

بررسی طیف میانگین شرطی جنبش نیرومند زمین در منطقه زاگرس

داریوش شفیعی^۱، مجید معهود^{۲*} و حسین حمزه لو^۳

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

^{۲*} استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

^۳ استاد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴)

چکیده

از طیف میانگین شرطی (CMS) برای انتخاب نگاشت‌های زمین‌لرزه هدف و تحلیل دینامیکی سازه‌ها استفاده می‌شود. این طیف حاوی شکل طیفی میانگین مرتبط با شتاب طیفی هدف $Sa(T^*)$ است. نگاشت‌های زمین‌لرزه‌ای که به شکل طیفی هدف منطبق می‌شوند، نماینده نگاشت‌های زمین‌لرزه‌ای تلقی می‌شوند که به طور طبیعی، مقدار شتاب طیفی هدف آن $Sa(T^*)$ است. در این مقاله، تحلیل خطر زمین‌لرزه و جدایش خطر لرزه‌ای برای استخراج ترکیب‌هایی از بزرگا، فاصله و اپسیلون جنبش زمین (E) بر اساس دوره تناوب طبیعی سازه و دوره بازگشت ۴۷۵ سال در ساختگاه منتخب سد بختیاری انجام شده است. پس از تهیه بانک داده‌های زمین‌لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل بر اساس داده‌های ایران (منطقه زاگرس) و بر مبنای ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی ساختگاه منتخب، دسته‌بندی مناسب بانک داده‌ها بر اساس بزرگا و فاصله انجام شده است. تهیه و ارائه طیف میانگین شرطی حوزه نزدیک گسل برای ساختگاه منتخب سد بختیاری هدف نهایی مقاله است. از آنجاکه برای سازه‌هایی با دوره تناوب کوتاه، انتخاب رابطه همبستگی مناسب می‌تواند تأثیر بسزایی در طیف پاسخ نهایی داشته باشد، برای منطقه مورد مطالعه رابطه همبستگی تجربی منطقه زاگرس به دست آمده است.

مشاهدات نشان داد با افزایش دوره تناوب، اختلاف بین طیف‌های خطر یکنواخت و میانگین شرطی برای سازه‌های مرتفع افزایش می‌یابد و شکل طیف میانگین شرطی به سازه‌های بلند حساس‌تر است. شکل این طیف‌ها وابستگی زیادی به دوره تناوب هدف دارد. این نکته در تحلیل دینامیکی سازه‌هایی با چند درجه آزادی، بیشتر اهمیت دارد. در این سازه‌ها در نظر گرفتن تنها یک دوره تناوب هدف، باعث تولید نتایجی با مقادیر کمتر می‌شود. در طیف میانگین شرطی هرچه دوره تناوب‌ها به هم نزدیک‌تر باشند، همبستگی مقادیر E نیز بیشتر و پراکندگی کمتر خواهد بود. این موضوع به این معنی است که هرچه دو تناوب از هم دورتر باشند، تشابه مقادیر شتاب طیفی در آن دوره تناوب‌ها کمتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: طیف میانگین شرطی، حوزه نزدیک گسل، تحلیل خطر زلزله، زاگرس، ایران

۱ مقدمه

پاسخ سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه هم به خصوصیات سازه و هم به بار ناشی از زمین‌لرزه بستگی دارد. تعیین پارامترهای زمین‌لرزه طرح یکی از مشکل‌ترین و مهم‌ترین مسائل مهندسی زلزله است. جامعه مهندسی و پژوهشگران به مدل‌سازی بار زلزله و ارتعاشات ناشی از آن توجه خاصی دارند. طیف پاسخ یا طیف طرح، پایه کلیه مدل‌سازی‌های بار زلزله در مهندسی زلزله است. طیف پاسخ زلزله که یکی از پرکاربردترین توصیف‌های بار لرزه‌ای است، با پاسخ پیشینه سازه‌ها با تناوب‌های مختلف در یک زمین‌لرزه تعریف می‌شود. از ابتدای پیدایش طیف پاسخ زلزله که توسط محققین مختلف مطرح شد، پژوهش‌های بسیاری درباره مدل‌های مختلف طیف‌ها انجام شد و سرانجام به ارائه طیف طرح منجر شد. از مهم‌ترین کاربردهای طیف طرح، استفاده از آن جهت انتخاب و مقیاس زمین‌لرزه‌ها برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی است. در بیشتر آیین‌نامه‌ها طیف خطر یکنواخت (Uniform Hazard Spectrum, UHS) را طیف طرح هدف پیشنهاد کرده‌اند که شتاب‌های طیفی با مقادیر بیشتر را در تمامی تناوب‌ها تولید می‌کند. طیف میانگین شرطی (Conditional Mean Spectrum) CMS روشی است که به ازای مقادیر محتمل بزرگ (M) ، فاصله (R_{jb}) ، فاصله تا تصویر سطحی گسل) و اپسیلون (ϵ) (تفاوت بین شکل طیفی یک نگاشت و میانگین معادله پیش‌بینی جنبش زمین در دوره تناوب داده‌شده)، شتاب جنبش زمین هدف در یک ساختگاه مفروض برای یک سطح خطر لرزه‌ای مشخص برآورد می‌شود. فرض اصلی در CMS این است که فقط مقدار شتابی که دقیقاً با مقدار شتاب هدف $(S_a \text{ در UHS})$ برابر خواهد شد، در دوره تناوب هدف قرار گرفته است. در حقیقت، CMS مقدار پیشینه‌ای در دوره تناوب هدف دارد و با نزدیک شدن به طیف میانه، در دیگر دوره تناوب‌ها کاهش می‌یابد. روند

کاهش بر اساس یک مدل همبستگی بین مقادیر شتاب طیفی، برای تمام دوره تناوب‌ها است (بیکر و کورنل، ۲۰۰۶).

روش‌های مختلفی برای تهیه طیف‌های شتاب زلزله ارائه شده است. از این روش‌ها می‌توان به مفهوم طیف میانگین شرطی اشاره کرد. بیکر و کورنل (۲۰۰۵) با داشتن مقدار مشخص شتاب طیفی در یک دوره تناوب و مقدار بزرگ، فاصله ϵ (به‌دست آمده از تفکیک خطر لرزه‌ای) متناظر آن شتاب طیفی روشی را برای به‌دست آوردن طیف پاسخ شرطی یک زمین‌لرزه ارائه کردند. طیف میانگین شرطی، مقدار میانگین طیف پاسخ را در تمامی تناوب‌ها به شرط وقوع شتاب طیفی خاص در تناوب دلخواه تعیین می‌کند. این تناوب معمولاً برابر با تناوب مد اول ارتعاش سازه فرض می‌شود. با این روش، طیف میانگین شرطی سازه‌ها با تناوب مد اول ارتعاش‌های مختلف، متفاوت از هم خواهد بود. طیف‌های زلزله در روش‌های دیگر به سازه مورد مطالعه بستگی نداشتند، ولی در این روش طیف به‌دست آمده رابطه‌ای قوی با مشخصات دینامیکی سازه تحلیل‌شونده دارد. نتایج نشان می‌دهد طیف میانگین شرطی می‌تواند طیف هدف مناسب‌تری برای انتخاب زمین‌لرزه‌ها باشد.

از مطالعات انجام‌شده در این حوزه می‌توان به مطالعه طیف، اپسیلون و انتخاب نگاشت بیکر و کورنل (۲۰۰۶) اشاره کرد. برای تخمین پاسخ سازه در یک شدت زلزله خاص انتخاب نگاشت‌های مناسب ضروری است. بیکر و کورنل (۲۰۰۶) دریافتند انتخاب نگاشت بر اساس پارامتر اپسیلون خیلی مؤثرتر از انتخاب بر اساس بزرگ و فاصله است و نگاشت‌های انتخاب‌شده باید شکل طیفی شبیه به طیف میانگین شرطی داشته باشند. در آن پژوهش مقادیر ϵ برای هر نگاشت در محدوده‌ای از دوره تناوب‌هایی محاسبه شد که برای مدل پیش‌بینی جنبش زمین

نگاشت‌های انتخاب‌شده از طیف میانگین شرطی تعیین شده است، ممکن است برای برخی پاسخ‌ها غیرمحافظة کارانه باشد.

در این مقاله، ابتدا طیف خطر یکنواخت و طیف میانگین تخمینی با استفاده از نتایج تحلیل خطر و تفکیک خطر لرزه‌ای و استفاده از دو مدل کاهندگی برای منطقه محاسبه می‌شود. نتایج تحلیل خطر، شتاب طیفی هدف و نتایج تفکیک خطر، بزرگا، فاصله و اپسیلون میانگین را تعیین می‌کند. سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بیکر (۲۰۱۱) و همچنین ضرایب همبستگی بین دوره تناوب مورد نظر و سایر تناوب‌ها، شتاب طیفی در سایر تناوب‌ها محاسبه و طیف میانگین شرطی برای دوره تناوب هدف تعیین می‌شود و نتایج با هم مقایسه می‌شوند. نتایج بیانگر این است که در کلیه حالات، طیف‌های میانگین شرطی نسبت به طیف خطر یکنواخت، شتاب طیفی کمتری دارند و تغییر طیف هدف از طیف خطر یکنواخت به طیف میانگین شرطی، برای سازه بیشترین تأثیر را داشته است.

تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA)، جنبش‌های زمین حاصل از تمام زمین لرزه‌ها با تمام بزرگای ممکن و در تمام فواصل مؤثر از ساختمان را با توجه به فراوانی رخدادشان، در قالب یک احتمال می‌گنجاند.

در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی، زمین لرزه طراحی را با دقت نمی‌توان تعیین کرد. این روش تحلیل خطر، هیچ زمین لرزه خاصی را پیشنهاد نمی‌کند که بیانگر زمین لرزه طراحی در سطحی مفروض باشد. به عبارت دیگر، نرخ فزونی میانگین سالانه در یک ساختمان خاص، با بزرگا یا فاصله چشمه تا ساختمان خاص مرتبط نمی‌شود؛ بنابراین برای آنکه بتوان نشان داد چه رخدادهایی در سطح خطر مورد نظر ساختمان غلبه دارند، لازم است جدایش بزرگا و مسافت میانگین در خطر لرزه‌ای انجام شود. فرایند جدایش، ترکیب‌هایی از بزرگا (M)، فاصله چشمه تا ساختمان (R_{jb}) و مقدار ε جنبش زمین را استخراج می‌کند

آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) استفاده شده بود. بیکر (۲۰۱۱) با معرفی روش‌های تهیه طیف میانگین شرطی برای طیف هدف، طیف میانگین شرطی را ابزاری برای انتخاب جنبش نیرومند زمین معرفی می‌کند. برای یافتن نگاشت‌های متناظر با طیف میانگین شرطی، ابتدا یک محدوده دوره تناوب برای تشخیص مطابقت طیف معرفی می‌شود که این محدوده باید شامل دوره تناوب‌هایی باشد که پاسخ سازه در آن دوره تناوب‌ها مهم محسوب می‌شود. همچنین دو روش برای مقیاس کردن طیف پاسخ نگاشت‌ها به طیف میانگین شرطی بررسی و دلایل محافظة کار بودن طیف خطر یکنواخت مطرح و معیار مناسبی برای اندازه‌گیری میزان تشابه بین یک نگاشت و طیف میانگین شرطی ارائه شده است. نام این معیار (Sum of Squared Errors) SSE است که به معنای مجموع مربعات اختلافات بین لگاریتم طیف پاسخ نگاشت‌ها و لگاریتم طیف هدف است.

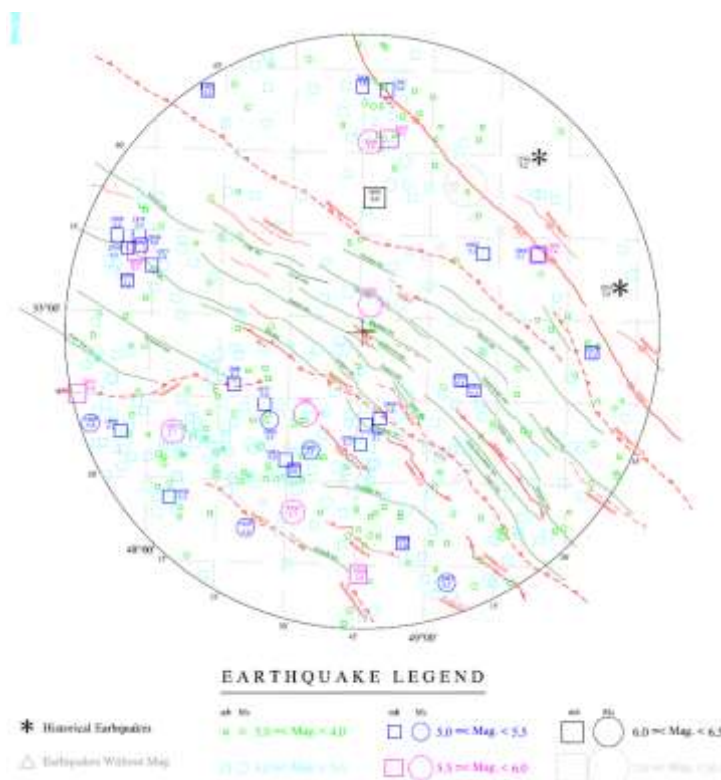
در گزارش هاسلتون (۲۰۱۲) در زمینه انتخاب و مقیاس کردن جنبش نیرومند زمین برای تحلیل عملکردی تاریخچه پاسخ، تعریف طیف هدف برای طراحی لرزه‌ای و ارزیابی عملکردی، تشابه طیف پاسخ و حرکات نزدیک گسل در مؤسسه NIST انجام شده است. در این تحقیق با مقایسه UHS و CMS نتیجه گرفته شده است که UHS یک طیف محافظة کارانه است و برای جنبش‌های بزرگ، CMS طیف مناسب‌تری است. در این گزارش با بررسی نگاشت‌های مناطق نزدیک گسل برای تبدیل به طیف هدف نتیجه شده است پالس سرعت به‌ویژه در نواحی واقع در جهت گسیختگی گسل (forward directivity) عامل مهمی در انتخاب دقیق‌تر جنبش نیرومند زمین است.

ونگ و همکاران (۲۰۱۷) طیف میانگین شرطی تعمیم‌یافته و عملکرد آن را برای ارزیابی بر مبنای شدت معرفی کردند. شدتی که از تحلیل تاریخچه پاسخ با

(ترجیحاً ناحیه زاگرس) که در حوزه نزدیک به ثبت رسیده یا در حوزه گسل نزدیک ایجاد شده‌اند، چگونگی تهیه طیف میانگین شرطی به‌عنوان طیف پاسخ هدف زمین‌لرزه طراحی ارائه خواهد شد.

برای بررسی اثر ضرایب همبستگی جدید بر طیف CMS، که در ادامه بررسی خواهد شد، سازه بزرگ ملی و مهم کشور یعنی سد بختیاری در منطقه شمال زاگرس انتخاب شده است. این سد قوسی در دست ساخت روی رودخانه بختیاری، از سرشاخه‌های رود دز، در رشته‌کوه زاگرس در ۸۰ کیلومتری جنوب شرقی خرم‌آباد و ۵۰ کیلومتری بالادست سد دز و در محدوده جغرافیایی شهرستان الیگودرز در استان لرستان قرار دارد (شکل ۱).

که در کل خطر در یک دوره بازگشت معین مشارکت دارند. مقدار ε نمایش‌دهنده انحراف معیاری است که از اختلاف پارامتر جنبش زمین مشاهده‌شده از میانگین پارامتر جنبش زمین پیش‌بینی‌شده از رابطه کاهندگی به‌دست می‌آید. جدایش خطر لرزه‌ای، زمین‌لرزه طراحی را از هر دو مقدار میانگین یا معین M و R به‌تنهایی یا به همراه ε به تصویر می‌کشد. هدف از جدایش لرزه‌ای، تخمین میزان مشارکت چشمه‌های زمین‌لرزه‌ای در خطر کل لرزه‌ای در دوره تناوب‌های سازه‌ای متعدد در ساختگاه مورد مطالعه است. در تحقیق حاضر، بر مبنای مطالعات PSHA و نتایج جدایش خطر لرزه‌ای با استفاده از جنبش‌های زمین واقعی و شبیه‌سازی‌شده در ایران



شکل ۱. موقعیت سد بختیاری به همراه زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی ثبت‌شده و موقعیت گسل‌های منطقه.

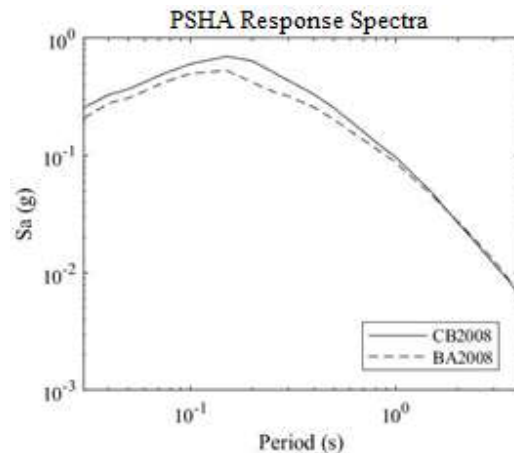
سال با استفاده از دو رابطه کاهندگی کمپل-بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) و CB2008 (۲۰۰۸) و بور-آتکینسون (۲۰۰۸) در BA2008 در شکل ۲ رسم شده است.

تحلیل خطر و جدایش خطر لرزه‌ای برای این سد با استفاده از برنامه EZ-frisk-3 انجام و شتاب‌های طیفی حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی برای دوره بازگشت ۴۷۵

مشخصات دینامیکی سازه، دوره تناوب اصلی مُد اول آن برابر ۱ ثانیه به دست آمده است. این دوره تناوب مبنای محاسبات آتی طیف احتمال شرطی است. در شکل ۳ و جدول ۱ اطلاعات حاصل از جدایش لرزه‌ای این سازه در ساختمانگاه زاگرس آورده شده است.

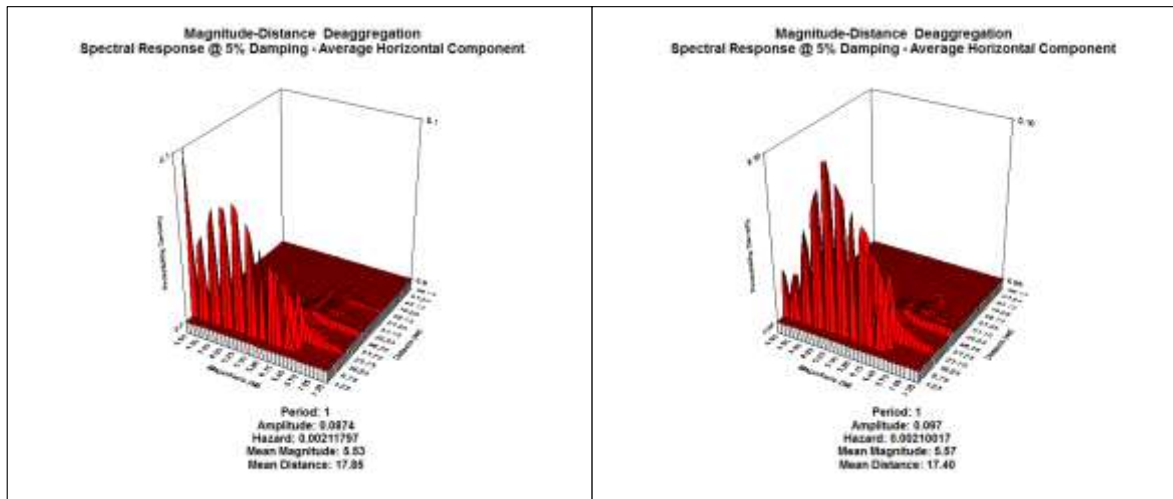
جدول ۱. اطلاعات حاصل از جدایش لرزه‌ای سد بختیاری در منطقه زاگرس.

GMMs	BA2008	CB2008
Sa(T=۱s) (g)	۰/۰۸۷	۰/۰۹۷
Mean Magnitude	۵/۵۳	۵/۵۷
Mean Distance (km)	۱۷/۸۵	۱۷/۴
Mean Epsilon	۰/۶۹	۰/۷۴



شکل ۲. شتاب‌های طیفی حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال.

تحلیل جدایش لرزه‌ای بر اساس دو رابطه کاهندگی CB2008 و BA2008 انجام شده است. این دو رابطه با داده‌های منطقه همخوانی خوبی نشان می‌دهند. با توجه به



شکل ۳. جدایش لرزه‌ای حاصل از تحلیل خطر زمین‌لرزه ساختمانگاه سد بختیاری به روش احتمالاتی با استفاده از روابط کاهندگی CB2008 (راست) و BA2008 (چپ).

زمین انتخاب شده با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (بیکر، ۲۰۱۱):

$$\rho(\varepsilon(T_{min}), \varepsilon(T_{max})) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\varepsilon(T_{min})^i - \mu_{\varepsilon(T_{min})}}{\sigma_{\varepsilon(T_{min})}} \right) \left(\frac{\varepsilon(T_{max})^i - \mu_{\varepsilon(T_{max})}}{\sigma_{\varepsilon(T_{max})}} \right) \quad (1)$$

متغیرهای رابطه (۱) عبارت‌اند از:

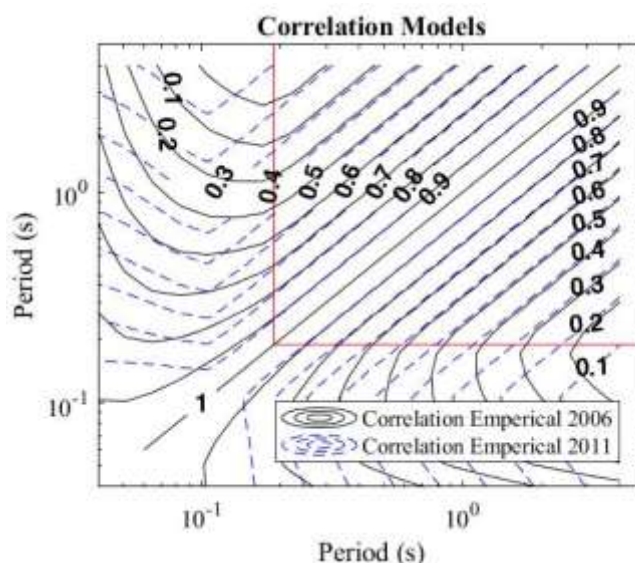
۲ ضریب همبستگی

ضریب همبستگی یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر تصادفی است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت نبود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. مقدار همبستگی بین دو مقدار $\varepsilon(T_1)$ و $\varepsilon(T_2)$ برای مجموعه جنبش‌های

مقدار همبستگی آنها محاسبه می‌شود. به دلیل انتخاب نگاهت‌های منطقه شمال زاگرس (شکل ۱)، این ضرایب همبستگی دیگر حالت کلی ندارند و مختص این منطقه هستند؛ از این رو اختلاف این ضرایب تجربی به دست آمده با روابط ارائه شده مقایسه و با معرفی ثابت‌های جدید، از خطای این روابط کاسته می‌شود. از روابط پرکاربرد می‌توان به روابط بیکر و کورنل (۲۰۰۶) و بیکر و جایارام (۲۰۰۸) اشاره کرد. با ترسیم این دو رابطه در مقیاس لگاریتمی (شکل ۴)، مشخص می‌شود از دوره تناوب حدود ۰/۱۸۹ تا ۰/۲ ثانیه به بعد (خطوط قرمز رنگ) رفتار ضریب همبستگی خطی است و در دوره تناوب‌های کوتاه، مقدار پراکندگی آن زیاد می‌شود و سریع تغییر می‌کند؛ بنابراین برای سازه‌هایی با دوره تناوب کوتاه، انتخاب رابطه همبستگی می‌تواند تأثیر بسزایی در طیف پاسخ نهایی داشته باشد.

ضریب همبستگی ε در دو دوره تناوب؛	$\rho(\varepsilon(T_{min}), \varepsilon(T_{max}))$
دوره تناوب بیشینه و کمینه؛	T_{min} و T_{max}
تعداد جنبش‌های بررسی شده؛	N
مقدار ε برای دوره تناوب کمینه و بیشینه جنبش i ام؛	$\varepsilon(T_{max})_i$ و $\varepsilon(T_{min})_i$
مقدار میانگین ε برای دوره تناوب کمینه و بیشینه تمام جنبش‌ها؛	$\mu_{\varepsilon(T_{max})}$ و $\mu_{\varepsilon(T_{min})}$
مقدار انحراف معیار ε برای دوره تناوب کمینه و بیشینه تمام جنبش‌ها.	$\sigma_{\varepsilon(T_{max})}$ و $\sigma_{\varepsilon(T_{min})}$

بنابراین برای تمام جنبش‌های زمین، در ابتدا مقدار ε برای دوره تناوب‌های مختلف محاسبه و با استفاده از رابطه (۱)



شکل ۴. مقایسه روابط بیکر و کورنل (۲۰۰۶) و بیکر و جایارام (۲۰۰۸) برای دوره تناوب‌های مختلف.

۳ نتایج و بحث

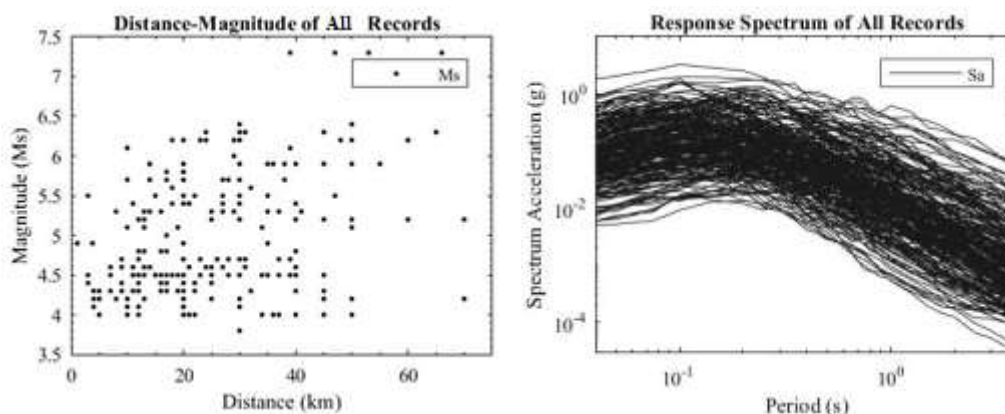
۳-۱ ضرایب همبستگی تجربی منطقه زاگرس

بانک داده از ۲۴۱ جنبش زمین اختصاصی منطقه زاگرس از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در شرایط ساختمانی سنگ بستر تشکیل شده است و طیف‌های پاسخ پس از

تصحیحات لازم و پردازش شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه شده‌اند. مشخصات نگاهت‌های انتخابی در جدول ۲ آورده شده است. همچنین توزیع بزرگا-فاصله و طیف پاسخ این جنبش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات نگاشت‌های انتخابی.

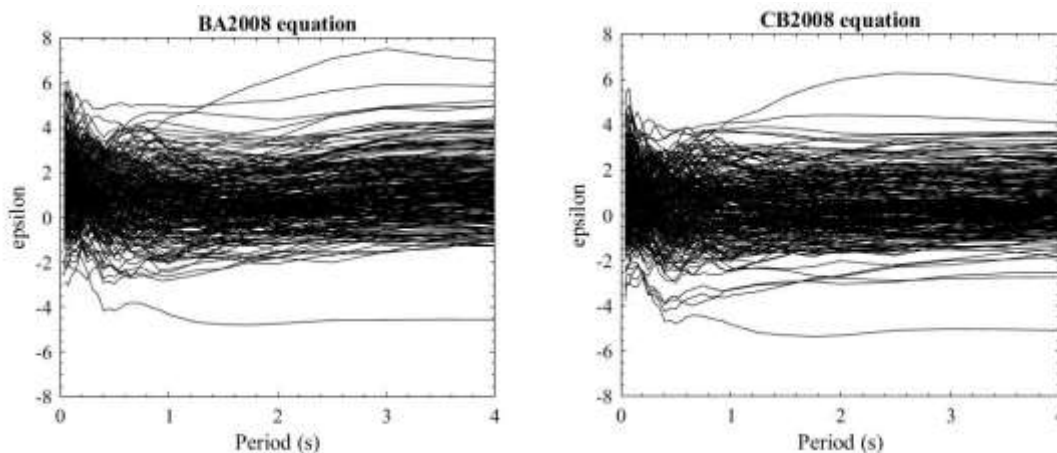
Parameter	Range
R (km)	۷۰~۱/۱
Fd (km)	۵۰~۶
Ms	۷/۳~۳/۸
Vs (m/s)	۱۵۰۰~۲۸۱
Date	۲۰۱۸~۱۹۸۵



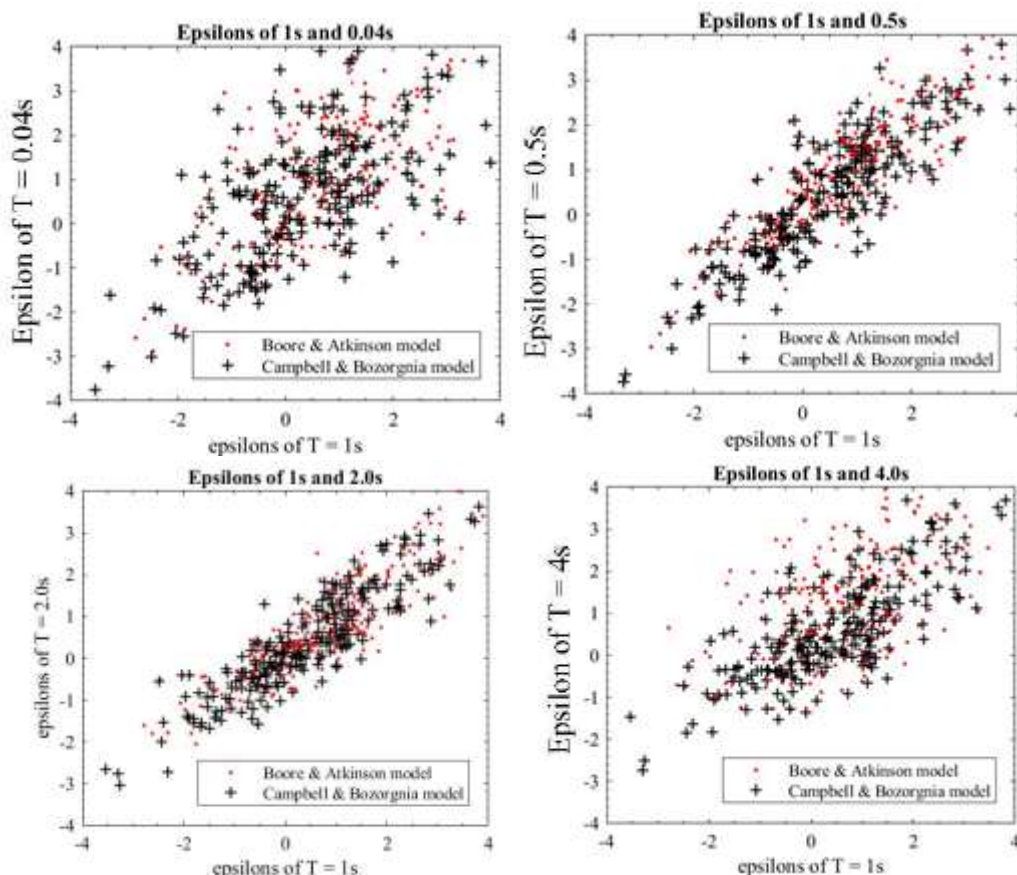
شکل ۵. طیف پاسخ (سمت راست) و توزیع بزرگا-فاصله (سمت چپ) شتاب‌نگاشت‌های انتخابی.

پارامتر در دوره تناوب‌های مختلف برای کلیه جنبش‌ها سنجیده می‌شود؛ برای نمونه در شکل ۷ میزان همبستگی ϵ در دوره تناوب اصلی سازه ($T^* = 1$) در مقایسه با دوره تناوب‌های ۰/۴، ۰/۵، ۲ و ۴ ثانیه مقایسه شده است.

با استفاده از دو رابطه BA2008 و CB2008 پارامتر ϵ برای دوره تناوب‌های مختلف این دسته نگاشت‌ها محاسبه شد (شکل ۶). با محاسبه مقدار پارامتر ϵ برای دوره تناوب‌های متفاوت، طیف پاسخ تمام داده‌های جنبش زمین با استفاده از رابطه ضریب همبستگی و میزان همبستگی این



شکل ۶. محاسبه پارامتر ϵ برای دوره تناوب‌های مختلف بر اساس روابط BA2008 و CB2008



شکل ۷. مقایسه میزان همبستگی ϵ در دوره تناوب اصلی سازه مورد بررسی ($T^* = 1$) و دوره تناوب‌های ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۵ و ۴ ثانیه.

مختلف می‌توان ضرایب معرفی‌شده در روابط گذشته را اصلاح کرد. یک روش مؤثر برای انتخاب بهترین ضرایب، تغییر ضرایب به صورت افزایشی از صفر و محاسبه مقدار مربع خطای رابطه زیر با ضرایب جدید است (بیکر، ۲۰۱۱):

$$\rho(\epsilon(T_{min}), \epsilon(T_{max}), C_1, C_2, C_3) = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \left(C_1 + C_2 I_{(T_{min} < 0.189)} \ln \frac{T_{min}}{C_3}\right) \ln \frac{T_{max}}{T_{min}}\right) \quad (2)$$

با تغییر ضرایب C_1 ، C_2 ، C_3 مقدار مربع خطا (SSE) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (بیکر، ۲۰۱۱):

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left(\rho(\epsilon(T_{min}), \epsilon(T_{max}), C_1, C_2, C_3) - \rho(\epsilon(T_{min}), \epsilon(T_{max}))_{Zagros} \right)^2 \quad (3)$$

برای هر مجموعه ترکیبی از C_1 ، C_2 و C_3 که مقدار خطای

بر اساس داده‌های ثبت‌شده و بانک اطلاعاتی، بازه تغییرات ϵ بین ۲- و ۳+ است که میانگین آن حدود ۰/۷ است (شکل ۷). در مطالعات پیشین مانند بیکر (۲۰۱۱) بازه تغییرات از ۴- تا ۴+ است. از ویژگی‌های نگاهت‌های ثبت‌شده، گستردگی این مقادیر است و به همین دلیل با استفاده از بانک داده‌های کامل‌تر، مقادیر میانگین وزن بیشتری پیدا می‌کنند. استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده، به دلیل تولید نگاهت‌هایی با خصوصیات مشابه، باعث کاهش بازه تغییرات ϵ می‌شود که این موضوع استفاده از داده‌های شبیه‌سازی را نامناسب می‌سازد.

۲-۳ اصلاح رابطه ضرایب همبستگی

با به‌دست آمدن همبستگی اپسیلون‌ها در دوره تناوب‌های

رابطه (۳) را کمینه کند، مقدار این ضرایب به عنوان ثابت‌های جدید معرفی می‌شود (جدول ۳). در شکل ۸ میزان همبستگی با ضرایب اصلاح شده ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که دو رابطه کاهندگی انتخاب شده، تأثیر کمی بر مقادیر همبستگی ایجاد شده ناشی از جنبش‌های زمین دارند.

جدول ۳. ضرایب جدید محاسبه شده بر اساس داده‌های منطقه مورد مطالعه.

Coeff	BA2008	CB2008
C_1	۰/۱۸۵	۰/۱۶۵
C_2	۰/۰۷	۰/۰۷
C_3	۰/۱۱	۰/۰۸۱

۳-۳ تأثیر ضرایب همبستگی بر طیف پاسخ شرطی

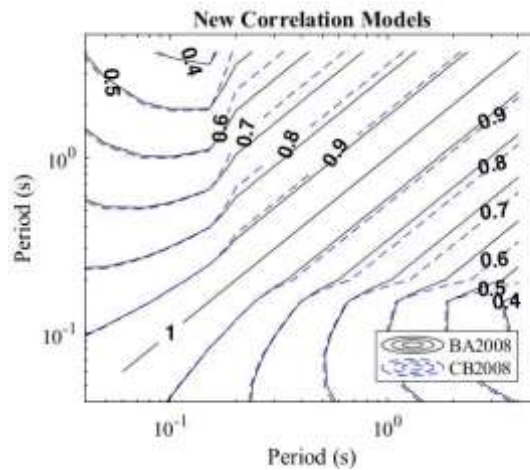
با اصلاح ضرایب ثابت رابطه همبستگی ϵ بین دوره تناوب‌ها، میانگین طیف میانگین شرطی CMS اصلاح شده با استفاده از این رابطه جدید به صورت زیر محاسبه می‌شود (بیکر، ۲۰۱۱):

$$\mu_{\ln Sa(T_i) | \ln Sa(T^*)} = \mu_{\ln Sa}(M, R, T_i) + \rho(T_i, T^*) \epsilon(T^*) \sigma_{\ln Sa}(T_i) \quad (۴)$$

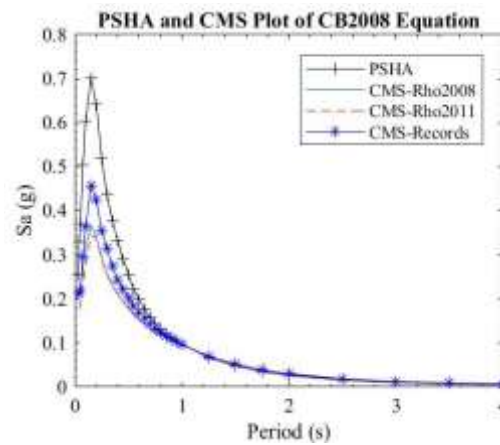
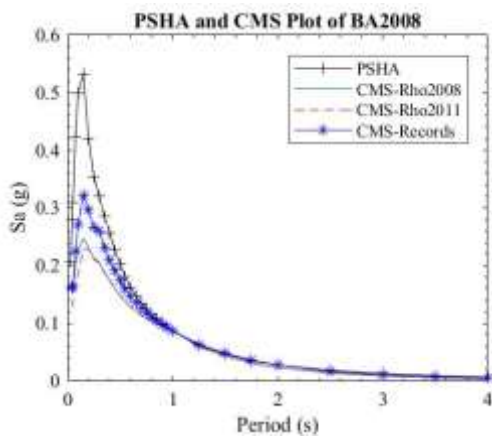
همچنین میزان انحراف معیار این طیف پاسخ عبارت است از:

$$(۵)$$

$\sigma_{\ln Sa(T_i) | \ln Sa(T^*)} = \sigma_{\ln Sa}(T_i) \sqrt{1 - \rho^2(T_i, T^*)}$
 در شکل ۹ طیف پاسخ حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی (PSHA) و طیف میانگین شرطی (CMS) به کمک نرم‌افزار EZ-FRISK-3 ترسیم شده است. همان‌طور که مشخص است با استفاده از ضرایب اصلاح شده، طیف پاسخ در دوره تناوب کمتر، عدد بزرگ‌تری را نسبت به رابطه کلی ارائه شده قبلی نشان می‌دهد. این اعداد بزرگ‌تر از نظر اقتصادی و هزینه‌های مورد نیاز تأیید نمی‌شوند.



شکل ۸. میزان همبستگی با ضرایب اصلاح شده.



شکل ۹. مقایسه طیف پاسخ حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی (PSHA) و طیف میانگین شرطی (CMS) بر اساس رابطه تجربی بیکر و جایارام (۲۰۰۸)، بیکر (۲۰۱۱) و داده‌های ثبت شده.

۴ نتیجه‌گیری

برای تحلیل دینامیکی و طراحی سازه‌ها نیاز به تخمین جنبش زمین به‌عنوان بار وارده بر سازه است. پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند از آنجاکه طیف پاسخ احتمالاتی یکنواخت (UHS) میزان نرخ خطر چشمه‌های لرزه‌زا را در تمام تناوب‌ها جمع می‌کند، انتخاب آن محافظه‌کارانه است و جنبش‌های طبیعی کمتر، در تمام دوره تناوب‌ها شتاب طیفی زیادی نشان می‌دهند. راه‌حل برطرف کردن این مسئله استفاده از طیف شرطی میانگین است. در طیف شرطی میانگین، دوره تناوب اصلی سازه مبنای محاسبات است و شتاب طیفی متناظر با آن از طیف خطر یکنواخت تعیین می‌شود. با داشتن شتاب طیفی در این دوره تناوب، به دانستن میزان همبستگی شتاب طیفی در دوره تناوب - های دیگر نیاز است تا بتوان به کمک آن، میزان شتاب طیفی را در آن دوره تناوب‌ها تخمین زد. پارامتر E میزان انحراف معیاری است که شتاب طیفی هر جنبش زمین از میانگین شتاب طیفی ناشی از رابطه کاهندگی دارد. این پارامتر برای مجموعه‌ای از جنبش‌ها محاسبه و همبستگی این پارامتر در دوره تناوب‌های مختلف تعیین می‌شود.

در این تحقیق مجموعه‌ای از جنبش‌های زمین مختص منطقه شمال زاگرس گردآوری و مقادیر E و همبستگی آنها محاسبه شده است. با توجه به روابط گذشته، همبستگی ناشی از این جنبش‌ها بیش از مقادیر ارائه‌شده در روابط تجربی است. این افزایش همبستگی به این معناست که اگر برای مثال شتاب طیفی در دوره تناوب یک ثانیه زیاد است، در بقیه دوره تناوب‌ها نیز شتاب طیفی زیاد است؛ بنابراین طیف احتمال شرطی حاصل از این همبستگی زیاد نیز مقادیر بیشتری دارد. این افزایش شتاب طیفی به‌طور مستقیم در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های متناظر با طیف میانگین شرطی اثرگذار است و به‌خصوص در دوره تناوب‌های کوچک‌تر اثرگذاری آن بیشتر است. برای سازه‌هایی با دوره تناوب کوتاه، انتخاب رابطه

همبستگی می‌تواند تأثیر بسزایی در طیف پاسخ نهایی داشته باشد. کاربرد دو رابطه کاهندگی نشان می‌دهد انتخاب رابطه کاهندگی تأثیر کمی بر مقدار همبستگی‌های ایجادشده ناشی از جنبش‌های زمین دارد. اثر ساختگاه نیز می‌تواند باعث افزایش مقادیر شتاب‌های طیفی شود که در این مقاله شرایط ساختگاهی سنگی لحاظ شده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل حمایت از این پژوهش و پشتیبانی نرم‌افزاری تشکر و قدردانی می‌کنند. در زمان تهیه این مقاله، استاد دکتر حسین حمزه‌لو دار فانی را وداع گفتند. یاد و خاطره ایشان همیشه زنده است.

منابع

- Abrahamson, N. A., and Silva, W. J., 2008, Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations: Earthquake Spectra, **24**(1), 67-97.
- Baker, J. W., and Cornell, C. A., 2005, A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **34**(10), 1193-1217.
- Baker, J. W., and Cornell, C. A., 2006, Spectral shape, epsilon and record selection: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **35**(9), 1077-1095.
- Baker, J. W., and Jayaram, N., 2008, Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models: Earthquake Spectra, **24**(1), 299-317.
- Baker, J. W., 2011, Conditional mean spectrum: Tool for ground motion selection: Journal of Structural Engineering, **137**(3), 322-331.
- Boor, D. M., and Atkinson, G. M., 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0 s: Earthquake Spectra, **24**(1), 99-138.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion model for the geometric mean

horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 139-171.

Haselton, C. B., 2012, Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses: Report, National

Institute of Standards and Technology (NIST-GCR-11-917-15).

Kwong, N. S., and Chopra, A. K., 2017, A generalized conditional mean spectrum and its application for intensity-based assessments of seismic demands: *Earthquake Spectra*, **33**(1), 123-143.

Estimation of conditional mean spectrum of ground motion in Zagros, Iran

Darius Shafiei¹, Majid Mahood^{2*} and Hosein Hamzeloo²

¹ Ph.D. student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

² Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 15 July 2021, Accepted: 26 September 2021)

Summary

Selection of ground motion time series provides a critical link between site-specific probabilistic seismic hazard analysis and dynamic seismic response analysis to quantify the seismic performance of a system of interest. The conditional mean spectrum can be used for selecting the target earthquake records and dynamic analysis of structures. The conditional mean spectrum gives the mean spectral form associated with the spectral acceleration of the target $S_a(T^*)$, so that the seismic records that match the target spectral shape can be considered as the representative of the seismic target records of the spectrum $S_a(T^*)$. In this paper, in order to extract the combinations of magnitude, distance and epsilon of the earth's movements, seismic hazard analysis and deaggregation in the selected site of Bakhtiari Dam has been done based on the natural period of the structure and the return period of 475 years. After preparing the seismic data bank and near-fault data using Iran's data (Zagros region) and regarding the seismic characteristics of the selected site, appropriate classification of the database based on the magnitude and distance has been done. The ultimate goal of this article is to prepare and present the conditional mean spectrum of the area near the fault for the selected structure of Bakhtiari Dam. For structures with short rotation times, the correlation relationship can have a significant effect on the final response spectrum.

The results indicate that by selecting high periods as the target period, the difference between the uniform risk spectrum and the conditional mean spectrum increases, so the shape of the conditional mean spectrum is more sensitive to tall structures. In fact, the shape of these spectra is highly dependent on the target period. This point is more important in the dynamic analysis of structures with several degrees of freedom because in these structures, considering only one period of target rotation gives rise to downstream results. In the conditional mean spectrum, the closer the two cycles to each other, the higher the correlation of the epsilon values and the less scatter. This means that the farther apart the two rotations are, the less similar the spectral acceleration values are to each other.

We know three methods by which ground motions can be selected for dynamic seismic response analysis of engineered system when the underlying seismic hazard is quantified via ground motion simulation rather than empirical ground motion prediction equations. Even with simulation-based seismic hazard, a ground motion selection process is still required in order to extract a small number of time series from the much larger set developed as part of the hazard calculation

Keywords: Ground motion selection, seismic hazard analysis, Zagros

*Corresponding author:

m.mahood@iiees.ac.ir