



معاونت پژوهشی و فناوری

گزارش نهایی طرح تحقیقاتی

تعیین ضریب مقیاس رگوردهای زلزله در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه‌های ساختمانی با استفاده از نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مجریان طرح:

کاظم شاکری و محتشم محبی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی

این طرح با تصویب و حمایت مالی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق

اردبیلی اجرا گردیده است

زمستان 1394

چکیده طرح:

در سال‌های اخیر مهندسی زلزله بر اساس عملکرد به عنوان یک روش کارآمد مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. با توجه به اینکه در سطوح پایین عملکردی سازه وارد ناحیه غیرخطی شده و تغییرشکل‌های غیرالاستیک می‌دهد، بنابراین انجام تحلیل‌های غیرخطی به منظور تخمین پاسخ‌های سازه‌ای اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دقیق‌ترین روش تحلیل غیرخطی می‌باشد. انتخاب رکوردهای زلزله مورد استفاده و نحوه‌ی مقیاس کردن آن‌ها از چالش‌های مهم این نوع تحلیل می‌باشد. رکوردهای زلزله باید به شکلی انتخاب و مقیاس شوند که میانگین پاسخ‌های حاصل از تعداد محدودی رکورد انتخابی مقیاس شده، نزدیک به میانگین پاسخ‌های حاصل از تعداد زیادی رکورد مقیاس نشده‌ی سازگار با شرایط زمین‌ساختی منطقه (به عنوان نتیجه‌ی دقیق) بوده و پراکندگی پاسخ‌ها تحت اثر هر یک از رکوردهای مقیاس شده نسبت به میانگین پاسخ‌های حاصل از تمامی رکوردهای مورد استفاده، به حداقل ممکن برسد.

در این تحقیق روش جدیدی برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله با در نظر گرفتن مشخصه‌های رفتار غیرخطی سازه‌ها پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی به منظور در نظر گرفتن مشخصات سازه‌ی چند درجه آزادی و نیز کاهش حجم عملیات محاسباتی، سازه‌ی چند درجه آزادی به سازه‌ی یک درجه آزادی معادل غیرالاستیک تبدیل شده و رکوردها به نحوی مقیاس می‌گردند که تغییر مکان حداکثر سازه‌ی یک درجه آزادی معادل غیرالاستیک، برابر با تغییر مکان هدف غیرالاستیک گردد. پارامترهای مشخصه‌ی سیستم یک درجه آزادی معادل از تحلیل بارافزون بر اساس برش مودال طبقات بدست می‌آید. در محاسبه الگوی بار بر اساس برش مودال طبقات، اثر مدهای بالاتر و اندرکنش بین مدها و نیز مشخصات رکورد مورد استفاده لحاظ می‌گردد.

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، این روش بر روی چهار سازه‌ی 4، 8، 14 و 20 طبقه به کار گرفته شده و با روش استاندارد 2800 مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی بالا بودن دقت روش

پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های سازه‌ای و کم بودن پراکندگی پاسخ‌های حاصل از آن در مقایسه با پاسخ‌های حاصل از روش استاندارد 2800 می‌باشد.

کلید واژه‌ها: تحلیل تاریخچه زمانی، رفتار غیرخطی سازه‌ها، مقیاس کردن رکوردهای زلزله، منحنی بارافزون

سپرس مطالب

شماره و عنوان مطالب	صفحه
فصل اول: مقدمه و هدف	
1-1- ضرورت و اهمیت پژوهش	2
1-2- هدف پژوهش	3
فصل دوم: پیشینه‌ی پژوهش	
2-1- پیشینه‌ی پژوهش	5
فصل سوم: روش پیشنهادی و مدل‌سازی	
3-1- روش پیشنهادی SSSP	11
3-1-1- مراحل گام به گام روش پیشنهادی SSSP	12
3-1-2- مدل‌های سازه‌ای	15
3-1-3- مشخصات رکوردهای مورد مطالعه	21
فصل چهارم: ارزیابی روش‌های مورد مطالعه	
4-1- ارزیابی روش پیشنهادی	26
4-2- ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش SSSP	26
4-3- ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش استاندارد 2800	30
4-4- ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی SSSP در مقایسه با روش استاندارد 2800	34
فصل پنجم: نتیجه‌گیری	
5-1- نتیجه‌گیری	49

فهرست جدول‌ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
جدول 3-1: مشخصات مقاطع مورد استفاده در طراحی سازه‌ها	17
جدول 3-2: مشخصات رکوردهای مورد مطالعه	22
جدول 3-3: رکوردهای انتخابی هریک از سه مجموعه رکورد زلزله	23
جدول 4-1: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش SSSP برای رکوردهای مجموعه‌ی 1	29
جدول 4-2: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش SSSP برای رکوردهای مجموعه‌ی 2	29
جدول 4-3: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش SSSP برای رکوردهای مجموعه‌ی 3	30
جدول 4-4: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش استاندارد 2800 برای رکوردهای مجموعه‌ی 1	33
جدول 4-5: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش استاندارد 2800 برای رکوردهای مجموعه‌ی 2	33
جدول 4-6: ضرایب مقیاس محاسبه شده به روش استاندارد 2800 برای رکوردهای مجموعه‌ی 3	33

فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان شکل	صفحه
شکل 3-1: پلان سازه‌های مورد مطالعه	16
شکل 3-2: شکل مقاطع مورد استفاده برای تیرها و ستون‌ها	17
شکل 3-3: شکل هندسی سازه‌های 4 و 8 طبقه	18
شکل 3-4: شکل هندسی سازه‌های 14 و 20 طبقه	19
شکل 3-5: منحنی تنش-کرنش مصالح steel 01	20
شکل 3-6: مدل رفتار چرخه‌ای مصالح steel 01 بدون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک	21
شکل 3-7: طیف پاسخ شتاب هر یک از 21 رکورد زلزله و طیف میانگین آن‌ها (طیف طرح)، $\xi = 5\%$	24
شکل 4-1: حداکثر تغییر مکان بام محاسبه شده به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر هر یک از 21 رکورد زلزله که بر روی منحنی بارافزون مد اول هر یک از سازه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است	27
شکل 4-2: حداکثر تغییر مکان سازه‌ی یک درجه آزادی معادل غیرالاستیک مورد استفاده در روش پیشنهادی تحت اثر هر یک از 21 رکورد انتخابی (D)، خط افقی نشان‌دهنده‌ی مقادیر میانگین می‌باشد (\bar{D})	28
شکل 4-3: متوسط طیف‌های پاسخ رکوردهای مقیاس شده به روش استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای هر یک از سازه‌های: (a) 4 طبقه، (b) 8 طبقه، (c) 14 طبقه، (d) 20 طبقه	32
شکل 4-4: میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 4 طبقه	36
شکل 4-5: میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 8 طبقه	37

- شکل 4-6: میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 14 طبقه
- 38
- شکل 4-7: میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 20 طبقه
- 39
- شکل 4-8: نسبت میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه به پاسخ معیار و برای سازه‌ی 4 طبقه
- 40
- شکل 4-9: نسبت میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه به پاسخ معیار و برای سازه‌ی 8 طبقه
- 41
- شکل 4-10: نسبت میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه به پاسخ معیار و برای سازه‌ی 14 طبقه
- 42
- شکل 4-11: نسبت میانگین پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه به پاسخ معیار و برای سازه‌ی 20 طبقه
- 43
- شکل 4-12: پراکندگی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 4 طبقه
- 44
- شکل 4-13: پراکندگی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 8 طبقه
- 45
- شکل 4-14: پراکندگی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 14 طبقه
- 46

شکل 4-15: پراکندگی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده به روش‌های SSSP و استاندارد 2800 در هر یک از سه مجموعه رکورد هفت‌گانه و برای سازه‌ی 20 طبقه

فصل اول:

مقدمه و هدف

1-1- ضرورت و اهمیت پژوهش

به دلیل ماهیت دینامیکی بارهای زلزله، تحلیل دینامیکی سازه‌ها در برابر زلزله به منظور تخمین پاسخ‌های سازه‌ای اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در طول سالیان گذشته مطالعات متعددی برای شناخت زلزله و رفتار لرزه‌ای سازه‌ها انجام یافته است. هدف از این مطالعات، بهبود عملکرد رفتار سازه در مقابل زلزله بوده و نتیجه‌ی آن، تغییر و تکامل آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای و کاهش اثرات نامطلوب زلزله می‌باشد.

از آنجائیکه طراحی سازه‌ها در مقابل زلزله طبق آیین‌نامه‌های موجود بر اساس نیروهای کاهش یافته می‌باشد، انتظار می‌رود که سازه تحت اثر زلزله‌های شدید وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده و با تغییر شکل‌های پلاستیک در چرخه‌های رفت و برگشتی به جذب و استهلاک انرژی بپردازد. با ورود سازه به ناحیه‌ی غیرخطی، کنترل پاسخ سازه بر اساس پارامتر جابجایی دقیق‌تر از پارامترهای نیرویی خواهد بود. لذا در رویکردی جدید، آیین‌نامه‌های طراحی در حال گذر از حالت کنترل نیرویی به حالت کنترل جابجایی و طراحی بر اساس عملکرد می‌باشند. بنابراین انجام تحلیل‌های غیرخطی برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های موجود و نیز طراحی سازه‌های جدید، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دقیق‌ترین روش تحلیل سازه‌ها می‌باشد که استفاده از آن برای تعیین رفتار لرزه‌ای سازه‌ها و تخمین پارامترهای نیاز مهندسی (EDP)¹ از جمله: جابجایی بام، جابجایی نسبی طبقات، نیروی اعضا و غیره، روز به روز در حال افزایش می‌باشد. اما نتایج حاصل از این روش به شدت وابسته به رکورد زلزله‌ی انتخابی جهت تحلیل بوده و ممکن است برای رکوردهای مختلف، پاسخ‌هایی با اختلاف زیاد حاصل شود.

برای استفاده مطلوب از تحلیل تاریخچه زمانی، علاوه بر اینکه باید نسبت به زلزله و رفتار سازه در برابر آن شناخت نسبی داشت، رکوردهای مورد استفاده را نیز باید با روش مناسبی مقیاس نمود. به نحوی که استفاده از آن روش منجر به تخمین پاسخ‌های سازه‌ای با دقت قابل قبولی شود و علاوه بر آن، پراکندگی پاسخ‌های حاصل تحت اثر هر یک از رکوردهای مقیاس شده نسبت به متوسط پاسخ‌های حاصل از تمامی رکوردهای مورد استفاده کم باشد. روش‌های مختلفی برای مقیاس نمودن رکوردهای زلزله پیشنهاد شده است که هر یک دارای مزایا و

¹ Engineering Demand Parameters

معایی هستند. با توجه به اهمیت روش مقیاس کردن رکوردهای زلزله در تحلیل تاریخچه زمانی و تأثیر آن در مقادیر پاسخ‌های سازه‌ای، انجام مطالعات برای ارزیابی روش‌های موجود و ارائه‌ی روشی جدید برای بهبود عملکرد روش تحلیل تاریخچه زمانی لازم و ضروری می‌باشد.

2-1- هدف پژوهش

برای استفاده مطلوب از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تعیین پاسخ‌های سازه‌ای تحت اثر رکوردهای انتخاب شده، این رکوردها باید به شکل مناسبی مقیاس گردند. به همین دلیل است که نحوه‌ی انتخاب و مقیاس کردن رکوردها، موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در سال‌های اخیر بوده است. برای ارزیابی دقت و کارایی روش‌های مختلف، متوسط نتایج و همچنین پراکندگی پاسخ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این راستا روش مقیاسی مطلوب و مورد قبول است که هم منجر به تخمین پاسخ‌های سازه‌ای با دقت قابل قبول گردد و هم پراکندگی پاسخ‌ها تحت اثر هر یک از رکوردهای مقیاس شده کم باشد.

در این پژوهش روش جدیدی برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله با در نظر گرفتن مشخصه‌های رفتار غیرخطی سازه‌ها و به منظور افزایش دقت روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در تخمین پاسخ‌های سازه‌ای و کاهش پراکندگی پاسخ‌ها پیشنهاد می‌شود

فصل دوم:

پیشینه‌ی پژوهش

1-2- پیشینه ی تحقیق

مقیاس کردن براساس شتاب حداکثر زمین ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین روش جهت مقیاس کردن رکوردهای زلزله می‌باشد. در این روش رکورد زلزله بر شتاب حداکثر آن (1PGA) تقسیم شده و سپس در شتاب مبنای طرح منطقه ضرب می‌شود. بدین ترتیب رکورد مقیاس شده به نحوی بدست می‌آید که حداکثر شتاب آن برابر با حداکثر شتاب محتمل منطقه در سطح خطر مورد نظر باشد. به طور مشابه می‌توان از مقادیر حداکثر سرعت و جابجایی زمین برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله نیز استفاده نمود (مقدم، 1389).

نثار و کراوینکلر (1991) در مطالعه‌ای که برای تعیین رابطه‌ی بین R_{μ} (ضریب کاهش برش پایه ناشی از شکل‌پذیری) با μ (ضریب شکل‌پذیری) و T (زمان تناوب سازه) انجام دادند، رکوردهای زلزله را به حداکثر شتاب $0/4g$ (سازگار با شتاب مبنای منطقه‌ای) مقیاس نمودند. در این مطالعه پراکندگی زیادی بخصوص برای مقادیر بالای R_{μ} در پاسخ‌ها مشاهده شد. همچنین میراندا (1993) نشان داده است که با مقیاس کردن رکوردهای زلزله بر اساس حداکثر شتاب آن‌ها، پراکندگی پاسخ‌ها با افزایش زمان تناوب بیشتر می‌شود. علاوه بر آن، ناو و هال (1984) و نیز شوم و کرنل (1998) در مطالعات جداگانه‌ای نشان دادند که این روش مقیاس کردن رکوردها که هیچ مشخصه‌ای از سازه را در نظر نمی‌گیرد، پاسخ غیر صحیح و با پراکندگی زیاد در مقادیر EDP ارائه می‌دهد، مگر اینکه از تعداد زیادی رکورد زلزله استفاده شود.

برای در نظر گرفتن مشخصات سازه‌ها در مقیاس کردن رکوردهای زلزله، شوم و همکارانش (1998) روشی را به کار بردند که در آن رکوردها بر اساس مقدار میانگین شتاب طیفی خطی با میرایی 5٪ در زمان تناوب اصلی سازه ($S_a(T)$) مقیاس می‌شوند. در این روش مقدار شتاب طیفی حاصل از هر یک از رکوردها در زمان تناوب اصلی سازه تعیین شده و میانگین آن‌ها محاسبه می‌گردد. ضریب مقیاس هر رکورد به نحوی تعیین می‌شود که میزان شتاب طیفی رکورد مورد نظر در زمان تناوب اصلی سازه برابر با میانگین حاصل گردد. مهانی (1999) و همچنین علوی و کراوینکلر (2000) در مطالعات جداگانه‌ای نشان دادند که این روش برای سازه‌هایی که مد اول در آن‌ها غالب است، مناسب بوده و برای سازه‌هایی که اثر مدهای بالاتر در آن‌ها قابل توجه بوده و نیز سازه‌هایی که وارد ناحیه غیرخطی شده و تغییر شکل غیرالاستیک می‌دهند، روش مناسبی نمی‌باشد. همچنین کوراما و فارو نشان دادند که حداکثر جابجایی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر رکوردهای زلزله‌ی مقیاس شده به این

روش پراکندگی بالایی دارند، بخصوص در مواردی که سازه برای تحمل تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی بالا طراحی شده باشد (2003).

بکر و کرنل (2005) برای بهبود روش مقیاس کردن رکوردهای زلزله بر اساس میانگین شتاب طیفی خطی در زمان تناوب اصلی سازه، شاخص شدت برداری را تعریف نمودند که شامل شتاب طیفی زمان تناوب اصلی سازه و پارامتری به نام اپسیلون (ϵ) است. اپسیلون نشان دهنده‌ی شکل طیف در نزدیکی زمان تناوب مورد نظر می‌باشد. اگرچه استفاده از پارامتر ϵ منجر به کاهش پراکندگی پاسخ‌های حاصل می‌شود، ولی روش مذکور برای زلزله‌های نزدیک گسل مناسب نمی‌باشد (بکر و کرنل، 2006، 2008).

در آیین‌نامه‌ی ASCE 7-05 (2005) روش مقیاس کردن رکوردها برای تحلیل‌های دو بعدی و سه بعدی به طور جداگانه مطرح شده است. در تحلیل دو بعدی یک مؤلفه از هر زمین‌لرزه انتخاب شده و ضریب مقیاس به نحوی تعیین می‌گردد که متوسط طیف‌های پاسخ رکوردها که با اعمال نسبت میرایی 5٪ بدست آمده‌اند، در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ در هیچ حالتی کمتر از مقدار نظیر آن در طیف طرح نباشد (T زمان تناوب اصلی سازه است). در تحلیل‌های سه بعدی دو مؤلفه از هر زمین‌لرزه به کارگرفته شده و طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج رکوردها با اعمال نسبت میرایی 5٪ مشخص می‌گردد. طیف‌های پاسخ هر زوج رکورد با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته می‌شود. طیف‌های پاسخ ترکیبی حاصل از حداقل سه زوج رکورد، متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ با طیف طرح استاندارد مقایسه می‌گردد. هر زوج رکورد چنان مقیاس می‌شود که در این محدوده مقدار متوسط طیف‌های ترکیبی بیش از 10 درصد از $1/3$ برابر مقدار متناظر طیف طرح کمتر نشود.

روش مقیاس کردن رکوردهای زلزله در آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 (2010) مشابه ASCE 7-05 است، با این تفاوت که هر زوج رکورد در تحلیل سه بعدی در آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 به نحوی مقیاس می‌شود که متوسط طیف‌های ترکیبی در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ در هیچ حالتی کمتر از مقدار نظیر آن در طیف طرح نباشد.

از آنجائیکه در آیین‌نامه‌ی ASCE حد پایین متوسط طیف‌های رکوردهای مقیاس شده مورد توجه بوده و در مورد حد بالای آن ضابطه‌ای ارائه نشده است، کلکن و چوپرا (2010a) روشی را جهت مقیاس کردن رکوردها در تحلیل دو بعدی و بر اساس این آیین‌نامه پیشنهاد دادند که در آن برای هر یک از رکوردهای انتخابی در ابتدا یک

ضریب مقیاس اولیه محاسبه می‌شود. ضریب مقیاس اولیه‌ی هر یک از رکوردها با مینیمم کردن فاصله‌ی بین طیف پاسخ هر رکورد با طیف طرح در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ و با استفاده از روش حداقل مربعات محاسبه می‌گردد. مربع مجموع این فاصله‌ها برابر است با:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n [\bar{A}_i - (SF \cdot A_i)]^2 \quad (2-1)$$

که در آن، \bar{A}_i شتاب طیفی طرح و A_i شتاب طیفی رکورد مقیاس نشده در زمان تناوب i ام می‌باشند. n تعداد زمان تناوب‌های انتخابی در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ است. با برقراری رابطه‌ی $d\lambda/dSF \cong 0$ ضریب مقیاس SF که λ را مینیمم می‌کند با استفاده از رابطه‌ی (2) محاسبه می‌شود:

$$SF = (\sum_{i=1}^n (\bar{A}_i \cdot \bar{A}_i)) / (\sum_{i=1}^n (\bar{A}_i \cdot A_i)) \quad (2-2)$$

باید توجه داشت که ضریب مقیاس اولیه‌ی حاصل از رابطه‌ی (2-2)، طیف پاسخ رکورد مقیاس شده‌ی اولیه را به طیف طرح در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ نزدیک می‌کند ولی ممکن است متوسط طیف‌های پاسخ رکوردهای مقیاس شده‌ی اولیه، پایین‌تر از طیف طرح در این محدوده باشد. در این حالت لازم است که تمامی رکوردها به میزان یکسانی افزایش داده شوند (علاوه بر ضریب مقیاس اولیه‌ی حاصل از رابطه‌ی (2-2) که برای هر یک از رکوردها متفاوت است) تا متوسط طیف‌های مقیاس شده بالاتر از طیف طرح قرار گیرد. بدین ترتیب تمام محدودیت‌های آیین‌نامه‌ی ASCE رعایت می‌شود.

طبق استاندارد 2800 ایران رکوردهای به کار برده شده در تحلیل تاریخچه زمانی باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله باشند. از این رو برای دستیابی به هدف یاد شده باید حداقل سه زوج رکورد متعلق به مؤلفه‌های افقی سه زلزله مختلف ثبت شده که ویژگی‌های زیر را دارند انتخاب نمود:

(1) رکوردها متعلق به زلزله‌هایی باشند که ارضا کننده‌ی شرایط زلزله‌ی طرح باشند و در آن‌ها آثار: بزرگا،

فاصله از گسل، ساز و کار چشمه لرزه‌زا در نظر گرفته شده باشد.

(2) ساختگاه‌های رکوردها باید به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی، لرزه‌شناسی و به ویژه مشخصات لایه‌های خاک با زمین محل ساختمان، تا حد امکان، دارای شباهت باشند.

(3) مدت زمان حرکت شدید زمین در رکوردها حداقل باید برابر بیشترین یکی از دو مقدار 10 ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه باشد. مدت زمان حرکت شدید رکوردها را می‌توان از روش‌هایی از قبیل روش توزیع تجمعی انرژی، بدست آورد.

چنانچه سه زوج رکورد ثبت شده با مشخصات مورد نظر در دسترس نباشند، می‌توان به جای آن‌ها از زوج‌های مناسب رکوردهای شبیه‌سازی شده‌ی مصنوعی استفاده کرد.

روش مقیاس کردن رکوردهای زلزله در استاندارد 2800 ایران مشابه روش آیین‌نامه‌ی ASCE 7-05 در تحلیل سه بعدی است. با این تفاوت که طبق استاندارد 2800، رکوردهای زلزله در ابتدا به مقدار حداکثر خود مقیاس شده و ضریب مقیاس به نحوی محاسبه می‌شود که در محدوده زمان تناوب‌های $0/2T$ و $1/5T$ ، مقادیر متوسط طیف‌های ترکیبی زوج رکوردها حداقل مساوی $1/4$ برابر مقدار نظیر آن در طیف طرح استاندارد باشد. ضریب مقیاس محاسبه شده، به رکوردهایی که به مقدار حداکثر خود مقیاس شده‌اند اعمال شده و در تحلیل تاریخیچه زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به منظور لحاظ کردن مشخصه‌های رفتار غیرخطی سازه‌ها در مقیاس کردن رکوردهای زلزله، محققان مطالعات مختلفی را انجام داده و روش‌هایی را پیشنهاد داده‌اند که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

کوراما و فارو (2003) رکوردهای زلزله را بر اساس میانگین متوسط شتاب طیفی در محدوده‌ی زمان تناوب‌های خطی و غیرخطی مد اول سازه مقیاس نمودند. در این روش شتاب طیفی متوسط در محدوده‌ی زمان تناوب‌های خطی و غیرخطی مد اول سازه $(S_a(T_1 \rightarrow T_{\mu}))$ برای هر یک از رکوردها محاسبه شده و میانگین این متوسط‌ها محاسبه می‌گردد. سپس ضریب مقیاس به نحوی تعیین می‌شود که متوسط شتاب طیفی هر رکورد در محدوده‌ی زمان تناوب‌های خطی و غیرخطی مد اول سازه برابر با مقدار میانگین محاسبه شده گردد. در این روش پراکندگی پاسخ‌ها در زمان تناوب‌های بالا، زیاد می‌باشد.

در دستورالعمل FEMA 440 (2005) ضریب مقیاس به نحوی محاسبه می‌گردد که تغییر مکان حداکثر مرکز جرم بام در تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکورد مقیاس شده، برابر با تغییر مکان هدف تعیین

شده از تحلیل استاتیکی غیرخطی شود. برای محاسبه‌ی تغییر مکان هدف از روش ضرایب و یا روش طیف ظرفیت که به ترتیب در FEMA 356 (2000) و ATC 40 (1996) ارائه شده است، استفاده می‌گردد.

کلکن و چوپرا روش MPS¹ را برای انتخاب و مقیاس کردن رکوردهای زلزله ارائه دادند. در این روش با در نظر گرفتن حد تسلیم سازه و رفتار غیرخطی آن، رکوردها به نحوی مقیاس می‌شوند که حداکثر جابجایی سازه‌ی یک درجه آزادی معادل غیرالاستیک سازگار با مد اول سازه تحت اثر رکورد مقیاس شده، برابر با جابجایی حاصل از طیف غیرالاستیک گردد. مشخصات سازه‌ی یک درجه آزادی معادل غیرالاستیک مد اول از تحلیل بارافزون مودال متناسب با مد اول بدست می‌آید. کارایی و دقت این روش در مورد ساختمان‌های کوتاه، متوسط و بلند مرتبه در مقایسه با آیین‌نامه‌ی ASCE مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل حاکی از دقت مناسب آن می‌باشد (2010a, 2010b).

در مقایسه‌ی دو روش دستورالعمل FEMA 440 و MPS در مقیاس کردن رکوردهای زلزله، ذکر این نکته ضروری است که برای تعیین ضریب مقیاس به روش دستورالعمل FEMA 440، تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه‌ی چند درجه آزادی (سازه‌ی اصلی) انجام می‌یابد و از آنجائیکه باید تحلیل‌های متعددی با ضرایب مقیاس متفاوت انجام داد تا حداکثر تغییر مکان بام تحت اثر رکورد مقیاس شده برابر با تغییر مکان هدف تعیین شده گردد، تعیین ضریب مقیاس پروسه‌ای زمان‌بر و طولانی خواهد بود. ولی برای تعیین ضریب مقیاس به روش MPS، سازه‌ی چند درجه آزادی به سازه‌ی یک درجه آزادی معادل تبدیل شده و برای تعیین ضریب مقیاس، تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه‌ی یک درجه آزادی انجام می‌یابد تا زمانی که حداکثر تغییر مکان سازه‌ی یک درجه آزادی معادل تحت اثر رکورد مقیاس شده، برابر با تغییر مکان هدف غیرالاستیک گردد. بنابراین با توجه به ساده‌تر بودن مدل سازه‌ی یک درجه آزادی معادل نسبت به سازه‌ی چند درجه آزادی، تعیین ضریب مقیاس با روش MPS در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌یابد.

ریز و چوپرا روش مقیاس MPS را برای سازه‌های سه بعدی تحت اثر زلزله‌ها با دو مؤلفه‌ی افقی عمود بر هم توسعه داده و نشان دادند که با مقیاس کردن مؤلفه‌های هر رکورد با روش MPS و تعیین ضریب مقیاس جداگانه برای هر مؤلفه، پراکندگی پاسخ‌های کل حاصل از دو مؤلفه کاهش می‌یابد (2010).

Modal Pushover-based Scaling¹

Scaling of Ground Motion Records for Nonlinear RHA of Building Using Nonlinear Static Analysis

Kazem Shakeri and Mohtasham Mohebbi

Abstract

Nonlinear time history analysis is the most accurate method for seismic response analysis of structures and its performing for designing and evaluating purposes in some cases is inevitable. The most important issue in nonlinear time history analysis is the scaling method of ground motion records in order to have an accurate estimation of structural responses. In this paper a new method for scaling of ground motion records is proposed, in which the nonlinear behavior of structures is considered. In the proposed method named SNSP (Scaling based on Nonlinear Structural Properties), the scaling factor of each record is determined in a way that the peak displacement of the equivalent single degree of freedom (SDOF) system subjected to the scaled record matches the target displacement. The target displacement is determined by averaging the values of the peak displacement of the equivalent SDOF system subjected to a large number of unscaled ground motion records. The characteristic parameters of the equivalent SDOF system are determined based on the modal pushover analysis, in which the load pattern is derived from the modal story shear profile of the structure. Thus, in the equivalent SDOF system the effect of higher modes and the interaction between them in the inelastic phase are considered. Furthermore, the characteristics of the selected ground motion records are also considered by using their response spectra in the proposed scaling procedure. The accuracy and efficiency of the proposed method was verified through four 4-, 8-, 14- and 20-story buildings under 21 near fault records and compared with the scaling method of the Iranian code of practice for the seismic resistant design of buildings, Standard No.2800. Results show that the structural responses obtained from the proposed scaling method are close to the average responses considering site specific records and the dispersion of responses is low.

Key Words: Nonlinear time history analysis, Ground motion scaling, Nonlinear structural properties, Pushover



University of Mohaghegh Ardabili

Final Report of Research Project

**Scaling of Ground Motion Records for Nonlinear
RHA of Building Using Nonlinear Static Analysis**

By Kazem Shakeri and Mohtasham Mohebbi

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

**This Research Project Has Been Financially Supported by the Office
of Vice Chancellor for Research**

2016

