

اپسیلون به عنوان شاخصی از شکل شتاب نگاشت

محسن غفوری آشتیانی (استاد)
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهدی موسوی* (استادیار)

علیرضا آذربخت (استادیار)
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)
دوری ۲ - ۲۹، شماره ۳، ص. ۱۰۹-۱۱۵، (پادداشت‌نوی)

در برآورد خطر پذیری لرزه‌ی سازه‌ها از سنج‌های مختلف از شدت زلزله می‌توان سود جست که در این بین، طیف پاسخ شتاب $(S_a(T))$ شناخته شده‌ترین آنهاست. در سال‌های اخیر با تأکید بر «ناکامل» بودن این سنج، تحقیقات دامنه‌داری صورت پذیرفته که شمره‌ی آن ارائه‌ی روش‌هایی برای برآورد واقع‌گرایانه‌تر پاسخ سازه‌هاست. در این نوشتار، ضمن بازتعریف این مسئله به بررسی سیر پژوهش‌های سال‌های اخیر و دستاوردهای آن پرداخته شده است. یافته‌های سال‌های اخیر حاکی از آن است که به‌کارگیری طیف یکنواخت خطر $(UHS)^1$ برای تحلیل سازه‌ها که در آیین‌نامه‌های امروزی استفاده می‌شود، منجر به برآورد محافظه‌کارانه‌ی پاسخ می‌شود. نقد روش فعلی آیین‌نامه‌ها برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله و نیز معرفی نسل نوینی از طیف پاسخ با عنوان طیف میانگین شرطی $(CMS)^2$ بخش دیگری از این نوشتار است.

ashtiany@iiees.ac.ir
m.mousavi@araku.ac.ir
a-azarbakht@araku.ac.ir

واژگان کلیدی: خطر، خطرپذیری، سنج‌ی شدت، پاسخ، ارزیابی.

۱. مقدمه

این نوشتار بر بلوک دوم روش فوق متمرکز است و به مرور روند مطالعه‌های سال‌های اخیر در خصوص برآورد پاسخ به صورت تابعی از «سنج‌ی شدت» پرداخته است.

۲. برآورد پاسخ سازه‌ی

«سنج‌ی شدت» پارامتر حد واسط بلوک «تحلیل خطر» و بلوک «تحلیل سازه» است. با به‌کارگیری سنج‌ی شدت، مثل IM_1 به نمایندگی از ورودی لرزه‌ی، شکل ریاضی محاسبه‌ی نرخ فراگذشت پاسخ سازه (θ) از سطح x به صورت رابطه‌ی ۱ قابل بازنویسی است:^[۱]

$$\lambda_{\theta}(x) = \int_{IM_1} G_{\theta|IM_1}(x|im_1) |d\lambda_{IM_1}(im_1)| \quad (1)$$

در این رابطه، $G_{\theta|IM_1}(x|im_1)$ احتمال فراگذشت θ از مقدار x به شرط رخداد یک زلزله با شدت $im_1 = IM_1$ و $d\lambda_{IM_1}(im_1)$ نرخ سالانه‌ی فراگذشت IM_1 از مقدار im_1 است.

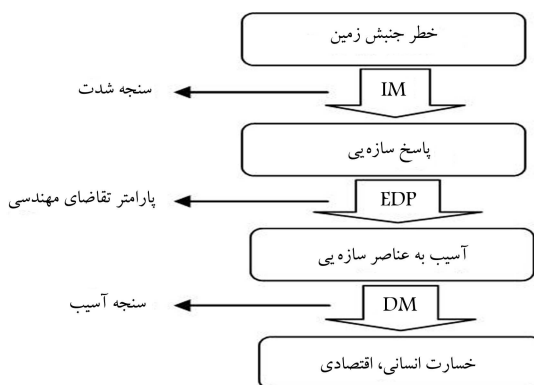
چالش‌های مختلفی در استفاده از رابطه‌ی ۱ برای محاسبه‌ی نرخ پاسخ سازه مطرح شده است. از جمله آنکه به‌کارگیری کدام سنج‌ی شدت منجر به برآورد دقیق‌تر پاسخ می‌شود. دقت در برآورد پاسخ را می‌توان به میزان پراکندگی^۹ پاسخ مرتبط دانست. پراکندگی کمتر پاسخ به «کارایی»^{۱۰} بیشتر معیار شدت تعبیر شده است.^[۲]

تصمیم‌گیری نظام‌مند در حوزه‌ی مدیریت کاهش آثار زلزله مستلزم ارزیابی کمی خطرپذیری^۲ سازه‌هاست. مرکز تحقیقات مهندسی زلزله‌ی پسیفیک (PEER)^۴، فرایندی مدون برای حل این مسئله ارائه کرده است.^[۱] کمی‌سازی خطر^۵ لرزه‌ی، پاسخ سازه‌ی، آسیب وارده به سازه و خسارات منتج شده (اعم از خسارت‌های اقتصادی و انسانی) مراحل کلیدی این فرایند است. ویژگی بارز در روش PEER، ساختار بلوکی آن است که این امکان را فراهم می‌سازد تا هر یک از مراحل به صورت مستقل از سایر مراحل مورد مطالعه قرارگیرد. چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، ارتباط بین بلوک‌های مختلف این روش به کمک پارامترهای حد واسط صورت پذیرفته است.

در روش شناسی PEER، متغیرهای حد واسط عبارت‌اند از: «سنج‌ی شدت» (IM)^۶، «پارامترهای تقاضای مهندسی» (EDP)^۷ و «سنج‌ی آسیب» (DM)^۸. نکته‌ی مهم این روش این است که در هر یک از بلوک‌ها، تحلیل فقط به متغیر حد واسط ورودی وابسته است و به سناریوی زلزله‌ی رخ داده بستگی ندارد. برای مثال، در بلوک دوم پاسخ فقط به «سنج‌ی شدت» وابسته است و به هیچ متغیر دیگری مثل بزرگای یا فاصله بستگی ندارد. همچنین شایان ذکر است که هر بلوک فقط به بلوک ماقبل بستگی دارد و مستقل از بلوک‌های ماقبل‌تر است. برای نمونه، آسیب سازه فقط به «پارامتر تقاضای مهندسی» بستگی دارد و مستقل از «سنج‌ی شدت» است.

* نویسنده مستقل

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۹/۲۷، پذیرش ۱۳۹۰/۱۲/۱۴.



شکل ۱. نمایش شماتیک مدل مهندسی زلزله‌ی عملکردی.

(d_y) است، آنگاه شکل طیف دیگر عاملی برای بروز آریبی در برآورد پاسخ سازه نخواهد بود. عدم شهرت روابط کاهندگی غیرخطی در ادبیات مهندسی سبب شده است تا این سنجه‌ی شدت چندان مورد توجه قرار نگیرد.

در مقابل این مطالعات که در پی معرفی سنجه‌ی شدت اصلاح شده برای حذف آریبی پاسخ ناشی از اثر شکل طیف بوده است، در رویکردی دیگر بحث استفاده‌ی توأم از دو سنجه‌ی شدت به صورت یک بردار سنجه‌ی شدت نیز از سوی برخی از پژوهشگران مطرح شده است. براساس این نگرش، رابطه‌ی ۱ به صورت رابطه‌ی ۲ قابل بازنویسی است:^[۷]

$$\lambda_{\theta}(x) = \int_{IM_1} \int_{IM_2} G_{\theta|IM_1, IM_2}(\theta | im_1, im_2) f_{IM_2|IM_1}(im_2 | im_1) |d\lambda_{IM_1}(im_1)| \quad (2)$$

در این رابطه، $f_{IM_2|IM_1}(im_2 | im_1)$ تابع چگالی احتمال رخداد IM_2 به شرط رخداد IM_1 است، که اتفاقاً جمله‌ی چالش برانگیز برای محاسبه‌ی نرخ پاسخ است. اگرچه برای غلبه بر مشکل محاسبه‌ی نرم مذکور، فرایندی با عنوان «تحلیل خطر احتمالاتی برداری»^[۴] در ادبیات پیشنهاد شده است؛^[۸] اما به دلیل پیچیدگی و فاصله‌ی قابل توجه از تحلیل خطر احتمالاتی استاندارد (PSHA) استفاده از آن برای سنجه‌های شدت گوناگون فعلاً عملی نیست.^[۷]

پژوهشگران دیگری برای حالتی خاص به بررسی جوانب مختلف استفاده از بردار شدت پرداخته‌اند.^[۷] این حالت خاص که اتفاقاً اوج کار این پژوهشگران بوده است، زوج $\langle S(T), \varepsilon \rangle$ برای به‌کارگیری در انتگرال مذکور معرفی شده است. اپسیلون (ε) فاصله‌ی بین مقدار طیف پاسخ شتاب یک شتاب‌نگاشت واقعی، $S_a(T)$ ، از مقدار پیش‌بینی شده با یک رابطه‌ی کاهندگی^[۵]، $\overline{S_a(T)}$ ، است که برحسب تعداد انحراف معیار حاصل از رابطه‌ی کاهندگی، $\sigma_{\ln S_a}$ ، بیان می‌شود (رابطه‌ی ۳). این پارامتر غالباً مورد توجه لرزه‌شناسان قرار دارد.

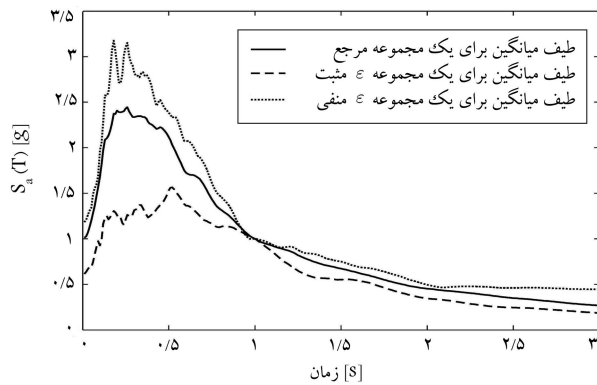
$$\varepsilon = \frac{\ln S_a(T) - \ln \overline{S_a(T)}}{\sigma_{\ln S_a}} \quad (3)$$

در این رابطه لازم به توجه است که با منظورکردن بردار مذکور $S_a(T)$ برای محاسبه‌ی نرخ پاسخ، نرم چالشی توزیع احتمال شرطی دو سنجه‌ی شدت کاملاً روشن است، چرا که با فرض اینکه پراکندگی مشاهدات در روابط کاهندگی از یک توزیع نرمال پیروی کند (که فرضی معقول است)، طبیعتاً اپسیلون متغیری تصادفی با میانگین صفر و آریبی معیار واحد است. نکته‌ی مهم این است که این پژوهشگران ε را عاملی برای رخداد آریبی در برآورد پاسخ سازه نشان داده‌اند و بنابراین منظورکردن ε در فرایند محاسبه‌ی پاسخ، عاملی برای کاهش پتانسیل آریبی است.^[۷] این یافته که ε عامل آریبی در پاسخ است، دقیقاً معادل این نتیجه‌ی بسیار مهم است که مقیاس‌کردن ورودی‌های زلزله عامل آریبی در پاسخ است؛ که البته در تحقیقات برخی پژوهشگران نیز با روشی دیگر اثبات شده است.^[۹] بنابراین استفاده از فرم انتگرالی دوگانه (رابطه‌ی ۲) سبب می‌شود تا مقیاس‌کردن ورودی‌های زلزله با دغدغه‌ی همراه نباشد. نکته‌ی بسیار جالب این است که پارامتر ساده‌ی ε به‌تنهایی شناسه‌ی مناسبی از شکل طیف شتاب‌نگاشت‌های میدان دور است.^[۷] با در کنار هم قراردادن عبارات اخیر می‌توان به نتیجه‌ی بسیار مهمی دست یافت و آن این است که پراکندگی شکل طیف یک مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت که با مقداری مشخص مثل $S_a(T)$ ، همپایه شده‌اند، با وضعیت پراکندگی اپسیلون آنها همبسته است. این نتیجه را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که شکل طیف یک شتاب‌نگاشت کاملاً نادر با شکل طیف

هر چه کارایی یک سنجه‌ی شدت بیشتر باشد، تعداد ورودی‌های لازم و به تبع آن حجم محاسبات دینامیکی نیز کاسته می‌شود؛ به طوری که کاهش ۵۰ درصدی در پراکندگی پاسخ منجر به کاهش ۷۵ درصدی کمینه‌ی ورودی‌های لازم می‌شود.^[۴] برای مثال، کارایی بیشتر سنجه‌ی $S_a(T)$ نسبت به PGA به اثبات رسیده است.^[۵] علی‌رغم مطالعه‌های صورت پذیرفته برای ارائه‌ی سنجه‌های شدت پیشرفته‌تر که با منظورکردن رفتار غیرخطی و همچنین اثرات مودهای بالاتر همراه است،^[۴] همچنان سنجه‌ی $S_a(T)$ به‌منزله‌ی پارامتری عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

منظورکردن یک سنجه‌ی شدت لرزه‌ی منفرد برای محاسبه‌ی پاسخ سازه به معنای پذیرش تلویحی استقلال پاسخ از سایر سنجه‌های شدت است. بنابراین، صحت محاسبات پاسخ منوط به درستی فرض استقلال پاسخ از سایر سنجه‌های شدت است، که از آن به «کفایت»^[۱] سنجه‌ی شدت تعبیر شده است.^[۴] حال فرض کنید پاسخ سازه علاوه بر سنجه‌ی شدت مورد استفاده یعنی IM_1 به سنجه‌ی دوم شدت یعنی IM_2 نیز وابسته باشد. در این محاسبه پاسخ سازه براساس به‌کارگیری IM_1 در رابطه‌ی ۱ وابسته به مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده دارد. بنابراین اگر مقدار IM_2 در مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های ورودی با مقداری مورد انتظار در ساختگاه متفاوت باشد، آنگاه پاسخ محاسبه‌شده با مقدار مورد انتظار برای سازه «آریبی»^[۱۲] خواهد داشت. ساده‌ترین راهبرد برای کنترل پتانسیل آریبی در برآورد پاسخ، اتخاذ رویکردی مناسب برای انتخاب شتاب‌نگاشت برای انجام تحلیل سازه است. برای این منظور، توزیع IM_2 به شرط IM_1 در هر گام انتگرال تعیین شده است و شتاب‌نگاشت‌های سازگار با این توزیع انتخاب می‌شوند.

مطالعات متعددی برای جستجوی پارامترهایی که لحاظ‌نکردن آنها می‌تواند مولد آریبی در برآورد پاسخ باشد، انجام شده است. برای نمونه در پژوهشی بزرگ‌تر را به‌منزله‌ی عامل مؤثر در پاسخ سازه‌های چند درجه آزادی نشان داده‌اند.^[۵] این نتیجه مؤید گرایش سنتی آیین‌نامه‌ها برای منظورکردن فاصله و بزرگی در انتخاب شتاب‌نگاشت سازگار با ساختگاه است. اما آنچه که به صورت آشکار می‌تواند پاسخ سازه را متأثر سازد و البته مورد اشاره‌ی بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است، شکل طیف ورودی‌های مقیاس شده به $S_a(T)$ است. علی‌رغم اینکه تأثیر شکل طیف^[۱۳] کاملاً واضح است، ولی چالش اصلی در منظورکردن آن در فرایند انتخاب شتاب‌نگاشت، یافتن شاخصی کمی برای معرفی آن است. پیچیدگی این مسئله باعث شده است تا عده‌ی از پژوهشگران در پی معرفی سنجه‌ی شدتی غیر از $S_a(T)$ باشند. برخی پژوهشگران پیشنهاد استفاده از طیف پاسخ غیرخطی تغییرمکان $S_{di}(T, d_y)$ را به‌منزله‌ی سنجه‌ی شدت زلزله ارائه کرده‌اند.^[۶] آنها نشان داده‌اند که با منظورکردن سنجه‌ی شدت فوق که تابعی از دوره‌ی تاو و نیز شاخص رفتار غیرخطی سازه



شکل ۳. مقایسه‌ی شکل طیف مجموعه‌های شتاب‌نگاشت انتخاب‌شده با و بدون توجه به مقدار اپسیلون.

شکل طیف میانگین ۳ دسته شتاب‌نگاشت ترسیم شده است: در دسته‌ی اول، ۴۴ شتاب‌نگاشت معرفی شده در FEMA ۲۰۰۸^[۱۱] بدون توجه به مقدار اپسیلون مورد استفاده است. شتاب‌نگاشت‌های دسته‌ی دوم و سوم براساس مثبت‌ترین و منفی‌ترین مقادیر ε (۱sec) به تعداد ۱۵ شتاب‌نگاشت برای هر دسته انتخاب شده است. مقدار اپسیلون متوسط برای این ۳ دسته با ۰٫۵، ۰٫۲۷ و ۰٫۱۷- برابر است. برای فراهم‌کردن امکان مقایسه، هر ۳ مجموعه به مقدار $S_a(T = 1 \text{ sec}) = 1 \text{ g}$ مقیاس شده‌اند. شکل ۳ مؤید این موضوع است که شکل طیف شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده کاملاً متأثر از مقدار اپسیلون است.

۴. الگوپذیری پاسخ غیرخطی سازه از مقدار اپسیلون

اگر سنججه‌ی شدت $S_a(T)$ یک سنجه‌ی «کافی» برای نمایندگی از ورودی‌های لرزه‌یی باشد، انتظار می‌رود هیچ ارتباط معناداری بین میزان ظرفیت فروریزش یک سازه و سایر سنجه‌ها از جمله اپسیلون وجود نداشته باشد. در بخش قبل تأثیر واضح اپسیلون بر شکل طیف مشاهده شده است. با این ترتیب به نظر می‌رسد اپسیلون روی پاسخ سازه‌ها نیز مؤثر باشد. این تأثیر به‌خصوص در مراحل پیشرفته‌ی غیرخطی شدن — به دلیل درگیرشدن محدوده‌ی بیشتری از طیف — چشمگیرتر خواهد بود. به همین دلیل در این بخش ظرفیت فروریزش سازه^{۱۹} به‌منزله‌ی پاسخ سازه‌یی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ تغییرات ظرفیت فروریزش ۲ سیستم SDOF با دوره‌های تناوب ۱٫۰ و ۲٫۰ ثانیه و ضریب نرمی ۶ و ۱۲ برحسب اپسیلون ورودی‌های زلزله نشان داده شده است. انتخاب این ضرایب نرمی برای بسط نتایج به طیف گسترده‌ی از سازه‌های با شکل‌پذیری معمولی تا شکل‌پذیری ویژه بوده است. مجموعه‌ی ورودی‌های زلزله در این شکل‌ها مشابه مجموعه‌ی ۷۸ تایی است که در قسمت قبل معرفی شده است. ظرفیت فروریزش سیستم‌ها با بهره‌گیری از تحلیل دینامیکی فزاینده^[۱۲] و استفاده از الگوریتم هانت‌اند فیل^{۲۰} محاسبه شده است.^[۱۳] همچنین با نرمال‌کردن مقدار ظرفیت نظیر فروریزش به ظرفیت نظیر تسلیم‌شدگی، پاسخ سازه با R بیان شده است:

$$R = \frac{S_a^{collapse}(T)}{S_a^{yield}(T)} \quad (4)$$

ارتباط بین ظرفیت فروریزش سازه‌ها با مقدار اپسیلون در این شکل کاملاً مشهود است. یکی از اثرات شکل‌پذیری بالاتر افزایش ضریب همبستگی بین پاسخ سازه و اپسیلون است، که البته در برخی مراجع نیز به آن اشاره شده است.^[۱۴] وابستگی

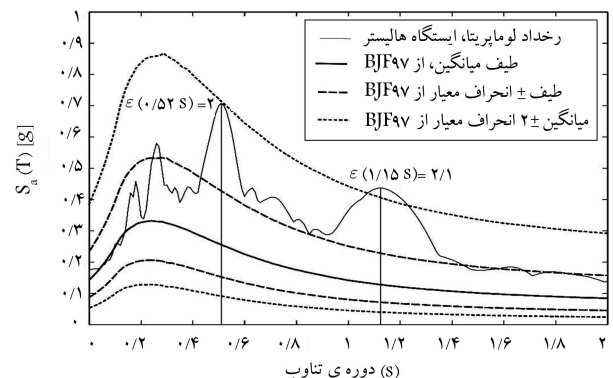
شتاب‌نگاشت‌های رایج کاملاً متفاوت است. بنابراین با انتخاب شتاب‌نگاشت‌های متناسب با سطح خطر موردنظر برای تحلیل سازه‌ی پاسخ سازه را می‌توان از رابطه‌ی ۱ بدون رخداد آریبی سیستماتیک برآورد کرد. این موضوع با اهمیت در بخش‌های بعدی این نوشتار به تفصیل بررسی شده است.

۳. الگوپذیری شکل طیف یک شتاب‌نگاشت از مقدار

اپسیلون

برخی پژوهشگران شکل طیف متفاوت شتاب‌نگاشت‌های «نادر»^{۱۶} و «فراوان»^{۱۷} را به‌منزله‌ی یک الگوی کلیدی در مسائل میدان دور بررسی کرده‌اند.^[۱۵] برای تشریح شکل طیف متمایز شتاب‌نگاشت‌های «نادر»، شکل ۲ طیف پاسخ شتاب یکی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی لوماپریتا را نشان می‌دهد. این طیف در دوره‌های تناوب ۰٫۵۲s و ۱٫۱۵s دارای مقدار استثنایی ۰٫۷g و ۰٫۴۵g است. احتمال رخداد این سطح از شدت در کالیفرنیا کمتر از ۲٪ در ۵۰ سال است. در این شکل همچنین مقدار میانگین طیف پاسخ شتاب براساس رابطه‌ی کاهندگی بور-جوینر (BJF۹۷)^[۱۱] برای بزرگا، فاصله و نیز مشخصات خاک متناظر با شتاب‌نگاشت مورد اشاره ترسیم شده است. به‌طور خاص، طیف این شتاب‌نگاشت در محدوده‌ی ۰٫۴s تا ۰٫۶s و نیز ۱٫۰s تا ۱٫۳s نسبت به مقدار میانگین دارای اوج است. در دوره‌ی تناوب ۰٫۵۲s، مقدار طیف این شتاب‌نگاشت به اندازه‌ی ۲٫۰ برابر آریبی معیار استاندارد، بالاتر از مقدار میانگین پیش‌بینی شده است، به عبارتی این شتاب‌نگاشت در این دوره‌ی تناوب دارای مقدار $\varepsilon(0.52s) = 2.0$ است. به همین صورت، $\varepsilon(1.15s) = 2.1$ بنابراین اپسیلون تابعی از شتاب‌نگاشت، رابطه‌ی کاهندگی مورد استفاده و نهایتاً دوره‌ی تناوب مورد بررسی است.

همان‌طور که ε تابعی از دوره‌ی تناوب است، به همین صورت ارتباط اپسیلون و شکل طیف نیز وابسته به دوره‌ی تناوب است. برای یک شتاب‌نگاشت با $\varepsilon(1.0 \text{ sec}) = 2.0$ انتظار می‌رود شکل طیف در اطراف دوره‌ی تناوب ۱٫۰ ثانیه دارای اوج^{۱۸} باشد؛ ولی برای شتاب‌نگاشت دیگر با $\varepsilon(2.0 \text{ sec}) = 2.0$ این اوج در اطراف دوره‌ی تناوب ۲٫۰ ثانیه رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت تصادفی شتاب‌نگاشت‌های زلزله، رابطه‌ی بین اپسیلون و شکل طیف برای شتاب‌نگاشت‌های منفرد لزوماً قطعی نیست؛ ولی این روند کلی که مقدار اپسیلون مثبت در یک دوره‌ی تناوب به معنای رخداد اوج در شکل طیف در حوالی آن دوره‌ی تناوب است، کاملاً اثبات شده است.^[۱۵] برای روشن شدن مسئله در شکل ۲،



شکل ۲. مقایسه‌ی شکل طیف یک شتاب‌نگاشت خاص از زلزله‌ی لوماپریتا با مقدار پیش‌بینی شده توسط کاهندگی BJF۹۷.

اپسیلون و یا اتا باعث تولید آریبی در برآورد پاسخ می‌شود، پرسش این است که چگونه می‌توان «اپسیلون هدف»^{۲۱} یا «اتا هدف»^{۲۲} را برای یک ساختگاه معین تعیین کرد. نکته‌ی قابل ذکر در اینجا آن است که در تعریف شاخص اتا، مقدار اتای هدف با اپسیلون هدف مساوی منظور شده است و لذا عملاً محاسبه‌ی اپسیلون هدف کافی بوده و می‌توان آن را به اتای هدف تسری داد.

۵. تعیین اپسیلون هدف برای سطوح مختلف خطر ساختگاه

ساختگاه ایده‌آلی را فرض کنید که فقط متأثر از یک زلزله‌ی مشخصه با این خصوصیات است:

-- دوره‌ی بازگشت زلزله‌ی مشخصه: $RP = ۲۰۰$ years

-- بزرگای زلزله‌ی مشخصه: $Mw = ۷٫۲$

-- نزدیک‌ترین فاصله‌ی ساختگاه تا گسل: $R = ۱۱٫۰$ km

-- سرعت موج برشی خاک ساختگاه: $V_{s,۳۰} = ۳۶۰$ m/sec

از تئوری احتمالات نرخ فراگذشت سالیانه (ν) برای $\ln S_a(T) > x$ رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\nu [\ln S_a(T) > x] = \nu \cdot P [\ln S_a(T) > x | Mw, R] \quad (۶)$$

در این رابطه ν نرخ سالیانه‌ی رخداد زلزله‌ی مشخصه است که برای این مثال $\frac{1}{۴۰۰}$ است. ابتدا، مقدار x برابر با مقدار پیش‌بینی شده از یک رابطه‌ی کاهندگی $(\ln S_a(T))$ فرض شده است (رابطه‌ی ۷):

$$\nu [\ln S_a(T) > \overline{\ln S_a(T)}] = \nu \cdot P [\ln S_a(T) > \overline{\ln S_a(T)} | Mw, R] = \frac{1}{۴۰۰} \quad (۷)$$

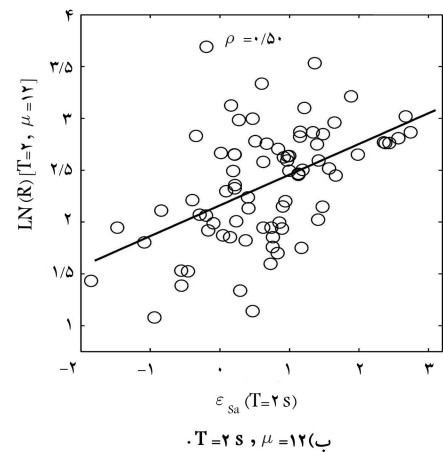
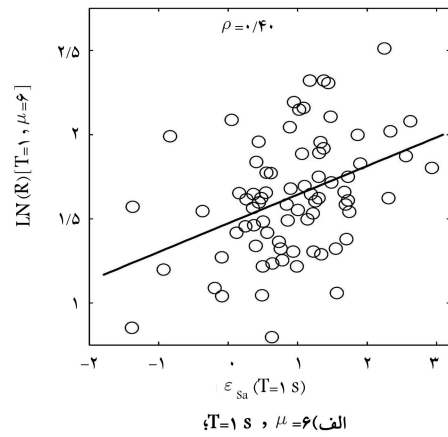
بنابراین می‌توان گفت اپسیلون صفر معادل دوره‌ی بازگشت ۴۰۰ سال است. با فرض یک توزیع نرمال برای $\ln S_a(T)$ ، رابطه‌ی ۵ برای $\varepsilon = ۰٫۲۰$ به صورت رابطه‌ی ۸ قابل بازنویسی است:

$$\nu [\ln S_a(T) > \overline{\ln S_a(T)} + ۰٫۷۸\sigma] = \nu \cdot P [\ln S_a(T) > \overline{\ln S_a(T)} + ۰٫۷۸\sigma | Mw, R] = \frac{1}{۴۷۵} \quad (۸)$$

بنابراین $\varepsilon = ۰٫۲۰$ هم‌ارز یک رخداد با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال است. به همین ترتیب می‌توان اپسیلون هدف را برای سطوح مختلف خطر محاسبه کرد. برای مثال در جدول ۱، این محاسبات برای ۴ سطح خطر متعارف آمده است. برای یک ساختگاه واقعی نیز محاسبات اپسیلون تفاوت ماهوی با روند مذکور نخواهد داشت. فقط این مسئله وجود دارد، که برخلاف ساختگاه ایده‌آل موجود در

جدول ۱، اپسیلون هدف برای سطوح مختلف خطر یک ساختگاه فرضی.

دوره‌ی بازگشت	اپسیلون هدف	احتمال رخداد در ۵۰ سال (%)
۲۵۰	-۰٫۸۰	۱۸
۴۷۵	+۰٫۲۰	۱۰
۲۴۷۵	+۱٫۴۰	۲



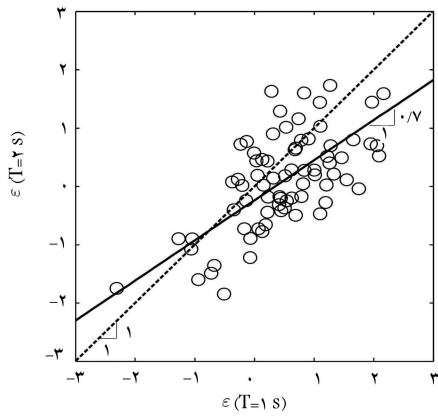
شکل ۴. تأثیر اپسیلون بر ظرفیت فروریزش لرزه‌یی.

پاسخ به اپسیلون به شکلی سیستماتیک و با بهره‌گیری از آزمون فرضیه‌ی آماری نیز قابل اثبات است. برای این منظور، فرض صفر به صورت $\beta = ۰$: H_0 منظور می‌شود. β شیب خط میان‌یابی پاسخ از اپسیلون است. از یک آزمون t برای تعیین اینکه آیا شیب میان‌یابی خطی از مقدار صفر فاصله‌ی معناداری دارد یا خیر استفاده می‌شود. مقدار p برای دو سیستم موردنظر در اینجا به ترتیب $۰٫۰۰۷$ و $۰٫۰۰۲$ محاسبه شده است، که کمتر از یک سطح معناداری معمول $۰٫۰۵$ است و بدین ترتیب شواهد کافی برای رد فرض صفر وجود دارد. مقادیر p مؤید احتمال نادرست فرض صفر است. بنابراین وجود ارتباط بین پاسخ و مقدار اپسیلون قطعی است. این تحلیل برای یک محدوده‌ی باز از سیستم‌های SDOF با دوره‌ی تناوب و شکل پذیری انجام و نتیجه‌ی یکسانی حاصل شده است.^[۱۵] جزئیات آزمون فرض آماری روی شیب مدل‌های میان‌یابی را می‌توان در نتایج تحقیق مونته‌گمری دید.^[۱۶] اخیراً شاخص جدیدی از شکل طیف با نام اتا ارائه شده است.^[۱۷]

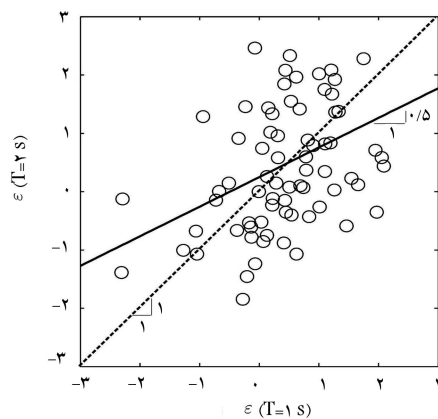
$$\eta = ۰٫۴۸۵ + ۲٫۴۵۴\varepsilon_{SA} - ۲٫۰۲۰\varepsilon_{PGV} \quad (۵)$$

که در این رابطه، ε_{SA} و ε_{PGV} به ترتیب اپسیلون طیف پاسخ شتاب و اپسیلون سرعت بیشینه‌اند. اتا در مقایسه با اپسیلون شاخص کارآمدتری از شکل طیف است و بر مبنای مطالعات انجام شده،^[۱۷] انتخاب شتاب‌نگاشت براساس شاخص اپسیلون و اتا و تحلیل غیرخطی سازه‌ها براساس هر یک از آن دو به تفاوت معناداری بین پاسخ سازه‌ها منجر می‌شود.^[۱۷]

حال که مشخص شد استفاده از سنجه‌ی شدت $S_a(T)$ بدون در نظر گرفتن



الف) (۲ s) در مقابل (1 s) ε



ب) ε(0.2s) در مقابل (1s) ε

شکل ۵. نمایش همبستگی مقادیر اپسیلون در دوره‌های تناوب مختلف.

برای دوره‌های تناوب مختلف متفاوت است. شیب همبستگی کمتر از واحد، شاهدهی برای مردودی UHS است. بررسی این همبستگی مورد توجه قرار گرفته است، [۲۵] و از مطالعه‌ی تعداد زیادی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله، رابطه‌ی ۹ برای پیش‌بینی مقدار طیف پاسخ در دوره‌های تناوب مجاور پیشنهاد شده است:

$$\ln S_a(T_i)^* = \ln S_a(M, R, T_i) + \sigma_{\ln S_a(T_i)} \cdot \rho \cdot \varepsilon(T_1) \quad (9)$$

در این رابطه $\sigma_{\ln S_a(T_i)}$ مقدار اریبی معیار استاندارد در دوره‌ی تناوب مورد نظر است، $\varepsilon(T_1)$ اپسیلون هدف در دوره‌ی تناوب مشخصه ρ شیب همبستگی بین $S_a(T_1)$ و $S_a(T_i)$ است، که رابطه‌ی ۱۰ برای آن پیشنهاد شده است: [۲۶]

$$\rho = 1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \left(0.359 + 0.163 I_{(T_{\min} < 0.189)} \ln \frac{T_{\min}}{0.189} \right) \ln \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right) \quad (10)$$

در این رابطه T_{\min} و T_{\max} مقدار بیشینه و کمینه‌ی T_1 و T_i است. پارامتر I مقدار منطقی ۰ یا ۱ است. طیفی که براساس رابطه‌ی ۱۰ ترسیم شود، اصطلاحاً طیف میانگین شرطی (CMS) نامیده می‌شود. [۲۶] در شکل ۶، UHS برای سطح خطر ۲۴۷۵ سال برای یک ساختگاه مشخص با مقادیر CMS در چند دوره‌ی تناوب مقایسه شده است. تفاوت بین UHS و CMS کاملاً آشکار است.

جایگزینی CMS به جای UHS در آیین‌نامه‌ها گامی مؤثر برای نزدیک شدن به برآورد واقع‌گرایانه‌ی پاسخ غیرخطی سازه‌هاست. [۲۶] اگرچه آیین‌نامه‌ها بازه‌ی ۰٫۲T

یک ساختگاه واقعی ممکن است چشمه‌های متعدد لرزه‌ی وجود داشته باشد. تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ی (PSHA) [۲۳] فرایندی استاندارد مبتنی بر قضیه احتمال کل است که منجر به تجمیع آثار تمام منابع خطر در قالبی احتمالاتی می‌شود. [۱۸] افزون بر PSHA که کاملاً شناخته شده است، فرایند دیگری نیز معرفی شده است، [۱۹] که با انجام تحلیل بیزین [۲۴] بر روی نتایج PSHA، سهم مشارکت [۲۵] سناریوی مختلف خطر روشن می‌شود. با به‌کارگیری این فرایند که با نام «تفکیک خطر لرزه‌ی» [۲۶] شناخته شده است، «سناریوی غالب» مشخص و فرایند مذکور برای محاسبه‌ی اپسیلون به‌کار گرفته می‌شود.

۶. نقد ساز و کار آیین‌نامه‌ها برای انتخاب ورودی لرزه‌ی

در آیین‌نامه‌های فعلی مثل ASCE-05 [۲۰] شرط نخست برای انتخاب ورودی جهت تحلیل یک سازه، سازگاری «بزرگا» و «فاصله»ی شتاب‌نگاشت‌های انتخابی با سناریوی غالب ساختگاه حاصل از تحلیل «تفکیک خطر» است. همچنین مقیاس ورودی‌ها (در صورت نیاز) جهت انطباق با طیف خطر یکنواخت (UHS) ساختگاه مورد تأکید قرار گرفته است. این فرایند که دارای خاستگاه زلزله‌شناسی است، [۲۱] از سال‌ها پیش به‌منزله‌ی عملی‌ترین شیوه‌ی تحلیل پاسخ سازه در جامعه‌ی مهندسی استفاده شده است. اما به‌نظر می‌رسد این ساز و کار در آینده‌ی نه چندان دور و به فراخور پیشرفت‌های مهندسی زلزله عملکردی و فراگیرتر شدن تحلیل‌های غیرخطی مورد بازبینی جدی قرار گیرد. برآیند نقدهای وارد به آیین‌نامه، برآورد محافظه‌کارانه‌ی پاسخ سازه است. [۲۴-۲۵] این اریبی در برآورد پاسخ ناشی از مغایرت شکل طیف UHS با شکل طیف شتاب‌نگاشت‌ها در سطوح بالای خطر زلزله است. [۷] برای شکافتن موضوع، مجدداً شکل ۲ را در نظر بگیرید. طیف خطر یکنواخت ۲۴۷۵ ساله که معادل میانگین به اضافه‌ی ۲ برابر اریبی معیار است، در شکل درج شده است. یک زلزله‌ی کاملاً «نادر» مثل لوماپریتا در دوره‌ی تناوب ۰٫۵۲ ثانیه منطبق بر طیف یکنواخت است؛ اما همان‌طور که کاملاً واضح است، مقادیر طیف این شتاب‌نگاشت در سایر دوره‌های تناوب به‌صورت قابل توجهی بیش از مقدار UHS است. از آنجا که طیف UHS در دوره‌های تناوب کوتاه متأثر از زلزله‌های بزرگ است و در دوره‌های تناوب بلند سهم زلزله‌های کوچک غالب است، [۷] لذا عملاً هیچ تک زلزله‌ی با این سطح انرژی یافت نمی‌شود تا طیف آن منطبق بر طیف یکنواخت خطر باشد، در نتیجه محافظه‌کارانه‌بودن شیوه‌ی انطباق بر UHS قابل توجیه است.

در تهیه‌ی طیف UHS برای سطوح بالای خطر مقادیر طیف در دوره‌های تناوب مختلف به‌صورت یکسان بزرگ‌نمایی می‌شود. ولی آنچه که از آن غفلت می‌شود، این است که به‌دلیل طبیعت تصادفی زلزله ممکن است یک شتاب‌نگاشت واقعی در یک دوره‌ی تناوب مشخص کاملاً استثنایی باشد؛ ولی در نقاط مجاور آن انتظار رخداد سطوح پایین‌تر کاملاً طبیعی است. حال آنکه در تهیه‌ی UHS، مقدار همبستگی $S_a(T)$ در دوره‌های تناوب مجاور به‌صورت تلویحی کامل فرض می‌شود. با اتخاذ این فرض تلویحی، مقدار $S_a(T)$ از روابط کاهندگی مرسوم محاسبه و UHS تهیه می‌شود. روابط کاهندگی مرسوم فقط به پیش‌بینی $S_a(T)$ در دوره‌های تناوب مختلف می‌پردازند و هیچ اطلاعاتی درخصوص همبستگی $S_a(T)$ در دوره‌های تناوب مختلف در اختیار قرار نمی‌دهند.

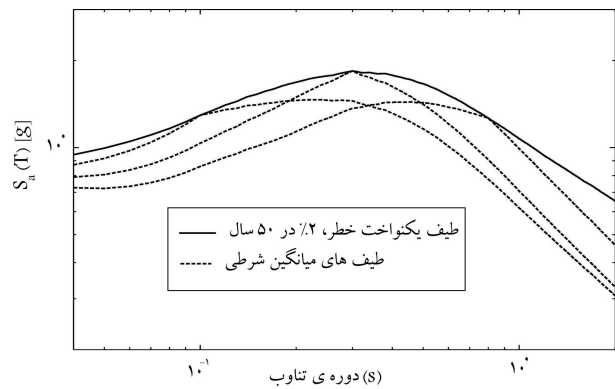
در شکل ۵، تغییرات مقدار اپسیلون در دوره‌ی تناوب مجاور یک دوره‌ی مشخص نشان داده شده است. وجود همبستگی، یک الگوی آشکار است؛ ولی نرخ همبستگی

تا $1/5T$ را برای انطباق با طیف هدف معرفی کرده‌اند، در برخی از مراجع به این بازه تا $2/5T$ نیز اشاره شده است.^[۲۷] شکل ۷ به مقایسه UHS و CMS در دوره تناوب $1/5$ ثانیه پرداخته و فرایند انتخاب و انطباق شتاب نگاشت‌ها بر CMS را در بازه 0.2 تا 1.0 ثانیه نشان می‌دهد.

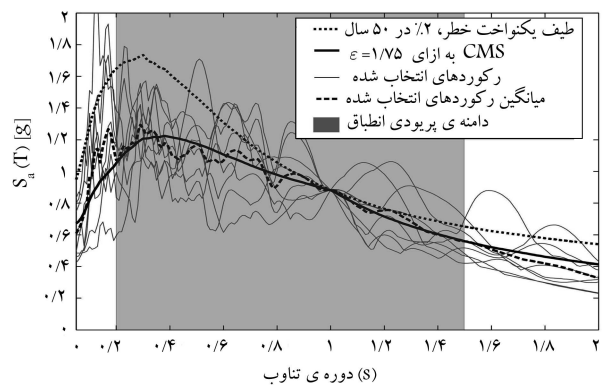
شایان ذکر است علی‌رغم آنکه بحث اصلاح طیف یکنواخت برای کاهش برآورد محافظه‌کارانه‌ی پاسخ سازه‌ها در سال‌های اخیر به صورت جدی در محافل پژوهشی مهندسی زلزله مطرح شده است، طیف پاسخ هدفی که در استانداردهای ایمنی اتمی از سال‌های پیش پیشنهاد شده است، از جهاتی شبیه CMS است.^[۲۸-۳۰] در استانداردهای اتمی، طیف هدف محصول به‌کارگیری رابطه‌ی کاهندگی بر بزرگا و فاصله‌ی غالب حاصل از تحلیل تفکیک خطر است. این در حالی است که در CMS اثر اپسیلون روی شکل طیف به صورت سیستماتیک بررسی شده است.

۷. نتیجه‌گیری

استفاده از معیار شدت $S_a(T)$ برای برآورد نرخ سالیانه‌ی پاسخ یک سازه با اریبی همراه است. این اریبی ناشی از تأثیر شکل طیف شتاب‌نگاشت‌های زلزله در پاسخ غیرخطی است. از طرف دیگر، شکل طیف شتاب‌نگاشت‌های زلزله متأثر از سطح خطر مربوط است. بنابراین راه حل مستقیم برای کنترل این اریبی، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های سازگار با سطح خطر مورد انتظار در ساختگاه است. سطح مختلف خطر یک ساختگاه که با اپسیلون قابل سنجش است، از تحلیل تفکیک خطر ساختگاه مشخص می‌شود. از آنجا که شکل طیف شتاب‌نگاشت‌های نادر با شکل UHS سطوح بالای خطر کاملاً متفاوت است، روش فعلی آیین‌نامه منجر به برآورد محافظه‌کارانه‌ی پاسخ سازه‌ها می‌شود. جایگزینی CMS با UHS راه حلی کاملاً عملی برای اصلاح فرایند آیین‌نامه‌ی است.



شکل ۶. طیف یکنواخت خطر ۲٪ در ۵۰ سال در یک ساختگاه فرضی، در مقایسه با چند طیف میانگین شرطی در ۳ دوره‌ی تناوب مختلف ۰٫۸، ۰٫۳ و ۰٫۱ ثانیه.



شکل ۷. انتخاب شتاب‌نگاشت براساس انطباق با CMS.

پانویس‌ها

1. uniform hazard spectrum
2. conditional mean spectrum
3. risk
4. pacific earthquake engineering research
5. hazard
6. intensity measure
7. engineering demand parameter
8. damage measure
9. dispersion
10. efficiency
11. sufficiency
12. bias
13. spectral shape
14. vector based probabilistic seismic hazard analysis
15. attenuation
16. rare
17. plentiful
18. peak
19. structural collapse capacity

20. hunt and fill algorithm
21. target epsilon
22. target eta
23. probabilistic seismic hazard analysis
24. bayesian analysis
25. contribution
26. seismic hazard de-aggregation

منابع (References)

1. Moehle, J. and Deierlein, G.G. "A framework methodology for performance-based earthquake engineering", In *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada*, pp. 679-692 (2004).
2. Cornell, C.A. and Krawinkler, H. "Progress and challenges in seismic performance assessment", *PEER Center News*, **3**(2), pp.4 (2000).
3. Luco, N. and Cornell, C.A. "Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earth-

- quake ground motions”, *Earthquake Spectra*, **23**(2), pp. 357-392 (2007).
4. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. “Applied incremental dynamic analysis”, *Earthquake Spectra*, **20**(2), pp. 523-553 (2004).
 5. Shome, N., Cornell, C.A., Bazzurro, P. and Carballo, J.E. “Earthquakes, records, and nonlinear responses”, *Earthquake Spectra*, **14**(3), pp. 469-500 (1998).
 6. Tothong, P. “Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships, and near-fault effects”, PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University (2007).
 7. Baker, J.W. and Cornell, C.A. “A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34**(10), pp. 1193-1217 (2005).
 8. Bazzurro, P. and Cornell, C.A. “Vector-valued probabilistic seismic hazard analysis”, Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Boston, M.A., 10 p. (2002).
 9. Luco, N. and Bazzurro, P. “Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(13), pp. 1813-1835 (2007).
 10. Baker, J.W. and Cornell, C.A. “Spectral shape, epsilon and record selection”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**(9), pp. 1077-1095 (2006).
 11. Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E. “Equations for estimating horizontal response spectra and peak accelerations from western North America earthquakes: A summary of recent work”, *Seismological Research Letters*, **68**(1), pp. 128-153 (1997).
 12. FEMA. ATC-63 Project 90% Draft Report – FEMA P695 Recommended Methodology for Quantification of Building System Performance and Response Parameters, Prepared by the Applied Technology Council, Redwood City, CA (2008).
 13. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**(3), pp. 491-514 (2002).
 14. Haselton, C.B., Baker, J.W., Liel, A.B. and Deierlein, G.G. “Accounting for ground-motion spectral shape characteristics in structural collapse assessment through an adjustment for epsilon”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000489 (2011).
 15. Ashtiany, Gh.M., Mousavi, M. and Azarbakht, A.R. “Strong ground motion record selection for the reliable prediction of the mean seismic collapse capacity of a structure group”, *Engineering and Structural Dynamics*, **40**(6), pp. 691-708 (2011).
 16. Montgomery, C.D. and Runger, C.G., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc. (2003).
 17. Mousavi, M., Ashtiany, M. and Azarbakht, A.R. “A new indicator of elastic spectral shape for more reliable selection of ground motion records”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**(12), pp. 1403-1416 (2011).
 18. McGuire, R.K. “Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, pp. 1257-1284 (1995).
 19. Bazzurro, P. and Cornell, C.A. “On Disaggregation of seismic hazard”, *Bulletin of Seismological Society of America*, **89**(2), pp. 501-520 (1999).
 20. ASCE7-05, *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA (2005).
 21. Cornell, C.A., *On Earthquake Record Selection For Non-linear Dynamic Analysis*, The Esteva Symposium; August, Mexico (2005).
 22. Reiter, L., *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press: New York, 254 p. (1990).
 23. Naeim, F. and Lew, M. “On the use of design spectrum compatible time histories”, *Earthquake Spectra*, **11**(1), pp. 111-127 (1995).
 24. Bommer, J.J., Scott, S.G. and Sarma, S.K. “Hazard-consistent earthquake scenarios”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**(4), pp. 219-231 (2000).
 25. Baker, J.W. and Cornell, C.A. “Correlation of response spectral values for multicomponent ground motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(1), pp. 215-227 (2006).
 26. Baker, J.W. “The conditional mean spectrum: A tool for ground motion selection”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, **137**(3), pp. 322-331 (2011).
 27. Haselton, C. and Baker, J. W. “Ground motion intensity measures for collapse capacity prediction: Choice of optimal spectral period and effect of spectral shape”, *Proceedings, 8th National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, 10 p. (2006).
 28. *Guidelines for Use of Probabilistic Seismic Hazard Curves at Department of Energy sites for Department of Energy Facilities*, Standard DOE-1024-92 (1996).
 29. *Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion*, Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.165 (1997).
 30. *Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities*, American Society of Civil Engineers. ASCE=SEI 43-05, ASCE Standard. Structural Engineering Institute, Working Group for Seismic Design Criteria for Nuclear Facilities, Reston, VA, 81 (2005).

EPSILON AS AN INDICATOR OF GROUND MOTION SPECTRAL SHAPE

M. Ghafory-Ashtiany

ashtiany@iiees.ac.ir

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)

M. Mousavi (corresponding author)

m.mousavi@araku.ac.ir

A. Azarbakht

a-azarbakht@araku.ac.ir

Dept. of Civil Engineering
University of Arak

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 109-116, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 8 May 2011; received in revised form 18 December 2011; accepted 5 March 2012.

Abstract

From the various intensity measures that may be applied to evaluation of the seismic risk of structures, the acceleration response spectrum, $S_a(T)$, is the most famous. As a key assumption in usual risk assessment procedures, such as PEER methodology, the structural response depends only upon the applied intensity measures, and not on any other properties of ground motion. This required condition is termed the “sufficiency” of the used intensity measure. The limited “sufficiency” of $S_a(T)$ has been emphasized in recent research and, as a result, different methods have been proposed to modify structural response analysis. In this paper, the problem has been re-defined and then recent studies have been surveyed.

The inelastic displacement response spectrum is another alternative for $S_a(T)$. The intensity measure vector, as an innovative approach for bias reduction, has been also reviewed.

This paper is mainly focused on the spectral shape concern. It has been discussed how the spectral shape of ground motion affects the structural nonlinear response. Epsilon, as a well known seismological parameter, is introduced as a convenient indicator of spectral shape. It has been shown that epsilon has significant effects on the nonlinear response of structures. As a convenient approach for reliable ground motion selection, the hazard related target epsilon is calculated first, and then the compatible ground motion is selected. A convenient procedure has been introduced in this paper, in order to find the target epsilon and eta values at different hazard levels.

In the second half of this paper, the current code conformed approach for ground motion selection has been discussed. All seismic design codes and guidelines require scaling of a number of selected ground motions so that they match or exceed a target spectrum, i.e. uniform hazard spectrum (UHS). The recent findings show that application of the UHS for analysis of structures leads to a conservative estimation of structural response. Finally, a new generation of response spectrum, named the conditional mean spectrum (CMS), has been introduced. The CMS presents the expected response spectrum, conditioned on occurrence of a target spectral acceleration value at the period of interest. It has been shown that this is a more realistic target spectrum for ground motion selection in comparison with UHS.

Key Words: hazard, risk, intensity measure, response, bias, selection.