

چکیده

یکی از راهکارهای متداول برای تعیین خصوصیات مؤلفه قائم زلزله طرح به صورت ویژه ساختگاه استفاده از روابط تجربی نسبت طیفی شتاب قائم به افقی (V/H) است. با این حال اثرات ساختگاهی تاکنون به صورت دقیق در این روابط وارد نشده است. در این مقاله اثرات محلی ساختگاه بر روی خصوصیات مؤلفه قائم شتاب زلزله‌های میدان نزدیک بررسی شده است. به این منظور ساختگاه‌های مختلف با ویژگی‌های دینامیکی متفاوت به جای دسته‌بندی‌های کلی روابط تجربی در نظر گرفته شده و تحت تحریک مجموعه‌ای از زلزله‌های میدان نزدیک به صورت دو بعدی تحلیل دینامیکی شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نسبت طیفی شتاب قائم به افقی (V/H) از عواملی نظیر پیوند اساسی ارتعاشی ساختگاه در حالت انتشار موج فشاری، نسبت پواسون خاک (ν) و همچنین مشخصات تحریک ورودی تأثیرپذیر است. مقایسه‌ی نسبت‌های V/H به دست آمده از تحلیل‌های عددی با روابط تجربی موجود نشان می‌دهد که همخوانی نتایج در حالت اشباع بودن خاک نسبت به حالت خشک بیشتر است و با افزایش نسبت پواسون از میزان تأثیر نوع خاک بر نسبت‌های طیفی شتاب V/H کاسته می‌شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود از معکوس امپدانس لرزه‌ای یک چهارم طول موج بر مبنای سرعت موج فشاری، در روابط کاهندگی تجربی V/H برای لحاظ نمودن اثرات ساختگاهی استفاده شود.

کلمات کلیدی: زلزله میدان نزدیک، مؤلفه قائم، اثرات ساختگاهی، نسبت طیفی شتاب قائم به افقی (V/H)

پاسخ لرزه‌ای رسوبات آبرفتی ناشی از مؤلفه قائم زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل

علی کاوند (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران،
akavand@ut.ac.ir

سید احمد سرکشیک‌زاده مطلق

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

عباس قلندرزاده

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۱- مقدمه

ارتباط بین پیوند اساسی سازه و پیوند غالب تحریک لرزه‌ای است؛ بنابراین میزان انرژی حرکت قوی زمین در محدوده فرکانسی تأثیرگذار بر پاسخ سازه باید به عنوان معیار قطعی تعیین‌کننده اهمیت مؤلفه‌های قائم و افقی شتاب زلزله به کار رود [۱-۲]. به عبارت دیگر حتی در مواردی که مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت یک زلزله انرژی کمتری نسبت به مؤلفه افقی آن دارد، باید توجه داشت که انرژی مؤلفه قائم در یک بازه فرکانسی کوتاه‌تر متمرکز می‌شود. این مسئله می‌تواند برای سازه‌های مهندسی که معمولاً دارای فرکانس اساسی ارتعاشی قائم در بازه ۵ تا ۲۰ هرتز هستند، مخرب باشد [۳]. شواهد میدانی جمع‌آوری شده در زلزله‌های گذشته از جمله زلزله‌ی کالاماتا

مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت یک زلزله به لحاظ دامنه و محتوای فرکانسی تفاوت عمده‌ای با مشخصات مؤلفه‌های افقی آن دارد. مؤلفه قائم زلزله بیشتر ناشی از انتشار امواج P می‌باشد در حالی که مؤلفه افقی آن عمدتاً تحت اثر انتشار امواج S قرار دارد. در گذشته تصور می‌شد که بیشینه شتاب حرکت قائم زلزله، به دلیل محتوای انرژی کمتر در مقایسه با مؤلفه افقی آن، قابلیت ایجاد خرابی قابل توجهی در سازه‌ها ندارد؛ اما نکته‌ی اساسی که نباید فراموش کرد این است که معمولاً قسمت قابل توجهی از انرژی حرکت قائم زلزله در یک بازه فرکانسی به مراتب کوچک‌تر در مقایسه با مؤلفه افقی آن متمرکز است. از طرف دیگر مسئله‌ی مهم تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای یک سازه،

با توجه به مواردی که ذکر شد، تعیین خصوصیات مؤلفه قائم زلزله طرح به خصوص به صورت ویژه ساختگاه در بسیاری از مسائل طراحی مهندسی مورد نیاز است. اهمیت این مسئله در سال‌های اخیر با مشاهده‌ی فراتر رفتن دامنه‌ی حرکات قائم از حرکات افقی در محدوده‌ی پیوندهای کوتاه در زلزله‌های ثبت شده در نواحی نزدیک گسل واضح تر شده است. به همین دلیل محققین مختلفی در خصوص ویژگی‌های مؤلفه حرکتی قائم زلزله و نحوه‌ی به کارگیری آن در طراحی لرزه‌ای مطالعاتی به انجام رسانده‌اند. نیومارک و همکاران [۷] از جمله محققینی بودند که پیشنهاد دادند هنگامی که اثر حرکت قائم زمین به طور صریح در فرایند طراحی مدنظر است، طیف پاسخ قائم به طور عمومی به اندازه‌ی دو سوم طیف پاسخ افقی در تمامی بازه‌ی پیرویی در نظر گرفته شود. از این پیشنهاد تاکنون به صورت گسترده‌ای استفاده شده است. نیازی و بزرگ‌نیا [۸-۱۱] برای مطالعه‌ی اثر بزرگا و فاصله روی نسبت طیفی قائم به افقی جنبش نیرومند زمین (V/H)، صدها طیف پاسخ افقی و قائم از چندین زلزله ثبت شده توسط آرایه جنبش نیرومند زمین (SMART-1) در تایوان را تحلیل کردند. بزرگ‌نیا و نیازی [۱۲] در سال ۱۹۹۳ به بررسی طیف پاسخ افقی و قائم روی ساختگاه‌های خاکی و سنگی در زلزله‌ی لوماپریتا، کالیفرنیا (۱۹۸۹) و بزرگ‌نیا و همکاران [۱۳-۱۴] به تحلیل طیف پاسخ افقی و قائم ثبت شده روی ساختگاه‌های خاکی در زلزله‌ی سال ۱۹۹۴ نورث‌ریج، کالیفرنیا پرداختند. نتایج به دست آمده از این مجموعه مطالعات برای اولین بار نشان داد که نسبت طیفی V/H به میزان زیادی وابسته به پیوندهای طیفی و فاصله از گسل است. به طوری که V/H مقدار بیشینه‌ی کاملاً مشخصی در محدوده‌ی پیوندهای کوچک دارد که در نواحی نزدیک گسل مقدار آن حتی از مقدار متداول دو سوم نیز تجاوز می‌کند. واتابه و همکاران [۱۵] با استفاده از شتابنگاشت‌های جنبش نیرومند زمین در آمریکا، یک همبستگی معنادار میان دامنه‌ی مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب زمین پیدا کردند و پیشنهاد نمودند که می‌توان با توسعه‌ی قوانین ساده، طیف پاسخ قائم را از طیف افقی آن به دست آورد.

(یونان ۱۹۸۶)، زلزله‌ی نورث‌ریج (آمریکا ۱۹۹۴) و زلزله‌ی کوبه (ژاپن ۱۹۹۵) آسیب و فروپاشی ساختمان‌های فولادی و بتنی و همچنین پل‌های متعددی را نشان داد که می‌توان آنها را به تأثیر مؤلفه حرکت قائم زلزله نسبت داد [۱، ۴، ۵، ۶]. در بسیاری از مواقع تصور می‌شود که به دلیل وجود ضرایب ایمنی بالاتر در طراحی در برابر بارهای ثقلی، احتمال گسیختگی در عناصر سازه‌ای در اثر نیروی ناشی از مؤلفه قائم زلزله کم است؛ اما بر خلاف این تصور، در زلزله‌های گذشته موارد زیادی وجود دارد که تخریب‌ها به طور مستقیم ناشی از نوسانات محوری ستون‌ها به علت نیروی قائم زلزله و نیز شکست‌های برشی و خمشی ناشی از آن رخ داده است (شکل ۱).



(الف) شکست فشاری پایه‌های پل هانشین [۶]



(ب) شکست فشاری پایه عریض شاهراه میشین [۶]

شکل (۱): مواردی از آسیب مشاهده شده به سازه‌ها ناشی از مؤلفه قائم زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن

حدود ۵ برابر) تولید می‌کند، میزان مشارکت موج برشی تبدیل شده به موج فشاری در مؤلفه قائم زلزله در ساختگاه خاکی نسبت به حالتی که مؤلفه قائم تنها توسط موج فشاری ایجاد شود (مثلاً ساختگاه سنگی)، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. سیلوا [۱۶] بیان می‌کند که در ساختگاه سنگی، امپدانس کمتر سرعت موج برشی و همچنین کمتر بودن تغییرات سرعت امواج برشی و فشاری در محیط سنگی باعث می‌شود امواج برشی کمتر به امواج فشاری تبدیل شده و در نتیجه مقادیر نسبت‌های VH کوچک‌تر شود.

یکی از راهکارهای متداول، ساده و غیرمستقیم در طراحی مهندسی برای تعیین خصوصیات طیف طرح مؤلفه قائم زلزله استفاده از روابط تجربی نسبت طیفی قائم به افقی (VH) است [۱۸]. بدین منظور در ابتدا طیف طرح افقی به صورت ویژه ساختگاه در سطح زمین مشخص شده و سپس با ضرب نسبت طیفی VH در طیف طرح افقی، طیف طرح مؤلفه قائم به دست می‌آید. با این حال به دلیل مشکلات موجود در تعریف محدوده پاسخ خطی خاک در حالت انتشار موج فشاری ناشی از مؤلفه قائم زلزله، عدم وجود اطلاعات کافی از رفتار غیرخطی خاک در حالت انتشار موج فشاری و همچنین عدم اطلاع دقیق از سطح آب زیرزمینی در ایستگاه‌های ثبت زلزله، اثرات ساختگاهی (به خصوص در بخش غیرخطی پاسخ زمین) در روابط تجربی نسبت VH تاکنون به صورت دقیق وارد نشده است. شایان ذکر است که حتی در ساختگاه‌های سنگی نیز بررسی مسئله به دلیل عواملی همچون تأثیر نوع سنگ بستر، تنوع ماهیت و راستای درزه‌ها و ترک‌ها در محیط سنگی و میزان هوازگی سنگ‌ها با پیچیدگی‌هایی همراه است که استفاده از مدل‌سازی عددی یا روابط تجربی را بدین منظور دشوار می‌سازد. در کشور ایران نیز در تحقیقات گذشته بیشتر در خصوص نسبت‌های طیفی مؤلفه افقی به قائم ارتعاشی زمین (H/V) عمدتاً توسط ثبت خردلرزه‌ها^۱ و به منظور تعیین مشخصات ساختگاه از جمله پریرود طبیعی رسوبات و ضریب تشدید [به عنوان مثال ۱۹] و همچنین تعیین ویژگی‌های دینامیکی آبرفت با استفاده از تحلیل‌های معکوس [۲۰] متمرکز شده است. با این حال تاکنون تحقیقات

همچنین سیلوا [۱۶] با استفاده از تعداد زیادی از اطلاعات پایگاه داده‌ای جنبش نیرومند زمین، اثرات بزرگ، فاصله، شرایط محلی ساختگاه و شرایط تکتونیکی را بر روی شکل طیف پاسخ شتاب مؤلفه‌های افقی و قائم نشان دادند. در استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم [۱۷] نیز در نظر گرفتن اثرات مؤلفه قائم زلزله به صورت یک نیروی قائم در کل سازه ساختمان‌هایی که در مناطق با خطر نسبی خیلی زیاد واقع شده‌اند، تیرهای با دهنه‌ی بیشتر از ۱۵ متر، تیرهایی که بار قائم قابل توجهی حمل می‌کنند و بالکن‌هایی که به صورت طره ساخته می‌شوند، ضروری است. مقدار این نیروی قائم برابر $0/6$ شتاب مبنای طرح ضرب در مقدار بار مرده (یا بار مرده به اضافه سربار) با احتساب ضریب اهمیت سازه پیشنهاد شده است. مطابق با این استاندارد نیروهای قائم و افقی زلزله باید هم‌زمان با بارهای مرده و زنده به سازه اعمال شده و اثرات آنها ترکیب گردد.

در خصوص میزان تأثیر شرایط ساختگاهی بر ویژگی‌های مؤلفه قائم زلزله شایان ذکر است که به دلیل محدود بودن رکوردهای ثبت شده در زلزله‌های گذشته در آرایه‌های قائم درون‌چاهی، نتیجه‌گیری قطعی در مورد نحوه انتشار امواج حرکات قائم زمین در رسوبات و عوامل مؤثر بر آن مشکل است. با این حال داده‌های در دسترس نشان می‌دهند که حداکثر تشدید شتاب قائم زلزله (PVA)، عمدتاً در ۲۰ متر بلایی لایه‌های خاک رخ می‌دهد. برخی از محققین برای مشاهده‌ی وابستگی VH به فاصله و شرایط ساختگاهی، تفسیرهایی مبتنی بر لرزه‌شناسی ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال سیلوا [۱۶] بیان کرد که در فواصل نزدیک منبع زلزله در ساختگاه‌های خاکی، اختلاف قابل توجه بین سرعت موج برشی در مرز سنگ بستر لرزه‌ای و خاک، سبب می‌شود تا موج برشی برخوردی (SV) عمدتاً به موج فشاری (P) تبدیل شود. این موج P تبدیلی هم‌زمان با انتشار در محیط خاکی تقویت شده و با نزدیک شدن به سطح به دلیل تغییرات شدیدتر در سرعت موج فشاری رسوبات (Vp) در مسیر قائم‌تری منتشر می‌شود. از طرف دیگر به دلیل اینکه منبع زلزله دامنه‌ی بزرگ‌تری از امواج برشی را نسبت به امواج فشاری (در

$$[M]\{\ddot{a}\} + [D]\{\dot{a}\} + [K]\{a\} = \{F\} \quad (1)$$

نرم افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر جهت حل معادله‌ی دینامیکی حاکم بر مسئله در حوزه زمان از روش ویلسون-تتا (Wilson- θ) و جهت حل معادله‌های کلی اجزای محدود از روش تجزیه چولسکی^۲ استفاده می‌کند. در روش خطی معادل مورد استفاده جهت مدل‌سازی رفتار خاک نیز تحلیل دینامیکی با یک سختی مشخص خاک آغاز می‌شود. در هر گام تحلیل تمام تاریخچه زمانی شتاب زلزله به مدل اعمال شده و حداکثر کرنش برشی در نقاط گوسی المان‌ها محاسبه می‌شود. سپس با توجه به سطح کرنش در هر المان، سختی برشی کاهش یافته با استفاده از تابع تغییرات سختی برشی-کرنش ($G/G_0-\gamma$) مصالح محاسبه می‌شود و این فرایند تا همگرایی سختی برشی در تمامی المان‌ها تکرار می‌گردد.

۲-۱- اعتبارسنجی مدل عددی

جهت اعتبارسنجی مدل عددی و همچنین برنامه مورد استفاده، از داده‌های زلزله‌های ثبت شده توسط آرایه شتاب‌نگاری قائم در ساختمانگاه لوتیانگ واقع در کشور تایوان استفاده شده است. ساختمانگاه آزمایش‌های لرزه‌ای بزرگ مقیاس لوتیانگ^۳ که در یکی از فعال‌ترین نواحی لرزه‌خیز شمال شرقی تایوان قرار دارد در سال ۱۹۸۵ توسط مؤسسه‌ی تحقیقاتی الکترونیکی نیرو (EPRI) و شرکت برق تایوان جهت مطالعه‌ی رفتار دینامیکی خاک و همچنین مسائل اندرکنش خاک و سازه در نیروگاه‌های هسته‌ای در مقیاس کوچک ایجاد شده است (شکل ۲). پاسخ لرزه‌ای ساختمانگاه به صورت مداوم توسط شتاب‌نگارهای سه‌جهته سطحی و درون‌چاهی که تا عمق ۴۷ متری از سطح زمین قرار گرفته‌اند ثبت می‌گردد. مطابق شکل (۲)، در آرایه DHB این ساختمانگاه تحقیقاتی، شتاب‌نگارهایی در اعماق ۰، ۶، ۱۱، ۱۷ و ۴۷ متری از سطح زمین در سه امتداد شمال-جنوب، شرق-غرب و قائم قرار گرفته‌اند [۲۲-۲۳]. خصوصیات خاک این ساختمانگاه توسط آزمایش‌های محلی ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی به‌دست آمده و در مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف

مؤثری در خصوص ارائه‌ی روابط کاهندگی نسبت طیفی V/H مختص کشور ایران و میزان تأثیر اثرات ساختگاهی بر نسبت طیفی V/H صورت نگرفته است.

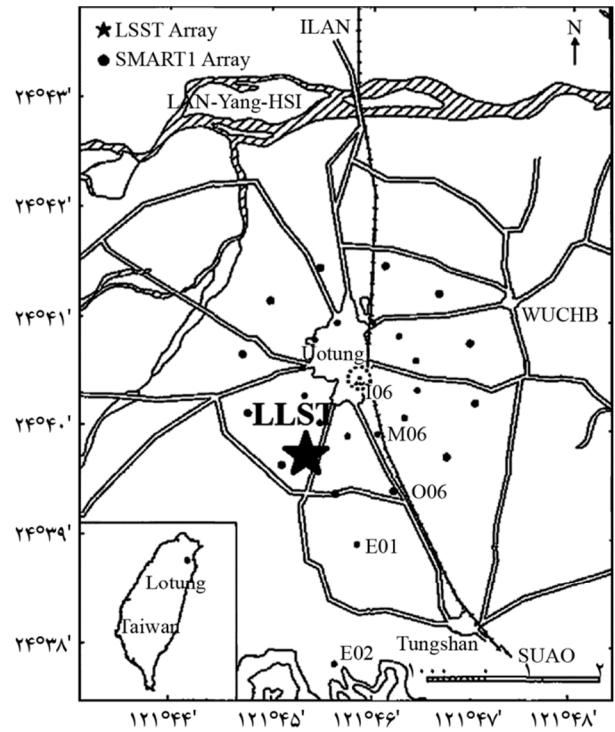
در این مقاله به منظور بررسی دقیق‌تر مسئله، اثرات محلی آبرفت بر روی خصوصیات مؤلفه قائم زلزله‌های میدان نزدیک مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور ساختگاه‌های مختلفی با ویژگی‌های دینامیکی آبرفت متفاوت، متشکل از خاک‌های شنی، ماسه‌ای و رسی در نظر گرفته شده و به‌جای دسته‌بندی‌های کلی ذکر شده در آیین‌نامه‌های طراحی و روابط کاهندگی تجربی نظیر ساختگاه‌های خاکی یا سنگی تحت تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم، مجموعه‌ای از زلزله‌های ثبت شده در میدان نزدیک به‌صورت دو بعدی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. در پایان منحنی‌های V/H به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی برای دسته‌بندی‌های مختلف شرایط ساختگاهی و بزرگ‌های مختلف زلزله با روابط تجربی موجود مقایسه شده‌اند.

۲-۲- مدل‌سازی عددی پاسخ دینامیکی رسوبات

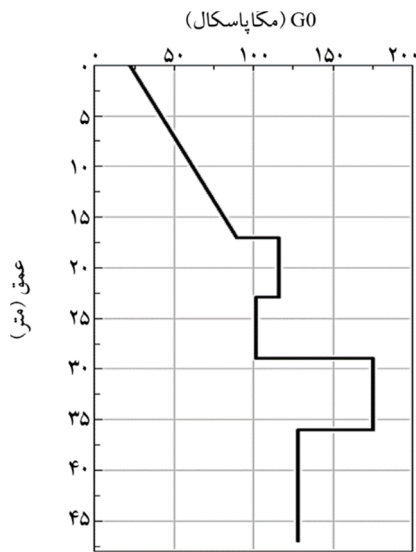
رویکرد بررسی مسئله در مقاله‌ی حاضر مبتنی بر تحلیل دینامیکی دو بعدی پاسخ ساختمانگاه تحت تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های قائم و افقی زلزله به روش اجزای محدود در حوزه‌ی زمان و با استفاده از مدل‌سازی رفتار خاک به‌صورت خطی معادل است. تحلیل‌های عددی انجام شده با استفاده از برنامه‌ی QUAKE/W [۲۱] از مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio صورت گرفته است. این نرم‌افزار با رویکرد اجزای محدود به حل معادله‌ی دینامیکی حاکم بر مسئله (معادله ۱) می‌پردازد. در معادله (۱)، $[M]$ عبارت است از ماتریس جرم، $[D]$ ماتریس میرایی، $[K]$ ماتریس سختی و $[F]$ بردار نیروها (شامل مجموعه نیروهای حجمی، نیروهای ناشی از فشارهای سطحی، نیروهای متمرکز گره‌ای و نیروهای ناشی از بارگذاری زلزله) می‌باشد. همچنین $\{\ddot{a}\}$ بردار شتاب گره‌ای، $\{\dot{a}\}$ بردار سرعت گره‌ای و $\{a\}$ بردار جابه‌جایی گره‌ای می‌باشد. در این معادله میرایی نیز به‌صورت میرایی رایلی در نظر گرفته می‌شود.

ارائه شده است [۲۳-۲۵]. نحوه‌ی تغییرات سختی برشی اولیه‌ی خاک (G_0)، سرعت موج برشی (V_s) و اعداد نفوذ استاندارد (N_{SPT}) با عمق برای ساختگاه لوتیانگ در شکل (۳) و منحنی‌های کاهش سختی برشی با کرنش برشی ($G/G_0-\gamma$) و تغییرات میرایی با کرنش برشی ($D-\gamma$) در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

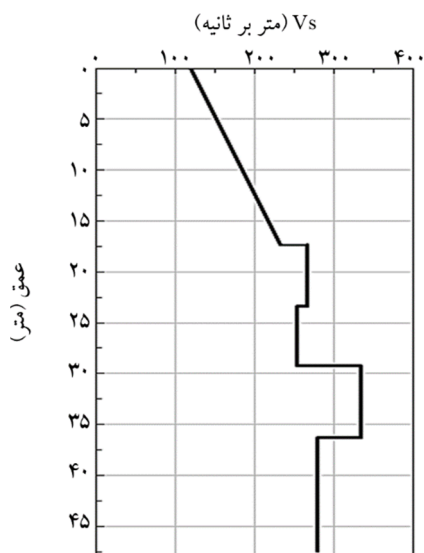
جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، لایه‌های خاک در ساختگاه لوتیانگ به همراه مشخصات دینامیکی و ژئوتکنیکی آن در برنامه‌ی Quake/w به‌صورت دو بعدی مدل شده است.



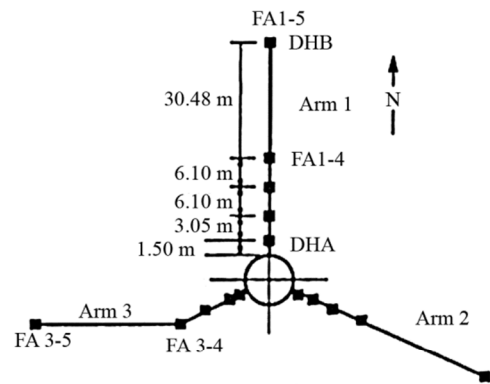
الف) موقعیت جغرافیایی آرایه LSST



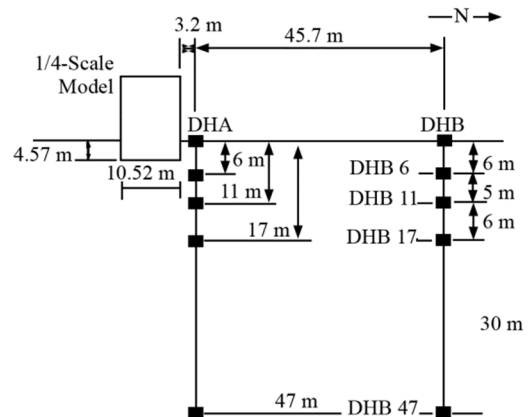
الف) سختی برشی اولیه (G_0)



ب) سرعت موج برشی (V_s)



ب) نحوه قرارگیری آرایه‌های سطحی

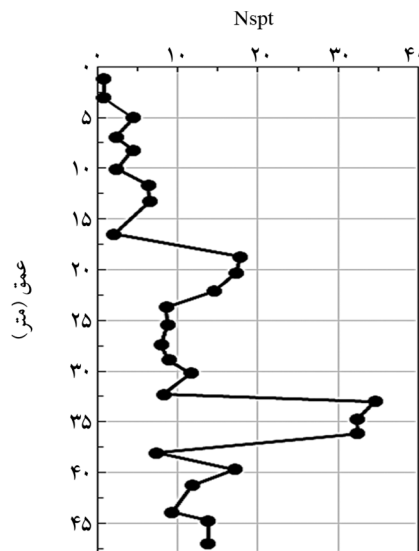


ج) نحوه قرارگیری آرایه‌های درون‌چاهی [۲۲]

شکل (۳): پروفیل مشخصات ژئوتکنیکی ساختگاه لوتیانگ [۲۱-۲۲]

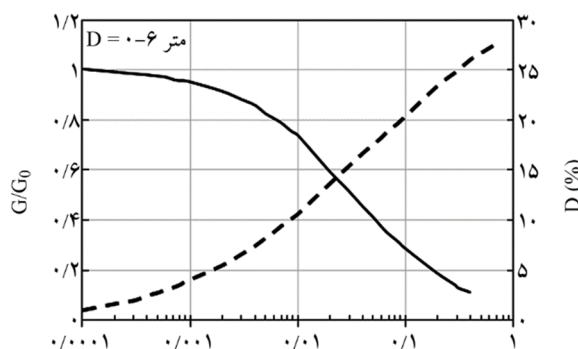
شکل (۲): ساختگاه تحقیقاتی لوتیانگ در کشور تایوان

سپس مدل عددی تحت تحریک هم زمان مؤلفه های افقی و قائم زلزله ثبت شده در واقعه LLST7 در تاریخ ۱۹۸۶/۰۵/۲۰ توسط آرایه قائم DHB لوتیانگ در عمق ۴۷ متری تحلیل شده است. مشخصات این زلزله در جدول (۱) و شتاب نگاشت ثبت شده در عمق ۴۷ متری نیز در شکل (۵) تحت عنوان حرکت ورودی ارائه شده است. همچنین در شکل (۵)، نتایج به دست آمده از مدل عددی با رکوردهای واقعی شتاب ثبت شده در عمق ۱۱ متری و در سطح زمین مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده از تحلیل عددی همخوانی مناسبی را با هر سه مؤلفه رکوردهای ثبت شده در اعماق مختلف ساختگاه لوتیانگ نشان می دهند.

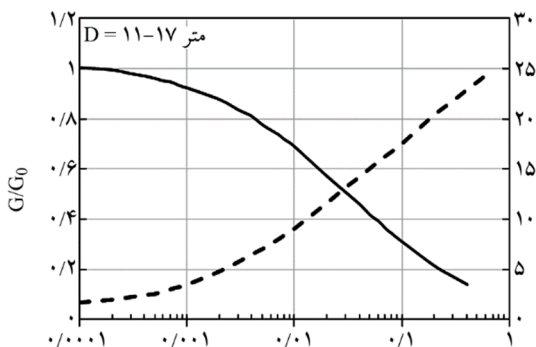


(ب) عدد نفوذ استاندارد (Nspt)

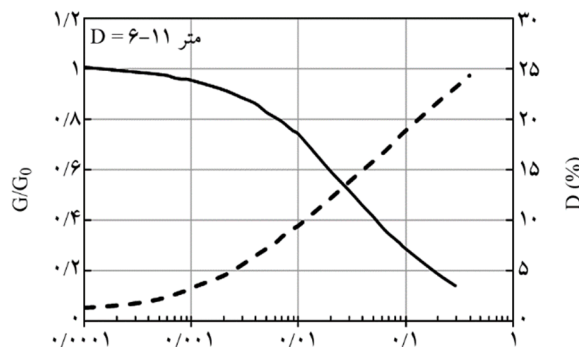
۱۵۴۱ شکل (۳)



منحنی کرنش برشی γ (درصد)



منحنی کرنش برشی γ (درصد)

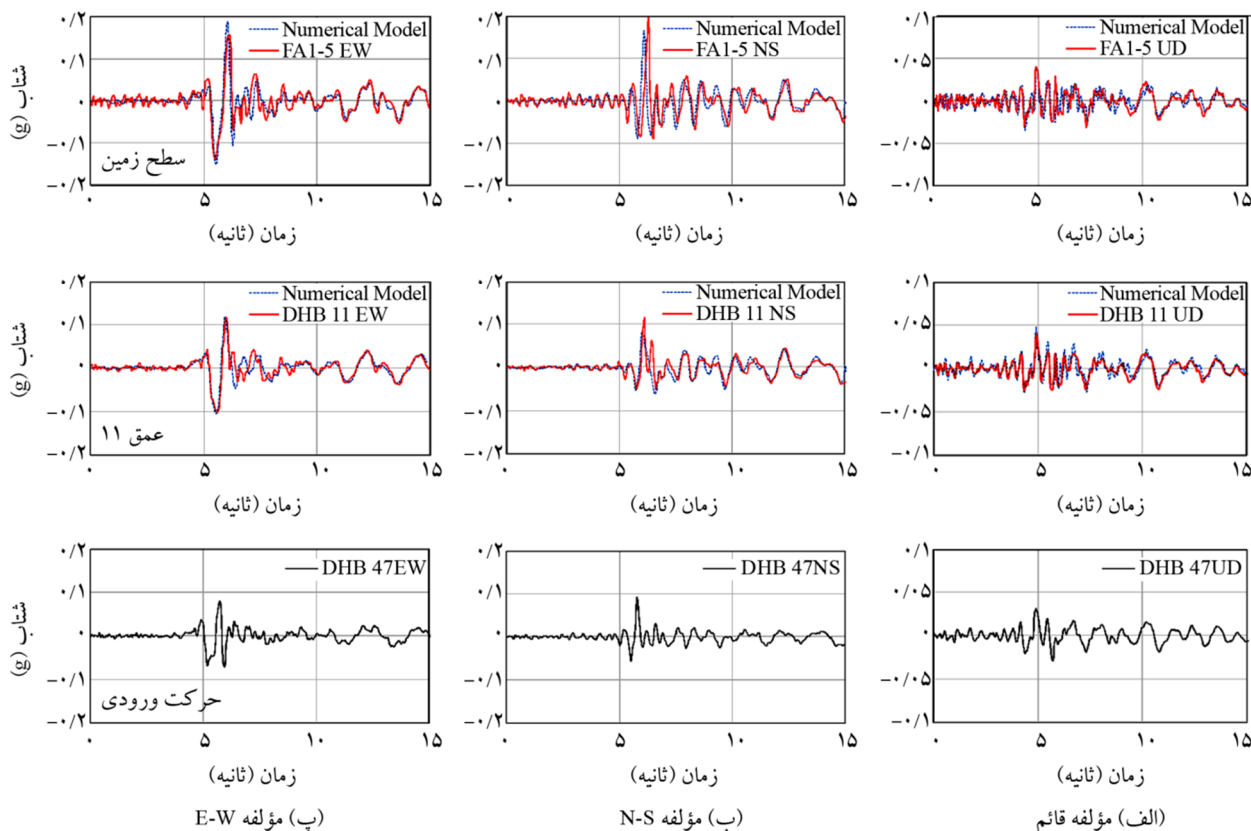


منحنی کرنش برشی γ (درصد)

شکل (۴): منحنی های G/G_0 و D بر حسب کرنش برشی در ساختمان لوتیانگ در اعماق مختلف [۲۵]

جدول (۱): مشخصات واقعه LSST7 ثبت شده در آرایه قائم DHB لوتیانگ در عمق ۴۷ متری (استفاده شده به عنوان حرکت ورودی در مدل عددی)

تاریخ	بزرگا (M_1)	فاصله رومرکزی (کیلومتر)	عمق کانونی (کیلومتر)	بیشینه شتاب در عمق ۴۷ متری (g)		
				مؤلفه E-W	مؤلفه N-S	مؤلفه قائم
۱۹۸۶/۰۵/۲۰	۶/۵	۶۶/۲	۱۵/۸	۰/۰۸۶	۰/۰۳	



شکل (۵): مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی و رکورد واقعی ثبت‌شده در ساختمانگه لوتیانگ (کلمه اختصاری FAI-5 معرف حرکت ثبت‌شده در سطح زمین، DHB 11 حرکت در عمق ۱۱ متری و DHB 47 حرکت در عمق ۴۷ متری یا همان حرکت ورودی به مدل عددی است).

ثانیه تغییر می‌کند که زمین‌های نوع II و III را طبق استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم [۱۷] شامل می‌شود. تغییرات V_s با عمق در ساختمانگه‌های مختلف به‌گونه‌ای فرض شده است که مقادیر متوسط آن در ۳۰ متر، منطبق بر اعداد ذکر شده در جدول (۲) باشد. عامل تأثیرگذار بر تغییرات سختی برشی اولیه

۲-۲- مشخصات مدل‌های عددی جهت مطالعه پارامتریک
به‌منظور بررسی اثرات محلی آبرفت بر نسبت طیفی شتاب مؤلفه قائم به افقی (V/H)، ساختمانگه‌هایی به‌صورت ساده شده با نوع خاک و ویژگی‌های دینامیکی متفاوت به‌جای دسته‌بندی‌های کلی ذکر شده در آیین‌نامه‌های طراحی در نظر گرفته شده‌اند. به این منظور جمعاً ۱۴ ساختمانگه با جنس خاک و متوسط سرعت موج برشی (V_{s30}) متفاوت مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است. به‌منظور به دست آوردن مقادیر سرعت موج فشاری (V_p) نیز ضریب پواسون خاک به‌صورت متوسط برابر $\nu=0.35$ فرض شده و مقادیر V_p متناظر با V_s در هر حالت محاسبه شده است. ضخامت رسوب در تمامی مدل‌ها برابر ۳۰ متر می‌باشد که بر روی سنگ بستر لرزه‌ای با سرعت موج برشی ۷۵۰ متر بر ثانیه قرار گرفته‌اند. مطابق با جدول (۲) سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر در مدل‌های مختلف از ۲۳۰ تا ۵۳۰ متر بر

جدول (۲): مشخصات انواع خاک برای تحلیل‌های دینامیکی

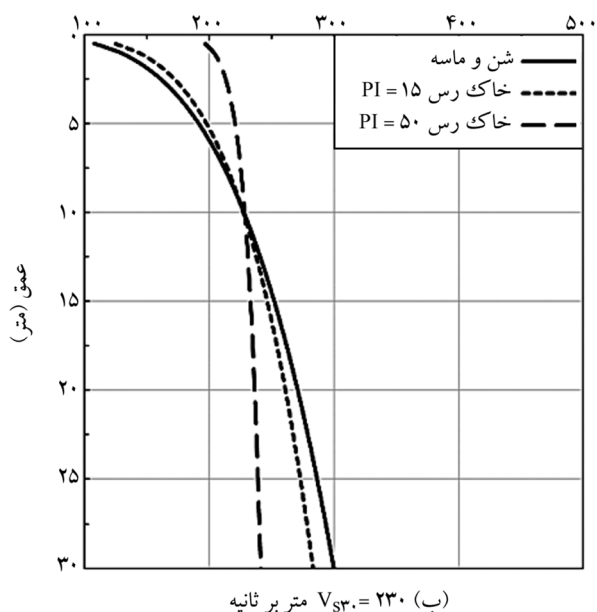
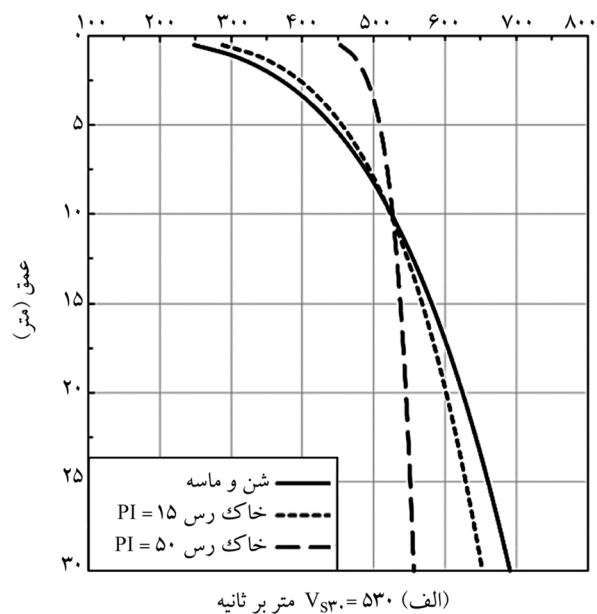
سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر (V_{s30})				جنس خاک
۵۳۰	۴۳۰	۳۳۰	۲۳۰	
√	√	√	√	شن
√	√	√	√	ماسه
√	√	√	√	رس با $PI = 15$
-	-	√	√	رس با $PI = 50$
نوع II	نوع II	نوع III	نوع III	طبقه‌بندی نوع زمین مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم [۱۷]

خطی معادل، از نمودارهای G/G_0 و D ارائه شده توسط سید و ادريس [۲۶] برای خاک‌های شنی و ماسه‌ای و نمودارهای G/G_0 و D ارائه شده توسط وستیک و دوبری [۲۷] برای خاک‌های رسی استفاده شده است. تمامی مدل‌ها به صورت دو بعدی ساخته شده و دارای عرض ۳۵۰ متر در جهت افقی (به منظور ناچیز نمودن اثرات مرزهای کناری) و عمق ۳۰ متر در جهت قائم می‌باشند. جهت افزایش دقت تحلیل‌های دینامیکی ابعاد المان‌ها در مدل به ۰/۱ طول موج حرکت ورودی محدود شده است. مراحل تحلیل مدل‌ها شامل دو مرحله بارگذاری ثقلی و بارگذاری دینامیکی زلزله می‌باشد. شرایط مرزی برای تحلیل‌های ثقلی به این گونه است که گره‌ها در مرزهای قائم کناری تنها در جهت قائم قابلیت حرکت داشته ولی در مرز پایین مدل در برابر حرکت در هر دو جهت قائم و افقی مقید شده‌اند. جهت تحلیل دینامیکی نیز همین شرایط مرزی اعمال شده تنها با این تفاوت که به گره‌های واقع در مرزهای کناری اجازه حرکت افقی نیز داده شده است.

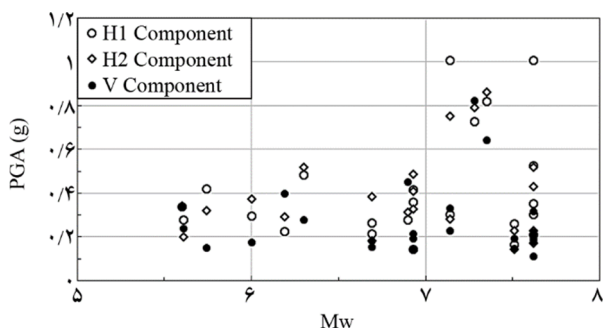
۲-۳- رکوردهای زلزله

جهت تحلیل پاسخ ساختمان از رکوردهای ثبت شده در ۲۳ زلزله حوزه نزدیک استفاده شده است که ۱۰ رکورد آن دارای پالس مشهود و ۱۳ رکورد آن فاقد پالس در تاریخچه زمانی سرعت می‌باشند [۲۸]. شایان ذکر است که رکوردهای زلزله حاوی پالس سرعت ناشی از پدیده جهت‌پذیری در حوزه نزدیک گسل، در سال‌های اخیر به دلیل اثرات بسیار مخرب بر سازه‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. در تحلیل‌های مقاله‌ی حاضر از هر دو مؤلفه افقی زلزله‌ها به همراه مؤلفه قائم استفاده شده است. به این صورت که یک بار مؤلفه شمالی-جنوبی (N-S) همراه با مؤلفه قائم و یک بار مؤلفه شرقی-غربی (E-W) همراه با مؤلفه قائم به صورت هم‌زمان به مدل‌ها اعمال شده است. محدوده‌ی بزرگای رکوردهای انتخابی $5/5 \leq M_w \leq 7/62$ و فاصله‌ی جویزر-بور (یا به اختصار R_{jb} که عبارت است از کوتاه‌ترین فاصله‌ی ساختمان تا تصویر سطحی گسیختگی گسل)

خاک (G_0) با عمق در خاک‌های دانه‌ای (شنی و ماسه‌ای) میزان تنش محصورکننده است ولی برای خاک‌های چسبنده (رسی) شاخص خمیری و نسبت بیش تحکیمی (OCR) مؤثر می‌باشند. نحوه تغییرات V_s با عمق برای ساختگاه‌هایی متشکل از خاک‌های مختلف ولی با سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر یکسان در شکل (۶) نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور در نظر گرفتن تغییرات سختی برشی و میرایی خاک با کرنش برشی در روش



شکل (۶): مقایسه تغییرات سرعت موج برشی با عمق برای خاک‌های مختلف و سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر (V_{s30}) یکسان



شکل (۷): توزیع PGA- بزرگا برای هر سه مؤلفه زلزله در رکوردهای انتخابی

آنها کمتر از ۱۰ کیلومتر می‌باشد و تمامی آنها بر روی ساختگاه سنگی (متر بر ثانیه $V_s > 750$) ثبت شده‌اند. با توجه به اینکه نتایج تحلیل‌ها در نهایت با مقادیر تخمینی توسط روابط V/H تجربی مقایسه خواهند شد، انتخاب رکوردها به گونه‌ای بوده که تا حد امکان بزرگای زلزله‌های انتخابی بخش وسیعی از محدوده‌ی بزرگا در روابط تجربی را پوشش دهد (شکل ۷). مشخصات زلزله‌های دارای پالس سرعت مشهود و بدون پالس سرعت به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول (۳): مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک دارای پالس سرعت مشهود

زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه ثبت	بزرگا	سازوکار گسلی	R_{jb}
Duzce, Turkey	۱۹۹۹/۱۱/۱۲	IRIGM 487	۷/۱۴	امتدادلغز	۲/۶۵
Tabas, Iran	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	Tabas	۷/۳۵	معکوس	۱/۷۹
Coyote Lake	۱۹۷۹/۰۸/۰۶	Gilroy Array #6	۵/۷۴	امتدادلغز	۰/۴۲
Morgan Hill	۱۹۸۴/۰۴/۲۴	Gilroy Array #6	۶/۱۹	امتدادلغز	۹/۸۵
Landers	۱۹۹۲/۰۶/۲۸	Lucerne	۷/۲۸	امتدادلغز	۲/۱۹
Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹/۰۸/۱۷	Gebze	۷/۵۱	امتدادلغز	۷/۵۷
Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹/۰۸/۱۷	Izmit	۷/۵۱	امتدادلغز	۳/۶۲
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU102	۷/۶۲	مورب‌لغز معکوس	۱/۴۹
Loma Prieta	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	Los Gatos	۶/۹۳	مورب‌لغز معکوس	۳/۲۲
L'Aquila Italy	۲۰۰۹/۰۴/۰۶	L'Aquila - Parking	۵/۶	مورب‌لغز نرمال	۵/۰۷

جدول (۴): مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک فاقد پالس سرعت

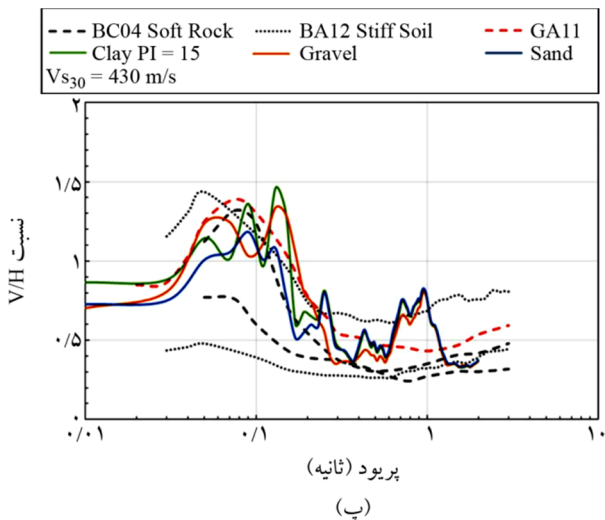
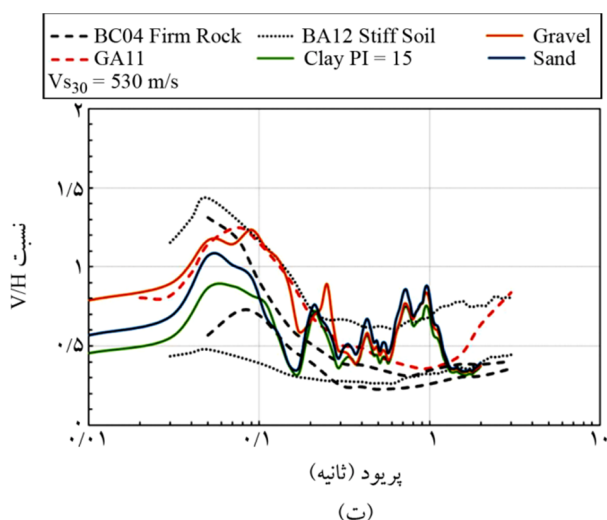
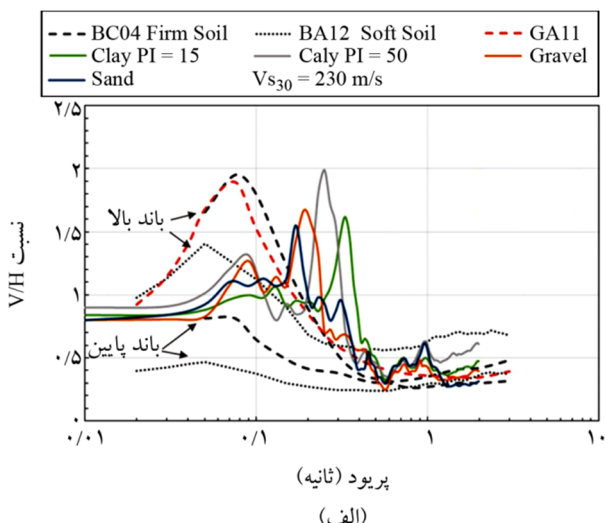
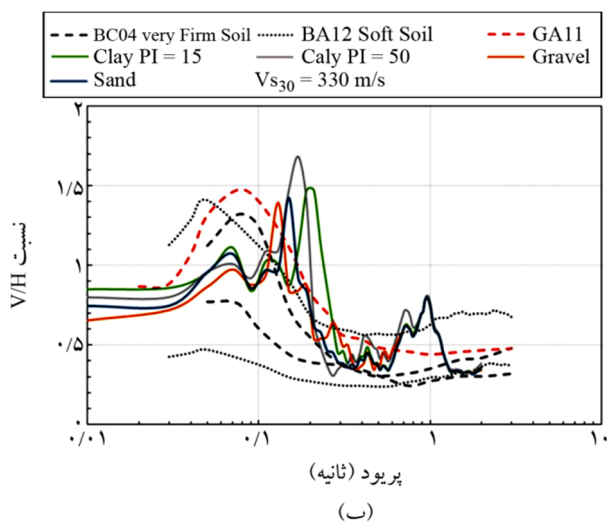
زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه ثبت	بزرگا	سازوکار گسلی	R_{jb}
Loma Prieta	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	Gilroy	۶/۹۳	مورب‌لغز معکوس	۹/۱۹
Loma Prieta	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	Gilroy Array #1	۶/۹۳	مورب‌لغز معکوس	۸/۸۴
Northridge-01	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	LA - Chalon Rd	۶/۶۹	معکوس	۹/۸۷
Northridge-01	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	LA 00	۶/۶۹	معکوس	۹/۸۷
Kobe, Japan	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	Kobe University	۶/۹	امتدادلغز	۰/۹
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU084	۷/۶۲	مورب‌لغز معکوس	۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU088	۷/۶۲	مورب‌لغز معکوس	۴/۶۷
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU089	۷/۶۲	مورب‌لغز معکوس	۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU138	۷/۶۲	مورب‌لغز معکوس	۹/۷۸
Sierra Madre	۱۹۹۱/۰۶/۲۸	Mt Wilson	۵/۶۱	معکوس	۲/۶۴
Parkfield-02, CA	۲۰۰۴/۰۹/۲۸	Parkfield	۶	امتدادلغز	۴/۲۵
L'Aquila, Italy	۲۰۰۹/۰۴/۰۶	L'Aquila	۶/۳	نرمال	۰
Duzce, Turkey	۱۹۹۹/۱۱/۱۲	IRIGM 496	۷/۱۴	امتدادلغز	۴/۲۱

۳- نتایج تحلیل های عددی

در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از تحلیل های عددی ارائه و سپس به بررسی عوامل مؤثر بر نسبت های طیفی V/H پرداخته خواهد شد. همچنین نتایج به دست آمده با روابط کاهندگی تجربی V/H ارائه شده توسط بزرگ نیا و کمپیل [۱۸]، بومر و همکاران [۲۹] و گولرج و آبراهامسون [۳۰] مقایسه خواهند شد. جهت بررسی و مقایسه ی نتایج با روابط کاهندگی تجربی، زلزله های انتخابی در تحقیق حاضر بر اساس بزرگای سه دسته شامل زلزله های با بزرگای $5 \leq M_w < 6$ ، $6 \leq M_w < 7$ و $M_w \geq 7$ تقسیم بندی شده اند.

۳-۱- نسبت های طیفی V/H ناشی از زلزله های دارای پالس سرعت

در شکل (۸) نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی تحت تحریک زلزله های میدان نزدیک حاوی پالس با بزرگای $5 \leq M_w < 6$ نشان داده شده است. در این نمودارها طیف های V/H به دست آمده از روابط تجربی بزرگ نیا و کمپیل [۱۸]، بومر و همکاران [۲۹] و گولرج و آبراهامسون [۳۰] نیز جهت مقایسه آورده شده اند که به ترتیب با BC04، BA12، GA11 مشخص شده اند. طیف های V/H بزرگ نیا و کمپیل [۱۸] و بومر و همکاران [۲۹] به صورت حدود بالا (میانگین به علاوه ی انحراف



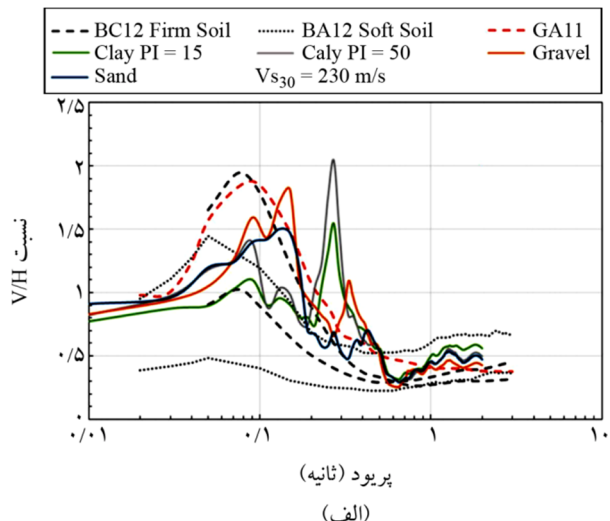
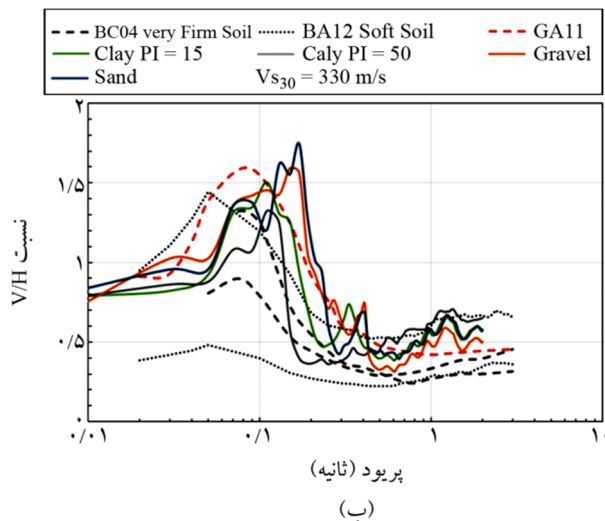
شکل (۸): مقایسه ی طیف های V/H به دست آمده از تحلیل های عددی (حالت زلزله های دارای پالس سرعت با $5 \leq M_w < 6$ و $0 \leq R_{jb} \leq 10$ در حالت $v=0.35$) با روابط کاهندگی تجربی

طیف VH کاسته می‌شود که دلیل آن کاهش رفتار غیرخطی با افزایش سختی خاک طی تحریک یکسان زلزله است. به‌طور کلی می‌توان ذکر نمود که مقادیر حداکثر نسبت VH (تشدید نسبت طیفی) برای خاک‌های نرم (V_{s30} کمتر) در مقایسه با ساختگاه‌های سخت (V_{s30} بالاتر) بیشتر است. به‌عنوان مثال مطابق با نتایج به‌دست آمده میزان تشدید در طیف VH برای حالت $V_{s30}=230$ متر بر ثانیه (شکل ۸-الف) تا حدود ۲ نیز افزایش می‌یابد که بیشتر از مقادیر متناظر در روابط تجربی می‌باشد، ولی برای $V_{s30}=530$ متر بر ثانیه (شکل ۸-ب) این عدد تا حدود ۱/۳ کاهش می‌یابد و در محدوده‌ی ارائه‌شده توسط روابط تجربی قرار می‌گیرد.

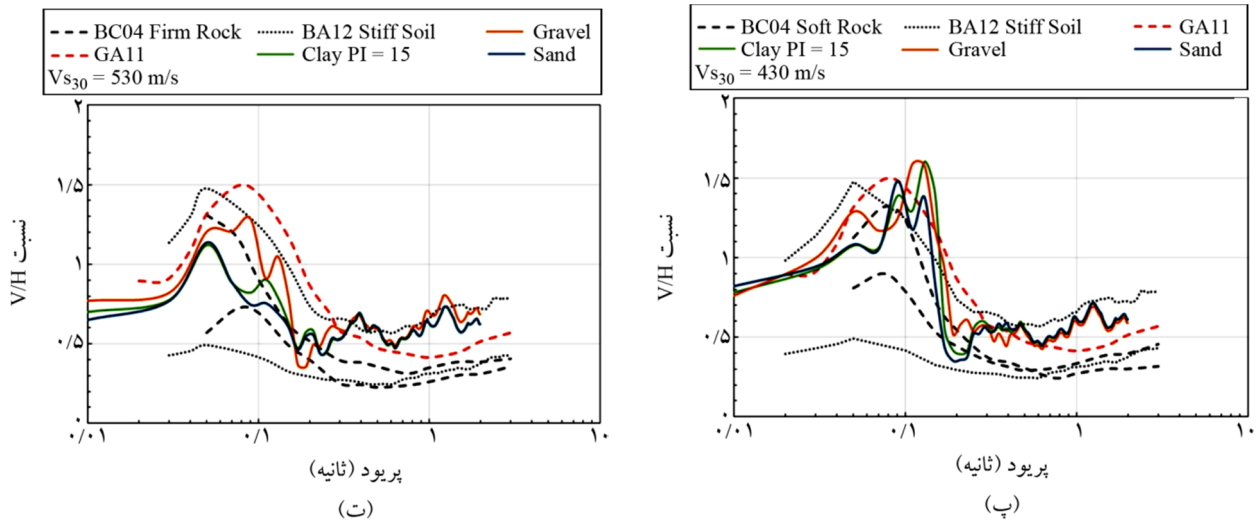
شکل (۹) نتایج حاصل از تحلیل‌ها در حالت اعمال زلزله‌های حاوی پالس سرعت با بزرگای $7 < M_w \leq 6$ را نشان می‌دهد. در این حالت نیز همانند زلزله‌های با بزرگای $6 < M_w \leq 5$ مقدار حداکثر طیف VH در حوالی پرپود اساسی سرعت موج فشاری پروفیل‌ها رخ داده و به‌طور کلی رفتاری شبیه قبل را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) نتایج در حالت زلزله‌های میدان نزدیک حاوی پالس با بزرگای $7 < M_w$ نشان داده شده است. به‌طور کلی روندهای مشاهده شده مشابه باحالات قبلی است ولی به نظر می‌رسد با افزایش بزرگای زلزله میزان تطابق نتایج تحلیل‌های عددی با روابط تجربی بیشتر شده است. این موضوع با مقایسه‌ی میزان همخوانی نتایج تحلیل‌های عددی با روابط تجربی در شکل‌های (۸) و (۱۰) قابل درک است.

معیار) و پایین (میانگین منهای انحراف معیار) و طیف VH گولرج و آبراهامسون [۳۰] برای مقادیر میانگین ارائه شده‌اند.

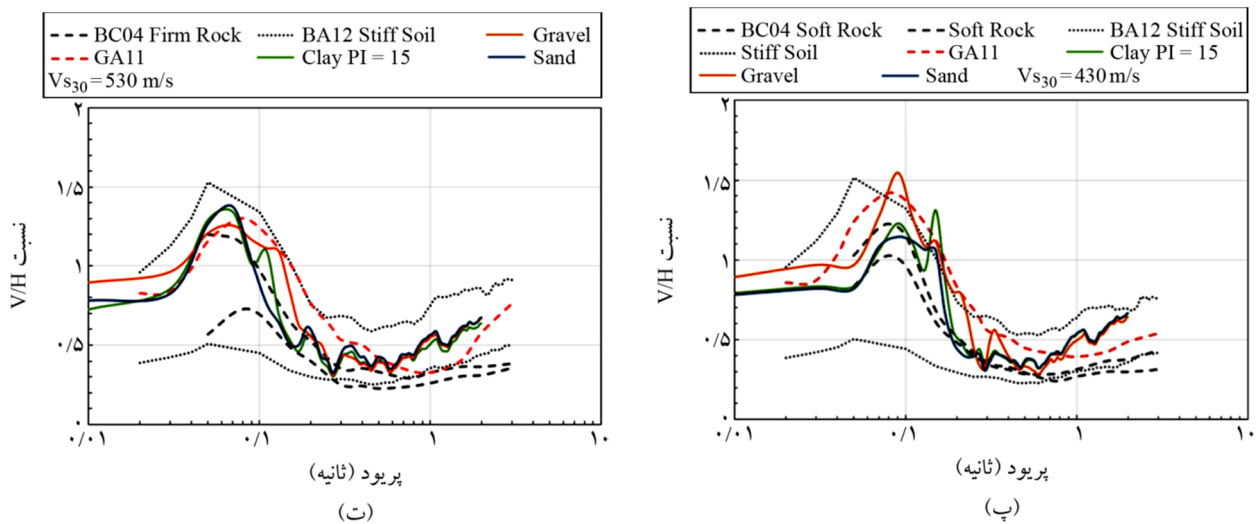
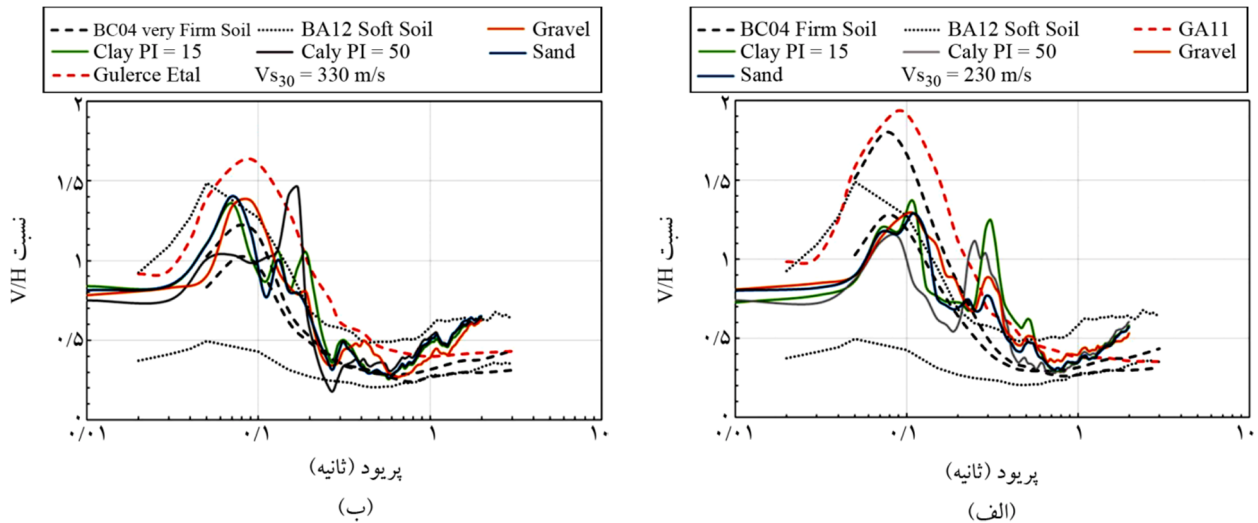
در شکل (۸) مشاهده می‌شود که مقادیر حداکثر نسبت طیفی VH برای تمامی حالات در حوالی پرپود اساسی ساختگاه متناظر با سرعت موج فشاری (به‌صورت ساده شده $4H/V_p$) رخ داده است. به‌عنوان مثال پرپود اساسی متناظر با سرعت موج فشاری برای ساختگاه با $V_{s30}=230$ متر بر ثانیه برابر ۰/۲۵ ثانیه می‌باشد که مشاهده می‌شود مقدار حداکثر نسبت طیفی VH نیز در همین محدوده پرپودی رخ داده است (شکل ۸-الف). نکته‌ی قابل توجه در این شکل این است که محدوده پرپودی حداکثر نسبت طیفی VH در روابط تجربی همواره کمتر از حدود ۰/۱ ثانیه است. درحالی‌که مطابق نتایج تحلیل‌های عددی به‌خصوص در حالت مواجهه با خاک‌های نرم‌تر ($V_{s30} = 230$ متر بر ثانیه) این محدوده می‌تواند تا حدود ۰/۳ ثانیه نیز گسترش یابد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر رسوبات بر شکل نسبت طیفی VH است. همچنین در خاک‌های نرم مقادیر حداکثر طیف VH برای خاک‌های رسی در پرپودهای بزرگ‌تری در مقایسه با خاک‌های شنی و ماسه‌ای رخ داده است (به‌عنوان نمونه شکل ۸-الف) ولی هر چه خاک سخت‌تر شده (افزایش V_{s30}) از میزان تأثیر نوع خاک بر طیف‌های VH کاسته شده است (به‌عنوان نمونه شکل ۸-ب). به‌عبارت‌دیگر با افزایش سختی خاک از تأثیر پارامترهای دینامیکی خاک (منحنی‌های رفتاری یا نوع خاک) بر



شکل (۹): مقایسه‌ی طیف‌های VH به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی (حالت زلزله‌های دارای پالس سرعت با $6 \leq M_w \leq 7$ و $0 \leq R_{fb} \leq 10$ در حالت $v=0.35$) با روابط کاهندگی تجربی



ادامه شکل (۹)



شکل (۱۰): مقایسه‌ی طیف‌های V/H به دست آمده از تحلیل‌های عددی (حالت زلزله‌های دارای پالس سرعت با $Mw > 7$ و $0 \leq R_{jb} \leq 10$ در حالت $v=0.35$) با روابط کاهندگی تجربی

نوع خاک بر شکل طیف V/H در حالت زلزله‌های بدون پالس بسیار کمتر شده است به گونه‌ای که برخلاف حالت تحریک توسط زلزله‌های حاوی پالس، حتی در ساختگاه نرم (شکل ۱۱- الف) نیز تفاوت کمتری در طیف V/H برای خاک‌های مختلف مشاهده می‌شود.

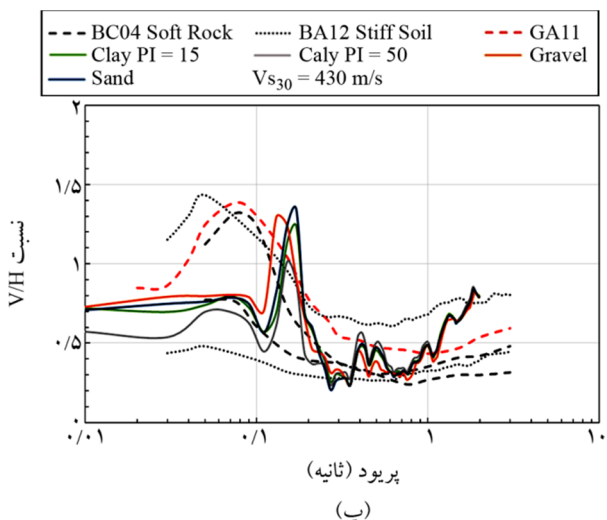
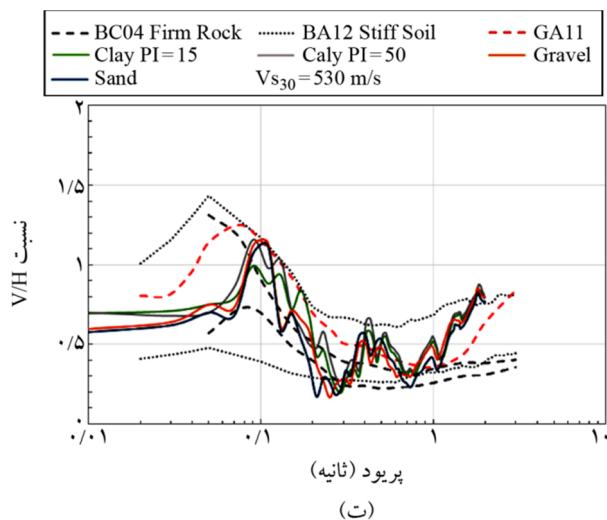
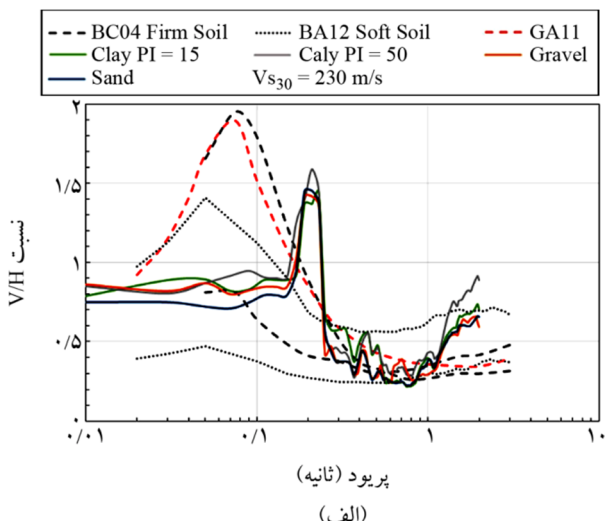
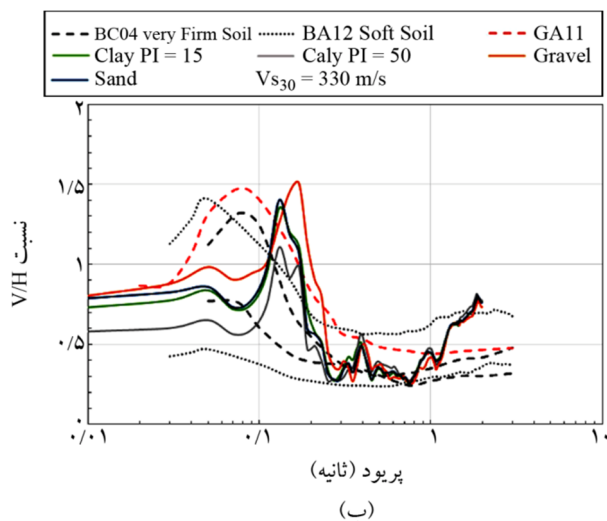
۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- بررسی اثر تغییرات سرعت موج فشاری

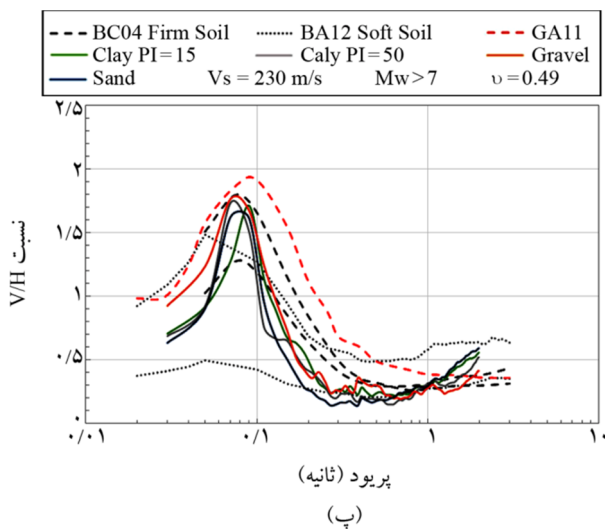
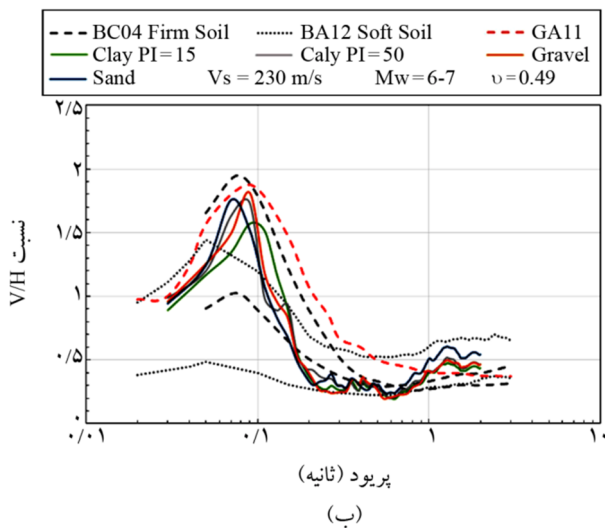
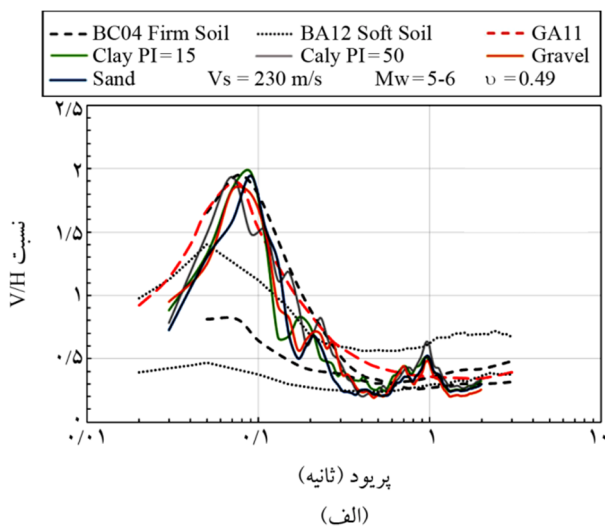
در شکل‌های (۸) تا (۱۱) مشاهده شد که طیف V/H محاسبه شده برای ساختگاه نرم با نتایج به دست آمده از روابط کاهندگی تجربی همخوانی اندکی را نشان می‌دهد (به خصوص در

۳-۲- نسبت‌های طیفی V/H ناشی از زلزله‌های فاقد پالس سرعت

در شکل (۱۱) نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی در حالت اعمال زلزله‌های فاقد پالس سرعت به صورت نمونه برای بزرگای $5 \leq M_w < 6$ ارائه شده است. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در تمامی پروفیل‌ها حداکثر مقدار منحنی‌های V/H در پرورد اساسی متناظر با سرعت موج فشاری رخ داده است ولی با این تفاوت که تحت تحریک زلزله‌های بدون پالس مقادیر نسبت طیفی V/H مقداری کمتر از حالت اعمال زلزله‌های دارای پالس سرعت را نشان می‌دهد. همچنین مطابق با نتایج ارائه شده در شکل (۱۱) و مقایسه‌ی آنها با مقادیر متناظر در شکل (۸)، اثر



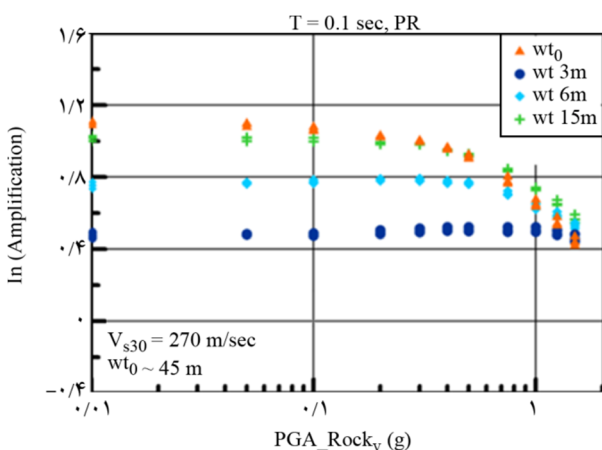
شکل (۱۱): مقایسه‌ی طیف‌های V/H به دست آمده از تحلیل‌های عددی (حالت زلزله‌های فاقد پالس سرعت با $5 \leq M_w < 6$ و $0 \leq R_{jb} \leq 10$ در حالت $v=0.35$) با روابط کاهندگی تجربی



شکل (۱۲): مقایسه طیف‌های V/H به دست آمده از تحلیل‌های عددی حالت زلزله‌های دارای پالس سرعت با بزرگای مختلف، $0 \leq R_{ib} \leq 10$ با روابط کاهندگی تجربی $\nu=0.49$ و $V_{s,30}=230\text{m/s}$

محدوده‌پریودی متناظر با بیشینه مقدار طیف V/H و هرچه میزان سختی خاک افزایش می‌یابد همخوانی طیف‌های V/H محاسبه شده و تجربی افزایش می‌یابد. تمامی نتایج قبلی با فرض ضریب پواسون (ν) برابر 0.35 ارائه شده بود که به‌عنوان یک مقدار متوسط برای اکثر خاک‌ها در حالت خشک قابل‌پذیرش است. شایان ذکر است ضریب پواسون حساسیت کمتری به نوع خاک، تنش محصورکننده و نسبت تخلخل خاک در مقایسه با درجه‌ی اشباع و شرایط زهکشی حین بارگذاری دارد. در شرایط اشباع بودن خاک (بالا بودن سطح آب زیرزمینی در ساختگاه) و حین اعمال بارگذاری زلزله به‌صورت زهکشی نشده به‌خصوص در خاک‌های رسی نرم اشباع، مقدار ضریب پواسون می‌تواند به مقدار حدی 0.5 بسیار نزدیک شود. به‌طور کلی پارامتر ν کنترل‌کننده‌ی نسبت سرعت موج فشاری به سرعت موج برشی خاک است و لذا می‌تواند بر روی مقادیر نسبت طیفی V/H بسیار تأثیرگذار باشد. در صورتی که لایه‌ی خاک در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گرفته باشد در شرایط زهکشی نشده بارگذاری زلزله، مقدار ν افزایش یافته و در نتیجه سرعت موج فشاری در خاک در مقایسه با سرعت موج برشی نیز به‌سرعت افزایش می‌یابد. به همین دلیل برای بررسی اثر تغییرات نسبت پواسون (ν)، تحلیل‌های عددی در حالت سرعت موج برشی متوسط برابر 230 متر بر ثانیه تحت تحریک زلزله‌های حاوی پالس و با فرض ضریب پواسون برابر 0.49 نیز انجام شد. مقدار ضریب پواسون 0.49 به‌عنوان یک مقدار حدی جهت بررسی مسئله انتخاب شده است. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در شکل (۱۲) ارائه شده است. با مقایسه نتایج با مقادیر متناظر در شکل‌های (۸) تا (۱۱)، تأثیر قابل‌توجه مقدار ν بر شکل طیف V/H قابل مشاهده است. به‌علاوه همان‌گونه که مشاهده می‌شود تأثیر پارامترهای دینامیکی و منحنی‌های رفتاری خاک بر روی طیف V/H با افزایش ν بسیار کم شده است. به‌عبارت‌دیگر با نزدیک شدن نسبت پواسون به عدد 0.5 از میزان رفتار غیرخطی خاک کاسته شده و منحنی‌های V/H برای خاک‌های مختلف به یکدیگر شبیه می‌شوند. شایان ذکر است که برای ساختگاهی با

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش سطح آب زیرزمینی، میزان غیرخطی بودن پاسخ به شدت کاهش می‌یابد.



شکل (۱۳): پاسخ دینامیکی یک‌بعدی ساختمانی با سرعت موج برشی متوسط $V_{s30}=270$ متر بر ثانیه و با پروفیل‌های V_p متفاوت [۳۱]

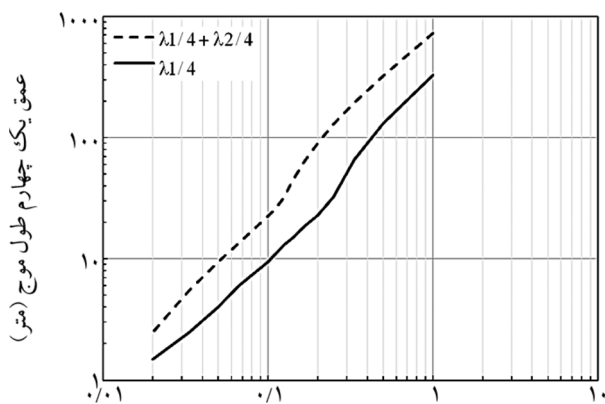
۴-۲- استفاده از پارامتر امیدانس لرزه‌ای یک‌چهارم طول

موج جهت شبیه‌سازی طیف V/H

امیدانس لرزه‌ای یک‌چهارم طول موج^۴ یا به اختصار IC^{qw} ، بیانگر اختلاف در سرعت انتشار موج در لایه‌های خاک است و به صورت نسبت بین دو میانگین سرعت انتشار موج در دو ضخامت متوالی از پروفیل خاک برابر یک چهارم دو طول موج دلخواه، مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۳۲]. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود این پارامتر تابعی از فرکانس موج می‌باشد. مثالی از نحوه محاسبه این پارامتر برای یک پروفیل سرعت موج فشاری انتخابی به صورت نمونه در شکل (۱۴) ارائه شده است. شایان ذکر است که مقدار پارامتر IC^{qw} در فرکانسی معادل فرکانس اساسی ارتعاشی برشی ساختمانی حداقل و معکوس آن حداکثر می‌گردد. از این رو در صورتی که معکوس امیدانس لرزه‌ای یک‌چهارم طول موج، $(IC^{qw})^{-1}$ ، بر مبنای سرعت موج فشاری محاسبه شود، مقدار آن در فرکانسی معادل فرکانس اساسی ارتعاشی فشاری ساختمانی بیشینه شده و لذا انتظار می‌رود رفتاری شبیه تغییرات منحنی V/H با پریود (یا فرکانس) را نشان دهد.

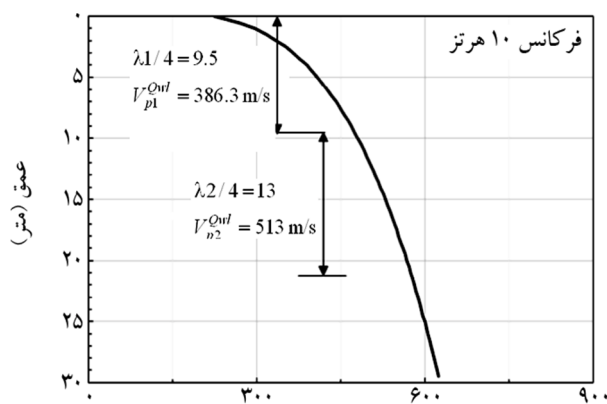
سرعت موج برشی متوسط ۲۳۰ متر بر ثانیه و $\nu=0/49$ ، پریود اساسی ساختمانی برای موج فشاری حدود $0/08$ ثانیه به دست می‌آید که مشاهده می‌شود مقدار بیشینه طیف V/H در شکل (۱۲) نیز در نزدیکی همین پریود رخ داده است.

اگرچه در روابط کاهندگی تجربی ذکر نشده است که وضعیت زمین در ایستگاه‌های ثبت زلزله به لحاظ سطح آب زیرزمینی در چه شرایطی قرار داشته است ولی نتایج ارائه شده در شکل (۱۲) نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب نتایج تحلیل‌های عددی با روابط تجربی کاهندگی در حالت مواجهه با خاک‌های نرم و اشباع است. این در حالی است که در حالت وجود خاک‌های نرم با ضریب پواسون $\nu=0/35$ که می‌تواند مبین حالت پایین بودن سطح آب زیرزمینی باشد، تطابق با روابط تجربی مشاهده نمی‌شود. این مطلب لزوم در نظر گرفتن وضعیت آب زیرزمینی (اشباع بودن لایه‌های خاک) را به هنگام برآورد خصوصیات مؤلفه قائم زلزله یادآور می‌سازد. در این خصوص پیشنهاد می‌شود متغیری جهت در نظر گرفتن تغییرات سرعت موج فشاری در ساختمانی به دلیل اشباع شدن خاک در روابط کاهندگی تجربی V/H وارد شود. به طور کلی با مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه و روابط کاهندگی تجربی مشاهده می‌شود تغییرات سرعت موج فشاری در روابط تجربی موجود به دلیل کمبود اطلاعات مورد توجه واقع نشده است. این موارد توسط برخی از محققین نیز مورد اشاره قرار گرفته است. به عنوان مثال، نتایج تحلیل پاسخ رسوبات با روش خطی معادل یک‌بعدی نشان می‌دهد که میزان غیرخطی بودن پاسخ به میزان زیادی با پروفیل سرعت موج فشاری (V_p) و سطح آب زیرزمینی در ساختمانی در ارتباط است که این موضوع به علت انتشار موج فشاری در لایه‌های خاک در حالت تحریک توسط مؤلفه قائم زلزله است [۳۱]. به عنوان مثال در شکل (۱۳) نتایج تحلیل‌های دینامیکی یک‌بعدی پاسخ یک ساختمانی با سرعت موج برشی $V_{s30}=270$ متر بر ثانیه ولی با پروفیل‌های V_p متفاوت (به دلیل تغییرات در سطح آب زیرزمینی) در پریود $0/1$ ثانیه ارائه شده



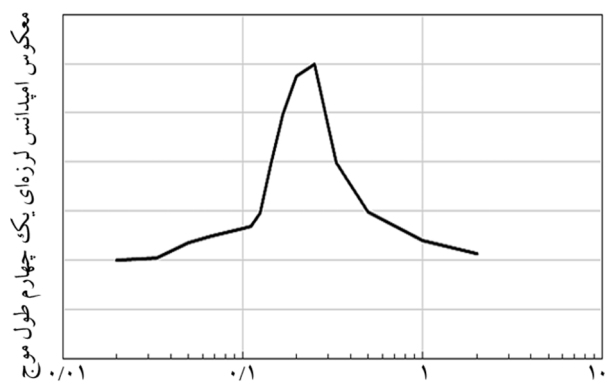
پریود (ثانیه)

(ب) تغییرات پارامترهای یک چهارم طول موج ($\lambda/4$) با پریود



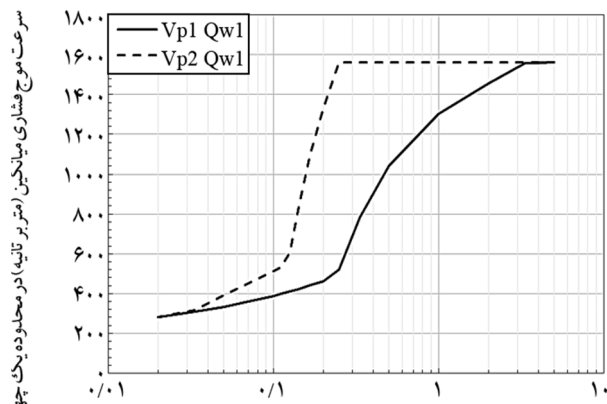
سرعت موج P (متر بر ثانیه)

(الف) پروفیل سرعت موج فشاری انتخابی



پریود (ثانیه)

(ت) تغییرات پارامتر $(IC^{Qwl})^{-1}$ با پریود



پریود (ثانیه)

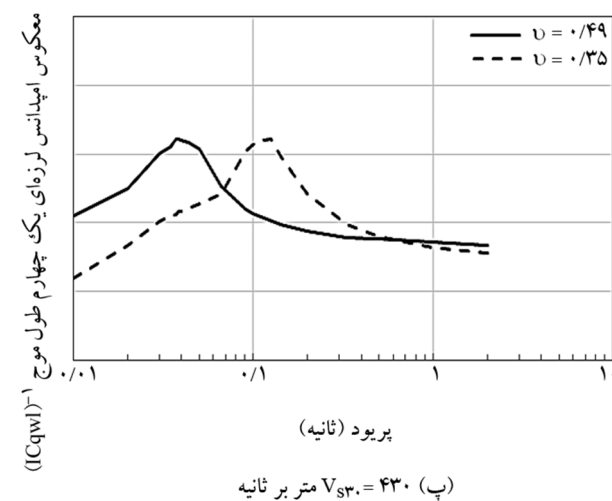
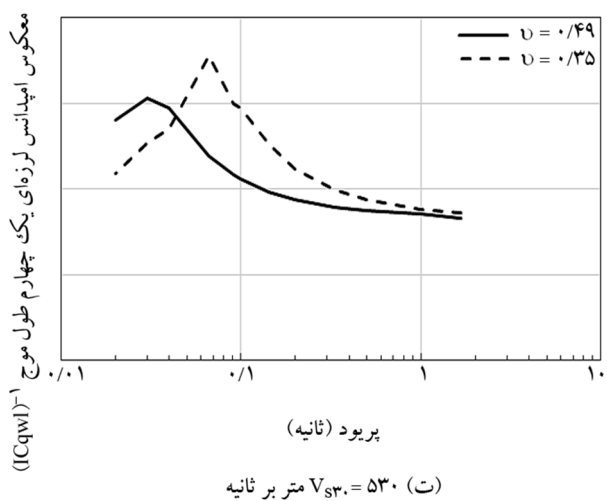
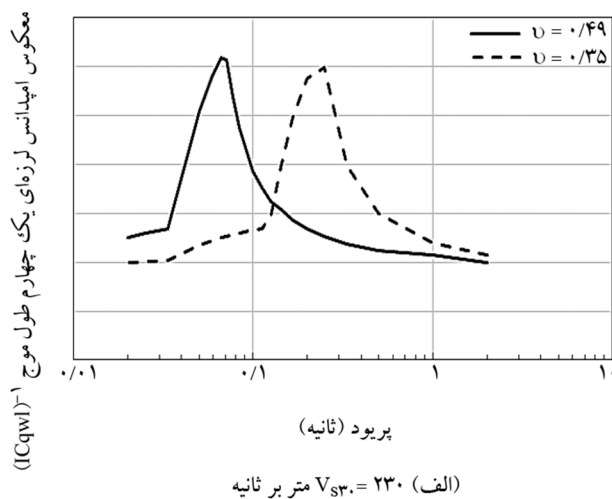
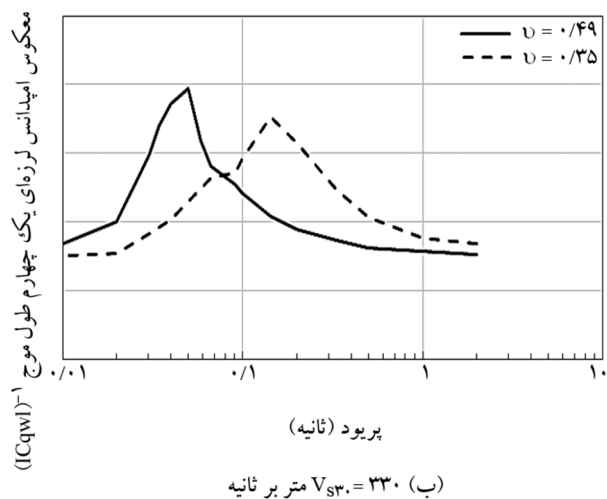
(ب) تغییرات سرعت های میانگین یک چهارم طول موج (V^{Qwl}) با پریود

شکل (۱۴): نمونه‌ی مراحل محاسبه پارامتر $(IC^{Qwl})^{-1}$

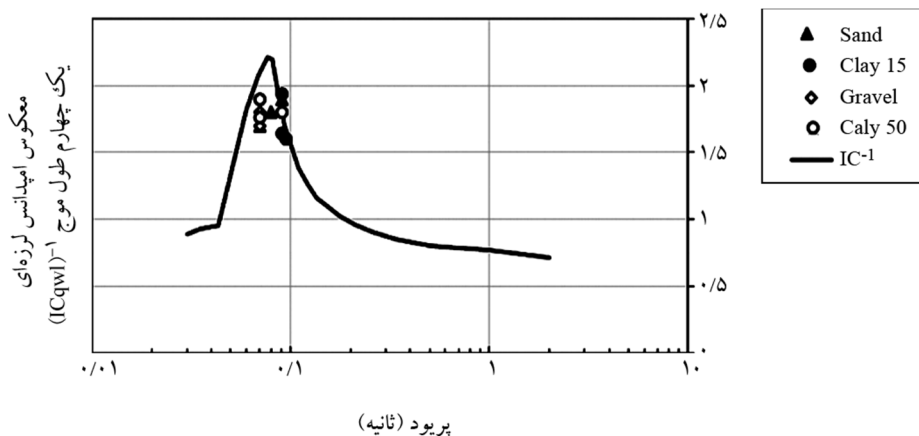
شد، سازگار است. به منظور بررسی بیشتر در شکل (۱۶) نمودار تغییرات $(IC^{Qwl})^{-1}$ برحسب پریود برای پروفیل با $V_{30} = 230$ متر بر ثانیه با نسبت پواسون $0/49$ با نقاط بیشینه (قله) منحنی های V/H زلزله های دارای پالس سرعت مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود منحنی $(IC^{Qwl})^{-1}$ می تواند پیش بینی مناسبی از محل رخ دادن بیشینه مقدار منحنی V/H داشته باشد. از این رو پیشنهاد می شود از پارامتر $(IC^{Qwl})^{-1}$ برای لحاظ نمودن اثرات ساختگاهی در روابط کاهش دگی تجربی V/H استفاده شود.

$$IC^{Qwl}(f) = \frac{V_1^{Qwl}(f, \lambda_1/4)}{V_2^{Qwl}(f, \lambda_2/4)} \quad (1)$$

در شکل (۱۵) نحوه‌ی تغییرات $(IC^{Qwl})^{-1}$ برحسب پریود برای پروفیل هایی با سرعت موج برشی متوسط 30 متر مختلف و در دو حالت نسبت پواسون $0/35$ و $0/49$ ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشینه مقدار هر یک از نمودارها در حوالی پریود اساسی متناظر با سرعت موج فشاری ساختگاه رخ داده و نحوه‌ی تغییرات $(IC^{Qwl})^{-1}$ برحسب پریود نیز با شکل طیف های V/H که در نمودارهای بخش های قبلی ارائه



شکل (۱۵): نمودارهای تغییرات معکوس امپدانس لرزه‌ای یک چهارم طول موج بر مبنای سرعت موج فشاری $(IC^{qwl})^{-1}$ برحسب پریود برای پروفیل‌هایی با سرعت موج برشی و ضرایب پواسون مختلف



شکل (۱۶): نمودار تغییرات $(IC^{qwl})^{-1}$ برحسب پریود برای پروفیل با $V_{s30} = 230$ متر بر ثانیه با نسبت پواسون ۰/۴۹ و مقایسه آن با نقاط بیشینه (قله) منحنی‌های V/H زلزله‌های دارای پالس سرعت

۵- نتیجه گیری

بر طیف V/H است. اگرچه مقدار ضریب پواسون خاک وابسته به جنس و سختی آن است ولی تا حد زیادی از اشباع یا خشک بودن خاک (سطح آب زیرزمینی) تأثیر می‌پذیرد. به‌طور کلی با افزایش ضریب پواسون از میزان تأثیر پارامترهای دینامیکی و منحنی‌های رفتاری خاک بر طیف V/H به‌شدت کاسته شده است. به‌عبارت‌دیگر با اشباع شدن خاک از میزان رفتار غیرخطی خاک کاسته می‌شود. اگرچه در روابط کاهندگی تجربی اطلاعاتی از وضعیت خاک در ساختگاه‌های ثبت زلزله به لحاظ وضعیت آب زیرزمینی ارائه نشده است ولی نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوب نتایج تحلیل‌های عددی با روابط تجربی کاهندگی در حالت مواجهه با خاک‌های نرم در حالت اشباع (مقادیر ضریب پواسون حدود ۰/۴۹) است. این نتایج لزوم در نظر گرفتن وضعیت آب زیرزمینی را به‌هنگام برآورد خصوصیات مؤلفه قائم حرکت زلزله یادآور می‌سازد. در نهایت با توجه به همخوانی خوب منحنی تغییرات معکوس امپدانس لرزه‌ای یک‌چهارم طول‌موج بر مبنای سرعت موج فشاری $(IC^{qm})^{-1}$ بر حسب پیروید با طیف‌های V/H ، پیشنهاد می‌شود از این پارامتر برای لحاظ نمودن اثرات ساختگاهی در روابط کاهندگی تجربی V/H استفاده شود. بررسی روابط کاهندگی موجود برای نسبت طیفی شتاب V/H همچنین نشان می‌دهد که در برخی از آنها اثرات ساختگاهی به‌صورت طبقه‌بندی‌های کلی در نظر گرفته شده است که در نتیجه برای محدوده‌ی متفاوتی از سرعت موج برشی عملاً نتایج یکسانی ارائه می‌دهد. در صورتی که مطابق نتایج تحقیق حاضر ویژگی‌های طیف‌های V/H می‌تواند با تغییرات سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری بسیار متفاوت باشد. این موارد لزوم بازنگری در روابط کاهندگی تجربی V/H را آشکار می‌سازد.

مراجع

- Papazoglou, A. (1995) *Near-Source Vertical Earthquake Ground Motion; an Assessment of Causes and Effects*. MSc. Dissertation, Imperial College, London.
- Elnashai, A. and Papazoglou, A. (1997) Procedures and spectra for analysis of RC structures subjected

در این مقاله به‌منظور بررسی اثرات محلی آبرفت بر خصوصیات مؤلفه قائم زلزله‌های میدان نزدیک، ساختگاه‌هایی با ویژگی‌های دینامیکی آبرفت متفاوت متشکل از خاک‌های شنی، ماسه‌ای و رسی در نظر گرفته شده و به‌جای دسته‌بندی‌های کلی ذکر شده در روابط کاهندگی تجربی به‌صورت دو بعدی مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی شدند. رکوردهای زلزله انتخابی جهت تحلیل‌ها شامل ۲۳ شتاب‌نگاشت ثبت شده در نواحی فعال تکتونیکی با فاصله (R_{jb}) کمتر از ۱۰ کیلومتر از گسل و دارای بزرگ‌گامی بین ۵/۶ تا ۷/۶۲ می‌باشند. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده به دو دسته دارای پالس و بدون پالس مشهود سرعت در تاریخچه زمانی خود تقسیم شدند. نتایج تحلیل‌ها به‌صورت نسبت طیفی قائم به افقی (V/H) طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵ درصد ارائه و بررسی شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر نسبت طیفی شتاب V/H برای تمامی حالت‌ها در نزدیکی پیروید اساسی ساختگاه متناظر با سرعت موج فشاری رخ داده است. نکته قابل توجه این است که محدوده پیرویدی مشاهده‌ی حداکثر نسبت طیفی شتاب V/H در روابط تجربی همواره کمتر از حدود ۰/۸ ثانیه است. در حالی که مطابق نتایج تحلیل‌های عددی به‌خصوص در حالت مواجهه با خاک‌های نرم‌تر در بالای سطح آب زیرزمینی این محدوده می‌تواند تا حدود ۰/۳ ثانیه نیز گسترش یابد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر رسوبات بر نسبت طیفی شتاب V/H است. با افزایش سختی خاک از تأثیر پارامترهای دینامیکی خاک بر طیف V/H کاسته می‌شود که دلیل آن کاهش رفتار غیرخطی با افزایش سختی خاک طی تحریک زلزله است. به‌طور کلی طیف‌های V/H محاسبه شده برای ساختگاه‌های نرم همخوانی کمتری را با روابط کاهندگی تجربی نشان می‌دهد و هرچه میزان سختی خاک افزایش می‌یابد این همخوانی افزایش می‌یابد.

نتایج تحلیل‌های پارامتریک انجام شده بر روی نسبت پواسون خاک نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل ملاحظه این متغیر (به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی ارتباط بین سرعت موج برشی و فشاری در خاک)

- Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 695-707.
13. Bozorgnia, Y., Niazi, M., and Campbell, K.W. (1995) Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake. *Earthquake Spectra*, **11**, 515-525.
 14. Bozorgnia, Y., Niazi, M., and Campbell, K.W. (1996) Relationship between vertical and horizontal ground motion for the Northridge earthquake. *Proceeding of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.
 15. Watabe, M., Tohido, M., Chiba, O., and Fukuzawa, R. (1990) Peak accelerations and response spectra of vertical strong motions from near-field records in USA. *Proceeding of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 301-306.
 16. Silva, W. (1997) *Characteristics of Vertical Strong Ground Motions for Applications to Engineering Design*. FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities.
 17. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800), 4th Edition.
 18. Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. (2004) The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, **8**(2), 175-207.
 19. Ghalandarzadeh, A. and Motamed, R. (2005) Microtremor measurements: an effective tool for site effect studies. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **38**(6), 777-790 (in Persian).
 20. Ghalandarzadeh, A. and Kavand, A. (2010) Determination of shear wave velocity of sedimentary deposits by means of microtremor measurements. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **44**(4), 525-536 (in Persian).
 21. QUAKE/W (2012) The GeoStudio suite, GEO-SLOPE International Ltd., Alberta, Canada.
 22. Elgamal, A.W., Zagal, M., Tang, T.H., and Stepp, J.C. (1995) Lotung downhole array. I: Evaluation of site dynamic properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(4), 350-362.
 3. Legeron, F. and Sheikh, M.N. (2009) Bridge support elastic reactions under vertical earthquake ground motion. *Engineering Structures*, **31**(10), 2317-2326.
 4. Hashash, Y.M., Phillips, C., and Groholski, D.R. (2010) Recent advances in non-linear site response analysis. *5th International Conference in Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No. OSP 4, 1-22.
 5. He, L. (2005) *Liquefaction-Induced Lateral Spreading and its Effects on Pile Foundations*. Ph.D. Thesis, University of California San Diego, USA.
 6. Papazoglou, A. and Elnashai, A. (1996) Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(10), 1109-1138.
 7. Newmark, N.M., Blume, J.A., and Kapur, K.K. (1973) *Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants*. Consulting Engineering Services, Urbana, IL.
 8. Niazi, M. and Bozorgnia, Y. (1989) Behavior of vertical ground motion parameters in the near-field. *Seismological Research Letters*, **60**(4).
 9. Niazi, M. and Bozorgnia, Y. (1990) Observed ratios of PGV/PGA and PGD/PGA for deep soil sites across SMART-1 array, Taiwan. *Proceedings of Fourth US National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, CA, 367-374.
 10. Niazi, M. and Bozorgnia, Y. (1992) Behaviour of near source vertical and horizontal response spectra at SMART-1 array, Taiwan. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**(1), 37-50.
 11. Niazi, M. and Bozorgnia, Y. (1992) *Behaviour of Near Source Vertical and Horizontal Response Spectra at SMART-1 Array*. Taiwan.
 12. Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993) Distance scaling of vertical and horizontal responsespectra of the Loma Prieta earthquake. *Earthquake*

- | اصطلاحات فنی | |
|---|--|
| Microtremors | ۱- خرد لرزه‌ها |
| Cholesky Factorization | ۲- تجزیه چولسکی |
| Lotung Large Scale Seismic Test: Lsst | ۳- ساختگاه آزمایش‌های لرزه‌ای بزرگ مقیاس لوتیانگ |
| Quarter Wavelength Seismic Impedance Contrast | ۴- امپدانس لرزه‌ای یک چهارم طول موج |
-
23. Amorosi, A., Elia, G., Boldini, D., and Schiavone, F. (2011) Seismic ground response analysis: comparison between numerical simulations and observed array data. *Proceedings of 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile, Paper No. SGRAM.
 24. Borja, R.I., Caho, H.Y., Montans, F., and Lin, C.H. (1999) Nonlinear ground response at Lotung LSST site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(3), 187-197.
 25. Borja, R.I., Lin, C.H., Sama, K.M., and Masada, G.M. (2000) Modelling non-linear ground response of nonliquefiable soils. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**, 63-83.
 26. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970) *Soil Moduli and Damping Factors for Response Analyses*. Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
 27. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991) Effects of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **117**(1), 89-107.
 28. PEER Ground Motion Database [Online]. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu>
 29. Bommer, J., Akkar, S., and Kale, O. (2011) A model for vertical-to-horizontal response spectral ratios for Europe and Middel East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**(4), 1783-1806.
 30. Gulerce, Z. and Abrahamson, N.A. (2011) Site specific design spectra for vertical ground motion. *Earthquake Spectra*, **27**(4), 1023-1047.
 31. PEER (2013) PEER reports on NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions.
 32. Poggi, V., Edwards, B., and Fah, D. (2012) Characterizing the vertical-to-horizontal ratio of ground motion at soft-sediment sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(6), 2741-2756.