

بررسی عددی پاسخ طیف شتاب لرزه‌ای در تونل‌های شهری مدفون در خاک‌های ریزدانه

مقاله پژوهشی

حسین خادمی^۱، مهدی مخبری^۲، غلامرضا عاطفت دوست^۳

۱- دانشجوی دکترای ژئوتکنیک؛ گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، Khademi_hosein57@yahoo.com

۲- عضو هیات علمی، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، mehdi.mokhberi@iau.ac.ir

۳- استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، Gh.atefatdost@iau.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵

شماره صفحات: ۱ تا ۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2026.16934.1505

چکیده	واژگان کلیدی
این مطالعه به بررسی عددی پاسخ طیف شتاب لرزه‌ای در تونل‌های شهری مدفون در خاک‌های ریزدانه می‌پردازد. هدف اصلی، تحلیل تاثیر عمق مدفون تونل (یا ضخامت روباره، <i>sedimentary layer</i>) بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های با قطرهای مختلف ۶، ۹ و ۱۲ متر و نوع خاک ماسه سیلتی، رس سیلتی و آبرفت بر شتاب طیفی سطح زمین است. تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و به کارگیری مدل رفتاری غیرخطی دراکر-پراگر، شبیه‌سازی‌های دینامیکی دو بعدی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور تونل به‌طور کلی موجب تغییرات در مقدار طیف پاسخ شتاب می‌شود. با افزایش عمق اثر حضور تونل کاهش می‌یابد، به‌طوری که در عمق ۴۰ متری، شتاب طیفی در تمامی موارد کمتر از حالت میدان آزاد مشاهده می‌شود. قابل توجه‌ترین پدیده، تقویت موضعی شتاب طیفی در عمق میانی ۳۰ متری است. بیشترین میزان تقویت در خاک ماسه سیلتی و برای تونل با قطر ۱۲ متر رخ داده که شتاب طیفی به $g/4.1$ رسیده است و نشان‌دهنده افزایش $2/62$ درصدی نسبت به حالت بدون تونل است. در خاک رس سیلتی نیز در شرایط بحرانی، افزایش حدود ۷ درصدی مشاهده می‌شود. این نتایج بر پیچیدگی اندرکنش خاک-سازه و لزوم در نظر گرفتن اثر تونل‌ها در ارزیابی خطر لرزه‌ای و طراحی سازه‌های سطحی مجاور تاکید می‌کند.	تونل شتاب طیفی آباکوس (ABAQUS) میدان آزاد حوزه نزدیک

۱- مقدمه

Moghaddam, & Moghadam, 2024; Rezaei, Shirzeshagh, Golpasand, & Engineering, 2019; Xie et al., 2022). مطالعات گسترده‌ای از رویکردهای عددی و تجربی برای تجزیه و تحلیل رفتار تونل‌ها در شرایط زلزله انجام شده است. در این مطالعات نشست سطحی زمین و تغییر شکل خاک در لایه‌های زیرین در حین حفاری بررسی شده‌اند و میزان تغییر حجم خاک و یا تغییر شکل سطحی

رشد سریع جمعیت شهری، همراه با محدودیت دسترسی به فضای سطحی، منجر به افزایش وابستگی به زیرساخت‌های زیرزمینی شده است. در میان این سازه‌ها، تونل‌ها به دلیل نقش حیاتی‌شان در تضمین ایمنی و عملکرد در طول رویدادهای لرزه‌ای، توجه قابل توجهی از سوی محققان را به خود جلب کرده‌اند (Mohsenian, Gharaei-)

کرنش‌ها و شتاب‌ها را اندازه‌گیری کنند. این آزمایش‌ها بینش‌های ارزشمندی در مورد پاسخ دینامیکی تونل‌ها ارائه می‌دهند و برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی مفید هستند. علاوه بر این، محققان تأثیر سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را بررسی کرده‌اند (Fakhriyeh, Vahdani, 2019). مطالعات نشان داده‌اند که وجود سازه‌های زیرزمینی، پاسخ لرزه‌ای در سطح را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد، پدیده‌ای که به عنوان "برهم‌کنش خاک-سازه" شناخته می‌شود. این برهم‌کنش به ویژه برای تونل‌هایی که در رسوبات خاکی حفر می‌شوند، بسیار مهم است (Rezk, Olabi, Wilberforce, & Sayed, 2024; Shang et al., 2023; Su, Peng, & Hong, 2021; Yesane, Ghugal, & Wankhade, 2016). زیرا می‌تواند منجر به تقویت یا تضعیف امواج لرزه‌ای شود و در نتیجه بر شدت لرزش زمین که در سطح تجربه می‌شود، تأثیر بگذارد. درک رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی برای تضمین ایمنی و تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری ضروری است. با بررسی اندرکنش بین خاک و سازه‌های تونل، محققان می‌توانند مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر و دستورالعمل‌های طراحی را برای کاهش خطرات لرزه‌ای توسعه دهند. بینش‌های حاصل از این مطالعات به پیشرفت عملکرد لرزه‌ای و تاب‌آوری کلی سازه‌های زیرزمینی کمک می‌کند. طیف شتاب لرزه‌ای برای تونل‌های واقع در خاک، نشان‌دهنده تغییرات شتاب زمین به عنوان تابعی از فرکانس در طول زلزله است. این طیف ابزاری حیاتی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و طراحی تونل‌ها برای مقاومت در برابر حرکات زمین ناشی از زلزله است. ویژگی‌های آن تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های خاک، هندسه تونل و عمق قرار دارد (Khademi, Mokhberi, 2023). تعیین حداکثر شتاب سطح زمین یک عامل خیلی مهم در طراحی سازه‌های سطحی، از جمله سازه‌های واقع در میدان دور است که احتمال دارد تحت تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی قرار گیرند (Fakhriyeh et al., 2019). با این حال، قوانین موجود در طراحی سازه‌های سطحی، اغلب تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی را نادیده می‌گیرند. روش‌های تحلیلی زیادی برای بررسی تأثیر حفرة‌های زیرزمینی بر حرکت زمین، با استفاده از انواع مختلف امواج لرزه‌ای، از جمله امواج P ، امواج S و امواج ریلی، ارائه و توسعه داده شده‌اند. با توجه به استفاده و کاربری

زمین مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیقات (Zou et al., 2021) (Andersen, Jones, & vibration, 2006; Asheghabadi & Matinmanesh, 2011; G. Tsinidis, Karatzetzou, Stefanidou, & Markogiannaki, 2022; G. J. T. Tsinidis & technology, 2018; Zaid, Mishra, & Rao, 2020)، تمرکز اصلی بر برهم‌کنش خاک-سازه، به ویژه برای تونل‌هایی که در رسوبات خاک ساخته می‌شوند، بوده است. بر اساس این یافته‌ها برهم‌کنش تونل-سازه نقش محوری در تعیین عملکرد لرزه‌ای چنین سازه‌هایی ایفا می‌کند. مطالعه سازه‌های زیرزمینی، به ویژه تونل‌ها، در زمینه رویدادهای لرزه‌ای به دلیل کاربرد گسترده آنها در محیط‌های شهری و آسیب‌پذیری ذاتی آنها در برابر زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است (Cilingir, Madabhushi, & Engineering, 2011; Liu, Wang, Bao, & Vibration, 2021). بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی به ویژه تونل‌ها برای اطمینان از شرایط ایمنی و مقاومت در برابر نیروهای وارده دارای اهمیت فراوان می‌باشد. بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در این حوزه صورت گرفته با تمرکز بر بررسی اندرکنش خاک-سازه بوده است، زیرا این تغییرات دینامیکی تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دینامیکی تونل‌ها دارد. در طی سالیان اخیر محققان با ارتقاء دانش خود در مباحث اندرکنش خاک-سازه، در تلاش هستند با ارائه راهکارهای مناسب، طرح‌های مناسب‌تری برای کاهش خطرات را ارائه داده که موجب عملکرد بهتر و مناسب‌تر سازه‌های مدفون زیرزمینی در برابر خطرات ناشی از زمین لرزه گردد. یک حوزه قابل توجه از تحقیقات، ارزیابی پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها از طریق شبیه‌سازی‌های عددی است (Bao et al., 2017; Yan, Haider, Li, Song, & Technology, 2020). در این شبیه‌سازی‌ها هم سازه تونل و هم خاک اطراف آن مدل‌سازی می‌شوند و عوامل مهمی مانند ویژگی‌های مواد، هندسه و شرایط مرزی را در نظر گرفته می‌شود. با قرار دادن این مدل‌ها در سناریوهای شبیه‌سازی شده زلزله، محققان می‌توانند تغییر شکل‌های تونل و پاسخ‌ها به سطوح مختلف لرزش زمین را تجزیه و تحلیل کنند. تحقیقات تجربی، علاوه بر تکمیل مطالعات عددی، نقش حیاتی در درک رفتار تونل در طول رویدادهای لرزه‌ای ایفا می‌کنند. مدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی شرایط دنیای واقعی ساخته می‌شوند و محققان را قادر می‌سازند که پارامترهای کلیدی مانند جابجایی‌ها،

این روش‌ها، اغلب آنها به فرضیات ساده‌شده‌ای مانند در نظر گرفتن محیط به عنوان کاملاً الاستیک وابسته هستند، لذا رفتار غیرخطی خاک را که برای تحلیل لرزه‌ای و دینامیکی دقیق ضروری است، نادیده گرفته می‌شوند. برآورد دقیق تاثیر حضور سازه‌های زیرزمینی بر شتاب سطح زمین برای مطمئن شدن از ایمنی و پایداری زیرساخت‌های سطحی امری حیاتی است. بیشترین شتاب سطح زمین، که به عنوان حداکثر شتابی که توسط زمین بوقوع پیوسته، در طول فرآیندها و اتفاقات لرزه‌ای تعریف می‌شود که این موضوع یک پارامتر کلیدی در طراحی سازه است (Baziar, Moghadam, Kim, Choo, & Technology, 2014; Douglas, 2003). پارامتر مذکور به‌طور مستقیم بر نیروها و تنش‌های اعمال شده بر ساختمان‌ها، پل‌ها و سایر زیرساخت‌های مهم و حیاتی تاثیر می‌گذارد و برآورد دقیق آن را ضروری می‌سازد. در سال‌های اخیر، شناخت بیشتر و مهم‌تری از نقش مهم سازه‌های زیرزمینی در اصلاح حرکت زمین به وجود آمده است. این سازه‌ها، که شامل تونل‌ها، معادن، مغارها و حفره‌های ساخته دست بشر را شامل می‌شوند قادر هستند انتشار امواج لرزه‌ای را تغییر دهند و منجر به تغییرات در شتاب سطح زمین بشوند (Besharat, Davoodi, Jafari, & Engineering, 2018; Wang et al., 2014). برای بررسی این موضوع، چندین راه‌حل تحلیلی ارائه شده است که هدف آنها مدل‌سازی برهم‌کنش بین امواج لرزه‌ای و حفره‌های زیرزمینی از طریق معادلات ریاضی و شبیه‌سازی‌های عددی است (Fakhriyeh et al., 2019). این رویکردها عواملی مانند ویژگی‌های انتشار موج، هندسه حفره و ویژگی‌های خاک را برای پیش‌بینی دقیق‌تر شتاب سطح زمین در نظر می‌گیرند. تاکید بر این نکته ضروری است که شتاب طیفی یک پارامتر حیاتی در تحلیل و طراحی سازه‌های تحت بارهای لرزه‌ای است. این پارامتر شدت حرکت زمین را کمی می‌کند و اطلاعات ضروری را برای ارزیابی خسارت بالقوه سازه‌ای فراهم می‌کند و شیوه‌های طراحی را هدایت می‌کند تا اطمینان حاصل شود که سازه‌ها می‌توانند نیروهای لرزه‌ای پیش‌بینی‌شده را بدون فروپاشی یا خسارت قابل توجه تحمل کنند. علاوه بر این، داده‌های شتاب طیفی، همراه با سایر پارامترهای لرزه‌ای، نقش حیاتی در ارزیابی خطر لرزه‌ای و ارزیابی ریسک برای مکان‌ها یا مناطق خاص ایفا می‌کنند.

علیرغم اهمیت آن، دستورالعمل‌های فعلی برای طراحی سازه‌های سطحی اغلب تاثیر سازه‌های زیرزمینی را در نظر نمی‌گیرند. این کاستی نشان‌دهنده یک شکاف دانش قابل توجه است که به‌طور بالقوه ایمنی و عملکرد سازه‌های سطحی را در مناطقی که تحت تاثیر حفره‌های زیرزمینی قرار دارند به خطر می‌اندازد. در نتیجه، نیاز مبرمی به توسعه روش‌های دقیق و قابل اعتماد برای ارزیابی اثرات سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای زمین وجود دارد. لذا هدف این تحقیق، بررسی نیاز مذکور با در نظر گرفتن تاثیر عوامل کلیدی مانند ضخامت لایه‌ی روباره (لایه‌ی خاک زیر تونل)، عمق تونل، قطر تونل و ویژگی‌های خاک بر شتاب طیفی سطح زمین در طول رویدادهای لرزه‌ای است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی سناریوهای بدون تونل (میدان آزاد) و با تونل‌هایی با قطرهای مختلف (۶، ۹ و ۱۲ متر) در اعماق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر در حالت لرزه‌ای توسعه داده شده‌اند. علاوه بر این، سه نوع خاک مجزا - ماسه سیلتی، رس سیلتی و خاک آبرفت به عنوان محیط اطراف تونل‌ها در نظر گرفته شده‌اند. این مدل‌ها برای ارزیابی تاثیر نوع خاک بر شتاب طیفی سطح زمین به کار گرفته شده‌اند و مفاهیمی در مورد تعاملات پیچیده بین سازه‌های زیرزمینی و انتشار امواج لرزه‌ای ارائه شده است.

۲- روش تحقیق

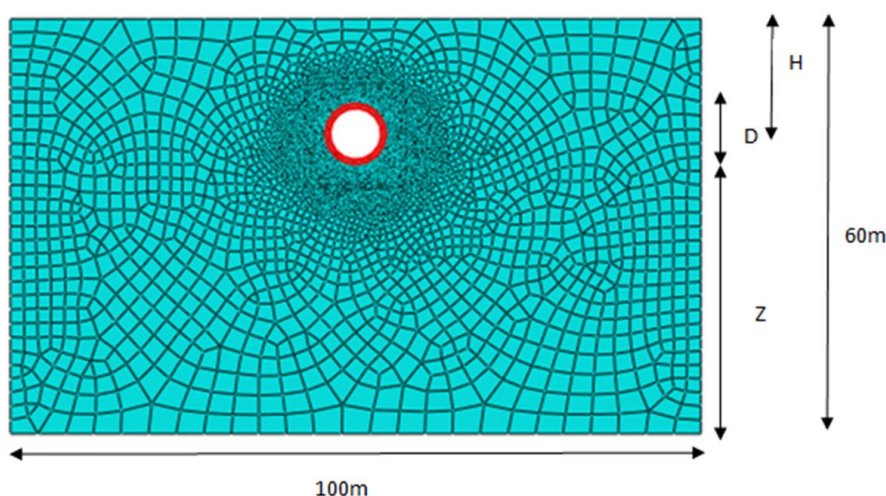
روش‌های عددی در واقع یک دستورالعمل عددی جهت حل مسائل فیزیکی است که توسط معادله دیفرانسیل توصیف می‌شوند. این روش دارای چند ویژگی است که آن را از سایر روش‌ها نظیر روشهای تجربی جهت استفاده در موضوع این تحقیق متمایز ساخته و برای حل مدل‌های پیچیده و دارای چندین مرحله حفاری، تحلیل هر تونل با هر سطح مقطع استفاده می‌گردد. روش‌های مدل‌سازی عددی نیز شامل روش‌های مختلفی از جمله تفاضل محدود، المان مرزی، المان مجزا و یا اجزای محدود می‌شود. این تحقیق باتوجه به وجود مسائل پیچیده‌ی خاک و سنگ اطراف تونل و انتخاب روشی که بتوان این مسائل پیچیده را به اجزاء کوچکتری برای جواب بهینه تقسیم کند و از انتخاب مسیری در تحلیل را که بتواند نتایج مناسب‌تر را در مدت کوتاه‌تر و با پاسخ دقیق‌تر ارائه دهد انجام شده است. بدین منظور از مدل‌سازی عددی و با روش اجزای

محدود (Finite Element Method) برای تحلیل استفاده شده است.

۱-۲- مدل‌سازی عددی

ارزیابی رفتار دینامیکی تونل‌ها تحت نیروهای لرزه‌ای فرآیندی پیچیده است که تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد. در این مطالعه مدل‌سازی دینامیکی دوبعدی به روش اجزای محدود به کار گرفته شد. برای این هدف از نرم‌افزار آباکوس که ابزاری برای تحلیل مسایل خطی و غیرخطی به روش عددی است استفاده شده است. کتابخانه گسترده این نرم‌افزار از انواع

المان‌ها و مدل‌های مواد، امکان سفرشی‌سازی شبیه‌سازی‌ها را برای مطابقت با شرایط متنوع فراهم می‌کند. برای شبیه‌سازی رفتار سیستم تونل-خاک، از معیار *Drucker-Prager (DP)* استفاده شد. این معیار در مطالعات قبلی توسط دینگ و همکاران (*Ding et al., 2006*) و جینگ و همکاران (*Jiang et al., 2010*) تایید شده است که اثربخشی آن را در پیش‌بینی پاسخ‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد. شکل ۱، نمایی از مدل محاسباتی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد و تصویری از تنظیمات و پارامترهای در نظر گرفته شده در تحلیل را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از مدل محاسباتی

به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط تحلیلی) می‌باشد که حداقل ناحیه تاثیر یک حفرة زیرزمینی تا حداقل ۳ برابر قطر تونل برآورد شده است و یا در صورتی که ابعاد مدل حدود ۱۰ برابر ابعاد تونل باشد تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت (*Cundall, & R.R.Hart, 1994*). در این تحقیق، برای تعیین ابعاد هندسی مدل از روش تحلیل تنش استفاده شده و چندین تحلیل حساسیت به منظور به حداقل رساندن اثرات مرزی انجام شد و در نهایت، شرایط مرزی، انواع المان‌ها و چگالی مش مدل عددی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که بر نتایج تأثیری نداشته باشند. لذا در این راستا برای کاهش تأثیر مرزها بر تحلیل دینامیکی، از مدل مستطیلی با عرض ۱۰۰ متر و عمق ۶۰ متر، همانطور که در شکل ۱، نشان داده شده است، استفاده شده است. برای تحلیل، تونل دایره‌ای با

۲-۲- ویژگی‌های خاک

در این مطالعه، سه نوع خاک متمایز مورد بررسی قرار گرفته است: رسوبات (*Sediment*)، رس سیلتی (*Silty Clay*)، و ماسه سیلتی (*Silty Sand*). هر لایه خاک با ضخامت‌های آبرفتی (H) ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر، که از مرکز تونل تا سطح زمین اندازه‌گیری شده‌اند، تحلیل شده است. انتخاب این سه نوع خاک بر اساس ویژگی‌های مکانیکی و عملکردشان در شرایط لرزه‌ای صورت گرفته است. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها در جدول ۱، به تفصیل آمده است.

۳-۲- ویژگی‌های تونل

ابعاد هندسی مدل، تابع ویژگی‌های ژئوتکنیکی محیط مورد مطالعه است، لذا برای تعیین محدوده‌ی مناسب از توده‌ی سنگ و خاک اطراف تونل، ایده‌ی اولیه در این زمینه مربوط

۲) روش زیرسازه. در این پژوهش با توجه به شرایط موجود ساختگاهی از روش مستقیم برای محاسبه اثر اندرکنش استفاده شد. در این روش کل سیستم خاک - تونل و تمام شرایط تکیه‌گاهی به یکباره و باهمدیگر و همزمان باهم مدل شده سپس ضریب اندرکنش خاک - تونل به نرم افزار وارد می‌گردد. برای اعمال این اثر اندرکنشی لازم است ضریب اصطکاک بین خاک و تونل در مدل‌سازی اعمال شود. رابطه شماره (۱) برای شبیه‌سازی اندرکنش بین خاک و بتن بر اساس زاویه اصطکاک خاک و پوشش بتنی تعریف شده است. این ضریب بر اساس تئوری کولمب و مواد و مصالح و زاویه اصطکاک خاک (ϕ) تعریف می‌گردد (عاشق آبادی؛ ۲۰۱۸). همچنین طبق توصیه‌ی باولز (۱۹۸۵) برای دیوارهای بتنی در مواردی که از قالب‌های نسبتاً صاف استفاده می‌شود، ضریب مذکور بین $0.08 - 0.16$ می‌توان در نظر گرفت.

$$\mu = \delta \tan \phi \approx 0.6 \tan \phi \quad (1)$$

که در این رابطه‌ی ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک مورد مطالعه است.

قطرهای مختلف (D) ۶، ۹ و ۱۲ متر، که قطرهای معمول تونل‌ها در ایران است، در نظر گرفته شده است. عمق مدفون تونل (Z) نیز در مدل‌سازی سه عمق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. این قطرها با هدف بررسی تاثیر ضخامت لایه روباره (*sedimentary layer*)، که ضخامت لایه خاک از کف تونل تا بستر را در نظر می‌گیرد انتخاب شده است. نصب پوشش تونل یکی از اجزای اصلی در پیشروی سپر حفاری تونل است که بعد از اتمام هر گام حفاری انجام می‌شود. بدلیل مزایای خیلی زیاد قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی در مقایسه با سایر پوشش‌های تونل (کیفیت بالا، مقاومت بالا و توانایی تحمل بار زیاد و ...)، پوشش تونل مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی (سگمنت) با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر با مقاومت ۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر-مربع و وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب گردید. به دلیل سطح تماس تونل با خاک اثر برهم کنش در مدل‌سازی لحاظ شد. روش‌های مختلفی برای بدست آوردن و محاسبه اثر برهم کنش خاک - سازه وجود دارد. دو روشی که بیشترین استفاده را دارند عبارتند از: ۱) روش مستقیم و

جدول ۱- ویژگی‌های ژئوتکنیکی سه نوع خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر

مشخصات خاک	آبرفت	ماسه لای‌دار (SM)	ماسه رس‌دار (SC)
وزن مخصوص (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۹	۱۸/۳۳	۱۶
زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۴۲	۳۱	۲۶
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳
چسبندگی، C (کیلونیوتن بر متر مربع)	۳۲	۱۴	۲۸
ضریب الاستیسیته، E (کیلونیوتن بر متر مربع)	۵۶	۱۰	۵۲

لرزه‌ای ورودی و بردار نیروی اینرسی می‌باشد. (Almeida e Sousa, Negro, Matos Fernandes, Cardoso, & engineering)، ماتریس میرایی وسکوز $[C]$ با استفاده از فرمول‌بندی کامل میرایی ریلی نمایش داده می‌شود که شامل ترکیبی خطی از ماتریس‌های جرم و سختی است:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

ضرایب میرایی ریلی، α و β ، در تعیین نسبت میرایی مودال ζ برای مد z ام استفاده می‌شوند. این نسبت را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

۲-۴- میرایی

در روش تحلیل تاریخچه زمانی، معادله حرکت سیستم با استفاده از روش انتگرال‌گیری گام به گام حل می‌شود. این امر امکان در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی بین تونل و خاک اطراف را فراهم می‌کند.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [M]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (2)$$

در این معادله $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی ویسکوز و بردارهای شتاب نسبی سازه را نشان می‌دهند. علاوه بر این، $\ddot{u}_g(t)$ تاریخچه زمانی شتاب موج

ایمپریال ویلی ۲۶۲، نورث‌ریچ ۱۲۳۱، سن فرناندو و طیس انجام شده است. جدول ۲، ویژگی‌های این زلزله‌ها را نشان می‌دهد که از پایگاه داده حرکت زمین مرکز تحقیقات مهندسی زلزله واقع در دانشگاه برکلی (PEER) انتخاب شده‌اند. زلزله‌های انتخاب‌شده به دلیل ماهیت مخرب و تاثیر جهانی‌شان به‌طور گسترده شناخته شده‌اند. برای اطمینان از نتایج سازگار و قابل اعتماد، رکوردهای زلزله بر اساس دستورالعمل‌های ارایه شده توسط داورنیا و همکاران تنظیم شدند (Davarnia, et al., 2020). این تنظیمات شامل تغییر مقیاس شتاب اوج زمین (PGA) و زمان مؤثر همه زلزله‌ها با استفاده از SeismoSignal و تنظیم آنها به ترتیب روی $0.16g$ و $4s$ برای درنظر گرفتن پارامترهای مختلف و به حداقل رساندن اختلافات در داده‌ها بود (Argyroudis, et al., 2017). جدول ۲ مشخصات و شکل ۲، شتاب و الگوهای شتاب نرمال شده چهار زلزله ایمپریال ویلی ۲۶۲، نورث‌ریچ ۱۲۳۱، سن فرناندو و طیس را نشان می‌دهد.

۲-۶- شرایط مرزی و مش‌بندی

شرایط مرزی، رفتار و پاسخ یک سازه را در سطوح مشترک آن با محیط اطراف تعریف می‌کنند. شرایط مرزی به عنوان قیدهایی عمل می‌کنند که شرایطی را که سازه تحت آن عمل می‌کند، شبیه‌سازی می‌کنند. در این تحقیق، مجموعه‌ای از تحلیل‌های حساسیت برای کاهش مؤثر تاثیر اثرات مرزی بر تحلیل دینامیکی انجام شد. به‌طور گسترده مشخص شده است که شرایط مرزی نقش حیاتی در دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های عددی ایفا می‌کنند. بنابراین، توجه دقیقی به انتخاب شرایط مرزی مناسب، انواع المان‌ها و تراکم مش‌بندی معطوف شد تا تضمین شود که آنها تاثیر نامطلوبی بر نتایج کلی نداشته باشند. شبکه المان محدود به عمق 30 متر زیر سطح زمین می‌رسد و به صورت جانبی تا 40 متر از خط مرکزی تونل امتداد می‌یابد. از این رو، ابعاد نهایی مدل 60 متر عمق و 100 متر عرض در نظر گرفته شد.

در زمینه تحلیل عددی، انتخاب ابعاد مش نقش مهمی در تضمین شبیه‌سازی‌های دقیق و کارآمد دارد. ابعاد مش نه باید خیلی کوچک باید باشد و نه خیلی بزرگ، زیرا هر دو حالت می‌تواند پیامدهای منفی در تحلیل داشته باشند.

$$\xi_j = \frac{\alpha_r}{2\omega_j} + \frac{\beta_r\omega_j}{2} \quad (4)$$

که در آن ω_j نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای متناظر با مُد شماره j است. ضرایب α_r و β_r را می‌توان با استفاده از دو روش تعیین کرد: در روش اول از یک فرکانس کنترل ω_j استفاده می‌شود، در حالی که در روش دوم از دو فرکانس کنترل استفاده می‌شود. با استفاده از روش فرکانس کنترل منفرد (Single Control Frequency)، مقادیر α_r و β_r استخراج می‌گردد:

$$\alpha_r = \xi^*\omega^* \quad \beta_r = \frac{\xi^*}{\omega^*} \quad (5)$$

پارامتر ξ^* نسبت میرایی معین را در فرکانس کنترل خاص ω^* نشان می‌دهد. به‌طور کلی فرض می‌شود که ω^* برابر با ω_1 و ξ^* معادل ξ_1 است، ω_1 و ξ_1 به ترتیب در حالت طبیعی اول فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی معین را نشان می‌دهند.

$$\alpha_r = \xi_1\omega_1 \quad \beta_r = \frac{\xi_1}{\omega_1} \quad (6)$$

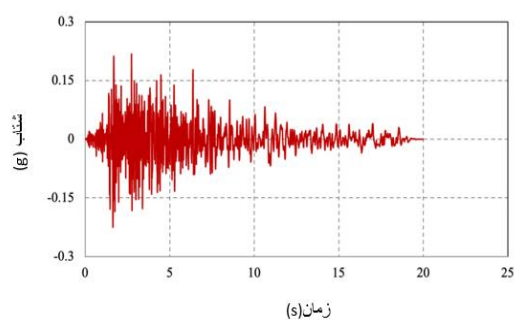
میرایی ریلی در تمام مدل‌ها به منظور جبران محدودیت‌های معیارهای رفتاری در پیش‌بینی رفتار پسماند (هیستریزیس) خاک مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش حاضر بر روی مدل دراکر-پراگر تمرکز دارد. مدل‌سازی کنترل‌شده با کرنش دوبعدی (2D) سیستم تونل و خاک با استفاده از عناصر ۸ گرهی انجام شده است. به دلیل تغییرات قابل توجه در توزیع تنش در اطراف تونل، چگالی عناصر پیرامون تونل با استفاده از عناصر کوچک‌تر افزایش یافته است. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن تاثیر مهم شرایط مرزی در تحلیل لرزه‌ای، از پیاده‌سازی مرزهای جاذب از نوع لایسمر (Lysmer) در تمام مدل‌ها استفاده شده است. با لحاظ کردن وجود مرزهای جاذب و تاثیر اندرکنش خاک و سازه، از بازتاب امواج لرزه‌ای هنگام برخورد با مرزهای توده‌های خاکی جلوگیری می‌شود. جدول ۱، مقادیر پارامترهای تعیین‌شده معیار دراکر-پراگر را برای تمام مصالح به‌کار رفته در پژوهش جاری ارایه می‌دهد.

۲-۵- بار زلزله

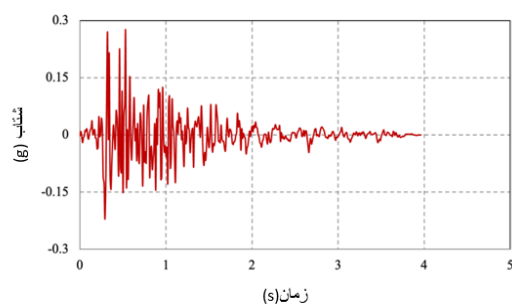
به منظور ارزیابی واکنش تونل به ارتعاشات لرزه‌ای، سیستم تونل-خاک در معرض بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفته است. این کار با استفاده از داده‌های چهار زلزله شناخته‌شده،

جدول ۲- ویژگی‌های اساسی زلزله‌های حوزه دور مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر

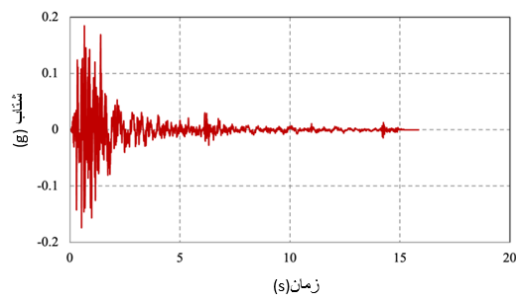
شماره	نام زلزله	محل وقوع	زمان	$PGA(g)$	دوره ارتعاش (S)	M_w
۱	Imperial Valley 262	Mexico City	۱۹۷۹	۰/۳۱۷	۲۰	۶/۵
۲	Northridge 1231	USA	۱۹۹۴	۰/۳۴۵	۱۹/۹	۶/۷
۳	San Fernando	USA	۱۹۷۱	۰/۲۷۸	۲۷/۹۹	۶/۶
۴	Tabas	Iran	۱۹۷۸	۰/۳۲۴	۱۰/۴۶	۷/۴



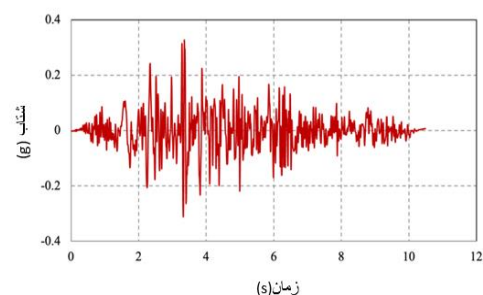
ب- ایمپریال ویلی ۲۶۲



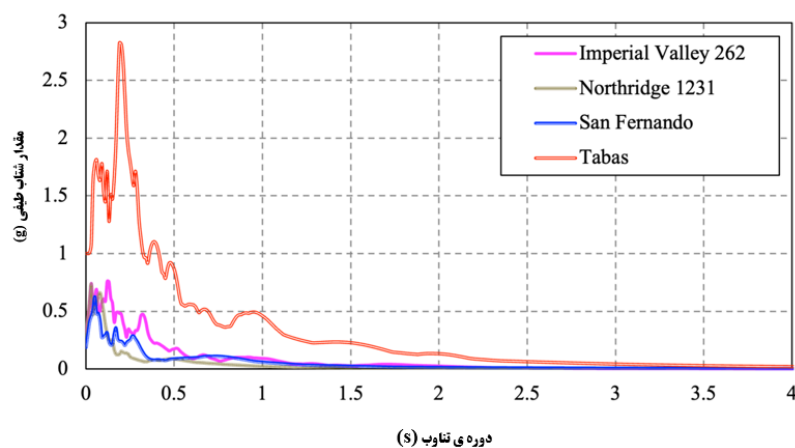
الف- نورتریج ۱۲۳۱



ت- سن فرناندو



پ- طبس



ث- شتاب‌های نرمال شده ورودی‌های لرزه‌ای استفاده شده

شکل ۲- منحنی‌های شتاب

بر اساس نظریه ادریس و سید (۱۹۶۸) تناوب اصلی خاک اطراف تونل (T) طبق رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد. در نهایت، دوره تناوب تونل برابر با دوره محاسبه شده برای خاک اطراف تونل در نظر گرفته شده است، زیرا تونل و خاک ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند و از آنجایی که به یکدیگر چسبیده‌اند، معمولاً مطابق با حرکت ناشی از زلزله پاسخی یکسان می‌دهند (George, et al., 2010; Idriss IM, Seed HB, 1968, Abate & Massimino 2016)

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (10)$$

که در رابطه‌ی فوق H ضخامت نهشته خاک بر روی سنگ بستر و V_s سرعت موج برشی خاک می‌باشد. برای به حداقل رساندن زمان محاسبات و در عین حال حفظ دقت، ضریب $\frac{1}{10}$ (۱۰) المان در هر طول موج) برای اندازه شبکه مش در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن حداقل سرعت موج برشی برای خاک‌های نرم، ۱۷۵ متر بر ثانیه، همان‌طور که توسط چن و همکاران و سان و همکاران (Chen, & Li, 2024; Sum et al., 2023) مشخص شده است و حداکثر فرکانس موج ورودی در رکوردهای زلزله اعمال شده در این مطالعه، اندازه المان (ΔL) برای همه مدل‌ها ۱۶ متر تعیین شده است. شکل ۳، تصویری از مش‌بندی انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. بدیهی است که در مجاورت تونل از مش‌های کوچک‌تری استفاده شده است که هدف آن افزایش دقت در تحلیل است.

استفاده از شبکه‌های خیلی کوچک می‌تواند منجر به محدودیت در پیش‌بینی دقیق تغییر شکل خاک شود، زیرا هرچه شبکه ریزتر باشد، محاسبات دقیق‌تر می‌شوند. با این حال، شبکه‌های بیش از حد کوچک نیاز به محاسبات بالاتری دارند که می‌تواند زمان‌بر و نیازمند امکانات سیستمی بیشتری باشد. برعکس، انتخاب شبکه‌هایی که خیلی بزرگ هستند ممکن است زمان محاسباتی سریع‌تری را به همراه داشته باشد، اما دقت را در محاسبات کاهش می‌دهند. این امر به این دلیل رخ می‌دهد که شبکه‌های بزرگ‌تر تمایل دارند جزئیات پیچیده فرآیند تغییر شکل خاک را نادیده بگیرند، که به طور بالقوه منجر به پیش‌بینی‌های با قابلیت اطمینان کمتر می‌شود. بنابراین، اهمیت در ایجاد تعادل بین دقت و کارایی محاسباتی است. برای نمایش دقیق انتشار موج در مدل‌های عددی، اندازه المان (ΔL) باید تقریباً یک دهم طول موج (λ) مرتبط با بالاترین مؤلفه فرکانسی موج ورودی باشد (Fakhriyeh et al., 2019). این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

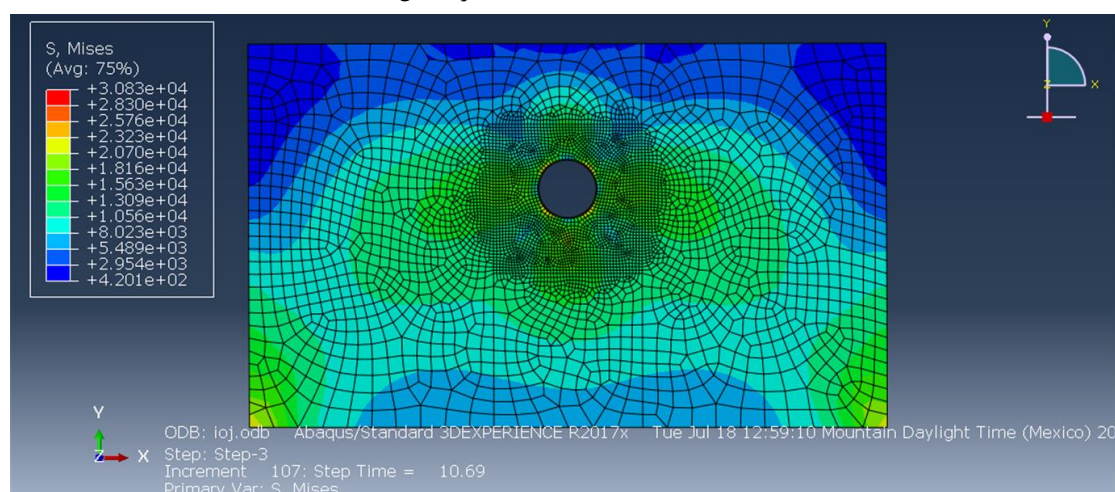
$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (7)$$

که در آن λ طول موج منتشر شده در مدل است. طول موج با سرعت موج برشی خاک (V_s) و بالاترین فرکانس موج ورودی (f_{max}) با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\lambda = \frac{V_s}{f_{max}} \quad (8)$$

با جایگزینی λ در عبارت ΔL ، اندازه المان مستقیماً با V_s و f_{max} مرتبط می‌شود:

$$\Delta L \leq \frac{V_s}{10 \cdot f_{max}} \quad (9)$$

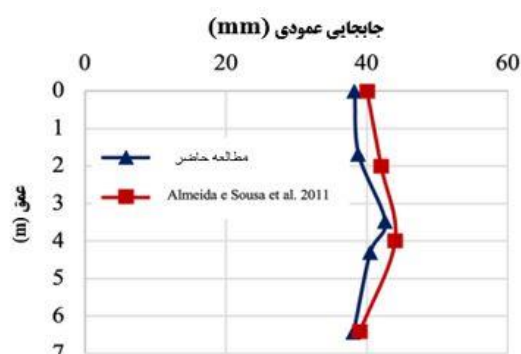


شکل ۳- نمایشی از مش‌بندی انجام‌شده

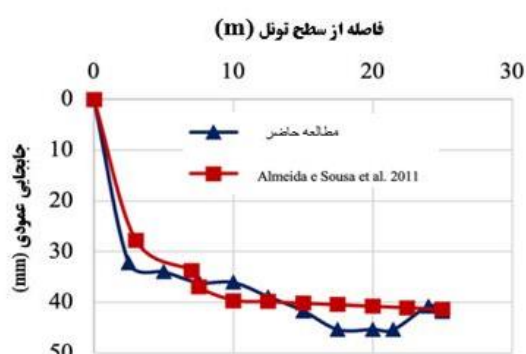
۷-۲- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته در این مطالعه، گامی حیاتی برای اطمینان از دقت و قابلیت اطمینان نتایج است. مدل‌سازی عددی، به‌ویژه در مهندسی سازه و تحلیل لرزه‌ای، نیازمند اعتبارسنجی کامل در برابر داده‌های تجربی یا مطالعات قبلی معتبر است تا به قابلیت‌های پیش‌بینی مدل اطمینان حاصل شود. در این مطالعه، مدل توسعه‌یافته ABAQUS در مقایسه با یافته‌های یک بررسی عددی قبلی که توسط Almeida e Sousa (2011) و همکاران (Almeida e Almeida e Sousa et al., 2011) انجام شده، اعتبارسنجی شده است. در تحقیق مذکور، تحلیل‌های غیرخطی سه بعدی یک تونل در برزیل مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند اعتبارسنجی و مقایسه نتایج مهم در شکل ۴ (الف و ب) ارائه شده است تا

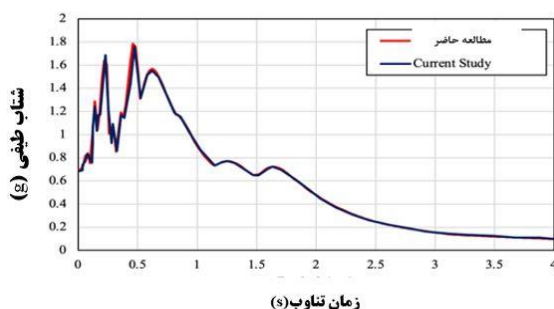
قابلیت اطمینان و دقت مدل عددی فعلی را نشان دهد. نتایج عددی یک تطابق قوی با جابجایی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند، که اثربخشی مدل اتخاذ شده در پیش‌بینی دقیق نتایج را تایید می‌کند. علاوه بر این، اعتبارسنجی بیشتر با استفاده از نتایج نرم‌افزار Seisomsignal از مطالعه حاضر در مقایسه با طیف پاسخ شتاب گزارش شده توسط کامپاس و همکاران (Kampas et al., 2020)، همان‌طور که در شکل ۴ (ت) نشان داده شده است، انجام شده است. آنها از رکورد Takarazuka از زمین‌لرزه کوبه در سال ۱۹۹۵ به عنوان تحریک لرزه‌ای استفاده کردند و منحنی شتاب مربوطه در شکل ۴ (پ) ارائه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که طیف پاسخ شتاب به‌دست‌آمده از مدل عددی حاضر با نتایج گزارش‌شده توسط کامپاس و همکاران مطابقت خوبی دارد و دقت مدل را بیشتر تایید می‌کند (Kampas et al., 2020).



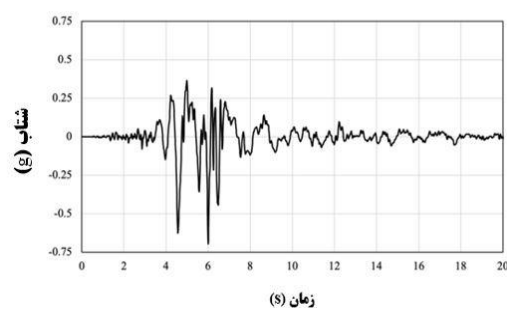
ب- نشست در عمق تونل



الف- نشست تاج تونل



ت- طیف پاسخ شتاب



پ- منحنی شتاب زمین‌لرزه

شکل ۴- نمودارهای نشست تونل و منحنی‌های شتاب

این نرم‌افزار در تخمین قابل اعتماد پارامترهای مختلف است. در نتیجه، در این مطالعه، مدل ارائه شده با استفاده از ABAQUS و با بهره‌گیری از تحقیقات قبلی و همچنین انجام

علاوه بر این، مطالعات متعددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل تونل‌های مدفون تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی انجام شده است که نشان‌دهنده توانایی

تحلیل‌های مقایسه‌ای متعدد برای اطمینان از قابلیت اطمینان آن توسعه داده شد.

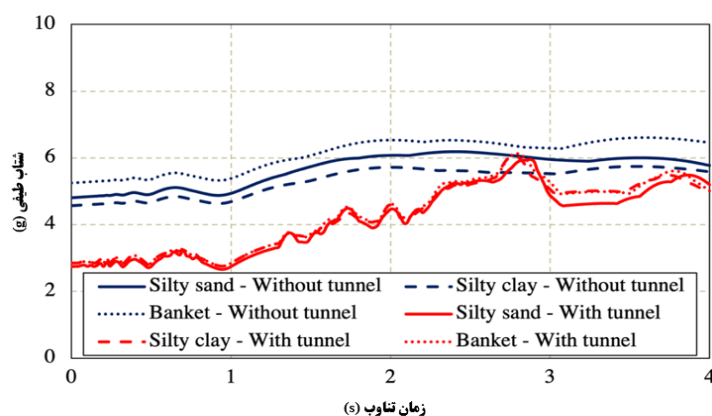
۳- نتایج، بحث و بررسی

بررسی عددی پاسخ طیف شتاب لرزه‌ای برای تونل‌های شهری مدفون، همان‌طور که در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و مدل Drucker-Prager (DP) برای رفتار غیرخطی خاک صورت پذیرفت، بینش‌های مهمی را در مورد تاثیر پارامترهای هندسی و خاکی بر رفتار دینامیکی سازه-خاک فراهم می‌آورد. نتایج این تحقیق به وضوح نشان‌دهنده پیچیدگی‌های ذاتی اندرکنش خاک-سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای است و با یافته‌های تحقیقات پیشین در مورد پدیده‌های انعکاس، پراکندگی و تقویت موج سازگار است. نتایج تاثیر عمق تونل بر مبنای قطر تونل بر طیف پاسخ شتاب در حالات گوناگون بررسی شده است.

۳-۱- قطر تونل ۶ متر در عمق‌های مختلف

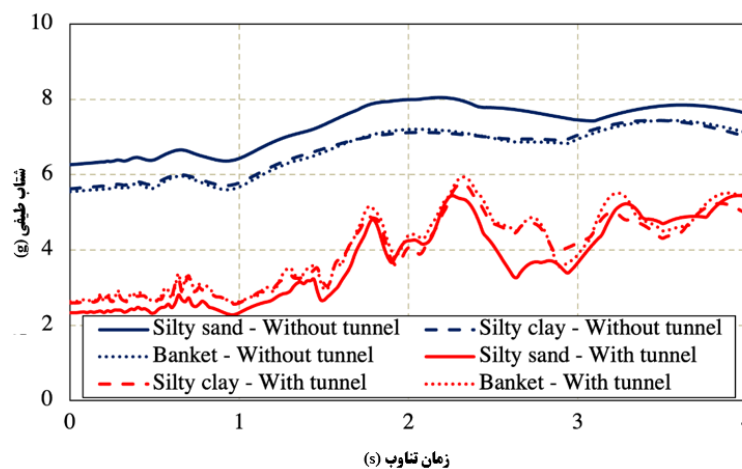
شکل ۵، مقایسه‌ای از شتاب طیفی در برابر دوره تناوب را برای دو موقعیت متمایز نشان می‌دهد، یکی بدون تونل و دیگری با تونل در عمق ۲۰ متر. در انواع مختلف خاک از جمله ماسه سیلتی، رسوبات آبرفتی و رس سیلتی. در شرایط ارتعاش آزاد یعنی زمانی که هنوز تونل حفر نشده است. یافته‌ها نشان‌دهنده روند ثابت تغییرات شتاب طیفی و کمی افزایشی با افزایش دوره تناوب هستند که نشان می‌دهد پاسخ زلزله در انواع مختلف خاک نسبتاً پایدار می‌ماند. از طریق بررسی شتاب‌های طیفی، می‌توان تفاوت‌ها را در وجود و عدم وجود تونل مشخص کرد. بدیهی است که وجود تونل باعث

ایجاد نوسانات و ناهماهنگی‌هایی در شتاب طیفی می‌شود. این تغییرات عمدتاً به اندرکنش بین سازه تونل و خاک اطراف آن نسبت داده می‌شود. وقتی امواج لرزه‌ای از مجاورت یک تونل عبور می‌کنند، اندرکنش بین دیواره‌های تونل و خاک بوجود آمده و باعث ایجاد پدیده‌های پیچیده انعکاس موج، پاشش و پراکندگی امواج می‌شود. بنابراین، این تحلیل به ویژه در درک تاثیر تونل‌ها بر رفتار دینامیکی سازه‌ها و خطرات احتمالی مرتبط با آنها بسیار مهم است. لازم به ذکر است که در مدت زمان ۲/۸ ثانیه، خاک رس سیلتی حاوی تونل، شتاب طیفی بالاتری معادل تقریباً ۶,۰۶g در مقایسه با شرایط بدون تونل را تجربه کرد. این افزایش نشان دهنده افزایش ۵/۵ درصدی از بالاترین مقدار شتاب طیفی مشاهده شده برای خاک رس سیلتی بدون تونل است که ۵/۷۵g در ۳/۵۴ ثانیه بوده است. پدیده شتاب طیفی تقویت‌شده در مجاورت تونل‌ها به دلیل عوامل مختلفی ایجاد می‌شود. اولاً، وجود تونل یک شرط مرزی جدید ایجاد می‌کند که ویژگی‌های انتشار امواج لرزه‌ای را تغییر می‌دهد. این تغییر در شرایط مرزی می‌تواند منجر به تمرکز و تقویت حرکت زمین شود و لرزش لرزه‌ای تجربه شده توسط سطح زمین را تشدید کند. ثانیاً، اندرکنش بین سازه تونل و زمین اطراف، یکی دیگر از عوامل تعیین‌کننده مهم در تقویت طیفی شتاب است. این اندرکنش که به عنوان اندرکنش خاک-سازه (SSI) شناخته می‌شود، نقش مهمی در اصلاح پاسخ لرزه‌ای سازه‌های نزدیک تونل‌ها ایفا می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند سختی، میرایی و هندسه آن، همراه با ویژگی‌های سازه‌ای تونلی، به طور کلی بر میزان بزرگنمایی مشاهده شده تاثیر می‌گذارند.



شکل ۵- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۲۰ متر

تونلی وجود ندارد، منحنی شتاب طیفی هموار به نظر می‌رسد و هیچ نوسان قابل توجهی را تجربه نمی‌کند. دلیل این امر این است که امواج آزادانه و بدون برخورد با هیچ مانعی، مانند تونل‌ها، منتشر می‌شوند. مشاهده می‌شود که ماکزیمم سطح شتاب مشاهده شده در نتیجه تماس و سطح مشترک تونل با خاک، $g/5.94$ بوده است. این امر به طور خاص در مناطقی که از مصالح نوع آبرفت تشکیل شده‌اند، رخ داده است. لذا دوره تناوب مرتبط با این شتاب $2/32$ ثانیه اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که این نتایج با یافته‌های تحقیقات مرتبط قبلی مطابقت خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۶- شتاب طیفی مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۳۰ متر

دو خاک رس سیلتی و آبرفت در حضور تونل، شباهت‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد. حداکثر شتاب طیفی برای ماسه سیلتی در دوره‌ی زمانی $2/26$ ثانیه مشاهده می‌شود و مقدار گزارش شده آن به $g/7.23$ می‌رسد. شکل ۷، نشان می‌دهد که شتاب طیفی در حضور تونل برای همه انواع خاک در مقایسه با شرایط میدان آزاد، به طور مداوم کمتر بوده است.

۳-۲- قطر تونل ۹ متر در اعماق مختلف

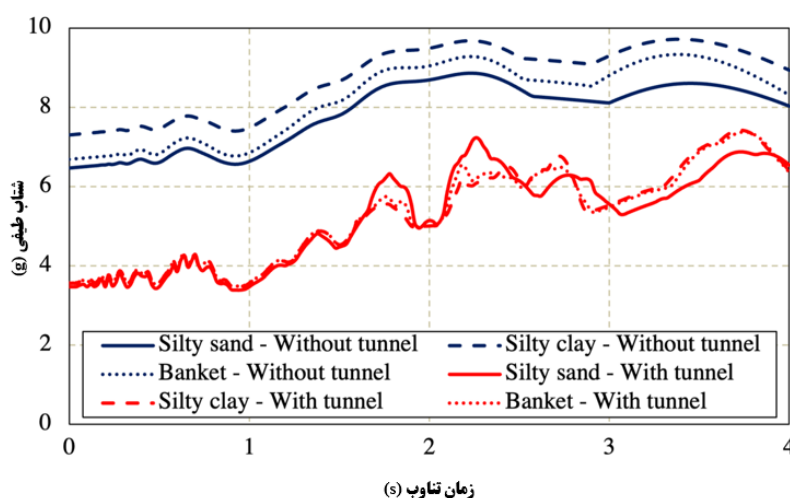
نتایج نمایش داده شده در شکل ۸ تا شکل ۱۰، تغییرات شتاب طیفی را نسبت به دوره تناوب برای حالت‌های بدون تونل و با تونل واقع در اعماق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر نشان می‌دهد. این حالت‌ها انواع مختلف خاک از جمله ماسه سیلتی، آبرفت و رس سیلتی را در بر می‌گیرند. از داده‌ها مشخص است که در تمام مواردی که تونلی وجود ندارد، روند افزایشی مداوم و

شکل ۶، مقایسه‌ای بین شتاب طیفی و دوره تناوب برای حالت‌های بدون و با تونل در عمق ۳۰ متر برای ماسه سیلتی، آبرفت و رس سیلتی را نشان می‌دهد. برخلاف شرایط میدان آزاد (بدون تونل)، نوسانات مختلفی در شتاب طیفی در حضور تونل مشاهده شده است. این پدیده ناشی از تاثیر امواج ورودی و عبوری از یک تونل است. امواج دچار شکست و انعکاس می‌شوند و منجر به اثرات خاصی می‌شوند. در طول پیک‌های ناشی از زمین لرزه‌ها، همگرایی امواج، شتاب طیفی را تقویت می‌کند، در حالی که در زمین‌لرزه‌ی ایمپریال ویلی، واگرایی امواج باعث کاهش شتاب طیفی شده است. در مقابل، وقتی

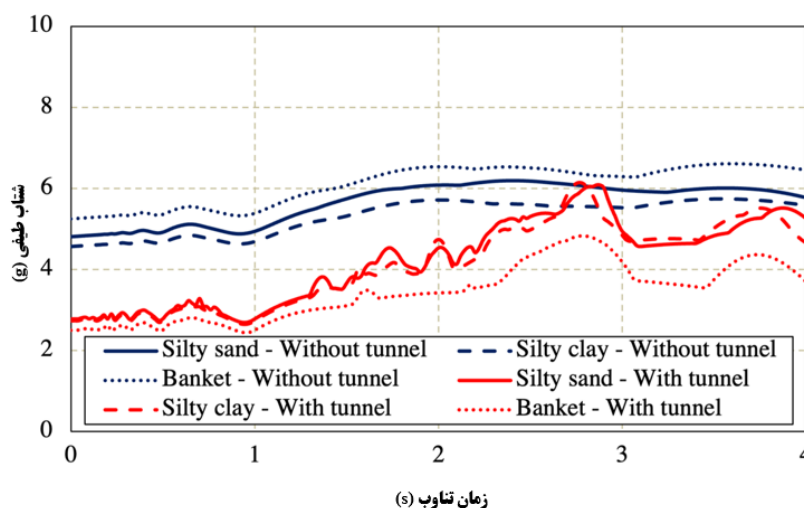
شکل ۷، تغییرات شتاب طیفی را برای دوره‌های مختلف در حالت با و بدون تونل نشان می‌دهد، به طور خاص در عمق ۴۰ متری، در سه نوع خاک مختلف. به طور مقایسه‌ای، روندهای کلی با روندهای گزارش شده برای اعماق ۲۰ و ۳۰ متر سازگار هستند. به جز این که با افزایش عمق تونل، شتاب‌های طیفی به سمت مقادیر بالاتر تغییر کرده‌اند. علاوه بر این، وجود تونل منجر به نوسانات مختلف در شتاب طیفی، به ویژه در خاک ماسه سیلتی، برخلاف شرایط موجود در میدان آزاد، شده است. شایان ذکر است که در میدان آزاد، بیشترین و کمترین شتاب‌های طیفی به ترتیب مربوط به رس سیلتی و ماسه سیلتی بوده است. در حالت با حضور تونل، بالاترین سطح شتاب ثبت شده برای خاک رس سیلتی و آبرفت مشاهده شد. و به دوره‌ی زمانی $3/72$ ثانیه می‌رسد که معادل $g/7.4$ است. علاوه بر این، نتایج به دست آمده برای هر

از بالاترین مقدار شتاب طیفی مشاهده شده برابر با $5/75g$ برای رس سیلتی بدون تونل است که در دوره زمانی $3/54$ ثانیه رخ داده است. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن ترکیب خاک و وجود عناصر سازه‌ای مانند تونل‌ها را هنگام ارزیابی خطرات لرزه‌ای بالقوه یک منطقه برجسته کرده است. مهندسان ژئوتکنیک باید بادقت، واکنش شتاب را در خاک رسی سیلتی ارزیابی کنند و تاثیر تونل‌های مجاور را در نظر بگیرند، زیرا ممکن است باعث تشدید حرکت لرزه‌ای تونل شود و به اقدامات کاهش خطر اضافی نیاز داشته باشند.

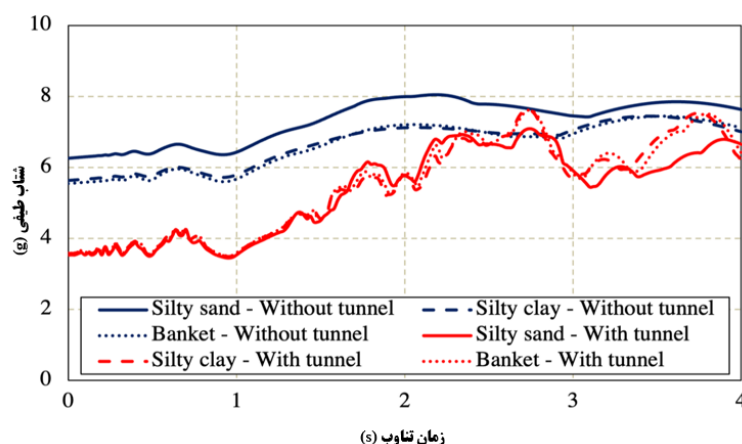
تدریجی در شتاب طیفی با افزایش دوره زمانی را نشان می‌دهد، این نتایج با مطالعات فخریه و همکاران تایید می‌گردد (*Fakhriyeh et al., 2019*). این مشاهده نشان می‌دهد که پاسخ‌ها برای ترکیبات مختلف خاک نسبتاً ثابت باقی مانده است. طبق یافته‌ها، پاسخ شتاب طیفی در عمق ۲۰ متر برای خاک رس سیلتی و ماسه سیلتی با حضور تونل نسبتاً ثابت مانده است. تاکید بر این نکته ضروری است که در طول دوره زمانی $2/76$ ثانیه، ماده رس سیلتی با تونل، شتاب طیفی بیشتری حدود $6/14g$ را تجربه کرد، برخلاف حالتی که تونلی وجود نداشت. این افزایش، نشان‌دهنده‌ی افزایش $6/9$ درصدی



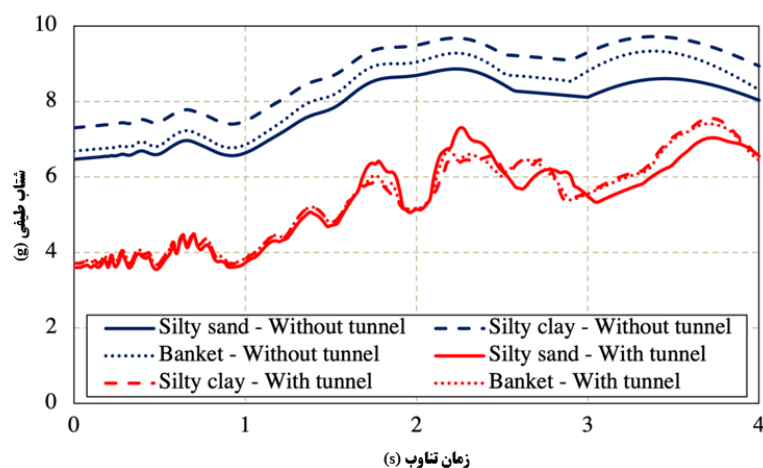
شکل ۷- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۴۰ متر



شکل ۸- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۲۰ متر



شکل ۹- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۳۰ متر



شکل ۱۰- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۴۰ متر

متر، از مقادیر مربوط به شرایط بدون تونل فراتر نرفته است. توجه به این نکته ضروری است که بالاترین شتاب طیفی ثبت شده در عمق ۳۰ متر در ماسه لای‌دار و در غیاب تونل مشاهده شده است. با این حال، در عمق ۴۰ متر، این رس لای‌دار بود که حداکثر شتاب طیفی را نشان داده است.

۳-۳- قطر تونل ۱۲ متر در اعماق مختلف

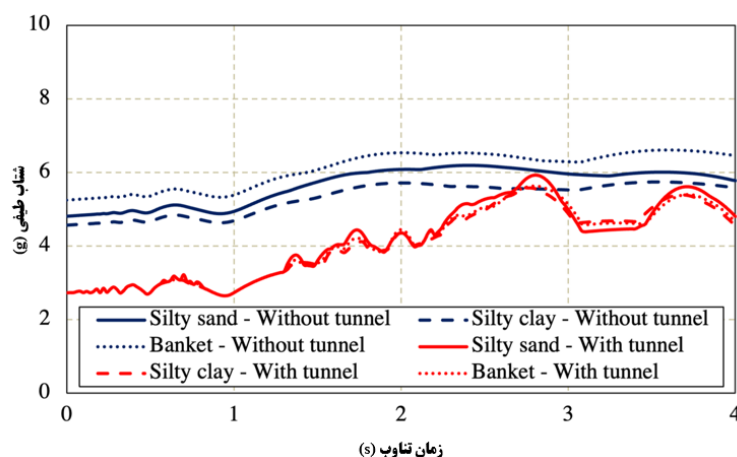
شکل ۱۱ تا شکل ۱۳، اختلاف شتاب طیفی بر حسب دوره تناوب را برای حالت‌های مختلف نشان داده‌اند. این مدل‌ها شامل مدل‌های بدون تونل و مدل‌های دارای تونل با قطر ۱۲ متر واقع در اعماق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر برای انواع مختلف خاک، یعنی ماسه سیلتی، آبرفت و رس سیلتی، هستند. در حالت بدون حضور تونل، مقادیر شتاب یک الگوی صعودی ثابت و

نکته مهم این است که هنگام تجزیه و تحلیل اعماق مختلف، به ویژه اعماق ۳۰ و ۴۰ متر، نرخ شتاب در پاسخ، افزایش قابل توجهی را در همه انواع خاک، هم در میدان‌های آزاد و هم با حضور تونل‌ها تجربه کرده است. در شکل ۹، نشان داده شده است که در حضور تونل، رس سیلتی و مصالح آبرفت، شتاب‌های طیفی بالاتری تقریباً برابر با $7/61g$ و g را به ترتیب برای دوره‌های $2/76$ ثانیه و $3/8$ ثانیه در مقایسه با شرایط میدان آزاد تجربه کرده‌اند. این مقادیر به ترتیب نشان‌دهنده افزایش $2/3\%$ و $7/0\%$ از بالاترین شتاب طیفی $7/44g$ مشاهده شده در غیاب تونل برای آبرفت و رس سیلتی در دوره‌ی زمانی $3/54$ ثانیه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۰، نشان داده شده است، شتاب طیفی در هیچ یک از الگوهای گزارش شده برای همه انواع خاک، برخلاف عمق ۳۰

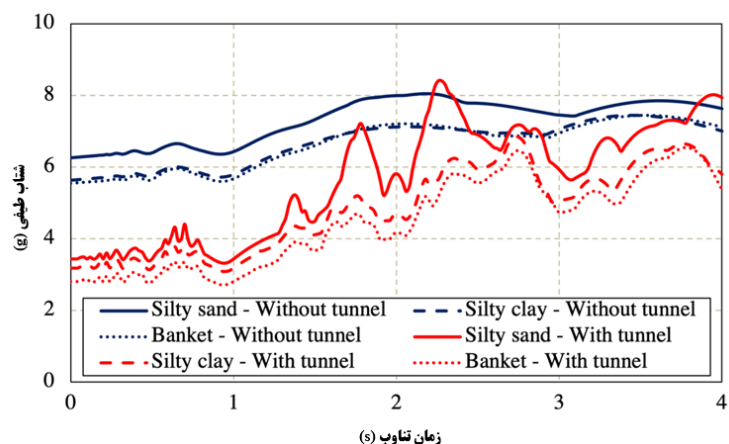
میدان آزاد تقویت کرده است. در تونل با قطر ۱۲ متر، بیشترین نوسانات در عمق ۳۰ متری در خاک ماسه‌ای سیلتی مشاهده شده است. برای دوره‌های ۲/۲۶ و ۳/۹۶ ثانیه، شتاب طیفی به تقریباً $8/41g$ و $8/01g$ افزایش یافته که از شتاب طیفی در شرایط میدان آزاد پیشی گرفته است. شایان ذکر است که در این حالت، وجود تونل توانسته است منجر به افزایش شتاب طیفی تقریباً ۲/۲۶٪ در مقایسه با حداکثر شتاب طیفی مشاهده شده در ماسه لای‌دار بدون تونل (به طور خاص، $8/04g$ در دوره زمانی ۲/۲۲ ثانیه) بشود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شتاب طیفی در عمق بیشتری از تونل (به طور خاص، ۴۰ متر) از مقادیر مشاهده شده در شرایط بدون تونل برای هیچ یک از انواع خاک‌های ذکر شده در تحلیل، فراتر نرفته است. این یافته، تفاوت افزایش شتاب طیفی در اعماق ۳۰ و ۴۰ متر را نشان داده است.

جزئی را با افزایش دوره زمانی را نشان داده است. تغییر در پاسخ زلزله صرف نظر از نوع خاک، نسبتاً بدون تغییر باقی مانده است. با این وجود، هنگامی که یک تونل ساخته شد، شتاب طیفی دچار نوسانات و ناهماهنگی‌هایی شد. این انحرافات را می‌توان به اندرکنش بین سازه تونل و خاک مجاور نسبت داد (Fakhriyeh et al., 2019). لذا، هنگامی که امواج لرزه‌ای در نزدیکی تونل حرکت کرده‌اند، با دیواره‌های تونل برهم‌کنش داشته و باعث انعکاس‌های پیچیده موج، پاشش و اثرات پراکندگی شده‌اند. در همه انواع خاک‌های ذکر شده، هیچ یک از مدل‌ها مقادیر شتاب طیفی را که در شرایط بدون تونل مشاهده شده است، بیشتر از آنچه در شکل ۱۱، نشان داده شده را نشان نمی‌دهد.

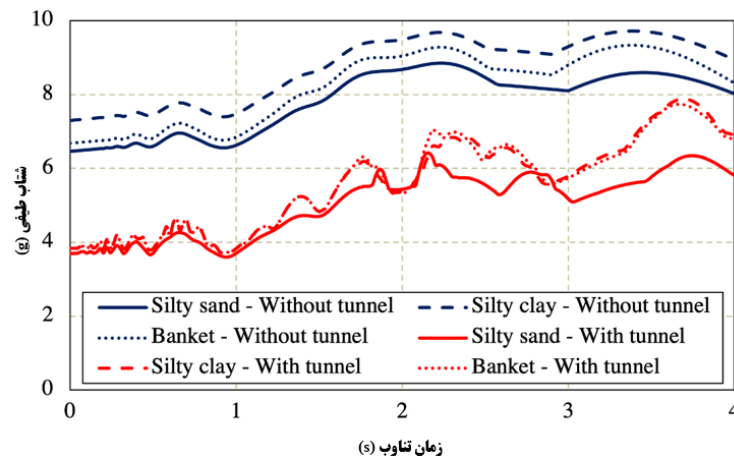
با این حال مطابق شکل ۱۲، در دوره‌های زمانی خاص در عمق ۳۰ متر، تونل شتاب طیفی را بیشتر از مدل‌های



شکل ۱۱- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۲۰ متر



شکل ۱۲- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۳۰ متر



شکل ۱۳- شتاب طیفی برای مدل بدون تونل و با تونل در عمق ۴۰ متر

حفره بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تضعیف می‌شود و شتاب طیفی سطح زمین هرگز از شرایط میدان آزاد پیشی نمی‌گیرد. این تضعیف با افزایش فاصله کانونی از منبع انتشار (در مدل) و افزایش اثر میرایی لایه‌های ضخیم‌تر خاک بالای تونل (به ویژه در خاک‌های با میرایی بالاتر مانند رس سیلتی) توجیه می‌شود. این یافته با تحقیقات پیشین مبنی بر کاهش تاثیر حفره‌ها با افزایش عمق تونل هم‌سو است.

۳-۵- اثر نوع خاک بر رفتار دینامیکی خاک

مقایسه نتایج در سه نوع خاک (ماسه سیلتی، رس سیلتی و آبرفت) بر اهمیت ویژگی‌های ژئوتکنیکی تاکید می‌کند. خاک رس سیلتی (Silty Clay) دارای چسبندگی بالاتر ($C = 28kPa$) و مدول یانگ نسبتاً بالا ($E = 52MPa$) در مقایسه با ماسه سیلتی است. مهم‌ترین نتیجه در این خاک، افزایش ۷ درصدی شتاب طیفی سطح زمین در بحرانی‌ترین حالت (احتمالاً در عمق ۳۰ متر و قطر مشخص) در مقایسه با شرایط بدون تونل است. این افزایش، هرچند در درصد کم، نشان‌دهنده پتانسیل بالای خاک‌های چسبنده در انتقال و گاهی تقویت انرژی لرزه‌ای در حضور حفره‌های بزرگ است. خاک ماسه سیلتی (Silty Sand) دارای کمترین مقدار چسبندگی ($C = 14kPa$) و دارای کمترین ضریب پواسون ($\nu = 0.35$) است. بیشترین نوسانات و بالاترین مقادیر تقویت شتاب در عمق ۳۰ متری این خاک ($8/41g$) نشان می‌دهد که خاک‌های دانه‌ای سست‌تر ممکن است مستعدتر به پدیده‌های تشدید لرزه‌ای در نزدیکی تونل‌های مدفون در

۳-۴- تاثیر هندسه تونل و عمق بر تقویت شتاب طیفی

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق، وابستگی شدید پاسخ لرزه‌ای سطح زمین به عمق تونل (H) است. در اعماق کم (۲۰ متر)، وجود تونل منجر به نوسانات واضح در طیف شتاب می‌شود که نشان‌دهنده پراکندگی و انعکاس موج ناشی از برخورد جبهه موج با دیواره‌های تونل (همان‌طور که توسط فخریه و همکاران (Fakhriyeh et al., 2019) نیز گزارش شده است. با این حال، در این عمق، در هیچ یک از سناریوهای مورد بررسی، شتاب طیفی سطح زمین از شرایط میدان آزاد فراتر نرفته است (برخلاف یافته‌های جزئی در مورد قطرهای کوچک‌تر در خاک رس سیلتی در عمق ۲۰ متر که افزایش ۵,۵ درصدی را نشان داده است).

نکته قابل توجه، تقویت نسبی شتاب طیفی در عمق ۳۰ متری در برخی دوره‌های تناوبی خاص است. به‌ویژه برای تونل با قطر ۱۲ متر در خاک ماسه سیلتی که تا $8/41g$ افزایش یافته است. این تقویت گذرا در عمق میانی را می‌توان به اثر تشدید (*Resonance*) بین طول موج ورودی، سختی مؤثر تونل-خاک و فرکانس‌های طبیعی سیستم خاک اطراف نسبت داد. در این حالت، پدیده‌های پیچیده میدان نزدیک (*Near-Field*) که شامل برهم‌کنش‌های غیرخطی و تغییر شکل‌های پلاستیک در نزدیکی دیواره تونل است، نقش محوری ایفا می‌کنند و سبب تقویت موضعی حرکت می‌شوند. در مقابل، در عمق بیشتر (۴۰ متر)، نتایج نشان می‌دهند که اثر وجود

اطمینان از ایمنی لرزه‌ای، باید مدل‌های تحلیلی پیچیده‌تری به کار گرفته شوند که دینامیک اندرکنش خاک-تونل را به طور کامل لحاظ کنند.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی اثرات عمق تونل، قطر تونل و ویژگی‌های خاک اطراف تونل بر شتاب طیفی زمین در طول رویدادهای لرزه‌ای است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف، هم با در نظر گرفتن تونل و هم بدون تونل، مورد تحلیل قرار گرفته است. این مدل‌ها شامل تونل‌هایی با قطر ۶، ۹ و ۱۲ متر در اعماق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر و با در نظر گرفتن سه نوع خاک اطراف تونل شامل ماسه سیلتی، رس سیلتی و آبرفت هستند. نتایج بدست آمده را می‌توان در بندهای زیر خلاصه کرد:

- با افزایش عمق تونل از ۲۰ متر به ۴۰ متر، به دلیل کاهش ضخامت آبرفت، کاهش ضریب بزرگنمایی و در نتیجه روند کاهشی در نوسانات شتاب طیفی ناشی از حضور تونل مشاهده می‌شود. در عمق ۴۰ متر، اثر میرایی لایه ضخیم خاک فوقانی غالب شده و پاسخ شتاب طیفی در حضور تونل در تمامی انواع خاک، کمتر از شرایط میدان آزاد (بدون تونل) باقی ماند.

- برای تونل‌هایی در اعماق ۲۰ و ۳۰ متر، افزایش قطر تونل منجر به همگرایی در مقادیر شتاب طیفی بین سناریوهای با و بدون تونل، به ویژه در خاک رس سیلتی می‌شود. با این حال، مشخص شد که تاثیر قطر تونل بر حرکت لرزه‌ای به عمق تونل و نوع خاک بستگی دارد. برای تونل‌های عمیق‌تر (مثلاً ۴۰ متر)، حتی با قطر ۱۲ متر، شتاب طیفی در غیاب تونل به طور قابل توجهی بیشتر از شرایط حضور تونل است.

- در دوره‌های زمانی ارتعاش خاص (مثلاً ۲/۲۶، ۲/۷۶، ۳/۸ و ۳/۹۶ ثانیه) و در انواع مختلف خاک، نتایج تحلیل مدل‌ها نشان می‌دهند که وجود تونل، شتاب طیفی را در مقایسه با شرایط میدان آزاد تقویت می‌کند. این تقویت، تاثیر قابل توجه تونل بر ویژگی‌های حرکت زمین را برجسته می‌کند. نکته قابل توجه این است که در خاک رس سیلتی،

اعماق متوسط باشند، زیرا قابلیت جذب انرژی آن‌ها از طریق هیستریزیس (که توسط مدل دراگر-پراگر شبیه‌سازی شد) کمتر از خاک‌های چسبنده است.

۳-۶- تاثیر قطر تونل (D)

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش قطر تونل (از ۶ به ۱۲ متر) در اعماق ۲۰ و ۳۰ متر منجر به همگرایی مقادیر شتاب طیفی بین سناریوهای با و بدون تونل، به ویژه در خاک رس سیلتی می‌شود. این همگرایی بیانگر این است که با بزرگتر شدن قطر تونل، ناحیه تاثیر (تغییر شکل) بزرگتر شده و پاسخ کلی سیستم به پاسخ میدان آزاد نزدیک‌تر می‌شود (یعنی اثر میرایی موضعی تونل کمتر محسوس است)، مگر اینکه برهم‌کنش پیچیده بین موج ورودی و اندازه حفره در یک عمق بحرانی (برای مثال ۳۰ متر) باعث تقویت محلی شود. در اعماق ۴۰ متر، افزایش قطر تونل اثر کمتری بر تفاوت پاسخ با و بدون تونل دارد، زیرا میرایی ناشی از لایه ضخیم خاک فوقانی بر هرگونه اثر ساختاری غلبه می‌کند.

۳-۷- ارزش‌گذاری در طراحی سازه‌ای و

جمع‌بندی

یافته‌های این تحقیق، لزوم توجه به اندرکنش خاک-سازه (SSI) را در طراحی سازه‌های سطحی مجاور تونل‌های شهری تایید می‌کند. نادیده گرفتن اثر تونل می‌تواند منجر به ارزیابی نادرست خطر لرزه‌ای شود. به طور خاص در مدل‌سازی محدودیت‌های روش میدان آزاد در برآورد پاسخ‌های لرزه‌ای در نزدیکی تونل، به ویژه در عمق ۳۰ متر و برای خاک‌های دانه‌ای، دقت کافی ندارند و می‌توانند پاسخ‌های لرزه‌ای را دست کم بگیرند یا بیش از حد تخمین بزنند. بعلاوه با توجه به شواهدی مبنی بر تقویت شتاب طیفی در شرایط خاص (حداکثر ۷ درصد در رس سیلتی)، و همچنین نوسانات شدید مشاهده شده، توصیه می‌شود که در مناطقی که تحلیل دقیق اندرکنش خاک-سازه امکان‌پذیر نیست، افزایش محافظه‌کارانه ۱۰ تا ۱۵ درصدی شتاب طیفی در طراحی در نظر گرفته شود. این دامنه پیشنهاد شده، شمولیت لازم برای پوشش اثرات تقویت مشاهده شده (۷ درصد) و همچنین عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌سازی دینامیکی را فراهم می‌آورد. در نهایت، این مطالعه تایید می‌کند که پارامترهای عمق، قطر و نوع خاک به صورت هم‌افزا بر پاسخ شتاب طیفی تاثیر می‌گذارند و برای

چسبندگی و سختی خاک در ماهیت (تقویت یا تضعیف) پاسخ دینامیکی مؤثر است.

- نتایج مطالعه نشان می‌دهد که طراحی لرزه‌ای سازه‌های سطحی و همچنین ارزیابی پایداری تونل در نواحی شهری باید فراتر از تحلیل‌های میدان آزاد باشد. توصیه می‌شود برای اطمینان از یک طراحی محافظه‌کارانه، افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی در شتاب طیفی بر اساس این یافته‌ها اعمال گردد، مگر آنکه تحلیل جامع اندرکنش خاک-سازه در عمق و نوع خاک بحرانی به طور دقیق انجام پذیرد.

وجود تونل در بحرانی‌ترین سناریو باعث افزایش تقریباً ۷ درصدی شتاب طیفی در سطح زمین می‌شود.

- پدیده تقویت شتاب طیفی در مقایسه با میدان آزاد، به طور موضعی در عمق ۳۰ متری رخ می‌دهد. این تقویت در خاک ماسه سیلتی (برای قطر ۱۲ متر) تا حدود $g \ 8/41$ گزارش شده است و بر اهمیت تحلیل‌های دقیق اندرکنش خاک-سازه (SSI) در اعماق متوسط تأکید می‌کند.

- خاک رس سیلتی در بحرانی‌ترین حالت، شاهد افزایش حدود ۷ درصدی شتاب طیفی سطح زمین در مقایسه با حالت بدون تونل است. این نتیجه نشان می‌دهد که دو ویژگی

۵- مراجع

- Almeida e Sousa, J., Negro, A., Matos Fernandes, M., Cardoso, A. J. J. o. g., & engineering, g. (2011). Three-dimensional nonlinear analyses of a metro tunnel in São Paulo Porous Clay, Brazil. 137(4), 376–384 .
- Andersen, L., Jones, C. J. J. o. s., & vibration. (2006). Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels—a comparison of two-and three-dimensional models. 293(3-5), 611–625 .
- Argyroudis, S., Tsinidis, G., Gatti, F., Pitilakis, K. J. S. D., & Engineering, E. (2017). Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels. 98, 244–256 .
- Asheghabadi, M. S., & Matinmanesh, H. J. P. e. (2011). Finite element seismic analysis of cylindrical tunnel in sandy soils with consideration of soil-tunnel interaction. 14, 3162–3169 .
- Bao, X., Xia, Z., Ye, G., Fu, Y., Su, D. J. T., & Technology, U. S. (2017). Numerical analysis on the seismic behavior of a large metro subway tunnel in liquefiable ground. 66, 91–106 .
- Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Kim, D.-S., Choo, Y. W. J. T., & Technology, U. S. (2014). Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. 44, 10–22 .
- Besharat, V., Davoodi, M., Jafari, M. K. J. A. J. f. S., & Engineering. (2014). Variations in ground surface responses under different seismic input motions due the presence of a tunnel. 39(10), 6927–6941 .
- Chen, S., Xu, C., & Li, S. J. S. (2024). Earthquake Engineering Technology and Its Application. In (Vol. 16, pp. 6703): MDPI.
- Cilingir, U., Madabhushi, S. G. J. S. D & ,Engineering, E. (2011). A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels. 31(3), 452–462 .
- Davarnia, D., Farahmand Azar, B. J. T. S. D. o. T., & Buildings, S. (2020). A new method for scaling of

- earthquake records using input energy of structures. 29(9), e1736 .
- Ding, J.-H., Jin, X.-L., Guo, Y.-Z., & Li, G.-G. J. E. s. (2006). Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel. 28(10), 1367–1377 .
- Douglas, J. J. E.-S. R. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. 61(1-2), 43–104 .
- Fakhriyeh, H., Vahdani, R., Gerami, M. J. S., & Vibration. (2019). Seismic acceleration spectrum of ground surface under Urban Subway Tunnels with circular cross sections in soil deposits based on SSI. 2019(1), 2076961 .
- Jiang, L., Chen, J., Li, J. J. E. e., & vibration, e. (2010). Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. 9(4), 555–567 .
- Kampas, G., Knappett, J. A., Brown, M., Anastasopoulos, I., Nikitas, N., Fuentes, R. J. T., & Technology, U. S. (2020). Implications of volume loss on the seismic response of tunnels in coarse-grained soils. 95, 103127 .
- Khademi, H., Mokhberi, M., Atefatdoost, G. J. G., & Engineering, G. (2023). Effect of a shock-absorbing material on seismic responses of the longitudinal buried tunnel using theoretical analysis and finite element modeling. 41(2), 120.
- Liu, J., Wang, D., Bao, X. J. E. E., & Vibration, E. (2021). Longitudinal integral response deformation method for the seismic analysis of a tunnel structure. 20(4), 887–904 .
- Mohsenian, V., Gharaei-Moghaddam, N., & Moghadam, A. S. J. R. i. E. (20۲۴). Exploring the distribution of seismic loads in tunnel-form concrete buildings using the probable area method. 21, 101851 .
- Rezaei, A. H., Shirzehhagh, M., Golpasand, M. R. B. J. G., & Engineering. (2019). EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements. 19(2), 153 .
- Rezk, H., Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Sayed, E. T. J. R. i. E. (2024). Metaheuristic optimization algorithms for real-world electrical and civil engineering application: a review. 23, 102437 .
- Shang, H., Bao ,C., Wang, H., Ma, X., Cao, J., & Du, J. J. R. i. E. (2023). Seismic response analysis of frame structures with uneven settlement of foundation considering soil-structure interaction. 20, 101574 .
- Su, N., Peng, S., & Hong, N. J. R. i. E. (2021). Universal simplified spectral models and closed form solutions to the wind-induced responses for high-rise structures. 10, 100230 .
- Sun, Y., Wang, G., Wang, Y., Tu, J., Jing, L., & Qi, W. J. S. (2023). Comparative Study on Shaking Table Tests for a Pile–Nuclear Island Structure under Different Soil Conditions. 15(15), 11988 .

- Tsinidis, G., Karatzetzou, A., Stefanidou, S., & Markogiannaki, O. J. G. (2022). Developments in seismic vulnerability assessment of tunnels and underground structures. 2(1), 209–249 .
- Tsinidis, G. J. T., & technology, u. s. (2018). Response of urban single and twin circular tunnels subjected to transversal ground seismic shaking. 76, 177–193 .
- Wang, G., Yuan, M., Miao, Y., Wu, J., Wang, Y. J. T., & Technology, U. S. (2018). Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system. 76, 145–159 .
- Xie, J., Duan, L., Li, Y., Yan, J., Pang, J., Li, X., . . . Engineering, B. (2022). Shock absorption analysis based on the tunnel-soil-surface building interaction system. 21(4), 1545–1560 .
- Yan, L., Haider, A., Li, P., Song, E. J. T., & Technology, U. S. (2020). A numerical study on the transverse seismic response of lined circular tunnels under obliquely incident asynchronous P and SV waves. 97, 103235 .
- Yesane, P. M., Ghugal, Y., & Wankhade, R. J. I. J. E. R. (2016). Study on soil-structure interaction: a review. 5(3), 737–741 .
- Zaid, M., Mishra, S., & Rao, K. (2020). Finite element analysis of static loading on urban tunnels. In *Geotechnical Characterization and Modelling: Proceedings of IGC 2018* (pp. 807–823): Springer.
- Zou, Y., Zhang, Y., Liu, H., Liu, H., Miao, Y. J. T., & Technology, U. S. (2021). Performance-based seismic assessment of shield tunnels by incorporating a nonlinear pseudostatic analysis approach for the soil-tunnel interaction. 114, 103981 .

Numerical investigation of seismic acceleration spectrum response in urban tunnels buried in fine-grained soils

Hossein Khademi Mashari¹, Mehdi Mokhberi^{2*}, Gholamreza Atefatdoost³

1- PhD candidate; Department of Civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, E-mail: Khademi_hosein57@yahoo.com

2- Faculty Member; Department of Civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, E-mail: mehdi.mokhberi@iau.ac.ir

3- Assistant Professor; Department of Civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, E-mail: Gh.atefatddost@iau.ac.ir

Received: 12 Oct 2025; Accepted: 6 Jul 2026

DOI: 10.22044/tuse.2026.16934.1505

Keywords	Extended Abstract
Tunnel Spectral acceleration Abaqus (ABAQUS) Free square Near field	Summary This study numerically investigates the seismic acceleration spectrum response of urban tunnels buried in fine-grained soils. The main objective is to analyze the effects of tunnel burial depth, tunnel diameter, and soil type on the ground surface seismic acceleration spectrum. Three tunnel diameters (6, 9, and 12 meters) were examined at burial depths of 20, 30, and 40 meters within three soil types: silty sand, silty clay, and alluvium. The research was conducted using ABAQUS software for two-dimensional dynamic simulations, employing the Drucker-Prager nonlinear constitutive model. The findings of this study reveal that tunnel presence significantly alters spectral acceleration, with the most pronounced effects observed at intermediate depths and in looser soil conditions.

Introduction

Rapid urban population growth and limited surface space have increased dependence on underground infrastructure in which tunnels play a critical role in transportation and utility networks. Ensuring seismic safety of these structures is essential as their failure may have severe consequences. Extensive numerical and experimental studies have been conducted to understand tunnel behavior under earthquake loading. However, complex interaction between tunnels, surrounding soils, and seismic wave propagation requires further investigation. This research addresses this gap by systematically evaluating the influence of overburden thickness, tunnel depth, tunnel diameter, and soil properties on ground surface spectral acceleration due to seismic loading. The results aim to provide practical insights for seismic hazard assessment and the design of surface structures adjacent to underground tunnels.

Methodology and Approaches

Numerical models were developed using ABAQUS software package to simulate both free-field conditions and tunnel-soil systems. Tunnels with diameters of 6, 9, and 12 meters were modeled at depths of 20, 30, and 40 meters, measured from the tunnel center to the ground surface. Three distinct soil types—silty sand, silty clay, and alluvium—were considered. The Drucker-Prager criterion was used to simulate nonlinear soil behavior. The tunnel lining, composed of a 30 cm thick precast concrete segment with a compressive strength of 700 kg/cm² and a density of 2400 kg/m³, was modeled. Soil-structure interaction at the tunnel-soil interface was explicitly considered. Seismic loading was applied using ground motion records from

four well-known earthquakes: Imperial Valley 262, Northridge 1231, San Fernando, and Tabas. The finite element mesh was used and extended to a depth of 60 meters and a width of 100 meters. The study systematically evaluated the effects of tunnel depth and diameter on the acceleration spectrum response under various soil conditions.

Results and Conclusions

The results indicate that tunnel presence causes measurable changes in the ground surface acceleration spectrum response compared to free-field conditions. With increasing depth, the tunnel influence diminishes so that at a depth of 40 meters, spectral acceleration values were consistently lower than those of the free-field scenario for all soil types and tunnel diameters. The most notable phenomenon occurred at the intermediate depth of 30 meters, where a local enhancement of spectral acceleration was observed. The highest amplification occurred in the case of a 12-meter diameter tunnel in silty sand soil. The study emphasizes the necessity of incorporating tunnel effects into seismic hazard assessments and the design of adjacent surface structures to ensure resilience during earthquake events.
