

# تفکیک خطر لرزه‌یی شاخص اِتا در طیف‌های شرطی

محمدعلی مهندسی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا آذربخت\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵ (درداشت فنی)  
دوره ۲ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۹-۱۴۷، (پادداشت فنی)

انتخاب حرکات زمین در بحث برآورد پاسخ غیرخطی سازه‌ها - به گونه‌یی که بتوان با کمینه‌ی تعداد حرکات زمین، پاسخ قابل اطمینانی از سازه به دست آورد - تبدیل به موضوعی کلیدی در مهندسی زلزله براساس عملکرد و نیز نسل بعدی آیین‌نامه‌های لرزه‌یی شده است. برای بهبود انتخاب و نیز شناخت بهتر ویژگی‌های طیفی حرکات زمین، پارامترهای نوین طیفی از جمله اسپیلون شتاب طیفی و اِتا در ادبیات فنی معرفی و در گام بعدی تلاش شده است تا با بهره‌گیری از این پارامترها، طیف‌های مشروط برای بهبود تخمین پاسخ سازه معرفی شوند. کاربرد اِتا به دلیل وابستگی به اسپیلون سرعت بیشینه، برای محاسبه‌ی طیف مشروط با مشکلاتی مواجه است. هدف اصلی این پژوهش، تفکیک لرزه‌یی اِتاست، که نتایج آن با روش‌های موجود در این زمینه مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است که تدقیق در محاسبه‌ی اِتای هدف در ناحیه‌ی زمان تاوهای پایین طیف‌های شرطی مؤثر است.

واژگان کلیدی: اسپیلون شتاب طیفی، اسپیلون سرعت بیشینه، طیف میانگین مشروط، اِتا.

m\_mohandesi@yahoo.com  
a-azarbakht@araku.ac.ir

## ۱. مقدمه

هدف نهایی در طراحی براساس عملکرد، محاسبه‌ی نحوه‌ی عملکرد سازه تحت اثر زلزله‌های محتمل آینده است. در نسخه‌های اولیه‌ی آیین‌نامه‌های مربوط به طراحی براساس عملکرد این‌گونه فرض می‌شد که با رسیدن به یک تغییرمکان خاص، ایمنی جانی تأمین می‌شود. اما نکته‌یی که در آیین‌نامه‌های مذکور کمتر به آن توجه شده است، بحث در نظر گرفتن عدم قطعیت به صورت صریح بوده و عدم قطعیت معمولاً به صورت تلویحی در آن‌ها لحاظ شده است.

یکی از روش‌های در نظرگیری عدم قطعیت ذاتی<sup>۱</sup>، استفاده از تحلیل‌های دینامیکی فراینده<sup>۲</sup> است،<sup>۱</sup> که مستلزم انجام تحلیل‌های نسبتاً زیاد و صرف وقت قابل توجهی است. روش‌های مختلفی برای کاهش تعداد حرکات زمین در این زمینه پیشنهاد شده است.<sup>۲-۵</sup> روند مرسوم در آیین‌نامه‌ها، انتخاب تعدادی از حرکات زمین براساس ساخت‌گاه و مقیاس آنها به‌گونه‌یی است که بر طیف طرح پیشنهادی آیین‌نامه منطبق باشند. هر چند پژوهش‌ها نشان داده‌اند که طیف‌های پیشنهادی آیین‌نامه‌ها، تخمین مناسبی از تقاضای لرزه‌یی به دست نمی‌دهند و در این راستا تلاش شده است تا از پارامترهای نوین همچون اسپیلون و طیف میانگین شرطی برای بهبود تخمین خطر لرزه‌یی و تخمین پاسخ سازه استفاده شود.<sup>۶</sup>

از دیگر پارامترهای طیفی، که برای بهبود پیش‌بینی پاسخ سازه ارائه شده است، پارامتر اِتاست که پژوهش‌های پیشین در این زمینه نشان داده‌اند به‌کارگیری پارامتر مذکور به نسبت تک پارامتر اسپیلون شتاب طیفی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود.<sup>۷</sup> پارامتر اِتا با به‌کارگیری اسپیلون بیشینه‌ی سرعت زمین، علاوه بر اسپیلون شتاب طیفی، می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد حرکت زمین به دست دهد.

هر چند کاربرد این پارامتر برای تشکیل طیف شرطی با محدودیت‌هایی همراه است. از جمله آنکه رابطه‌یی مستقل از اسپیلون برای اِتا ارائه نشده است،<sup>۸</sup> که این امر کاربرد اِتا را با مشکل مواجه کرده است. در این پژوهش تلاش شده است که از اِتا برای تشکیل طیف میانگین شرطی تقریبی در ناحیه‌یی از خطر لرزه‌یی چندگانه استفاده شود که در عین سادگی، قابلیت اطمینان مناسبی داشته باشد.

## ۲. معرفی شاخص‌های طیفی

### ۱.۱. اسپیلون

در گذشته، بزرگا و فاصله‌ی زلزله را به صورت سنتی معیاری برای کمی‌سازی حرکت زمین می‌دانستند، اما در سال‌های اخیر، پارامتر اسپیلون نیز برای این مهم در نظر

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۲/۲، پذیرش ۱۳۹۳/۲/۳۱

گرفته شده است (رابطه‌ی ۱): [۶]

$$\varepsilon = \frac{\ln \bar{S}_a(T_1) - \ln S_a(T_1)}{\sigma_{\ln S_a(T_1)}} \quad (1)$$

همان‌گونه که در رابطه‌ی ۱ مشاهده می‌شود، اِسیلون توسط زلزله‌شناسان به صورت تعداد انحراف معیاری که لگاریتم شتاب طیفی یک زلزله از شتاب طیفی محاسبه شده توسط رابطه‌ی کاهندگی فاصله دارد، تعریف می‌شود. [۷] اِسیلون برای شتاب‌نگاشت‌های مقیاس نشده محاسبه می‌شود و به عنوان معیاری از شکل طیف پاسخ است. با عنایت به اینکه این شاخص با میانگین و انحراف معیار نرمال شده است، در نتیجه به صورت ایده‌آل، پارامتری با میانگین صفر و انحراف معیار یک است. اِسیلون تابعی از دوره‌ی تناوب مود اول است و در دوره‌های تناوب‌های متفاوت تغییر می‌کند. این پارامتر به نوع رابطه‌ی کاهندگی انتخابی نیز مرتبط است. [۶]

## ۲.۲. اِتا

پارامتر جدید اِتا، ترکیبی خطی از اِسیلون پاسخ شتاب ( $\varepsilon_{Sa}$ ) و اِسیلون سرعت بیشینه ( $\varepsilon_{PGV}$ ) است و کارا تر از شاخص شناخته شده‌ی اِسیلون، در انتخاب شتاب‌نگاشت است. [۷] در یک مطالعه‌ی موردی، بالایش ورودی‌های لرزه‌ی براساس شاخص اِتا منجر به برآورد نرخ سالیانه‌ی فروریزش کمتر در مقایسه با شاخص اِسیلون شده است. [۷] اِتا با ایده‌ی تلفیق پارامترهای شدت حوزه‌ی زمان (مانند بیشینه‌ی شتاب زمین، بیشینه‌ی سرعت زمین، بیشینه‌ی جابجایی زمین) از یک سو و پارامترهای حوزه‌ی بسامد (مقادیر مختلف طیفی) برای حصول شاخص مطمئن‌تری از شکل طیف ایجاد شده است. اگرچه تاکنون اِسیلون عموماً برای مقادیر طیف پاسخ شتاب استفاده شده است، ولی تعریف ذکر شده قابل توسعه به سایر پارامترهای شدت نیز است. در رابطه‌ی ۲،  $IM$  و  $\overline{IM}$  به ترتیب معرف شدت مشاهده شده و شدت پیش‌بینی شده از یک رابطه‌ی کاهندگی بوده و  $\sigma_{\ln IM}$  انحراف استاندارد پارامتر شدت است، که از رابطه‌ی کاهندگی به دست می‌آید. چالش عملی در به کارگیری ترکیب اِسیلون‌های مختلف برای انتخاب شتاب‌نگاشت، تعیین هر یک از مقادیر اِسیلون هدف در سطح خطر مطلوب است. معمولاً تحلیل استاندارد تفکیک خطر فقط به تعیین اِسیلون پاسخ شتاب هدف منجر می‌شود و سایر اِسیلون‌ها نامعلوم است.

$$\varepsilon_{IM} = \frac{\ln \overline{IM} - \ln IM}{\sigma_{\ln IM}} \quad (2)$$

هر یک از اِسیلون‌های شدت می‌تواند بخشی از اطلاعات نهفته در یک شتاب‌نگاشت را منعکس کند. به دلیل تمایز بنیادین شدت‌های حوزه‌ی زمان و بسامد می‌توان فرض کرد که تلفیق آنها به تقویت متقابل یکدیگر منجر می‌شود و پارامتر توانمندتری را برای پیش‌بینی پاسخ پدید می‌آورد. هدف یافتن شاخصی مانند اِتا ( $\eta$ )، تلفیق اِسیلون‌های مختلف، برای پیش‌بینی شکل طیف است. پارامتر اِتا به صورت ترکیب خطی از اِسیلون پاسخ شتاب، اِسیلون شتاب بیشینه، اِسیلون سرعت بیشینه، و اِسیلون جابجایی بیشینه ( $\varepsilon_{Sa}$ ) تعریف شده است، که در معادله‌ی ۳ نمایش داده شده است:

$$\eta = C_1 \varepsilon_{PGD} + C_2 \varepsilon_{PGV} + C_3 \varepsilon_{PGA} + \varepsilon_{Sa} \quad (3)$$

ضرایب  $C_1$  تا  $C_3$  با شرط بیشینه‌سازی ضریب همبستگی اِتا و پاسخ قابل محاسبه هستند. نتایج تحلیل روی سازه‌ها نشان می‌دهد اِتا بهتر از اِسیلون پاسخ غیرخطی را پیش‌بینی می‌کند. البته این رابطه فقط برای یک سیستم یک درجه‌ی آزاد خاص

حاصل شده است و طبیعتاً نمی‌تواند برای کل سازه‌ها معتبر باشد. یافتن یک رابطه‌ی کمی برای پیش‌بینی پاسخ، مستلزم به کارگیری تحلیل میان‌یابی تعمیم یافته برای تمامی سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد مورد اشاره است.

به عنوان نتیجه برای دو شتاب‌نگاشت با اِسیلون پاسخ شتاب یکسان انتظار می‌رود که شتاب‌نگاشت با مقدار اِسیلون سرعت بیشینه‌ی بالاتر، ظرفیت فروریزش کمتری نشان دهد و برعکس. مقایسه‌ی مقدار ضریب همبستگی پاسخ و هر یک از دو پارامتر اِسیلون و اِتا برای سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد در شکل ۱ نشان داده شده است. بهبود در مقدار متوسط ضریب همبستگی دلالت بر توانمندی بیشتر اِتا دارد. [۶]

بهبود کارایی اِتا در مقایسه با اِسیلون برای پیش‌بینی پاسخ، احتمالاً به واسطه‌ی این واقعیت است که اِتا بهتر از اِسیلون قادر به تشخیص الگوی شکل طیف کشسان است.

اگرچه تحلیل‌های انجام شده در قالب مدل‌های یک درجه‌ی آزاد صورت پذیرفته است، اما منظورکردن پارامتر اِتا منجر به ایجاد تمایز در شکل طیف شتاب‌نگاشت‌ها در دوره‌های تناوب بالاتر و نیز کوتاه‌تر از دوره‌ی تناوب هدف می‌شود. بنابراین می‌توان گفت شتاب‌نگاشت‌های پالایش شده براساس اِتا برای سازه‌های چند درجه‌ی آزادی نیز قابل استفاده هستند، که این مطلب نیاز به بررسی بیشتر دارد.

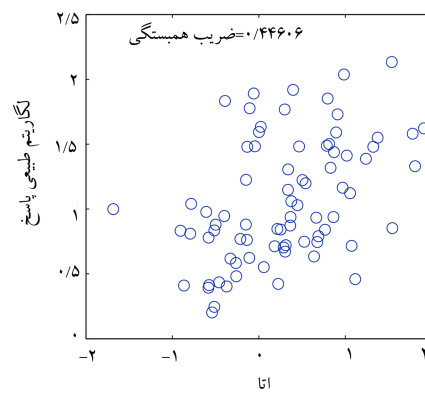
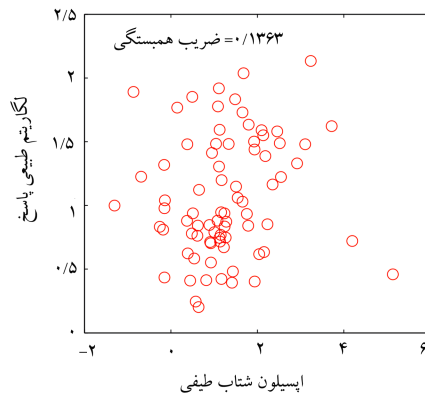
براساس تحلیل مجموعه‌ی از سیستم‌های یک درجه‌ی آزادی برای محاسبه‌ی ساده‌تر اِتا، موسوی و همکاران، [۶] با توجه به کم‌بودن آثار اِسیلون‌های بیشینه‌ی شتاب و تغییر مکان، رابطه‌ی ۴ را معرفی کرده‌اند که به نسبت رابطه‌ی اولیه‌ی اِتا ساده‌تر است:

$$\eta = \varepsilon_{Sa} - b \varepsilon_{PGV} \quad (4)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، یک چالش عملی بر سر به کارگیری اِتا برای انتخاب ورودی‌های لرزه‌ی، انتخاب اِسیلون‌های هدف در سطوح مختلف خطر لرزه‌ی است. مدل‌های پیش‌بینی جنبش‌های زمین، پیش‌بینی توزیع احتمال پارامترهای شدت برای یک رخداد را فراهم می‌سازند. این مدل‌ها فقط به ارائه‌ی توزیع حاشیه‌ی هر یک از پارامترهای شدت می‌پردازند و بررسی همبستگی بین پارامترهای مختلف مورد توجه قرار نمی‌گیرد. از سوی دیگر، تحلیل استاندارد تفکیک خطر فقط مقدار اِسیلون پاسخ شتاب هدف را برای سطوح مختلف خطر یک ساخت‌گاه به دست می‌دهد و اِسیلون سرعت بیشینه‌ی هدف همچنان نامعلوم باقی می‌ماند. فرض مقادیر برابر برای این دو اِسیلون می‌تواند محل چالش باشد، چرا که مقدار یکسان برای دو اِسیلون ممکن است لزوماً معادل یک سطح خطر مشخص نباشد. لذا همبستگی بین اِسیلون سرعت بیشینه و اِسیلون پاسخ شتاب در زمان‌های تناوب مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و از تحلیل میان‌یابی خطی برای ارائه‌ی یک رابطه‌ی برآوردکننده‌ی اِسیلون سرعت بیشینه براساس اِتا استفاده شده است. نتایج به دست آمده در این بخش براساس به کارگیری یک مجموعه‌ی نسبتاً بزرگ از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های کم‌عمق، که در سطح جهان ثبت شده‌اند، به دست آمده است، که در بردارنده‌ی ۲۶۷ جفت شتاب‌نگاشت با بزرگای بیش از ۵/۵ و فاصله‌ی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر بوده و در پژوهش‌های پیشین نیز به دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. [۶] رابطه‌ی بین اِسیلون سرعت بیشینه و اِسیلون پاسخ شتاب را می‌توان در قالب رابطه‌ی ۵ بیان کرد:

$$\varepsilon_{PGV} = C_1 \varepsilon_{Sa} + C_2 \quad (5)$$

روش مستقیم برای منظورکردن اِتا هدف در تحلیل فروریزش این است که اِسیلون



شکل ۱. مقایسه‌ی کارایی اِتا و اِسیلون برای یک سازه‌ی خاص در دوره‌ی تناوب ۰/۴۵ ثانیه و شکل‌پذیری ۱۲ براساس میزان ضرب همبستگی بین پاسخ‌های غیرخطی و شاخص‌های طیفی.

### ۳. تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌یی

تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌یی، تمامی سناریوهای زلزله با بزرگا و فواصل گوناگون را به همراه پیش‌بینی شدت حرکت زمین، به منظور محاسبه‌ی خطر لرزه‌یی ساخت‌گاه ترکیب می‌کند. همچنین PSHA با به‌کارگیری چندین رابطه‌ی کاهندگی می‌تواند عدم قطعیت ناشی از مدل‌سازی<sup>۳</sup> موجود در پیش‌بینی حرکت زمین را نیز در محاسبات وارد کند. از سوی دیگر، روش‌های انتخاب حرکات زمین از تفکیک<sup>۴</sup> احتمالاتی خطر لرزه‌یی برای تشخیص توزیع سناریوهای مشارکت‌کننده در فراگذشت از یک سطح مفروض شتاب طیفی بهره می‌برند.

در حقیقت مزیت اصلی روش تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌یی، توانایی ترکیب انواع بزرگا، فاصله، و نیز فرضیات جدید مطرح‌شده در توری ورودی حرکات زمین است. از جمله پژوهش‌های جدید می‌توان به واردشدن پارامتر اِسیلون به روند تحلیل خطر احتمالاتی اشاره کرد.

رابطه‌ی استاندارد فراگذشت  $\lambda$  به‌صورت معادله‌ی ۹ بیان می‌شود: [۱۰۹]

$$\lambda(y) = v \iint f_M(m) f_R(r) P[Y > y | m, r] dm dr \quad (9)$$

که در آن،  $v$  نرخ فعالیت منبع است. عبارت احتمال زیرانتگرال را می‌توان به صورت صریح و نیز تابعی از  $\varepsilon$  (پیشایی حرکت زمین) به‌صورت معادلات ۱۰ و ۱۱ بیان کرد:

$$\lambda(y) = v \iiint f_M(m) f_R(r) f_\varepsilon P[Y > y | m, r, \varepsilon] dm dr d\varepsilon \quad (10)$$

$$P[Y > y | m, r, \varepsilon] = H[\ln Y(m, r, \varepsilon) - \ln y] \quad (11)$$

در فرمول‌بندی ذکرشده، عبارت احتمال زیرانتگرال یک تابع پله‌یی هوی ساید است، که مقدار آن اگر  $\ln y$  کوچک‌تر از  $\ln Y(m, r, \varepsilon)$  باشد، صفر و در غیر این صورت یک است. به‌عنوان جایگزین تابع پله‌یی هوی ساید، برای محاسبه‌ی مشارکت  $M, R, \varepsilon$  در  $\lambda(y)$  از معادله‌ی ۱۲ استفاده می‌شود:

$$P[Y > y | m, r, \varepsilon] = \delta[\ln Y(m, r, \varepsilon) - \ln y] \quad (12)$$

که در آن،  $\delta$  تابع دلتای دیراک است. با استفاده از این تابع در  $\ln Y(m, r, \varepsilon)$ ، مقدار احتمال ۱ و مقادیر احتمال در بقیه‌ی نقاط صفر خواهد بود. علت استفاده از تابع دلتا آن است که هدف محاسبه‌ی دسته‌های بزرگا، فاصله، و اِسیلون‌هایی است

سرعت بیشینه‌ی مورد انتظار در سطح خطر مطلوب از رابطه‌ی ۵ تعیین و سپس اِتا هدف، از رابطه‌ی ۴، محاسبه و نهایتاً شتاب‌نگاشت‌های سازگار با این اِتا پالایش شوند. با هدف ساده‌سازی فرایند به‌صورت رابطه‌ی ۶، می‌توان رابطه‌ی محاسبه‌ی اِتا را به‌صورتی بازبینی کرد که مقدار اِتای هدف با اِسیلون پاسخ شتاب هدف هم‌پایه شود:

$$\eta = k_0 + k_1(\varepsilon S_a - b \varepsilon PGV) \quad (6)$$

واضح است که به واسطه‌ی رابطه‌ی خطی بین مقادیر اِتا و پاسخ سازه‌یی، بازبینی مذکور مجاز است. اینک با جایگزینی اِسیلون سرعت بیشینه از رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۶ و منظورکردن اِتا هدف برابر با اِسیلون پاسخ شتاب هدف، ضرایب  $k_0, k_1$  قابل محاسبه است، که این مقادیر در رابطه‌ی ۷ نمایش داده شده است:

$$k_0 = \frac{b C_0}{1 - b C_1} = 0.485, \quad k_1 = \frac{1}{1 - b C_1} = 2.454 \quad (7)$$

با جایگزینی ضرایب فوق در رابطه‌ی ۶، صورت نهایی اِتا به‌صورت معادله‌ی ۸ به‌دست می‌آید:

$$\eta = 0.485 + 2.454 \varepsilon S_a - 2.020 \varepsilon PGV \quad (8)$$

در حال حاضر می‌توان اِتا هدف را برابر اِسیلون پاسخ شتاب حاصل از تحلیل تفکیک خطر قرار داد. [۱] به عبارت دیگر، برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها به‌منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی می‌توان دو راهبرد مختلف را مدنظر قرار داد: الف) با جایگذاری اِسیلون هدف (حاصل از تفکیک لرزه‌یی ساخت‌گاه موردنظر) در رابطه‌ی ۵، اِسیلون بیشینه‌ی شتاب حاصل می‌شود. سپس با جایگذاری اِسیلون بیشینه‌ی شتاب در رابطه‌ی ۴، مقدار اِتای هدف محاسبه می‌شود، که می‌توان شتاب‌نگاشت‌هایی که اِتایی نزدیک به این اِتای هدف را دارند، انتخاب کرد. ب) به‌عنوان یک راه‌حل ساده‌تر، می‌توان برای محاسبه‌ی اِتای هر شتاب‌نگاشت از رابطه‌ی ۸ استفاده کرد و شتاب‌نگاشت‌هایی که اِتایی نزدیک (و یا برابر) با اِسیلون هدف (حاصل از تفکیک لرزه‌یی ساخت‌گاه موردنظر که همچنین برابر اِتای هدف است) دارند را انتخاب کرد. اما باید به این نکته توجه کرد که در تمامی این نتیجه‌گیری‌ها، رابطه‌ی میان  $\varepsilon PGV$  و  $\varepsilon S_a$  خطی فرض شده‌اند؛ در حالی که انجام این فرض نیاز به پژوهش بیشتر دارد، که مورد توجه این نوشتار است.

که برابر با حرکت زمین باشند و از آن فراتر نروند  $\lambda(S_a = y)$ . اگر معادله‌ی خطر را به صورت رابطه‌ی ۱۳ در نظر بگیریم:

$$\lambda(S_a > y) = v \iiint f_{M,R,\varepsilon}(m, r, \varepsilon) P(S_a > y | m, r, \varepsilon) dm dr d\varepsilon \quad (13)$$

می‌توان توزیع  $M$ ‌هایی که سبب  $S_a > y$  می‌شوند، را به صورت معادله‌ی ۱۴ نمایش داد:

$$f_{M|S_a, y}(m, y) = \frac{1}{\gamma(S_a > y)} v \iint f_{M,R,\varepsilon}(m, r, \varepsilon) P(S_a > y | m, r, \varepsilon) dr d\varepsilon \quad (14)$$

که در آن،  $f_{M,R,\varepsilon}(m, r, \varepsilon)$  تابع چگالی احتمال هم‌بسته‌ی بزرگا و فاصله و  $\varepsilon$  برای مبدأ خاص هستند. باید در نظر داشت از آنجایی که  $\varepsilon$  از نظر احتمالاتی مستقل از  $M$  و  $R$  است، می‌توان نوشت:  $f_{M,R,\varepsilon}(m, r, \varepsilon) = f_{M,R}(m, r) f_\varepsilon(\varepsilon)$ . که در اینجا  $f_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}}$  است و نشان‌دهنده‌ی توزیع نرمال استاندارد شده است. با استفاده از تعریف امید ریاضی و با فرض استقلال احتمالات می‌توان مقدار میانگین بزرگا را با استفاده از رابطه‌ی ساده‌ی ۱۵ محاسبه کرد:

$$\bar{M} = E(M | S_a > y) = \sum_j m_j P(M = m_j | S_a > y) \quad (15)$$

به همین ترتیب می‌توان روابط موردنیاز برای محاسبه‌ی سایر پارامترها را نیز به دست آورد.

### ۱.۳. روابط کاهندگی حرکات زمین

خطر لرزه‌ای به صورت برداری از سنجه‌های اندازه‌گیری شدت تعریف می‌شود، که باید بیان‌گر مناسبی از ورودی زلزله باشند. معمولاً خروجی تحلیل خطر -- که به عنوان ورودی برآورد تقاضای لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد -- به صورت میانگین رویداد سالیانه‌ی سنجه‌ی شدت است. یکی از بخش‌های مهم در هر دو روش متعین و احتمالاتی تحلیل خطر، توانایی تخمین جنبش شدید زمین از یک گروه پارامترهای تعریف‌شده‌ی زلزله‌شناسی است. این تخمین با استفاده از رابطه‌ی حرکت زمین یا آنچه که مهندسان آن را رابطه‌ی کاهندگی می‌نامند، حاصل می‌شود. رابطه‌ی حرکت زمین، یک معادله‌ی ریاضی است که رابطه‌ی میان یک پارامتر دلخواه جنبش شدید با یک یا چند پارامتر مربوط به مبدأ زلزله، مسیر انتشار امواج، و وضعیت ساخت‌گاه را، که به صورت کلی به عنوان پارامترهای لرزه‌شناسی نامیده می‌شوند، برقرار می‌سازد. رابطه‌ی حرکت زمین را به صورت بسیار ساده می‌توان به صورت معادلات ۱۶ و ۱۷ نشان داد:

$$\ln Y = c_1 + c_2 M - c_3 \ln R - c_4 R + \varepsilon \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{\ln \bar{Y} - \ln Y}{\sigma_{\ln Y}} \quad (17)$$

که در آن،  $\ln Y$  لگاریتم طبیعی پارامتر جنبش شدید مورد نظر،  $M$  بزرگای زلزله،  $R$  فاصله‌ی مبدأ تا ساخت‌گاه یا عبارتی مرتبط با آن است، و  $\varepsilon$  جمله‌ی خطای تصادفی، با میانگین صفر و انحراف معیار واحد است. جمله‌ی  $c_2 M$  سازگار با تعریف بزرگای زلزله به عنوان معیار لگاریتمی از دامنه‌ی حرکت زمین است. جمله‌ی  $-c_3 \ln R - c_4 R$  سازگار با گسترش هندسی جبهه، هنگامی که از مبدأ دور می‌شود، است. پارامتر  $c_2$

بسته به نوع موج لرزه‌ی (حجمی یا سطحی) و با ساختار پوسته‌ی با فاصله تغییر خواهد کرد. جمله‌ی  $-c_4 R$  سازگار با کاهندگی غیرکشسان امواج لرزه‌ی به علت میرایی مادی و اغتشاش، زمانی است که در پوسته منتشر می‌شوند. در عمل روابط حرکت زمین، بسیار پیچیده‌تر از این معادله هستند. این پیچیدگی بیشتر به علت نیاز برای در نظر گرفتن تأثیراتی مانند رفتار حوزه‌ی نزدیک، مکانیزم گسلس، شرایط ویژه‌ی ساخت‌گاه، جهت‌پذیری مبدأ و الگوی انتشار، فرادایره و فرودایره و نیز محیط تکنیکی است.

### ۲.۳. نسل بعد روابط کاهندگی حرکات زمین<sup>۵</sup>

برآورد مناسب پارامترهای جنبش زمین در یک ساخت‌گاه به منظور استفاده در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه، به ویژه در مناطق لرزه‌خیز همچون کشور ایران اهمیت به‌سزایی دارد. خسارت‌های مالی و جانی ناشی از این رخداد طبیعی با استفاده از ارزیابی خطر لرزه‌ی قابل کنترل و کاهش است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های موردنیاز جهت انجام تحلیل خطر لرزه‌ی، پیش‌بینی جنبش‌های نیرومند زمین است، که توسط روابطی موسوم به روابط کاهندگی به دست می‌آیند.

نسل بعدی روابط حرکت زمین قابلیت اعمال به گروه وسیع‌تری از حرکات زمین و فواصل را دارند، تا دیگر نیازی به برون‌یابی فراتر از حدود قابل کاربرد آن روابط نباشد. همچنین این روابط قابلیت تکنیک دقیق تر گروه‌های ساخت‌گاه (مانند سنگ سخت، سنگ نرم، خاک بسیار سخت، خاک سخت، خاک نرم به جای فقط خاک یا سنگ) یا استفاده‌ی مستقیم از سرعت میانگین موج برشی در ۳۰ متر فوقانی را دارند. به علاوه لازم است روابط آینده‌ی حرکات زمین به صورت سیستماتیک بتوانند در برگیرنده‌ی مباحثی مانند آثار جهت‌پذیری حوزه‌ی نزدیک، عمق نهشته‌ها، اثر فرادایره و فرودایره و سایر پارامترهای موجود در روابط کاهندگی فعلی باشند، که در این راستا تلاش‌های بسیاری در حال انجام است. هدف اصلی در روش‌های مذکور، توسعه‌ی مدل‌های کاهندگی جدید برای زلزله‌های کم عمق درون پوسته‌ی در غرب ایالات متحده‌ی آمریکا و نواحی تکنوتیکی مشابه است. در این پروژه ۵ تیم به صورت مستقل، اما در تعامل با یکدیگر، روابط کاهندگی جدیدی را پیشنهاد کرده‌اند. این تیم‌ها عبارت‌اند از: [۱۱] AS ۰۸ . ۱، [۱۲] BA ۰۸ . ۲، [۱۳] CB ۰۸ . ۳، [۱۴] I ۰۸ . ۴، [۱۵] CY ۰۸ . ۵ و [۱۶] I ۰۸ . ۵

این تذکر لازم است که در انجام این پژوهش از مدل CB ۰۸ برای در نظر گرفتن شرایط ساخت‌گاه و تخمین شتاب طیفی استفاده شده است.

### ۴. طیف میانگین شرطی: نیاز و محاسبه

با شناخت پارامترهای نوین طیفی می‌توان از آنها در جهت بهبود تخمین عملکرد سازه استفاده کرد. معمولاً هدف از تحلیل دینامیکی سازه، پیش‌بینی پاسخ آن تحت اثر حرکات زمین با مقدار مشخص شتاب طیفی است، که این امر به خصوص برای تحلیل‌های آماری و احتمالاتی سازه‌ها بسیار مهم است. اغلب این امر با انتخاب حرکات زمین سازگار با طیف به عنوان ورودی تحلیل همراه است. معمولاً در آیین‌نامه‌ها طیف با خطر ثابت (UHS)<sup>۶</sup> به عنوان طیف طراحی معرفی می‌شود. مسئله اینجاست که مقادیر UHS در محدوده‌های مختلف تناوبی از رخدادهای گوناگونی حاصل شده‌اند، زیرا در روند محاسبه‌ی UHS خطر ناشی از تمامی سرچشمه‌های لرزه‌زا با یکدیگر جمع می‌شوند و بنابراین نمی‌توان با

گام ۴. محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی.

با داشتن اطلاعات لازم می‌توان در این مرحله طیف شرطی را طبق رابطه‌ی ۲۰ محاسبه کرد:

$$\mu_{\ln S_a(T_i)|\ln S_a(T^*)} = \mu_{\ln S_a(M, R, T_i)} + \rho(T_i, T^*)\varepsilon(T^*)\sigma_{\ln S_a(T_i)} \quad (20)$$

که در آن،  $\mu_{\ln S_a(M, R, T)}$  و  $\sigma_{\ln S_a(T)}$  از روابط کاهندگی محاسبه می‌شوند و برای محاسبه‌ی  $\rho(T_i, T^*)$  می‌توان از روابط مختلفی استفاده کرد.

کرنل و بیگر (۲۰۰۵)<sup>[۶]</sup> در مورد هر دو روش دقیق و تخمینی محاسبه‌ی طیف بحث کرده‌اند. در روند دقیق برای محاسبه‌ی طیف شرطی دقیق لازم است از چندین مقدار مسبب بزرگا و فاصله ناشی از تفکیک خطر لرزه‌ی استفاده کرد. در بخش‌های بعد این موضوع بیشتر توضیح داده شده است.

اما در روش تقریبی از مقادیر میانگین بزرگا، فاصله، و  $\varepsilon$  حاصل از تفکیک  $(\bar{M}, \bar{R}, \bar{\varepsilon})$  استفاده می‌شود که طیف به‌کاررفته در تحقیق کرنل و بیگر<sup>[۶]</sup> منجر به نتایجی قابل مقایسه با حالت حل دقیق می‌شود. هر چند این نتیجه‌گیری براساس یک سایت فرضی و با به‌کارگیری مدل خطر ساده‌ی بوده است.<sup>[۲۱]</sup>

#### ۲.۴. طیف میانگین شرطی براساس اتا (ECMS)<sup>۸</sup>

همان‌گونه که اشاره شده است، پارامتر اتا که اخیراً توسط موسوی و همکاران<sup>[۷]</sup> ارائه شده است، توانایی برقراری همبستگی مناسب‌تری میان پاسخ سازه و شکل طیفی دارد و بنابراین کاربرد آن برای محاسبه‌ی طیف شرطی می‌تواند به انتخاب بهتر حرکات زمین کمک کند. پارامتر اتا به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ تعریف می‌شود:

$$\eta = 0.472 + 2.73\varepsilon_{S_a} - 2.247\varepsilon_{PGA} \quad (21)$$

برای محاسبه‌ی طیف شرطی میانگین بر مبنای اتا، دانستن اسیلون و اتای هدف لازم است. اما روابط تفکیک موجود فقط مقدار اسیلون را ارائه می‌دهند. هر چند موسوی و همکاران<sup>[۷]</sup> رابطه‌ی اتا را به‌گونه‌ی مقیاس کرده‌اند که در مقادیر هدف، مقادیر اسیلون و اتا با یکدیگر برابر باشند. بر این اساس طیف میانگین شرطی بر مبنای اتا با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ قابل محاسبه است:

$$S_a(T) = e^{(\mu_{\ln S_a} + \frac{\eta^{\text{target}} \sigma_{\ln S_a(T)} (\rho(\eta(T), \eta(T^*)) + 1)^{1/2}}{\sqrt{1.73}})} \quad (22)$$

که در آن،  $\rho(\eta(T), \eta(T^*))$  ضریب همبستگی میان  $\eta$  در یک دوره‌ی تناوب دلخواه و دوره‌ی تناوب هدف  $T^*$  است. می‌توان این رابطه‌ی اخیر را به‌صورت معادله‌ی ۲۳ بازنویسی کرد، و مقدار  $\rho'$  از رابطه‌ی ۲۴ قابل محاسبه است:

$$S_a(T) = \exp(\mu_{\ln S_a(T)} + \eta^* \sigma_{\ln S_a(T)} \rho'_{(\eta(T), \eta(T^*))}) \quad (23)$$

$$\rho'_{(\eta(T), \eta(T^*))} = \frac{\rho(\eta(T), \eta(T^*)) + 1.73}{2.73} \quad (24)$$

برای محاسبه‌ی  $\rho'$ ، رابطه‌ی بسته مطابق رابطه‌ی ۲۵ پیشنهاد شده است<sup>[۲۲]</sup> که در آن  $T_{\min}$  و  $T_{\max}$  دوره تناوب‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر هستند.  $I$  تفاوت دو دوره‌ی تناوب و همواره منفی است. همچنین دوره‌ی تناوب‌های قابل استفاده در رابطه‌ی مذکور

استفاده از یک رخداد لرزه‌ی، به شکل مشابه طیف UHS دست یافت و نتایج مطالعات بیانگر تخمین بسیار دست بالای شتاب طیفی در حالت کاربرد UHS است.<sup>[۱۷،۱۶]</sup>

به‌عنوان راهکاری برای بهبود نتایج طیف میانگین شرطی (CMS)<sup>۹</sup> به‌عنوان روشی برای دست‌یابی به نتایجی با پراکندگی و خطای کمتر توسط بیگر<sup>[۶]</sup> معرفی شده است؛ که در ادامه محاسبه‌ی آن بررسی شده است. در حقیقت روند طیف میانگین شرطی تلاش می‌کند با در نظر گرفتن پارامتر  $\varepsilon$ ، تخمینی واقعی‌تر از طیف مورد انتظار ارائه دهد.

#### ۱.۴. روند ساده‌ی محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی براساس اسیلون محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی براساس اسیلون پیچیدگی زیادی ندارد و به‌صورت این گام‌ها انجام می‌شود:<sup>[۱۸]</sup>

گام ۱. محاسبه‌ی  $S_a$  هدف در یک تناوب مفروض و مقادیر بزرگا، فاصله، و اسیلون متناظر.

برای شروع محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی لازم است مقدار  $S_a$  را در یک تناوب مفروض  $T^*$ ، محاسبه کنیم (معمولاً مقدار  $T^*$  تناوب اول سازه فرض می‌شود، اما می‌تواند هر تناوب دیگری نیز باشد، به خصوص هنگامی که در نظر باشد مودهای دیگر هم لحاظ شوند). همچنین لازم است مقدار بزرگا، فاصله، و  $\varepsilon(T^*)$  نیز محاسبه شوند که از طریق تفکیک خطر لرزه‌ی می‌توان این کمیت را محاسبه کرد.

گام ۲. محاسبه‌ی میانگین و انحراف معیار استاندارد با فرض بزرگا و فاصله‌ی محاسبه‌شده از مرحله‌ی قبلی.

در گام دوم لازم است مقادیر  $\mu_{\ln S_a(M, R, T)}$  و نیز  $\sigma_{\ln S_a(T)}$  را برای بزرگا و فاصله‌ی هدف محاسبه کرد، که در این مرحله می‌توان از هر رابطه‌ی کاهندگی دلخواهی سود برد (یادآور می‌شود که در این نوشتار از مدل  $CB^{0.8}$  (۲۰۰۸)<sup>[۱۴]</sup> استفاده شده است).

گام ۳. محاسبه‌ی اسیلون در سایر تناوب‌ها با فرض  $\varepsilon(T^*)$ .

در حقیقت در این گام مقدار میانگین مشروط  $\varepsilon$  را برای سایر تناوب‌ها محاسبه می‌کنیم، که این کار از طریق در نظر گرفتن ضریب همبستگی و مطابق معادله‌ی ۱۸ است:

$$\mu_{\varepsilon(T_i)|\varepsilon(T^*)} = \rho(T_i, T^*)\varepsilon(T^*) \quad (18)$$

که در اینجا  $\mu_{\varepsilon(T_i)|\varepsilon(T^*)}$  بیانگر مقدار میانگین  $\varepsilon(T_i)$  به شرط  $\varepsilon(T^*)$  است. مقدار  $\rho$  در پژوهشی در سال ۲۰۰۶<sup>[۱۹]</sup> به‌صورت رابطه‌ی ۱۹ پیشنهاد شده است، که در دوره‌ی تناوب بین ۵ - ۰.۰۵ ثانیه معتبر است:

$$\rho(T_{\min}, T_{\max}) = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{3} - 0.359\right) + 0.163 I_{(T_{\min} < 0.189)} \ln\left(\frac{T_{\min}}{0.189}\right) \ln\left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}}\right) \quad (19)$$

که در آن،  $I_{(T_{\min} < 0.189)}$  تابع نشانگری است که برای  $T_{\min} < 0.189$  برابر ۱ است و در غیر این صورت صفر است؛  $T_{\min}$  و  $T_{\max}$  بیانگر مقادیر کوچک‌تر و بزرگ‌تر مورد نظر است. مدل پیچیده‌تر این رابطه‌ی همبستگی نیز در پژوهشی در سال ۲۰۰۸<sup>[۲۰]</sup> ارائه شده است.

در بازه‌ی  $0.1 \leq T \leq 5$  ثانیه هستند:

$$C_1 = I(T_{\min} + 0.359) + \cos(1.45 \tan^{-1}(T_{\max})) \times \cos(1.11 T_{\max})$$

$$C_2 = \tan^{-1}\left(\frac{-I \cos(1.94 T_{\max})}{3.98}\right)$$

$$C_3 = \cos\left(\cos\left(\frac{I + T_{\min}}{2 T_{\max}}\right)\right) - \exp(\cos(T_{\min}) - 4.054) - 0.6114$$

$$C_4 = \cos\left(\max\left(\frac{I}{T_{\max}}, -T_{\max}\right)\right)$$

$$\rho'_{\eta(T), \eta(T^*)} = \begin{cases} C_1 + C_2 & T_{\max} < 0.3, T_{\min} < 0.15 \\ C_3 + C_4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

بنابر این تابع چگالی احتمال فاصله را می‌توان به صورت معادله‌ی ۲۷ محاسبه کرد:

$$f_R(r) = \frac{d}{dr} F_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{15\sqrt{r^2 - 10^2}} & 10 \leq r < 18 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

که می‌توان از رابطه‌ی ذکر شده در محاسبات مربوط به خطر استفاده کرد. نتایج تحلیل خطر سایت معرفی شده در بخش اخیر و به طور مشخص نمودار خطر لرزه‌ی در مقابل  $S_a$  با فرض  $T = 1$  (sec) و نیز نمودار خطر لرزه‌ی در مقابل PGV شکل ۳ نشان داده شده است.

با محاسبه‌ی این کمیت‌ها قادر خواهیم بود تا با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ توزیع  $M$ ‌هایی که سبب  $S_a > y$  می‌شوند، را محاسبه کنیم. همچنین می‌توان این رابطه را برای محاسبه‌ی توزیع  $R$  و  $\varepsilon$  نیز سازگار و مقادیر میانگین متناظر را محاسبه کرد. به عبارتی برای هر مقدار  $s_a$  فرضی، می‌توان مقادیر  $\bar{M}$ ،  $\bar{R}$  و  $\bar{\varepsilon}$  را محاسبه کرد. شکل ۴ الف، مقادیر محاسبه شده‌ی  $\bar{\varepsilon}_{s_a}$  را در مقابل خطر و شکل ۴ ب، تغییرات  $\bar{\varepsilon}_{PGV}$  را در مقابل مقادیر خطر نشان می‌دهد. همچنین مقادیر  $\bar{M}$  و  $\bar{R}$  در مقابل خطر در شکل ۴ ج و د نمایش داده شده‌اند. با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ و ترکیب این دو نمودار می‌توان تغییرات آتا در مقابل خطر را محاسبه کرد. نکته‌ی قابل ذکر آن است که انجام ترکیب این دو پارامتر برای محاسبه‌ی مقدار آتا به صورت هم‌خط امکان‌پذیر خواهد بود. بدین معنا که در یک خطر مشخص باید میزان اسیلون مربوط به شتاب طیفی و اسیلون بیشینه‌ی سرعت استخراج و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ ادغام شوند:

$$\eta = \varepsilon_{S_a} - 0.823 \varepsilon_{PGV} \quad (28)$$

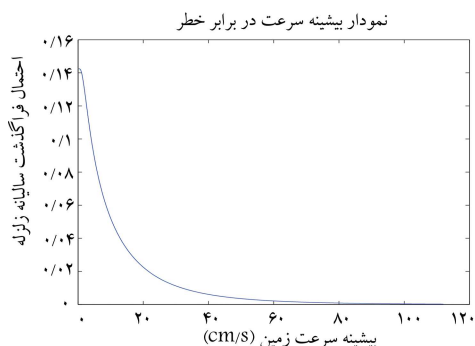
### ۳.۴ معرفی سایت فرضی برای انجام محاسبات طیف‌های شرطی

همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین اشاره شده است، در این نوشتار هدف محاسبه‌ی طیف شرطی براساس آتا است. برای محاسبه‌ی طیف شرطی نیاز است ساخت‌گاهی به صورت فرضی در نظر گرفته شود. فرض می‌شود ساخت‌گاه تحت اثر یک گسل خطی به طول ۳۰ کیلومتر قرار دارد و موقعیت مکانی آن بر روی عمود منصف گسل قرار دارد. پارامترهای لرزه‌ی گوتنبرگ ریشتر برای این سایت به صورت  $a = 1.29$  و  $b = 1.32$  محاسبه شده‌اند. سایت در شکل ۲ نشان داده شده است. سایر پارامترهای مورد استفاده در تحلیل خطر سایت عبارت‌اند از:

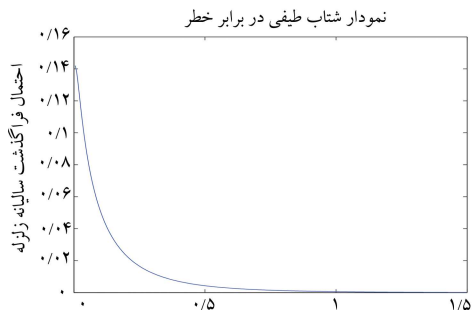
$$M_{\max} = 7, M_0 = 5, R_{JB} = 2, \text{delta} = 90, V_{sr_0} = 460$$

همچنین فرض کنیم احتمال وقوع شدن مرکز زلزله در تمام نقاط یکسان باشد. در این حالت احتمال مشاهده‌ی فاصله‌ی کوچک‌تر از  $r$  برابر کسری از طول گسل است، که در شعاع  $r$  قرار گرفته است. با استفاده از رابطه‌ی فیثاغورث می‌توان فاصله‌ی مرکز گسل را با نقطه‌ی که در فاصله‌ی  $r$  از سایت قرار گرفته است، به صورت  $\sqrt{r^2 - 10^2}$  محاسبه کرد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان تابع توزیع تجمعی  $R$  را به صورت معادله‌ی ۲۶ محاسبه کرد:

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & r < 10 \\ \frac{2\sqrt{r^2 - 10^2}}{r_0} & 10 \leq r < 18 \\ 1 & r > 18 \end{cases} \quad (26)$$

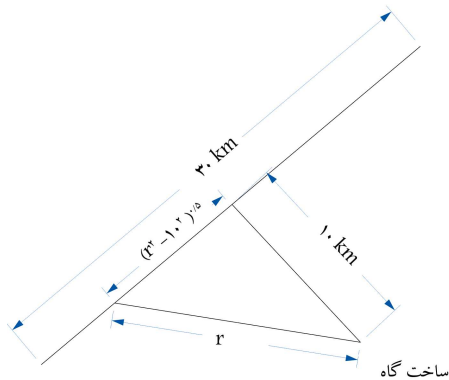


الف) منحنی خطر شتاب طیفی برای  $T=1$  (s)

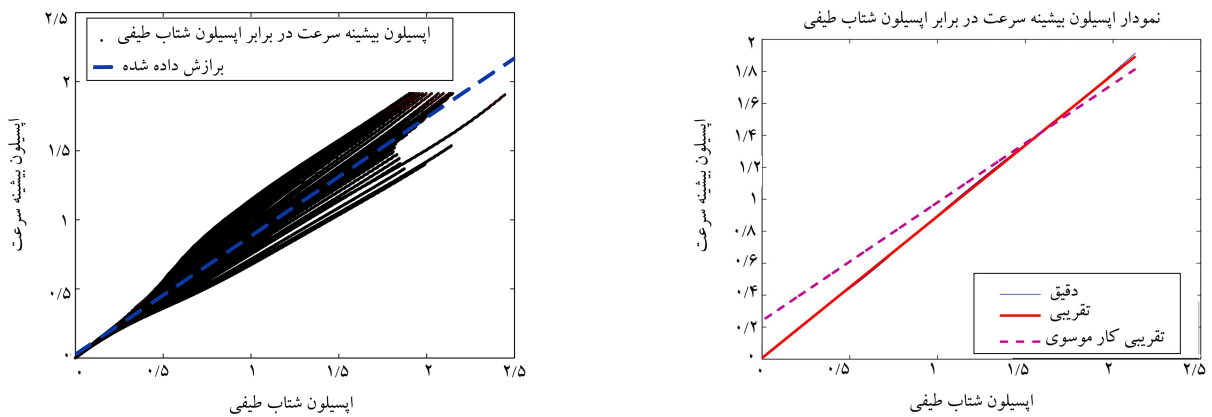
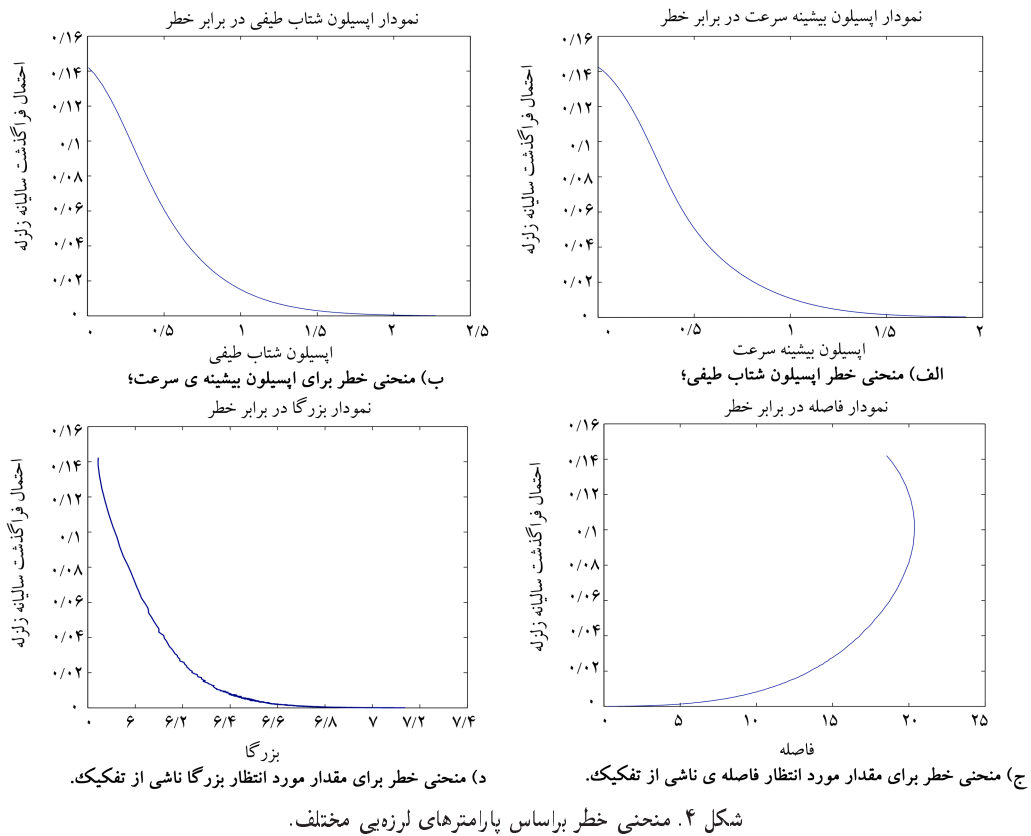


ب) منحنی خطر شتاب طیفی (درصدی از شتاب جاذبه زمین) در مقابل خطر شتاب طیفی در برابر خطر

شکل ۳. منحنی خطر شتاب طیفی و بیشینه‌ی سرعت زمین.



شکل ۲. مشخصات ساخت‌گاه مورد مطالعه.



شکل ۵. مقادیر  $\epsilon_{PGV}$  در مقابل  $\epsilon_{S_a}$  و نیز مقادیر تقریبی برازش شده و پیشنهادی توسط موسوی و همکاران [۷].

به منظور تسهیل در محاسبات، موسوی و همکاران رابطه‌ی تقریبی ۲۹ را برای محاسبه‌ی  $\epsilon_{PGV}$  با داشتن  $\epsilon_{S_a}$  ارائه کرده‌اند: [۷]

$$\epsilon_{PGV} = 0.74\epsilon_{S_a} + 0.24 \quad (29)$$

با جایگزینی رابطه‌ی ۲۹ در رابطه‌ی ۲۸، می‌توان مقادیر  $\epsilon_{PGV}$  را بدون نیاز به محاسبه‌ی مستقیم  $\epsilon_{PGV}$  محاسبه کرد. شکل ۵، نمودار تغییرات  $\epsilon_{S_a}$  در مقابل تغییرات  $\epsilon_{PGV}$  را به همراه نتایج حاصل از رابطه‌ی ۲۹ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از کاربرد رابطه‌ی تقریبی، اختلاف معناداری را با حل دقیق نشان می‌دهد. برای به دست آوردن نتیجه‌ی دقیق‌تر از برازش خط استفاده شده است، که معادله‌ی ۳۰ را نشان می‌دهد و این خط نیز در نمودار رسم شده

است که تطابق مناسب‌تری با حل دقیق نشان می‌دهد:

$$\epsilon_{PGV} = 0.8869\epsilon_{S_a} + 0.0065 \quad (30)$$

اگر این محاسبات را برای دوره تناوب‌های متفاوت تکرار کنیم، شکل ۶ برای رابطه‌ی میان اسیلون‌ها قابل ترسیم است و با انجام رگرسیون به رابطه‌ی ۳۱ دست خواهیم یافت:

$$\epsilon_{PGV} = 0.8575\epsilon_{S_a} + 0.02538 \quad (31)$$

با ترکیب مقادیر حاصل برای اسیلون شتاب طیفی و سرعت بیشینه می‌توان نمودار تغییرات  $\epsilon_{PGV}$  در مقابل خطر را ترسیم کرد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود،

نوشت که با جایگذاری کمیت موجود می‌توان به معادله‌ی ۳۳ رسید:

$$\mu_{\ln S_a(T)} = \bar{\mu}_{\ln S_a(T)} + \sigma_{\ln S_a} \varepsilon \quad (32)$$

$$\mu_{\ln S_a(T) | \ln S_a(T^*)} = \mu_{\ln S_a(T)}(\bar{M}, \bar{R}, T_T) + \sigma_{\ln S_a}(\bar{M}, \bar{R})[\rho\eta(T^*) + 0,1823\varepsilon_{PGV}] \quad (33)$$

به منظور محاسبه‌ی  $\rho$  مجموعه‌ی مشتعل بر ۲۶۷ زوج حرکت زمین انتخاب شده است، که مشخصات هر کدام از آنها شامل پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات روابط کاهندگی بر مبنای  $CB^{\circ}8$  استخراج شده است. سپس با استفاده از توابع محاسبه‌ی ضرایب همبستگی موجود، مقدار  $\rho$  برای  $T$ های مختلف محاسبه شده‌اند.

در این مرحله قادر خواهیم بود تا با استفاده از منحنی خطر اِتا، میزان خطر مفروض و نیز تناوب مبنای دلخواه طیف میانگین شرطی براساس اِتا را محاسبه کنیم. در شکل ۸، طیف میانگین شرطی محاسبه‌شده براساس اِتا، اپسیلون و طیف UHS نمایش داده شده‌اند.

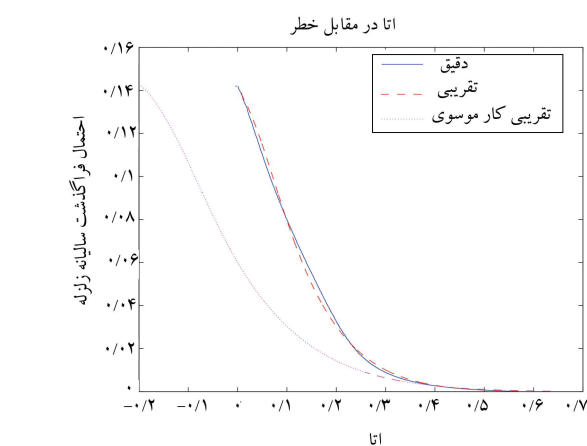
در شکل مذکور ECMS مستقیماً براساس اِتا و بدون در نظر گرفتن رابطه‌ی آن با اپسیلون محاسبه شده است. اِتا هدف از تفکیک خطر لرزه‌ی مستقیماً به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که در دوره‌های تناوب بالا این ۳ نمودار تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند، اما در  $T^*$  نمودار ECMS و CMS با یکدیگر مساوی و بیشتر از مقدار UHS هستند و در دوره‌های تناوب پایین که مربوط به مدهای بالاتر تناوب سازه است، ECMS بالاتر از CMS قرار گرفته است، که با توجه به همبستگی بیشتر اِتا و پاسخ لرزه‌ی سازه نسبت به همبستگی اپسیلون و پاسخ لرزه‌ی سازه نشان می‌دهد که استفاده از CMS به جای ECMS در انتخاب شتاب‌نگاشت برای تحلیل دینامیکی می‌تواند موجب برآورد پاسخ‌های دست‌پایین شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

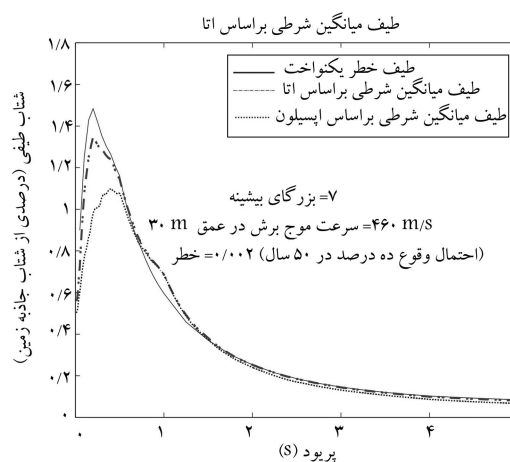
همان‌طور که ملاحظه شده است، محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی براساس پارامتر نون اِتا به دو روش امکان‌پذیر است: ۱. اِتا مقیاس شود، به طوری که اِتای هدف با اپسیلون هدف برابر شود و طیف میانگین شرطی بر این اساس تولید شود، ۲. اِتا هدف مستقیماً از تفکیک خطر محاسبه شود و مبنای محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مقیاس‌کردن اِتا می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ی در برآورد پاسخ وارد کند. همچنین در دوره‌های تناوب پایین که مربوط به مدهای بالاتر تناوب سازه است، نمودار طیف ECMS بالاتر از CMS قرار می‌گیرد، که با توجه به همبستگی بیشتر اِتا و پاسخ لرزه‌ی سازه نسبت به همبستگی اپسیلون و پاسخ لرزه‌ی سازه نشان می‌دهد که استفاده از CMS به جای ECMS در انتخاب شتاب‌نگاشت برای تحلیل دینامیکی می‌تواند موجب برآورد پاسخ‌های دست‌پایین شود.

## پانویس‌ها

1. aleatory uncertainty
2. incremental dynamic analysis (IDA)
3. epistemic uncertainty
4. disaggregation



شکل ۷. منحنی شاخص اِتا در مقابل خطر لرزه‌ی و مقادیر تقریبی.



شکل ۸. طیف میانگین شرطی محاسبه‌شده براساس اِتا و اپسیلون، طیف UHS و مقادیر تقریبی آن.

اختلاف نتایج ناشی از کاربرد رابطه‌ی تقریبی پیشنهادی و رابطه‌ی محاسبه‌شده از برازش خطی در این قسمت نیز به نسبت حل دقیق قابل ملاحظه است، که رابطه‌ی برازش‌شده مطابقت مناسبی با حل دقیق از خود نشان می‌دهد.

## ۴.۴. محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی بر مبنای اِتا

با انجام محاسبات مربوط به خطر لرزه‌ی و محاسبه‌ی نمودار خطر لرزه‌ی براساس اِتا، ابزار لازم برای محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی براساس اِتا به دست می‌آید. محاسبه‌ی طیف میانگین شرطی براساس اِتا در این نوشتار به صورت مستقیم و بدون نیاز به نرمال‌سازی براساس  $\varepsilon$  هدف انجام می‌پذیرد. بنابراین می‌توان معادله‌ی ۳۲ را

5. next generation attenuation relationship (NGA)
6. uniform hazard spectrum (UHS)
7. conditional mean spectrum (CMS)
8. Eta-based conditional mean spectrum (ECMS)



## (References) منابع

1. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(3), pp. 491-514 (2002).
2. Azarbakht, A. and Dolšek, M. "Progressive incremental dynamic analysis for first-mode dominated structures", *Journal of Structural Engineering*, **137**(3), pp. 445-455 (2011).
3. Kayhani, H., Azarbakht, A. and Ghafory-Ashtiany, M. "Estimating the annual probability of failure using improved progressive incremental dynamic analysis of structural systems", *The Structural Design of Tall and Special Buildings Journal*, **22**(17), pp. 1279-1295 (2012).
4. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Direct estimation of seismic demand and capacity of multidegree-of-freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **131**(4), pp. 589-599 (2005).
5. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**(9), pp. 1097-1117 (2006).
6. Baker, J.W. and Cornell, C.A. "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**(10), pp. 1193-1217 (2005).
7. Mousavi, M., Ghafory-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**, pp. 1403-1416 (2011).
8. Shahri, M.R., Azarbakht, A. and Mousavi, M. "Comparing E-CMS and CMS for nuclear design spectra", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **14**(2), pp. 159-164 (2012).
9. McGuire, R.K. "Probabilistic seismic hazard and design earthquakes: Closing the loop", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**(5), pp. 1275-1284 (1995).
10. Bazzurro, P. and Cornell, C.A. "Disaggregation of seismic hazard", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(2), pp. 501-520 (1999).
11. Power, M. and et al. "An overview of the NGA project", *Earthq. Spectra*, **24**(1), pp. 3-21 (2008).
12. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. "Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 67-97 (2008).
13. Boore, D.M. and Atkinson, G.M. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
14. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-171 (2008).
15. Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R. "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 173-215 (2008).
16. Idriss, I.M. "An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes", *Earthq. Spectra*, **24**(1), pp. 217-242 (2008).
17. 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).
18. Baker, J.W. "Conditional mean spectrum: Tool for ground motion selection", *Journal of Structural Engineering*, **137**(3), pp. 322-331 (2011).
19. Baker, J.W. and Cornell, C.A. "Spectral shape, epsilon and record selection", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(9), pp. 1077-1095 (2006).
20. Jack, W. and Baker, J.W. "Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 299-317 (February 2008).
21. Ebrahimian, H., Azarbakht, A., Tabandeh, A. and Golafshani, A. "The exact and approximate conditional spectra in the multi-seismic-sources regions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **39**, pp. 61-77 (2012).
22. Mousavi, M., Shahri, M.R. and Azarbakht, A. "E-CMS: A new design spectrum for nuclear structures in high levels of seismic hazard", *Nuclear Engineering and Design*, **252**(10), pp. 27-33 (2012).