

انتخاب مجموعه مناسب حرکات زمین برای تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از طیف خطر یکنواخت

علی اکبر یحیی آبادی^{۱*}، نسربین نعمانی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی تحت تأثیر رکوردهای حرکت زمین قرار دارد. با توجه به اینکه پیش‌بینی دقیق مشخصات زلزله‌های آینده امکان پذیر نیست، نحوه‌ی انتخاب رکوردهای حرکت زمین همواره به عنوان یک چالش در مهندسی زلزله مطرح بوده است. در این مطالعه، یک روش برای انتخاب مجموعه‌ی مناسب از حرکات شدید زمین با توجه به ویژگی‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی یک ساختمانگاه خاص معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مجموعه رکوردهایی که در این مطالعه پیشنهاد می‌شود، می‌توان برای تحلیل انواع سازه‌ها بدون توجه به پیرو ارتعاشی آن‌ها، حتی در ساختمانگاه‌هایی که در معرض حرکات پالس-گونه‌ی حوزه‌ی نزدیک قرار دارند، استفاده کرد. رکوردهای حرکت زمین به نحوی انتخاب می‌شود که میانگین و انحراف معیار طیف‌های پاسخ آن‌ها با طیف طراحی هدف مطابقت داشته باشد. بدین منظور از طیف‌های پاسخی که بر مبنای مشخصات آماری طیف طراحی هدف شبیه‌سازی می‌شوند، استفاده می‌شود. در نظر گرفتن انحراف معیار طراحی در انتخاب رکوردها، به طور مناسب عدم قطعیت ذاتی در رکوردهای زلزله را در نظر می‌گیرد. از بین حدود ۳۰۰ رکورد، یک مجموعه‌ی ۳۰ تایی و یک مجموعه‌ی ۷ تایی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله که دارای بیشترین مطابقت با پارامترهای آماری طیف هدف می‌باشند، برای خاک‌های I، II و III پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه، همچنین یک روش مناسب با عنوان حداقل مجموع مربعات خطاها برای تعیین ضرایب مقیاس رکوردها، مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مختلف برای مقیاس کردن رکوردها، علیرغم رعایت ضوابط آیین‌نامه می‌تواند منجر به ضرایب مقیاس مختلف برای رکوردهای مختلف و در نتیجه برآورد متفاوت از پاسخ سازه‌ها در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شود.

کلمات کلیدی: انتخاب حرکات زمین، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، میانگین، انحراف معیار، طیف خطر یکنواخت، مقیاس کردن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2019.143503.1625	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/JSCE.2019.143503.1625	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۱	۱۳۹۷/۱۰/۱۸	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	
علی اکبر یحیی آبادی				*نویسنده مسئول:		
A.yahyaabadi@ub.ac.ir				پست الکترونیکی:		

Selection of an appropriate ground motion records set for time history analysis using uniform hazard spectrum

Aliakbar Yahyaabadi ,Nasrin Nomani

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

ABSTRACT

In time history analysis of structures, it is essential to select an appropriate set of earthquake ground motions using the meaningful statistical methods. This matter is a challenge in earthquake engineering because the characteristics of future earthquakes are unpredictable. In this paper, earthquake ground motion records were selected based on the geological and geotechnical characteristics of the desired site. The record sets proposed here can be used for analyzing any structure with a desired fundamental period, even for sites that have potential to experience near-fault pulse-like events. The records were selected based on the response spectra simulated according to the statistical characteristics of the target Uniform Hazard Spectrum (UHS). The objective is that the response spectra of the selected records have the mean and standard deviation that are consistent with the corresponding values of the target UHS. In addition to the mean, the standard deviation was also considered in the records selection procedure to capture the ground motion aleatory uncertainty. Two appropriate sets of 7 and 30 records, selected from about 300 earthquake ground motion records, were suggested for each soil types of I, II, and III. Additionally, an efficient method referred to as the least sum of squared errors was developed for scaling the records with respect to the standard No. 2800 of Iran. Results demonstrate that using the different methods for scaling the records leads to various scaling factors for records, and as a consequence different structural responses using the method of time history analysis.

ARTICLE INFO

Received: 07 August 2018

Revised: 08 January 2019

Accepted: 11 January 2019

Keywords:

Ground motions selection, Time history analysis, Mean, Standard deviation, Uniform hazard spectrum, Scaling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.143503.1625

*Corresponding author Aliakbar Yahyaabadi

Email address: A.yahyaabadi@ub.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های عمده‌ای در حوزه‌ی تحقیقات و رهیافت‌های مهندسی زلزله صورت گرفته است. بخشی از این پیشرفت‌ها در حوزه‌هایی نظیر روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، همچون تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی و کاربرد آن در مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد می‌باشد. در مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد، می‌توان شتاب‌نگاشت‌ها را از پایگاه داده‌های حرکات ثبت شده‌ی زمین در زمین لرزه‌های گذشته بر اساس شاخص‌هایی نظیر بزرگی، فاصله از گسل و مکانیزم گسل انتخاب کرد؛ و سپس آن‌ها را به گونه‌ای مقیاس کرد که با شرایط مورد نظر سازگار باشند [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که حرکات شدید زمین نسبت به سایر منابع عدم قطعیت، نظیر مشخصات سازه و ساختگاه، تقریب‌های مدل‌سازی و فرضیات تحلیل و طراحی بیشترین تأثیر را بر پاسخ سازه دارد [۲].

تصادفی بودن ماهیت زلزله باعث می‌شود تا نتوان به صراحت وقوع زلزله را در منطقه‌ای خاص پیش‌بینی کرد. از طرف دیگر، تعیین دقیق پارامترهای تأثیرگذار لرزش زمین نظیر مقادیر بیشینه‌ی حرکت زمین، مدت زمان حرکت شدید و محتوی فرکانس که ممکن است در آینده در یک منطقه رخ دهد، امری بعید به نظر می‌رسد. با این حال، انتخاب یک مجموعه‌ی مناسب از رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل‌های دینامیکی اجتناب‌ناپذیر است. ترجیح بر این است که از رکوردهای ثبت شده در یک منطقه خاص که تا حدودی شرایط و ویژگی‌های زلزله‌های آینده را نمایندگی می‌کند، استفاده شود. با توجه به اینکه برای بسیاری از مناطق جهان و برای بسیاری از طراحی‌های مورد نظر، پایگاه داده‌های مربوط به حرکات ثبت شده، پراکنده و یا به طور کلی فاقد اطلاعات می‌باشند، به ناچار باید حرکات ثبت شده در سایر مناطق نیز مورد بررسی قرار گیرند.

انتخاب مناسب رکوردهای حرکت زمین، مستلزم شناخت مشخصاتی از زلزله است که بر سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی تأثیرگذار است. به طور معمول، رکوردهای حرکات زمین بر اساس پارامترهای لرزه‌ای در سایت که وابسته به مشخصات سازه هستند، انتخاب می‌شوند. این پارامترها از محاسبات تحلیل خطر بدست می‌آید. سپس، شدت حرکات زمین با پارامتری تحت عنوان شاخص شدت اندازه‌گیری و بر اساس احتمال فراگذشت مشخص در سایت مقیاس می‌شود [۳]. در رابطه با انتخاب حرکات زمین بر اساس پارامترهای وابسته به مشخصات سازه، می‌توان به مطالعات استیوارت و همکاران [۴]، بیکر و کرنل [۵] هسلتون و همکاران [۶] و کاستانوس و سکتوس [۷] اشاره کرد. مجموعه رکوردهای انتخاب شده بر اساس این روش‌ها، فقط برای یک سازه‌ی مشخص در ساختگاه معلوم قابل کاربرد است. تحقیقات نشان می‌دهد که پراکندگی در پاسخ‌های یک سازه تحت یک مجموعه رکورد حرکت زمین قابل توجه خواهد بود، حتی اگر این رکوردها بر مبنای یک سطح خطر لرزه‌ای یکسان انتخاب شده باشند [۸]. بنابراین در برخی تحقیقات، ایده‌ی لرزش‌های بحرانی ملاک انتخاب مجموعه حرکات زمین برای تحلیل سازه‌های مهم نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای قرار گرفته است. بر اساس این ایده، لی و همکاران روشی را پیشنهاد داده‌اند که می‌توان به کمک آن، رکوردهایی از حرکات زمین که منجر به شدیدترین حالت آسیب در نیروگاه خواهد شد را شناسایی کرد [۹].

در صورتی که معرفی یک مجموعه‌ی مناسب از حرکات زمین با قابلیت کاربرد برای گستره‌ی وسیعی از مشخصات سازه‌ای و ژئوتکنیکی مدنظر باشد، نمی‌توان از روش‌های مبتنی بر مشخصات سازه استفاده کرد. زیرا، سیستم‌های سازه‌ای در یک منطقه‌ی جغرافیایی ممکن است به محدوده‌ی گسترده‌ای از پیوندها حساس باشند، و برخی از سایت‌ها نیز ممکن است در معرض حرکات پالس-مانند حوزه‌ی نزدیک قرار داشته باشند. بدین منظور می‌توان از رکوردهای حرکت زمین سازگار با طیف‌های طراحی استفاده کرد. سیمون کونگ و چپرا پیشنهاد دادند که از حرکات دو مؤلفه‌ای زمین که سازگار با یک زوج طیف هدف در راستای محورهای اصلی ساختمان هستند، برای تحلیل غیرخطی ساختمان‌ها در حوزه دور استفاده شود [۱۰]. پالانسی و همکاران در مطالعه‌ای با موضوع ارزیابی آماری تقاضای لرزه‌ای در ساختمان‌های خمشی میان‌مرتبه نشان دادند که تحلیل تاریخچه‌ی زمانی تحت مجموعه‌های مختلف از رکوردهای حرکات زمین منجر به برآورد یکسان از تقاضای لرزه‌ای نخواهد شد، حتی اگر این مجموعه‌ها بر مبنای طیف طراحی یکسانی انتخاب شده باشند [۱۱]. نتیجه‌ای مشابه در یک مطالعه‌ی دیگر که توسط تیان و همکاران در خصوص ارزیابی عملکرد لرزه‌ای برج‌های انتقال برق انجام شد، حاصل گردید

[۱۲]. این موضوع دلالت بر تأثیر عدم قطعیت ذاتی موجود در رکوردهای زلزله و ضرورت توجه به آن در انتخاب رکوردهای زلزله دارد. بیکر و همکاران روشی را پیشنهاد دادند که بر آن اساس می‌توان مجموعه‌ای از حرکات زمین را انتخاب کرد که طیف‌های پاسخ آن‌ها، مقدار میانگین و انحراف معیار مشخصی داشته باشد [۱۳]. بر خلاف بسیاری از روش‌ها که در آن‌ها فقط انطباق با طیف میانگین مدنظر است، در نظر گرفتن انحراف معیار طیف طراحی در انتخاب رکوردها سبب می‌شود که مجموعه رکوردهای انتخاب شده بر اساس این روش، عدم قطعیت ذاتی موجود در زلزله را نیز در بر گیرد. در این روش، ابتدا چندین طیف پاسخ با استفاده از روش‌های احتمالاتی بر اساس مقادیر آماری طیف هدف تولید می‌شود. سپس، آن دسته از حرکات ثبت شده‌ی زمین در زلزله‌های گذشته که طیف پاسخ آن‌ها با طیف‌های شبیه‌سازی شده انطباق دارد، انتخاب می‌شود. به این ترتیب، میانگین و واریانس مجموعه‌ی حرکات زمین که بر مبنای این روش انتخاب می‌شود، منطبق بر مقادیر هدف خواهد بود.

مطالعات کتکه و راجه در سال ۲۰۰۸، تنها پژوهش قابل قبول در زمینه انتخاب حرکات زمین بر مبنای میانگین و واریانس طیف هدف قبل از مطالعات بیکر و همکاران می‌باشد [۱۴]. مطابق روش پیشنهادی آن‌ها، ابتدا حرکاتی از زمین بر اساس مطابقت با طیف میانگین انتخاب می‌شود، سپس برای دست یافتن به واریانس هدف، باید ضرایب مقیاس را به صورت اختصاصی به حرکات زمین اعمال کرد. مهمترین محدودیت این روش این است که نمی‌توان از آن برای حرکات مقیاس نشده استفاده کرد.

در این مطالعه، مجموعه شتاب‌نگاشت‌های مناسب که میانگین و واریانس آن‌ها با مقادیر متناظر طیف هدف در شهر بجنورد مطابقت داشته باشد، پیشنهاد خواهد شد. بدین منظور بر اساس روش پیشنهادی بیکر و لی [۱۵]، ابتدا طیف‌های پاسخ به کمک توزیع نرمال و با توجه به مشخصات آماری طیف خطر یکنواخت برای شهر بجنورد شبیه‌سازی شدند. پس از اطمینان از همخوانی پارامترهای آماری طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده با طیف خطر شهر بجنورد، از این طیف‌ها برای انتخاب مجموعه‌های ۷ تایی و ۳۰ تایی شتاب-نگاشت‌ها برای ساختگاه‌های نوع I، II و III استفاده شد. برای انتخاب مجموعه‌ی مناسب شتاب‌نگاشت از یک پایگاه اطلاعاتی متشکل از حدود ۳۰۰ رکورد زلزله که شامل رکوردهای حوزه‌ی دور و حوزه‌ی نزدیک با و بدون اثر پالس می‌باشد، استفاده شده است. مزیت شتاب-نگاشت‌های پیشنهادی این است که بر اساس مشخصات دینامیکی سازه‌ی خاصی انتخاب نشده‌اند؛ لذا می‌توان از آن‌ها برای تحلیل هر نوع سازه استفاده کرد. با توجه به اینکه سازه‌های متفاوتی وجود دارد که هر یک به بازه‌ای از پرپیوندها حساس هستند؛ لذا انتخاب حرکات زمین بر مبنای پرپیوندهای خاص یا بازه‌ی کوچکی از پرپیوندها مفید نمی‌باشد. در این پژوهش، بازه‌ی پرپیوندهای مورد بررسی بین صفر تا ۲ ثانیه می‌باشد.

پس از پیشنهاد مجموعه‌های مناسب شتاب‌نگاشت برای ساختگاه‌های I، II و III، لازم است ضرایب مقیاس رکوردها مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ی زلزله تعیین شود. در استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ضرایب مقیاس رکوردها بر اساس مقایسه مقدار متوسط طیف‌های پاسخ با طیف طرح استاندارد در بازه‌ی پرپیودی $0.2T$ تا $1/5T$ تعیین می‌شود. در این آیین‌نامه ضابطه‌ای درباره‌ی نحوه انتخاب ضریب مقیاس هر یک از رکوردها پیشنهاد نشده است؛ لذا می‌توان از روش‌های متفاوتی برای تعیین ضریب مقیاس هر رکورد استفاده کرد. در این پژوهش، ضمن معرفی یک روش مناسب با عنوان حداقل مجموع مربعات خطاها برای تعیین ضریب مقیاس هر رکورد، با مقایسه کارایی این شاخص با شاخص‌های مساحت شتاب طیفی و حداکثر شتاب زمین، اثرات استفاده از شاخص‌های مختلف برای مقیاس کردن رکوردها بر نتایج نهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۶].

۲- مدل تصادفی شبیه‌سازی طیف‌های پاسخ

انتخاب مجموعه شتاب‌نگاشت‌های مناسب، اغلب بر پایه انطباق طیف‌های پاسخ رکوردهای انتخابی و یک طیف هدف انجام می‌شود. طیف هدف می‌تواند طیف طراحی آیین‌نامه یا طیف محاسبه شده از تحلیل احتمالاتی خطر زلزله باشد. روش انطباق طیفی، رایج‌ترین روش پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای است و می‌تواند در طراحی بر مبنای نیرو و یا طراحی بر مبنای عملکرد مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، رکوردهایی انتخاب می‌شوند که بیشترین سازگاری را با طیف هدف از لحاظ شکل طیفی داشته باشند [۱۷].

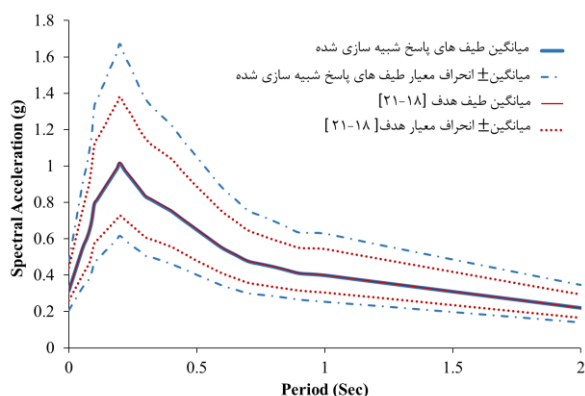
در این پژوهش، طیف خطر یکنواخت شهر بجنورد [۱۸-۲۱]، به عنوان طیف هدف برای انتخاب رکوردها مورد استفاده قرار گرفت. در انجام تحلیل احتمالاتی خطر زلزله در مطالعات مذکور، طیف خطر یکنواخت به کمک رابطه‌ی کاهندگی امبرسیز برای خاک‌های نوع I، II و III [۲۲]، و با در نظر گرفتن اثرات پالس-مانند حوزه‌ی نزدیک محاسبه شده است. استفاده از طیف خطر یکنواخت به عنوان طیف هدف این مزیت را دارد که دامنه‌های طیفی در تمام پریودها از احتمال فراگذشت یکسانی برخوردار هستند. این ویژگی برای پیشنهاد یک مجموعه شتاب‌نگاشت برای تحلیل انواع سازه‌ها که به محدوده‌های پریودی مختلف حساس هستند، مفید خواهد بود.

هدف، انتخاب مجموعه رکوردهایی است که میانگین و انحراف معیار طیف پاسخ آن‌ها با مقادیر طیف خطر یکنواخت مطابقت داشته باشد. مطالعات نشان داده است که لگاریتم شتاب‌های طیفی ($\ln S_a$) در پریودهای مختلف یک بردار تصادفی با توزیع نرمال است [۲۳]. پارامترهای این توزیع آماری عبارت است از میانگین و انحراف معیار مقادیر لگاریتم شتاب‌های طیفی در پریودهای مختلف که می‌توان بر پایه‌ها آن‌ها نسبت به انتخاب مجموعه رکوردهای مناسب اقدام کرد. کافی است حرکات زمین به نحوی انتخاب شوند که پارامترهای آماری برای مجموعه رکوردها با مقادیر متناظر در طیف خطر یکنواخت مطابقت داشته باشد.

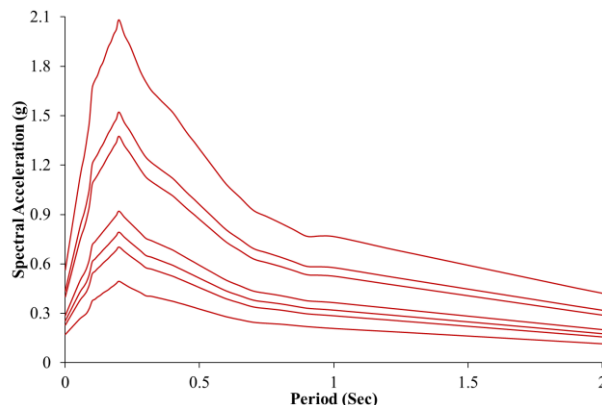
زمانی که علاوه بر میانگین، انطباق با انحراف معیار نیز مدنظر باشد، بررسی رکوردها به صورت تک به تک کافی نیست؛ بلکه باید میانگین و انحراف معیار مجموعه‌های مختلف از رکوردها با مقادیر هدف مطابقت داده شوند. به طور کلی، تعداد زیادی مجموعه رکورد احتمالی وجود خواهد داشت که با طیف هدف مطابقت داشته باشد. بنابراین، انتخاب بهترین مجموعه نیاز به محاسبات بهینه‌سازی سنگین دارد. بیکر و همکاران روشی را پیشنهاد داده‌اند که دستیابی به این مهم را با دقت قابل قبول میسر می‌سازد [۱۵]. در این روش، ابتدا باید به تعداد رکورد مورد نیاز، طیف‌های پاسخ بر اساس توزیع هدف تولید گردد و سپس رکوردهایی از حرکات زمین انتخاب شود که طیف‌های پاسخ آن‌ها، یک به یک با طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده بیشترین انطباق را داشته باشند.

بر همین مبنا، پارامترهای آماری طیف خطر یکنواخت در شهر بجنورد به عنوان مقادیر هدف برای تولید مجموعه‌های ۳۰ تایی و ۷ تایی از رکوردهای زلزله استفاده گردید. در اولین گام، با استفاده از روش مونت کارلو، یک مجموعه‌ی ۳۰ تایی و یک مجموعه‌ی ۷ تایی از طیف‌های پاسخ بر اساس توزیع نرمال طیف هدف شبیه‌سازی شد. شایان ذکر است میانگین و انحراف معیار طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده به صورت تقریبی با مقادیر هدف انطباق دارند؛ زیرا این طیف‌ها با توجه به توزیع آماری نرمال نمونه‌برداری می‌شوند. مسلماً هر چه تعداد طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی بیشتر باشد، نتایج با طیف هدف سازگاری بیشتری خواهد داشت.

برای روشن‌تر شدن این موضوع، در شکل‌های ۱ و ۲، طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده بر پایه طیف خطر یکنواخت برای خاک نوع II، برای دو مجموعه‌ی ۷ تایی و ۳۰ تایی نمایش داده شده است. در این شکل‌ها، می‌توان میانگین و میانگین به علاوه و منهای یک انحراف معیار طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی و مقادیر متناظر در طیف هدف (طیف خطر یکنواخت) را مشاهده کرد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در هر دو حالت مجموعه‌ی ۷ تایی و مجموعه‌ی ۳۰ تایی، انطباق خوبی بین طیف میانگین شبیه‌سازی شده و طیف میانگین هدف وجود دارد. با این حال، در مجموعه‌ی ۳۰ تایی به دلیل اینکه از تعداد بیشتری طیف‌های شبیه‌سازی شده استفاده گردیده، مقادیر فوق میانگین و زیر میانگین به طیف‌های متناظر هدف نزدیک‌تر شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش تعداد طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده، انحراف معیار رکوردهای انتخاب شده تطبیق بهتری با مقادیر هدف خواهد داشت و در نتیجه عدم قطعیت ذاتی موجود در وقوع زلزله با دقت بهتری در رکوردهای انتخابی منعکس می‌شود.

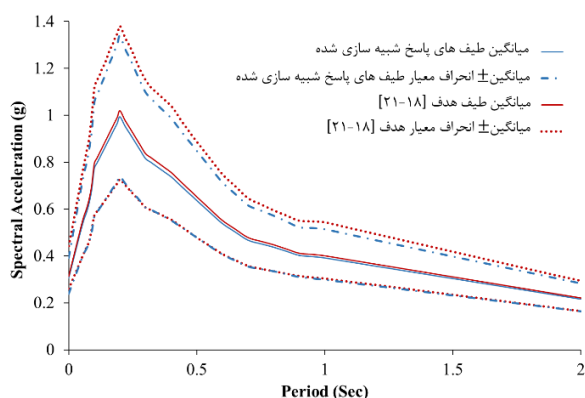


(ب)

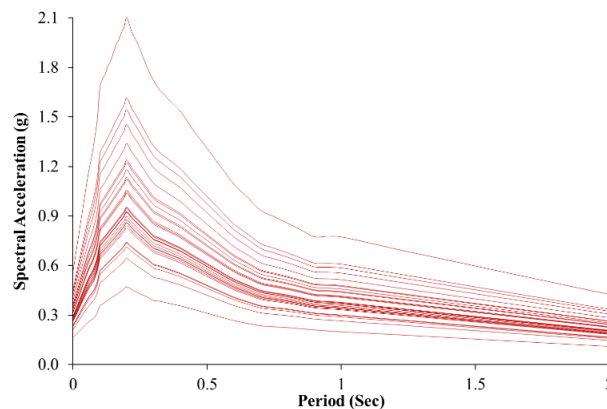


(الف)

شکل ۱: (الف) مجموعه‌ی ۷ تایی طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده بر اساس طیف خطر یکنواخت برای خاک نوع II، (ب) مقایسه‌ی میانگین و میانگین به علاوه و منهای یک انحراف معیار طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده و طیف خطر یکنواخت



(ب)



(الف)

شکل ۲: (الف) مجموعه‌ی ۳۰ تایی طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده بر اساس طیف خطر یکنواخت برای خاک نوع II، (ب) مقایسه‌ی میانگین و میانگین به علاوه و منهای یک انحراف معیار طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده و طیف خطر یکنواخت

۳- پایگاه اطلاعاتی داده‌ها

پایگاه اطلاعاتی در این مطالعه شامل ۲۹۵ رکورد از ۴۹ زلزله‌ی مختلف است، که مجموعه‌ای از رکوردهای پالس-مانند و بدون پالس حوزه‌ی نزدیک و همچنین رکوردهای حوزه‌ی دور را در بر می‌گیرد. از این بین، ۱۳۸ رکورد مربوط به زلزله‌های ایران است که از بانک داده‌های شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران دریافت شده‌اند [۲۴]. مابقی رکوردها، یعنی ۱۵۷ رکورد از رکوردهای ثبت شده در مناطق مختلف جهان از پایگاه اطلاعات مرکز تحقیقاتی مهندسی زلزله پاسیفیک به این مجموعه اضافه شده است [۲۵]. بزرگی رکوردها بین ۵/۵ تا ۷/۸ می‌باشد، به صورتی که ۸۷ رکورد دارای بزرگی بین ۵/۵ تا ۶، ۱۶۷ رکورد دارای بزرگی ۶ تا ۷ و ۴۱ رکورد دارای بزرگی بیشتر از ۷ است.

شتاب‌نگاشت‌ها بر روی خاک‌های با تراکم متوسط، خاک‌های سخت و یا سنگ مطابق طبقه‌بندی زمین در استاندارد ۲۸۰۰ ایران ثبت شده‌اند و انواع گسل‌ها را پوشش می‌دهند. در محاسبه‌ی طیف پاسخ برای هر رکورد زلزله، از میانگین هندسی دو مؤلفه‌ی افقی متعامد شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در هر ایستگاه استفاده شده است. برای رکوردهای پالس مانند حوزه‌ی نزدیک، مؤلفه‌های عمود و موازی با

گسل مورد استفاده قرار گرفتند؛ زیرا اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده سبب بروز پالس سرعت در مؤلفه‌ی عمود بر گسل در حوزه‌ی نزدیک می‌شود [۲۶].

۴- انتخاب حرکت زمین

در این بخش از پژوهش، نحوه‌ی انتخاب مجموعه رکوردهای مناسب که میانگین و واریانس طیف‌های پاسخ آن‌ها با طیف هدف مطابقت داشته باشد، تبیین می‌شود. برای هر یک از طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده در بخش دوم مقاله، رکوردی انتخاب می‌شود که طیف پاسخ آن از بیشترین انطباق با طیف پاسخ شبیه‌سازی برخوردار باشد. تشابه بین طیف پاسخ حرکت زمین و طیف پاسخ شبیه‌سازی شده با استفاده از رابطه‌ی مجموع مربعات خطاها (SSE) ارزیابی گردید:

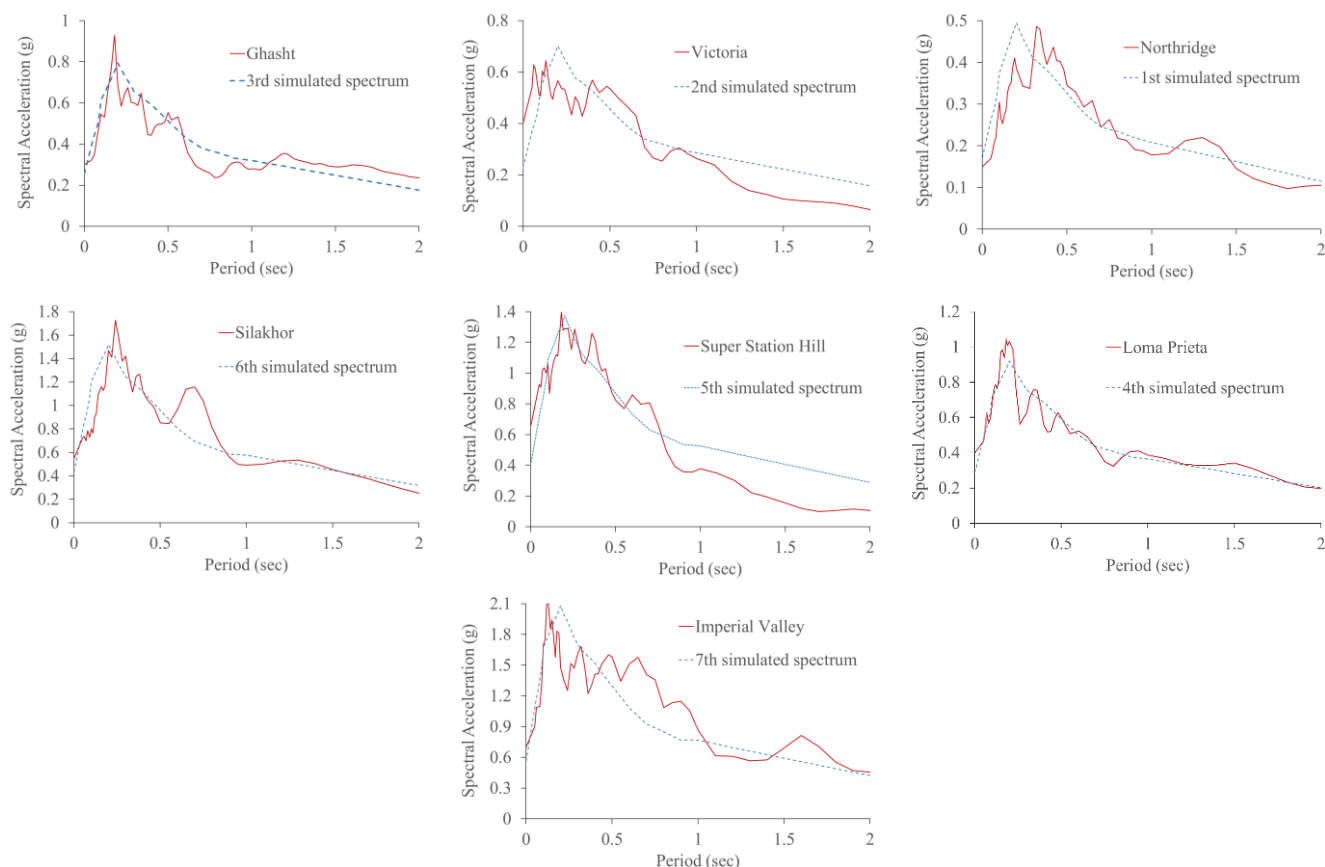
$$SSE = \sum_{j=1}^p (S_a(T_j) - S_a^{(s)}(T_j))^2 \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، $S_a(T_j)$ شتاب طیفی رکورد مورد نظر در پریود T_j و $S_a^{(s)}(T_j)$ شتاب طیفی در طیف پاسخ شبیه‌سازی شده در پریود T_j و P تعداد کل پریودهای مورد بررسی در بازه ۰ تا ۲ ثانیه است. با محاسبه مقدار SSE برای هر یک از طیف‌های شبیه‌سازی شده به ازای هر یک از ۲۹۵ رکورد موجود در پایگاه اطلاعاتی این پژوهش، در نهایت رکوردی که منجر به کمترین SSE شد، به عنوان مناسب‌ترین حرکت زمین انتخاب گردید. با تکرار این محاسبات برای تمام طیف‌های پاسخ شبیه‌سازی شده، مجموعه رکوردهای مناسب به تعداد طیف‌های شبیه‌سازی شده، حاصل گردید.

شایان ذکر است، آنچه در فرآیند انتخاب یک رکورد اهمیت دارد، میزان انطباق شکل طیف پاسخ آن رکورد با شکل طیف شبیه‌سازی شده است. به عبارتی ممکن است طیف پاسخ یک رکورد، علیرغم سازگاری مناسب شکل آن با شکل طیف شبیه‌سازی شده، به دلیل هم‌مقیاس نبودن مقادیر آن منجر به مجموع خطای مربعات قابل توجهی گردد. لذا، مجموع مربعات خطا بین طیف پاسخ هر رکورد حرکت زمین و طیف شبیه‌سازی شده به ازای ضرایب مقیاس مختلف که به حرکت زمین اعمال شد، محاسبه گردید و در نهایت کمترین مجموع مربعات خطا که به ازای یک ضریب مقیاس مشخص برای هر رکورد بدست می‌آید، ملاک قرار گرفت.

چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، استفاده از شاخص SSE منجر به انتخاب رکوردهایی شده است که انطباق خیلی خوبی با طیف‌های شبیه‌سازی شده ۱ تا ۷ برای خاک نوع II دارند. در این شکل به جهت اختصار، به ذکر عنوان رویداد زلزله بسنده شده است. جزئیات دقیق مربوط به مجموعه رکوردهای ۷ تایی پیشنهادی برای خاک‌های نوع I، II و III را می‌توان در جدول‌های ۱ تا ۳ مشاهده کرد. در جدول ۴ نیز مجموعه ۳۰ تایی رکوردهای پیشنهادی برای خاک نوع II معرفی شده است. مجموعه‌های ۳۰ تایی پیشنهادی برای خاک‌های نوع I و III را نیز می‌توان در مرجع [۲۷] یافت.

با توجه به اینکه طیف‌های شبیه‌سازی شده بر اساس یک توزیع لوگ نرمال مشخص تولید شدند، به نحوی که میانگین و انحراف معیار آن‌ها تقریباً با مقادیر متناظر هدف مطابقت داشته باشد؛ می‌توان انتظار داشت که شتاب‌نگاشت‌هایی که بر پایه مقایسه با طیف‌های شبیه‌سازی شده انتخاب شده‌اند، میانگین و انحراف معیار مطلوب را دارا باشند. این موضوع در شکل ۴ برای رکوردهای پیشنهادی برای خاک نوع II نشان داده شده است. در این شکل، میانگین، میانگین به علاوه و منهای یک انحراف معیار طیف‌های پاسخ مجموعه



شکل ۳: مقایسه‌ی طیف‌های شبیه‌سازی شده با رکوردهای انتخاب شده برای مجموعه‌ی ۷ تایی و خاک II

جدول ۱: مجموعه‌ی ۷ تایی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای خاک نوع I

ردیف	رویداد	ایستگاه	سال وقوع	بزرگی	فاصله (کیلومتر)
۱	Tabas	Deyhook	۱۹۷۸	۷/۴	۱۸
۲	Superstation hill	Parachute Test Site	۱۹۸۷	۶/۵	۰/۹
۳	Upland	Pomona	۱۹۹۰	۵/۶	۷/۲
۴	Mammoth lakes	CDMG 54099	۱۹۹۰	۵/۷	۶/۰
۵	Coalinga	Palmer Ave	۱۹۸۳	۵/۷	۱۲/۱
۶	Northridge	LA-Baldwin Hills	۱۹۹۴	۶/۷	۲۹/۹
۷	Ahar	Ahar	۲۰۱۲	۶/۲	۲۷

جدول ۲: مجموعه‌ی ۷ تایی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای خاک نوع II

ردیف	رویداد	ایستگاه	سال وقوع	بزرگی	فاصله (کیلومتر)
۱	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۱۹۸۹	۶/۹	۸/۵
۲	Gasht	Roodbar	۲۰۰۳	۷/۸	۴۰/۶
۳	Superstation hill	Parachute Test Site	۱۹۸۷	۶/۵	۰/۹
۴	Silakhor	Chalalan Choolan	۲۰۰۶	۵/۹	۹
۵	Imperial valley	Delta	۱۹۷۹	۶/۵	۲۲
۶	Northridge	Northridge-Saticoy	۱۹۹۴	۶/۷	۱۲/۱
۷	Victoria	Cerro Prieto	۱۹۸۰	۶/۳	۱۴/۴

جدول ۳: مجموعه‌ی ۷ تایی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای خاک نوع III

ردیف	نام رکورد انتخاب شده	ایستگاه	سال وقوع	بزرگی	فاصله (کیلومتر)
۱	Gasht	Hidooj	۲۰۱۳	۷/۸	۱۳۸
۲	Koujoo	Garmdarreh	۲۰۰۴	۶/۴	۷۶
۳	Silakhor	Chalalan Choolan	۲۰۰۶	۵/۹	۹
۴	Northwest China-01	Jiashi	۱۹۹۷	۵/۹	۲۴/۱
۵	Tabas	Deyhook	۱۹۷۸	۷/۴	۱۸
۶	Coyote lake	Gilroy Array #6	۱۹۷۹	۵/۷	۳/۱
۷	Westmorland	Parachute Test Site	۱۹۸۱	۵/۹	۱۶/۷

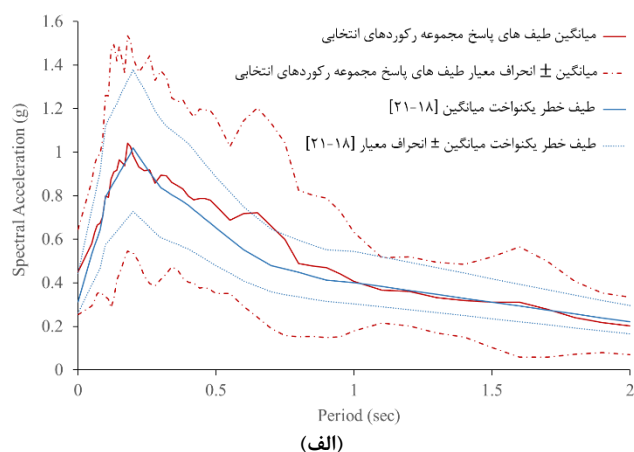
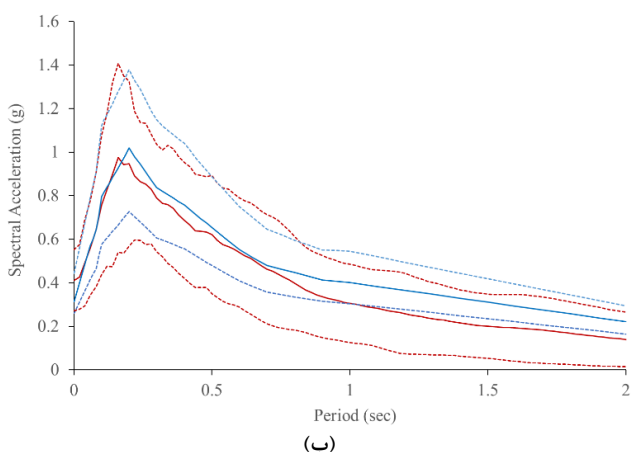
رکوردهای پیشنهادی با طیف‌های متناظر هدف برای دو مجموعه‌ی ۷ تایی و ۳۰ تایی مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از تعداد بیشتر رکورد در یک مجموعه منجر به بهبود میزان انطباق با طیف هدف می‌شود. علاوه بر انطباق مقادیر زیر میانگین، میانگین و فوق میانگین طیف‌های پاسخ رکوردهای پیشنهادی با طیف طراحی، دیگر نقطه قوت مجموعه رکوردهای پیشنهادی در این پژوهش این است که توزیع احتمالاتی این رکوردها با توزیع احتمالاتی طیف هدف یعنی توزیع لوگ نرمال مطابقت دارد. لذا، استفاده از این مجموعه رکوردها در تحلیل تاریخی‌ی زمانی سازه‌ها سبب سوگیری نتایج نمی‌شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه طیف‌های شبیه-سازی شده بر اساس توزیع لوگ نرمال و با روشی کاملاً تصادفی انتخاب شده‌اند، این روش قابل استفاده برای سایر ساختگاه‌ها نیز می‌باشد.

همانطور که در مقدمه نیز اشاره شد، از دیگر نقاط قوت روش مورد بحث در این مطالعه، در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی موجود در رکوردهای زلزله، در انتخاب مجموعه رکوردهای پیشنهادی است. این موضوع وقتی اهمیت می‌یابد که بخواهیم مطابق ضوابط آیین‌نامه‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران، پاسخ سازه را تحت رکوردهای انتخابی برآورد کنیم. مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران، متوسط پاسخ سازه تحت رکوردهای انتخابی در صورت استفاده از ۷ رکورد و بیشتر ملاک طراحی قرار می‌گیرد.

جدول ۴: مجموعه‌ی ۳۰ تایی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای خاک نوع II

ردیف	نام رکورد انتخاب شده	ایستگاه	سال وقوع	بزرگی	فاصله (کیلومتر)
۱	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۱۹۸۹	۶/۹	۸/۵
۲	Sarein	Ardebil 1	۱۹۹۷	۶/۰	۲۸
۳	Zarand	Chatrood	۲۰۰۵	۶/۵	۲۶
۴	Gasht	Roodbar	۲۰۱۳	۷/۸	۴۰۶
۵	Northwest China-01	Jiashi	۱۹۹۷	۵/۹	۲۴/۱
۶	Kobe	Kakogawa	۱۹۹۵	۶/۹	۲۲/۵
۷	Gheshm	Tomban	۲۰۰۸	۶/۰	۹
۸	Silakhor	Chalalan Choolan	۲۰۰۶	۵/۹	۹
۹	Victoria	Cerro Prieto	۱۹۸۰	۶/۳	۱۴/۴
۱۰	Palm spring	White water Trout Farm	۱۹۸۶	۶/۱	۶
۱۱	Upland	Pomona	۱۹۹۰	۵/۶	۷/۲
۱۲	Friuli	Tolmezzo	۱۹۷۶	۶/۵	۱۵/۰
۱۳	Westmorland	Fire Station	۱۹۸۱	۵/۹	۶/۵
۱۴	Coyote lake	Gilroy Array #6	۱۹۷۹	۵/۷	۳/۱
۱۵	Morgan hill	Coyote Lake Dam-SW ABUT	۱۹۸۴	۶/۲	۰/۵
۱۶	Gheshm	Souza	۲۰۰۵	۵/۷	۱۷
۱۷	Coalinga	Pleasant Valley Pump FF	۱۹۸۳	۵/۸	۱۳/۲
۱۸	Mammoth lakes	Convict Creek	۱۹۸۰	۶/۱	۶/۶
۱۹	Chalfant	LADWP South st	۱۹۸۶	۵/۸	۲۳/۴
۲۰	Northridge	LA-Baldwin Hills	۱۹۹۴	۶/۷	۲۹/۹

۲۱	Superstation hill	USGS 5051	۱۹۸۷	۶/۶	۱۷
۲۲	Garmkhan	Bojnord	۱۹۹۷	۶/۴	۲۹
۲۳	Shonbeh	Faryab	۲۰۱۳	۶/۰	۵۲
۲۴	Whittier Narrows-01	LB - Orange Ave	۱۹۸۷	۶/۰	۲۴/۵
۲۵	Moosiyani	Moosiyani	۲۰۰۸	۵/۸	۲۵
۲۶	Nagan	Nagan	۱۹۷۷	۶/۱	۵
۲۷	Sefidrood	Sefidrood Dam 1	۱۹۹۱	۵	۲۷
۲۸	Tabas	Deyhook	۱۹۷۸	۷/۴	۱۸
۲۹	Avaj	Bahar	۲۰۰۲	۶/۴	۹۶
۳۰	San Salvador	Geotech Investing Centre	۱۹۸۶	۵/۸	۶/۳



شکل ۴: مقایسه‌ی طیف‌های میانگین و میانگین به علاوه و منهای یک انحراف معیار مجموعه رکوردهای پیشنهادی با طیف‌های متناظر طراحی برای خاک نوع II، الف) طیف‌های پاسخ مجموعه رکوردهای ۷ تایی، ب) طیف‌های پاسخ مجموعه رکوردهای ۳۰ تایی

متوسط پاسخ به طور معمول بر اساس میانگین حسابی مقادیر پاسخ محاسبه می‌شود. در نظر گرفتن انحراف معیار در انتخاب رکوردها، سبب افزایش میزان پراکندگی پاسخ‌های سازه تحت رکوردهای انتخابی مختلف می‌شود. از طرفی، افزایش میزان پراکندگی پاسخ-ها، سبب افزایش مقدار متوسط پاسخ‌ها خواهد شد [۱۵]. به عبارت دیگر، استفاده از روش‌هایی که در آن عدم قطعیت ذاتی موجود در رکوردهای زلزله در انتخاب رکوردها لحاظ نمی‌شود، سبب برآورد دست پایین از میانگین پاسخ سازه و در نتیجه طرح لرزه‌ای غیرمحافظة کارانه خواهد شد.

۵- مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها

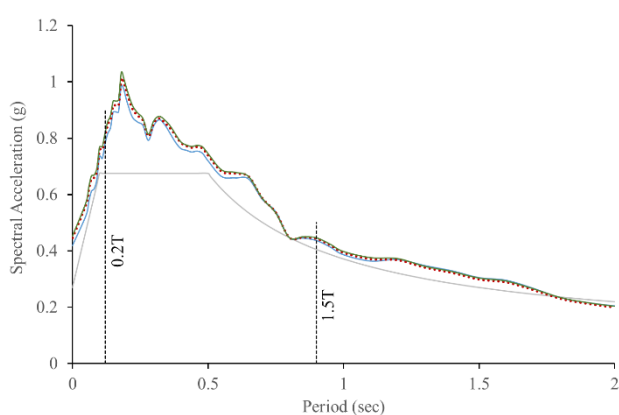
قبل از انجام تحلیل تاریخی‌چهی زمانی تحت رکوردهای انتخابی برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های موجود و یا طراحی لرزه‌ای سازه‌های جدید، ضروری است مجموعه رکوردهای انتخابی به سطح شدت خطر زلزله در سایت مورد نظر مقیاس شوند. ضوابط مربوط به نحوه‌ی مقیاس کردن رکوردها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران تصریح شده است. مطابق بند ۲-۳-۵-۳ این آیین‌نامه، شتاب‌نگاشت‌ها باید طوری مقیاس شوند که در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پریرود اساسی ساختمان، متوسط طیف‌های پاسخ رکوردها بیش از ده درصد از مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نشود [۱۶]. نکته حائز اهمیت این است که آیین‌نامه در مورد نحوه انتخاب ضریب مقیاس برای هر یک از رکوردها، ضابطه‌ای پیشنهاد نکرده و تنها به کنترل مقدار متوسط طیف‌های پاسخ اکتفا کرده است. لذا، می‌توان از روش‌های متفاوتی برای مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده کرد. در این بخش از مقاله، ضمن معرفی یک روش مناسب با عنوان حداقل مجموع مربعات خطاها (SSE) برای تعیین ضریب مقیاس هر یک از رکوردها، به مقایسه نتایج این روش با دو روش مساحت شتاب طیفی (SAA) و شتاب حداکثر زمین (PGA) به منظور روشن شدن میزان تأثیر روش مقیاس در نتیجه نهایی پرداخته خواهد شد.

در روش پیشنهادی حداقل مجموع مربعات خطاها، ضریب مقیاس هر رکورد به نحوی تعیین می‌شود که حداقل مجموع مربعات خطاها بین طیف پاسخ رکورد مورد نظر و طیف استاندارد در محدوده پریودی 0.2T تا 1.5T حاصل شود. بر این اساس می‌توان مطمئن شد که بیشترین انطباق بین طیف پاسخ و طیف طراحی در محدوده پریودی مورد نظر آیین‌نامه برقرار است. از برابر صفر قرار دادن مشتق مجموع مربعات خطاها، رابطه زیر برای تعیین ضریب مقیاس بهینه، SF_i بدست آمد:

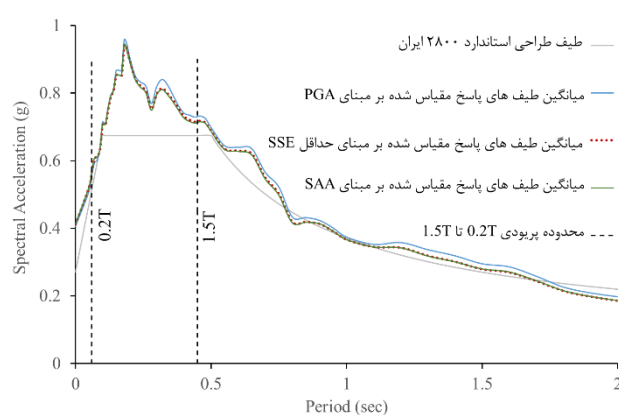
$$SF_i = \frac{\sum_{all T_j} AB(T_j) S_{ai}(T_j)}{\sum_{all T_j} S_{ai}^2(T_j)} \quad (2)$$

در رابطه (2)، A شتاب مبنای طرح و $B(T_j)$ مقدار ضریب بازتاب ساختمان در پریود T_j مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران است. مقدار $S_{ai}(T_j)$ مقدار شتاب طیفی در پریود T_j برای رکورد i است.

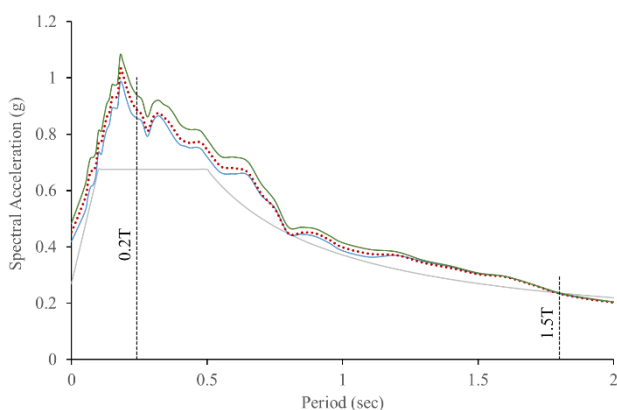
ضریب مقیاس هر رکورد در روش مساحت شتاب طیفی، SAA، برابر با نسبت مساحت زیر منحنی طیف طرح استاندارد به مقدار متناظر در طیف پاسخ رکورد مورد نظر در محدوده پریودی 0.2T تا 1.5T می‌باشد. در روش شتاب حداکثر زمین، تمام رکوردها به PGA یکسان مقیاس می‌شوند. شایان ذکر است بعد از محاسبه ضرایب مقیاس، میانگین طیف‌های پاسخ مقیاس شده محاسبه و با طیف طرح استاندارد در محدوده پریودی 0.2T تا 1.5T مقایسه گردید. سپس ضرایب مقیاس تمام رکوردها با فاکتور یکسان به نحوی اصلاح گردید که متوسط طیف‌های پاسخ، بیش از ده درصد از مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نشود. در شکل ۵، میانگین طیف‌های پاسخ ۷ رکورد پیشنهادی در جدول ۲ که بر اساس سه روش فوق مقیاس شده‌اند، با ۹۰٪ طیف طراحی استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقایسه شده است. این شکل برای چهار ساختمان با پریود اساسی ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ ثانیه ترسیم شده است. همانطور که می‌توان در این شکل مشاهده کرد، میانگین طیف‌های پاسخ مقیاس شده با سه روش در هر چهار ساختمان تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه ۷ رکورد مورد استفاده، بر اساس مقادیر میانگین، زیر میانگین و فوق میانگین طیف خطر یکنواخت در شهر بجنورد انتخاب شده‌اند، لذا روشی که برای



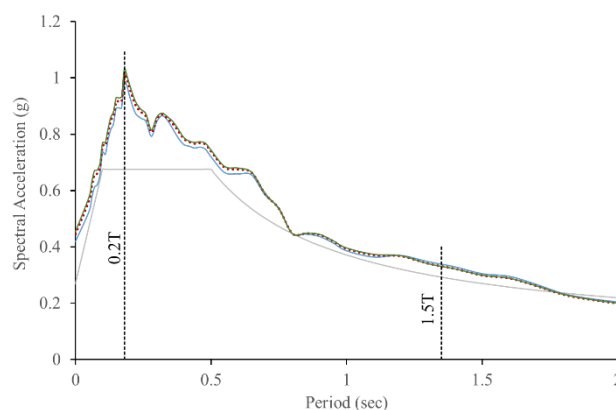
(ب) ساختمان با پریود اساسی ۰/۶ ثانیه



(الف) ساختمان با پریود اساسی ۰/۳ ثانیه



(الف) ساختمان با پریود اساسی ۱/۲ ثانیه



(ج) ساختمان با پریود اساسی ۰/۶ ثانیه

شکل ۵: مقایسه‌ی میانگین طیف‌های پاسخ مجموعه رکوردهای ۷ تایی برای خاک نوع II که مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران و بر اساس حداکثر شتاب زمین (PGA)، مساحت شتاب طیفی (SAA) و حداقل مجموع مربعات خطا (SSE) مقیاس شده‌اند.

جدول ۵: مقادیر حداکثر شتاب زمین برای رکوردهای مقیاس شده به سه روش مختلف و برای چهار پریود اساسی برای مجموعه‌ی ۷ تایی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای خاک نوع II (مقادیر بر حسب g می‌باشند)

Event	T=0.3 sec			T=0.6 sec			T=0.9 sec			T=1.2 sec		
	PGA	SAA	SSE	PGA	SAA	SSE	PGA	SAA	SSE	PGA	SAA	SSE
Loma Prieta	0.41	0.43	0.41	0.42	0.49	0.45	0.42	0.48	0.47	0.42	0.48	0.51
Gasht	0.41	0.40	0.38	0.42	0.46	0.42	0.42	0.44	0.43	0.42	0.42	0.44
Superstation hill	0.41	0.45	0.46	0.42	0.52	0.51	0.42	0.57	0.50	0.42	0.68	0.52
Silakhor	0.41	0.36	0.37	0.42	0.37	0.38	0.42	0.37	0.37	0.42	0.39	0.36
Imperial valley	0.41	0.36	0.35	0.42	0.35	0.36	0.42	0.35	0.38	0.42	0.35	0.36
Northridge	0.41	0.32	0.33	0.42	0.33	0.34	0.42	0.31	0.32	0.42	0.32	0.31
Victoria	0.41	0.59	0.59	0.42	0.65	0.66	0.42	0.66	0.67	0.42	0.74	0.66

مقیاس کردن رکوردها مورد استفاده قرار گرفته است، تأثیر چندانی بر شکل نهایی طیف میانگین این رکوردها نداشته است. به عبارت دیگر می‌توان گفت، به دلیل انطباق خوب شکل طیف‌های پاسخ رکوردهای انتخابی با طیف طراحی، از تأثیر روش مورد استفاده در مقیاس کردن رکوردها بر شکل نهایی طیف میانگین کاسته شده است.

در جدول ۵، مقادیر حداکثر شتاب زمین، PGA، رکوردهای مقیاس شده به سه روش مذکور ارائه شد است. علیرغم شباهت طیف‌های میانگین سه روش مورد بررسی در شکل ۵، همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر PGA رکوردهای مقیاس شده کاملاً با یکدیگر متفاوت است. اختلاف بین مقادیر حداکثر شتاب زمین در حالت استفاده از شاخص PGA با دو شاخص دیگر یعنی SAA و SSE قابل توجه است. به عنوان مثال، برای رکورد نورتریج مقدار شتاب حداکثر زمین در رکورد مقیاس شده برای $T = 0.3 \text{ sec}$ بر اساس شاخص PGA برابر 0.41 g می‌باشد، که بر اساس شاخص‌های SAA و SSE به ترتیب برابر 0.43 g و 0.41 g است. شایان ذکر است که نتایج حاصل بر اساس شاخص‌های SAA و SSE در اکثر قریب به اتفاق موارد نزدیک به هم می‌باشد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مختلف برای مقیاس کردن رکوردها، علیرغم رعایت ضابطه استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌تواند منجر به ضرایب مقیاس مختلف برای رکوردهای مختلف و در نتیجه پاسخ‌های نهایی متفاوت در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شود. از بین سه شاخص PGA، SAA و SSE که در

مقیاس کردن رکوردها مورد بررسی قرار گرفت، شاخص SSE به دلیل اینکه علاوه بر طیف میانگین، به انطباق بهتر هر یک از رکوردهای انتخابی با طیف طراحی در محدوده پریودی مورد نظر آیین نامه منجر می‌شود، شاخص مناسب‌تری برای مقیاس کردن رکوردها بر اساس طیف طراحی آیین نامه می‌باشد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

طبق ضوابط فصل دوم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، برای انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی باید از شتاب‌نگاشت‌هایی که تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در ساختگاه مورد نظر باشند و در آن‌ها اثر بزرگا، فاصله از گسل و... در نظر گرفته شده باشد، استفاده نمود. در انتخاب و مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها به این روش، با این که انطباق با طیف طرح استاندارد به خوبی مدنظر قرار می‌گیرد، ماهیت تصادفی و تغییرپذیری ناشی از منبع لرزه‌ای نادیده گرفته می‌شود. در این مطالعه، مجموعه شتاب-نگاشت‌های مناسب برای ساختگاه‌های مختلف بر مبنای تحلیل‌های آماری به نحوی انتخاب شد که با پارامترهای آماری طیف خطر یکنواخت در ساختگاه مورد نظر مطابقت داشته باشد:

- برای هر یک از ساختگاه‌های با خاک نوع I، II و III، یک مجموعه‌ی ۳۰ تایی و یک مجموعه‌ی ۷ تایی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله از بین حدود ۳۰۰ رکورد انتخاب و پیشنهاد شد. مجموعه رکوردهای پیشنهادی علاوه بر انطباق با طیف طرح میانگین، عدم قطعیت ذاتی در رکوردهای زلزله را با لحاظ کردن انحراف معیار طیف طراحی در فرآیند انتخاب به نحو مناسب پوشش می‌دهد.
- مجموعه رکوردها بر اساس یک توزیع لوگ نرمال مشخص انتخاب شده‌اند، به نحوی که میانگین و انحراف معیار آن‌ها تقریباً برابر با مقادیر متناظر طیف هدف می‌باشد.
- با افزایش تعداد رکوردها در یک مجموعه می‌توان انتظار داشت که تطبیق بهتری بین انحراف معیار رکوردهای انتخاب شده با مقادیر هدف حاصل شود و در نتیجه عدم قطعیت ذاتی موجود در وقوع زلزله با دقت بهتری منعکس شود.
- در نظر نگرفتن عدم قطعیت ذاتی موجود در رکوردهای زلزله در انتخاب رکوردها، سبب برآورد دست پایین از میانگین پاسخ سازه و در نتیجه طرح لرزه‌ای غیرمحافظة کارانه خواهد شد.
- شاخص مجموع مربعات خطاها (SSE) برای تعیین ضریب مقیاس هر یک از رکوردها مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران پیشنهاد شد. به کمک این شاخص، ضریب مقیاس هر رکورد به نحوی تعیین می‌شود که بیشترین انطباق بین طیف پاسخ و طیف طراحی در محدوده پریودی $0.2T$ تا $1/\Delta T$ مورد نظر آیین‌نامه برقرار شود.
- مقایسه ضرایب مقیاس حاصل از روش SSE با روش‌های مقیاس بر مبنای مساحت شتاب طیفی (SAA) و شتاب حداکثر زمین (PGA)، نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مختلف برای مقیاس کردن رکوردها، علیرغم رعایت ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌تواند منجر به ضرایب مقیاس مختلف برای رکوردهای مختلف و در نتیجه پاسخ‌های نهایی متفاوت در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شود.
- نتایج نشان می‌دهد اختلاف بین شدت رکوردهای مقیاس شده با استفاده از شاخص PGA در مقایسه با دو شاخص دیگر یعنی SAA و SSE قابل توجه است. شایان ذکر است که نتایج حاصل بر اساس شاخص‌های SAA و SSE در اکثر قریب به اتفاق موارد نزدیک به هم می‌باشد.

مراجع

- [1] Ashayeri, I. and Nikbakhtan, M. (2015). Presenting Relations for Generating Synthetic Accelerograms in Iran Plateau Using Stochastic Approach. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **2**(4), Pages 11-25.
- [2] Padgett, J. E. and DesRoches R. (2007). Sensitivity of seismic response and fragility to parameter uncertainty. *Journal of Structural Engineering*, **133**(12), Pages 1710-1718.
- [3] Yahyaabadi, A. and Theranizadeh, M. (2011). New scalar intensity measure for near-fault ground motions based on the optimal combination of spectral responses. *Scientia Iranica*, **18**(6), Pages 1149-1158.
- [4] Stewart, J. P., Chiou, S.-J., Bray, J.D., Graves, R. W., Somerville, P.S. and Abrahamson, N.A. (2002). Ground motion evaluation procedures for performance-based design. *Soil dynamics and earthquake engineering*, **22**(9-12), Pages 765-772.
- [5] Baker, J. W. and Cornell, C. A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(9), Pages 1077-1095.
- [6] Haselton, C. B., et al. (2009). *Evaluation of ground motion selection and modification methods: Predicting median interstory drift response of buildings*. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, Available at: <https://peer.berkeley.edu/node/59> [Accessed 2. 3. 2018].
- [7] Katsanos, E. and Sextos, A. (2018). Structure-specific selection of earthquake ground motions for the reliable design and assessment of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(2), Pages 583-611.
- [8] Zhai, C.H., Chang, Z.W., Li, S. and Xie, L.L. (2013). Selection of the most unfavorable real ground motions for low- and mid-rise RC frame structures. *Journal of Earthquake Engineering*, **17** (8), Pages 1233-125.
- [9] Li, C., Zhai, C., Kunnath, S. and Ji, D. (2019). Methodology for selection of the most damaging ground motions for nuclear power plant structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**, Pages 345-357.
- [10] Simon Kwong, N. and Chopra, A. C. (2018). Determining Bidirectional Ground Motions for Nonlinear Response History Analysis of Buildings at Far-Field Sites. *Earthquake Spectra*. **34**(4), Pages 1931-1954.
- [11] Palanci, M., Kayhan, A. H. and Demir, A. (2018). A statistical assessment on global drift ratio demands of mid-rise RC buildings using code-compatible real ground motion records. *Bulletin of earthquake engineering*, **16**(11), Pages. 5453–5488.
- [12] Tian, L., Ma, R. and Qu, B. (2018). Influence of different criteria for selecting ground motions compatible with IEEE 693 required response spectrum on seismic performance assessment of electricity transmission towers. *Engineering Structures*, **156**, Pages. 337-350.
- [13] Baker, J. W., et al. (2011). *New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program*. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, Available at: <https://peer.berkeley.edu/node/59> [Accessed 2. 3. 2018].
- [14] Kottke, A. and Rathje E. M. (2008). A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis. *Earthquake Spectra*, **24**(4), Pages 911-932.
- [15] Baker, J. W. and Lee C. (2018). An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum. *Journal of Earthquake Engineering*, **22**(4), Pages 708-723.
- [16] Building and House Research Center. (2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800*. Tehran, Iran.
- [17] Katsanos, E. I., Sextos, A. G. and Manolis G. D. (2010). Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(4), Pages 157-169.
- [18] Nodehi, F. (2015). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis with respect to Near-Fault Effects*. Master of Science. University of Bojnord, Faculty of Engineering.
- [19] Rahimi, M. (2016). *Bayesian Probabilistic Seismic Hazard Analysis with respect to Near-Fault Effects (Case study: Bojnord)*. Master of Science. University of Bojnord, Faculty of Engineering.
- [20] Yahyaabadi, A. and Nodehi, F. (2015). Probabilistic seismic hazard analysis of Bojnord region by considering near-fault effects. In: *The 6th International Conference on Earthquake & Structures*. City: Kerman, Pages 949-956.

- [21] Rahimi, M., Yahyaabadi, A. (2018). Bayesian probabilistic seismic hazard analysis with respect to near-fault effects. *Asian Journal of Civil Engineering*. Available online at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42107-018-00109-7> [Accessed 30. 12. 2018].
- [22] Ambraseys, N., Douglas, J., Sarma S. K. and Smit, P. M. (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of earthquake engineering*, **3**(1), Pages. 1-53.
- [23] Jayaram, N. and Baker, J. W. (2008). Statistical tests of the joint distribution of spectral acceleration values. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(5), Pages 2231-2243.
- [24] Iran Strong Motion Network Data Bank. (2016, September). Retrieved from <http://www.bhrc.ac.ir>
- [25] PEER ground motion database. (2016, September). Retrieved from <http://ngawest2.berkeley.edu/>
- [26] Akkar, S., Moghimi, S. and Arıcı, Y. (2018). A study on major seismological and fault-site parameters affecting near-fault directivity ground-motion demands for strike-slip faulting for their possible inclusion in seismic design codes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **104**, Pages 88-105.
- [27] Nomani, N. (2016). *Selection of an appropriate ground motion set for time history analysis*. Master of Science, University of Bojnord, Faculty of Engineering.