Archive of SID

مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحه ۵۶ – ۷۱

بررسی تأثیر مشخصات دینامیکی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای و تحلیل و طراحی ساختمان‌ها

سعید غفارپور جهرمی[1*] و سعیده محمدی[2]

[1] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
[2] کارشناسی ارشد، مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲)

چکیده

بررسی و مطالعه پراکندگی خسارات زلزله‌های مختلف بیانگر اهمیت تأثیر ساختگاه بر مشخصات و خصوصیات لرزش زمین در سطح است. از سوی دیگر، اثر محلی ساختگاه نقش مهمی در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله دارد. طبیعت اثر محلی ساختگاه را می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف مانند تحلیل ساده نظریه پاسخ زمین، اندازه‌گیری جنبش واقعی سطحی و زیرسطحی در همان ساختگاه و اندازه‌گیری جنبش سطحی در ساختگاه‌هایی با شرایط متفاوت نسبت به ساختگاه موردنظر تشریح کرد. در این مقاله عوامل تأثیرگذار بر حرکت زمین و پاسخ ساختگاه تحت تأثیر زلزله طبس و بم به روش عددی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC در ساختگاه‌های نوع ۲ و نوع ۳ در شهر تهران بررسی و ارزیابی می‌شود. برای بررسی تأثیر پارامترهای توده خاک بر پاسخ زمین، مطالعه پارامتریک انجام شده است. در این روش شتاب بیشینه سطح زمین و ضریب تشدید مقایسه می‌شوند. این دو کمیت تأثیر مهمی بر جرم سازه و نیروی زلزله وارد بر سازه دارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد شتاب بیشینه سطح زمین با شتاب سنگ بستر متفاوت است و به‌طور درخور توجهی تابع مشخصات ساختگاه و لایه زمین‌شناسی است. مطابق نتایج، افزایش سرعت و عمق سنگ بستر (برای هر دو نوع خاک)، تأثیر چشمگیری بر شتاب سطح زمین و ضریب تشدید لایه‌های سطحی خاک دارد.

واژه‌های کلیدی: مشخصات دینامیکی خاک، پاسخ زمین، روش عددی، طیف پاسخ ساختگاه

* نگارنده رابط: saeed_ghf@sru.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱ مقدمه

هنگام وقوع زلزله، امواج لرزه‌ای که از چشمه زلزله به اطراف منتشر می‌شوند، به صورت‌های مختلفی در امتداد پوسته جامد زمین حرکت می‌کنند. با رسیدن این امواج حجمی به سطح زمین، ارتعاش و امواج سطحی تا مدت زمان مشخصی ایجاد می‌شود. استهلاک این امواج در سطح به‌کندی صورت می‌پذیرد. شدت، مدت و دوام لرزش در سطح زمین و یک منطقه خاص نه تنها به بزرگای زلزله و فاصله کانونی آن وابسته است بلکه به خصوصیات و مشخصات ساختگاه و لایه خاک نیز بستگی دارد. لرزش سطح زمین از مهم‌ترین خطرهای زلزله شناخته می‌شود؛ زیرا باعث تمامی خرابی‌ها در منطقه تحت تأثیر می‌شود. امواج زلزله بخش زیادی از مسیر چشمه تا سطح زمین را در بستر سنگی طی می‌کنند، اما قسمت پایانی مسیر اغلب در لایه‌های سطحی خاک سپری می‌شود که خصوصیات این لایه‌ها می‌تواند ماهیت ارتعاشات سطح زمین را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. لایه‌های خاک می‌توانند امواج زلزله را بسته به فرکانس ارتعاشات، مستهلک یا تشدید کنند؛ لذا این لایه‌ها نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های جنبش زمین در یک زلزله ایفا می‌کنند (کرامر، ۱۹۹۶).

در گذشته، پژوهشگران به تأثیر ساختگاه بر جنبش لرزه‌ای سطح زمین توجه می‌کردند، اما تقریباً از سال ۱۹۲۰ به بعد، اهمیت آن در طراحی سازه‌ها بیشتر بررسی شد و مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شد. از دیدگاه نظریه کشسانی خطی، اثر ساختگاه و بزرگ‌نمایی ناشی از نهشته‌های رسوبی بر لرزش‌های خفیف ناشی از زلزله‌های کوچک به‌خوبی قابل استنباط و درک است، اما بزرگ‌نمایی جنبش نیرومند زمین ناشی از زلزله‌های بزرگ، تفاوت‌های زیادی با پیش‌بینی‌ها دارد؛ برای مثال فِیلد و همکاران (۱۹۹۷، ۱۹۹۸) با بررسی اثر ساختگاه از دیدگاه ژئوتکنیکی، مطالعات آزمایشگاهی مختلفی را انجام دادند و نواقص قانون هوک و نظریه کشسانی خطی را اثبات کردند. ایشان نشان دادند رفتار پلاستیک خاک در کرنش‌های بزرگ باعث کاهش بزرگ‌نمایی می‌شود (فِیلد و همکارن، ۱۹۹۷). بااین‌حال، لرزه‌شناسان و زمین‌شناسان همچنان در مورد اثر رفتار غیرخطی خاک بر نگاشت‌های زلزله به دیده شک می‌نگرند و البته به نظر می‌رسد علت آن، تعداد به‌نسبت کم شواهد مبتنی بر جنبش نیرومند سازگار با نظریه کشسانی خطی است (فِیلد و همکاران، ۱۹۹۸). روش‌های تحلیلی بررسی پاسخ ساختگاه عوامل زیادی را شامل می‌شود که می‌توانند جنبش لرزه‌ای و طیف پاسخ متناظر آن را تحت تأثیر قرار دهند، اما مسئله مهم این است که تأثیر این پارامترها بر تحلیل پاسخ ساختگاه نیز باید بررسی شود تا جنبش زمین در ساختگاه به‌صورت مطمئنی ارزیابی شود. در ادامه، برخی مطالعات انجام‌شده در این زمینه ارائه می‌شود. جوینر و چن (۱۹۷۵) و هوانگ و لی (۱۹۹۱) اثر پارامترهای ساختگاه از قبیل مدول برشی سکانت (مماسی) و نسبت میرایی در کرنش‌های پایین را در انواع خاک رس و ماسه با عمق آب زیرزمینی و عمق سنگ بستر متفاوت بررسی کردند. تحقیق آنها نشان داد نسبت میرایی در کرنش‌های پایین و تغییرات سطح آب، فقط اثر ثانویه بر پاسخ ساختگاه دارد. بُرجا و همکاران (۱۹۹۹) از مدل غیرخطی به روش اجزاء محدود برای بررسی اثر رفتار هیسترزیس خاک استفاده و نتایج را با پاسخ ثبت‌شده در گمانه‌های آزمایش لرزه‌ای زلزله سال ۱۹۸۶ تایوان مقایسه کردند. مدل‌سازی توده خاک به‌صورت سه‌بعدی و با رفتار غیرخطی، با صرف‌نظر کردن از محدوده کشسانی و محاسبه کاهش سختی در بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است. دقت روش پیشنهادی در این بررسی، مناسب تشخیص داده شد، اما مقادیر شتاب بیشینه اندکی کمتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده است. وُنگ و همکاران (۲۰۰۶) با مدل‌سازی عددی برای سه نوع خاک در هُنگ‌کنگ و

www.SID.ir

Archive of SID

تحت نوسان لرزه‌ای شدید، به مطالعه پاسخ لرزه‌ای ساختگاه پرداختند. ایشان با کمک نرم‌افزار FLAC و مدل رفتاری سطح حدی خاک، پاسخ ساختگاه را بررسی و با مدل خطی مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که طیف پاسخ ساختگاه به مشخصات لایه‌های خاک، مدل رفتاری خاک و سنگ بستر وابسته است به‌طوری‌که رفتار غیرخطی خاک سبب کم شدن شتاب بیشینه سطح زمین در بسیاری از ساختگاه‌هایی می‌شود که شتاب بیشینه سنگ بستر در آنها کمتر از g ۰/۱ است. براساس این تحقیق، وقتی سطح شتاب اعمالی کمتر از g ۰/۱ باشد، نتایج تحلیل مدل رفتاری حدی با نتایج مدل رفتاری خطی سازگار است، اما با افزایش مقدار شتاب، در مدل غیرخطی شتاب سطح زمین کمتر از روش خطی به‌دست‌می‌آید که ناشی از تأثیر رفتار الاستوپلاستیک خاک است. طباطبایی‌فر و همکاران (۲۰۱۱) با لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه، تأثیر مشخصات دینامیکی خاک و عمق سنگ بستر را بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌هایی بررسی کردند که قاب خمشی داشتند. در این مطالعه یک ساختمان ده طبقه روی پی سطحی بررسی شد. در پژوهش گفته‌شده، سرعت موج برشی سنگ بستر کمتر از m/s ۶۰۰ و عمق آن معادل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر فرض و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D انجام شده است. نتایج نشان داد خصوصیات دینامیکی خاک نظیر سرعت موج برشی و عمق سنگ بستر، در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها تأثیر بسیار محسوسی دارد. همچنین مشاهده شد با کاهش سرعت موج برشی در خاک و افزایش عمق سنگ بستر، تغییر مکان جانبی و جابه‌جایی میان‌طبقه سازه‌ها افزایش می‌یابد. نیلیما و همکاران (۲۰۱۲) پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را تحت شرایط مختلف خاک بررسی کردند. در این تحقیق که در یکی از شهرهای هندوستان انجام شد، ساختمان‌های سه طبقه روی لایه خاک با مشخصات مختلف مطالعه شدند. نتایج نشان داد با افزایش سختی خاک، فرکانس طبیعی و اساسی لایه افزایش و برش پایه کاهش می‌یابد. این تغییرات در خاک‌های نرم بسیار محسوس‌تر است. به‌طورکلی نتایج نشان دادند که با کاهش سختی خاک، تغییر مکان و جابه‌جایی سطح زمین افزایش می‌یابد؛ ازاین‌رو تأثیر اندرکنش خاک و سازه و همچنین ساختگاه در طراحی سازه‌های مهم مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، مخازن ذخیره‌سازی مایعات، سدها و غیره را نمی‌توان در طراحی لرزه‌ای نادیده گرفت. حسینی و اسدالهی‌پژوه (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار FLAC، پاسخ ساختگاه را به روش معادل خطی و با مدل‌های پلاستیک بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از مدل‌های رفتاری با قابلیت تسلیم باعث می‌شود شتاب و طیف پاسخ سطح زمین همواره کمتر از روش معادل خطی پیش‌بینی شود که این نتیجه ناشی از رفتار خاک است. چوب‌بستی و همکاران (۲۰۱۴) پاسخ ساختگاه را در شهر بابُل با تقسیم‌بندی شهر به پنج ناحیه مختلف از نظر ساختگاه بررسی و ارزیابی و طیف پاسخ حاصل را با طیف پاسخ آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد طیف پاسخ حاصل از مدل‌های الاستوپلاستیک، پایین‌تر از طیف پیشنهادی آیین نامه ۲۸۰۰ است. رگنیر و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر رفتار غیرخطی خاک را در تحلیل ساختگاه مطالعه کردند که نتیجه بررسی آنها نشان داد تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها باید با توجه به رفتار واقعی خاک انجام شود. در پژوهش مارکهام و همکاران (۲۰۱۶) که درباره تأثیر تنش‌های مؤثر غیرخطی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای بود، تأثیرگذاری وضعیت و نسبت تنش‌های درجا بر مشخصات دینامیکی ساختگاه آشکار شد. رحمانی و همکاران (۲۰۱۴) با تحلیل سه‌بعدی، تأثیر تحلیل غیرخطی پیوسته را بر رفتار ساختگاه مسیر یک راه به‌خصوص در محل کوله پل‌ها بررسی و ارزیابی کردند. در این بررسی مشخص شد مشخصات هندسی و دینامیکی لایه تأثیر محسوس بر سازه پل دارد. کرامر و همکاران (۲۰۱۵)

www.SID.ir

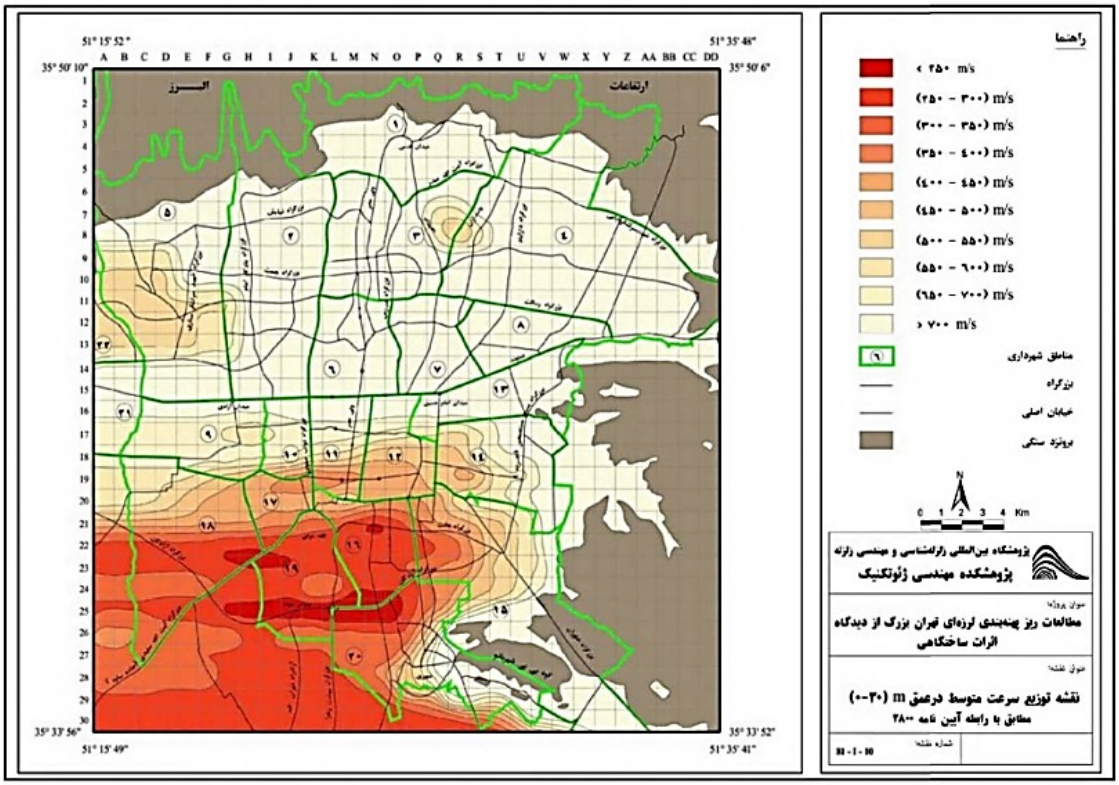
Archive of SID

درباره تأثیر مشخصات لایه‌های سطحی خاک بر پاسخ ساختگاه و جنبش سطح زمین در زمان زلزله تحقیق کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد جنبش سطح زمین در زمان زلزله به لایه‌بندی و مشخصات خاک، شدت، مدت و فرکانس ارتعاش وابسته است.

بررسی پژوهش‌های گفته‌شده نشان می‌دهد عوامل و متغیرهای مختلفی بر مشخصات ساختگاه و تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله تأثیرگذار هستند که مشخصات لایه‌بندی خاک و پارامترهای لرزه‌ای زلزله از مهم‌ترین آنها است. با توجه به اهمیت این موضوع و مطالعات انجام‌یافته در مناطق مختلف، در پژوهش حاضر تلاش می‌شود عوامل تأثیرگذار بر جنبش زمین و پاسخ ساختگاه برای دو نوع ساختگاه شامل خاک نوع ۲ و ۳ (مطابق با آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰) در شهر تهران بررسی و ارزیابی شود. این مطالعه به روش عددی با نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D انجام شده است. به‌منظور تحلیل دینامیکی ساختگاه از دو شتاب‌نگاشت زلزله‌های طبس و بم استفاده و تأثیر مشخصات دینامیکی خاک بر پاسخ ساختگاه بررسی شده است. در این بررسی شتاب بیشینه سطح زمین و تابع تشدید در شرایط مختلف مقایسه شده‌اند تا میزان و نحوه تأثیر هر پارامتر بر پاسخ ساختگاه مشخص شود (گزارش ژئوتکنیک مجتمع مسکونی افق، ۱۳۹۰).

۲ ساختگاه‌های مطالعه‌شده

مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مشخصات ساختگاه براساس ویژگی‌ها و لایه‌بندی به چهار نوع مختلف از نوع یک تا نوع چهار طبقه‌بندی می‌شود. طبق مطالعات و کاوش‌های



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی سرعت موج برشی برای تشخیص نوع ساختگاه در شهر تهران (جعفری و همکاران، ۱۳۸۲)

www.SID.ir

Archive of SID

مختلف انجام‌شده در شهر تهران، پهنه‌بندی خاک در بسیاری از مناطق از نوع ۲ و ۳ است. ازجمله این مطالعات می‌توان به مطالعه جعفری و همکاران (۱۳۸۲) اشاره کرد (شکل ۱)؛ بنابراین در پژوهش حاضر نیز به بررسی همین دو نوع ساختگاه اکتفا شده است. داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق از مطالعات ژئوتکنیکی مهندسان مشاور باران خاک استخراج شده‌اند. مشخصات ساختگاه نوع ۲ از کاوش‌های ژئوتکنیکی در محل احداث یک مجتمع تجاری در خیابان گلستان استخراج شده و مطالعات و بررسی‌ها در محل احداث پروژه با حفر گمانه‌های تحقیقاتی، آزمایش‌های صحرایی، نمونه‌گیری از لایه‌های خاک و انجام آزمایش‌های مکانیک خاک صورت پذیرفته است.

محققان مختلفی به بررسی و شناخت گسل‌های گستره تهران پرداخته‌اند (قریشی و ارژنگ، ۱۳۸۷). براساس نقشه گسل موجود، نزدیک‌ترین گسل در مجاورت پروژه مورد مطالعه، گسل شیان و قنات کوثر به طول تقریبی ۱۸ کیلومتر است که راستای تقریبی شرقی-غربی دارد. طول گسل و کمترین فاصله گسل‌های موجود در منطقه تا ساختگاه پروژه در جدول ۱ نشان داده شده است (گزارش ژئوتکنیک مجتمع تجاری شمشاد، ۱۳۹۰). داده‌های ثبت‌شده از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهند که زلزله‌های حوزه نزدیک ویژگی‌های متفاوتی نسبت به زلزله‌های حوزه دور دارند و جنبش زمین در اثر این زلزله‌ها تحت تأثیر امتداد گسل است. محدوده کمتر از ۲۰ کیلومتر در اطراف گسل به‌عنوان حوزه نزدیک شناخته می‌شود؛ لذا با توجه به اطلاعات جدول ۱، تحلیل‌های این تحقیق در حوزه نزدیک انجام شده است.

جدول ۱. گسل‌های موجود در نزدیکی ساختگاه نوع ۲ (گزارش ژئوتکنیک مجتمع تجاری شمشاد، ۱۳۹۰).

نام	طول (km)	فاصله (km)
نیاوران	۱۸	۶/۵
شیان	۱۸	۰/۴
نارمک	۲/۵	۲/۵
داودیه	–	۲/۷

مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، این منطقه در محدوده با خطر نسبی بسیار زیاد قرار دارد و مقدار شتاب مبنای طرح $a = 0/35\ g$ باید لحاظ شود. براساس آزمایش‌های ژئوفیزیکی درجا، میانگین سرعت موج برشی لایه‌ها تا عمق ۳۰ متر حدود ۵۷۰ متر بر ثانیه است؛ بنابراین نوع ساختگاه جهت تعیین ضریب بازتاب سازه از نوع ۲ برآورد می‌شود. مشخصات لایه‌بندی خاک محدوده منطقه مورد نظر در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است (گزارش ژئوتکنیک مجتمع تجاری شمشاد، ۱۳۹۰).

جدول ۲. لایه‌بندی ساختگاه نوع ۲

سرعت موج برشی (m/s)	اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kN/m^2)	وزن مخصوص (kN/m^3)	رده‌بندی خاک	عمق (m)
۴۰۰	۳۲	۱/۶	۱۹	GM	۰ -۴
۶۷۴	۳۵	۴	۱۹/۱	SC	۴ -۷
۶۷۴	۳۷	۲/۵	۱۹/۲	GM	۷ -۱۰
۶۷۴	۳۸	۸	۱۹/۸	SC	۱۰ -۱۴
۶۷۴	۳۸	۳	۲۰	GM	۱۴ -۱۷
۵۸۷	۳۹	۱۰	۲۰/۵	SC	۱۷ -۲۴
۵۸۷	۴۰	۵	۲۱	GM	۲۴ -۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. مقطع لایه‌بندی ساختگاه نوع ۳

سرعت موج برشی(m/s)	اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kN/m^2)	وزن مخصوص (kN/m^3)	نوع خاک	عمق (m)
۱۷۵	۲۸	۵	۱۹/۳۰	SC	۰-۸
۲۷۵	۳۰	۳	۱۹/۶	GM	۸-۱۴
۳۷۲	۳۲	۷	۱۹/۳	SC	۱۴-۳۰

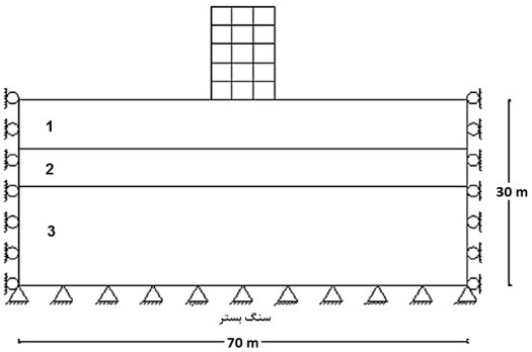
مشخصات ساختگاه نوع ۳ از کاوش‌های ژئوتکنیکی محل احداث یک برج تجاری-مسکونی در خیابان مقدس اردبیلی در منطقه یک تهران استخراج شد. طبق نتایج آزمایش ژئوفیزیکی درجا، میانگین سرعت موج برشی لایه‌ها تا عمق ۳۰ متر در این ساختگاه حدود ۲۷۴ متر بر ثانیه است؛ بنابراین نوع خاک با استناد به آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) از نوع ۳ برآورد می‌شود. لایه‌بندی خاک در جدول ۳ و فاصله ساختگاه مورد مطالعه تا مهم‌ترین گسل‌های نزدیک در جدول ۴ آورده شده است (گزارش ژئوتکنیک مجتمع مسکونی افق، ۱۳۹۰).

جدول ٤. گسل‌های موجود در نزدیکی ساختگاه نوع ۳

نام	طول (km)	فاصله (km)
راندگی نیاوران	۱۸	۰/۲
شمال تهران	۷۵	۲
گسل محمودیه	۱۱	۰/۵

۳ مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی

امروزه استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای مختلف در حوزه مهندسی ژئوتکنیک کاربرد فراوانی دارد. قابلیت شبیه‌سازی در ترسیم مدل، امکان تعریف ویژگی‌های رفتاری مختلف برای مصالح با مشخصات متفاوت و همچنین تحلیل مسائل به روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود با امکان بررسی دقت موردنیاز و زمان تحلیل، تأثیر بسزایی در انتخاب نرم‌افزار دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC نسخه ۴ استفاده شده است. مدل عددی به‌کارگرفته‌شده برای داده‌های موجود، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این مدل‌سازی برای درنظرگرفتن شرایط اولیه تنش و کرنش، ابتدا همه مدل‌ها در حالت استاتیکی و تحت بار ثقلی تحلیل شدند سپس بار دینامیکی زلزله اعمال شد. ابعاد شبکه در نتایج تحلیل مؤثر است. هرچه شبکه ریزتر باشد، دقت و زمان تحلیل هم افزایش می‌یابد. همچنین اندازه هر جزء باید به نحوی انتخاب شود که امکان گذر موج در آن فراهم شود. برای شبکه‌بندی نیز از اجزای چهارگرهی استفاده شده است. برای تعیین ابعاد بهینه در مدل دینامیکی، تحلیل حساسیت نسبت به ابعاد مدل صورت پذیرفت. برای مشخص شدن رابطه تنش-کرنش باید از مدل رفتاری مناسب استفاده کرد؛ در این بررسی به دلیل معتبر بودن، از مدل رفتاری سخت‌شونده استفاده شده است. استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب برای تحلیل‌های دینامیکی توصیه نمی‌شود (دستگول، ۲۰۰۴).

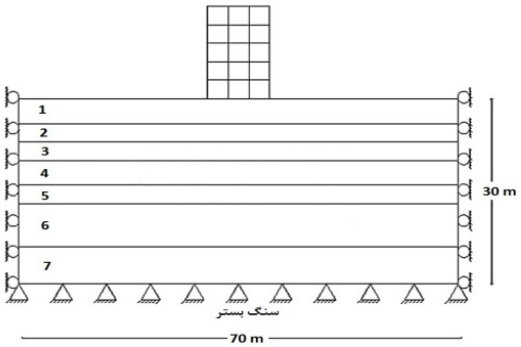


شکل ۲. نمونه مدل خاک و سازه برای خاک نوع ۲

بخش مهم دیگر در مدل‌سازی عددی در مسائل ژئوتکنیکی، انتخاب فاصله و شرایط مرزی مناسب در مدل است. مرزها باید در فاصله‌ای از سازه اصلی قرار بگیرند که تأثیری بر رفتار نداشته باشند. همچنین باید شرایط

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. نمونه مدل خاک و سازه برای خاک نوع ۳

مرزی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی به نحوی انتخاب شود که بتواند اثر نیم‌بی‌نهایت بودن مدل را نشان دهد. جدول ۵ نتایج شتاب افقی و جابه‌جایی بیشینه سطح زمین را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. اگر طول مدل بیش از ۶۰ متر فرض شود، تغییر محسوسی در نتایج تحلیل حاصل نمی‌شود؛ بنابراین در این تحقیق بُعد طولی مدل، ۷۰ متر انتخاب شده است. در حالت استاتیکی برای درنظرگرفتن نیم‌بی‌نهایت بودن مدل، دو مرز عمودی شرایط تکیه‌گاه مفصلی را دارند. به‌این‌ترتیب، امکان نشست در مرزها وجود خواهد داشت، اما امکان تغییر مکان جانبی در مرزها از بین می‌رود. مرز پایینی مدل هم در هر دو جهت امکان حرکت نخواهد داشت. این شرایط مرزی از لحاظ فیزیکی در مسائل ژئوتکنیکی هم قابل قبول خواهد بود، اما در مرحله تحلیل دینامیکی، باید شرایط مرزی را متفاوت درنظرگرفت. موج دینامیکی به‌علت وجود و برخورد با مرزهای عمودی به داخل مدل بازتاب می‌شود، اما در شرایط واقعی چنین بازتاب موجی وجود ندارد؛ بنابراین شرایط مرزی با اعمال مرزهای آرام انجام می‌شود. تحریک دینامیکی موج زلزله از مرز پایین به مدل اعمال می‌شود. ازآنجایی‌که نرم‌افزار مورد استفاده توانایی درنظرگرفتن جرم ساختگاه را تحت نیروی زلزله دارد، در این تحقیق از این ویژگی نیز بهره برده شده است.

برای بارگذاری، با توجه به طرح تفصیلی شهر تهران، تعداد طبقات ساختمان، پنج طبقه انتخاب شده است و بار گسترده مربوطه نیز حدود ۵۰ کیلوپاسکال محاسبه و در طول ۱۰ متر (معادل عرض یک ساختمان) در سطح زمین به مدل اعمال شده است.

جدول ۵. مشخصات ابعاد مدل‌سازی عددی

طول مدل (m)	۳۰	۵۰	۶۰	۷۰
شتاب افقی بیشینه سطح (g)	۱/۶۸	۱/۵۳	۱/۴۷	۱/۴۸
جابه‌جایی افقی ماندگار (cm)	۰/۶	۱/۲	۲/۴۵	۲/۵
جابه‌جایی قائم ماندگار (cm)	۱/۱	۱/۶۳	۱/۲	۱/۲

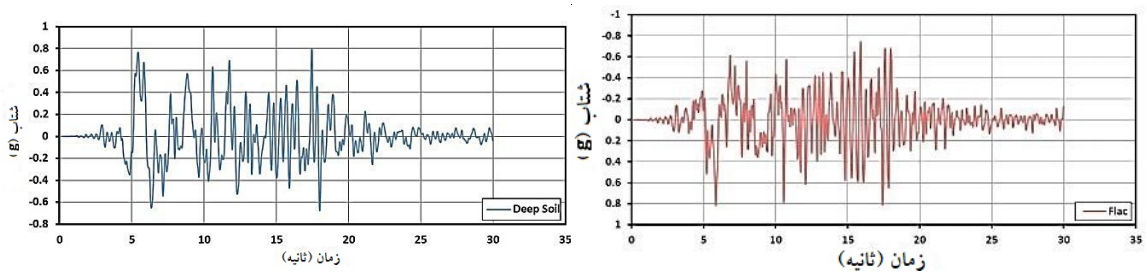
برای اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و دقت‌سنجی مدل، نمودارهای شتاب و تغییرمکان سطح زمین مستخرج از مدل‌سازی با دو نرم‌افزار FLAC و DEEPSOIL با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این بررسی برای تحلیل در نرم‌افزار DEEPSOIL از روش خطی معادل استفاده شده است. ساختگاه مورد بررسی از نوع ۳ و بدون سربار است. جنبش ورودی مدل، شتاب‌نگاشت زلزله بم است. تاریخچه زمانی شتاب استخراج‌شده از هر دو نرم‌افزار در شکل ۴ و دامنه طیف فوریه در شکل ۵ نشان داده شده است. خروجی دو نرم‌افزار تقریباً یکسان است. شتاب بیشینه حاصل از هر دو نرم‌افزار که تقریباً در زمان‌های مشابه رخ می‌دهد، حدود ۰/۷ g است و اختلافی کمتر از ۵ درصد با هم دارند.

۴ مشخصات جنبش ورودی و زلزله طرح

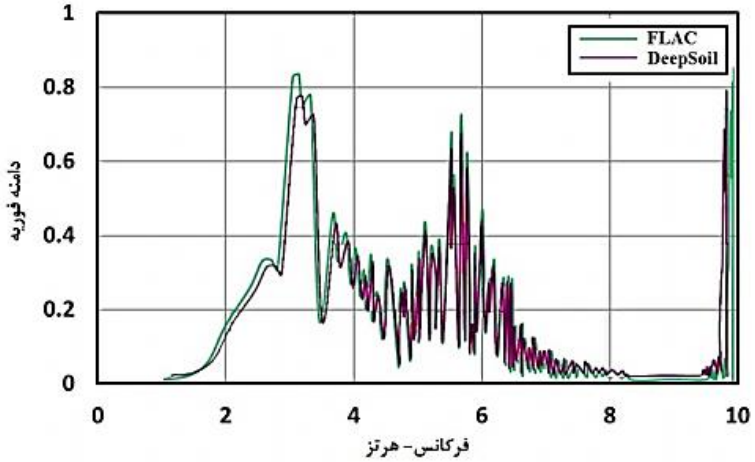
بعد از ایجاد تنش‌های اولیه و اعمال بارگذاری استاتیکی در مدل عددی، بارگذاری زلزله‌ها به‌صورت تاریخچه زمانی شتاب افقی به سنگ بستر در عمق ۳۰ متری انجام می‌شود. در این مرحله از اثر شتاب قائم زلزله

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤. مقایسه تاریخچه زمانی شتاب حرکت ورودی زلزله در نرم‌افزار FLAC و نرم‌افزار DEEPSOIL برای خاک نوع ۳



شکل ۵. مقایسه طیف فوریه پاسخ حرکت ورودی زلزله در نرم‌افزار FLAC و نرم‌افزار DEEPSOIL برای خاک نوع ۳

صرف‌نظر می‌شود. نگاشت زلزله را نمی‌توان به‌صورت خام استفاده کرد؛ در ابتدا باید تصحیح خط پایه صورت گیرد و فرکانس‌های بالا فیلتر شوند. اگر از شتاب‌نگاشت پردازش‌نشده به‌عنوان تاریخچه زمانی استفاده شود، ممکن است مدل در نرم‌افزار FLAC 2D پس از پایان حرکت ارتعاشی، تغییر مکان ماندگار نشان دهد. این موضوع ناشی از این حقیقت است که جواب انتگرال‌گیری در انتهای تاریخچه زمانی زلزله صفر نمی‌شود. برای از بین بردن تغییر مکان ماندگار، از تصحیح خط پایه استفاده می‌شود. از سوی دیگر، نگاشت زلزله شامل فرکانس‌های کم تا زیاد است. فرکانس‌های زیاد تأثیری در رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی ندارند ولی منجر به کاهش شدید گام زمانی و درنتیجه افزایش زمان تحلیل می‌شوند؛ بنابراین فرکانس‌های بیشتر از ۱۰ هرتز در نگاشت، قبل از اعمال به مدل فیلتر می‌شوند. برای شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق، تصحیح خط پایه به روش USGC (بور و همکارانش) اعمال شده است.

تعیین حرکت ورودی مناسب در سنگ بستر یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی در تحلیل پاسخ زمین است. به‌این‌منظور لازم است از شتاب‌نگاشت منطقه‌ای با منشأ یکسان استفاده شود، اما در گستره شهر تهران تاکنون چنین شتاب‌نگاشتی ثبت نشده است؛ بنابراین از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های طبس و بم در تحلیل دینامیکی استفاده شد. این نگاشت‌ها ابتدا با نرم‌افزار سایزموسیگنال برای یافتن

www.SID.ir

Archive of SID

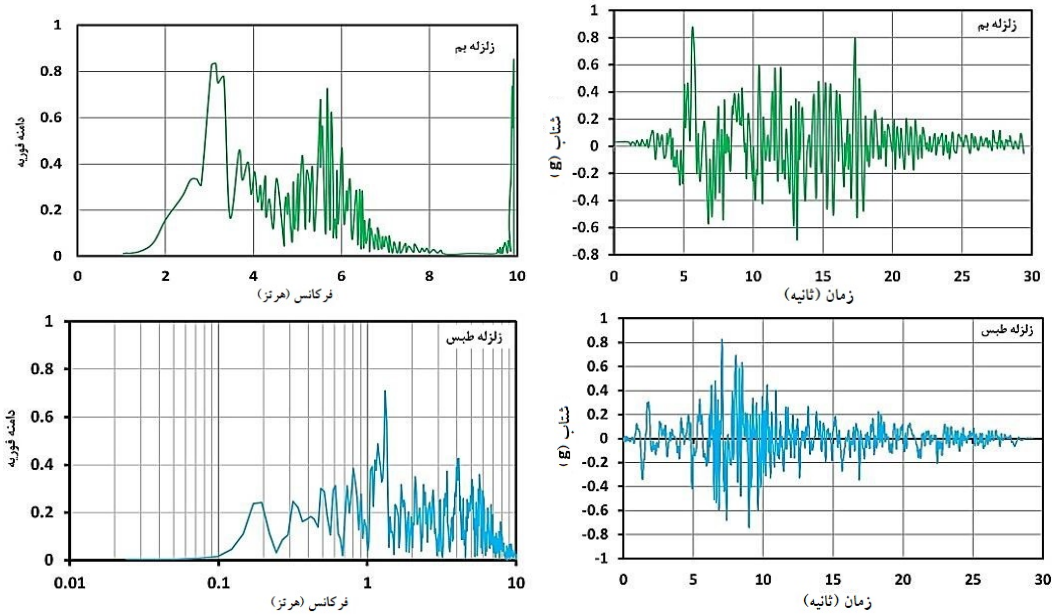
طیف سنگ بستر مقیاس شده‌اند. محتوای فرکانسی جابه‌جایی در پاسخ دینامیکی بسیار مؤثر است و بررسی آن با استفاده از طیف فوریه انجام می‌شود. بزرگای زلزله طبس برابر با ۷/۶ ریشتر، شتاب بیشینه افقی آن g ۰/۸۲۸ و فرکانس غالب جابه‌جایی افقی آن ۱/۳۱۸ هرتز است. از دیدگاه مهندسی، سازه‌هایی با دوره‌تناوب طبیعی حدود ۰/۷۶ ثانیه در اثر این زلزله دچار تشدید می‌شوند. بزرگای زلزله بم برابر ۶/۶ ریشتر، ژرفای کانونی آن ۸ کیلومتر، شتاب بیشینه افقی آن g ۰/۸ (مؤلفه‌های افقی شرقی–غربی) و شتاب بیشینه قائم آن g ۰/۹۸ است. فرکانس غالب این زلزله در بازه ۲ تا ۸ هرتز است (شکل ۶).

۵ ارزیابی، تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش تأثیر متغیرهای مختلف توده خاک بر پاسخ سطح زمین ارزیابی می‌شود. متغیرهای بررسی‌شده شامل زاویه اصطکاک داخلی، سرعت موج برشی و عمق سنگ بستر است. خروجی تحلیل شامل شتاب بیشینه سطح زمین، طیف پاسخ شتاب و ضریب تشدید است که تحت تأثیر هر دو زلزله مقایسه و بررسی می‌شوند.

۵-۱ تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر شتاب بیشینه سطح زمین

تغییرات شتاب بیشینه افقی سطح زمین برحسب زاویه اصطکاک داخلی در ساختگاه نوع ۲ و ۳ در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، شتاب بیشینه سطح زمین به‌صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. همچنین بررسی تاریخچه زمانی شتاب مشخص می‌کند که تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک در زمان وقوع شتاب بیشینه و همچنین روند کلی تغییرات شتاب سطح زمین تأثیر چندانی ندارد و فقط مقدار شتاب تغییر می‌یابد. میزان تغییر شتاب بیشینه با تغییر ۱۵ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی در زلزله طبس حدود ۱۴ درصد و در زلزله بم حدود ۶ درصد است که نشان‌دهنده تأثیر ناچیز تغییر زاویه اصطکاک داخلی در

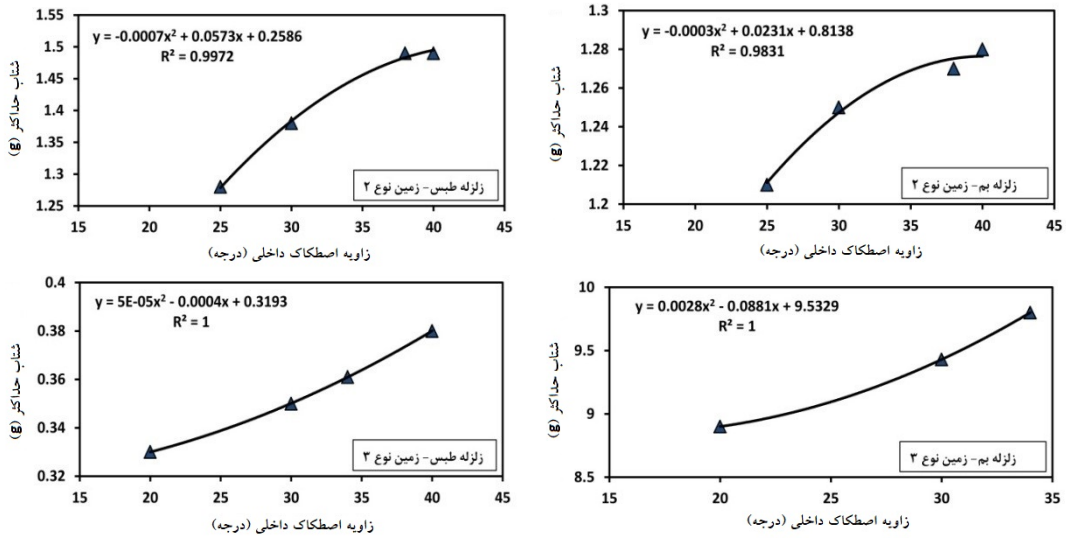


شکل۶. تاریخچه زمانی شتاب افقی و دامنه طیف فوریه زلزله طبس و زلزله بم مقیاس‌شده در سنگ بستر

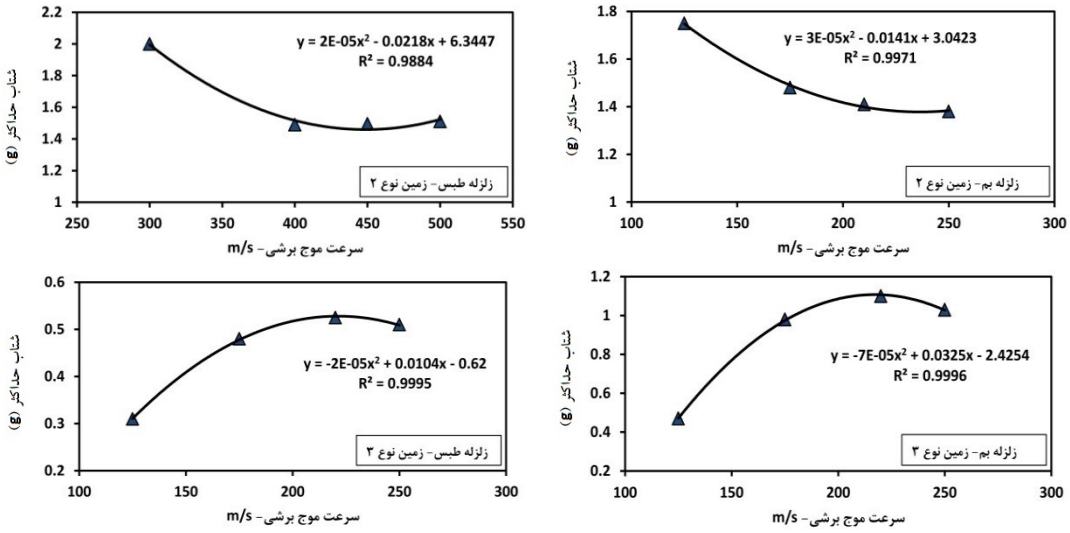
www.SID.ir

Archive of SID

شتاب بیشینه است. دلیل این افزایش شتاب می‌تواند آن باشد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، سختی و تراکم خاک بیشتر می‌شود و مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد؛ ازاین‌رو تحت بارگذاری یکسان و مشابه، احتمال رسیدن شرایط تنش به گسیختگی و احتمال بروز تغییرشکل‌های ماندگار و پلاستیک در خاک کاهش پیدا می‌کند. کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک باعث کاهش میرایی می‌شود و درنتیجه شتاب سطح زمین افزایش می‌یابد. در شکل ۷ روابط همبستگی برای حالت خاص موضوع تحقیق نیز آورده شده است.



شکل ۷. تغییرات شتاب بیشینه سطح زمین برحسب زاویه اصطکاک داخلی خاک



شکل ۸. تغییرات شتاب بیشینه سطح زمین برحسب سرعت موج برشی لایه سطحی

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲ تأثیر سرعت موج برشی لایه سطحی بر شتاب بیشینه افقی سطح زمین

شکل ۸ تغییرات شتاب بیشینه سطح زمین برحسب سرعت موج برشی را در نزدیک‌ترین لایه سطح زمین نشان می‌دهد. ضخامت لایه سطحی بر نتایج تحلیل تأثیرگذار است. در این تحقیق ضخامت لایه سطحی متناظر با مطالعه موردی و گزارش ژئوتکنیک انتخاب شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت موج برشی در لایه نزدیک به سطح زمین، مقدار شتاب بیشینه کاهش می‌یابد. سرعت موج برشی به نوع خاک و ویژگی‌های آن بستگی دارد. درصورت کم بودن چگالی، رسوبی بودن، لایه‌لایه بودن و آبرفتی بودن ساختار خاک یا وجود رطوبت زیاد، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد. در این شرایط دامنه موج فشاری و شتاب بیشینه در سطح زمین نیز افزایش می‌یابد. کاهش شتاب در زلزله طبس تا سرعت ۴۰۰ m/s و در زلزله بم تا سرعت ۴۵۰ m/s محسوس است، اما پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند. دلیل این امر با استفاده از رابطه (۱) قابل توجیه است (بُرجا و همکاران):

$$G = \rho \times V_S^2 \qquad (۱)$$

که G مدول برشی خاک، ρ چگالی و V_S سرعت موج برشی است (بُرجا و همکاران). این رابطه نشان می‌دهد با افزایش سرعت موج برشی در لایه فوقانی، سختی لایه نیز باید افزایش یابد. افزایش سختی خاک باعث کاهش دامنه ارتعاشات و درنتیجه کاهش شتاب افقی بیشینه در سطح زمین خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر، در محدوده تحلیل‌های صورت‌گرفته، افزایش سرعت موج برشی منجر به کاهش احتمال بروز تشدید و درنتیجه کاهش شتاب بیشینه در سطح زمین نوع ۲ می‌شود درحالی‌که در زمین نوع ۳، میزان کاهش کمتر است. بهسازی خاک در لایه‌های سطحی زیر سازه‌های سطحی باعث افزایش سختی و سرعت موج برشی می‌شود و درنتیجه سبب کاهش شتاب سطحی زمین در ساختگاه نوع ۳ خواهد شد و می‌تواند از شدت خسارات وارده به سازه بکاهد.

۵-۳ تأثیر عمق سنگ بستر بر شتاب بیشینه افقی سطح زمین

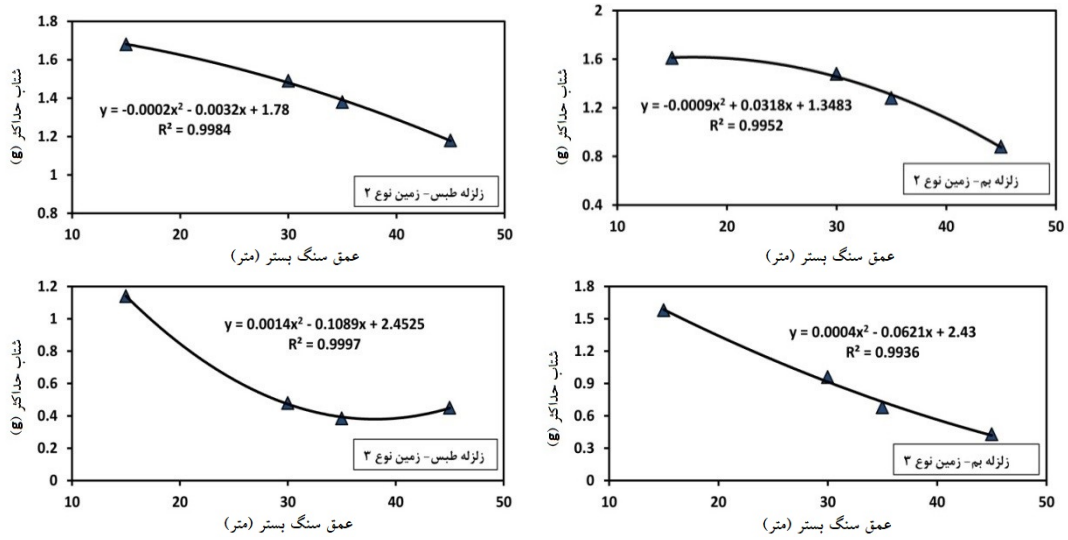
به‌منظور بررسی تأثیر عمق سنگ بستر، کل مدل به‌صورت سیستم یک درجه آزادی برای سازه و خاک زیر آن به‌صورت یک میله یک‌طرف‌گیردار و یک‌طرف‌آزاد مقیاس شده‌اند. ضخامت همه لایه‌ها متناسب با شرایط گزارش ژئوتکنیکی در مطالعه موردی، با نسبت یکسان افزایش داده می‌شود. با استناد به آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، لایه‌های سطحی تا عمق ۳۰ متر بیشترین تأثیر را بر پاسخ ساختگاه دارند. شکل ۹ تغییرات شتاب بیشینه سطح زمین برحسب عمق سنگ بستر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق سنگ بستر، شتاب بیشینه سطح زمین کاهش می‌یابد. علت این نتیجه را می‌توان در فرضیات زیاد مدل‌سازی و همچنین رابطه (۲) جستجو کرد که بیانگر دوره‌تناوب طبیعی لایه خاک (T_n) در فرکانس اساسی است(بُرجا و همکاران). شایان ذکر است که شدیدترین تشدید، در فرکانس اساسی رخ می‌دهد.

$$T_n = \frac{4H}{V_S} \qquad (۲)$$

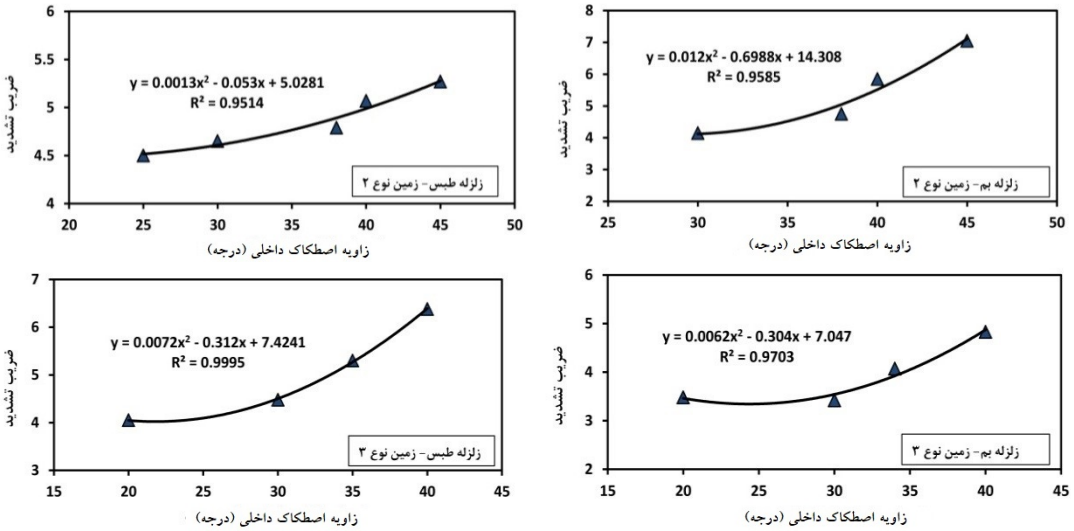
که H ضخامت لایه و V_S سرعت موج برشی است. این رابطه بر مبنای رفتار کشسان برای خاک و سنگ بستر ارائه شده است، اما به‌طور تقریبی برای رفتار غیرخطی با میرایی اندک نیز قابل استفاده است (کرامر و همکاران، ۲۰۱۵). با افزایش عمق سنگ بستر و ضخامت لایه، دوره‌تناوب طبیعی خاک افزایش و درنتیجه فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. با کاهش فرکانس طبیعی، شتاب بیشینه سطح زمین نیز متناظر با آن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت و حجم لایه خاک موجود در مدل، میرایی هندسی ناشی از انتشار انرژی در حجم بیشتری از مصالح افزایش می‌یابد و شاهد کند شدن دامنه حرکت امواج خواهیم بود (دستگول، ۲۰۰۴).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹. تغییرات شتاب بیشینه سطح زمین برحسب عمق سنگ بستر



شکل ۱۰. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک لایه سطحی زمین بر ضریب تشدید

۴-۵ تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ضریب تشدید

ضریب تشدید بیانگر نسبت جنبش در سطح زمین به جنبش در بستر سنگی است و با رابطه (۳) تعریف می‌شود(بُرجا و همکاران):

$$\text{ضریب تشدید} = \frac{\text{جنبش در سطح زمین}}{\text{جنبش در سنگ بستر}} \qquad (۳)$$

ضریب تشدید تابعی از فرکانس ارتعاش است. در این تحقیق فرکانس غالب زلزله ملاک بررسی قرار گرفته است که برای زلزله طبس حدود ۵ هرتز و برای زلزله بم حدود ۴ هرتز است. در شکل ۱۰ تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر میزان ضریب تشدید پاسخ ساختگاه در ساختگاه‌های نوع ۲ و ۳ تحت زلزله طبس و بم نشان داده

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، ضریب تشدید افزایش می‌یابد. در ساختگاه نوع ۲ با افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۲۵ به ۴۵ درجه در زلزله طبس، ضریب تشدید حدود ۱۷ درصد و در زلزله بم حدود ۴۳ درصد افزایش می‌یابد. این امر بیانگر مخرب بودن زلزله‌های مشابه بم نسبت به زلزله‌های مشابه طبس در ساختگاه نوع ۲ است. ضریب تشدید در ساختگاه نوع ۳ در زلزله طبس حدود ۳۰ درصد و در زلزله بم حدود ۳۲ درصد است که بیانگر این موضوع است که با افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش نقاط پلاستیک، ضریب تشدید زلزله می‌تواند افزایش یابد و خسارات ناشی از زلزله می‌تواند بیشتر شود.

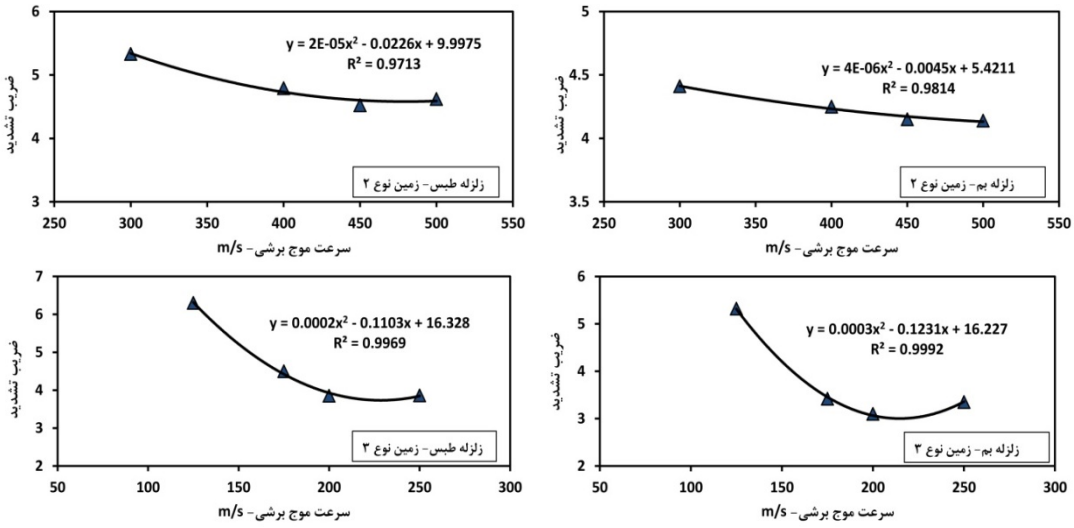
برای مقایسه ضریب تشدید به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با ضریب حاصل از روابط نظریه، ضریب تشدید خاک نوع ۲ با سرعت موج برشی ۵۰۰ متر بر ثانیه تحت یک حرکت با فرکانس غالب زلزله به‌کمک رابطه (۴) بررسی شد (کرامر، ۱۹۹۶):

$$A(\omega)=\frac{1}{\sqrt{cos^2\left(\omega H/V_S\right)+[\xi\left(\omega H/V_S\right)]^2}} \qquad (۴)$$

که A بیانگر ضریب تشدید، H ضخامت لایه (۳۰ متر)، V_S سرعت موج برشی متوسط لایه، ξ میرایی لایه و ω فرکانس زاویه‌ای است. اگر ω برابر با فرکانس غالب توده خاک درنظرگرفته‌شود، بیشینه ضریب تشدید به‌دست‌می‌آید. با جاگذاری متغیرها در رابطه (۴)، ضریب تشدید ۳/۵ به‌دست‌می‌آید که مشابه ضریب تشدید به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای خاک نوع ۲ است.

۵-۵ تأثیر تغییر سرعت موج برشی بر ضریب تشدید

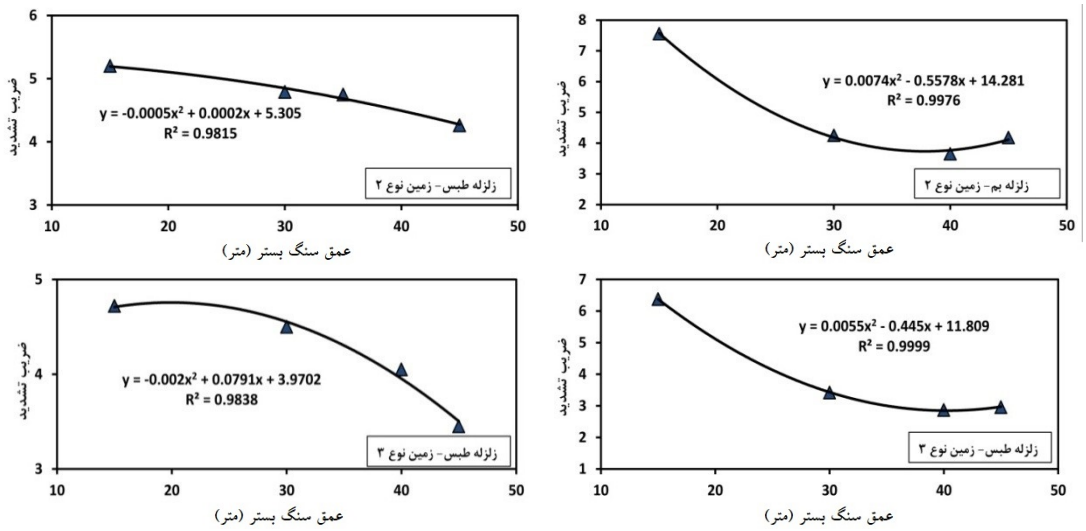
اثر سختی ساختگاه و سرعت موج برشی لایه سطح زمین بر ضریب تشدید در ساختگاه نوع ۲و نوع ۳ ارزیابی و نتایج آن در شکل ۱۱ برای زلزله طبس و بم نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش سرعت موج برشی، ضریب تشدید کاهش می‌یابد. در ساختگاه نوع ۲ تحت زلزله طبس، این کاهش حدود ۱۳ درصد و تحت زلزله بم حدود ۶ درصد است. برای ساختگاه نوع ۳، در زلزله طبس کاهش نسبت تشدید حدود ۴۰ درصد و در زلزله بم حدود ۴۶ درصد است. این نتایج نشان‌دهنده این



شکل ۱۱. تأثیر سرعت موج برشی لایه سطحی زمین بر ضریب تشدید

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲. تأثیر ضخامت لایه سطحی و عمق سنگ بستر بر ضریب تشدید

واقعیت است که در ساختگاه نوع ۳ که نرم‌تر و سختی کمتری نسبت به ساختگاه نوع ۲ دارد، ضریب تشدید بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد.

۶-۵ تأثیر عمق سنگ بستر بر ضریب تشدید

تأثیر عمق سنگ بستر و ضخامت لایه بر ضریب تشدید و پاسخ ساختگاه در ساختگاه نوع ۲ و نوع ۳ تحت زلزله طبس و بم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. براساس این شکل، با افزایش عمق سنگ بستر، ضریب تشدید کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در ضخامت بالای ۱۰۰ متر، تشدید چشمگیری مشاهده نمی‌شود که دلیل آن، غلبه اثر میرایی بر اثر تشدید است. در ساختگاه نوع ۲ در زلزله طبس با افزایش عمق سنگ بستر از ۱۵ متر به ۴۵ متر، ضریب تشدید حدود ۱۹ درصد و در زلزله بم حدود ۴۰ درصد کاهش دارد. این نتیجه بیانگر مخرب بودن زلزله‌های مشابه زلزله بم از نظر پارامترهای لرزه‌ای نظیر محتوای فرکانسی، دامنه و مدت در مقایسه با زلزله طبس در این نوع ساختگاه است. در ساختگاه نوع ۳ با افزایش ضخامت لایه سطحی و عمق سنگ بستر، در زلزله طبس حدود ۳۰ درصد و در زلزله بم حدود ۵۴ درصد کاهش در ضریب تشدید رخ می‌دهد. با کاهش سختی و نرم‌شدن لایه‌های خاک، شدت خرابی‌ها افزایش می‌یابد.

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل و ارزیابی در این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه و جمع‌بندی کرد. شایان ذکر است که این نتایج تنها برای متغیرها و فرضیات اشاره‌شده در این تحقیق صادق و معتبر هستند. در هر دو ساختگاه، شتاب بیشینه افقی سطح زمین در مقایسه با شتاب ورودی سنگ بستر افزایش می‌یابد که مبین تأثیر ساختگاه بر جنبش سطح زمین است. در هر دو ساختگاه، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، شتاب بیشینه در سطح زمین افزایش و پاسخ شتاب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت موج برشی، شتاب بیشینه افقی در سطح زمین برای هر دو ساختگاه کاهش می‌یابد. افزایش سرعت موج برشی در لایه سطحی، با فرض ثابت بودن ضخامت لایه، منجر به کاهش فرکانس طبیعی می‌شود که از محدوده فرکانس طبیعی سازه‌های متداول در شهر تهران دور است. این مسئله بیانگر کاهش نیروی دینامیکی زلزله وارد بر سازه‌های سطحی است. فرکانس طبیعی ساختمان‌های پنج تا

www.SID.ir

Archive of SID

هفت طبقه در شهر تهران در حدود ۰/۵ تا ۰/۷ هرتز است. با افزایش ضخامت لایه سطحی و عمق سنگ بستر، شتاب بیشینه افقی سطح زمین نیز کاهش می‌یابد؛ یعنی پاسخ سازه نیز می‌تواند کاهش یابد.

منابع

جعفری، م.، رزمخواه، ع. و کشاورز، م.، ۱۳۸۲، سرعت موج برشی زون رسوبات آلومینیومی در شهر تهران: نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، **۱۴**(۳)، ۳۱-۴۲.

قریشی، م. و ارژنگ، ر.، ۱۳۸۷، بررسی گسل کواترنر شهر تهران: ماهنامه علوم زمین و معدن ایران، **۱۸**(۲)، ۴۲-۵۹.

گزارش ژئوتکنیک مجتمع تجاری شمشاد، شرکت مهندسی گنجینه آتیه، تهران، ۱۳۹۰.

گزارش ژئوتکنیک مجتمع مسکونی افق، شرکت مهندسی باران خاک سنجش، تهران، ۱۳۹۰.

Boore, D.M., Oliver, A.A., III, Page, R.A., and Joyner, W.B., 1978, Estimation of ground motion parameters: U.S. Geological Survey Open-File Report 78–509, 145 p., available at http://pubs.usgs.gov/of/1978/0509/.

Borja, R. I., Chao, H. Y., Montans, F. J., and Lin, C. H., 1999, Nonlinear ground response at Lotung LSST site: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **125**(3), 187–197.

Choobbasti, A. J., Rezaei, S., Farrokhzad, F., and Azar, P. H., 2014, Evaluation of site response characteristic using nonlinear method (Case study: Babol, Iran): Frontiers of Structural and Civil Engineering, **8**(1), 69-82.

Destegul, U., 2004, Sensitivity analysis of soil response modelling in seismic microzonation for Lalitpur, Nepal: M.Sc. thesis, International Institute for Geo Information Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands.

Field, E. H., Johnson, P. A., Beresnev, I. A., and Zeng, Y., 1997, Nonlinear ground motion amplification by sediments during the 1994 Northridge earthquake: Nature, **390**, 599–602.

Field, E. H., Kramer, S., Elgamal, A. W., Bray, J. D., Matasovic, N., Johnson, P. A., Cramer, C., Roblee, C., Wald, D. J., Bonilla, L. F., Dimitriu, P. P., and Anderson, J. G., 1998, Nonlinear site response: where we're: Seismological Research Letter, **69**(3), 230–234.

Hosseini, S. M. M. M., and Asadollahi Pajouh, M., 2012, Comparative study on the equivalent linear and the fully nonlinear site response analysis approaches: Arabian Journal of Geosciences, **5**(4), 587-597.

Hwang, H. H. M., and Lee, C. S., 1991, Parametric study of site response analysis: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **10**(6), 282–290.

Joyner, W. B., and Chen, A. T. F., 1975, Calculation of nonlinear ground response in earthquakes: Bulletin of the Seismological Society of America, **65**(5), 1315–1336.

Kramer, S. L., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 254-280.

Kramer, S. L., Asl, B. A., Ozener, P., and Sideras, S. S., 2015, Effects of liquefaction on ground surface motions: Earthquake Geotechnical Engineering, **21**(2), 285-309.

Markham, C. S., Bray, J. D., Macedo, J., and Luque, R., 2016, Evaluating nonlinear effective stress site response analyses using records from the Canterbury earthquake sequence: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **82**, 84-98.

Neelima, B., Pandu Ranga Rao, B., Kodanda Rama Rao, P., Reddy, S. R. K., 2012, Earthquake response of structure under different soil conditions: International Journal of Engineering Research and Technology, **1**(7).

Rahmani, A., Taiebat, M., and Finn, W. L., 2014, Nonlinear dynamic analysis of Meloland road overpass using three-dimensional continuum modeling approach: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **57**, 121-132.

Régnier, J., Bonilla, L. F., Bard, P. Y., Kawase, H., Bertrand, E., Hollender, F., Marot, M., Sicilia, D., and Nozu, A., 2015, PRENOLIN Project: a benchmark on numerical simulation of 1D non-linear site effect. 1– verification phase based on canonical cases: 6ICEGE, Christchurch, New-Zealand.

Tabatabaiefar, H. R., Fatahi, B., Samali, B., 2011, Effects of soil dynamic properties and bedrock depth on seismic response of

www.SID.ir

Archive of SID

building frames incorporation soil-structure interaction: Kasetsart University, Thailand.

Tchalenko, J. S., and Braud, J., 1974, Seismicity and structure of the Zagros; The Main Recent Fault between 33° and 35°N: Philos. Trans. R. Soc. London, **277**(1262), 1-25.

Wang, Z. L., Makdisi, F. I., and Egan, J., 2006, Practical applications of a nonlinear approach to analysis of earthquake-induced liquefaction and deformation of earth structures: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **26**(2), 231-252.

Wong, Y., Yun, Y., Guo, X., and John, X., 2006, Seismic response of soil sites in Hong Kong by numerical modeling: 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.

www.SID.ir

Archive of SID

Iranian Journal of Geophysics, Vol 13, No 1, 2019, P. 4

Investigation of the Dynamic Properties Effect of Site on Seismic Ground Response in Analysis and Design of Buildings

Saeed Ghaffarpour Jahromi[1*] and Saeedeh Mahammadi[2]

[1]*Professor Assistant, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran*
[2]*Master of Geotechnical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran*

(Received: 19 November 2017, Accepted: 22 April 2019)

Summary

The study of variations of damage intensity for different earthquakes indicates the importance of the site effects on earthquake induced damage and ground motion parameters such as peak ground acceleration and induced amplification. In the occurrence of an earthquake, local site conditions such as soil characteristics, dimension of topographic irregularities, seismic bedrock depth, etc. as well as characteristics of incident wave have important e ects on seismic ground responseLocal site effects play an important role in earthquake-resistant designs and should be assessed carefully. By assessment of induced damages to structures and major infrastructures, seismic geotechnical researchers have concluded that the site conditions significantly influence on the failure distribution in urban and rural areas. Consequently, to determine the characteristics of seismic motions of the ground, it is essential to study the effective geotechnical factors. Consideration of the effects of the site response in the design of civil structures systems is of important to mitigate the damages to a certain extent on structures and the environment. Hence, it is relatively crucial to reliably attain the dynamic soil parameters of an earthquake-prone city/state. The nature of local site effects can be explained by using different methods such as simple theoretical analysis of ground response, measuring of surface and subsurface actual motion at the same site, and measuring the movements of the ground in sites with different conditions in comparison with the proposed site. In this paper, the effective factors on ground motion and site response in the soil classes II and III for Tehran city under the influence of Tabas and Bam earthquake were reviewed with numerical method and by using the finite difference software (FLAC 2D). Some of the effective parameters of the site dynamic characteristics on the seismic response of the ground surface have been studied and the response of peak ground acceleration and the resonance function has been compared.

The results of this study show that at both sites, the horizontal maximum acceleration of the ground surface increases with respect to the bedrock shear velocity, reflecting the influence of the site on ground movement. At both sites, with increasing soil internal friction angle, the maximum acceleration at ground level increases and the acceleration response decreases. Also, as the shear wave velocity increases, the horizontal maximum acceleration at ground level for both structures decreases. Increasing the shear wave velocity in the surface layer, assuming the thickness of the layer is constant, results in a decrease in the natural frequency, which is far from the normal frequency range of conventional structures in Tehran. This indicates a decrease in the earthquake's dynamic force on surface structures. The natural frequency of five to seven story buildings in Tehran is about 0.5 to 0.7 Hz. As the surface layer thickness and bedrock depth increase, the horizontal maximum acceleration of the ground surface also decreases, meaning that the structural response can also be reduced.

Keywords: soil, dynamic properties, seismic ground response, numerical method, response spectra.

*Corresponding author: Saeed_ghf@sru.ac.ir

www.SID.ir