



## تعیین نسبت طیفی مؤلفه قائم و افقی زلزله‌های نزدیک گسل

میلاذ محمدیان، عباس مهدویان\*، نعمت حسنی

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۰۲

### کلمات کلیدی:

زلزله  
استاندارد ۲۸۰۰  
نسبت V/H  
مؤلفه قائم

**خلاصه:** بر اساس بررسی‌ها صورت گرفته در چند دهه اخیر مشخص شده که خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک متفاوت از زلزله‌های حوزه دور از گسل است، از جمله این تفاوت‌ها مؤلفه قائم زلزله است. عدم در نظر گرفتن ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل ممکن است خسارات و فجایع انسانی و زیست محیطی ناشی از وقوع این نوع از زلزله را چندین برابر کرده و آثار ناشی آن بر محیط و سازه‌های موجود تا مدت‌ها قابل جبران نباشد (بخش عمده این خرابی‌ها در فاصله کوتاه رومرکزی، به خصوص در اعضای قائم دهانه بلند پل‌ها، سازه‌ها و ساختمان‌ها مربوط به مؤلفه قائم زلزله است). بر طبق مطالعات صورت گرفته در این حوزه مشخص شد که بررسی مؤلفه قائم و ارتباط آن با مؤلفه افقی زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در ایران مورد غفلت واقع گشته و تاکنون در این زمینه اقدامی صورت نپذیرفته است، این درحالیست که مشخصاً در آیین‌نامه‌ها و پژوهش‌های بین‌المللی این ضریب به صورت دقیق (نسبت V/H) تعیین شده است. بنا بر اهمیت بحث، به تعیین نسبت مؤلفه قائم بر مؤلفه افقی بر اساس داده‌های حوزه نزدیک گسل ایران پرداخته و با استفاده از تعداد ۶۹ زلزله حوزه نزدیک گسل (نه صرفاً دارای پالس) که در فاصله رومرکزی کمتر از ۳۰ کیلومتر و با بزرگای گشتاوری حداقلی ۵ و حداقل شتاب ماکزیمم ۲۰۰ متر بر مجذور ثانیه که در داخل ایران روی داده، نسبت طیفی V/H تعیین شده است. در نهایت پیشنهاد شده است همچون سایر استانداردها، آیین‌نامه‌ها و پژوهش‌های صورت گرفته که با استفاده از فرضیات ساده‌ای نظیر مقدار دوسوم نسبت طیفی V/H تعیین شده است از مقدار ۰/۷۱ برای تبدیل طیف پاسخ شتاب مؤلفه افقی به طیف پاسخ مؤلفه قائم داده‌های حوزه نزدیک گسل ایران استفاده شود.

### ۱- مقدمه

و بتنی قابل صرف نظر کردن نیست و بسیاری از آسیب‌ها در فاصله کوتاه رومرکز در اعضای قائم ساختمان و دهانه بلند پل‌ها مربوط به مؤلفه قائم زلزله است، بنابراین عواملی همچون توسعه امکانات ثبت نگاشت زلزله و افزایش توانایی مهندس‌ها در تحلیل دقیق سازه‌ها باعث شده که اثرات مؤلفه قائم زلزله بر روی پاسخ ساختمان‌ها و نحوه به‌کارگیری آن در طراحی لرزه‌ای مورد توجه محققان قرار بگیرد [۲-۹].

آثار مؤلفه قائم زلزله در گذشته به صورت ناچیز در نظر گرفته می‌شد، به‌نحوی که در پژوهش‌های گذشته و در نسخه‌های قدیمی برخی آیین‌نامه‌ها، از تأثیر مؤلفه قائم زلزله صرف نظر شده یا صرفاً به صورت ضریبی (دوسوم) از مؤلفه افقی در نظر گرفته می‌شد، از این رو یکی از روش‌های ساده جهت تعیین طیف طرح مؤلفه قائم زلزله استفاده از روابط تجربی نسبت طیفی V/H (مؤلفه قائم به افقی) است [۱۰، ۱۱].

مطالعات فرارانی در رابطه با مؤلفه قائم زلزله صورت گرفته [۷، ۱۲-

در طی رخداد زلزله، بیشتر نیروهای اینرسی ناشی از مؤلفه‌های افقی شتاب باعث خرابی سازه شده و اغلب در طراحی سازه از نیروی اینرسی ناشی از مؤلفه قائم شتاب صرف نظر می‌شود. در گذشته تصور این گونه بود که در سازه‌ها مؤلفه قائم زلزله به دلیل محتوای انرژی پائین در مقایسه با مؤلفه افقی زلزله توانایی ایجاد خرابی قابل توجه ندارد [۱].

اما با گسترش شبکه‌های لرزه‌نگاری و افزایش تعداد داده در سراسر دنیا مشخص شد که در زلزله‌های بزرگ، مؤلفه قائم حرکت نیرومند زمین خصوصاً در نواحی حوزه نزدیک گسل، نه تنها می‌تواند مساوی، حتی بیشتر از مؤلفه افقی باشد. آسیب‌ها و فروپاشی زلزله‌های بزرگی چون نورتریج، لوماپریتا، کوبه و بم نشان داده‌اند که تاثیر جنبش قائم زمین لرزه و مشاهده آثار متفاوت آن در بعضی از سازه‌ها، پل‌ها و همچنین ساختمان‌های فولادی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdavianabbas@yahoo.com



زاویه ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در اغلب حالات اثر یکی از مؤلفه‌ها (مؤلفه افقی عمود بر امتداد گسل) حاکم است، همچنین ممکن است گاهی اوقات اثر مؤلفه برآیند حاکم شود.

### ۳- ویژگی طیفی زلزله حوزه نزدیک

برش پایه سیستم‌های سخت بیشترین مقدار و سازه‌های خیلی شکل‌پذیر کمترین مقدار را دارد، پارامتر کنترل‌کننده در طراحی سازه‌های شکل‌پذیر که با ارتعاش و جابجایی بیشتر در حالت پلاستیک، انرژی زلزله‌ها را تلف می‌کنند، سرعت یا جابجایی است؛ بنابراین برش پایه وارد به آن‌ها کم است. با وسعت ناحیه شتاب-حساس، سازه‌های شکل‌پذیر در این ناحیه واقع شده و به صورت سخت رفتار می‌کنند؛ بنابراین سازه‌ای که در زلزله‌های حوزه دور در گروه سازه‌های شکل‌پذیر طبقه‌بندی می‌شود، در زلزله‌های حوزه نزدیک جزو سازه‌های سخت هستند؛ برش پایه وارده ناشی از زلزله افزایش می‌یابد و چون سازه به صورت سخت ارتعاش می‌کند فرصت ندارد با جابجایی بیشتر، انرژی زلزله را تلف کند، بنابراین شکل‌پذیری ظاهری سازه کاهش می‌یابد [۳۰].

در توصیف رفتار و پاسخ سازه‌های واقع در حوزه نزدیک از دیدگاه طیفی، مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر جابجایی زمین (PGD)، از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند و این پارامترها نسبت به زلزله‌های حوزه دور به طور مشخصی بزرگ‌تر بوده و بر رفتار سازه‌ها بسیار تأثیرگذار است. در زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک به لحاظ فاصله کوتاه بین محل شکست و محل دریافت آن، فرصتی برای میرا شدن فرکانس‌های بالا نبوده، از همین رو تاریخچه زمانی شتاب آن‌ها محتوای فرکانسی بالایی دارند، برخلاف زلزله‌های حوزه دور که انرژی زلزله در کل زمان ارتعاش توزیع می‌شود، در زلزله‌های حوزه نزدیک بخش عمده‌ای از انرژی زلزله در یک یا چند پالس ابتدایی قرار دارد.

یکی دیگر از تفاوت‌هایی که معمولاً در بین زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور وجود دارد و بیشترین تأثیر را در نحوه پاسخ سازه‌ها دارند، نسبت‌های PGV/PGA و PGD/PGV است که در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل دارای پالس، نسبت PGV/PGA آن‌ها بالا است و معمولاً این نسبت برای زلزله‌های حوزه نزدیک اثر پدیده جهت‌پذیری را در نگاشت نشان می‌دهد و در واقع این نسبت هر چه بزرگ‌تر باشد نگاشت پالسی‌تر خواهد بود [۳۰].

به لحاظ دامنه و محتوای فرکانسی مشخصات مؤلفه قائم نگاشت

[۱۵]، همچنین روابط و ضریب‌های برای نسبت طیفی  $V/H$  معرفی شده است [۱۹-۱۶]. از طرفی برخی از آئین‌نامه‌های بین‌المللی و دستورالعمل‌های مهندسی در نسخه‌های قدیمی و جدید خود برای تعیین این نسبت توصیه‌های متفاوتی دارند [۲۰-۲۴]، به عنوان مثال ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ اثرات مؤلفه قائم زمین‌لرزه را به صورت یک نیروی قائم در نظر گرفته است [۲۵].

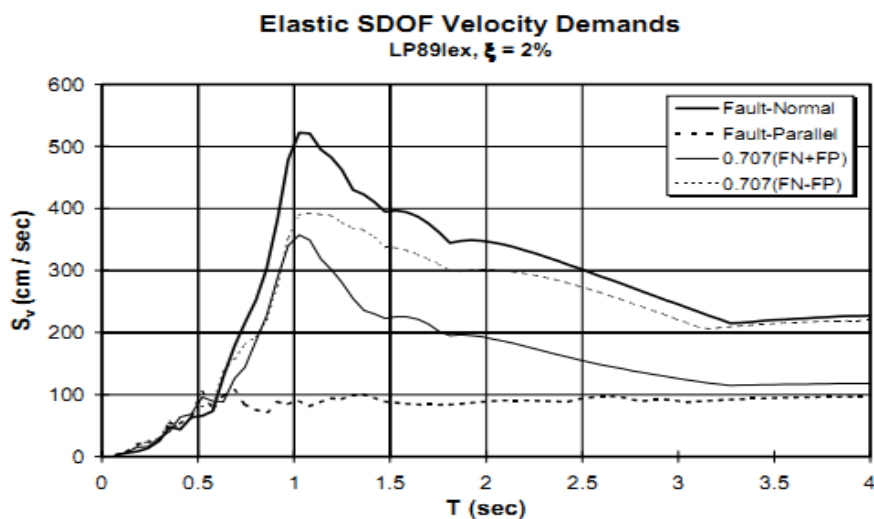
اهمیت تعیین و بررسی مؤلفه قائم زلزله به عنوان هدف این پژوهش و همچنین پارامتری مهم که در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و شریان‌های حیاتی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده زمانی مشخص می‌شود که با توجه به لرزه خیزی بالای برخی نقاط کشور و وجود گسل‌های فعال در مجاورت برخی از مراکز جمعیتی و شهری ایران و همچنین وجود کمربند لرزه‌ای آلپ-همیالیای، احتمال وقوع زلزله‌های با مؤلفه قائم قابل توجه در حوزه نزدیک گسل دور از ذهن نیست. بنابراین باید با بررسی دقیق مؤلفه قائم زلزله و تعیین آن بعنوان پارامتری مهم که نقشی مهم در طراحی برخی سازه‌ها می‌تواند ایفا کند، تمرکز بیشتری بر روی تعیین نسبت مؤلفه قائم با مؤلفه افقی بخصوص در ساختگاه‌های که در مناطق نزدیک به گسل قرار دارند داشت.

### ۲- زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل

زلزله‌های حوزه نزدیک به گسل معمولاً بر اثر عواملی از جمله مکانیسم شکست، جهت‌پذیری شکست (جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه) و جابجایی ضربه‌ای ماندگار زمین، اغلب شدیدتر از زلزله‌های معمولی ثبت شده طی یک رخداد مشابه و تحت شرایط ساختگاهی یکسان ولی دور است، زیرا نزدیکی به چشمه لرزه‌ای اجازه کاهندگی قابل توجهی را به زلزله نمی‌دهد؛ بنابراین تاریخچه زمانی شتاب این نوع زلزله‌ها دارای محتوای فرکانسی بسیار بالا با دامنه بزرگ و زمان تدوام کوتاه است [۲۶].

ورود یک‌باره حجم بالای انرژی به سازه در مدت‌زمانی کوتاه (پتانسیل خرابی)، بالا بودن مقدار نسبت سرعت حداکثر به شتاب حداکثر زمین و تغییر شکل‌های دائمی بزرگ در زمین باعث مشخص شدن ویژگی‌های متفاوت زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور شده است [۲۶]. هادسون و هوسنر [۲۷]، بولت [۲۸] و برترو و همکاران [۲۹] با شناسایی برخی از ویژگی‌های مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک در سال ۱۹۵۷ مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته تا آن زمان را انجام دادند.

با توجه به مؤلفه‌های زلزله‌های نزدیک گسل، جهت‌گیری سازه‌هایی که در محدوده نزدیک به گسل واقع شده‌اند، نیز مهم است. این موضوع توسط علوی و کراوینکلر [۲۶] با بررسی اثرات هر یک از مؤلفه‌ها و برآیند آن‌ها در



شکل ۱. طیف سرعت نگاشت حوزه نزدیک [۳۲]

Fig. 1. Velocity spectrum of the record near the fault [32]

درجه) رکورد حوزه نزدیک با اثر جهت انتشار گسلش را در شکل ۱ نشان داده است. شدت مؤلفه عمود بر امتداد گسل در مقایسه با مؤلفه موازی گسل بسیار آشکار است و وقتی این دو مؤلفه ۴۵ درجه چرخش داشته تفاوت بین طیف‌ها کمتر شده؛ اما طیف یکی از این دو مؤلفه چرخش یافته هنوز به طیف مؤلفه عمود بر امتداد گسل تا حدودی نزدیک است.

#### ۴- مواد و روش‌ها

اطلاعات شتاب‌نگاشتی مجموعه داده (تعداد ۶۹ نگاشت) حوزه نزدیک گسل در این پژوهش از بانک اطلاعاتی مرکز تحقیقات وزارت راه و شهرسازی که شامل زلزله‌های ثبت شده در ایران از ابتدای تاسیس شبکه شتاب‌نگاری تا سال ۲۰۱۵ با مشخصات، فاصله‌ی رومرکزی کمتر از ۳۰ کیلومتر،  $g \leq 0.2$  و  $M_w \leq 5$  جمع‌آوری شده است [۳۳].

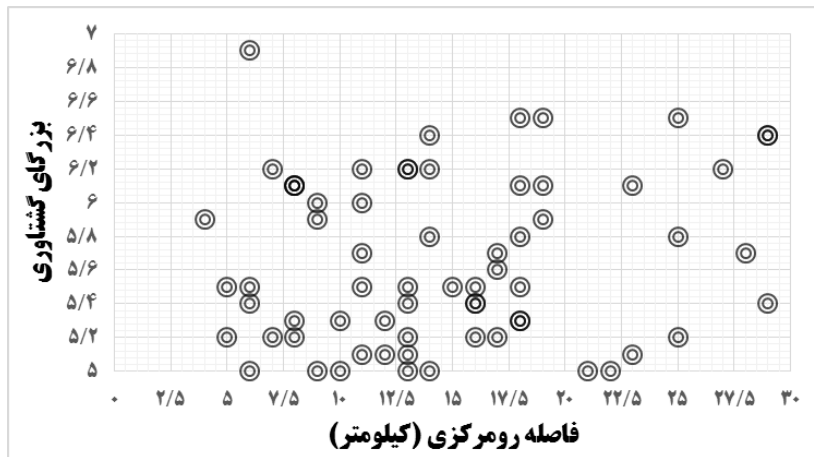
بر اساس هدف این مطالعه که تعیین نسبت طیفی  $V/H$  بر اساس داده‌های لرزه‌ای ایران در حوزه نزدیک (نه صرفاً داده‌های دارای پالس بلکه تمام نگاشتهای که نزدیک به گسل بوده و یا پالسگونه یا بدون پالس هستند) بیان شده است، ابتدا مؤلفه‌های سه گانه هر شتاب‌نگاشت تعیین و از هم جدا شده (مؤلفه قائم و افقی عمود بر امتداد گسل مشخص شده)، با اجرای فیلتر میان‌گذر در حوزه فرکانس و با انتخاب تابع تبدیل فیلتر باترورث با مرتبه‌ی ۴ (انتخاب فرکانس تصحیح FH، متناسب با نوع دستگاه و همچنین فرکانس تصحیح FL، با استفاده از روش سیگنال به نویز) و تصحیح خط

یک زلزله با مؤلفه‌های افقی آن تفاوت زیادی دارد. همچنین از مهم‌ترین ویژگی‌هایی متفاوت مؤلفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک با زلزله‌های حوزه دور، نسبت بیشینه شتاب قائم به بیشینه شتاب افقی (PVA/PHA) است که در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور بیشتر است [۳۱، ۳۲]، همچنین نسبت طیف پاسخ مؤلفه قائم به طیف پاسخ افقی (SV/SH) به پریود سازه و فاصله سازه از صفحه گسلش بستگی دارد.

#### ۳-۱- طیف پاسخ جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک

طیف‌های سه‌گانه با میرایی کم، جهت تحلیل طیفی سازه‌ها بکار می‌روند، در تحلیل یک سازه تحلیل طیفی از مزایای نسبت به روش استاتیکی برخوردار بوده و نتایج واقع بینانه به دست می‌دهد، بنابراین تعیین طیف پاسخ طراحی از جمله مسائل مهم در تحلیل طیفی است. طیف پاسخ جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل دستخوش تغییراتی است که به دلیل تغییر در مقادیر دامنه‌های زلزله است؛ بنابراین لازمه انجام تحلیل طیفی برای سازه‌های واقع در حوزه نزدیک گسل، تهیه طیف پاسخ در حوزه نزدیک است.

بر طبق بررسی‌ها مشخص شده که پاسخ سازه در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بر روی مؤلفه افقی عمود بر گسل متمرکز است، در مطالعه سامرویل [۳۲] که تمرکز بر مؤلفه عمود بر امتداد گسل را بیان می‌نماید، پاسخ طیفی یک طیف سرعت (مؤلفه عمود و موازی امتداد گسل و دو مؤلفه ۴۵



شکل ۲. توزیع فاصله رومرکز ۶۹ داده انتخاب شده نسبت به بزرگای زمین لرزه

Fig. 2. Epicenter distance distribution of 69 selected data relative to earthquake moment magnitude

در ابتدا مؤلفه افقی داده‌های نزدیک گسل با توجه به موقعیت ژئوفیزیکی ایستگاه شتاب‌نگاری آن‌ها نسبت به گسل مسبشان (عمود بر امتداد گسل) برای هر ۶۹ شتاب‌نگاشت مورد استفاده تشخیص داده شده و طیف شتاب مربوط به این مؤلفه‌ها رسم و این طیف پس از اصلاح و فیلترینگ به شتاب طیفی  $g$  ۱ نرمال شده و از این مقدار نرمال شده جهت تعیین نسبت طیفی  $V/H$  و مدل پیشنهادی استفاده شده است. قابل بیان است با توجه به این که رابطه بین تغییر مکان سازه با شتاب زمین، خطی است، بنابراین تفاوتی میان حالتی که شتاب‌نگاشت را بر عدد ثابت  $PGA$  (حداکثر شتاب زمین) تقسیم کرده با حالتی که طیف پاسخ حاصل شده را بر  $PGA$  تقسیم کرده، نمایان نخواهد شد.

شکل‌های (۲ تا ۴) توزیع بزرگای گشتاوری زمین لرزه‌ها، فاصله رومرکز و بیشینه شتاب زمین مربوط به ۶۹ داده انتخاب شده نسبت به یکدیگر را نشان داده است.

#### ۶- نتایج

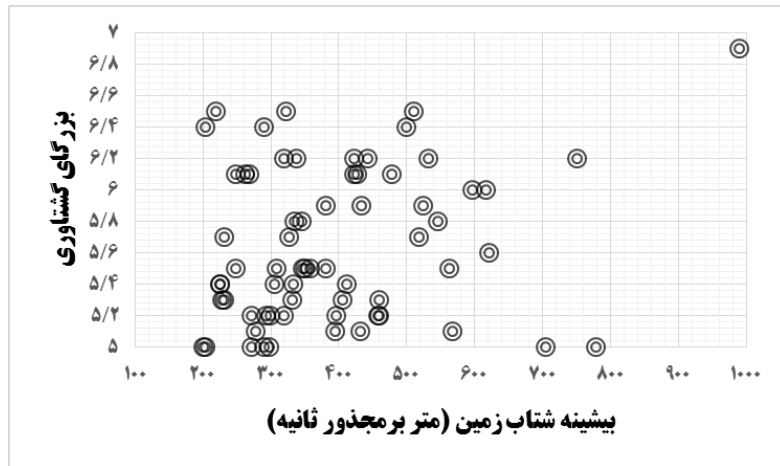
از جمله بزرگ‌ترین نیاز مهندسیین زلزله‌شناس، تهیه مدل قابل‌اعتمادی است که به طور مؤثر، طبیعت حرکت زمین (مخصوصاً در حوزه نزدیک منبع لرزه‌زا) را توصیف کند و اطلاعات موردنیاز طراحی سازه‌ها در مقابل حرکات زمین (مخصوصاً در حوزه نزدیک) را فراهم نماید. لذا به مجموعه داده‌های تجربی، تکمیلی به همراه مدل‌های تنوریک نیاز است که پارامترهای دینامیکی و سینماتیکی مرتبط با گسیختگی گسل را به مشخصات اصلی

مینا، تصحیح اولیه داده‌ها رقومی انجام شده، سپس با محاسبه طیف پاسخ شتاب، نسبت به نرمال کردن طیف‌ها به ماکزیمم شتاب حرکت زمین ( $PGA$ ) به منظور یکنواخت ساختن تمامی نسبت‌ها، نسبت  $V/H$  برای هر شتاب‌نگاشت با تقسیم نمودن طیف شتاب مؤلفه قائم بر طیف شتاب مؤلفه افقی (برای همان داده) تعیین شده است. از نتایج انحراف معیار مجموعه استفاده شده (جهت حذف داده‌های خیلی بزرگ یا خیلی کوچک) و داده‌های که بیش از میانگین بعلاوه یک انحراف از معیار بودند حذف شدند، سپس نسبت به متوسط‌گیری از کل داده‌ها پرداخته و با استفاده از رگرسیون خطی (با محاسبه میانگین مربعات خطا از الگوریتم  $Least\ square$  در نرم‌افزار  $Matlab$  برای مدل‌سازی داده‌ها استفاده شده) نسبت طیفی پیشنهادی  $V/H$  تعیین شده است.

#### ۵- طیف پاسخ شتاب و نسبت طیفی $V/H$ کل داده‌ها

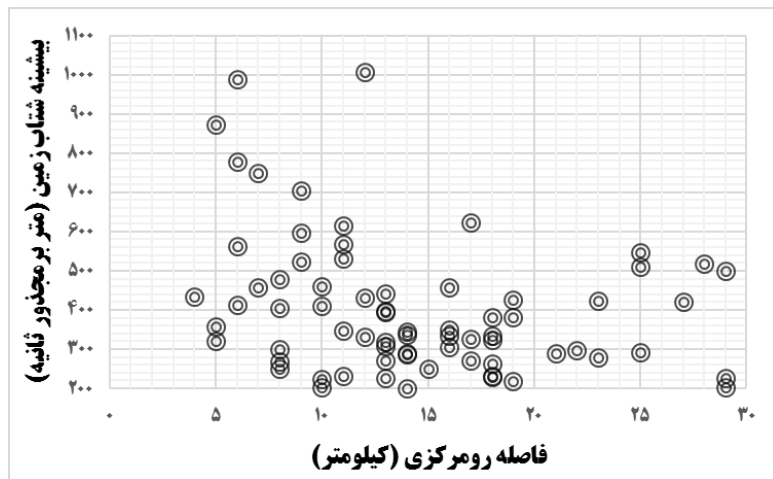
میرایی ۵٪ رایج‌ترین مقدار میرایی برای تعیین ویژگی‌های جنبش لرزه‌ای و مقایسه طیف پاسخ زلزله‌ها است که در طراحی سازه‌های مهندسی کاربرد دارد. در طیف بازتاب ارائه شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نیز از میرایی ۵٪ استفاده شده [۲۵]، از این رو برای تهیه طیف بازتاب داده‌ها برای شتاب‌نگاشت‌های تصحیح شده، از میرایی ۵٪ استفاده شده است.

برای مقایسه شتاب‌نگاشت‌هایی زلزله‌های مختلف و همچنین ترکیب نتایج آن‌ها، لازم است که آن‌ها را هم‌پایه کرده که رایج‌ترین روش برای هم‌پایه کردن شتاب‌نگاشت‌ها استفاده از شتاب اوج زمین است. برای این کار



شکل ۳. توزیع بیشینه شتاب زمین ۶۹ داده انتخاب شده نسبت به بزرگای زمین لرزه

Fig. 3. Peak ground acceleration distribution of 69 selected data relative to earthquake moment magnitude



شکل ۴. توزیع فاصله رومرکز ۶۹ داده انتخاب شده نسبت به بیشینه شتاب زمین

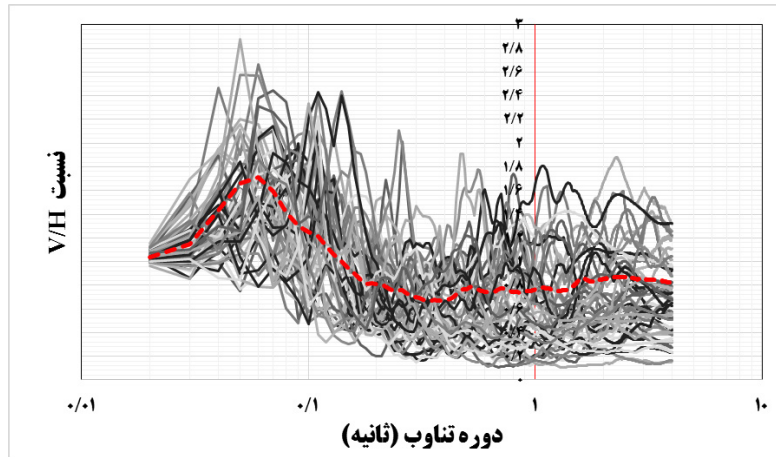
Fig. 4. Epicenter distance distribution of 69 selected data relative to Peak ground acceleration

زلزله‌های نزدیک گسل در اثر مؤلفه قائم به سازه‌ها وارد آمده صرف نظر شده است. از این رو اثر مولفه قائم زلزله باید در آیین‌نامه‌های طراحی به صورت دقیق یا نسبی از زلزله افقی و یا به صورت نسبی از بار مرده وارد بر سازه در نظر گرفته شود.

تعیین مولفه قائم یا نسبت آن با مولفه افقی در متون مدون و علمی دنیا چندین سال است که مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته و نتایج آن در اسناد و مدارک معتبر منتشر شده است، این موضوع باعث شد احساس نیازی در

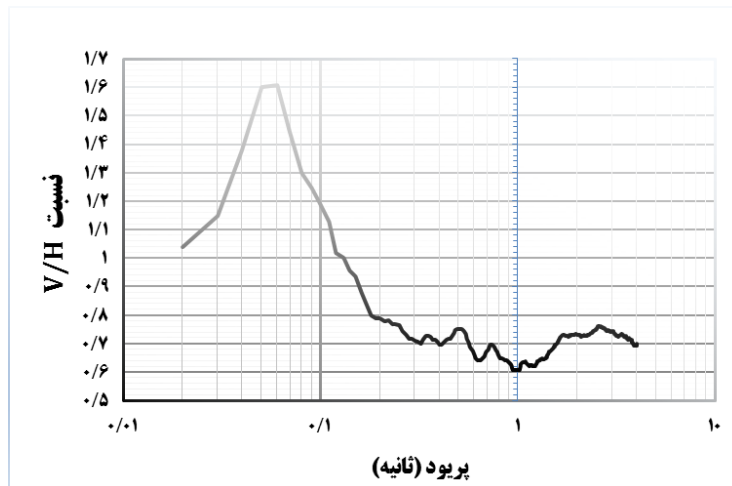
این پدیده ارتباط دهد.

در گذشته به علت کوچک بودن یا گسترده نبودن شبکه‌های لرزه‌نگاری و تعداد کم شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در اغلب مطالعات از مؤلفه قائم زلزله صرف نظر شده است، همچنین تصور بر این بود به دلیل هم‌راستا بودن ارتعاش قائم با نیروی وزن، سازه می‌تواند به خوبی این ارتعاش را تحمل کرده و پایدار بماند، اما در اکثر زلزله‌های دور از گسل بیشتر آسیب‌های مشاهده شده ناشی از مؤلفه افقی بوده و به همین دلیل از آسیب‌های شدیدی که در



شکل ۵. نسبت طیفی V/H کل داده‌ها (نمودار قرمز میانگین کل داده‌ها و محور افقی لگاریتمی است)

Fig. 5. V/H spectral ratio of the total data (the red graph is the average of the total data and the horizontal axis is logarithmic)



شکل ۶. متوسط نسبت طیفی V/H کل داده‌ها (محور افقی لگاریتمی است)

Fig. 6. Average V/H spectral ratio of all data (horizontal axis is logarithmic)

صورت گرفته است.

نتایج کلی و ضریب همبستگی مدل پیشنهادی نسبت V/H و مقایسه آن با ضرایب نسبی طیف حاصل شده از کل شتاب‌نگاشت‌ها در شکل (۷) و جدول (۱) در دسترس است. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل پیشنهادی به‌دست‌آمده از کل داده‌ها از الگوریتم Least squares در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است.

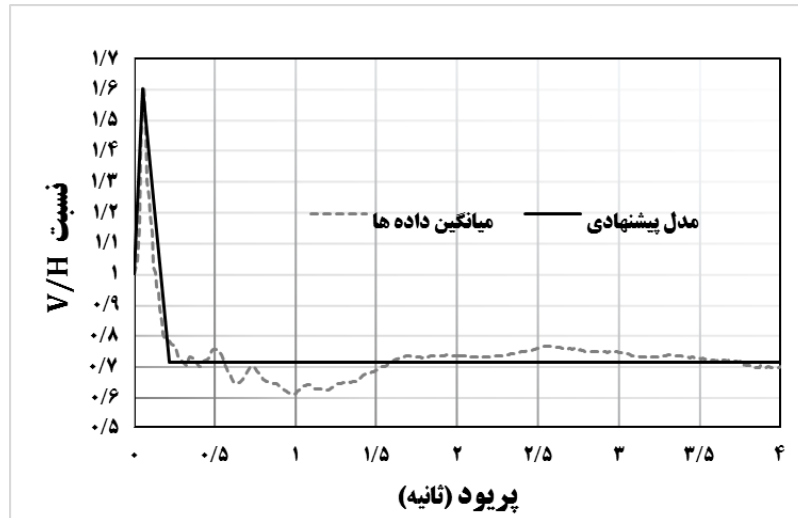
نسبت طیفی V/H برای کل داده‌ها در کل بازه پریودی (۰-۴ ثانیه) تعیین سپس با میانگین‌گیری و استفاده از رگرسیون خطی، ضریب پیشنهادی

این حوزه ایجاد شود که باعث شکل‌گیری هدف این پژوهش یعنی تعیین نسبت طیفی V/H (مؤلفه قائم به مؤلفه افقی) بر اساس داده‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل ایران شده است؛

نتایج کل اقدامات صورت گرفته بر روی طیف هر یک از نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل زمین‌لرزه‌ها (تعیین نسبت طیفی، تعیین انحراف از معیار، متوسط‌گیری و ارائه مدل) در قالب شکل‌ها، نمودارها و جداولی که در ادامه آمده پرداخته شده است.

برای همخوانی نتایج در زمان ترکیب با یکدیگر، عمل نرمال کردن طیف‌های پاسخ مؤلفه‌های افقی و قائم به ماکزیمم شتاب، برای کل داده‌ها





شکل ۷. متوسط ضرایب نسبی طیفی کل داده‌ها به همراه مدل پیشنهاد شده

Fig. 7. Average spectral coefficients of all data along with the proposed model

جدول ۱. مدل پیشنهاد شده V/H

Table 1. Proposed V/H model

ضریب همبستگی	۰/۹۲
$N = 12T + 1$	$T < 0.05$
$N = -5/235T + 1/1862$	$0.05 < T < 0.22$
$N = 0.71$	$0.22 < T < 4$

## ۷- نتیجه گیری

۱- در ویرایش چهارم آئین نامه ۲۸۰۰ ایران بحثی از حوزه نزدیک نشده است، تنها پارامتری که گویا بیان کننده در نظر گرفتن اثرات حوزه نزدیک گسل است ضریب (N) است که مبنا و معیار تعیین آن نیز ارائه نشده است (با اعمال این ضریب چنین برداشت می‌شود که اثرات حوزه نزدیک در نظر گرفته شده است) همچنین برای در نظر گرفتن مؤلفه قائم برای برخی از اعضای خاص سازه ای یک نیروی قائم به صورت نسبی از بار مرده وارد بر سازه لحاظ شده است.

نهایی به دست آمده ارائه شده است. قابل بیان است پارامترهای بزرگی زلزله، فاصله کانونی، خصوصیات ساختگاه، پریود سازه، جنس خاک و مکانیسم گسلش هر کدام به صورت مشخصی بر نسبت طیفی V/H تأثیرگذار است، اما فاصله کانونی و خصوصیات ساختگاه مهم‌ترین این موارد هستند. به دلیل محدودیت در تعداد داده‌های موجود در حوزه نزدیک گسل، بررسی‌های صورت گرفته فقط با در نظر گرفتن اثرات پریود سازه انجام شده و از طبقه‌بندی داده‌ها بر اساس سایر پارامترها و ارائه مدل متناسب با آن‌ها صرف نظر شده است.

شدیدی است؛ اما پس از این بخش (پریود ۰/۰۶ ثانیه) دامنه مدل پیشنهادی ثابت مانده و مقدار مشخصی را نشان داده که این مقدار برابر با ۰/۷۱ است. ۵- قاعده کلی استانداردهای مهندسی که برای برآورد حرکت قائم زمین در طراحی مقدار  $V/H = 0/67$  را در نظر گرفته با نتایج این پژوهش دارای اختلاف است، اما این اختلاف مقدار خیلی زیاد نیست.

۶- باتوجه به تاثیرپذیری نسبت  $V/H$  از پارامترهای مختلف، اگرچه معرفی مقدار  $0/67$  (برطبق اسناد و منابع معتبر بین المللی) برای نسبت  $V/H$  در کل بازه زمانی ۰ تا ۴ ثانیه با در نظر گرفتن اثر پارامتر پریود سازه مناسب و متناسب است، اما این امکان وجود دارد که بررسی و طبقه بندی این نسبت با سایر پارامترها نتایج دیگری را منجر شود، ازاینرو مقدار دقیق این ضریب بر اساس داده های ایران و نتایج این پژوهش برابر با مقدار  $0/71$  است.

۷- آیین نامه های ساختمانی همواره به منظور استانداردسازی و رعایت اصول ساخت مورد استفاده قرار می گیرند، بنابراین پیشنهاد می شود آیین نامه ۲۸۰۰ و همچنین در سایر مواردی که نیاز به تعیین طیف طرح مؤلفه قائم زمین لرزه برای کل سازه یا برخی از اعضای آن است، از ضریب طیفی  $V/H$  پیشنهادی این پژوهش استفاده شود.

۲- مؤلفه قائم یک زلزله در حوزه نزدیک از جمله پارامترهای مهم در طرح لرزه ای ساختمان ها، سازه های با توزیع مکانی، پل ها و شریان های حیاتی است که اگر تعیین این مؤلفه در طراحی سازه لازم باشد یا به دلیل عدم قطعیت های موجود در پدیده زلزله یا عدم شناخت و پیش بینی دقیق رفتار و خصوصیات خاک، طیف مؤلفه قائم نیاز باشد، باید این طیف ترسیم شود و یا با استفاده از روابط تجربی نسبت  $V/H$  طیف پاسخ مؤلفه قائم تهیه گردد.

۳- میان طیف مؤلفه افقی و قائم زلزله ارتباط معنادار وجود دارد (این نسبت ثابت نیست)، بنابراین برای ارتباط بین این دو طیف می توان از روابط تجربی موجود در سایر پژوهش ها و استانداردهای بین المللی استفاده کرد، اما اکیدا توصیه میشود برای زلزله های حوزه نزدیک گسل از رابطه پیشنهادی این پژوهش که برای تمامی داده های (نه صرفا پالسگونه) با مشخصات  $5 \leq Mw$  و  $PGA \geq 0/2g$  و فاصله کانونی تا ۳۰ کیلومتر معتبر است و باتوجه به رکوردهای ایران تعیین شده استفاده کرد.

۴- این مطالعه نشان داد که مدل پیشنهادی  $V/H$  در پریودهای ابتدای (شکل ۷) بسیار حساس به دوره تناوب طیفی است و دارای نرخ تغییرات

## پیوست

در این بخش اطلاعات شتابنگاشتی مجموعه داده حوزه نزدیک گسل انتخاب شده قرار داده شده است.

نام ایستگاه (فارسی)	نام ایستگاه (لاتین)	شماره رکورد	تاریخ	بیشینه شتاب زمین (cm/s/s)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله رومرکزی	ML	Mw
بجنورد*	Bojnoord*	<u>1727/02</u>	1997/02/04 10:37	203	37.71	57.49	29	6.6	6.4
کریق	Kariq	<u>1833/02</u>	1997/02/28 12:57	616	37.99	48.15	11	6.2	6
سیرج*	Sirch*	<u>1913/01</u>	1998/03/14 19:40	750	30.16	57.62	7	-	6.2
بالاده	Balaadeh	<u>2131/02</u>	1999/05/06 23:00	423	29.49	51.89	23	-	6.1
آوج	Avaj	<u>2749/01</u>	2002/06/22 02:58	499	35.66	48.92	29	-	6.4
بم	Bam	<u>3168/02</u>	2003/12/26 01:56	989	29.04	58.33	6	-	6.9
پول	Poul	<u>3330/01</u>	2004/05/28 12:38	290	36.28	51.61	14	-	6.4
زرند	Zarand	<u>3671/01</u>	2005/02/22 02:25	323	30.8	56.77	18	-	6.5
سد قدرونی	Qadrooni Dam	<u>3689/01</u>	2005/02/22 02:25	219	30.8	56.77	19	-	6.5
سد شیرین رود	Shirinrood Dam1	<u>3697/01</u>	2005/02/22 02:25	510	30.8	56.77	25	-	6.5



نام ایستگاه (فارسی)	نام ایستگاه (لاتین)	شماره رکورد	تاریخ	بیشینه شتاب زمین (cm/s/s)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله رومرکزی	ML	Mw
تمبان	Tomban	<u>4686/03</u>	2008 /09/10 11:00	597	26.83	55.81	9	6.1	6
اهر	Ahar	<u>5520/01</u>	2012 /08/11 12:23	262	38.52	46.86	18	-	6.1
سد ستارخان ۲	Satarkhan Dam 2	<u>5587/01</u>	2012 /08/11 12:23	268	38.52	46.86	8	-	6.1
سد ستارخان ۱	Satarkhan Dam 1	<u>5586/01</u>	2012 /08/11 12:23	249	38.52	46.86	8	-	6.1
سد ستارخان ۳	Satarkhan Dam 3	<u>5588/01</u>	2012 /08/11 12:23	478	38.52	46.86	8	-	6.1
سد ستارخان ۳	Satarkhan Dam 3	<u>5588/06</u>	2012 /08/11 12:34	442	38.45	46.75	13	-	6.2
سد ستارخان ۱	Satarkhan Dam 1	<u>5586/04</u>	2012 /08/11 12:34	319	38.45	46.75	13	-	6.2
سد ستارخان ۲	Satarkhan Dam 2	<u>5587/05</u>	2012 /08/11 12:34	338	38.45	46.75	14	-	6.2
ورزقان	Varzaqan	<u>5579/04</u>	2012 /08/11 12:34	532	38.45	46.75	11	-	6.2
اهر	Ahar	<u>5520/04</u>	2012 /08/11 12:34	422	38.45	46.75	27	-	6.2
کریق	Kariq	<u>1833/15</u>	1997 /03/02 18:29	290	38.05	47.89	21	5	5
خنج	Khonj	<u>2049/01</u>	1998 /11/13 13:01	397	27.81	53.53	13	5.5	5.2
اهر	Ahram	<u>2214/01</u>	1999 /09/24 19:17	226	28.73	51.53	29	5.3	5.4
صالح آباد	Saleh Abad	<u>2221/01</u>	1999 /11/08 21:37	333	35.75	61.25	16	5.4	5.4
علی آباد	Ali Abad	<u>2276/02</u>	1999 /11/26 04:27	459	36.76	54.84	16	5.2	5.2
درخت توت	Derakht Toot	<u>2224/03</u>	1999 /12/05 13:12	272	35.82	61.22	13	4.9	5
سرگز- احمدی	Ahmadi	<u>2510/01</u>	2000 /03/05 09:40	226	27.92	56.66	13	5.3	5.4
کمه	Komeh	<u>3124/01</u>	2003 /11/18 23:21	298	30.99	51.38	22	5.3	5
خفر	Khafir	<u>3125/01</u>	2003 /11/18 23:21	203	30.99	51.38	10	5.3	5
آباد	Abad	<u>3239/01</u>	2004 /03/02 07:51	412	29.01	51.32	6	5.8	5.4
سوزا	Suza	<u>3915/01</u>	2005 /11/27 10:22	327	26.78	55.9	17	-	5.7
لالی	Lali	<u>3938</u>	2005 /12/26 23:15	293	32.35	49.36	25	-	5.2
چالان چولان	Chalan Choolan	<u>4027/05</u>	2006 /03/30 19:36	320	33.69	48.95	5	5.7	5.2
چالان چولان	Chalan Choolan	<u>4027/08</u>	2006 /03/31 01:17	524	33.69	49	9	6.2	5.9
تمبان	Tomban	<u>4147/13</u>	2006 /06/28 21:02	518	27.02	55.83	28	6.1	5.7
کلور	Koloor	<u>4207/01</u>	2006 /11/05 20:06	200	37.48	48.83	14	5.6	5

نام ایستگاه (فارسی)	نام ایستگاه (لاتین)	شماره رکورد	تاریخ	بیشینه شتاب زمین (cm/s/s)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله رومرکزی	ML	Mw
سده	Sedeh	<u>4552/03</u>	2008 /03/09 03:51	568	33.36	59.35	11	4.9	5.1
موسیان	Moosiyan	<u>4646</u>	2008 /08/27 21:52	546	32.3	47.42	25	-	5.8
تمبان	Tomban	<u>4686/19</u>	2008 /09/11 02:16	278	26.96	55.93	23	4.8	5.1
حسینییه علیا	Hosseiniyeh Olya	<u>4942/01</u>	2010 /02/23 10:25	305	32.57	48.38	16	-	5.4
اشکنان	Eshkanan	<u>5016/02</u>	2010 /07/24 12:34	394	27.11	53.65	13	-	5.1
سد شهید یعقوبی ۲	Shahid Yaqoobi Dam2	<u>5093</u>	2010 /07/30 13:50	381	35.28	59.26	19	-	5.9
تربت حیدریه	Torbate Heiydaryeh	<u>5006</u>	2010 /07/30 13:50	434	35.28	59.26	4	-	5.9
کوه زر	Kooh-e-Zar	<u>5030/01</u>	2010 /08/27 19:23	622	35.45	54.4	17	5.9	5.6
قائمیه	Ghaemiyeh	<u>5062</u>	2010 /09/27 11:22	335	29.78	51.76	18	6.1	5.8
بابامنیر	Baba Monir	<u>5194/01</u>	2011 /03/05 11:24	299	30	51.19	8	-	5.2
نیشابور	Neyshaboore	<u>5382</u>	2012 /01/19 12:35	271	36.34	58.92	17	5.4	5.2
ورزقان	Varzaqan	<u>5589/07</u>	2012 /08/14 14:02	381	38.38	46.76	18	-	5.5
چای کندی ۱	Chaykandi1	<u>5597/43</u>	2012 /08/14 14:02	357	38.38	46.76	5	-	5.5
شیخ خم لو	Sheykh-Khomloo	<u>5609/11</u>	2012 /08/14 14:02	308	38.38	46.76	13	-	5.5
مهنترلو	Mehtar1	<u>5611/02</u>	2012 /08/14 14:02	347	38.38	46.76	11	-	5.5
سد ستارخان ۲	Satarkhan Dam 2	<u>5637/04</u>	2012 /08/14 14:02	350	38.38	46.76	16	-	5.5
سد ستارخان ۳	Satarkhan Dam 3	<u>5638/06</u>	2012 /08/14 14:02	249	38.38	46.76	15	-	5.5
سد نهند ۲	Nahand Dam 2	<u>5666/02</u>	2012 /08/15 17:49	231	38.35	46.61	18	-	5.3
چای کندی ۱	Chaykandi1	<u>5597/79</u>	2012 /08/15 17:49	406	38.35	46.61	8	-	5.3
ورزقان	Varzaqan	<u>5674/05</u>	2012 /11/07 06:26	331	38.45	46.52	12	-	5.3
شیخ خم لو	Sheykh-Khomloo	<u>5715/13</u>	2012 /11/07 06:26	460	38.45	46.52	10	-	5.3
چای کندی ۱	Chaykandi1	<u>5716/23</u>	2012 /11/07 06:26	229	38.45	46.52	18	-	5.3
بلداجی	Boldaji	<u>5755/03</u>	2013 /01/25 12:11	458	31.95	50.98	7	-	5.2
شنبه	Shonbeh	<u>5801/07</u>	2013 /04/09 12:05	431	28.46	51.66	12	-	5.1
شنبه	Shonbeh	<u>5801/69</u>	2013 /04/10 01:58	563	28.35	51.74	6	-	5.5
درویشی	Darvishi	<u>5894/02</u>	2013 /05/01 18:31	779	28.29	51.75	6	-	5
دالکی	Dalaki	<u>6063/01</u>	2013 /11/28 13:51	232	29.35	51.36	11	-	5.7
مورموری	Murmuri	<u>6302/01</u>	2014 /08/20 10:14	345	32.7	47.82	14	-	5.8

نام ایستگاه (فارسی)	نام ایستگاه (لاتین)	شماره رکورد	تاریخ	بیشینه شتاب زمین (cm/s/s)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله روم مرکزی	M <sub>s</sub>	M <sub>b</sub>
قائن*	Qaen*	1043	1976 /11/07 04:00	223	33.82	59.19	10	6.4	5.8
ناغان*	Naqan*	1054/01	1977 /04/06 13:36	872	31.9	50.76	5	6.1	5.6
دیپوک*	Deyhook*	1082/01	1978 /09/16 15:35	411	33.37	57.44	10	7.4	6.4
زنجیران	Zanjiran	1502/09	1994 /06/20 09:09	1006	28.96	52.61	12	5.7	5.9
فیروزآباد	Firooz Abad	1493/02	1994 /06/20 09:09	288	28.96	52.61	14	5.7	5.9

## منابع

- [7] K. Campbell, A study of the near-source behavior of peak vertical acceleration, *Eos*, 63 (1982) 1037.
- [8] G.P. Mavroeidis, A.S. Papageorgiou, A mathematical representation of near-fault ground motions, *Bulletin of the seismological society of America*, 93(3) (2003) 1099-1131.
- [9] G.-Q. Wang, X.-Y. Zhou, P.-Z. Zhang, H. Igel, Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(1) ((2002) 73-96.
- [10] Y. Bozorgnia, K.W. Campbell, The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02) (2004) 175-207.
- [11] Y. Bozorgnia, M. Niazi, K. Campbell, Relationship between vertical and horizontal ground motion for the Northridge earthquake, in: *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, Proceedings, 1996.
- [12] G. Bureau, Near-source peak ground accelerations, (1981).
- [13] M. Niazi, Y. Bozorgnia, Behaviour of near-source vertical and horizontal response spectra at smart-1 array, Taiwan, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 21(1) (1992) 37-50.
- [14] W. Silva, Characteristics of vertical strong ground motions for applications to engineering design, 1088-
- [1] Y. Bozorgnia, M. Niazi, Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(8) (1993) 695-707.
- [2] N. Ambraseys, J. Douglas, Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 23(1) (2003) 1-18.
- [3] Y. Bozorgnia, M. Niazi, K.W. Campbell, Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake, *Earthquake spectra*, 11(4) (1995) 515-525.
- [4] M. Mohammadian, A. Mahdavian, N. Hassani, A Mathematical Model to Consider the Pulse-Like Earthquake Effects in Seismic Design Spectrums Based on Strong Motions of Iran, *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 4(4) (2017) 89-106. (in Persian)
- [5] M. Mohammadian, A. Mahdavian, N. Hassani, Investigating the effect of pulse earthquakes on the dynamic behavior of soils, in: *the second international conference on new research achievements in civil engineering, architecture and urban management*, Tehran, 2015. (in Persian)
- [6] K.W. Campbell, Erratum: Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra, *Seismological Research Letters*, 71(3) (2000) 352-354.

- [25] H.a.u.D.R.C. Ministry of Road & Urban Development. Road, Earthquake Resistant Design of Buildings-code 2800, in: T.c.o.I.b.s.a. regulations (Ed.) Fourth Edition, 2014. (in Persian)
- [26] B. Alavi, H. Krawinkler, Effects of near-fault ground motions on frame structures, John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford, (2001).
- [27] D.E. Hudson, G.W. Housner, An analysis of strong-motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March 22, 1957, Bulletin of the seismological society of America, 48(3) (1958) 253-268.
- [28] B.A. Bolt, The san fernando valley, california, earthquake of february 9 1971: Data on seismic hazards, Bulletin of the seismological society of America, 61(2) (1971) 501-510.
- [29] V.V. Bertero, S.A. Mahin, R.A. Herrera, Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, Earthquake engineering & structural dynamics, 6(1) (1978) 31-42.
- [30] X. Li, H. Dou, X. Zhu, Engineering characteristics of near-fault vertical ground motions and their effect on the seismic response of bridges, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 6(4) (2007) 345-350.
- [31] M. Watabe, M. Tohido, O. Chiba, R. Fukuzawa, Peak accelerations and response spectra of vertical strong-ground motions from near-field records in the USA, in: Proc. 8th Japan Earthquake Engineering Symposium-1990, (1990) 301-306.
- [32] P. Somerville, Magnitude scaling of near fault ground motions, EOS, Trans. Am. Geophys. Union, 81 (2000).
- [33] H.a.U.D.R.C. Road, Iran Strong Motion Network., in: www.bhrc.ir
- 3800, 1997.
- [15] M.A. Ansary, F. Yamazaki, Behavior of horizontal and vertical SV at JMA sites, Japan, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 124(7) (1998) 606-616.
- [16] R.V. Amirbekian, B.A. Bolt, Spectral comparison of vertical and horizontal seismic strong ground motions in alluvial basins, Earthquake Spectra, 14(4) (1998) 573-595.
- [17] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7(2) (2000).
- [18] M. Mohammadian, A. Mahdavian, N. Hassani, The V/H response spectral ratio of near fault field earthquakes according to Iran's data, Iranian Journal of Geophysics, 17(1) (2023) 21-38. (in Persian)
- [19] J.J. Bommer, S. Akkar, Ö. Kale, A model for vertical-to-horizontal response spectral ratios for Europe and the Middle East, Bulletin of the Seismological Society of America, 101(4) (2011) 1783-1806.
- [20] U.B. Code, UBC-97, in: Structural engineering design provisions. International conference of building officials, Whittier, California, (1997).
- [21] R. Guide, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Regulatory Guide, (1973).
- [22] E. 8, Earthquake Resistant Design of Structures, Second Draft CEN/TC250/SC8, PT1: General Rules, (1993).
- [23] U.B. Code, International Code Council, Inc., Falls Church, (2000).
- [24] A. RP2A-WSD, Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design—, Twenty-2000, (2000).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. mohammadian, A. Mahdavian, N. Hassani, Determining the spectral ratio of the vertical and horizontal components of near-field earthquakes, Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 2195-2206.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21204.7650

