



مطالعه تأثیر اندرکنش تونل و ساختمان بر پاسخ لرزه‌ای طبقات ساختمان با مدل‌سازی عددی

آرش سروی، مسعود رابطی‌مقدم*، منصور پرویزی، علی علی پور منصورخانی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

اندرکنش
تونل
ساختمان
پاسخ لرزه‌ای
مدل‌سازی عددی
FLAC 2D

خلاصه: در آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان، در محاسبه نیروهای اعمالی به ساختمان، توجه‌ای به اثر اندرکنشی سازه‌های زیرزمینی و ساختمان و تأثیر آن بر تغییر نیروهای اعمالی بر ساختمان نشده است. لذا در مطالعه حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار 2D FLAC به بررسی تأثیر اندرکنش تونل و ساختمان بر پاسخ لرزه‌ای طبقات ساختمان پرداخته شده است تا در زمینه طراحی ساختمان، ارزیابی از نیروهای اعمالی لرزه‌ای بر ساختمان دقیق شود. جهت انجام این مطالعه در ابتدا مدل در حالت وجود ساختمان به تنهایی (SF) تحت تحریک امواج هارمونیک برشی درون صفحه و امواج واقعی زلزله قرار گرفت. پس از آن با اضافه کردن تونل به مدل (STF) سیستم تحت تحریک قرار گرفت. در نهایت با قیاس نتایج ماکزیمم شتاب طبقات ساختمان در حالت STF به SF تأثیر اندرکنش تونل و ساختمان بر شتاب طبقات مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به مطالعه انجام شده، با تغییر فاصله محوری تونل از ساختمان تأثیر منفی تونل بر پاسخ شتاب طبقات در فرکانس‌های پایین به علت ایجاد بزرگ‌نمایی و تأثیر مثبت تونل در فرکانس‌های بالا بر پاسخ شتاب طبقات به علت ایجاد کوچک‌نمایی مشاهده شد. تغییر امواج واقعی زلزله و سرعت موج برشی خاک می‌تواند پاسخ شتاب طبقات را با بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی مواجه کند. در قیاس بین امواج واقعی زلزله و امواج هارمونیک هم فرکانس یا فرکانس غالب موج اعمالی، در اکثر زلزله‌ها امواج هارمونیک بزرگ‌نمایی بیشتری را در پاسخ شتاب طبقات ایجاد کرده‌اند.

۱- مقدمه

مقطع سازه‌ای سبک‌تر جهت تیر و ستون‌های ساختمان باز می‌گذارد و به تبع آن هزینه تمام شده ساخت ساختمان کاهش می‌یابد. لذا در نظر گرفتن مسائل اندرکنش ساختمان و تونل در طرح اقتصادی‌تر سازه تأثیرگذار می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهند که امواج لرزه‌ای طی فرآیند انتقال، موجب اندرکنش با تونل شده است و باعث آن می‌شود که هر نقطه‌ای از تونل به عنوان منبع جدیدی از امواج لرزه‌ای تلقی گردند که باعث بروز امواج ثانویه در تمامی جهت‌ها می‌شوند. این امر می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های سطحی اثرگذار باشد [۲].

بر طبق مطالعات پیشین وجود سازه زیرزمینی در حین زلزله بر روی انتشار امواج لرزه‌ای اثرگذار است و وجود سازه سطحی بر روی پاسخ لرزه‌ای مناطق مجاور و سازه زیرزمینی تأثیرگذار می‌باشد [۳]. پیتیلاکیز و همکاران [۱] در یک مطالعه عددی به بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای شکل با در نظر گرفتن اندرکنش سازه‌های مجاور پرداخته‌اند. آنان دریافتند که تحلیل ویسکو الاستیک در خاک افزایش شتاب

روند رو به رشد شهرها در دنیای مدرن امروزی، افزایش تراکم جمعیتی، وجود ترافیک و به دنبال آن کند شدن حمل و نقل شهری، آلوده شدن هوا ناشی از مصرف مشتقات نفتی در وسایل نقلیه، ایجاد آلودگی‌های صوتی خودروها، اتلاف وقت مردم به علت ایجاد ترافیک‌های سنگین و تسریع در سیستم ارتباطات شهری، از مبانی اصلی توجه به ساخت و ساز سازه‌های ارتباطی از قبیل تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو زیرزمینی می‌باشد. در شهرهای بزرگ عبور سازه‌های زیرزمینی و تونل‌ها در مجاورت ساختمان‌های بلند مرتبه امری اجتناب‌ناپذیر است. تونل‌های زیرزمینی در شهرها می‌توانند از زیر ساختمان‌ها و یا اینکه از مجاور آن‌ها عبور کنند که این مسئله می‌تواند منجر به اندرکنش پیچیده بین ساختمان‌ها و تونل‌ها شده و پاسخ لرزه‌ای تونل، ساختمان و سطح زمین را تحت تأثیر قرار دهد [۱]. در صورتی که با لحاظ نمودن مسائل اندرکنشی بین تونل و ساختمان با کوچک‌نمایی پاسخ شتاب در طبقات مواجه شویم، این عامل دست طراحان سازه را در انتخاب



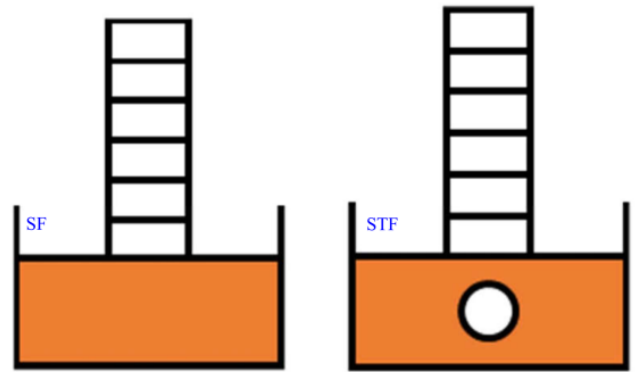
ریختگی امواج دینامیکی اعمالی به ساختمان می‌گردد. در نهایت تونل باعث افزایش پی‌ریز طبیعی در سطح زمین می‌گردد که بر ساختمان‌های بلند مرتبه تأثیرات زیادی دارد. شجاع و علی‌الهی^۸ [۸] به بررسی اندرکنش لرزه‌ای بین پی‌های سطحی و حفره‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع روباره تنش‌های ناشی از بارهای دینامیکی زلزله بر سطوح تونل افزایش یافته است. مایورال و ماسکودا^۹ [۹] در یک مطالعه عددی به بررسی اندرکنش تونل و ساختمان واقع بر خاک رسی نرم حین وقوع زلزله پرداخته‌اند. تحقیقات آن‌ها نشان داد، زمانی که تونل دقیقاً در زیر ساختمان واقع است اندرکنش‌های تخریبی بزرگ‌تری به وقوع می‌پیوندد. همچنین زمانی که پی‌ریز غالب تحریک سیستم به پی‌ریز پایه‌ای خاک نزدیک‌تر است، بزرگ‌نمایی بالاتری به وقوع می‌پیوندد. میر حبیبی و سروش^{۱۰} [۱۰] در یک مطالعه عددی به بررسی نشست ساختمان واقع بر تونل دوقلو پرداخته‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد که عرض و سختی ساختمان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر منحنی نشست ساختمان است و همچنین افزایش عمق تونل تأثیر خود بر نشست ساختمان را کاهش می‌دهد. میائو و همکاران^{۱۱} [۱۱] در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی به بررسی اندرکنش دینامیکی ساختمان و ایستگاه مترو پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر آن بود که پاسخ لرزه‌ای تونل با افزایش تعداد ساختمان بر سطح زمین افزایش می‌یابد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که پاسخ لرزه‌ای تونل با افزایش فاصله تونل و ساختمان کاهش می‌یابد. ژو و همکاران^{۱۲} [۱۲] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر پی نواری و منفرد بر نیروهای برشی اعمالی به ساختمان در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد برای ساختمان‌ها با مقادیر مشابه سختی نسبی، میزان نیروهای برشی بر ساختمان‌ها دارای پی منفرد کمتر است. لی و چن^{۱۳} [۱۳] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر اندرکنش ساختمان و مترو بر پاسخ لرزه‌ای اجزای سازه‌ای ایستگاه مترو پرداخته‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد که وجود ساختمان باعث کاهش دریافت ایستگاه مترو به ویژه در بالاترین طبقه ایستگاه مترو می‌گردد و این کاهش زمانی که فرکانس موج به بیشتر از ۴ Hz می‌رسد بیشتر نمود می‌یابد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که وجود ساختمان باعث کاهش نیروی محوری ستون ایستگاه مترو و افزایش لنگر خمشی آن

افقی نزدیک تونل در قیاس با میدان آزاد را ایجاد می‌کند در حالی که تحلیل الاستو پلاستیک رفتار پیچیده‌تری را به علت گسیختگی خاک نشان داد. مطالعات آن‌ها نشان داد که وجود سازه بالای سطح زمین باعث افزایش کمی در شتاب افقی نزدیک تونل شده است. آباته و ماسیمینو^۱ [۴] در یک مطالعه عددی به بررسی اندرکنش بین تونل، خاک و ساختمان موجود روی سطح زمین و همچنین به اثر تونل بر پاسخ خاک و سازه و بالعکس آن پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند وجود ساختمان باعث کاهش بیشتر بزرگ‌نمایی شتاب در قیاس با حالت میدان آزاد می‌شود. همچنین یافته‌های آن‌ها نشان داد که ترکیب تونل و ساختمان باعث کاهش بیشتری در بزرگ‌نمایی شتاب در سطح خاک می‌گردد. ونگ و همکاران^۲ [۵] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر ایستگاه‌های متروی زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های موجود در سطح زمین پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که اثر سازه‌های زیرزمینی بر خصوصیات دینامیکی در سطح خاک، به ابعاد و به وزن سازه‌ی روی سطح زمین وابسته می‌باشد که هر چه سازه سبک‌تر باشد کمتر تحت تأثیر خصوصیات دینامیکی قرار می‌گیرد. ژو و هو^۳ [۲] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر تونل بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که تأثیر تونل بر پاسخ لرزه‌ای سازه بیشترین حالت را زمانی دارد که دقیقاً در زیر سازه واقع شود. در این موقعیت اندرکنش بین تونل و سازه بیشترین مقدار را از خود نشان داد. پی‌ریز نوسان طبیعی کل سازه به طور چشمگیری افزایش یافت که سبب افزایش جابجایی سازه گردید. هی‌اما و همکاران^۴ [۶] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر حضور شمع‌های فونداسیون ساختمان بر تغییر شکل تونل پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد که جابجایی خاک زمانی که تونل در خاک رسی نرم واقع است نسبت به حالتی که تونل در خاک رسی سخت واقع است مقدار بیشتری را دارد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد شمع‌ها در هر دو نوع خاک باعث تغییرات بیشتری در قطر تونل می‌گردد که با رسیدن تعداد شمع‌ها به مقداری خاص تغییرات در قطر تونل ثابت می‌ماند. رستمی و همکاران^۵ [۷] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر اندرکنش ساختمان‌های فلزی و تونل تحت تحریک امواج دینامیکی پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها بیانگر آن بود که وجود تونل باعث افزایش انرژی ورودی به ساختمان می‌شود که قادر به ایجاد مفصل‌های پلاستیک در اجزای سازه‌ای ساختمان است. همچنین وجود تونل باعث پیچیدگی و به هم

6 Shoja and Alielahi
7 Mayoral and Mosqueda
8 Mirhabibi and Soroush
9 Miao and et al
10 Xu et al
11 Li and Chen

1 Abate and Massimino
2 Wang et al
3 Zhou and Hu
4 Heama et al
5 Roštami et al

می‌شود و با توجه به نتایج، به ارزیابی اندرکنش تونل و ساختمان پرداخته شده است. در این مطالعه با تغییر پارامترهایی نظیر تغییر ارتفاع ساختمان، تغییر فاصله محوری تونل و ساختمان تحت عنوان فاصله محوری بدون بعد (e/a) ، تغییر امواج واقعی زلزله و تغییر سرعت موج برشی خاک، تأثیر این تغییرات بر بزرگ‌نمایی شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان مورد مطالعه قرار گرفته است. مراحل روش تحقیق در شکل ۲ در یک فلوجارت مشخص شده است.



شکل ۱. حالت SF و STF

Fig. 1. SF and STF models

در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D استفاده شده است. از قابلیت‌های شایان این نرم‌افزار توانایی تحلیل دینامیکی مسائل ژئوتکنیکی جهت مدل‌سازی بارهای هارمونیک، بار زلزله و انفجار و همچنین تحلیل مدل‌های کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری می‌باشد مدل‌سازی مطالعه حاضر متشکل از سه عضو اصلی خاک، تونل و ساختمان می‌باشد. خاک و تونل به دلیل بعد سوم زیاد به صورت کرنش مسطح عمل کرده و مدل‌سازی دو بعدی برای آن‌ها مناسب است و در مورد ساختمان که یک سازه سه بعدی است، نرم‌افزار FLAC 2D قادر است سازه سه بعدی را به دو بعدی معادل تبدیل کند. کافی است برای اعضای سازه که در بعد عمود بر صفحه در فواصل منظمی تکرار می‌شوند فاصله تکرار را مشخص نمود. با توجه به قابلیت‌های بالای این نرم‌افزار در تحلیل مسائل اندرکنشی و ضعف سایر نرم‌افزارهای تحلیل سازه‌ای نظیر SAP و ETABS در مدل‌سازی و تحلیل مسائل اندرکنشی و از آنجا که در بسیاری از مقالات معتبر علمی از این نرم‌افزار جهت تحلیل مسائل اندرکنشی خاک و سازه استفاده شده است، انتخاب نرم‌افزار FLAC 2D گزینه‌ای بسیار مناسب جهت این مطالعه می‌باشد. جدول ۱ المان‌های انتخابی جهت معرفی به نرم‌افزار و مرجع انتخاب المان‌ها می‌باشد که در ادامه شرح آن‌ها به تفصیل آمده است:

ابعاد مدل دارای بعد 20 m طول و 50 m ارتفاع می‌باشد. ابعاد مدل بر اساس نتایج مطالعه‌ای که در بخش صحت‌سنجی استفاده شد انتخاب گردیده است. چرا که اولاً تونل تا مرزهای دور در سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و انتظار می‌رود به این علت که در این مطالعه تأثیر فاصله گرفتن سازه از تونل در سطح زمین در نظر گرفته شده است، پاسخش تحت تأثیر قرار گیرد. از این رو تا حد امکان عرض مدل بزرگ‌تر و حتی بزرگ‌تر از مدل وریفای انتخاب شده است. ثانیاً نتایج تحلیل حاضر به صورت بی‌بعد است و تقسیم پاسخ سازه در دو سیستم STF به SF می‌باشد که اثر ابعاد مدل در هر دو سیستم یکسان خواهد بود.

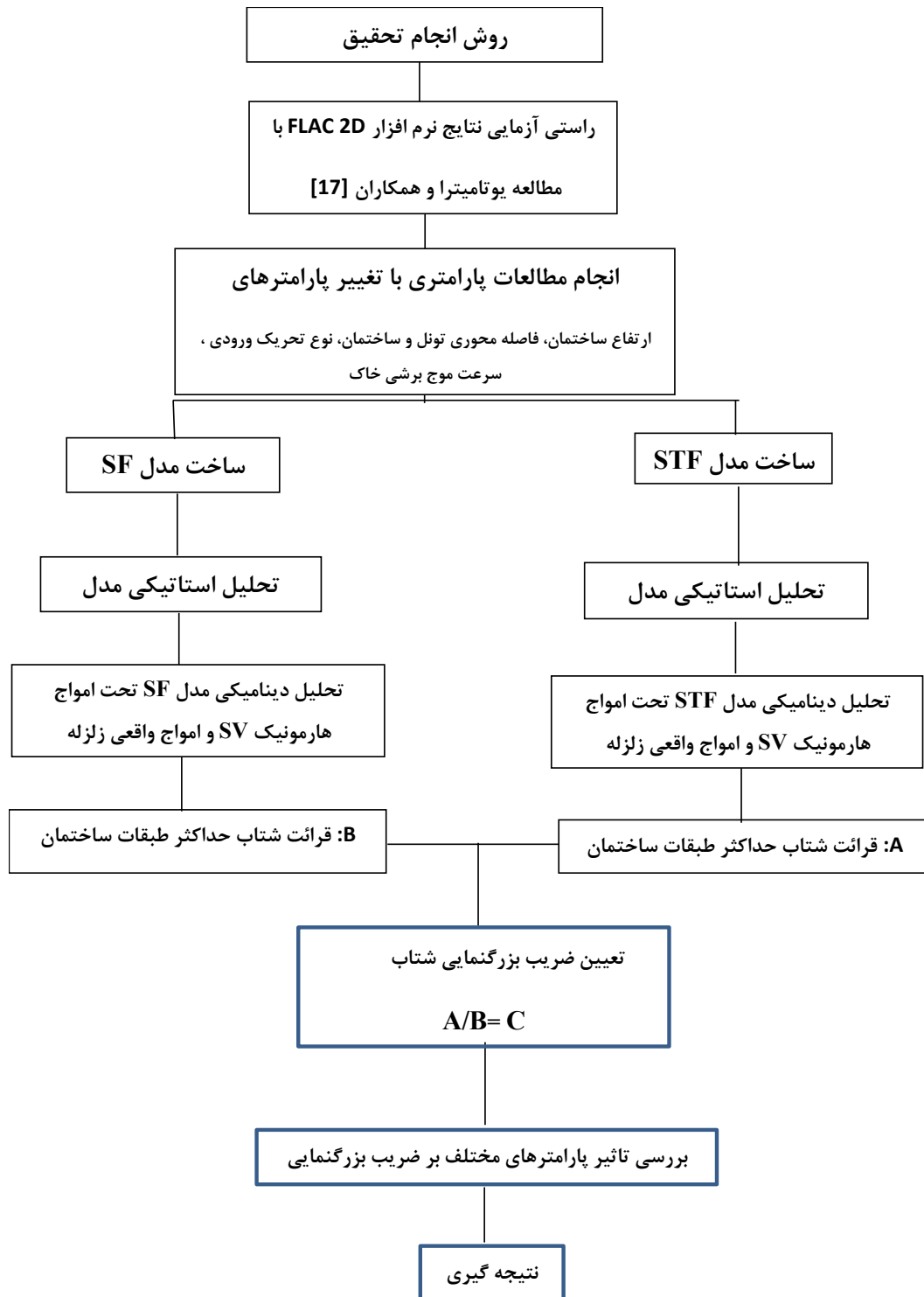
می‌شود. علاوه بر آن نتایج مطالعه آن‌ها بیانگر آن بود که با افزایش فاصله ایستگاه و ساختمان به بیش از $16/5\text{ m}$ اندرکنش تونل و ساختمان تأثیر خود را از دست می‌دهد. طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در آیین‌نامه‌ها بدون لحاظ نمودن اثرات سازه‌های زیرزمینی مجاور مثل تونل‌های مترو صورت می‌گیرد. در صورت مجاورت تونل با ساختمان، اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان با یکدیگر، می‌تواند باعث تغییر در نیروهای اعمالی به ساختمان در حین زلزله گردد. از این رو بررسی این مسئله می‌تواند منجر به یک تحلیل واقع‌گرایانه‌تر و ایمن‌تر در مورد طراحی ساختمان‌های احداث شده در مجاورت تونل‌ها گردد. هدف مطالعه حاضر بررسی این مسئله از طریق مطالعه عددی و تعیین پارامترهای اثرگذار بر اندرکنش تونل و ساختمان است.

۲- مدل‌سازی عددی و راستی‌آزمایی نتایج

این پژوهش به دنبال بررسی تأثیر اندرکنش تونل و ساختمان بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های واقع بر آن به کمک مدل‌سازی عددی می‌باشد. به منظور بررسی این موضوع به طور کلی ۲ حالت در مطالعه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است.

در حالت اول یک ساختمان بر روی سطح زمین قرار می‌گیرد که حالت SF^1 نامیده می‌شود. در حالت دوم مدلی با حضور سازه و تونل تحت عنوان STF^2 تحت تحریک امواج لرزه‌ای قرار می‌گیرد. از مقایسه بین ماکزیمم شتاب ایجاد شده در هر طبقه ساختمان در حالت STF به بیشترین مقدار شتاب ایجاد شده در همان طبقه در حالت SF تحت تحریک امواج لرزه‌ای، میزان ضریب بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی پاسخ شتاب طبقه حاصل

- 1 Structure Field
- 2 Structure-Tunnel Field



شکل ۲. فلوچارت روش انجام تحقیق

Fig. 2. Flowchart of research methodology.

جدول ۱. المان‌های انتخابی جهت معرفی به نرم‌افزار

Table 1. Selected elements to be introduced to the software

ردیف	بخش	نوع المان	مرجع
۱	مرزهای کناری مدل	مرز میدان آزاد	علی الهی و رضانی [۱۵]
۲	مرزهای تحتانی مدل	مرز آرام	علی الهی و رضانی [۱۵]
۳	اندرکنش خاک و سازه	المان رابط اتصال	یگانه و همکاران [۱۴]
۴	اجزای سازه‌ای	المان تیر	یگانه و همکاران [۱۴]
۵	پوشش تونل	المان لاینر	علی الهی و رضانی [۱۵]

و تونل را نمی‌دهد [۱۴]. مقدار سختی قائم و سختی برشی زون‌های مجاور سطح مشترک اتصال برابر $(K_v = K_n = 1 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)/m})$ در نظر گرفته شده است. رابطه (۲) تاریخچه زمانی تنش برشی اعمالی به مدل را نشان می‌دهد که می‌بایست به مرز تحتانی مدل اعمال گردد [۱۵].

$$\sigma_s = -2 \rho c_s V(t) \quad (2)$$

که در این رابطه $V(t = \cos \omega t)$ تاریخچه زمانی سرعت تحریک اعمالی و $\omega = 2\pi f$ می‌باشد. ω فرکانس زاویه‌ای برحسب rad/s و f فرکانس موج هارمونیک بر حسب هرتز (Hz)، ρ چگالی و c_s = سرعت موج برشی خاک است.

سرعت موج برشی خاک 400 m/s در نظر گرفته شده است. که بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی نوع زمین در آیین‌نامه ۲۸۰۰ خاک نوع II می‌باشد که بیانگر محیط خاکی متراکم می‌باشد. طبیعتاً با تغییر سرعت موج برشی خاک تفاوت در میزان پاسخ شتاب طبقات در نتیجه اندرکنش اتفاق می‌افتد که تأثیر تغییر این پارامتر در همین مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳-۴ این مطالعه سه نوع خاک دیگر که بتواند سیستم‌های طبقه‌بندی خاک را که از نوع I الی IV را پوشش دهد با سرعت موج برشی 150 ، 250 و 800 تحت تحریک موج لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مرزهای تحتانی با مرزهای آرام^۲ که جاذب انرژی می‌باشند مدل شده‌اند که مدل‌کننده میرایی تشعشی در مدل نیمه بی‌نهایت است [۱۵]. همچنین

شبکه‌بندی مدل به صورت $1 \times 1 \text{ m}^2$ در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که شرایط توصیه شده توسط کولمیر و لیسمر^۱ اقتاع شود. این دو محقق پیشنهاد داده‌اند اندازه زون‌های موجود در محیط پیوسته به منظور انتشار صحیح موج در مدل مورد مطالعه کوچک‌تر از مقادیر حاصله در رابطه (۱) شود [۱۴].

$$\Delta L \leq \lambda / 10 \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر λ طول موج، هنگام رخ دادن بیشترین فرکانس در محیط است و ΔL برابر اندازه بزرگ‌ترین المان می‌باشد. مدل‌های رفتاری اعمال شده به مصالح در این مطالعه مدل رفتاری الاستیک همگن در نظر گرفته شده است. در مدل اولیه چگالی خاک 2000 kg/m^3 و مدول برشی آن $10^8 \times 3/2$ Pa در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون خاک برابر 0.33 می‌باشد. همچنین در تحلیل‌های دینامیکی میرایی خاک 2% از نوع رایلی و فرکانس طبیعی مود ارتعاشی اول خاک برابر 2 Hz در نظر گرفته شده است. در ابتدا مدل تحلیل استاتیکی انجام گردید. پس از انجام تحلیل استاتیکی و اطمینان از به تعادل رسیدن مدل، یک تونل به شعاع 4 m به ضخامت 33 cm در عمق 10 m سطح زمین توسط المان لاینر ایجاد شد [۱۵]. پوشش تونل بتنی با مدول الاستیسیته 30 GPa ، چگالی 2400 kg/m^3 و ضریب پواسون 0.2 در نظر گرفته شده است. اندرکنش بین تونل و خاک با استفاده از المان رابط اتصال مدل شده که اجازه هیچ‌گونه لغزشی بین خاک

$$\begin{aligned}
 LL &= 200 \text{ Kg/m}^2 \\
 DL + LL &= 770 \text{ Kg/m}^2 \\
 \text{Beam Dimension} &= 40 * 40 \text{ cm} \\
 \text{Concrete Specific Weight} &= 2400 \text{ Kg/m}^3 \\
 \text{Equivalent Beam Force} &= (.4 * .4) * 2400 = 384 \text{ Kg/m} \\
 \text{Equivalent Roof Spread Force} &= 770 * 3 = 2310 \\
 [2310 + 384] &= \rho_{\text{Equivalent}} * [.4 * .4] \\
 \rho_{\text{Equivalent}} &= 16837 \text{ Kg / m}^3
 \end{aligned}$$

سیستم‌های دینامیکی طبیعی دارای درجه‌ای از میرایی بوده که انرژی ارتعاشات وارده را جذب می‌کنند. میرایی رایلی در ابتدا جهت تحلیل سازه‌ها در محیط الاستیک برای میرا نمودن نوسان‌های طبیعی در سیستم مورد استفاده قرار گرفت. یک ماتریس میرایی مانند C طبق رابطه (۴) با استفاده از ضرایب α و β با مؤلفه‌های ماتریس جرم M و سختی K مرتبط می‌شود. ضرایب α و β به ترتیب ثابت میرایی مرتبط با جرم و سختی است.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

با توجه به آنکه میرایی بحرانی عبارت از مقدار میرایی مشخصی است که در آن سیستم فنر دچار نوسان نشده و تغییر شکل ایجاد شده بلافاصله به صفر تبدیل می‌شود و با توجه به آنکه نسبت میرایی برابر با نسبت میرایی یک سیستم به میرایی بحرانی آن می‌باشد، برای یک سیستم با چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی ξ_c با هر سرعت زاویه‌ای در سیستم ω_i به صورت رابطه (۵) مرتبط می‌شود [۱۴].

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (5)$$

در FLAC 2D جهت محاسبه میرایی رایلی مصالح سازه نیاز به نسبت میرایی بحرانی مینیمم ξ_{\min}^2 و فرکانس مرکزی مینیمم f_{\min} می‌باشد که این مقادیر از رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند [۱۴].

جهت مرزهای کناری مدل از مرز میدان آزاد استفاده می‌شود تا به خوبی از بازگشت امواج به داخل مدل جلوگیری نماید [۱۵]. در نرم‌افزار FLAC 2D خصوصیات کلی مقطع سازه‌ای به المان‌های تیر اعمال می‌شود که در آن جزییات میلگرد گذاری لحاظ نمی‌گردد و مدول الاستیسیته مقطع در حالت بتن مسلح در نظر گرفته می‌شود. جهت مدل‌سازی اجزای سازه‌ای از المان تیر استفاده گردید [۱۴]. دهانه قاب ساختمان در جهت مطالعه ۴ m و اتصالات آن‌ها گیردار می‌باشد. ابعاد تیر و ستون‌های ساختمان ۴۰×۴۰ cm در نظر گرفته شده است. مصالح تیر و ستون‌ها بتنی با چگالی ۲۴۰۰ kg/m³ و مدول الاستیسیته آن‌ها ۳۰ GPa می‌باشد. رفتار مصالح سازه‌ای الاستیک در نظر گرفته شده است. جهت لحاظ نمودن اینرسی سقف‌ها در مدل، بار ناشی از سقف‌ها بدون تغییر در ابعاد تیر، در چگالی تیرها مطابق با رابطه (۳) اعمال شد [۱۴].

$$(DL + \beta_r LL) \times Spacing = Area \times \rho \quad (3)$$

DL: بار مرده

LL: بار زنده

β_r : ضریب کاهش بار زنده

Spacing: فاصله المان‌های تیر در جهت عمده بر صفحه

Area: مساحت سطح مقطع تیر

ρ : چگالی

در این مطالعه جهت اعمال بار ناشی از سقف‌ها، با فرض دهانه ۶ m در جهت عمود قاب و فرض بار مرده و زنده برابر ۵۷۰ و ۲۰۰ kg/m² می‌باشد. بار مرده کف سقف‌ها مربوط به سقف تیرچه بلوک می‌باشد که دارای وزن تقریبی ۵۷۰ kg/m² می‌باشد و بار زنده ۲۰۰ kg/m² بار گسترده‌ای است که مربوط به ساختمان‌ها و مجتمع‌های مسکونی بر اساس آیین‌نامه محبت ۶ ویرایش سال ۱۳۹۲ می‌باشد. با توجه به اینکه FLAC 2D نرم‌افزار ۲ بعدی می‌باشد و قادر به مدل‌سازی سقف نمی‌باشد، جهت لحاظ نمودن اثر اینرسی سقف، نیروی معادل بار اعمالی از سوی سقف را در چگالی تیرها مطابق رابطه (۳) لحاظ نموده که بر اساس آن چگالی معادل تیرها به ۱۶۸۳۷ kg/m³ افزایش یافت. که نحوه محاسبه آن به شرح ذیل می‌باشد:

$$DL = 570 \text{ Kg/m}^2$$

جدول ۲. پارامترهای مورد نیاز جهت معرفی به نرم‌افزار 2D FLAC

Table 2. Parameters required to be introduced in FLAC 2D software

ردیف	بخش	نوع المان	مرجع
۱	مرزهای کناری مدل	مرز میدان آزاد	علی الهی و رضانی [۱۵]
۲	مرزهای تحتانی مدل	مرز آرام	علی الهی و رضانی [۱۵]
۳	اندرکنش خاک و سازه	المان رابط اتصال	یگانه و همکاران [۱۴]
۴	اجزای سازه‌ای	المان تیر	یگانه و همکاران [۱۴]
۵	پوشش تونل	المان لاینر	علی الهی و رضانی [۱۵]

بررسی شود و ثانیاً بتوان زلزله‌ها را با امواج هارمونیک برشی درون صفحه که دارای پریود بدون بعد معادل با فرکانس غالب زلزله‌ها باشند مقایسه کرد و از آنجا که موضوع این مطالعه طراحی ساختمان به روش تاریخیچه زمانی نیست الزامات آیین‌نامه ۲۸۰۰ در بحث انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها لحاظ نگردیده است.

شکل ۳ مدل عددی ایجاد شده در نرم‌افزار برای ساختمان سه‌طبقه در

حالت وجود توأم تونل و ساختمان (STF) می‌باشد.

به منظور راستی آزمایی نتایج نرم‌افزار، جهت اعتبارسنجی مدل‌سازی از مطالعه یوتامیترا و همکاران [۱۷] با عنوان تأثیر سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین استفاده شده است. روند مدل‌سازی در نرم‌افزار جهت اعتبارسنجی به این صورت می‌باشد که یک محیط خاکی به ابعاد 180 m طول و 50 m ارتفاع در نظر گرفته شده است. یک تونل به شعاع 5 m در عمق 10 m سطح زمین قرار گرفت. مدول الاستیک بتن 30 GPa ، وزن مخصوص بتن 2400 kg/m^3 و رفتار خاک ویسکو الاستیک و از المان‌های چهار وجهی با رفتار کرنش مسطح جهت شبکه‌بندی محیط استفاده شد. میرایی خاک از نوع رایلی و برابر 2% در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی پوشش تونل از المان سازه‌ای لاینر استفاده گردید. اندرکنش بین این المان سازه‌ای و خاک اطراف با استفاده از رابط اتصال که اجازه هیچ‌گونه لغزشی را نمی‌دهد مدل شد. سرعت موج برشی، چگالی و ضریب پواسون خاک به ترتیب 400 m/s ، 2000 kg/m^3 و 33% در نظر گرفته شده است. ضریب انعطاف‌پذیری تونل 150 می‌باشد. تحریک ورودی به صورت تنش به بستر اعمال گردید و لذا از مرزهای آرام جهت مدل‌سازی کف استفاده شد.

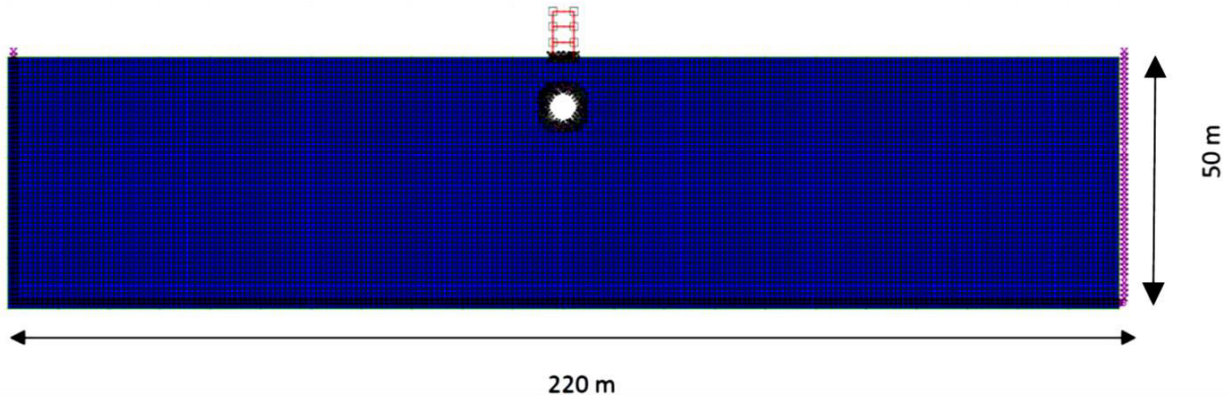
$$\xi_{min} = (\alpha\beta)^{1/2} \quad (6)$$

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{1/2} \quad (7)$$

جهت محاسبه فرکانس‌های طبیعی مد ارتعاشی اول و دوم ساختمان با مدل کردن قاب در نرم‌افزار ETABS فرکانس‌های اول و دوم مد ارتعاشی را یافته و به 2D FLAC جهت در نظر گرفتن میرایی مصالح سازه معرفی می‌گردد. جدول ۲ مقادیر پارامترهای مورد نیاز جهت معرفی به نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

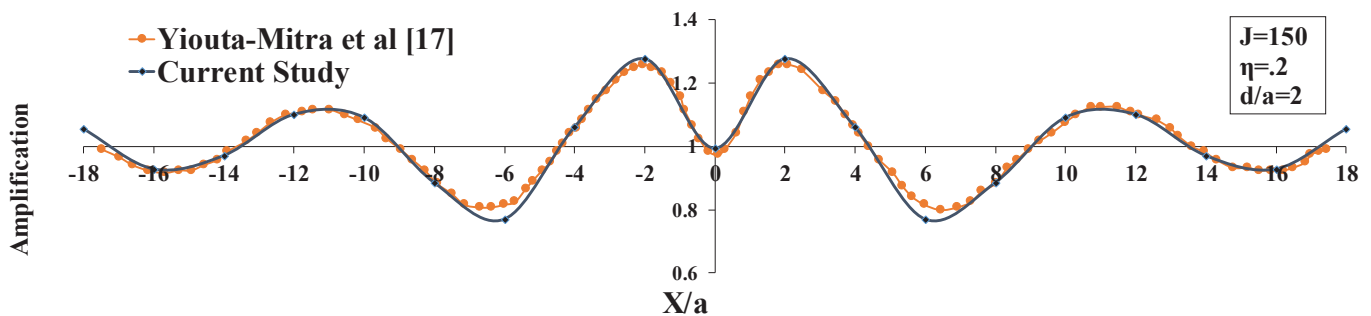
بر طبق یافته‌های مطالعات پیشین اثر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای محیط پیرامونی در پریودهای بدون بعد در محدوده ۲ تا ۱۰ مشهود است. [۱۶]. از این رو مقادیر پریود بدون بعد در محدوده ۲ تا ۱۰ انتخاب شده است. همچنین جهت بررسی اثر تشدید از پریودهای بدون بعد مد ارتعاش نوسانی اول (NP) ساختمان‌ها استفاده شده است. لذا جهت تحریک مدل از امواج هارمونیک با پریودهای بدون بعد (λ/D) ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و از پریودهای بدون بعد مد ارتعاش نوسانی اول (NP) ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه به ترتیب برابر $45/7$ ، $59/26$ و 48 استفاده شده است.

جهت بررسی اثر زلزله واقعی از تاریخچه زمانی زلزله طبرس، بم، کوبه و هلنا استفاده گردیده است. ملاک انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها تفاوت در فرکانس غالب زلزله‌ها بوده است تا اولاً نحوه پاسخ اندرکنش به زلزله‌های مختلف



شکل ۳. مدل عددی ایجاد شده برای ساختمان سه طبقه در حالت STF در 2D FLAC

Fig. 3. Numerical model created for a three-story building in STF model in FLAC 2D



شکل ۴. مقایسه نتایج بزرگ‌نمایی حالت (TF) به (FF) مدل‌سازی مطالعه حاضر با نتایج مطالعه یوتامیترا و همکاران [۱۷]

Fig.4. The general layout of the problem

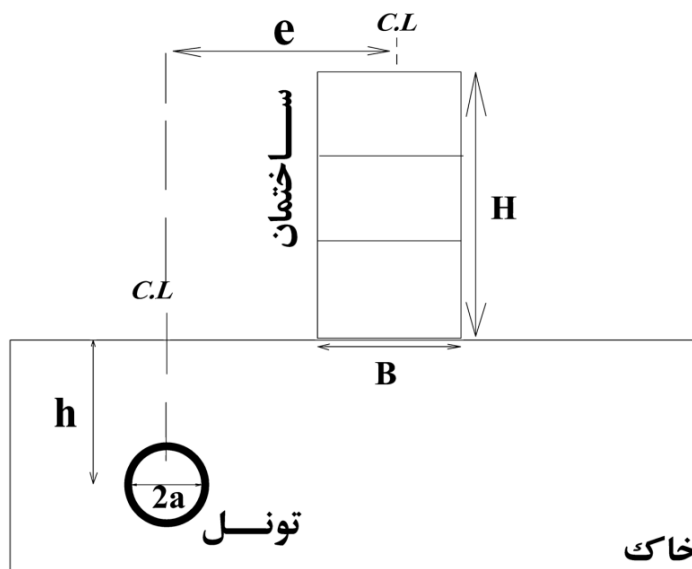
شکل شماره ۴ قیاس بین نتایج بزرگ‌نمایی حالت وجود تونل (TF) به حالت میدان آزاد (FF) (مدل بدون تونل و سازه) مدل ایجاد شده در نرم‌افزار با نتایج مطالعه یوتامیترا و همکاران [۱۷] در تونل با ضریب انعطاف‌پذیری ۱۵۰ با عمق قرارگیری بدون بعد $2(d/a)$ تحت تحریک موج هارمونیک با فرکانس بدون بعد $0.2/\eta = \eta(0.2)$ می‌باشد.

نتایج اعتبارسنجی نسبت پاسخ شتاب حالت TF به FF حاکی از تطبیق بسیار خوب مدل ایجاد شده با مدل مقاله یوتامیترا و همکاران [۱۷] دارد، به گونه‌ای که تا ۱۸ برابر شعاع تونل جواب‌های حاصل از تحلیل مدل‌ها در این مقاله، تنها در نقطه‌ای از سطح زمین در فاصله ۶ برابر شعاع تونل اختلاف ناچیزی برابر ۰.۲٪ را دارد و در سایر نقاط واقع بر سطح زمین در این بازه تطابق

جهت مرزهای کناری مرزهای آزاد انتخاب گردید که از برگشت موج به مدل جلوگیری می‌کند. مدل تحت تحریک موج هارمونیک به صورت تاریخچه تنش برشی با معادله زیر قرار گرفت:

$$\sigma_s = -2 \rho c_s V(t) \quad (8)$$

که در این رابطه $V(t = \cos \omega t)$ تاریخچه زمانی سرعت تحریک اعمالی و $\omega = 2\pi f$ می‌باشد. ω فرکانس زاویه‌ای بر حسب rad/s و f فرکانس موج هارمونیک بر حسب هرتز (Hz)، ρ چگالی و c_s = سرعت موج برشی خاک است.



شکل ۵. هندسه کلی مسئله مورد مطالعه

Fig. 5. The general layout of the problem

پاسخ شتاب مواجه گردد. تغییر ارتفاع ساختمان نیز تأثیر خود را بر میزان این پاسخ شتاب هر طبقه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ مربوط به تحریک مدل در $D/\lambda = 2$ در ساختمان‌ها کاهش نسبت پاسخ شتاب در طبقات اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع ساختمان کاهندگی کمتری در طبقات بالاتر روی می‌دهد به نحوی که بیشترین کاهندگی پاسخ شتاب طبقات مربوط به تراز فونداسیون ساختمان ۵ طبقه برابر ۲۶٪ و کمترین آن در طبقه ۵ همین ساختمان برابر ۱۱٪ رخ داده است. الگوی تغییرات پاسخ شتاب از تراز فونداسیون تا طبقه ۵ به صورت الگوی خطی می‌باشد. در سایر ساختمان‌ها روند تغییرات پاسخ شتاب از روی فونداسیون تا طبقه آخر ساختمان مشابه با ساختمان ۵ طبقه شده است. با توجه به شکل ۷ تحت تحریک امواج با $\lambda/3$ $D =$ اندرکنش باعث کاهش پاسخ شتاب طبقات در یک بازه ۲۷٪ الی ۳۰٪ از تراز فونداسیون تا آخرین طبقه ساختمان شده است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که تحت تحریک مدل در $D/\lambda = 5$ از طبقه ۴ به بعد اثر اندرکنش بر نسبت پاسخ شتاب طبقه کم شده است به نحوی که در طبقه ۴ اندرکنش تونل و ساختمان بر نسبت پاسخ شتاب طبقه هیچ گونه اثری را نداشته است و در طبقه ۵ کاهش ناچیز در حدود ۲٪ نسبت پاسخ شتاب اتفاق افتاده است. بازه کوچک‌نمایی نسبت پاسخ شتاب از طبقه ۱ تا ۳ در هر ساختمان در حدود ۶٪ الی ۱۲٪ می‌باشد، آن گونه که بیشترین تأثیر کوچک‌نمایی اندرکنش در

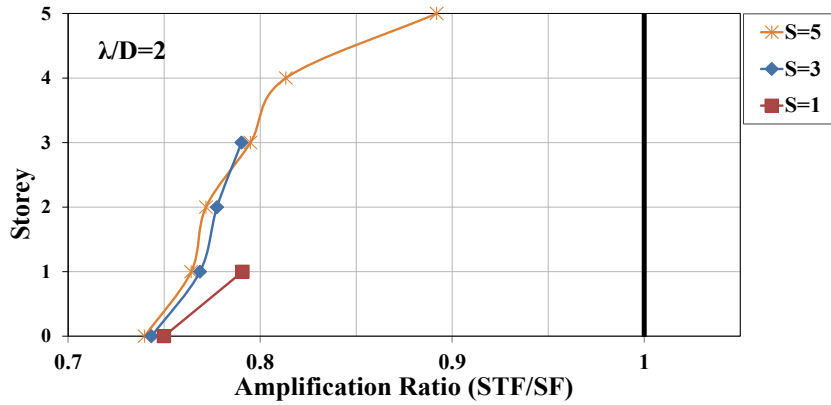
۱۰۰٪ نتایج این مطالعه و مقاله یوتا میترا و همکاران [۱۷] مشاهده شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی در این بخش با تغییر پارامترهایی نظیر تغییر ارتفاع ساختمان (H)، تغییر فاصله محوری تونل و ساختمان (e)، تغییر امواج واقعی زلزله و تغییر سرعت موج برشی خاک به بررسی تأثیر این تغییرات بر بزرگ‌نمایی شتاب طبقات ساختمان مورد مطالعه در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان پرداخته شده است. شکل ۵ هندسه کلی مسئله مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این مطالعه عرض ساختمان (B) و عمق تونل (h) و شعاع تونل (a) بدون تغییر هستند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر تغییر ارتفاع ساختمان بر اندرکنش تونل و ساختمان و تأثیر آن بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان

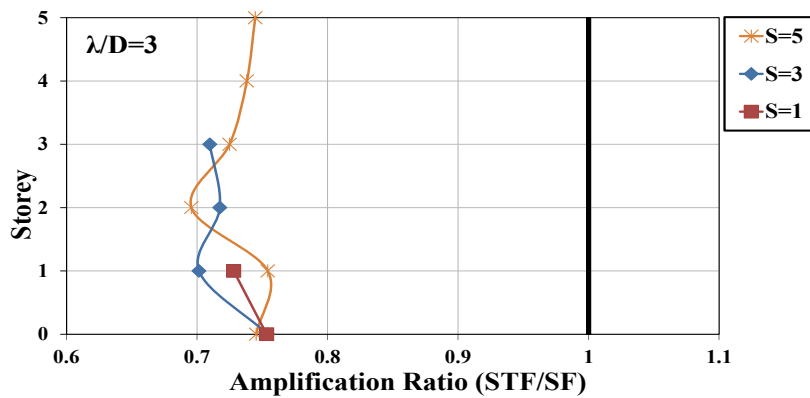
جهت این مطالعه ساختمان‌های ۱، ۳ و ۵ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳ متر در نظر گرفته شده است. اشکال ۶ الی ۱۱ نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF) برای ساختمان با ۱، ۳ و ۵ طبقه تحت تحریک امواج هارمونیک با پریود بدون بعد ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و NP را نشان می‌دهد.

با توجه به اشکال ۶ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که بسته به میزان فرکانس موج اعمالی پاسخ طبقات ساختمان می‌تواند با بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی



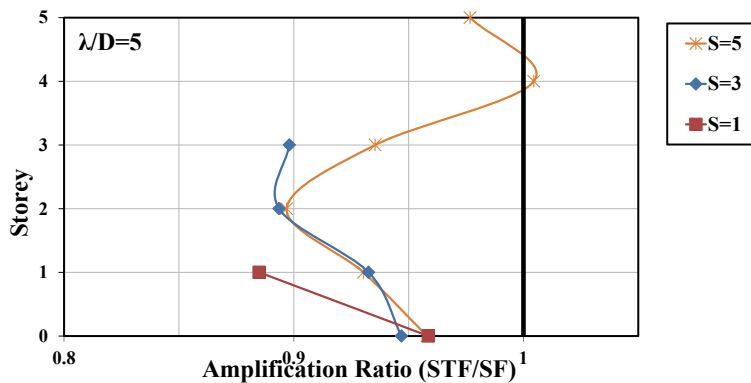
شکل ۶. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $\lambda/D=2$

6. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=2$



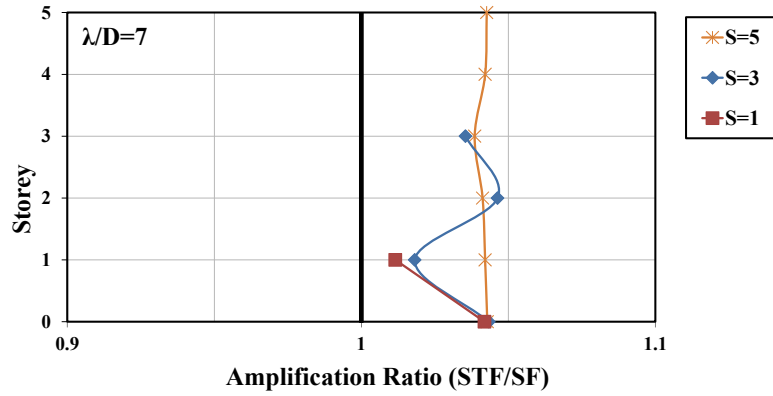
شکل ۷. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $\lambda/D = 3$

Fig. 7. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=3$



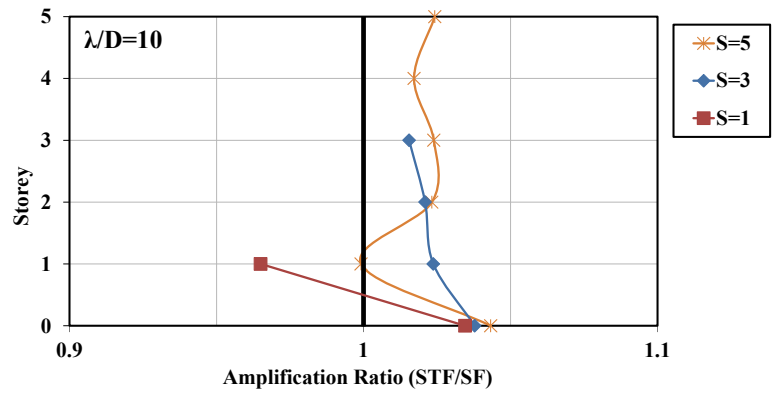
شکل ۸. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $\lambda/D = 5$

Fig. 8. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=5$



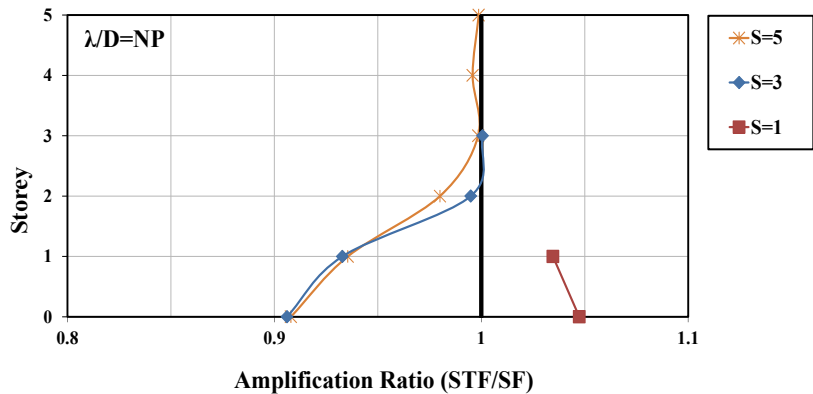
شکل ۹. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $\lambda/D=7$

Fig. 9. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=$



شکل ۱۰. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $\lambda/D=10$

Fig. 10. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=10$



شکل ۱۱. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان ۱، ۳ و ۵ طبقه در $NP=\lambda/D$

Fig. 11. Acceleration amplification ratio (STF/ SF) changes in height for 1, 3 and 5 storey buildings at $\lambda/D=NP$

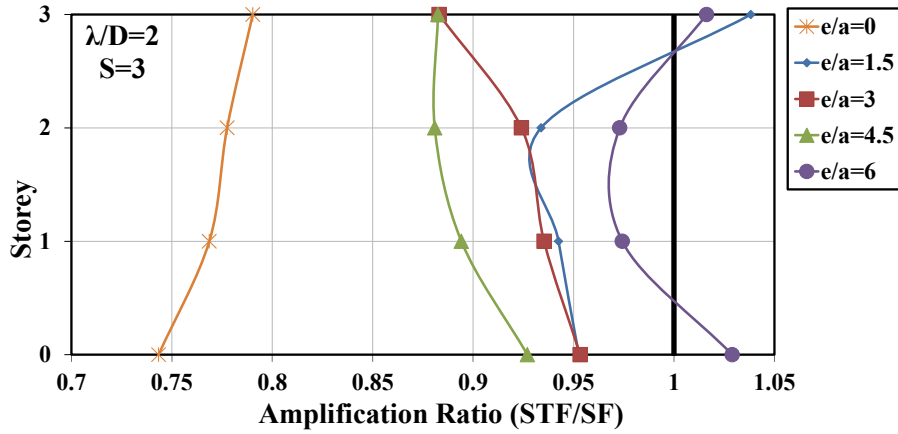
و جواب گذرا تابع فرکانس طبیعی ساختمان می‌باشد. لذا با تغییر ارتفاع ساختمان، عملاً فرکانس طبیعی ساختمان را نیز تغییر داده‌ایم؛ بنابراین تغییر نسبت شتاب در محدوده‌های نزدیک به ساختمان و تونل به علت تأثیرگذار بودن عوامل ذکر شده امری بدیهی می‌باشد. مجموع آثار اندرکنشی ذکر شده فوق از دلایل تأثیرگذاری تغییر ارتفاع ساختمان بر اندرکنش تونل و ساختمان و تغییر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان می‌باشد.

۳-۲- اثر تغییر فاصله محوری تونل و ساختمان و تأثیر آن بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش

جهت بررسی اثر تغییر فاصله محوری ساختمان و تونل بر موضوع مورد مطالعه با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها و تنها با تغییر در فاصله محوری ساختمان و تونل در شرایط e/a برابر ۰، ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ سیستم تحت تحریک امواج هارمونیک با پریودهای بدون بعد مختلف قرار گرفت. اشکال ۱۲ الی ۱۷ نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) جهت ساختمان سه طبقه در پریود بدون بعد ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰، NP را در فاصله محوری بدون بعد مختلف تونل و ساختمان را نشان می‌دهد.

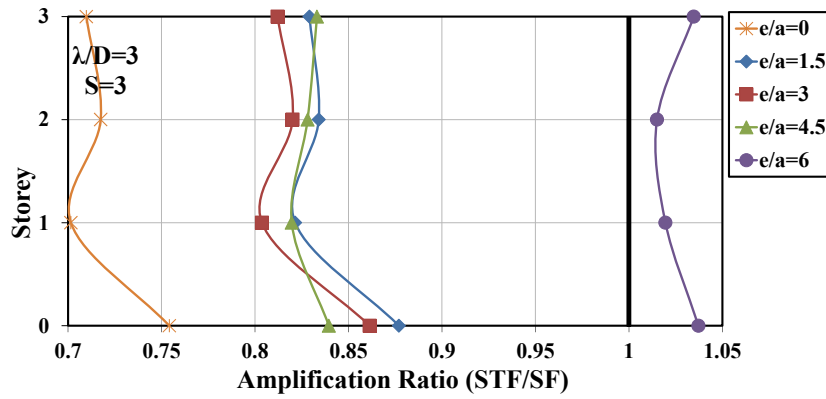
با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در تحریک مدل توسط موج با $\lambda/D=2$ اندرکنش تونل و ساختمان بیشترین تأثیر خود را بر کوچک‌نمایی شتاب طبقات در $e/a=0$ از خود نشان می‌دهد به نحوی که بیشترین کاهش نسبت پاسخ شتاب در حدود ۲۶٪ بر روی فونداسیون ساختمان افتاده است. با افزایش فاصله محور تونل و ساختمان تأثیر اندرکنش بر نسبت پاسخ شتاب طبقات تأثیر خود بر کوچک‌نمایی را کمتر کرده است. میزان این کوچک‌نمایی در نسبت‌های $e/a=3$ و $e/a=4/5$ در محدوده بین ۶٪ روی فونداسیون تا ۱۲٪ در طبقه ۳ می‌باشد. در $e/a=6$ در روی فونداسیون و طبقه ۳ افزایش نسبت پاسخ شتاب در بازه ۲٪ الی ۳٪ اتفاق افتاده است و در سایر طبقات کاهش نسبت پاسخ شتاب به وقوع پیوسته است. الگوی رفتاری در افزایش و یا کاهش نسبت پاسخ شتاب در $e/a=3$ و $e/a=4/5$ شبیه به هم می‌باشند، به گونه‌ای که از روی فونداسیون تا طبقه ۳ کاهندگی بیشتر نسبت پاسخ شتاب اتفاق افتاده است. در $e/a=1/5$ و $e/a=6$ الگوی رفتاری شبیه به هم می‌باشد به نحوی که از روی فونداسیون تا طبقه ۲ کاهندگی نسبت پاسخ شتاب اتفاق می‌افتد و در طبقه ۳ به ناگهان نسبت پاسخ شتاب افزایش می‌یابد. در $e/a=0$ اگر چه کوچک‌نمایی پاسخ شتاب اتفاق افتاده اما الگوی رفتاری در جهت افزایش نسبت پاسخ شتاب از روی فونداسیون تا طبقه ۳ با اختلاف ۵٪ می‌باشد. شکل ۱۳ مربوط به تحریک

این پریود بدون بعد مربوط به تراز طبقه ۱ ساختمان یک طبقه با بیشترین اثر کاهندگی برابر ۱۲٪ می‌باشد. این روند کاهش پاسخ اندرکنش در پریودهای بدون بعد بالاتر در کلیه طبقات اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل ۹ با تحریک مدل تحت موج با $\lambda/D=7$ در کلیه ساختمان‌ها در تمامی طبقات افزایش نسبت پاسخ شتاب طبقه در بازه ۱٪ الی ۴٪ رخ داده است. در این پریود بدون بعد اندرکنش بیشترین تأثیر را بر بزرگ‌نمایی طبقات ساختمان ۵ طبقه داشته است به نحوی که در تمامی طبقات این ساختمان بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب با یک الگوی ثابت از فونداسیون تا طبقه ۵ تا ۴٪ اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰ مربوط به تحریک مدل با $\lambda/D=10$ نیز افزایش نسبت پاسخ شتاب طبقات به استثنای طبقه اول ساختمان ۱ و ۵ طبقه رخ داده است. بازه بزرگ‌نمایی در حدود ۲٪ الی ۴٪ با بیشترین بزرگ‌نمایی مربوط به فونداسیون ساختمان ۵ طبقه می‌باشد و این در حالی است که در طبقه ۱ ساختمان یک طبقه کوچک‌نمایی نسبت پاسخ شتاب در حدود ۳/۵٪ به وقوع پیوسته است. با توجه به شکل ۱۱ به استثنای ساختمان یک طبقه که افزایش نسبت پاسخ شتاب در بازه ۴٪ الی ۵٪ رخ داده است، در ساختمان ۳ و ۵ طبقه، کاهش نسبت پاسخ شتاب فونداسیون، طبقات ۱ و ۲ در بازه کاهشی ۱٪ الی ۹٪ مشاهده می‌شود. در سایر طبقات اندرکنش در پریود بدون بعد NP تأثیری بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ندارد. در پاسخ به تغییرات ایجاد شده در نسبت پاسخ شتاب طبقات می‌توان گفت که حضور تونل باعث تفرق و انکسار امواج می‌گردد. با توجه به متفاوت بودن سختی آن نسبت به خاک اطراف در نتیجه حبس انرژی می‌تواند تداخل امواج رفت و برگشتی کند. در نهایت با تغییر مسیر موج می‌تواند ایجاد امواج جدید نماید و بر مشخصات و محتوای فرکانسی موج تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر منحنی بودن سطح تونل قادر به ایجاد کردن اثر کانونی است که در آن کانونی شدن پرتوهای موج توسط بازتاب و شکست در سطوح انحناء ایجاد می‌شود که تمرکز موج‌های لرزه‌ای در یک نقطه را می‌تواند ایجاد کند. همچنین با توجه به تهی بودن داخل تونل، سرعت انتشار موج تغییر می‌یابد. با برخورد موج‌های لرزه‌ای به سطح منحنی تونل با توجه به زاویه تابش موج و شیب سطح منحنی بازتاب‌هایی با زوایای متفاوت ایجاد می‌شود که می‌تواند انرژی پرتوهای موج را در یک ناحیه خاص متمرکز نماید. از طرفی وجود ساختمان به علت اثر اینرسی و متفاوت بودن سختی فونداسیون نسبت به خاک و نهایتاً با نوسانات خود می‌تواند باعث تغییر در خصوصیات موج گردد. در مورد سازه با اعمال موج هارمونیک معادله دیفرانسیل حاکم بر سیستم ساختمان دارای دو جواب ماندگار و گذرا می‌گردد. جواب ماندگار تابع فرکانس موج تحریکی



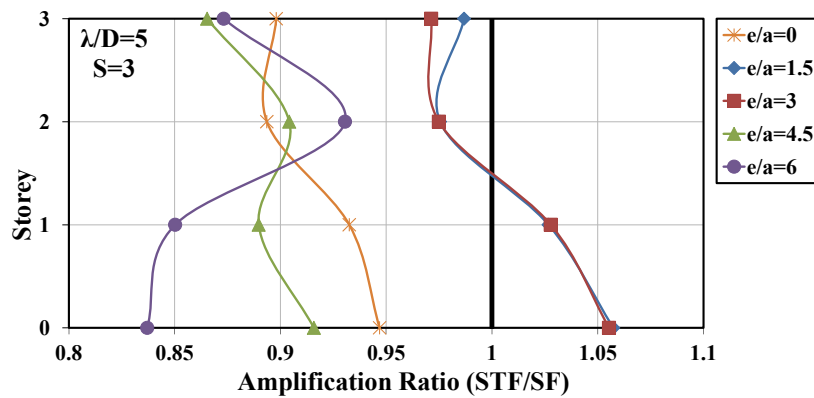
شکل ۱۲. تغییرات نسبت بزرگنمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه (S=3) در $\lambda/D=2$

Fig. 12. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building (S=3) at $\lambda/D=2$



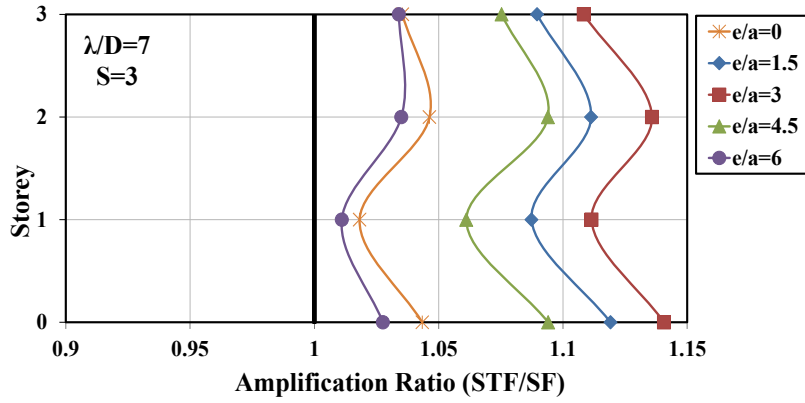
شکل ۱۳. تغییرات نسبت بزرگنمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه (S=3) در $\lambda/D=3$

Fig. 13. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building (S=3) at



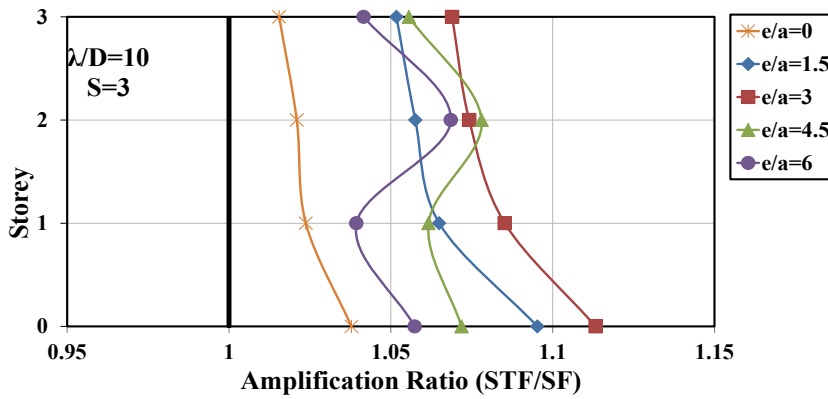
شکل ۱۴. تغییرات نسبت بزرگنمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه (S=3) در $\lambda/D=5$

14. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building (S=3) at $\lambda/D=5$



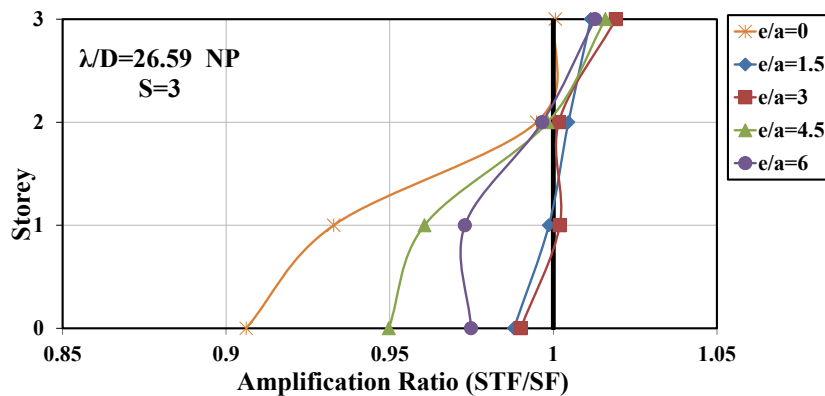
شکل ۱۵. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه ($S=3$) در $\lambda/D=7$

Fig.15. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building ($S=3$) at $\lambda/D=7$



شکل ۱۶. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه ($S=3$) در $\lambda/D=10$

Fig.16. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building ($S=3$) at $\lambda/D=10$



شکل ۱۷. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه ($S=3$) در $\lambda/D=NP$

Fig. 17. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building ($S=3$) at $\lambda/D=NP$

پاسخ شتاب برابر ۱ می‌باشد و اندرکنش تونل و ساختمان در این پریود بدون بعد تأثیری بر نسبت پاسخ شتاب در این طبقه ندارد. در روی فونداسیون کاهش نسبت پاسخ شتاب از ۱٪ تا ۹٪ به وقوع می‌پیوندد. کمترین تأثیر اندرکنش مربوط به نسبت‌های $e/a=1/5$ و $e/a=3$ می‌باشد. الگوی رفتاری در تمامی نسبت‌های e/a شبیه به هم می‌باشد. در پاسخ به چرایی اثر تغییر فاصله محوری ساختمان و تونل بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش، عوامل گوناگونی دخیل در این مسئله می‌باشند. از جمله آن‌ها می‌توان به اثر اینرسی ساختمان اشاره کرد. حرکت ساختمان بر روی تاریخچه زمانی حرکت زمین، در نتیجه تکان خوردن، ضربه زدن و لغزش ساختمان نسبت به سطح زیرین، می‌تواند تأثیرگذار باشد. حرکت گهواره‌ای ساختمان ایجاد آشفته‌گی‌هایی در مجاورت ساختمان می‌نماید. از طرفی امواجی که به واسطه وجود تونل متفرق می‌شوند امواج انعکاس یافته، تبدیل مد یافته، امواج پراشیده شده و امواج تداخل سطحی می‌باشند. مجموعه این امواج در فاصله بالای حفره و سطح زمین در مدت کوتاهی تداخل نموده و جابجایی‌های بسیار متغیری را در سطح زمین ایجاد می‌کند. نتیجتاً ترکیب نوسانات ساختمان و آشفته‌گی‌های ایجاد شده در امواج رسیده به ساختمان در نتیجه وجود تونل قادر به تغییر مشخصات لرزه‌ای موج می‌باشد. از طرفی تغییر فاصله محوری تونل و ساختمان می‌تواند الگوهای بر هم نهی امواج به هم ریخته را دستخوش تغییر نماید که نتیجتاً پاسخ‌های متفاوتی را در سطح زمین و به تبع آن در طبقات ساختمان به واسطه تأثیرپذیر بودن پاسخ ساختمان از فرکانس‌های امواج دریافتی ایجاد نماید.

۳-۳- تغییرات بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش

تونل و ساختمان تحت تحریک امواج واقعی زلزله

جهت مشاهده اثر تحریک توسط امواج واقعی زلزله بر موضوع مورد مطالعه با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها و تنها با تغییر امواج واقعی زلزله به بررسی موضوع پرداخته شد. زلزله‌های انتخابی جهت بررسی، شتاب‌نگاشت‌های زلزله طیس، بم کوبه و هلنا می‌باشد. پس از انتخاب زلزله‌های ذکر شده با انتقال داده‌ها به نرم‌افزار SeismoSignal، با به صفر رساندن جابجایی ماندگار و اصلاح خط پایه انجام شده و پس از آن شتاب‌نگاشت‌های مربوطه به نرم‌افزار FLAC 2D معرفی کرده و با اعمال آن به بستر مدل به تحلیل‌های مورد نیاز پرداخته شده است. مشخصات امواج لرزه‌ای اعمالی در جدول ۳ ارائه گردیده است:

مدل تحت $\lambda/D=3$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که در $\lambda/D=3$ اندرکنش تونل و ساختمان بیشترین تأثیر خود را بر کوچک‌نمایی پاسخ طبقات در $e/a=0$ از خود نشان می‌دهد به نحوی که بیشترین کاهش نسبت پاسخ شتاب در حدود ۳۰٪ بر روی طبقه ۱ ساختمان اتفاق می‌افتد. با افزایش فاصله محور تونل و ساختمان تأثیر اندرکنش بر نسبت پاسخ شتاب طبقات تأثیر خود بر کوچک‌نمایی را کمتر کرده است به نحوی که میزان این کوچک‌نمایی در نسبت‌های $a/e=1/5$ الی $e/a=4/5$ در محدوده بین ۱۲٪/۵ روی فونداسیون تا ۱۹٪ در طبقه ۱ می‌باشد. در $e/a=6$ افزایش ناگهانی نسبت پاسخ شتاب در تمامی طبقات در بازه ۲٪ تا ۴٪ روی داده است. شکل ۱۴ مربوط به تحریک مدل در $\lambda/D=5$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که اندرکنش تونل و ساختمان بیشترین تأثیر خود را بر کوچک‌نمایی طبقات در $e/a=6$ از خود نشان می‌دهد به نحوی که بیشترین کاهش نسبت پاسخ شتاب را در حدود ۱۶٪ بر روی فونداسیون ساختمان اتفاق افتاده است. الگوی رفتاری در این پریود بدون بعد روندی بسیار متفاوت را در قیاس با پریود بدون بعد ۲ و ۳ از خود نشان می‌دهد به گونه‌ای که برخلاف انتظار بیشترین کاهش نسبت پاسخ شتاب در نسبت $e/a=6$ اتفاق افتاده و نه در نسبت $e/a=0$. در این پریود بدون بعد در $e/a=1/5$ و $a/e=3$ در روی فونداسیون افزایش برابر ۶٪ و در طبقه ۱ افزایش ۳٪ نسبت پاسخ شتاب رخ داده است. با توجه به شکل ۱۵ با تحریک مدل در $\lambda/D=7$ مشاهده می‌شود الگوی رفتاری نسبت پاسخ شتاب روند بسیار مشابهی را در تمامی نسبت‌های e/a از خود نشان می‌دهد. در تمامی نسبت‌های e/a افزایش نسبت پاسخ شتاب در تمامی طبقات به وقوع پیوسته است. بیشترین افزایش نسبت پاسخ شتاب در نسبت $e/a=3$ در حدود ۱۴٪ در روی فونداسیون اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در $\lambda/D=10$ در تمامی نسبت‌های e/a افزایش نسبت پاسخ شتاب در تمامی طبقات اتفاق افتاده است. بیشترین افزایش نسبت پاسخ شتاب مربوط به نسبت $e/a=3$ در حدود ۱۲٪ بر روی فونداسیون می‌باشد. الگوی رفتاری در نسبت‌های $e/a=0$ ، $e/a=1/5$ و $e/a=3$ مشابه به هم می‌باشد، به نحوی که مقدار نسبت بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب از روی فونداسیون تا طبقه ۳ روند کاهشی با اختلافی در حدود ۲٪ تا ۵٪ دارد و در مورد نسبت‌های $e/a=4/5$ و $e/a=6$ این روند سینوسی است. با توجه به شکل ۱۷ بیشترین کوچک‌نمایی در پریود بدون بعد طبیعی مد اول ارتعاشی ساختمان در نسبت $e/a=0$ بر روی فونداسیون ساختمان برابر با ۹٪ اتفاق می‌افتد. به استثنای $e/a=3$ در تمامی نسبت‌های e/a بزرگ‌نمایی نسبت پاسخ شتاب طبقه سوم در حدود ۲٪ رخ می‌دهد. در طبقه دوم در تمامی نسبت‌های e/a نسبت

جدول ۳. پارامترهای مربوط به امواج لرزه‌ای اعمالی

Table 3. Parameters related to applied seismic waves

ردیف	رویداد/ایستگاه	تاریخ وقوع/زمان	بزرگی (Mw)	PGA	فرکانس غالب (هرتز)
۱	ایران، طیس / دیهوک	۱۹۷۸/۰۹/۱۶ ۱۵:۳۵	۷/۳۵	۰/۳۲۴ g	۵
۲	ایران، بم / آبراق	۲۰۰۳/۱۲/۲۶ ۱:۵۶	۶/۶۰	۰/۱۶۸ g	۱۲/۵
۳	ژاپن، کوبه / دانشگاه کوبه	۱۹۹۵/۰۱/۱۶ ۵:۴۶	۶/۹۰	۰/۴۲۵ g	۶/۲۵
۴	آمریکا، هلنا / دانشکده کارول	۱۹۳۵/۱۰/۳۱ ۱۸:۳۷	۶	۰/۱۶۱ g	۷/۱۴

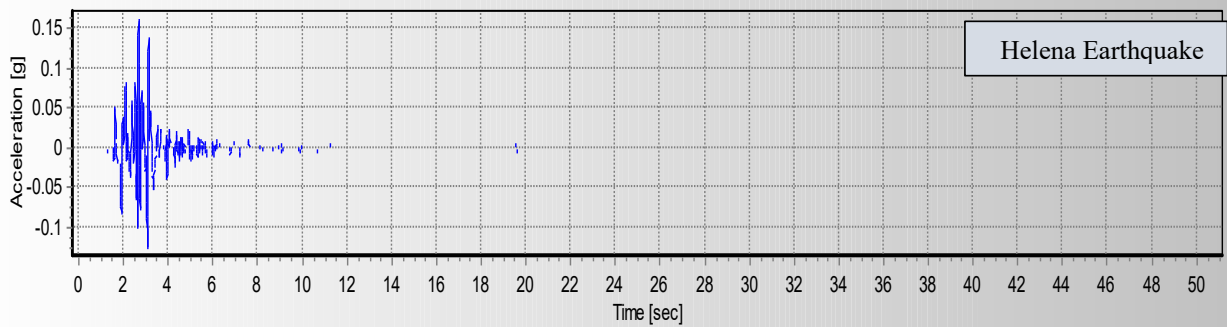
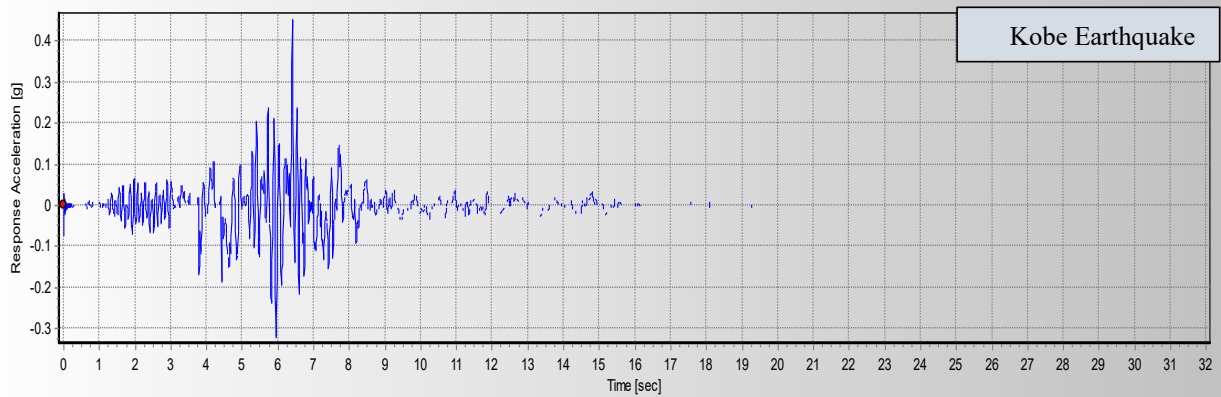
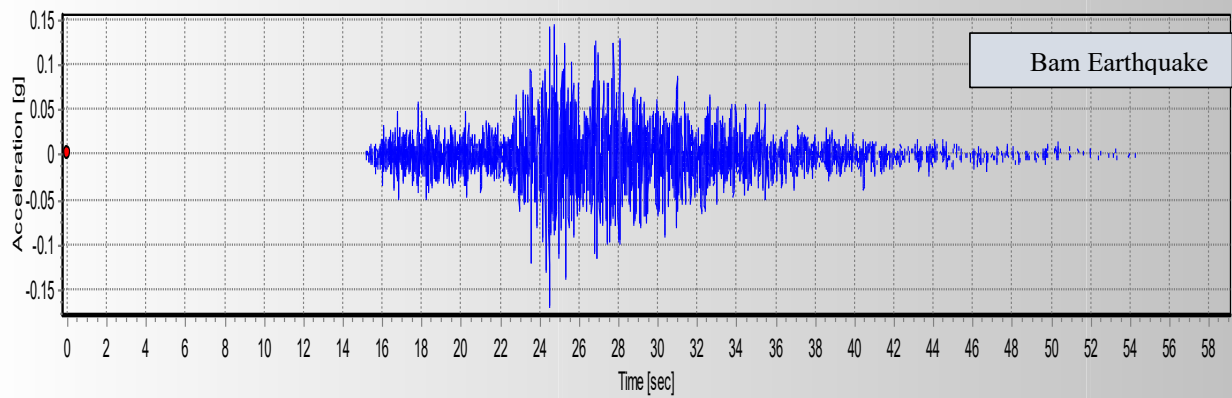
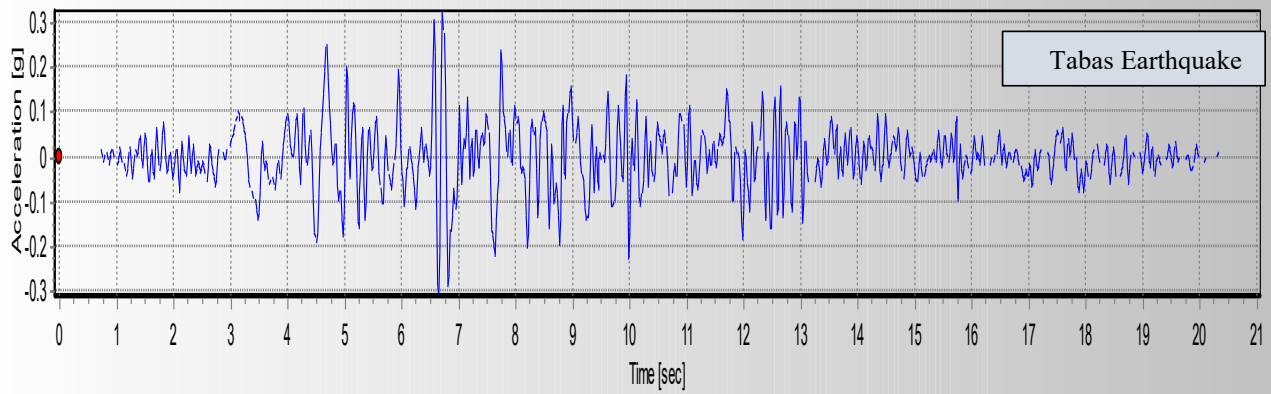
شکل ۱۸ مربوط به تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های اعمالی به بستر مدل‌سازی می‌باشد:

شکل ۱۹ تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای طیس، بم، کوبه و هلنا می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که میزان بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی طبقات ساختمان و همچنین الگوی رفتاری نسبت شتاب طبقات ساختمان تحت تأثیر نوع زلزله اعمالی می‌باشد. بیشترین بزرگ‌نمایی نسبت پاسخ شتاب مربوط به فونداسیون ساختمان در حدود ۵/۵٪ تحت تحریک زلزله طیس می‌باشد. بیشترین کوچک‌نمایی نیز مربوط به فونداسیون ساختمان تحت تحریک زلزله بم در حدود ۸/۵٪ می‌باشد. اشکال ۲۰ الی ۲۳ مقایسه بین تغییرات بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب (STF/SF) امواج لرزه‌ای اعمالی و امواج هارمونیک در پریودهای بدون بعد معادل با فرکانس غالب امواج لرزه‌ای مربوطه می‌باشد:

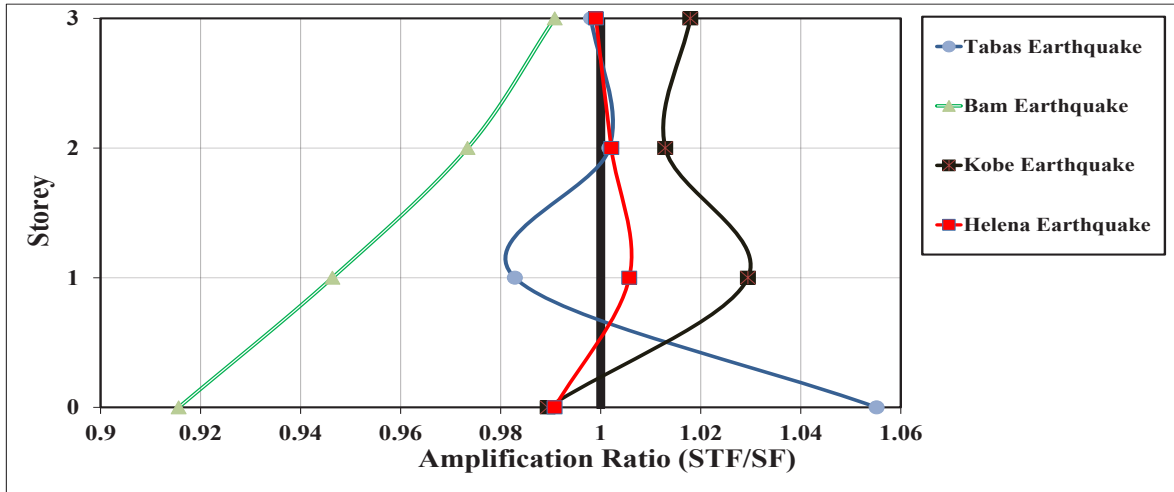
با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که در تمامی طبقات ساختمان به استثنای تراز فونداسیون موج هارمونیک با $\lambda/D=10$ بزرگ‌نمایی بیشتری را در قیاس با زلزله طیس ایجاد کرده است. بزرگ‌نمایی موج هارمونیک حدوداً در بازه ۲٪ الی ۴٪ به وقوع پیوسته است و این در حالی است که در طبقه ۱ ساختمان تحت تحریک زلزله طیس کوچک‌نمایی در حدود ۲٪ اتفاق افتاده است. الگوی کاهش نسبت پاسخ شتاب از روی فونداسیون تا طبقه ۳

تحت تحریک موج هارمونیک با $\lambda/D=10$ به صورت خطی کاهش یافته است و این در حالی است که در مورد زلزله طیس الگوی یکنواخت در تغییر نسبت پاسخ شتاب از فونداسیون تا طبقه ۳ مشاهده نشد. با توجه به شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که بر خلاف زلزله طیس تحت تحریک زلزله بم در تمامی طبقات ساختمان موج هارمونیک با $\lambda/D=4$ کوچک‌نمایی بیشتری را در قیاس با زلزله بم ایجاد کرده است. کوچک‌نمایی موج هارمونیک حدوداً در بازه ۱۸٪ در تمامی طبقات ساختمان به وقوع پیوسته است و این در حالی است که تحت تحریک زلزله بم کوچک‌نمایی در حدود ۱٪ الی ۹٪ اتفاق افتاده است که بیشترین میزان این کوچک‌نمایی روی تراز فونداسیون رخ داده است و تا طبقه ۳ الگوی خطی کاهش دارد. با توجه به شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که در تمامی طبقات ساختمان موج هارمونیک با $\lambda/D=8$ بزرگ‌نمایی بیشتری را در قیاس با زلزله کوبه ایجاد کرده است. بزرگ‌نمایی موج هارمونیک حدوداً در بازه ۴٪ الی ۵٪ به وقوع پیوسته است و این در حالی است که بزرگ‌نمایی زلزله کوبه در بازه ۱/۵٪ الی ۳٪ قرار گرفته و حتی ساختمان در تراز روی فونداسیون با کوچک‌نمایی در حد ۱٪ مواجه شده است. با توجه به شکل ۲۳ مشاهده می‌شود که در تمامی طبقات ساختمان موج هارمونیک با $\lambda/D=7$ بزرگ‌نمایی بیشتری را در قیاس با زلزله هلنا ایجاد کرده است. بزرگ‌نمایی موج هارمونیک حدوداً در بازه ۲٪ الی ۴٪ به وقوع پیوسته است و این در حالی است که زلزله هلنا تغییر چندانی در نسبت پاسخ شتاب طبقات نداده است؛ بنابراین با توجه به شکل‌های ۲۰ الی ۲۳



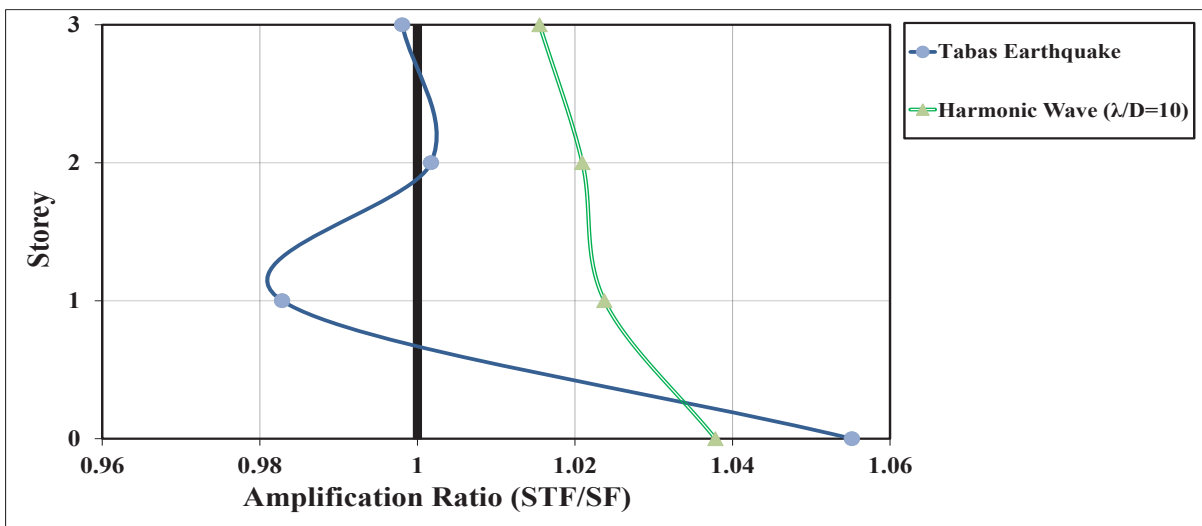
شکل ۱۸. تاریخچه زمانی شتاب مربوط به زلزله‌های طبس، بم، کوبه و هلنا

Fig. 18. Acceleration time history of Tabas, Bam, Kobe and Helena earthquakes



شکل ۱۹. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع ساختمان تحت تحریک امواج طیس، بم، کوبه و هلنا

Fig. 19. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in building height under the excitation of Tabas, Bam, Kobe and Helena waves

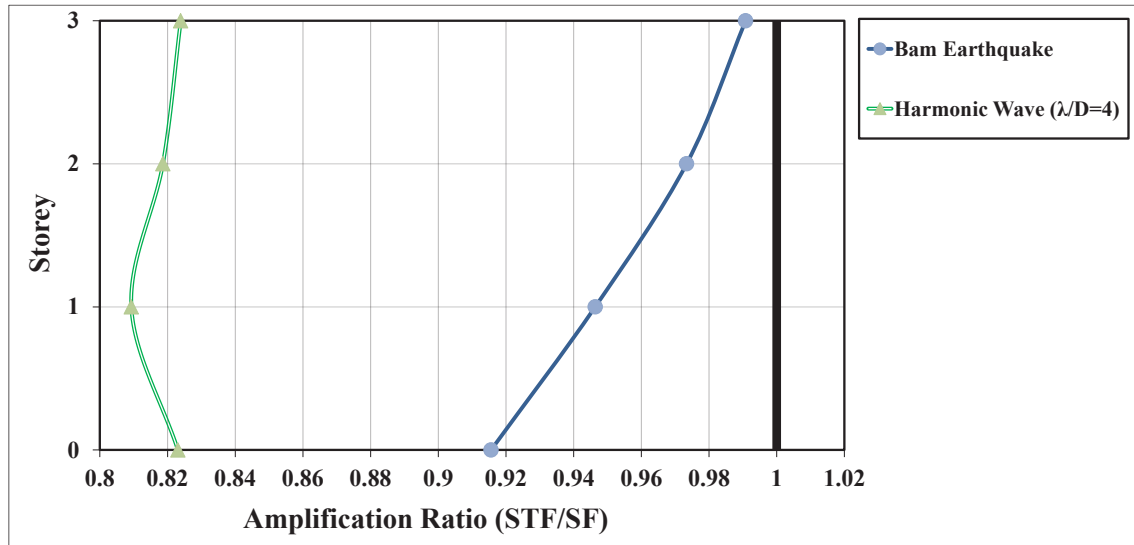


شکل ۲۰. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای طیس و موج هارمونیک با $\lambda/D=10$

Fig. 20. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building under the excitation of Tabas seismic waves and harmonic wave with $\lambda/D=10$

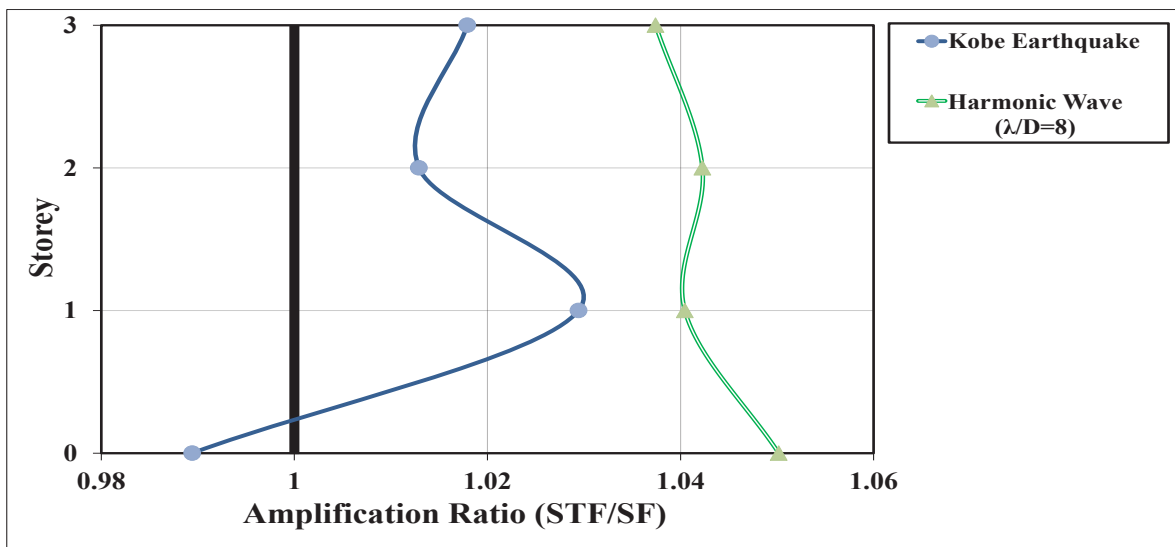
گوناگونی از فرکانس‌های متفاوت می‌باشند و از سویی دیگر می‌دانیم که پاسخ یک سیستم به امواج تحریکی اعمالی به شدت به فرکانس تحریک وابسته است، لذا با اعمال امواج لرزه‌ای با فرکانس‌های غالب متفاوت پس از برخورد با تونل که خود منشأ تفرق، تک سر و کانونی شدن امواج لرزه‌ای مابین تونل و سطح زمین به علت محبوس شدن امواج لرزه‌ای می‌شود، قاعدتاً تفاوت در الگوی تداخلی امواج به وجود آمده قادر به ایجاد الگوهای

مشاهده می‌شود که الگوی رفتاری و میزان تغییرات نسبت شتاب طبقات ساختمان در حالت (STF/SF) تحت امواج لرزه‌ای و امواج هارمونیک با پریود بدون بعد معادل با فرکانس غالب امواج واقعی زلزله، لزوماً با هم برابر نمی‌باشند و الگوهای رفتاری متفاوتی نسبت به هم دارند. در ارزیابی چرایی متفاوت بودن نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان با تغییر امواج لرزه‌ای می‌توان به این نکته اشاره کرد که از آنجا که امواج لرزه‌ای شامل طیف



شکل ۲۱. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای بم و موج هارمونیک با $\lambda/D=4$

Fig. 21. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building under the excitation of Bam seismic waves and harmonic wave with $\lambda/D=4$

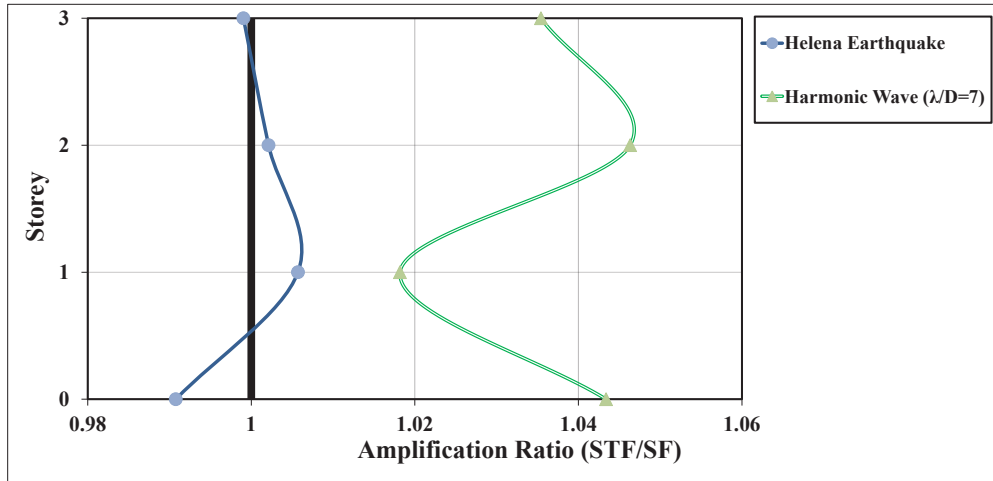


شکل ۲۲. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای کوبه و موج هارمونیک با $\lambda/D=8$

Fig. 22. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building under the excitation of Kobe seismic waves and harmonic wave with $\lambda/D=8$

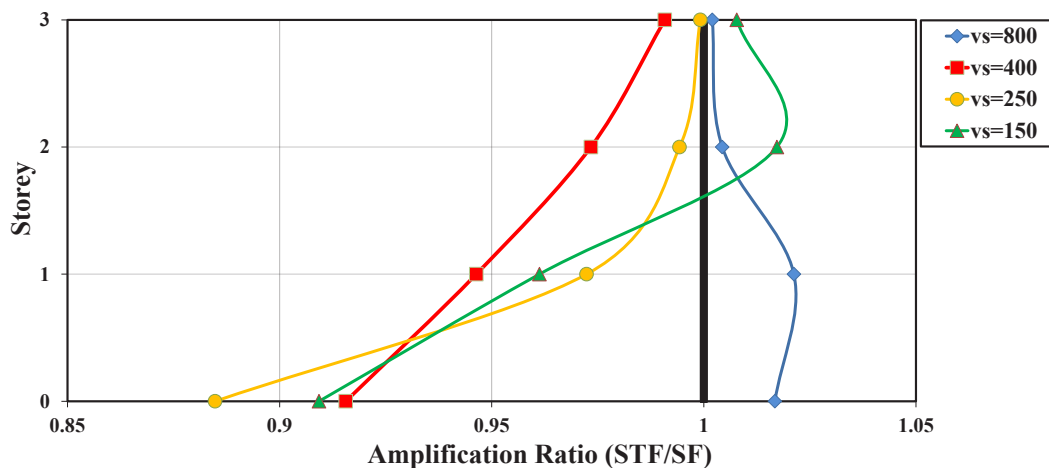
سپری شدن یک فاز زمانی پاسخ سیستم خود را در تطبیق با فرکانس موج اعمالی می‌یابد. بر این اساس متفاوت بودن نسبت پاسخ شتاب طبقات در نتیجه تغییر موج لرزه‌ای اعمالی با توجه به تأثیر اندرکنشی تونل و ساختمان بر تغییر مشخصات لرزه‌ای موج اعمالی امری مشهود و توجیه‌پذیر می‌باشد.

متفاوتی از نسبت پاسخ شتاب در روی سطح زمین می‌گردد. همچنین در معادله سختی - جرم ساختمان پاسخ ساختمان علاوه بر فرکانس طبیعی خود ساختمان به فرکانس موج اعمالی بستگی دارد به نحوی که پاسخ ماندگار یک سیستم به این فرکانس مربوط می‌شود به نحوی که پس از



شکل ۲۳. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای هلنا و موج هارمونیک با $\lambda/D=7$

Fig. 23. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building under the excitation of Helena seismic waves and harmonic wave with $\lambda/D=7$



شکل ۲۴. تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی شتاب (STF/SF) در ارتفاع برای ساختمان سه طبقه تحت تحریک امواج لرزه‌ای بم و خاک با سرعت موج برشی ۱۵۰، ۲۵۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ m/s

Fig. 24. Acceleration amplification ratio (STF / SF) changes in height for a three-story building under the excitation of Bam seismic waves and soil with shear wave velocities of 150, 250, 400 and 800 m/s

اساس طبقه‌بندی نوع زمین آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران انتخاب گردید. شکل ۲۴ تغییرات بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب حالت (STF/SF) طبقات یک ساختمان سه طبقه تحت تحریک زلزله بم در خاک‌ها با سرعت موج برشی متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که تغییر سرعت موج برشی خاک تأثیر خود را بر نسبت پاسخ شتاب طبقات در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان

۳-۴ اثر تغییر سرعت موج برشی خاک (V_s) بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان جهت بررسی اثر تغییر سرعت موج برشی خاک بر موضوع مورد مطالعه با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها و تنها با تغییر سرعت موج برشی خاک به بررسی موضوع پرداخته شد. موج دینامیکی اعمالی زلزله بم با خصوصیات مندرج در جدول ۲ می‌باشد. در این مطالعه ۴ نوع خاک از نوع I الی IV بر

۶- تأثیر منفی تونل در فرکانس‌های پایین با تغییر فاصله محوری از ساختمان با توجه به ایجاد بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب با بیشترین مقدار برابر ۱۴/۵٪ مشاهده شد. در فرکانس‌های بالا تونل تأثیر مثبت خود را بر پاسخ شتاب طبقات با بیشترین کوچک‌نمایی برابر ۳۰٪ گذاشته است.

۷- تغییر امواج واقعی زلزله می‌تواند باعث بزرگ‌نمایی، کوچک‌نمایی و یا عدم تفاوت در نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان شود. در قیاس بین امواج واقعی زلزله و امواج هارمونیک هم فرکانس با فرکانس غالب موج اعمالی در اکثر زلزله‌ها امواج هارمونیک بزرگ‌نمایی بیشتری را در پاسخ شتاب طبقات ایجاد کرده‌اند.

۸- تغییر در سرعت موج برشی خاک می‌تواند نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان را دچار بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی نماید که میزان در تغییر نسبت پاسخ شتاب طبقات تابع الگوی خاصی از افزایش و یا کاهش در نتیجه تغییر سرعت موج برشی خاک به صورت خطی نمی‌باشد.

با توجه به نتایج مطالعات انجام شده در نظر گرفتن اثر اندرکنش تونل و ساختمان بر نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان و سطح زمین امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد و می‌تواند در طراحی ایمن و اقتصادی‌تر سازه‌ها در زلزله مؤثر باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
a	شعاع تونل، m
B	عرض ساختمان، m
C	ماتریس میرایی
c_s	سرعت موج برشی در محیط پیوسته، m/sec
D	قطر تونل، m
d	عمق تونل، m
e	فاصله محوری تونل و ساختمان، m
f_{min}	فرکانس مرکزی مینیمم، Hz
h	عمق تونل، m
K	ماتریس سختی
K_v	سختی برشی $(N/m^2)/m$
K_n	سختی قائم $(N/m^2)/m$
M	ماتریس جرم
Ra	ضریب بزرگ‌نمایی
T	پریود
V_s	تاریخچه زمانی سرعت تحریک ورودی، m/sec

از خود نشان داده است. بیشترین بزرگ‌نمایی در نسبت شتاب در حدود ۲٪ در طبقه ۱ ساختمان واقع بر خاک دارای سرعت موج برشی 800 m/s اتفاق می‌افتد و کمترین کوچک‌نمایی مربوط به فونداسیون ساختمان واقع بر خاک با سرعت موج برشی 250 m/s در حدود ۱۱/۵٪ می‌باشد. در مورد خاک‌های دارای سرعت موج برشی ۱۵۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ میزان کوچک‌نمایی از روی فونداسیون تا طبقه ۳ کاهش یافته به نحوی که عملاً در طبقه ۳ اندرکنش تأثیر خود بر کوچک‌نمایی به نحو چشمگیری کاهش داده است به نحوی که بیشترین کوچک‌نمایی در این طبقه در ساختمان واقع بر خاک دارای سرعت موج برشی 400 m/s با ۱٪ کوچک‌نمایی اتفاق افتاده است. تأثیر اندرکنش در ساختمان واقع بر خاک با سرعت موج برشی 800 m/s به علت بزرگ‌نمایی کم با بیشترین مقدار حدود ۲٪ در روی فونداسیون و طبقه ۱ در نسبت پاسخ شتاب نسبت به سایر خاک‌ها کم‌تر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر اندرکنش تونل و ساختمان بر پاسخ لرزه‌ای طبقات ساختمان با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار FLAC 2D پرداخته شده است. تأثیر پارامترهایی از قبیل تغییر ارتفاع ساختمان، تغییر فاصله محوری تونل و ساختمان، تغییر امواج واقعی زلزله، تغییر سرعت موج برشی خاک بر اندرکنش تونل و ساختمان مورد مطالعه قرار گرفت. از تحلیل مطالعات پارامتری صورت گرفته نتایج زیر حاصل شد: ۱- تغییر در فرکانس موج اعمالی قادر به ایجاد بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی نسبت پاسخ شتاب طبقات در نتیجه اندرکنش تونل و ساختمان می‌باشد.

۲- در بررسی اثر تغییر ارتفاع ساختمان بر اندرکنش تونل و ساختمان، بیشترین بزرگ‌نمایی مربوط به فونداسیون ساختمان یک طبقه برابر ۵٪ و بیشترین کوچک‌نمایی برابر ۳۰٪ در طبقه دوم ساختمان پنج طبقه اتفاق می‌افتد.

۳- کمترین تفاوت در نسبت پاسخ شتاب طبقات به علت تغییر در ارتفاع ساختمان مربوط به سطح روی فونداسیون می‌باشد.

۴- تغییرات در نسبت‌های e/a با لحاظ نمودن اثر λ/D قادر به تغییرات در نسبت پاسخ شتاب طبقات ساختمان با الگوهای رفتاری متفاوت از بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی می‌گردد.

۵- در پریودهای بدون بعد پایین با افزایش نسبت e/a از میزان کاهش نسبت پاسخ شتاب کاسته می‌شود اما از یک الگوی خطی در کاهش نسبت پاسخ شتاب تبعیت نمی‌کند.

علائم یونانی

α	ثابت میرایی مرتبط با جرم
β	ثابت میرایی مرتبط با سختی
β_r	ضریب کاهش بار زنده
η	فرکانس بدون بعد
λ	طول موج، m
ζ	نسبت میرایی بحرانی
ζ_{min}	نسبت میرایی مینیمم
ρ	چگالی خاک، kg/m ³
σ_s	تاریخچه زمانی تنش برشی اعمالی، N/m ²
ω_i	سرعت زاویه‌ای، rad/sec

بالانویس

* شرایط مرجع

منابع

- interaction due to adjacent loaded pile row by 3D FEM. MATEC Web of Conferences, 192, 2018, 02051.
- [7] Rostami, A., Moghadam, A. S., Hosseini, M., and Asghari, N. Evaluation of Formation of Plastic Hinge and Seismic Behavior of Steel Structures Due to Soil - Structure - Tunnel Interaction. Journal of Earthquake and Tsunami, 14(3), 2019, 2050014.
- [8] Shoja, E. and Alielahi, H. An Investigation of the Seismic Interaction of Surface Foundations and Underground Cavities Using Finite Element Method. International Journal of Engineering, 33, 2020, 1721-1730.
- [9] Mayoral, J. M., and Mosqueda, G. Seismic interaction of tunnel-building systems on soft clay. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 139, 2020, 106419.
- [10] Mirhabibi, A., Soroush, A. Three-Dimensional Simulation of Interaction Between Surface Buildings and Twin Tunnelling Regarding the Surface Settlement. Geotech Geol Eng, 38, 2020, 5143–5166.
- [11] Miao, Y., Zhong, Y., Ruan, B., Cheng, K., and Wang, G. Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction. Tunnelling and Underground Space Technology, 106, 2020, 103629.
- [12] Xu, J., Franza, A., Marshall, A. M., Losacco, N., and Boldini, D. Tunnel-framed building interaction: comparison between raft and separate footing foundations. Geotechnique, 2020, 1–38.
- [13] Li, W., and Chen, Q. Seismic damage evaluation of an entire underground subway system in dense urban areas by 3D FE simulation. Tunnelling and Underground Space Technology, 99, 2020, 103351.
- [14] Yeganeh, N., Bolouri-Bazaz, J., Akhtarpour, A. Seismic analysis of the soil-structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79, 2015, 149-170.
- [15] Alielahi, M., Ramazani, M. Evaluation of Earthquake Magnification Pattern in Buildings Located on Boxed Underground Structures Journal of Earthquake Engineering, pp, 2016, 1-3. (in Persian(
- [1] Pitilakis, K., Tsinidis, G., Leanza, A., and Maugeri, M. Seismic behavior of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67, 2014, 1–15.
- [2] Zhou, Z., and Hu, H. Seismic response of building structure near tunnel. MATEC Web of Conferences, 95, 2017, 03012.
- [3] Wang, G., Yuan, M., Miao, Y., Wu, J., and Wang, Y. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system. Tunneling and Underground Space Technology, 76, 2018, 145–159.
- [4] Abate, G., and Massimino, M. R. Numerical modeling of the seismic response of a tunnel-soil-aboveground building system in Catania (Italy). Bulletin of Earthquake Engineering, 15 (1), 2016, 469–491.
- [5] Wang, G., Yuan, M., Ma, X., and Wu, J. Numerical study on the seismic response of the underground subway station- surrounding soil mass-ground adjacent building system. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 11(4), 2017, 424–435.
- [6] Heama, N., Jongpradist, P., Lueprasert, P., and Suwansawat, S. Investigation on pile-soil-tunnel

- [17] Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., and Sofianos, A. Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures. In *Dynamic Response and Soil Properties*, 2007, 1-10.
- [16] Rabeti Moghadam, M., and Baziar, M. H. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 2016, 81–97.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Sarvi, M. Rabeti Moghadam, M. Parvizi, A. A. Mansourkhani, *Effect of Tunnel and Building Interaction on the Seismic Response of Building by Numerical Modeling*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 671-694.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19035.7041



