



فرکانس غالب ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتاب‌نگارها

عطیه اسحاقی^{۱*}، محمد شاهوار^۲، اسماعیل فرزانه‌گان^۳، حسین عبداللهی^۴

۱. استادیار، زلزله‌شناسی مهندسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۲. استادیار، زلزله‌شناسی مهندسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۳. عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۴. کارشناس، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، پست الکترونیکی: a.eshaghi@bhrc.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، مقادیر نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی (H/V) برای داده‌های جنبش نیرومند زمین ثبت شده توسط شبکه شتابنگاری زلزله ایران (ISMN) محاسبه شده است. سپس، یک رویه یکنواخت و مشخص برای انتخاب فرکانس بیشینه (fpeak) از نسبت طیفی H/V متوسط برای هر ایستگاه در پایگاه داده اعمال شده است. بر اساس این رویه، مقدار فرکانس بیشینه در ۴۶۷ ایستگاه شبکه شتابنگاری زلزله ایران برآورد شده است. همچنین، رابطه بین فرکانس بیشینه و مقدار سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول (VS30) مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، این رابطه برای ایران ارائه شده است. نتایج و عدم قطعیت‌های مدل مربوط با سایر مطالعات مرتبط انجام شده برای ژاپن، آمریکای شمالی مرکزی و شرقی و همچنین، مطالعات قبلی برای ایران مقایسه شده است. در مقایسه با سایر مجموعه‌های داده، مدل VS30 ارائه شده برای ایران بالاترین مقادیر VS30 را در بین همه مدل‌ها نشان می‌دهد. از معادله توسعه‌یافته در این مطالعه می‌توان برای تخمین VS30 در ایستگاه‌های ISMN که هیچ مشخصه ساختگاه دیگری وجود ندارد استفاده نمود. همچنین، با استفاده از فرکانس بیشینه به‌دست آمده می‌توان نوع خاک را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ طبقه‌بندی نمود.

کلیدواژگان

اثرهای ساختگاه، شتابنگار، نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی H/V، سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول (VS30)

Fundamental Site Frequency Based on H/V Spectral Ratios of Iranian Earthquakes Using Strong Motion Data

Attieh Eshaghi^{1*}, Mohammad Shahvar², Esmail Farzanegan³, Hossein Abdollahi⁴

1, 2, 3. Faculty member, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

4. M.Sc., Research expert, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, a.eshaghi@bhrc.ac.ir

Abstract

In this study, horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio have been calculated for strong ground motion data recorded by the Iranian Strong Motion Network (ISMN). Then, a uniform and specific procedure is applied for selecting the peak frequency (fpeak) of the average H/V spectral ratio for each station in the database. Based on this procedure, the fpeak value is estimated at 467 stations of ISMN. Also, the relationship between peak frequency and time-averaged shear-wave velocity in the upper 30 m (VS30) has been investigated and this relationship is presented for Iran. The results and uncertainties of the model are compared with other related studies conducted in Japan, Central and Eastern North America (CENA), as well as previous studies for Iran. Compared to other datasets, the VS30 model presented for Iran shows the highest VS30 values among all models. The equation developed in this study can be used to estimate VS30 at ISMN stations where there is no other site characteristics. Also, using the peak frequency obtained, the soil type can be classified according to the 2800 standard.

Keywords

Site Effects, Strong Motion Data, Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratio, Time-Averaged Shear-Wave Velocity in the Upper 30 m (VS30)

۱- مقدمه

میزان جنبش زمین، محتوای فرکانسی و مدت زمان زلزله تأثیر می‌گذارد
آبه عنوان مثال ۱ و ۲. در نتیجه تحقیقات علمی، تجربی و نظری متعددی
در مورد این پدیده صورت گرفته است. در میان روش‌های مختلفی که برای

شرایط زمین‌شناسی محلی یک ساختگاه یا به عبارتی، اثر پاسخ ساختگاه یکی
از عوامل کلیدی در تعیین میزان خسارت ناشی از زلزله است که بر روی

است (<https://ismn.bhrc.ac.ir>). در این مطالعه از داده‌های شتابنگاری ثبت شده از رویدادهایی با بزرگی (M) بزرگتر از ۲.۵ که در ایستگاه‌های دارای فاصله رومرکزی $R \leq 300$ کیلومتر ثبت شده‌اند استفاده شده است (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در مطالعه

تعداد نگاشت سه مؤلفه‌ای	تاریخ	بزرگا	فاصله
6771	1999-2018	$M \geq 2.5$	$R < 300$ km

در ابتدا، ۶۷۷۱ نگاشت سه مؤلفه‌ای ثبت شده در ۸۴۴ ایستگاه انتخاب گردید (جدول ۱). شکل ۱ نقشه ایستگاه‌های ثبت‌کننده و زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. تمام نگاشت‌های موجود در بانک به صورت چشمی بررسی شدند و شروع امواج P و S و همچنین پنجره S در آنها تعیین گردید. پس از آن، نگاشت‌های با کیفیت که دارای شروع موج P و S واضح بودند و همچنین پنجره S در آنها مشخص بود، برای وارد شدن به محاسبات انتخاب شدند. در این مطالعه زلزله‌هایی که حداقل سه نگاشت ثبت شده با کیفیت داشتند انتخاب شدند و برای محاسبه نهایی فرکانس بیشینه یا f_{peak} مورد استفاده قرار گرفتند.

به‌طور کلی، عملیات زیر بر روی تمام شتابنگاشت‌ها انجام پذیرفته است:

- ۱- نگاشت‌ها تصحیح خط مبنا شده‌اند.
- ۲- نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای هر مؤلفه نگاشت محاسبه شده است و باند فرکانسی که در آن نسبت S/N بیشتر از سه است، برای وارد شدن در محاسبات انتخاب شده است.
- ۳- نگاشت‌ها بر اساس نسبت سیگنال به نوفه فیلتر شدند تا بازه فرکانسی که در آن نگاشت قابل اعتماد است مشخص شود و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.
- ۴- پنجره انتخابی از شروع موج P تا انتهای S برای استفاده در محاسبات انتخاب شده است.
- ۵- طیف فوریه (FAS) برای سه مؤلفه نگاشت در باند فرکانسی از پیش تعیین‌شده (در ۱۰۰ بازه فرکانسی لگاریتمی نمونه‌گیری شده به طور مساوی در فاصله از ۰.۱ تا ۴۹ هرتز) محاسبه گردیده است.
- ۶- طیف فوریه (FAS) هر مؤلفه با استفاده از یک پنجره کانو-امچی^۳ [۱۲] با پارامتر پهنای باند، b ، برابر با ۲۰ هموار شده است.
- ۷- مقدار H/V برای هر نگاشت سه مؤلفه‌ای محاسبه شده است (توضیحات در ادامه). داده‌ها فقط برای فرکانس‌هایی با نسبت سیگنال به نویز بیشتر از سه حفظ شده‌اند.

در نهایت، ۴۹۰۱ نگاشت سه مؤلفه‌ای وارد محاسبات نهایی شدند.

محاسبه اثر تقویت ساختگاه معرفی شده‌اند، یک روش بر اساس طیف مشاهده شده نسبت مؤلفه افقی به عمودی (H/V) داده‌های جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. اعتقاد بر این است که نسبت H/V منعکس‌کننده اثرهای کل تقویت در یک ساختگاه است. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که نسبت H/V در خاک نرم، معمولاً بیشینه واضح و پایداری را نشان می‌دهد که با فرکانس تشدید (f_0) همبستگی دارد [۳]. در نتیجه از این روش می‌توان برای تخمین f_0 ، که پارامتر مهمی برای توصیف پاسخ محلی خاک است استفاده نمود [۱، ۴، ۵ و ۶]. این روش همچنین دارای مزیت ارائه اطلاعات برای ساختگاه‌های موردنظر بدون نیاز به عملیات اضافی و هزینه‌بر است. یکی دیگر از پارامترهای شاخص برای توصیف میزان سختی خاک در یک ساختگاه خاص در زلزله‌شناسی مهندسی، $VS30$ است که نشان‌دهنده سرعت موج برشی متوسط تا عمق ۳۰ متری است. این پارامتر به عنوان یک متغیر برای اثرهای ساختگاه در تعدادی از معادلات اخیر پیش‌بینی حرکت زمین^۱ ($GMPE$) استفاده شده است. آیین‌نامه ایمنی ساختمان‌ها در برابر زلزله یا استاندارد ۲۸۰۰ در ایران و همچنین، بسیاری دیگر از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مانند قانون ساختمان ایالات متحده^۲ (شورای ایمنی لرزه‌ای ساختمان ۲۰۰۹) و اروپا (Eurocode 8) برای در نظر گرفتن شرایط پاسخ ساختگاه در ارزیابی جنبش نیرومند زمین طرح به $VS30$ متکی هستند. هر چند مقدار قابل‌توجهی تغییرات جنبش زمین غیرقابل توضیح پس از حذف اثر ساختگاه، پیش‌بینی شده توسط $VS30$ باقی می‌ماند [۷ و ۸]. با این حال، چندین مطالعه نشان داده‌اند که ممکن است $VS30$ نتواند پیش‌بینی صحیحی از تقویت ساختگاه به خصوص در فرکانس‌های پایین ارائه دهد [۹ و ۱۰]. همچنین، این مقدار در همه ساختگاه‌ها ممکن است موجود نباشد. در این مطالعه، مقدار H/V با استفاده از شتابنگاشت‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری زلزله ایران ($ISMN$) محاسبه گردیده است. سپس، مقدار فرکانس بیشینه در هر ایستگاه به‌دست آمده است. همچنین، همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده $VS30$ به‌دست آمده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی و فرکانس بیشینه برای ایستگاه‌های ثبت‌کننده زلزله مورد بررسی قرار گرفته است و یک مدل پیش‌بینی‌کننده $VS30$ با استفاده از پارامترهای H/V ارائه شده است.

۱-۱- داده شتابنگاری

شبکه شتابنگاری زلزله ایران ($ISMN$)^۲ در سال ۱۳۵۲ تأسیس گردیده است و به عنوان شبکه ملی شتابنگاری ایران شناخته می‌شود. این شبکه در حال حاضر دارای بیش از ۱۳۵۰ ایستگاه شتابنگاری فعال است و بیش از ۱۵۰۰۰ شتابنگاشت سه مؤلفه‌ای در بانک داده‌های آن وجود دارد. بیشتر این دستگاه‌های شتابنگاری در مناطق با لرزه‌خیزی بالا یا مراکز پرجمعیت و صنعتی قرار گرفته‌اند. نگاشت‌های حاصل نیز توسط چهار نسل مختلف از دستگاه‌های شتابنگاری ثبت و ضبط گردیده‌اند که سه نسل از آنها کماکان در این شبکه فعال هستند و جنبش نیرومند زمین را ثبت می‌نمایند [برای اطلاعات بیشتر مراجعه شود به ۱۱]. ایستگاه‌های $ISMN$ در مناطق با شرایط مختلف زمین‌شناسی نصب گردیده‌اند، اما فقط چهار ایستگاه دارای گمانه هستند که به آرایه لازم برای مقایسه جنبش زمین ثبت شده در سطح با عمق مجهز هستند. در همین حال، $VS30$ برای ۵۵۰ ایستگاه تعیین شده است که اطلاعات مربوط به این ایستگاه‌ها در وبگاه شبکه شتابنگاری موجود

¹ Ground Motion Prediction Equations

² Iran Strong Motion Network (ISMN)

³ Konno-Ohmachi

پروکسی [۲۳ و ۲۴] برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی، و در نتیجه محاسبه Vs30 در دسترس است.

شایان ذکر است در این مطالعه، سرعت موج برشی تمام ایستگاه‌هایی که VS30 برای آنها گزارش شده است، با استفاده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی محاسبه شده‌اند و تنها چهار ایستگاه در تهران هستند که ایستگاه درون چاهی دارند و همچنین، سرعت موج برشی بر اساس لاگ‌گیری گمانه موجود است. به‌طور کلی، لرزه‌نگاری انعکاسی و شکست مرزی دو روشی هستند که در آنها ساختار سرعت لرزه‌ای زمین‌شناسی زیر سطحی با استفاده از اندازه‌گیری‌های سطحی برآورد می‌شود. برای بیش از ۵۵۰ ایستگاه شتابنگاری در ایران بر اساس روش شکست مرزی مقدار VS30 تعیین شده است و در بانک اطلاعاتی شبکه این اطلاعات موجود هستند [۲۵]. روش بسیار دقیق دیگر برای به‌دست آوردن سرعت موج برشی و به‌طور کلی، خصوصیات ساختگاه و الگوی پاسخ ساختگاه احداث و حفر گمانه و انجام دادن روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی است. این روش دقیق اما بسیار پرهزینه است. در ایران در سال ۱۳۸۵ با توجه به اهمیت شهر تهران برای اولین بار احداث آرایه درون چاهی، در دو راستای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی برای چهار ایستگاه انجام شده است.

۲- محاسبه نسبت طیفی H/V

۲-۱- روش محاسبه نسبت طیفی H/V

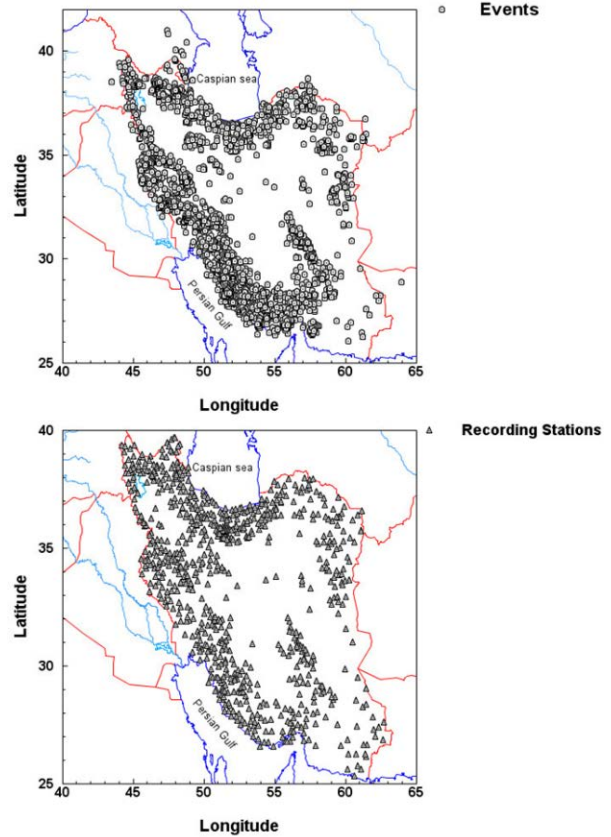
در ابتدا برای محاسبه H/V هر نگاشت سه مؤلفه‌ای، نخست طیف فوریه از هر مؤلفه شتاب را با استفاده از یک پنجره کانو- اوماچی [۱۲] با پارامتر هموارسازی $b=20$ نرم می‌کنیم [۲۶]. در این قسمت ما مقدار طیف را در ۱۰۰ نقطه بین فرکانس ۰.۱ تا ۴۹ هرتز محاسبه می‌نماییم. ما از طیف فوریه استفاده نمودیم به دلیل اینکه مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این روش باعث به دست آمدن f_{peak} با دقت بالاتر می‌شود [۲۷]. پس از این مرحله، میانگین دو مؤلفه افقی را در مقیاس \log_{10} محاسبه می‌کنیم؛ و پس از آن نسبت طیفی H/V با تقسیم میانگین هندسی طیف‌های افقی بر طیف دامنه هموار شده مؤلفه عمودی محاسبه می‌شود:

$$\log(H/V)_{ij} = 0.5(\log(H_1) + \log(H_2)) - \log(V), \quad (2)$$

که در آن، H_1 و H_2 طیف فوریه مؤلفه‌های افقی به ترتیب شرقی- غربی و شمالی- جنوبی هستند و V طیف فوریه مؤلفه عمودی مربوط است که در ایستگاه i از رویداد j ثبت شده‌اند. توجه داشته باشید که ما در سراسر این مطالعه از واحد لگاریتمی پایه ۱۰ استفاده می‌کنیم. سپس، طیف نهایی H/V در هر ایستگاه به عنوان میانگین مقادیر $\log(H/V)$ همه شتابنگاشت‌های ثبت شده در آن ایستگاه محاسبه می‌شود.

$$\log\left(\frac{\bar{H}}{\bar{V}}\right)_{i,f} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{i,f}} \log\left(\frac{H}{V}\right)_{ij}}{N_{i,f}} \quad (3)$$

به صورتی که $N_{i,f}$ تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایستگاه i در فرکانس f است و $N_{i,f}$ از ۳ تا ۱۹۳ متغیر است. شایان ذکر است این اعداد نشانگر نگاشت‌های با کیفیتی هستند که وارد محاسبات شده‌اند. $\log\left(\frac{\bar{H}}{\bar{V}}\right)_{i,f}$ در باند فرکانسی قابل اعتماد ایستگاه i محاسبه می‌شود. باند فرکانسی



شکل ۱ توزیع جغرافیایی زمین‌لرزه‌ها (بالا) و ایستگاه‌های ثبت‌کننده (پایین) مورد استفاده در مطالعه

۲-۱- سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی از سطح

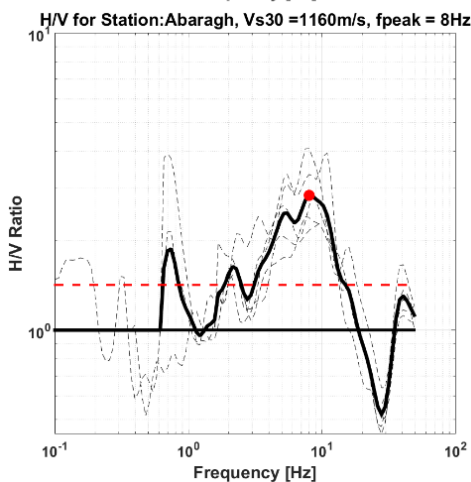
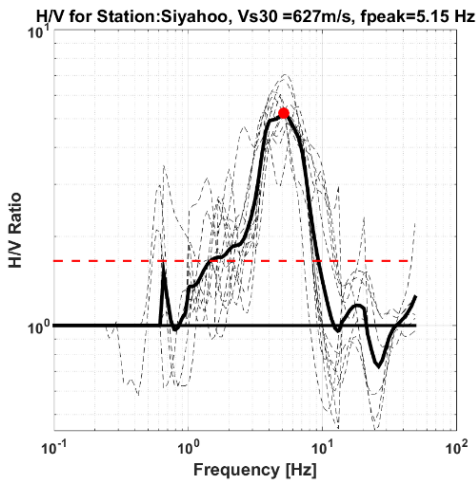
یک پارامتر شاخص جایگزین دیگر ساختگاه برای توصیف سختی لایه‌های خاک در زلزله‌شناسی مهندسی VS30 است که بیانگر متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر است [۱۳] و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{S30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{S_i}} \quad (1)$$

که در آن، d_i و v_{S_i} به ترتیب ضخامت (به متر) و سرعت موج برشی لایه نام (متر/ثانیه) را نشان می‌دهند و n نیز تعداد کل لایه‌ها است. VS30 چندین کاربرد دارد که عمده آن، استفاده به عنوان یک شاخص طبقه‌بندی‌کننده ساده برای ساختگاه، از نظر پاسخ لرزه‌ای آن در کدهای ساختمانی است [از جمله: ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. همچنین، این پارامتر به عنوان یک متغیر توضیحی برای اثر ساختگاه در تعدادی از معادلات اخیر پیش‌بینی جنبش زمین^۱ (GMPEs) مورد استفاده قرار گرفته است [از جمله: ۱۷ و ۱۸]. VS30 یک متغیر نسبتاً ساده است که با تقویت ساختگاه همبستگی خوبی نشان می‌دهد [به عنوان مثال: ۱۹]، هرچند مقدار قابل توجهی تغییرات جنبش زمین پس از حذف اثر ساختگاه پیش‌بینی شده توسط VS30 باقی می‌ماند که کماکان غیرقابل توضیح‌اند [به عنوان مثال: ۷، ۸ و ۲۰]. روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در محل ساختگاه [۲۱ و ۲۲]، یا روش‌های مبتنی بر

¹ Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

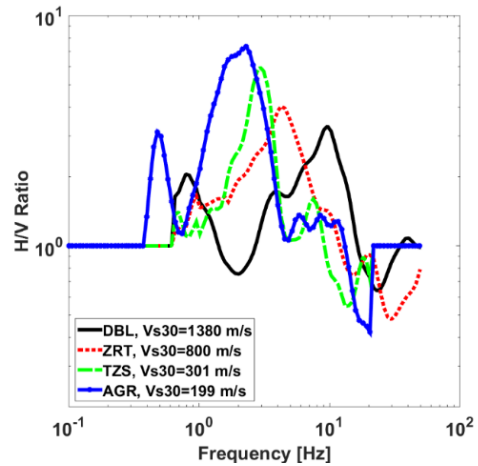
نمایانگر حداکثر میزان بزرگنمایی یا Apeak است و فرکانس مربوط به آن نیز fpeak است. با در نظر گرفتن فرضیه گفته شده برای نقطه حداکثری در محاسبات ما تعداد ۲۹۳ ایستگاه از ۴۶۷ ایستگاه یک نقطه حداکثری قابل توجه نشان می‌دهند. ۱۲۰ ایستگاه دارای دو نقطه حداکثری هستند و ۱۶ ایستگاه دارای ۳ نقطه حداکثری است. ۳۵ ایستگاه هم هیچ نقطه حداکثری قابل توجهی نداشتند که این ایستگاه‌ها از ادامه محاسبات حذف گردیدند. برای ایستگاه‌هایی که بیش از یک نقطه حداکثری داشتند، مشابه مطالعات پیشین [۲۸ و ۲۶] بزرگترین مقدار مشاهده شده برای نقطه بیشینه برای محاسبه Apeak و fpeak انتخاب شدند. برای نمونه نسبت طیف‌های مربوط به نگاشت‌های ثبت شده از زمین‌لرزه‌ها برای دو ایستگاه سیاهو و ابارق به همراه طیف H/V میانگین نهایی و همچنین نقاط حداکثری (دایره توپر) تعیین شده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. هر دو ایستگاه یک نقطه بیشینه واضح نشان می‌دهند. همچنین، ایستگاه ابارق که دارای سرعت موج برشی بالاتر است fpeak بالاتری نسبت به ایستگاه سیاهو نشان می‌دهد.



--- Earthquake H/V — Average (H/V)_f - - - Mean • Significant peak

شکل ۳ نسبت طیفی H/V برای دو ایستگاه نمونه سیاهو و ابارق. خط‌چین‌های خاکستری نشان داده شده طیف‌های افقی به عمودی (H/V) از رویدادهای ثبت شده در هر ایستگاه هستند. خط توپر سیاه میانگین طیف (H/V)_f را نشان می‌دهد. دایره توپر قرمز Apeak نهایی انتخاب شده هستند.

قابل اعتماد هر ایستگاه به این صورت تعریف می‌شود که در توالی فرکانس‌های مربوط، حداقل داده از سه نگاشت وجود داشته باشد. به این صورت اطمینان بیشتری برای محاسبه میانگین وجود خواهد داشت [۲۸]. شکل ۲ نمونه‌های طیف به دست آمده H/V برای چهار ایستگاه مختلف را نشان می‌دهد که دارای سرعت موج برشی گزارش شده بودند.



شکل ۲ نمونه‌ای از طیف‌های به دست آمده برای H/V برای چهار ایستگاه مختلف که سرعت موج برشی گزارش شده داشتند. با کاهش سرعت میزان تقویت دامنه افزایش می‌یابد و مقدار فرکانس غالب به فرکانس‌های کوچکتر شیفت پیدا می‌کند.

همان‌گونه که انتظار می‌رود با کاهش سرعت، هم میزان تقویت دامنه افزایش می‌یابد و هم مقدار فرکانس غالب به فرکانس‌های کوچکتر شیفت پیدا می‌کند و این روند در شکل ۲ کاملاً مشهود است.

۲-۲- محاسبه مقادیر fpeak و Apeak در هر ایستگاه

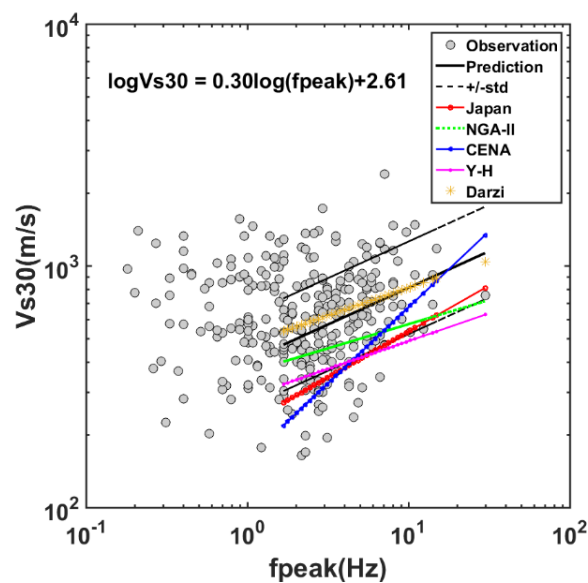
در هر ایستگاه مقدار بیشینه H/V مشاهده شده به نام دامنه بیشینه^۱ خوانده می‌شود و فرکانسی که در آن مقدار این دامنه بیشینه به دست آمده است نیز فرکانس بیشینه^۲ نامیده می‌شود. روشی که ما برای تعیین این مقادیر بیشینه استفاده می‌کنیم یک روش قابل تولید مجدد است که در ادامه شرح داده شده است. همان‌گونه که در بخش داده‌های شتابنگاری شرح داده شد، ابتدا شتابنگاشت‌ها پردازش شده و پس از آن برای هر ایستگاه تمام نگاشت‌های ثبت شده با کیفیت وارد محاسبه نسبت H/V نهایی برای آن ایستگاه می‌شوند. برای اطمینان از مقادیر فرکانس بیشینه به دست آمده ایستگاه‌هایی که حداقل سه زمین‌لرزه ثبت شده با کیفیت داشتند انتخاب شدند. به این صورت ۴۶۷ ایستگاه بودند که بیش از سه نگاشت با کیفیت داشتند که تقریباً ۵۵٪ کل ایستگاه‌های مورد بررسی هستند. از میان نگاشت‌های مربوط به این ۴۶۷ ایستگاه ۴۹۰۱ نگاشت دارای کیفیت مناسب بودند و وارد محاسبات نهایی شدند. از بین ۴۶۷ ایستگاه ذکر شده، ۲۹۲ ایستگاه دارای VS30 گزارش شده هستند (۶۲٪ کل ایستگاه‌های مورد مطالعه). در این مطالعه یک نقطه حداکثری به صورت حداکثر محلی که دامنه آن بیش از بیشینه دو مقدار تعریفی ذیل باشد تعریف شده است: ۱- یک و نیم برابر میانگین H/V و ۲- مقدار ۰.۳ (که برابر با بزرگنمایی ۲ در حالت خطی است). این نقطه

¹ Apeak
² fpeak

۳- نتایج

همان گونه که توضیح داده شد، مقادیر f_{peak} برای ۴۶۷ ایستگاه شتابنگاری که دارای حداقل سه نگاشت زمین لرزه ثبت شده با کیفیت بودند محاسبه گردید. ۲۹۲ ایستگاه از کل ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای مقدار VS30 گزارش شده (به دست آمده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی) بودند. اطلاعات مربوط به این ایستگاه‌ها به همراه مقادیر به دست آمده برای f_{peak} در انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در دست چاپ است که علامت‌ها در صورت تمایل می‌توانند به آن مراجعه فرمایند [۳۳]. با استفاده از این مقادیر رابطه بین سرعت موج و فرکانس بیشینه به دست آمده برای هر ایستگاه مورد مطالعه قرار گرفت تا مشخص شود که آیا می‌توان از مقدار f_{peak} به دست آمده برای تخمین VS30 در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری استفاده نمود یا خیر. شکل ۴ توزیع مقادیر VS30 مشاهده شده را بر حسب مقدار f_{peak} نمایش می‌دهد. در این شکل، یک رابطه افزایشی خطی بین VS30 و f_{peak} برای $f_{peak} \geq 1.6$ هرتز وجود دارد که با معادله ۴ نشان داده شده است. در کل ۲۰۰ ایستگاه دارای مقدار f_{peak} بیش از ۱.۶ هرتز بودند. مقدار VS30 برای مقادیر با $f_{peak} < 1.6$ با این معادله قابل برآورد نیست. مقدار انحراف معیار رابطه ۴ برابر با ۰.۱۹ در پایه لگاریتمی است که با ضریب عدم اطمینان ۱.۵۷ برابر است.

برای مقایسه، روابط به دست آمده برای ژاپن، NGA-II، آمریکای شمالی مرکزی و شرقی (CENA) و ایران [۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۰] در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند و همچنین، به ترتیب در معادلات ۵ تا ۹ ارائه شده‌اند.



شکل ۴ VS30 به عنوان تابعی از f_{peak} . خط توپر مشکی بهترین خط برازش شده است (مدل مرتبه اول)، و خطوط خط‌چین مشکی مقادیر ± 1 انحراف معیار را نشان می‌دهند. روابط موجود برای ژاپن، NGA-II و CENA [۲۶ و ۲۸] و ایران [۲۹ و ۳۰] به ترتیب با خطوط قرمز، سبز، آبی، صورتی و نارنجی نشان داده شده‌اند.

$$\log(Vs30) = 0.38(\pm 0.02) * \log(f_{peak}) + 2.35(\pm 0.01) \pm 0.16, \quad (5) \text{ ژاپن}$$

برای $f_{peak} \geq 1 \text{ Hz}$

$$\log(Vs30) = 0.20(\pm 0.02) * \log(f_{peak}) + 2.56(\pm 0.01) \pm 0.15, \quad (6) \text{ NGA-II}$$

برای $f_{peak} \geq 1 \text{ Hz}$

$$\log(Vs30) = 0.63(\pm 0.06) * \log(f_{peak}) + 2.2(\pm 0.04) \pm 0.14, \quad (7) \text{ CENA}$$

برای $f_{peak} \geq 2 \text{ Hz}$

$$\log(Vs30) = 0.23(\pm 0.03) * \log(f_{peak}) + 2.46(\pm 0.018) \pm 0.14, \quad (8) \text{ ایران}$$

برای $f_{peak} \geq 1 \text{ Hz}$, [۲۹]

$$\log(Vs30) = \log(290), \text{ برای } f_{peak} < 1 \text{ Hz}$$

$$\log(Vs30) = 0.23(\pm 0.1) * \log(f_{peak}) + 2.68(\pm 0.06) \pm 0.16, \quad (9) \text{ ایران}$$

برای $f_{peak} \geq 1 \text{ Hz}$, [۳۰]

نکته قابل توجه این است که رابطه به دست آمده در مطالعه حاضر با کمی اختلاف در شیب با رابطه درزی و همکاران [۳۰] هم‌خوانی بهتری دارد. رابطه یغمایی و حسنی [۲۹] دارای یک خطای محاسبه است، از این جهت که در بانک داده ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری زلزله ایران، تعداد زیادی ایستگاه با سرعت موج برشی زیر ۱۷۵ m/s وجود ندارد. احتمالاً سرعت در هدر داده‌ها اشتباه خوانده شده‌اند و برای همین مقدار عرض از مبدأ برای رابطه ۸ بسیار کمتر از رابطه به دست آمده در این مطالعه و مطالعه درزی و همکاران [۳۰] است. نکته دیگر این که در دو مطالعه دیگر در مورد ایران تعداد ایستگاه‌های به کار رفته برای تعیین f_{peak} کمتر از مقداری است که ما انتخاب کردیم (حداقل سه نگاشت با کیفیت در یک ایستگاه) که می‌تواند در تعیین فرکانس تشدید مطمئن بسیار تأثیرگذار باشد. همچنین، در مطالعه درزی و همکاران [۳۰] پراکندگی داده‌های با فرکانس بیشینه زیر یک هرتز نشان داده نشده‌اند تا بتوان انتخاب فرکانس یک هرتز را برای حد قابل قبول بودن فرکانس بررسی کرد.

نگاهی دقیق‌تر به شکل ۴ نشان می‌دهد که روندهای متفاوتی برای نواحی مختلف قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که رابطه بین H/V و VS30 با توجه به منطقه مورد مطالعه می‌تواند متفاوت باشد که بستگی به شرایط غالب خاک منطقه دارد. قابل توجه است که در بین مدل‌های مقایسه شده ساختگاه‌های ایران دارای بیشترین مقادیر VS30 هستند. همچنین مدل پیش‌بینی VS30 ایران f_{peak} کمتری را برای VS30 مشخص نشان می‌دهد، که این نکته را درزی و همکاران [۳۰] نیز در مطالعه خود ذکر نموده‌اند. یک دلیل مطرح شده برای این موضوع ممکن است وجود لایه‌های خاک کم سرعت در سطح برای اکثر ایستگاه‌های ایران باشد که خاک سخت‌تر را پوشانده‌اند [۳۰].

$$\log(Vs30) = 0.30(\pm 0.11) * \log(f_{peak}) + 2.61(\pm 0.07) \pm 0.19, \quad (4) \text{ این مطالعه}$$

برای $f_{peak} \geq 1.6 \text{ Hz}$

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش H/V مطالعاتی در مورد ایران انجام گرفته است که طبقه‌بندی نوع خاک را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ می‌توان با استفاده از مقدار فرکانس بیشینه تخمین زد [۳۱ و ۳۲]. با استفاده از نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر می‌توان با استفاده از مقادیر fpeak به‌دست آمده طبقه‌بندی نوع خاک را در ایستگاه‌های شتابنگاری که دارای اطلاعات زمین‌شناسی VS30 نیستند، تخمین زد. همچنین، با استفاده از رابطه ۴ می‌توان مقدار VS30 را نیز در ایستگاه‌های فاقد مقدار گزارش شده تخمین زد.

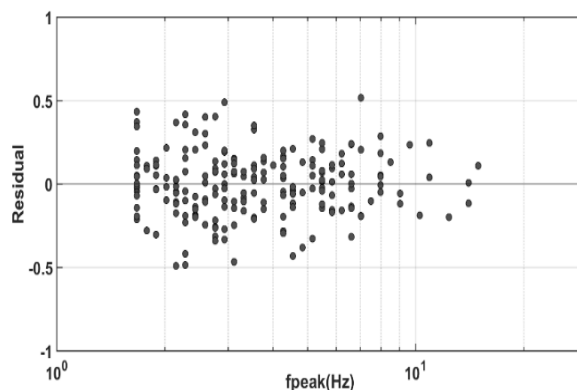
در مقایسه برتری‌های نسبی دو روش H/V و VS30 به عنوان متغیرهای توصیف‌کننده ساختگاه، به‌طور کلی می‌توان گفت که روش H/V ارزان‌تر است و به‌دست آوردن آن برای یک ساختگاه خاص آسان‌تر است، مگر اینکه VS30 از دیگر مؤلفه‌های برآوردکننده برای تعیین سرعت موج برشی (پروکسی‌هایی) مانند توپوگرافی تخمین زده شود که در این صورت عدم اطمینان بیشتری دارد. علاوه بر این، نسبت H/V حامل اطلاعات در مورد پاسخ لایه‌های عمیق‌تر است، در مقایسه با VS30 که فقط ۳۰ متر بالا را در نظر می‌گیرد. در نهایت، می‌توان گفت که روش H/V دارای اطلاعات غنی‌تری در مورد محتوای فرکانس و درجه تقویت است، در حالی که VS30 یک پارامتر توصیف‌کننده محدودتری است [۲۶]. در این مطالعه، سعی بر این شد که فرکانس بیشینه ساختگاه با استفاده از روش H/V تعیین گردد و همچنین رابطه بین VS30 و این پارامتر بررسی شد. چنین همبستگی برای درک بهتر نقاط قوت و ضعف این متغیرهای توصیف‌کننده ساختگاه مفید است. این رابطه به ما توانایی تخمین VS30 از نسبت H/V را می‌دهد که می‌توان از VS30 به‌دست آمده در کدهای ساختمانی و یا در روابط تخمین جنبش زمین استفاده کرد. به‌طور کلی، ساختگاه‌های نرم‌تر نسبت‌های بالاتر H/V را نسبت به ساختگاه‌های سخت‌تر نشان می‌دهند، و با افزایش نرمی (به عنوان مثال، از سنگ به خاک) فرکانس اوج به سمت مقادیر پایین تغییر می‌کند. به‌طور کلی، روش تجربی با استفاده از نسبت طیفی H/V در صورت وجود تعداد قابل‌توجهی نگاشت جنبش زمین، تقریباً روشی قابل قبول برای طبقه‌بندی نوع خاک ساختگاه ثبت‌کننده جنبش زمین است. ولی این نکته را باید مد نظر قرار داد که این روش به داشتن تعداد قابل‌توجهی نگاشت حاصل از جنبش زمین نیاز دارد و مقدار نهایی بزرگنمایی و فرکانس غالب به نگاشته‌های موجود وابسته است. در نهایت، باید این نکته را بیان داشت که اطلاعات حاصل از گمانه دارای دقت و اطمینان بالاتری هستند و در صورت موجود بودن این اطلاعات، می‌توان با ضریب اطمینان بالاتری اثر ساختگاه را مورد بررسی قرار داد. اما در صورتی که این اطلاعات موجود نباشند، روش‌های تجربی از جمله روش H/V به خاطر کم هزینه بودن و سرعت انجام دادن کار (در صورت موجود بودن شتابنگاشت‌های کافی و با کیفیت) جزو روش‌های پیشنهادی برای بررسی اثر ساختگاه هستند. با این حال، اندازه‌گیری موج برشی و اطلاعات بیشتر، مانند زمین‌شناسی سطحی، داده‌های گمانه و غیره هنوز برای روشن شدن عدم قطعیت چنین طرح‌های تجربی مورد نیاز است.

۵- قدردانی

از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جهت حمایت از پروژه "ارزیابی شرایط ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتابنگارها" قدردانی می‌شود. همچنین، از سازمان برنامه و بودجه و وزارت راه و شهرسازی برای پشتیبانی و حمایت از شبکه شتابنگاری زلزله ایران قدردانی می‌گردد.

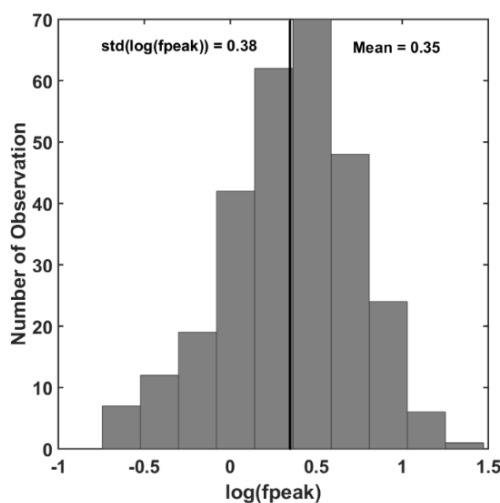
شکل ۵ مقادیر باقی‌مانده VS30 را با استفاده از رابطه ۴ پیشنهاد شده در این مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر باقی‌مانده از رابطه زیر محاسبه شده‌اند:

$$\text{VS30 (مشاهده شده)} = \log_{10}(\text{VS30 باقی‌مانده}) - \log_{10}(\text{پیش‌بینی شده VS30})$$



شکل ۵ توزیع مقادیر باقی‌مانده پیش‌بینی VS30 به عنوان تابعی از fpeak بر اساس مدل پیشنهادی در این مطالعه

همان‌گونه که از توزیع مقادیر باقی‌مانده در شکل ۵ مشخص است این مقادیر به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند و روند خاصی را نشان نمی‌دهند. توزیع فرکانس اوج به همراه مقدار میانگین و مقدار انحراف معیار آن در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق شکل ۶، توزیع فرکانس اوج دارای چولگی منفی است. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که بیشتر ایستگاه‌ها دارای fpeak در فرکانس‌های بالا هستند، که می‌توان دلیل آن را مربوط به لایه‌های خاک پوشاننده کم عمق با سرعت کمتر بر روی یک لایه سخت‌تر دانست. شایان ذکر است که نتایج به‌دست آمده در مطالعه درزی و همکاران [۳۰] نیز مقادیر مشابهی را برای مقدار میانگین فرکانس اوج (۰.۳۴) نسبت به مقادیر به‌دست آمده در این مطالعه یعنی ۰.۳۵ نشان می‌دهد.



شکل ۶ هیستوگرام فرکانس اوج به‌دست آمده از نسبت H/V با استفاده از داده‌های شتابنگاری مورد مطالعه

۶- مراجع

- [21] J. A. Hunter, H. L. Crow, Shear wave velocity measurement guidelines for Canadian seismic site characterization in soil and rock, (Open File 7078), *Geological Survey Canada*, 227, 2012, <http://dx.doi.org/10.4095/291753>.
- [22] S. L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, p. 653.
- [23] T. Allen, D. J. Wald, On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS30), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99:935–43, 2009.
- [24] A. Yong, S. E. Hough, J. Iwahashi, A. Braverman, Terrain-based site conditions map of California with implications for the contiguous United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102:114–28, 2012.
- [25] A. Farzanegan, H. Mirzaei Alavijeh, F. Sinaian, *Research report of construction geological studies using boundary failure seismography method in accelerometer stations of the country*, Publications of Building and Housing Research Center, 2010- 2011.
- [26] H. Ghofrani, G. Atkinson, Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectralratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 30–43, 2014.
- [27] C. Zhu, F. Cotton, M. Pilz, Detecting Site Resonant Frequency Using HVSR: Fourier versus Response Spectrum and the First versus the Highest Peak Frequency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(2):427-40, 2020, <https://doi.org/10.1785/0120190186>.
- [28] B. Hassani, G. Atkinson, Applicability of the Site Fundamental Frequency as a VS30 Proxy for Central and Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 653–664, 2016.
- [29] S. Yaghmaei-Sabegh, B. Hassani, Investigation of the relation between Vs30 and site characteristics of Iran based on horizontal-to-vertical spectral ratios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128- 105899, 2020.
- [30] A. Darzi, M. Pilz, M. R. Zolfaghari, H. D. Fa, An Automatic Procedure to Determine the Fundamental Site Resonance: Application to the Iranian Strong Motion Network, *Pure and Applied Geophysics*, 176, 3509–3531, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02153-z>.
- [31] M. Zare, P. Y. Bard, M. Ghafoory-Ashtiany, Site characterizations for the Iranian strong motion network, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18:101–23, 1999.
- [32] F. Sinaiean, *Study on Iran strong motion records*, Ph.D. thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, 2006.
- [۳۳] ع. اسحاقی، م. پورمحمدشاهوار، ا. فرزانهگان، ح. میرزایی، ارزیابی شرایط ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتابنگارها، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۱.
- [1] P. Y. Bard, M. Bouchon, The two-dimensional resonance of sediment filled valley, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 519–541, 1985.
- [2] J. Bielak, J. Xu, O. Ghattas, Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, 413–423, 1999.
- [3] H. Cadet, P. Y. Bard, A. M. Duval, E. Bertrand, Site effect assessment using KiK-net data, Part 2: site amplification prediction equation based on f_0 and V_{sz} , *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10:451–89, 2012.
- [4] G. M. Atkinson, J. F. Cassidy, Integrated use of seismograph and strong-motion data to determine soil amplification: Response of the Fraser River delta to the Duvall and Georgia Strait earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90:1028–40, 2000.
- [5] J. Lermo, F. J. Chávez-García, Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83:1574–94, 1993.
- [6] J. Lermo, F. J. Chávez-García, Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84:1350–64, 1994.
- [7] D. M. Boore, Can site response be predicted?, *Journal of Earthquake Engineering*, 8:1–41, 2004.
- [8] V. W. Lee, M. D. Trifunac, Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1250–8, 2010.
- [9] D. Bindi, M. Massa, M. L. Luzi, G. Ameri, F. Pacor, R. Puglia, et al., Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%- damped PSA at spectral periods up to 3 s using the RESORCE dataset, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 391–430, 2014.
- [10] M. Mucciarelli, M. R. Gallipoli, Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Proceedings of 1st European conference on earthquake engineering and seismology*, Cd-Rom edition, p. 270, 2006.
- [11] M. Shahvar, E. Farzanegan, A. Eshaghi, H. Mirzaei, *i1-net: The Iran Strong Motion Network*, Seismological Research Letters, 2021, doi: <https://doi.org/10.1785/0220200417>.
- [12] K. Konno, T. Ohmachi, Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88:228–41, 1998.
- [13] R. D. Borcherdt, *Simplified site classes and empirical amplification factors for site dependent code provisions*, Proceedings of NCEER, SEAOC, BSSC workshop on site response during earthquakes and seismic code provisions, University of Southern California, Los Angeles, CA, Nov 18–20, 1992.
- [14] BSSC (Building Seismic Safety Council), *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Parts: Provisions*, (Report No. FEMA-450), Washington D.C., Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [15] CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*, Bruxelles, 2004.
- [16] NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program), *Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1, Provisions*, FEMA 368, Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [17] N. Gregor, N. A. Abrahamson, G. M. Atkinson, D. M. Boore, Y. Bozorgnia, K. W. Campbell, et al., *Comparison of NGA-West 2 GMPEs, Earthq Spectra* 2014, <http://dx.doi.org/10.1193/070113EQS186M>.
- [18] S. Akkar, M. A. Sandikkaya, J. Bommer, Empirical ground-motion models for point- and extended- source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12:359–87, 2013.
- [19] D. M. Boore, W. B. Joyner, T. E. Fumal, *Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes, an interim report, Part 2*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 93–509, 1994.
- [20] V. W. Lee, M. D. Trifunac, Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1250–8, 2010.