

- زلزله ۲۵ شهریور ۱۳۵۷ طبس: حدود ساعت ۷ و ۳۶ دقیقه بعد از ظهر ۱۳۵۷/۶/۲۵ (ساعت ۱۵ و ۳۵ دقیقه و ۵۶ ثانیه به وقت گرینویچ) (روز ۱۶ سپتامبر



شکل ۳- شتاب‌نگاشت زلزله آپلند



شکل ۴- شتاب‌نگاشت زلزله ترکیه

### ۳-۱- بارگذاری

امروزه به دلیل نیاز روزافزون به استفاده از لوله‌های زیرزمینی تأسیسات و با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران، ضرورت بررسی رفتار این سازه‌ها در برابر زلزله بیش‌ازپیش احساس می‌شود. طراحی سازه‌های زیرزمینی برای مقاومت در برابر زلزله نسبت به طراحی لرزه‌ای سازه‌های سطحی دارای جنبه‌های متفاوتی است. یکی از نکات مهم که در تحلیل‌های دینامیکی باید مورد توجه قرار گیرد، نحوه اعمال بارگذاری دینامیکی است. این بارگذاری معمولاً به صورت اعمال یک زلزله در تراز سنگ‌بستر میسر است. با توجه به این موضوع که بررسی انجام‌شده در این پژوهش تحلیل لرزه‌ای است، لذا برای اعمال زلزله از سه شتاب‌نگاشت زلزله ۱۳۵۷ طیس، زلزله ۱۹۹۰ آپلند و زلزله ۱۹۹۹ ترکیه استفاده شد (شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴) بدین معنی که تغییرات شتاب زلزله‌های مذکور به عنوان ورودی زلزله به سنگ‌بستر اعمال شد که همان تراز صلب انتهایی مدل است.

۱۹۷۸) شهر طیس به وسیله یکی از بزرگ‌ترین زلزله‌های قرن اخیر ایران با بزرگی ۷٫۴ ریشتر به لرزه درآمد و شهر زیبا و تاریخی طیس با سابقه بیش از ۱۰۰۰ سال قدمت به کلی ویران و ۳۰ آبادی خراب و به ۱۰۰ آبادی دیگر خسارت وارد شد و بیش از ۱۵۰۰۰ هزار نفر کشته و مصدوم شدند. شتاب‌نگاشت زلزله مذکور در شکل ۲، نشان داده شده است.

زلزله ۱۹۹۰ آپلند: منطقه آپلند در نزدیکی کالیفرنیا در کشور آمریکا است. این منطقه در نزدیک گسل فعال سان‌خوزه قرار گرفته است و همه‌ساله هزاران مورد زلزله با شدت‌های کوچک و متوسط در این منطقه رخ می‌دهد. این شتاب‌نگاشت یکی از صدها زلزله اتفاق افتاده در این منطقه با بزرگی ۵/۷ ریشتر است. شتاب‌نگاشت زلزله مذکور در شکل ۳، نشان داده شده است.

زلزله ترکیه: این زلزله مهیب در ۱۷ آگوست ۱۹۹۹ مناطق شمال غرب ترکیه را به لرزه درآورده است، بزرگی این زلزله ۷/۴ درجه در مقیاس ریشتر بوده است و بیش از ۱۷ هزار کشته بر جای گذاشته است. این زلزله بخش‌های وسیعی از مناطق شمال غرب ترکیه به خصوص در استان‌های بولو، ازمیت، آراپازی و استانبول رخ داد و موجب کشته شدن هزاران نفر و زخمی شدن هزاران تن دیگر شد، بسیاری از مناطق ترکیه بر روی خطوط گسل فعال زلزله واقع شده است و همه‌ساله هزاران مورد زلزله با شدت‌های کوچک و متوسط در این کشور رخ می‌دهد. شتاب‌نگاشت زلزله مذکور در شکل ۴، نشان داده شده است.



شکل ۲- شتاب‌نگاشت زلزله طیس

#### ۴-مدلسازی عددی و مبانی تحلیل

##### دینامیکی

در این پژوهش جهت مدلسازی عددی از نرم‌افزار المان محدود *PLAXIS* استفاده شده است. بدین‌صورت که لوله و بخشی از محیط اطراف آن مدلسازی شده و کل مجموعه مورد تحلیل قرار گرفته است. ویژگی‌های مکانیکی خاک مدلسازی شده در جدول ۱، نشان داده شده است. لوله‌های که در مدلسازی‌ها استفاده شده است با قطر ۱/۴ متر و از نوع بتن پلیمری در نظر گرفته شده است (در پروژه‌های لوله رانی به روش میکروتونلینگ از لوله بتن پلیمری استفاده می‌گردد که در جدول ۲، مشخصات لوله مذکور آورده شده است). در مدل کردن این لوله فرض شده است که حفاری آن با دستگاه میکروتونلینگ انجام شده و بلافاصله بعد از حفاری لوله‌ها نصب شده است. ویژگی‌های لوله مدلسازی شده در جدول ۳، نشان داده شده است. با توجه به طول زیاد لوله در مقایسه با مقطع آن، از مدل دوبعدی کرنش مسطح استفاده شده است. جهت کم تأثیر کردن شرایط مرزی محیط اطراف در هر طرف با شرایط مرزی تکیه‌گاهی غلتکی مدل شده است. در این حالت لازم است تا اطراف محیط با استفاده از مرزهای جاذب انرژی محصور شود تا از انعکاس امواج به داخل حوزه جلوگیری به عمل آید. ایجاد مرزهای جاذب در مدلسازی در شکل ۵، نشان داده شده است. در شکل مذکور مرزهای طرف راست و چپ و پایین، مرزهای جاذب هستند و مرز بالایی سطح آزاد است. مرزهای جاذب برای جذب افزایش تنش‌ها روی مرزها استفاده می‌شوند که از بارهای دینامیکی ناشی می‌شود، وگرنه این افزایش‌ها به طرف خاک بازتاب خواهند کرد.

##### ۴-۱- مدل‌سازی‌ها

با توجه به تغییر در عمق کارگذاری لوله‌ها در پروژه‌های مختلف، در این پژوهش فرض شده است، لوله‌ها در عمق‌های بین ۵ تا ۱۲/۵ متر کارگذاری شده‌اند، لذا عمق مدل‌ها بین ۱۰ تا ۲۵ متر در نظر گرفته شده است و طول بهینه مدل‌ها ۵۰ متر تعیین گردید. با توجه به بازتاب امواج زلزله بر روی کناره‌ها بهترین محل جهت قرارگیری لوله در مدل‌ها مرکز مدل است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی محیط لایه بکار رفته در

مدل‌ها		خاک
الاستیک خطی	واحد	زهکشی شده
وزن مخصوص غیراشباع	$kN/m^3$	۱۷
وزن مخصوص اشباع	$kN/m^3$	۱۷
فرسایش‌پذیری $x$	$m/s$	۰
فرسایش‌پذیری $y$	$m/s$	۰
تخلخل اولیه	-	۱
ضریب یکنواختی	-	۰
نسبت تخلخل مرجع	$kN/m^2$	۳۰۰۰
ضریب پواسون	-	۰/۲
وزن مخصوص غیراشباع	$kN/m^3$	۱۷
نفوذپذیری		خنثی

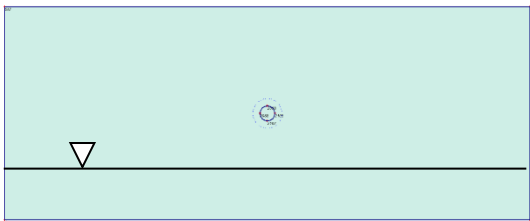
جدول ۲- مشخصات فنی لوله‌های بتن پلیمری مخصوص

لوله رانی					
قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	ضخامت دیواره (mm)	طول لوله (m)	فشاری مجاز در لوله رانی (Ton)	نیروی وزن لوله (Kg/m)
۱۴۰۰	۱۷۲۰	۱۶۰	۳	۷۵۴	۱۷۵۰

جدول ۳- مشخصات جنس لوله بکار رفته در مدل‌ها

شماره	واحد	صفحه
سختی نرمال	$kN/m$	۵۶
سختی خمشی	$kNm^2/m$	۹۰۰۰۰
وزن	$kN/m/m$	۵

نظر گرفته شده است. به این صورت که کف مدل تراز صفر صفر در نظر گرفته شده و سپس تراز آب بر مبنای کف مدل افزایش پیدا کرده است. مدل‌ها بر اساس سطح تراز آب صفر صفر، سطح تراز آب ۵+ از کف، سطح تراز آب ۱۰+ از کف، سطح تراز آب ۱۱+ از کف، سطح تراز آب ۱۵+ از کف و سطح تراز آب ۲۰+ از کف ایجاد شده‌اند. در شکل ۸، مدل با سطح تراز آب ۵+ نمایش داده شده است.

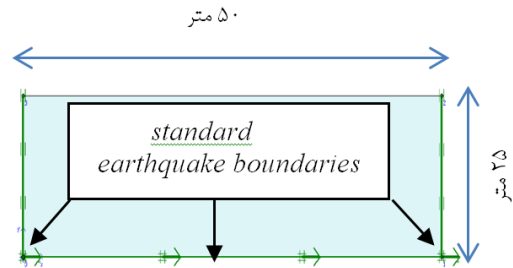


شکل ۸- نحوه مدل‌سازی تغییر سطح تراز آب (سطح تراز آب ۵+ از کف مدل)

با توجه به دلایل زیر در این تحقیق از تحلیل دوبعدی بجای تحلیل سه‌بعدی استفاده شده است: طول زیاد بعد سوم نسبت به دو بعد دیگر، سختی زیاد بعد سوم و کرنش خیلی کم آن و همچنین این نکته که به دست آوردن کرنش‌ها در این تحقیق مورد نظر نبوده است. با توجه به طول زیاد لوله در مقایسه با مقطع آن، از مدل دوبعدی کرنش مسطح استفاده شده است. مدل‌سازی با توجه به طول زیاد لوله‌ها به صورت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و تحلیل‌ها بر این اساس انجام می‌گردد. مدل کرنش صفحه‌ای در جاهایی بکار می‌رود که هندسه مدل دارای مقطع عرضی یکنواخت (کمتر یا بیشتر) باشد و حالت تنش وابسته به آن و آرایش و ترتیب بارگذاری آن بر روی طول یکنواخت عمود بر مقطع عرضی (جهت z) باشد. تغییر مکان‌ها و کرنش‌ها در جهت z صفر در نظر گرفته می‌شود.

## ۵- بحث و بررسی نتایج

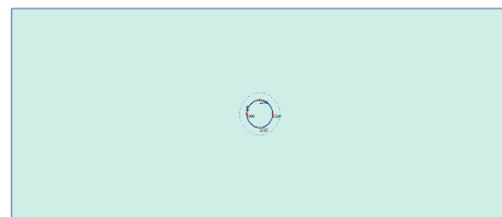
پس از مدل‌سازی و تحلیل صورت گرفته، خروجی نرم‌افزار در قسمت‌های مختلف به شرح زیر ارائه گردیده است. شکل ۹ و شکل ۱۰، تغییر مکان‌های قائم نسبت به عمق، در زلزله‌های طبس، ترکیه و آبلند را نشان می‌دهند.



شکل ۵- مرزهای جاذب

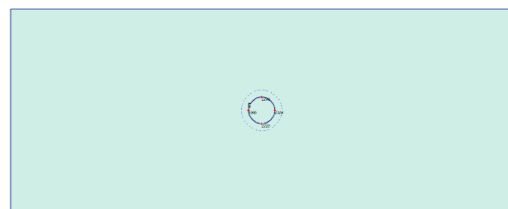
مدل‌سازی‌ها بر اساس، عمق کارگذاری لوله، تغییر قطر لوله، اثر ابعاد المان‌بندی، تراز آب و محل قرارگیری لوله در مش‌بندی انجام گرفته است.

- بررسی تأثیر عمق کارگذاری لوله: جهت بررسی تأثیر عمق کارگذاری لوله، مدل‌سازی با تغییر عمق کارگذاری لوله در فواصل ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متری از سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در شکل ۶، عمق کارگذاری لوله در فاصله ۱۲/۵ متری از سطح زمین نشان داده شده است.



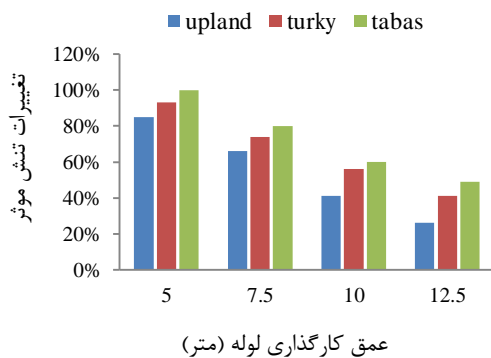
شکل ۶- عمق کارگذاری لوله در فاصله ۱۲/۵ متری

بررسی تأثیر تغییر قطر لوله: در این بخش تعدادی مدل با تغییر قطر لوله مدل‌سازی شده‌اند. قطر لوله‌های این مدل‌ها ۱، ۱/۴ و ۲/۶ متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۷، مدل با قطر لوله ۲/۶ متر نشان داده شده است.

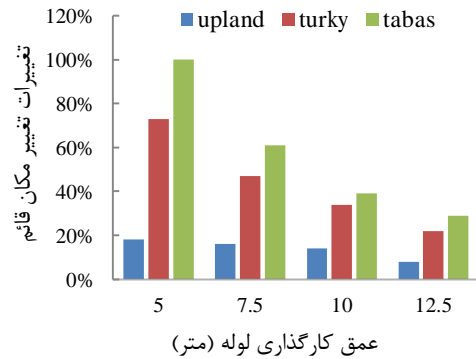


شکل ۷- مدل با قطر لوله ۲/۶ متر

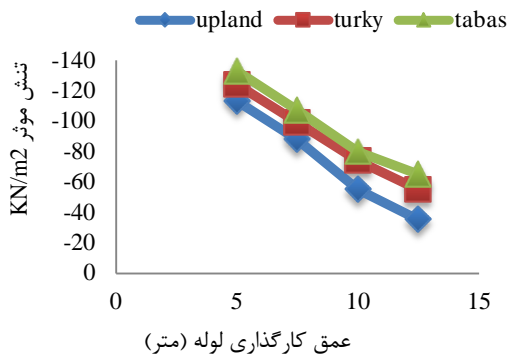
- بررسی تغییر تراز آب: در این قسمت تأثیر تغییر تراز آب مدل‌سازی گردیده است. مبنای تراز آب از کف مدل در



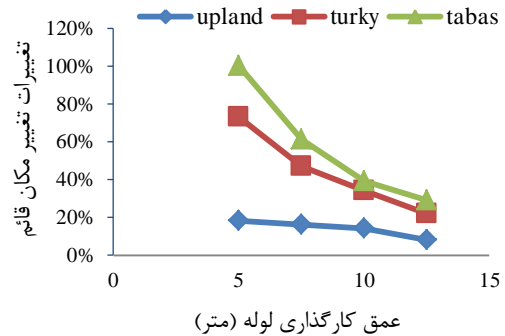
شکل ۹- مقایسه درصد تغییرات تنش مؤثر نسبت به عمق در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند



شکل ۱۰- مقایسه درصد تغییرات تغییر مکان قائم نسبت به عمق در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند



شکل ۱۱- مقایسه درصد تغییرات تنش مؤثر نسبت به عمق در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند



شکل ۱۲- مقایسه درصد تغییرات تغییر مکان قائم نسبت به عمق، در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند

شکل ۱۳، درصد تغییرات تغییر مکان قائم نسبت به تغییر قطر لوله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، لوله با قطر کمتر، تغییر مکان کمتر و لوله با قطر بیشتر، تغییر مکان بیشتر را ایجاد می‌کند.



شکل ۱۳- درصد تغییرات تغییر مکان قائم نسبت به عمق در مدل‌های با تغییر قطر لوله

همان‌طور که در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، بیشترین تغییر مکان قائم متعلق به زلزله طبرس است. با توجه به شکل ۹ و شکل ۱۰، در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند مشاهده می‌گردد، هر چه لوله در عمق بیشتری کارگذاری شود، تغییر مکان قائم کمتر می‌شود.

در شکل ۱۱ و شکل ۱۲، تغییرات تنش مؤثر نسبت به عمق در زلزله‌های طبرس، ترکیه و آپلند نمایش داده شده است. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، بیشترین درصد تغییرات تنش مؤثر متعلق به زلزله طبرس است و هر چه عمق کارگذاری بیشتر می‌شود، تنش مؤثر کاهش می‌یابد.



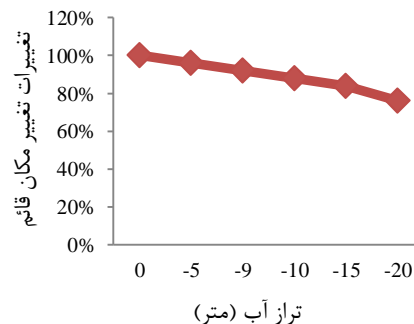
پس هر چه سطح تراز آب بیشتر شود، تغییر مکان قائم بیشتر می‌شود، یعنی تراز آب شرایط بحرانی را به وجود می‌آورد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ذکر این مورد که در تمامی شرایط، مطالعه دقیق آب‌های زیرزمینی باید انجام شود، زیرا منشا بزرگ‌ترین مشکلات در طول احداث بناهای زیرزمینی، آب است ضروری به نظر می‌رسد.

## ۶- نتیجه‌گیری

سازه‌های زیرزمینی خصوصیات خاصی دارند که رفتار لرزه‌ای، آن‌ها را از اکثر سازه‌های سطحی متمایز می‌نماید. برجسته‌ترین این خصوصیات محصورشدگی کامل آن‌ها در خاک یا سنگ و نیز طول قابل‌توجه آن‌ها است. ضمناً این سازه‌ها در برابر زلزله نسبت به سازه‌های سطحی آسیب‌پذیری کمتری دارند؛ لذا در مقابل زلزله، نسبت به سایر سازه‌های سطحی پایدارترند؛ چراکه جابجایی زمین، دامنه حرکات، شتاب و سرعت ذره‌ای زمین عموماً با زیادشدن عمق، کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده در خصوص تأثیر عمق کارگذاری لوله‌ها با استفاده از چند زلزله مختلف این نکته را تأکید می‌نماید که با افزایش عمق کارگذاری لوله تغییر مکان‌های قائم و تنش مؤثر کاهش می‌یابد. پس لوله‌های که در عمق بیشتری کارگذاری شده‌اند، در مقابل خطرات زلزله ایمن‌تر هستند. هر چه مقطع لوله بزرگ‌تر باشد، حساسیت آن به زلزله بیشتر است؛ لذا از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش قطر لوله تغییر مکان‌ها بیشتر می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، هر چه سطح تراز آب بیشتر شود، تغییر مکان‌ها بیشتر می‌شود؛ یعنی تراز آب شرایط بحرانی را به وجود می‌آورد. پس نیاز است شرایط تراز آب را در محاسبات در نظر گرفته شود.

ایجاد حفره زیرزمینی باعث رها شدن تنش می‌شود که موجب پخش مجدد میدان تنش در پیرامون فضای زیرزمینی حفاری شده می‌گردد و تغییر شکل‌هایی را در مصالح سازنده اطراف لوله می‌شود. توزیع مجدد تنش وابسته به شرایط زمین‌شناسی است و می‌تواند حالتی پیچیده داشته باشد. از عوامل مؤثر دیگر می‌توان شکل و اندازه لوله را نام برد. هر چه قطر لوله بیشتر شود، تغییر مکان قائم بیشتر می‌شود؛ لذا هر چه مقطع لوله بزرگ‌تر باشد، حساسیت آن به زلزله بیشتر است. پس اگر قطر لوله‌ها افزایش یابد، می‌توان انتظار تغییر مکان‌های بیشتری داشت. تغییر مکان قائم بیشتر در حالتی که قطر لوله افزایش پیدا می‌کند را می‌توان به دلایل حساسیت لوله در برابر زلزله، ایجاد حفره بزرگ‌تر در خاک و ایجاد تنش بیشتر و ایجاد دست‌خوردگی بیشتر در خاک مرتبط دانست.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، بیشترین تغییرات با ۱۰۰٪ در زمانی اتفاق می‌افتد که تراز آب در ۲۰+ متر است وقتی که تراز آب در صفر صفر (کف مدل) قرار دارد، کمترین تغییر مکان اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۴- درصد تغییرات تغییر مکان قائم نسبت به عمق در مدل‌های با تغییر تراز آب

## ۷- مراجع

- Atalah, A. (Mar 2013). Case history of microtunneling through a very soft soil condition", *International Journal of Economics and Management Engineering (IJEME)*, 3(1), pp. 23-28. [https://scholarworks.bgsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=construct\\_mgt\\_pub](https://scholarworks.bgsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=construct_mgt_pub)
- Boyce, G., Havekost, M., Camp, C. and Joyal, N. (May 2-7 2010). Grade control for microtunnels in very loose and very soft soils", *North American Society for Trenchless Technology (NASTT), Paper B-5-02*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2467967418301065>



- Chakeri, H., Ozcelik, Y. and Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface Settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 36, pp. 14-23. <https://sciexplore.ir/Documents/Details/536-230-544-028>
- Chen, S.L., Gui, M.W. and Yang, M.C. Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin-and quadruple-tube tunnels", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779811001350>
- Hossaini, S.M., Shaban, M. and Talebnejad, A. (2012). Relationship between twin tunnels distance and surface subsidence in soft ground of Tabriz Metro-IRAN", *Coal Operators' Conference*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Relationship-between-twin-tunnels-distance-and-in-Hossaini-Shaban/3f9c927040da6ebc77ab4b418def527a8aef3780>
- Kuesel, T. R (1969). *Earthquake Design Criteria for Subways*. *Journal of the Structural Divisions, ASCE, VOL.95,NO.ST6*. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSDEAG.0002292>
- Leca, E. and New, B. (2007). Settlements induced by tunneling in Soft Ground", *Tunneling and Underground Space Technology*, 22, pp. 119-147. [https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/download/76\\_fc32374761a17cde8d72f432244168b0](https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/download/76_fc32374761a17cde8d72f432244168b0)
- Liu, W.-T. and Lu, X.-Y. (2012). 3D numerical analysis of soil structure interaction behaviors of pipe jacking construction", *Applied Mechanics and Materials*, 2, pp. 534-538. <https://www.semanticscholar.org/paper/3D-Numerical-Analysis-of-Soil-Structure-Interaction-Liu-Lu/c2e3f6235f43268901651ec086b710349d68577e>
- Olson, P.O., Ariaratnam, S.T. and Lueke, J.S., (2015). Jacking force and productivity analysis of pilot tube microtunneling installations", *American Society of Civil Engineers*. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000215>
- Scott, R. F. (1981). *Foundations Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. PLAXIS 8.0 Dynamic manual. [9] HAZUS-SR. "Earthquake loss Estimation Methodology". FEMA .2005
- Seed, B. H. and Whitman, R. V. (1970). Design of Earth Retaining Structures for Dynamic loads . ASCE special conference on lateral stresses in the Ground and Design of earth retaining structures. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0017611>
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of the coefficient of subgrade reactions. *Geotechnique, Institute of engineers, London*, vol. 5, No. 4, pp. 197-236. <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1955.5.4.297>
- wang, J.-N. (1993). *Seismic Design of Tunnels, A State-of-the-Art Approach*. Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York. <http://cdn.wspgroup.com/8kzmue/seismic-design-of-tunnels-a-simple-state-of-the-art-design-approach.pdf>
- Wen, G., Koo, D.H. and Liu, W. (2011). Analysis on failure factors and a case study for a microtunneling pipe installation", *American Society of Civil Engineers*. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41202%28423%29216?src=recsys>
- Wood, J.H. (1973). *Earthquake-induced soil pressures on structures*. California Institute of Technology, report No.EERL 73-05. <https://authors.library.caltech.edu/26420>