

اهمیت انتخاب شتاب نگاشت در پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های ثانویه

علیرضا آذربخت

دانشیار، دانشگاه اراک، اراک، ایران
a-azarbakht@araku.ac.ir

نادر گرجی

دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، اراک، ایران
nader.gorji1989@gmail.com

کلید واژه‌ها: طیف پاسخ طبقه، طیف میانگین شرطی، سیستم‌های ثانویه، انتخاب شتاب نگاشت

چکیده

در مطالعات صورت گرفته روش‌هایی از جمله روش طیف پاسخ طبقه برای محاسبه نیروی وارد بر اجزای ثانویه ارائه گردیده است. این روش بر مبنای انجام تحلیل تاریخچه زمانی می‌باشد. از موارد تاثیر گذار در این تحلیل انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب است. این عمل معمولاً با انطباق میانگین طیف شتاب نگاشت‌ها بر طیف هدف طراحی صورت می‌گیرد. در این نوشتار برای سازه با زمان تناوب ۱/۲۱ ثانیه، شتاب نگاشت‌ها در دسته‌های مختلف برای تعداد هفت و پانزده، طبق طیف هدف انتخاب و طیف پاسخ طبقه متناظر محاسبه شده است. نتایج حاصل در این مطالعه وجود پراکندگی و تفاوت غیرقابل چشم پوشی در پاسخ سازه را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج حاصل این پرسش که "استفاده از کدام دسته‌ی شتاب نگاشت‌ها برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی با فرض ثابت بودن سطح خطر، نوع طیف هدف و تعداد شتاب نگاشت برای محاسبه‌ی طیف پاسخ طبقه مناسب است؟" مورد توجه قرار می‌گیرد.

مقدمه

در دهه‌های اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در آنالیز لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای انجام شده است و در پی این پیشرفت نگرانی در رابطه با عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های ثانویه مطرح گردید. ایمنی لرزه‌ای و عملکرد صحیح سیستم‌های ثانویه از اهمیت بالایی برخوردار است. در بیشتر موارد، درصد بالایی از هزینه‌های ساختمان مربوط به سیستم‌های ثانویه است. تخریب این اجزا در زلزله ممکن است سبب اختلال در کاربری ساختمان شده و حتی برای ساکنان آن نیز مخاطراتی ایجاد نماید. زلزله‌های گذشته آسیب پذیری شدید سیستم‌های ثانویه را نشان داده‌اند. به همین دلیل عملکرد مهندسی در محاسبه میزان پاسخ و طراحی سیستم‌های ثانویه بسیار مهم می‌باشد. معمولاً این سیستم‌ها را به دو گروه حساس به تغییر مکان و حساس به شتاب، تقسیم می‌کنند. بسیاری از عناصر ثانویه هم نسبت به تغییر شکل سازه و هم شتاب وارده حساس می‌باشند. اگر تغییر شکل سازه اصلی کنترل کننده عملکرد سیستم ثانویه باشد، آن سیستم، حساس به تغییر مکان تلقی می‌شود. چنان که این عنصر در برابر تغییر شکل سازه آسیب پذیر نباشد، عنصر حساس به شتاب تلقی می‌گردد. این گونه عناصر چنانچه مهار کافی نداشته باشند، نسبت به لغزش یا واژگونی آسیب پذیر خواهند بود (Naeim 2001). بیش تر آیین نامه‌ها، از روش‌های نیروی جانبی معادل برای تعیین نیروی وارد بر سیستم‌های ثانویه استفاده می‌کنند. در این روش‌ها، عنصر مربوطه برای تحمل نیروی لرزه‌ای معین که به صورت کسری از وزن آن است، طراحی می‌شود. محققان برای محاسبه پاسخ اعضای ثانویه از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. این روش‌ها به صورت کلی در دو دسته‌ی روش طیف پاسخ طبقه و مدل ترکیبی سیستم اصلی- ثانویه قرار می‌گیرند. با توجه به میزان اهمیت اندرکنش دینامیکی میان سیستم اصلی و ثانویه، استاندارد برای روند طراحی مهندسی ارائه شده است که مبنای تصمیم‌گیری برای استفاده از روش طیف پاسخ طبقه یا مدل ترکیبی در آنالیز سیستم‌های ثانویه می‌باشد (USNRC1975 Asfura and Der Kiureghian1986). در روش ترکیبی تحلیل سازه اصلی و اجزای ثانویه درمدل‌سازی هم‌زمان آن-ها صورت می‌گیرد. در صورتی که وزن عضو ثانویه از ۱۰٪ وزن کل سازه و ۲۰٪ وزن طبقه کمتر باشد، می‌توان از اثر عضو غیرسازه‌ای بر سازه صرف نظر کرد. در این صورت می‌توان به جای روش ترکیبی از روش ساده‌تر استفاده نمود. صرف نظر کردن از اثر متقابل سیستم ثانویه بر سازه اصلی در این موارد نتایج محافظه کارانه‌ای را سبب می‌شود. در این روش ابتدا رفتار سازه اصلی در محل اتصال سیستم ثانویه با صرف نظر از



اندرکنش آن‌ها تعیین می‌شود. سپس این پاسخ به عنوان ورودی برای تحلیل سیستم ثانویه استفاده می‌شود. از جمله کارهای تحقیقی در زمینه محاسبه شتاب وارد بر طبقات، تحقیقات Miranda and Taghavi (2004) می‌باشد که در آن روابطی برای تخمین بشینه شتاب طبقه سازه‌های چند درجه آزادی ارائه شده است. البته روابط ارائه شده در آن تحقیق بسیار پیچیده و کاربرد آن دشوار است. در تحقیقات Medina et al. (2006) با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی کاهش قابل ملاحظه‌ای در نقاط اوج طیف پاسخ طبقه رخ می‌دهد. در مطالعه Vukobratovic and Fajfar (2014) با استفاده از سیستم‌های یک درجه آزاد، سیستم اولیه را با رفتار غیرخطی و سیستم ثانویه را در ناحیه خطی مدل کردند و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار دادند. به عنوان نتیجه روشی مستقیم برای محاسبه طیف شتاب طبقه ارائه گردیده است. در روش ارائه شده، طیف پاسخ طبقه در نواحی تشدید بر اساس مقادیر تجربی به دست آمده از مطالعه پارامتریک و در سایر قسمت‌ها بر اساس اصول دینامیک سازه می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد روش طیف پاسخ طبقه دارای خطاهایی تحت شرایط خاصی می‌باشد. در مطالعه‌ای به تخمین این میزان خطا برای ارائه شرایط استفاده از این روش توسط Park (2007) پرداخته شده است. اخیراً با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی برای سیستم اصلی و استفاده از روش طیف پاسخ طبقه، رفتار و پاسخ اجزای غیر سازه‌ای تحت مجموع ۱۶۴ داده‌ی زمین لرزه اروپا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده با مطالعات موجود متفاوت است. این تفاوت با افزایش زمان تناوب سازه‌ی اصلی افزایش می‌یابد. نتایج بررسی معیار تشدید^۱ نیز بیانگر این موضوع است که تخمین آیین نامه فعلی اروپا Eurocode (2005) از نقاط اوج، از مقدار واقعی این نقاط کمتر است Oropenza and Favez (2010). Chaudhuri and Villaverde (2008) نیز اثر رفتار غیرخطی سازه را بر اجزای غیرسازه‌ای غیرخطی بررسی و علاوه بر آن اثر پارامترهایی نظیر سختی سازه، تشدید، ارتفاع محل نصب عضو غیرسازه‌ای و میرایی آن را بر پاسخ شتاب بررسی نمودند.

ایجاد طیف هدف

در هر دو روش موجود برای آنالیز سیستم‌های ثانویه از آنالیزهای تاریخیچه زمانی استفاده می‌شود. در این دسته از آنالیزها انتخاب مجموعه‌ای از شتاب نگاشت‌های زمین لرزه با ویژگی‌های خاص، متناسب با شرایط ساختگاه و سازه‌ی مورد نظر موضوع بسیار مهم و تاثیرگذاری به شمار می‌رود. این شتاب نگاشت‌ها باید بر مبنایی مناسب و با توجه به هدف تحلیل انتخاب شوند. برخی آیین‌نامه‌ها طیف الاستیک به نام طیف هدف یا طیف طرح را ارائه نموده تا اساس انتخاب شتاب نگاشت‌های ورودی باشند. آیین نامه ASCE7-2005 طیف با خطر یکسان^۲ را مبنای انتخاب قرار داده است و پیشنهاد می‌کند با انتخاب حداقل هفت شتاب نگاشت که طیف میانگین آن‌ها در محدوده مشخص فرکانسی بر طیف هدف منطبق باشد به انجام تحلیل مورد نظر پرداخته شود. اما در مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده، طیف با خطر یکسان که از جمله نتایج بکارگیری تحلیل خطر لرزه‌ای به حساب می‌آید گزینه مناسبی برای این هدف نیست. در حقیقت طیف با خطر یکسان نمی‌تواند بیانگر یک رخداد منفرد در نظر گرفته شود Baker and Cornell (2006). از آن‌جا که طیف UHS در دوره‌های تناوب کوتاه متاثر از زلزله‌های بزرگ است و در دوره‌های تناوب بلند سهم زلزله‌های کوچک غالب است، Baker and Cornell (2005) لذا عملاً هیچ تک زمین لرزه با این سطح انرژی یافت نمی‌شود تا طیف آن منطبق بر طیف یکنواخت خطر باشد. در نتیجه محافظه کارانه بودن شیوه‌ی انطباق بر UHS قابل توجیه است. حتی طیف‌های انتخابی بر مبنای شتاب طیفی در دوره تناوبی هدف در تمام محدوده فرکانسی شباهتی به طیف مذکور ندارند. اهمیت این مسئله زمانی بیشتر می‌شود که سطح خطر مورد مطالعه افزایش پیدا کرده و لازم است از طیف‌هایی با سطوح خطر بالاتر استفاده شود.

شاخص اپسیلون و اتا

اپسیلون فاصله‌ی بین مقدار طیف پاسخ شتاب یک شتاب نگاشت واقعی، $S_a(T)$ ، از مقدار پیش بینی شده با یک رابطه‌ی کاهندگی^۳، $S_a(T)$ ، است رابطه‌ی (۱). بنابراین اپسیلون ضریبی از انحراف معیار است که در صورتی که با طیف میانگین جمع شود طیف UHS را نتیجه خواهد داد.

$$V_{Sa}(T) = \frac{\ln Sa(T) - \sim_{\ln Sa}(M, R, T, n)}{\dagger_{\ln Sa(T)}} \quad (1)$$

اپسیلون بر اساس هر یک از معیارهای مختلف شدت زمین لرزه می‌تواند بخشی از اطلاعات نهفته در یک شتاب نگاشت را منعکس کند. به عبارت دیگر می‌توان تمام معیارهای شدت را مورد بررسی قرار داد و میزان تأثیر هر یک از اپسیلون‌های متناظر را بر روی پاسخ سازه بررسی نمود. اپسیلون رایج در محاسبات و تحقیقات بر مبنای یک معیار شدت در نظر گرفته شده‌اند و به دلیل اهمیت شتاب طیفی در پاسخ سازه آن معیار، شتاب طیفی فرض شده است. مخصوصاً برای سیستم‌هایی که حالت اول ارتعاشی در آن‌ها حالت غالب است (Shome and Cornell 1998). به تازگی شاخص اتا توسط موسوی و همکارانش ارائه گردیده که بر مبنای استفاده از تمام اپسیلون‌ها شکل گرفته است Mousavi et al. (2011). این شاخص هم‌بستگی بیش‌تری با پاسخ

1. Resonance factor
2. Uniform Hazard Spectrum (UHS)
3. Attenuation relation



غیرخطی سیستم سازه‌ای نشان داده است. به بیان دیگر هم‌بستگی میان شاخص اتا و پاسخ غیرخطی سیستم سازه‌ای نزدیک به ۵۰ درصد افزایش پیدا کرده است. شاخص اتا در حقیقت یک ترکیب خطی از چند شاخص اسیلون است. البته مهم‌ترین معیارهای جنبش زمین که در شاخص اتا در نظر گرفته شده‌اند حداکثر شتاب طیفی و حداکثر سرعت زمین هستند. در این مطالعه یک بانک شتاب‌نگاشت مرجع مشتمل بر ۲۶۷ جفت شتاب‌نگاشت افقی با بزرگای بیش از ۵/۵ و فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر، در نظر گرفته شده است (Baker and Cornell (2006). مطابق با مطالعه‌ی Mousavi et al.(2011) برای مجموعه شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده شاخص اتا در نهایت از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$y = 0.472 + 2.730v_{Sa} - 2.247v_{PGV} \quad (2)$$

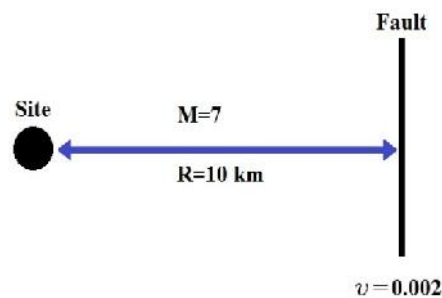
طیف میانگین شرطی بر اساس شاخص اتا^۴

در سال‌های اخیر طیف هدف میانگین شرطی^۵ توسط بیکر معرفی شده است. این طیف علاوه بر آن‌که بر مبنای تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی است از شاخص اسیلون به عنوان شاخص پیش‌بینی کننده شکل طیف نیز بهره برده است (Baker (2011). هنگامی که بتوان از اسیلون هدف برای پیش‌بینی دیگر اسیلون‌ها به واسطه ضریب هم‌بستگی میان اسیلون‌ها در زمان تناوب‌های مختلف بهره گرفت پیش‌بینی مقادیر شاخص اتا و شتاب طیفی نیز دور از دسترس نخواهد بود. در مطالعه شهری (۱۳۹۰) با استفاده از شاخص اتا طیف شرطی ECMS ارائه شده است. برای به دست آوردن مقدار شتاب طیفی کافی است با استفاده از روابط (۲) و (۳) عبارت Sa(T) از معادله (۴) استخراج شود. جایگزینی طیف‌های شرطی به جای UHS می‌تواند گامی موثر برای نزدیک شدن به برآورد واقع‌گرایانه‌ی پاسخ غیرخطی سازه‌ها باشد.

$$v(T_2) = \dots_{(v(T_1), v(T_2))} \times v(T_1) \quad (3)$$

$$Sa(T) = \exp\left(-\ln Sa + \frac{y^{target} + \ln Sa(T) (\dots_{(y(T), y(T^*))} + 1.730)}{2.730}\right) \quad (4)$$

برای ایجاد طیف هدف ساختگاه ایده‌آل شکل (۱) مد نظر است. سازه در فاصله ۱۰ کیلومتری از تنها منبع تولید زلزله قرار دارد. این گسل تنها قادر به تولید زلزله‌ای در هر ۲۰۰ سال یک بار با قدرت ۷ ریشتر می‌باشد. اسیلون هدف برای سطح خطر-۱ (احتمال رخداد ۱۰٪ در ۵۰ سال) ۰/۲ به دست آمده است. با استفاده از مشخصات ساختگاه و رابطه‌ی کاهندگی کمیل بزرگ‌نیا مطابق با روند مذکور مقادیر شتاب طیفی محاسبه گردیده و به عنوان طیف هدف شرطی بر اساس شاخص اتا در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است (Campbell and Bozorgnia (2008).



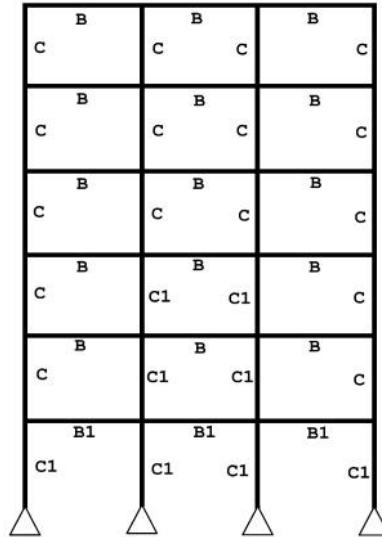
شکل ۱: ساختگاه ایده‌آل فرضی برای به دست آوردن طیف هدف

هندسه سازه و مدل سازی

در راستای هدف مطالعه پیش‌رو از سازه‌ای فولادی با زمان تناوب ۱/۲۱ ثانیه، قاب خمشی سه دهانه (هر دهانه ۵ متر) و شش طبقه (ارتفاع هر طبقه ۴ متر) استفاده شده است. سازه با شکل پذیری و اهمیت متوسط به روش طراحی حدی طبق ضوابط آیین‌نامه مبحث دهم طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی طراحی شده است (ANSI/AISC (2005) and INBC (1992). مقاطع مورد استفاده در جدول (۱) ذکر شده است.

4. Eta-based Conditional Mean Spectrum (ECMS)

5. Conditional Mean Spectrum (CMS)



شکل ۲: هندسه سازه مورد استفاده.

جدول ۱: مقاطع استفاده شده در سازه

C	IPE400
C1	IPE600
B	IPE400
B1	IPE500

این سازه در نرم افزار SAP2000 14.2.2 به صورت خطی طراحی و سپس برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به نرم افزار Perform 3D منتقل شده است. در جدول (۲) بارگذاری ثقلی و ضریب زلزله مورد استفاده جهت طراحی سازه آمده است.

جدول ۲: اطلاعات و فرضیات طراحی

بار مرده	۲۴۰۰ Kg/m
بار زنده	۸۰۰ Kg/m
ضریب زلزله	۰.۱۳۵

برای انجام تحلیل غیرخطی باید مدل بکار گرفته شده در تحلیل های خطی با در نظر گرفتن مقاومت اعضا و رفتار فرا ارتجاعی آن ها ارتقا یابد. قبل از انجام تحلیل غیرخطی باید بار ثقلی برای اصلاح ماتریس سختی قبل از اعمال بار فوق العاده به مدل ساختمان اعمال گردد (FEMA356 (2000)). مشخصات غیرخطی اعضا در مدل سازی باید به لحاظ مقاومت، سختی و شکل پذیری با داده های آزمایشگاهی و یا مدل های تحلیلی معتبر سازگار باشد. رابطه نیرو-تغییر شکل اعضا را می توان حداقل به صورت دو خطی در نظر گرفت و یا از روابط داده شده در دستورالعمل FEMA356 استفاده کرد. در تعیین روابط نیرو-تغییر شکل برای اعضای ساختمان اثرات نیروهای محوری ناشی از بارهای ثقلی باید در نظر گرفته شود. در نرم افزار مورد استفاده، المان های تیر و ستون مطابق معیارهای دستورالعمل FEMA356 تحت عنوان FEMA Beam و FEMA Column موجود می باشند. رفتار دوخطی E-P.P^c برای فولاد مورد استفاده در این مدل سازی در نظر گرفته شده است.

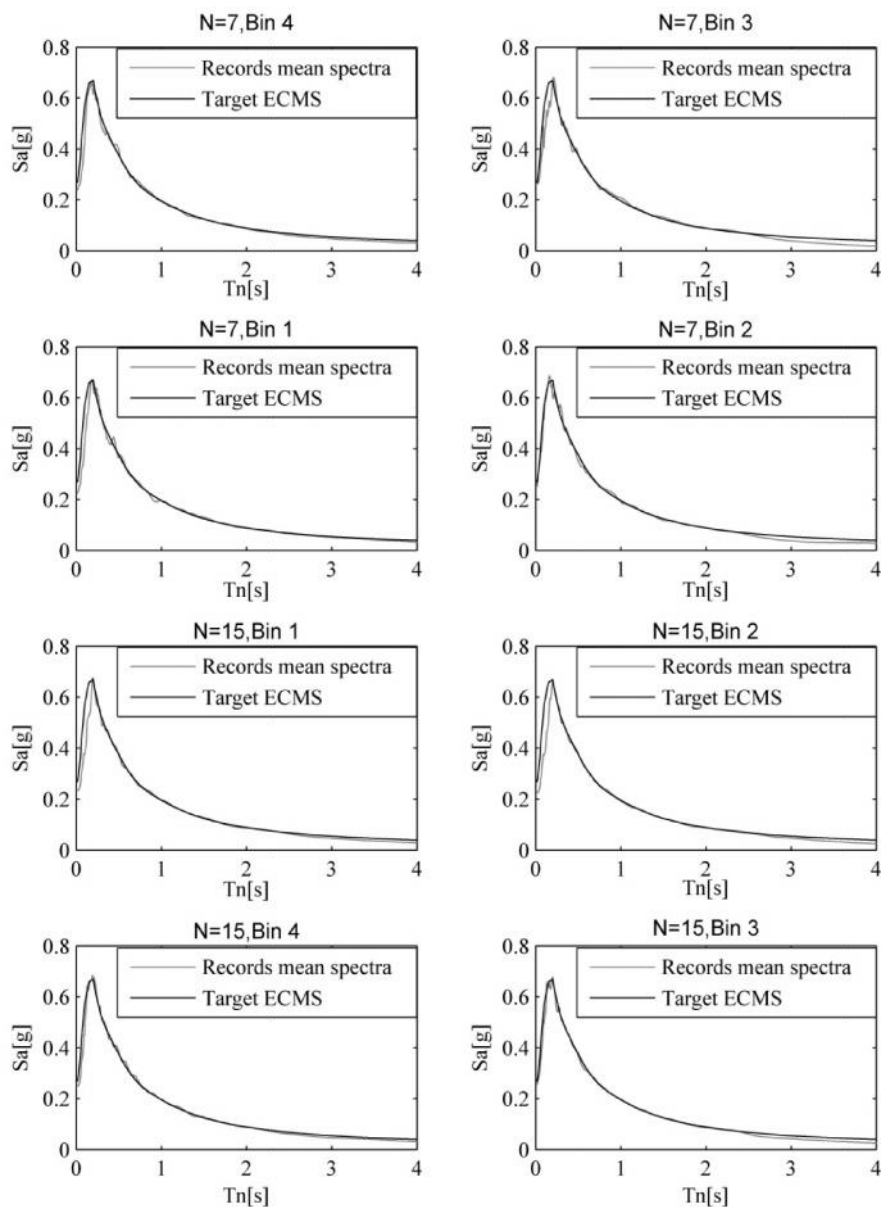
انتخاب شتاب نگاشت ها

برای انتخاب شتاب نگاشت ها به کمک الگوریتم ژنتیک، با شناخت کافی نسبت به نحوه انتخاب و روند آن، تابع هدفی متناسب با هدف بهینه سازی در نظر گرفته می شود. بهینه سازی نیز می تواند توسط توابع هدف اختلاف مقادیر طیف هدف و طیف شتاب نگاشت های انتخابی در محدوده ای خاص مدنظر باشد. همچنین این امکان وجود دارد که هدف حداقل شدن ناحیه محدود بین دو طیف باشد. تابع بهینه ساز می تواند به فرم معادلات (۵) و (۶) بیان شود (Naeim et al., 2004).

$$Z = \frac{\sum_{i=T_0}^{T_n} (S a_i^{target} - S a_i)^2}{N} \quad (5)$$

$$Z = \frac{\int_{T_0}^{T_n} |Sa^{target} - Sa| dT}{\int_{T_0}^{T_n} Sa^{target} dT} \times 100 \quad (6)$$

که در آن T_0 و T_n ابتدا و انتهای محدوده دوره تناوب مورد نظر جهت انطباق، N تعداد دوره تناوب های موجود در محدوده بررسی، Sa_i شتاب طیفی شتاب نگاشت و Sa^{target} شتاب طیفی متناظر طیف هدف هستند. در این مطالعه برای انتخاب شتاب نگاشت ها از تابع هدف طبق رابطه ی (۶) استفاده شده است. عمل انتخاب بدون استفاده از مقیاس کردن و هم پایه کردن انجام می شود. بدین صورت که ابتدا طیف هدف، تعداد شتاب نگاشت های مورد نیاز ($N=7, 15, \dots$) و بازه ای که انطباق در آن مد نظر است، تعیین و معرفی می گردند. بازه ای انطباق با فرض زمان تناوب هدف T برابر با $0.2T-2T$ در نظر گرفته شده است. الگوریتم موجود در برنامه از میان کلیه شتاب نگاشت های معرفی شده به دنبال N شتاب نگاشتی می گردد که میانگین طیف های آن ها کم ترین اختلاف را طبق تابع بهینه سازی با طیف هدف داشته باشد. برای هر دو حالت $N=7$ و 15 چندین بار عمل انتخاب انجام شده و برای هر یک چهار دسته شتاب نگاشت با کم ترین میزان خطا و اختلاف انتخاب شده است. در شکل (۳) برای تمامی دسته شتاب نگاشت های انتخاب شده به ازای تعداد هفت و پانزده، طیف میانگین شتاب نگاشت ها به همراه طیف هدف نشان داده شده است.

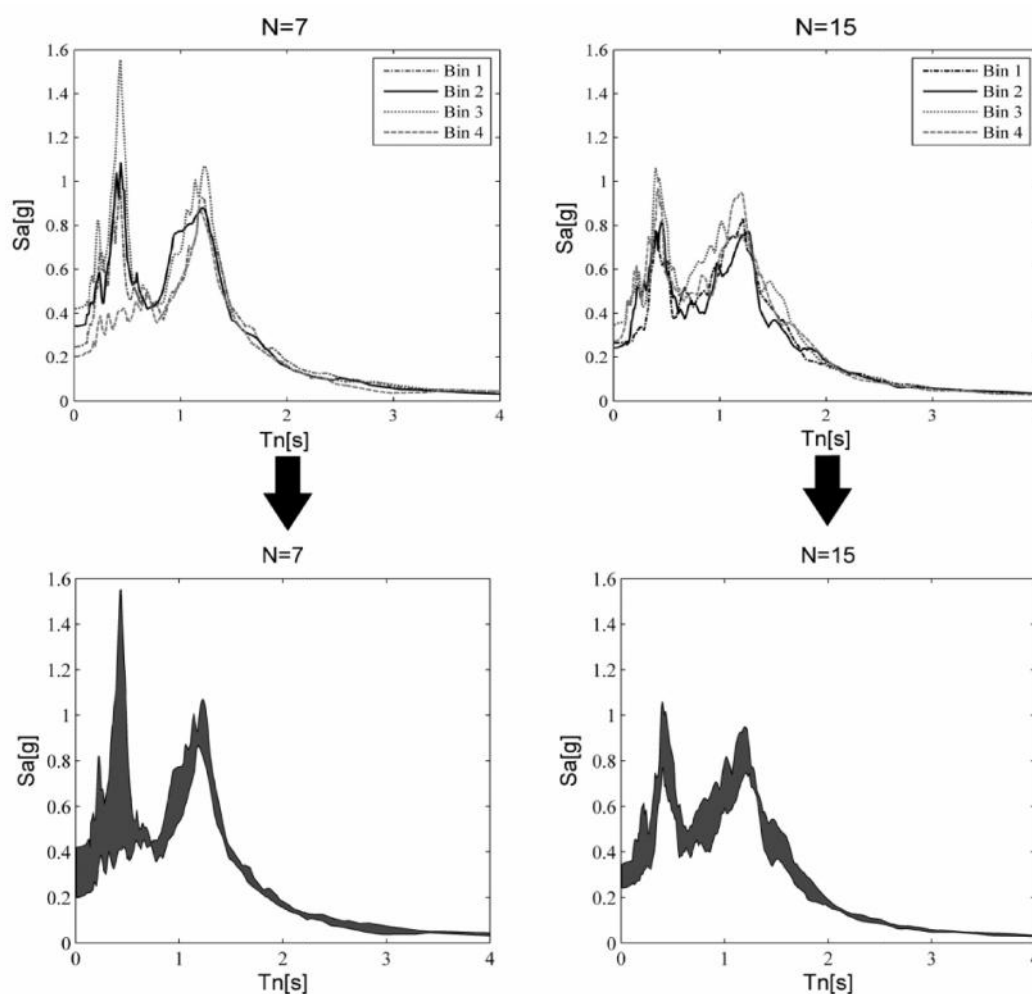


شکل ۳: انتخاب شتاب نگاشت ها دسته های هفت و پانزده تایی



مقایسه طیف‌های پاسخ طبقه

طیف‌های پاسخ طبقه حاصل از چهار دسته‌ی N تایی شتاب نگاشت با $N=7$ و 15 برای سازه مورد مطالعه مطابق با طیف هدف ECMS و سطح خطر-1 برای سیستم یک درجه آزادی با رفتار خطی محاسبه و در شکل (4) نشان داده شده است. از نتایج حاصل به نظر می‌رسد ضمن ثابت بودن تعداد شتاب نگاشت‌ها، طیف هدف و سطح خطر میان نتایج حاصل از دسته شتاب نگاشت‌های مختلف تفاوت غیرقابل چشم پوشی وجود دارد. همچنین با توجه به نتایج حاصل برای دسته‌های هفت تایی و پانزده تایی، در این مطالعه تفاوت بین دسته‌های هفت تایی به میزان قابل توجهی بیشتر نیز می‌باشد. برای درک بهتر این تفاوت در هر یک از N ها بیشینه و کمینه پاسخ‌های هر چهار دسته در هر یک از زمان‌های تناوب به دست آمده و تفاوت میان این دو مقدار به صورت سطح محصور بین دو نمودار در شکل (4) نشان داده شده است. قسمت رنگی محصور شده نشان دهنده‌ای میزان تفاوتی است که امکان دارد با انتخاب یکی از چهار دسته موجود و استناد به نتایج حاصل از آن در مقدار شتاب طیفی حاصل از طیف پاسخ طبقه به وجود آید. این امکان نیز وجود دارد که با استفاده از تعداد بیشتری از دسته شتاب نگاشت‌ها و یا در سطوح خطر بالاتر این تفاوت بیش‌تر از حالت فعلی نمایان گردد. بیش‌ترین میزان تفاوت در دسته‌های هفت تایی $g/15$ و در دسته‌های $g/34$ می‌باشد.



شکل 4: طیف‌های طبقه حاصل از دسته‌های مختلف هفت و پانزده تایی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه چهار دسته‌ی هفت تایی و چهار دسته‌ی پانزده تایی شتاب نگاشت برای سطح خطر-1 و مطابق با طیف هدف شرطی بر اساس شاخص اتا انتخاب شده‌اند. با استفاده از شتاب نگاشت‌های انتخاب شده و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی یک قاب خمشی فولادی با زمان تناوب $1/21$ ثانیه، طیف پاسخ طبقه برای هر دسته از شتاب نگاشت‌ها محاسبه شده است. در نتایج حاصل با وجود ثابت بودن شرایط انتخاب برای دسته شتاب نگاشت‌های مختلف، پراکندگی و تفاوت غیرقابل چشم پوشی مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد اگر برای محاسبه طیف پاسخ طبقه انتخاب شتاب نگاشت‌ها با استفاده از رویکرد مورد استفاده در این مطالعه انجام شود، نتایج حاصل از آن چالش برانگیز است. ارائه راه‌کار و نتیجه‌گیری جامع نیازمند مطالعات بیش‌تر می‌باشد.



- ANSI/AISC 360-05, (2005) Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, inc., Chicago, Illinois 60601-1802.
- ASCE7-5, (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, Reston, VA.
- Asfura, A. and A. Der Kiureghian (1986) 'Floor response spectrum method for seismic analysis of multiply supported secondary system', J. Earthquake Eng. Struct. Dyn, 14, 245-265
- 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), pp. 1193-1217.
- Baker, J.W., (2011) Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. Journal of Structural Engineering. 137(3): p. 322-331.
- Baker, J.W., Cornell, C.A, (2006) Spectral shape, epsilon and record selection. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 35(9): p. 1077-1095.
- Campbell, K.W., 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): p. 139-171.
- CEN, Eurocode 8 (2005): Design of structures for earthquake resistance, in Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels, Belgium.
- Chaudhuri ; S. R. ; Villaverde; R. (2008); "Effect of Building Nonlinearity on Seismic Response of Nonstructural Components: A Parametric Study" ; Journal Of Structural Engineering ASCE.
- FEMA356, (2000) Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings.: SAC Joint Venture. Prepared for the Federal Emergency Management Agency: Washington, DC.
- INBC (1992), "Iranian National Building Code (INBC), Part 10: Steel Structures" Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.
- Marcelo Oropeza ., Pascale Favez., Pierino Lestuzzi., (2010) Seismic response of nonstructural components in case of nonlinear structures based on floor response spectra method., Bull Earthquake Eng 8:387~400.
- Medina ; R. A. ; Sankaranarayanan ; R. ; Kingston K. M. (2006) ; "Floor Response Spectra for Light Components Mounted on Regular Moment-Resisting Frame Structures".
- Miranda ; E. ; Taghavi ; SH. (2004) ; "Approximate Floor Acceleration Demands in Multistory Buildings. II: Applications; Journal of Structural Engineering"; Volume 131.
- Moon Shik Park., (2007) Assessment of floor response spectrum by parametric error estimation and its application to a spring-mounted reactor vessel assembly. Journal of Mechanical Science and Technology 21 2091~2100.
- Mousavi, M., Ghafory-Ashtiany, M., Azarbakht, A, (2011) A new indicator of elastic spectral shape for the reliable selection of ground motion records. Earthquake Engineering & Structural Dynamics.
- Naeim . F (2001) ; The Seismic Design Handbook;ch13;
- Naeim, F., Alimoradi, A .,Pezeshk, S,(2004) Selection and scaling of ground motion earthquakes for structural design using genetic algorithms. Earthquake Spectra. 20(2): p. 413-426.
- Shome, N., Cornell, C.A, (1998) Earthquakes, Records, and Nonlinear Responses. Earthquake Spectra., 14(3): p. 469.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1975), Standard Review Plan, NUREG-75/087, Nov.
- Vladimir Vukobratovi'c., Peter Fajfar.,(2014) A method for the direct determination of approximate floor response spectra for SDOF inelastic structures. Bull Earthquake Eng.,.

شهری م (۱۳۹۰) "طیف میانگین شرطی بر اساس شاخص اتا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، اراک.