

مطالعه اثر شکل طیف زمین لرزه بر ظرفیت فروریزش سازه‌ها

محسن گرامی (نویسنده مسؤل)، دانشیار و عضو پژوهشکده فناوری‌های نوین دانشگاه سمنان، سمنان،

E-mail: mgerami@semnan.ac.ir

سجاد حیدری، دانشجوی دکتری دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده: یکی از چالش‌های پیش رو در زمینه تحلیل دینامیکی سازه‌ها در سطح فروریزش انتخاب رکورد مناسب برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه است. برای این منظور زمین‌لرزه انتخابی باید از زمین‌لرزه مورد استفاده در طراحی اولیه سازه شدیدتر باشد. انتظار می‌رود زمین‌لرزه‌ای که موجب فروریزش ساختمان‌های مدرن (سازه‌هایی که به دلیل نوع طراحی، دوره تناوب اصلی آن‌ها قبل از فروریزش افزایش می‌یابد) می‌گردد، دارای بزرگای زیاد و حرکت‌های شدید و ناگهانی باشد. تحقیقات اخیر نشان داده است که حرکت‌های شدید زمین موجب ایجاد بیشینه مقدار در دوره تناوب‌های بلند شکل طیف (*spectral shape*) خواهد شد. یکی از روش‌های موجود جهت محاسبه اثر شکل طیف، انتخاب یک مجموعه زمین‌لرزه بر اساس دوره تناوب اصلی ساختمان و مشخصات تحلیل خطر ساختگاه است. استفاده از این روش با چالش‌هایی همچون نیاز به انتخاب مجموعه‌های خاصی از زمین‌لرزه برای هر ساختمان روبه‌رو است. در این مقاله تلاش شده علاوه بر معرفی روش‌های موجود جهت اعمال اثر شکل طیف بر روی نتایج ظرفیت فروریزش، با ارائه مثال‌هایی ضمن مقایسه روش‌های مختلف مناسب‌ترین روش معرفی گردد.

کلیدواژه‌ها: شکل طیف، انتخاب زمین‌لرزه، اثر اپسیلون (*Epsilon*) و ارزیابی عملکرد ساختمان

1 - مقدمه

در دامنه نوسان‌های بزرگ می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد [3]؛ بنابراین زمانی که احتمال فروریزش سازه تحت دامنه نوسان‌های بزرگ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، انتخاب زمین‌لرزه بر روی نتایج ارزیابی فروریزش به‌طور قابل ملاحظه‌ای تأثیر می‌گذارد. یکی از روش‌های اعمال اثر شکل طیف بر روی پاسخ فروریزش سازه انتخاب زمین‌لرزه‌هایی است که یک اوج (*peak*) در دوره تناوب‌های بلند منحنی طیفی خود دارد [4]. برای این منظور مؤلفه اپسیلون معرفی گردید که در واقع نشان‌دهنده میزان انحراف معیار از منحنی طیف میانگین است. موسوی و همکاران [5] مؤلفه دیگری را بنام مؤلفه اتا (η) برای انتخاب رکورد معرفی نمودند که با استفاده از این مؤلفه می‌توان علاوه بر اثر اوج موجود در منحنی طیف شتاب، اثر اوج

یکی از چالش‌های بزرگ پیش‌رو در ارزیابی ظرفیت فروریزش سازه‌ها از طریق تحلیل دینامیکی غیرخطی، انتخاب و مقیاس نمودن زمین‌لرزه‌هاست. بیکر و کرنل [1] نشان دادند که علاوه بر شدت زمین‌لرزه، شکل طیف زمین‌لرزه نیز یک مشخصه کلیدی مؤثر بر روی پاسخ سازه است. به‌خصوص برای یک زمین‌لرزه در سطح خطری مشخص (به‌عنوان مثال سطح خطر 2 درصد در 50 سال)، به‌طوری‌که شکل دو طیف خطر یکنواخت (UHS) و طیف میانگین یک زمین‌لرزه مشخص حتی با داشتن دامنه طیف برابر در یک دوره تناوب می‌توانند کاملاً متفاوت از هم باشند [1، 2]. ویژگی‌های شکل طیف زمانی که ظرفیت فروریزش سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد؛ زیرا

افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و مقدار طیف در مقادیر دیگر دوره تناوب کمتر از طیف رابطه کاهندگی است. طیف زمین‌لرزه (در سطح خطر 2 درصد در 50 سال) در دوره تناوب 1 ثانیه در حدود 0/9g می‌باشد که نسبت به طیف رابطه کاهندگی که 0/3g می‌باشد بسیار بیشتر است.

در دوره تناوب 1 ثانیه طیف زمین‌لرزه لوماپریتا با انحراف معیار استاندارد بالا 1/9 در بالای طیف به‌دست‌آمده از رابطه کاهندگی قرار گرفته است که اصطلاحاً بیان می‌شود این رکورد دارای اپسیلون (ε) 1/9 در 1 ثانیه است ($\epsilon(1s) = 1/9$).

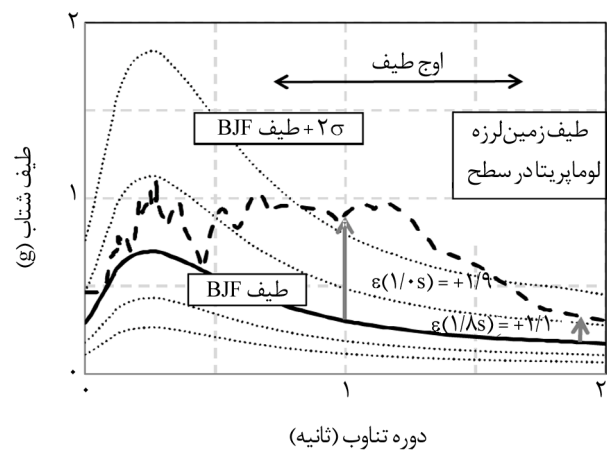
مقدار اپسیلون به‌عنوان مقدار انحراف از معیار لگاریتمی بین طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه با طیف رابطه کاهندگی بیان می‌شود؛ بنابراین پارامتر ε یک تابع از زمین‌لرزه است که البته برای مقادیر مختلف دوره تناوب متفاوت است.

از آنجایی که ε تنها به دوره تناوب وابسته است، رابطه بین اپسیلون و شکل طیف به‌صورت قابل ملاحظه‌ای به مقدار دوره تناوب وابسته است. به‌عنوان مثال یک زمین‌لرزه با $\epsilon(1s) = 2/0$ تمایل دارد تا یک اوج در منحنی طیف خود در نزدیکی دوره تناوب 1 ثانیه داشته باشد، حال آنکه یک زمین‌لرزه با $\epsilon(2s) = 2/0$ تمایل دارد تا یک اوج در منحنی طیف خود در نزدیکی دوره تناوب 2 ثانیه داشته باشد. از آنجایی که زمین‌لرزه ذاتاً پدیده‌ای احتمالاتی است و به‌طوری که در شکل (1) و (2) مشاهده می‌شود رابطه بین اپسیلون و شکل طیف لزوماً برای هر یک از زمین‌لرزه‌ها مشخص نیست. اما زمانی که یک مجموعه از زمین‌لرزه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد رابطه بین اپسیلون و شکل طیف کاملاً قابل دفاع و آشکار است [8].

به‌عنوان مثال اوج موجود در شکل طیف زمین‌لرزه لوماپریتا، شکل (1)، در منحنی طیف اکثر زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده دور از گسل در سواحل کالیفرنیا آمریکا موجود است. در این زمین‌لرزه‌ها اکثر مقادیر اپسیلون برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال بین 1 و 2 است. در حقیقت این مقادیر مثبت برای اپسیلون ناشی از آن است که دوره بازگشت زمین‌لرزه (در اینجا 2475 سال برای سطح خطر 2

موجود در منحنی طیف سرعت را نیز در انتخاب زمین‌لرزه اعمال نمود. انتخاب زمین‌لرزه‌هایی که بتوان از طریق آن‌ها ظرفیت فروریزش ساختمان را بررسی نمود از دیگر چالش‌های موجود است. غفوری آشتیانی و همکاران [6] بر روی چگونگی انتخاب یک مجموعه کوچک از زمین‌لرزه‌ها تحقیق نمودند که بتوان به‌وسیله آن‌ها ظرفیت فروریزش ساختمان را بررسی نمود.

در شکل (1)، شکل طیف شتاب زمین‌لرزه لوماپریتا که یک زمین‌لرزه خاص و نادر است (به دلیل دامنه نوسان‌های بزرگ) نمایش داده شده است (در این شکل طیف با ضریب 1/4+ مقیاس شده است، این مقیاس تنها به جهت نمایش بهتر طیف اعمال شده است و اپسیلون باید از طریق طیف بدون مقیاس به دست آید). طیف زمین‌لرزه لوماپریتا با سطح خطر 2 درصد در 50 سال در دوره تناوب 1 ثانیه دارای شدت طیف زیاد 0/9g است که کمتر رخ می‌دهد، زیرا در دوره تناوب بالا معمولاً مقادیر طیف پاسخ کاهش می‌یابد. در این شکل همچنین طیف میانگین مورد انتظار به‌دست‌آمده از رابطه کاهندگی بور و همکاران [7] متناسب با بزرگا، فاصله و مشخصات ساختگاه این زمین‌لرزه نمایش داده شده است. شکل (1) نشان می‌دهد که طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه بسیار متفاوت از طیف به‌دست‌آمده از رابطه کاهندگی است، به‌ویژه در دوره تناوب 0/6 تا 1/8 ثانیه که شکل طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه



شکل (1): مقایسه طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه لوماپریتا با طیف به‌دست‌آمده از رابطه کاهندگی بور و همکاران [7].

میزان قابل توجهی افزایش یابد. زمانی که زمین‌لرزه‌های نادری همچون لوماپریتا (با اپسیلونی در حدود 2) تعیین‌کننده عملکرد سازه است (در این تحقیق، هدف ارزیابی خطر فروریزش در ساختمان‌های مدرن در ناحیه لرزه‌خیز کالیفرنیا می‌باشد)، ظرفیت سازه برای مقادیر مورد انتظار $\varepsilon +$ که بحرانی‌ترین حالت است محاسبه می‌گردد.

در تحلیل سازه مهم‌ترین روش مستقیم جهت لحاظ نمودن اثر شکل طیف انتخاب زمین‌لرزه‌هایی است که در دوره تناوب اصلی سازه دارای $\varepsilon(T_1)$ (به عبارتی دارای مقادیر مشخص اپسیلون در دوره تناوب T_1) باشند که مطابقت خوبی با $\varepsilon(T_1)$ هدف طیف به‌دست‌آمده برای یک سطح خطر مشخص داشته باشد. در روش دیگر به‌وسیله مقدار شدت طیف، زمین‌لرزه‌ها انتخاب و مقیاس می‌شوند. این شدت می‌تواند حاصل از مقادیر طیف جابه‌جایی غیرخطی [12] و یا میانگین طیف شتاب (S_a) مربوط به یک بازه از دوره تناوب‌ها باشد. از آنجایی که مقادیر اندازه‌گیری شده به‌عنوان شدت زلزله $(S_a(T_1))$ که برای توصیف و چگونگی خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند مقادیری گسترده است. در این مقاله علاوه بر شرح روش‌های موجود، روشی جایگزین [3] برای تعیین و مشخص نمودن خصوصیات زمین‌لرزه‌ها جهت استفاده در تحلیل معرفی می‌گردد.

روش جایگزین ارائه‌شده در این مقاله اجازه می‌دهد یک مجموعه کلی از زمین‌لرزه‌ها که مستقل از مقادیر اپسیلون انتخاب شده‌اند برای تحلیل سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند و سپس ظرفیت فروریزش تخمین زده شده در شکل طیف اصلاح گردد. این تصحیح با استفاده از پارامتر ε انجام می‌گیرد که این پارامتر برای یک ساختمان و سطح خطر مشخص از طریق تجزیه خطر لرزه‌ای (disaggregation of the seismic hazard) موردنظر به دست می‌آید. از آنجایی که برای طراحی لرزه‌ای، دست‌یابی به یک دسته‌بندی از مشخصات ساختگاه نیازمند بررسی و تحلیل تعداد زیادی از ساختمان‌هاست و از طرف دیگر عملاً انتخاب دسته رکوردهای منحصره‌فرد برای هر

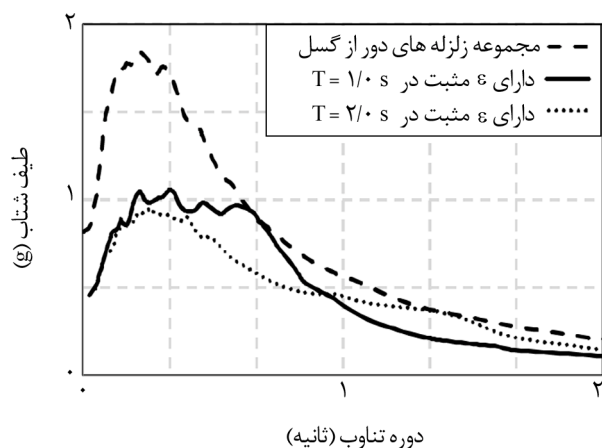
درصد در 50 سال در نظر گرفته شده) بسیار طولانی‌تر از دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ای است که به وقوع می‌پیوندد (در کالیفرنیا آمریکا به‌طورمعمول دوره بازگشت زمین‌لرزه با خطر بالا در حدود 150 تا 500 سال است). بنابراین جهت تحلیل سازه‌های موجود در این ساختگاه برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال می‌بایست زمین‌لرزه‌هایی را انتخاب نمود که اپسیلونی بین 1 تا 2 داشته باشند.

این تحقیق با هدف ارزیابی ظرفیت فروریزش به‌وسیله تحلیل دینامیکی غیرخطی از طریق پارامتر اپسیلون بر روی شکل طیف متمرکز شده است. کورت و همکاران [3] به‌صورت کامل اثر شکل طیف و اپسیلون را بر روی پاسخ ظرفیت فروریزش ساختمان‌ها و بعدازآن این بحث را به‌صورت متمرکزتر بر روی ساختمان‌های بتنی شکل‌پذیر و غیرشکل‌پذیر بررسی نمودند [9، 10]، در سال‌های اخیر ظرفیت فروریزش سازه‌های فولادی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [11]. جهت برآورد و ارزیابی ظرفیت فروریزش سازه نیاز به یک مجموعه از زمین‌لرزه‌هاست که شدت هر زمین‌لرزه برای آن که بتواند سبب فروریزش سازه گردد باید از طریق مقیاس نمودن افزایش یابد. ظرفیت فروریزش برای یک زمین‌لرزه خاص از طریق شدت زمین‌لرزه (که طیف شتاب در دوره تناوب مود اول سازه است $S_{a,col}(T_1)$ مشخص می‌گردد. ظرفیت فروریزش سازه بعد از تعیین میانگین و پراکندگی ظرفیت فروریزش برای چند زمین‌لرزه خاص به دست می‌آید (میانگین موردنظر در این مقاله میانگین هندسی و برابر است با میانگین توزیع لگ‌نرمال (lognormal distribution)). روشی که جهت انتخاب و مقیاس نمودن زمین‌لرزه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و تعیین شکل طیف از طریق ε مبتنی بر تعیین مقدار شدت زمین‌لرزه $(S_a(T_1))$ است.

بر اساس تحقیقات گذشته (که در ادامه شرح داده خواهد شد)، چنانچه اثر وجود اوج در منحنی شکل طیف در نظر گرفته شود، نتایج به‌دست‌آمده برای ظرفیت فروریزش سازه می‌تواند در مقایسه با نتایج حاصل‌شده به‌وسیله زمین‌لرزه‌هایی که در شکل طیف خود فاقد اوج است به

FEMA (2008) ارائه شده‌اند).

طیف بعدی یک مجموعه شامل 20 زمین‌لرزه که بر اساس $\varepsilon(1s) = +2$ انتخاب شده‌اند. طیف سوم نیز مجموعه‌ای شامل 20 زمین‌لرزه است که بر اساس $\varepsilon(2s) = +2$ انتخاب شده‌اند. به‌طور کلی مجموعه زمین‌لرزه‌های دور از گسل تقریباً عاری از مقادیر اپسیلون و فاقد اوج در دوره تناوب‌های بالای شکل طیف هستند. به جهت امکان مقایسه بهتر نتایج در شکل (2)، مجموعه زمین‌لرزه‌های 2 و 3 به گونه‌ای مقیاس شده‌اند تا مقادیر میانگین طیف در آن‌ها (S_a) به ترتیب در 1 و 2 ثانیه برابر با مقادیر طیف حاصل از مجموعه 3 شود. شکل (2) نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن پارامتر اپسیلون می‌توان شکل طیف‌های کاملاً متفاوتی را به دست آورد. زمانی که زمین‌لرزه در یک دوره تناوب مشخص دارای یک اپسیلون مثبت باشد، طیف به‌دست‌آمده تمایل دارد یک اوج در دوره تناوب موردنظر داشته باشد و شکل طیف این زمین‌لرزه‌ها کاملاً از شکل طیف خطر یکنواخت استاندارد (Uniform Hazard Spectrum (UHS)) متفاوت است. بیکر و کورنل [1] یک روش آماری به نام طیف میانگین شرطی (CMS Conditional Mean Spectrum) را جهت پیش‌بینی شکل طیف مورد انتظار ارائه داده‌اند که به‌صورت مشروط و با در نظر گرفتن یک مقدار S_a در یک دوره تناوب مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (2): مقایسه طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه‌هایی که با یا بدون در نظر گرفتن اثر اپسیلون انتخاب شده‌اند [16].

ساختمان امکان‌پذیر نیست روش پیشنهادی [3] به‌وسیله تحقیقات مرتبط [13، 14] توسعه یافت که در آن‌ها یک مجموعه بزرگ از ساختمان‌ها با دوره تناوب‌های متفاوت برای سطح خطر ایمنی در برابر فروریزش مورد بررسی قرار گرفتند.

در این مقاله ابتدا بر روی رابطه بین شکل طیف و اپسیلون بحث شده و سپس چگونگی تأثیر شکل طیف بر پاسخ ظرفیت فروریزش بررسی می‌گردد. بحث دیگری که در این مقاله بیان می‌شود شکل طیف و مقادیر ε مرتبط با ساختگاه و سطوح خطر متفاوت است. برای اعمال اثر شکل طیف بر روی نتایج ظرفیت فروریزش در اینجا یک روش رگرسیون (regression method) پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از یک ضریب تصحیح مقادیر میانگین ظرفیت فروریزش که به‌وسیله یک دسته رکورد کلی به‌دست‌آمده‌اند، تصحیح می‌گردند. سپس جهت توسعه یک روش ساده‌سازی شده یک تحلیل رگرسیون برای تصحیح نتایج ظرفیت فروریزش 111 ساختمان از طریق یک ضریب تصحیح ε انجام می‌گیرد [12].

2 - اثر شکل طیف روی مقدار اپسیلون و ظرفیت فروریزش ساختمان

2-1 - چگونگی ارتباط بین شکل طیف و مقدار اپسیلون زمین‌لرزه

همان‌طور که در شکل (1) نمایش داده شد، در سطح خطر 2 درصد در 50 سال طیف به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه لوماپریتا در دوره تناوب 1 ثانیه اپسیلونی برابر با 1/9 دارد $\varepsilon(1s) = 1/9$. این شکل نشان می‌دهد که در نزدیکی دوره تناوب موردنظر یک اوج متناسب با مقدار اپسیلون شکل می‌گیرد. در مطالعات اخیر با بررسی‌های آماری قوی روی تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌ها، ارتباط بین اپسیلون و اوج شکل طیف تأیید شده است. در شکل (2) سه طیف با یکدیگر مقایسه شده‌اند که طیف اول یک مجموعه شامل 78 زمین‌لرزه است که بدون در نظر گرفتن ε انتخاب شده‌اند (مانند مجموعه کلی زمین‌لرزه‌های دور از گسلی که در

2-2 - چگونگی تأثیر شکل طیف بر روی ظرفیت فروریزش

انتخاب زمین لرزه‌های نادری همچون لوماپریتا (شکل (1)) که دارای اوج طیفی معادل مقدار مثبت $\varepsilon(T_1)$ می‌باشند به شکل قابل توجهی ظرفیت فروریزش را افزایش خواهند داد. این تفاوت میان نتایج را می‌توان با مقایسه نتایج حاصل از یک مجموعه از زمین لرزه‌های دور از گسل با نتایج حاصل از دو مجموعه از زمین لرزه‌هایی که در دوره تناوب‌های 1 و 2 ثانیه دارای مقادیر مثبت اپسیلون هستند بیان نمود که این مجموعه‌ها به ترتیب با خط‌چین، خط و نقطه‌چین در شکل (2) نمایش داده شده است. از آنجایی که با آسیب سازه در حین زلزله دوره تناوب سازه افزایش می‌یابد، مقادیر طیف در دوره تناوب‌های بالا به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. به همین صورت، در مجموعه‌هایی که بر اساس اپسیلون مثبت انتخاب شده‌اند مقادیر طیف در دوره تناوب‌های پایین (دوره تناوب کمتر از 1 ثانیه) به دلیل اثر مشارکت موده‌های بالاتر مقادیر قابل توجهی است.

چهار تحقیق جهت اثبات تأثیر پارامتر اپسیلون بر ارزیابی فروریزش غیرخطی سازه‌ها انجام گرفته است که عبارتند از:

1. بیکر و کورنل [1] اثر مشخصات زمین لرزه را روی ظرفیت فروریزش یک ساختمان قاب خمشی بتنی هفت طبقه با ظرفیت تغییر شکل ناچیز و پریود 0/8 ثانیه بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین ظرفیت فروریزش برای حالتی که از یک مجموعه زمین لرزه با مقدار اپسیلون 2 در پریود 0/8 استفاده می‌شود 1/7 برابر بزرگ‌تر از حالتی است که مجموعه زمین لرزه انتخابی بدون در نظر گرفتن اثر اپسیلون انتخاب می‌گردد.
2. گولت و همکاران [15] ظرفیت فروریزش یک ساختمان چهار طبقه بتنی را با پریود 1 ثانیه در دو حالت به دست آوردند، یکی با استفاده از یک مجموعه رکورد با $\varepsilon(2s) = 1/4$ و در حالت دوم با استفاده از یک مجموعه

رکورد با $\varepsilon(1s) = 0/4$. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش به دست آمده برای مجموعه رکورد با $\varepsilon(1s) = 1/4$ در حدود 1/4 برابر بیشتر از ظرفیت فروریزش به دست آمده برای مجموعه رکورد با $\varepsilon(1s) = 0/4$ است.

3. هسلتون و بیکر [16] ظرفیت فروریزش یک مدل یک درجه آزادی با پریود 1 ثانیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش به دست آمده برای مجموعه رکورد با $\varepsilon(1s) = 2$ در حدود 1/8 برابر بیشتر از ظرفیت فروریزش به دست آمده برای مجموعه رکوردی است که بدون در نظر گرفتن اپسیلون انتخاب شده است.

4. زاریان [17] به طور کلی اثر اپسیلون را روی قاب‌های خمشی و دیوارهای برشی بررسی کردند. نتایج نشان دهنده افزایش 1/6 برابری میانگین ظرفیت فروریزش با اعمال اثر اپسیلون بود.

همچنین در تحقیقی دیگر که توسط بیکر و کرنل [18] انجام گرفت، پاسخ سازه تحت زمین لرزه‌های دور از گسل و با لحاظ اثر اپسیلون به دست آمد و نتایج نشان داد که جهت‌پذیری پیش‌رونده جهش‌های سرعت (forward-directivity velocity pulses) اثر قابل توجهی بر روی پاسخ به دست آمده نخواهد داشت. زمین لرزه‌های دور از گسلی که دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده جهش‌های سرعت زیادی هستند، نباید در روش جایگزین معرفی شده در این مقاله مورد استفاده قرار گیرند.

3 - مقدار اپسیلون مورد انتظار برای یک ساختمان و سطح خطر مشخص

در اینجا رابطه بین اپسیلون مورد انتظار، ساختمان و سطح خطر، با ذکر یک مثال ساده مورد بررسی قرار گرفته است. یک ساختمان ایده‌آل در نظر گرفته شده که تنها تحت اثر یک گسل نقطه‌ای با مشخصات زیر می‌باشد:

- دوره بازگشت رویداد (زمین لرزه) 200 سال است.
- بزرگای رویداد 7/2 است.
- نزدیک‌ترین فاصله به گسل 11 کیلومتر است.

طریق رابطه (1) به دست می‌آید:

$$\frac{1}{RP_{Sa \geq x}} = \left(\frac{1}{RP_{Characteristic Event}} \right) [P(Sa \geq x | Characteristic Event)] \quad (1)$$

دوره بازگشت با فرض توزیع پواسون استاندارد برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال از رابطه (2) به دست می‌آید.

$$P(Sa \geq x \text{ in time } t) = 1 - \exp(-t / RP_{Sa \geq x}) \quad (2)$$

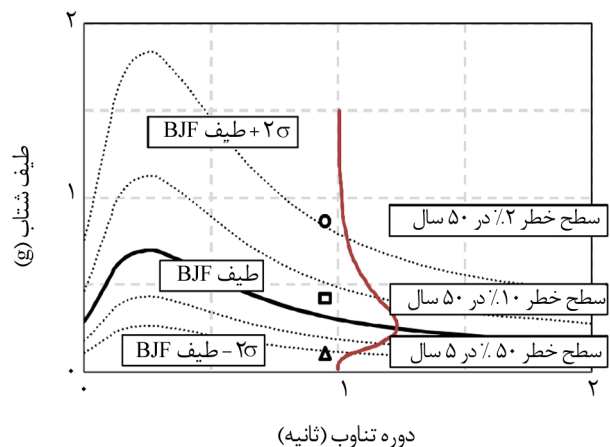
در رابطه فوق t برابر 50 سال و احتمال وقوع زمین‌لرزه در 50 سال برابر 0/02 است؛ بنابراین با استفاده از رابطه (2) دوره بازگشت زمین‌لرزه 2475 سال به دست می‌آید. با توجه به رابطه (1) و اینکه دوره بازگشت رویدادی که در این مثال مورد بررسی قرار گرفته 200 سال است، خواهیم داشت:

$$(1 / 2,475 \text{ years}) = (1 / 200 \text{ years}) \times (0.081) \quad (3)$$

بنابراین تنها 8 درصد زمین‌لرزه‌هایی که رخ خواهد داد سطح خطری بیشتر از 2 درصد در 50 سال خواهند داشت. در واقع این احتمال 8 درصد با انحراف از معیاری برابر 1/43 در بالای مقدار میانگین رخ خواهد داد (یا به بیان دیگر اسیلونی برابر با 1/43 در دوره تناوب 1 ثانیه خواهیم داشت). تغییر مشخصات ساختگاه بر روی پاسخ طیف شتاب مؤثر است؛ زیرا روابط کاهندگی متأثر از خصوصیات ساختگاه می‌باشد، درحالی‌که مقدار ε تغییر نمی‌کند به این خاطر که نسبت دوره بازگشت زلزله با دوره بازگشت زمین‌لرزه موردنظر با توجه به رابطه (1) بدون تغییر باقی می‌ماند. در یک ساختگاه واقعی که تحت تأثیر چندین گسل می‌باشد شرایط کمی پیچیده‌تر است؛ ولی به‌طور کلی مقدار اسیلون مربوط به یک سطح طراحی (یک شدت طیف مشخص Sa) با تغییر مشخصات خاک ساختگاه تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

مقدار اسیلون به‌شدت به دوره بازگشت زمین‌لرزه موردنظر وابسته است. همان‌طور که در شکل (3) مشاهده می‌شود زمین‌لرزه‌ای با سطح خطر 10 درصد در 50 سال (دوره بازگشت 475 سال) دارای $Sa(1s) = 0/46 \text{ g}$ و

• برای خاک ساختگاه داریم: $V_{s30} = 360$ متر بر ثانیه.
 • دوره تناوب اصلی ساختمان مورد نظر 1 ثانیه است.
 در شکل (3)، طیف میانگین و طیف‌های میانگین با انحراف از معیار ± 1 و ± 2 (و یا مقادیر اسیلون $\pm 1\varepsilon$ و $\pm 2\varepsilon$) حاصل از رویداد فوق نمایش داده شده است. با توجه به شکل چنانچه از رابطه کاهندگی بور و همکاران [7] برای محاسبه طیف استفاده شود، برای ساختمان مورد بررسی شدت طیف $Sa(2s) = 0/4 \text{ g}$ به دست خواهد آمد. در این شکل همچنین توزیع لوگ‌نرمال Sa در دوره تناوب 1 ثانیه اضافه شده است که نشان می‌دهد در بزرگا و فاصله رویداد این مثال باید انتظار انحراف معیار لگاریتمی برابر با 0/57 را داشته باشیم. برای این رویداد مقادیر $Sa(1s)$ مربوط به زمین‌لرزه‌های دارای محتوی فرکانسی پایین (2 درصد در 50 سال) در قسمت انتهایی (اصطلاحاً دم) بالای توزیع حداکثر طیف شتاب در دوره تناوب 1 ثانیه قرار گرفته است.



شکل (3): پاسخ طیف میانگین حاصل از رابطه کاهندگی بور و همکاران (BJKF) [7]، توزیع لوگ‌نرمال این طیف در دوره تناوب 1 ثانیه و طیف شتاب برای سطوح خطر مختلف.

در این مثال، دوره بازگشت زمین‌لرزه 200 سال است که از دوره بازگشت موردنظر یعنی 2 هزار و 475 سال بسیار کوچک‌تر است. این امر سبب می‌شود زمین‌لرزه مورد نظر دارای مقادیر مثبتی از اسیلون باشد. زمانی که تنها یک رویداد حاکم بر خطر زمین‌لرزه باشد، رابطه میان میانگین دوره بازگشت (RP) زمین‌لرزه با رویداد موردنظر از

طبقه در ساختگاه لس‌آنجلس آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند.

نتایج به‌دست‌آمده برای این ساختمان و ساختگاه نشان داد سطح شدت زمین‌لرزه (در 60 درصد میانگین ظرفیت فروریزش) مهم‌ترین عاملی است که در محاسبه مقدار λ_{col} مؤثر است. در مثالی که توسط آن‌ها بررسی شد، طیف شتاب مربوط به زمین‌لرزه‌ها تقریباً $1/5$ برابر طیف سطح خطر 2 درصد در 50 سال و مقدار اپسیلون نیز بیشتر از دو به دست آمد.

5 - روش‌های محاسبه اپسیلون در ارزیابی فروریزش سازه

به دو روش می‌توان اپسیلون را محاسبه نمود که در ذیل و از طریق ارزیابی فروریزش یک ساختمان قاب خمشی بتن مسلح هشت طبقه شرح داده شده است. این ساختمان هشت طبقه توسط هسلتون و دیرلین [13] طراحی و مدل‌سازی گردید و با سیستم باربری جانبی قاب خمشی ویژه شامل سه دهانه، هر یک به عرض $6/1$ متر و دارای بارگذاری گسترده روی مساحت 669 مترمربعی هر طبقه و دوره تناوب اصلی $1/71$ ثانیه است.

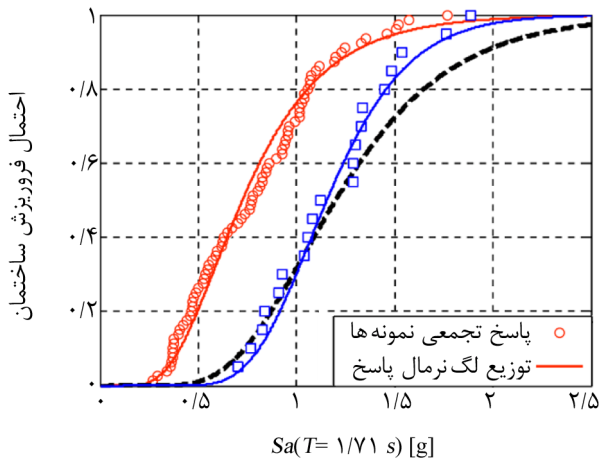
علاوه بر موارد فوق، هسلتون و دیرلین [13] برای مدل‌سازی غیرخطی سازه و روش مورداستفاده برای ارزیابی فروریزش جزئیات بیشتری را نیز ارائه دادند. در این مثال شمال لس‌آنجلس به‌عنوان ساختگاه سازه در نظر گرفته شد که یک نمونه از ساختگاه‌های دور از گسل سواحل کالیفرنیا می‌باشد [15] و خاک آن طبق دسته‌بندی برنامه کاهش خطر زلزله ملی آمریکا (National Earthquake Hazard Reduction Program) جزء دسته D است. هدف در این مثال محاسبه احتمال فروریزش سازه به‌صورت مشروط (با این شرط که در دوره تناوب $1/71$ ثانیه داریم $Sa(1/71s) = 0/57g$ و تحت زمین‌لرزه‌هایی با سطح خطر 2 درصد در 50 بود. برای زمین‌لرزه‌هایی با این سطح خطر با استفاده از روش تجزیه خطر لرزه‌ای اپسیلون هدف $1/7$ به دست آمد.

$\varepsilon(1s) = 0/3$ است، این در حالی است که زمین‌لرزه‌ای با سطح خطر 50 درصد در 5 سال (دوره بازگشت 7/2 سال) دارای $Sa(1s) = 0/15g$ و $\varepsilon(1s) = -1/7$ است. در مواردی که زمین‌لرزه ویژه‌ای همچون لوماپریتا برای ارزیابی عملکرد (مانند ارزیابی فروریزش ساختمان‌های مدرن) مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمال آن‌که پاسخ حاصل از این زمین‌لرزه دارای اپسیلون مثبت باشد، بسیار زیاد است، شکل (1). با توجه به رابطه (1) مقدار ε بسیار متأثر از دوره بازگشت یک رویداد است. در سواحل کالیفرنیا آمریکا دوره بازگشت زلزله معمولاً 200 سال می‌باشد، این در حالی است که در شرق آمریکا دوره بازگشت زلزله را بسیار بیشتر در نظر می‌گیرند. لحاظ نمودن این دوره بازگشت بسیار طولانی سبب می‌شود مقدار اپسیلون در زلزله‌های شدید و نادر مانند لوماپریتا بسیار کمتر از آنچه باید باشد، لحاظ گردد.

4 - مقادیر اپسیلون هدف

مقادیر اپسیلون مورد انتظار یا هدف که می‌بایست برای ارزیابی پاسخ ساختمان به دست آید به ساختگاه و سطح خطر مورد انتظار وابسته است. بنابراین بر اساس سطح خطری که متناسب با سطح عملکردی ساختمان در نظر گرفته می‌شود، اپسیلون هدف تعیین می‌گردد. برای مثال زمانی که احتمال فروریزش تحت یک زمین‌لرزه با احتمال تعداد وقوع 2 درصد در 50 سال مورد بررسی قرار می‌گیرد $P[C|Sa = Sa_{2/50}]$ ، سطح خطر هدف مناسب 2 درصد در 50 سال است. درحالی‌که اگر میانگین تعداد فروریزش سالانه برای سازه (λ_{col}) مورد بررسی قرار گیرد، تعیین سطح خطر هدف مناسب بسیار مشکل خواهد بود.

در حالت ایده‌آل جهت اعمال اثر اپسیلون بر منحنی خطر، مقادیر اپسیلون هدف (ε_0) برای سطوح مختلف Sa افزایش می‌یابد. در روش دیگر که یک روش تقریبی است، سطح خطر هدف که تأثیر قابل‌توجهی بر روی λ_{col} دارد و تابع دو پارامتر ساختگاه و ظرفیت فروریزش ساختمان است مورد استفاده قرار می‌گیرد. هسلتون و دیرلین [13] این مسأله را برای دو ساختمان بتن مسلح قاب خمشی چهار



شکل (4): توزیع ظرفیت فروریزش ساختمان هشت طبقه بتنی که تحت مجموعه زمین‌لرزه‌ای با ε مثبت محاسبه شده است [4].

5-2 - استفاده از یک مجموعه کلی از زمین‌لرزه‌ها و اصلاح نتایج با استفاده از اپسیلون

در روش اول برای هر دوره تناوب در یک ساختگاه خاص با یک اپسیلون هدف نیازمند انتخاب یک دسته زمین‌لرزه جداگانه هستیم، به همین علت این روش برای تمامی حالت‌ها قابل استفاده نیست. برای مثال، در پروژه 63 شورای فناوری‌های کاربردی آمریکا (Applied Technology Project (ATC-63) Council-63) (FEMA2008) [14] ارزیابی فروریزش در تعداد نزدیک به 100 ساختمان با دوره تناوب‌های اصلی متفاوت و برای دسته‌بندی‌های کلی طراحی لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که در بررسی این ساختمان‌ها، هدف تعمیم نتایج ارزیابی فروریزش برای دسته‌بندی‌های طراحی لرزه‌ای است، انتخاب مجموعه زمین‌لرزه‌های منحصربه‌فرد برای هر یک از ساختمان‌ها عملی و مناسب نیست.

در روش دوم سازه ابتدا توسط یک دسته زمین‌لرزه که بدون در نظر گرفتن مقادیر اپسیلون انتخاب شده‌اند تحلیل می‌شود، سپس توزیع پاسخ به‌دست‌آمده برای سازه بر اساس مقدار اپسیلون هدف برای هر ساختگاه و سطح خطر مشخص تصحیح می‌گردد. از این روش می‌توان برای محاسبه تمامی پاسخ‌های سازه (مانند دریافت میان طبقه و دوران مفاصل پلاستیک) استفاده نمود که در اینجا هدف تنها تعیین ظرفیت فروریزش سازه است. مراحل روش 2 عبارتند از:

5-1 - یک مجموعه از زمین‌لرزه‌ها که با استفاده از اپسیلون هدف انتخاب شده‌اند

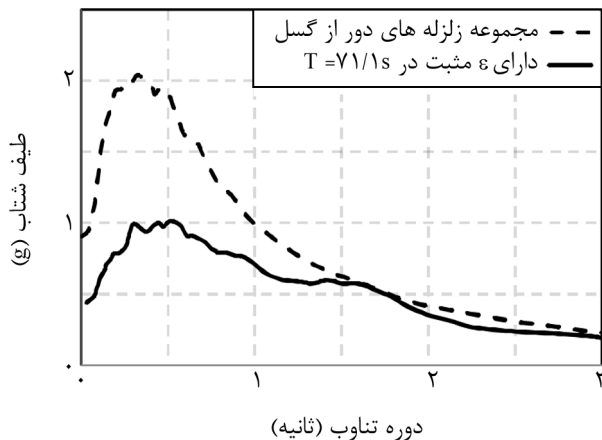
در این روش جهت تحلیل سازه زمین‌لرزه‌هایی انتخاب می‌گردند که بر اساس ساختگاه و سطح خطر مورد انتظار دارای مقدار ثابتی از اپسیلون هستند. جهت انتخاب زمین‌لرزه از روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه که توسط آبراهامسون و سیلوا [4] ارائه شده استفاده می‌شود. برای بررسی این روش یک مثال ارائه می‌شود [3]. یک مجموعه 20 تایی از زمین‌لرزه‌هایی که دارای ε مثبت هستند، انتخاب شده‌اند. میانگین اپسیلون این زمین‌لرزه‌ها برابر است با $\varepsilon(T_1) = 1/7$ و دوره تناوب اصلی سازه $(T_1) = 1/71$ ثانیه است (به‌طورکلی مقدار اپسیلون در هر یک از زمین‌لرزه‌ها بیشتر از 1/25 است). در انتخاب این دسته از زمین‌لرزه‌ها معیارهای اضافه دیگری مانند حداقل بزرگای زلزله و نوع دسته‌بندی خاک ساختگاه مورد استفاده قرار گرفت. هسلتون و دیرلین [13] یک لیست کامل از معیارهای لازم برای انتخاب رکورد را ارائه کردند.

در شکل (4)، نتایج حاصل از ظرفیت فروریزش سازه قاب خمشی بتن مسلح هشت طبقه تحت 20 زمین‌لرزه دارای اپسیلون مثبت نمایش داده شده‌اند. نتایج ارزیابی فروریزش نشان داد که تحت هر یک از این زمین‌لرزه‌ها ساختمان از نظر دینامیکی ناپایدار خواهد شد (نتیجه‌گیری فوق با بررسی پاسخ دریافت طبقات انجام گرفت).

در شکل (4)، ظرفیت فروریزش هر یک از 20 زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفته و منحنی برآزش توزیع لگ‌نرمال آن‌ها نیز به شکل اضافه شده است. میانگین ظرفیت فروریزش $S_{a,col}(T_1) = 1/15 g$ و انحراف از معیار لگاریتمی ظرفیت فروریزش (که با $\sigma_{LN}(S_{a,col})$ نمایش داده می‌شود) نیز 0/28 به‌دست‌آمده است. این پراکندگی (که اصطلاحاً record-to-record نام‌گذاری شده است) ناشی از تغییر مشخصات زمین‌لرزه‌ها (غیر از مشخصه $S_a(T_1)$) است. برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال و $S_a(T_1) = 0/57 g$ احتمال فروریزش شرطی بسیار کم و برابر 0/5 درصد است.

این در حالی است که استفاده از زمین لرزه‌های کمتر برای تحلیل نیز می‌تواند کفایت کند.

در شکل (5) طیف‌های میانگین پاسخ حاصل از مجموعه کلی با مجموعه زمین لرزه‌هایی دارای اپسیلون مثبت (روش اول) مقایسه شده‌اند. جهت امکان مقایسه بهتر نتایج، دو مجموعه به گونه‌ای مقیاس شده‌اند که هر دو طیف در دوره تناوب $1/71$ ثانیه دارای پاسخ شتاب $Sa(T_1) = 0/57g$ گردند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در محل دوره تناوب $1/71$ ثانیه وجود یک اوج در شکل طیف مجموعه دارای اپسیلون مثبت نسبت به مجموعه کلی مشهود است.



شکل (5): مقایسه طیف میانگین حاصل از زمین لرزه‌های مجموعه کلی و مجموعه دارای اپسیلون مثبت [3].

7 - ارزیابی ظرفیت فروریزش ساختمان قاب خمشی بتن مسلح هشت طبقه با استفاده از روش دوم

هسلتون و همکاران [3] برای بررسی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از روش دوم یک مثال ارائه دادند. در این مثال یک ساختمان بتنی هشت طبقه (با دوره تناوب اصلی $1/71$ ثانیه) تحت دسته زمین لرزه کلی قرار گرفت و میانگین ظرفیت فروریزش سازه $\mu_{Sa,col(T_1)} = 0/72g$ و پراکندگی نتایج ظرفیت $\sigma_{LN(Sa,col)} = 0/45$ به دست آمد. شدت این ساختمان در سطح خطر 2 درصد در 50 سال $Sa(1/71s) = 0/57g$ است، بنابراین احتمال فروریزش سازه در این سطح خطر 29 درصد می‌باشد. در بخش‌های قبل

1. یک مجموعه از زمین لرزه‌های دور از گسل که زمین لرزه‌ها در آن بدون در نظر گرفتن مقادیر ε انتخاب شده‌اند. این مجموعه را مجموعه کلی می‌نامند که برای ایجاد یک نمونه آماری قابل توجه و اطمینان از دقت تحلیل رگرسیون (در مرحله 3) باید دارای تعداد زیادی زمین لرزه باشد.

2. ظرفیت فروریزش از طریق تحلیل دینامیکی غیرخطی محاسبه می‌گردد. این تحلیل دینامیکی به روش گام‌به‌گام [19] و با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده انجام می‌گیرد. نتایج نیز به صورت یک توزیع تجمعی به وسیله میانگین و پراکندگی حاصل از ارزیابی ظرفیت فروریزش به دست می‌آید.

3. انجام یک تحلیل رگرسیون خطی بین ظرفیت فروریزش و مقدار اپسیلون هر زمین لرزه جهت محاسبه رابطه بین این دو پارامتر.

4. توزیع ظرفیت فروریزش به دست آمده با استفاده از روابط رگرسیون تصحیح می‌گردد تا نتایج به دست آمده با اپسیلون هدف ساختگاه و سطح خطر مورد نظر متناسب باشد.

6 - مجموعه زمین لرزه‌های کلی دور از گسل و مقایسه آن با مجموعه دارای اپسیلون مثبت

مجموعه زمین لرزه‌ای که در این مقاله به نام مجموعه کلی نام برده می‌شود شامل 78 زمین لرزه دور از گسل شدید است که در آن زمین لرزه‌ها بدون در نظر گرفتن مقادیر اپسیلون انتخاب شده‌اند. این مجموعه کلی توسط هسلتون و دیرلین [13] ارائه شد. آن‌ها یک لیست کامل از معیارهای انتخاب زمین لرزه را نیز ارائه کردند.

یک زیرمجموعه 44 تایی از این زمین لرزه‌ها در پروژه 63 شورای فناوری‌های کاربردی آمریکا (ATC) [14] به عنوان بخشی از روند اعتبارسنجی آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان مورد استفاده قرار گرفت و مجموعه گسترده‌تر 78 زمین لرزه‌ای برای دستیابی به نتایج رگرسیون دقیق‌تر بین ظرفیت فروریزش و مقدار اپسیلون مورد استفاده قرار گرفت.

می توان با توجه به رابطه (2) و مقدار اپسیلون، به صورت زیر میانگین اصلاح شده $LN[S_{a,col}(T_1)]$ را به دست آورد.

$$\begin{aligned} \mu'_{LN[S_{a,col}(T_1)]} &= \beta_0 + \beta_1 \times \varepsilon(T_1) \\ &= -0.356 + 0.311 \times 1/7 = 0.173 \end{aligned} \quad (5)$$

حال می توان میانگین ظرفیت فروریزش سازه را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} Mean'_{S_{a,col}(T_1)} &= \exp(\mu'_{LN[S_{a,col}(T_1)]}) = \\ &= \exp(0.173) = 1.19g \end{aligned} \quad (6)$$

نسبت میانگین ظرفیت فروریزش اصلاح شده به اصلاح نشده به صورت زیر به دست می آید.

$$\frac{1.19g}{0.72g} = 1.65 \text{ Ratio} = \frac{\exp(\mu'_{LN[S_{a,col}(T_1)]})}{\exp(\mu_{LN[S_{a,col}(T_1)]})} \quad (7)$$

در رابطه فوق $\mu_{LN[S_{a,col}(T_1)]}$ به صورت مستقیم از نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از مجموعه کلی زمین لرزه ها و $\mu'_{LN[S_{a,col}(T_1)]}$ با اصلاح نتایج از طریق تحلیل رگرسیون و مقدار اپسیلون هدف به دست آمده است.

با توجه به رابطه (7)، افزایش $1/65$ برابر میانگین ظرفیت فروریزش (از $0.72g$ اصلاح نشده به $1/19g$ اصلاح شده) تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج ارزیابی فروریزش خواهد داشت.

پراکندگی نتایج ظرفیت فروریزش که به صورت مستقیم از زمین لرزه ها به دست آمده است، $\sigma_{LN[S_{a,col}(T_1)]} = 0/45$ است. مقدار انحراف معیار به صورت زیر و با استفاده از اپسیلون هدف قابل تصحیح می باشد.

$$\sigma'_{LN[S_{a,col}(T_1)]} = \sqrt{\{\sigma_{LN[S_{a,col}(T_1)],reg}\}^2 + \beta_1^2 \sigma_\varepsilon^2} \quad (8)$$

با استفاده از نتایج تحلیل رگرسیون و با توجه به شکل (6)، در رابطه (8)، $\sigma_{LN[S_{a,col}(T_1)],reg} = 0/36$ خواهد بود و مقدار σ_ε نیز که انحراف معیار استاندارد مربوط به مقادیر اپسیلون ($\varepsilon(T_1)$) است برای یک ساختگاه و سطح خطر مشخص به وسیله تجزیه خطر لرزه ای به دست می آید. برای ساختگاهی که در مثال این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار σ_ε برای زمین لرزه هایی با سطح خطر 2 درصد

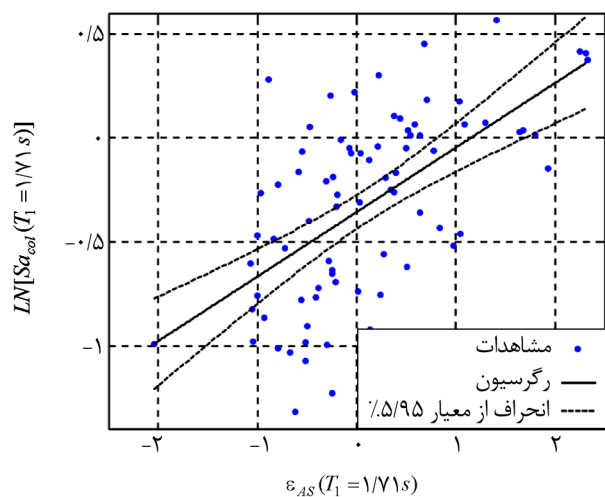
احتمال فروریزش این سازه در همین سطح خطر تحت مجموعه زمین لرزه های دارای اپسیلون مثبت، تنها $0/5$ درصد) به دست آمده بود [3]، این مطلب نشان می دهد نتایج به دست آمده از مجموعه کلی (روش دوم) هنوز نیازمند اصلاح بر اساس مقدار اپسیلون هدف می باشند.

در شکل (6) مقادیر لگاریتمی طیف شتاب (به عنوان نماینده ظرفیت فروریزش) مربوط به مقدار اپسیلون هر زمین لرزه نمایش داده شده است. همچنین نتایج تحلیل رگرسیون خطی بین $LN[S_{a,col}(T_1)]$ [20] و $\varepsilon(T_1)$ نیز در این شکل نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از نتایج تحلیل رگرسیونی یک روش [17] جهت اصلاح پاسخ فروریزش ارائه شده است. رابطه بین میانگین $LN[S_{a,col}(T_1)]$ و $\varepsilon(T_1)$ را می توان به صورت رابطه (4) بیان نمود.

$$\mu'_{LN[S_{a,col}(T_1)]} = \beta_0 + \beta_1 \times \varepsilon(T_1) \quad (4)$$

در رابطه فوق β_0 و β_1 که به ترتیب خروج از مرکزیت و شیب خط حاصل از تحلیل رگرسیون بین ظرفیت فروریزش و ε هستند برای این مثال $-0/356$ و $0/311$ هستند.

برای آنکه میانگین ظرفیت فروریزش بر اساس اپسیلون هدف (که در این مثال $\varepsilon(T_1) = 1/7$ است) اصلاح گردد،

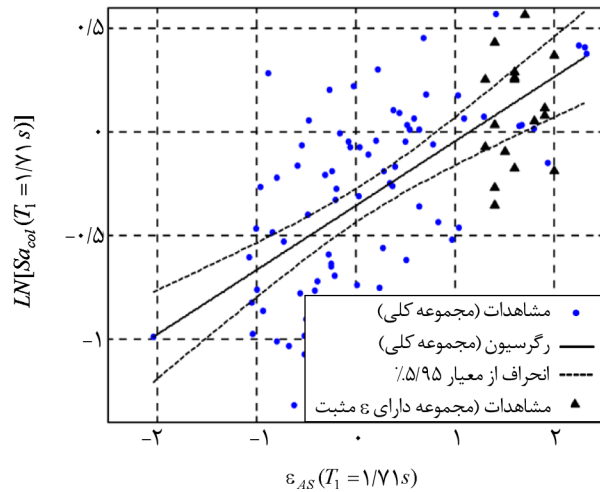


شکل (6): رابطه بین طیف شتاب (به عنوان ظرفیت فروریزش) و ε برای هر زمین لرزه به همراه نتایج تحلیل رگرسیون خطی بین این دو پارامتر [4].

8 - مقایسه دو روش

در شکل (7) توزیع ظرفیت فروریزش به‌دست‌آمده از دو روش 1 و 2 نمایش داده شده است. این شکل همچنین توزیع ظرفیت فروریزش روش 2 را قبل از آنکه برای ε اصلاح شود، نمایش داده است. شکل (8) مشابه شکل (6) است، با این تفاوت که به منظور امکان مقایسه نتایج، شکل (8) شامل اطلاعات مربوط به زمین‌لرزه‌های دارای اپسیلون مثبت می‌باشد.

اشکال (7) و (8) و جدول (1) همگی نشان می‌دهد که دو روش دارای نتایج تقریباً یکسانی هستند و میانگین ظرفیت فروریزش به‌دست‌آمده برای آن‌ها تنها 4 درصد با یکدیگر متفاوت است. پراکندگی نتایج ظرفیت فروریزش ($\sigma_{(Sa,col)}$) از 0/28 برای روش 1 تا 0/38 برای روش 2 متفاوت است که می‌توان گفت این اختلاف بسیار زیاد است. این اختلاف زیاد در مقدار پراکندگی نتایج را می‌توان ناشی از تعداد کم زمین‌لرزه‌های در نظر گرفته شده برای روش 1 دانست.

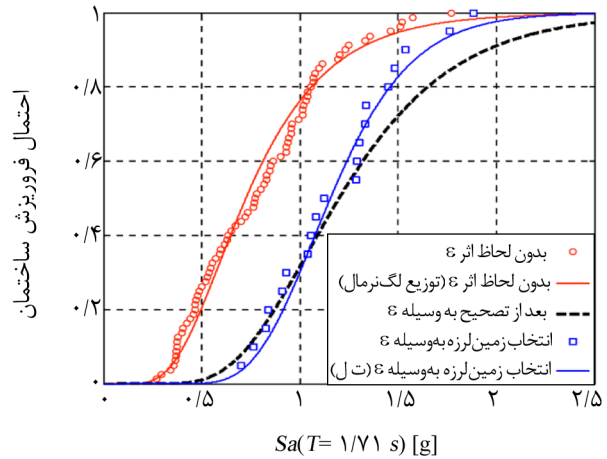


شکل (8): رابطه بین طیف شتاب و ε که در شکل (6) موجود است، به همراه نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از یک مجموعه از زمین‌لرزه‌های دارای ε مثبت [4].

در 50 سال 0/35 که مقدار انحراف معیار استاندارد کاهش‌یافته در رابطه (9) به‌دست‌آمده است. با توجه به این رابطه در تعیین این مقدار وزن تأثیر انحراف معیار ظرفیت فروریزش اصلاح‌نشده نسبت به انحراف معیار مقدار اپسیلون مورد انتظار (که در β_1^2 ضرب می‌شود) بیشتر است.

$$\sigma'_{LN[Sa,col(T_1)]} = \sqrt{(0.36)^2 + (0.31) \times (0.35)^2} = 0.38 \quad (9)$$

انحراف معیار کاهش‌یافته نسبت به انحراف از معیاری که به‌صورت مستقیم از زمین‌لرزه‌ها به‌دست‌آمده (که برابر با $\sigma_{LN[Sa,col(T_1)]} = 0/45$ است) 15 درصد کاهش یافته است. نسبت به افزایشی که در مقدار میانگین ظرفیت فروریزش در قسمت قبل شاهد بودیم، این کاهش در مقدار انحراف معیار تنها یک اثر متوسط بر روی ارزیابی فروریزش سازه خواهد داشت و تنها اثر آن در نواحی انتهایی توزیع ظرفیت فروریزش مشهود است.



شکل (7): مقایسه نتایج توزیع ظرفیت فروریزش به‌دست‌آمده از دو روش که نتایج روش 2 در حالت قبل و بعد از اصلاح توسط اپسیلون هدف نمایش داده شده است [3].

جدول (1): مقایسه نتایج خطر فروریزش ساختمان هشت طبقه بتنی حاصل از روش 1 و نتایج اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده روش 2 [3].

$\lambda_{col} [10^{-4}]$	$P[C/Sa_{2/50}]$	$\sigma_{LN}(Sa,col)$	میانگین $Sa,col(1/71s)$	روش‌ها
0/28	0/005	0/28	1/15	روش 1
0/50	0/024	0/38	1/20	روش 2
6/3	0/29	0/45	0/72	نتایج بدون لحاظ نمودن اثر ε
2	5	1/2	1/0	نسبت نتایج روش 2 به 1
23	58	1/6	0/63	نسبت نتایج اصلاح‌نشده به روش 1

ظرفیت فروریزش، نسخه ساده‌سازی شده‌ای از روش 2 برای اصلاح توزیع ظرفیت فروریزش توسط هسلتون و همکاران [3] ارائه شده که در آن دیگر نیازی به محاسبه $\varepsilon(T_1)$ برای زمین‌لرزه و انجام یک تحلیل رگرسیون نیست. در روش ساده‌سازی شده برای تخمین β_1 (پارامتر معادله (2)) از یک رابطه تجربی و برای تصحیح توزیع ظرفیت فروریزش از یک مقدار تقریبی $\sigma_{LN[Sa, col(T_1)]}$ استفاده شده است.

10 - بررسی مثال‌هایی از اصلاح نتایج از طریق روش ساده‌سازی شده

در این بخش برای بررسی روش ساده‌سازی شده و مقایسه آن با روش 2، سه مجموعه از ساختمان‌های بتن مسلح که در مجموع 111 ساختمان است مورد بررسی قرار گرفته‌اند [3].

مجموعه اول شامل 65 ساختمان قاب خمشی ویژه بتن مسلح مدرن و در محدوده یک تا بیست طبقه است. 30 ساختمان از این مجموعه بر اساس آیین‌نامه‌های رایج [21]، [22] برای منطقه کالیفرنیا آمریکا با خطر لرزه‌خیزی بالا [13] طراحی گردید. 35 ساختمان دیگر که چهار و دوازده طبقه بودند بر اساس پاسخگویی به ویرایش مقررات طراحی ساختمان طراحی شدند که ویرایش جدید شامل تغییراتی در مقاومت طراحی، دریافت درون طبقه و نسبت تیر ضعیف ستون قوی است [13].

در مثالی که مورد بررسی قرار گرفت نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از دو روش برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و با توجه به شکل (7) در بدترین حالت میانگین نرخ سالانه ظرفیت فروریزش λ_{col} حاصل از دو روش تنها دارای ضریب تغییراتی برابر با 2 است. این در حالی است که اگر نتایج روش 1 را با نتایج اصلاح‌نشده روش 2 مقایسه کنیم ضریب تغییرات در نتایج حاصله به حدود 23 خواهد رسید. هسلتون و دیرلین [13] در تحقیقات خود نشان دادند ضریب تغییرات λ_{col} با اعمال تغییر کوچکی در سازه می‌تواند از 1/5 تا 2/2 تغییر کند که به ضریب تغییرات نتایج حاصل از روش 2 بسیار نزدیک است.

9 - روش ساده‌سازی شده جهت محاسبه اثر اپسیلون

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، با استفاده از هر دو روش مجموعه زمین‌لرزه‌های دارای مقادیر مثبت اپسیلون و یک مجموعه زمین‌لرزه کلی و سپس اصلاح نتایج به‌وسیله ε ، می‌توان نتایج تقریباً یکسانی را برای ظرفیت فروریزش به دست آورد. از آنجایی که در روش 2 نیازی به انتخاب دسته زمین‌لرزه‌های جداگانه برای هر دوره تناوب سازه و ساختگاه نیست می‌توان این روش را مناسب‌تر دانست. با این حال و طبق آنچه در بخش قبل بیان شد، در روش 2 نیز جهت محاسبه $\varepsilon(T_1)$ برای هر زمین‌لرزه و تحلیل رگرسیون تلاش قابل‌توجهی نیاز است. به‌منظور ارائه یک روش عملی جهت اصلاح نتایج

جدول (2): نتایج حاصل از بررسی ظرفیت فروریزش 111 ساختمان [3].

اطلاعات طراحی			ساختمان بتنی قاب خمشی ویژه			ساختمان‌های بتنی دوره 1967			ساختمان بتنی قاب خمشی معمولی		
تعداد طبقات	سیستم مقاوم	RDR_{ult}	β_1	$\sigma_{LN, reg} / \sigma_{LN}$	RDR_{ult}	β_1	$\sigma_{LN, reg} / \sigma_{LN}$	RDR_{ult}	β_1	$\sigma_{LN, reg} / \sigma_{LN}$	
2	پیرامونی	0/067	0/26	0/82	0/035	0/22	0/86	0/28	0/95	0/024	
	داخلی	0/085	0/26	0/81	0/019	0/16	0/91	0/09	0/97	0/019	
4	پیرامونی	0/038	0/27	0/83	0/013	0/18	0/90	0/24	0/92	0/016	
	داخلی	0/047	0/26	0/83	0/016	0/20	0/88	0/27	0/97	0/011	
8	پیرامونی	0/023	0/31	0/81	0/007	0/16	0/97	0/12	0/82	0/009	
	داخلی	0/028	0/32	0/79	0/011	0/18	0/95	0/19	0/95	0/017	
12	پیرامونی	0/026	0/29	0/84	0/005	0/10	0/97	0/17	0/97	0/009	
	داخلی	0/022	0/25	0/86	0/010	0/16	0/95	0/16	-	-	
میانگین زیرمجموعه		0/33	0/27	0/82	0/012	0/17	0/93	0/18	0/95	0/014	
میانگین مجموعه کلی		-	0/28	-	-	0/18	-	0/19	-	-	

شکل ساختمان‌ها به وسیله حداکثر دررفت نسبی بام (RDR_{ult}) نمایش داده شده است. مقدار RDR_{ult} در واقع حداکثر دررفت نسبی بام در لحظه‌ای که مقاومت سازه به میزان 20 درصد نسبت به مقاومت حداکثر افت نموده، می‌باشد. همچنین ساختمان‌هایی که دارای مقادیر RDR_{ult} بیشتری هستند مقدار بالاتری از β_1 خواهند داشت.

11 - بررسی اجزاء روش ساده‌سازی شده

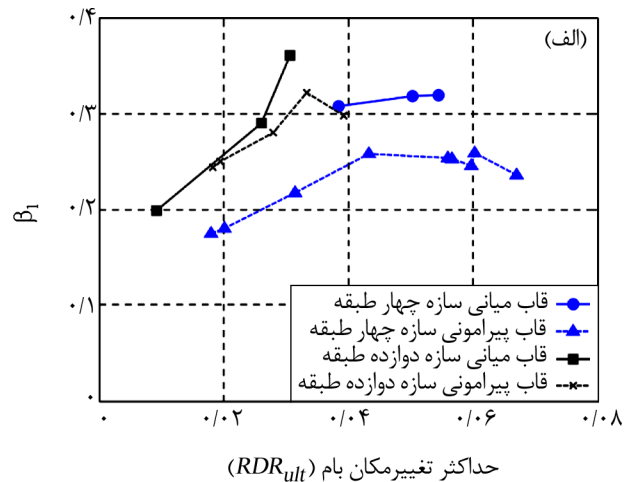
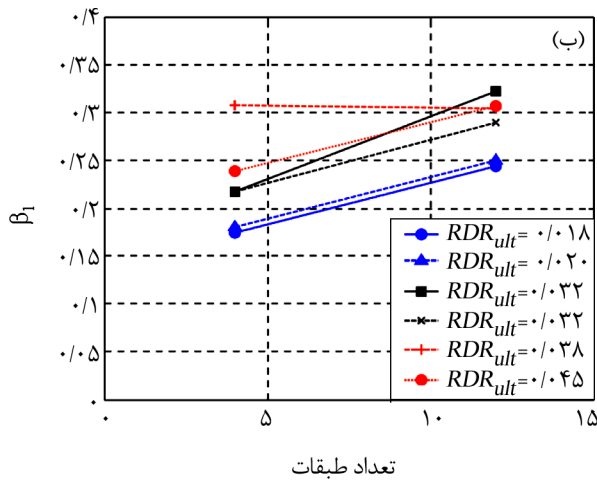
11-1 - محاسبه مقدار β_1

اهمیت ε (که در پارامتر β_1 منعکس شده است) در ساختمان‌های دارای ظرفیت تغییر شکل بالا بیشتر است، زیرا این ساختمان‌ها از نظر شکل‌پذیری نرم بوده و دوره تناوب اصلی آن‌ها قبل از فروریزش افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود در محاسبه پاسخ سازه شکل طیف و به‌ویژه مقادیر طیف مربوط به دوره تناوب‌های بیشتر از T_1 (دوره تناوب اصلی سازه) اهمیت بیشتری یابد. در شکل (الف-9) چگونگی رابطه بین RDR_{ult} و β_1 برای چهار دسته از ساختمان‌های قاب خمشی ویژه بتن مسلح (مجموعه اول) که هر دسته شامل ساختمان‌های هم‌ارتفاع می‌باشد نمایش داده شده است [12]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اگر حداکثر دررفت نسبی بام از 0/04 افزایش یابد مقدار پارامتر β_1 بر روی پاسخ تغییر شکل سازه تقریباً بی‌تأثیر است. علاوه بر این پارامتر β_1 در سازه‌های بلند به دلیل اهمیت اثر مودهای بالاتر تمایل به افزایش خواهد داشت، بنابراین به دست آوردن طیف برای دوره تناوب‌های کمتر از T_1 بسیار مهم است. در شکل (ب-9) به‌منظور بررسی اثر ارتفاع ساختمان (بدون در نظر گرفتن اثر ظرفیت تغییر شکل)، مقادیر β_1 مربوط به شش جفت از ساختمان‌های چهار و دوازده طبقه قاب خمشی ویژه بتن مسلح که همگی دارای مقادیر یکسانی از RDR_{ult} می‌باشند، نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در پنج دسته از شش دسته ساختمان مورد بررسی یک ارتباط مشخص (که یک روند افزایشی است) را بین β_1 و ارتفاع ساختمان نشان می‌دهد.

مجموعه دوم شامل 20 ساختمان قاب خمشی معمولی است که در محدوده دو تا دوازده طبقه بوده و نماینده ساختمان‌های شرق آمریکا می‌باشند. طراحی این ساختمان‌ها در جهت توسعه پروژه 63 شورای فناوری‌های کاربردی آمریکا (ATC-63) و به‌عنوان بخشی از این پروژه انجام گرفت [8].

مجموعه سوم شامل 26 ساختمان بتن مسلح غیرشکل‌پذیر است که نماینده ساختمان‌های دوره 1967 بوده و در محدوده‌ی دو تا دوازده طبقه می‌باشند. ساختگاه این سازه‌ها نیز ناحیه کالیفرنیا با خطر لرزه‌خیزی بالا [23] تعیین شده است.

در مثال‌های فوق آنالیز ظرفیت فروریزش برای هر ساختمان و تحلیل رگرسیون برای محاسبه ضریب β_1 (که در رابطه (2) تعریف شده) انجام شد [3] که یک زیرمجموعه از نتایج به‌دست‌آمده در جدول (2) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود مقدار میانگین β_1 برای مجموعه 65 تایی از ساختمان‌های بتنی قاب خمشی ویژه 0/28 به‌دست‌آمده است. این مقدار برای طیف وسیعی از ساختمان‌ها که در ارتفاع و طراحی متفاوت می‌باشند، فوق‌العاده پایدار است و مقدار ضریب تغییرات آن تنها 0/14 است. پایداری مقدار β_1 نشان می‌دهد اثر ε (یا شکل طیف) بر روی پاسخ ظرفیت فروریزش سازه‌هایی که ظرفیت تغییر شکل غیرخطی آن‌ها شبیه به این مجموعه است تقریباً یکسان می‌باشد. مقدار میانگین β_1 برای مجموعه 20 تایی از ساختمان‌های بتنی قاب خمشی معمولی 0/19 است که به میزان 40 درصد از مجموعه اول که دارای ساختمان‌های شکل‌پذیرتر می‌باشد، کمتر است. مقدار میانگین به‌دست‌آمده برای ساختمان‌ها دوران 1967 نیز 0/18 است که کاملاً شبیه به مجموعه دوم است. مقادیر کم β_1 نشان می‌دهد که ε بر روی پاسخ ظرفیت فروریزش ساختمان‌های قاب خمشی معمولی و ساختمان‌های دوره 1967 (و به‌طور کلی سازه‌های دارای ظرفیت تغییرشکلی پایین) تأثیر کم‌تری دارد. در جدول (2) ظرفیت تغییر

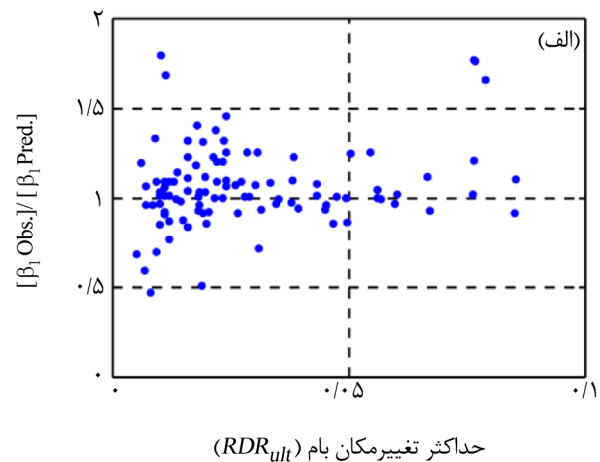
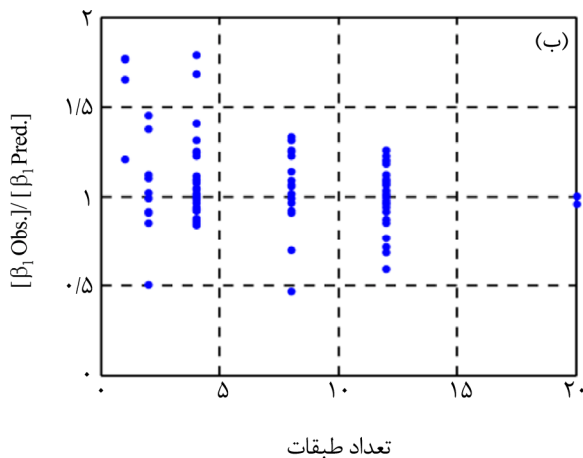


شکل (9): رابطه بین β_1 با (الف) ظرفیت تغییر شکل و (ب) تعداد طبقات ساختمان [3].

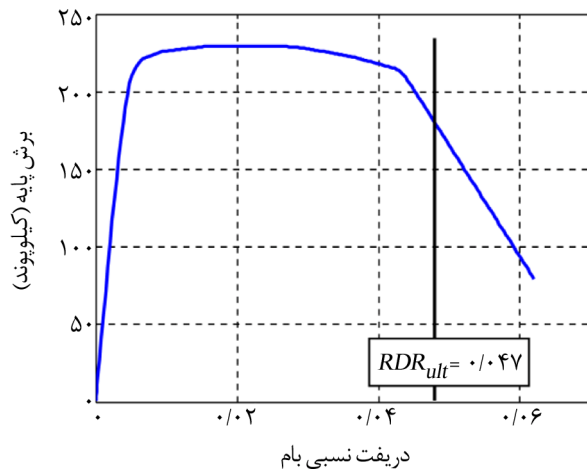
در رابطه (10)، N تعداد طبقات ساختمان است که باید کمتر از بیست طبقه (از سطح تراز پایه) باشد. مقدار RDR_{ult} از طریق تحلیل بارافزون استاتیکی به دست می‌آید. استفاده از این نوع تحلیل به دلیل اثر موده‌های بالاتر در سازه‌های بلند دارای محدودیت‌هایی است؛ با این حال در این مثال جهت محاسبه پاسخ تقریبی ظرفیت تغییر شکل ساختمان‌ها از این تحلیل استفاده شده است. در شکل (9)، اثر ارتفاع و ظرفیت تغییر شکل تقریباً یکدیگر را خنثی می‌کنند. به همین علت مقدار β_1 برای 30 ساختمان قاب خمشی ویژه بتنی که طبق آیین‌نامه طراحی شده و از یک تا بیست طبقه ارتفاع دارند، تقریباً ثابت است. در شکل (10)، مقدار نسبی β_1 مشاهده شده به β_1 به دست آمده از رابطه (10) نسبت به ظرفیت تغییر شکل و تعداد طبقات ساختمان نمایش داده شده است.

برای محاسبه $LN(\beta_1)$ (که تابع RDR_{ult} و ارتفاع ساختمان است)، تحلیل رگرسیون بر روی نتایج به دست آمده از 111 ساختمان مورد بررسی انجام گرفت تا رابطه‌ای برای محاسبه β_1 به دست آید [20]. سپس نتایج به دست آمده جهت نمایش بهتر رابطه بین ظرفیت تغییر شکل و ارتفاع سازه با یک قضاوت مهندسی [12] تصحیح گردید. از آنجایی که تعداد داده‌های ارتفاع و ظرفیت تغییر شکل موجود در شکل (9) کم بوده و به صورت جداگانه و نقطه‌ای است، تصحیح و محاسبه نتایجی که منعکس‌کننده‌ی این داده‌های گسسته است ضروری می‌باشد. معادله 8 از اثرات تقریباً خطی ارتفاع و غیرخطی RDR_{ult} برای ساختمان‌های دارای ظرفیت تغییر شکل پایین به دست آمده است.

$$\hat{\beta}_1 = (0.4)(N + 5)^{0.35} (RDR_{ult}^*)^{0.38} \quad (10)$$



شکل (10): مقدار نسبی β_1 مشاهده شده به β_1 به دست آمده نسبت به (الف) ظرفیت تغییر شکل و (ب) تعداد طبقات ساختمان [3].



شکل (11): تحلیل استاتیکی بار افزون مثال ساختمان چهار طبقه بتنی [3].

2. تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه جهت محاسبه ظرفیت فروریزش با استفاده از 44 زمین لرزه دور از گسل توسط FEMA P695 [14] ارائه شده است (روش دیگر استفاده از مجموعه زمین لرزه‌های کلی بزرگ‌تر و شامل 78 زمین لرزه است). هسلتون و همکاران [3] در بررسی مثال ساختمان چهار طبقه بتنی از هر دو مجموعه استفاده کردند که نتایج نشان داد میانگین و پراکندگی نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از هر دو مجموعه مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و فقط جهت انجام تحلیل رگرسیون دقیق‌تر بین $\varepsilon(T_1)$ و $LN[S_{a,col}(T_1)]$ مجموعه بزرگ‌تر مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر لگاریتمی ظرفیت فروریزش برای هر زمین لرزه به دست آورده و سپس میانگین و پراکندگی این مقادیر برای تمام زمین لرزه‌ها محاسبه می‌گردد. نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی مثال فوق از رابطه (12) به دست می‌آید.

$$\mu_{LN[S_{a,col}(T_1)]} \approx \mu_{LN[S_{a,col}(0.94s)]} = 0.601 \quad (12)$$

$$\sigma_{LN[S_{a,col}(T_1)]} \approx \sigma_{LN[S_{a,col}(0.94s)]} = 0.4 \quad (13)$$

میانگین ظرفیت فروریزش از مقدار میانگین لگاریتمی به دست آمده از رابطه (4) محاسبه می‌گردد.

$$Mean_{[S_{a,col}(0.94s)]} = \exp\{\mu_{LN[S_{a,col}(0.94s)]}\} = 1.82g \quad (14)$$

3. با استفاده از رابطه (10) مقدار β_1 برای مثال ساختمان چهار طبقه بتنی تخمین زده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج رابطه (10) برای 111 ساختمانی که در این مثال مورد ارزیابی قرار گرفت مناسب و منطقی است. با این حال بر اساس این نتایج در سه ساختمان یک طبقه مقدار β_1 به صورت قابل توجهی محافظه کارانه به دست آمده که با توجه به محاسبه نتایج دقیق در چهل ساختمان یک طبقه دیگر می‌توان از آن صرف نظر نمود.

11-2 - محاسبه مقدار $\sigma'_{LN[S_{a,col}(T_1)]}$

نتایج موجود در جدول (2) نشان می‌دهد که با محاسبه اثر ε پراکندگی نتایج ظرفیت فروریزش کاهش خواهد یافت. این کاهش در ساختمان‌های شکل پذیر قاب خمشی ویژه بتنی 10 تا 15 درصد و ساختمان‌های غیرشکل پذیر در حدود 5 درصد است. به منظور ساده‌سازی محاسبات از این اختلاف صرف نظر شده و پراکندگی به صورت مستقیم از مجموعه کلی زمین لرزه‌ها به دست می‌آید.

$$\sigma'_{LN[S_{a,col}(T_1)]} \approx \sigma_{LN[S_{a,col}(T_1)]} \quad (11)$$

12 - روش ساده‌سازی شده

در این بخش با ارائه یک مثال از ساختمان قاب خمشی ویژه بتن مسلح چهار طبقه [3] تلاش شده تا اصلاح نتایج فروریزش از طریق روش ساده‌سازی شده به صورت گام به گام بیان گردد.

این مراحل به صورت زیر است:

1. مدل‌سازی یک ساختمان مقاوم که بتوان آن را در سطح فروریزش بررسی نمود. محاسبه دوره تناوب اصلی سازه و انجام یک تحلیل بارافزون استاتیکی با یک الگوی بار مناسب که بتوان حداکثر دریفت نسبی بام (RDR_{ulti}) را زمانی که مقاومت سازه به میزان 20 درصد مقاومت حداکثر افت نموده، محاسبه نمود. در این مثال دوره تناوب اصلی ساختمان چهار طبقه بتنی 0/94 ثانیه است. تحلیل بار افزون با استفاده از الگوی بار پیشنهادی ASCE 7-05 بر روی سازه انجام شد که در نتیجه این تحلیل حداکثر دریفت نسبی بام 0/047 به دست آمد، شکل (11).

کلی زمین لرزه‌ها $(\bar{\varepsilon}(T_1)_{records})$ با مقدار اسیلون هدف حاصل از تجزیه خطر لرزه‌ای $(\bar{\varepsilon}(T_1))$ انجام می‌گیرد. محاسبات فوق برای ساختمان چهار طبقه قاب خمشی ویژه بتنی به صورت زیر انجام گرفته است.

$$\mu'_{LN[Sa,col(T_1)]} = \mu_{LN[Sa,col(T_1)]} + \hat{\beta}_1[\bar{\varepsilon}_0(T_1) - \bar{\varepsilon}(T_1)_{records}] \quad (18)$$

$$\mu'_{LN[Sa,col(T_1)]} = 0.601 + 0.254(1.9 - 0.17) = 1.04 \quad (19)$$

$$Mean'_{Sa,col(0.94s)} = \exp\{\mu'_{LN[Sa,col(0.94s)]}\} = \exp\{1.04\} = 2.83g \quad (20)$$

نسبت میانگین ظرفیت فروریزش اصلاح شده به مقادیر اصلاح نشده آن با استفاده از روابط (12) و (18) با استفاده از رابطه (21) محاسبه می‌شود.

$$Ratio = \frac{Mean'_{Sa,col(T_1)}}{Mean_{Sa,col(T_1)}} = \frac{Mean'_{Sa,col(0.94s)}}{Mean_{Sa,col(0.94s)}} = \quad (21)$$

$$\frac{2.83g}{1.82g} = 1.55$$

7. محاسبه پراکندگی ظرفیت فروریزش از طریق رابطه (12). پیشنهاد هسلتون و همکاران [3] محاسبه مقدار جهت ساده‌سازی به صورت مستقیم از تحلیل دینامیکی غیرخطی است.

$$\hat{\beta}_1 = (0.4)(N+5)^{0.35} (RDR_{ult}^*)^{0.38} \quad (15)$$

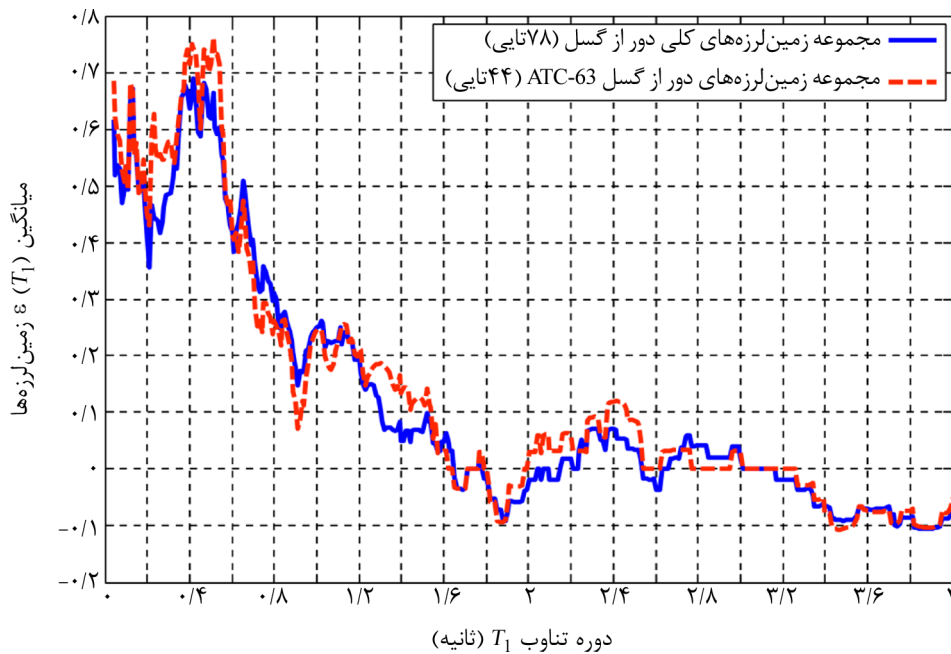
$$RDR_{ult}^* = 0.04 \quad (16)$$

$$\hat{\beta}_1 = (0.4)(4+5)^{0.35} (0.04)^{0.38} = 0.254 \quad (17)$$

4. با توجه به ساختگاه و سطح خطر موردنظر مقدار میانگین اسیلون هدف $(\varepsilon(T_1)_{target})$ تعیین می‌گردد. برای مثال ساختمان چهار طبقه بتنی این مقدار $\varepsilon(T_1)_{target} = 1/9$ است.

5. به علت تفاوت بین اسیلون هدف و مقدار اسیلون زمین لرزه‌های مورد استفاده می‌بایست نتایج اصلاح گردد. برای این منظور مقدار میانگین اسیلون مجموعه زمین لرزه‌های کلی $(\bar{\varepsilon}(T_1)_{records})$ محاسبه می‌گردد. میانگین مقادیر اسیلون در شکل (12) نمایش داده شده و مقدار $(\bar{\varepsilon}(T_1)_{records})$ را از روی این شکل می‌توان محاسبه نمود. برای مثال ساختمان چهار طبقه بتنی با توجه به شکل (۱۲) و اینکه دوره تناوب اصلی سازه 0/94 ثانیه است با استفاده از مجموعه کلی 78 زمین لرزه خواهیم داشت $\bar{\varepsilon}(T_1)_{records} = 0/17$ ؛ بنابراین با داشتن مقدار $\bar{\varepsilon}(T_1)_{records}$ می‌توان با استفاده از هر مجموعه از زمین لرزه‌ها سازه را تحلیل نمود.

6. میانگین ظرفیت فروریزش باید اصلاح شود. اصلاح نتایج ظرفیت به خاطر تفاوت بین میانگین اسیلون مجموعه



شکل (12): مقدار میانگین ε برای مجموعه زمین لرزه‌های کلی و یک زیرمجموعه 44 تایی از آن [3].

بنابراین در مثال فوق خواهیم داشت:

$$\sigma'_{LN[Sa,col(T_1)]} \approx \sigma_{LN[Sa,col(0.94s)]} = 0.4 \quad (22)$$

در روش مستقیم محاسبه اثر اپسیلون مقادیر اپسیلون زمین لرزه‌های انتخابی باید متناسب با ساختگاه ساختمان (شدت فروریزش Sa و دوره تناوب سازه موردنظر) انتخاب گردند. این روش در ارزیابی فروریزش ساختمان‌هایی با دوره تناوب و ساختگاه مختلف اغلب غیرممکن است. برای این منظور یک روش دوم نیز وجود دارد که در آن دیگر نیازی به انتخاب زمین لرزه‌ها بر اساس مقدار اپسیلون نیست و نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله اپسیلون هدف اصلاح می‌گردد. از آنجایی که روش دوم نیز نیازمند انجام محاسبات قابل توجهی می‌باشد، علاوه بر این دو روش، یک نسخه ساده‌سازی شده از روش دو نیز ارائه شده است. در این مقاله نتایج ظرفیت فروریزش حاصل از این سه روش برای یک ساختمان چهار طبقه بتنی نمایش داده شد تا مشخص گردد روش ساده‌سازی شده دارای نتایج بسیار نزدیک به نتایج روش‌های 1 و 2 است.

مراجع

1. Baker, J.W. and Cornell, C.A. (2006) Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(9), 1077-1095.
2. Baker, J.W. (2005) *Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford Univ., Stanford, CA.
3. Haselton, C.B., Baker, J.W., Liel A.B., and Deierlein G.G. (2011) Accounting for Ground-Motion Spectral Shape Characteristics in Structural Collapse Assessment through an Adjustment for Epsilon. *Journal of Structural Engineering*, **137**(3), 332-344.
4. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. (1997) Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquake. *Seismological Research Letters*, **68**(1), 94-126.
5. Mousavi, M., Ghafory Ashtiany, M., and Azarbakht, A. (2011) A new indicator of elastic spectral shape for the reliable selection of ground

13 - مقایسه روش ساده‌سازی شده با روش 2

برای مقایسه این دو روش، روش 2 نیز توسط هسلتون و همکاران [3] برای مثال ساختمان چهار طبقه قاب خمشی ویژه بتنی استفاده شد که نتایج به‌دست‌آمده انطباق بسیار خوبی با نتایج حاصل از روش ساده‌سازی شده داشت. با انجام یک تحلیل رگرسیون کامل مقدار $\beta_1 = 0/257$ با مقدار $\beta_1 = 0/254$ به‌دست‌آمده از روش ساده‌سازی شده تقریباً برابر است. میانگین ظرفیت فروریزش در روش 2، $2/63$ g و در روش ساده‌سازی شده $2/83$ g است. تفاوت مقادیر ظرفیت به‌دست‌آمده از دو روش در حدود 8 درصد است که مقداری منطقی و در مقایسه با حالتی که نتایج اصلاح نمی‌شود، بسیار ناچیز می‌باشد و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. پراکندگی نتایج در روش 2، $0/352$ است که در مقایسه با روش ساده‌سازی شده اندکی محافظه‌کارانه و برابر با $0/4$ است، در حدود 10 درصد کمتر است. در نهایت احتمال فروریزش سازه برای سطح خطر 2 درصد در 50 سال در هر دو روش تقریباً برابر صفر است (برای روش 2، $0/2$) درصد و برای روش ساده‌سازی شده $0/1$) درصد به دست آمد.

14 - نتیجه‌گیری

چنانچه ظرفیت فروریزش سازه با تحلیل غیرخطی دینامیکی مورد ارزیابی قرار گیرد، اعمال اثر شکل طیف در انتخاب و مقیاس نمودن زمین لرزه‌ها بسیار حیاتی است. در این مقاله مشخصات شکل طیف و چگونگی تأثیر آن از طریق پارامتر اپسیلون بر پاسخ ارزیابی فروریزش سازه بیان شده است (پارامتر اپسیلون در واقع انحراف از معیار طیف شتاب زمین لرزه از طیف به‌دست‌آمده از رابطه کاهندگی است). بررسی یک ساختمان بتنی قاب خمشی ویژه هشت طبقه نشان داد که با اصلاح نتایج از طریق پارامتر اپسیلون پاسخ میانگین ظرفیت فروریزش تا $1/6$ برابر افزایش می‌یابد.

- (FEMA) (2008) Recommended methodology for quantification of building system performance and response parameters. *ATC-63 Project 90% Draft Rep.-FEMA P695*, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
15. Haselton, C.B. and Baker, J.W. (2006) Ground motion intensity measures for collapse capacity prediction: Choice of optimal spectral period and effect of spectral shape. *Proc. 8th National Conf. on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.*
 16. Goulet, C.A., Haselton, C.B., MitraniReiser, J., Beck, J.L., Deierlein, G.G., Porter, K.A., and Stewart, J.P. (2007) Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building-from seismic hazard to collapse safety and economic losses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **36**(13), 1973-1997.
 17. Zareian, F. (2006) *Simplified performance-based earthquake engineering*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford Univ., Stanford, CA.
 18. Baker, J.W. and Cornell, C.A. (2008) Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions. *Engineering Structures*, **30**(4), 1048-1057.
 19. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. (2002) Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(3), 491-514.
 20. Chatterjee, S., Hadi, A.S., and Price, B. (2000) *Regression Analysis by Example*, 3rd Ed., Wiley, New York.
 21. ASCE (2005) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. 7-05, Reston, VA.
 22. American Concrete Institute (ACI) (2005) *Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-05*, Farmington Hills, MI.
 23. Liel, A.B. (2008) *Assessing the collapse risk of California's existing reinforced concrete frame structures: Metrics for seismic safety decisions*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford Univ., Stanford, CA.
 - motion records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(12), 1403-1416.
 6. Ghafory Ashtiany, M., Mousavi, M., and Azarbakht, A. (2011) Strong ground motion record selection for the reliable prediction of the mean seismic collapse capacity of a structure group. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(6), 691-708.
 7. Boore, D.M., Joyner, W.B., and Fumal, T.E. (1997) Equations for estimating horizontal response spectra and peak accelerations from western North America earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letters* **68**(1), 128-153.
 8. Baker, J.W. and Jayaram, N. (2008) Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models. *Earthquake Spectra*, **24**(1), 299-317.
 9. Liel, A.B., Haselton, C.B., and Deierlein, G.G. (2010) Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. II: Comparative assessment of nonductile and ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, **137**(4), 492-502.
 10. Haselton, C.B., Liel, A.B., Deierlein, G.G., Dean, B.S., and Chou, J.H. (2010) Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, **137**(4), 481-491.
 11. Li, Y., Song, R., and Van De Lindt, J.W. (2014) Collapse fragility of steel structures subjected to earthquake mainshock-aftershock sequences. *Journal of Structural Engineering*, **140**(12).
 12. Tothong, P. (2007) *Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships, and nearfault effects*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford Univ., Stanford, CA.
 13. Haselton, C.B. and Deierlein, G.G. (2007) Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete frame. PEER Rep. 2007/08, *Pacific Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.*
 14. Federal Emergency Management Agency