

# ارائه طیف قائم زلزله برای فلات ایران با استفاده از رابطه نسبت طیفی

محمدرضا سقراط<sup>۱</sup>، منصور ضیایی فر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

\*mansour@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۷/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۲/۰۴]

## چکیده

میزان تاثیر مولفه قائم زلزله در آسیب‌های وارد شده بر سازه‌ها در سال‌های اخیر مورد تحقیق بسیاری از پژوهشگران بوده و نشان داده شده است که این مولفه می‌تواند میزان آسیب‌ها را تشدید نماید. در برخی آیین نامه‌ها، طیف طراحی تنها برای مولفه افقی شتاب ارائه شده و در صورت نیاز به طیف قائم، استفاده از نسبت ۰/۶۷ برای تبدیل طیف افقی به قائم توصیه شده است. این در حالی است که رویکرد جدید در برخی از آیین نامه‌ها ارائه طیف جداگانه برای مولفه قائم زلزله است. در این مطالعه در نظر است تا رویکردهای مختلف برای توسعه طیف قائم مورد بررسی قرار گیرد. این رویکردها شامل استفاده مستقیم از رابطه کاهندگی برای مولفه قائم زلزله و همچنین بهره‌گیری از توابع تبدیل طیف افقی به قائم می‌باشد. به منظور صحت سنجی نتایج، مقایسه‌ای بین نتایج طیف قائم شتاب حاصل از دو روش ذکر شده صورت گرفته است. همچنین حساسیت مدل تبدیل طیفی به پارامترهایی همچون بزرگا، فاصله و نوع گسلش بررسی و نشان داده شده است که مدل مذکور نسبت به تغییرات فاصله وابستگی بیشتری دارد. در ادامه، مدل‌های ساده شده‌ای برای بیان نسبت طیفی که تنها وابسته به فاصله است پیشنهاد شده است. در نهایت، طیف‌های هموار شده برای دوره بازگشت‌های ۱۰۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله برای مولفه افقی و قائم ارائه شده و نشان داده شده که مدل تبدیل طیفی پیشنهادی از دقت قابل قبولی برای به دست آوردن طیف قائم برخوردار است. در انتها از یک روش کالیبراسیون که طیف افقی حاصله از تحلیل خطر لرزه‌ای را به طیف افقی آیین نامه ۲۸۰۰ مبدل می‌سازد استفاده شده و طیف قائم حاصله از مدل تبدیل طیفی به طیف قائم پیشنهادی این تحقیق برای فلات ایران تبدیل شده است.

**واژگان کلیدی:** مولفه قائم زلزله، روابط کاهندگی، رابطه نسبت طیف قائم به افقی، طیف قائم زلزله.

## ۱- مقدمه

از اولین پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص آسیب‌های وارد شده به سازه‌ها تحت اثر مولفه قائم می‌توان به مطالعه‌ی صادق وزیری و فوج [1] اشاره داشت که در آن نشان داده شده که تغییرات نیروی محوری ستون‌ها در اثر تحریکات قائم زلزله منجر به ناپایداری سازه شده است. همچنین می‌توان به مطالعات پالاسکاس و همکاران [2] اشاره کرد که در آن به بررسی اثر مولفه قائم زلزله بر پارکینگ‌های طبقاتی بعد از زلزله نورث‌ریچ پرداخته شده است. آن‌ها به این نکته تاکید داشتند که

تا قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ در دو دهه گذشته، محققین عمدتاً نیروهای اینرسی ناشی از مولفه افقی شتاب حاصل از زلزله را به عنوان عامل خرابی سازه‌ها در نظر می‌گرفتند. وقوع زلزله‌هایی مانند نورث‌ریچ در آمریکا و کوبه در ژاپن باعث شناخته شدن اهمیت مولفه قائم زلزله به ویژه در فواصل نزدیک گسل و در سازه‌های با پیوند ارتعاش قائم کوتاه شد.

طیفی، مدل‌های ساده شده‌ای برای تبدیل طیف افقی به قائم ارائه و به پیشنهاد طیف قائم زمین لرزه برای فلات ایران اقدام خواهد شد.

## ۲- روابط کاهندگی

فلات ایرات به عنوان یکی از مناطق لرزه‌خیزی مهم در دنیا محسوب می‌شود و احتمال ثبت حرکات نزدیک گسل با مولفه قائم قابل توجه، در این منطقه زیاد است. در این رابطه می‌توان به زلزله‌هایی همچون بم (۲۰۰۳) و طبس (۱۹۷۸) اشاره داشت. در زلزله بم (ثبت شده در ایستگاه بم) نشان داده شد که حرکت زمین در نزدیک گسل می‌تواند دارای بیشینه شتاب قائم بزرگتری نسبت به مولفه افقی باشد. بنابراین، شناخت و در نظر گرفتن اثر مولفه قائم در این رابطه مهم به نظر می‌رسد. دو دیدگاه متفاوت برای توسعه مولفه قائم طیف پاسخ زلزله وجود دارد که عبارتند از:

- محاسبه خطر با استفاده از روابط کاهندگی حرکات قائم زمین
- مقیاس کردن طیف افقی با استفاده از مدل نسبت طیف قائم به افقی

در میان روابط کاهندگی مختلفی که بر اساس داده‌های محلی توسعه داده شده است، می‌توان به مدل‌های ارائه شده به وسیله سقراط و ضیایی فر [9, 10] به منظور پیش بینی حرکات زمین برای مولفه افقی، قائم و همچنین نسبت طیف قائم به افقی اشاره نمود. در این مطالعات برای توسعه طیف افقی و قائم از رابطه (۱) استفاده شده بود:

$$\log_{10}(Y) = b_1 + b_2 Mw + b_3 Mw^2 + (b_4 + b_5 Mw) \times \log_{10} \sqrt{R^2 + b_6^2} + S_i + f_s F_S + f_{rv} F_{RV} + f_{uu} F_U \quad (1)$$

که در آن  $Y$  بیانگر بیشینه شتاب یا شتاب طیفی در میرایی ۵ درصد برحسب سانتیمتر بر مجذور ثانیه است. همچنین  $Mw$ ،  $R$  و  $S_i$  بیانگر بزرگا، فاصله و نوع خاک بوده و اندیس  $i$  (شامل اعداد ۱ تا ۴) نشان دهنده نوع خاک است.  $b_1$  تا  $b_6$  ضرایب حاصل از برازش است و  $f_s$ ،  $f_{rv}$  و  $f_{uu}$  نیز به ترتیب بیانگر اثرات مکانیسم گسلش امتداد لغز، معکوس و نامشخص است. این ضرایب نیز با استفاده از عملیات

نیروی جانبی زلزله در این ساختمان‌ها کمتر از نیروی جانبی طراحی بوده و از اینرو علت خرابی آن‌ها به اثر مولفه قائم زلزله نسبت داده شده است. شکیب و فولادگر [3] به مطالعه یک سازه جداسازی شده از پایه تحت تاثیر مولفه‌های افقی و قائم زلزله پرداختند. در مطالعه آنها نشان داده شد که نیروی محوری ستون به دلیل وجود مولفه قائم زلزله می‌تواند تا سه برابر نیز افزایش یابد.

برخی از پژوهشگران، به دنبال یافتن ارتباط بین مولفه افقی و قائم بوده‌اند که در این میان می‌توان به مطالعه بزرگ نیا و نیازی [4] اشاره داشت. آن‌ها دریافتند که نسبت مولفه افقی به قائم دارای مقداری ثابت نبوده و این نسبت در پیوندهای بلند و کوتاه متفاوت است. در مطالعه‌ی بزرگ نیا و کمپبل [5] نشان داده شد که نسبت طیفی مولفه قائم به افقی حساس به فاصله از گسل بوده و در پیوندهای کوتاه از مقدار ۰/۶۷ در نواحی نزدیک گسل تجاوز می‌کند. علاوه بر آن نشان داده شد که نسبت طیفی دارای مقادیر کمینه در محدوده پیوندهای میانی است و در پیوندهای بلندتر این نسبت روند افزایشی نامحسوسی خواهد داشت.

با این وجود استفاده از نسبت ۰/۶۷ به منظور مقیاس نمودن تمامی طیف افقی به قائم همواره مطرح بوده و هنوز برخی از مراجع و راهنماهای مهندسی از این نسبت استفاده می‌کنند. در این میان می‌توان به دستورالعمل شماره ۳۵۶ سازمان مدیریت بحران فدرال ایالات متحده [6] اشاره داشت. آیین نامه اروپایی طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله [7] و همچنین ضوابط و معیارهای موجود در برنامه ملی کاهش خطر زمین لرزه ایالات متحده [8] در میان اولین استانداردهایی هستند که طیف افقی و قائم زلزله را بصورت جداگانه معرفی نموده‌اند.

در این مطالعه در نظر است با لحاظ کردن روابط کاهندگی برای مولفه‌های افقی و قائم سازگار با فلات ایران مطالعات تحلیل خطر صورت پذیرد و طیف خطر یکنواخت برای مولفه‌های افقی و قائم در دوره بازگشت‌های مختلف به دست آید. همچنین، با ارائه روابط پیشنهادی برای نسبت طیف قائم به افقی، طیف قائم با استفاده از این روابط نیز دوباره برآورد می‌شود. در نهایت، به منظور سهولت استفاده از روابط نسبت

نزدیک و در پریودهای کمتر از ۰/۱ ثانیه استفاده از ضریب تبدیل ثابت ۰/۶۷ منجر به تخمین کمتر از واقعیت برای مولفه قائم می‌شود.

شکل ۱. مقایسه طیف افقی با قائم حاصل از رویکردهای مختلف با فرض خاک نوع ۱، گسلش معکوس و بزرگای گشتاوری ۶ در فواصل ۵ تا ۵۰ کیلومتر

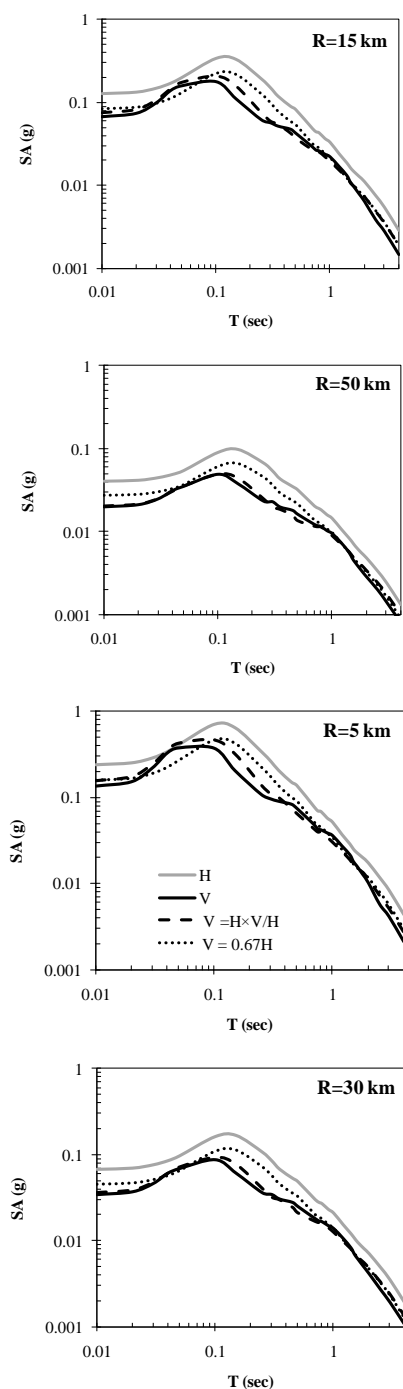


Fig. 1. Comparison of the horizontal spectral acceleration with the vertical ones using different approaches for site class I, reverse faulting and Mw6 in terms of distance.

برازش بر آورد می‌شود. مقادیر  $F_U$  و  $F_{RV}$ ،  $F_S$  به ترتیب برای در نظر گرفتن آثار گسلش امتدادلغز، معکوس و نامشخص برابر با یک فرض شده و در غیر اینصورت برابر با صفر قرار داده می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که ضرایب اشاره شده دارای مقادیر متفاوتی در هر پریود برای مولفه‌های افقی و قائم است.

در این پژوهش انجام شده [9]، فرم رابطه پیشنهادی برای ارائه مدل نسبت طیفی بصورت رابطه (۲) پیشنهاد شده بود. این رابطه شبیه به رابطه (۱) است که در آن ضرایب b3 و b5 برابر با صفر برآورد شده است.

$$\log_{10}(Y1) = b_1 + b_2 Mw + b_4 \times \log_{10} \sqrt{R^2 + b_6^2} + S_i + f_s F_S + f_{rv} F_{RV} + f_{uu} F_U \quad (2)$$

روابط (۱ و ۲) برای بزرگای در محدوده ۴/۱ تا ۷/۳ و فاصله تا ۳۰۰ کیلومتر برای خاک‌های رده ۱ تا ۳ مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [11] قابلیت کاربرد دارند. لازم به ذکر است که در رابطه (۲)، بیانگر نسبت طیف افقی به قائم در میرایی ۵ درصد است. در این پژوهش این روابط به منظور ارائه طیف قائم برای فلات ایران استفاده شده است.

### ۳- صحت سنجی مدل نسبت طیفی

برای بررسی درستی رابطه به کار گرفته شده برای نسبت طیفی رابطه (۲)، مقایسه‌ای بین طیف قائم تولید شده بر اساس رابطه کاهندگی مولفه قائم و همچنین طیف قائم حاصله بر اساس مدل نسبت طیفی، در شکل (۱) انجام شده است. در این طیف‌ها نوع خاک بر اساس رده ۱، گسلش از نوع معکوس و بزرگای گشتاوری برابر با ۶ (در فواصل ۵ تا ۵۰ کیلومتر) انتخاب شده است. در این شکل همچنین طیف قائم که به طور معمول معادل ۰/۶۷ طیف افقی فرض می‌گردد نیز نشان داده شده است.

به‌طور کلی می‌توان گفت هماهنگی مناسبی بین طیف‌های قائم حاصل از دو روش مستقیم و روش مبتنی بر استفاده از مدل نسبت طیفی در پریودهای مختلف وجود دارد. نتایج را می‌توان بر مبنای فاصله نزدیک (۵ و ۱۵ کیلومتر) و فاصله دور از گسل (۳۰ و ۶۰ کیلومتر) تفسیر نمود. به عنوان نمونه، در فواصل

اما، در پیوندهای بلند (بالای یک ثانیه) طیف قائم به دست آمده حاصل از سه روش اشاره شده (طیف قائم به صورت مستقیم، استفاده از مدل نسبت طیفی و حتی طیف حاصل از به کارگیری ضریب تبدیل ثابت ۰/۶۷) همگی یکسانند. در پیوندهای واقع در محدوده ۰/۱ تا ۱ ثانیه، طیف قائم به دست آمده از طریق ضریب ثابت ۰/۶۷، مقادیر بیشتری را نسبت به دو روش دیگر نتیجه می دهد. برای فواصل دور می توان دید که استفاده از ضریب تبدیل ثابت ۰/۶۷ در تمامی پیوندها منجر به نتایج محافظه کارانه تری می شود. برای پیوندهای کوتاه (کمتر از ۰/۱ ثانیه) و پیوندهای بلند (بیش از ۱ ثانیه) نتایج به دست آمده برای طیف قائم با استفاده از رویکرد مستقیم و مدل نسبت طیفی تقریباً مشابه اند.

۴- حساسیت سنجی مدل

میزان حساسیت مدل نسبت طیفی با توجه به مشخص بودن رده خاک و نوع گسلش تحت تاثیر تغییرات فاصله (۱۵/۵ و ۳۰ کیلومتر) و بزرگای (بزرگای گشتاوری برابر با ۴/۵، ۵/۵ و

۶/۵) در شکل (۲) بررسی شده است. با توجه به شکل (۲)، می توان دریافت که مدل نسبت طیفی حساسیت قابل توجهی نسبت به پارامتر بزرگای ندارد که علت این امر شکل رابطه نسبت طیفی است که تاثیر پارامتر بزرگای در آن کمتر از روابط کاهش دگی متداول است (برای جزییات بیشتر به کار سقراط و ضیایی فر [9] مراجعه شود). نسبت طیفی به کار گرفته شده دارای یک مقدار بیشینه در پیوند حدود ۰/۰۵ ثانیه می باشد که این مقدار در فواصل نزدیک تر دامنه ی بیشتری برای نسبت طیفی را نتیجه می دهد. همچنین می توان گفت که آثار فاصله نیز بیشتر در پیوندهای کوتاه تاثیرگذار است و تغییرات قابل توجهی در نسبت طیفی برای پیوندهای بیش از ۰/۲ ثانیه مشاهده نمی شود. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که نسبت های طیفی دارای مقدار بیشینه در پیوندهای کوتاه (حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ ثانیه) هستند و با افزایش پیوند این نسبت روندی نزولی در پیش گرفته و به کمترین مقدار خود می رسد. پس از آن، نسبت طیفی روند افزایشی ملایمی را (از محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ ثانیه به بعد) نشان خواهد داد.

شکل ۲. نسبت طیفی برحسب پیوند در خاک های مختلف و برای بزرگای ۴/۵ تا ۶/۵ در فواصل ۵ تا ۳۰ کیلومتر

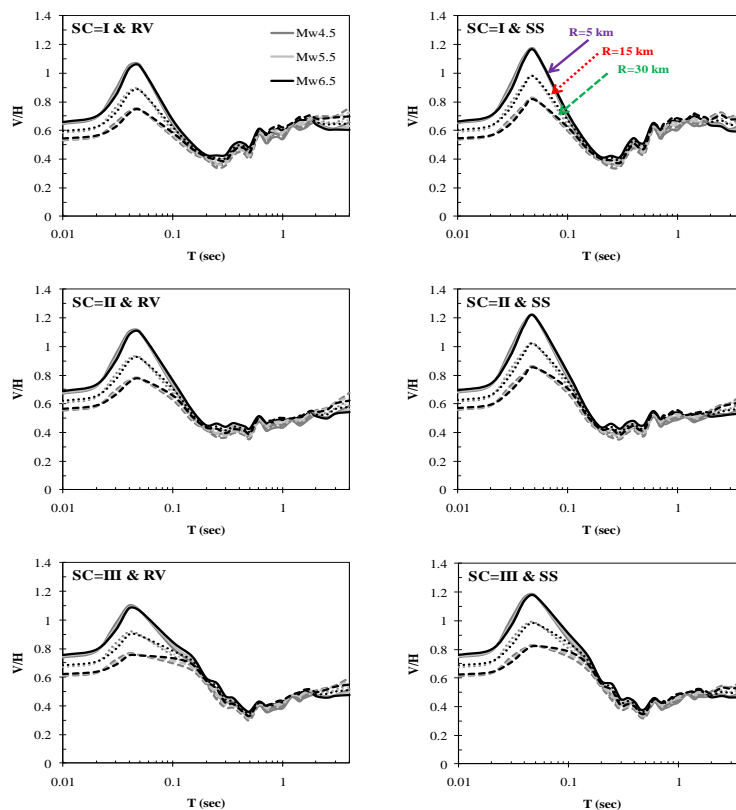


Fig. 2. Vertical-to-horizontal spectral ratios in different site classes, Magnitudes and distances.

بین مقادیر پیش بینی نسبت طیفی در گسلش امتداد لغز نسبت به گسلش معکوس حدود ۱۰ درصد و نسبت به گسلش نامشخص حدود ۲۰ درصد است.

آثار نوع خاک برای بزرگای گشتاوری ۶/۰ و سازوکار گسلش امتداد لغز در فواصل ۵ و ۱۵ کیلومتری در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴: نسبت طیفی بر حسب پرپود در خاک‌های نوع ۱، ۲ و ۳ و در

بزرگای ۶ در فواصل ۵ و ۱۵ کیلومتری

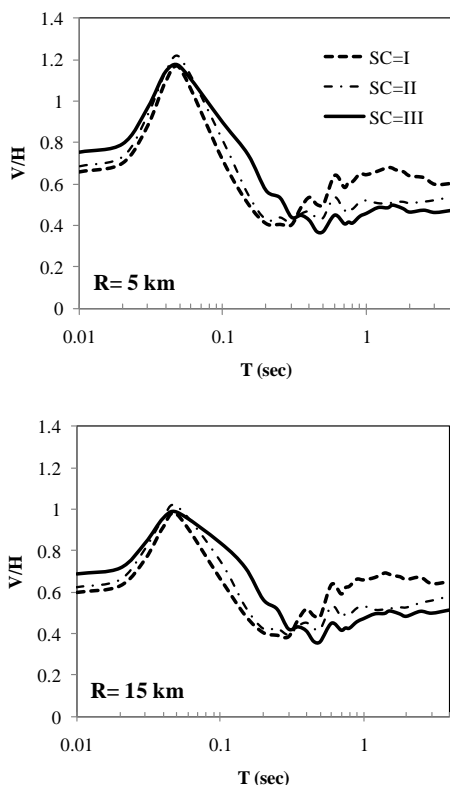


Fig. 4. Comparison of vertical-to-horizontal spectral ratios in terms of spectral period at different distances and site classes

همان‌گونه که مشاهده می‌شود اگرچه در پرپودهای کوتاه و خاک‌های نرم مقادیر بیشتری برای نسبت طیفی پیش بینی می‌شود، اما در پرپودهای بلند این روند معکوس می‌شود. این امر در تایید مطالعه صورت گرفته به وسیله بزرگ نیا و کمپبل (۲۰۰۴) ارزیابی می‌شود. همچنین در پرپودهای کوتاه، در برآورد میزان نسبت طیفی بین خاک نوع ۱ و ۲ اختلاف قابل توجهی وجود ندارد، اما در پرپودهای بلند، این نسبت برای خاک‌های نوع ۲ و ۳ مقادیر نزدیکتری را نشان می‌دهد.

مطابق با حساسیت سنجی انجام شده، نشان داده می‌شود که بزرگا تاثیر چندانی در برآورد نسبت طیفی ندارد. بنابراین، با ثابت نگه داشتن بزرگا (بزرگای گشتاوری برابر با ۶) می‌توان میزان تغییرات نسبت طیفی را با توجه به نوع گسلش برای خاک نوع ۱ مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۳).

شکل ۳: مقایسه نسبت‌های طیفی بر حسب پرپود و نوع گسلش در فواصل مختلف

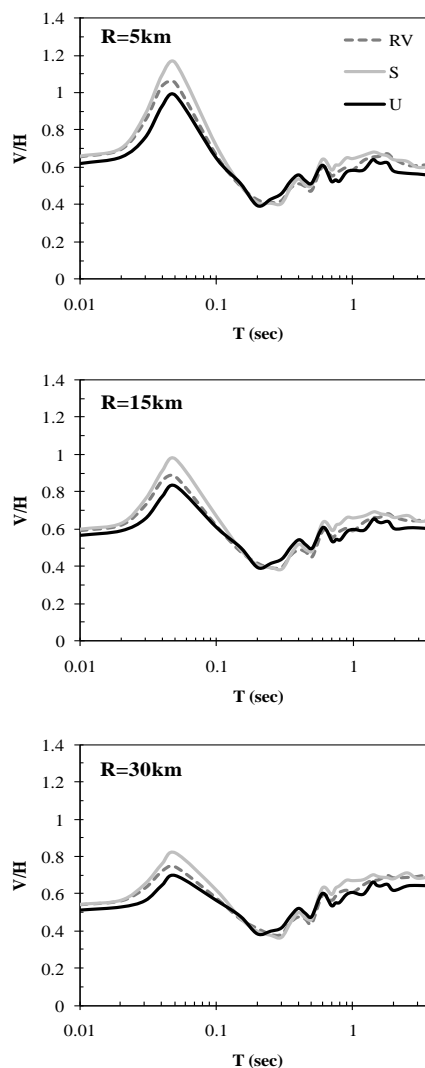


Fig. 3. Comparison of vertical-to-horizontal spectral ratios in terms of spectral period at different distances and faulting mechanisms.

نتایج حاصله در این شکل مبین آنست که در پرپودهای بیش از ۰/۲ ثانیه، نسبت‌های طیفی پیش بینی شده تقریباً مقادیر یکسانی را نشان می‌دهد اما در پرپودهای کوتاه گسلش امتداد لغز نسبت طیفی بیشتری را نتیجه می‌دهد. میزان بیشینه اختلاف

دو بخش این رابطه در پریودهای کمتر از ۰/۰۵ ثانیه و بیشتر از ۰/۳ ثانیه ثابت بوده و بخش انتقالی نزولی آن در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۳ ثانیه قرار دارد. در این رابطه ضرایب  $a$  و  $b$  تابعی از فاصله است که مقادیر آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ضرایب مربوط به رابطه نسبت طیفی

R	5 (km)	15 (km)	30 (km)	50 (km)
$a$	1.25	1.05	0.85	<b>0.75</b>
$b$	0.35	0.25	0.13	<b>0.06</b>

**Table 1.** The regression coefficients for proposed vertical-to-horizontal spectral ratios.

برای فواصل بیش از ۵۰ کیلومتر، نسبت طیف قائم به افقی برای تمامی پریودها برابر با ۰/۶۷ پیشنهاد می‌شود. برای اطمینان، در این رابطه از نتایج ارائه شده برای گسلش امتدادلغز استفاده شده است. همچنین، به منظور سادگی در استفاده از مدل ارائه شده، نسبت طیفی پیشنهادی طوری معرفی شده که مستقل از آثار خاک باشد (پوش نتایج مربوط به آثار خاک‌های مختلف برای این مدل مورد استفاده قرار گرفته است).

## ۶- طیف قائم پیشنهادی

روش استفاده شده در این پژوهش تحلیل خطر لرزه‌ای بر مبنای رویکرد احتمالاتی است. این رویکرد به طور گسترده در تعیین مشخصه‌های حرکت زمین استفاده شده است. تحلیل خطر لرزه‌ای برای تهران و با فرض خاک رده ۱ صورت پذیرفته است. نتایج حاصله برای طیف خطر یکنواخت افقی و قائم در دوره بازگشت‌های مختلف (۱۰۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال) در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل مقایسه‌ای بین طیف‌های قائم حاصله از روش مستقیم (V)، به دست آمده از رابطه ۲ (V1) و یا حاصله از به کارگیری تابع ساده شده‌ی نسبت طیفی (V2) صورت پذیرفته است. همچنین در این شکل طیف قائم حاصله از به کارگیری ضریب تبدیل ثابت ۰/۶۷ نیز نشان داده شده است (V0.67).

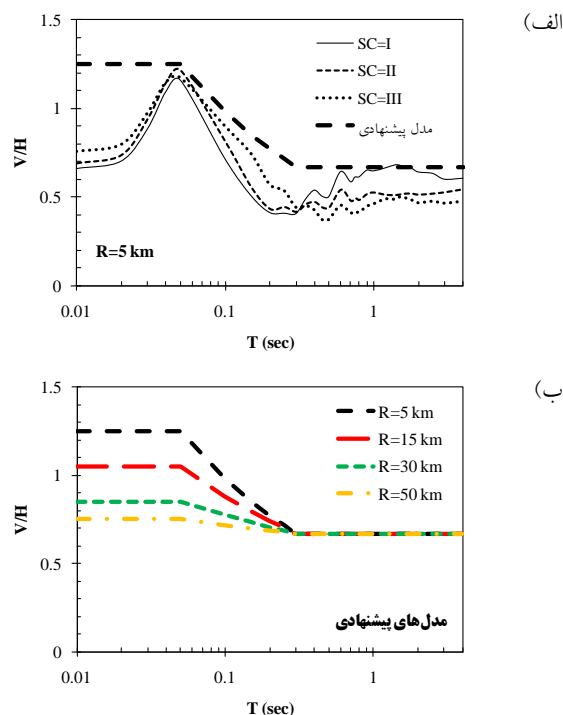
همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود طیف‌های قائم حاصله (به غیر از V0.67) علاوه بر تفاوت در محتوای فرکانسی، در پریودهای کوتاه بعضی وقت‌ها دارای دامنه‌های

## ۵- مدل پیشنهادی برای نسبت طیفی

به منظور کاربرد عملی در اهداف مهندسی، طیف‌های ساده شده‌ای برای نسبت طیفی ارائه و در شکل (۵-ب) به تصویر کشیده شده‌اند. همچنین طیف ساده شده با مدل‌های نسبت طیفی در فاصله ۵ کیلومتر مقایسه شده است (شکل ۵-الف). شکل (۵-ب) تنها برحسب فاصله از گسل رسم شده زیرا که مدل‌های نسبت طیفی حساسیت کمی نسبت به نوع خاک، بزرگا و سازوکار گسلش دارند. نسبت‌های طیفی ساده شده در شکل (۵-ب) را می‌توان به سه بخش مجزا تفکیک نمود که فرم کلی آن بصورت رابطه (۳) ارائه شده است.

$$V/H = \begin{cases} a & T \leq 0.05 \\ a \times \left( \frac{0.05}{T} \right)^b & 0.05 < T < 0.3 \\ 0.67 & T \geq 0.3 \end{cases} \quad (3)$$

شکل ۵. الف) مقایسه مدل‌های نسبت طیفی بر حسب نوع خاک با مدل پیشنهادی در فاصله ۵ کیلومتر ب) مدل پیشنهادی در فواصل مختلف



**Fig. 5.** a) Comparison of vertical-to-horizontal spectral ratios in terms of spectral period with the proposed model at distance of 5 km, b) the proposed model in different distances

برای تولید طیف قائم از رابطه ۲ و یا ۳، نیاز به مشخص بودن سناریوی غالب است. در عمل هر نقطه از طیف افقی را ترکیبی از سناریوهای مختلف تشکیل می‌دهند و دانستن میزان مشارکت این سناریوها در تولید دامنه طیفی (موسوم به جدایش خطر) برای درک ویژگی‌های طیف حاصله حائز اهمیت است. برای انجام این مهم، معمولاً دو پریرود از طیف را به عنوان نماینده‌ای از کل آن در نظر می‌گیرند. گالرک و آبراهامسون [12] پریرودهای ۰/۲ و ۲ ثانیه را به عنوان نماینده پریرودهای کوتاه و بلند در نظر گرفته‌اند. سایر پژوهشگران مقادیر دیگری را برای بیان پریرودهای غالب انتخاب کرده‌اند [13]. برای طیف قائم به دلیل حساس بودن آن به محدوده‌ی پریرودهای کوتاه، مقادیر ۰/۰۵ ثانیه و ۱ ثانیه در این مطالعه به عنوان نماینده طیف انتخاب شده است.

در شکل (۷)، جدایش خطر برای پریرود ۰/۰۵ ثانیه در دوره بازگشت‌های ۱۰۰ و ۴۷۵ ساله در محدوده‌ی بزرگای ۳/۵ تا ۷/۵ رسم شده است. معیار فاصله نیز تا محدوده ۴۰۰ کیلومتر انتخاب شده است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در پریرود کوتاه (۰/۰۵ ثانیه) سناریوی غالب در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله دارای بزرگای گشتاوری ۵/۷۵ و فاصله ۳۰ کیلومتر بوده ولی برای دوره بازگشت بالاتر سناریوی غالب در بزرگای گشتاوری ۵/۷۵ و فاصله ۱۰ کیلومتر به دست آمده است. این در حالی است که، در پریرود یک ثانیه و برای تمام دوره بازگشت‌ها بزرگای گشتاوری ۷/۲۵ و فاصله ۱۵۰ کیلومتر سناریوی غالب را تشکیل می‌دهد. البته، اگرچه سناریوی غالب در برخی موارد ممکن است یکسان باشد اما میزان مشارکت سناریوها در تولید دامنه طیفی می‌تواند کاملاً متفاوت به دست آید.

با مشخص بودن سناریوی غالب برای مولفه افقی در این دو نقطه، نسبت طیفی محاسبه شده و در طیف افقی ضرب می‌شود، سپس از پوش دو منحنی حاصله، طیف قائم به دست می‌آید. (V1 و V2 در شکل ۶) در صورتیکه امکان دسترسی به نتایج جدایش خطر وجود نداشته باشد، می‌توان سناریوی غالب را با استفاده از مطالعات قبلی و یا نظرات خبرگان تخمین زد.

بیشتری در مقایسه با طیف افقی است. این مشاهدات نشان می‌دهد که استفاده از ضریب ۰/۶۷ برای تبدیل طیف افقی به قائم نمی‌تواند دقت مناسبی ارائه دهد.

نتایج حاصله همچنین نشان می‌دهد که تفاوت چندانی در مقادیر طیف قائم با استفاده از دو رویکرد مختلف (روش مستقیم V و یا استفاده از نسبت طیفی V1) وجود ندارد. البته، ذکر این نکته ضروری است که چون تعداد روابط کاهندگی ارائه شده برای مولفه قائم محدود است و قابلیت استفاده از روابط کاهندگی برای مولفه قائم با استفاده از روش نسبت طیفی برای منطقی وجود ندارد [9]، استفاده از روش نسبت طیفی برای ارائه طیف قائم معقول‌تر است. همچنین باید توجه داشت که استفاده از این روش هزینه محاسباتی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

شکل ۶. مقایسه طیف افقی و قائم حاصل از انجام تحلیل خطر احتمالاتی

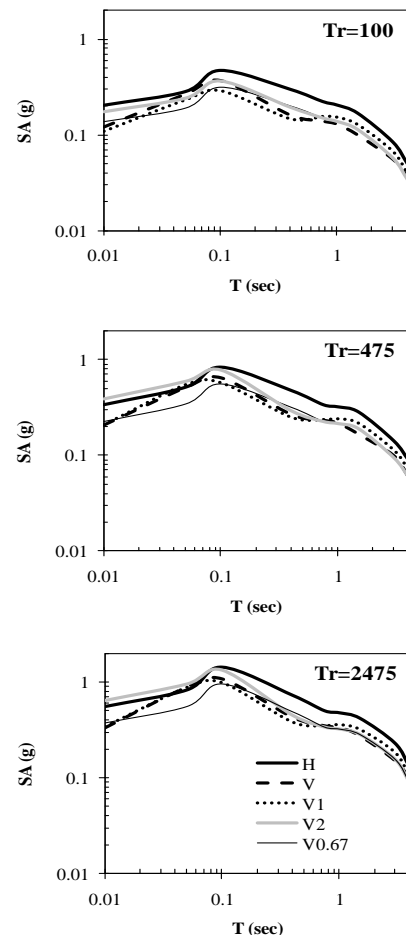


Fig. 6. Comparison of uniform hazard spectrum (UHS) for horizontal and vertical components of spectral acceleration.

شکل ۷. نتایج جدایش خطر برای پریود ۰/۰۵ ثانیه برای دوره بازگشت های ۱۰۰ و ۴۷۵ سال

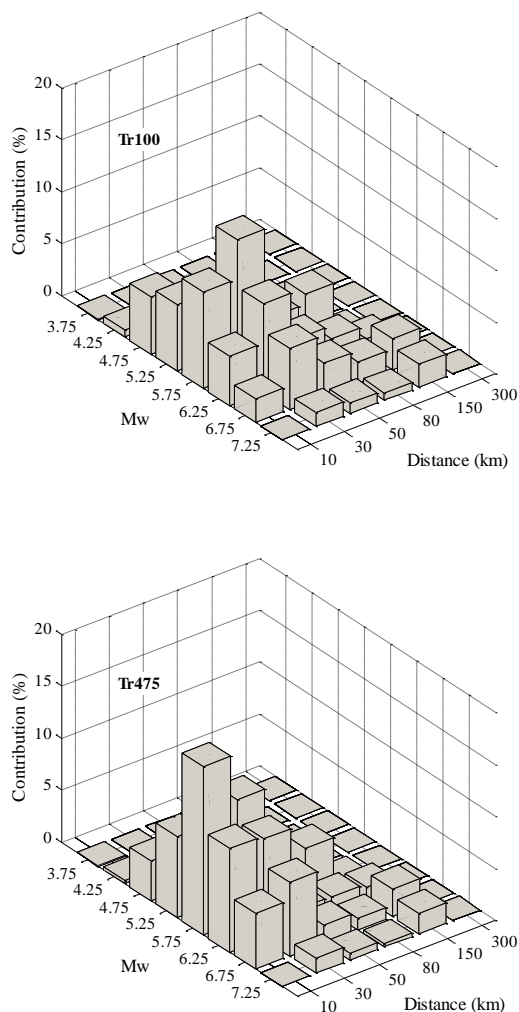


Fig. 7. Deaggregation results at period of 0.05 s in return periods of 100 and 475 years.

شکل ۸. مقایسه طیف های هموار شده مولفه های افقی و قائم در دوره بازگشت های مختلف

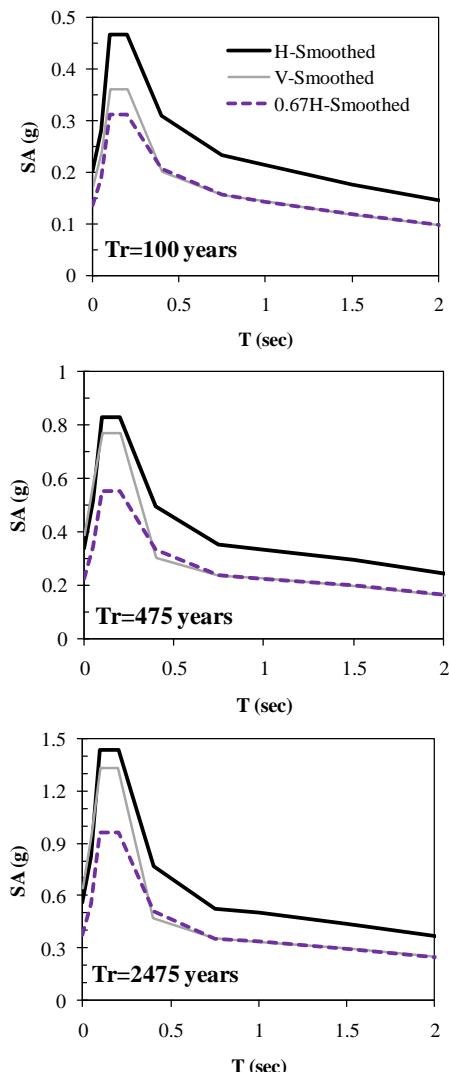


Fig. 8. Comparison of smoothed spectra for horizontal and vertical components in different return periods.

## ۷- طیف هموار شده

طیف های بدست آمده در گام قبل برای دوره بازگشت های ۱۰۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله هموار شده و در شکل (۸) نشان داده شده اند. در این شکل، طیف قائم حاصل از نسبت تبدیل ثابت ۰/۶۷ نیز آورده شده است. می توان گفت که طیف قائم حاصله از نسبت ۰/۶۷ در پریودهای کمتر از ۰/۴ ثانیه مقادیر کاملاً غیر محافظه کارانه ای را برآورد می کند. به بیان دیگر، در صورتی که پریود قائم کمتر از ۰/۴ ثانیه باشد استفاده از این طیف بایستی عملاً غیر صحیح تلقی شود.

در شکل (۹)، ضریب بازتاب (B) افقی هموار شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله (H-475) با ضریب بازتاب آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۱] با در نظر گرفتن نوع خاک رده ۱ در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد مقایسه شده است. همان گونه که دیده می شود ضریب بازتاب افقی آیین نامه (H-2800) به دلیل طبیعت محافظه کاری آن در مقایسه با ضریب بازتاب افقی به دست آمده (H-475) در بسیاری از نواحی محتوای فرکانسی متفاوتی را نشان می دهد. در این تحقیق، به محاسبه روابطی برای تبدیل ضریب بازتاب افقی هموار شده به ضریب بازتاب آیین نامه



کاهندگی حرکات قائم زمین صورت می‌پذیرد و در رویکرد دوم، طیف افقی با استفاده از روابط نسبت طیفی به طیف قائم تبدیل می‌شود. در این مطالعه از دو رویکرد اشاره شده برای فلات ایران استفاده شده است. نتایج حاصله مبین آن بوده است که طیف‌های قائم حاصله از هر دو روش هماهنگی مناسبی با یکدیگر دارند. همچنین نشان داده شد که استفاده از ضریب  $0.67$  برای تبدیل طیف افقی به قائم برای سناریوهای نزدیک گسل در پروده‌های کوتاه منجر به تخمین کمتر از واقعیت مولفه قائم می‌شود. البته، این نسبت در پروده‌های بلند (بیش از یک ثانیه) مناسب تلقی می‌شود.

در این مطالعه با حساسیت سنجی مدل نسبت طیفی نشان داده شد که این نسبت بیشتر به تغییرات فاصله حساسیت دارد. همچنین می‌توان گفت که آثار فاصله در پروده‌های کوتاه بیشتر تاثیرگذار بوده است. بر اساس نتایج این تحقیق مشخص شد که نسبت‌های طیفی دارای یک مقدار بیشینه در پروده‌های کوتاه هستند و با افزایش پرودا این نسبت روند نزولی را طی کرده و به کمترین مقدار خود می‌رسد. سپس با افزایش پرودا، نسبت طیفی روندی افزایشی با شیبی ملایم خواهد داشت.

به منظور استفاده کاربردی در اهداف مهندسی، روابطی ساده برای بیان نسبت طیفی پیشنهاد شده است که تنها وابسته به پارامتر فاصله از محل گسل است. برای درستی آزمایشی مدل پیشنهادی، تحلیل خطر احتمالاتی برای مولفه افقی و قائم با استفاده از روابط کاهندگی مستقل صورت پذیرفته است. همچنین طیف خطر یکنواخت برای مولفه افقی حاصل از تحلیل خطر با استفاده از نسبت طیفی به مولفه قائم تبدیل شده است. نتایج حاصله نشان دهنده آن است که تفاوت چندانی در مقادیر طیف قائم با استفاده از دو رویکرد ارائه شده وجود ندارد.

از نکات قابل توجه در طیف قائم می‌توان به تمایل محل اوج طیف به سمت پروده‌های کوتاه‌تر در مقایسه با طیف افقی اشاره نمود. طیف‌های بدست آمده برای مولفه‌های افقی و قائم در دوره بازگشت‌های  $100$ ،  $475$  و  $2475$  ساله هموارسازی شده‌اند. سپس طیف بازتاب افقی هموار شده برای دوره بازگشت  $475$  ساله با طیف پیشنهادی آیین نامه  $2800$  با در نظر

اقدام شده است. با استفاده از این روابط می‌توان ضریب بازتاب قائم هموار شده حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی ( $V-475$ ) را نیز به ضریب بازتاب قائم منطبق با مشخصه‌های آیین نامه  $2800$  تبدیل نمود. این طیف در شکل با  $V-Trans$  نشان داده شده است.

در این پژوهش، ضریب بازتاب پیشنهادی برای مولفه قائم در انطباق با  $V-Trans$  به صورت رابطه  $4$  پیشنهاد شده است. در این رابطه ضرایب  $a$ ،  $T_s$  و  $T_l$  به ترتیب برابر با  $0.18$ ،  $0.05$  و  $0.2$  در نظر گرفته شده‌اند.

$$B_V = \begin{cases} 1.15 + a \left( \frac{T}{T_s} \right) & T \leq T_s \\ 1.15 + a & T_s < T < T_l \\ (1.15 + a) \left( \frac{T_l}{T} \right)^{0.7} & T \geq T_l \end{cases} \quad (4)$$

شکل ۹. ضریب بازتاب‌های افقی و قائم برای دوره بازگشت  $475$  ساله در مقایسه با ضریب بازتاب افقی آیین نامه  $2800$  - برای خاک رده

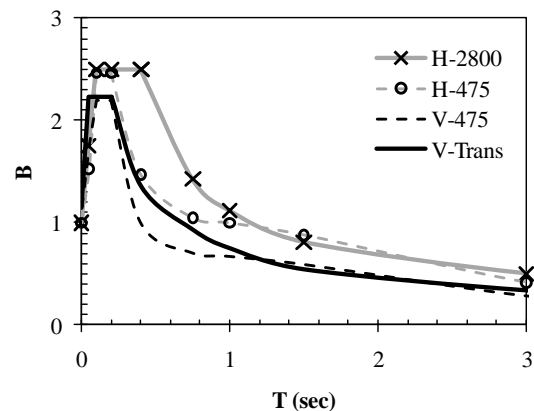


Fig. 9. Normalized response spectra for vertical and horizontal components in accordance with Standard 2800 (site class I).

## ۸- نتیجه گیری

وقوع زلزله‌هایی همچون نورث‌ریج ( $1994$ ) و کوبه ( $1995$ ) در دو دهه اخیر، منجر به شناخت اهمیت مولفه قائم زلزله گردید. این در حالی است که در بسیاری از آیین نامه‌های طراحی یا از آثار مولفه قائم چشم‌پوشی شده و یا از روش‌هایی مانند مقیاس کردن طیف افقی با نسبت‌های ثابتی مانند  $0.67$  استفاده می‌شود. دو دیدگاه متفاوت برای توسعه طیف قائم وجود دارد، در رویکرد اول محاسبه خطر با استفاده از روابط

- 5- Bozorgnia Y. & 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**(02), 175-207.
- 6- FEMA 356. 2000 Commentary for the seismic rehabilitation of buildings
- 7- Eurocode 8. 2004 Design of structures for earthquake resistance, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels.
- 8- Building Seismic Safety Council. 2009 National Earthquake Hazards Reduction Program Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- 9- Soghrat M. R. & Ziyaeifar M. 2016 A Predictive Equation for Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratios in Northern Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106** (1), 123-140.
- 10- Soghrat, M. R., & Ziyaeifar, M. 2016 Ground Motion Prediction Equations for Horizontal and Vertical Components of Acceleration in Northern Iran. *Journal of Seismology*, **21**(1), 99-125.
- 11- Standard 2800. 2014 Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 4th edition
- 12- Gülerce Z. & Abrahamson N. A. (2011). Site-specific design spectra for vertical ground motion. *Earthquake Spectra*, **27**(4), 1023-1047.
- 13- Soghrat, M. R., & Ziyaeifar M. 2016 Development of Short Return Period Spectra for the Regions with High to Moderate Seismicity, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* (Under Review).

گرفتن نوع خاک رده ۱ و لحاظ کردن پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد مقایسه شده است. پس از آن با محاسبه توابع کالیبراسیون برای تبدیل طیف افقی هموار شده (حاصل از تحلیل خطر) به طیف افقی آیین نامه ۲۸۰۰ اقدام شد. سپس، با استفاده از همان توابع طیف بازتاب قائم هموار شده حاصل از تحلیل خطر به طیف قائم آیین نامه ای مبدل و در نهایت روابط ساده ای برای طیف قائم پیشنهادی برای فلات ایران ارائه شده است.

## References

## ۹- مراجع

- 1- Saadeghvaziri M. A. & Foutch D. A. 1991 Dynamic behaviour of R/C highway bridges under the combined effect of vertical and horizontal earthquake motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **20**(6), 535-549.
- 2- Palaskas M. N., He L. & Chegini M. 1996 Vertical seismic forces on elevated concrete slabs. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **1**(3), 88-90.
- 3- Shakib H. & Fuladgar A. 2003 Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation. *Computers & Structures*, **81**(4), 189-196.
- 4- Bozorgnia Y. & Niazi M. 1993 Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **22**(8), 695-707.

# Development of a Vertical Design Spectrum for Iranian Plateau Using V/H Spectral Ratio

M.R. Soghrat<sup>1</sup>, M. Ziyaeifar<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student, Earthquake Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

2- Assoc. Prof., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

\*mansour@iiees.ac.ir

## Abstract:

In last two decades, some earthquakes like Kobe (1995), Chi-chi (1999) and Bam (2003) have shown the importance of vertical component of ground motion in the inflicting damage on a variety of structural systems. Moreover, it has been shown that the effects of vertical component of earthquake in structural responses are more pronounced in the near fault regions. By this means, both horizontal and vertical design spectra are required in the structural design procedure to reduce the vulnerability of structural systems subjected to seismic loads. However, some of the existing design codes or guidelines are providing the designers only with the horizontal spectrum. In some others, the vertical spectrum is defined using a unified ratio of 2/3 with respect to the horizontal one. A new trend in design codes approaches is to introduce vertical design spectrum for the ground motion.

Typically, there are two approaches in obtaining the vertical component of response spectrum using Ground Motion Prediction Equations (GMPEs). The differences between these approaches are based on the method of using GMPEs in the development of vertical spectrum. The first approach is based on the direct application of GMPEs for vertical component of earthquake and in the second one; the attenuation model is in the form of vertical to horizontal spectral ratio function (V/H). The attenuation model in this case is used to scale the horizontal spectrum to the vertical one. While V/H ratio typically scales down the horizontal spectrum, it may scale up the spectrum in near distances, particularly for the short range of the response spectrum.

GMPEs play a key role in seismic hazard evaluation for site-specific spectra. To propose a GMPE for any specific region, magnitude, source-to-site distance and peak ground characteristics of earthquakes in that region are required. In addition, some other parameters such as site class and faulting mechanism might also be necessarily considered in development of GMPEs for a particular region. Although various GMPEs have been developed for horizontal component of earthquake, there are no reliable GMPEs for vertical component of earthquakes in Iranian plateau.

In this study, after selecting the required GMPEs (GMPEs for horizontal and vertical component as well as GMPE for vertical to horizontal spectral ratio), the integrity of their results for development of vertical spectrum was evaluated. The sensitivity analyses for the V/H model show the relative independency of this ratio to the magnitude and faulting mechanism of earthquakes (as well as site classes). Therefore, the source-to-site distance parameter is chosen as the sole contributor in defining the V/H ratio. Later, a simplified model for V/H ratio is proposed in terms of distance (source to site). Seismic hazard analysis for vertical component of earthquakes is performed using V/H at a desired site and compared with the results of uniform hazard spectrum (UHS) analysis for the same component of earthquake in the region. Later, a vertical design spectrum for the Iranian plateau based on V/H ratio is proposed. At the end, a calibration technique - that can convert the horizontal uniform hazard spectrum to the design code horizontal spectrum- is used to find the design response spectrum for vertical component of earthquake for Iranian plateau.

**Keywords:** The vertical component of earthquake, Ground motion prediction equation Vertical-to-Horizontal Spectrum Ratio, Vertical design spectrum.