

پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها

سید حسن موسوی بفر وئی^۱، نوربخش میرزائی^{۲*}، الهام شعبانی^۳ و مرتضی اسکندری قادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۲/۳، پذیرش نهایی: ۹۳/۱/۱)

چکیده

به‌منظور ارزیابی سطوح جنبش نیرومند روی سنگ بستر برای بیشینه شتاب و مقادیر طیفی در پهنه ایران، برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی اصلاح شده صورت گرفته است. فهرست نامه‌ای (کاتالوگی) یکنواخت، شامل زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی تا انتهای ۲۰۱۲ در ناحیه‌ای محدود به ۲۲ تا ۴۲ درجه عرض شمالی و ۴۲ تا ۶۶ درجه طول شرقی، تهیه شده است. تعداد ۲۳۸ چشمه بالقوه زمین‌لرزه به‌صورت پهنه‌ای تعیین و پارامترهای لرزه‌خیزی هر یک ارزیابی شده است. در برآورد آهنگ رویداد زمین‌لرزه برای بازه‌های بزرگی گوناگون در هر چشمه بالقوه زمین‌لرزه، از تابع توزیع مکانی استفاده شده است. با نرم‌افزار OpenQuake، برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران برای شبکه‌ای شامل بیش از ۴۰۰۰۰ نقطه و سه رابطه تضعیف و دو مدل لرزه‌خیزی با استفاده از درخت منطقی، صورت گرفته است. نقشه‌های خطر زمین‌لرزه برای PGA و SA در دوره‌های تناوب ۰/۲ و ۲ ثانیه روی سنگ بستر با ۵٪ میرایی برای ۱۰٪ و ۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال تهیه شده است. برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، مقدار PGA در مناطق گوناگون کشور از ۰/۶۳g برای شمال شرق استان لرستان تا ۰/۱g برای مناطق مرکزی ایران متغیر است. در بین مراکز استان‌های کشور، بندرعباس و تبریز با ۰/۳۵g بیشترین و یزد و اصفهان با ۰/۱۱g کمترین مقدار PGA روی سنگ بستر را برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال به خود اختصاص داده‌اند. نتایج، با نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۳) و تحقیقات صورت گرفته سایر محققان، مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: برآورد خطر زمین‌لرزه، جنبش نیرومند زمین، لرزه‌خیزی، چشمه بالقوه زمین‌لرزه، شتاب طیفی

Seismic hazard zoning in Iran and estimating peak ground acceleration in provincial capitals

Mousavi Bafrouei, S. H.¹, Mirzaei, N.^{2*}, Shabani, E.³ and Eskandari-Ghadi, M.⁴

¹Ph.D. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

⁴Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 22 Feb 2014, Accepted: 23 Sep 2014)

Summary

Growing environmental and social concerns, both on the part of decision makers and public opinion, have brought a new perspective to the perception of hazard assessments a valid alternative in the long-term, and an effective complement in short and medium terms, to traditional design procedure for a resistant and safe environment. Results of the gradual development of research on the probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) in the past 40 years make a framework that could be used for estimation of probability of

occurrences of earthquakes, at certain return periods on each site. The primary advantage of the PSHA over alternative representations of the earthquake threat is that PSHA integrates over all possible earthquake occurrences and ground motions to calculate a combined probability of exceedance that incorporates the relative frequencies of occurrence of different earthquakes and ground-motion characteristics. Features of the PSHA allow the ground-motion hazard to be expressed at multiple sites consistently in terms of the earthquake sizes, frequencies of occurrence, attenuation, and associated ground motion. Potential seismic sources, seismicity models, ground motion prediction equations (GMPE) and site effects, are the most important factors in seismic hazard studies. In this research, a modified probabilistic seismic hazard assessment, developed by Chinese researchers, is used to estimate the level of the potential seismic ground motion in Iran. A unified catalog of de-clustered earthquakes containing both historical and recent seismicity until late 2012 in the area encompassed by 22-42°N and 42-66°E is used. An area source model which contains 238 potential seismic sources within 5 major seismotectonic provinces in the study region has been delineated. Considering magnitude uncertainty and incompleteness of the earthquake data, the seismicity parameters of the seismotectonic provinces are determined. Spatial distribution function is used to determine occurrence rates of potential seismic sources for different magnitude intervals. Also, the background seismicity has been determined for each province. Seismic hazard assessment of Iran for a grid of over 40,000 points with 10 km interval is carried out using OpenQuake software by three different GMPEs and two models of seismicity for potential seismic sources in a logic tree. The peak ground horizontal acceleration (PGA) and spectral accelerations (SA) for 5% damping ratio at 0.2 and 2 seconds corresponding to 10% and 63% probability of exceedances within 50 years (475- and 50-years mean return periods, respectively) are calculated. The resultant seismic hazard maps display a probabilistic estimate of PGA and 0.2 and 2 sec SA for different mean return periods of 50 and 475 years. Resultant peak ground horizontal acceleration for 475-years return period varies from 0.63g in North-East of Lorestan to 0.1g in central Iran. The resultant PGAs for the 475-year return period in provincial capitals indicate the maximum value (0.35g) in Bandar Abbas and Tabriz, and the minimum one (0.11g) in Esfahan and Yazd. Comparison of the results of this study with the last map of seismic hazard in the Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings, seismic macrozonation hazard map of Iran, Standard 2800, shows significant differences. Seismic hazard levels estimated in this study in southern Iran, Sistan-Baluchestan, Hormozgan and Fars provinces, show significantly higher values.

Keywords: Seismic hazard assessment, Strong ground motions, Seismicity, Potential seismic sources, Spectral acceleration

۱ مقدمه

زمین لرزه‌ها باعث تلفات جانی و خسارت‌های مالی فراوان شده‌اند. امروزه کاملاً روشن است که بهترین روش برای کاهش خسارت‌های ناشی از زمین لرزه، طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زمین لرزه، براساس ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی و ژئوتکنیکی ساختگاه و نوع کاربری آنها است. انتظار می‌رود، چنین سازه‌هایی در مقابل سطوح معینی از جنبش نیرومند زمین مقاوم باشند. پارامترهای

خطرهای طبیعی جزء جدایی‌ناپذیر زندگی انسان‌ها هستند و گریز از آنها غیر ممکن است. بنابراین، لازم است با ارزیابی قابل‌اعتماد آنها و اقدامات پیشگیرانه، خطرپذیری سازه‌ها را به کمترین مقدار ممکن برسانیم. سرزمین ایران به علت قرار داشتن در کمربند کوه‌زایی آلپ-همیالیا یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان است که به دفعات متحمل زمین‌لرزه‌های مخرب شده است. تعدادی از این

ساختگاهی است. برای در نظر گرفتن این نوع عدم قطعیت، از چند مدل محتمل از ویژگی‌های چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و چند مدل محتمل از تضعیف جنبش نیرومند زمین استفاده می‌شود تا مناسب‌ترین نتایج تحلیل خطر زمین‌لرزه به دست آید. پاور و همکاران (۱۹۸۱)، کالکاری و همکاران (۱۹۸۴) و کوپراسمیت و یانگز (۱۹۸۶) درخت منطقی را برای منظور کردن عدم قطعیت شناختی معرفی کرده‌اند که امروزه به منزله ابزاری رایج در برآورد خطر زمین‌لرزه از آن استفاده می‌شود. در درخت منطقی اثر مدل‌های متفاوت، با سری شاخه‌ها و وزن‌های هر کدام، در محاسبات خطر مشارکت داده می‌شوند. وزن مربوط به هر شاخه یا مدل، به قضاوت پژوهشگر در خصوص میزان اعتماد به مدل بستگی دارد (مک گوئر و تورو، ۱۹۸۶؛ تورو و مک گوئر، ۱۹۸۷؛ آبراهامسون و بومر، ۲۰۰۵؛ دلاوود و همکاران، ۲۰۱۲؛ بومر، ۲۰۱۲).

داشتن اطلاعات کافی برای تعیین مدل چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و لرزه‌خیزی مربوط به آنها در روش احتمالاتی برآورد خطر زمین‌لرزه ضروری است. در بسیاری از مناطق کره زمین، از جمله ایران، به علت‌های گوناگون، این اطلاعات به اندازه کافی وجود ندارد. تاکنون راهکارهای زیادی برای رفع این مشکل و دستیابی به نتایج منطقی‌تر، معرفی و استفاده شده است. شی و همکاران (۱۹۹۲) روش احتمالاتی اصلاح شده را برای برآورد خطر زمین‌لرزه پیشنهاد داده‌اند که در آن، کمبود اطلاعات زمین‌لرزه‌ای، با اطلاعات زمین‌شناسی، دیرینه‌زلزله‌شناسی و به‌ویژه لرزه‌زمین‌ساختی و تکیه بر فرض تشابه زمین‌ساختی، جبران می‌شود. جزئیات این روش در کارهای میرزائی (۱۹۹۷) و شعبانی و میرزائی (۲۰۰۷) نیز آمده است. فرانکل (۱۹۹۵) راهکاری را مطرح کرده است که در آن، لرزه‌خیزی چشمه‌ها متفاوت از روش سنتی، به صورت هموار شده مکانی (Spatially smoothed seismicity) تعیین می‌شود. در این روش،

زیادی که همگی دارای عدم قطعیت هستند، از جمله مکان، بزرگی، احتمال رویداد زمین‌لرزه و جنبش نیرومندی که زمین‌لرزه در فواصل معین ایجاد می‌کند، در تعیین سطوح طراحی مؤثرند (کرامر، ۱۹۹۶). در برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی (PSHA)، در حکم رایج‌ترین روش برآورد خطر، پارامترهای موثر به همراه عدم قطعیت‌های مربوط، در محاسبات در نظر گرفته می‌شوند. در PSHA، جنبش نیرومند زمین با بیشینه شتاب، بیشینه سرعت، بیشینه جابه‌جایی، پارامترهای طیفی و مانند آنها بیان می‌شود.

راهکار پیشنهادی کرنل (۱۹۶۸)، رایج‌ترین روش برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه است. به منظور پهنه کردن این روش، اصلاحاتی در جزئیات آن صورت گرفته است که در نظر گرفتن ناکامل بودن داده‌ها و عدم قطعیت‌ها از آن جمله است. به طور کلی عدم قطعیت‌ها به دو دسته تصادفی (Aleatory) و شناختی (Epistemic) تقسیم می‌شوند. در خصوص این دسته‌بندی و نحوه در نظر گرفتن هر یک از آنها در محاسبات خطر زمین‌لرزه، تحقیقات زیادی صورت گرفته است که از میان آنها می‌توان به کارهای مک گوئر و تورو (۱۹۸۶)، آدامز و هالچوک (۲۰۰۳)، آبراهامسون (۲۰۰۶)، هونگ و گودا (۲۰۰۶) و کمبل و بزرگنیا (۲۰۰۸) اشاره کرد. عدم قطعیت تصادفی عمدتاً از طبیعت فیزیکی غیرقابل پیش‌بینی رویدادهای آینده ناشی می‌شود و با استفاده از مدلی ساده از یک فرایند پیچیده با تابع چگالی احتمال (Probability density function) در محاسبات منظور می‌شود. آبراهامسون (۲۰۰۶) معتقد است، سه متغیر با عدم قطعیت تصادفی مربوط، شامل بزرگی زمین‌لرزه، مکان زمین‌لرزه و تعداد انحراف معیار جنبش نیرومند زمین (E)، باید در محاسبات احتمالاتی خطر منظور شوند. عدم قطعیت شناختی، ناشی از کمبود اطلاعات از پارامترهای چشمه زمین‌لرزه، مسیر انتشار امواج لرزه‌ای و شرایط

لرزه‌خیزی فقط برای مناطقی در نظر گرفته می‌شود که در آنجا سابقه وقوع زمین‌لرزه وجود داشته باشد و امکان استفاده از اطلاعات لرزه‌زمین‌ساختی، زمین‌شناسی، دیرینه‌زلزله‌شناسی و اطلاعات مربوط به گسل‌های فعال، در محاسبات خطر زمین‌لرزه وجود ندارد.

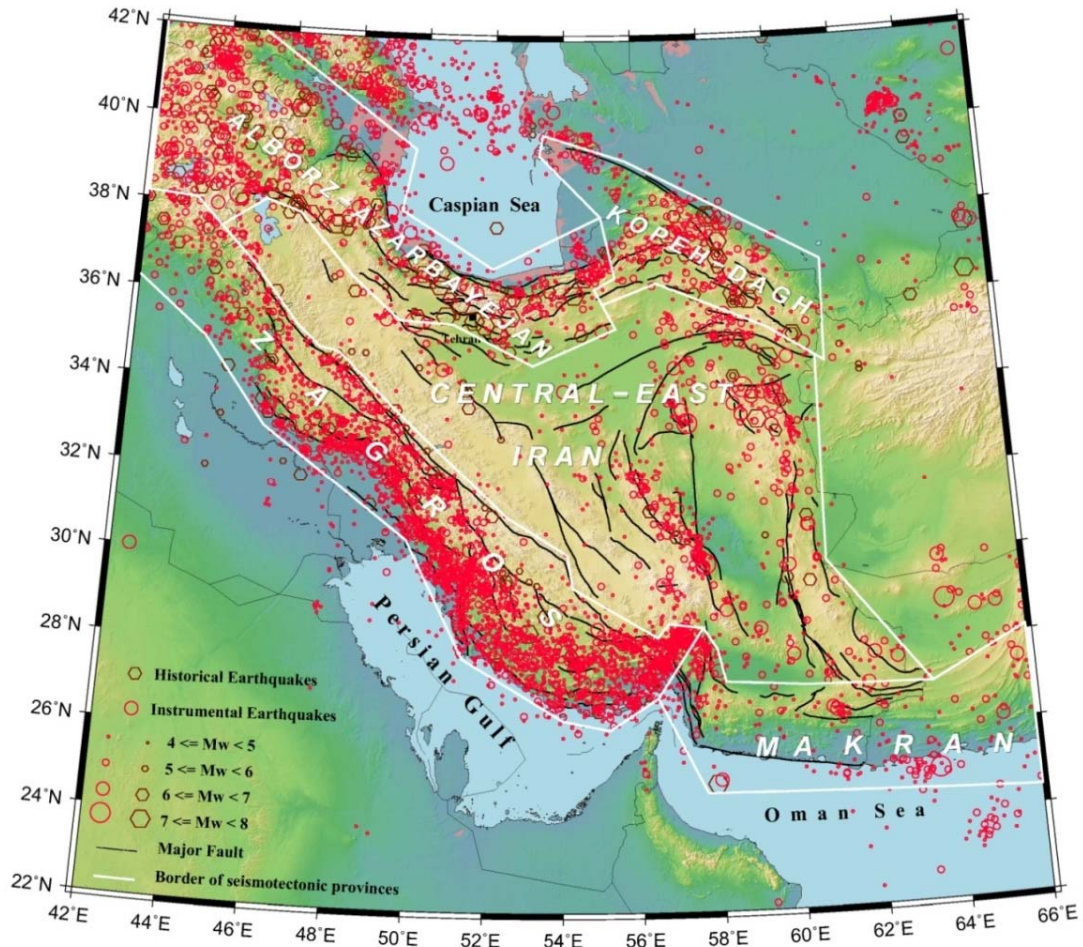
پیش از این، تحقیقات دیگری نیز برای برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی در ایران صورت گرفته است؛ برای نمونه: توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) با در نظر گرفتن ۲۰ زون لرزه‌زا در گستره ایران، مقدار بیشینه شتاب افقی (PGA) را برای دوره‌های بازگشت ۷۵ و ۴۷۵ سال برآورد کرده‌اند؛ همچنین، حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲) با در نظر گرفتن ۲۵ چشمه بالقوه زمین‌لرزه، مقادیر برآورد شده PGA و شتاب طیفی (SA) در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال را به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی عرضه کرده‌اند. مرکز تحقیقات راه و شهرسازی (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن)، در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، بدون معرفی جزئیات روش کار، PGA برآورد شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال را به صورت نقشه پهنه‌بندی به دست داده است.

در تحقیق حاضر ترجیح داده شده است از روش برآورد خطر احتمالاتی اصلاح شده، برای برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران استفاده شود. علت اصلی این انتخاب، امکان استفاده بهینه از اطلاعات ارزشمند لرزه‌زمین‌ساختی و زمین‌شناسی، به‌ویژه برای جبران کمبود داده‌های لرزه‌ای است. این اطلاعات در تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و پارامترهای مربوط به آنها نقش مهمی دارد. در این تحقیق، پهنه‌ای محدود به ۲۳ تا ۴۱ درجه عرض شمالی و ۴۳ تا ۶۵ درجه طول شرقی بررسی شده است. به این منظور، از فهرست نامه یکنواخت زمین‌لرزه‌ها، شامل زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی از هزاره سوم قبل از میلاد تا انتهای سال ۲۰۱۲ استفاده شده است. تقسیم‌بندی ایران به ۵ ایالت

لرزه‌زمین‌ساختی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) مبنا قرار گرفته و ۲۳۲ چشمه پهنه‌ای مدل شده درون این ایالت‌ها توسط میرزائی و همکاران (۱۹۹۹) بازمینی و ۶ چشمه بالقوه زمین‌لرزه، افزوده شده است. پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به ۵ ایالت اصلی لرزه‌زمین‌ساختی و ۲۳۸ چشمه بالقوه زمین‌لرزه تعیین شده است و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تصادفی و شناختی و استفاده از نرم‌افزار OpenQuake (<http://openquake.org>)، مقادیر PGA و SA در دوره‌های تناوب ۰/۲ و ۲ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال، محاسبه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تهیه شده است.

۲ ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی

فلات ایران از شمال شرق با صفحه اوراسیا و از جنوب و غرب با صفحه عربستان در تماس است و با توجه به موقعیتی که در بخش میانی کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا دارد، لرزه‌خیزی زیادی دارد. ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران را پژوهشگران گوناگون، از جمله بربریان (۱۹۷۶)، نوروزی (۱۹۷۶) و میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) بررسی کرده‌اند. وجه مشترک این تحقیقات آن است که در ایران مناطق گوناگون با ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی متفاوت وجود دارد، اما، توافقی در خصوص تعداد و محدوده ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی وجود ندارد. در این تحقیق تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) که بر پایه اطلاعات زمین‌شناسی، زلزله‌شناسی و ژئوفیزیکی بیشتری صورت گرفته، مبنای کار قرار گرفته است. میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) پنج ایالت اصلی لرزه‌زمین‌ساختی؛ زون برخورد قاره به قاره زاگرس، منطقه برخوردی البرز-آذربایجان، محیط درون‌قاره‌ای ایران مرکزی و شرق ایران، زون برخورد قاره‌ای کپه‌داغ و زون فرورانش اقیانوسی-قاره‌ای مکران را تعیین و معرفی کرده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱. ایالت‌های اصلی لرزه‌زمین‌ساختی ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸) به همراه رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی) و دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۲) در ایران و نواحی مجاور. خطوط تیره نشانگر گسل‌های اصلی و خطوط روشن نشانگر مرز ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی است.

۳ چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه

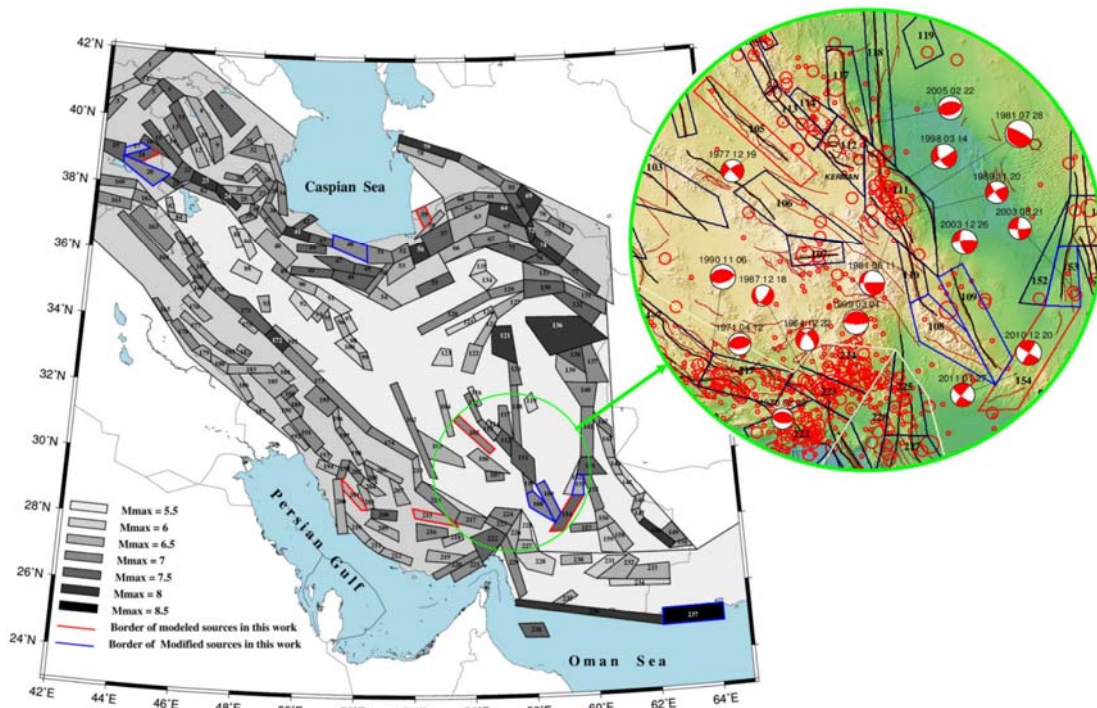
به علت تفاوت در ویژگی‌های زمین‌ساختی محلی، لرزه‌خیزی و بیشینه بزرگی زمین‌لرزه در مناطق گوناگون هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی، متفاوت است. بنابراین، لازم است مناطق دارای پتانسیل لرزه‌خیزی یکنواخت در هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی، به منزله چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه تعیین شوند و آهنگ لرزه‌خیزی و بیشینه بزرگی زمین‌لرزه مربوط به هر یک از آنها مشخص شود. معمولاً، برای تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه دو فرض کلیدی

در نظر گرفته می‌شود؛ فرض اول بیان می‌کند که زمین‌لرزه‌های بزرگ، ترجیحاً در نزدیکی مکان رویداد زمین‌لرزه‌های قبلی به وقوع می‌پیوندند و فرض دوم این است که ساختارهای با ویژگی‌های زمین‌ساختی مشابه، قادر به تولید زمین‌لرزه‌های با بزرگی یکسان هستند و ثبت نشدن زمین‌لرزه روی یک ساختار، دلیلی بر ناتوانی بالقوه رویداد زمین‌لرزه در آن نیست.

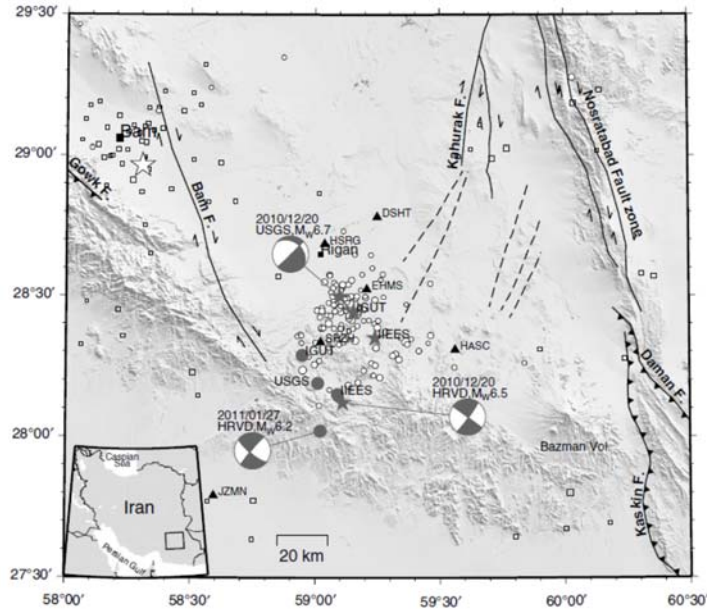
در این تحقیق، چشمه‌های پهنه‌ای تعیین شده میرزائی و همکاران (۱۹۹۹) با توجه به فهرست‌نامه جدید

زمین‌لرزه ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰ (شکل ۳) در مدل کردن چشمه شماره ۱۵۴ تعیین کننده بوده است. بیشینه بزرگی چشمه شماره ۱۰۹ در پی رویداد زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم ($M_w=6.5$) که یکی از مخرب‌ترین زمین‌لرزه‌های دهه اول سده بیست‌ویکم به شمار می‌رود، تعدیل شده است. چشمه شماره ۱۰۵ به علت وجود گسل فعال جورجافک با طول بیش از ۱۳۰ کیلومتر واقع در شمال غرب شهر کرمان با سازوکار معکوس و مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد اضافه شده است. این گسل دارای شیب به سمت جنوب غرب است و در بخش شمال غربی سبب رانده شدن سنگ‌های کرتاسه روی رسوبات آبرفتی کواترنر شده است. پهنه‌های به شدت خرد شده همراه با برش گسلی، چشمه‌های آب و پرتگاه‌های گسلی (گاه به بلندی ۱۰۰ متر) از ویژگی‌های این گسل است.

زمین‌لرزه‌ها و تحقیقات صورت گرفته روی زمین‌لرزه‌های بزرگ اخیر و پس‌لرزه‌های آنها، بازنگری شده است. از تعداد ۲۳۲ چشمه بالقوه زمین‌لرزه تعیین شده میرزائی و همکاران (۱۹۹۹)، مختصات ۷ چشمه (چشمه‌های ۲۰، ۴۶، ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۵۳ و ۲۳۷) اصلاح و تعداد ۶ چشمه جدید (چشمه‌های ۱۸، ۵۹، ۱۰۵، ۱۵۴، ۲۰۱ و ۲۱۵) اضافه شده است. بیشینه بزرگی ۱۷ چشمه نیز براساس داده‌های جدید تعدیل شده است. چشمه‌های اصلاح شده و چشمه‌های جدید به ترتیب به رنگ آبی و سرخ در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. برای نمونه، چشمه شماره ۱۵۴ در جنوب دشت لوت به کمک اطلاعات به دست آمده از دو زمین‌لرزه ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰ ($M_w = 6.7$) و ۲۷ ژانویه ۲۰۱۱ ($M_w = 6.2$) در منطقه بیابانی جنوب شهر ریگان تعیین شده است. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها و مکان پس‌لرزه‌های



شکل ۲. چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در ایران و لرزه‌خیزی منطقه مشخص شده با دایره سبز رنگ. رنگ مشکی مربوط به حدود چشمه‌هایی است که میرزائی و همکاران (۱۹۹۹) تعیین کرده‌اند، رنگ آبی مربوط به حدود چشمه‌هایی است که مختصات آنها در تحقیق حاضر تعدیل شده است و رنگ سرخ حدود چشمه‌هایی را نشان می‌دهد که در این تحقیق اضافه شده‌اند. عدد داخل چشمه‌ها مربوط به شماره چشمه‌ها است.



شکل ۳. لرزه‌خیزی جنوب دشت لوت. ستاره توخالی رومرکز زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم و مربع‌های توخالی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه بم و سایر زمین‌لرزه‌های منطقه را نشان می‌دهد. ستاره‌ها و دایره‌های خاکستری به ترتیب رومرکز زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۰/۱۲/۲۰ و ۲۰۱۱/۱/۲۷ است که آژانس‌های گوناگون گزارش کرده‌اند. دایره‌های توخالی رومرکز ۱۳۰ پس‌لرزه با $M_N \geq 2.5$ را نشان می‌دهند که مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از ۲۰۱۰/۱۲/۲۰ تا ۲۰۱۱/۱/۲۷ با نصب شبکه موقت محلی ثبت کرده است. محل ایستگاه‌ها با مثلث نشان داده شده است (رضاپور و محسن‌پور، ۲۰۱۳).

زرد نشان داده شده است. انتخاب این مدل، یعنی گسیختگی کراندار، اجازه می‌دهد که کانون گسیختگی و لبه بالایی گسیختگی مدل شود و در روابط تضعیفی که در آنها عمق کانونی و فاصله از سطح گسیختگی در محاسبات شرکت داده می‌شوند، به خوبی مورد استفاده قرار گیرد (کرولی و همکاران، ۲۰۱۱b).

در این تحقیق، فاصله نقاط شبکه در همه چشمه‌های پهنه‌ای ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. از میان ۲۳۸ چشمه پهنه‌ای واقع در ۵ ایالت اصلی لرزه‌زمین‌ساختی، اطلاعات مربوط به هندسه گسلش ۶۷ چشمه با توجه به سازوکار کانونی تعیین شده در بررسی‌های موردی (برای نمونه: جکسون و مکزی، ۱۹۸۴؛ بیکر و همکاران، ۱۹۹۳؛ پرستلی و همکاران، ۱۹۹۴؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ طالبیان و جکسون، ۲۰۰۴؛ واکر و جکسون، ۲۰۰۴؛ حمزه‌لو، ۲۰۰۵؛ بربریان، ۲۰۰۵؛ تاتار و همکاران، ۲۰۰۷)

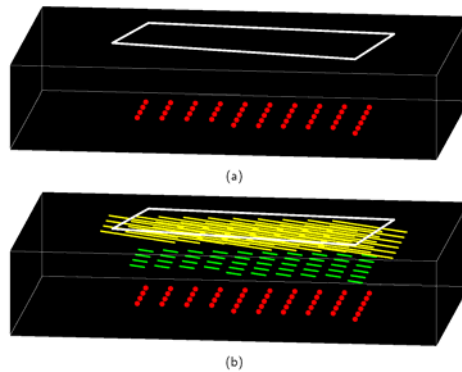
در نرم‌افزار OpenQuake، هر چشمه پهنه‌ای به صورت شبکه‌ای از نقاط با فاصله‌های برابر در نظر گرفته می‌شود. کاربرد این امکان را دارد که نقاط شبکه هر چشمه پهنه‌ای را بسته به اطلاعات موجود، به صورت چشمه‌های نقطه‌ای یا خطی (درحکم زیرمجموعه چشمه پهنه‌ای) در نظر بگیرد (شکل ۴). در صورت انتخاب چشمه‌های نقطه‌ای، رویداد زمین‌لرزه به هر نقطه از شبکه با عمق کانونی معینی که برای چشمه پهنه‌ای تعریف شده است، نسبت داده می‌شود (شکل ۴a) و در صورت انتخاب چشمه خطی، به هر نقطه از شبکه یک گسیختگی نسبت داده می‌شود، به طوری که لبه پایینی گسیختگی در عمق کانونی و عمق لبه بالایی با توجه به بزرگی زمین‌لرزه و با رابطه تجربی بین بزرگی و مساحت سطح شکست برآورد می‌شود (شکل ۴b). در شکل ۴b دو حالت متفاوت از لبه بالایی گسیختگی برای دو بزرگی متفاوت با رنگ‌های سبز و

و سازوکارهای عرضه شده در پایگاه GCMT، جمع آوری و نقاط شبکه موجود در این چشمه‌ها به صورت چشمه‌های خطی در نظر گرفته شده‌اند. برای این چشمه‌ها اطلاعاتی از قبیل امتداد، شیب، جهت بردار لغزش و عمق کانونی وارد شده است و از رابطه تجربی بین بزرگی و مساحت صفحه شکست که ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) عرضه کرده‌اند، در تعیین عمق لبه بالایی گسیختگی استفاده شده است. از این ۶۷ چشمه، ۱۸ چشمه در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان، ۱۷ چشمه در ایران مرکزی و شرق ایران، ۵ چشمه در کپه‌داغ، ۵ چشمه در مکران و ۲۲ چشمه در زاگرس قرار دارند. به علت در دسترس نبودن اطلاعات هندسه گسلش برای تعداد ۱۸۰ چشمه پهنه‌ای دیگر، نقاط شبکه داخل آنها به صورت چشمه‌های نقطه‌ای در نظر گرفته شده است.

۴ پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی در ارزیابی پارامترهای لرزه‌خیزی از فهرست‌نامه یکنواخت زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی منطقه مورد بررسی (موسوی و همکاران، ۲۰۱۴) استفاده شده است. این فهرست‌نامه شامل ۲۵۶ زمین‌لرزه تاریخی از هزاره سوم قبل از میلاد تا ۱۸۹۹ و ۷۲۸۲ زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگی $M_w \geq 4.0$ از ۱۹۰۰ تا انتهای ۲۰۱۲ است (فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌های مکران و ایران مرکزی و شرق ایران، با توجه به رویداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در سال ۲۰۱۳، مطابق جدول ۱ توسعه داده شده است). در بررسی برآورد خطر زمین‌لرزه ضروری است که رویدادهای وابسته (مانند پس‌لرزه‌ها) از فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌ها حذف و از فهرست‌نامه‌ای شامل رویدادهای تصادفی استفاده شود. حذف پس‌لرزه‌ها در کار موسوی و همکاران (۲۰۱۴) با روش پنجره‌ای بهینه شده، صورت گرفته است. در عمل، از دو پنجره زمانی و دو پنجره مکانی معرفی شده گاردنر و نوپوف (۱۹۷۴) و اوهرامر (۱۹۸۶)، استفاده

شده است، که در آنها به‌ازای هر بزرگی زمین‌لرزه، پنجره یا محدوده‌های مکانی و زمانی‌ای معین شده است که زمین‌لرزه‌های واقع در آن محدوده‌ها، درحکم پس‌لرزه در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که پهنای پنجره‌های معرفی شده متفاوت است، حذف پس‌لرزه‌ها در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول، رویدادهای واقع در پنجره‌های زمانی و مکانی کوچک‌تر، به مثابه پس‌لرزه در نظر گرفته شده‌اند، و در مرحله دوم، برای رویدادهایی که خارج از پنجره‌های زمانی و مکانی کوچک‌تر و داخل پنجره‌های زمانی و مکانی بزرگ‌تر قرار گرفته‌اند، با در نظر گرفتن فاصله زمانی و مکانی آن رویداد از زمین‌لرزه اصلی و توالی پس‌لرزه‌ای خاص آن، و همچنین، ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی محل زمین‌لرزه، در خصوص انتخاب آنها به منزله پس‌لرزه تصمیم‌گیری شده است. به این ترتیب، از بین ۷۵۳۸ زمین‌لرزه، تعداد ۲۳۶۳ رویداد درحکم پس‌لرزه شناخته شده‌اند که حدود ۳۱٪ زمین‌لرزه‌های فهرست‌نامه را تشکیل می‌دهند. پس از حذف پس‌لرزه‌ها، تعداد رویدادهای مستقل با بزرگی $M_w \geq 4.0$ به ۵۱۷۵ می‌رسد.

در مرحله بعد، آستانه کامل بودن داده‌ها برای محدوده‌های بزرگی متفاوت در هر یک از ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی تعیین شده است (جدول ۱). به این ترتیب، براساس روش کیجکو و سلفول (۱۹۹۲)، پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به هر یک از ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی براساس دو مدل عدم قطعیت بزرگی مرز سخت (Hard bound) و مرز نرم (Soft bound)، به‌طور مجزا تعیین شده است. در مدل مرز سخت فرض شده است که بزرگی واقعی زمین‌لرزه‌ها در بازه محدود به این مرزها باشد. در مدل مرز نرم عدم قطعیت بزرگی زمین‌لرزه‌ها به صورت خطای تصادفی گاوسی در نظر گرفته شده است. پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به هر یک از ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۴. نمایش نمادین چشمه‌های (a) نقطه‌ای و (b) خطی در هر چشمه پهنه‌ای (برگرفته از کرولی و همکاران، ۲۰۱۱b).

جدول ۱. داده‌های ورودی برای تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی هر یک از ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران (موسوی و همکاران، ۲۰۱۴).

Alborz-Azarbayejan						
	extreme part	complete part				
Period (years)	743-1849	1850-1902	1903-1919	1920-1962	1963-1992	1993-2012
Threshold magnitude	all	6	5.5	5	4.5	4
Number of Earthquakes	39	18	23	140	226	277
Central-East Iran						
Period (years)	1336-1902	1903-1922	1923-1955	1956-1971	1972-2001	2002-2013.04
Threshold magnitude	all	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0
Number of Earthquakes	11	4	24	35	197	234
Kopch Dagh						
Period (years)	840-1869	1870-1916	1917-1939	1940-1974	1972-1994	2000-2012
Threshold magnitude	all	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0
Number of Earthquakes	13	6	14	33	63	100
Makran						
Period (years)	-	1919-1963	1964-2001	2002-2013.09		
Threshold magnitude	-	5.5	4.5	4		
Number of Earthquakes	0	15	116	104		
Zagros						
Period (years)	840-1852	1853-1927	1928-1963	1964-1992	1993-2012	
Threshold magnitude	all	6	5.5	4.5	4	
Number of Earthquakes	21	11	57	906	1215	

جدول ۲. پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران.

Sismotectonic provinces	β		b-value		λ (for $M_{min}=4.0$)		M_{max}	
	Hard bound	Soft bound	Hard bound	Soft bound	Hard bound	Soft bound	Hard bound	Soft bound
Alborz-Azarbayejan	2.14±0.03	2.23±0.06	0.91±0.01	0.96±0.03	16.92±0.92	13.84±1.28	8.0±0.6	8.1±0.7
Central-East Iran	2.2±0.04	2.26±0.06	0.93±0.02	0.98±0.03	15.81±1.18	12.8±1.08	7.9±0.28	7.9±0.31
Kopeh Dagh	2.06±0.06	2.15±0.08	0.88±0.02	0.91±0.04	6.13±0.71	5.07±0.62	7.7±0.74	7.8±0.87
Makran	2.0±0.09	2.02±0.11	0.85±0.04	0.86±0.05	6.33±0.81	6.33±0.78	8.5±1.08	8.5±1.27
Zagros	2.53±0.02	2.64±0.03	1.08±0.01	1.12±0.01	67.04±3.2	49.1±2.58	7.4±0.21	7.5±0.23

۱۹۸۸؛ شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$\lambda_{i,m_j} = \lambda_{m_j} f_{i,m_j} \quad (2)$$

که در آن، λ_{i,m_j} و f_{i,m_j} به ترتیب، میانگین آهنگ رویداد سالانه و تابع توزیع مکانی مربوط به بازه بزرگی M_j برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه M_j است.

در مفهوم تابع توزیع مکانی، علاوه بر تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در هر چشمه در بازه‌های بزرگی متفاوت، انواع اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ساختارهای موجود و جایگاه زمین‌ساختی نیز در ارزیابی آهنگ رویداد سالانه زمین‌لرزه‌ها در هر چشمه در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق برای تعیین تابع توزیع مکانی از روش جمع وزن‌های معادل (Equal weight summation) عرضه شده یان (۱۹۹۳)، که در آن از عامل‌های کنترل‌کننده برای ارزیابی‌ها بهره گرفته می‌شود، استفاده شده است. در این روش برای عامل کنترل‌کننده منتخب K_j و بزرگی m_j (میان بازه بزرگی)، برای چشمه M_j ، ضریب وزنی $W_{im_j,k}$ در نظر گرفته می‌شود. سپس، در هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ضریب‌های وزنی بهنجار می‌شود تا بار عامل به صورت زیر به دست آید (گائو، ۱۹۸۸؛ شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$Q_{im_j,k} = \frac{W_{im_j,k}}{\sum_i W_{im_j,k}} \quad (3)$$

۵ پارامترهای لرزه‌خیزی چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه به علت ناکافی بودن داده‌های زمین‌لرزه‌ای در دسترس، تعیین مستقیم پارامترهای لرزه‌خیزی هر چشمه، در عمل با مشکلاتی همراه است. برای رفع این مشکلات، با استفاده از مفهوم تابع توزیع مکانی، سهم هر چشمه از نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها در هر بازه بزرگی، برای همه چشمه‌های واقع در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی تعیین می‌شود (شی و همکاران، ۱۹۹۲؛ میرزائی، ۱۹۹۷؛ شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷).

نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها برای هر یک از بازه‌های بزرگی، Δm ، در هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی به صورت زیر تعیین می‌شود (گائو، ۱۹۸۸؛ شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$\lambda_{m_j} = \frac{2\lambda \exp[-\beta(m_j - M_{min})] sh(0.5\beta\Delta m)}{1 - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]} \quad (1)$$

که در آن، λ و β پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی، m_j مقدار میانه مربوط به هر بازه بزرگی، sh تابع سینوس هذلولوی، Δm بازه بزرگی، M_{min} کمینه بزرگی تأثیرگذار روی سازه‌های مهندسی و M_{max} بیشینه بزرگی زمین‌لرزه محتمل در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی است.

برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه M_j در یک ایالت لرزه‌زمین‌ساختی، میانگین نرخ رویداد سالانه برای محدوده بزرگی Δm به صورت زیر تعیین می‌شود (گائو،

بزرگی‌های کوچک و متوسط، ممکن است به‌طور تصادفی در هر جای ناحیه موردنظر روی دهد. بزرگی زمین‌لرزه زمینه برای هر ناحیه به سطح فعالیت زمین‌ساختی آن ناحیه بستگی دارد و همواره از بیشینه بزرگی هریک از چشمه‌های تعیین شده در آن ناحیه کوچک‌تر است (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹). در این تحقیق برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس، کپه‌داغ و البرز-آذربایجان، بزرگی ۶ و برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی مکران و ایران مرکزی و شرق ایران، بزرگی ۵/۵، درحکم زمین‌لرزه زمینه در نظر گرفته شده است.

۷ رابطه‌های تضعیف جنبش نیرومند

در سال‌های اخیر بر پایه داده‌های شتاب‌نگاری ایران، و همچنین، ترکیب داده‌های ایران با مناطق مشابه، چندین رابطه تضعیف جنبش زمین عرضه شده است. نوروزی (۲۰۰۵) برای PGA براساس مقیاس بزرگی M_w ، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۷) برای PGA و SA براساس مقیاس بزرگی M_s ، زعفرانی و همکاران (۲۰۰۸) برای PGA و SA براساس مقیاس بزرگی M_w ، قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) برای SA براساس مقیاس بزرگی M_w ، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۰) برای PGA و SA براساس مقیاس بزرگی M_s ، سقراط و همکاران (۲۰۱۲) برای PGA و SA براساس مقیاس بزرگی M_w و زعفرانی و سقراط (۲۰۱۲) برای PGA و SA براساس مقیاس بزرگی M_w ، رابطه‌های تضعیف را برای دو گروه سنگ و خاک عرضه کرده‌اند. در این تحقیقات، روابط تضعیف با در نظر گرفتن فاصله، بزرگی زلزله، دوره تناوب طبیعی لایه خاک و جنس آن به‌دست آمده است و از دیگر متغیرهای پیش‌بین مانند سازوکار گسلش به علت فقدان آنها در داده‌های استفاده شده، صرف نظر شده است. از آنجا که در این تحقیق لحاظ کردن اثر سازوکار گسلش در رابطه تضعیف نیز مورد نظر بوده است، استفاده از

سپس، بار عامل‌ها در هر چشمه بالقوه زمین‌لرزه جمع بسته می‌شود و بار کلی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (گائو، ۱۹۸۸؛ شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$R_{imj} = \sum_k Q_{imjk} \quad (۴)$$

سرانجام، در هر ایالت، با بهنجار کردن بارهای کلی، تابع توزیع مکانی برای بازه بزرگی M در چشمه بالقوه M به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (گائو، ۱۹۸۸؛ شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$f_{i,mj} = \frac{R_{i,mj}}{\sum_i R_{i,mj}} \quad (۵)$$

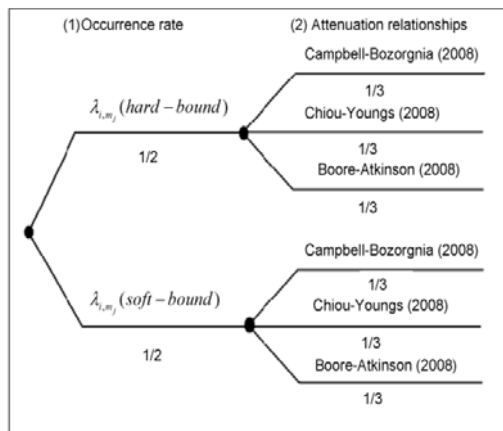
در این تحقیق، چهار عامل کنترل‌کننده در تعیین تابع توزیع مکانی مربوط به هر چشمه بالقوه زمین‌لرزه در نظر گرفته شده است: قابلیت اعتماد تعیین چشمه بالقوه زمین‌لرزه، جایگاه زمین‌ساختی چشمه، عنصرهای ساختاری واقع در چشمه و تعداد زمین‌لرزه‌های هر چشمه. شرح کامل‌تر نحوه محاسبه تابع توزیع مکانی در شعبانی و میرزائی (۲۰۰۷) داده شده است. برای نمونه، تابع توزیع مکانی مربوط به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در هر بازه بزرگی مربوط به ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ در جدول ۳ آمده است.

مطابق رابطه (۲) با ضرب تابع توزیع مکانی هر بازه بزرگی هر چشمه، در نرخ رویداد سالانه همان بازه بزرگی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی مربوط، نرخ رویداد سالانه مربوط به بازه‌های بزرگی گوناگون چشمه‌ها قابل تعیین است.

۶ لرزه‌خیزی زمینه

در جاهایی که به سبب کمبود اطلاعات، امکان تعریف چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه فراهم نیست و ساخت‌های فعال در آن نواحی قابل مشاهده نیستند، لازم است لرزه‌خیزی زمینه (Background seismicity) در نظر گرفته شود. در مفهوم لرزه‌خیزی زمینه، زمین‌لرزه‌های با

رابطه‌های تضعیف داده شده برای ایران، ممکن نشد. بنابراین، از رابطه‌های دیگر که با داده‌های بیشتر به دست آمده و مناسب بودن آنها برای ایران مورد تأیید قرار گرفته است، استفاده شد. شجاع‌طاهری و همکاران (۲۰۱۰) میزان کارایی مدل‌های تضعیف نسل جدید (Next Generation Attenuation) را برای کاربرد در ایران، بررسی کرده‌اند. آنها مدل‌های تضعیف بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، کمبل و بزرگنیا (۲۰۰۸) و چپو و یانگز (۲۰۰۸) را برای داده‌های شبکه شتاب‌نگاری ایران به کار بردند و در ارزیابی روابط، برای رویدادهایی که سازوکار گسلش و سطح گسیختگی آنها تعیین شده بود، نوع گسلش و فاصله ساختگاه از سطح گسیختگی را نیز در نظر گرفتند و نتایج حاصل را مقایسه کردند. براساس کار تحقیقاتی آنها، هر سه مدل تضعیف بدون شک می‌تواند در ایران به کار رود. بنابراین، در این تحقیق از هر سه رابطه تضعیف نامبرده با وزن یکسان استفاده شده است. در انتخاب این سه رابطه تضعیف، عوامل دیگر از جمله: استفاده از داده‌های زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای کم‌عمق، شامل برخی زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران (زمین‌لرزه ۱۹۷۸ طبرس و زمین‌لرزه ۱۹۹۰ رودبار-منجیل)، قابلیت محاسبه PGA و SA برای دوره‌های تناوب متفاوت بین ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه، و قابلیت در نظر گرفتن تعداد معین انحراف معیار به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت تصادفی نیز نقش داشته است. به علاوه، روابط تضعیف به کار رفته با داده‌های بیشتری به دست آمده‌اند و باعث سازگاری بیشتر با واقعیت هستند.



شکل ۵. درخت منطقی برای آهنگ رویداد سالانه و روابط تضعیف در این تحقیق.

۸ عدم قطعیت‌ها

در این تحقیق، عدم قطعیت بزرگی زمین‌لرزه‌ها (تاریخی، دوره نخست دستگاهی و دوره نوین دستگاهی) براساس تحقیقات آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲)، آمبرسیز (۱۹۸۹) و میرزائی و همکاران (۱۹۹۷) در محاسبه پارامترهای

جدول ۳. بیشینه بزرگی و تابع توزیع مکانی در بازه‌های بزرگی گوناگون (بیش از بزرگی زمین‌لرزه زمینه) مربوط به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ. شماره چشمه‌ها مطابق شکل ۲ است.

Source No.	M_{max}	Spatial distribution function			
		$6.0 < M_w \leq 6.5$	$6.5 < M_w \leq 7.0$	$7.0 < M_w \leq 7.5$	$7.5 < M_w \leq 8.0$
60	7.0	0.039	0.045		
61	7.0	0.051	0.047		
62	7.0	0.043	0.062		
63	6.5	0.043			
64	7.7	0.051	0.067	0.087	0.216
65	7.0	0.044	0.052		
66	6.5	0.043			
67	7.0	0.044	0.052		
68	7.5	0.060	0.057	0.121	
69	7.7	0.045	0.052	0.130	0.175
70	6.5	0.039			
71	7.0	0.049	0.045		
72	7.7	0.046	0.065	0.113	0.179
73	7.0	0.043	0.071		
74	7.7	0.049	0.057	0.130	0.251
75	7.5	0.045	0.064	0.097	
76	7.5	0.059	0.047	0.087	
77	7.5	0.055	0.052	0.111	
78	6.5	0.020			
79	7.7	0.046	0.065	0.124	0.179
80	7.0	0.043	0.050		
81	7.0	0.043	0.050		

۹ برآورد خطر زمین لرزه

در این تحقیق، مانند بیشتر مدل‌های برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی، توزیع احتمالاتی رویدادها پواسونی فرض می‌شود. در مدل پواسونی، رویداد زمین لرزه‌ها مستقل از زمان است، به این معنی که احتمال رویداد یک زمین لرزه در یک پنجره زمانی، فقط به بزرگی پنجره وابسته و مستقل از عوامل دیگر، از جمله مدت زمان طی شده از آخرین رویداد است. همچنین، در این مدل، احتمال وقوع بیش از یک زمین لرزه در یک زمان بسیار کوتاه ناچیز فرض می‌شود (بیکر، ۲۰۰۸). در این تحقیق از آخرین نسخه نرم‌افزار OpenQuake (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۳) که برای برآورد خطر زمین لرزه و تحلیل خطرپذیری تدوین شده، استفاده شده است. این نرم‌افزار در قالب طرح مدل زمین لرزه جهانی (پینهو، ۲۰۱۲) عرضه شده و به دوروش تحت وب و اجرای گُذ به صورت متن باز، قابل استفاده است. محاسبات در این نرم‌افزار براساس روش کرنل (۱۹۶۸) و مک گوئر (۱۹۷۶) مطابق فرمول‌بندی فیلد و همکاران (۲۰۰۳) در محیط جاوا و پایتون به صورت ترکیبی صورت می‌گیرد (کرولی و همکاران، ۲۰۱۱a). در شکل ۶ توالی محاسبات برآورد خطر مطابق فرمول‌بندی فیلد و همکاران (۲۰۰۳) نشان داده شده است.

رابطه داده شده در شکل ۶ از چند جهت با رابطه مرسوم برآورد خطر متفاوت است. واضح‌ترین تفاوت این است که این رابطه مستقیماً با احتمالات سروکار دارد، در صورتی که در رابطه مرسوم، میانگین نرخ‌های سالانه جمع و در پایان، احتمالات محاسبه می‌شود. تفاوت دیگر این فرمول‌بندی در این است که در رابطه مرسوم، روی بزرگی و فاصله انتگرال گرفته می‌شود، در صورتی که در این رابطه بزرگی‌ها و سطح‌های گسیختگی گسسته، جمع بسته می‌شود (فیلد و همکاران، ۲۰۰۳).

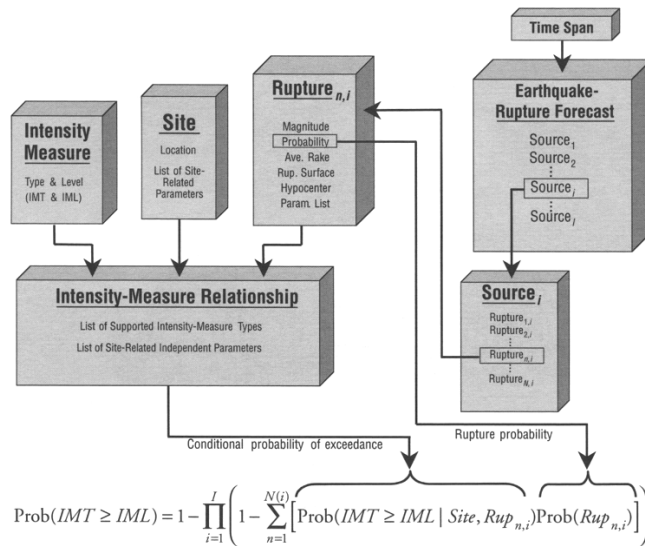
به منظور برآورد خطر زمین لرزه در ایران، تعداد ۲۳۸ چشمه پهنه‌ای مدل شده است. فرض این است که لرزه‌خیزی در چشمه پهنه‌ای همگن است و زمین لرزه‌ها در هر چشمه روی شبکه منظمی از نقاط با فاصله مشخص، که در اینجا ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است، قرار می‌گیرند. همچنین، توزیع فراوانی-بزرگی به صورت گسسته منظم افزایشی (Incremental evenly-discretized magnitude frequency distribution) بازه‌های به پهنای ۰/۵ واحد بزرگی در نظر گرفته شده است. برای هر چشمه بالقوه زمین لرزه، آهنگ رویداد سالانه در هر بازه بزرگی ثابت فرض می‌شود.

برای اعمال لرزه‌خیزی زمینه، هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی را به صورت یک چشمه پهنه‌ای در نظر گرفته و لرزه‌خیزی مربوط بین $M_{min}=4$ و بزرگی زمین لرزه زمینه مربوط به آن ایالت (MB)، با فرض پواسونی بودن رویداد زمین لرزه‌ها به صورت توزیع فراوانی-بزرگی گوتنبرگ-ریشتر کراندار (Truncated Gutenberg-Richter magnitude frequency distribution) در نظر گرفته شده است.

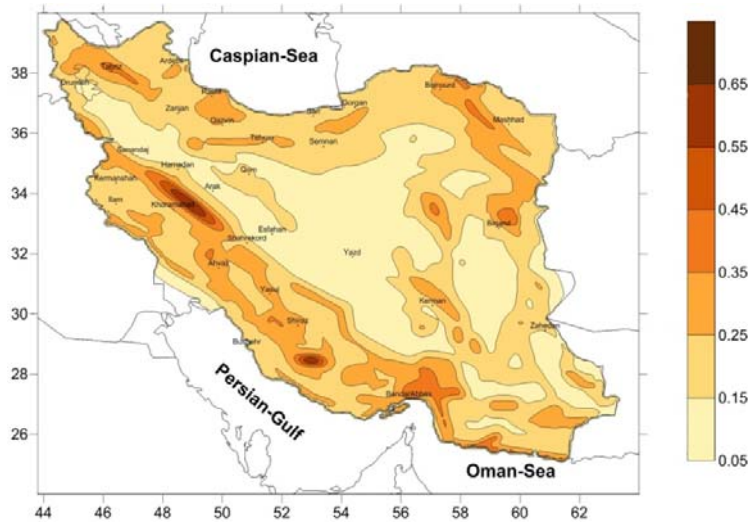
برآورد خطر زمین لرزه برای شبکه‌ای شامل ۴۱۳۰۴ نقطه با فاصله نقاط ۱۰ کیلومتر در محدوده ۴۳ تا ۶۵ درجه طول شرقی و ۲۳ تا ۴۱ درجه عرض شمالی، صورت گرفته است. در محاسبات، برای همه نقاط شبکه شرایط ساختگاهی سنگی منظور شده است. به این ترتیب برای همه نقاط شبکه، مقادیر PGA و SA در دوره‌های تناوب ۰/۲ و ۲ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۰/۶۳٪ و ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال)، برای میرایی ۵٪ محاسبه و براساس نتایج، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لرزه روی سنگ بستر تهیه شده است (شکل‌های ۷ تا ۱۲). همچنین، پارامترهای جنبش زمین به طور خاص برای ۳۱ ساختگاه در ۳۱ مرکز استان کشور روی سنگ بستر محاسبه شده و نتایج در جدول ۴ آمده

محاسبه شده برای این ۱۶ ساختمان، مشاهده می‌شود که در همه موارد با در نظر گرفتن شرایط ساختمانی، جنبش‌های زمین بیشتر شده است. متأسفانه، به علت موجود نبودن مدل خاک واقعی در کل منطقه مورد بررسی، عرضه نقشه پهنه‌بندی با در نظر گرفتن اثر ساختمان امکان‌پذیر نیست.

است. مرکز تحقیقات راه و شهرسازی برای ساختمان تعدادی از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری، سرعت موج برشی ۳۰ متر بالای خاک (V_{s30}) را تعیین کرده است. برای ۱۶ ساختمان واقع در مراکز استان‌های کشور، از مقادیر موجود V_{s30} برای محاسبه PGA و SA استفاده شده است و نتایج آن در جدول ۵ آمده است. با مقایسه جنبش‌های



شکل ۶. توالی محاسبات برآورد خطر زمین‌لرزه در نرم‌افزار OpenQuake (در ابتدا، OpenSHA؛ فیلد و همکاران، ۲۰۰۳).



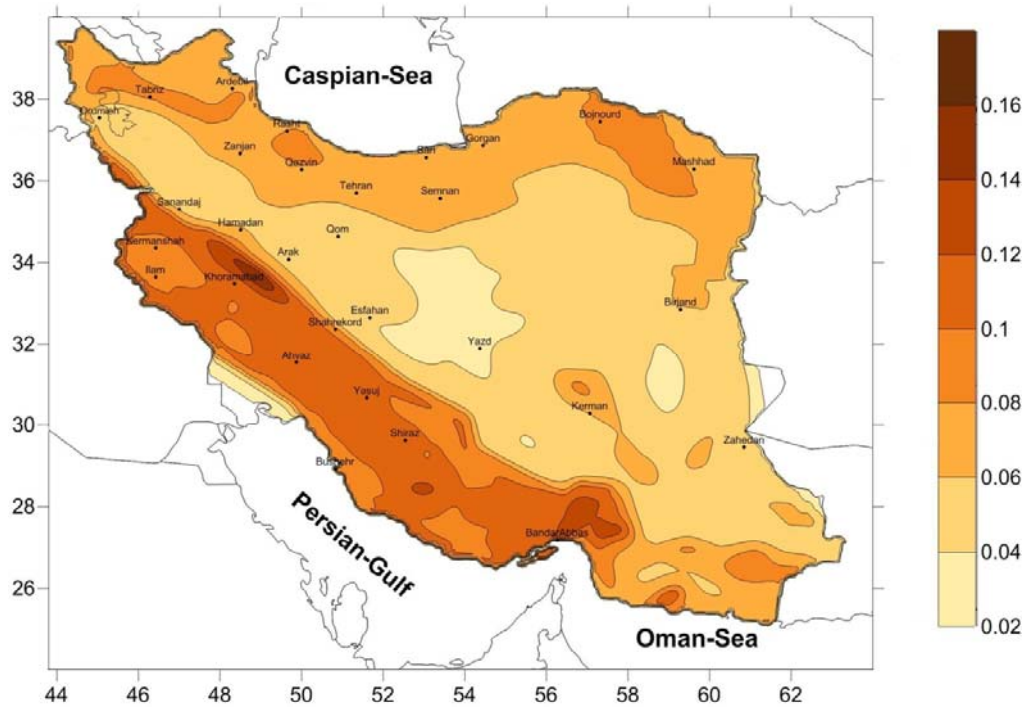
شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.

جدول ۴. مقادیر جنبش زمین برآورد شده روی سنگ بستر در مراکز استان‌های کشور.

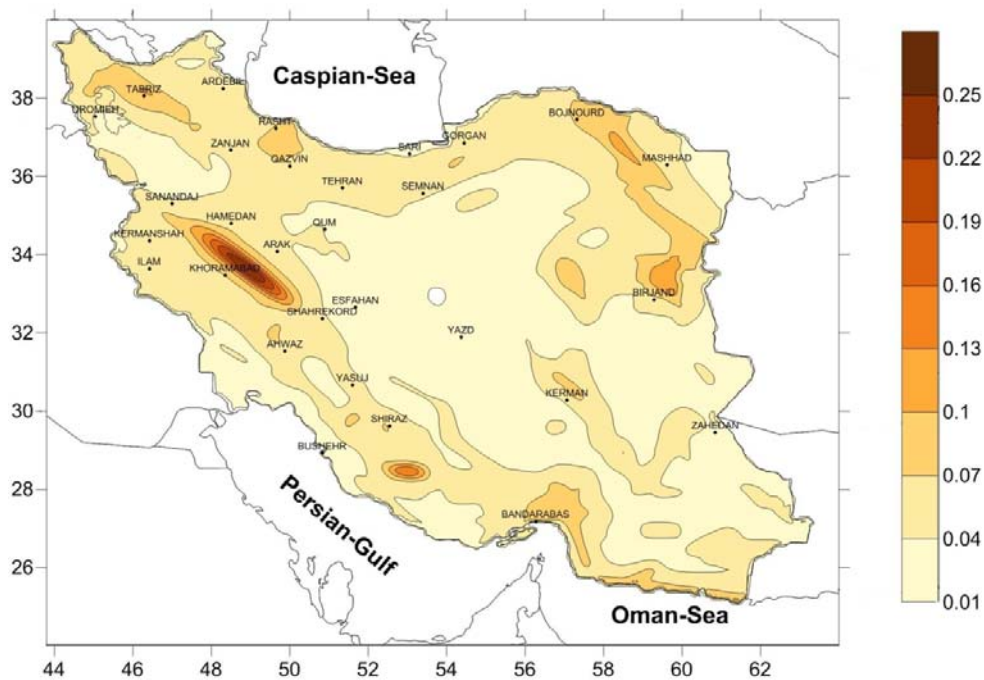
Name	Long.	Lat.	PGA(g)		SA(0.2s)(g)		SA(2s)(g)	
			475 yr	50 yr	475 yr	50 yr	475 yr	50 yr
Ahvaz	49.88	31.53	0.312	0.109	0.68	0.215	0.063	0.016
Arak	49.68	34.08	0.136	0.053	0.272	0.106	0.049	0.013
Ardebil	48.328	38.217	0.258	0.079	0.564	0.162	0.065	0.016
Bandar Abbas	56.293	27.193	0.353	0.111	0.785	0.219	0.081	0.018
Birjand	59.208	32.876	0.173	0.053	0.359	0.105	0.048	0.011
Bojnood	57.314	37.482	0.269	0.085	0.577	0.173	0.077	0.017
Boushehr	50.837	28.977	0.226	0.092	0.431	0.166	0.029	0.011
Esfahan	51.68	32.65	0.112	0.042	0.218	0.083	0.026	0.008
Gorgan	54.385	36.839	0.228	0.072	0.477	0.143	0.055	0.011
Hamedan	48.534	34.869	0.184	0.059	0.381	0.118	0.057	0.014
Ilam	46.42	33.64	0.246	0.1	0.494	0.192	0.043	0.015
Karaj	50.96	35.82	0.25	0.077	0.543	0.154	0.058	0.014
Kerman	57.083	30.256	0.189	0.061	0.399	0.126	0.049	0.012
Kermanshah	46.42	34.35	0.233	0.099	0.468	0.191	0.043	0.015
Khoram Abad	48.371	33.518	0.266	0.111	0.529	0.21	0.077	0.017
Mashhad	59.561	36.315	0.231	0.078	0.489	0.157	0.061	0.016
Orumieh	45.05	37.53	0.153	0.056	0.321	0.115	0.038	0.012
Qazvin	50.011	36.281	0.235	0.077	0.496	0.156	0.061	0.014
Qom	50.89	34.64	0.175	0.055	0.368	0.111	0.039	0.012
Rasht	49.591	37.292	0.252	0.078	0.53	0.156	0.067	0.014
Sanandaj	47	35.3	0.157	0.06	0.334	0.123	0.045	0.013
Sari	53.069	36.607	0.181	0.07	0.377	0.138	0.039	0.012
Semnan	53.444	35.592	0.219	0.071	0.441	0.14	0.045	0.012
Shahr-e-kord	50.83	32.36	0.231	0.09	0.45	0.167	0.046	0.013
Shiraz	52.531	29.625	0.305	0.109	0.648	0.216	0.066	0.017
Tabriz	46.28	38.05	0.354	0.084	0.775	0.166	0.095	0.015
Tehran	51.466	35.827	0.247	0.077	0.529	0.156	0.059	0.014
Yasuj	51.6	30.66	0.321	0.107	0.699	0.21	0.068	0.015
Yazd	54.37	31.89	0.111	0.04	0.216	0.076	0.014	0.005
Zahedan	60.85	29.45	0.158	0.051	0.33	0.101	0.031	0.008
Zanjan	48.49	36.67	0.191	0.07	0.388	0.138	0.043	0.013

جدول ۵. مقادیر جنبش زمین برآورد شده در تعدادی از مراکز استان‌های کشور براساس سرعت موج برشی ۳۰ متر بالایی خاک.

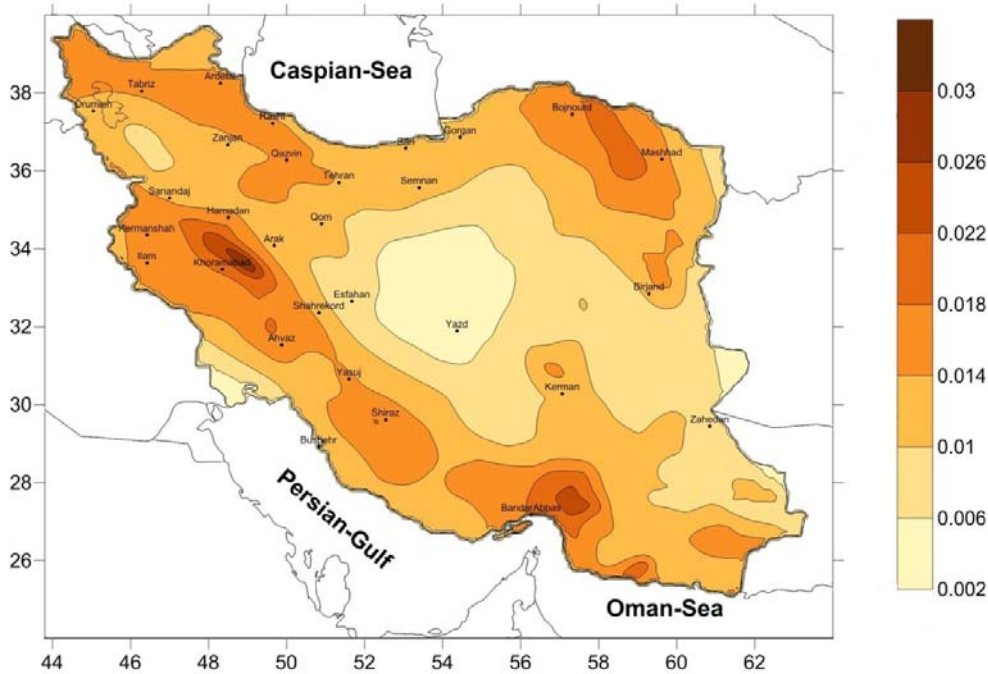
Name	Long.	Lat.	V _{s30} (m/s)	PGA(g)		SA(0.2s)(g)		SA(2s)(g)	
				475 yr	50 yr	475 yr	50 yr	475 yr	50 yr
Ardebil	48.328	38.217	659	0.29	0.089	0.638	0.184	0.078	0.02
Bandar Abbas	56.293	27.193	337	0.475	0.161	1.031	0.338	0.181	0.038
Birjand	59.208	32.876	787	0.18	0.056	0.375	0.114	0.051	0.012
Bojnourd	57.314	37.482	504	0.32	0.104	0.707	0.223	0.114	0.026
Bushehr	50.837	28.977	511	0.271	0.113	0.532	0.215	0.043	0.016
Gorgan	54.385	36.839	291	0.306	0.108	0.652	0.23	0.124	0.026
Hamedan	48.534	34.869	872	0.186	0.061	0.386	0.123	0.056	0.015
Kerman	57.083	30.256	202	0.284	0.112	0.611	0.241	0.144	0.038
Khoramabad	48.371	33.518	821	0.275	0.118	0.559	0.227	0.082	0.021
Mashhad	59.561	36.315	707	0.25	0.085	0.532	0.174	0.07	0.019
Qazvin	50.011	36.281	456	0.286	0.098	0.63	0.21	0.101	0.024
Rasht	49.591	37.292	334	0.332	0.11	0.71	0.236	0.141	0.03
Sari	53.069	36.607	359	0.24	0.096	0.516	0.203	0.073	0.022
Semnan	53.444	35.592	393	0.277	0.094	0.587	0.199	0.084	0.021
Shiraz	52.531	29.625	345	0.395	0.156	0.867	0.328	0.138	0.036
Tehran	51.466	35.827	481	0.296	0.096	0.659	0.204	0.09	0.022



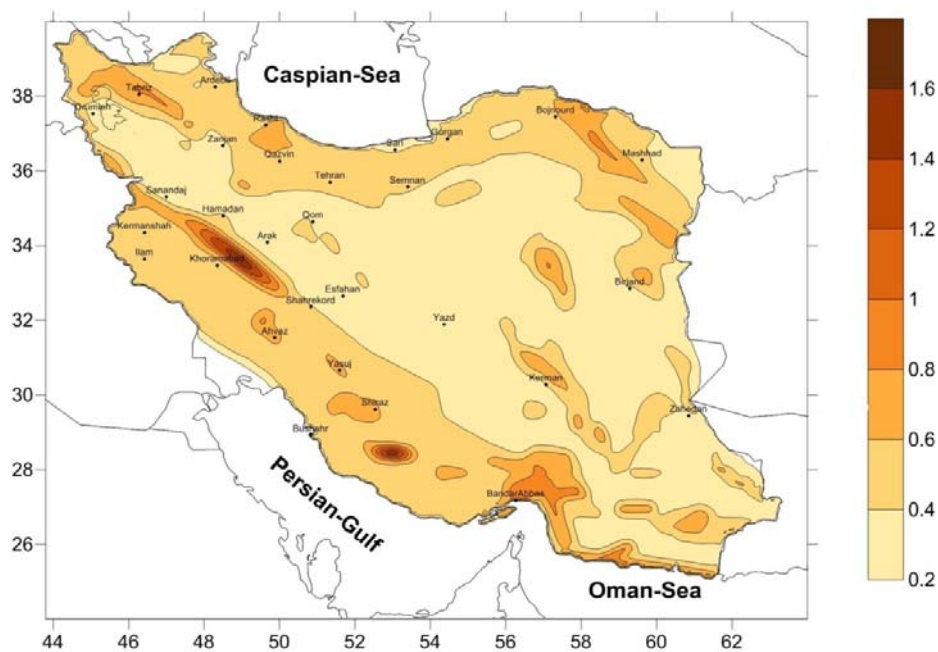
شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.



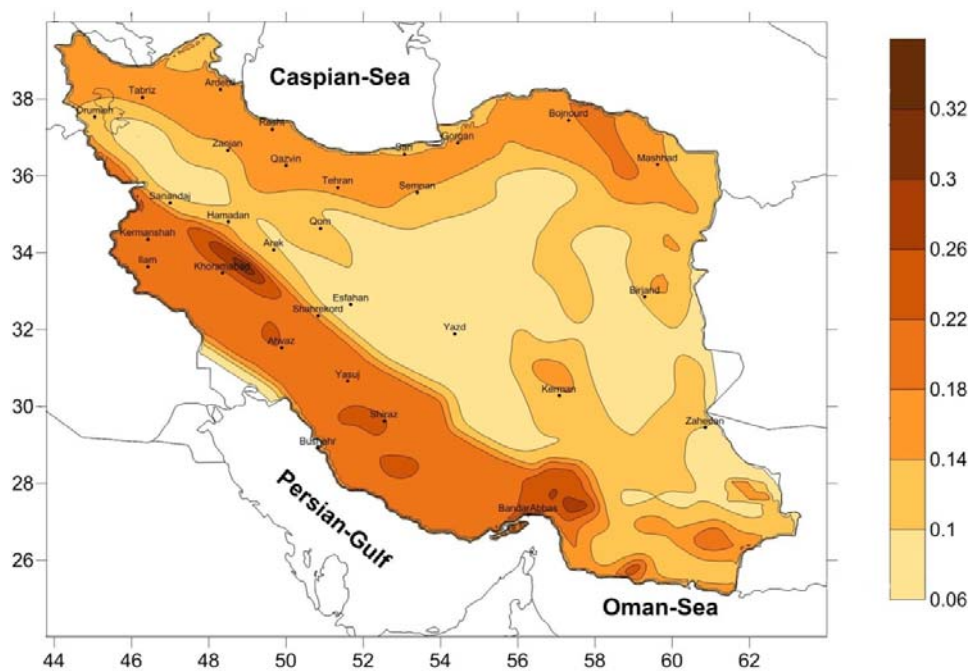
شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۲ ثانیه برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۲ ثانیه برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.



شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.



شکل ۱۲. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر.

۱۰ نتیجه گیری

برای برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی در ایران، ۲۳۸ چشمه بالقوه زمین لرزه در ایران و نواحی مجاور تعیین شد. در گستره محدود به ۴۳ تا ۶۵ درجه طول شرقی و ۲۳ تا ۴۱ درجه عرض شمالی، برای شبکه منظمی شامل ۴۱۳۰۴ نقطه با فواصل ۱۰ کیلومتر و شرایط ساختگاه سنگی، با نرم افزار OpenQuake مقادیر SA و PGA در دوره های تناوب ۰/۲ و ۲ ثانیه برای ۱۰٪ و ۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال) محاسبه و نقشه های پهنه بندی خطر ناشی از جنبش نیرومند زمین تهیه شده است. از مقایسه نقشه PGA مربوط به دوره بازگشت ۴۷۵ سال (شکل ۷)، با نقشه پهنه بندی خطر در آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، (شکل پ-۱)، تفاوت های قابل توجهی مشهود است، به طوری که در برخی نواحی از جمله مناطق جنوبی کشور مانند استان های سیستان و بلوچستان، هرمزگان و فارس، خطر برآورد شده به طور چشمگیری بیشتر از میزان خطر در نقشه موجود در آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ایران است. متأسفانه، چون در مورد چگونگی تهیه این نقشه اطلاعاتی منتشر نشده است، در مورد علت های این تفاوت های چشمگیر نمی توان بحث کرد. از مقایسه نتایج این تحقیق و تحقیقات توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) و حمزه لو و همکاران (۲۰۱۲) (شکل های پ-۲ و پ-۳)، تفاوت قابل ملاحظه ای در مقادیر PGA و شکل پربندها مشاهده می شود. این تفاوت ها ممکن است ناشی از تفاوت پارامترهای لرزه خیزی محاسبه شده، مدل چشمه ها و انتخاب رابطه های تضعیف مورد استفاده باشد. با این حال، در همه این پژوهش ها، مناطقی مانند زون گسلی تبریز، گسل شمال تهران، گسل اصلی عهد حاضر زاگرس و شمال دشت لوت (سامانه گسلی دشت بیاض، آبیض و فردوس) دارای بیشترین مقدار PGA معرفی شده اند. با

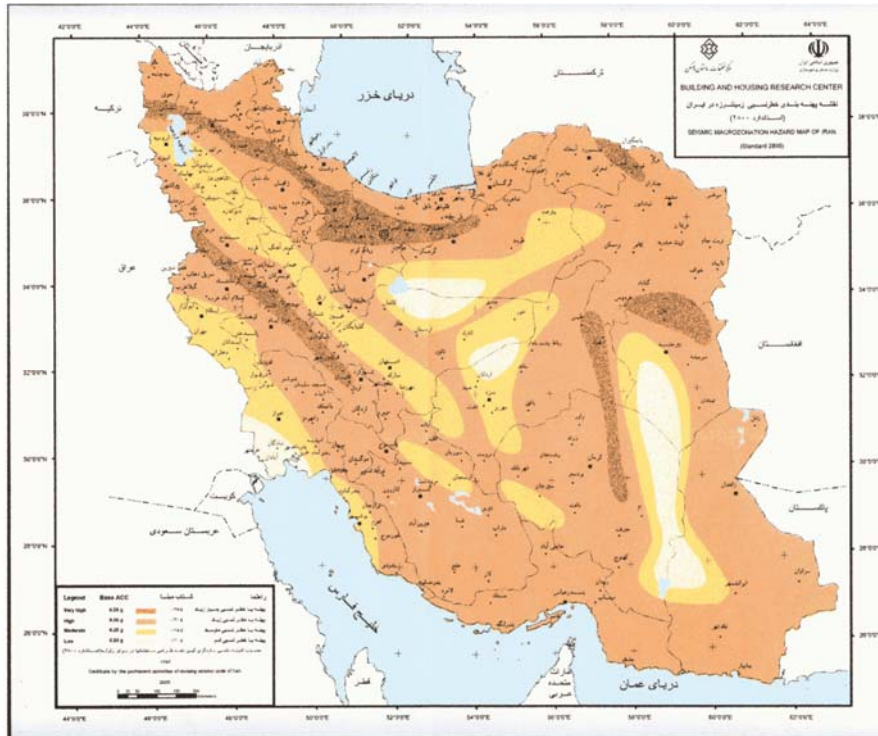
توجه به نقشه های پهنه بندی خطر زمین لرزه تهیه شده در این تحقیق، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، بیشترین سطح خطر برآورد شده در ایران به رویداد زمین لرزه در چشمه های لرزه زای سامانه گسلی عهد حاضر زاگرس (MRF) در مرز زاگرس و ایران مرکزی شامل بخش هایی از استان های لرستان و کرمانشاه مربوط است. کمترین سطوح خطر برآورد شده مربوط به دشت لوت در شرق کرمان، بخش های وسیعی از استان های یزد و اصفهان، و همچنین، بخش هایی از شمال استان کردستان و جنوب استان آذربایجان غربی است. در بین مراکز استان های کشور، بندرعباس و تبریز با ۰/۳۵g بیشترین و یزد و اصفهان با ۰/۱۱g کمترین مقدار PGA روی سنگ بستر را به خود اختصاص داده اند.

روش نوین محاسباتی، امکان ارزیابی مستقل پارامترهای لرزه خیزی برای داده های ناکامل و دارای عدم قطعیت، مدل کردن ۲۳۸ چشمه بالقوه زمین لرزه و استفاده مؤثرتر از پارامترهای گسلش (به ویژه در رابطه های تضعیف نسل جدید) در نرم افزار مورد استفاده، دلالت بر مزیت نسبی نقشه های پهنه بندی تهیه شده در این تحقیق نسبت به کارهای مشابه قبلی دارد. بدیهی است با فراهم شدن اطلاعات پایه جدیدتر، لازم است این گونه نقشه ها، در بازه های زمانی مناسب، بازنگری و روزآمد شود.

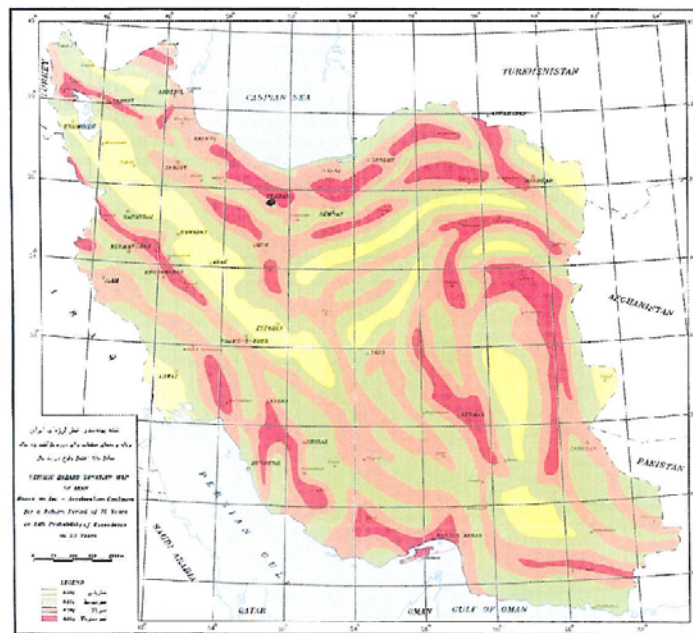
تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۶۲۰۱۰۲۵/۱۰۸ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران صورت گرفته است. از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و مؤسسه ژئوفیزیک برای فراهم آوردن امکان این پژوهش قدردانی می کنیم. همچنین، از داوران محترم برای پیشنهادات ارزنده و دقت نظر در بررسی مقاله حاضر سپاسگزاریم.

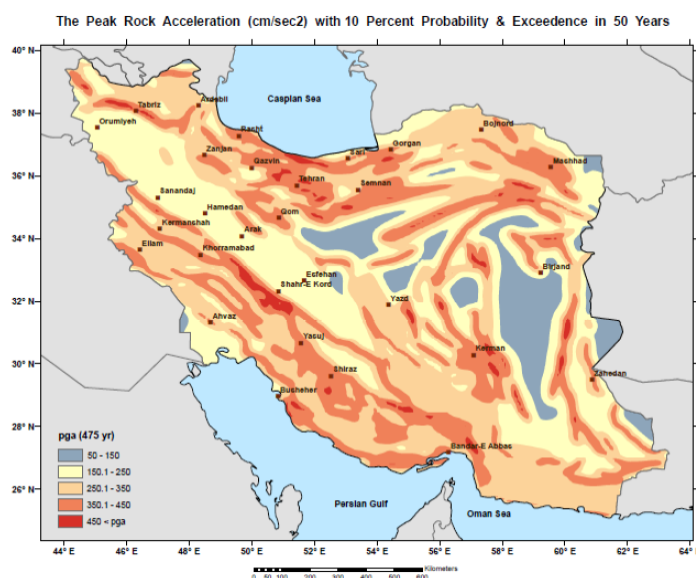
پیوست



شکل پ-۱. نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰)، برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴).



شکل پ-۲. نقشه پهنه‌بندی پیشینه شتاب جنبش زمین برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۷۵ سال (توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹).



شکل پ-۳. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب cm/s^2 در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۱۲).

fold-and-thrust belt, *Geophys. J. Int.*, **115**, 41-61.

Baker, J. W., 2008, An Introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), Handbook, Version 1.3.

Berberian, M., 1976, Contribution to the seismotectonics of Iran, part II. Geological Survey of Iran, Report 39, 516pp.

Berberian, M., 2005, The 2003 Bam urban earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut Block, southeast Iran, *Earthq. Spectra*, **2**, S35-S99.

Bommer, J., 2012, Challenges of building logic trees for probabilistic seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, **28**, 1723-1735.

Boore, D. M. and Atkinson, G. M., 2008, 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**, 99-138.

Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y., 2008, 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**, 139-171.

Chiou, B. S. J. and Youngs, R. R., 2008, An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, **24**, 173-215.

Coppersmith, K. J. and Youngs, R. R., 1986, Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessment with intraplate tectonic

مراجع

کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC)، تهران، ویرایش سوم، ۱۳۵ ص.

Abrahamson, N. A., 2006, Seismic hazard assessment: problems with current practice and future development, in Proc. of the 1st European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva, Switzerland.

Abrahamson, N. A. and Bommer, J. J., 2005, Probability and uncertainty in seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, **21**, 603-607.

Adams, J. and Halchuk, S., 2003, Fourth generation seismic hazard maps of Canada: values for over 650 Canadian localities intended for the 2005 National Building Code of Canada, Geological Survey of Canada Open File, **4459**, 1-155.

Ambraseys, N. N., 1989, Temporary seismic quiescence: SE Turkey, *Geophys. J.*, **96**, 311-331.

Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982, A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, Cambridge.

Baker, C., Jackson, J. and Priestley, K., 1993, Earthquakes on the Kazerun line in the Zagros mountains of Iran: Strike-slip faulting within a

- Hong, H. P. and Goda, K., 2006, A comparison of seismic-hazard and risk deaggregation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 2021-2039.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984, Active tectonics of the Alpine– Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. Int.*, **77**, 185-264.
- Jackson, J., Priestly, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the south Caspian basin, *Geophys. J. Int.*, **148**, 214-245.
- Kassawara, R. and Sandell, L., 2006, Truncation of the lognormal distribution and value of the standard deviation for ground motion models in the Central and eastern United States, EPRI RP 1013105, Department of Energy, Norman A. Abrahamson, Inc.
- Kijko, A. and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 120-134.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 652pp.
- Kulkarni, R. B., Youngs, R. R. and Coppersmith, K. J., 1984, Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis, in *Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, **1**, 263-270.
- McGuire, K. K., 1976, Fortran computer program for seismic risk analysis. Open-File report 76-67, United States Department of the Interior, Geological Survey- 102pp.
- McGuire, R. K. and Toro, G., 1986, Methods of earthquake ground motion estimation for the eastern United States, EPRI RP 2556-16, prepared by Risk Engineering, Inc.
- Mirzaei, N., 1997, *Seismic zoning of Iran*, Ph.D. Dissertation, Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing, 134pp.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1997, Evaluation of uncertainty of earthquake parameters for the purpose of seismic zoning of Iran, *Earthquake Research in China*, **11**, 197-212.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces, *Journal of Earthquake Prediction Research*, **7**, 465-495.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1999, Delineation of potential seismic sources for seismic zoning of Iran, *Journal of Seismology*, **3**, 17-30.
- environments, in *Proc. of the 3rd U.S. National Conf. on Earthquake Engineering*, Charleston, South Carolina, **1**, 301-312.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1583-1606.
- Crowley, H., Monelli, D., Pagani, M., Silva, V. and Weatherill, G., 2011a, *OpenQuake Book*, The GEM Foundation, Pavia, Italy, 102pp.
- Crowley, H., Monelli, D., Pagani, M., Silva, V. and Weatherill, G., 2011b, *OpenQuake User's Manual*, The GEM Foundation, Pavia, Italy, 126pp.
- Delavaud, E., Fabrice, C., Sinan Akkar, F., Scherbaum, L., Danciu, C. E., Beauval, S. E., Drouet, J., Douglas, R., Basili, M., Abdullah, Sandikkaya, M., Segou, E. F. and Nikos, T., 2012, Towards a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe, *Journal of Seismology*, **16**, 451-473.
- Field, E. H., Jordan, T. H. and Cornell, C. A., 2003, OpenSHA - a developing community-modeling environment for seismic hazard analysis, *Seism. Res. Lett.*, **74**, 406-419.
- Frankel, A., 1995, Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States, *Seism. Res. Lett.*, **66**, 8-21.
- Gao, M., 1988, Discussion on annual occurrence rates, *Recent Developments in World Seismology*, **1**, 1-5.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 1363-1367.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K., 2009, An empirical spectral ground motion model for Iran, *Journal of Seismology*, **13**, 499-515.
- Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., Mirza Hessabi, M. and Razavian Amrei, S. A., 2010, Ground motion prediction equations of spectral ordinates and Arias intensity for Iran, *Journal of Earthquake Engineering*, **14**, 1-29.
- Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A. and Dana, F. M., 2007, Attenuation relationships for Iran, *Journal of Earthquake Engineering*, **11**, 469-492.
- Hamzehloo, H., 2005, Determination of causative fault parameters for some recent Iranian earthquakes using near field SH-wave data, *J. Asian Earth Sci.*, **25**, 621-628.
- Hamzehloo, H., Alikhanzadeh, A., Rahmani, M. and Ansari, A., 2012, Seismic hazard maps of Iran, In: *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal.

- assessment, *Nat. Hazards*, Published online: 12 March 2013, DOI 10.1007/s11069-013-0618-x.
- Soghrat, M. R., Khaji, N. and Zafarani, H., 2012, Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model, *Geophys. J. Int.*, **188**, 645-679.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, *Geophys. J. Int.*, **156**, 506-526.
- Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D. and Bergman, E., 2007, The 28 May 2004 Baladeh earthquake (M_w 6.2) in the Alborz, Iran: Implications for the geology of the south Caspian basin margin and for the seismic hazard of Tehran, *Geophys. J. Int.*, **170**, 249-261.
- Tavakoli, B. and Ghafory-Ashtiany, M., 1999, Seismic hazard assessment of Iran, *Annali Di Geofisica*, **42**, 1013-1022.
- Toro, G. and McGuire, R., 1987, Computational procedures for seismic hazard analysis and its uncertainty in the eastern United States, In: *Proceedings of the Third International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Princeton, NJ, 195-206.
- Uhrhammer, R. A., 1986, Characteristics of northern and central California seismicity, *Earthquake Notes*, **57**, 21pp.
- Walker, R. and Jackson, J., 2004, Active tectonics and late cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, paper no. TC5010, *Tectonics*, **23**, doi: 10.1029/2003TC001529.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.
- Yan, J., 1993, Principles and methods to determine spatial distribution function, *Proceedings, PRC/USSR Workshop on Geodynamics and Seismic Risk Assessment*, Beijing, China, 159-167.
- Zafarani, H. and Soghrat, M., 2012, Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **102**, 2031-2045.
- Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, A. S. and Ansari, A., 2008, Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran, *Soil Dynam. Earthquake Eng.*, **28**, 550-576.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N. and Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for Iranian plateau, *Annals of Geophysics*, under review.
- Nowroozi, A., 1976, Seismotectonic provinces of Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 1249-1276.
- Nowroozi, A., 2005, Attenuation relations for peak horizontal and vertical accelerations of earthquake ground motion in Iran: a preliminary analysis, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **7**, 109-128.
- OpenQuakewebsite:
<http://www.globalquakemodel.org/openquake/>.
- Pinho, R., 2012, GEM: a participatory framework for open, state-of-the-art models and tools for earthquake risk assessment worldwide, In: *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal.
- Power, M. S., Coppersmith, K. J., Youngs, R. R., Schartz, D. P. and Swan, R. H., 1981, Seismic exposure analysis for the WNP-2 and WNP-1/4 site, Appendix 2.5K to Amendment No. 18 Final Safety Analysis Report for WNP-2, Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, 63pp.
- Priestley, K., Baker, C. and Jackson, J., 1994, Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian basin and surrounding regions, *Geophys. J. Int.*, **118**, 111-141.
- Rezapour, M. and Mohsenpour, A., 2013, The 2010 M_w 6.5 Rigan, Iran, earthquake aftershock sequence, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **103**, 1793-1800.
- Shabani, E. and Mirzaei, N., 2007, Probabilistic seismic hazard assessment of the Kermanshah-Sanandaj region of Western Iran, *Earthquake Spectra*, **23**, 175-197.
- Shi, Z. and Zhang, T., 1996, Seismic intensity zoning map of China, In: *Achievements of seismic hazard prevention and reduction in China*, Seismological Press, Beijing, 143-164.
- Shi, Z., Yan, J. and Gao, M., 1992, Research on the principles and methodology of seismic zonation-results of the trial in north China, *Acta Seismologica Sinica*, **5**, 305-314.
- Shoja Taheria, J., Naserieh, S. and Hadic, G., 2010, A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau, *Journal of Earthquake Engineering*, **14**, 278-292.
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D. and Pinho, R., 2013, Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk