مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۱، جلد پنجم، شماره ۱ و۲، صفحه ۵۹ تا ۶۸

بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی مناطق مختلف ایران با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

عبدالهادی قزوینیان [۱]، حمیدرضا نجاتی [۲*]، وهاب سرفرازی [۳]، محمد حیاتی [٤]

دریافت مقاله:۸۹/۱۲/۱٤ پذیرش مقاله: ۹۱/٦/۱

چکیده

روابط تجربی رخداد زلزله، مانند رابطه‌ی خطی گوتنبرگ – ریشتر، با رویکرد کاملا قطعی ارائه شده‌اند و با وجود عدم قطعیت‌ها و احتمالات مختلف در رخداد زلزله، از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند. عدم قطعیت موجود در تعیین تعداد زلزله‌های با بزرگی مشخص ایجاب می‌کند تا برای تعیین تعداد رخداد زلزله از رویکرد احتمالاتی استفاده شود. در این مطالعه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و همچنین با فرض توزیع نرمال برای تابع توزیع احتمال بزرگی زلزله، پتانسیل لرزه‌خیزی در مناطق مختلف ایران به صورت احتمالی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌های احتمالاتی انجام شده برای مناطق مختلف ایران، تعداد رخداد زلزله با توزیع بزرگی نرمال و درصد احتمال مختلف را مشخص می‌کند. بر این اساس چنانچه ایران به بیست منطقه‌ی لرزه‌خیز تقسیم شود منطقه‌ی ۱۲ (واقع در جنوب‌غربی ایران) لرزه‌خیزترین منطقه و منطقهٔ ۱٦ (واقع در شمال غربی ایران) کمترین تعداد رخداد زلزله را در بازهٔ زمانی معین دارد.

کلید واژه‌ها: *ارزیابی خطر زلزله، تحلیل احتمالاتی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، لرزه‌خیزی ایران*

۱. دانشیار مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، nejatihmd@gmail.com
۳. استادیار مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی همدان
٤. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تحلیل خطر زلزله نقش مهمی در شناسایی پتانسیل لرزه‌خیزی و کاهش آثار مخرب زلزله دارد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های مختلف برای تحلیل خطر زلزله در مناطق مختلف توسعه یافته است (Fischer et al., 2002; Weatherill and Burton, 2010). هدف از تحلیل خطر زلزله، ارائه‌ی تصویری هر چه روشن‌تر از خصوصیات لرزه‌ای و پتانسیل زلزله‌خیزی منطقه مورد نظر به منظور مصرف مناسب هزینه‌های اجرایی طرح‌های عمرانی و صنعتی می‌باشد. برآورد خطر زلزله در نقاط زلزله‌خیز به ویژه برای تأسیسات مهم، دارای اهمیت زیادی است، زیرا طرح‌های نامناسب و غیر واقع‌بینانه می‌تواند موجب خسارات و ضایعات فراوان جانی و مالی شود؛ از طرف دیگر طراحی‌های بسیار محتاطانه با ضرایب اطمینان بیش از حد نیز موجب تحمیل هزینه‌های غیر ضروری و اتلاف مصالح خواهد بود. بنابراین ضرایب ایمنی سازه‌های مختلف باید با درنظر گرفتن عمر مفید سازه و اهمیت آن در رابطه با محیط زیست و تعداد افرادی که به نحوی با آن در ارتباط هستند و همچنین احتمال وقوع زمین لرزه در محل تعیین گردد(برگی، ۱۳۷۹). به طور کلی دو روش تحلیل خطر زلزله وجود دارد که عبارتند از: روش تحلیل خطر قطعی (Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA) و روش تحلیل خطر احتمالی (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) (Reiter, 1990). رویکرد تحلیل خطر قطعی، چندان قابل اطمینان نمی‌باشد زیرا این رویکرد، اطلاعاتی در مورد احتمال وقوع زلزله، مرجع، موقعیت وقوع آن، میزان لرزش مورد انتظار در بازه‌ی زمانی مشخص ارائه نمی‌دهد. از طرف دیگر نتایج حاصل از این رویکرد محافظه کارانه بوده و کاربرد این روش جزء برای سازه‌هایی نظیر نیروگاه‌های اتمی و سدهای بزرگ توصیه نمی‌شود(Kramer, 1996). بر این اساس رویکرد احتمالاتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای تحلیل خطر زلزله باشد.

در خلال ۲۰ تا ۳۰ سال گذشته استفاده از مفاهیم احتمالات، باعث شده است که عدم قطعیت در اندازه، موقعیت و سرعت تکرار زلزله و همچنین تغییرات مشخصات زمین با بزرگی و موقعیت زلزله به طور صریح در ارزیابی خطر زلزله مورد توجه قرار گیرد. تحلیل احتمالی خطر زلزله چارچوبی ارائه می‌دهد که در آن عدم قطعیت‌ها می‌تواند شناسایی شده و به صورت کمی درآید تا تصویر کامل‌تری از خطر زلزله ترسیم گردد (Day, 2002). با این همه هنوز هم در روش تحلیل خطر احتمالاتی عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که لازم است این عدم قطعیت‌ها با استفاده از روش‌های موجود در تئوری احتمالات رفع شود.

در روش تحلیل خطر احتمالی، براساس آمار زلزله‌های قبلی و با استفاده از یک مدل ریاضی، احتمال وقوع زلزله با بزرگی مشخص در آینده تعیین می‌شود. بنابراین مهم‌ترین عامل در روش فوق داشتن آمار معتبر پیرامون زلزله‌های قبلی منطقه‌ی مورد بررسی می‌باشد(Akinci et al., 2010).

پس از جمع‌آوری آمار زلزله‌های به وقوع پیوسته در منطقه، بزرگی زلزله‌ها به مقیاسی یکسان تبدیل می‌شود. سپس بر اساس رابطه‌ی گوتنبرگ- ریشتر (رابطه ۱) تعداد وقوع زلزله با بزرگی مشخص در منطقه‌ی مورد نظر تعیین می‌شود (Gutenberg and Richter, 1944)

$$\log(N) = A - bM \qquad (۱)$$

در رابطهٔ ۱، N تعداد زلزله با بزرگی مساوی یا بیشتر از M در مدت زمان مورد نظر است. همچنین A و b ثابت‌های زلزله هستند که برای هر منطقه متغیر است. رابطه ۱ به عنوان قانون تکرار گوتنبرگ – ریشتر مطرح می‌باشد.

بنابراین رابطه ۱ در تعیین احتمال وقوع زلزله با بزرگی مشخص بسیار حائز اهمیت است(شکری قصبه و همکاران، ۱۳۸۶). از طرف دیگر این رابطه برای مناطق مختلف دارای ضرایب متفاوت می‌باشد. همچنین فرضیات دیگری برای رابطه‌ی میان بزرگی زلزله و لگاریتم تعداد رخداد آن وجود دارد که یکی از آنها برقراری رابطه‌ی درجه دوم (رابطه ۲) بین بزرگی زلزله و تکرار آن در دوره زمانی معین است(شکری قصبه و همکاران، ۱۳۸۶).

$$\log(N) = A + bM + cM^2 \qquad (۲)$$

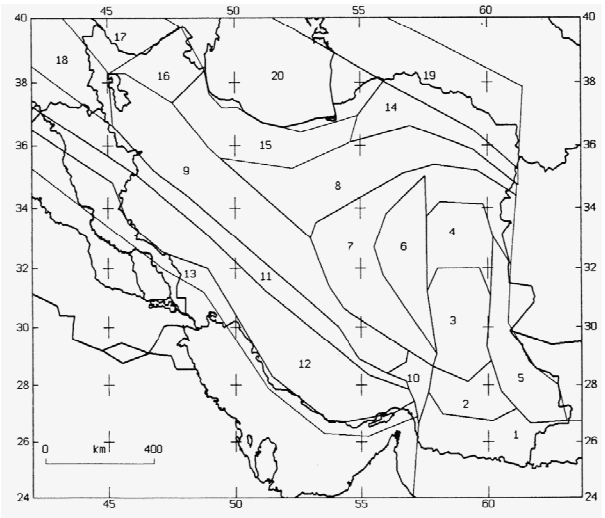
به طور معمول این رابطه ضریب همبستگی بهتری را در مقایسه با مدل خطی آن (رابطه۱) نشان می‌دهد، اما با این همه، روابط ۱ و ۲ به صورت قطعی عددی را به عنوان تعداد رخداد زلزله‌های با بزرگی برابر یا بزرگ‌تر از M ارائه می‌دهد که به علت عدم قطعیت‌های فراوان در وقوع زلزله، تعیین قطعی تعداد رخداد زلزله‌های با بزرگی مشخص چندان دقیق نیست. بنابراین اگر چه در ظاهر از رویکرد احتمالاتی برای تحلیل خطر زلزله در ساختگاه مورد نظر استفاده می‌شود ولی برای تعیین یکی از مهم‌ترین پارامترها، یعنی تعداد رخداد زلزله‌هایی با بزرگی مشخص در یک دوره زمانی معین، از رابطه‌ای قطعی استفاده می‌شود (روابط۱ یا ۲). در این مطالعه تلاش می‌شود تا تعداد رخداد زلزله در مناطق بیست‌گانه‌ی ایران بر اساس تحلیل احتمالاتی و با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعیین شده تا برآورد خطر زلزله برای هر یک از این مناطق دقیق‌تر صورت گیرد. به عبارت دیگر مسئله‌ی عدم قطعیت موجود در تعیین تعداد زلزله‌هایی با بزرگی مشخص، در مناطق مختلف کشور حل شده و روند تحلیل خطر قبلی اصلاح شده است.

۲. لرزه‌خیزی در فلات ایران

استقرار فلات ایران بر روی کمربند زلزله خیز آلپ – هیمالیا باعث ایجاد تعداد زیادی گسل جوان و فعال شده است. در برآورد خطر زلزله لازم است استان‌های لرزه‌خیز زمین‌ساختی که در نزدیکی ساختگاه سازه قرار دارند، مطالعه شوند. با ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات زمین‌شناختی، زمین‌ساختی و داده‌های لرزه‌ای بر روی یک نقشه می‌توان نقاطی را تعیین نمود که از نظر توان لرزه‌زایی مستقل و با مناطق مجاور خود اختلاف داشته باشند. به این مناطق، ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی[1] یا به طور خلاصه ایالت‌های لرزه‌خیز گفته می‌شود. بر این اساس فلات ایران به پنج ایالت اصلی لرزه‌خیز تقسیم می‌شود (Mirzaei et al., 1998) که عبارتند از: البرز – آذربایجان، کمربند چین خوردهٔ زاگرس، ایران مرکزی، مکران و کپه‌داغ.

در تقسیم‌بندی دیگر ایران به ۲۳ منطقه لرزه‌خیز تقسیم می‌شود(Nowroozi, 1976). جدیدترین تقسیم‌بندی ایران از لحاظ لرزه‌خیزی مربوط به سال ۱۹۹۶ می باشد که در آن ایران به ۲۰ منطقهٔ تقسیم شده است (Tavakoli and Ashtiany, 2002). در شکل ۱ تقسیم‌بندی مناطق ۲۰ گانه لرزه‌خیزی ایران نشان داده شده است.

این تقسیم‌بندی را می‌توان برتر از تقسیم‌بندی سایر محققان دانست زیرا در این تقسیم‌بندی علاوه بر توجه به ساختار تکتونیکی هر منطقه، وجود یک یا چند گسل فعال در این مناطق بیست‌گانه مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱. تقسیم‌بندی لرزه‌خیزی ایران (Tavakoli and Ashtiany, 2002).

۳. قوانین تکرار وقوع زلزله

در روش احتمالاتی فرض بر این است که قانون تکراری که از مطالعات لرزه‌خیزی گذشته به دست می‌آید برای تخمین لرزه‌خیزی آینده معتبر و مناسب می‌باشد. یکی از معروف‌ترین قوانین تکراری که برای تعیین تعداد وقوع زلزله استفاده می‌شود قانون گوتنبرگ – ریشتر (رابطهٔ ۱) است. این رابطه به منطقه‌ی خاصی اختصاص ندارد بلکه رابطه‌ای عمومی است و پارامترهای A و b به کمک مطالعات آماری تعیین می‌شوند و در تخمین میزان ریسک لرزه‌ای در یک ناحیه معین به کار می‌روند. واضح است که تعیین دقیق پارامترهای A و b مستلزم

1.Seismotectonic Provinces

جمع‌آوری داده‌های بسیار زیادی است و حتی با جمع‌آوری تعداد زیادی داده لرزه‌ای باز هم عدم قطعیت موجود در وقوع زلزله باعث می‌شود که اظهار نظر قطعی در مورد تعداد زلزله‌های احتمالی از دقت بالایی برخوردار نباشد.

کالیا و ناریان (Kaila and Narian, 1971) با استفاده از آمار زلزله‌های مناطق مختلف جهان، ضرایب A و b را برای این مناطق به دست آورده است. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای A و b برای مناطق مختلف جهان نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای A و b برای مناطق مختلف جهان (Kaila and Narian, 1971).

منطقه	مختصات محدوده		A	b
ژاپن	132N 26N	150N 40E	6.86	1.22
شرق کانادا	142E 47N	115W 65N	5.05	1.09
شرق امریکا	135W 25N	105W 47N	5.94	1.14
غرب امریکا	105W 25N	51W 47N	5.79	1.38
آمریکای مرکزی	120W 10N	85W 25N	7.36	1.45
کلمبیا – پرو	85W 18S	60W 6N	5.6	1.11
ایران – ترکیه	48E 35N	35W 42N	6.02	1.18

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده، مقادیر A و b برای مناطق مختلف، متفاوت است. تغییر پارامتر b کمتر از تغییر پارامتر A می‌باشد. در بسیاری از مطالعات لرزه‌خیزی معمولاً مقدار b را یک در نظر می‌گیرند (Abercrombie, 1996). هر چه مناطق مورد بررسی از نظر خصوصیات لرزه‌خیزی همگن‌تر باشد دقت این ضرایب بیشتر خواهد بود. همچنین ممکن است پراکندگی بزرگی زلزله‌های مورد بررسی در یک منطقه با روابط درجه دو (رابطه‌ی۲) همبستگی بیشتری داشته باشد.

در جدول۲ معادلات درجه ۲ برای تعیین تعداد رخداد زلزله‌ای با بزرگی برابر یا بزرگ‌تر از M برای مناطق ۲۰ گانه‌ی ایران ارائه شده است. برای این منظور زلزله‌هایی که بین سال‌های ۱۹۰٤ تا ۲۰۰۳ (یک دوره‌ی صد ساله) اتفاق افتاده‌اند جمع‌آوری شده و رابطه‌ی بین تعداد وقوع و بزرگی هر یک در مناطق بیست‌گانه‌ی کشور(شکل۱) مشخص شده است. همان‌طور که در جدول۲ نشان داده شده است ضریب همبستگی بین تعداد رخداد و بزرگی زلزله درمناطق مختلف بسیار بالا می‌باشد.

٤. تحلیل احتمالاتی تعداد وقوع زلزله

همان‌طور که اشاره شد، تعداد رخداد زلزله برای مناطق بیست‌گانه‌ی ایران با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۲ به صورت قطعی تعیین است. از آنجایی که وقوع زلزله و بزرگی آن کاملاً تصادفی می‌باشد و همواره در تعیین بزرگی زلزله در ساختگاه پروژه‌های مهندسی عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارد، تعیین قطعی تعداد رخداد زلزله با استفاده از روابط جدول ۲ چندان دقیق نمی‌باشد. برای تعیین احتمالاتی تعداد وقوع زلزله در مناطق مختلف کشور لازم است تا توزیع بزرگی زلزله‌هایی که در هر یک از این مناطق اتفاق می‌افتد تعیین شود. برای این منظور با فرض توزیع نرمال برای بزرگی زلزله در مناطق بیست‌گانه‌ی ایران تحلیل احتمالاتی وقوع زلزله با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte Carlo Simulation) انجام می شود. در شکل ۲ تابع توزیع احتمالاتی نرمال و تابع توزیع تجمعی بزرگی زلزله نشان داده شده است.

برای تعیین توزیع احتمالاتی بزرگی زلزله در بازه‌ی زمانی مشخص (مثلاً ۱۰۰ ساله) فرض می‌شود که حداقل بزرگی زلزله ۲ و حداکثر آن ۸ در مقیاس ریشتر باشد. همچنین مقدار میانگین و انحراف معیار این توزیع به ترتیب ۵/۵ و ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. از شکل ۲ کاملاً مشهود است که ۹۰ درصد زلزله‌های در نظرگرفته شده در توزیع احتمالاتی در بازه‌ی ٤/٦ تا ٦/۳ در مقیاس ریشتر هستند.

بر اساس توزیع احتمالی فرض شده برای بزرگی زلزله، (شکل ۲) تنها ۵ درصد زلزله‌هایی که در یک دوره‌ی صد ساله در منطقه‌ی مورد مطالعه اتفاق می‌افتد بزرگی کمتر از ٤/٦ ریشتر دارند. اگر چه این مقدار (۵ درصد) کمتر از واقعیت است ولی چنانچه تحلیل خطر زلزله برای ساختگاه سازه‌های مهندسی

انجام شود تعیین تعداد رخداد زلزله‌های با بزرگی کمتر از ٤/٦ ریشتر اهمیت زیادی ندارد. به همین دلیل توزیع احتمال بزرگی زلزله به صورت نرمال و با مقادیر حداقل ۲ ریشتر، حداکثر ۸ ریشتر و میانگین ۵/۵ ریشتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. قوانین تکرار رخداد زلزله برای مناطق بیست‌گانه‌ی ایران (شکری قصبه و همکاران، ۱۳۸٦)

مناطق	معادله‌ی حاصل از رگرسیون درجه دوم	ضریب همبستگی
۱	$\log(N) = 4.758 - 0.723M + 0.002M^2$	۰/۹۶۹
۲	$\log(N) = 6.239 - 1.579M + 0.095M^2$	۰/۹۷۲
۳	$\log(N) = 5.467 - 1.265M + 0.069M^2$	۰/۹۷۸
۴	$\log(N) = 4.832 - 0.934M + 0.046M^2$	۰/۹۹۰
۵	$\log(N) = -2.008 + 1.822M - 0.233M^2$	۰/۹۷۲
۶	$\log(N) = 1.542 + 0.487M - 0.101M^2$	۰/۹۹۴
۷	$\log(N) = 1.994 + 0.261M - 0.079M^2$	۰/۹۸۴
۸	$\log(N) = -0.435 + 1.091M - 0.15M^2$	۰/۹۷۳
۹	$\log(N) = 0.037 + 0.99M - 0.15M^2$	۰/۹۷۰
۱۰	$\log(N) = 4.003 - 0.317M - 0.049M^2$	۰/۹۸۴
۱۱	$\log(N) = 4.117 - 0.366M + 0.035M^2$	۰/۹۷۳
۱۲	$\log(N) = 1.718 + 1.008M + 0.18M^2$	۰/۹۹۵
۱۳	$\log(N) = 5.474 - 1.06M + 0.043M^2$	۰/۹۹۵
۱۴	$\log(N) = 0.321 + 1.093M - 0.182M^2$	۰/۹۷۸
۱۵	$\log(N) = 4.681 - 0.688M + 0.008M^2$	۰/۹۸۷
۱۶	$\log(N) = 3.548 - 0.644M + 0.016M^2$	۰/۹۷۷
۱۷	$\log(N) = 0.521 + 0.834M - 0.148M^2$	۰/۹۱۸
۱۸	$\log(N) = 3.268 - 0.214M - 0.034M^2$	۰/۹۶۵
۱۹	$\log(N) = 2.82 + 0.002M - 0.05M^2$	۰/۹۸۳
۲۰	$\log(N) = -1.103 + 1.695M - 0.249M^2$	۰/۹۹۸
کل مناطق ایران	$\log(N) = 4.016 + 0.132M - 0.078M^2$	۰/۹۹۷

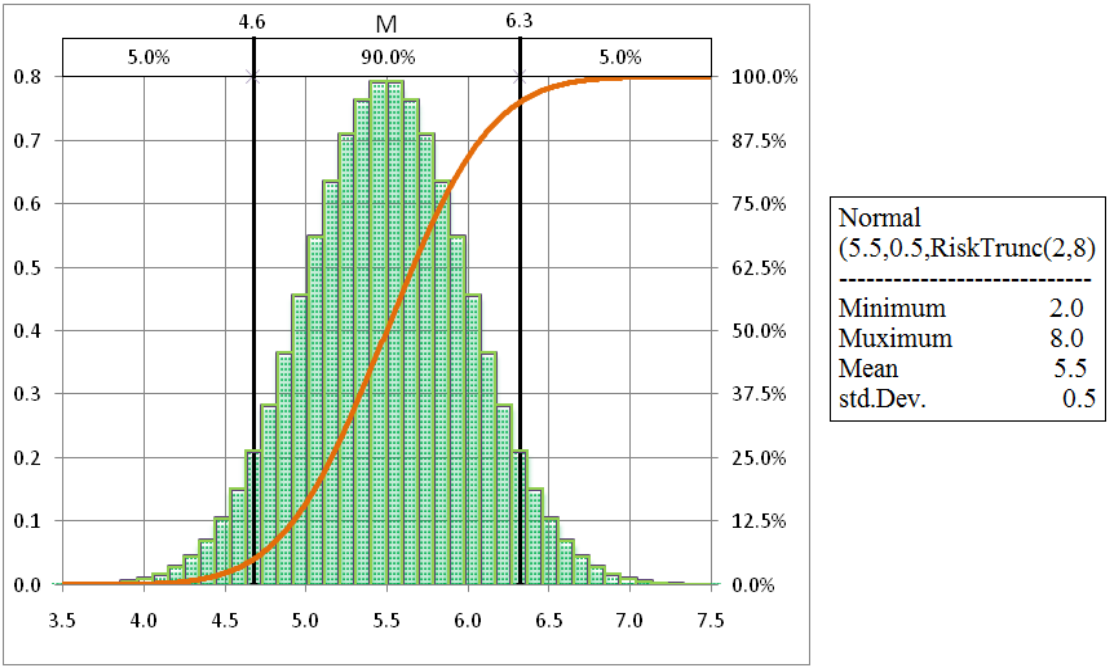
پس از تعیین توزیع احتمالاتی بزرگی زلزله، تعداد رخداد زلزله به صورت احتمالاتی و با بهره‌گیری از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو برای مناطق بیست‌گانه‌ی ایران تعیین می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار @risk جهت انجام شبیه‌سازی استفاده می‌شود. مدل احتمالاتی به کار گرفته شده دارای یک ورودی (تابع توزیع احتمال بزرگی زلزله) و یک خروجی (توزیع احتمال تعداد رخداد زلزله) می‌باشد. با تعیین ورودی مدل، خروجی مدل بر اساس روابط جدول ۲ برای هر کدام از مناطق به صورت توزیع احتمال مشخص می‌شود. بدین ترتیب تعداد رخداد زلزله در بازه‌ی زمانی مشخص برای مناطق مختلف ایران به صورت احتمالاتی تعیین می‌شود. به عبارت دیگر احتمال اینکه در هر منطقه چه تعداد رخداد زلزله وجود داشته باشد تعیین می‌شود. در جدول ۳ تعداد رخداد زلزله با توزیع بزرگی نرمال در بازه‌ی زمانی مشخص برای مناطق

مختلف ایران نشان داده شده است. به عبارت دیگر در جدول مذکور تعداد رخداد زلزله در مناطق بیست‌گانه‌ی ایران با درصد احتمالی متفاوت نشان داده شده است. واضح است که تعداد رخداد زلزله عددی صحیح می‌باشد ولی در جدول ۳ که نتیجه‌ی تحلیل‌های احتمالاتی و در واقع خروجی نرم‌افزار می‌باشد این اعداد با یک رقم اعشار بیان شده‌اند. لذا برای استفاده در تحلیل خطر زلزله باید از قسمت صحیح اعداد استفاده نمود.

جدول۳. تعداد رخداد زلزله در بازه‌ی زمانی مشخص برای مناطق مختلف ایران

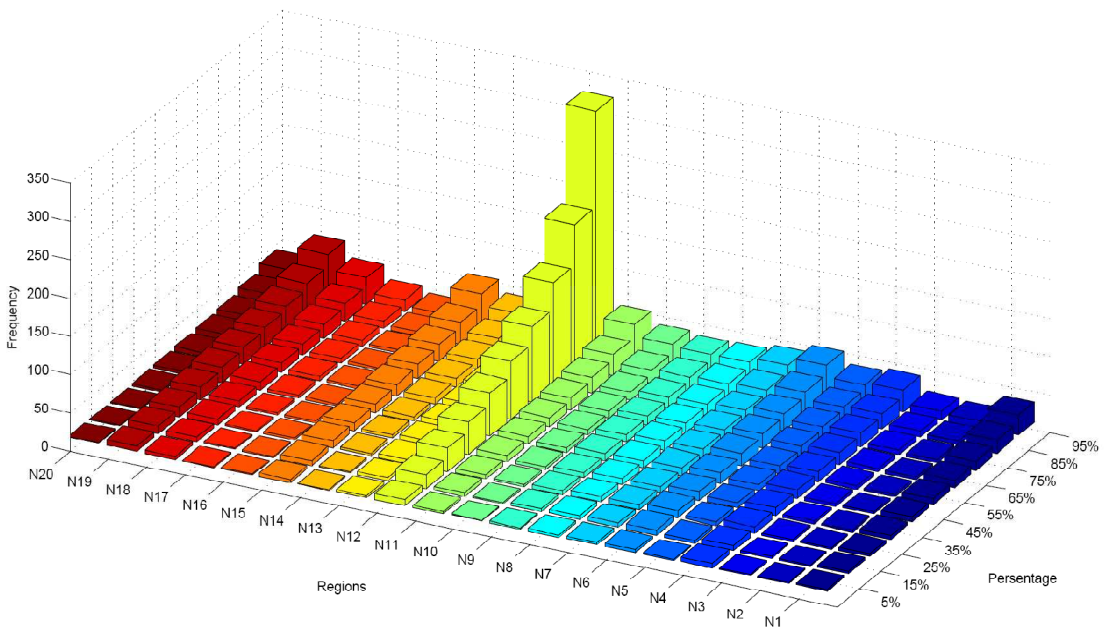
Percentile	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	N Total
%5	1.8	1.1	1.7	5.8	1.6	3.8	3.1	2.9	2.0	1.1	2.5	7.9	3.1	0.9	4.5	1.3	0.8	3.6	6.8	0.5	54.0
%10	2.5	1.3	2.0	6.8	2.5	5.3	4.1	4.1	2.9	1.6	3.5	13.2	3.9	1.5	5.7	1.6	1.2	4.7	8.8	0.8	76.8
%15	3.0	1.5	2.3	7.5	3.3	6.5	5.1	5.0	3.6	2.1	4.4	18.4	4.5	2.0	6.8	1.8	1.5	5.6	10.5	1.2	96.7
%20	3.5	1.7	2.5	8.2	4.1	7.7	5.9	5.8	4.4	2.6	5.3	23.8	5.1	2.6	7.7	2.0	1.9	6.4	12.0	1.6	115.7
%25	4.0	1.8	2.7	8.9	4.9	8.8	6.7	6.6	5.1	3.0	6.1	29.4	5.6	3.2	8.7	2.2	2.2	7.2	13.4	2.0	134.5
%30	4.6	2.0	2.9	9.5	5.7	9.9	7.5	7.4	5.8	3.5	7.0	35.5	6.2	3.8	9.6	2.3	2.6	8.1	14.8	2.5	153.7
%35	5.1	2.1	3.2	10.1	6.5	11.0	8.3	8.2	6.5	4.1	7.9	42.0	6.8	4.4	10.6	2.5	3.0	8.9	16.3	3.0	173.7
%40	5.7	2.3	3.4	10.8	7.4	12.2	9.2	9.0	7.2	4.7	8.9	49.1	7.4	5.1	11.6	2.7	3.4	9.7	17.7	3.6	194.7
%45	6.3	2.5	3.7	11.5	8.3	13.4	10.0	9.8	8.0	5.3	10.0	56.9	8.1	5.9	12.6	2.9	3.8	10.6	19.2	4.2	217.1
%50	7.0	2.7	4.0	12.2	9.2	14.6	11.0	10.7	8.8	6.0	11.1	65.6	8.8	6.7	13.8	3.1	4.3	11.5	20.8	4.9	241.3
%55	7.7	2.9	4.3	13.0	10.2	16.0	12.0	11.5	9.7	6.8	12.4	75.4	9.6	7.6	15.0	3.3	4.8	12.6	22.5	5.6	267.8
%60	8.5	3.1	4.6	13.8	11.3	17.5	13.0	12.5	10.6	7.7	13.8	86.5	10.5	8.7	16.4	3.5	5.4	13.7	24.4	6.5	297.3
%65	9.5	3.4	5.0	14.8	12.6	19.1	14.3	13.5	11.6	8.7	15.4	99.4	11.5	9.9	18.0	3.8	6.0	14.9	26.4	7.6	330.7
%70	10.6	3.8	5.4	15.9	13.9	21.0	15.6	14.6	12.8	10.0	17.4	114.7	12.6	11.3	19.8	4.1	6.7	16.4	28.8	8.8	369.4
%75	12.0	4.2	6.0	17.2	15.4	23.1	17.2	15.8	14.1	11.5	19.7	133.1	14.0	13.0	22.0	4.5	7.6	18.1	31.4	10.3	415.4
%80	13.7	4.7	6.6	18.8	17.2	25.7	19.1	17.2	15.7	13.5	22.7	156.4	15.8	15.0	24.7	4.9	8.7	20.1	34.7	12.1	472.3
%85	16.1	5.4	7.5	20.9	19.3	28.9	21.6	18.9	17.6	16.1	26.6	187.2	18.2	17.7	28.3	5.5	10.1	22.8	38.8	14.5	546.7
%90	19.6	6.4	8.9	24.0	22.1	33.4	24.9	21.1	20.2	20.2	32.5	232.2	21.8	21.6	33.6	6.3	12.0	26.6	44.6	17.9	654.1
%95	26.3	8.5	11.5	29.5	26.1	40.7	30.6	24.3	24.3	28.1	43.6	312.3	28.6	28.3	43.4	7.7	15.3	33.3	54.4	23.8	844.9

نماد Ni در جدول ۳ نشان دهنده‌ی تعداد رخداد زلزله در ناحیه‌ی i ام (در تقسیم‌بندی شکل ۱) است. جدول ۳ حداکثر تعداد رخداد زلزله را با درصد احتمال متفاوت بیان می‌کند. به عنوان مثال با احتمال ۹۵ درصد تعداد زلزله‌هایی که در یک دوره‌ی ۱۰۰ ساله در منطقهٔ ١٦ رخ می‌دهد کمتر از ۷ زلزله است. و یا به عبارت دیگر ۵ درصد احتمال دارد در دوره‌ی ۱۰۰ ساله در منطقه‌ی ١٦ بیش از ۷ زلزله اتفاق بیفتد. همچنین این نکته لازم به یادآوری است که بزرگی زلزله‌هایی که رخ می‌دهند نیز به صورت احتمالاتی قابل تعیین هستند. به طوری‌که در هر کدام از این مناطق ۵ درصد احتمال دارد که زلزله ای با بزرگی بیش از ٦/٣ در مقیاس ریشتر اتفاق بیفتد.



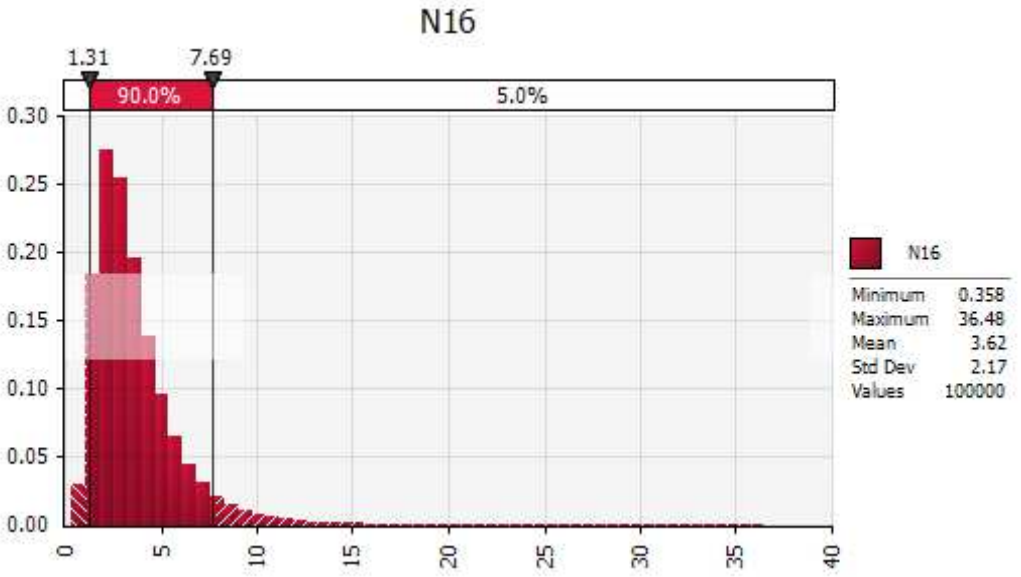
شکل ۲. توزیع احتمال نرمال بزرگی زلزله در بازهٔ زمانی مشخص

برای بیان بهتر مفهوم تعداد رخداد زلزله در مناطق بیست‌گانه ایران بر اساس درصد احتمال مختلف داده‌های جدول ۳، به صورت تصویر هیستوگرام سه بعدی نشان داده شده است (شکل ۳).

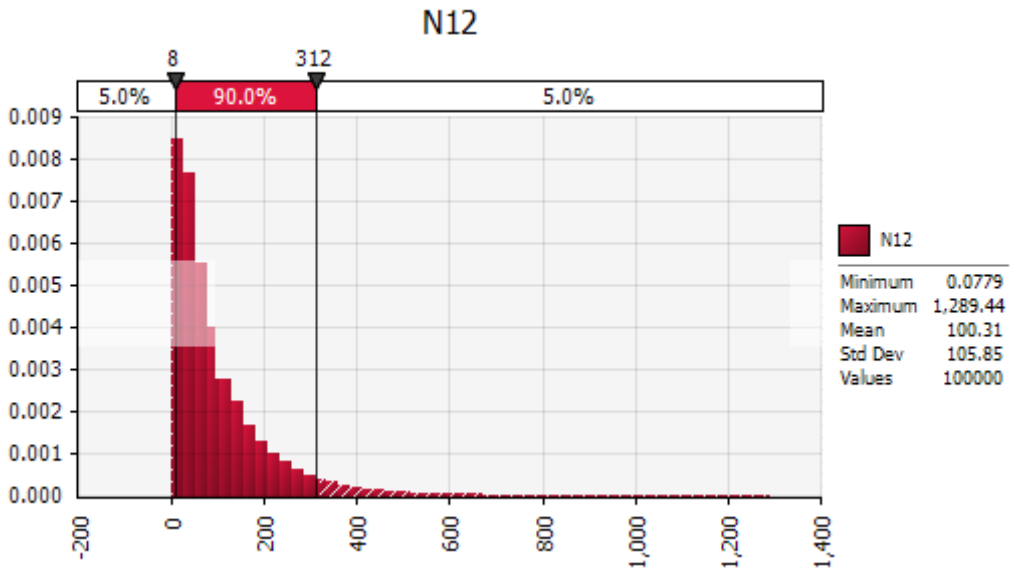


شکل ۳. تعداد رخداد زلزله در بازهٔ زمانی ۱۰۰ ساله برای مناطق بیست‌گانه ایران با درصدهای احتمال متفاوت برای بزرگایی با توزیع احتمال نرمال

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است تعداد زلزله‌هایی که در منطقه‌ی ۱۲ اتفاق می‌افتد به مراتب بیشتر از سایر مناطق می‌باشد و به همین دلیل می‌توان گفت این منطقه بیشترین پتانسیل لرزه‌خیزی را در کشور دارد. همچنین منطقه‌ی ١٦ کمترین پتانسیل لرزه‌خیزی را دارن و بعد از منطقهٔ ١٦ مناطق۲ و۳ به ترتیب کم‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی را دارند. تابع توزیع احتمالاتی رخداد زلزله برای هر منطقه به راحتی قابل تعیین است. در شکل‌های٤ و٥ توابع توزیع رخداد زلزله به ترتیب برای مناطق ١٦ و ١٢ نشان داده شده است.



شکل ٤. تابع توزیع رخداد زلزله برای منطقه‌ی ١٦



شکل ٥. تابع توزیع رخداد زلزله برای منطقه‌ی ١٢

تابع توزیع رخداد زلزله برای مناطق بیست‌گانه کشور را می‌توان در تحلیل لرزه‌خیزی ساختگاه پروژه‌های مهندسی که در این مناطق قرار دارند مورد استفاده قرار داد. به عنوان نمونه در زلزله‌خیزترین منطقه‌ی ایران یعنی منطقه‌ی۱۲، فقط ٥ درصد احتمال دارد که کمتر از ٨ زلزله در این منطقه در یک بازه‌ی ١٠٠ ساله اتفاق بیفتد. در حالی که در منطقه‌ی ١٦ یعنی

امن‌ترین منطقه‌ی ایران از لحاظ لرزه‌خیزی، فقط ۵ درصد احتمال دارد که بیش از ۸ زلزله در یک بازه ۱۰۰ ساله اتفاق بیفتد.

نتایج تحلیل احتمالاتی تعداد رخداد زلزله به منظور ارزیابی خطر زلزله برای منطقه‌ای خاص، بسیار مفید بوده و با استفاده از توزیع تعداد رخداد زلزله در هر منطقه می‌توان تصویری هر چه روشن‌تر از خصوصیات لرزه‌ای و پتانسیل زلزله‌خیزی منطقه مورد نظر به دست آورد.

جهت تحلیل و طراحی سازه‌های حساس معمولاً دو زلزله ملاک محاسبات قرار می‌گیرد. این دو زلزله تحت عنوان بیشینهٔ زلزله‌ی قابل (Maximum Credible Earthquake, MCE) و زلزله‌ی مبنای طرح (Design Base Earthquake, DBE) نام‌گذاری شده‌اند. در روش تحلیل احتمالاتی، زلزله‌ی MCE به صورت حادثه‌ای با احتمال وقوع ۵ تا ۱۰ درصد در طول عمر مفید سازه تعریف می‌شود. زلزله‌ی DBE، زمین لرزه‌ای است که حداقل یکبار در مدت عمر مفید سازه روی می‌دهد و نباید هیچگونه خسارتی به سازه وارد سازد. خطر وقوع چنین زلزله‌ای در تحلیل احتمالاتی بین ۳۷ تا ٦٤ درصد در نظر گرفته می‌شود(Krinitzsky, 2002). در این شرایط و بر اساس تحلیل‌های احتمالاتی انجام شده در مطالعه‌ی حاضر می‌توان برای افزایش دقت تحلیل خطر لرزه‌ای تعداد رخداد زلزله‌ها را با توجه به سطح بارگذاری انتخابی (MCE یا DBE) تعیین نمود. یعنی برای زلزله MCE که احتمال وقوع آن ۵ تا ۱۰ درصد است باید تعداد رخداد زلزله در منطقه را با احتمال ۵ تا ۱۰ درصد محاسبه نمود. همچنین برای زلزله‌ی DBE احتمال ۳۷ تا ٦٤ درصد را باید برای تعیین تعداد رخداد زلزله استفاده نمود. به عنوان نمونه چنانچه از مدل پواسون برای ارزیابی احتمالی وقوع زلزله استفاده شود متغیر تصادفی این مدل یعنی تعداد رخداد زلزله نیز به صورت احتمالی تعیین می‌شود. به عبارت دیگر در این صورت مدل پواسون با قانون تکرار به صورت احتمالی ترکیب می‌شود و بدین ترتیب نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای به صورت دقیق‌تر ارائه می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تعداد رخداد زلزله در مناطق مختلف کشور در یک بازه‌ی زمانی ۱۰۰ ساله به صورت احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس ایران به ۲۰ منطقه‌ی لرزه‌خیزی تقسیم شده و رابطه‌ی تجربی بین بزرگی و تعداد رخداد زلزله برای هر۲۰ منطقه تعیین شده است. از آنجایی که این روابط به صورت قطعی تعداد وقوع زلزله با بزرگی مشخص را در مناطق مختلف تخمین می‌زنند طبیعی است که عدم قطعیت موجود در وقوع زلزله در این روابط در نظر گرفته نشده و لذا این روابط از دقت بالایی برخوردار نخواهند بود.

با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو، تحلیل احتمالاتی رخداد زلزله در مناطق بیست‌گانه ایران انجام شده و بدین ترتیب تعداد رخداد زلزله در بازه‌ی زمانی مشخص برای مناطق مختلف ایران به صورت احتمالاتی تعیین می‌شود. به عبارت دیگر احتمال اینکه در هر منطقه چه تعداد رخداد زلزله وجود داشته باشد تعیین می‌شود.

براساس تحلیل‌های انجام شده مشخص شده است که منطقه‌ی ١٦ کمترین میزان رخداد زلزله با توزیع بزرگی نرمال را دارد در حالی که منطقه‌ی ۱۲ لرزه‌خیزترین منطقهٔ کشور می‌باشد. همچنین حداکثر تعداد رخداد زلزله با درصد احتمال متفاوت تعیین شده است. به عنوان مثال با احتمال ۹۵ درصد تعداد زلزله‌هایی که در یک دوره‌ی ۱۰۰ ساله در منطقه‌ی ١٦ رخ می‌دهد کمتر از ۸ رخداد می‌باشد. به عبارت دیگر ۵ درصد احتمال دارد در یک دوره‌ی ۱۰۰ ساله در منطقه‌ی ١٦ بیش از ۸ زلزله اتفاق بیفتد.

در زلزله‌خیزترین منطقه‌ی ایران یعنی منطقهٔ ۱۲، فقط ۵ درصد احتمال دارد که کمتر از ۸ زلزله با توزیع بزرگی نرمال در یک بازه‌ی ۱۰۰ ساله اتفاق بیفتد. در حالی که در منطقه‌ی ١٦ یعنی امن‌ترین منطقهٔ ایران از لحاظ تعداد رخداد زلزله، فقط ۵ درصد احتمال دارد که بیش از ۸ زلزله در یک بازه‌ی ۱۰۰ ساله اتفاق بیفتد.

منابع

برگی، خ.ف.، ۱۳۷۹. اصول مهندسی زلزله. انتشارات دانشگاه تهران.

شکری قصبه، م.، بخشیانی ع. و مفید م.، ۱۳۸٦. تحلیل ریسک وقوع زلزله در پروژه‌های ساخت برای نقاط مختلف ایران با استفاده از رگرسیون‌های درجه دوم GLS و کمک از تست‌های آماری و مدل آماری پواسن. فصلنامه‌ی علمی پژوهشی شریف، شمارهٔ ٤٠،ص.۱۷-۱۳.

Abercrombie, R.E., 1996. The magnitude-frequency distribution of earthquake records with deep seismometers at Cajon Pass, southern California. Tectonophysics, 261: 1-7.

Akinci, A., Perkins, D, Lombardi, A.M., Basili, R., 2010. Uncertainties in probability of occurrence of strong earthquakes for fault sources in the Central Apennines, Italy. Journal of Seismology, 14:95–117

Day, R.W., 2002. Geotechnical Earthquake Engineering Handbook. McGraw-Hill Companies,

Fischer, T., Alvarez, M., De la Llera, J.C., Riddell, R., 2002. An integrated model for earthquake risk assessment of buildings. Engineering Structures, 24: 979–998.

Gutenberg, B., Richter C.F., 1944. Frequency of earthquake in California. Bullettin of Seismolology Society of America, 72: 1867-1879.

Kaila, K.L., Narian, H, 1971. A new approach for the preparation of quantitative seismicity maps, Bullettin of Seismolology Society of America, 61(5): 1275-91

Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Krinitzsky, E.L., 2002. How to Obtain Earthquake Ground Motions for Engineering Design. Engineering Geology, 65: 1-16.

Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y.T., 1998. Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. Journal of Earthquake Prediction Research, 7: 465-495.

Nowroozi, A., 1976. Seismotectonic Provinces of Iran, Bullettin of Seismolology Society of America, 66, 1249-1276.

Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis - Issues and Insights. Columbia University Press, New York,

Tavakoli, B., Ghafoori Ashtiany, M., 2002. Seismic hazard assessment of Iran. Available in: WWW.IIEES.com

Weatherill, G., Burton, P.W., 2010. An alternative approach to probabilistic seismic hazard analysis in the Aegean region using Monte Carlo simulation. Tectonophysics, 492: 253–278.