



اثر تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان بلند مجاور با در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی سیستم ساختمان-خاک-تونل

مازیار فهیمی فرزاد^{*}، بابک علی نژاد^۱، علیرضا سعیدی عزیزکندی^۲، رضا عالی نژاد^۱

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹

کلمات کلیدی:

اندرکنش ساختمان-خاک-تونل

آنالیز دینامیکی

پاسخ لرزه‌ای

خلاصه: حفر تونل به دلایل مختلف در مناطق شهری خصوصیات ساختمانی و ارتعاش میدان آزاد زمین را تغییر می‌دهد و در نتیجه پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های مجاور تونل نیز تغییر خواهد کرد. در این مقاله با در نظر گرفتن اندرکنش سیستم ساختمان-خاک-تونل، اثر وجود تونل بر پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان ۱۵ طبقه مقیاس شده معیار مورد بررسی قرار می‌گیرد. از ۴ رکورد زلزله معیار (دو رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه نزدیک) جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای این ساختمان استفاده شده است. ساختمان به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و هندسی مدل شده است. رفتار خاک با استفاده از معیار شکست موهر-کولمب و روش معادل خطی در نظر گرفته می‌شود. اندرکنش خاک و ساختمان با استفاده از الزام رابط و اندرکنش بین تونل و خاک با استفاده از اصطکاک کولمب مدل شده است. در این مطالعه هدف بررسی اثر شکل مقطع و عمق قرارگیری تونل و همچنین نوع خاک ساختمانی بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان با پایه انعطاف‌پذیر در حضور تونل نسبت به بدون تونل می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد نسبت حداکثر جابجایی در حضور تونل، برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور برای خاک با سرعت موج برشی ۱۵۰ و ۳۲۰ m/s به میزان حداکثر ۱۰٪ کاهش دارد.

۱- مقدمه

تحلیل دقیق‌تر سازه لازم است در صورت امکان اثر شرایط محلی ساختمانی بر دامنه، طول مدت و محتوی فرکانسی جنبش‌های شدید زمین در نظر گرفته شود [۶]. در بحث اثرات محلی ساختمانی مواردی مانند عمق سنگ بستر، تراز سطح آب زیرزمینی، جنس خاک‌های مختلف، انعکاس، تفرق و انکسار موج در لایه‌های مختلف خاک، اثر لایه‌های رسوبی، مشخصات دینامیکی خاک مانند سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک و اثر توپوگرافی سطحی و زیرسطحی به صورت منفرد و یا با اثر متقابل بر پاسخ لرزه‌ای سازه به صورت گسترده‌ای در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است [۶].

یکی از شرایط ساختمانی که به خصوص در مناطق شهری می‌تواند بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها تاثیر داشته باشد و کمتر به آن پرداخته شده است وجود سازه‌های زیرزمینی در مجاورت ساختمان‌های موجود بر روی زمین است [۷]. حفر تونل‌های شهری با کاربری، اندازه، هندسه و عمق متفاوت در مناطق شهری باعث تغییر در تغییر شکل زمین می‌شود و در نهایت با توجه به فاصله محور تونل از سازه مجاور می‌تواند نیروهای داخلی پوشش تونل را تغییر دهد. از طرف دیگر وجود تونل مسیر و شدت امواج وارد بر ساختمان مجاور را نیز تغییر می‌دهد. بنابراین به دلیل احداث تونل‌های

تحلیل و طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله با فرضیات ساده کننده متعددی همراه است که نگرانی از تحقق عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار از سازه تحت رخداد زلزله طرح را ایجاد می‌کند. یکی از مهم‌ترین فرضیات مورد استفاده در تحلیل و طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی متداول مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها به صورت مستقل از ساختمانی و با فرض تکیه‌گاه گیردار در پای ستون‌های ساختمان است [۱]. خرابی بخش فوقایی آزادراه هانشین و ایستگاه مترو دایکای در زلزله ۱۹۹۵ کوبه، خرابی تعدادی از پل‌های با فونداسیون شمعی در زلزله ۱۹۸۹ لوما پریتا و خرابی شدید و گسترده ساختمان‌های متداول کوتاه و متوسط در زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی از نمونه‌های شاخصی است که در نظر نگرفتن اثرات ساختمانی و یا اندرکنش خاک و سازه عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار از سازه را محقق نکرده است [۴-۲]. در چند دهه اخیر با توسعه مفهوم اندرکنش خاک و سازه و تحقیقات گسترده در این زمینه امکان مدل‌سازی و تحلیل سازه بر بستر انعطاف‌پذیر فراهم شده است [۵]. علاوه بر مفهوم اندرکنش خاک و سازه به منظور مدل‌سازی و

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir



بیشینه آن برای نسبت عمق‌های ۱/۵، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱۰٪، ۸٪ و ۵٪ برای خاک با سرعت موج برشی ۱۷۵ متر بر ثانیه بود و سازه‌های با محدوده پریودی بالاتر از ۰٫۴ ثانیه تحت تأثیر حضور تونل مترو قرار نمی‌گیرند [۲۹]. رابطی مقدم و بازبار اثر یک تونل مترو دایره‌ای را بر الگوی بزرگ‌نمایی شتاب سطح زمین بررسی کردند. در این بررسی اثر پارامترهای مختلفی مانند سرعت موج برشی خاک، محتوی فرکانسی ارتعاش ورودی، نسبت انعطاف‌پذیری و عمق دفن تونل مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات پارامتری نشان داده است که مقدار بزرگ‌نمایی تابعی از سه نسبت پریود بی‌بعد، عمق بی‌بعد و نسبت انعطاف‌پذیری است و اثر این پارامترها به ترتیب در محدوده بین ۳ تا ۱۰، کمتر از ۳ و بزرگ‌تر از ۱ قابل توجه است [۷].

اثر تونل خط دوم متروی کرج (تونل نعل اسبی شکل بدون پوشش) تحت امواج مهاجم SH از نوع ریکر بر الگوی بزرگ‌نمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بررسی شده است. در این مطالعه اثر نسبت عمق تونل، موقعیت افقی آن و زاویه موج مهاجم بررسی شده است [۳۰]. اثر تونل خط ۷ مترو تهران در شرایط بستر مختلف و نیز هفت روباره متفاوت تحت چهار زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت بر شتاب سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است که در بحرانی‌ترین حالت می‌تواند شتاب مبنای طرح را ۳۳٪ افزایش دهد و از ۰٫۳۵ به ۰٫۴۶ شتاب ثقل برساند. همچنین افزایش روباره تونل باعث افزایش شعاع تأثیر تونل روی سطح زمین می‌شود و تأثیر حضور تونل بر مقادیر شتاب سطح در فاصله ۰٫۵ تا ۱٫۵ برابر قطر تونل بوده است [۳۱]. نادرپور و همکاران پارامترهای موثر در تفرق امواج زلزله‌های دور از گسل توسط تونل دو قلو متروی شیراز و اثر آن بر مقادیر جابجایی نسبی سازه ارگ شیراز را بررسی کردند [۳۲]. خلج‌زاده و آزادی به روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D به اثرات حفر تونل بر تقویت امواج زلزله در سطح زمین را بررسی کردند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که سختی خاک و پوشش تونل و همچنین محتوای فرکانسی امواج، تأثیر بسزایی در پاسخ زمین می‌گذارد و می‌تواند حداکثر شتاب سطح زمین را در شرایط هارمونیک تا حدود ۱/۳ و با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله بم تا ۱/۷ برابر افزایش دهد [۲۶].

اثر حفره‌های دایره‌ای دفن شده بدون پوشش با طول بی‌نهایت تحت امواج مهاجم SV و P بر پاسخ جابجایی سطح زمین در فاصله‌های مختلف از حفره مورد بررسی قرار گرفته است [۳۳]. علی‌الهی و همکاران با به کارگیری روش عددی اجزای مرزی دو بعدی در حوزه زمان در یک محیط همگن و همسان، به بررسی پاسخ لرزه‌ای و الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع

زیرزمینی در مجاورت ساختمان‌های مسکونی اندرکنشی سه گانه بین سیستم ساختمان، خاک و تونل ایجاد می‌گردد [۹، ۸]. در ادبیات فنی اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای ساختمان بدون توجه به حضور سازه‌های زیرزمینی در مجاورت آن به صورت گسترده بررسی شده است [۱۰ و ۴ و ۲]. همچنین اثر زلزله بر پاسخ تونل بدون حضور سازه [۱۵-۱۱] و در مطالعات کمتری با در نظر گرفتن حضور سازه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲-۱۶]. اما مطالعات محدودی در زمینه اثر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای سازه مجاور وجود دارد [۲۴، ۲۳]. به دلیل پیچیدگی و هزینه بالای محاسباتی مدل‌سازی و تحلیل اندرکنش سه گانه سیستم ساختمان-خاک-تونل اثر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها در برخی از مطالعات به صورت ضمنی در نظر گرفته شده است. در این مطالعات اثرات حضور تونل بر پاسخ میدان آزاد زمین بررسی شده است و در حقیقت اثرات حضور تونل بر شتاب‌نگاشت ثبت شده بر روی زمین و یا در زیر پی سازه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۶، ۲۵].

۲- اثر سازه زیر زمینی بر پاسخ لرزه‌ای سازه روی سطح زمین

همان‌طور که عنوان شد به دلیل هزینه محاسباتی بالا مدل‌سازی و تحلیل اثر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها در سیستم سه گانه ساختمان-خاک-تونل، در بسیاری از مطالعات این اندرکنش به صورت ضمنی و بدون مدل‌سازی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات اثر حضور تونل بر پاسخ شتاب و الگوی بزرگ‌نمایی لرزه‌ای سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. بازبار و همکاران بعد از صحت‌سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ انجام گرفته بر روی یک تونل مترو، اثر تونل‌های مدفون جعبه‌ای را بر حداکثر شتاب سطح زمین مورد بررسی قرار دادند نتایج مطالعات پارامتری نشان داد که حضور تونل پریودهای بالا را تقویت و پریودهای پایین تحریک ورودی را تضعیف می‌کند [۲۷]. این محققین در مطالعه‌ای تکمیلی اثر انعطاف‌پذیری پوشش تونل بر پاسخ شتاب سطح زمین را بررسی کردند، نتایج این مطالعه نشان داد که دو سیستم با ضریب انعطاف‌پذیری یکسان، ولی با جنس متفاوت منجر به پاسخ یکسان شتاب در سطح زمین می‌شوند [۲۸]. همچنین بازبار و همکاران اثرات حضور تونل مترو شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در محدوده رفتار خطی خاک را بررسی کردند. در این مطالعه تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگ‌نمایی شتاب و همچنین اثر آن بر طیف پاسخ شتاب در سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است از مطالعات چنین نتیجه‌گیری شد که میزان حداکثر بزرگ‌نمایی تابع عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بوده که

بررسی قرار دادند. برای این منظور، یک سری تحلیل عددی دو بعدی، به روش ویسکوالاستیک و معادل خطی برای ابعاد مختلف ایستگاه و سرعت موج برشی مختلف انجام دادند. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب و تأثیر محدوده پریود در برابر فاصله نسبی ارائه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که یک بزرگ‌نمایی قابل توجه در لبه ایستگاه بزرگ‌تر مترو ظاهر می‌شود و چنین اثر منفی با افزایش فاصله نسبی به تدریج کاهش می‌یابد. شدت طیف پاسخ در پریودهای کوتاه ($0/1 - 0/4$ ثانیه) تقویت می‌شود در حالی که تأثیر آن برای پریودهای طولانی جزئی خواهد بود [۴۲]. در مطالعه‌ای توسط لو و هوانگ، در مدل سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار عددی MIDAS-GTS / NX پاسخ شتاب سطح زمین در حضور تونل مترو تحت موج لرزه‌ای و تأثیر زاویه تقاطع تونل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب بزرگ‌نمایی شتاب، نیروی داخلی و جابجایی تونل‌های متقاطع ابتدا افزایش می‌یابد و سپس در امتداد نقاط اندازه‌گیری کاهش می‌یابد و پاسخ دینامیکی تونل در خاک فوقانی بیشتر از سنگ پایین است. با افزایش زاویه تقاطع بین تونل‌های بالا و پایین، شتاب و نیروی برشی به تدریج کاهش می‌یابد [۴۳].

اثر تونل بر عملکرد سازه رو سطحی در مطالعات محدودی به صورت صریح و با مدل‌سازی سیستم سه گانه ساختمان-خاک-تونل مورد بررسی قرار گرفته است. ونگ و همکاران اندرکنش بین یک ایستگاه زیرزمینی و ساختمان با فونداسیون شمعی که بر لایه خاک ویسکوالاستیک قرار دارد تحت موج مهاجم S را در حوزه فرکانس بررسی کردند. در این مطالعه اثر قرارگیری سازه‌ها، جهت ارتعاش موج لرزه‌ای، فاصله بین سازه‌ها، سرعت موج برشی، میرایی خاک، عمق دفن و تعداد دهانه‌های ساز زیرزمینی بر ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی سازه سطحی بررسی شده است [۲۴]. گو و همکاران اثر ایستگاه خیابان ژوجیانگ در نانجینگ چین را بر پاسخ ساختمان مجاور سازه تحت زلزله با دوره بازگشت 10% در ۱۰۰ سال مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه شکل و مقدار نسبت جابجایی بین طبقه‌ای ساختمانی که در فاصله‌های مختلف از ایستگاه قرار دارد مورد بررسی قرار گرفته است و به اهمیت مقدار پریود سازه و فاصله سازه تا ایستگاه مترو پاسخ‌ها اشاره شده است [۲۳]. آباته و ماسیمینو اندرکنش دینامیکی این سیستم سه گانه را با مدل‌سازی المان محدود یک سیستم کامل درگیر سه بعدی مورد بررسی قرار دادند و اثر حضور تونل بر پاسخ خاک و سازه روسطحی و برعکس را بررسی کردند [۹]. این محققین همچنین در یک مطالعه پارامتری اثرات عمق تونل، موقعیت قرارگیری ساختمان و زلزله ورودی را بر این اندرکنش سه گانه مورد

بر روی تونل‌های زیرزمینی دو قلو و منفرد تحت تأثیر امواج مهاجم برشی درون صفحه‌ای در فرکانس‌های مختلف پرداختند [۳۴]. همین محققین در شرایط مشابه پاسخ لرزه‌ای و الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر حفرة‌ها و تونل‌های زیرزمینی بدون پوشش (لاینینگ) تحت تأثیر امواج برشی SV در بسامدهای مختلف را بررسی کردند. افزایش فضای حبس موج در بالای تونل‌های دو قلو بدون پوشش به نسبت تونل منفرد می‌تواند یکی از عمده‌ترین دلایل موجود برای افزایش بزرگ‌نمایی لرزه‌ای سطح زمین باشد [۳۵]. علی‌الهی و رضانی اثر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل منفرد و دو قلو بر تغییرات پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که وجود سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل تأثیر محسوسی بر تغییر پاسخ سطح زمین دارد به طوری که می‌تواند تا حدود دو برابر موجب بزرگ‌نمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نسبت به حالت میدان آزاد شود [۳۶]. علی‌الهی و آدم‌پیرا به منظور تخمین کمی طیف پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با حضور انواع مختلف سازه‌های زیرزمینی و تحت زلزله‌های واقعی یک رویکرد نسبتاً ساده ارائه کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که در اثر حضور حفرة در پریودهای بزرگ بزرگ‌نمایی افزایش یافته است [۳۷، ۳۸]. همچنین علی‌الهی و همکاران اثر تونل بدون پوشش با هندسه‌های مختلف را تحت امواج مهاجم SV و P بررسی کردند. در این مطالعه تغییرات ضریب بزرگ‌نمایی و پریود مشخصه محیط در برابر عمق دفن تونل به عنوان یک نتیجه اصلی گزارش شده است [۳۹]. علی‌الهی و همکاران پاسخ لرزه‌ای دره‌های نیم سینوسی را که در زیر آن یک حفرة با ابعاد، عمق و موقعیت مختلف قرار دارد را بررسی کردند. در اثر حضور حفرة در پریودهای بزرگ بزرگ‌نمایی افزایش یافته است [۴۰]. نگوین و همکاران در یک مطالعه، منحنی‌های شکنندگی برای تونل‌های مستطیلی یک، دو و سه گانه ساخته شده برای سیستم مترو با تحلیل قاب غیرخطی، مورد بررسی قرار دادند. طیف گسترده‌ای از پروفیل‌های ساختگاه برای ارزیابی اثر مشخصات خاک بر منحنی شکنندگی محاسبه شده استفاده شده است. منحنی‌های شکنندگی تونل‌ها از نظر شتاب حداکثر سطح زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) تولید می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که منحنی شکنندگی نسبت به مشخصات سایت بسیار حساس است و منحنی‌های مبتنی بر PGA منجر به بزرگ‌ترین پراکندگی می‌شوند. همچنین تونل‌های چند جعبه در مقایسه با تونل‌های یک جعبه به دلیل تقاضای لرزه‌ای زیاد در معرض آسیب زمین لرزه هستند [۴۱]. سون و همکاران، تأثیر ایستگاه مترو در حرکت سطح زمین که تحت تأثیر موج لرزه‌ای عمودی قرار دارد، مورد

جدول ۱. ضرایب مقیاس [۴۵]

Table 1. Scale coefficients

طول	λ	شتاب	1	جرم مخصوص	1
تنش	λ	سرعت موج برشی	$\lambda^{1/2}$	نیرو	λ^3
کرنش	1	زمان	$\lambda^{1/2}$	سختی	λ^2
سختی نسبی (EI)	λ^5	فرکانس	$\lambda^{-1/2}$	مدول	λ

مقیاس شده، مصالح فولاد طبق استاندارد سازه فولادی استرالیا [۴۶]، با حداقل تنش تسلیم ۲۸۰ Mpa و حداقل تنش نهایی ۴۱۰ Mpa انتخاب شده است. ضخامت ورق نهایی پی یک صفحه فولادی $500 \times 500 \text{ mm}^3$ ، کفها شامل صفحات $400 \times 400 \times 5 \text{ mm}^3$ و برای ستونها چهار ورق فولادی $500 \times 400 \times 2 \text{ mm}^3$ استفاده می‌شود. مدل‌سازی سیستم خاک و سازه در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D به صورت دو بعدی و با فرض رفتار کرنش مسطح انجام شده است. رفتار خاک با استفاده از روش معادل خطی و رفتار سازه به صورت غیرخطی مصالح در نظر گرفته شده است. در این مطالعه از چهار رکورد زلزله معیار شامل نورتریج، کوبه، ال سنترو و هاچینوه استفاده شده است. مشخصات مقاطع مقیاس شده مطابق جدول ۲ می‌باشد.

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی از المان رابط^۲ استفاده شده است. مشخصات المان رابط شامل سختی برشی (k_s) و قائم (k_n) طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۴۷].

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{min}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه K (برحسب kPa) مدول بالک محیط مجاور و ΔZ_{min} (برحسب m) طول کوچک‌ترین المان در راستای عمود بر جهت المان رابط است. با توجه به رابطه (۵) مقدار سختی برشی برابر 500 kPa/m و سختی قائم برابر 45000 kPa/m محاسبه می‌شود [۴۸]. در مطالعه حاضر، برای مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه نرم‌افزار ABAQUS انتخاب گردید

بررسی قرار دادند [۸]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ در مدل آزمایشگاهی اندرکنش خاک، تونل و ساختمان به این نتیجه رسیدند که وجود ساختمان و تونل سختی کل مدل را تضعیف کرده است، بنابراین پاسخ لرزه‌ای خاک اطراف آن تقویت شده است. با این حال مشاهده شد که تا حدی وجود تونل مانع از انتشار موج لرزه‌ای می‌شود و بنابراین پاسخ لرزه‌ای ساختمان به ویژه برای طبقات پایین و متوسط را کاهش می‌دهد [۴۴].

۳- صحت سنجی

به منظور توجیه صحت نتایج به دست آمده در این مطالعه، با مدل کردن مقاله طباطبائی فر و همکاران که در زمینه بررسی عددی و آزمایشگاهی پاسخ لرزه‌ای قاب ساختمانی با منظور نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه است مقایسه و صحت سنجی نتایج صورت می‌گیرد، در این مقاله از یک ساختمان ۱۵ طبقه مقیاس شده روی میز لرزان به منظور مطالعه اندرکنش سیستم سازه خاک و سازه استفاده شده است [۴۵]. سازه اولیه یک قاب خمشی بتنی ۱۵ طبقه با دهانه m ۱۲ در هر دو جهت و به ارتفاع m ۴۵ است. سقف سازه به صورت دال بتنی و فرکانس طبیعی ۰٫۳۸۴ HZ می‌باشد. خاک زیر سازه، خاک رسی با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه و وزن واحد 1440 kN/m^3 (چگالی خاک 1470 kg/m^3) است. فاصله افقی مرزهای جانبی خاک و عمق بستر به ترتیب m ۶۰ و m ۳۰ انتخاب شده است به منظور تهیه یک مدل مقیاس شده از سازه اولیه یک عامل مقیاس‌سازی در نظر گرفته شده است. این عامل با توجه به مقاله مرجع برابر ۱:۳۰ انتخاب گردیده است که مطابق جدول ۱ می‌باشد.

با در نظر گرفتن ضریب مقیاس هندسی ۱:۳۰، ارتفاع، طول و عرض مدل سازه به ترتیب برابر با $1/50$ ، $1/40$ و $1/40$ متر تعیین شده است. در مدل

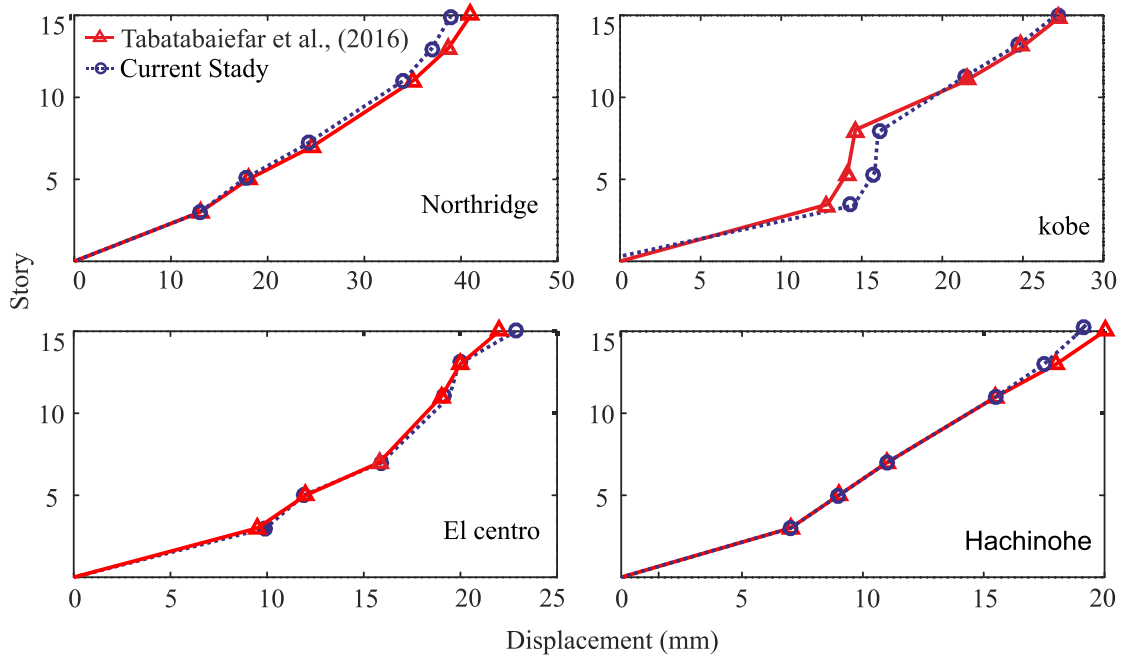
1 AS / NZS 3678-2011

2 Interface Element

جدول ۲. مشخصات مقاطع مقیاس شده [۴۵].

Table 2. Characteristics of scaled sections

$۴,۱۶ \times 10^{-۱۰}$	ممان اینرسی فونداسیون (m^4)	۰,۰۰۲	سطح مقطع تیر (m^2)
$۲,۰ \times 10^{-۸}$	مدول الاستیسیته (kPa)	$۴,۱۶ \times 10^{-۱۰}$	ممان اینرسی تیر (m^4)
۷۸۵۰	جرم مخصوص فولاد (kg/m^3)	$۱,۶ \times 10^{-۴}$	سطح مقطع ستون (m^2)
۱,۱	میرایی سازه (%)	$۵,۳۳ \times 10^{-۱۱}$	ممان اینرسی ستون (m^4)
۲,۱۱	فرکانس سازه با پایه گیردار (HZ)	۰,۰۰۵	سطح مقطع فونداسیون (m^2)



شکل ۱. مقایسه حداکثر جابجایی طبقات

Fig. 1. Comparison of maximum displacement of floors

۴- مشخصات سیستم ساختمان-خاک-تونل و رکوردهای معیار

در این مطالعه از ساختمان ۱۵ طبقه معیار مقیاس شده توسط طباطبائی فر و همکاران که صحت سنجی گردید به منظور مطالعه اندرکنش سیستم ساختمان-خاک-تونل استفاده می‌شود. مشخصات سازه مقیاس شده مطابق جدول ۳ می‌باشد.

به منظور بررسی اثر نوع زمین ساختگاه دو تیپ خاک نرم از نوع رسی با دو سرعت برشی متفاوت به ترتیب برابر ۳۲۰ و ۱۵۰ m/s مورد بررسی قرار

در این نرم‌افزار نیز از فرض رفتار کرنش مسطح و المان‌های دو بعدی (CPE4) استفاده گردید. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی از المان رابط استفاده گردید سختی برشی و قائم توسط چند فنر با سختی برشی و قائم معادل به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۴۵۰۰۰ Kpa/m به مدل اعمال گردید. فرکانس طبیعی سیستم ساختمان و خاک در نرم‌افزار ABAQUS برابر ۱۶۸ HZ به دست می‌آید که برای آزمایش میز لرزان در مقاله مرجع برابر ۱۶ HZ است. نمودار حداکثر جابجایی طبقات مطابق شکل ۱ آورده شده است و نتایج حاکی از تطابق نتایج می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات مدل سازه مقیاس شده [۴۵].

Table 3. Scaled structure model characteristics

۱/۵۰۰	ارتفاع کل (m)
۰/۴۰۰	طول (m)
۰/۴۰۰	عرض (m)
۱۰۶	وزن کل (kg)
۲/۱۱۰	فرکانس طبیعی (HZ)

جدول ۴. مشخصات خاک [۴۹]

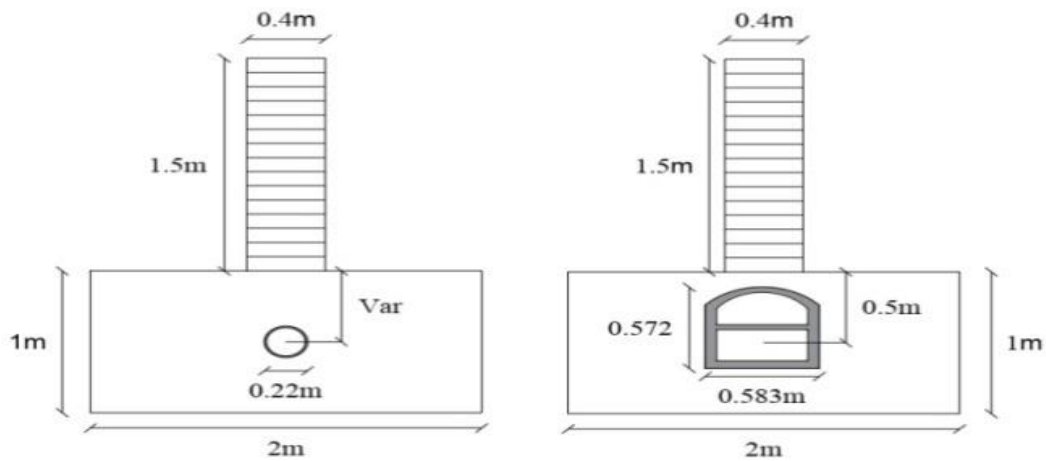
Table 4. soil characteristics

پارامترهای مقیاس شده خاک		پارامترهای اولیه خاک		نوع پارامتر
Ee نوع	De نوع	Ee نوع	De نوع	نوع خاک
۲۸	۵۸	۱۵۰	۳۲۰	سرعت موج برشی (m/s)
۰/۶۷۰	۰/۶۷۰	۲۰	۲۰	چسبندگی خاک (kPa)
۱۴۷۰	۱۷۳۰	۱۴۷۰	۱۷۳۰	جرم مخصوص خاک (kg/m ³)
۱۱۰۰	۵۹۱۰	۳۳۱۰۰	۱۷۷۳۰۴	بیشینه مدول برشی (kPa)
۰/۴۰۰	۰/۳۹۰	۰/۴۰۰	۰/۳۹۰	نسبت پواسون
۱۲	۱۹	۱۲	۱۹	ضریب اصطکاک (°)

عمق قرارگیری به قطر تونل (H/D) می‌توان تاثیر عمق قرارگیری تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان را بررسی نمود. به همین منظور برای مقطع تونل با قطر ۶/۵ m و با در نظر گرفتن عمق‌های متداول حفر تونل، شامل عمق ۱۰، ۱۵ و ۲۰ که به ترتیب متناظر با H/D=۱.۵، H/D=۲.۲۵ و H/D=۳ قرار گرفته است. همچنین برای بررسی تاثیر شکل مقطع تونل، مقطع ایستگاه با فرض مساحت و ضخامت یکسان به صورت مربع و دایره نیز مقایسه می‌شود. مصالح لاینینگ تونل و دیواره ایستگاه از بتن مسلح مطابق جدول ۵ می‌باشد. هر مدل تحت چهار رکورد زلزله قرار گرفت که طیف وسیعی از شدت، مدت زمان حرکت شدید زمین و محتوای فرکانسی با انتخاب زمین لرزه‌ها پوشش داده شد تا ارزیابی جامعی از اندرکنش خاک و سازه در در زمین نرم

گرفته است. مشخصات خاک‌های مقیاس شده مورد بررسی مطابق جدول ۴ می‌باشد.

از دو مقطع متداول جهت بررسی اثر شکل و مساحت مقطع تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان استفاده شده است. مقطع تونل دایره‌ای با قطر بیرونی ۶/۵ m و به ضخامت ۰/۳۵ m و مقطع ایستگاه به عرض ۱۷/۵ m و ارتفاع ۱۷/۱۵ m با احتساب تاج و ضخامت دیواره ۱/۷۵ m انتخاب گردید. با استفاده از ضریب مقیاس در سیستم اندرکنش ساختمان خاک و تونل، قطر بیرونی و ضخامت تونل به ترتیب برابر ۰/۲۲ m و ۰/۱۱ و عرض، ارتفاع و ضخامت دیواره ایستگاه به ترتیب برابر ۰/۵۸۳، ۰/۵۷۲ و ۰/۵۸۳ انتخاب گردید. در این مطالعه، مطابق شکل ۲ ساختمان دقیقاً بر روی تونل قرار داشته و اثر فاصله افقی سازه از تونل در نظر گرفته نشده است. با در نظر گرفتن نسبت



شکل ۲. ابعاد و محل قرارگیری تونل و ایستگاه مترو

Fig. 2. Dimensions and location of the tunnel and metro station

جدول ۵. مشخصات مصالح تونل

Table 5. Specifications of tunnel materials

پارامتر	اولیه	مقیاس شده
مدول الاستیسیته (GPa)	۴۰	۱,۳۳۰
نسبت پواسون	۰,۲۰۰	۰,۲۰۰
جرم مخصوص (kg/m^3)	۲۴۰۰	۲۴۰۰

۵- مدل سازی اندرکنش ساختمان-خاک-تونل

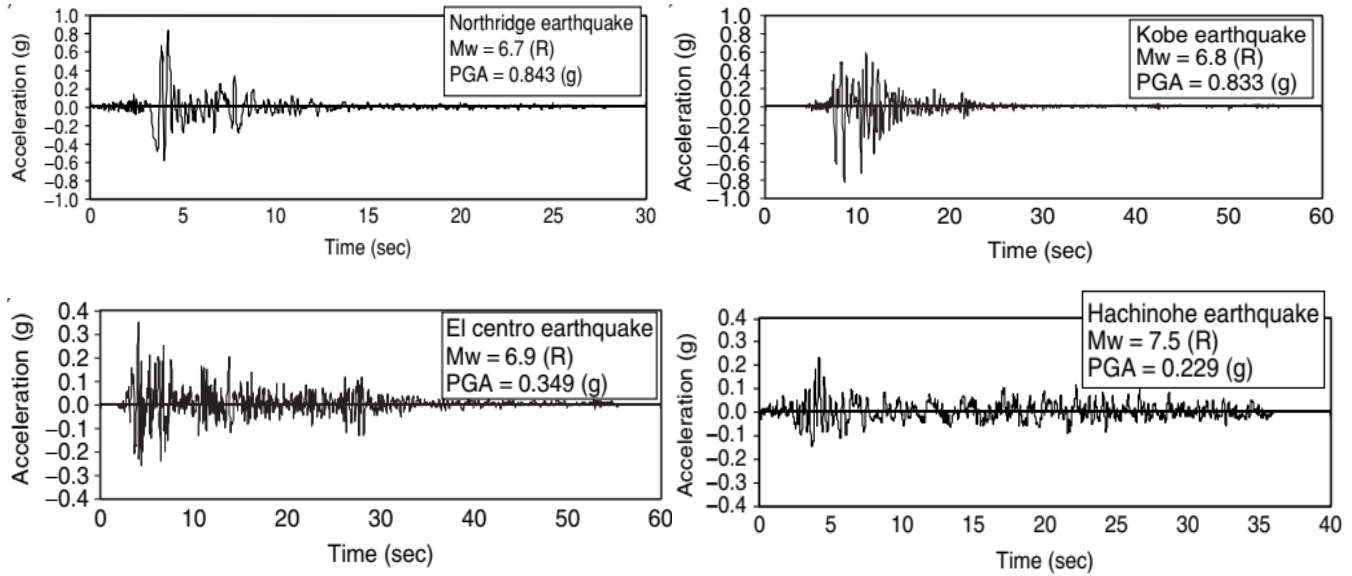
در این تحقیق با استفاده از مفهوم اندرکنش خاک و سازه به ترکیب دو سیستم اندرکنش خاک و تونل و اندرکنش خاک و ساختمان پرداخته شده است:

۵-۱- اندرکنش خاک و ساختمان

تأثیراتی که اندرکنش خاک و ساختمان ایجاد می کند، به دو اثر اندرکنش سینماتیکی و اثر اندرکنش اینرسی تقسیم بندی می شود. در واقع اندرکنش خاک و ساختمان باعث دو تغییر مهم در عوامل موثر بر رفتار ساختمان در زلزله می گردد. اولین آن ها مربوط به تغییر در تحریک موثر اعمالی به پای سازه است، در واقع به دلیل صلبیت پی سازه نسبت به خاک و عدم قابلیت

امکان پذیر شود. مشخصات زمین لرزه های نمایش داده شده در شکل ۳ حداکثر مقادیر مطلق برای هر حرکت زمین است. از دو زلزله حوزه دور شامل ال سنترو^۱ و هاچینوه^۲ و دو زلزله حوزه نزدیک شامل نورتریج^۳ و کوبه^۴ مطابق شکل ۳ استفاده شده است و در تحلیل تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفتند [۴۸]. با توجه به ضریب مقیاس، گام های زمانی رکورد زلزله های ال سنترو، نوردریج و کوبه از 0.1 S به 0.0365 S و رکورد زلزله هاچینوه از 0.1 S به 0.01825 HZ مقیاس می شود. همچنین فرکانس غالب زلزله نورتریج 0.01825 HZ ، کوبه 0.03748 HZ ، ال سنترو 0.0642 HZ و هاچینوه 0.0201 HZ می باشد.

- 1 El Centro
- 2 Hachinohe
- 3 Northridge
- 4 Kobe



شکل ۳. تاریخچه زمانی رکوردهای زلزله معیار [۴۵]

Fig. 3. Time history of benchmark earthquake records

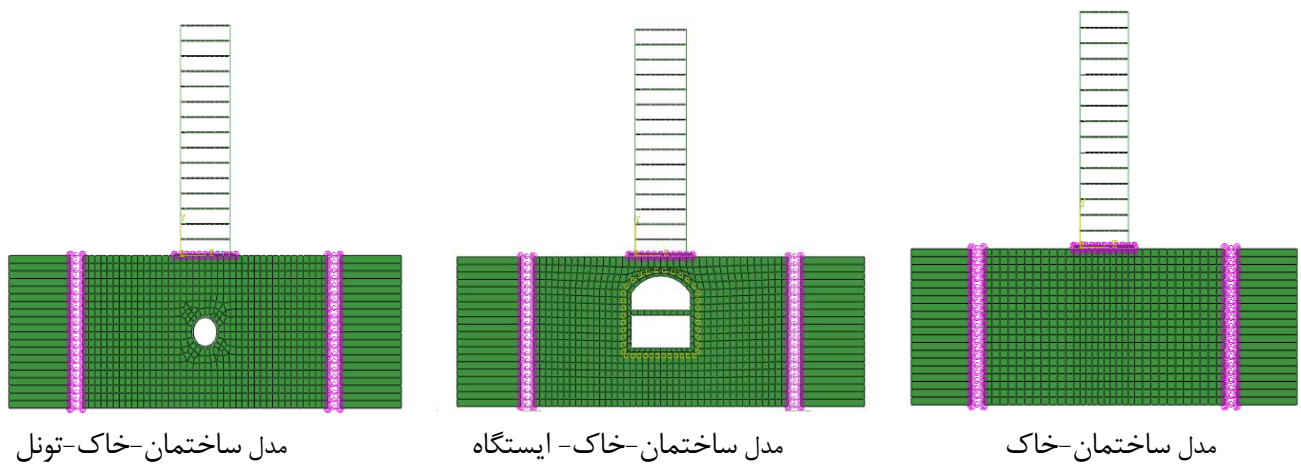
است. مشخصات ساختمان، خاک و تونل به صورت بخش‌های قبل در این نرم‌افزار مدل شده است. برای مدل‌سازی خاک از فرض رفتار کرنش مسطح و المان‌های دو بعدی (CPE4) و برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی از المان رابط استفاده شده است. با توجه به رابطه (۱) برای خاک E_e مقدار سختی برشی برابر 465 kPa/m و سختی قائم برابر 465 kPa/m و برای خاک D_e مقدار سختی برشی برابر 583 kPa/m و سختی قائم برابر 5250 kPa/m محاسبه می‌شود این سختی توسط چند فنر با سختی برشی و قائم معادل به مدل اعمال گردید. محدوده شبیه‌سازی محیط خاک در ABAQUS ارتفاع و عرضی به ترتیب برابر 1 m و 2 m دارد. در مدل‌سازی‌های عددی، ابعاد المان باید دقت تحلیل، سرعت تحلیل و انتشار صحیح موج در محیط را برآورده نماید. حداکثر اندازه المان در مسائل دینامیکی باید به گونه‌ای انتخاب گردد که انتشار موج در محیط به درستی صورت گیرد به منظور انتشار صحیح موج در محیط، حداکثر ابعاد المان به رابطه زیر محدود می‌گردد [۵۱].

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (2)$$

که در آن λ طول موج انتشار یافته در محیط است که با حداقل

تطابق خاک با حرکت میدان آزاد، پی سازه میانگینی از حرکت میدان آزاد خاک را تجربه می‌کند که به این حرکت تغییر یافته، تحریک ورودی به پی می‌گویند. این اثر را که جدا از جرم پی و سازه می‌باشد، اندرکنش سینماتیکی می‌نامند. دومین مورد، تغییر در شرایط دینامیکی سیستم از قبیل پیروید و میرایی موثر آن است. با در نظرگیری خاک و ساختمان به عنوان یک سیستم دینامیکی، پیروید و میرایی این سیستم متفاوت از سازه واقع بر بستر صلب خواهد. با وجود جرم سازه و پی، ارتعاش سازه و نیروی اینرسی ناشی از آن باعث ایجاد حرکت جدیدی در پی خواهد شد که این اثر را اندرکنش اینرسی می‌نامند.

از بین روش‌های موجود برای لحاظ اندرکنش خاک و ساختمان روش زیرسازه و روش مستقیم کاربردی‌تر است. در روش زیرسازه رفتار خاک با استفاده از سختی دینامیکی سازه و محاسبه ماتریس امپدانس خاک در نظر گرفته می‌شود. در روش مستقیم، قسمتی از خاک مجاور سازه و لایه‌های خاک به صورت مستقیم در نظر گرفته می‌شوند [۵۰]. بنابراین در این مطالعه مدل‌سازی خاک با استفاده از روش مستقیم و محاسبه سختی دینامیکی و حرکت ورودی به پی با استفاده از روش اجزا محدود در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود انواع حلگرهای استاتیکی و دینامیکی در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS و توانایی آن در انجام آنالیز خطی و غیرخطی مدل‌سازی سیستم ساختمان-خاک-تونل به روش مستقیم و در این نرم‌افزار انجام شده



شکل ۴. مدل‌سازی‌های انجام شده در ABAQUS

Fig. 4. Models in ABAQUS

برابر 0.5 m انتخاب گردید. در شکل ۴ ساختمان-خاک، ساختمان-خاک-تونل و ایستگاه و ساختمان-خاک-تونل نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی رفتار خاک سه نوع روش وجود دارد: ۱- خطی ۲- معادل خطی ۳- غیرخطی، از آنجایی که رفتار غیرخطی خاک شناخته شده است، برای تخمین قابل قبول از پاسخ زمین روند خطی باید اصلاح شود. پیچیدگی مدل‌های رفتاری غیرخطی و تعدد پارامترهای مورد نیاز آن‌ها سبب شده تا مدل معادل خطی به سبب سادگی مفاهیم و تعداد محدودتر پارامترهای مورد نیاز تحلیل، متداول‌تر از سایر روش‌ها باشد. روش معادل خطی با توجه به سادگی مفاهیم نسبت به سایر روش‌ها جهت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی خاک برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی خاک، زلزله و اندرکنش دینامیکی خاک و سازه روش مناسبی است. در این روش با فرض رفتار خطی نسبت میرایی و مدول برشی برای هر لایه خاک اصلاح می‌گردد که این اصلاح به صورت منحنی کاهش مدول برشی و افزایش میرایی می‌باشد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی خاک از روش معادل خطی استفاده می‌شود. از منحنی‌های استفاده شده برای خاک توسط طباطبایی فر و همکاران مطابق شکل ۵، به منظور لحاظ نسبت افزایش میرایی و از رابطه (۵) به منظور محاسبه نسبت کاهش مدول برشی استفاده شده است [۵۲].

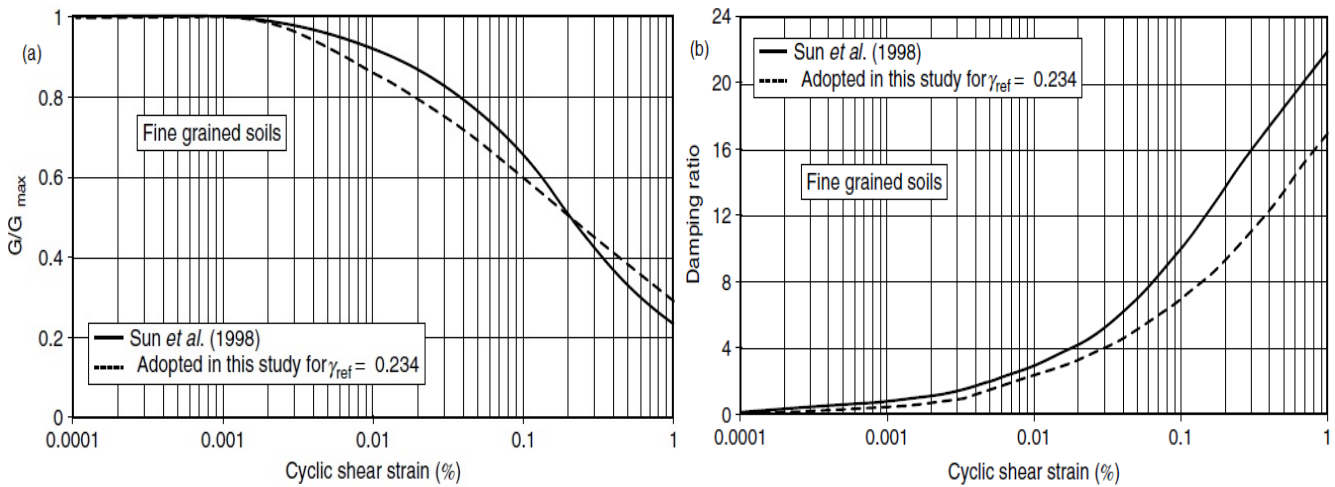
سرعت موج برشی در محیط و حداکثر فرکانس تحریک ورودی به صورت زیر در رابطه است:

$$\lambda_{\min} = \frac{V_{S \min}}{f_{\max}} \quad (3)$$

طبق دو رابطه بالا حداکثر ابعاد المان‌ها به منظور انتشار صحیح موج در محیط به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\Delta L \leq \frac{V_{S \min}}{10 \times f_{\max}} \quad (4)$$

در این روابط $V_{S \min}$ حداقل سرعت موج برشی خاک (برحسب m/s) و f_{\max} حداکثر فرکانس تحریک ورودی (برحسب HZ) می‌باشد. با توجه به اینکه در این مطالعه حداقل سرعت موج برشی مقیاس شده مربوط به خاک رسی برابر با 28 m/s و حداکثر فرکانس غالب برابر 25 HZ می‌باشد حداکثر ابعاد المان به 0.11 m محدود می‌شود. در این مطالعه ابعاد المان



شکل ۵. (a) منحنی نسبت کاهش مدول برشی (b) منحنی نسبت افزایش میرایی [۵۳]

Fig. 5. (a) Shear modulus curve (b) Damping ratio curve

با فرکانس‌های ω_1 و ω_2 (برحسب Rad/s)، ضرایب میرایی α و β را می‌توان به شرح رابطه (۷) به دست آورد:

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}; \beta = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (۲) و در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی با استفاده از المان رابط و تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار ABAQUS، فرکانس سیستم خاک و ساختمان برای خاک De و Ee به ترتیب برابر ۱٫۹۶ HZ و ۱٫۵۷ به دست می‌آید که در تعیین میرایی سازه در هر یک از سیستم خاک و ساختمان استفاده گردید. برای سیستم با خاک نوع De، $\alpha=0.202$ و $\beta=0.00045$ و برای خاک نوع Ee، $\alpha=0.163$ و $\beta=0.00055$ محاسبه گردید.

۵-۲- اندرکنش خاک و تونل

برای تحلیل لرزه‌های تونل‌ها راهکارهای مبتنی بر روش‌های عددی، تحلیلی و تجربی ارائه شده است. به طور خلاصه روش‌های معمول عددی در طراحی لرزه‌های تونل نیز روش مستقیم تحلیل اندرکنش خاک و تونل

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^S} \quad (5)$$

در این رابطه γ کرنش برشی، γ_{ref} کرنش برشی مرجع، β و S ضرایب بی‌بعد می‌باشند. مقادیر β و S در این مطالعه برابر ۱ در نظر گرفته شده است. بر اساس این رابطه نسبت میرایی نیز قابل محاسبه است.

در تحلیل دینامیکی غیرخطی، میرایی خاک را می‌توان با فرمول میرایی رایلی^۱ به دست آورد [۵۲]. ماتریس میرایی در فرمول رایلی، یک ترکیبی خطی از ماتریس جرم و سختی طبق رابطه (۶) است:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

که در آن $[C]$ ، $[M]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس میرایی، جرم و سختی هستند، α و β ضرایب مورد استفاده برای تنظیم نسبت میرایی مدل در دو مود سیستم هستند. با فرض نسبت میرایی یکسان (ξ) برای دو مود اول

1 Rayleigh damping

که v_s و v_n به ترتیب مولفه قائم و برشی سرعت در مرز خاک هستند (برحسب m/s)، ρ چگالی خاک (برحسب kg/m^3) است و C_n و C_s به ترتیب سرعت موج P و موج S (برحسب m/s) هستند [۴۴]. نیروهای قائم و برشی ویسکوز برای خاک نوع De برابر 100340 N.s/m و برای خاک نوع Ee برابر 41160 N.s/m محاسبه گردید این میرایی توسط چند میراگر با نیروهای قائم و برشی معادل برای خاک نوع De و Ee به ترتیب برابر 100340 N.s/m و 41160 به مدل اعمال گردید.

۶- بررسی عملکرد لرزه‌ای اندرکنش ساختمان-خاک-تونل

در این قسمت اثر حضور تونل بر پاسخ میدان آزاد بدون حضور ساختمان و همچنین بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حضور ساختمان معیار ۱۵ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالتی که سازه وجود ندارد در ابتدا اثر انعطاف‌پذیری تونل و عمق دفن تونل بر بزرگ‌نمایی شتاب سطح زمین و طیف جابجایی بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه در حضور تونل بیشینه جابجایی طبقات و نیروی اعضا با توجه به هندسه، عمق دفن و ابعاد تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۱- بررسی اثر انعطاف‌پذیری سازه زیرزمینی

ضریب انعطاف‌پذیری بیانگر میزان انعطاف‌پذیری تونل نسبت به خاک اطراف است که برای تونل جعبه‌ای شکل طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$F = \left(\frac{G_m}{K_s}\right)\left(\frac{W}{H}\right) \quad (10)$$

که در آن G_m مدول برشی متوسط خاک اطراف تونل متناسب با کرنش برشی (برحسب Pa)، K_s سختی برشی پوشش تونل (برحسب N/m) که از تحلیل مجزای قاب سازه‌ای تونل به دست می‌آید، W و H به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع سازه‌ی زیرزمینی (برحسب m) است. جهت تعیین K_s قاب سازه‌ای تونل بدون حضور خاک مطابق شکل ۶ در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و با اختصاص مشخصات سازه‌ای و اعمال بار واحد با فرض تکیه‌گاه ساده تغییر مکان افقی قاب محاسبه و ks تعیین شده است [۵۶].

در تونل‌های دایره‌ای شکل با در نظرگیری رفتار الاستیک، مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری پوشش تونل با استفاده از رابطه‌ی تحلیلی (۱۱) قابل محاسبه است [۷]:

می‌باشد. برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و تونل از مدل اصطکاک کولمب استفاده شده است [۵۳، ۲۴]. این مدل، رفتار اصطکاک بین سطوح تماس را با استفاده از یک ضریب اصطکاک μ مشخص می‌کند و طبق رابطه (۸) تعیین می‌گردد:

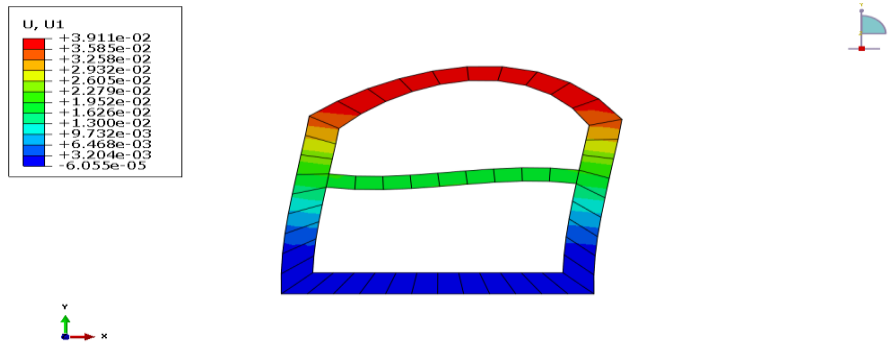
$$\mu = \tan(\delta) + \frac{c}{\sigma}, \tau_{crit} = \mu\rho \quad (8)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک و ρ فشار تماس بین دو سطح (برحسب پاسگال)، δ زاویه اصطکاک بین بتن تونل و خاک (برحسب $^\circ$)، c چسبندگی (برحسب Pa) و σ تنش قائم (برحسب Pa) که با فرض تنش کل وارده در محور تونل می‌باشد. زاویه اصطکاک بین مصالح تونل از جنس بتن و خاک، مطابق مطالعات گومز و همکاران [۵۴] همخوانی مناسبی با مقدار معمول $\frac{2}{3}\phi$ (زاویه اصطکاک داخلی خاک) دارد. در این مطالعه، بیشترین مقدار ضریب اصطکاک برای عمق قرارگیری تونل برابر $H/D = 1/5$ محاسبه گردید. لغزش سطوح تماس زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی بین آن‌ها برابر تنش برشی اصطکاکی حدی شود. برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و تونل از خاصیت تماس به صورت رفتار مماسی و قائم استفاده شده است. رفتار مماسی اصطکاک کولمب و رفتار قائم تماس سخت^۱ در نظر گرفته شده است این نوع تماس تداخل دو سطح را به حداقل می‌رساند.

۵-۳- شرایط مرزی مدل

به منظور در نظر گرفتن میرایی تشعشعی باید المان‌های مرزی خاک به نحو مناسب طراحی گردند. به همین منظور از المان‌های جاذب در مرزهای مدل استفاده شده است تا بتواند به درستی بیانگر محیط نیمه بی‌نهایت خاک باشد. در این مطالعه، برای به حداقل رساندن بازتاب انرژی موج قائم و برشی به درون المان‌های اجزا محدود از میراگر مستقل در جهت‌های برشی و قائم در مرزهای مدل استفاده شده است. میراگرها نیروهای قائم و برشی ویسکوز را با استفاده از رابطه زیر ایجاد می‌کنند:

$$T_n = -\rho C_n V_n; T_s = -\rho C_s V_s \quad (9)$$



شکل ۶. تعیین تغییر مکان سازه زیرزمینی در نرم افزار

Fig. 6. Determining the displacement of the underground structure in the software

۶-۱-۲- خاک نوع Ee

این خاک از نوع خاک نرم با زاویه اصطکاک داخلی 12° و چسبندگی 67.0 Pa می باشد با محاسبه زاویه اصطکاک بین بتن تونل و خاک از زاویه اصطکاک داخلی خاک مطابق جدول ۴، با استفاده از رابطه (۸) بیشترین ضریب اصطکاک بین تونل و خاک برابر 0.3 محاسبه می شود. فرکانس طبیعی این خاک از آنالیز فرکانسی برابر ۶ هرتز به دست می آید. برای این خاک مدول برشی مقیاس شده برابر 1100 kPa و ضریب انعطاف پذیری ایستگاه مترو با تعیین تغییر مکان سازه زیرزمینی در نرم افزار ABAQUS برابر با 390 cm با استفاده از رابطه (۱۰) برابر 43 محاسبه می شود. در این خاک نیز با توجه به رابطه (۱۱) ضریب انعطاف پذیری تونل دایره ای 370 محاسبه گردید.

ضریب انعطاف پذیری بالاتر به معنی انعطاف پذیر بودن سازه نسبت به محیط اطراف است که در این مطالعه برای خاک نوع De بیشتر از خاک نوع Ee است. در شکل ۷ نمونه ای از بزرگ نمایی شتاب در سطح زمین در دو نوع خاک (از TF و FF به ترتیب برای حالت در حضور تونل و بدون حضور تونل نام برده می شود) و در شکل ۸ مقایسه شتاب سطح زمین و طیف جابجایی برای دو نوع خاک در اثر حضور سازه زیرزمینی نشان داده شده است. با کاهش ضریب انعطاف پذیری تونل میزان حداکثر شتاب در سطح زمین افزایش می یابد این نتیجه مطابق با تحقیقات بازبار [۵۶] می باشد.

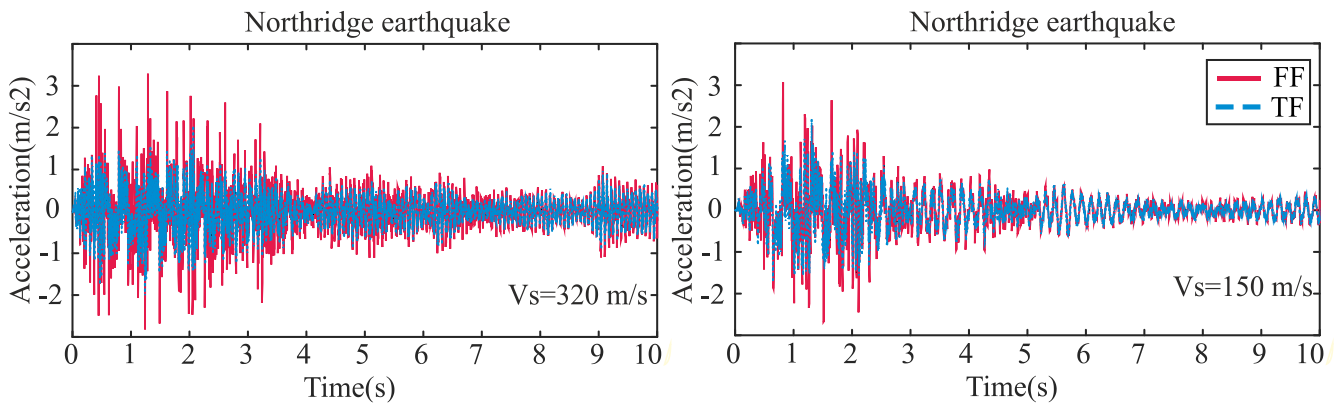
$$J = \frac{2E_s(1-\nu_l^2).R^3}{E_l(1+\nu_s)t^3} \quad (11)$$

در رابطه ی فوق E_s و E_l به ترتیب مدول الاستیسیته خاک و مصالح پوشش تونل است؛ همچنین ν_s ، ν_l به ترتیب ضریب پواسون مصالح خاک و پوشش تونل است؛ همچنین R و t به ترتیب شعاع مقطع تونل و ضخامت پوشش تونل می باشند.

در این مطالعه از دو نوع خاک استفاده شده است که موجب تفاوت در ضریب انعطاف پذیری سازه زیرزمینی به شرح ذیل می شود:

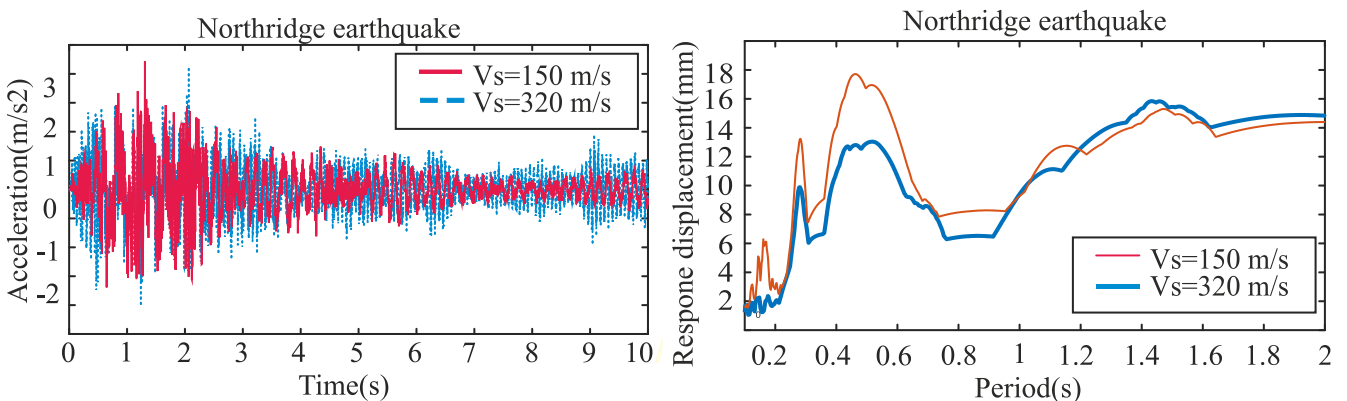
۶-۱-۱- خاک نوع De

این خاک از نوع خاک نرم با زاویه اصطکاک داخلی 19° و چسبندگی 67.0 Pa می باشد. با محاسبه زاویه اصطکاک بین بتن تونل و خاک از زاویه اصطکاک داخلی خاک مطابق جدول ۴، با استفاده از رابطه (۸) بیشترین ضریب اصطکاک بین تونل و خاک 0.35 فرض می شود. فرکانس طبیعی خاک از آنالیز فرکانسی برابر 14 Hz به دست می آید برای این خاک مدول برشی مقیاس شده برابر 5910 Kpa و ضریب انعطاف پذیری ایستگاه مترو با تعیین تغییر مکان سازه زیرزمینی در نرم افزار ABAQUS برابر 390 cm با استفاده از رابطه (۱۰) برابر 230 و با توجه به رابطه (۱۱) ضریب انعطاف پذیری تونل دایره ای نیز 1710 محاسبه می شود.



شکل ۷. مقایسه شتاب سطح زمین در حالت با ایستگاه مترو و بدون آن برای دو نوع خاک

Fig. 7. Comparison of ground surface acceleration with and without subway station for two types of soil



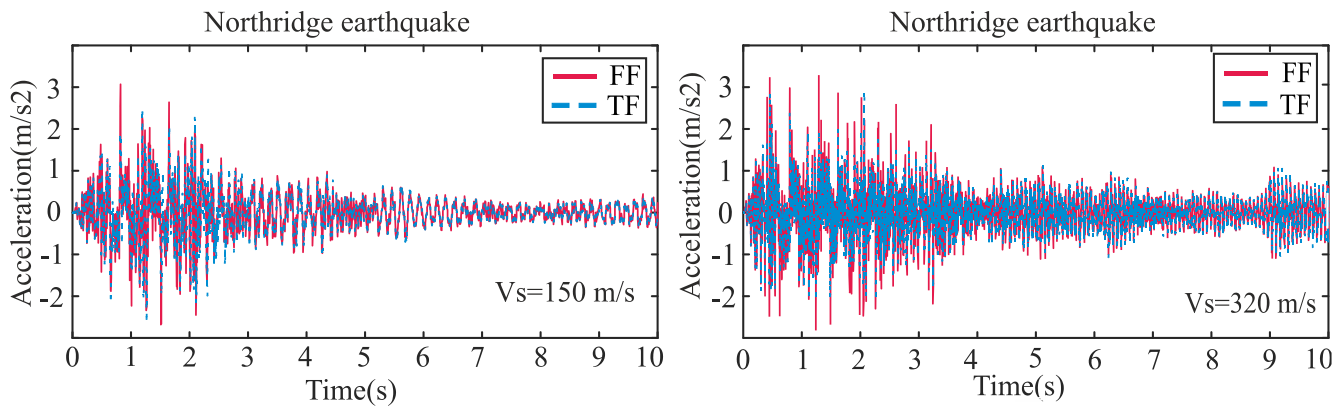
شکل ۸. مقایسه شتاب سطح زمین و طیف جابجایی با ایستگاه مترو برای دو نوع خاک

Fig. 8. Comparison of ground surface acceleration and displacement spectra with metro stations for two soil types

بزرگ‌نمایی و اعداد کوچک‌تر از یک معرف کوچک‌نمایی امواج روی سطح زمین هستند. هنگامی که شتاب‌نگاشت به سنگ بستر اعمال می‌شود با عبور این امواج از لایه خاک تغییراتی در دامنه و محتوای فرکانسی آن صورت می‌گیرد. به صورت متداول دامنه امواج در سطح زمین در زلزله‌های واقعی افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از این تغییرات در شکل ۹ نشان داده شده است نزدیک بودن فرکانس موج ورودی به فرکانس طبیعی دلیل افزایش دامنه امواج روی سطح زمین است [۳۹ و ۷]. در شکل ۱۰ بزرگ‌نمایی شتاب در

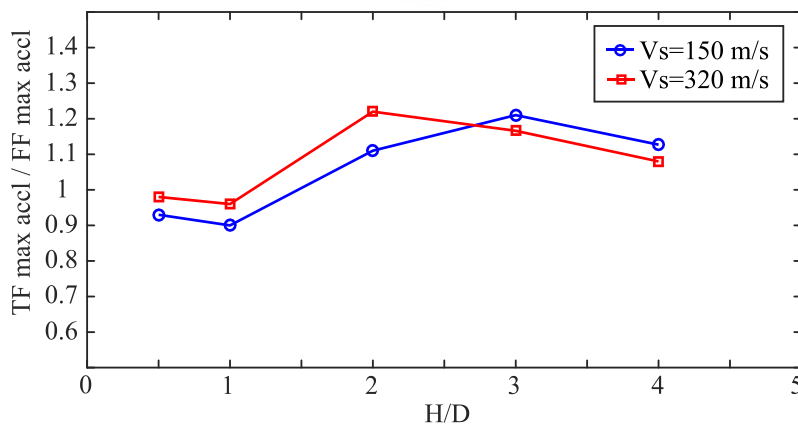
۶-۲- تاثیر فرکانس موج ورودی بر بزرگ‌نمایی شتاب سطح زمین در حضور تونل

منظور از بزرگ‌نمایی، افزایش شتاب سطح زمین در اثر حضور تونل می‌باشد، به این صورت که حداکثر شتاب سطح زمین در شرایط حضور تونل (TF) نسبت به حداکثر شتاب سطح زمین در حالت بدون تونل (FF) محاسبه می‌شود. برای این منظور دو تاریخچه شتاب برداشت شده از روی سطح زمین بر هم تقسیم شده است. اعداد بزرگ‌تر از یک نشان دهنده



شکل ۹. مقایسه شتاب سطح زمین در حالت بدون تونل و با تونل $H/D = 1.5$ برای دو نوع خاک

Fig. 9. Comparison of ground surface acceleration without tunnel and with tunnel $H/D = 1.5$ for two soil types



شکل ۱۰. بزرگ‌نمایی شتاب سطح زمین در دو نوع خاک برای عمق‌های مختلف تونل

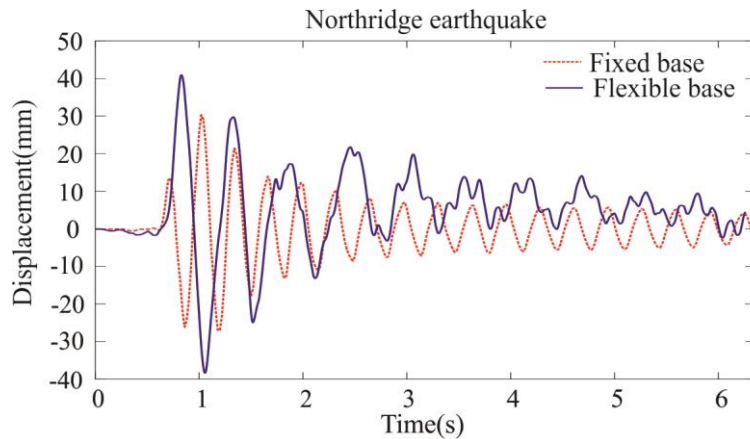
Fig. 10. Magnification of ground acceleration in two types of soil for different tunnel depths

در سازه تحت اثر زمین لرزه‌های شدید می‌باشد. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از تاریخچه جابجایی بام با پایه انعطاف‌پذیر برای خاک نوع Ee با حالت با پایه گیردار مقایسه شده است. با توجه به اهمیت کنترل جابجایی طبقات، حداکثر جابجایی طبقات تحت تاثیر اندرکنش ساختمان-خاک- تونل باید مورد بررسی قرار گیرد به همین منظور نسبت تغییر مکان جانبی ماکزیمم طبقات مربوط به هر رکورد به تغییر مکان جانبی ماکزیمم در حالت بدون تونل برای سازه با پایه انعطاف‌پذیر تحت تاثیر عمق قرارگیری برای خاک

سطح زمین در دو نوع خاک در اثر حضور تونل نشان داده شده است.

۳-۶- جابجایی حداکثر طبقات

با توجه به بررسی تاثیر تونل در شتاب سطح زمین و مطابقت آن با نتایج تحقیقات گذشته، به بررسی تاثیر آن بر ساختمان و پارامتر مهم جابجایی حداکثر طبقات پرداخته می‌شود. بسیاری از خرابی‌ها و فروریزش سازه‌ها و خسارات جانی و مالی قابل توجه به سازه ناشی از جابجایی‌ها به وجود آمده



شکل ۱۱. مقایسه جابجایی بام برای خاک نوع Ee و پایه گیردار

Fig. 11. Comparison of roof displacement for Ee soil type and fixed base

$$\text{drift} = (d_{i+1} - d_i) \leq \Delta_a = 0.015h - 0.015 \times 100 = 1.5 \text{ mm} \quad (12)$$

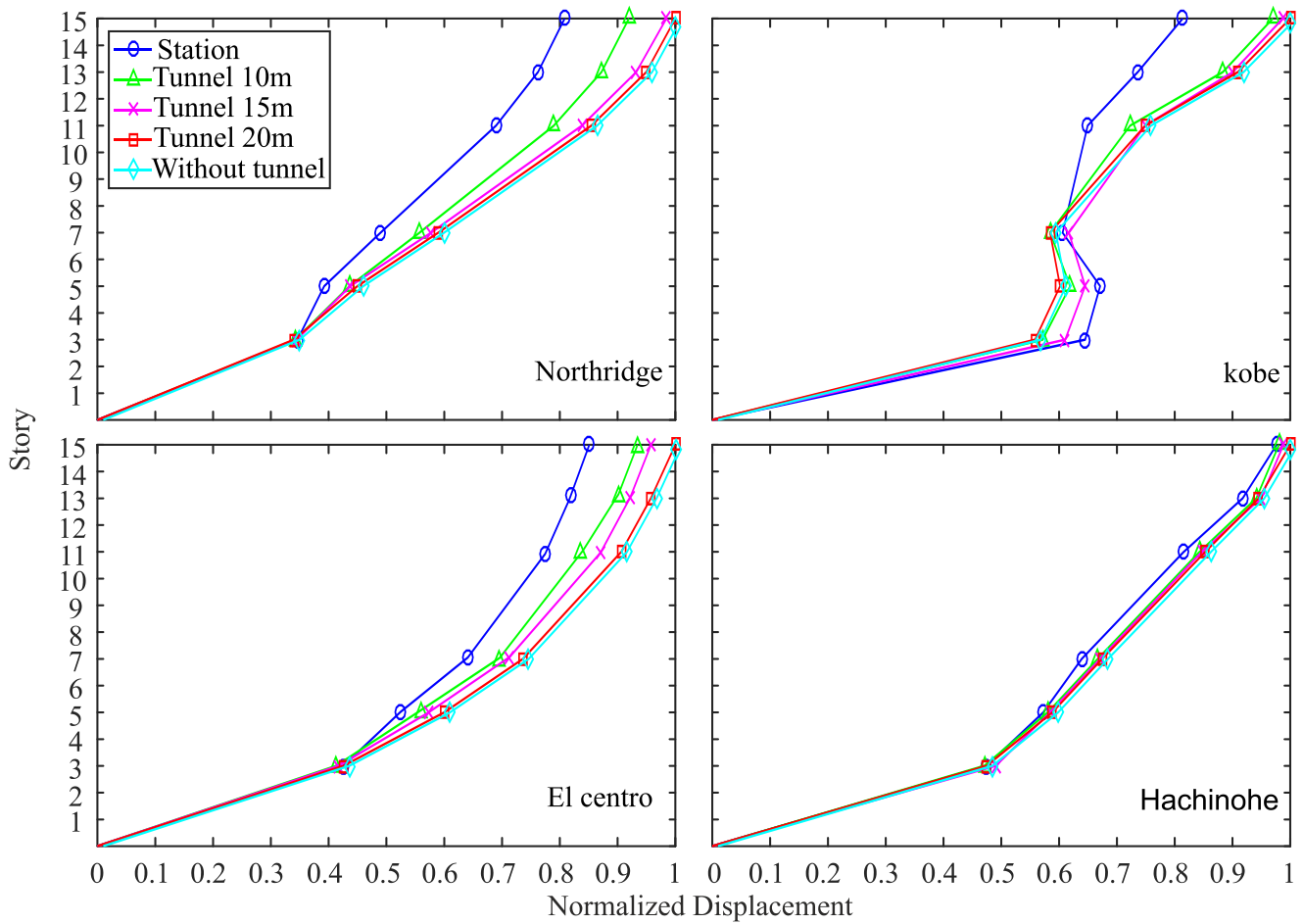
در این رابطه، h برابر ارتفاع طبقه (برحسب mm)، d_i جابجایی طبقه i ام (برحسب mm)، d_{i+1} جابجایی طبقه بالاتر از طبقه i ام (برحسب mm) و Δ_a جابجایی نسبی مجاز (برحسب mm) می‌باشد. بیشترین جابجایی نسبی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و ساختمان برای طبقات پایین ساختمان بوده و بیشترین جابجایی نسبی برای طبقه اول برای سازه با پایه گیردار برابر 1.43 mm، برای پایه انعطاف‌پذیر با خاک نوع De برابر 2.04 mm و برای خاک نوع Ee برابر 2.19 mm می‌باشد برای طبقه بام بیشترین جابجایی نسبی برای سازه با پایه گیردار برابر 0.57 mm، برای پایه انعطاف‌پذیر با خاک نوع De برابر 0.85 mm و برای خاک نوع Ee برابر 1.02 mm می‌باشد. افزایش جابجایی نسبی برای طبقه اول با پایه انعطاف‌پذیر برای خاک نوع De برابر 0.42% و برای خاک نوع Ee برابر 0.53% می‌باشد که بیشتر از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای است.

با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تغییرات جابجایی حداکثر طبقات برای مقاطع مختلف با مساحت یکسان به ترتیب برای تونل دایره‌ای، ایستگاه و تونل جعبه‌ای افزایش می‌یابد که به علت افزایش تنش و میرایی در لبه‌های تیز گوشه و همچنین انکسار و انعکاس موج در برخورد با اضلاع تونل‌های

نوع De در شکل ۱۱ و برای خاک نوع Ee نیز در شکل ۱۲ ارائه شده است. همچنین تاثیر شکل مقطع برای خاک نوع Ee در شکل ۱۳ و برای خاک نوع De نیز در شکل ۱۴ مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات جابجایی حداکثر طبقات با وجود تونل به طور کلی نشان دهنده کاهش حداکثر جابجایی طبقات نسبت به سیستم بدون تونل می‌باشد. برای خاک نوع Ee جابجایی طبقات پایین بیشتر از خاک نوع De می‌باشد با افزایش سطح مقطع تونل (ایستگاه نسبت به تونل‌های دایره‌ای) کاهش جابجایی به حدود 20% می‌رسد که به دلیل انکسار و انعکاس موج در برخورد با ایستگاه و تفرق موج در ناحیه قرار گرفته بین ایستگاه و سطح زمین است همچنین با کاهش فاصله محل قرارگیری تونل دایره‌ای نسبت به تراز پایه ساختمان میزان کاهش محسوس‌تر است و تاثیر تونل دایره‌ای بر جابجایی ساختمان در عمق‌های مختلف نسبت به ایستگاه مترو کمتر می‌باشد. تغییرات جابجایی برای زلزله هاچینوه نسبت به سه زلزله دیگر کاهش نامحسوسی دارد که به علت نزدیک بودن فرکانس غالب زلزله هاچینوه با فرکانس سیستم برای خاک نوع De پدیده تشدید اتفاق افتاده است.

با توجه به طراحی سازه مطابق آیین‌نامه لرزه‌ای استرالیا [۵۷] حداکثر جابجایی نسبی طبقات به $0.15h$ محدود می‌شود که به صورت رابطه زیر می‌باشد:



شکل ۱۲. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات تحت چهار رکورد زلزله برای خاک نوع De در عمق مختلف

Fig. 12. Maximum lateral displacement ratio of floors under four earthquake records for De-type soil at different depths

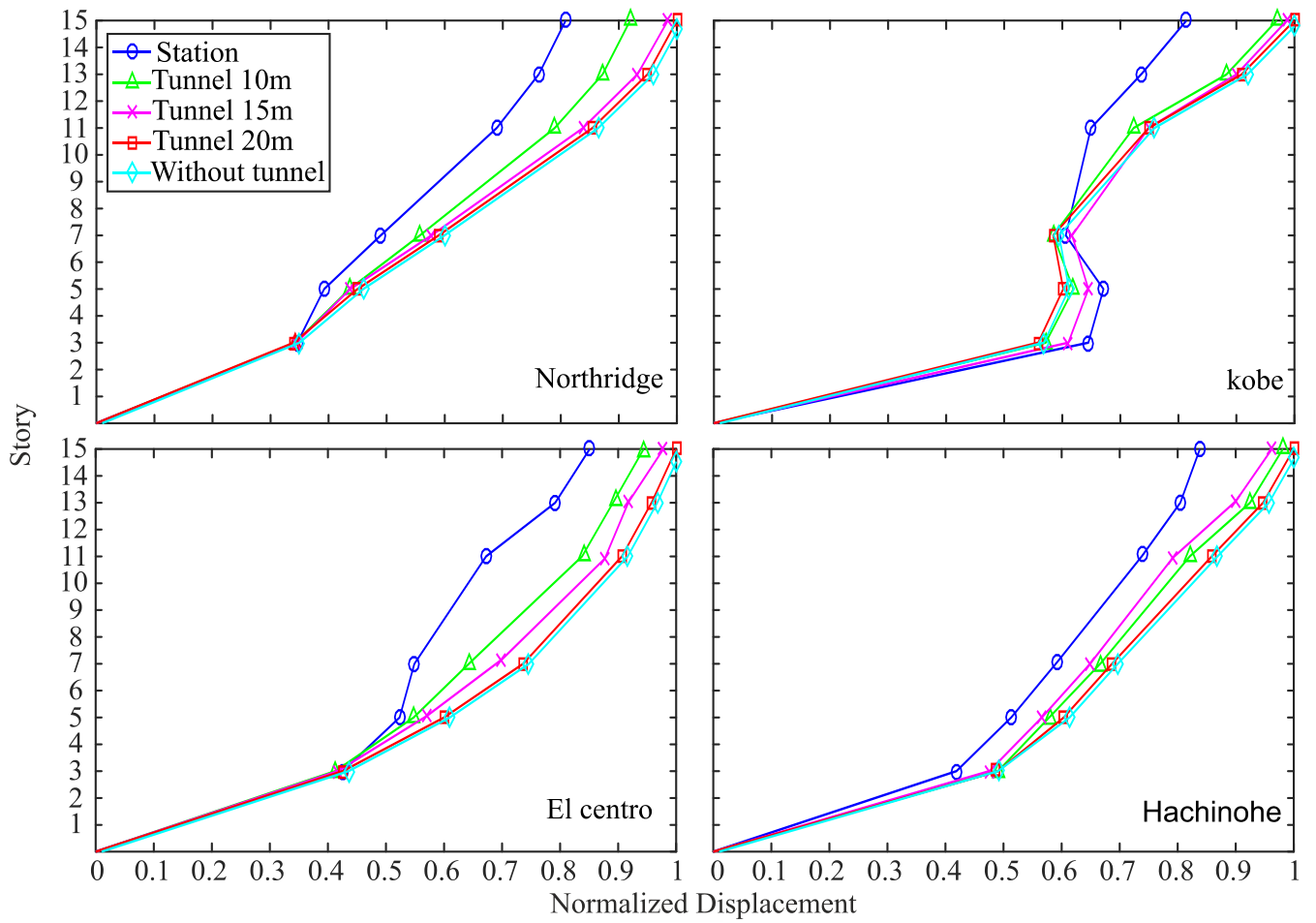
در این بخش به ارزیابی تاثیر تونل بر مقدار تغییرات تنش در اعضا پرداخته می‌شود. بدین منظور مقادیر قائم شده حداکثر تنش ایجاد شده در اعضا در حالات مختلف به حداکثر تنش ایجاد شده در حالت بدون وجود تونل در نرم‌افزار ABAQUS محاسبه شده و مطابق شکل ۱۶ تعیین شده است. تنش در اعضا در خاک نوع De برای زلزله‌های ال‌سنتره، هاجینوه و کوبه و برای خاک نوع Ee برای زلزله کوبه تحت تاثیر ایستگاه مترو افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. نسبت حداکثر تنش ایجاد شده در اعضا، برای زلزله‌های حوزه نزدیک در خاک نوع De و Ee برای زلزله کوبه کاهش به میزان ۲۲٪ و برای زلزله‌های حوزه دور، در خاک نوع De برای زلزله ال‌سنتره به میزان ۹٪ افزایش دارد.

لازم به ذکر است که به دلیل ساده بودن مدل عددی مورد استفاده،

جعبه‌ای می‌باشد. در حضور تونل دایره‌ای جابجایی نسبی تغییر نمی‌کند ولی در حضور ایستگاه مترو و تونل دایره‌ای و مربع معادل این تغییرات کمتر از حدود آیین‌نامه می‌شود. نسبت حداکثر جابجایی در حضور تونل، برای زلزله‌های حوزه نزدیک، در خاک نوع De برای زلزله نوتریچ و در خاک نوع Ee برای زلزله کوبه و برای زلزله‌های حوزه دور، در خاک نوع De و Ee برای زلزله ال‌سنتره بیشترین کاهش به میزان ۱۰٪ دارد.

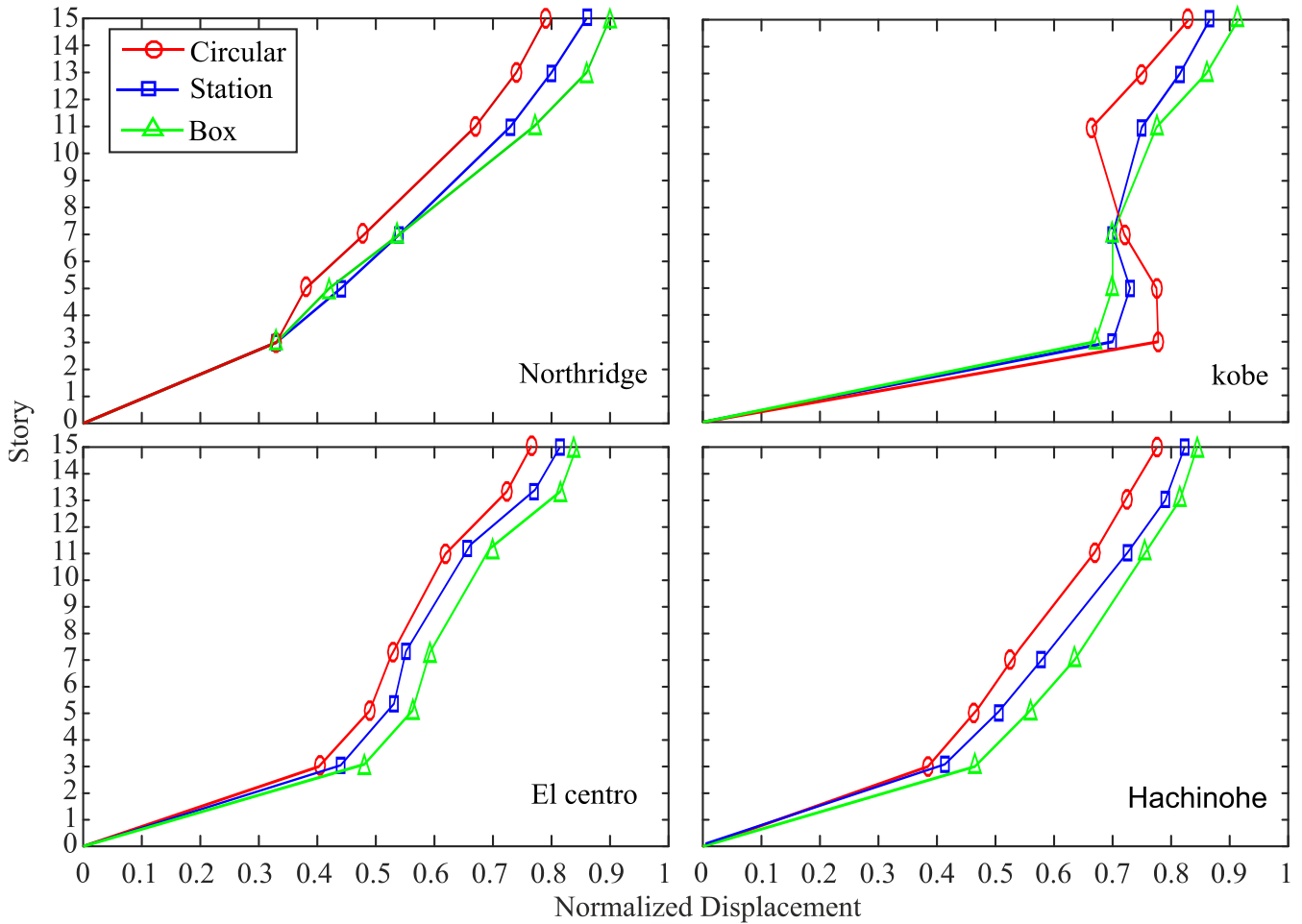
۴-۶ کنترل تنش اعضای سازه‌ای

برای داشتن یک طرح اقتصادی و ایمن لازم است تغییر نیرو در اعضای سازه تحت عوامل مختلف مورد توجه قرار گیرد. لذا با توجه بررسی تاثیر تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه،



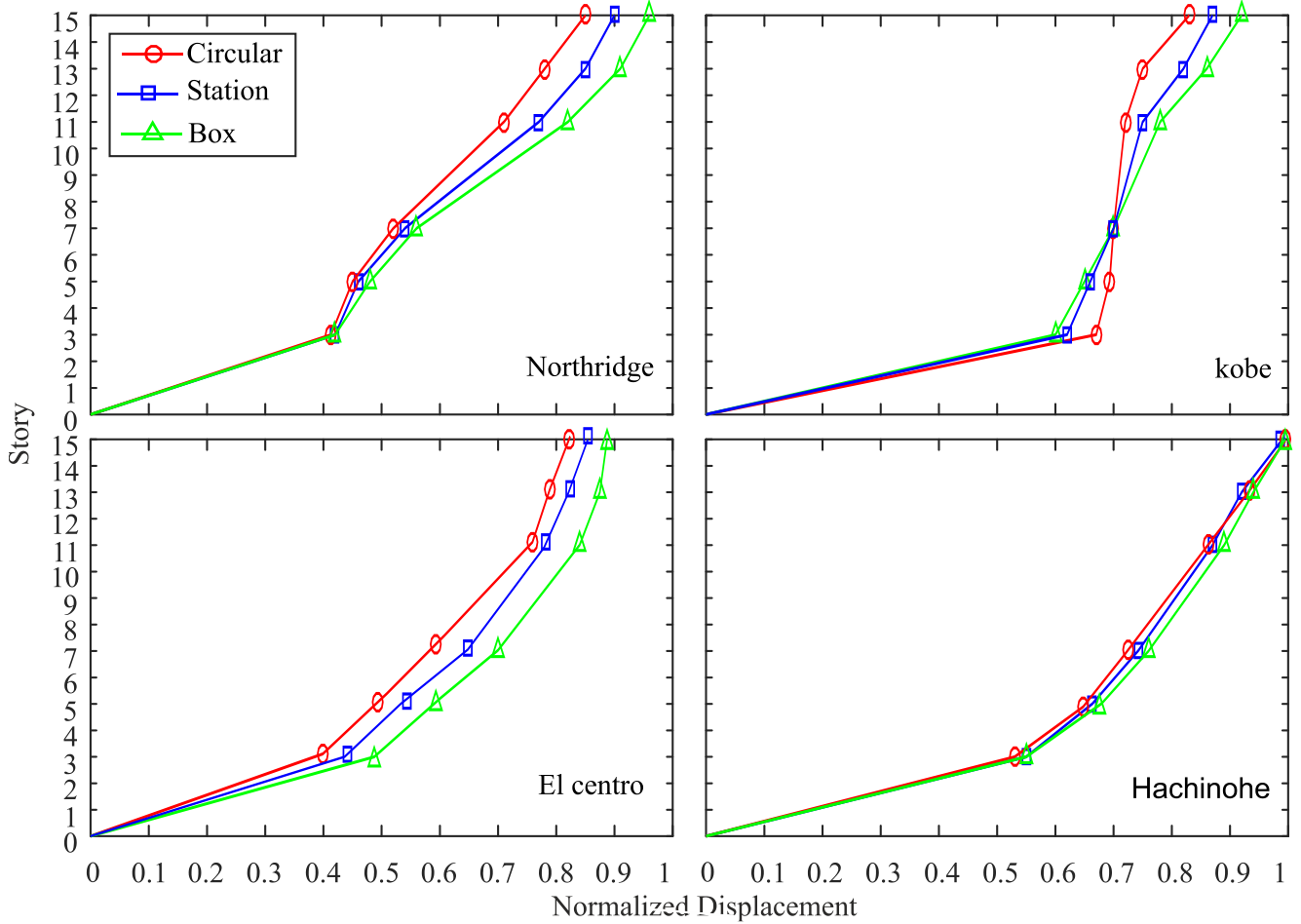
شکل ۱۳. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات تحت چهار رکورد زلزله برای خاک نوع Ee در عمق مختلف

Fig. 13. Maximum lateral displacement ratio of floors under four earthquake records for Ee type soil at different depths



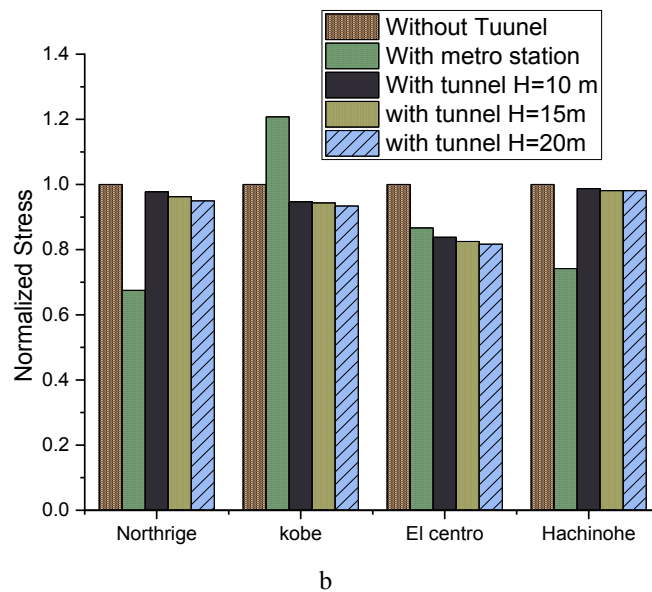
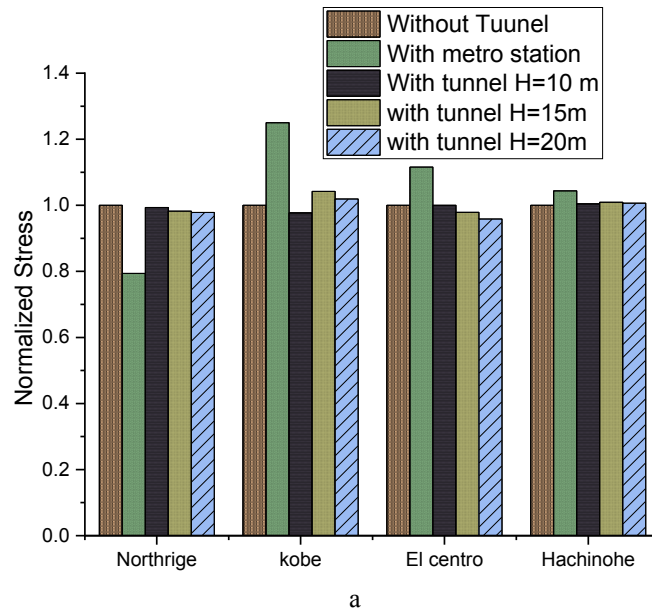
شکل ۱۴. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات تحت چهار رکورد زلزله برای خاک نوع Ee برای مقاطع مختلف

Fig. 14. Maximum lateral displacement ratio of floors under four earthquake records for Ee type soil for different sections



شکل ۱۵. حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات تحت چهار رکورد زلزله برای خاک نوع De برای مقاطع مختلف

Fig. 15. Maximum lateral displacement of floors under four earthquake records for type De soil for different sections



شکل ۱۶. حداکثر تنش ایجاد شده در اعضا سازه تحت چهار رکورد زلزله: (a) خاک نوع De (b) خاک نوع Ee

Fig. 16. Maximum stress created in structural members under four earthquake records: (a) De soil type (b) Ee soil type

• یک مدل عددی سه بعدی مناسبتر خواهد بود زیرا سازه زیرزمینی احتمالاً به طور قابل توجهی بر انتشار امواج در جهات مختلف تأثیر می‌گذارد. مدل‌های دو بعدی که در اینجا استفاده گردید ممکن است مسئله اندرکنش سازه زیرزمینی برای موج پیچیده را کاملاً در نظر نگیرد.

• در این مطالعه به ۴ رکورد زلزله معیار اکتفا شده است به منظور در نظر

برخی عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌ها در این مطالعه به شرح ذیل وجود دارد:

• برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک از روش معادل خطی در تحلیل لرزه‌ای استفاده گردید برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار دینامیکی خاک، یک مدل غیرخطی پیشرفته‌تر لازم است. به دلیل عدم وجود پارامترهای دقیق، مدل‌سازی محدود شده است.

بزرگ‌تر از ۳ ($H/D > 3$) تاثیرات آن به طور کلی قابل چشم پوشی می‌باشد. (۶) نسبت حداکثر تنش ایجاد شده در اعضا، برای زلزله‌های حوزه نزدیک در خاک نوع De و Ee برای زلزله کوبه به میزان ۲۲٪ و برای زلزله‌های حوزه دور، در خاک نوع De برای زلزله ال‌سترو به میزان ۹٪ افزایش دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه به عنوان یک نتیجه کلی افزایش جابجایی جانبی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و ساختمان مشاهده گردید و سطح عملکرد ساختمان ممکن است کاهش یابد که تهدید کننده ایمنی است. با در نظر گرفتن اندرکنش ساختمان- خاک- تونل، با افزایش مساحت مقطع تونل و کاهش عمق تونل، جابجایی ماکزیمم طبقات ساختمان کاهش می‌یابد و همچنین افزایش مساحت مقطع و کاهش عمق تونل می‌تواند بسته به نوع زلزله و خاک محل ساختگاه موجب افزایش تنش لرزه‌ای اعضا شود که باید در طراحی سازه مورد توجه قرار گیرد. با توجه به توضیحات داده شده برای داشتن یک ساختمان با عملکرد مناسب بهتر است اندرکنش ساختمان، خاک و تونل در طراحی مدنظر قرار گیرد.

منابع

- [1] G. Mylonakis, G. Gazetas, Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental?, J. Earthqu. Eng., 4(3) (2000) 277-301.
- [2] V. Anand, S.R. Satish Kumar, Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review, Structures, 16 (2018) 317-326.
- [3] K. Pitilakis, G. Tsinidis, Performance and Seismic Design of Underground Structures, in: M. Maugeri, C. Soccodato (Eds.) Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 2014, pp. 279-340.
- [4] N. Sharma, K. Dasgupta, A. Dey, A state-of-the-art review on seismic SSI studies on building structures, Innov. Infrastruct. Solut., 3(1) (2018).
- [5] E. Kausel, Early history of soil-structure interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(9) (2010) 822-832.
- [6] M.D. Trifunac, Site conditions and earthquake ground motion – A review, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90 (2016) 88-100.
- [7] M. Rabeti Moghadam, M.H. Baziar, Seismic ground

گرفتن عدم قطعیت موجود در رکوردهای زلزله بهتر است در مطالعات جامع‌تری چند رکورد زلزله در بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه مورد بررسی قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در این مطالعه اثر تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان مدنظر می‌باشد برای هر یک از چهار رکورد زلزله می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

(۱) اثر اندرکنش دینامیکی خاک و ساختمان تأثیر زیادی بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان بلند با قاب خمشی مستقر بر روی خاک‌های نوع De و Ee دارد. برای ساختمان بلند با قاب خمشی که بر روی نوع خاک نسبتاً نرم قرار دارند، مشخص می‌شود که اثر نوع ساختگاه به افزایش جابجایی جانبی و جابجایی نسبی بین طبقه کمک می‌کند. با این حال، در نظر گرفتن اثرات ساختگاه مانند اثر اندرکنش خاک و سازه، ایمنی ساختمان را تضمین نمی‌کند و سطح عملکرد ساختمان ممکن است کاهش یابد. لحاظ کردن اثرات ساختگاه در تحلیل ساختمان‌های با پایه ثابت شامل افزایش جابجایی جانبی و جابجایی نسبی بین طبقه است.

(۲) اندرکنش خاک و ساختمان موجب افزایش پیروی اول ساختمان می‌شود و تاثیر آن بر پاسخ جابجایی بام در خاک نرم‌تر بیشتر از خاک سخت است، به طوری که موجب افزایش جابجایی بام گردید. افزایش جابجایی نسبی برای طبقات اول با پایه انعطاف‌پذیر برای خاک نوع De برابر ۴۲٪ و برای خاک نوع Ee برابر ۵۳٪ می‌باشد.

(۳) اندرکنش ساختمان- خاک- تونل نیز بر جابجایی حداکثر طبقات ساختمان تاثیر دارد به طور کلی نشان دهنده کاهش حداکثر جابجایی طبقات نسبت به سیستم بدون تونل می‌باشد. با توجه به کاهش فاصله محل قرارگیری تونل دایره‌ای نسبت به تراز پایه ساختمان بیشترین میزان کاهش برای $H/D = 1/5$ برابر ۱۰٪ است. با افزایش سطح مقطع تونل (ایستگاه نسبت به تونل‌های دایره‌ای) کاهش جابجایی به حدود ۲۰٪ می‌رسد این میزان کاهش در محاسبات لرزه‌ای قابل توجه است.

(۴) نسبت حداکثر جابجایی طبقات ساختمان تحت اثر اندرکنش ساختمان- خاک- تونل، برای زلزله‌های حوزه نزدیک در خاک نوع De برای زلزله نوتریج و در خاک نوع Ee برای زلزله کوبه و برای زلزله‌های حوزه دور، در خاک نوع De و Ee برای زلزله ال‌سترو بیشترین کاهش به میزان ۱۰٪ دارد.

(۵) در این مطالعه به طور کلی تاثیر تونل بر پاسخ حداکثر جابجایی با افزایش عمق قرارگیری آن کاهش می‌یابد و برای نسبت عمق به قطر تونل

- Engineering, 132 (2020).
- [18] S. Dashti, Y.M.A. Hashash, K. Gillis, M. Musgrove, M. Walker, Development of dynamic centrifuge models of underground structures near tall buildings, *Soil Dyn. Earthqu. Eng.*, 86 (2016) 89-105.
- [19] F.Y.M.A. Hashash, M.S. Dashti, S.M. Michael Musgrove, K. Gillis, M. Martin Walker, M. Kirk Ellison, S.M.Y.I. Basarah, Influence of tall buildings on seismic response of shallow underground structures, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 144(12) (2018).
- [20] M.A. Lotfollahi Yaghin, S. Timas, F. Khoshnoudian, Influence of Neighboring Structures on Seismic Behavior of Tunnel, *Journal of Computational Methods in Engineering*, (2012).
- [21] Y. Miao, Y. Zhong, X. Chen, B. Ruan, Seismic response of SSSI system: Surface structures and subway, *Geotech. Res.*, 6(2) (2018) 69-77.
- [22] C. Navarro, Effect of adjoining structures on seismic response of tunnels, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 16(11) (1992) 797-814.
- [23] K. Pitilakis, G. Tsinidis, A. Leanza, M. Maugeri, Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects, *Soil Dyn. Earthqu. Eng.*, 67 (2014) 1-15.
- [24] H.F. Wang, M.L. Lou, R.L. Zhang, Influence of presence of adjacent surface structure on seismic response of underground structure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100 (2017) 131-143.
- [25] J. Guo, J. Chen, A. Bobet, Influence of a subway station on the inter-story drift ratio of adjacent surface structures, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 35 (2013) 8-19.
- [26] H.F. Wang, M.L. Lou, X. Chen, Y.M. Zhai, Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54 (2013) 31-38.
- [27] M.H. Baziar, M. Rabeti Moghadam, D.S. Kim, Y.W. Choo, Effect of underground structure on pga at ground surface considering linear and nonlinear behavior for the soil, (2014). motion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83 (2016) 81-97.
- [8] G. Abate, M.R. Massimino, Parametric analysis of the seismic response of coupled tunnel–soil–aboveground building systems by numerical modelling, *Bull. Earthquake Engin.*, 15(1) (2017) 443-467.
- [9] G. Abate, M.R. Massimino, Numerical modelling of the seismic response of a tunnel–soil–aboveground building system in Catania (Italy), *Bull. Earthquake Engin.*, 15(1) (2017) 469-491.
- [10] V. Anand, S.R. Satish Kumar, Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review, *Structures*, 16 (2018) 317-326.
- [11] N. Sharma, K. Dasgupta, A. Dey, A state-of-the-art review on seismic SSI studies on building structures, *Innov. Infrastruct. Solut.*, 3(1) (2018).
- [12] J.P. Wolf, C. Song, Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction, *Eng. Struct.*, 24(1) (2002) 13-28.
- [13] S. Liang, Z. Chen, SPH-FEM coupled simulation of SSI for conducting seismic analysis on a rectangular underground structure, *Bull. Earthquake Engin.*, 17(1) (2019) 159-180.
- [14] C. Su, T. Baizang, Z. Haiyang, W. Jianning, L. Xiaojun, Z. Kai, Experimental investigation of the seismic response of shallow-buried subway station in liquefied soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136 (2020).
- [15] G. Tsinidis, K. Pitilakis, Improved R-F relations for the transversal seismic analysis of rectangular tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 48-65.
- [16] L. Yan, A. Haider, P. Li, E. Song, A numerical study on the transverse seismic response of lined circular tunnels under obliquely incident asynchronous P and SV waves, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 97 (2020).
- [17] Z. Zhong, Y. Shen, M. Zhao, L. Li, X. Du, H. Hao, Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil, *Soil Dynamics and Earthquake*

- ground surface using BEM, Sharif: Civil engineering, 33-2(3.2) (2017) 29-41.
- [38] H. Alielahi, M.S. Ramazani, surface seismic amplification pattern assessment in sites over underground box structures, Bulletin of earthquake science and engineering, 3(1) (2016) 55-71.
- [39] H. Alielahi, M. Adampira, Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 85 (2016) 67-83.
- [40] H. Alielahi, M. Adampira, Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 80 (2016) 163-167.
- [41] H. Alielahi, M. Kamalian, M. Adampira, Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 71 (2015) 63-79.
- [42] H. Alielahi, M. Kamalian, M. Adampira, A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of canyons, Acta Geotech., 11(2) (2016) 391-413.
- [43] D.D. Nguyen, D. Park, S. Shamsher, V.Q. Nguyen, T.H. Lee, Seismic vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway tunnels, Tunn. Undergr. Space Technol., 86 (2019) 247-261.
- [44] Q. Sun, D. Dias, X. Guo, P. Li, Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion, Comput. Geotech., 111 (2019) 243-254.
- [45] Y. Lu, W. Huang, Numerical Simulation of Dynamic Response Law of Intersecting Metro Tunnels in Upper and Lower Strata, Geotech. Geol. Eng., 38(4) (2020) 3773-3785.
- [46] G. Wang, M. Yuan, Y. Miao, J. Wu, Y. Wang, Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system, Tunn. Undergr. Space Technol., 76 (2018) 145-159.
- [47] S.H.R. Tabatabaiefar, B. Fatahi, B. Samali, Numerical and Experimental Investigations on Seismic Response of Building Frames under Influence of Soil-Structure Interaction, Advances in Structural Engineering, 17(1) [28] M.H. Khalajzadeh, M. Azadi, The Effects of Tunnel Excavation on the Seismic Response of Ground Surface Using Finite Difference Method, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 51(1) (2019) 99-108.
- [29] M.H. Baziar, M. Rabeti Moghadam, D.S. Kim, Y.W. Choo, Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration, Tunn. Undergr. Space Technol., 44 (2014) 10-22.
- [30] M.H. Baziar, M. Rabeti Moghadam, D.S. Kim, Y.W. Choo, effect of underground structure lining flexibility on acceleration response at ground surface, sharif: civil engineering, (2016).
- [31] M.H. Baziar, A. Ghalandarzadeh, M. Rabeti Moghadam, Tehran Subway Tunnel Effect on the Seismic Response of the Ground Surface with Linear Soil Behavior: An Experimental and Numerical Study, Earthquake Engineering, (2015).
- [32] M. Panji, A. Fakhrafar, Amplification pattern of seismic ground surface in the presence of underground horseshoe tunnel subjected to incident SH-wave Earthquake Engineering, (2017).
- [33] V. Beshart, S. Majidzamani, Seismic Responce of ground Surface Tehran Subway, Earthquake Engineering, (2017).
- [34] h. Naderpour, h.R. Vosoughifar, e. Ghobakhloo, Evaluation of effective parameters on wave diffraction of far-fault ground motions using artificial neural networks, Sharif: Civil engineering, 32-2(1.1) (2016) -.
- [35] H. Alielahi, M. Kamalian, J. Asgari Marnani, M.K. Jafari, M. Panji, Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity, International Journal of Civil Engineering, 11(1) (2013) 45-54.
- [36] H. Alielahi, M. Adampira, Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications, Int. J. Civ. Eng., 14(4) (2016) 233-251.
- [37] H. Alielahi, M. Adampira, M. Asgari, Influence of double tunnels on seismic amplification pattern of

- [54] Y.M.A. Hashash, C. Phillips, D.R. Groholski, Recent advances in non-linear site response analysis, fifth international Conferenc On Resent Advances in Geotechnical erthquake Engineering and Soil Dynamics, (2010).
- [55] A.S. Hokmabadi, B. Fatahi, B. Samali, Physical Modeling of Seismic Soil-Pile-Structure Interaction for Buildings on Soft Soils, *Int. J. Geomech.*, 15(2) (2015) 04014046.
- [56] J. Khazaei, A. Amiri, M. Khalilpour, Seismic evaluation of soil-foundation-structure interaction: Direct and Cone model, *Earthqu. Struct.*, 12(2) (2017) 251-262.
- [57] J.E. Gómez, G.M. Filz, R.M. Ebeling, Extended Hyperbolic Model for Sand-to-Concrete Interfaces, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(11) (2003) 993-1000.
- [58] M.H. Baziar, M. Rabeti Moghadam, D.S. Kim, Y.W. Choo, EFFECT OF UNDERGROUND STRUCTURE LINING FLEXIBILITY ON ACCELERATION RESPONSE AT GROUND SURFACE, *SHARIF: CIVIL ENINEERING*, 31-2(4.2) (2016) 79-89.
- [59] AS1170.4-2007, Structural Design Actions - Part 4: Earthquake Actions in Australia, Australian Standards, Sydney, (2007).
- (2016) 109-130.
- [48] AS/NZS 3678-2011, Structural Steel - Hot-Rolled Plates, Floor Plates and Slabs, Australian Standards, Sydney., (2011).
- [49] M.H.T. Rayhani, M.H. El Naggar, Numerical modeling of seismic response of rigid Foundation on soft soil, *Int. J. Geomech.*, 8(6) (2008) 336-346.
- [50] M. Bagheri, M.E. Jamkhaneh, B. Samali, Effect of seismic soil-pile-structure interaction on mid and high-rise steel buildings resting on a group of pile foundations, *Int. J. Geomech.*, 18(9) (2018).
- [51] B. Fatahi, S.H.R. Tabatabaiefar, Fully nonlinear versus equivalent linear computation method for seismic analysis of midrise buildings on soft soils, *Int. J. Geomech.*, 14(4) (2014).
- [52] M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, A.R. Saeedi Azizkandi, R. Alinejad, Investigation of the effect of building soil and shallow circular tunnel interaction on the seismic response of a 20-story SAC building, *Tunneling & Underground Space Engineering*, 9(3) (2020) 305-325.
- [53] R.L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5) (1973) 421-427.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, A. Saeedi Azizkandi, R. Alinejad, Influence of a Tunnel on the Seismic Response of Adjacent Tall Building Considering Dynamic Building- Soil-Tunnel Interaction, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 541-564.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18985.7017](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18985.7017)

