

روش سه مرحله‌ای انتخاب شتابنگاشت‌های زلزله برای تحلیل دینامیکی سازه‌ها

فرهاد بهنام‌فر^{۱*}، محمد نورائی^۲، مهدی طالبی ولنی^۳

^۱دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲کارشناس ارشد مهندسی زلزله، اصفهان، ایران

^۳کارشناس ارشد مهندسی سازه، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ آذر ۱۳۹۲
بازنگری: ۱۸ مرداد ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۹ مهر ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۰ بهمن ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

انتخاب حرکات زمین
تحلیل تاریخچه زمانی
پراکنندگی پاسخ‌ها
روند غربال‌گری
سازه‌ها

چکیده: تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی سازه‌ها با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله، روشی مرسوم در تحقیق‌های مهندسی زلزله و نیز در طراحی سازه‌های مهم است. امروزه بر اساس آیین‌نامه‌های زلزله، لازم است تا در وهله اول شتابنگاشت‌ها سازگار باشند و سپس به مقیاس درآیند. به منظور سازگاری شتابنگاشت‌ها، معیارهایی مانند مشابهت‌ساز و کار کانونی و بزرگا، فاصله‌های مشابه از مرکز زلزله و بالاخره یکسان‌بودن نوع خاک محل ثبت زلزله عنوان شده است. در این مقاله، یک روند غربالگری سه‌مرحله‌ای ارائه شده است که توسط آن، تعداد ثبت رکوردهای منتخب به سرعت کاهش داده خواهند شد. رکوردهای نهایی از لحاظ معیارهای ارائه‌شده، مناسب‌ترین شتابنگاشت‌ها برای سازه مورد نظر هستند. استفاده از این روش نسبت به روش‌های موجود، به کاهش بیشتر پراکنندگی پاسخ‌های تحلیل غیرخطی سازه منجر خواهد شد و با کاهش پراکنندگی نیز میزان اعتماد به ایمنی سازه طراحی شده بیشتر خواهد شد.

۱- مقدمه

دینامیکی منطقی نبوده و برآیندی (میانگین، فوق‌میانگین و غیره) از نتایج تحلیل تحت چندین شتابنگاشت باید مورد توجه قرار گیرد. برای این کار، ممکن است که استفاده از زلزله‌های بوقوع‌پیوسته در همان منطقه، بهترین عمل باشد. اما معمولاً تعداد کافی از این رکوردها در هر منطقه موجود نیست. در استفاده از رکوردهای مناطق مشابه برای محل مورد نظر نیز باید توجه نمود که این زلزله‌ها دارای دوره‌های بازگشت (احتمال فراگذشت) مختلفی هستند که با دوره بازگشت مورد نظر برای طراحی سازه متفاوت است. در این صورت، استفاده مستقیم از چنین رکوردهایی منجر به پراکنندگی بسیار زیاد در نتایج تحلیل دینامیکی سازه می‌شود و تفسیر نتایج و میزان اعتماد به سازه طراحی‌شده و نیز ایمنی آن را بسیار کاهش خواهد داد.

آیین‌نامه‌های زلزله، معیارهای کلی برای انتخاب زلزله‌های مناسب را ارائه می‌دهند. این معیارها برای رفع نگرانی‌های فوق کافی نیستند و مشکل موجود را حل نخواهند کرد. به عنوان نمونه، استاندارد [۱] ۲۸۰۰ و یا آیین‌نامه ASCE7 10 [۲] بیان می‌کنند که شتابنگاشت‌های زلزله باید از لحاظ خاک محل، فاصله کانونی، بزرگا و سازوکار گسلی مشابه باشند. استفاده از این معیارها در بانک‌های اطلاعاتی بزرگ زمین‌لرزه‌ها (مانند NGA در PEER [۳])، منجر به صدها و گاهی چند هزار رکورد زلزله می‌شود که بکارگیری آن‌ها برای هر پروژه غیرعملی است. این موضوع، نشان‌دهنده اهمیت و ضرورت ارائه معیارهای تکمیلی برای انتخاب شتابنگاشت‌های

بروز زلزله‌های بزرگ سبب می‌شود تا سازه‌ها وارد ناحیه غیرخطی شوند. در این شرایط، استفاده از تحلیل‌هایی مانند استاتیکی معادل یا طیفی نمی‌تواند بیان‌کننده رفتار دقیق سازه‌ها باشد. دقیق‌ترین روش تحلیلی موجود در شرایط حاضر، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی^۱ با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله است که شامل محاسبه لحظه به لحظه بازتاب‌های ساختمان تحت تأثیر شتابنگاشت‌های واقعی یک زلزله است. میزان دقت نتایج یک تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به عوامل متعددی بستگی دارد که یکی از مهمترین آن عوامل، چگونگی انتخاب حرکات زمین برای تحلیل است. یک شتابنگاشت مناسب ضمن سازگاری با ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه، باید بتواند بیشترین تأثیر را بر سازه مورد نظر داشته باشد؛ در غیر این صورت، ممکن است تا تصویر نادرستی از واکنش‌های سازه ارائه دهد و یا اصولاً منجر به واکنش مهمی در سازه نشود. از سویی دیگر، شتابنگاشت یک نوع بارگذاری است که در گذشته به وقوع پیوسته و هرگز عیناً تکرار نخواهد شد. بنابراین، استفاده از یک شتابنگاشت به تنهایی برای تحلیل

^۱ Time history dynamic analysis

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir

شاخص شدت Sd_i ، شاخصی است که مبنای آن تنها طیف پاسخ غیرارتجاعی است. نحوه انتخاب حرکت‌های زمین مناسب بر اساس شاخص‌های شدت پیشرفته، به این صورت بوده که پس از محاسبه IM ها، رکوردهایی که دارای IM نزدیک‌تری به مقدار میانگین IM های محاسبه‌شده هستند، برای انتخاب شدن از IM هایی که فاصله بیشتری از میانگین دارند، در اولویت قرار خواهند گرفت. زیرا انتخاب این رکوردها و حذف رکوردهای با فاصله بیشتر از میانگین، انحراف استاندارد را کاهش خواهد داد [۵].

در ارتباط با نرم‌افزار نیز برنامه‌هایی برای انجام انتخاب و مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها موجود است. روش سنجش میانگین انحراف طیفی، روش پایه نرم‌افزار REXEL-DISP بوده که توسط شبکه‌ای از دانشکده‌های مهندسی زلزله در کشور ایتالیا پشتیبانی می‌شود و با هدف انتخاب و مقیاس کردن حرکت‌های زمین در سه مرحله تعریف طیف هدف، جستجوی رکوردها و تطبیق طیفی توسعه داده شده است [۶].

طیف‌های هدف بکار برده‌شده در نرم‌افزار بر مبنای طیف آیین‌نامه اروپا^۶ یا آیین‌نامه ساختمانی کشور ایتالیا^۷ (NIBC) است. روش دیگری موسوم به سازگاری طیفی روش مبنای عمل در نرم‌افزار ارائه‌شده توسط مرکز اطلاعات حرکت‌های قوی زمین^۸ (ISESD) است [۷]. هدف از این روش، یافتن شتابنگاشت‌هایی است که به طور مناسبی با طیف‌های طراحی آیین‌نامه‌ای تطابق داشته باشند. به این منظور، از معیار کمترین انحراف از یک طیف هدف استفاده خواهد شد.

در این مقاله، در ابتدا مهم‌ترین روش‌های موجود انتخاب حرکت زمین تشریح می‌شوند. سپس این روش‌ها به منظور اهداف این تحقیق از ساده تا پیچیده دسته‌بندی می‌شوند. بر این اساس، یک فرایند سه‌مرحله‌ای غربالگری برای انتخاب شتابنگاشت‌های زلزله ارائه خواهد شد که طی آن، تعداد رکوردهای انتخاب‌شده مرتباً کمتر می‌شود تا رکوردهای مناسب برای تحلیل دینامیکی سازه مورد نظر طبق یک روال منطقی بدست آیند.

۲- روش‌های موجود برای انتخاب شتابنگاشت‌های زلزله

در این بخش، مهم‌ترین روش‌های گوناگونی که در گذشته برای انتخاب شتابنگاشت‌های مناسب پیشنهاد شده‌اند، به اختصار مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

روش بند ۲-۱، یک روش بسیار ساده تنها بر اساس مشخصات کلی زلزله بدون توجه به طیف طرح است. وجه مشترک روش‌های گفته‌شده در بندهای ۲-۲ تا ۲-۶ استفاده از معیار نسبتاً ساده‌ای در هر یک از آن‌ها به منظور تعیین میزان مشابهت طیف زلزله با طیف طرح محل بدون توجه به پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سازه است. در روش بند ۲-۷، مشخصات رفتاری غیرخطی سازه نیز به نحوی در نظر گرفته می‌شود.

مناسب است. محققان مختلف، روش‌هایی را در زمینه انتخاب شتابنگاشت پیشنهاد نموده‌اند. یکی از این روش‌ها، انتخاب بر اساس بزرگای M ، فاصله تا مکان مورد نظر R ، شرایط خاک محل S ، نحوه گسش^۱ یا سازوکار منبع F و متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری $V_{S,30}$ است. در این روش، در ابتدا مشخصات مورد نظر انتخاب شده و سپس رکوردهایی که مقادیر M و R و F و S و $V_{S,30}$ آن‌ها تا حد امکان نزدیک به مقادیر مشخص شده هستند، انتخاب می‌شوند. در روشی دیگر، انتخاب با استفاده از طیف خطر یکنواخت^۲ (UHS) صورت می‌گیرد. در این روش، طیف‌های پاسخ هر حرکت زمین بر اساس دامنه آن به صورتی مقیاس می‌شوند که در محدوده زمان تناوب‌های $0.2T$ تا $1/5T$ (که در آن، T زمان تناوب اصلی سازه است)، نزدیک به طیف خطر یکنواخت مورد نظر بوده و بیشترین شباهت را با طیف مذکور داشته باشند. روش‌های انتخاب حرکت‌های زمین بر اساس طیف میانگین شرطی^۳ (CMS) شبیه به روش قبلی است؛ با این تفاوت که در این روش، از شکل طیف هدف به عنوان جایگزین طیف خطر یکنواخت (UHS) برای انتخاب حرکت‌های زمین استفاده می‌شود. گروه انتخاب حرکت‌های زمین با استفاده از مؤلفه اپسیلون (ϵ)، روشی است که انتخاب حرکت‌های زمین در آن بر اساس مقدار اپسیلون آن‌ها در دوره تناوب اصلی ساختمان ($\epsilon(T_1)$) صورت می‌گیرد؛ به طوری که مؤلفه $\epsilon(T_1)$ تا حد امکان به عدد مورد نظر نزدیک باشد. $\epsilon(T_1)$ شاخصی به صورت انحراف استاندارد لگاریتمی است که بین طیف پاسخ زلزله مورد نظر و طیف مبنای مقایسه (موسوم به طیف میانگین شرطی) محاسبه می‌شود [۴].

شاخص‌های شدت پیشرفته از دیگر مؤلفه‌های موجود برای انتخاب حرکت‌های زمین هستند. شاخص شدت بیشینه شتاب زمین^۴ (PGA) و شاخص شدت شتاب طیفی در دوره تناوب حالت اول سازه^۵ ($Sa(T_1)$) هر چند بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما اطلاعاتی را در ارتباط با شکل طیف پاسخ دربر ندارند.

به دلیل این نیاز، شاخص‌های شدت جامع‌تری با عنوان شاخص‌های شدت پیشرفته مدنظر قرار گرفته است. از جمله این شاخص‌ها، شاخص شدت $IM_{1E&2E}$ است که شامل نسبت پاسخ تغییر مکان‌های غیرارتجاعی به تغییر مکان الاستیک یک سامانه چند درجه آزادی بوده و نمونه کامل‌شده‌ای از شاخص‌های شدت دیگری مانند IM_{1E} و IM_{1I} و $IM_{1E&2E}$ و Sd_i هستند. در میان آن‌ها، IM_{1E} شاخص شدتی است که مبتنی بر طیف پاسخ الاستیک در دوره تناوب حالت اول سازه بوده و IM_{1I} بر مبنای طیف پاسخ غیرارتجاعی تغییر مکان است. نزدیکترین شاخص شدت به $IM_{1E&2E}$ ، شاخص شدت $IM_{1E&2E}$ بوده که طیف پاسخ تغییر مکان ارتجاعی و تأثیر مشارکت حالت‌های بالاتر در محاسبه آن لحاظ شده است. در نهایت،

¹ faulting

² uniform hazard spectrum

³ conditional mean spectrum

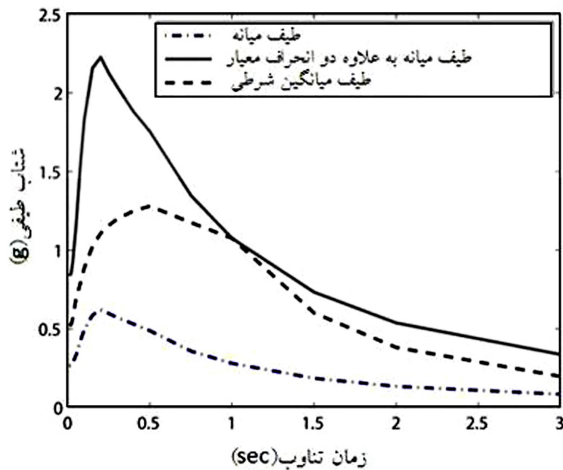
⁴ peak ground acceleration intensity measure

⁵ Structure's fundamental mode spectral acceleration intensity

⁶ EURO CODE 8

⁷ National Institute for Building Construction

⁸ Institute of European Strong-motion Data



شکل ۱: طیف‌های میانگین شرطی، میانه و میانه به علاوه ۲ انحراف معیار برای منطقه ریورساید کالیفرنیا ($M_w=7$ و $R=10$ کیلومتر) [۸]
 Fig. 1. The conditional mean, median and median plus two standard deviations spectra for Riverside, California with $M_w=7$ and $R=10$ km [8]

۲-۴- انتخاب بر اساس مؤلفه اپسیلون (ε)

مؤلفه ε یک مشخصه شکلی از طیف میانگین شرطی است که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۹]:

$$\varepsilon(T) = \frac{\ln_{Sa}(T) - \mu_{\ln Sa}(M, R, T)}{\sigma_{\ln Sa}(M, R, T)} \quad (1)$$

که در آن، $\ln_{Sa}(T)$ لگاریتم شتاب طیفی، $\mu_{\ln Sa}(M, R, T)$ میانگین شتاب‌های طیفی رکورد مورد نظر بر اساس بزرگ، فاصله و دوره تناوب مشخص و $\sigma_{\ln Sa}(M, R, T)$ انحراف استاندارد رکورد مورد نظر است که با استفاده از شتاب زمین محاسبه می‌شوند.

به این ترتیب، $\varepsilon(T)$ نشان‌دهنده میزان اختلاف طیف پاسخ زلزله مورد نظر و طیف میانگین شرطی در زمان تناوب T است. اگر مقدار ε در زمان تناوب اصلی سازه (T_1)، محاسبه شود، به عنوان عدد انحراف استاندارد لگاریتمی شناخته خواهد شد. در این روش، زلزله‌هایی مناسب‌تر قلمداد می‌شوند که $\varepsilon(T_1)$ آن‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد. محاسبات این روش شامل تعیین طیف میانگین شرطی و مؤلفه ε در زمان‌های تناوب مورد نظر است.

۲-۵- انتخاب به روش میانگین انحراف طیفی

این روش، شامل سه مرحله عمده است: در مرحله اول، طیف طرح محل با در دست داشتن اطلاعات مناسب مشخص می‌شود. مرحله دوم مربوط به جستجوی رکوردها است که در آن، انتخاب رکوردها با در نظر گرفتن اطلاعاتی مشابه با مرحله اول صورت می‌گیرد. در مرحله سوم، با توجه به تعیین طیف طرح و انتخاب اولیه رکوردها در دو مرحله قبل، سنجش تطبیق

۲-۱- انتخاب بر اساس M و R و F و S

در این روش، با انتخاب مقادیر پیش‌فرض و مطلوب برای بزرگ (M)، فاصله تا گسل (R)، نوع گسل (F)، نوع خاک محل (S) و شتاب طیفی در زمان تناوب اصلی سازه $Sa(T_1)$ (بر اساس طیف طرح محل) زلزله‌هایی که مشخصات آن‌ها نزدیک به مقادیر مورد نظر است، انتخاب می‌شوند. با توجه به محدود بودن مؤلفه‌های مورد استفاده، می‌توان پیش‌بینی نمود که استفاده از این روش به تعداد زیادی رکورد نیاز داشته باشد. از سویی دیگر، مزیت بزرگ این روش سادگی زیاد و سرعت استفاده از آن بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده است.

۲-۲- انتخاب با استفاده از طیف خطر یکنواخت (UHS)

در این روش، در ابتدا طیف طرح با خطر یکنواخت برای ناحیه مورد نظر و با استفاده از ضوابط آیین‌نامه‌ای یا با مطالعات خاص ساختگاهی محاسبه می‌شود. سپس طیف پاسخ هر زلزله با این طیف طرح مقایسه شده و زلزله‌هایی انتخاب می‌شوند که در محدوده زمان تناوب‌های $0.2T$ تا $1/5T$ (که در آن، T زمان تناوب اصلی سازه است)، بیشترین شباهت را با طیف طرح داشته باشند. معیارهای مختلفی را می‌توان برای تعیین میزان مشابهت طیف پاسخ و طیف طرح در نظر گرفت که در بند ۳-۲ به آن‌ها اشاره خواهد شد.

۲-۳- انتخاب با استفاده از طیف میانگین شرطی (CMS)

روش انتخاب حرکت زمین بر اساس طیف میانگین شرطی (CMS) شبیه به روش دوم؛ اما با جایگزین کردن طیف میانگین شرطی به جای طیف خطر یکنواخت است. با توجه به این‌که یک زلزله به تنهایی قادر به تولید طیف پاسخی به بزرگی طیف UHS در تمامی زمان‌های تناوب نخواهد بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از UHS به عنوان طیف هدف برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، محافظه‌کارانه است. طیف میانگین شرطی، یک طیف هدف جایگزین بوده که می‌تواند در طراحی لرزه‌ای به جای طیف خطر یکنواخت استفاده شود. به منظور آن‌که طیف جدید با ماهیت لرزه‌خیزی منطقه متناسب باشد، یک نقطه مشترک بین آن و طیف آیین‌نامه در نظر گرفته خواهد شد که مقدار هر دو طیف در آن نقطه یکسان فرض می‌شود. برای ساخت طیف میانگین مشروط، در ابتدا باید مقدار شتاب طیفی هدف و مؤلفه شکل طیفی (که در ادامه توضیح داده خواهد شد) در یک دوره تناوب معین (معمولاً دوره تناوب حالت اول سازه) مشخص شود و سپس متوسط لگاریتم مقادیر طیف پاسخ شتاب و انحراف استاندارد آن از طیف هدف تعیین شود. از مؤلفه‌های فوق بر طبق روابط مربوطه، به منظور محاسبه طیف میانگین شرطی در دوره تناوب‌های مختلف استفاده خواهد شد [۸]. به عنوان نمونه، شکل ۱ طیف‌های UHS و CMS محاسبه‌شده برای منطقه ریورساید کالیفرنیا^۱ را نشان می‌دهد [۸].

¹ Riverside, California

۳- روش پیشنهادی برای انتخاب حرکت‌های زمین

در این تحقیق، یک روش سه‌مرحله‌ای برای انتخاب زلزله‌های مناسب ارائه می‌شود که در آن، میزان دقت و ریزی‌ی روش (و زمان انجام محاسبات) در هر مرحله افزایش داده می‌شود. بر این اساس، یک روال سه‌مرحله‌ای غربالگری برای انتخاب حرکات زمین ارائه می‌شود که در آن، تعداد رکوردهای انتخابی از مرحله‌ی اول تا سوم به شدت کاهش یافته و در هر مرحله نیز از معیارهای سختگیرانه‌تری استفاده می‌شود. این سه مرحله با عناوین غربال درشت، غربال متوسط و غربال ریز تعریف می‌شوند که به ترتیب در ادامه توضیح داده خواهند شد.

در بند ۳-۱ با عنوان غربال درشت علاوه بر تشریح روش، میزان اهمیت نسبی هر یک از مؤلفه‌های بزرگا، فاصله از گسل، نوع گسل و نوع خاک محل در تعداد رکوردهای انتخابی از بانک اطلاعاتی زلزله‌ها بررسی شده و توصیه مشخصی ارائه شده است. در بند ۳-۲، سه روش که می‌توانند اهداف غربال متوسط (سادگی نسبی همراه با دقت و سرعت مناسب) را برآورده کنند (و یکی از آن‌ها توسط پژوهش حاضر پیشنهاد شده است)، مورد بحث قرار گرفته و شاخص‌های مناسب آن‌ها محاسبه شده است. معیارهای مناسب روش‌ها، شاخص‌هایی هستند که در این تحقیق پیشنهاد شده است. در بند ۳-۳ نیز دو روش که به علت دقت و سختگیری بیشتر و زمان‌بری و پیچیدگی نسبی برای غربال ریز مناسب‌تر هستند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شاخص‌های ارائه‌شده به منظور سنجش دو روش مورد بحث در غربال ریز، به طور مشترک نشان داده‌اند که یکی از سه روش ارائه‌شده برای انجام غربال متوسط مناسب‌تر از دو روش دیگر بوده و کافی است. همچنین یکی از دو روش مورد استفاده در غربال ریز به عنوان روش ارجح معرفی شده است.

۳-۱- غربال درشت

هدف در غربال درشت آن است که به سرعت و بدون انجام محاسبه خاصی، یک قدم به هدف نهایی (که انتخاب تعداد محدودی زلزله است) نزدیک‌تر شود و تعداد قابل قبولی از زلزله‌ها را انتخاب نماید. برای انتخاب حرکات‌های زمین در غربالگری درشت، از مؤلفه‌های حرکت زمین و نیز مؤلفه‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شود. از آنجایی که امروزه انتخاب حرکات‌های زمین با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی اینترنتی صورت می‌گیرد، در این نوع غربالگری باید به گزینه‌های موجود در این پایگاه‌ها نیز توجه نمود. برای نمونه، بانک اطلاعات PEER-NGA [۳] (که یکی از کامل‌ترین مراجع در این زمینه است)، امکان انتخاب بزرگا (M)، فاصله از گسل (R)، نوع گسل (F) و نوع خاک محل شتاب‌نگار (S) را فراهم ساخته است. برای بررسی تأثیر نسبی هر یک از مؤلفه‌های فوق، موارد زیر با مراجعه به پایگاه اطلاعاتی مذکور مشخص می‌شود:

الف) در صورتی که هیچ‌گونه محدودیتی برای M و R و S و F وجود نداشته باشد، تعداد رکوردهای انتخاب‌شده توسط بانک اطلاعاتی بسیار زیاد است و برابر با ۷۶۳۸ عدد خواهد بود (آوریل ۲۰۱۲).

طیفی بین رکوردها و طیف هدف با توجه به رابطه ۲ انجام می‌شود:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_j(T_i) - Sa_{REF}(T_i)}{Sa_{REF}(T_i)} \right)^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق، $Sa_j(T_i)$ نشان‌دهنده دامنه شتاب طیفی زلزله j -ام در دوره تناوب i -ام، $Sa_{REF}(T_i)$ مقدار طیف آیین‌نامه‌ای در دوره تناوب مشابه و N تعداد نقاط دوره تناوبی مورد نظر است [۶]. مؤلفه δ برای هر رکورد نشان‌دهنده فاصله میانگین طیف پاسخ رکورد مورد نظر از طیف آیین‌نامه است. به این ترتیب، هرچه میزان این انحراف محاسبه‌شده کمتر باشد، رکورد مورد بررسی با طیف هدف تطابق بیشتری را خواهد داشت.

۲-۶- انتخاب به روش سازگاری طیفی

در این روش، مقدار متوسط جذر مجموع مربع‌های انحراف طیف پاسخ زلزله از طیف هدف (D_{rms}) با استفاده از مؤلفه‌های مشخص و بر اساس رابطه ۳ بدست می‌آید [۱۱]:

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_0(T_i)}{PGA_0} - \frac{Sa_s(T_j)}{PGA_s} \right)^2} \quad (3)$$

در رابطه فوق، N تعداد نقاط دوره تناوب، $Sa_0(T_i)$ شتاب طیفی رکورد در دوره تناوب T_i و $Sa_s(T_j)$ شتاب طیفی هدف در همان دوره تناوب است. PGA_0 و PGA_s نیز به ترتیب بیشینه شتاب حرکت زمین در رکورد مورد نظر و میزان شتاب طیفی در دوره تناوب صفر از طیف هدف است. مقادیر کوچک D_{rms} نشان‌دهنده تطابق بیشتر بین طیف پاسخ زلزله مورد نظر و طیف هدف است.

۲-۷- انتخاب با شاخص شدت تغییر مکان طیفی غیرارتجاعی

شاخص شدت پیشرفته $IM_{1E\&2E}$ یک ترکیب SRSS از تغییر مکان غیرارتجاعی در دوره تناوب اول سازه و تغییر مکان طیفی الاستیک در دوره تناوب دوم آن است. بنابراین این شاخص شدت علاوه بر رفتار غیرارتجاعی، اثر شکل‌های مودی بالاتر را نیز در پاسخ‌های سازه در نظر می‌گیرد. این روش، بین روش‌های مورد بررسی از همه مفصل‌تر بوده و مستلزم انجام تحلیل مودی و تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌ی مورد نظر است [۱۲]. در تحلیل استاتیکی غیرخطی، تغییر مکان طبقه بام معادل با تسلیم سازه تعیین می‌شود. سپس بردارهای مود شکل و ضرایب مشارکت جرمی شکل‌های مودی اول و دوم محاسبه شده و در نهایت نیز با داشتن مقادیر پاسخ‌های طیفی الاستیک و غیرالاستیک سازه در حالت اول، مقدار $IM_{1E\&2E}$ برای هر رکورد بدست می‌آید. لازم به ذکر است که رکوردی که دارای مقدار IM نزدیکتری به میانگین IM ‌های محاسبه‌شده هستند، در اولویت انتخاب قرار دارند.

جدول ۱: تأثیر بزرگای زلزله در تعداد زلزله‌های انتخاب‌شده

Table 1. Effect of the earthquake magnitude on the number of selected earthquakes

ردیف	بزرگا	تعداد رکورد
۱	$5 < M < 5/5$	۲۵۳
۲	$5/5 < M < 6$	۶۰۲
۳	$6 < M < 6/5$	۲۵۰۰
۴	$6/5 < M < 7$	۴۳۷
۵	$7 < M < 7/5$	۲۲۲
۶	$7/5 < M < 8$	۴۸۲

ب) در این حالت، تنها برای M محدوده‌ای تعریف می‌شود. اما R و S و F محدودیتی ندارند. بسته به محدوده انتخابی برای M ، تعداد رکوردهای انتخاب‌شده مطابق با جدول ۱ خواهند بود.

پ) در این حالت، محدوده‌ای برای مقادیر R در نظر گرفته می‌شود. اما M و S و F محدودیتی ندارند. در صورتی که $0 < R \leq 20$ کیلومتر فرض شود، تعداد رکوردها ۳۷۵ عدد و در صورتی که $20 < R \leq 50$ باشد، تعداد زلزله‌ها ۷۱۲ عدد خواهند بود.

ت) در نهایت و با محدود کردن همه‌ی مؤلفه‌ها مطابق با جدول ۲، تعداد رکوردهای مناسب بسیار کمتر خواهد بود.

جدول ۲: تعداد زلزله‌های انتخاب‌شده با غربال درشت در حالت‌های مختلف

Table 2. Number of the selected earthquakes using the loose screen in different cases

ردیف	بزرگا	فاصله	نوع خاک	امتداد لغز	نرمال	معکوس	معکوس امتداد لغز	نرمال امتداد لغز
۱	$5 < M < 5/5$	$0 < R \leq 20$	-	صفر	صفر	صفر	۱	صفر
۲	$5 < M < 5/5$	$0 < R \leq 20$	C	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
۳	$5 < M < 5/5$	$20 < R \leq 50$	-	صفر	صفر	صفر	صفر	۱
۴	$5 < M < 5/5$	$20 < R \leq 50$	C	صفر	صفر	صفر	صفر	۱
۵	$5/5 < M < 6$	$0 < R \leq 20$	-	۲۱	۲	۱۴	۵۳	صفر
۶	$5/5 < M < 6$	$0 < R \leq 20$	C	۵	۱	۱۰	۲۶	صفر
۷	$5/5 < M < 6$	$20 < R \leq 50$	-	۶	۶	۷۹	۵۵	صفر
۸	$5/5 < M < 6$	$20 < R \leq 50$	C	۲	۱	۴۳	۱۹	صفر
۹	$6 < M < 6/5$	$0 < R \leq 20$	-	۲۵	۵	۲۳	۸	۳
۱۰	$6 < M < 6/5$	$0 < R \leq 20$	C	۷	۲	۱۸	۱	۱
۱۱	$6 < M < 6/5$	$20 < R \leq 50$	-	۲۴	۱۰	۲۵۹	۱۵	صفر
۱۲	$6 < M < 6/5$	$20 < R \leq 50$	C	۹	۴	۱۵۵	۶	صفر
۱۳	$6/5 < M < 7$	$0 < R \leq 20$	-	۴۱	۷	۵۵	۲۱	صفر
۱۴	$6/5 < M < 7$	$0 < R \leq 20$	C	۲	۲	۳۲	۱۴	صفر
۱۵	$6/5 < M < 7$	$20 < R \leq 50$	-	۱۵	۴	۸۱	۲۹	صفر
۱۶	$6/5 < M < 7$	$20 < R \leq 50$	C	صفر	۲	۴۱	۱۵	صفر
۱۷	$7 < M < 7/5$	$0 < R \leq 20$	-	۱۴	صفر	۶	صفر	صفر
۱۸	$7 < M < 7/5$	$0 < R \leq 20$	C	۹	صفر	۴	صفر	صفر
۱۹	$7 < M < 7/5$	$20 < R \leq 50$	-	۱۶	صفر	۴	صفر	صفر
۲۰	$7 < M < 7/5$	$20 < R \leq 50$	C	۷	صفر	۲	صفر	صفر
۲۱	$7/5 < M < 8$	$0 < R \leq 20$	-	۷	صفر	صفر	صفر	صفر
۲۲	$7/5 < M < 8$	$0 < R \leq 20$	C	۲	صفر	صفر	۵۲	صفر
۲۳	$7/5 < M < 8$	$20 < R \leq 50$	-	۶	صفر	صفر	۱۰۲	صفر
۲۴	$7/5 < M < 8$	$20 < R \leq 50$	C	۳	صفر	صفر	۵۰	صفر

جدول ۳: زلزله‌های انتخاب شده در مرحله غربال درشت

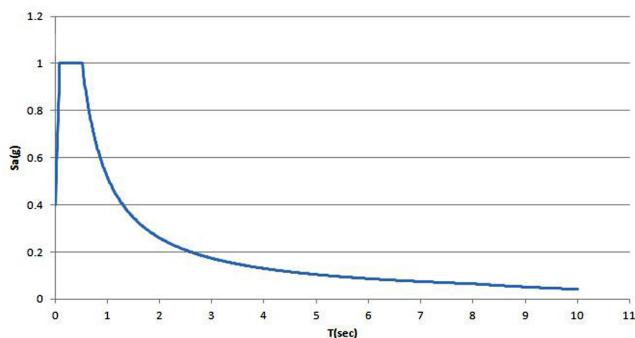
Table 3. Selected earthquakes after the loose screen stage

ردیف	رکوردر	ردیف	رکوردر
۱	NGA0087	۲۲	NGA1029
۲	NGA1023	۲۳	NGA0078
۳	NGA1020	۲۴	NGA1058
۴	NGA0974	۲۵	NGA1035
۵	NGA0088	۲۶	NGA0942
۶	NGA0121	۲۷	NGA1008
۷	NGA0081	۲۸	NGA0993
۸	NGA0063	۲۹	NGA1005
۹	NGA1007	۳۰	NGA0963
۱۰	NGA1061	۳۱	NGA1015
۱۱	NGA1072	۳۲	NGA0079
۱۲	NGA1038	۳۳	NGA0945
۱۳	NGA1022	۳۴	NGA1055
۱۴	NGA0997	۳۵	NGA0070
۱۵	NGA0969	۳۶	NGA1031
۱۶	NGA1095	۳۷	NGA1057
۱۷	NGA0991	۳۸	NGA1027
۱۸	NGA1065	۳۹	NGA1053
۱۹	NGA1070	۴۰	NGA1019
۲۰	NGA0948	۴۱	NGA1030
۲۱	NGA1028		

غربال درشت انتخاب شدند و با انجام محاسباتی در حد متوسط و نه چندان پیچیده است. همان گونه که در بند ۲ گفته شد، معیار اصلی در این جا آن است که میزان مشابهت طیف زلزله با طیف طرح محل به صورت مناسبی تعیین شود و نمونه‌هایی از آن در بندهای ۲-۲ تا ۲-۶ آورده شده است. لازم به یادآوری است که روش مناسب از نظر این تحقیق، روشی است که به کمترین پراکندگی آماری در نتایج تحلیل غیرخطی سازه منجر شود. زیرا روش‌هایی که سرعت مناسبی برای غربال متوسط دارند، همگی مبتنی بر تحلیل (خطی) طیفی سازه هستند. یافتن روش مناسب در این مرحله، جز با دقت در ماهیت هر روش، انتخاب چند روش منطقی‌تر و نیز سعی و خطا بین روش‌های منتخب ممکن نخواهد بود. در بررسی انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که سه روش سازگاری بیشتری را با اهداف غربال متوسط دارند که در ادامه معرفی خواهند شد. روش اول (توازن طیفی) در این تحقیق و مرجع [۱۳] در پژوهش حاضر بسط داده شده است. همچنین معیارهای عددی مورد بحث در هر سه روش برای تعیین مشابهت طیف زلزله با طیف طرح، پیشنهاد این تحقیق است. لازم به ذکر است که جزییات مفصل‌تر در این ارتباط، در مرجع [۴] موجود است. همان طور دیده خواهد شد، رویکرد مشترک در هر سه روش بکارگیری معیاری برای سنجش مشابهت طیف‌های زلزله و طرح است.

۳-۲-۱- روش توازن طیفی [۱۳]

در این روش، مشابهت طیف پاسخ زلزله با طیف طرح محل در محدوده $0.2T$ تا $1/5T$ مینا قرار می‌گیرد [۱۰] و معیار مشابهت، سطح زیر منحنی طیف‌ها است. به این ترتیب، ضریب مقیاسی تعریف می‌شود که برابر با نسبت سطح زیر منحنی طیف پاسخ زلزله به سطح زیر منحنی طیف طرح محل در محدوده فوق است. هرچه این ضریب به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده تناسب بیشتر آن خواهد بود. در صورتی که برآیند طیف‌های پاسخ دو مؤلفه متعامد زلزله بکار برود، از $1/4$ برابر سطح زیر منحنی طیف طرح برای محاسبه ضریب مقیاس استفاده خواهد شد. طیف طرح مورد استفاده در این تحقیق، طیف طرح آیین‌نامه ASCE7-10 بوده [۲] که در شکل ۲ نشان



شکل ۲: طیف طرح مورد استفاده

Fig. 2. The design spectrum utilized

نکته مهم در جدول ۲، آن است که در صورت در نظر گرفتن مؤلفه‌های این جدول (یعنی M و R و S و F) در غربال درشت، تعداد مناسبی از رکوردها در این مرحله نتیجه خواهند شد. بنابراین غربال درشت با انتخاب مؤلفه‌های بزرگا، فاصله، نوع خاک و نوع گسل تعریف خواهد شد که مطابق با روش گفته شده در بند ۱-۲ است.

لازم به ذکر که به طور نمونه، حالتی از جدول ۲ که در آن تعداد زلزله‌ها ۴۱ عدد است (خانه‌ای که در ردیف ۱۶ با رنگ خاکستری مشخص شده) برای انجام محاسبات در بندهای بعدی استفاده خواهد شد. شناسه این زلزله‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۲- غربال متوسط

هدف از غربال متوسط، کاهش قابل ملاحظه تعداد زلزله‌هایی که در

جدول ۴: ضرایب مقیاس روش توازن طیفی برای غربال متوسط

Table 4. Scale factors of the spectral balancing method for the medium screen

ردیف	رکورد	ضریب مقیاس	ردیف	رکورد	ضریب مقیاس	ردیف	رکورد	ضریب مقیاس
۱	NGA0087	۰/۷۱	۱۵	NGA0969	۱/۹۲	۲۹	NGA1005	۲/۳۹
۲	NGA1023	۰/۹۸	۱۶	NGA1095	۱/۹۳	۳۰	NGA0963	۲/۴۶
۳	NGA1020	۱/۰۴	۱۷	NGA0991	۱/۹۷	۳۱	NGA1015	۲/۴۸
۴	NGA0974	۱/۱۷	۱۸	NGA1065	۱/۹۹	۳۲	NGA0079	۲/۶۲
۵	NGA0088	۱/۱۷	۱۹	NGA1070	۲/۰۰	۳۳	NGA0945	۲/۶۷
۶	NGA0121	۱/۱۹	۲۰	NGA0948	۲/۰۳	۳۴	NGA1055	۲/۷۲
۷	NGA0081	۱/۲۲	۲۱	NGA1028	۲/۰۶	۳۵	NGA0070	۲/۸۰
۸	NGA0063	۱/۵۵	۲۲	NGA1029	۲/۰۸	۳۶	NGA1031	۲/۸۷
۹	NGA1007	۱/۶۰	۲۳	NGA0078	۲/۰۹	۳۷	NGA1057	۳/۰۰
۱۰	NGA1061	۱/۶۹	۲۴	NGA1058	۲/۱۱	۳۸	NGA1027	۳/۰۳
۱۱	NGA1072	۱/۷۵	۲۵	NGA1035	۲/۱۱	۳۹	NGA1053	۳/۲۱
۱۲	NGA1038	۱/۷۶	۲۶	NGA0942	۲/۳۳	۴۰	NGA1019	۳/۲۶
۱۳	NGA1022	۱/۸۱	۲۷	NGA1008	۲/۳۴	۴۱	NGA1030	۳/۳۷
۱۴	NGA0997	۱/۹۰	۲۸	NGA0993	۲/۳۵			

زیر نمودار طیف سرعت (S_p) بین دو لحظه‌ی معین است. هاوزنر^۱ SI را به صورت زیر تعریف کرده است [۱۵]:

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_p dt \quad (۴)$$

در این روش، شدت طیفی تمامی رکوردهایی که از غربال درشت عبور کرده‌اند (در این مثال، ۴۱ رکورد) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده و سپس شدت طیفی طیف طرح مورد استفاده (شکل ۲) نیز محاسبه می‌شود. در نهایت، شدت طیفی هر رکورد بر شدت طیفی طیف طرح تقسیم خواهد شد و حاصل این تقسیم، مؤلفه RSI خواهد بود. هرچه این نسبت (RSI) به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان اختلاف طیف پاسخ با طیف طرح کمتر قلمداد می‌شود. در جدول ۵ مقادیر RSI رکوردهای عبور کرده از غربال درشت نشان داده شده است. ترتیب ارائه رکوردها برحسب RSI به صورت صعودی است. از این بین، رکوردهای ۳۲ تا ۴۱ که RSI آن‌ها به یک نزدیک‌تر است، انتخاب شده و در مرحله بعدی (یعنی غربال ریز) از آن‌ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تنها یکی از رکوردهای انتخابی در این روش با رکوردهای انتخاب‌شده در روش توازن طیفی یکسان است.

داده شده است. این طیف برای منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار زیاد و خاک نوع C محاسبه شده که تقریباً معادل با ناحیه‌ای با $A=0/35$ و خاک نوع III در استاندارد ۲۸۰۰ است.

مقادیر ضریب مقیاس روش توازن طیفی برای ۴۱ زلزله استخراج شده در غربال درشت به روش فوق محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است. در این محاسبه $T_1=1$ ثانیه فرض شده است.

در جدول ۴، زلزله‌ها با ضرایب مقیاس به ترتیب صعودی مرتب شده‌اند. از این بین، زلزله‌هایی که ضریب مقیاس آن‌ها به یک نزدیک‌تر است، مناسب‌تر هستند. بر این اساس، ۱۰ زلزله شامل ردیف‌های ۱ تا ۱۰ جدول برای محاسبات غربال ریز لحاظ می‌شوند. تعداد زلزله‌های انتخابی به صورتی در نظر گرفته شده‌اند که برای محاسبات آماری بعدی مناسب باشد.

۳-۲-۲ روش شدت طیفی

در این روش، معیار مشابهت طیف‌ها، نزدیکی مقادیر شدت طیفی آن‌ها خواهد بود. شدت طیفی معیاری از میزان انرژی جذب‌شده توسط سازه در مدت زمان معینی از زمین‌لرزه بوده و در نتیجه تابعی از سرعت طیفی سازه است [۱۴].

شدت طیفی با علامت اختصاری SI بیان می‌شود و برابر با مساحت

¹ W. George Housner

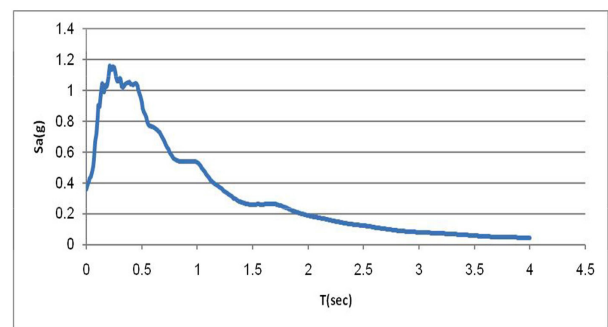
جدول ۵: مقادیر نسبت شدت طیفی زلزله به طیف طرح

Table 5. Ratios of the seismic spectral intensity to design spectrum ampliudes

ردیف	رکورد	RSI	ردیف	رکورد	RSI	ردیف	رکورد	RSI
۱	NGA0121	۰/۰۳	۱۵	NGA0088	۰/۱۸	۲۹	NGA1030	۰/۳۷
۲	NGA1022	۰/۰۸	۱۶	NGA0948	۰/۱۸	۳۰	NGA1058	۰/۲۹
۳	NGA0969	۰/۰۸	۱۷	NGA1015	۰/۱۸	۳۱	NGA1035	۰/۲۹
۴	NGA1061	۰/۱۰	۱۸	NGA1020	۰/۱۸	۳۲	NGA0991	۰/۳۲
۵	NGA0087	۰/۱۰	۱۹	NGA1029	۰/۲۰	۳۳	NGA0078	۰/۳۲
۶	NGA0081	۰/۱۱	۲۰	NGA1038	۰/۲۱	۳۴	NGA1008	۰/۳۳
۷	NGA0063	۰/۱۲	۲۱	NGA0974	۰/۲۲	۳۵	NGA1031	۰/۳۷
۸	NGA1095	۰/۱۴	۲۲	NGA1053	۰/۲۲	۳۶	NGA1057	۰/۳۷
۹	NGA1023	۰/۱۴	۲۳	NGA0942	۰/۲۲	۳۷	NGA0070	۰/۳۸
۱۰	NGA0945	۰/۱۵	۲۴	NGA0997	۰/۲۳	۳۸	NGA1005	۰/۳۸
۱۱	NGA1065	۰/۱۶	۲۵	NGA1019	۰/۲۴	۳۹	NGA0993	۰/۴۰
۱۲	NGA1027	۰/۱۷	۲۶	NGA1070	۰/۲۴	۴۰	NGA1007	۰/۴۷
۱۳	NGA1072	۰/۱۸	۲۷	NGA0079	۰/۲۵	۴۱	NGA0963	۱/۳۱
۱۴	NGA1028	۰/۱۸	۲۸	NGA1055	۰/۲۶			

۳-۲-۳- روش اپسیلون (ϵ)

همان‌طور که در بند ۲-۴ گفته شد، مؤلفه ϵ یک مشخصه شکلی طیف میانگین شرطی است. به این ترتیب، در صورتی که طیف میانگین شرطی محل مطابق بند ۲-۳ محاسبه شود، می‌توان $\epsilon(T_1)$ را برای طیف پاسخ هر زلزله نسبت به طیف میانگین شرطی محاسبه نمود. در این صورت، زلزله‌هایی مناسب‌ترند که $\epsilon(T_1)$ آن‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد. طیف میانگین شرطی محل با توجه به طیف طرح شکل ۲ برای مثال حاضر محاسبه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف میانگین شرطی مثال حاضر

Fig. 3. The conditional mean spectrum for the current spectrum

با استفاده از شکل ۳ و رابطه ۱، $\epsilon(T_1)$ برای زلزله‌های گذشته از غربال درشت محاسبه شده و در جدول ۶ به ترتیب صعودی نشان داده شده است. ۱۰ ثبت رکورد با $\epsilon(T_1)$ نزدیک به صفر در جدول ۶ شامل ردیف‌های ۱۶ تا ۲۵ هستند که با نتایج دو روش قبلی غربال متوسط متفاوت بوده و فقط در چند مورد مشترک هستند. این ۱۰ رکورد برای غربال ریز بکار خواهند رفت.

۳-۳- غربال ریز

در مرحله‌ی قبل، از سه روش برای غربالگری متوسط حرکت زمین استفاده شد. از نتایج هر سه روش به طور جداگانه در این قسمت برای غربال ریز استفاده شده و در عین حال، با مقایسه نتایج غربال ریز، غربال متوسط مناسب‌تر نیز تعیین خواهد شد. هدف از غربال ریز، انتخاب بهترین رکوردهای باقی‌مانده به منظور تحلیل دینامیکی غیرخطی است. منظور از بهترین رکوردها، مواردی است که در مجموع منجر به کمترین پراکندگی در پاسخ غیرخطی سازه می‌شوند. این، کمترین تعداد رکورد لازم را نشان می‌دهد. به این ترتیب، در زمان تحلیل‌های غیرخطی نیز بیشینه صرفه‌جویی به عمل خواهد آمد. برای این کار و با بررسی انجام‌شده، از روش‌های بندهای ۲-۳ و ۲-۷ (یعنی طیف میانگین شرطی و شاخص شدت طیف تغییر مکان) استفاده می‌شود. این دو روش نسبت به روش‌های مورد بحث در مرحله غربال متوسط، محاسبات بیشتری داشته و در روش شاخص شدت طیف

جدول ۶: مقادیر $\varepsilon(T_1)$ برای زلزله‌های گذشته از غربال درشت

Table 6. Values of $\varepsilon(T_1)$ for the earthquakes that passed the loose screen

ε	رکورد	ردیف	ε	رکورد	ردیف	ε	رکورد	ردیف
-۰/۵۱۴	NGA1035	۲۹	-۰/۲۳۸	NGA1027	۱۵	-۲/۷۴۸	NGA0121	۱
-۰/۵۹۶	NGA1007	۳۰	-۰/۱۵۹	NGA1015	۱۶	-۱/۶۲۲	NGA1023	۲
-۰/۶۴۰	NGA1008	۳۱	-۰/۱۵۰	NGA0948	۱۷	-۱/۵۷۵	NGA0969	۳
-۰/۶۵۵	NGA1053	۳۲	-۰/۰۷۶	NGA0942	۱۸	-۱/۳۹۸	NGA0081	۴
-۰/۶۷۷	NGA1030	۳۳	-۰/۰۶۶	NGA0997	۱۹	-۱/۲۶۷	NGA1022	۵
-۰/۷۰۳	NGA0079	۳۴	-۰/۰۱	NGA1029	۲۰	-۱/۲۶۵	NGA0087	۶
-۰/۷۷۳	NGA1005	۳۵	-۰/۰۱۳	NGA1038	۲۱	-۰/۹۵۳	NGA1061	۷
-۰/۸۶۷	NGA1057	۳۶	-۰/۰۴۹	NGA1072	۲۲	-۰/۸۰۱	NGA1020	۸
۱/۰۰۸	NGA1019	۳۷	-۰/۱۵۰	NGA1055	۲۳	-۰/۵۶۶	NGA1095	۹
۱/۱۰۹	NGA0993	۳۸	-۰/۱۹۷	NGA1058	۲۴	-۰/۵۵۱	NGA0974	۱۰
۱/۱۷۳	NGA1031	۳۹	-۰/۲۱	NGA0088	۲۵	-۰/۵۳۹	NGA1065	۱۱
۱/۳۶۰	NGA0070	۴۰	-۰/۲۷۳	NGA0078	۲۶	-۰/۴۴۵	NGA0063	۱۲
۳/۲۳۵	NGA0963	۴۱	-۰/۳۸۲	NGA0991	۲۷	-۰/۳۲۴	NGA1028	۱۳
			-۰/۴۳۲	NGA1070	۲۸	-۰/۲۸۳	NGA0945	۱۴

جدول ۷: مؤلفه‌های CMS برای زلزله‌های حاصل از روش توازن طیفی

Table 7. The CMS parameters for the earthquakes retrieved using the spectral balancing method

S.F	SSE	رکورد	ردیف
۲/۴۸	۱۸/۰۰	NGA0087	۱
۲/۸۲	۵۸/۱۱	NGA1023	۲
۲/۳۷	۴۶/۱۸	NGA1020	۳
۱/۹۴	۷۵/۹۷	NGA0974	۴
۲/۷۴	۱۸/۰۶	NGA0088	۵
۱/۹۲	۱۱/۲۶	NGA0121	۶
۲/۴۲	۲۴/۷۱	NGA0081	۷
۱/۵۸	۱۱/۵۱	NGA0063	۸
۱/۳۰	۲۶/۷۵	NGA1007	۹
۱/۰۳	۵/۶۷	NGA1061	۱۰
۲/۰۶	۲۹/۶۲	MEAN	
۰/۵۸	۲۱/۸۵	S.D.	

تغییر مکان از مشخصات رفتاری غیرخطی سازه نیز استفاده می‌شود. بنابراین، این دو روش برای غربال ریز مناسب‌تر هستند.

۳-۱- روش طیف میانگین شرطی (CMS)

در این روش، میزان تطابق طیف پاسخ هر زلزله با طیف میانگین شرطی بررسی می‌شود. به صورت عددی، میزان تطابق با مؤلفه‌های ضریب مجموع مربع‌های خطاها (SSE) و ضریب مقیاس (SF) تعیین می‌شود که از رابطه‌های ۵ و ۶ بدست می‌آیند [۸]:

$$SSE = \sum_{j=1}^n (\ln Sa(T_j) - \ln Sa_{CMS}(T_j))^2 \quad (5)$$

در رابطه فوق، $\ln Sa(T_j)$ لگاریتم شتاب طیفی زلزله مورد نظر در دوره تناوب T_j و $\ln Sa_{CMS}(T_j)$ مقدار لگاریتم CMS در همان دوره تناوب است.

$$Scale\ Factor = \frac{\sum_{j=1}^n Sa_{CMS}(T_j)}{\sum_{j=1}^n Sa(T_j)} \quad (6)$$

در رابطه فوق نیز $\ln Sa_{CMS}(T_j)$ و $Sa(T_j)$ به ترتیب شتاب‌های طیفی در طیف میانگین شرطی و رکورد مورد نظر در دوره تناوب T_j هستند. به این ترتیب، هرچه SSE به صفر و SF به یک نزدیک‌تر باشد، رکورد مربوطه مناسب‌تر خواهد بود [۸]. مؤلفه‌های این روش برای هر یک از سه دسته

جدول ۸: مؤلفه‌های CMS برای زلزله‌های حاصل از روش شدت طیفی

Table 8. The CMS parameters for the earthquakes retrieved using the spectral intensity method

ردیف	رکورد	SSE	S.F
۱	NGA1007	۴۷/۴۸	۱/۵۸
۲	NGA0993	۱۸/۷۸	۱/۱۸
۳	NGA0070	۱۵/۷۵	۰/۷۵
۴	NGA1005	۲/۷۷	۰/۹۷
۵	NGA1057	۱۴/۹۸	۰/۷۰
۶	NGA1031	۹/۷۱	۰/۸۹
۷	NGA1008	۲/۳۸	۰/۹۴
۸	NGA0078	۱۹/۹۸	۰/۹۶
۹	NGA0991	۱۱/۳۶	۱/۲۳
۱۰	NGA1035	۱۳/۹۴	۱/۰۱
	MEAN	۱۵/۷۱	۱/۰۲
	S.D.	۱۲/۰۰	۰/۲۴

جدول ۹: مؤلفه‌های CMS برای زلزله‌های حاصل از روش اپسیلون

Table 9. The CMS parameters for the earthquakes retrieved using the epsilon method

ردیف	رکورد	SSE	S.F
۱	NGA0078	۲۴/۵۲	۰/۸۹
۲	NGA0088	۶/۲۶	۳/۱۱
۳	NGA0942	۶/۳۹	۱/۰۷
۴	NGA0945	۵/۱۰	۰/۹۴
۵	NGA0948	۶/۶۷	۱/۲۷
۶	NGA0997	۱۰/۰۲	۱/۲۵
۷	NGA1015	۵/۹۰	۱/۰۱
۸	NGA1027	۳/۲۵	۰/۹۴
۹	NGA1029	۴/۸۵	۰/۷۶
۱۰	NGA1038	۲۱/۴۶	۱/۴۵
۱۱	NGA1055	۸۰/۶۱	۱/۷۳
۱۲	NGA1058	۵۸/۷۷	۱/۲۸
۱۳	NGA1072	۱۸/۳۷	۱/۷۲
	MEAN	۱۹/۴۰	۱/۵۶
	S.D.	۲۲/۸۴	۰/۴۴

رکورد انتخاب شده در غربال متوسط محاسبه شده و به شرح جدول‌های ۷ تا ۹ هستند. در این جدول‌ها، MEAN میانگین اعداد هر ستون و SD انحراف معیار آن‌ها است.

در جدول‌های بالا، میانگین و انحراف استاندارد SSE و SF نیز محاسبه شده است که برای مقایسه روش‌ها بکار خواهند رفت. میانگین و انحراف معیار SSE و SF در جدول‌های ۷ تا ۹ چهار مؤلفه را برای ارزیابی کیفیت روش‌ها در اختیار می‌گذارد.

از مقایسه این مقادیر در جدول‌های مذکور نتیجه می‌شود که روش شدت طیفی در غربال متوسط بسیار بهتر از سایر روش‌ها عمل کرده است.

همچنین در جدول ۸، سه زلزله‌های مناسب‌تر از نظر کیفیت ترکیبی SSE و SF، زلزله‌های ۱۰۰۵، ۱۰۰۸ و ۱۰۳۱ هستند.

۳-۲- انتخاب حرکت‌های زمین با شاخص شدت طیف تغییر مکان شاخص شدت طیف تغییر مکان $(IM_{1I&2I})$ ، کمیتی است که از رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$IM_{1I&2E} = Sd^I(T_1, \xi_1, d_y) \times \sqrt{1 + \left[\frac{PF_2^{[2]} Sd^E(T_1, \xi_1)}{PF_1^{[2]} Sd^I(T_1, \xi_1, d_y)} \right]^2} \quad (7)$$

در رابطه فوق، $Sd^I(T_1, \xi_1, d_y)$ طیف پاسخ تغییر مکان یک نوسانگر با دوره تناوب T_1 ، نسبت میرایی ξ_1 و تغییر مکان تسلیم d_y ؛ $Sd^E(T_1, \xi_1)$ مقدار طیف پاسخ تغییر مکان در مود اول؛ و $PF_1^{[2]}$ و $PF_2^{[2]}$ به ترتیب ضرایب مشارکت مود اول و دوم هستند.

محاسبات این شاخص شدت با تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام می‌شود. برای محاسبه این شاخص، در ابتدا باید d_y طبق رابطه ۸ محاسبه شود [۱۱]:

$$d_y = \frac{\theta_{Roof}}{\Gamma_1 \sum h_i} \quad (8)$$

در رابطه فوق، θ_{Roof} زاویه تغییر مکان بام، Γ_1 ضریب مشارکت جرمی، $\varphi_{1,n}$ المان n -ام بردار مود شکل اول سازه، n تعداد طبقات ساختمان و h_j ارتفاع طبقه i -ام است.

بعد از محاسبه $IM_{1I&2I}$ برای تمامی رکوردهای حاصل از غربال متوسط، رکوردهایی که دارای IM نزدیک‌تری به مقدار میانگین IM ‌ها هستند، مناسب‌تر خواهند بود. زیرا حذف رکوردهای دورتر به کاهش انحراف استاندارد خواهد انجامید.

مقادیر IM طبق رابطه ۷ و مربع‌های انحراف از میانگین (SDM) بر اساس رابطه ۹ برای سه دسته رکورد حاصل از روش‌های مختلف غربال ریز در جدول‌های ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده است.

$$Square\ Deviation\ of\ Mean\ (SDM) = (X - \bar{X})^2 \quad (9)$$

همچنین در این جدول‌ها، میانگین و انحراف معیار IM ‌ها نیز بیان

جدول ۱۲: مؤلفه‌های روش *IM* برای زلزله‌های حاصل از روش اپسیلون

Table 12. The IM parameters for the earthquakes retrieved using the epsilon method

ردیف	رکورد	IM 1I&2e	SDM
۱	NGA0078	۴/۱۰	۲/۹۹
۲	NGA0088	۱/۹۷	۱/۳۶
۳	NGA1058	۲/۵۰	۶/۲۷
۴	NGA1055	۲/۰۲	۴/۱۰
۵	NGA1072	۱/۵۶	۲/۴۴
۶	NGA1038	۲/۹۳	۸/۵۹
۷	NGA1029	۱/۶۲	۲/۶۲
۸	NGA0997	۲/۵۷	۶/۵۸
۹	NGA0942	۳/۹۶	۱۵/۶۵
۱۰	NGA0948	۲/۱۹	۴/۸۰
۱۱	NGA1015	۲/۰۴	۴/۱۶
۱۲	NGA1027	۱/۸۲	۳/۳۱
۱۳	NGA0945	۱/۵۷	۲/۴۷
	MEAN	۲/۳۷	-
	S.D.	۰/۸۱	-

شده است. این محاسبه نشان می‌دهد که روش شدت طیفی دارای کمترین پراکندگی در مقادیر *IM* است.

بنابراین، مشابه با نتیجه روش *CMS* در بند ۳-۳-۱، روش شدت طیفی به عنوان بهترین روش برای غربال متوسط برگزیده می‌شود. لازم به ذکر است که روش *IM* در شرایطی نتایج مشابهی را نسبت به روش *CMS* ارائه نموده است که به علت لزوم انجام تحلیل مودی و استاتیکی غیرخطی، بسیار پیچیده‌تر و وقت‌گیرتر از آن است. بنابراین در غربال ریز، استفاده از روش *CMS* به علت سادگی بیشتر و نتایج مشابه توصیه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی روش‌های مختلف، یک روال سه‌مرحله‌ای برای انتخاب شتابنگاشت‌های مناسب برای تحلیل غیرخطی یک سازه مشخص ارائه شد که به کمترین پراکندگی در نتایج انجامید. در طی این مراحل، تعداد رکوردها به سرعت کاهش یافته و در نهایت به تعدادی که استفاده از آن‌ها برای تحلیل غیرخطی عملی است، منجر شد. در مرحله‌ی اول موسوم به

جدول ۱۰: مؤلفه‌های روش *IM* برای زلزله‌های حاصل از روش توازن طیفی

Table 10. The IM parameters for the earthquakes retrieved using the spectral balancing method

ردیف	رکورد	IM 1I&2e	SDM
۱	NGA0087	۱/۰۲	-۰/۲۳
۲	NGA1023	۱/۲۹	-۰/۳۳
۳	NGA1020	۱/۷۹	۳/۲۰
۴	NGA0974	۱/۷۶	۳/۱۱
۵	NGA0088	۱/۹۷	۳/۸۹
۶	NGA0121	-۰/۴۷	-۰/۲۲
۷	1NGA0081	-۰/۸۴	-۰/۷۱
۸	NGA0063	۱/۶۵	۲/۷۱
۹	NGA1007	۳/۱۴	۹/۸۸
۱۰	NGA1061	-۰/۹۹	-۰/۹۷
	MEAN	۱/۴۹	-
	S.D.	-۰/۷۲	-

جدول ۱۱: مؤلفه‌های روش *IM* برای زلزله‌های حاصل از روش شدت طیفی

Table 11. The IM parameters for the earthquakes retrieved using the spectral intensity method

ردیف	رکورد	IM 1I&2e	SDM
۱	NGA1007	۳/۱۴	-۰/۱۹
۲	NGA0993	۴/۰۶	۱۲/۹۲
۳	NGA0070	۴/۵۰	۲۰/۲۸
۴	NGA1005	۳/۵۹	۱۲/۹۲
۵	NGA1057	۳/۲۴	۱۰/۴۷
۶	NGA1031	۳/۶۵	۱۳/۳۶
۷	NGA1008	۳/۳۷	۱۱/۳۴
۸	NGA0078	۴/۱۰	۱۶/۸۲
۹	NGA0991	۳/۰۶	۹/۳۵
۱۰	NGA1035	۳/۱۲	۹/۷۴
	MEAN	۳/۵۸	-
	S.D.	-۰/۴۷	-

Computer Aided Record Selection for Code-based Seismic Structural Analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp. 339-362, 2010.

- [7] Internet Site for European Strong-motion Data: <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>
- [8] J. W., Baker; Conditional Mean Spectrum: A Tool for Ground Motion Selection, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 322-331, 2011.
- [9] J. W., Baker; C. A., Cornell; A Vector-valued Ground Motion Intensity Measure Consisting of Spectral Acceleration and Epsilon, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 10, pp. 1193-1217, 2005.
- [10] N. N., Ambraseys; J., Douglas; D., Rinaldis; C., Berge-Thierry; P., Suhadolc; G., Costa; R., Sigbjornsson; P., Smit; Dissemination of European Strong-motion Data, Vol. 2, CD-ROM Collection, *Engineering and Physical Sciences Research Council*, UK, 2004.
- [11] N., Luco; A., Cornell; Structure Specific Scalar Intensity Measures for Near-source and Ordinary Earthquake Ground Motions, *Earthquake Spectra 2007*, Vol. 23, No. 2, pp. 357-392, 2007.
- [12] F., Behnamfar; A., Khodaparast; A., Bahmanzad; Providing a Method to Scale the Accelerograms for Nonlinear Dynamic Analysis and Comparison with Standard 2800 Method, *The 4th National Conference on Regulations for Seismic Design of Buildings*, 2010.
- [13] F., Behnamfar; A., Nafarie; A Method for Scaling the Strong Ground Motion in Performance-based Design, *The 1st National Conference on Civil Engineering, Sharif University of Technology*, 2004.
- [14] H., Moghadam; *Earthquake Engineering*, Farhang Publications, 2002.
- [15] G. W., Housner; Intensity of Ground Motion During Strong Earthquakes, *Office of Naval Research Report*, pp. 1-60, August 1952; <http://resolver.caltech.edu/CaltechEERL:1952.EERL.1952.001/>

غربال درشت، از انتخاب مقادیر مشخصی برای بزرگا، فاصله تا گسل، نوع گسل و نوع خاک محل استفاده شده و نشان داده شد که بهره‌گیری از همین چهار مؤلفه برای انتخاب تعداد مناسبی از زلزله‌ها کفایت می‌کند. در بانک اطلاعاتی PEER-NGA استفاده از غربال درشت به انتخاب ۴۱ زلزله انجامید. در مرحله دوم موسوم به غربال متوسط، روش‌های توازن طیفی، شدت طیفی و اپسیلون ارائه و بررسی شدند و نشان داده شد که استفاده از روش شدت طیفی برای غربال متوسط، منجر به مناسب‌ترین نتایج خواهد شد که متناظر با کمترین پراکندگی در واکنش‌های طیفی سازه‌ها تحت زلزله‌های منتخب است. در نهایت در مرحله سوم موسوم به غربال ریز، روش‌های طیف میانگین شرطی و شاخص شدت تغییر مکان غیرارتجاعی مطالعه شدند که به نتایج یکسانی از نظر انتخاب زلزله‌های مناسب منجر شدند. با توجه به سادگی و سرعت بسیار بیشتر روش طیف میانگین شرطی، استفاده از این روش برای غربال ریز توصیه شد.

مراجع

- [1] Seismic Design Code of Buildings 2800, *Building and Housing Research Center*, 3rd Edition, 2005.
- [2] ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and other Structures, *American Society of Civil Engineers*, 2010.
- [3] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), *Evaluation of Ground Motion Selection and Modification Methods: Predicting Median Interstory Drift Response of Buildings*, 2009.
- [4] J. W., Baker; C. A., Cornell; Spectral Shape, Epsilon and Record Selection, *Earthq. Engng. and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 9, pp. 1077-1095, 2006.
- [5] P., Tothong; A., Cornell; Structural Performance Assessment under Near-source Pulse-like Ground Motions Using Advanced Ground Motion Intensity Measures, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 37, pp. 1013-1037, 2009.
- [6] I., Iervolino; C., Galasso; E., Cosenza; REXEL:

Please cite this article using:

F., Behnamfar, M., Nooraei, M., Talebi, "A 3-stage Method for Selection of Ground Motions for Dynamic Time History Analysis". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(1) (2017) 127-138.

DOI: 10.22060/ceej.2016.603

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

