

چکیده

امروزه با توجه به توسعه محیط‌های شهری و افزایش روزافزون جمعیت و مشکلات ترافیکی شهرهای بزرگ، همواره ساخت فضاهای زیرزمینی به عنوان یک راهکار مدنظر می‌باشد. در این تحقیق تلاش شده تا مخاطرات ناشی از ساخت این فضاها و تأثیر آن بر سطح زمین در حین زلزله مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور خط ۷ مترو تهران با توجه به عبور از مجاورت مناطق مسکونی و آبرفت‌های مختلف، در مناطق بحرانی به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده است. اندرکنش دینامیکی تونل با سطح زمین به روش عددی و نرم‌افزار تفاضل محدود تحت محرک‌های ورودی مختلف انجام گردیده است. تحلیل‌ها در دو حالت حوزه پاسخ آزاد زمین و نیز حوزه تونل انجام گردیده است. مدل‌سازی برای سه حالت مختلف از شرایط بستر و نیز هفت روباره مختلف تحت چهار زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت انجام شده است. مدل عددی صحت‌سنجی شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که همواره در بحرانی‌ترین حالت، حضور تونل باعث افزایش ۳۳ درصدی مقادیر شتاب در سطح زمین می‌گردد. این افزایش مقادیر می‌تواند شتاب مبنای طراحی ساختمان‌ها را از $0.35g$ به $0.46g$ تغییر دهد. همچنین بیشترین تأثیر حضور تونل بر مقادیر شتاب سطح در فاصله $0.5D$ تا $1.5D$ از محور تونل می‌باشد که در این محدوده نیز در مسیر خط ۷ مترو ساختمان‌های مسکونی قرار دارد. در تحلیل‌های با عمق دفن‌های مختلف نیز مشخص گردید که افزایش روباره تونل باعث افزایش شعاع تأثیر روی سطح زمین می‌شود، در صورتی که اثر افزایشی آن کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: تونل مترو، اندرکنش دینامیکی، حوزه پاسخ آزاد زمین، بزرگنمایی شتاب، حوزه تونل.

بررسی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل، مطالعه موردی خط ۷ متروی تهران

وهاب بشارت (نویسنده مسئول)

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، ایران و

پژوهشگر مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی،

v.besharat@mshdiau.ac.ir

سهیل مجید زمانی

استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی و به‌طور کلی اثر توأمان زلزله و تونل در لس آنجلس ارائه شد [۱] که در حقیقت سرآغازی بر مطالعات لرزه‌ای تونل و رفتار دینامیکی تونل و محیط اطراف آن بود. در سال ۱۹۷۹ لی و تریفوناک [۲] بر روی پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای شکل، برای امواج مهاجم SH و در محیط همگن و همسان مطالعاتی را به روش تحلیلی انجام داده‌اند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که با افزایش زاویه تابش موج نسبت به افق، پیچیدگی حرکت لرزه‌ای سطح زمین افزایش می‌یابد. کریچلو [۳] تأثیر سازه‌های زیرزمینی توپس بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین

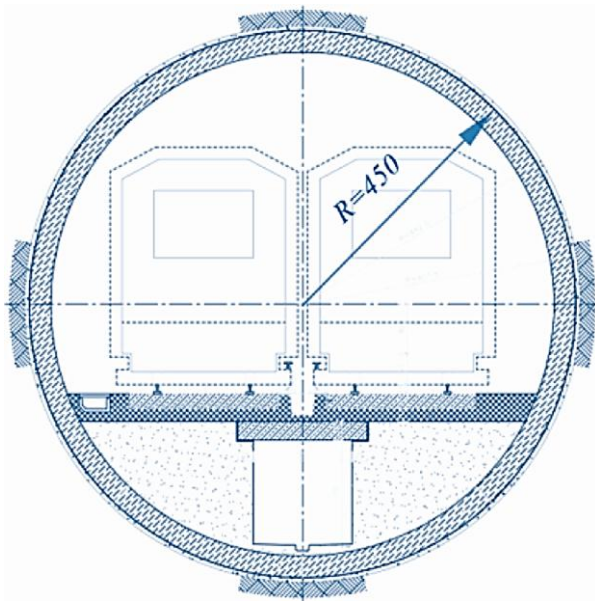
ساخت سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها باعث ایجاد تغییراتی در سطح زمین می‌شود. این تغییرات در حوزه استاتیکی و دوران ساخت مورد بررسی بسیاری از محققین بوده است. حضور هرگونه ناهمگونی همچون تونل‌ها در داخل زمین باعث تغییر رفتار لرزه‌ای سطح زمین در حوزه دینامیکی نیز خواهد شد. محققین در بررسی‌های خود با روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و نیز انجام آزمایش‌های مبتنی بر مدل‌سازی فیزیکی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. از سال ۱۹۷۱ و بعد از زلزله سان‌فرانسیسکو، اطلاعاتی در خصوص خسارات وارد شده به

می‌دهد. دلیل این امر نیز عدم تبعیت حرکت سازه با حرکت خاک اطراف آن عنوان شده است که باعث کاهش پاسخ زمین در بالای سازه زیرزمینی نسبت به منطقه میدان آزاد می‌شود. همچنین در ادامه آن تحقیق، کاهش ۵۰ درصدی شتاب سطح نیز تحت کالورت گزارش شده است [۹].

بشارت و همکاران [۱۰] نیز اثر حضور تونل بر رفتار لرزه‌ای سطح زمین را در مطالعه موردی تونل نیایش صدر مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان از افزایش مقدار شتاب در فاصله $0.5D$ تا $1D$ از مرکز تونل در سطح زمین ناشی از حضور تونل دارد. این پارامتر در فرکانس نزدیک فرکانس طبیعی سیستم تا ۳۷ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این تغییر شتاب سطح ناشی از حضور تونل در مطالعه دیگر نویسندگان نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. پنجمی و همکاران [۱۲-۱۳] نیز با انجام تحلیل‌های حوزه زمان به روش اجزای مرزی به بررسی رفتار سطح زمین در حالت دره‌ای شکل در بالای حفرات پرداخته‌اند. در این تحقیقات ضمن بررسی پارامترهای مختلف نظیر ضریب شکل دره، ضریب عمق و زاویه حادث شدن بار بر رفتار دره در بالای حفره، نتایج نشان از پاسخ متفاوت با حالت دره و حفره به تنهایی می‌باشد. علی‌الهی و همکاران [۱۴-۱۵] نیز با انجام مطالعاتی به روش اجزای مرزی بر روی حفرات زیرزمینی، اثرات این حفرات را بر روی حرکات سطح زمین بررسی نمودند. آنها دریافتند که حفرات سطحی که در معرض امواج قائم SV قرار می‌گیرند باعث کاهش مؤلفه افقی حرکت در سطح زمین و بالای حفره می‌گردد درحالی که افزایش قابل توجهی در حرکات افقی سطح در فرکانس‌های بی‌بعد 0.5 و نیز نسبت ابعادی عمق دفن به شعاع تونل برابر $1/5$ ، دیده می‌شود. همچنین در تحقیقی دیگر توسط این محققین اثر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر طیف پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان‌دهنده افزایش حدود دو برابری بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نسبت به حالت میدان آزاد می‌باشد [۱۶]. تأثیرات لرزه‌ای دو بعدی

تحت اثر امواج لرزه‌ای قائم خطی و نیز امواج SH را به روش المان محدود دو بعدی مورد بررسی قرار داد. در ادامه مانوژیان و لی [۴] بر روی تفرق امواج SH برای اشکال مختلف حفره‌های توپر زیرسطحی بررسی‌هایی انجام دادند. این بررسی‌ها نشان داد که با افزایش فرکانس بی‌بعد، الگوی تغییر مکان بیشتر از پیش پیچیده شده و مقادیر دامنه بزرگنمایی حرکت سطح نسبت به حالت پاسخ آزاد، در حدود دو گزارش شده است. در سال ۲۰۰۷ یوتامیترا و همکاران [۵] با کمک تکنیک‌های تفاضل محدود و با کمک نرم‌افزار FLAC به بررسی این پدیده پرداختند. آنها نشان دادند که حداکثر بزرگنمایی حرکت افقی برای تونل بدون پوشش در شرایط بحرانی از نظر هندسه برابر $1/5$ می‌باشد. همچنین پیشنهاد دادند که برای این تونل‌ها در شرایط کلی، مؤلفه حرکت افقی می‌تواند بین ۲۰ درصد تا ۸۵ درصد با توجه به فاصله‌ی تونل بزرگ‌تر شود. در خصوص مؤلفه عمودی حرکت نیز مقدار تغییر آن ناشی از حضور تونل را حدود $0.33/5$ تا $1/5$ برابر مقدار مؤلفه افقی پاسخ آزاد زمین ارائه دادند. یو و دراوینسکی [۶] به بررسی تفرق امواج هارمونیک SV و P و رایلی توسط حفره‌های دایروی و غیردایروی هموار و ناهموار مدفون در محیط همگن و همسان کشسان به روش حل معادلات انتگرال مرزی به روش مستقیم در حوزه‌ی فرکانس پرداختند. کیلینگر و گوپال مادابوشی [۷] در سال ۲۰۱۱ اثرات حضور تونل را با مدل سانتریفیوژ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت عمق دفن تونل به قطر آن، نسبت بزرگنمایی شتاب در بالای تونل نسبت به میدان آزاد بیشتر می‌شود، همچنین بزرگنمایی صورت گرفته در حالت تونل صلب بیشتر از تونل انعطاف‌پذیر می‌باشد. در مطالعه‌ی مشابهی با هدف بررسی اثر حضور سازه زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، مدل‌سازی فیزیکی کالورت‌های مستطیلی در دو حالت کالورت صلب و انعطاف‌پذیر و محیط اطراف آنها توسط ابوهاجر و همکاران [۸] در دانشگاه آر پی ای به انجام رسید. آنها نشان دادند که وجود سازه مدفون، مقادیر شتاب‌های حداکثر موج ورودی را کاهش

تحلیل‌های لرزه‌ای، خطوط متروی تهران مورد بررسی اجمالی قرار گرفته و جهت تحلیل‌های نهایی خط ۷ مترو با توجه به وضعیت پلان و پروفیل خط و نیز عبور از سازه‌های مختلف به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. شکل (۱) مقطع تونل خط ۷ مترو که یک تونل دایروی بوده و به وسیله‌ی دستگاه حفاری و اجرا شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مقطع تونل خط ۷ متروی تهران.

خط ۷ مترو تهران با طولی برابر ۲۷ کیلومتر از بزرگراه هجرت ورزشگاه جهان پهلوان تختی (جنوب شرق) تا میدان بوستان سعادت آباد (شمال غرب) ادامه داشته و شامل ۲۵ ایستگاه می‌باشد. عمق دفن تونل در مسیر متغیر بوده و از ۶ متر در بخش‌های ابتدایی (جنوب شرقی مسیر) تا بالای ۵۰ متر در بخش‌های انتهایی (شمال غربی) متغیر می‌باشد. با دقت در پلان این خط مشخص می‌شود که مسیر عموماً از بافت شهری عبور کرده و سازه‌ی تونل در مجاورت ساختمان‌های مسکونی سطح با فواصل مختلف جای گرفته است. شکل (۲) پلان کلی این مسیر را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر از آنجا که هدف یافتن تأثیر این سازه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌باشد، با توجه به نتایج مطالعات

حفرات زیرزمینی نیز بر روی حرکات سطح به روش اجزای مرزی نشان‌دهنده‌ی افزایش زیاد متغیرهای بزرگنمایی سطح بوده که علی‌الهی و همکاران [۱۷] ضمن بررسی این مطلب به ارائه پیشنهادهایی جهت اصلاح مقادیر آیین‌نامه طرح لرزه‌ای و ریز پهنه‌بندی پرداخته‌اند.

بازیار و همکاران [۱۸-۱۹] نیز با انجام آزمایش سائتریفیوژ بر روی مدل دارای تونل و اندازه‌گیری شتاب‌ها در نقاط مختلف دریافتند که حضور سازه‌های زیرزمینی باعث بزرگنمایی پریودهای بلند و کاهش پریودهای کوتاه مؤلفه ورودی حرکت می‌شود. همچنین نتایج بررسی آنها بر روی مطالعه موردی شهر تهران نیز نشان از افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی تابع بزرگنمایی برای عمق‌های مختلف می‌باشد.

با بررسی مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر حضور تونل بر پاسخ سطح زمین مشخص شد که عمده تحقیقات که به صورت تحلیلی و عددی انجام پذیرفته است، بر پارامتر تغییر مکان‌های سطح متمرکز شده که نشان از تأثیر افزایش حرکات سطح ناشی از حضور تونل دارد. پارامتر شتاب که مبنای اصلی طراحی سازه‌های سطحی می‌باشد صرفاً در مدل‌سازی‌های فیزیکی و یا مطالعه موردی خاص مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که هم نتایج کاهشی و هم افزایشی در مطالعات مختلف گزارش شده است. در این تحقیق با توجه به حساسیت پارامتر شتاب طراحی سطح به حضور تونل و تأثیرپذیری طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی از سازه‌های زیرزمینی، این پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از آنجا که شهر تهران دارای بیشترین تراکم تونل‌های مترو در کشور بوده و این تونل‌ها از مجاورت ساختمان‌های مسکونی عبور می‌کند، تمرکز بر روی شرایط شهر تهران می‌باشد.

۲- بررسی مطالعه موردی

۲-۱- خصوصیات هندسی

جهت بررسی اثر حضور تونل بر پاسخ سطح زمین در



پلان و پروفیل خط ۷ در حدفاصل ایستگاه E7 تا D7 و ساختمان های مد نظر



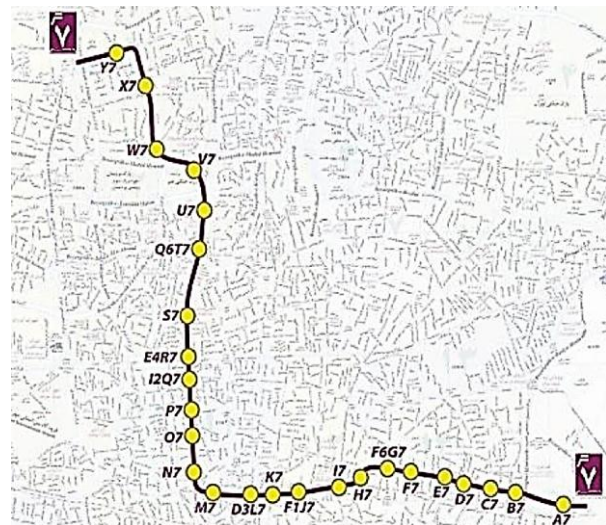
پلان و پروفیل خط ۷ در حدفاصل ایستگاه C7 تا B7 و ساختمان های مد نظر



پلان و پروفیل خط ۷ در حدفاصل ایستگاه I7 تا H7 و ساختمان های مد نظر

شکل (۳): پلان و پروفیل محدوده‌های انتخابی از خط ۷.

با تطبیق نقشه آبرفت شهر تهران با موقعیت خط ۷ مترو، خصوصیات تقریبی مقاطع انتخابی به دست می‌آید. این خصوصیات با توجه به آزمایش‌های ژئوتکنیک انجام شده تدقیق گردیده و برای مقاطع مورد نظر استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات خاک استفاده شده در تحلیل‌ها را بر این اساس ارائه می‌دهد. جهت تعیین خصوصیات ژئوتکنیک لرزه‌ای مسیر نیز از نقشه توزیع سرعت موج برشی به همراه مسیر خط ۷ مطابق شکل (۴) استفاده شده و بر اساس آن سرعت موج برشی در محدوده‌های دلخواه استخراج شده است.



شکل (۲): پلان کلی خط ۷ متروی تهران.

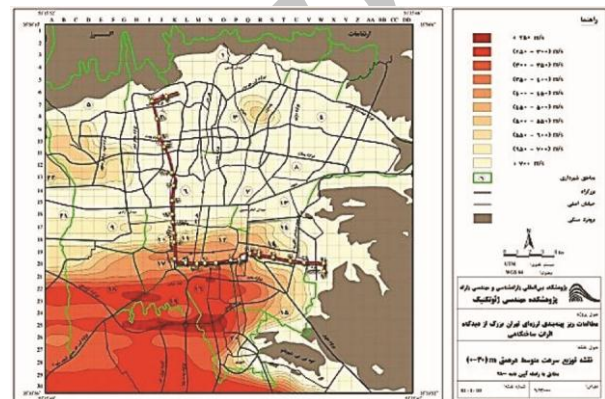
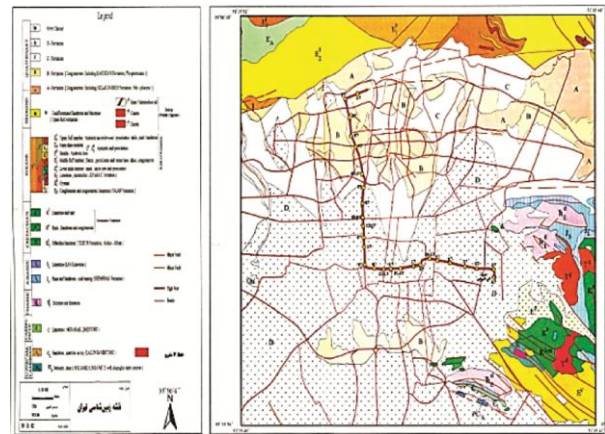
پیشین شرایط بحرانی تر یعنی روباره کمتر و فاصله افقی کمتر محور تونل تا سازه مد نظر قرار گرفته است. بدین منظور کل مسیر خط ۷ مترو از نظر پلان و پروفیل به طور دقیق بررسی شده و در آن با توجه به مطالعات پیشین مناطقی که دارای دو شرط هم‌زمان روباره کمتر از ۲۰ متر تونل و فاصله‌ی کمتر از ۲۲/۵ متر (۵ برابر شعاع) ساختمان‌ها از محور تونل بوده‌اند برداشت و مشخص شده‌اند. شکل (۳) برخی از این موقعیت‌ها را در پلان و پروفیل مسیر نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محور تونل به همراه مرزهای محدوده ۲۲/۵ متری اطراف آن در بین فضاهای ایستگاه‌ها و همچنین پروفیل زمین طبیعی، خط پروژه و نیز محدوده ۲۰ متری مشخص است.

۲-۲- خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر

خط ۷ متروی تهران از سمت شرق و جنوب شرقی به سمت قسمت‌های مرکزی حرکت کرده و سپس به سمت شمال ادامه مسیر می‌دهد لذا در طول مسیر خود از بافت‌های مختلف ژئوتکنیکی تهران عبور می‌کند. بسته به محل مورد بررسی در این تحقیق که در قسمت‌های فوق با اعمال محدودیت‌های هندسی مشخص شد خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی مختص آن قسمت استخراج گردیده است.

جدول (۱): خصوصیات ژئوتکنیکی و حالت‌های تحلیل.

گروه‌ها	Case 1	Case 2	Case 3
حالت‌های تحلیل بر حسب روباره	h8 – h10 – h12	h15 – h20	h13 – h17
وزن مخصوص γ (kN/m ³)	۱۸	۱۸	۱۸
مدول برشی G (MN/m ²)	۳/۶۵ E۲	۲/۲۱ E۲	۷/۶۱ E۲
زاویه اصطکاک ϕ (Deg.)	۲۵	۱۵	۳۵
چسبندگی c (kN/m ²)	۱۵	۲۵	۱۵
ضریب پواسون ν	۰/۳	۰/۳	۰/۳
سرعت موج برشی V _{s av} (m/s)	۴۵۰	۳۵۰	۶۵۰



۳-۱- هندسه مدل

جهت مدل‌سازی محیط لرزه‌ای به همراه تونل، از محیطی به ابعاد ۱۲۰×۵۰ متر استفاده شده است. عرض مدل برابر ۱۲۰ متر انتخاب شده تا مرزهای جانبی به اندازه کافی از تونل فاصله داشته باشند تا اثری بر روی تونل در نتایج نگذارند. این عرض برای مدل به گونه‌ای اختیار گردیده تا از هر طرف ۶D با تونل فاصله داشته باشد. در این صورت درصد خطای ناشی از تنش به حدود ۵ درصد رسیده و می‌توان از اثر مرزها بر تحلیل صرف‌نظر نمود. جهت انجام تحلیل دینامیکی، مدل مطابق شکل (۵) مش‌بندی می‌شود. نرم‌افزار FLAC برای حل مسائل از مش‌های مستطیل شکل استفاده می‌نماید. بسته به شرایط تحلیل، ابعاد این زون‌ها قابل تعریف است. این نرم‌افزار هر مش را به چهار زیر ناحیه مثلثی شکل که شرایط المان‌های کامل را دارا هستند به جهت همگرایی سریع‌تر تقسیم می‌کند. ابعاد مش باید به اندازه‌ای کوچک باشد تا امواج برشی منتشر شده در مدل بتواند در آن انتشار پیدا کند. بر اساس مطالعات لیسمر و کولمیر در این خصوص [۲۱]، در مدل‌های عدی طول موج (۸) تعیین‌کننده صحت انتشار امواج خواهد بود. مقدار طول موج نیز وابسته به ابعاد المان‌ها در راستای انتشار امواج بوده و بایستی ابعاد المان‌ها

شکل (۴): موقعیت خط ۷ مترو در نقشه توزیع سرعت موج برشی و آب‌رفت تهران.

۳-۲- جمع‌بندی و انتخاب مقاطع

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد خصوصیات هندسی و نیز پارامترهای خاک، مسیر خط ۷ به سه قسمت تقسیم شده است. در هر قسمت با توجه به وضعیت پلان و پروفیل، روباره‌های مختلف نیز انتخاب گردیده است. جدول (۱) انواع حالت‌های تحلیل به همراه خصوصیات در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.

۳-۳- مدل‌سازی عددی و فضای تحلیل

در تحقیق حاضر جهت بررسی رفتار اندرکنش دینامیکی تونل با سطح زمین و با توجه به پیچیدگی‌های این رفتار از مدل عددی استفاده شده است. نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC V6 [۲۰] به همراه فیش‌های نوشته شده جهت انجام تحلیل‌ها مبنای محاسبات بوده است.

۳-۳- نحوه بارگذاری

جهت اعمال محرک ورودی در نرم افزار FLAC روش های متفاوتی وجود دارد که بسته به نوع محرک و نیز شرایط مدل باید یکی از انواع آنها را انتخاب کرد. در تحقیق حاضر روشی که توسط راهنمای برنامه نیز توصیه شده یعنی استفاده از تاریخچه زمانی تنش برشی جای اعمال شتاب به کار گرفته می شود. در این روش فرض بر مرز انعطاف پذیر بوده که نمایانگر بستر انعطاف پذیر در مدل عددی است. در این حالت امکان جذب امواج توسط مرزهای جاذب وجود خواهد داشت. تاریخچه زمانی تنش برشی از تبدیل قسمت برشی امواج لرزه ای توسط رابطه (۳) به دست می آید.

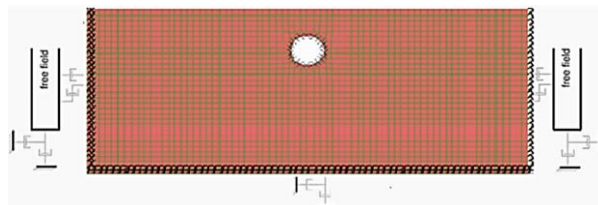
$$\sigma_s = \alpha(\rho C_s) V_s \quad (3)$$

در این رابطه σ_s تنش برشی، ρ جرم مخصوص خاک، C_s سرعت موج برشی خاک و V_s سرعت برشی ذرات می باشد. ضریب α نیز باید با توجه به تطبیق خروجی سرعت با سرعت اولیه برای هر مدل انتخاب شود.

۳-۴- صحت سنجی مدل

مدل عددی ساخته شده با توجه به لحاظ کردن اندرکنش تونل با محیط اطراف به روش های مختلف صحت سنجی شده است. در این تحقیق جهت صحت سنجی مدل عددی از مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج یک تونل تحت آزمایش سانتریفیوژ با شتاب $50g$ استفاده شده است [۲۴]. به مدل عددی ساخته شده مشابه مدل فیزیکی مینا زلزله لوما پریسا اعمال شده و شرایط و خصوصیات مدل سازی فیزیکی در مدل عددی به طور کامل پیاده شده است. مطابق شکل (۶) که خصوصیات مدل سازی فیزیکی مینا را نشان می دهد، نتایج تابع بزرگنمایی در عمق، در دو مدل با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که مشخص است اگرچه جواب در هر دو حالت مقدار کمی با هم متفاوت است ولی روند کلی جواب ها و سیر افزایشی آنها مشابه هم است که نشان از ارزیابی مناسب این مدل ساخته شده دارد. اختلاف ایجاد شده بین نتایج را نیز می توان به مرزها و نحوه مدل سازی آنها نسبت داد.

کوچک تر از $\frac{1}{10}$ یا $\frac{1}{8}$ طول موج باشد. فرکانس محرک ورودی در تحلیل های انجام شده همگی برای فرکانس بالای ۲۰ هرتز فیلتر خواهند شد.



شکل (۵): مدل عددی به همراه مش بندی جهت تحلیل.

۳-۲- مشخصات مدل

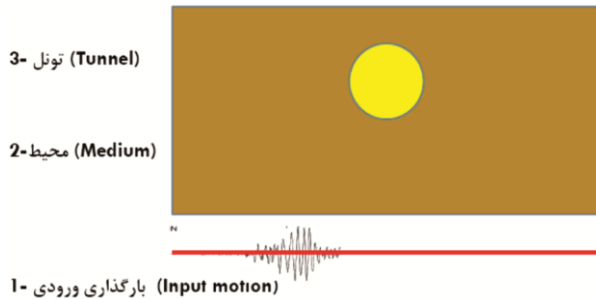
در مدل عددی موجود جهت خاک از مصالح با مدل رفتاری موهر-کولمب مطابق با مشخصات جدول (۱) برای هر حالت تحلیل استفاده شده است. با توجه به سادگی و در دسترس بودن پارامترهای مدل موهر-کولمب و نیز استفاده این مدل در تحقیقات مشابه [۹]، این مدل برای تحلیل ها استفاده شده است. میرایی هیستریسیس جهت مدل کردن میرایی در خاک های مدل استفاده شده تا رفتار واقعی مصالح را در هنگام زلزله نشان دهد. این مدل کاهش مدول برشی و میرایی را به صورت تابعی از کرنش برشی به خاک اعمال می کند [۲۲]. جهت استفاده از این مدل از سه پارامتر وابسته مطابق روابط (۱) و (۲) در تحلیل دینامیکی موجود استفاده شده است.

$$G_{\text{secant}} = s^2(3 - 3s) \quad (1)$$

$$s = \frac{L_1 - L}{L_2 - L_1} \quad (2)$$

در این روابط L لگاریتم کرنش برشی و L_1 و L_2 به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل L در جایی است که مشتق منحنی کاهش برابر صفر باشد. ضرایب به کار رفته نیز جهت یکسان کردن با منحنی های کاهش استفاده شده است. حد بالای منحنی کاهش مدول و میرایی برای ماسه که توسط سید و ایدریس [۲۳] پیشنهاد شده برای این تحلیل استفاده شده است و بر مبنای آن ضرایب به صورت $L_1 = -3.325$, $L_2 = 0.823$ اختیار می شود.

نوع آن، بزرگی، مدت و خصوصیات فرکانسی به‌عنوان محرک اصلی محیط در تحلیل‌ها مطرح می‌شود.



شکل (۷): فضاهای مختلف تحلیل که در تقابل با هم قرار دارند.

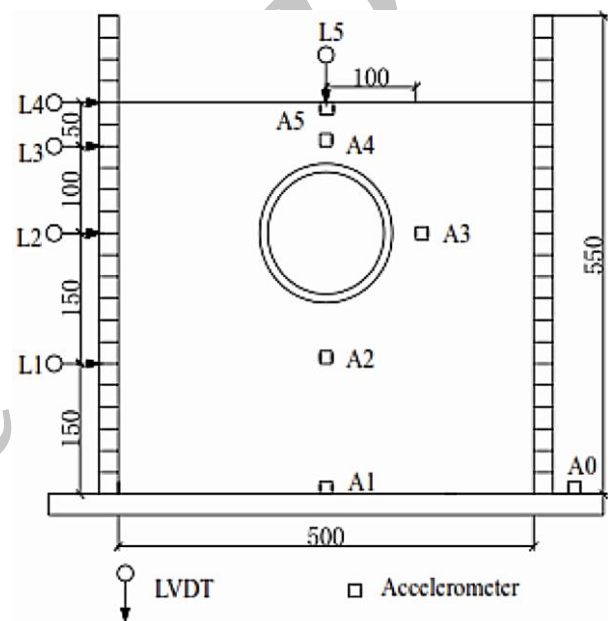
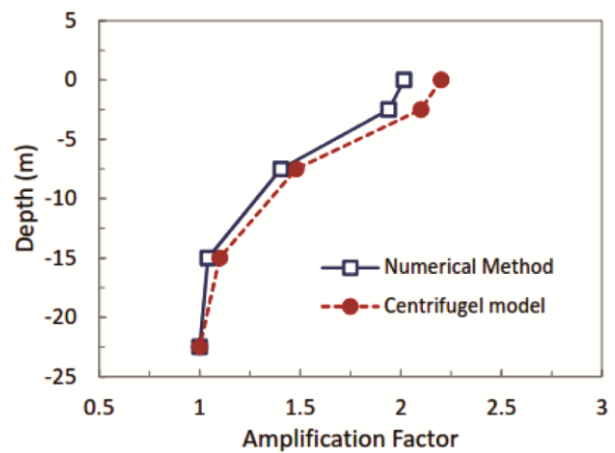
جدول (۲): مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل‌ها.

نام زلزله	زمان زلزله ثانیه	فرکانس غالب هرتز
امری ویل	۴۰	۰/۶
چی چی	۴۰	۱/۶۸
گیروی	۳۰	۲/۶۸
کاستیک	۳۰	۲/۹۳

در تحقیق حاضر از بارگذاری زلزله به صورت تاریخچه زمانی شتاب زلزله برای چهار زلزله با محتوای فرکانسی مختلف مطابق شکل (۸) و جدول (۲) استفاده شده است. تمامی شتاب‌نگاشت‌ها به شتاب حداکثر $0.3g$ در تحلیل‌ها مقیاس شده است. شتاب‌نگاشت‌های منتخب بر اساس خصوصیات مطالعه موردی از قبیل جنس زمین، وضعیت سنگ بستر و فاصله از گسل از سایت PEER [۲۵] استخراج و پس از اعمال اصلاحات در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۵-۲- محیط خاک

یکی دیگر از عوامل مؤثر در تحلیل اندرکنشی تونل و محیط اطراف، خصوصیات محیط لرزه‌ای می‌باشد. سرعت‌های موج برشی متفاوت در این تحلیل استفاده شده است که بر اساس موقعیت مطالعه موردی برابر ۳۵۰ ، ۴۵۰ و ۶۵۰ متر در ثانیه انتخاب



شکل (۶): مدل فیزیکی مینا به همراه تغییرات تابع بزرگنمایی شتاب در حالت مدل عددی و مدل فیزیکی.

۳-۵-۵- فضاهای تحلیل

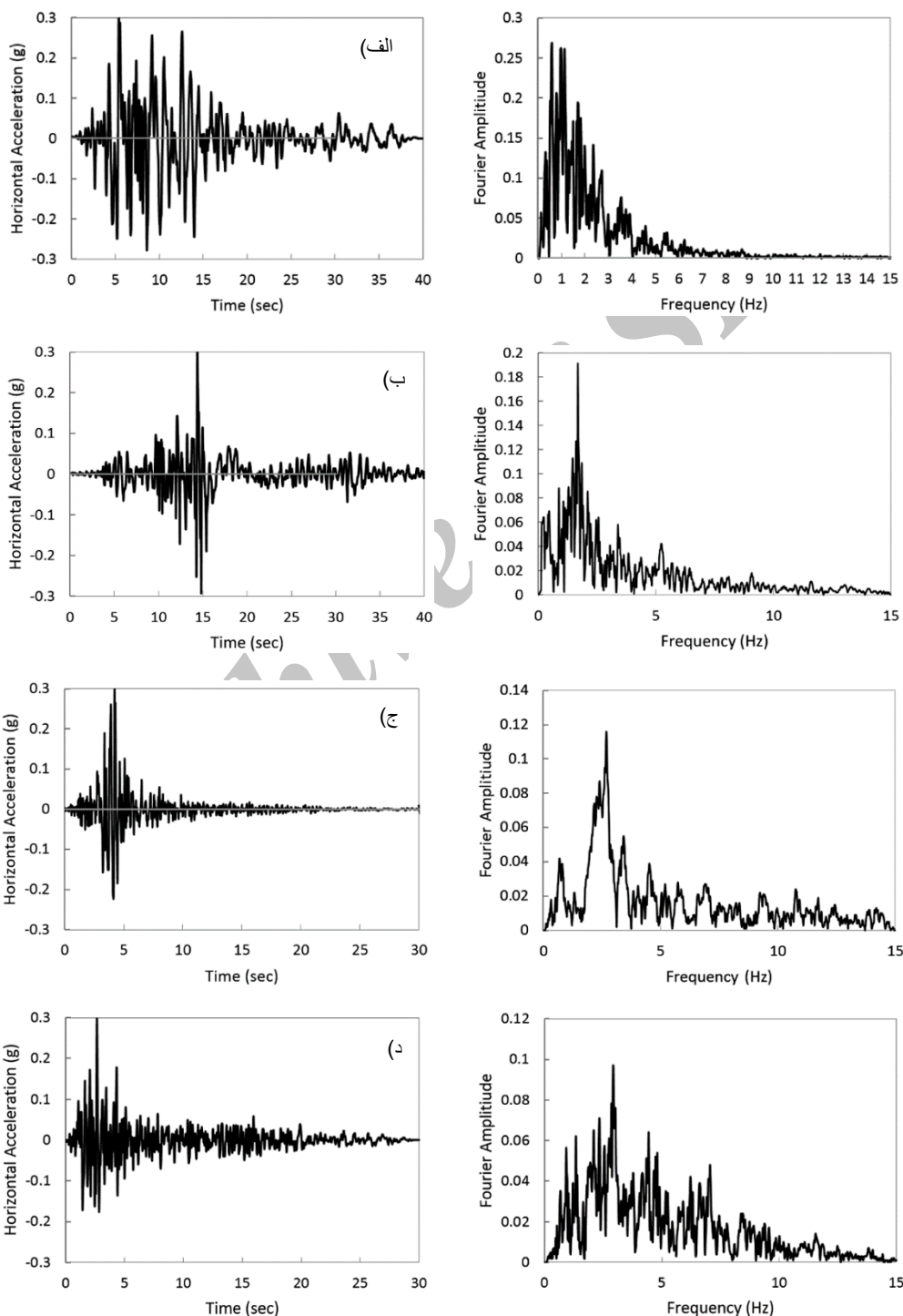
جهت بررسی اثر اندرکنش تونل و سطح زمین، نیاز است تا فضاهایی که با هم در اندرکنش هستند معرفی شود. این فضاها که در نتایج تحلیل و بررسی‌ها اثرگذارند در شکل (۷) به صورت شماتیک نشان داده شده است.

۳-۵-۱- بارگذاری ورودی

یکی از عوامل تأثیرگذار در رفتار دینامیکی محیط‌های خاکی، بارگذاری دینامیکی می‌باشد. این بارگذاری بسته به

۱/۱۷ و ۲/۴۶ هرتز به دست آمده است. در تحقیق حاضر با توجه به مشخصات محیط لرزه‌ای و نیز بارگذاری‌های انتخابی، در تحلیل‌های صورت گرفته نسبت فرکانسی (فرکانس بی بعد محرک ورودی به فرکانس طبیعی محیط) در محدوده ۰/۳ تا ۱/۸ قرار گرفته و نتایج در این حوزه معتبر می‌باشد.

شده است. از خصوصیات تأثیرگذار در تحلیل لرزه‌ای مدل، فرکانس طبیعی سیستم بوده که این فرکانس از مشخصه‌های محیط لرزه‌ای می‌باشد. با کمک نرم‌افزار DEEP SOIL و در حالت استفاده از روش خطی معادل همراه با میرایی فرکانس‌های طبیعی حالت‌های مختلف برای مد اول به ترتیب برابر ۱/۶۶،



شکل (۸): شتاب‌نکاشت‌ها و منحنی دامنه‌های فوریه وابسته به هر زلزله (الف) امری ویل، (ب) چی چی، (ج) گیلروی، (د) کاستیک.

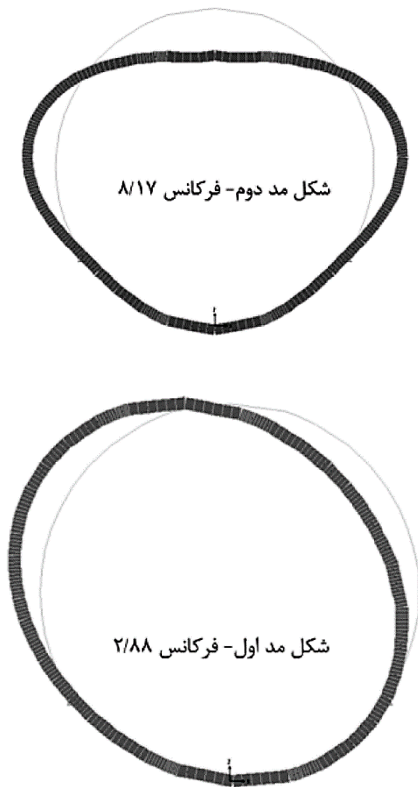
۳-۵-۳- تونل

قرار گرفتن تونل در خاک در هنگام اعمال ارتعاشات باعث می‌شود تا خود تونل نیز رفتار لرزه‌ای خاصی از خود نشان دهد. رفتار لرزه‌ای تونل شامل مشخصات هندسی و سازه‌ای تونل و نیز نسبت سختی آن با خاک اطراف می‌باشد. در تحلیل حاضر از تونلی با قطر ۹ متر و ضخامت پوشش ۳۰ سانتی‌متر که با کمک المان تیر مدل سازی شده، استفاده شده است. در این قسمت صرفاً هدف بررسی خصوصیات لرزه‌ای محیط‌های مختلف بوده لذا به بررسی رفتار تونل به تنهایی پرداخته خواهد شد. شکل (۹) نیز نحوه تغییر شکل تونل در مدهای مختلف ارتعاشی را نشان می‌دهد.

۴- نتایج تحلیل

۴-۱- تعاریف

جهت بررسی تأثیر حضور تونل بر پاسخ سطح زمین و محیط اطراف تونل تحلیل‌های دینامیکی در حوزه TF (حوزه پاسخ تونل) و FF (حوزه پاسخ آزاد زمین) صورت گرفته است. بدین صورت که ابتدا مدل عددی بدون حضور تونل تحلیل شده و پارامترهای مورد نظر به صورت کنتورهای رنگی و یا اعداد در نقاط مشخص ثبت گردیده است. حال مدل با همان شرایط بارگذاری و هندسی با وجود تونل تحلیل می‌شود و پارامترهای اشاره شده مجدداً استخراج می‌شوند. اختلاف بین شرایط FF با شرایط TF بیانگر اثر حضور تونل بر محیط می‌باشد. در حوزه زمان، تحلیل‌های دینامیکی بر روی تونل تحت محرک ورودی خاص انجام شده و نتایج شتاب و سرعت در نقاط خاص استخراج می‌شود. در این نتایج پارامترهای AAF و AIF که بیانگر نحوه اثر تونل می‌باشد در دو حالت حوزه پاسخ آزاد و حوزه تونل ارائه شده است. جهت توصیف دقیق‌تر تغییرات ایجاد شده در مقادیر شتاب، دو پارامتر جدید مطابق روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شود. در این پارامترها تأثیر اندرکنش تونل از تقسیم ضریب بزرگنمایی شتاب در پاسخ حوزه تونل به این ضریب در حوزه پاسخ آزاد به دست می‌آید.



شکل (۹): شکل مدهای تونل به همراه فرکانس‌های طبیعی تونل.

$$AAF = \frac{acc_i}{acc_{base}} \quad (۴)$$

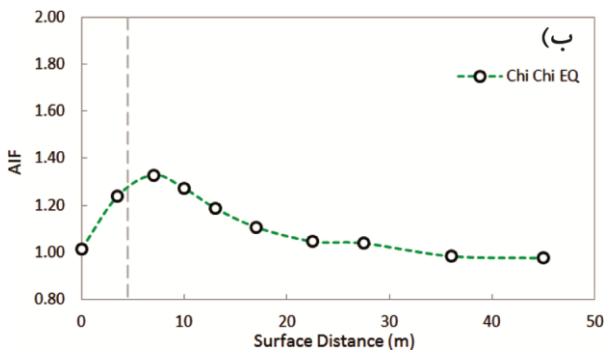
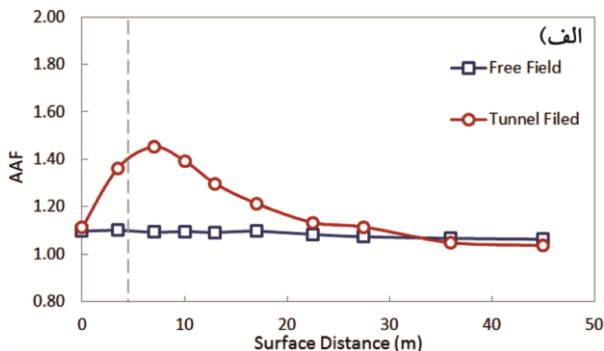
$$AIF = \frac{AAF_{TF}}{AAF_{FF}} \quad (۵)$$

در این روابط AAF ضریب بزرگنمایی شتاب، acc_i شتاب در یک نقطه خاص، AIF ضریب اندرکنشی شتاب، AAF_{TF} ضریب بزرگنمایی شتاب در حوزه تونل و AAF_{FF} ضریب بزرگنمایی شتاب در حوزه پاسخ آزاد زمین می‌باشد.

۴-۲- مشاهدات تفصیلی بر روی مدل مبنا

جهت بررسی دقیق‌تر نحوه تأثیر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، مدل مربوط به Case 1 در حالت h8 تحت زلزله چی چی مورد ارزیابی دقیق قرار خواهد گرفت. شتاب‌نگاشت که به مدت ۳۰ ثانیه به مدل اعمال گردیده دارای فرکانس غالب ۱/۶۸ هرتز می‌باشد. حداکثر شتاب در سیستم تحت این محرک ورودی در ثانیه حدود ۱۵ اتفاق می‌افتد. جهت بررسی تأثیر

این شتاب‌ها در هر دو حالت مدل با تونل و بدون تونل به دست آمده که نتایج آن در شکل (۱۱) ارائه شده است.

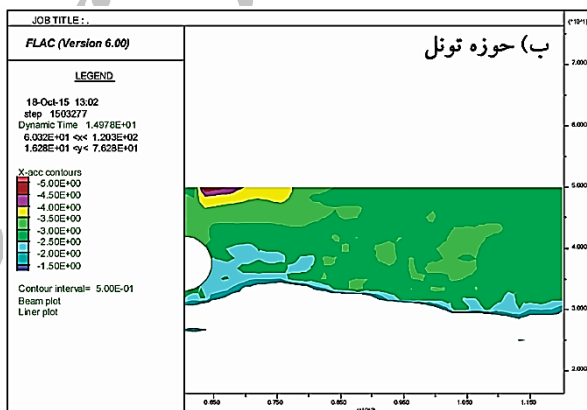
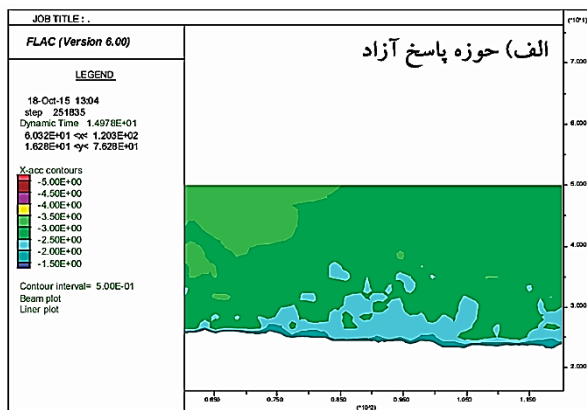


شکل (۱۱): نتایج تحلیل مدل تحت شتاب‌نگاشت چی چی (الف) ضریب بزرگنمایی در سطح (ب) ضریب اندرکنشی در سطح.

همان‌طور که در شکل (۱۱ الف) مشخص است مدل تحت بارگذاری معلوم دارای ضریب بزرگنمایی حدود ۱/۱۵ در حوزه پاسخ آزاد می‌باشد در حالی که در حوزه پاسخ تونل این ضریب در حداکثر مقدار به ۱/۵ ناشی از حضور تونل افزایش می‌یابد. این افزایش ضریب منجر به افزایش ۳۳ درصدی شتاب در سطح به علت حضور تونل شده است که در شکل (۱۱ ب) مشهود است. حداکثر اثرپذیری در این زلزله در فاصله بین ۳ تا ۵ متری تونل اتفاق افتاده است یعنی تونل بیشترین اثر خود را در این منطقه می‌گذارد.

جهت مشاهده رفتار متفاوت نقاط با فاصله مختلف از محور تونل در سطح زمین، تغییرات شتاب این نقاط در دو حالت حوزه پاسخ آزاد و حوزه تونل در زلزله لوما پریتا برای ۵ ثانیه اول زلزله در شکل (۱۲) ارائه شده است.

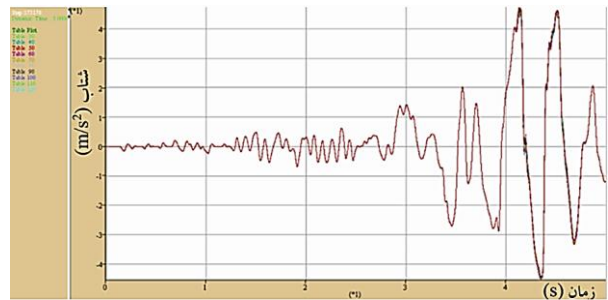
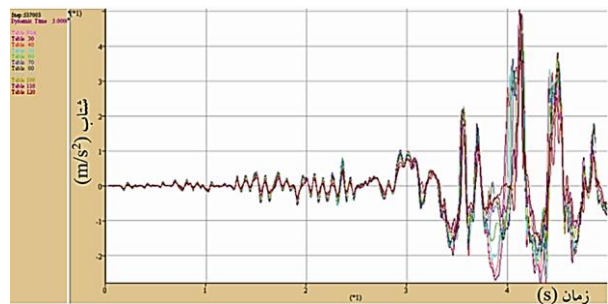
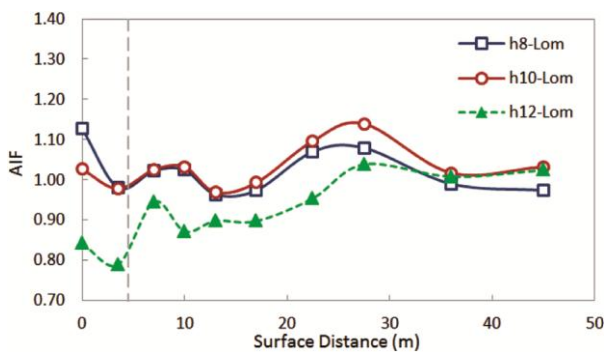
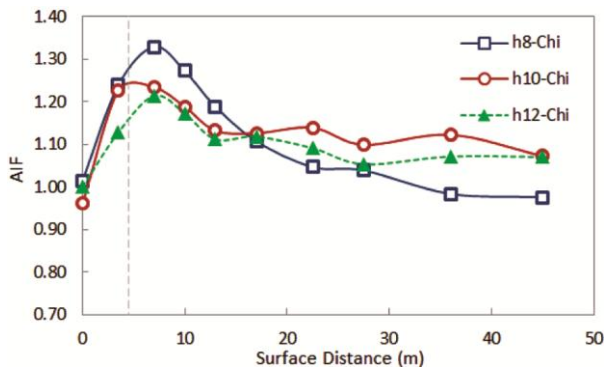
حضور تونل بر توزیع شتاب در محیط، شکل (۱۰) کنتور توزیع شتاب را در ثانیه ۱۴/۹۸ که بیشینه مقدار برای بالای تونل اتفاق افتاده در دو حالت پاسخ آزاد و حوزه تونل نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): کنتور تغییرات شتاب (الف) حوزه پاسخ آزاد (ب) حوزه پاسخ تونل.

همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور تونل باعث شده تا در یک زمان مشخص از تحریک دینامیکی، رفتار و پاسخ محیط اطراف و همچنین سطح زمین نسبت به حالت پاسخ آزاد تغییر کند. این تغییرات در اطراف تونل و بالای آن با تغییر رنگ ایجاد شده در کنتورها کاملاً مشهود می‌باشد.

با توجه به اهمیت تغییرات شتاب در راستای سطح زمین، در تحلیل‌های فوق مقادیر شتاب برای تمامی نقاط مشخص شده در سطح در تمام زمان بارگذاری دینامیکی برداشت شده و مقادیر حداکثر شتاب در هر نقطه در کل زمان انتخاب گردیده است.



شکل (۱۲): تغییرات شتاب نقاط مختلف سطح زمین در زلزله لوما پریتا در حالت پاسخ آزاد و پاسخ تونل برای نقاط مختلف سطح.

شکل (۱۳): نتایج تغییرات ضریب اندرکنشی شتاب در سطح برای سه عمق مختلف قرارگیری تونل در زلزله‌های هدف.

با دقت در شکل (۱۲) رفتار متفاوت نقاط مختلف سطح زمین ناشی از حضور تونل مشخص است درحالی که در حوزه پاسخ آزاد رفتار یکنواختی دارند. این رفتار متفاوت در برخی نقاط نشان از افزایش شتاب و در برخی دیگر نشان از کاهش شتاب ناشی از حضور تونل دارد.

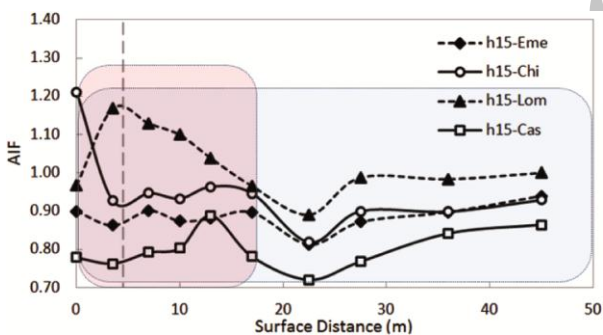
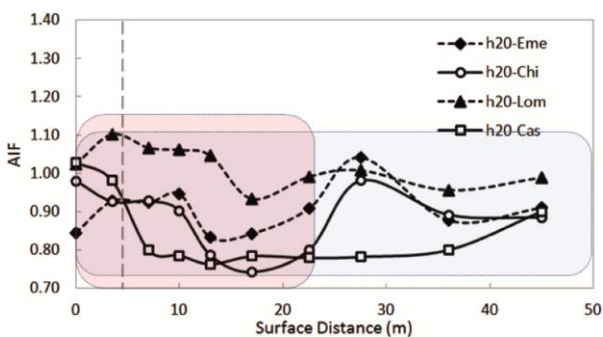
با دقت در نتایج بالا می‌توان مشاهده نمود که در Case 1 تحت زلزله‌های مختلف، رفتار سطح زمین نسبت به حضور تونل متفاوت است. این رفتار نشان می‌دهد که در نقاط مختلف سطح حضور تونل می‌تواند هم منجر به افزایش شتاب‌های سطح و هم کاهش آن شود. این نوع رفتار نسبت به نقاط مختلف همچنین عمق دفن‌های مختلف تونل و نیز محرک‌های مختلف متغیر است.

۴-۳- نتایج کلی تحلیل‌ها

در مطالعه موردی انتخاب شده سه حالت مختلف از خصوصیات خاک با روبراه‌های مختلف در مسیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که تمامی این مقاطع تحت بارگذاری چهار زلزله مختلف با محتوای فرکانسی متفاوت قرار گرفته‌اند. لازم به توضیح است که در استخراج نتایج پاسخ شتاب در تمامی تحلیل‌ها جهت جلوگیری از اثرات نوفه با فرکانس بالا، تاریخچه پاسخ شتاب در حوزه فرکانس بررسی و پس از اعمال فیلترها با فرکانس بالا مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۱۳) نتایج تحلیل‌ها را برای نمونه جهت دو زلزله لوما پریتا و چی چی در Case 1 نشان می‌دهد.

از آنجا که ساختمان‌های متعددی در بالای حوزه عبور مترو قرار دارند لذا بایستی برای هر مقطع با توجه به عمق دفن تونل تأثیر حضور تونل مشخص شود. با توجه به اینکه احتمال وقوع زلزله با مشخصات فرکانسی مختلف وجود دارد لذا در نتایج، تحلیل‌ها بر اساس عمق دفن مشخص و زلزله‌های متفاوت بررسی خواهد شد. نتایج در شکل (۱۴) برای سه عمق دفن ۸، ۱۰ و ۱۲ متر به صورت مجزا ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱۵) مشخص است حداکثر اثر تونل در زلزله‌ای به وقوع می‌پیوندد که فرکانس غالب آن به فرکانس محرک ورودی

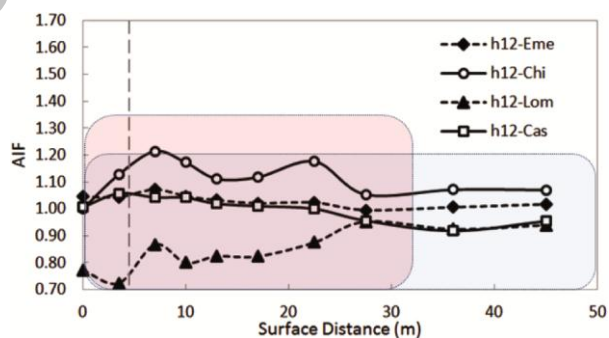
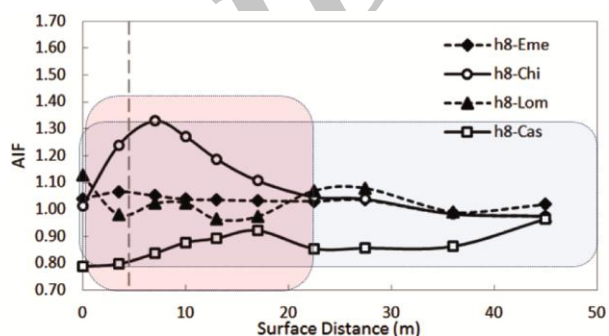
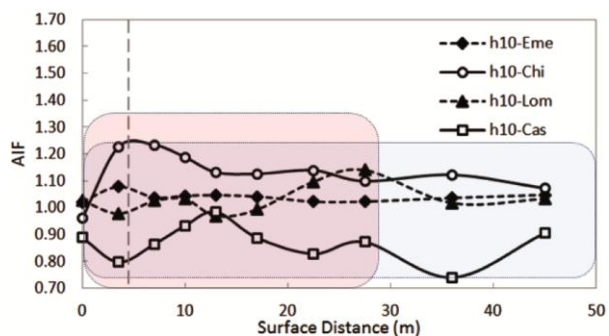
که هرچه تونل عمیق تر می شود، اثر افزایشی آن نیز بر شتاب سطح کاهش می یابد. علاوه بر موارد افزایشی، در برخی محرک های ورودی کاهش شتاب نیز مشاهده می شود ولی از آنجا افزایش شتاب سطح همواره شرایط بحرانی را برای طراحی سازه های سطحی ایجاد می نماید، این موضوع مورد تأکید این تحقیق می باشد. در ادامه نتایج تحلیل در Case 2 و Case 3 که مربوط به قسمت های میانی و نیز قسمت انتهایی مسیر خط ۷ می باشد ارائه گردیده است. در این قسمت نیز نتایج بر حسب عمق دفن تونل ارائه شده است.



شکل (۱۵): تأثیر اندرکنش تونل با محیط اطراف تحت شتاب نگاشت های مختلف با فرکانس های غالب مختلف در سطح در Case 2.

با دقت در نمودارهای شکل های (۱۵) و (۱۶) در تمامی تحلیل ها مشخص می شود که همواره در حالت های مختلف تحلیل و تحت محرک های ورودی مختلف، بیشترین تأثیر حضور تونل در حالتی اتفاق می افتد که فرکانس غالب محرک ورودی نزدیک فرکانس طبیعی سیستم باشد. این مورد در خصوص زلزله چی چی در Case 1 و زلزله امری ویل در Case 2 و همچنین زلزله لوما پریتا در Case 3 مشهود می باشد. همچنین

نزدیک تر باشد. این مورد در زلزله چی چی در Case 1 مشخص است. در بحرانی ترین حالت حضور تونل تحت این محرک ورودی باعث افزایش ۳۳ درصدی شتاب سطح زمین می شود.



شکل (۱۶): تأثیر اندرکنش تونل با محیط اطراف تحت شتاب نگاشت های مختلف با فرکانس های غالب مختلف در سطح در Case 1.

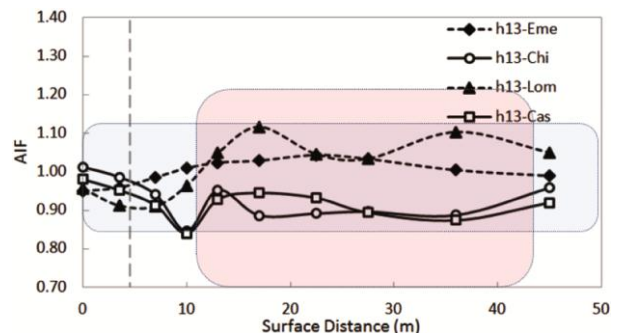
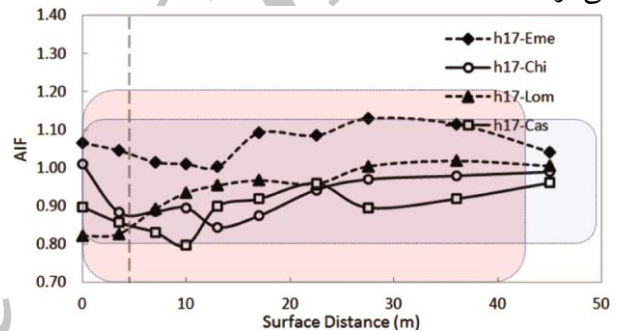
با دور شدن از محور تونل، اثر حضور تونل بر شتاب سطح زمین نیز کاهش می یابد به طوری که در فواصل دورتر رفتار سطح زمین در حالت حوزه تونل به حالت حوزه پاسخ آزاد نزدیک می شود. این موضوع با نزدیک شدن ضریب AIF به عدد یک در نمودارها نمود یافته است. از آنجا که در این حالت تونل در سه روبراه مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است، مشاهده می شود

که از نظر فاصله ساختمان‌ها و نیز ارتفاع روباره تونل بحرانی بوده است برداشت شده و همگی تحت تحلیل‌های متفاوت لرزه‌ای با محرک‌های زلزله متفاوت قرار گرفته‌اند که خلاصه‌ای از نتایج این تحقیق در ادامه ارائه شده است.

با دقت در نحوه‌ی توزیع پارامتر شتاب در اطراف تونل در زمان‌های مختلف بارگذاری و همچنین مدهای حرکتی سازه‌ی تونل می‌توان این‌گونه نتایج را تفسیر نمود که همواره حضور تونل در زمین باعث ایجاد اختلال در انتشار امواج می‌شود به طوری که در محرک‌های ایجادکننده‌ی موج برشی با زاویه انتشار صفر (SH)، تونل مانع رسیدن موج به بالای خود می‌شود. این مطلب موجب اثر کاهشی تونل بر شتاب در بالای تونل می‌شود. برخورد امواج به تونل، خود باعث ایجاد حرکات مضاعف تونل می‌شود. با توجه به مدهای حرکتی تونل و نیز زاویه انتشار و ارتعاش امواج اعمالی، طرفین تونل در سطح، بیشترین سهم تغییرات را از وجود تونل خواهند داشت. این تغییرات در صورت سازگاری خصوصیات محرک و ورودی با آبرفت و سازه‌ی تونل منجر به تشدید شده و در غیر این صورت کاهندگی حرکات را موجب خواهد شد. پس همواره این احتمال وجود خواهد داشت که محرک و ورودی منجر به تشدید مقادیر شتاب در سطح در موقعیت‌های مشخص که بیشتر در مجاورت تونل هستند شود. این موارد به وضوح در نمونه موردی انتخابی و تحلیل‌های متعدد قابل مشاهده است.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که همواره در تمامی حالت‌ها، حضور تونل باعث تغییر پاسخ سطح زمین در مقایسه با حالت پاسخ آزاد می‌شود. این تغییر بسته به نوع زمین، نوع محرک و ورودی و نیز موقعیت نقطه‌ی مورد نظر در سطح زمین نسبت به تونل می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش شتاب سطح شود. بیشترین تأثیر حضور تونل بر افزایش شتاب سطح در Case 1 تحلیل‌ها که مربوط به قسمت جنوب شرقی مسیر می‌باشد، تحت زلزله چی چی و برای تونل با عمق دفن ۸ متری اتفاق افتاده که افزایش شتاب ۳۳ درصدی را نشان می‌دهد. بدین معنی که سازه‌هایی که در این محدوده قرار دارند جهت طراحی سازه‌ای

مشخص شده که در Case 1 حضور تونل در بحرانی‌ترین حالت منجر به افزایش حدود ۳۳ درصدی شتاب‌ها در سطح زمین در نزدیکی تونل شده است. این مورد در Case 2 برابر ۱۷ درصد و در Case 3 حدود ۱۲ درصد می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که حضور تونل قطعاً تحت یک بارگذاری می‌تواند منجر به افزایش مقادیر شتاب شود. در نتایج ارائه شده مشخص شده که با افزایش روباره تونل اثر کاهشی شتاب به دلیل عدم انتقال موج به سطح و نیز عدم تأثیر مستقیم حضور تونل با روند بیشتری مشاهده می‌شود. این مورد در محرک‌های ورودی با فرکانس غالب دورتر از فرکانس طبیعی آبرفت نیز بیشتر دیده می‌شود.



شکل (۱۶): تأثیر اندر کنش تونل با محیط اطراف تحت شتاب نگاشت‌های مختلف با فرکانس‌های غالب مختلف در سطح در Case 3.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی اثر حضور تونل بر سازه‌های اطراف آن در دوره بهره‌برداری و تحت اثر زلزله انجام شده است. در این تحقیق خط ۷ مترو تهران به عنوان نمونه انتخاب شده است. با توجه به پلان و پروفیل این خط، مناطقی از مسیر

- shape. *Journal of Engineering Mechanics*, **122**, 123-129.
5. Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G. Sofianos. (2007) Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures. *M.D. Mandar and P.K. Joseph, ASCE*. **223**, 1-10.
 6. Yu, C.W. and Dravinski, M. (2009) Scattering of plane harmonic P, SV or Rayleigh waves by a completely embedded corrugated cavity. *Geophysical Journal International*, **178**, 479-487.
 7. Cilingir, U. and Gopal Madabhushi, S. (2011) A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 452-462.
 8. Abuhajar, O., El Naggar, H., and Newson, T. (2011) Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density. *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 64th Canadian Geotechnical Conference*, Toronto, Ontario, Canada.
 9. Abuhajar, O., El Naggar, H., and Newson, T. (2015) Experimental and numerical investigations of the effect of buried box culverts on earthquake excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **79**, 130-148.
 10. Besharat, V., Davoodi, M., and Jafari, M.K. (2014) Variations in Ground Surface Responses Under Different Seismic Input Motions Due the Presence of a Tunnel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **39**, 6927-6941.
 11. Besharat, V., Davoodi, M., and Jafari, M.K. (2012) Effect of underground structures on free-field ground motion during earthquakes. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
 12. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*, **194**, 1849-1865.

آنها باید به جای شتاب $0/35$ آیین نامه، در معرض شتاب $0/46$ جاذبه قرار گیرند.

با بررسی خصوصیات فرکانسی فضاهاى مختلف مشاهده شد که همواره بیشترین تأثیر حضور تونل در هنگامی اتفاق می افتد که فرکانس غالب حرکت به فرکانس طبیعی سیستم نزدیک باشد. این مورد در Case 1 در زلزله چپی چپی، در Case 2 در زلزله امری ویل و در Case 3 در زلزله لوما پریتا قابل مشاهده است. افزایش شتاب‌های ۳۳ درصدی، ۱۷ درصدی و نیز ۱۲ درصدی به ترتیب در این حالت‌های بارگذاری مشاهده شده است. موقعیت قرارگیری ساختمان‌های روی زمین نیز نسبت به تونل در نحوه رفتار آنها تأثیرگذار می‌باشد به نحوی که بر اساس نتایج تحلیل بیشترین تأثیر حضور تونل در فاصله $0/5D$ تا $1/5D$ اتفاق می‌افتد. همچنین هرچه عمق دفن تونل افزایش یابد شعاع تأثیر حضور تونل نیز افزایش می‌یابد اگرچه از شدت اثر آن کاسته می‌شود.

قدردانی

این تحقیق با حمایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام پذیرفته است و نویسندگان بدین وسیله از آن مرکز قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. ASCE (1974) *Earthquake Damage Evaluation and Design Consideration for Underground Structure*. American Society of Civil Engineering, Los Angeles Section.
2. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (1979) Response of tunnels to incident SH-waves. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **105**, 643-659.
3. Crichlow, J.M. (1982) The effect of underground structure on seismic motions of the ground surface. *Geophysical Journal International*, **70**, 563-575.
4. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. (1996) Diffraction of SH-waves by subsurface inclusions of arbitrary

- dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **95**(4), 859-877.
22. Cundall, P. (2011) Explicit finite-difference method in geomechanics. *Numerical Methods in Geomechanics*, ASCE, 132-150.
23. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1969) *Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes*. University of California, Institute of Transportation and Traffic Engineering, Soil Mechanics Laboratory.
24. Cao, J., and Hunag, M.S. (2010) Centrifuge tests on the seismic behavior of Tunnel. *International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, Taylor and Francis group, Zurich, Switzerland, 537-542.
25. University of California PEER Strong Motion Database.
13. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering*, **12**, 193-206.
14. Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., and Panji, M. (2013) Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity. *Int. J. Civil Eng.*, **11**, 45-54.
15. Alielahi, H., Kamalian, M., and Adampira, M. (2015) Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, 63-79.
16. Alielahi, H. and Ramezani, M.S. (2016) Seismic Site amplification pattern caused by underground box-shaped structures. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **3**, 55-71 (in persian).
17. Alielahi, H. and Adampira, M. (2016) Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, **14**, 233-251.
18. Baziar, M.H., Moghadam, M.R., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **44**, 10-22.
19. Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., and Moghadam, M.R. (1394) Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **3**, 15-36.
20. Itasca, F. (2005) *Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Manual*. Minneapolis. Itasca Consulting Group.
21. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. (1969) Finite