

بررسی اثر اندرکنش ساختمان، خاک و تونل دایره‌ای کم عمق بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان ۲۰ طبقه SAC

پژوهشی

مازیار فهیمی فرزاد^{۱*}؛ بابک علی نژاد^۲؛ علیرضا سعیدی عزیزکندی^۲؛ رضا عالی نژاد^۳

۱- استادیار: دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، m.farzam@maragheh.ac.ir

۲- استادیار: دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، alinejad@maragheh.ac.ir

۳- استادیار: دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، asaedia@iust.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد: دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، rezaalinejad.eng@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

شماره صفحات: ۳۰۵ تا ۳۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2021.10263.1404

چکیده

واژگان کلیدی

اندرکنش خاک و سازه

روش معادل خطی

پاسخ لرزه‌ای

FLAC 2D

از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای، تأثیر تونل‌های داخل شهری بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و محیط اطراف آشکار شده است. در این مقاله با در نظر گرفتن اندرکنش سیستم ساختمان-خاک-تونل، اثر وجود تونل دایره‌ای کم عمق بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان ۲۰ طبقه معیار SAC، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم اندرکنش ساختمان-خاک-تونل به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح خاک با استفاده از روش معادل خطی مدل شده است. از ۸ رکورد زلزله جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای این ساختمان استفاده شده است. در این مطالعه اثر فاصله افقی و قائم محور تونل دایره‌ای از مرکز پی، فرکانس تحریک، انعطاف‌پذیری تونل و همچنین نوع خاک ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، برای موج سینوسی، بیشترین تأثیر بزرگنمایی شتاب پای سازه در فاصله افقی ۴ برابر شعاع تونل است و با کاهش نسبت پرپود بی‌بعد، تأثیر تونل بر بزرگنمایی شتاب بیشتر می‌شود که به دلیل عبور امواج با طول موج‌های کوتاه‌تر است. برای امواج لرزه‌ای، تغییرات جابجایی بام و شتاب پای سازه در حضور تونل، برای خاک نوع IV بیشتر از خاک نوع II و III است. افزایش شتاب پای سازه در حضور تونل، حداکثر برابر ۴۶ درصد و افزایش جابجایی بام، حداکثر برابر ۵۴ درصد برای خاک نوع IV است.

۱- مقدمه

انعطاف‌پذیر و اندرکنش خاک و سازه صورت گرفته است (Kausel, 2010). در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، موجب افزایش پرپود سازه، افزایش میرایی سیستم، کاهش برش پایه و افزایش سهم مد گهواره‌ای نسبت به پاسخ کل می‌شود (Turan, et al., 2013), (Sarlak, et al., 2017). برخلاف موارد مذکور برای بررسی جابجایی نسبی سازه و اثر $P-\Delta$ با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، باید سیستم مورد تحلیل قرار گیرد و نمی‌توان به صورت قطعی اظهار نظر

تحلیل و طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله با فرض‌های ساده کننده متعدد همراه است (Priestley, 1993). یکی از مهم‌ترین فرضیات مورد استفاده در تحلیل و طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها، فرض تکیه‌گاه گیردار برای سازه و مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها به صورت مستقل از ساختگاه است (Mylonakis & Gazetas, 2000). در چند دهه اخیر تحقیقات گسترده در زمینه مدل‌سازی ساختمان‌ها بر بستر

بی‌بعد بین ۳ تا ۱۰ می‌شوند. در این مطالعه بزرگنمایی طیفی شتاب سطح زمین با افزایش سرعت موج برشی محیط کاهش یافته و با افزایش عمق، حداکثر بزرگنمایی طیفی کاهش می‌یابد (Baziar, et al., 2015).

رابطی مقدم و بازیار اثر پارامترهای مختلفی مانند، سرعت موج برشی خاک، محتوی فرکانسی ارتعاش ورودی، نسبت انعطاف‌پذیری و عمق دفن تونل را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات پارامتری نشان داده است که مقدار بزرگنمایی شتاب سطح زمین تابعی از سه نسبت پرپود بی‌بعد، عمق بی‌بعد و نسبت انعطاف‌پذیری تونل است و حداکثر بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در فاصله دو برابر قطر تونل از محور تونل است (Rabeti Moghadam & Baziar, 2016). در مطالعه‌ای توسط بشارت و مجیدزمانی در یک نرم افزار تفاضل محدود اثر تونل خط ۷ مترو تهران بر شتاب سطح زمین در شرایط مختلف بستر و روباره متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است که از چهار زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، موقعیت قرارگیری ساختمان‌های روی زمین نسبت به محور تونل در رفتار آنها تاثیر می‌گذارد. تاثیر حضور تونل بر مقادیر شتاب سطح در فاصله افقی ۰/۵ تا ۱/۵ برابر قطر تونل بوده است که در بحرانی‌ترین حالت می‌تواند شتاب مبنای طرح را ۳۳ درصد افزایش دهد و از ۰/۳۵ به ۰/۴۶ شتاب ثقل برساند (Beshart & Majidzamani, 2017). در مطالعه‌ای دیگر اثر تونل نعل اسبی شکل بدون پوشش خط دوم متروی کرج تحت امواج مهاجم SH از نوع ریکر بر الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بررسی شده است. مشاهده شد که حضور سازه‌های زیرزمینی در عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف روی شکل‌گیری الگوی متفاوت پاسخ لرزه‌ای سطح زمین موثر است (Panji & fakhravar, 2017).

در مطالعه‌ای نادریپور و همکاران جابجایی نسبی سازه ارگ شیراز را تحت پارامترهای موثر در تفرق امواج زلزله‌های دور از گسل بررسی کردند (Naderpour, et al., 2016). خلج‌زاده و آزادی با استفاده از یک نرم افزار تفاضل محدود به بررسی اثرات حفر تونل بر بزرگنمایی امواج زلزله در شتاب سطح زمین پرداختند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، حداکثر بزرگنمایی در خاک تیپ II-III در پرپود

کرد، ولی بسیاری از نتایج عددی نشان می‌دهد، جابجایی نسبی طبقات با پایه انعطاف‌پذیر بیشتر از پایه صلب است (Fatahi & Tabatabaiefar, 2014a), (Fatahi, et al., 2015), (Hokmabadi, et al., 2014). اندرکنش خاک و سازه به خصوص برای سازه‌های بدون مهاربند که روی خاک‌های نسبتاً نرم ساخته می‌شوند، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر مکان جانبی را افزایش دهد. در بحث اثرات محلی ساختگاه 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 (Trifunac, 2016).

بهره‌برداری از سازه‌های زیرزمینی نظیر، تونل و ایستگاه مترو در مناطق شهری روز به روز در حال افزایش است و ساختمان‌های متعددی روی این سازه‌ها وجود دارند. هر گونه ارتعاش دینامیکی مانند زلزله موجب تحریک محیط اطراف و ساختمان قرار گرفته روی آن می‌شود. در مطالعات متعددی اثر تونل بر شتاب سطح زمین، مورد بررسی قرار گرفته است. بازیار و همکاران اثر تونل‌های مدفون جعبه‌ای را بر حداکثر شتاب سطح زمین با صحت سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ انجام گرفته روی یک تونل مترو، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات پارامتری نشان داد که پرپودهای بالای تحریک ورودی در حضور تونل تقویت و پرپودهای پایین تحریک ورودی تضعیف می‌شود (Baziar, et al., 2014). این محققان اثر انعطاف‌پذیری پوشش تونل بر پاسخ شتاب سطح زمین را نیز بررسی کردند، نتایج نشان داد که ضریب انعطاف‌پذیری تونل پاسخ شتاب سطح زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد و وابسته به فرکانس حرکت ورودی و طبیعی سیستم است (Baziar, et al., 2016)؛ همچنین تاثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب سطح زمین توسط بازیار و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میزان حداکثر بزرگنمایی شتاب سطح زمین، تابع عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بوده و سازه‌های زیرزمینی موجب بزرگنمایی پاسخ شتاب در سطح زمین در محدوده پرپود

شکل منفرد و دوقلو بر تغییرات پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد، تحت تاثیر حضور تونل منفرد، پاسخ‌های لرزه‌ای به دست آمده در کناره‌های تونل نسبت به مرکز تونل در سطح زمین بیشتر بوده و با سطحی شدن تونل‌ها نسبت به سطح زمین، ناحیه حبس امواج در بخش بالایی تونل و سطح زمین کوچکتر شده است؛ در نتیجه مقدار بزرگنمایی در شتاب سطح زمین بیشتر شده است (Alielahy & Ramazani, 2016). علی‌الهی و آدم‌پیرا با استفاده از روش عنصر مرزی در حوزه زمان، با بررسی اثرات دو تونل موازی و انواع مختلف سازه‌های زیرزمینی و اشکال مختلف حفره روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، یک رویکرد نسبتاً ساده به منظور تخمین کمی طیف پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تحت زلزله‌های واقعی ارائه کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که در اثر حضور حفره در پریودهای بزرگ بزرگنمایی شتاب افزایش یافته است (Alielahy & Adampira, 2016a, 2016c). علی‌الهی و همکاران با بررسی اثر دره‌های نیم سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین که در زیر آن یک حفره با ابعاد، عمق و موقعیت مختلف قرار دارد به این نتیجه رسیدند که در اثر حضور حفره در پریودهای بزرگ بزرگنمایی شتاب افزایش یافته است (Alielahy, et al., 2016).

در مطالعات محدودی اثر تونل بر عملکرد سازه رو سطحی، 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 k را در حوزه فرکانس در نرم افزار انسیس بررسی کردند. برای رفتار خاک و سازه میرایی هیسترتیک در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تأثیر قرارگیری سازه‌ها، جهت موج لرزه‌ای، فواصل بین سازه‌ها، سرعت موج برشی، میرایی خاک، عمق دفن و تعداد دهانه‌های سازه زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان داد، پاسخ سیستم را می‌توان با توجه به فاصله بین ساختمان‌های مجاور که مربوط به خصوصیات دینامیکی سیستم کلی است، تقویت یا تضعیف کرد (Wang, et al., 2013). گو و همکاران اثر ایستگاه مترو خیابان ژوجیانگ در نانجینگ چین را بر مقدار نسبت جابجایی بین طبقه‌ای ساختمانی که در فاصله‌های مختلف از ایستگاه قرار دارد،

موج ورودی 0.25 ثانیه برابر $1/27$ و حداکثر تاثیر حضور تونل در شتاب و سرعت سطح زمین در فواصل افقی صفر و دو برابر شعاع تونل در پریود 0.1 تا $1/5$ ثانیه مشاهده می‌شود (Khalajzadeh & Azadi, 2019). اثر حفره‌های دایره‌ای دفن شده بدون پوشش تحت امواج مهاجم P و SV بر پاسخ جابجایی سطح زمین در فاصله‌های افقی مختلف از حفره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد که موج SV به صورت عمودی، باعث کاهش اجزای افقی حرکت روی سطح زمین در بالای حفره می‌شود، در حالی که به طور قابل توجهی مولفه عمودی را برای فرکانس بی‌بعد 0.5 و نسبت عمق دفن 1.5 افزایش می‌دهد. حداکثر مقادیر جابجایی‌های نرمال شده در مولفه عمودی امواج P ، بزرگتر از مولفه افقی امواج SV برای فرکانس بی‌بعد 1 است (Alielahy, et al., 2013).

علی‌الهی و همکاران اثر تونل بدون پوشش با هندسه‌های مختلف را تحت امواج مهاجم SV و P بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد، انکسار و تفرق امواج فشاری بسیار بیشتر از امواج برشی است؛ بنابراین بزرگنمایی شتاب بیشتری برای امواج P در مقایسه با امواج SV مشاهده می‌شود (Alielahy, et al., 2015). علی‌الهی و همکاران با استفاده از روش عددی اجزای مرزی دو بعدی در حوزه زمان در یک محیط همگن، الگوی بزرگنمایی شتاب سطح زمین واقع روی تونل‌های زیرزمینی دوقلو و منفرد تحت تاثیر امواج مهاجم برشی درون صفحه‌ای را در فرکانس‌های مختلف، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در صورت بروز امواج P ، بزرگنمایی‌های بیشتری در مقایسه با امواج SV مشاهده می‌شود (Alielahy & Adampira, 2016b). علی‌الهی و آدم‌پیرا الگوی بزرگنمایی شتاب و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را با حفره‌ها و تونل‌های زیرزمینی بدون پوشش (لاینینگ) تحت تاثیر امواج برشی SV در فرکانس‌های مختلف را بررسی کردند. بزرگنمایی لرزه‌ای شتاب سطح زمین برای امواج مهاجم با فرکانس‌های کوتاه‌تر مقادیر بزرگتری نشان می‌دهد. در مورد امواج مهاجم با طول موج 2 تا 8 برابر قطر تونل‌های دوقلو عامل بزرگنمایی شتاب در سطح زمین معمولاً مقادیر بزرگتر از واحد دارد (Alielahy, et al., 2017). در مطالعه‌ای دیگر علی‌الهی با همکاری رضانی اثر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای

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

در این مطالعه از ساختمان ۲۰ طبقه معیار SAC به‌منظور مطالعه اندرکنش سیستم ساختمان-خاک-تونل استفاده می‌شود. مشخصات سازه مطابق جدول ۱، است (Ohtori, et al., 2004).

جدول ۱- مشخصات مدل سازه SAC

Total height (m)	۸۰٫۷۷
Total width (m)	۳۰٫۵۰
Story weight (kg)	۵۵۲E+۵
Natural frequency (Hz)	۰٫۲۶

هت بررسی اثر تونل بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان مقطع تونل دایره‌ای با قطر بیرونی ۸ متر و به ضخامت ۰٫۳۵ متر انتخاب گردید. مصالح لاینینگ تونل از بتن مسلح مطابق جدول ۲، است.

جدول ۲- مشخصات مصالح تونل

Young modulus [GPa]	۲۴
Poisson ratio	۰٫۲۰
Density [kg/m ³]	۲۴۰۰

به‌منظور بررسی اثر نوع زمین ساختگاه، سه تیپ خاک با سه سرعت برشی متفاوت به‌ترتیب برابر ۱۵۰ و ۳۲۰ و ۶۰۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات خاک‌های مورد بررسی مطابق جدول ۳، است (Fatahi & Tabatabaiefar, 2014b).

جدول ۳- مشخصات خاک

Soil type	Type IV	Type III	Type II
Shear-wave velocity (m/s)	۱۵۰	۳۲۰	۶۰۰
Cohesion intercept (kPa)	۲۰	۲۰	۵
Soil density (kg/m ³)	۱۴۷۰	۱۷۳۰	۱۷۳۰
Maximum shear modulus (kPa)	۳۳۱۰۰	۱۷۷۳۰۴	۶۲۳۴۰۹
Poisson's ratio (ν)	۰٫۴	۰٫۳۹	۰٫۲۸
Friction angle (degrees)	۱۲	۱۹	۴۰

مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند، پاسخ‌ها به مقدار پی‌ریز سازه و فاصله سازه تا ایستگاه مترو بستگی دارد (Guo, et al., 2013). آباته و ماسیمینو با مدل‌سازی المان محدود سیستم سه بعدی شبکه زیرزمینی کاتانیا اثر تونل بر اندرکنش خاک و ساختمان و بالعکس و رفتار لرزه‌ای سیستم را از نظر شتاب تاریخچه زمانی، نسبت‌های بزرگنمایی شتاب، طیف دامنه فوریه و همچنین خمش و نیروهای محوری لرزه‌ای پوشش تونل بررسی کرده‌اند. این محققان نتیجه گرفتند، وجود ساختمان باعث کاهش نسبت شتاب در عمق در مقایسه با شرایط میدان آزاد می‌شود (Abate & Massimino, 2017a). این محققان همچنین در یک مطالعه مشابه بر شبکه زیرزمینی کاتانیا اثرات عمق تونل، موقعیت قرارگیری ساختمان و زلزله ورودی را به صورت پارامتریک بر اندرکنش سه گانه ساختمان، خاک و تونل مورد بررسی قرار دادند (Abate & Massimino, 2017b). وانگ و همکاران با بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی اجزا محدود سیستم سه گانه ساختمان، خاک و تونل در نرم افزار آباکوس به این نتیجه رسیدند که وجود تونل پاسخ سازه سطح را کاهش می‌دهد، اگرچه پاسخ مختلف برای امواج مختلف زلزله ارائه شده است؛ همچنین وجود تونل تأثیر قابل توجهی در پاسخ طبقات پایین سازه سطحی دارد (Guobo, et al., 2018).

در این مطالعه اثر پارامتر نوع خاک ساختگاه، فاصله افقی و قائم تونل، انعطاف‌پذیری تونل و فرکانس تحریک بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان معیار ۲۰ طبقه SAC تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک با در نظر گرفتن سه نوع خاک مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه و در بخش دوم به‌ترتیب مشخصات ساختمان معیار، خاک‌های مورد بررسی، تونل و زلزله‌های معیار مورد استفاده در تحلیل ارائه شده است. در بخش سوم و چهارم ابعاد مدل و المان تعیین شده است. سپس در بخش پنجم صحت سنجی و در بخش ششم فرضیات مورد استفاده، شرایط مرزی خاک و نحوه مدل‌سازی اندرکنش دینامیکی ساختمان-خاک-تونل در نرم افزار FLAC شرح داده شده است و در بخش هفتم نتایج حاصل از بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان تحت شرایط مختلف ارائه شده است.

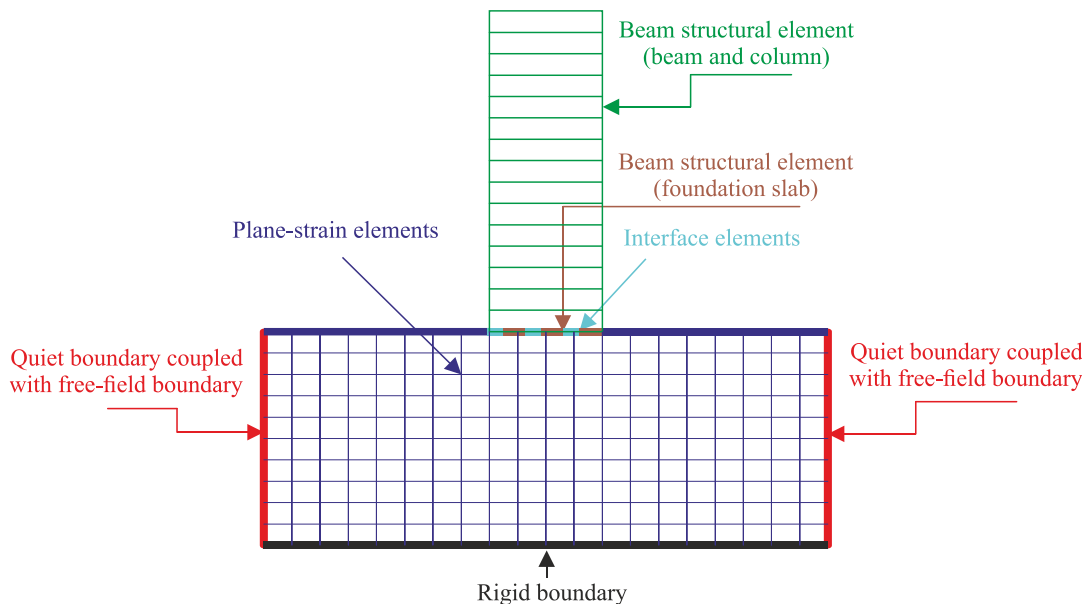
۳- تعیین ابعاد مدل

با توجه به نیمه نهایت بودن مسائل ژئوتکنیکی مدل باید به گونه‌ای ساخته شود که تا حد امکان هندسه نیمه بی‌نهایت سیستم را شبیه‌سازی کند. برای به حداقل رساندن بازتاب انرژی موج نرمال و برشی به درون المان‌ها از مرزهای جاذب در جهت‌های برشی و نرمال مطابق شکل ۱، در مرزهای مدل استفاده شده است.

برای بررسی تاثیر زلزله‌های مختلف از چهار زلزله حوزه دور و چهار زلزله حوزه نزدیک مطابق جدول ۴، استفاده شده است؛ همچنین فرکانس غالب زلزله نورتریج ۰٫۶۳۵، کوبه و ال‌سنترو ۱٫۴۶۵، هاجینوه ۰٫۳۶۶، کپ مندوسینو ۱٫۲۲، امپریال کالکسیو ۰٫۹۲۸، امپریال باندسکورنر ۱٫۳۹ و سانفرناندو ۲٫۱۵ هرتز است.

جدول ۴- رکورد زلزله‌های انتخاب شده

Type	Event name	Station	Mw	PGA
Nearfield	Northridge	Sylmar County	۶٫۷	۰٫۸۴
	Kobe	Hyogoken Nanbu	۶٫۸	۰٫۸۳
	Cape Mendocino	Petrolia	۷٫۱	۰٫۶۶
	Imperial Valley	Bonds Corner	۶٫۵	۰٫۶۰
Far field	El Centro	Imperial valley	۶٫۹	۰٫۳۵
	San Fernando	Castaic	۶٫۶	۰٫۲۷
	Imperial Valley	Calexico	۶٫۵	۰٫۲۷
	Hachinohe	Tokachi-oki	۷٫۵	۰٫۲۳



شکل ۱- حالت‌های شرایط مرزی بار دینامیکی در Flac2D

حداقل برسانند. در راستای انتخاب ابعاد مناسب برای محدوده المان بندی شده برای سیستم‌های تونل و خاک،

مرزهای جاذب مورد استفاده در مدل‌سازی خاک باید به طور مناسب از سازه فاصله بگیرند و اثر مرز را در نتایج به

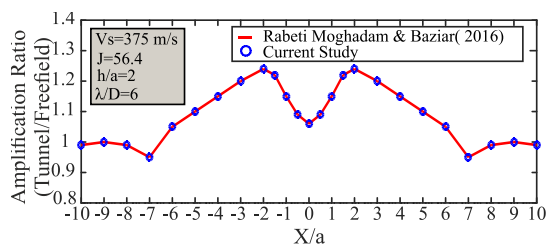
۱۵ متر محدود می‌شود.

۵- صحت سنجی

به منظور توجیه صحت نتایج به دست آمده در این مطالعه، مقاله طباطبائی فر و همکاران (Tabatabaiefar, et al., 2016). در زمینه بررسی عددی و آزمایشگاهی پاسخ لرزه‌ای قاب ساختمانی با منظور نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه و مقاله رابطی مقدم و بازاریار (Rabeti Moghadam & Baziar, 2016). در زمینه بررسی آزمایشگاهی و عددی تونل دایره‌ای بر پاسخ شتاب سطح زمین بررسی و صحت سنجی نتایج صورت گرفته است.

۵-۱- اندرکنش خاک و تونل

در مطالعه رابطی مقدم و بازاریار (Rabeti Moghadam & Baziar, 2016). تونل مترو دارای مقطعی دایره‌ای با قطر داخلی ۸ متر و با ضخامت پوشش ۳۵ سانتی‌متر از جنس بتن مسلح است. ارتفاع و عرض محیط خاک به ترتیب ۳۲ و ۱۶۰ متر و مدل رفتاری خاک ویسکوالاستیک انتخاب گردیده است. تحریک‌های اعمال شده امواج هارمونیک با دامنه g ۰.۳۵ بودند. برای صحت سنجی از خاک با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه با پریود بی‌بعد ۶ استفاده گردید. نمودار بزرگنمایی شتاب سطح زمین برحسب فاصله از محور تونل (x فاصله افقی از محور تونل و a شعاع تونل دایره‌ای)، مطابق شکل ۲، آورده شده است که انطباق مناسبی با نتایج مطالعه مرجع دارند.



شکل ۲- مقایسه شتاب سطح زمین

۵-۲- اندرکنش خاک و ساختمان

در مطالعه انجام شده توسط طباطبائی فر و همکاران، از یک ساختمان ۱۵ طبقه مقیاس شده روی میز لرزان به منظور مطالعه اندرکنش سیستم خاک و سازه استفاده شده است (Tabatabaiefar, et al., 2016). به منظور تهیه یک مدل مقیاس شده از سازه اولیه، یک عامل مقیاس‌سازی در نظر

مرزهای قائم باید فاصله‌ای بین ۴-۵ برابر قطر تونل نسبت به محور تونل و مرز تحتانی باید فاصله‌ای بین ۲-۳ برابر قطر تونل نسبت به محور تونل داشته باشد (Naseem, et al., 2019).

در مسائل مربوط به اندرکنش خاک و سازه نیز طول مدل باید حداقل ۳-۴ برابر شعاع پی ساختمان و ارتفاع مرزهای قائم باید حداقل ۲-۳ برابر شعاع پی ساختمان باشد (Tabatabaiefar & Massumi, 2010). با توجه به مدل‌سازی تونل و ساختمان در این مطالعه، با در نظر گرفتن شرایط مذکور ابعاد مدل برابر 160×40 متر انتخاب گردید.

۴- تعیین ابعاد المان

در مدل‌سازی‌های عددی، ابعاد المان باید به نحوی انتخاب شود تا دقت تحلیل، سرعت تحلیل و انتشار صحیح موج در محیط برآورده شوند. ابعاد ریزتر المان تا یک میزان به منزله دقت بیشتر تحلیل خواهد بود و با کاهش ابعاد المان سرعت تحلیل به ویژه در مسائل دینامیکی کاهش خواهد یافت. حداکثر اندازه المان در مسائل دینامیکی به گونه‌ای باشد که انتشار موج در محیط به درستی صورت گیرد، به منظور انتشار صحیح موج در محیط، حداکثر ابعاد المان با رابطه (۱) محدود می‌شود (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973).

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1)$$

که در آن λ طول موج انتشار یافته در محیط است که با حداقل سرعت موج برشی در محیط و حداکثر فرکانس تحریک ورودی به صورت رابطه (۲) است:

$$\lambda_{\min} = \frac{V_{S \min}}{f_{\max}} \quad (2)$$

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

$$\Delta L \leq \frac{V_{S \min}}{10 \times f_{\max}} \quad (3)$$

در این روابط $V_{S \min}$ حداقل سرعت موج برشی خاک و f_{\max} حداکثر فرکانس تحریک ورودی است. با توجه به اینکه در این مطالعه حداقل سرعت موج برشی مربوط به خاک رسی برابر با ۱۵۰ متر بر ثانیه است، حداکثر ابعاد المان به

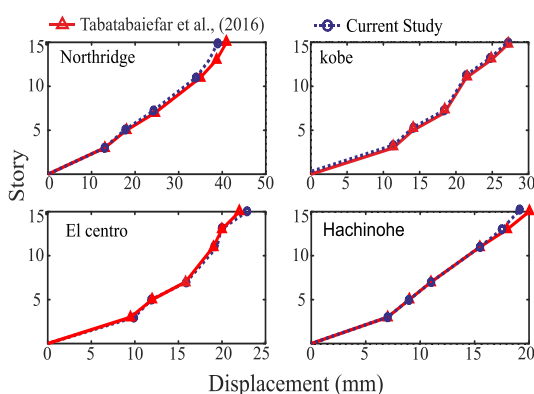
۶- بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حضور تونل

در این قسمت اثر حضور تونل بر پاسخ میدان آزاد بدون حضور ساختمان و همچنین بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حضور ساختمان معیار ۲۰ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش اول و در حالتی که ساختمان وجود ندارد، اثر تونل بر بزرگنمایی شتاب سطح زمین برای دو حالت مدلسازی خاک به روش ویسکوآلاستیک و معادل خطی بررسی و مقایسه شده است. در بخش دوم اندرکنش خاک و ساختمان و پارامترهای موثر بر آن بررسی شده است. در این بخش بیشینه جابجایی بام و شتاب پای سازه به عنوان پاسخ‌های شاخص مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش آخر به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حضور تونل مشابه بخش دوم بیشینه جابجایی طبقه بام و شتاب پای سازه، مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۱- اندرکنش خاک و تونل

همان‌طور که در مقدمه اشاره گردید، اندرکنش خاک و تونل به صورت گسترده توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. در بسیاری از این مطالعات، رفتار خاک به صورت ویسکوآلاستیک و یا سایر روش‌های ساده کننده لحاظ شده است؛ از آنجایی که رفتار غیرخطی خاک شناخته شده است، روند خطی برای تخمین قابل قبول از پاسخ زمین باید اصلاح شود. روش معادل خطی برای مدل‌سازی زلزله، انتشار موج در لایه‌های خاک و اندرکنش دینامیکی خاک-سازه روش مناسبی است. در این روش اصول روش خطی حفظ می‌شود اما نسبت میرایی و مدول برشی برای هر لایه خاک اصلاح می‌گردد که این اصلاح به صورت منحنی مدول برشی کاهش یافته می‌باشد. برای اعمال میرایی و مدول برشی کاهش یافته به روش معادل خطی از مدل هاردین (*Hardin-Drnevich*) با کرنش برشی مرجع ۰٫۲۳۴ و ۰٫۰۶ به ترتیب برای خاک رس و ماسه در نرم افزار *FLAC* استفاده گردید. در این راستا، ابتدا برای خاک صحت سنجی شده، به مقایسه روش معادل خطی و ویسکوآلاستیک مطابق شکل ۴، پرداخته شده است. سپس در شکل ۵ و شکل ۶ برای هر سه نوع خاک مورد مطالعه در این پژوهش نیز برای پیروی بی‌بعد (λ/D) برابر با ۶ که برابر نسبت طول موج تحریک ورودی به قطر تونل دایره‌ای و نسبت عمق تونل

گرفته شده است. این عامل با توجه به مقاله مرجع برابر ۱:۳۰ انتخاب گردیده است. با در نظر گرفتن ضریب مقیاس هندسی ۱:۳۰، ارتفاع، طول و عرض مدل سازه به ترتیب برابر با ۱،۵۰، ۰٫۴۰ و ۰٫۴۰ متر تعیین شده است. فرکانس طبیعی سیستم ساختمان و خاک ۱/۵۸ هرتز به دست می‌آید که برای آزمایش میز لرزان در مقاله مرجع برابر ۱/۶ هرتز است. در این مطالعه از چهار رکورد زلزله معیار شامل نورتیج، کوبه، ال‌سنتر و هاچینوه استفاده شده است. نمودار حداکثر جابجایی طبقات مطابق شکل ۳، آورده شده است که انطباق مناسبی با نتایج مطالعه مرجع دارند.



شکل ۳- مقایسه حداکثر جابجایی طبقات

۵-۳- ساختمان ۲۰ طبقه SAC

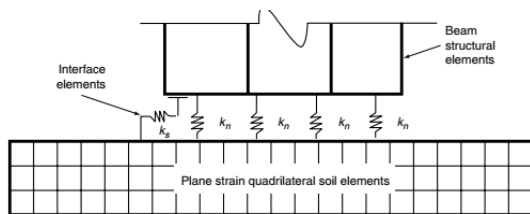
همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در این مطالعه پاسخ ساختمان ۲۰ طبقه SAC مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی ساختمان مطابق مشخصات جدول ۵، در نرم افزار *FLAC* و با استفاده از المان *Beam* انجام گرفت. فرکانس ساختمان برابر ۰٫۲۶۴ هرتز به دست می‌آید که مطابق با مقاله مرجع (*Ohtori, et al., 2004*) است. جابجایی طبقه بام مطابق جدول ۵، است.

جدول ۵- جابجایی حداکثر بام

زلزله	نورتیج	کوبه	ال سنتر و هاچینوه
<i>Ohtori et al., 2004</i>	۰٫۷۵	۰٫۵۱۷	۰٫۳۰۴
مطالعه حاضر	۰٫۷۸	۰٫۵۶	۰٫۲۹

صورت مستقیم در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های محاسبه سختی دینامیکی و حرکت ورودی به پی به دو صورت تقریبی و دقیق دسته‌بندی می‌شود که در روش تقریبی از روابط مقاومت مصالح و ساده شده مانند مدل مخروطی برای خاک استفاده می‌شود، ولی در روش دقیق رفتار واقعی آن مدل‌سازی می‌شود که در بین روش‌های دقیق، به روش اجزا محدود و تفاضل محدود می‌توان اشاره کرد.

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی در نرم افزار از المان رابط (*Interfac Element*) مطابق شکل ۷، استفاده گردید. مشخصات المان رابط شامل سختی برشی (k_s) و قائم (k_n) طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Rayhani & El Naggar, 2008).



شکل ۷- المان رابط شامل سختی برشی (k_s) و قائم (k_n)

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

در این رابطه K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی محیط مجاور و ΔZ_{\min} طول کوچک‌ترین المان در راستای عمود بر جهت المان رابط است.

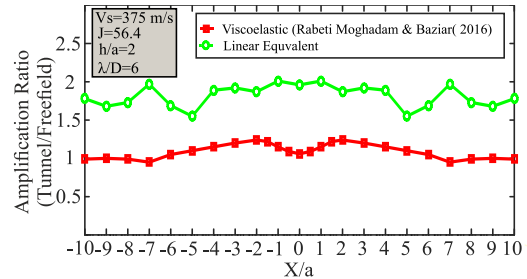
برای یک زلزله خاص، پاسخ دینامیکی سازه بر اساس میزان تأثیر عوامل مختلف بر رو سازه و خاک زیر آن می‌تواند تفسیر شود. پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ دینامیکی سیستم اندرکنش خاک و سازه عبارت‌اند از:

- پارامتر فرکانس بی‌بعد (*Non-Dimensional Frequency*) به‌عنوان نسبت سختی سازه به خاک برابر است با:

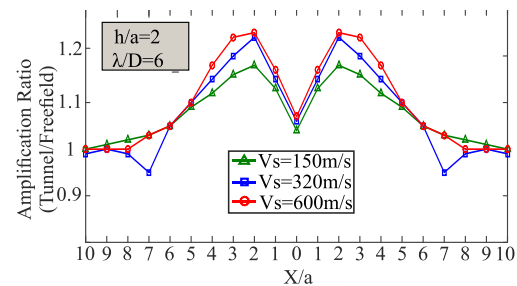
$$a_0 = \frac{\omega_{fix} \cdot \bar{H}}{V_s} \quad (5)$$

که در آن ω_{fix} فرکانس طبیعی سیستم با پایه ثابت، \bar{H} ارتفاع مؤثر سازه و V_s سرعت موج برشی خاک است. این پارامتر نشان‌دهنده میزان اثر اندرکنش خاک و سازه

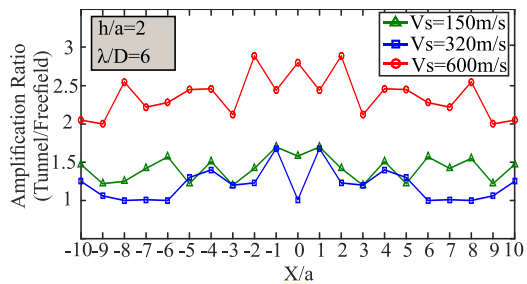
(h/a) برابر با ۲ برابر نسبت فاصله قائم محور تونل از سطح زمین به شعاع تونل دایره‌ای، مقایسه صورت گرفته است. نتایج نشان دهنده پاسخ متفاوت این دو روش نسبت به هم می‌باشد.



شکل ۴- مقایسه شتاب سطح زمین



شکل ۵- مقایسه شتاب سطح زمین در حالت ویسکوالاستیک

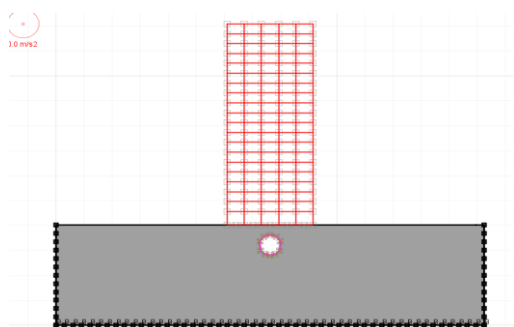


شکل ۶- مقایسه شتاب سطح زمین در حالت خطی معادل

۶-۲- اندرکنش خاک و ساختمان

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 امیدانس خاک در نظر گرفته می‌شود (Kolbadi & Rasti Ardakani, 2017). در روش مستقیم، قسمتی از خاک مجاور سازه و لایه‌های خاک به

میرایی خاک در انتشار موج در خاک تاثیر بسزایی دارد که در این مطالعه میرایی خاک بر اساس روش معادل خطی در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- مدل‌سازی ساختمان SAC در حضور تونل

جدول ۶- فرکانس سیستم خاک و سازه

Type	Fixed Base	Soil II	Soil III	Soil IV
Frequency(Hz)	۰,۲۶۴	۰,۲۳	۰,۱۹۸	۰,۱۳۳

با توجه به توضیحات داده شده جهت درک بهتر تاثیر پارامترهای موثر بر اندرکنش خاک و سازه برای هر سیستم شتاب پای سازه به ترتیب برای خاک نوع II، III، IV و مطابق شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ و جابجایی حداکثر بام سازه به ترتیب برای خاک نوع II، III، IV و مطابق شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ آورده شده است. در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش پریود ساختمان مطابق جدول (۶) می‌شود. با توجه به نمودارهای شتاب پای سازه، دامنه شتاب در خاک نرم نسبت به خاک‌های سخت‌تر کاهش یافته است، ولی افزایش جابجایی برای هر سه نوع خاک و چهار رکورد زلزله به ویژه خاک نوع IV (سرعت موج برشی ۱۵۰ متر برثانیه) به غیر از زلزله کوبه مشهود است.

است (مقادیر صفر و ۳ برای a_0 به ترتیب بیانگر سیستم پایه گیردار و سیستم با شرایط اندرکنشی متغیر می‌باشند).

- نسبت لاغری سازه (*Aspect Ratio*) که به صورت (H/R) تعریف می‌شود و برابر است با نسبت ارتفاع سازه (H) به شعاع پی دایره‌ای معادل (R)
- ضریب کاهش مقاومت (*Strengt Reduction factor*) سازه که برابر است با:

$$R_y = \frac{F_e}{F_y} \quad (6)$$

- نسبت جرم سازه به خاک زیر آن که برابر است با:

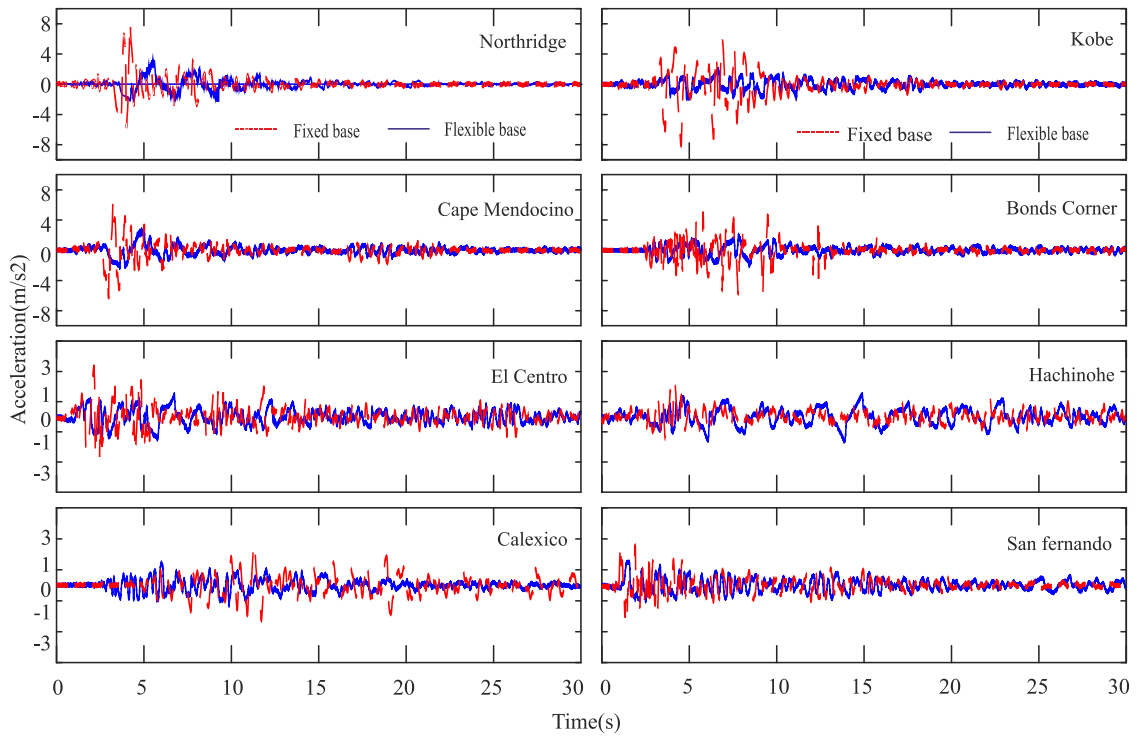
$$\bar{m} = \frac{m_{tot}}{\rho R^2 \bar{H}} \quad (7)$$

که در آن m_{tot} و \bar{H} به ترتیب برابر با جرم و ارتفاع مؤثر سازه، ρ جرم مخصوص خاک و R شعاع پی دایره‌ای معادل می‌باشند.

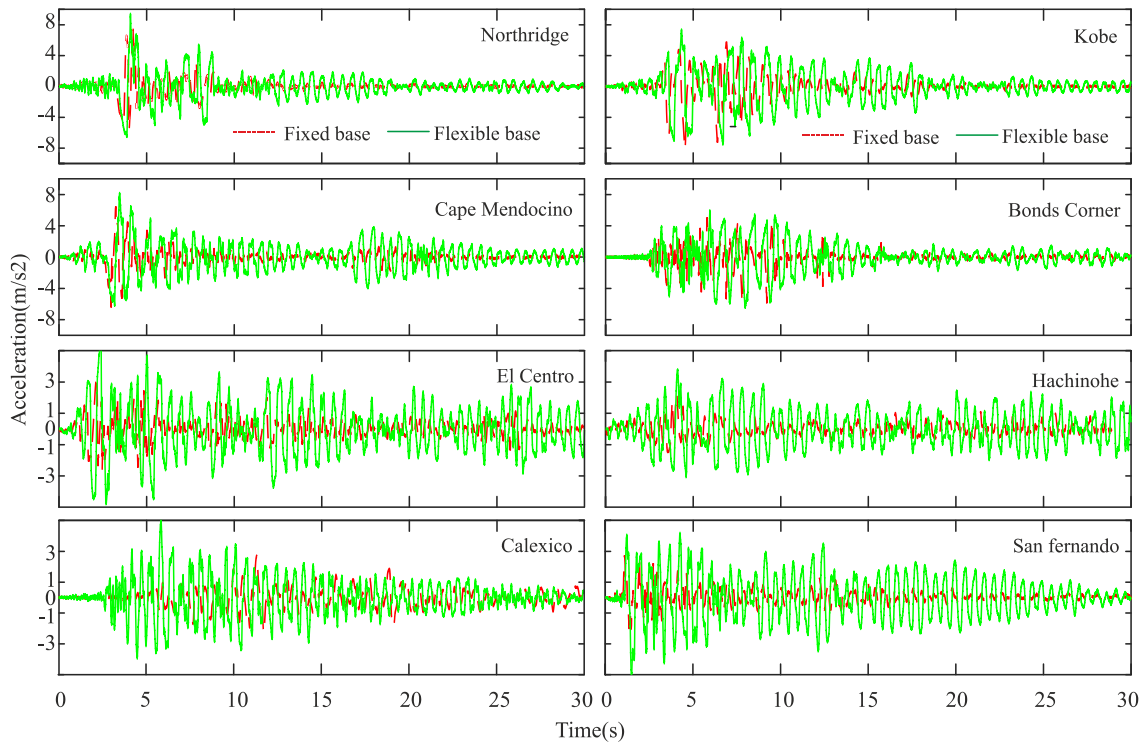
- میرایی مصالح خاک و میرایی مصالح سازه فرکانس بی‌بعد و نسبت لاغری سازه به عنوان دو پارامتر کلیدی در اندرکنش خاک و سازه مطرح هستند و ضریب کاهش مقاومت نشان‌دهنده سطح غیرخطی بودن سازه است (Hassani, et al., 2018).

در این پژوهش، با انتخاب ساختمان معیار ۲۰ طبقه SAC مطابق شکل ۸ و محاسبه شعاع معادل پی دایره‌ای برابر ۱۷,۲۰ متر، نسبت لاغری برابر ۴,۷۰ محاسبه گردید که نشان‌دهنده لاغر بودن ساختمان است. هر چه نسبت لاغری بزرگتر و ساختمان لاغرتر باشد، پریود سازه افزایش یافته و نسبت میرایی پی کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۶، نسبت فرکانس بی‌بعد برای خاک نوع II، III و IV به ترتیب برابر ۰,۱۵، ۰,۲۹ و ۰,۶۱ محاسبه می‌شود؛ همچنین رفتار سازه به صورت الاستیک خطی فرض شده است. نسبت جرم سازه از اهمیت کمتری نسبت به دو پارامتر اول برخوردار است. میرایی سازه به صورت رایلی در پاسخ ساختمان و همچنین

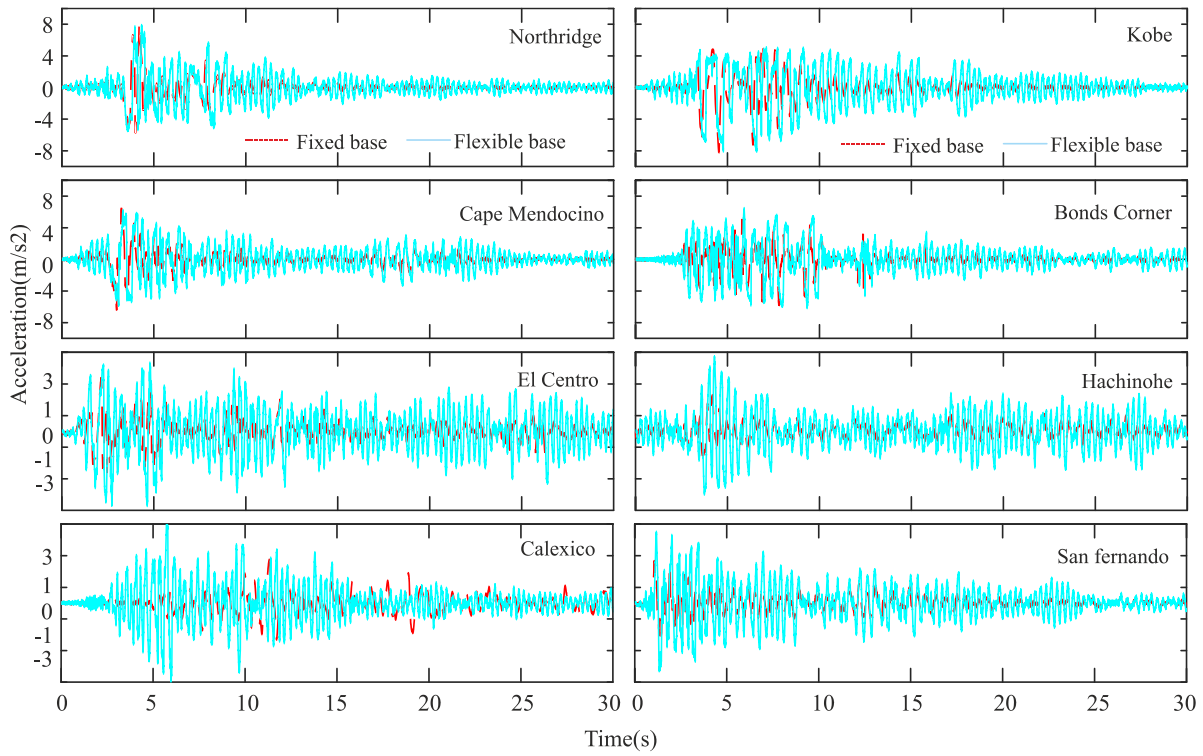
بررسی اثر اندرکنش ساختمان، خاک و تونل دایره‌ای کم عمق بر پاسخ لرزه‌ای...، فهیمی فرزام و ...، ص ۳۰۵-۳۲۵



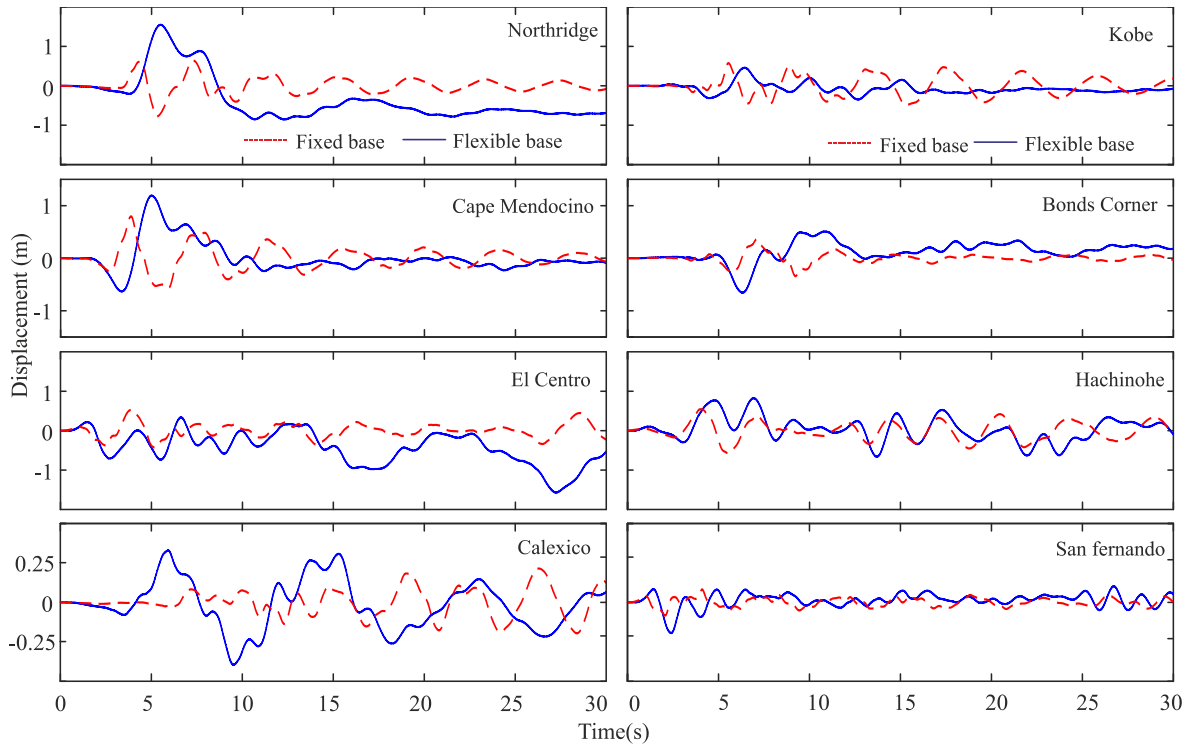
شکل ۹- شتاب پای سازه برای خاک نوع IV



شکل ۱۰- شتاب پای سازه برای خاک نوع III

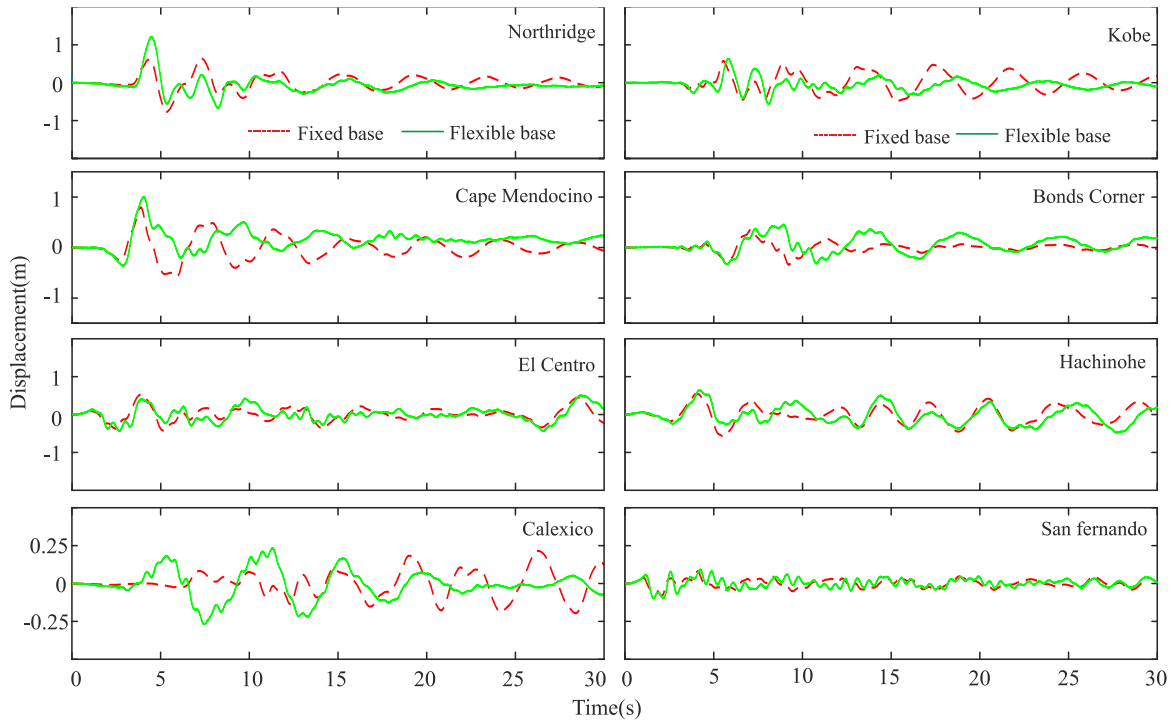


شکل ۱۱- شتاب پای سازه برای خاک نوع II

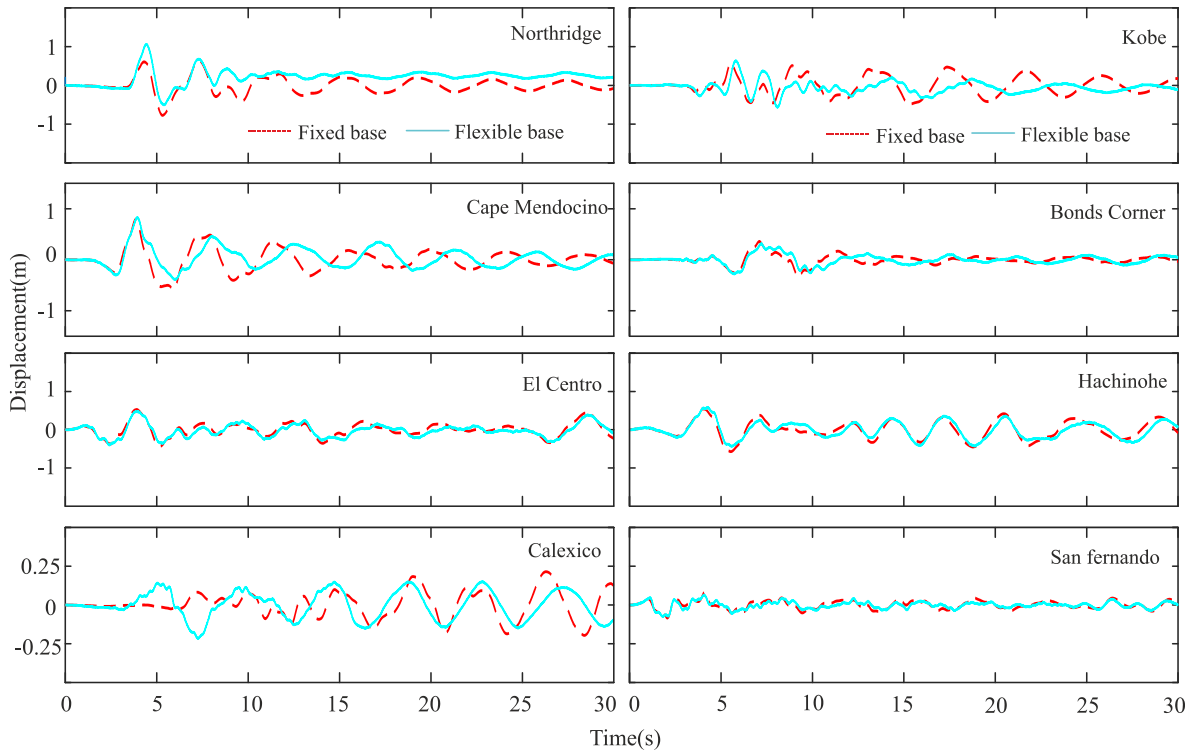


شکل ۱۲- جابجایی حداکثر بام برای خاک نوع IV

بررسی اثر اندرکنش ساختمان، خاک و تونل دایره‌ای کم عمق بر پاسخ لرزه‌ای...، فهیمی فرزام و ...، ص ۳۰۵-۳۲۵



شکل ۱۳- جابجایی حداکثر بام برای خاک نوع III



شکل ۱۴- جابجایی حداکثر بام برای خاک نوع II

۳-۶- اندرکنش ساختمان - خاک - تونل

با توجه به بررسی اندرکنش خاک و تونل و همچنین خاک و ساختمان، به بررسی ترکیب دو سیستم تحت عنوان اندرکنش ساختمان - خاک و تونل پرداخته می‌شود. با توجه به بررسی گسترده شتاب سطح زمین در تحقیقات گذشته در این تحقیق به بررسی شتاب پای سازه در حالت‌های مختلف ساختگاه و سازه زیرزمینی با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد موثر پرداخته می‌شود. بسیاری از خرابی‌ها و تکان‌های شدید در ساختمان‌ها، ناشی از جابجایی‌های بوجود آمده در سازه تحت اثر زمین لرزه‌های شدید است که در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مختلف تاکید به کنترل آن شده است. با توجه به اهمیت کنترل جابجایی طبقات، حداکثر جابجایی طبقات تحت تاثیر اندرکنش ساختمان-خاک-تونل باید مورد بررسی قرارگیرد. در این قسمت و در مرحله اول تحریک‌های ورودی به مدل از امواج هارمونیک به صورت سینوسی با دامنه $g = 0.35$ و پنج نسبت پریود بی‌بعد ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ که فرکانس تحریک بین ۱ الی $37/5$ هرتز خواهند داشت، محاسبه و متناسب با نوع خاک اعمال گردید. سپس برای دستیابی به نتایج واقعی‌تر، از شتابنگاشت واقعی زلزله استفاده شده است.

در این مطالعه با استفاده از تحلیل پارامتری اثرات پارامترهایی همچون عمق تونل، انعطاف‌پذیری پوشش تونل، فرکانس تحریک ورودی و فواصل افقی تونل بر الگوی بزرگنمایی بیشینه شتاب پای سازه و جابجایی بام مورد مطالعه قرار گرفته است. قطر تونل برابر $2a$ و عمق آن از محور تونل h در نظر گرفته شده است پارامترهای بی‌بعد بررسی شده در این قسمت شامل، نسبت عمق تونل (h/a) که برابر نسبت فاصله قائم محور تونل از سطح زمین به شعاع تونل دایره‌ای، نسبت فاصله افقی در سطح زمین از محور تونل نسبت به شعاع تونل دایره‌ای (x/a) ، پریود بی‌بعد (λ/D) که برابر نسبت طول موج تحریک ورودی به قطر تونل دایره‌ای، نسبت انعطاف‌پذیری پوشش تونل (J) که برابر نسبت سختی خاک به سختی پوشش تونل می‌باشند. در تونل‌های دایره‌ای شکل با در نظرگیری رفتار الاستیک، مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری پوشش تونل با استفاده از رابطه‌ی تحلیلی (۸) قابل محاسبه است (Rabeti Moghadam & Baziar,)

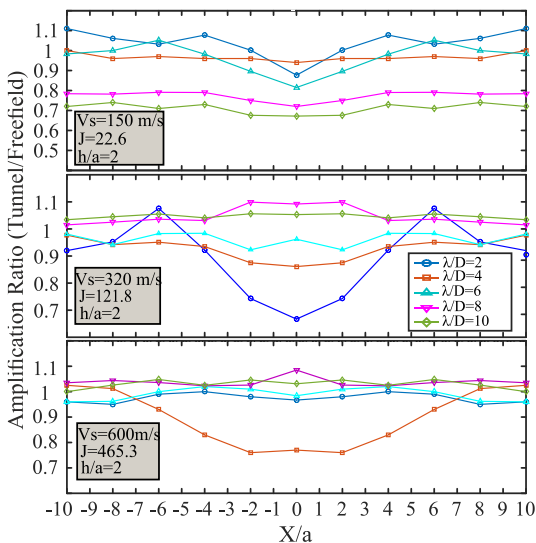
(2016)

$$J = \frac{2E_s(1-\nu_l^2).D^3}{E_l(1+\nu_s).t^3} \quad (8)$$

در رابطه‌ی فوق E_s و E_l به ترتیب مدول الاستیسیته خاک و مصالح پوشش تونل است؛ همچنین ν_l ، ν_s به ترتیب ضریب پواسون مصالح خاک و پوشش تونل است؛ همچنین D و t به ترتیب قطر مقطع تونل و ضخامت پوشش تونل می‌باشند. با توجه به رابطه فوق ضریب انعطاف‌پذیری تونل برای خاک با سرعت موج برشی 150 ، 320 و 600 متر بر ثانیه به ترتیب برابر 22.6 ، 121.8 و 465.3 محاسبه می‌شود.

۳-۶-۱- شتاب پای سازه برای موج سینوسی

نسبت بزرگنمایی شتاب پای سازه برای خاک‌های مختلف بر حسب فاصله افقی تا 10 برابر شعاع تونل از مرکز پی و فاصله قائم تا 6 برابر شعاع تونل از سطح زمین به ترتیب مطابق شکل ۱۵ و شکل ۱۶ برای موج سینوسی ترسیم شده است.



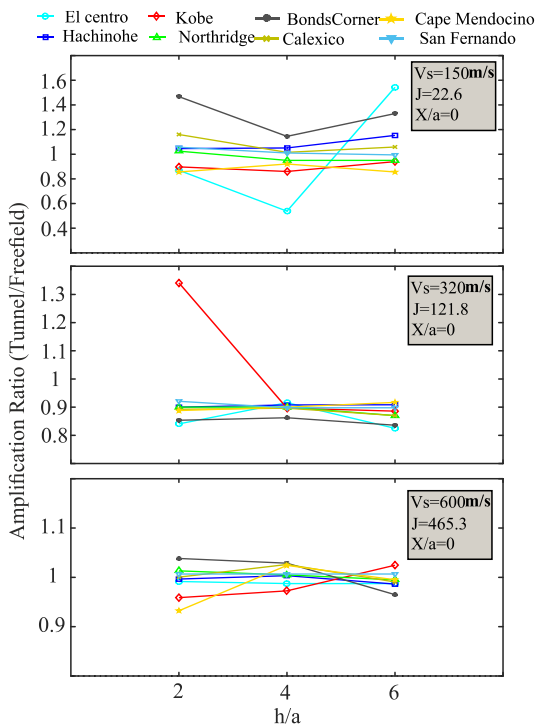
شکل ۱۵- بزرگنمایی شتاب پای سازه برای سه نوع خاک با فواصل افقی مختلف تونل از مرکز پی برای موج سینوسی

با توجه به این دو شکل نتایج زیر مشاهده می‌شود:

با بررسی شکل ۱۵، بیشترین تاثیر بزرگنمایی شتاب پای سازه در فاصله افقی $-4 \leq x/a \leq 4$ مشاهده می‌شود. با کاهش نسبت پریود بی‌بعد، تاثیر تونل بر بزرگنمایی شتاب پای سازه بیشتر می‌شود که به دلیل عبور امواج با طول موج‌های

حداکثر پاسخ مجموعه شتاب نگاشت‌ها مبنای تصمیم‌گیری خواهد بود، در ادامه نتیجه حداکثر پاسخ به‌منظور تحلیل نتایج استفاده شده است.

در شکل ۱۷، بیشترین مقدار نسبت بزرگنمایی جابجایی طبقه بام مربوط به هر رکورد تحت تاثیر عمق قرارگیری تونل برای خاک‌های مختلف ارائه شده است. نسبت بزرگنمایی جابجایی طبقه بام برای خاک نوع IV برای نسبت عمق تونل $h/a=6$ و برای خاک‌های نوع II و III برای نسبت عمق تونل $h/a=2$ بیشترین مقدار را دارد. افزایش جابجایی بام، حداکثر برابر ۵۴ درصد برای خاک نوع IV برای نسبت عمق تونل $h/a=6$ و برای خاک‌های نوع III و II برابر ۴۴ و ۴ درصد برای نسبت عمق تونل $h/a=2$ است.

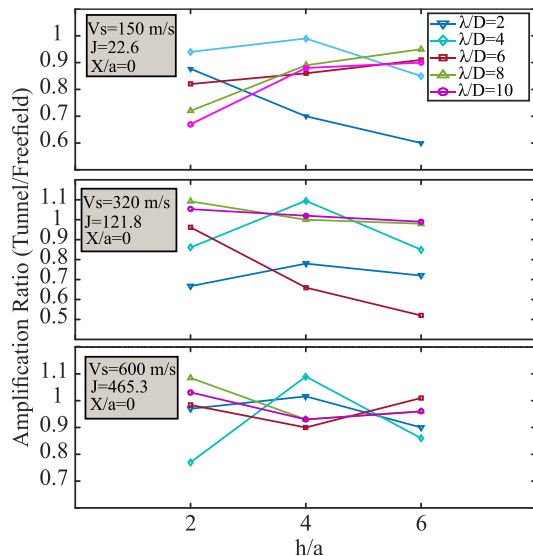


شکل ۱۷- بزرگنمایی جابجایی حداکثر بام برای سه نوع خاک برای نسبت عمق مختلف تونل از مرکز پی برای رکوردهای مختلف زلزله

مطابق شکل ۱۸، نسبت بزرگنمایی شتاب پای سازه برای خاک نوع IV برای نسبت عمق تونل $h/a=4$ و برای خاک‌های نوع II و III برای نسبت عمق تونل $h/a=2$ بیشترین مقدار را دارد. افزایش شتاب پای سازه، حداکثر

کوتاه‌تر است. در خاک نوع IV با نزدیک شدن به فرکانس سیستم نسبت شتاب پای سازه کاهش، ولی در خاک نوع III و II افزایش می‌یابد. در خاک نوع III و II با افزایش فاصله تونل از مرکز پی، در فاصله افقی $x/a=4$ نسبت شتاب پای سازه به ۱ میل می‌کند.

از شکل ۱۶، می‌توان گفت، حضور تونل مترو در خاک‌های مختلف برای موج‌های با فرکانس مختلف، با پاسخ متفاوت ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد که به دلیل انعکاس و انعکاس موج در برخورد با تونل و تفرق موج در ناحیه قرار گرفته بین تونل و سطح زمین می‌تواند باشد. تشدید این ناحیه با فرکانس غالب ارتباط دارد و مقدار این فرکانس وابسته به نسبت عمق تونل از سطح زمین است.



شکل ۱۶- بزرگنمایی شتاب پای سازه برای سه نوع خاک با فواصل قائم تونل برای موج سینوسی

۶-۳-۲- پاسخ لرزه‌ای ساختمان

در این بخش برای رسیدن به نتایج واقعی از رکوردهای زلزله معیار جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان استفاده گردید با توجه به شکل ۱۵ به لحاظ بحرانی بودن شتاب پای سازه در فاصله افقی $x/a=0$ و همچنین حجم بالای محاسبات، اثر تونل بر ساختمان تحت امواج لرزه‌ای برای عمق قرارگیری مختلف تونل در فاصله افقی $x/a=0$ مورد بررسی قرار گرفت. برای زلزله حوزه نزدیک و دور مقادیر حداکثر و حداقل جابجایی و شتاب پای سازه مطابق شکل ۱۷ و شکل ۱۸ است؛ همچنین با توجه به اینکه طبق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای

نوع II و III تحت رکورد حوزه نزدیک رخ داده است که نشان دهنده تاثیر مستقیم نوع خاک بر میزان بزرگنمایی پاسخ تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا اثر تونل بر بزرگنمایی شتاب سطح زمین برای دو حالت مدلسازی خاک به روش ویسکوالاستیک و معادل خطی بررسی گردید. سپس اندرکنش خاک و ساختمان و پارامترهای موثر بر دو پاسخ بیشینه شتاب پای سازه و جابجایی بام ساختمان به عنوان دو پاسخ شاخص در مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با ترکیب دو سیستم خاک-تونل و ساختمان-خاک تحت عنوان اندرکنش سه‌گانه ساختمان-خاک و تونل عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حضور تونل با مطالعه دو شاخص بخش دوم یعنی بیشینه جابجایی طبقه بام و شتاب پای سازه، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مطالب بررسی شده در بخش ۶ می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

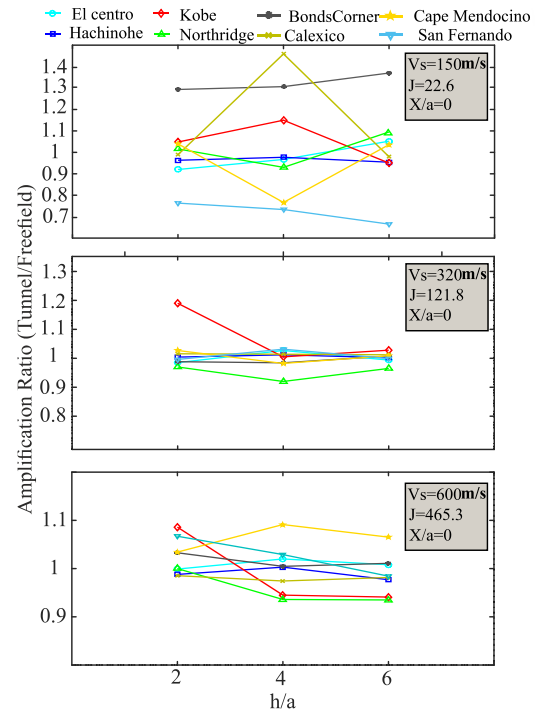
- اندرکنش خاک و تونل

در این پژوهش برای هر سه نوع خاک مورد مطالعه، برای پی‌ریز بی‌بعد (λ/D) برابر با ۶ و نسبت عمق تونل (h/a) برابر با ۲ مدلسازی خاک به روش ویسکوالاستیک و معادل خطی بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد، نسبت شتاب سطح زمین با افزایش سرعت موج برشی خاک در هر دو روش مدلسازی خاک به روش ویسکوالاستیک و معادل خطی بیشتر می‌شود. این افزایش برای روش معادل خطی در مقایسه با روش ویسکوالاستیک بیشتر است و برای خاک نوع IV در $x/a=2$ و برای خاک نوع III و II در $x/a=1$ بیشترین مقدار را دارد.

- اندرکنش خاک و ساختمان

اندرکنش خاک و ساختمان موجب افزایش پی‌ریز اول سازه می‌شود و تاثیر آن بر پاسخ شتاب پای سازه و جابجایی بام در خاک نرم بیشتر از خاک‌های سخت است، به طوری که موجب افزایش جابجایی بام و کاهش شتاب پای سازه به غیر از زلزله کوبه گردید. افزایش جابجایی بام برای زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از حوزه دور است.

برابر ۴۶ درصد برای خاک نوع IV برای نسبت عمق تونل $h/a=4$ و برای خاک‌های نوع III و II برابر ۱۹ و ۶۷ درصد برای نسبت عمق تونل $h/a=2$ است.



شکل ۱۸- بزرگنمایی شتاب پای سازه برای سه نوع خاک برای نسبت عمق مختلف تونل از مرکز پی برای رکوردهای مختلف زلزله

با توجه به نتایج شکل ۱۷ و شکل ۱۸ هم کاهش و هم افزایش شتاب پای سازه و جابجایی بام در حضور تونل مشهود است و وابسته به نوع خاک، فرکانس غالب زلزله، نسبت عمق تونل از سطح زمین، نسبت انعطاف‌پذیری می‌تواند باشد. این تغییرات برای خاک نوع IV بیشتر از خاک نوع III و برای خاک نوع III بیشتر از خاک نوع II است. تغییرات جابجایی و شتاب پای سازه در حضور تونل، برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور نیز وابسته به فرکانس‌های تحریک زلزله، مقدار شتاب زلزله و همچنین مشخصات دینامیکی سیستم خاک و سازه و نسبت عمق تونل از سطح زمین است. به صورت کلی و در محدوده پارامترها و رکوردهای مورد بررسی در این مطالعه برای خاک نوع IV بیشترین تغییرات پاسخ شتاب پای سازه و جابجایی بام در حضور تونل تحت زلزله حوزه دور و در خاک

برای خاک نوع III بیشتر از نوع II است. به صورت کلی و در محدوده پارامترها و رکوردهای مورد بررسی در این مطالعه برای خاک نوع IV بیشترین تغییرات پاسخ شتاب پای سازه و جابجایی بام در حضور تونل تحت زلزله حوزه دور و در خاک نوع II و III تحت رکورد حوزه نزدیک رخ داده است که نشان دهنده تاثیر مستقیم نوع خاک بر میزان بزرگنمایی پاسخ تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک است.

- (۷) افزایش شتاب پای سازه، حداکثر برابر ۴۶ درصد برای خاک نوع IV برای نسبت عمق $h/a=4$ و برای خاک‌های نوع III و II به ترتیب برابر ۱۹ و ۶۷ درصد برای نسبت عمق $h/a=2$ است.
- (۸) افزایش جابجایی بام، حداکثر برابر ۵۴ درصد برای خاک نوع IV برای نسبت عمق $h/a=6$ و برای خاک‌های نوع III و II به ترتیب برابر ۴۴ و ۴ درصد برای نسبت عمق $h/a=2$ است.
- (۹) به صورت کلی وجود تونل به خصوص در نسبت $-4 \leq x/a \leq 4$ می‌تواند منجر به تغییرات شتاب پای سازه و جابجایی بام شود که باید در طراحی ساختمان برای نسبت $h/a \leq 6$ در نظر گرفته شود.

۸- فهرست نمادها

در جدول ۷، فهرست نمادها آمده است.

• اندرکنش ساختمان-خاک و تونل در بخش سوم ابتدا و به منظور مطالعه اثر فرکانس تحریک بر سیستم اندرکنش ساختمان-خاک و تونل، بزرگنمایی شتاب پای سازه تحت تحریک‌های ورودی به صورت امواج سینوسی و با فرکانس متفاوت بررسی شد. سپس از شتابنگاشت واقعی زلزله به منظور بررسی نسبت عمق برای نسبت فاصله افقی استفاده شد که تحت فرکانس‌های مختلف بیشترین تغییرات را داشته است ($x/a=0$). نتایج بررسی سیستم سه گانه اندرکنش ساختمان-خاک و تونل به صورت زیر قابل بیان است:

- (۱) در این مطالعه برای موج سینوسی، بیشترین تاثیر بزرگنمایی شتاب پای سازه در نسبت فاصله افقی $-4 \leq x/a \leq 4$ مشاهده می‌شود.
- (۲) در خاک نوع IV با نزدیک شدن به فرکانس سیستم نسبت شتاب پای سازه کاهش، ولی در خاک نوع II و III افزایش می‌یابد.
- (۳) در خاک نوع II و III با افزایش نسبت فاصله افقی در نسبت فاصله افقی $x/a=10$ نسبت شتاب پای سازه به مقدار ۱ میل می‌کند.
- (۴) برای موج سینوسی، شتاب پای سازه را می‌توان در فاصله ده برابر شعاع از محور تونل برای هر سه نوع خاک تا ۱۰ درصد تقویت کرد.
- (۵) با کاهش نسبت پریود بی‌بعد (λ/D)، تاثیر تونل بر بزرگنمایی بیشتر می‌شود که می‌تواند به دلیل عبور امواج با طول موج‌های کوتاه‌تر باشد.
- (۶) تغییرات جابجایی بام و شتاب پای سازه در حضور تونل، برای خاک نوع IV بیشتر از خاک نوع III و

جدول ۷- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
حداکثر شتاب زمین	-	PGA	بعد المان	m	ΔL
بزرگای گشتاوری	-	Mw	طول موج	m	λ
حداکثر مقاومت ارتجاعی متناظر سازه	N	Fe	حداقل سرعت موج برشی خاک	m/s	Vsmin
مقاومت تسلیم سازه	N	Fy	حداکثر فرکانس تحریک ورودی	HZ	fmax
جرم کلی سازه	kg	mtot	سختی برشی	N/m	Ks
جرم مخصوص خاک	Kg/m ³	ρ	سختی قائم	N/m	Kn
مدول الاستیسیته خاک	N/m ²	Esoil	مدول بالک محیط مجاور	N/m ²	K
مدول الاستیسیته پوشش تونل	N/m ²	Elining	مدول برشی محیط مجاور	N/m ²	G
ضریب پواسون مصالح خاک	-	ν_{soil}	طول کوچک‌ترین المان	m	ΔZ_{min}
ضریب پواسون پوشش تونل	-	ν_{lining}	فرکانس سیستم با پایه گیردار	Rad/s	ω_{fix}
شعاع تونل	m	a	فرکانس بی‌بعد	-	a0
قطر تونل	m	D	ارتفاع مؤثر سازه	m	\bar{H}
ممان اینرسی مقطع تونل	m ⁴	I	سرعت موج برشی	m/s	Vs
ضریب انعطاف‌پذیری تونل	-	J	ارتفاع سازه	m	H
فاصله افقی محور تونل از مرکز پی	m	x	شعاع معادل پی دایره‌ای	m	R
فاصله قائم محور تونل از سطح زمین	m	h	نسبت جرم سازه به خاک	-	\bar{m}
پروژه سازه‌های فولادی کالیفرنیا (SEAOC ATC CUREE)	-	SAC	ضریب کاهش مقاومت	-	Ry

۹- مراجع

- Abate, G., & Massimino, M. R. (2017a). Numerical modelling of the seismic response of a tunnel–soil–aboveground building system in Catania (Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(1), 469-491.
- Abate, G., & Massimino, M. R. (2017b). Parametric analysis of the seismic response of coupled tunnel–soil–aboveground building systems by numerical modelling. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(1), 443-467.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016a). Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 67-83.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016b). Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, 14(4), 233-251.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016c). Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 163-167.
- Alielahi, H., Adampira, M., & Asgari, M. (2017). Influence of double tunnels on seismic amplification pattern of ground surface using BEM. *SHARIF: CIVIL ENGINEERING*, 33-2(3.2), 29-41.
- Alielahi, H., Kamalian, M., & 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.

- Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2016). A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of canyons. *Acta Geotechnica*, 11(2), 391-413.
- Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M. K., & Panji, M. (2013). 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), 45-54.
- Alielahi, H., & Ramazani, M. S. (2016). surface seismic amplification pattern assessment in sites over underground box structures. *Bulletin of earthquake science and engineering*, 3(1), 55-71.
- Baziar, M. H., Ghalandarzadeh, A., & Rabeti Moghadam, M. (2015). Tehran Subway Tunnel Effect on the Seismic Response of the Ground Surface with Linear Soil Behavior: An Experimental and Numerical Study. *Earthquake Engineering*.
- Baziar, M. H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2014). Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 10-22.
- Baziar, M. H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2016). effect of underground structure lining flexibility on acceleration response at ground surface. *SHARIF: CIVIL ENGINEERING*.
- Beshart, V., & Majidzamani, S. (2017). Seismic Responce of ground Surface Tehran Subway. *Earthquake Engineering*.
- Fatahi, B., & Tabatabaiefar, S. H. R. (2014a). Effects of soil plasticity on seismic performance of mid-rise building frames resting on soft soils. *Advances in Structural Engineering*, 17(10), 1387-1402.
- Fatahi, B., & Tabatabaiefar, S. H. R. (2014b). Fully nonlinear versus equivalent linear computation method for seismic analysis of midrise buildings on soft soils. *International Journal of Geomechanics*, 14(4).
- Fatahi, B., Tabatabaiefar, S. H. R., & Samali, B. (2014). Soil-structure interaction vs Site effect for seismic design of tall buildings on soft soil. *Geomechanics and Engineering*, 6(3), 293-320.
- Guo, J., Chen, J., & Bobet, A. (2013). Influence of a subway station on the inter-story drift ratio of adjacent surface structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 8-19.
- Guobo, W., mingzhi, y., Yu, M., Jan, w., & Yaxi, W. (2018). Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 76, 145-159.
- Hassani, N., Bararnia, M., & Ghodrati Amiri, G. (2018). Effect of soil-structure interaction on inelastic displacement ratios of degrading structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 75-87.
- Hokmabadi, A. S., Fatahi, B., & Samali, B. (2015). Physical Modeling of Seismic Soil-Pile-Structure Interaction for Buildings on Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*, 15(2), 04014046.
- Kausel, E. (2010). Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 822-832.
- Khalajzadeh, M. H., & Azadi, M. (2019). The Effects of Tunnel Excavation on the Seismic Response of Ground Surface Using Finite Difference Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1), 99-108.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421-427.

- Mylonakis, G., & Gazetas, G. (2000). Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental? *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3), 277-301.
- Naderpour, h., Vosoughifar, h. R., & Ghobakhloo, e. (2016). Evaluation of effective parameters on wave diffraction of far-fault ground motions using artificial neural networks. *SHARIF: CIVIL ENGINEERING*, 32-2(1.1), -.
- Naseem, A., Schotte, K., De Pauw, B., & De Backer, H. (2019). Ground Settlements due to Construction of Triplet Tunnels with Different Construction Arrangements. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer Jr, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 366-385.
- Panji, m., & fakhravar, a. (2017). Amplification pattern of seismic ground surface in the presence of underground horseshoe tunnel subjected to incident sh-wave. *BULLETIN OF EARTHQUAKE SCIENCE AND ENGINEERING*, 4(2), 49-66.
- Priestley, N. M. J. (1993). Myths and fallacies in earthquake engineering-conflicts between design and reality. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 26(3), 329-341.
- Rabeti Moghadam, M., & Baziar, M. H. (2016). Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 81-97.
- Rayhani, M. H. T., & El Naggar, M. H. (2008). Numerical modeling of seismic response of rigid Foundation on soft soil. *International Journal of Geomechanics*, 8(6), 336-346.
- S. Kolbadi, S. M., & Rasti Ardakani, R. (2017). Evaluation of Soil-Structure Interaction Parameters in Static and Dynamic Response of the Retaining. *Amirkabir J. Civil Eng*, 49(2), 323-334
- Sarlak, A., Saeedmonir, H., & Gheytratmand, C. (2017). Numerical and experimental study of soil-structure interaction in structures resting on loose soil using laminar shear box. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 30(11), 1654-1663.
- Tabatabaiefar, H. R., & Massumi, A. (2010). A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1259-1267.
- Tabatabaiefar, S. H. R., Fatahi, B., & Samali, B. (2016). Numerical and Experimental Investigations on Seismic Response of Building Frames under Influence of Soil-Structure Interaction. *Advances in Structural Engineering*, 17(1), 109-130.
- Trifunac, M. D. (2016). Site conditions and earthquake ground motion – A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 88-100.
- Turan, A., Hinchberger, S. D., & El Naggar, M. H. (2013). Seismic soil–structure interaction in buildings on stiff clay with embedded basement stories. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(8), 858-873.
- Wang, H. F., Lou, M. L., Chen, X., & Zhai, Y. M. (2013). Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, 31-38.

Investigation of the Effect of Building, Soil and Shallow Circular Tunnel Interaction on the Seismic Response of the 20-Story SAC Building

M. Fahimi Farzam^{1*}; B. Alinejad²; A. Saeedi Azizkandi³; R. Alinejad⁴

1- Assistant Professor; Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, m.farzam@maragheh.ac.ir

2- Assistant Professor; Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, alinejad@maragheh.ac.ir

3- Assistant Professor; Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran, asaedia@iust.ac.ir

4- MSc Student; Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, rezaalinejad.eng@gmail.com

Received: 18 Nov 2020; Accepted: 25 Jan 2021

DOI: 10.22044/tuse.2021.10263.1404

Keywords

Soil-structure interaction
Equivalent linear model
Seismic response
FLAC2D

Final English Extended Abstract

Summary

In this paper, the interaction of a building-soil-tunnel system was modeled to investigate the seismic response of a benchmark building affected by the presence of a shallow circular tunnel. A parametric study was conducted to scrutinize the effect of different influential dimensionless parameters on the

seismic response of the building under harmonic and real earthquake excitations. Overall, the results showed that the presence of tunnel could amplify the structural responses especially for soil type IV.

Introduction

The rapid growth of population in large cities is the reason for inevitably condensed construction of underground tunnels and condensed buildings on the ground. However, the dynamic interaction of these coupled systems has not well-addressed in the design codes. Therefore, in the present paper, this fully coupled system has been modeled to evaluate the response of a benchmark building in the presence of an underground circular shallow tunnel.

Methodology and Approaches

The analyses in this study have been carried out using a finite-difference software (i.e. Flac 2D). In addition, the direct integral method has been used for dynamic analysis. To investigate the effect of a tunnel on the seismic response of the 20-story SAC building, an existing circular subway tunnel section with an outer diameter of 8 m and a thickness of 0.35 m has been studied. Moreover, the effects of dimensionless depth (h/a), dimensionless distance (X/a), dimensionless period (λ/D) and flexibility ratio, as well as the site soil type on the seismic response of the building, have been investigated. Additionally, four benchmark earthquake records have been employed to evaluate the seismic performance of the building.

Results and Conclusions

The results of three studied interactions (i.e., tunnel-soil, building-soil and fully coupled tunnel-soil-building interactions) could be highlighted as shown in the following:

First, the effect of tunnel presence on the ground surface acceleration was compared based on the adoption of two soil models, i.e. viscoelastic and equivalent linear models. For both models, the results showed that the increase of shear

wave velocity amplified the ground surface acceleration. Then, soil building interaction was investigated under far-field and near-field earthquakes, which caused amplification and de-amplification of roof displacement and foundation acceleration, respectively. Finally, a comprehensive parametric study was performed for a fully coupled tunnel-soil-building system. Under seismic waves and for soil type IV, the maximum amplification of roof displacement and base acceleration were 54% and 46%, respectively.
