



پهنه‌بندی لرزه‌ای استان سیستان و بلوچستان به دو روش تعینی و احتمالاتی اصلاح شده

نجمه فاتحی^۱، افسانه نصرآبادی^{۲*}، سید حسن موسوی بفرونی^۲ و محمدرضا سپهوند^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۲- استادیار، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اردکان

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: a.nasrabadi@kgut.ac.ir

واژگان کلیدی

چکیده

برآورد خطر زمین‌لرزه

جنبش نیرومند زمین

استان سیستان و بلوچستان

بیشینه شتاب جنبش زمین

در این بررسی برآورد خطر لرزه‌ای تعینی و احتمالاتی اصلاح شده و پهنه‌بندی لرزه‌ای برای گستره ۲۳/۰۷ تا ۳۳/۴۸ درجه عرض شمالی و ۵۶/۹۲ تا ۶۵/۳۳ درجه طول شرقی، شامل استان سیستان و بلوچستان انجام شده است. به این منظور نقشه تکتونیکی منطقه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با ابعاد ۱:۲۵۰۰۰ و در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه ترسیم شده است. فهرست‌نامه یکنواختی از زمین‌لرزه‌ها شامل ۱۲ زمین‌لرزه تاریخی و ۹۰۵ زمین‌لرزه دستگاهی از ۱۹۰۱/۸/۶ تا ۲۰۱۶/۱/۲۲، با بزرگای $M_w \geq 4$ تهیه گردید. سپس با استفاده از این اطلاعات تعداد ۵۴ چشمه بالقوه زمین‌لرزه، در گستره مورد مطالعه به صورت پهنه‌ای تعیین گردید. با استفاده از تابع توزیع مکانی، آهنگ رویداد زمین‌لرزه برای محدوده‌های بزرگی گوناگون در هر چشمه بالقوه زمین‌لرزه برآورد شده است. در انتها بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین بر روی سنگ بستر با استفاده از نرم‌افزار Open Quake برای شبکه‌ای شامل ۴۴۳۵۲ نقطه برآورد گردید. بر اساس تحلیل خطر تعینی برای چشمه‌ها، بیشترین PGA در محدوده استان، ۰/۵۵g و کمترین مقدار ۰/۰۱g برآورد شده است. همچنین برآورد خطر احتمالاتی اصلاح شده انجام گردید و مقادیر PGA برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ سال که معادل ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال است، تعیین و نقشه پهنه‌بندی برای آن رسم شد. برای این دوره بازگشت که مبنای طرح در نظر گرفته می‌شود، حداقل شتاب مورد انتظار در استان ۰/۰۴g و حداکثر ۰/۴g است. نتایج به دست آمده با نتایج سایر پژوهشگران در منطقه و همچنین با نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش ۴) مقایسه شد.

۱- مقدمه

در استان سیستان و بلوچستان مطالعه موردی در مورد تحلیل خطر لرزه صورت نگرفته است؛ اما مطالعاتی در زمینه تحلیل خطر زمین‌لرزه برای کل ایران و همچنین رسم نقشه‌های پهنه‌بندی بیشینه شتاب زمین صورت گرفته است. این پژوهش‌ها شامل تحقیقات توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹)، حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲) و موسوی و همکاران (۱۳۹۳) است؛ که در این تحقیق بررسی و مقایسه نتایج آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

۲- ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی منطقه

استان سیستان و بلوچستان در محدوده ۲۵/۰۷ تا ۳۱/۴۸ درجه عرض شمالی و ۵۸/۹۲ تا ۶۳/۳۳ درجه طول شرقی قرار گرفته است. ابعاد گستره طرح به میزان ۲ درجه از هر طرف، فراتر از موقعیت جغرافیایی استان در نظر گرفته شده است؛ تا اثر تمام چشمه‌های مؤثر بر نقاط داخل استان منظور گردد. بخش‌های شمالی و مرکزی این استان در ایالت لرزه زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران و بخش‌های جنوبی در ایالت لرزه زمین‌ساختی مکران قرار دارد. الگوی ساختاری حوضه فلیش شرق ایران، به لحاظ جای‌گیری میان دو صفحه قاره‌ای لوت و هیلمند و به ویژه چیرگی زمین ساخت برخوردی، بسیار پیچیده و نشانگر یک کوهزایی درون قاره‌ای است. با این حال، به نظر می‌رسد که در این ناحیه، راندگی‌ها نقش اساسی دارند؛ به گونه‌ای که چین‌خوردگی سنگ‌ها پیامد عملکرد راندگی‌هاست. در بخش میانی حوضه، گسل‌های امتدادلغز راستگرد روند تقریبی شمالی - جنوبی داشته و به سمت شرق شیب زیادی دارند؛ ولی در پایانه‌های شمالی و جنوبی به دلیل چرخش‌های راستگرد بلوک لوت و بلوک هیلمند، ضمن تغییر در روند ساختارها، سرشت گسل‌ها به طور عمده از نوع راندگی‌های همپوشان است. عمق سائزموژنیک زلزله‌ها در این منطقه را می‌توان بین ۸ تا ۲۰ کیلومتر در نظر گرفت (میرزایی، ۱۳۸۳). زون فروورانش مکران (MSZ) از تنگه هرمز در ایران تا نزدیک کراچی در پاکستان به طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر امتداد دارد. برای اولین بار استونلی (Stoneley, 1974) فرض کرد که زون فروورانش مکران مرز بین صفحات عربستان - اوراسیا را تشکیل می‌دهد. مرزهای MSZ مناطق پیچیده تکتونیکی هستند. سیستم گسلی میناب-زندان هم مرز غربی این منطقه را تشکیل می‌دهد؛ که یک منطقه گذار بین برخورد قاره‌ای زاگرس و فروورانش اقیانوسی است. در قسمت جنوب، خط الراس موری قرار دارد؛ که مرز صفحه عربستان - هند را مشخص می‌کند (حیدرزاده و همکاران، ۲۰۰۹). ورنانت و همکاران (Vernant et al., 004) با به کارگیری یک شبکه ۲۷ ایستگاهی GPS در ایران و شمال عمان نشان دادند که نرخ فروورانش در MSZ تقریباً ۱۹ میلی‌متر در سال است. در بخش‌های جنوبی آن گسل‌ها از نوع راندگی یا معکوس هستند. عمق زلزله‌ها در بخش‌های ساحلی دریای

کشور ایران به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند کوهزایی آلپ-همالیا که یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان محسوب می‌گردد، همواره متحمل خسارت‌های سنگین ناشی از زلزله بوده است. با توجه به پیچیدگی طبیعت، این رویداد قابلیت پیش‌بینی قطعی را ندارد؛ اما می‌توان با استفاده از راهکارهایی همانند برآورد خطر لرزه‌ای تأثیر بسزایی در کاهش خسارت ناشی از آن داشت. نقشه‌های پهنه‌بندی که در نتیجه برآورد خطر لرزه‌ای ترسیم می‌گردند، امکان شناسایی مناطق پرخطر را فراهم می‌سازند و همچنین موجب دقت در طراحی سازه‌های مختلف می‌گردند. استان سیستان و بلوچستان در شرق ایران قرار داشته و از لحاظ استراتژیک از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین وجود منطقه آزاد اقتصادی چابهار و پتانسیل‌های معدنی و حمل‌ونقل در این منطقه، موجب می‌شود تا اهمیت انجام برآورد خطر لرزه‌ای برای این منطقه دوچندان شود.

راهکار تعینی تحلیل خطر برای سازه‌هایی که از درجه اهمیت بالایی برخوردارند مانند سدها، بیمارستان‌ها، نیروگاه‌های اتمی و... کاربرد دارند. این راهکار بالاترین میزان خطر را برای مناطق مربوط به احداث این دسته از سازه‌ها ارائه می‌کند. در راهکار احتمالاتی تمام زلزله‌های آسیب‌رسان در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه با استفاده از روش احتمالی امکان برآورد پتانسیل جنبش نیرومند زمین با در نظر گرفتن احتمال فزونی مشخص ممکن می‌شود. در مناطق لرزه‌خیز، هرگونه تصمیم‌گیری در مورد سازه‌های موجود و یا جدید باید با در نظر گرفتن اثرهای زلزله‌های احتمالی آینده باشد. راهکار پیشنهادی (Cornell (1968)، بیشترین کاربرد را برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه دارد. به منظور بهینه کردن این روش، اصلاحاتی در جزئیات آن صورت گرفته است؛ که توجه به داده‌های ناکافی و عدم قطعیت‌ها از آن جمله است. در این مطالعه ترجیح داده شده است از روش برآورد خطر احتمالاتی اصلاح شده توسط شی و همکاران (۱۹۹۲)، برای برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران استفاده شود. دلیل ترجیح دادن این روش نسبت به روش فرانکل (۱۹۹۵)، استفاده نشدن اطلاعات ارزشمندی از قبیل ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی و گسل‌های فعال، در روش فرانکل است. در صورتی که این اطلاعات در تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و پارامترهای مربوط به آن‌ها نقش مهمی دارند و در روش شی و همکاران، از آن‌ها استفاده می‌شود. دلیل دیگر این انتخاب، کوتاه بودن محدوده زمانی کاتالوگ نسبت به دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در بعضی مناطق از جمله نواحی مرکزی و شرقی ایران است. به طوری که تعداد زیادی گسل‌های فعال و مستعد وقوع زمین‌لرزه در این مناطق وجود دارد؛ که هیچ زمین‌لرزه‌ای بر روی آن‌ها ثبت نشده است و در روش فرانکل برای آن‌ها لرزه‌خیزی در نظر گرفته نمی‌شود؛ حال آن‌که در روش شی و همکاران بر اساس شواهد دیگر، لرزه‌خیزی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۱۵).

(۱۹۶۳-۱۹۰۰)، که اطلاعات مه‌لرزه‌ای به همراه داده‌های دستگاهی با کیفیت پایین برای تعیین پارامترهای مختلف زمین‌لرزه به کار گرفته می‌شوند، با عدم قطعیت ۰/۳ تا ۰/۵ واحد بزرگی مواجه هستیم و برای دوره‌ای که از ابزار مدرن استفاده می‌شود (۱۹۹۴-۱۹۶۴)، عدم قطعیت ۰/۲ تا ۰/۴ را در واحد بزرگی داریم. از آنجا که بزرگای همه رویدادهای فهرست‌نامه یکدست شده و به M_W تبدیل شده‌اند؛ علاوه بر عدم قطعیت یکای اصلی، باید میزان خطای تبدیل یکای اصلی به M_W نیز در نظر گرفته شود. برای انجام این تحقیق عدم قطعیت‌های مربوط به بزرگی زمین‌لرزه‌های تا پایان ۲۰۱۲ از کاتالوگ موسوی و همکاران (۲۰۱۵) استخراج شده و در ادامه از عدم قطعیت‌های مربوط به تبدیل بزرگای به M_W استفاده شده است؛ که در پیوست مقادیر آن آورده شده است.

جدول ۱: پنجره‌های شناسایی پس‌لرزه‌ها (موسوی و همکاران، ۲۰۱۵).

Manitude	L_1 (km)	L_2 (km)	T_1 (days)	T_2 (days)
3.5	6	26	4	22
4.0	9	30	8	42
4.5	13	35	15	83
5.0	20	40	27	155
5.5	30	47	51	290
6.0	45	54	94	510
6.5	67	61	174	790
7.0	100	70	322	915
7.5	149	81	597	960
8.0	223	94	1108	985

۲-۲- تعیین چشمه‌های زمین‌لرزه

در فلات ایران به دو دلیل چشمه برخی از زمین‌لرزه‌ها به بیش از یک گسل ارتباط داده می‌شود: تراکم بالای گسل‌های فعال و دقت پایین داده‌های لرزه‌ای. علاوه بر این گاهی حرکت تدریجی در راستای بسیاری از گسل‌های فعال در دوره‌های زمانی طولانی، به صورت خزش بوده و یک زمین‌لرزه بزرگ را به وجود نمی‌آورند (آرین و همکاران، ۱۳۸۹). به طور کلی چهار نوع چشمه لرزه‌ای شامل نقطه‌ای، خطی، پهنه‌ای یا سطحی و حجمی وجود دارد. در ایران، با توجه به کمیت و کیفیت داده‌های موجود مناسب‌ترین شیوه تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه به صورت پهنه‌ای است. در تعیین چشمه‌های زمین‌لرزه دو فرض اساسی مدنظر قرار می‌گیرد:

۱- تکرار زمین‌لرزه. این فرض بر این اصل دلالت دارد که ترجیحاً امکان رخداد زلزله‌ها در مناطقی که قبلاً زلزله رخ داده است، بیشتر از مناطق دیگر است.

۲- ساخت‌های تکتونیکی مشابه زمین‌لرزه‌های مشابه ایجاد می‌کنند و نبود ثبت داده‌های لرزه‌ای بر روی یک ساخت زمین‌شناسی به معنی عدم رخداد زلزله در آن منطقه نیست (موسوی و همکاران، ۱۳۹۳).

در عمل نقشه‌های تکتونیکی و نقشه رو مرکز زمین‌لرزه‌ها به

عمان کم است و با فاصله از ساحل، عمق زلزله‌ها افزایش می‌یابد؛ به طوری که به حدود ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر می‌رسد (آقاتابای، ۱۳۹۳).

۳- داده‌های مورد استفاده و روش مطالعه

۳-۱- فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌ها

برای فراهم کردن فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌ها، از فهرست‌نامه تهیه شده توسط موسوی و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. به منظور کامل کردن این فهرست، داده‌های زلزله‌های بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ابتدای ۲۰۱۶ از سایت‌های معتبر از جمله مرکز لرزه‌نگاری بین‌المللی (ISC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) جمع‌آوری شدند. این فهرست‌نامه، شامل ۵۶۵ زلزله دستگاهی با بزرگای $M_W \geq 4$ است. در ادامه تمام بزرگای یکسان‌سازی شدند. از آنجا که برای این تحقیق از کاتالوگ موسوی و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شده است؛ لذا برای یکسان‌سازی بزرگی زمین‌لرزه‌ها در گستره‌ی مورد بررسی، از روابط آماری به دست آمده توسط ایشان استفاده شده است. این روابط در پیوست آمده است. بزرگای گشتاوری (M_W)، که معیار انرژی آزاد شده در زلزله است، مناسب‌ترین مقیاس برای اندازه‌گیری بزرگای زلزله است؛ زیرا این مقیاس وابسته به ماهیت فیزیکی گسلش بوده و مستقل از تجهیزات لرزه‌نگاری محسوب می‌شود (Kanamori, 1979).

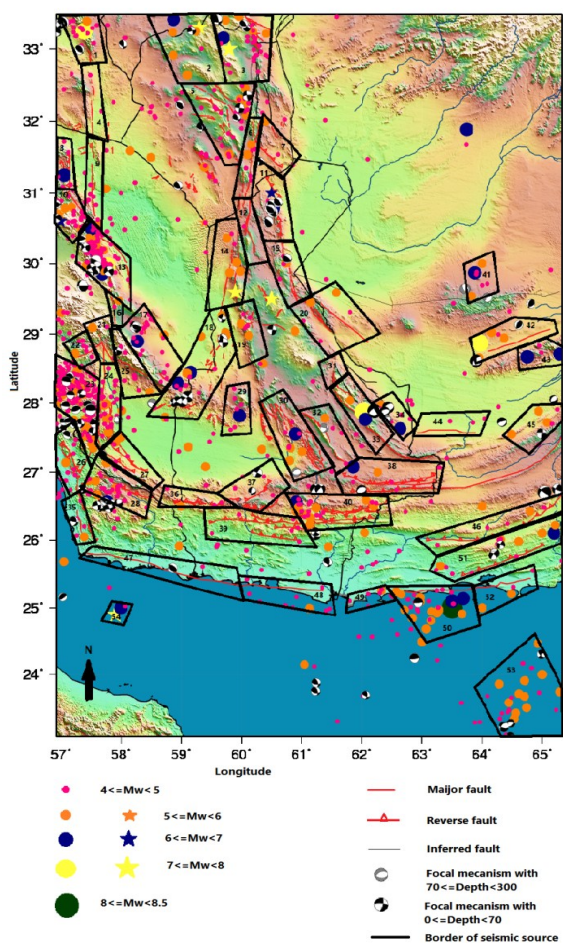
در برآورد خطر زمین‌لرزه، لازم است که رویدادهای وابسته مانند پیش‌لرزه و پس‌لرزه از فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌ها حذف شود. راهکار کرنل (Cornell, 1968) بر این اصل بنیان نهاده شده که زمین‌لرزه‌ها به صورت پواسونی رخ می‌دهند؛ به این معنی که در پهنه مورد نظر به صورت تصادفی در مکان و زمان رخ می‌دهند و همچنین بزرگای زمین‌لرزه‌ها در یک پهنه لرزه‌خیز مستقل از یکدیگرند. با توجه به این موضوع باید رویدادهای وابسته پیش‌لرزه و پس‌لرزه از فهرست‌نامه حذف شوند. برای این مرحله از پنجره‌های زمانی و مکانی، با روش اوهامر (Uhrhammer, 1968)، (L_1, T_1) و گاردنر و ناپوف (Gardner and Knopoff, 1974)، (L_2, T_2) استفاده شده است؛ که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$L_1(\text{km}) = e^{-1.024+0.804M_W} \quad (1)$$

$$T_1(\text{days}) = e^{-2.87+1.233M_W}$$

در جدول ۱ این پنجره‌ها به نمایش گذاشته شده است.

در مطالعات انجام شده توسط میرزائی و همکاران (۱۹۷۷a) عدم قطعیت بزرگی، برای زمین‌لرزه‌های ایران بر اساس کیفیت و کمیت اطلاعات موجود برای سه دوره‌ی زمانی تعیین شده است: دوره تاریخی (قبل از ۱۹۰۰)، که برای آن از مدارک و اسناد تاریخی و مشاهدات میدانی استفاده شده است؛ عدم قطعیت بزرگی از ۴/۰ تا ۸/۰ واحد بزرگی متغیر است. برای زلزله‌های دستگاهی در اوایل

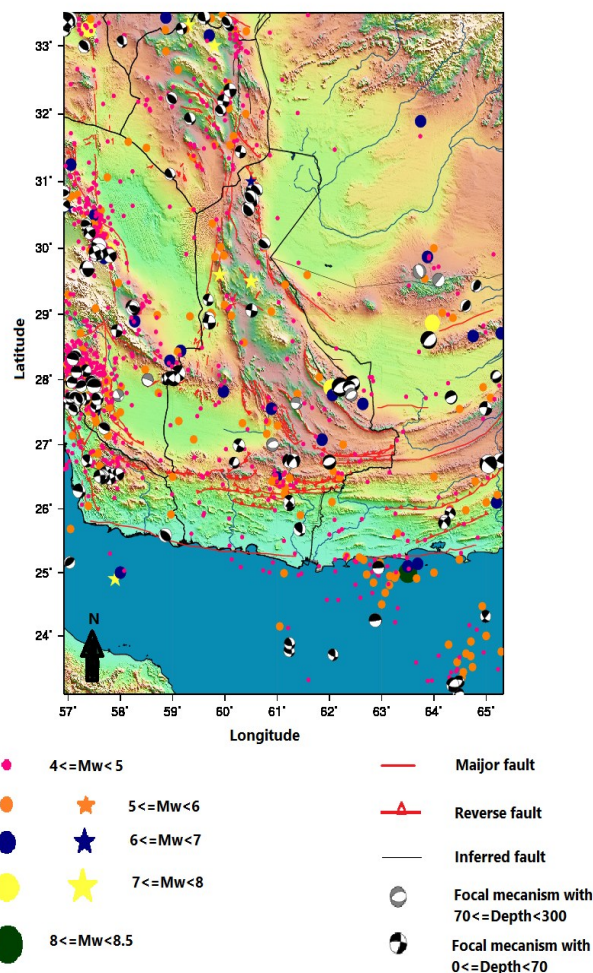


شکل ۲: چشمه‌های تعیین شده برای گستره تحقیق.

۳-۳- روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین

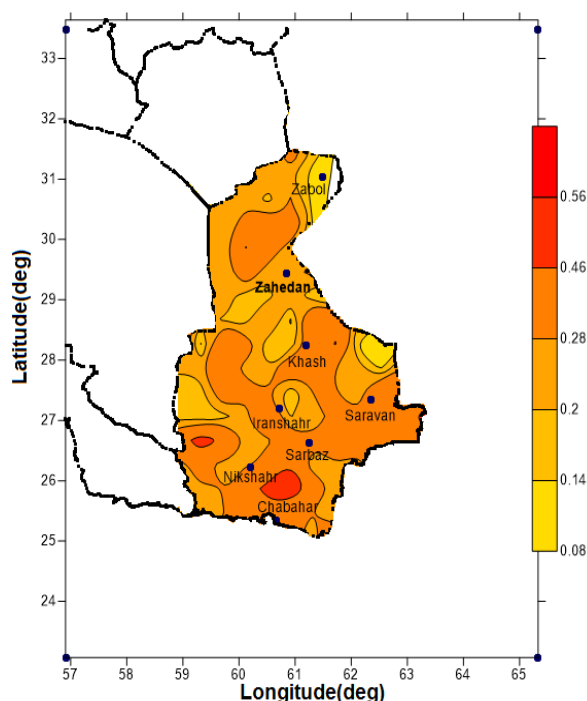
مهم‌ترین پارامترهای جنبش نیرومند زمین که در ارزیابی خطر زمین‌لرزه و رفتار سازه‌های مختلف در برابر آن‌ها مورد نظر بوده و دارای کاربرد مهندسی است، بیشینه شتاب، بیشینه سرعت و شتاب طیفی در میراثی‌های مختلف است. بهترین توصیف جنبش نیرومند زمین، به وسیله شتاب‌نگارها به دست می‌آید. شتاب نگاشت به دست آمده، تاریخچه زمانی شتاب را، در محلی که نصب شده است، بیان می‌کند. روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین، با دو روش تجربی و تئوری تعیین می‌شوند. در روش اول، تابعی از فاصله، بزرگای نوع خاک و سازوکار گسلش، مرتبط با پارامترهای جنبش زمین حاصل از زلزله‌های به وقوع پیوسته تعریف می‌شود. در روش دوم با استفاده از اطلاعات مربوط به چشمه زمین‌لرزه، انتشار امواج بین چشمه، سایت و شرایط ساختگاهی جنبش زمین، پارامترها شبیه‌سازی می‌شوند. برتری روش دوم به در نظر گرفتن اثرات ساختگاهی و امکان تأثیر جهت یافتگی است (حمزه‌لو، ۱۳۸۳). برای این تحقیق نیاز به انتخاب رابطه تضعیفی است؛ که اثرات گسلش را نیز در نظر بگیرد. در روابط تضعیف نسل جدید (Next Generation Attenuation) این اثر نیز در نظر گرفته شده است. بر اساس نظر شجاع طاهری و همکاران

عنوان راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرد و تصمیم نهایی در مورد چگونگی مدل کردن و هندسه چشمه‌های زمین‌لرزه بر اساس سایر اطلاعات و مدارک علمی موجود و همچنین به میزان قابل توجهی بر پایه دیدگاه‌ها و تجربه پژوهشگران صورت می‌گیرد. با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و استفاده از فهرست‌نامه داده‌ها و در نظر گرفتن ساز و کار کانونی زلزله‌ها، که از سایت CMT دریافت شدند؛ نقشه تکتونیکی با ابعاد گستره طرح تهیه شد. شکل ۱، نقشه مربوط به گسل‌ها، زلزله‌ها و ساز و کار کانونی زلزله‌ها و توپوگرافی منطقه را در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد. ابعاد گستره طرح به میزان ۲ درجه از هر طرف، فراتر از موقعیت جغرافیایی استان در نظر گرفته شده است؛ تا اثر تمام چشمه‌های مؤثر بر نقاط داخل استان منظور شود. با توجه به موارد ذکر شده و با استفاده از نقشه تکتونیکی تهیه شده، تعداد ۵۴ چشمه بالقوه پهنه‌ای تعیین شد (شکل ۲).



شکل ۱: نقشه مربوط به گسل‌ها (خطوط قرمز رنگ)، زمین‌لرزه‌ها (دایره‌های رنگی) و ساز و کار کانونی زمین‌لرزه‌ها.

یکسان در گستره مورد مطالعه ترسیم شد. شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش قطعی را نشان می‌دهد. تمام شتاب‌ها بر روی سنگ بستر محاسبه شده است. این نقشه‌ها زمانی که مطالعه موردی و خاصی برای سازه معینی ممکن نباشد، ابزار عملی و مناسبی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه است (میرزایی، ۱۹۹۷).



شکل ۳: نقشه پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه برحسب g در استان سیستان و بلوچستان بر اساس راهکار تعینی.

۵- برآورد خطر احتمالاتی به روش اصلاح شده

در روش احتمالی خطر زمین‌لرزه، تحلیل بر پایه تمامی حالات ممکن از مقادیر ممکن بزرگای زمین‌لرزه حاصل از توان لرزه زایی چشمه‌های مدل شده لرزه زا در گستره مورد نظر و در کلیه فاصله‌های ممکن از ساختمان مورد مطالعه با در نظر گرفتن هر ترکیب و به کمک برنامه‌های نرم‌افزاری انجام می‌گیرد. مراحل مربوط به تحلیل خطر احتمالاتی شامل شناسایی همه چشمه‌های بالقوه زلزله، تعیین تابع چگالی احتمال فاصله سایت از چشمه زلزله، $f_R(r)$ ، تعیین تابع چگالی احتمال بزرگی زلزله محتمل در پهنه یا ساختمان مورد نظر $f_M(m)$ ، پیش‌بینی نتایج شدت جنبش زمین با استفاده از توابعی که مرتبط با بزرگی، فاصله و سایر پارامترها هستند؛ ترکیب عدم قطعیت‌ها در اندازه زلزله، مکان و شدت جنبش زمین با استفاده از قضیه احتمال کل و برآورد خطر زمین‌لرزه در گستره طرح است (Baker, 2008). در این تحقیق جهت استفاده بهینه از اطلاعات لرزه زمین‌ساختی و زمین‌شناسی و برای جبران کمبود داده‌های لرزه‌ای از روش برآورد خطر احتمالاتی اصلاح شده استفاده شده است (Shi et al., 1992).

(ShojaTaheri et al., 2010)، سه مدل از این روابط با اطمینان برای ایران نیز قابل استفاده هستند. این روابط عبارت‌اند از: Boore and Atkinson, 2008, Campbell and Bozorgnia, 2008, Chiou and Youngs, 2008.

با توجه به این‌که در این تحقیق، برآورد خطر به دو روش تعینی و احتمالاتی انجام شده است و برای هر دو راهکار باید از یک رابطه تضعیف استفاده شود؛ لذا رابط Boore and Atkinson (2008) برای این تحقیق در نظر گرفته شد.

۴- برآورد خطر زمین‌لرزه به روش تعینی در گستره

مورد مطالعه

در روش تعینی به طور معمول یک زمین‌لرزه کنترلی برحسب بزرگی و فاصله از ساختمان در نظر گرفته می‌شود. این روش محافظه‌کارانه، صرفاً در مورد بعضی از سازه‌های خاص نظیر سدها و نیروگاه‌ها که تخریب آن‌ها عواقب فاجعه باری ایجاد می‌کند، به کار می‌رود. این روش اطلاعاتی در مورد احتمال وقوع زمین‌لرزه کنترلی و همچنین میزان لرزش مورد انتظار در اختیار ما نمی‌گذارد. مراحل آن شامل شناسایی چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، انتخاب زمین‌لرزه کنترلی برای هر چشمه، انتخاب رابطه تضعیف مناسب و برآورد خطر زمین‌لرزه در گستره طرح است. گسل‌ها و بزرگای انتخابی مربوط به هر چشمه در جدول پ-۱ آمده است. انتخاب زلزله کنترلی می‌تواند برحسب بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در چشمه، رابطه‌های تجربی بزرگ-طول و یا مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی انتخاب شود.

در این تحقیق برای تعیین زمین‌لرزه‌ی کنترلی در چشمه‌ها از روابط ولز و کوپر اسمیت (روابط ۲ تا ۵) (Wells and Coppersmith, 1994)، برای انواع گسل‌ها استفاده شده است. در برخی از چشمه‌ها بزرگای زمین‌لرزه رخ داده بیشتر از بزرگای به دست آمده از روابط تجربی مورد نظر است؛ که در این موارد از بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در چشمه به عنوان زمین‌لرزه کنترلی، استفاده شده است. L طول گسل برحسب کیلومتر است.

$$L(Km) M = 5.16 + 1.12 \log L \quad (2)$$

$$M = 5.00 + 1.22 \log L \quad (3)$$

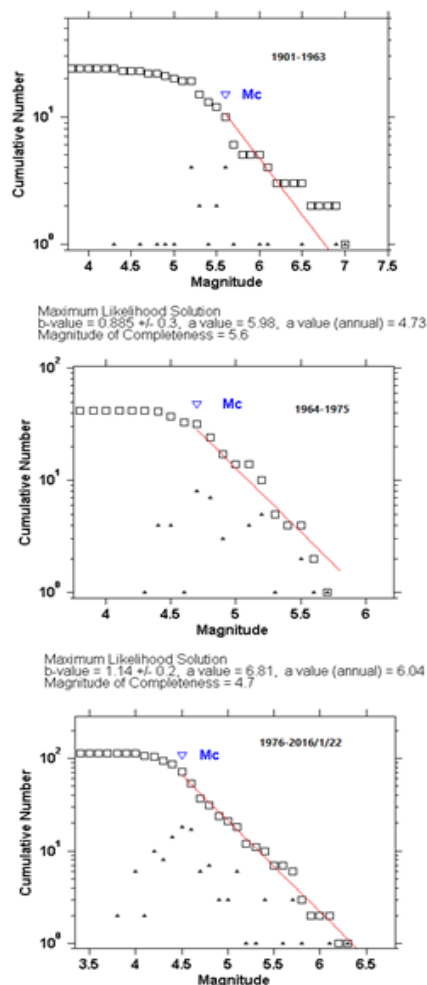
$$M = 4.86 + 1.32 \log L \quad (4)$$

$$M = 5.08 + 1.16 \log L \quad (5)$$

با تقسیم ناحیه مورد نظر به صورت شبکه‌ای از نقاط با فاصله ۰/۴ درجه طول و عرض جغرافیایی و با استفاده از زمین‌لرزه کنترلی و رابطه تضعیف بور و اتکینسون (Boore and Atkinson, 2008)، برآورد خطر تعینی برای هر نقطه شبکه با استفاده از کدی که نوشته شد، انجام گردید و در انتها خم‌های هم شتاب با فاصله‌های غیر

۵-۱- تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی

پس از آماده‌سازی فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌ها و تعیین چشمه‌های بالقوه زلزله باید پارامترهای لرزه‌خیزی تعیین شود. در این مرحله برای به دست آوردن آستانه کامل بودن داده‌ها، M_c ، برای محدوده‌های زمانی متفاوت، از نرم‌افزار zmap استفاده می‌شود. آستانه کامل بودن حدی از بزرگی زمین‌لرزه‌های فهرست‌نامه است، که بعد از آن بزرگی زلزله‌ها به طور کامل ثبت شده‌اند. شکل ۴ نتایج مربوط به نرم‌افزار zmap را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نتایج مربوط به نرم‌افزار zmap

در این شکل در بازه‌های زمانی مشخص شده، داده‌هایی شامل بزرگای زلزله، موقعیت جغرافیایی، زمان رخداد زلزله و همچنین عمق مربوط به هر زلزله را به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده تا در آن بازه زمانی مشخص آستانه کامل بودن بزرگی مشخص گردد. پس از تعیین M_c مربوط به بازه‌های زمانی مختلف، برای تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی مرتبط با گستره طرح از روش کیجکو و سلوول (Kijko and Sellevoll, 1992) استفاده شده است. این روش امکان تأثیر عدم قطعیت را به صورت مستقل برای هر رخداد زلزله فراهم می‌کند.

با استفاده از نرم‌افزار Kijko (2001) می‌توان پارامترهای لرزه‌خیزی λ و β (که $\beta = b \ln 10$ است و b نسبت زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر است) و همچنین M_{max} مربوط به منطقه مورد مطالعه را برآورد کرد (جدول ۲). این پارامترها مربوط به تمام گستره مورد مطالعه است. برای تعیین مستقیم پارامترهای لرزه‌خیزی برای هر چشمه به علت ناکافی بودن داده‌های زمین‌لرزه‌ای، با مشکلاتی مواجه هستیم. لذا با استفاده از مفهوم تابع توزیع مکانی، سهم هر چشمه را از نرخ لرزه‌خیزی مشخص می‌کنیم (میرزایی، ۱۹۹۷؛ Shi et al., 1992). در مفهوم تابع توزیع مکانی، علاوه بر تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در هر چشمه در بازه‌های بزرگی متفاوت، اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ساختارهای موجود و جایگاه زمین‌ساختی مربوط به هر چشمه نیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به داده‌های موجود در ایران، تابع توزیع مکانی بر پایه‌ی چهار عامل تعیین می‌شود. میزان اطمینان از چشمه بالقوه زمین‌لرزه تعیین شده، جایگاه زمین‌ساختی چشمه، عنصرهای ساختاری موجود در چشمه و تعداد زمین‌لرزه‌های هر چشمه تعیین می‌گردد. این عوامل ذکر شده، فاکتورهای کنترل‌کننده تابع توزیع مکانی نیز نامیده می‌شوند (میرزایی، ۱۹۹۷).

برای محاسبه تابع توزیع مکانی از فرمول‌بندی تهیه شده توسط یان (Yan, 1993)، جمع‌بندی وزن‌های معادل استفاده می‌شود. ابتدا برای هر فاکتور کنترل‌کننده مانند k ، در بازه بزرگی Δm ، در هر چشمه بالقوه زمین‌لرزه مانند l ، عددی نسبت داده می‌شود. این عدد ضریب توزیع نام دارد؛ که با در نظر گرفتن m_j به عنوان مقدار میانی محدوده بزرگی به صورت $W_{l,mjk}$ نمایش داده می‌شود. سپس در منطقه مورد مطالعه، برای به دست آوردن سهم نسبی هر چشمه به سهم کل، ضرایب توزیع مربوط به فاکتور k ام بهنجار می‌شوند؛ تا میزان تأثیر آن‌ها مشخص شود و از مجموع بار مربوط به ضریب k ام، بار کلی به دست می‌آید (Shi and Zhang, 1996; Gao, 1988):

$$Q_{l,mjk} = \frac{W_{l,mjk}}{\sum_l W_{l,mjk}} \quad \text{و} \quad \sum_k Q_{l,mjk} = R_{l,mj} \quad (6)$$

و در نهایت با بهنجار کردن بارهای کلی تابع توزیع مکانی برای بازه بزرگی l ام به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_{l,mj} = \frac{R_{l,mj}}{\sum_l R_{l,mj}} \quad (7)$$

نمونه‌ای از تابع توزیع مکانی از چند چشمه در بازه‌های بزرگی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲: پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به منطقه مورد مطالعه.

$\beta = 2.12 \pm 0.4$ ($b = 0.92 \pm 0.02$)
$\lambda = 14.49 \pm 0.5$ ($M_{min} = 4$)
$M_{max} = 8.14 \pm 0.8$ (for SIG(Xmax) = .80)

جدول ۳: نمونه‌ای از تابع توزیع مکانی مربوط به تعدادی از چشمه‌ها در گستره مورد مطالعه.

شماره چشمه	تابع توزیع مکانی		
	$5.5 < M_w \leq 6$	$6 < M_w \leq 6.5$	$6.5 < M_w \leq 7$
49	0.02542		
50	0.04383	0.0557	0.13453
51	0.04622	0.06379	0.10057
52	0.09685		
53	0.03431		

مقادیر β ، $M_{\max}$ ، λ نیز از خروجی نرم‌افزار Kijko (2001) تعیین گردیده است. در بخش‌هایی که اطلاعات کافی به منظور تعریف چشمه‌ها وجود نداشته باشد، لرزه‌خیزی زمینه (Background seismicity) در نظر گرفته می‌شود. بزرگی این زمین‌لرزه بستگی به فعالیت زمین ساختی منطقه دارد و همواره از بیشینه بزرگی هر یک از چشمه‌های تعیین شده در آن ناحیه کوچک‌تر است (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۹). با توجه به نبود اطلاعات کافی از منطقه، به ویژه در ناحیه مکران، به منظور برآورد بهتر خطر احتمالاتی در منطقه، استفاده از لرزه‌خیزی زمینه ضروری به نظر می‌رسد. برای ایالت‌های لرزه زمین ساختی ایران مرکزی، شرق ایران و مکران بزرگی ۵/۵ در نظر گرفته شده است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۳). با به کارگیری این مفهوم نرخ لرزه‌خیزی تعیین شده، با رابطه‌ی ۸ در بازه‌های بزرگی $4 < M_w \leq 4.5$ و $4.5 < M_w \leq 5$ برای منطقه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (جدول ۴).

نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها برای هر بازه بزرگی Δm ، برای گستره مورد نظر از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\lambda_{mj} = \frac{2\lambda \exp[-\beta(M_j - M_{\min})] \sinh(0.5\beta\Delta m)}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]} \quad (۸)$$

که در آن، λ و β پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه، m_j مقدار میانه مربوط به هر بازه بزرگی، $\sinh$ تابع سینوس هذلولوی، Δm بازه بزرگی، $M_{\min}$ حداقل بزرگی تأثیرگذار بر روی سازه مهندسی، $M_{\max}$ بیشینه بزرگی زمین‌لرزه محتمل در گستره طرح است. برای چشمه بالقوه ۱ ام میانگین نرخ رویداد سالیانه برای محدوده بزرگی Δm از رابطه زیر به دست می‌آید (Shi and Zhang, 1996):

$$\lambda_{l,mj} = \lambda_{mj} f_{l,mj} \quad (۹)$$

که در آن $\lambda_{l,mj}$ و $f_{l,mj}$ به ترتیب آهنگ رویداد سالیانه و تابع توزیع مکانی در بازه بزرگی l ام برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه ۱ ام است. محدوده بزرگی برای این تحقیق ۰/۵ در نظر گرفته شده و

جدول ۴: لرزه‌خیزی زمینه برای تمام گستره طرح.

محدوده بزرگا	نرخ لرزه‌خیزی زمینه		
	$4 < M_w \leq 4.5$	$4.5 < M_w \leq 5$	$5 < M_w \leq 5.5$
نرخ لرزه‌خیزی زمینه	9.469701	3.280732	1.136528

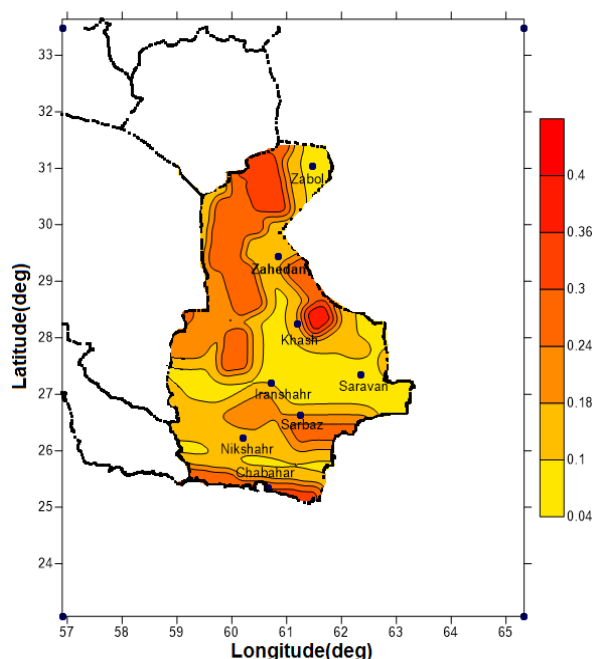
یا (IML; Intensity-Measure Levels) هستیم. علاوه بر این احتمال گسیختگی ناشی از زلزله نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع ورودی‌ها برای نرم‌افزار باید به گونه‌ای باشد که احتمال‌های مختلف شکست را برای چشمه تعیین شده، در نظر بگیرد. رابطه‌ای که در تحلیل خطر احتمالاتی توسط نرم‌افزار استفاده می‌شود عبارت است از:

۵-۲- برآورد خطر زمین‌لرزه

در این تحقیق از آخرین نسخه نرم‌افزار Open Quake (Pagani et al., 2014) استفاده شده است. ریاضیات این نرم‌افزار بر اساس روش کرنل و مک گوری (Cornell, 1968; McGuire, 1976) و بر اساس فرمول‌بندی فیلد و همکاران (Field et al., 2003) است. در تحلیل خطر احتمالاتی به دنبال احتمال فزونی شدت پارامتر جنبش (IMT; Intensity-Measure Types) از یک سطح شدت مشخص

$$Prob(IMT \geq IML | Site, Forecast) = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - \sum_{n=1}^{N(i)} Prob(IMT \geq IML | Site, Rup_{n,i}) Prob(Rup_{n,i})) \quad (۱۰)$$

پارامترهای جنبش زمین به طور خاص برای مرکز استان و چند شهر مهم بر روی سنگ بستر محاسبه و در جدول ۵ آمده است.



شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی بر حسب g برای استان سیستان و بلوچستان با راهکار احتمالاتی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال عمر مفید سازه، سطح مبنای بهره‌برداری (D.B.E) بر روی سنگ بستر.

Forecast مفهوم پیش‌بینی گسیختگی ناشی از زلزله است؛ که با نرم‌افزار محاسبه می‌شود. این رابطه، نسبت به روابط مرسوم جهت برآورد خطر چند اختلاف دارد. واضح‌ترین اختلاف این است که در آن به طور مستقیم با احتمال مواجه هستیم. در حالی که در مورد فرمول‌های قبلی مجموع میانگین نرخ‌های سالیانه با هم جمع می‌شود و در پایان، احتمال محاسبه می‌گردد. تفاوت دیگر این است که روابط مرسوم شامل اجتماع بزرگی و فاصله است؛ در حالی که در این فرمول‌بندی جمع گسسته بزرگی‌ها و سطوح گسیختگی سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه فرض پواسونی بودن رویدادها نیز در نظر گرفته شده است (Field et al., 2003). گستره طرح با ابعاد ۵ کیلومتر در طول و عرض جغرافیایی توسط نرم‌افزار شبکه‌بندی گردید. برآورد خطر لرزه‌ای توسط نرم‌افزار، با در نظر گرفتن ۵۴ چشمه پهنه‌ای و مشخصات مربوط به هر چشمه شامل: ابعاد چشمه، عمق بالایی و پایینی صفحه شکست، نسبت طول به عرض صفحه شکست و همچنین پارامترهای مربوط به گسلش ($strike, dip, rake$)، صورت گرفت (Pagani et al., 2016). برای هر چشمه آهنگ رویداد زمین‌لرزه بر اساس مفهوم تابع توزیع مکانی و با در نظر گرفتن لرزه‌خیزی زمینه محاسبه شده است. به این ترتیب محاسبات برای تعداد ۴۴۳۵۲ نقطه در شبکه‌بندی و با در نظر گرفتن ساختگاه سنگی و با استفاده از رابطه تضعیف بور و اتکینسون (Boore and Atkinson, 2008) انجام گرفته و مقادیر PGA برای دوره بازگشت ۴۷۵ (معادل ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال عمر مفید سازه)، برای میرایی ۵٪ محاسبه و بر اساس نتایج، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه رسم گردید (شکل ۵). همچنین

جدول ۵: بیشینه شتاب افقی بر روی سنگ بستر برای تعدادی از شهرهای استان سیستان و بلوچستان.

نام شهر	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	بیشینه شتاب افقی جنبش نیرومند زمین دوره بازگشت ۴۷۵ سال
ایران‌شهر	60.71	27.18	0.1g
چابهار	60.65	25.33	0.3g
خاش	61.19	28.23	0.2g
زابل	61.48	31.03	0.04g
زاهدان	60.84	29.43	0.1g
سراوان	62.35	27.33	0.04g
سرباز	61.25	26.62	0.2g
نیک شهر	60.21	26.21	0.1g

جغرافیایی صورت گرفت و خم‌های هم شتاب در فواصل غیر یکسان در استان سیستان و بلوچستان ترسیم گردید.

با توجه به شکل ۴ بیشترین PGA در محدوده استان سیستان و بلوچستان، ۰/۵۵g به دست آمده که مربوط به نقطه‌ای با مختصات جغرافیایی ۶۰/۹۲ درجه طول شرقی و ۲۵/۸۷ عرض شمالی است. شهرستان زاهدان، مرکز استان سیستان و بلوچستان در محدوده با بیشینه شتاب ۰/۲۵g قرار گرفته است.

۶- نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی لرزه‌ای استان سیستان و بلوچستان به روش تعینی انجام گردید. در مجموع ۵۴ چشمه بالقوه زمین‌لرزه در گستره مورد مطالعه بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌ای، زمین‌شناختی و زمین‌ساختی تعیین گردید. پس از تعیین بیشینه توان لرزه‌ای چشمه‌ها و انتخاب رابطه تضعیف مناسب، تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب و برای شبکه‌ای از نقاط با ابعاد ۰/۵ درجه در طول و عرض

دانست.

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن سرعت موج برشی بر روی سنگ بستر انجام گرفته است و در انجام آن از روش‌های نوین محاسباتی و به روزترین نرم‌افزار انجام تحلیل خطر استفاده شده است. به ویژه به کارگیری اثرات گسلش و استفاده از روابط تضعیف نسل جدید نکات قابل توجهی است؛ که در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است. در این تحقیق برای اولین بار چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در کشورهای هم‌جوار که در گستره طرح قرار داشتند؛ در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است که با فراهم شدن اطلاعات پایه‌ای جدیدتر می‌توان این نقشه‌ها را به روز کرد.

۷- پیوست

برای یکسان‌سازی بزرگی زمین‌لرزه‌ها در گستره‌ی مورد بررسی از روابط آماری زیر که توسط موسوی و همکاران (۲۰۱۵) به دست آمده، استفاده شده است. σ عدم قطعیت است.

$$M_W = 1.298 m_b - 1.349 \quad \sigma = 0.2 \quad 3.9 \leq m_b < 6.2 \quad (1-p)$$

$$M_W = 0.67 M_s + 1.945 \quad \sigma = 0.16 \quad 3 \leq M_s \leq 6.1 \quad (2-p) a$$

$$M_W = 0.94 M_s + 0.32 \quad \sigma = 0.17 \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.1 \quad (2-p) b$$

بزرگی برحسب M_N برای سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵:

$$M_W = 0.948 M_N + 0.664 \quad \sigma = 0.18-0.19 \quad (3-p) a$$

بزرگی برحسب M_N برای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵:

$$M_W = 0.922 M_N + 0.494 \quad \sigma = 0.2 \quad (3-p) c$$

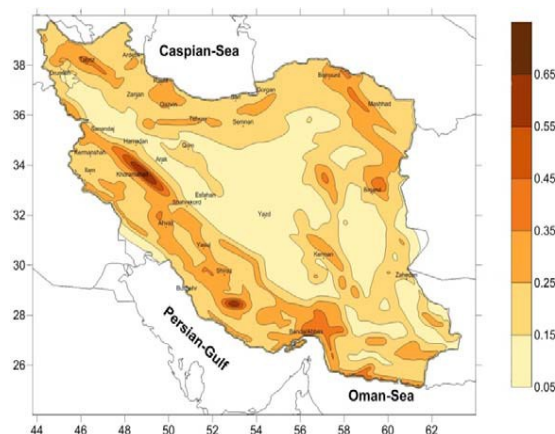
$$M_W = 0.81 M_l + 1.098 \quad \sigma = 0.19 \quad 3.7 \leq M_l \leq 6.4 \quad (4-p)$$

در راهکار احتمالاتی نیز با استفاده از نرم‌افزار OpenQuake

شبکه‌بندی با ابعاد ۰/۰۵ درجه در طول و عرض جغرافیایی صورت گرفته و نتایج برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال ترسیم گردیده است.

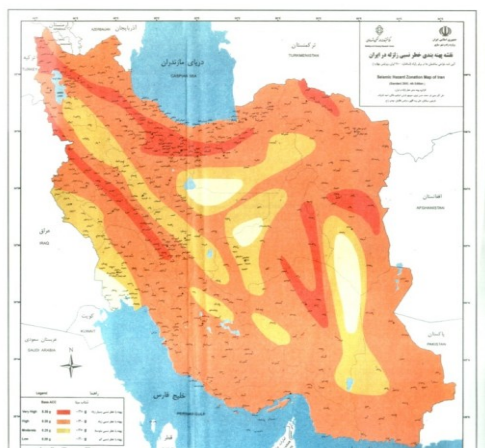
بر پایه تقسیم‌بندی ارائه شده در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زمین‌لرزه (استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۴)، نقشه پهنه‌بندی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال دربرگیرنده ۴ منطقه است: مناطق با سطح خطر بسیار بالا، $PGA > 0.35g$ ، مناطق با سطح خطر بالا، $0.35g < PGA < 0.3g$ ، مناطق با سطح خطر متوسط، $0.3g < PGA < 0.25g$ و مناطق با خطر پایین، $PGA < 0.25g$ (شکل پ-۲). بر پایه این تقسیم‌بندی و نقشه ارائه شده مناطق استان، در محدوده خطر نسبی بسیار بالا، بالا و متوسط قرار گرفته‌اند و بخش‌هایی نیز در پهنه خطر نسبی پایین قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر نقشه پهنه‌بندی PGA برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال معادل ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال عمر مفید سازه (سطح مبنای بهره‌برداری D.B.E) نشان می‌دهد که تقریباً بیش از نیمی از استان در پهنه با سطح خطر نسبی متوسط و کم و پایین‌تر قرار گرفته، و بقیه استان در پهنه خطر نسبی بسیار زیاد، پهنه خطر نسبی زیاد قرار گرفته است. در نقشه تهیه شده توسط موسوی و همکاران (۱۳۹۳) میزان خطر کمتری برای مناطق مختلف استان برآورد شده است. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برای ایران که توسط توکلی و آشتیانی (۱۹۹۹) تهیه شده است؛ که در شکل پ-۳ قرار گرفته است. با نقشه به دست آمده از این تحقیق مقایسه شده است؛ که نتیجه این مقایسه بیانگر این مطلب است که در نقشه حاضر مناطق با خطر بالا و بسیار بالا بخش‌های بیشتری از استان را در برمی‌گیرند. همچنین در نقشه پهنه‌بندی بیشینه‌ای که توسط حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲) تهیه شده است (شکل پ-۴)، نیز این تفاوت آشکار دیده می‌شود و مناطق با خطر بسیار بالا و بالای کمتری را نشان می‌دهد. علت این تفاوت‌ها را نمی‌توان به طور قطعی مشخص کرد. شاید بتوان به کارگیری چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه که در کشورهای هم‌جوار قرار گرفته‌اند؛ را یکی از دلایل این تفاوت‌ها

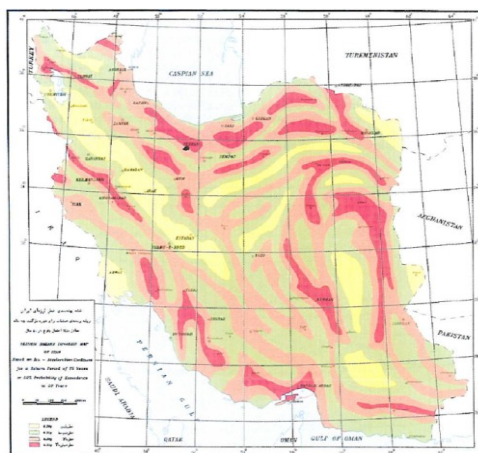


شکل پ-۱: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی برحسب g برای ایران برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال بر روی سنگ بستر (موسوی و همکاران، ۱۳۹۳).

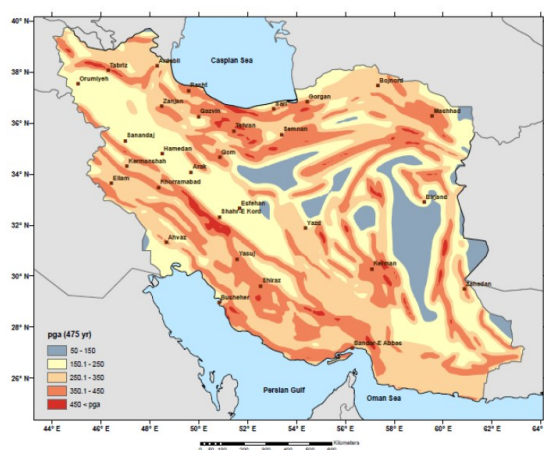
فاتحی و همکاران، پهنه‌بندی لرزه‌ای استان سیستان و بلوچستان به دو روش تعینی و احتمالاتی اصلاح شده، صفحات ۲۶۹-۲۵۵.



شکل پ-۲: نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰) برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳.



شکل پ-۳: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (توکل و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹).



شکل پ-۴: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب cm/s^2 در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۱۲).

جدول پ-۱: گسل‌ها و بزرگای انتخابی مربوط به هر چشمه.

بیشینه بزرگای در نظر گرفته شده	بیشینه بزرگا (با استفاده از رابطه کوپراسمیت)	بیشینه بزرگا (رخداد در چشمه با بزرگای بیش از ۵)	طول گسل‌های شاخص در چشمه	گسل‌های شاخص مربوط به هر چشمه	شماره چشمه
7.3	6.7	7.3(1978/9/16)	27.8km	بخشی از گسل نایبند که راستالغز راستگرد است	1
7.6		7.6(763)			2
7.1	7.1	7(1493/1/10)	53.4km	گسل اصلی مربوط به چهارگوشه شاه‌رخت 1:250000	3
7.2	7.2		61.2km	بخشی از گسل نایبند	4
7.4	7.4	5.7(1998/4/10)	100.2km	گسل‌های اصلی مربوط به چهارگوشه 1:250000 بیرجند و گسل اسماعیل آباد	5
7.5	7.5	5.6 (1928/3/8)	111.3km	بخش‌هایی از گسل‌های نه شرقی و نه غربی که امتداد لغز راستگرد هستند	6
7.1	7.1	5.1 (1993/1/27)	55.7 km	گسل تراستی بندان	7
7.2	7.2	6.4(1911/4/18)	66.8 km	بخشی از گسل لکرکوه که سازوکار کانونی آن معکوس است	8
7.4	7.4	5.7(1989/11/4)	111.3 km	بخشی از گسل نایبند	9
7.1	7.1	6(1864/1/17)	55.7 km	بخشی از گسل لکرکوه که سازوکار آن امتدادلغز است	10
6.9	6.9	6.5(734)	37.1 km	گسل تراستی سفیدابه و قسمت بالای گسل زاهدان که گسل تراستی است	11
7.4	7.4		100km	ادامه گسل نه غربی و گسل غرب آساگی	12
7.8	7.8	7.2(1981/7/28)	200km	گسل شهداد (فشاری)، گسل سیرج-گیلاف (راست لغز راستگرد)، گسل گوک (فشاری)	13
7.8	7.8	7(1838)	250km	گسل کهورک، بخشی از نه‌بندان، گسل نصرت آباد (گسل امتداد لغز راستگرد با مؤلفه فشاری)	14
7.7	7.7	5.2(1992/9/11)	200km	گسل زاهدان	15
6.9	6.9		37.1km	بخشی از گسل نایبند	16
7.4	7.4	6.2(2003/12/26)	100km	گسل بم (امتدادلغز راستگرد با مؤلفه کوچک شیب لغز فشاری)	17
6.6	6.6	6.5(2010/12/20)	22.3km	گسل‌های اصلی مربوط به چهارگوشه جهان آباد 1:250000	18
6.6	6.6	5.6(1971/9/8)	18.6km	گسل اصلی	19
7.3	7.3	5.3 (2000/10/23)	89.1km	گسل‌های اصلی مربوط به چهارگوشه 1:250000 زاهدان و گسل اصلی kirtakar مربوط به کشور پاکستان	20
6.9	6.9	5.9(1989/11/20)	37.1km	شامل بخشی از گسل سبزواران، دلفارد و چاه مزرعه	21
6.7	6.7	5.2(1983/1/31)	27.8km	بخشی از گسل چاه مزرعه	22
6.9	6.9	6.6(1999/3/4)	37.1km	بخشی از گسل‌های مربوط به چهارگوشه 1:250000 میناب، بخشی از گسل سبزواران	23
7.4	7.4	5.4(2011/6/15)	111.3km	بخش‌هایی از گسل‌های سبزواران، دار انار (معکوس) و جیرفت (معکوس)	24
7.1	7.1	5.3(1998/6/10)	55.7km	گسل جبال بارز	25
7.3	7.3	5.6 (1951/12/30)	89.1km	بخش‌هایی از گسل سبزواران، گسل میناب-زندان	26
7.3	7.3	5.9 (1947/10/3)	74.2 km	بخش‌هایی از گسل جیرفت و گسل دار انار	27
7.3	7.3	6.2(2013/5/11)	74.2 km	گسل پشگیرم (معکوس)، گسل دارپهن (معکوس)	28
6.6		6.6 (1969/11/7)			29
7.4	7.4	6.1 (1968/8/2)	111.3 km	گسل‌های اصلی مربوط به چهارگوشه 1:250000 ایرانشهر	30
6.7	6.7		22.3 km	بخش کوچکی از گسل سراوان و گسل گزو	31
7.4	7.4	5.2(2009/4/30)	100km	گسل بیرگ (فشاری)	32
7.6	7.4	7.6(2013/4/16)	111.3 km	شامل بخش‌هایی از گسل‌های سراوان، گزو	33
6.5		6.5 (1934/6/13)			34
7.1	7.1	5.1(1987/2/18)	55.7 km	گسل گازان	35
7.4	7.4	5.6(1926/5/19)	111.3 km	گسل بشاگرد (تراستی)	36
7.1	7.1		55.7 km	گسل لاشار (معکوس) و گسل کاجه (تراستی)	37
7.7	7.7	6(2005/3/13)	170km	گسل کنار (معکوس)، گسل جنوب زابلی (معکوس) و گسل بم پشت (معکوس)	38
7.7	7.7		167 km	گسل‌های معکوس کهورکان، تلگانه و دانار کالاک	39
7.7	7.7	6.1(1979/1/10)	150km	گسل مورتون، گسل پیشامگ (سازوکار راندگی)، گسل فیروزآباد (معکوس) و بخشی از گسل قصرقند (معکوس)	40
6		6(1987/8/10)			41

جدول پ-۱: ادامه.

بیشینه بزرگای در نظر گرفته شده	بیشینه بزرگا (با استفاده از رابطه کوپراسمیت)	بیشینه بزرگا (رخداد در چشمه با بزرگای بیش از ۵)	طول گسل‌های شاخص در چشمه	گسل‌های شاخص مربوط به هر چشمه	شماره چشمه
7.4	7.4	7.2(2011/1/18)	111.3 km	گسل اصلی dalbandin مربوط به کشور پاکستان	42
6.5		6.5 (2000/6/4)			43
7.4	7.4	5.8(2011/8/10)	98.9 km	گسل اصلی ladgasht مربوط به کشور پاکستان	44
5.5		5.5(1980/4/28)			45
7.8	7.8	5.4 (1936/6/11)	222.6 km	گسل اصلی hoshab مربوط به کشور پاکستان (فشارشی)	46
7.9	7.9		278.3 km	بخشی از گسل مکران	47
7.6	7.6	5.7(1972/8/6)	148.4 km	بخشی از گسل مکران	48
5.6		5.6 (1978/2/10)			49
8.1	7.4	8.1(1945/11/27)	111.3 km	گسل اصلی makran coast در کشور پاکستان	50
7.6	7.6	6.9 (1953/7/23)	167 km	گسل اصلی nairud در کشور پاکستان	51
7.3	7.3	5.7(2013/10/22)	89 km	بخشی از گسل اصلی makran coast در کشور پاکستان	52
5.6		5.6(1934/4/19)			53
7.7		7.7(1483/2/18)			54

۸- منابع

- spectral periods between 0.01s 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.
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
- Field, E.H., Jordan, T.H. and Cornell, C.A., 2003, Open SHA: a developing community modeling environment for seismic hazard analysis, Seismological Research Letters, 74, 406-419.
- 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.
- Heidarzadeh, M.D., Pirooz, M.H., Zaker, N.C. and Yalciner, A., 2009, Preliminary estimation of the tsunami hazards associated with the Makran subduction zone at the north western Indian Ocean, Nat Hazards, 48, 229-243.
- Kanamori, H., 1979, A semi-empirical approach to prediction of long- period ground motion from great earth quakes, Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1645-1670.
- Kijko, A. and Sellevoll, M.A., 1992, Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data File, Part II. Incorporation of Magnitude
- آرین، م.، احمدی کمیجانی، ن.، سلگی، ع. و رحیمی، ن.، ۱۳۸۹، لرزه زمین‌ساخت و برآورد خطر زمین‌لرزه ساختگاه سد جریانی دز، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، ۲، ۱-۱۴.
- آق اتابای، م.، ۱۳۹۳، الگوی توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های جنوب خاور زاگرس، فصلنامه علوم زمین، ۹۴، ۲۴۵-۲۵۴.
- حمزه لو، ح.، ۱۳۸۳، جنبش نیرومند زمین و پیش‌بینی پارامترهای آن، سمینار آموزشی مبانی لرزه زمین‌ساخت و تحلیل خطر نسبی زلزله، صفحات ۸۷-۹۶.
- فرزندگان، ا.، ۱۳۸۳، مفاهیم بنیادین زلزله با نگاهی به لرزه‌خیزی ایران، سمینار آموزشی مبانی لرزه زمین‌ساخت و تحلیل خطر نسبی زلزله، صفحات ۴۷-۵۶.
- کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم.
- موسوی بفرئی، س.ح.، میرزائی، ن.، شعبانی، ا. و اسکندری قادری، م.، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴، ۱۵-۳۸.
- میرزایی، ن.، ۱۳۸۳، ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی ایران، مبانی لرزه زمین‌ساخت و تحلیل خطر نسبی زمین‌لرزه، صفحات ۸۶-۶۸.
- Baker, J.W., 2008, An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Handbook, Version 1.3.
- 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

- map of China, In: Achievements of seismic hazard prevention and reduction in China, Seismological Press, Beijing, pp. 143-164.
- Shoja Taheri, 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, 278-29.
- Stoneley, R., 1974, Evolution of the continental margins bounding a former Tethys, In: Burk CA, Drake CL (eds) *The geology of continental margins*, Springer, New York, pp. 889-903.
- Uhrhammer, R.A., 1986, Characteristics of northern and central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57 (1), 21.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, MR., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Che'ry, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the middle east constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophys J Int.*, 157, 381-398.
- 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, pp. 159-167.
- Heterogeneity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 120-134.
- McGuire, R.K., 1976, Fortran computer program for seismic risk analysis, Open-File report 76-67, United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Mirzaei, N., 1997, *Seismic Zoning of Iran*, Ph.D. Dissertation in Geophysics, Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing, Peoples Republic of China.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y.T., 1999, Delineation of potential seismic sources for seismic zoning of Iran, *J. Seismol*, 3, 17-30.
- Mousavi-Bafrouei, S.H., Mirzaei, N. and Shabani, E., 2015, A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau. *Annals of Geophysics*, 57 (6).
- Pagani, M., Silva, V., Weatherill, G., Rao, A. and Simionato, M., 2016, *The Open Quake-engine User Instruction Manual*, GEM Foundation.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M. and Vigano, D., 2014, *Open Quake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model*, *Seismological Research Letters*, 85, 692-702.
- 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.
- Shi, Z. and Zhang, T., 1996, Seismic intensity zoning

Seismic hazard zoning of Sistan and Baluchestan province using deterministic and modified probabilistic methods

Najme Fatehi¹, Afsaneh Nasrabadi^{2*}, Seyed Hasan Mousavi Bafrouei³ and Mohammad Reza Sepahvand²

1- M.Sc. Student, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Ardakan, Ardakan, Iran

Received: 21 December 2016; Accepted: 4 July 2017

Corresponding author: a.nasrabadi@kgut.ac.ir

Keywords

Earthquake Hazard Assessment
Strong Ground Motion
Sistan and Baluchestan Province
Maximum Ground Motion
Acceleration

Extended Abstract

Summary

Iran has located on Alpine-Himalayan seismic line, which is one of seismically active areas in the world; and consequently, various earthquakes may happen that lead to heavy casualties. Given the complexity of nature there is no a definite prediction of an earthquake event but the amount of damages as a result of an earthquake can be greatly reduced with the help of statistical methods such as seismic hazard assessment. In this study, a modified deterministic and probabilistic seismic hazard assessment for a latitude range of 23.07 to 33.48 degrees of north and longitude of 56.92 to 65.33 degrees of east was conducted in Sistan-Baluchistan Province. For this purpose, a tectonic investigation was made by using geological surveys at a scale of 1: 250,000, and taking into account the topography of the area. A list of earthquakes happening in the area is prepared including 12 historical earthquakes and 905 instrumental earthquakes with magnitudes of the unit $M_w \geq 4$ since 1901/08/06 to 2016/22/01. As a result, a total of 54 potential sources of earthquakes were determined in the study area. Finally, the maximum strong ground motion acceleration on the bedrock was estimated. Based on deterministic seismic hazard analysis set for the sources, most PGA within the Province, equal to 0.55 g and the least amount of PGA equal to 0.01 g were estimated. The correction of probabilistic hazard assessment was carried out, and the PGA values for return period of 475 years was determined, which was equal to 10% likely increase in 50 years, and consequently, zoning maps were drawn for each rotation of return. For the return period of 475 years considered in this research, the minimum expected acceleration of 0.04 g and maximum acceleration of 0.4 g were obtained. The results were compared with the results obtained by other researchers, and also, with the zoning map of the relative hazard of earthquakes in Iran (Standard 2800, edition 4).

Introduction

Given the complexity of nature and with regard to current knowledge, we are not capable to predict earthquakes. Probabilistic statistical techniques are the most appropriate strategy to deal with heavy losses caused by an earthquake. To estimate some design parameters of strong ground motion for possible future earthquakes, seismic hazard analysis of past studies is made. In general, seismic hazard analysis is carried out using both deterministic and probabilistic methods, and seismic zoning done is using these two methods. As a result, seismic zoning areas with low or very low risk and relief centers, such as hospitals and important structures such as power plants to be built in these areas, are identified. Thus, these maps are of great importance in the issue of urban planning.

Methodology and Approaches

For this study, the catalogue including 12 historical earthquakes and 905 instrumental earthquakes were collected. The earthquakes along with topography, and fault indicator and focal mechanism of earthquakes were shown on a map. Considering the important points in determining potential sources of earthquakes, these sources were determined. Furthermore, earthquake hazard assessment was determined using the distance between the site and the weakened relationship of sources. Then, threshold completeness of earthquakes in time games was determined using Zmap software. Seismicity parameters for the entire range were also determined using the Kijko software. The probabilistic hazard assessment was also done using this software. Zoning maps of maximum horizontal acceleration were drawn

using both deterministic and probabilistic seismic hazard assessment methods.

Results and Conclusions

In this study, based on a zoning map with a return period of 475 years, large areas of Sistan-Baluchistan Province are in very high risk. These results should be considered in the planning and urban management. The proposals submitted for this area are as follows:

- 1- Increasing the number of seismic stations, especially in the southern part of Sistan and Baluchestan Province.
 - 2- Performing studies to determine shear wave velocity in the soil.
 - 3- Performing microzonation studies in the region.
-