

# مطالعه‌ی تأثیر لحاظ عدم قطعیت‌های عمق رخدادها در نتایج تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی

مهدی موسوی\* (استادیار)

علی فرهادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا آذربخت (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه اراک

حمید زعفرانی (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (درداشت شی)  
دوری ۲-۳۲، شماره ۲/۱، ص. ۱۱۱-۱۱۸، (یادداشت شی)

در تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی مرسوم، از لحاظ اثر عدم قطعیت عمق رخدادها چشم‌پوشی شده و یک توزیع یکنواخت برای آن منظور می‌شود؛ در حالی که عمق رخدادها در طبیعت از یک توزیع یکنواخت تبعیت نمی‌کند و حتماً متغیری تصادفی با پراکندگی قابل ملاحظه است. در این نوشتار، با آگاهی از محدودیت‌های روش کلاسیک و به‌منظور ارزیابی اثر لحاظ این عدم قطعیت در نتایج نهایی تحلیل خطر، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مطالعه‌ی موردی تحلیل خطر شهرستان ازنا استفاده شده است. ابتدا نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو در مقابل روش کلاسیک صحت‌سنجی شده و در ادامه، با اعمال فرض توزیع غیریکنواخت حاصل از تحویل داده‌های کاتالوگ، فرایند تحویل خطر تکمیل شده است. نتایج نشان داده است که در نظر گرفتن توزیع واقع‌گرایانه‌ی عمق می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ی در نتایج نهایی تحلیل خطر در خلاف جهت اطمینان داشته باشد.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، عمق رخدادها، منحنی خطر، ازنا.

## ۱. مقدمه

در تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی با در نظر گرفتن تمامی رخداد‌های ممکن و نیز لحاظ عدم قطعیت‌های موجود در قالبی نظام‌مند، به برآورد مشخصه‌ی از جنبش زمین به همراه احتمال فراگذشت از آن در یک دوره‌ی زمانی پرداخته می‌شود.<sup>[۱]</sup> فرایند تحلیل خطر لرزه‌ی کلاسیک، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این ۴ گام صورت می‌پذیرد:<sup>[۲]</sup>

۱. شناسایی چشمه‌های لرزه‌زای فعال بر مبنای مطالعه‌ی لرزه‌ی زمین‌ساخت.
  ۲. تعیین رابطه‌ی بین بزرگای رخدادها بر پایه‌ی مطالعه‌ی لرزه‌خیزی.
  ۳. انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب جهت برآورد مشخصه‌ی جنبش‌های زمین.
  ۴. محاسبه‌ی منحنی خطر با تجمیع نظام‌مند عدم قطعیت‌های مختلف در بزرگای فاصله.
- عدم قطعیت‌های موجود، در قالب رابطه‌ی ۱، در چارچوب محاسباتی تحلیل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۸/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۳/۳/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۲۷.

m-mousavi@araku.ac.ir  
farhadia99@yahoo.com  
a-azarbakht@araku.ac.ir  
h.zafarani@iiees.ac.ir

خطر لرزه‌ی کلاسیک، که بر قاعده‌ی احتمال کل استوار است، گنجانده می‌شود:<sup>[۳]</sup>

$$\lambda(X \geq x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} v_i \iint f_i(m) f_i(r|m) P(X \geq x|r, m) dr dm \quad (1)$$

که در آن،  $\lambda$  نرخ فراگذشت سالیانه از سطحی خاص از مشخصه‌ی جنبش زمین،  $v_i$  نرخ میانگین سالیانه‌ی رخداد زلزله‌ی چشمه‌ی لرزه‌زای  $i$ ام،  $m$  بزرگای زلزله،  $r$  فاصله تا ساخت‌گاه مورد نظر،  $f_i(\cdot)$  تابع چگالی احتمال، و  $P(X \geq x|r, m)$  احتمال فراگذشت از یک سطح خاص از مشخصه‌ی جنبش زمین است، که از رابطه‌ی کاهندگی حاصل می‌شود.

آنچه که از این رابطه مشخص است، این است که فقط به لحاظ عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای بزرگای فاصله پرداخته شده و عملاً با پارامتری مانند عمق زلزله به صورت قطعی برخورد شده است. به این معنا که در تحلیل‌های خطر کلاسیک، عدد ثابتی برای عمق رخدادها در نظر گرفته شده و فرایند انتگرال‌گیری انجام شده است. این عمق می‌تواند از مطالعه‌ی کاتالوگ‌های منطقه و بر پایه‌ی میانگین عمق رخداد‌های گذشته مشخص شود.<sup>[۴]</sup>

## ۲. تحلیل خطر لرزه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو

همان‌گونه که در مقدمه اشاره شده است، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در فرایند تحلیل خطر لرزه‌ی تاریکی نداشته و در مطالعات بسیاری از آن استفاده شده است؛ اما برای اولین بار موسون<sup>۶</sup> (۲۰۰۰) از روش مذکور و مزایای مربوط به آن استفاده کرده است.<sup>[۳]</sup>

در روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، نخست برای تمام چشمه‌های لرزه‌زا، رابطه‌ی بین بزرگای زلزله و نرخ وقوع به دست می‌آید و براساس آن به بازتولید تصادفی کاتالوگ‌های متعدد زلزله پرداخته می‌شود. این کاتالوگ‌ها حاوی تمامی رخداد‌های ممکن به همراه اطلاعاتی نظیر: زمان، بزرگا و محل وقوع رخدادها هستند. پس از شبیه‌سازی کاتالوگ‌های زلزله، مشخصه‌ی جنبش زمین برای هر یک از رخداد‌های موجود در کاتالوگ‌ها برآورد خواهد شد. در پایان به جای انتگرال‌گیری روی تمامی رخداد‌های موجود در کاتالوگ تعیین و با تقسیم مقدار ذکر شده بر بازه‌ی زمانی کاتالوگ، نرخ فراگذشت سالیانه‌ی آن سطح از مشخصه‌ی حرکت زمین برآورد و منحنی خطر محاسبه خواهد شد.<sup>[۸]</sup> در شکل ۲، چارچوب محاسباتی تحلیل خطر لرزه‌ی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده شده است.

در این نوشتار، با بهره‌گیری از مهم‌ترین مزیت روش مونت کارلو، یعنی امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی، فرض توزیع غیر یکنواخت عمق براساس داده‌ی کاتالوگ اعمال شده است. از دیگر مزایای روش مونت کارلو می‌توان به قابلیت در نظر گرفتن مدل‌های غیر پواسونی و درک آسان‌تر آن اشاره کرد.<sup>[۷]</sup>

در بخش بعدی نیز به معرفی یک ساختگاه در پهنه‌ی کشور و برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی برای ساختگاه مربوط پرداخته شده است.

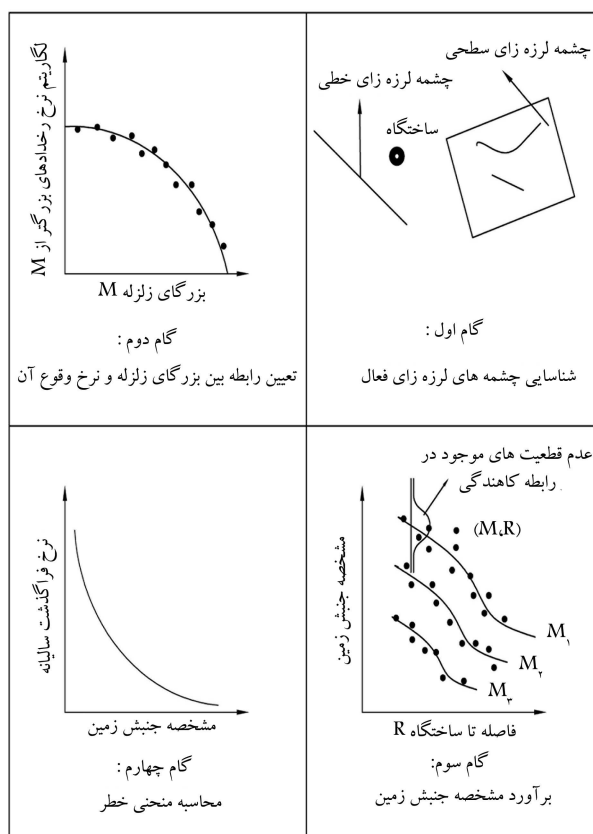
## ۳. معرفی ساختگاه و داده‌های مورد استفاده

### ۱.۳. ساختگاه مورد مطالعه

شهرستان ازنا با مختصات جغرافیایی (۳۳/۴۵۴ و ۴۹/۴۶۲) واقع در استان لرستان و ایالت لرزه‌ی زاگرس به‌عنوان ساختگاه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. از گسل‌های فعال در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ساختگاه مورد نظر می‌توان به گسل‌های زاگرس، نهاوند، بالارود و دزفول اشاره کرد (شکل ۳). در ادامه، رخداد‌هایی که تا سال ۱۳۹۲ در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ساختگاه مورد نظر رخ داده‌اند، به گسل‌های فعال اختصاص داده شده و در مجموع ۵ چشمه‌ی لرزه‌زای سطحی در نظر گرفته شده است، که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

### ۲.۳. داده‌های لرزه‌زا

کاتالوگ ISC<sup>[۹]</sup> به‌عنوان منبع اصلی در استخراج رویدادها در نظر گرفته شده و در کنار این کاتالوگ از کاتالوگ IIEES<sup>[۱۰]</sup> برای تکمیل داده‌ها استفاده شده است. این تذکر لازم است که قبل از انجام هرگونه محاسبه‌ی، پالایش کاتالوگ از پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها صورت پذیرفته و در نهایت، ۳۱۲ رخداد مستقل حاصل شده است. در بخش بعدی با استفاده از این ۳۱۲ داده، پارامترهای لرزه‌خیزی برای هر یک از چشمه‌های لرزه‌زا محاسبه شده است.

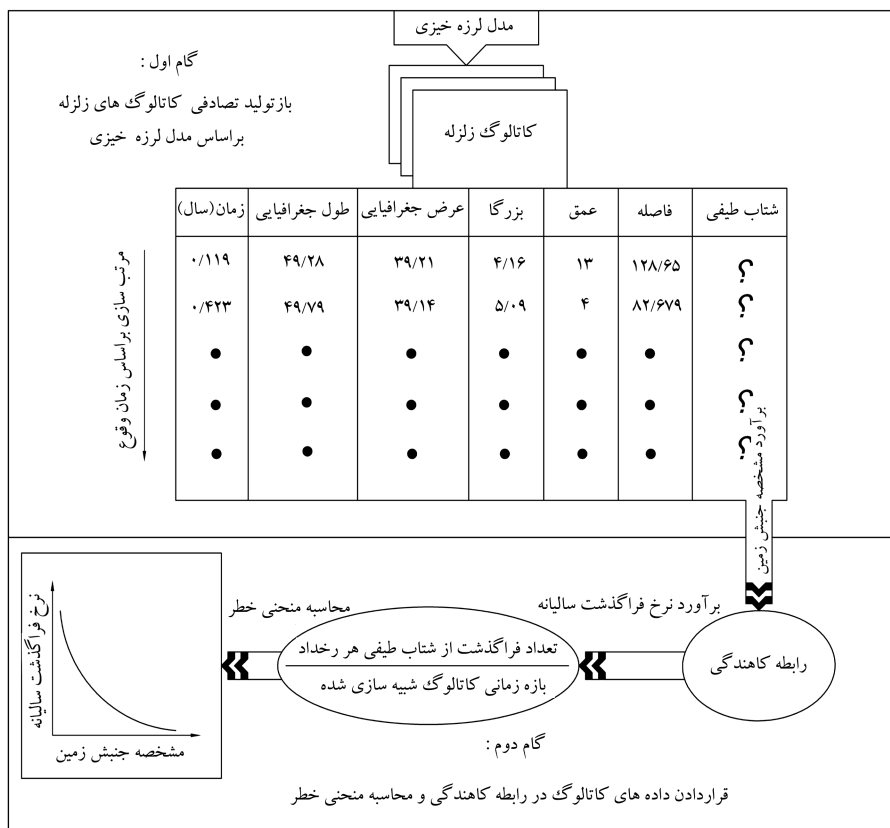


شکل ۱. گام‌های محاسباتی تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی.

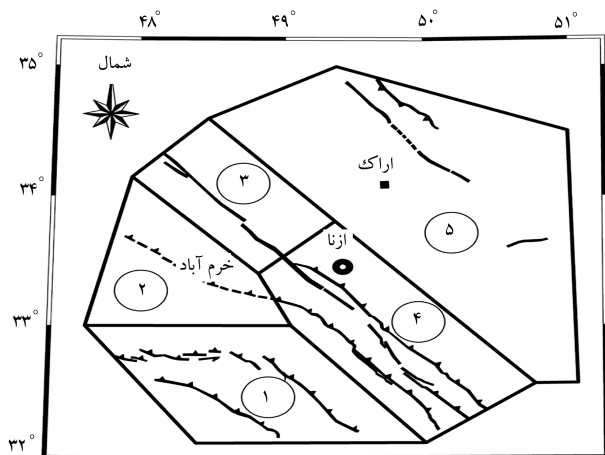
هدف از این نوشتار، نقد این رویکرد غالب در تحلیل خطر لرزه‌ی کلاسیک است. اثر پارامتر عمق زلزله در مشخصه‌ی جنبش زمین کاملاً روشن است و البته تجربه‌ی زلزله‌های پیشین شاهده‌ی بر این مدعاست، مثلاً در زمین لرزه‌ی که شهرستان سراوان را با بزرگای گشتاوری ۷/۵ و عمق ۹۵ کیلومتر در ۲۷ فروردین ۱۳۹۲ لرزانده است، فقط یک تن جان خود را از دست داده و عملاً خسارتی در پی نداشته است.<sup>[۵]</sup> در حالی که در زلزله‌ی بم که در ۵ دی ۱۳۸۲ با بزرگای ۶/۶ ریشتر و عمق ۱۰ کیلومتر اتفاق افتاده است، حدود ۵۰۰۰۰ تن از افراد جان باخته‌اند.<sup>[۵]</sup> نویسندگان این نوشتار بر این باورند که لحاظ عدم قطعیت پارامتر عمق، در مقابل نگرش در نظر گرفتن عددی ثابت برای این پارامتر می‌تواند نتایج تحلیل خطر را دست‌خوش تغییرات قابل ملاحظه‌ی کند.

رویکردی که برای مطالعه‌ی موضوع ذکر شده انتخاب شده است، بهره‌گیری از روش تحلیل خطر لرزه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلوست. با بهره‌گیری از این روش می‌توان افزون بر پارامترهای بزرگا و فاصله، سایر متغیرهای دخیل در فرایند برآورد خطر مانند: عمق، نوع خاک، نوع گسلش، و... را نیز به صورت متغیرهای تصادفی مدل کرد.<sup>[۶]</sup> از روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو در مطالعات دیگری مانند روزنهاور<sup>۱</sup> (۱۹۸۳)، شاپیرا<sup>۲</sup> (۱۹۸۳)، جانسون<sup>۳</sup> و کویاناگی<sup>۴</sup> (۱۹۸۸)، و آورنر<sup>۵</sup> و روزنهاور (۱۹۹۳) برای انجام تحلیل خطر لرزه‌ی استفاده شده است.<sup>[۷]</sup>

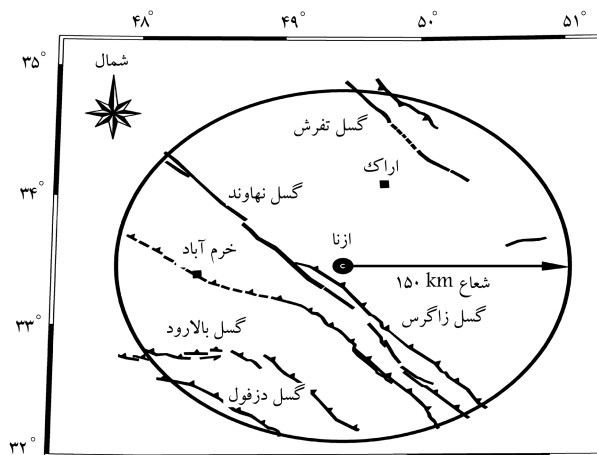
در ادامه‌ی نوشتار، نخست به معرفی اجمالی روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی پرداخته شده است. سپس ساختگاهی واقعی در پهنه‌ی کشور انتخاب و پس از صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی مونت کارلو در مقایسه با روش کلاسیک، به بررسی اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق پرداخته شده است.



شکل ۲. چارچوب محاسباتی روش مونت کارلو. [۱۹]



شکل ۴. نقشه‌ی چشمه‌های لرزه‌زای شناسایی شده برای شهرستان ازنا.



شکل ۳. نقشه‌ی گسل‌های فعال در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ساخت‌گاه مورد مطالعه.

### ۳.۳. پارامترهای لرزه‌خیزی

باید بزرگای تمامی رخدادها از یک نوع باشند؛ از آنجایی که بزرگای گشتاوری اشباع نمی‌شود، لذا بهترین معیار برای سنجش بزرگای رخدادهاست. [۱] بنابراین از روابط امه<sup>۷</sup> (۲۰۱۱)، [۱۱] اسکوردیلِس<sup>۸</sup> (۲۰۰۶) [۱۲] و شجاع طاهری (۲۰۰۷)، [۱۳] به ترتیب برای تبدیل بزرگای سطحی، حجمی، و محلی به بزرگای گشتاوری استفاده شده است.

در این نوشتار با بهره‌گیری از پژوهش توکلی و آشتیانی (۱۹۹۹)، [۱۴] بزرگای  $M_0$  و  $M_{max}$ ، که نشان‌دهنده‌ی کمینه و بیشینه مقدار قابل انتظار بزرگای رخدادها هستند، تعیین و با استفاده از روش آماری بیشینه احتمال<sup>۹</sup>، [۱۵] پارامتر لرزه‌خیزی

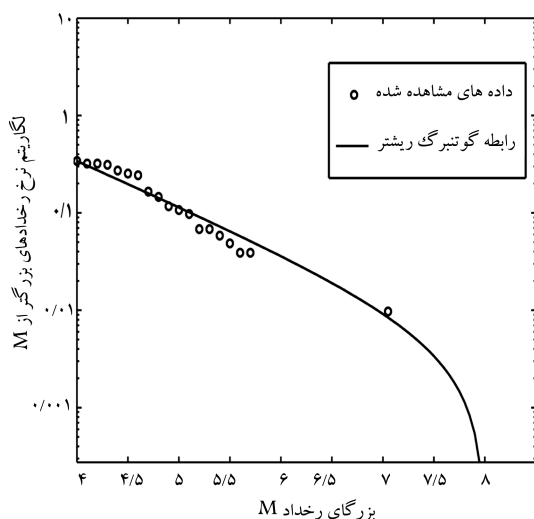
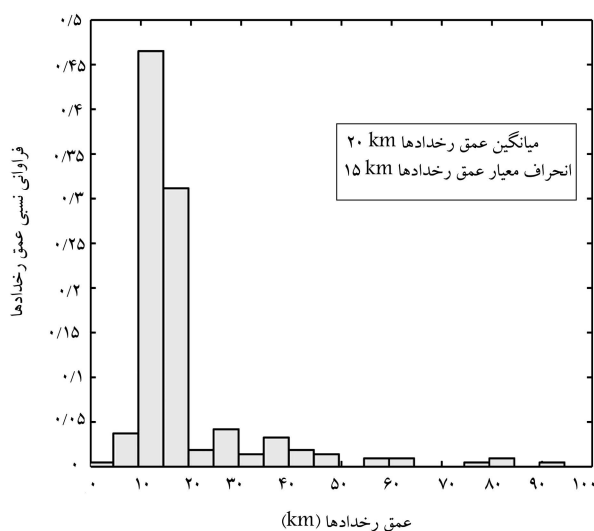
برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک ناحیه‌ی مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوه‌ی توزیع زلزله‌ها و بزرگای آنها ارائه شده است. یکی از معتبرترین آنها، رابطه‌ی گوتنبرگ - ریشر است (رابطه‌ی ۲): [۲]

$$\ln \lambda_m = \alpha - \beta m \quad (2)$$

که در آن،  $\lambda_m$  نرخ رخداد یا تعداد زلزله‌های بزرگ‌تر از  $m$  در سال است.  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت‌های لرزه‌ی منطقه یا چشمه‌ی لرزه‌زا هستند. در استفاده از رابطه‌ی مذکور

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌خیزی.

چشمه‌ی لرزه‌زا	$\beta$	$\lambda_0$	$M_0$	$M_{max}$
چشمه‌ی ۱	۱/۱۹	۲/۵۵	۴	۷/۲
چشمه‌ی ۲	۱/۰۵	۰/۶۹	۴	۷/۲
چشمه‌ی ۳	۱/۲۳	۰/۴۱	۴	۷/۶
چشمه‌ی ۴	۱/۰۷	۰/۳۴	۴	۸
چشمه‌ی ۵	۱/۲۲	۰/۲۷	۴/۵	۷/۳

شکل ۵. استخراج پارامتر لرزه‌خیزی  $\beta$  برای چشمه‌ی لرزه‌زای شماره‌ی ۴.

شکل ۶. پراکندگی داده‌های عمق کاتالوگ.

جدول ۲. توزیع غیریکنواخت عمق رویدادها.

وزن مربوط	۰/۰۳	۰/۷۳	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۱۰
عمق زلزله (۸ - ۰) (۹ - ۱۷) (۲۶ - ۱۸) (۳۵ - ۲۷) $\leq ۳۶$					

توجه به اینکه بررسی‌های اولیه نشان داده است که تغییرات عمق کانونی به اندازه‌ی ۴ کیلومتر تأثیر چندانی در نتایج نهایی تحلیل خطر نخواهد داشت، داده‌های کاتالوگ در دسته‌هایی به طول ۸ کیلومتر دسته‌بندی و در ادامه، توزیع عمق غیریکنواخت مطابق با جدول ۲ متناظر با مراکز دسته‌ها در نظر گرفته شده است.

### ۵.۳. روابط کاهندگی

روابط کاهندگی بیانگر ارتباط بین پارامترهای مختلف حرکت زمین از جمله: بزرگی، فاصله، سرعت موج برشی، نحوه‌ی گسلش، و پارامترهای فراوان دیگری است که به برآورد مشخصه‌ی جنبش زمین می‌پردازد.<sup>[۱۶]</sup> انتخاب رابطه‌ی کاهندگی در زمره‌ی عدم قطعیت‌های ذاتی است و برای لحاظ این عدم قطعیت از روش درخت منطقی استفاده می‌شود.<sup>[۱۷]</sup> در این نوشتار به دلیل آنکه هدف فقط ارزیابی اثر

$\beta$  برآورد شده است. در چشمه‌ی لرزه‌زای شماره‌ی ۴، رخدادی با بزرگی گشتاوری بیش از ۷/۲ به وقوع پیوسته است، لذا با انتخاب بزرگی ۸ به‌عنوان بیشینه‌ی بزرگی قابل انتظار در این چشمه‌ی لرزه‌زا و مقدار ۴ برای کمینه‌ی بزرگی رخدادها، داده‌های مربوط به بزرگی رخدادها به فاصله‌ی ۰/۰۵ واحد بزرگی بین دو بزرگی ۴ و ۸ تقسیم‌بندی شده‌اند. در ادامه، لگاریتم نرخ وقوع سالیانه برای هر بزرگی و  $\lambda_0$  یا همان نرخ رخداد  $M_0$  محاسبه شده و در نهایت، برازش پارامتر لرزه‌خیزی  $\beta$  با توجه به داده‌های مشاهده‌شده و به روش آماری بیشینه‌ی احتمال صورت پذیرفته است. در شکل ۵، انطباق رابطه‌ی گوتنبرگ - ریشتر به ازاء پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه‌شده با داده‌های موجود در کاتالوگ برای چشمه‌ی لرزه‌زای شماره‌ی ۴ مشاهده می‌شود.

برای سایر چشمه‌های لرزه‌زا، فرایندی مشابه آنچه برای چشمه‌ی لرزه‌زای شماره‌ی ۴ صورت پذیرفته است، انجام و پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شده‌اند. پارامترهای لرزه‌خیزی، که نشان‌دهنده‌ی الگوی رخداد زلزله در یک منطقه هستند، برای تمامی چشمه‌های لرزه‌زا در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۴.۳. عمق رویدادها

برای تعیین عمق رخدادها باید از کاتالوگ‌های زلزله استفاده کرد. استفاده از داده‌های موجود در کاتالوگ با محدودیت‌هایی روبرو خواهد بود. به این معنا که تمامی اطلاعاتی که از مطالعه‌ی کاتالوگ‌های زلزله حاصل می‌شود، صحت و دقت کافی ندارند. مثلاً عمق کانونی زلزله‌ی زاگرس (جولای، ۱۹۹۴) با استفاده از روش انعکاس امواج موجی<sup>۱</sup> معادل ۱۴ کیلومتر محاسبه شده است؛ این در حالی است که عمق کانونی زلزله‌ی ذکرشده در کاتالوگ CMT معادل ۴۹ کیلومتر، در کاتالوگ ISC معادل ۴۱ کیلومتر، و در کاتالوگ NEISC معادل ۴۳ کیلومتر گزارش شده است.<sup>[۱۵]</sup> استفاده از روش‌هایی همچون روش انعکاس امواج موجی، نیازمند شبکه‌ی با دقت بالا در کل کشور است، که در مورد زلزله‌های گذشته چنین شبکه‌ی وجود نداشته است؛ بنابراین فقط داده‌های ۱۵ سال اخیر ساخت‌گاه موردنظر، بررسی شده و توزیعی متناسب با شکل ۶ به‌دست آمده است.

مطابق شکل ۵، عمق رخدادها پراکندگی قابل ملاحظه‌ی دارد، داده‌های مربوط به عمق رخدادها توزیع غیریکنواخت با میانگین ۲۰ و انحراف معیار ۱۵ کیلومتر دارند. مقادیر ذکرشده از بررسی ۲۱۵ داده، که از کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استخراج شده‌اند، محاسبه شده است.

هدف از نگارش این نوشتار، ارزیابی اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق در نتایج نهایی تحلیل خطر لرزه‌ی است. به این منظور باید فرایند تحلیل خطر لرزه‌ی، یک بار برای توزیع یکنواخت عمق برابر با میانگین عمق رخدادها و بار دیگر برای توزیع غیریکنواخت و واقع‌گرایانه‌ی عمق مطابق با داده‌های کاتالوگ انجام شود. با

آتی نوشتار نیز به هنگام استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، دست‌کم ۱ میلیون شبیه‌سازی صورت گرفته است.

لحاظ عدم قطعیت پارامتر عمق است، [۱۸] برای منطقه‌ی ایران و متناسب با شرایط ساخت‌گاهی منطقه‌ی مورد مطالعه فقط از رابطه‌ی توسعه یافته‌ی کاهندگی استفاده و به عبارتی از لحاظ عدم قطعیت‌های روابط کاهندگی صرف‌نظر شده است.

در بخش بعدی با فرض توزیع یکنواخت برابر با میانگین عمق رخدادها به صحت‌سنجی نتایج روش مونت‌کارلو در مقایسه با روش کلاسیک پرداخته شده است.

## ۵. ارزیابی اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق در

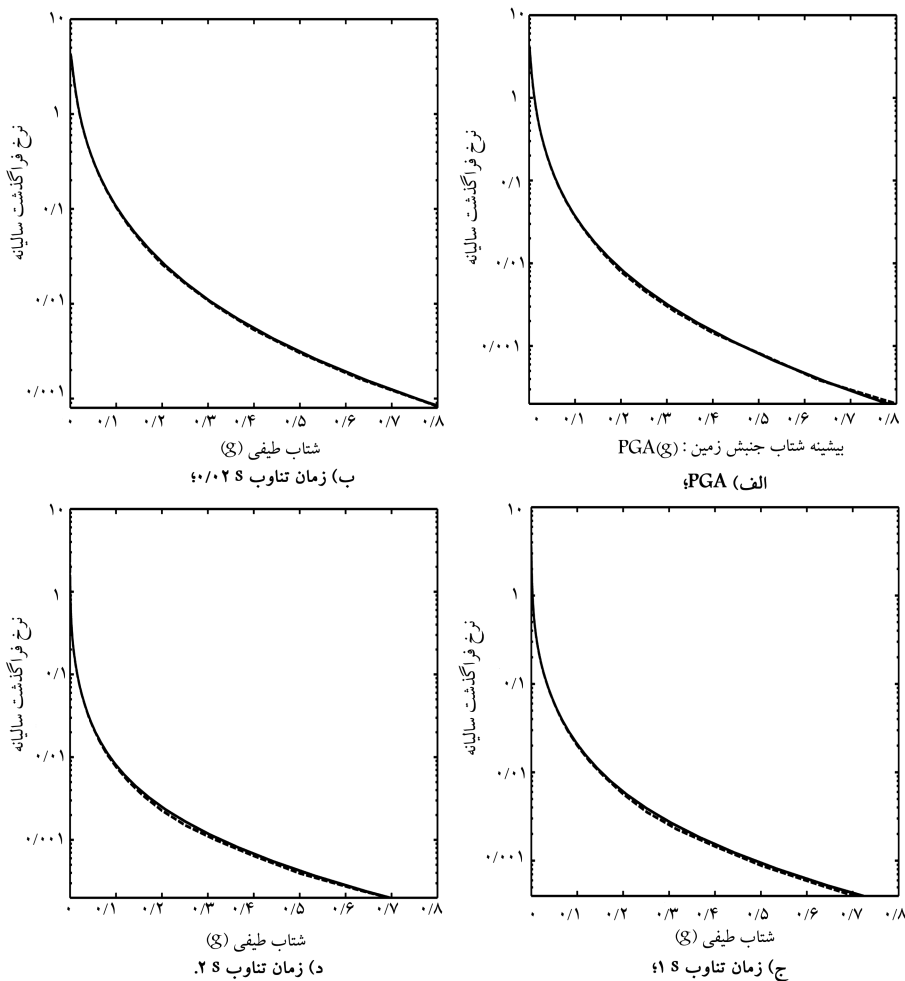
### نتایج نهایی تحلیل خطر لرزه‌ی

برای مطالعه‌ی اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق، تحلیل خطر لرزه‌ی به روش مونت‌کارلو که صحت نتایج آن در بخش قبل به اثبات رسیده است، ابتدا با فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین داده‌های کاتالوگ یعنی عمق ۲۰ کیلومتری انجام و در ادامه، فرض توزیع غیریکنواخت عمق مطابق با داده‌های جدول ۲ اعمال و فرایند تحلیل خطر تکمیل شده است. مقادیر شتاب طیفی در سطوح خطر با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله به ازاء زمان‌های تناوب مختلف در جدول‌های ۳ و ۴ برای دو توزیع یکنواخت و غیریکنواخت عمق مبتنی بر داده‌های کاتالوگ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳، تفاوت بین مقادیر شتاب طیفی در دو حالت توزیع یکنواخت برابر با میانگین عمق داده‌های کاتالوگ یعنی ۲۰ کیلومتر و توزیع واقع‌گرایانه و غیریکنواخت عمق، به ویژه در زمان‌های تناوب کوتاه قابل توجه است و در بیشینه‌ی

## ۴. صحت‌سنجی روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مقایسه با روش کلاسیک

برای مطالعه‌ی صحت نتایج روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تحلیل خطر لرزه‌ی به روش کلاسیک و مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو با فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین عمق زلزله‌های ۱۵ سال اخیر ساخت‌گاه موردنظر، یعنی عمق ۲۰ کیلومتر انجام و نتایج نهایی شامل منحنی‌های خطر در زمان‌های تناوب مختلف محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، شاهد برابری دو روش و انطباق منحنی‌های خطر در زمان‌های تناوب گوناگون هستیم. برابری دو روش مذکور در تعدادی بیش از ۱ میلیون شبیه‌سازی حاصل شده است، بنابراین در بخش‌های



جدول ۳. مقادیر شتاب طیفی در زلزله با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله (g).

توزیع عمق	زمان تناوب (ثانیه)			
	۲	۱	۰٫۲	PGA
توزیع یکنواخت ۲۰ کیلومتر	۰٫۲۰۸	۰٫۲۳۳	۰٫۵۷۱	۰٫۳۵
توزیع غیریکنواخت متناظر با کاتالوگ	۰٫۲۲۶	۰٫۳۵	۰٫۶۱۴	۰٫۴۰

جدول ۴. مقادیر شتاب طیفی در زلزله با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله (g).

توزیع عمق	زمان تناوب (ثانیه)			
	۲	۱	۰٫۲	PGA
توزیع یکنواخت ۲۰ کیلومتر	۰٫۴۹۳	۰٫۷۳	۰٫۸۷۵	۰٫۶۲۷
توزیع غیریکنواخت متناظر با کاتالوگ	۰٫۵۳۷	۰٫۷۴	۱٫۱۲	۰٫۷۵۵

بالتر در طراحی لرزه‌یی، سازه‌هایی با اهمیت بالاتر مورد توجه قرار می‌گیرند و با توجه به اینکه در نظر گرفتن توزیع واقع‌گرایانه‌ی عمق می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌یی در نتایج نهایی تحلیل خطر داشته باشد، باید بیش از پیش اثر عدم قطعیت‌های پارامتر عمق رخدادهای را جدی گرفت.

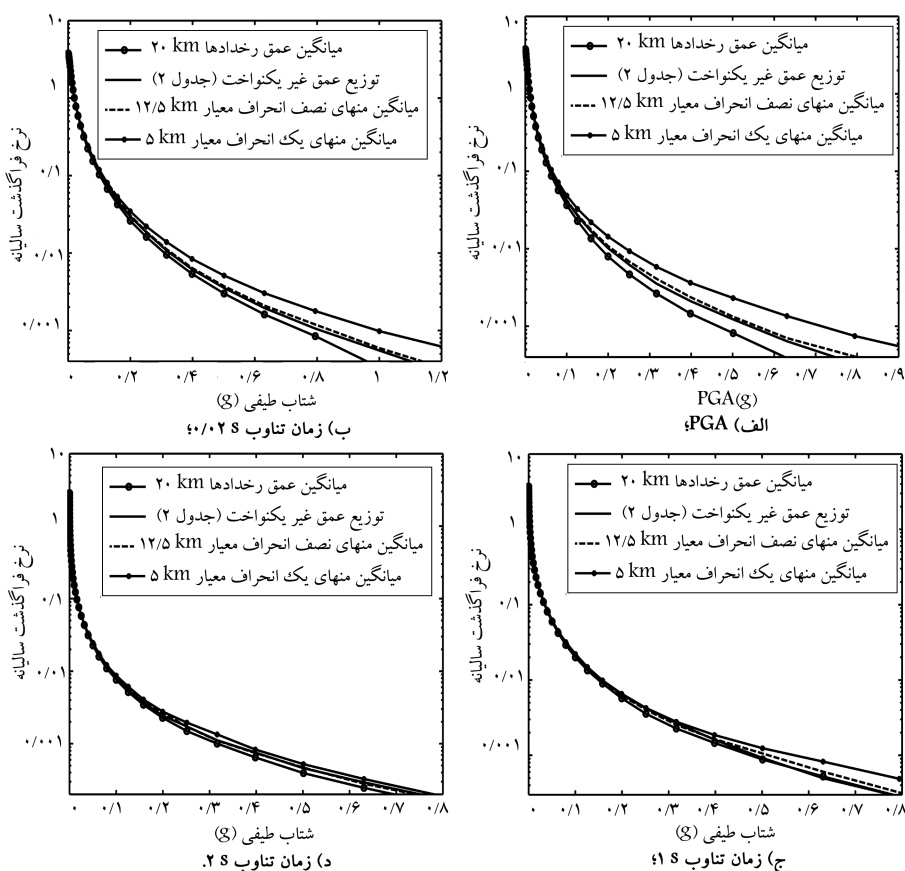
با توجه به تأثیرگذار بودن اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق در نتایج نهایی تحلیل خطر لرزه‌یی، محدودیت‌های روش کلاسیک در لحاظ اثر عدم قطعیت‌های این پارامتر و همچنین مرسوم بودن روش کلاسیک در جامعه‌ی مهندسی، در بخش بعدی به ارائه‌ی راهکار برای لحاظ اثر عدم قطعیت پارامتر عمق در تحلیل خطر کلاسیک پرداخته شده است.

## ۶. لحاظ اثر عدم قطعیت‌های عمق رخدادهای خطر کلاسیک

استفاده از روش کلاسیک در تحلیل خطر لرزه‌یی بیش از هر روش دیگری در جامعه‌ی مهندسی مورد استقبال قرار گرفته و یکی از مزایای این روش نسبت به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، کاهش زمان محاسبات است.<sup>[۷]</sup> از طرفی می‌دانیم که این روش در لحاظ اثر عدم قطعیت‌های مربوط به عمق رخدادهای پارامترهای ورودی با محدودیت روبروست؛ بنابراین برای لحاظ اثر این عدم قطعیت، می‌توان به در نظر گرفتن یک توزیع یکنواخت و لحاظ عددی ثابت، اما نه لزوماً مقدار میانگین، برای عمق رخدادهای به عنوان راهکار پیشنهادی اشاره کرد، به نحوی

شتاب زمین (PGA) به ۰٫۰۵ شتاب گرانش زمین (g) می‌رسد، که به نظر تفاوت قابل تأملی است.

با بررسی جدول ۴ مشاهده می‌شود که در سطوح خطر بالاتر شاهد افزایش تفاوت بین مقادیر شتاب طیفی در زمان‌های تناوب مختلف نسبت به سطوح خطر پایین‌تر هستیم. به گونه‌یی که در زلزله با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله، تفاوت بین PGA حاصل از توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین داده‌های کاتالوگ به اندازه‌ی ۰٫۰۵ شتاب گرانش زمین کمتر از مقدار برآورد شده با فرض توزیع واقع‌گرایانه بوده است؛ در حالی که این مقدار در زلزله با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله به ۰٫۱۲۸ شتاب گرانش زمین افزایش یافته است. با آگاهی از اینکه زلزله‌های با دوره‌ی بازگشت



شکل ۸. منحنی‌های خطر.

خطر لرزه‌یی استفاده شود، تا نتایج برابری با فرض توزیع واقع‌گرایانه به دست آید.

## ۷. نتیجه‌گیری

در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌یی به روش کلاسیک به دلیل محدودیت‌های موجود در فرایند انتگرال‌گیری از عدم قطعیت‌های پارامتر عمق رخدادها چشم‌پوشی می‌شود و با فرض مقدار میانگین عمق رخدادهای گذشته برای این پارامتر، برآورد مقادیر شتاب طیفی یک ساخت‌گاه صورت می‌گیرد. در این نوشتار، به منظور ارزیابی اثر لحاظ عدم قطعیت‌های پارامتر عمق، مطالعه‌ی موردی تحلیل خطر شهرستان ازنا به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با اعمال فرض توزیع واقع‌گرایانه‌ی عمق بر مبنای مطالعه‌ی داده‌های کاتالوگ صورت پذیرفته است. در واقع منظورکردن توزیع غیریکنواخت برای پارامتر عمق رخداد و همچنین استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان رویکردی که کمتر در جامعه‌ی مهندسی مورد توجه قرار گرفته است، می‌تواند از جنبه‌های نوآورانه‌ی این پژوهش تلقی شوند.

در این نوشتار روند کار به این صورت بوده است که ابتدا نتایج روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو که قابلیت در نظر گرفتن توزیع غیریکنواخت برای عمق رخدادها را دارند، در مقابل روش کلاسیک با فرض توزیع یکنواخت عمق برابر با میانگین داده‌های کاتالوگ به اثبات رسیده است. سپس با اعمال فرض توزیع غیریکنواخت عمق، فرایند تحلیل خطر تکمیل شده است. با در نظر گرفتن توزیع واقع‌گرایانه برای عمق رخدادها، تغییر قابل ملاحظه‌یی در نتایج نهایی تحلیل خطر مشاهده شده است. در پایان با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای عمق رخدادها سعی شده است تا یک مقدار ثابت برای این پارامتر مشخص شود، به نحوی که در نظر گرفتن این مقدار نتایجی را ارائه دهد که توزیع واقع‌گرایانه‌ی عمق حاصل شود. لذا مقدار ۱۲/۵ کیلومتر، همان مقدار مطلوب است که برابر با میانگین داده‌های کاتالوگ (عمق ۲۰ کیلومتر) منهای ۰/۵ انحراف معیار (۷/۵ کیلومتر) است.

بنابراین پیشنهاد می‌شود که به منظور لحاظ اثر عدم قطعیت‌های مربوط به عمق رخدادها در روش کلاسیک تحلیل خطر، می‌توان از فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین عمق رخدادها منهای ۰/۵ انحراف معیار استفاده کرد.

که فرض این مقدار ثابت برای عمق رخدادها، نتایج برابری با فرض توزیع واقع‌گرایانه‌ی عمق داشته باشد. بنابراین جست‌وجو جهت یافتن یک مقدار ثابت جهت فرض توزیعی یکنواخت با ویژگی ذکر شده برای عمق رخدادها صورت پذیرفته است.

فرایند تحلیل خطر لرزه‌یی برای ۴ توزیع مختلف عمق شامل: توزیع غیریکنواخت متناظر با داده‌های کاتالوگ، توزیع یکنواخت برابر با میانگین عمق داده‌های کاتالوگ (۲۰ کیلومتر)، توزیع یکنواخت برابر با میانگین عمق داده‌های کاتالوگ منهای ۱ انحراف معیار (۵ کیلومتر)، و همچنین توزیع یکنواخت برابر با میانگین عمق داده‌های کاتالوگ منهای ۰/۵ انحراف معیار (۱۲/۵ کیلومتر) صورت پذیرفته است. در شکل ۸، منحنی‌های خطر به ازاء ۴ توزیع عمقی، که بیشتر به آن اشاره شده است، در زمان‌های تناوب مختلف ارائه شده است؛ که مطابق آن، فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین عمق رخدادها همواره مقادیر شتاب طیفی کمتری را نسبت به ۳ توزیع دیگر عمق برآورد می‌کند و فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین عمق رخدادها منهای ۱ انحراف معیار به برآورد مقادیر شتاب طیفی بسیار محافظه‌کارانه‌تری نسبت به ۳ توزیع دیگر عمق می‌انجامد. تفاوت بین مقادیر شتاب طیفی محاسبه‌شده در توزیع‌های مختلف عمق، با کاهش زمان تناوب افزایش می‌یابد؛ همچنین در سطوح خطر بالاتر، تفاوت رشد فزاینده‌یی مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که با فرض توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین عمق رخدادها منهای ۰/۵ انحراف معیار، بیشترین مطابقت ممکن با منحنی‌های خطر در صورت فرض اعمال توزیع واقع‌گرایانه یا غیریکنواخت عمق حاصل شده است.

براساس توصیه‌ی کارشناسان در صورت نداشتن اطلاعات کافی می‌توان از عمق ۱۲ کیلومتری به‌عنوان توزیع یکنواخت عمق در فرایند تحلیل خطر لرزه‌یی استفاده کرد.<sup>[۴]</sup> مقدار پیشنهادی توسط کارشناسان به مقدار عمق ۱۲/۵ کیلومتری (میانگین عمق داده‌های کاتالوگ منهای ۰/۵ انحراف معیار) بسیار نزدیک است. با توجه به اینکه همواره مقدار میانگین داده‌های کاتالوگ‌های مختلف منهای ۱ انحراف معیار به مقدار ۱۲ کیلومتری نزدیک نخواهد بود، پیشنهاد می‌شود که از توزیع عمق یکنواخت برابر با میانگین داده‌های کاتالوگ منهای ۰/۵ انحراف معیار به جای مقدار میانگین داده‌های کاتالوگ در تحلیل

## پانویس‌ها

1. Rosenhauer
2. Shapira
3. Johnson
4. Koyanagi
5. Ahorner
6. Musson
7. Emme
8. Scordilis
9. maximum likelihood estimation
10. teleseismic waveform inversion methods

## منابع (References)

1. McGuire, R.K., *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, MNO-10, pp. 34-43 (2004).
2. Green, R.A. and Hall, W.J., *An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis*, Report on a Research Project by the Department of Civil Engineering, Structural Research Series No.592, University of Illinois, Urbana, Illinois, pp. 35-40 (1994).
3. Atkinson, G.M. "Integrating advances in ground-motion and seismic-hazard analysis", *In: Proceedings of the 15th*

- World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, Lisboa*, pp. 1-3 (2012).
4. Guideline for Seismic Hazard Analysis, Islamic Republic of Iran, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision in Press (in Persian).
  5. <http://fa.wikipedia.org>.
  6. Musson, R.M.W. and Sarageant, S.L., *Eurocode 8 Seismic Hazard Zoning Maps for the U.K.*, British Geological Survey, Seismology and Geomagnetism Program Technical, Report CR/07/125N, p. 28 (2007).
  7. Musson, R.M.W. "The use of Monte Carlo simulation for seismic hazard assessment in the U.K.", *Annali de Geofisica*, **43**(1), pp. 1-9 (2000).
  8. Assatourians, K. and Atkinson, G.M. "EqHaz- an open-source probabilistic seismic hazard code based on Monte Carlo simulation approach", Seism. Res. L. Submitted (see also <http://www.seismotoolbox.ca>), pp. 1-8 (2012).
  9. International Seismological Center (ISC), (available at <http://www.isc.ac.uk>).
  10. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), (available at <http://www.iiees.ac.ir>).
  11. *Earthquake Model of the Middle East Region Project (Emme)*, Annual Report (2011).
  12. Scordilis, E.M. "Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude", *J. Seismol*, **10**(2), pp. 225-236 (2006).
  13. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Ghofrani, H. "ML and MW scale in the Iranian Pelateau base on the strong motion records", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**(2), pp. 661-669 (2007).
  14. Tavakoli, B. and Ghafory-Ashtiany, M. "Seismic hazard assessment of Iran", *Annali de Geofisica*, **42**(6), pp. 1013-1020 (1999).
  15. Maggii, A., Priestley, K. and Jackson, J.A. "Focal depths of moderate and large size earthquakes in Iran", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **4**(2-3), pp. 1-10 (2002).
  16. Douglas, J. "Earthquake ground motion estimation using strong ground motion records: A review of equation for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates", *Earth-Seince Reviews*, **61**(1-2), pp. 43-104 (2003).
  17. Mousavi, M., Ansari, A., Zafarani, H. and Azarbakht, A. "Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analysis in the Zagros region, Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **16**(8), pp. 1184-1207 (2012).
  18. Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima Y. and Koketsu, K. "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *J. Seism.*, **13**(4), pp. 499-515 (2009).
  19. Assatourians, K. and Atkinson, G.M. "EqHaz: An open-source probabilistic seismic hazard code based on the Monte Carlo simulation approach", For Submission to Seism. Res. Letters, pp.1-20 (July 2012).