

برآورد احتمالاتی و واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه در استان گلستان

سید حسن موسوی بفرولی^{۱*} و سید هادی دهقان منشادی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران
^۲ استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱)

چکیده

در این پژوهش، برآورد احتمالاتی و واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای استان گلستان و نواحی پیرامون آن تا شعاع حدود ۱۵۰ کیلومتری از مرزهای استان انجام گرفته است. ابتدا بررسی‌های زمین‌شناسی و لرزه‌زمینساختی از جمله شناسایی گسل‌ها، ابعاد و سازوکار آنها انجام و پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه بر اساس کاتالوگ یکنواختی از زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی تا پایان سال ۲۰۲۱ با بزرگ‌هایی بین ۳/۵ تا ۷/۵ برآورد شده است. تعداد بیست و یک چشمه لرزه‌زا به صورت پهنه‌ای شناسایی و با راهکار تابع توزیع مکانی، متوسط نرخ رویداد سالانه هر یک در بازه‌های مختلف بزرگ‌تعیین شده است. با استفاده از نرم‌افزار OpenQuake و با بهره‌گیری از درخت منطقی و سه رابطه از جدیدترین رابطه‌های تضعیف جنبش نیرومند زمین مختص ایران، بیشینه شتاب زمین و شتاب طیفی در دوره تناوب‌های ۰/۲، ۱ و ۲ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای نقاطی به فاصله ۵ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه تعیین شده است. نتایج به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان گلستان و نمودار شتاب طیفی برای ساختگاه سنگی در شهر گرگان ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد شهرستان گرگان و مناطقی از شهرستان‌های آق‌قلا، علی‌آباد و کردکوی واقع در جنوب غرب استان و مناطقی از شهرستان مراوه‌تپه واقع در شمال شرق استان نسبت به نواحی دیگر می‌توانند تحت تأثیر شتاب جنبش زمین بیشتری قرار گیرند که مقدار آن برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در این مناطق بین 21/0g و 25/0g برآورد شده است. برای تعیین مؤثرترین چشمه لرزه‌زا در میزان خطر برآورد شده در شهر گرگان، واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای پارامترهای فاصله، بزرگ‌تعداد انحراف معیار و طول و عرض جغرافیایی انجام و محتمل‌ترین سناریوی ایجادکننده بیشینه شتاب در شهر گرگان معرفی شده است. نتایج واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه نشان می‌دهد گسل‌های خزر و شمال البرز بیشترین سهم را در میزان خطر زمین‌لرزه شهر گرگان دارند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر زمین‌لرزه، درخت منطقی، گلستان، لرزه‌خیزی، بیشینه شتاب، واهم‌افزایی

۱ مقدمه

استان گلستان واقع در شمال شرقی فلات ایران، در قرن‌های گذشته متحمل زمین‌لرزه‌های ویرانگری بوده است این استان یکی از مناطقی است که لرزه‌خیزی زیادی دارد و از استان‌های پرمخاطره ایران به‌شمار می‌آید. زمین‌لرزه‌های سال ۸۷۴ میلادی گرگان با بزرگای $M_s 6/2$ و ۲۰۰۰ کشته، ۱۴۹۸ میلادی گنبد کاووس با بزرگای $M_s 6/7$ و ۱۰۰۰ کشته و ۳۰ ژوئیه ۱۹۷۰ مراوه تپه با بزرگای $M_s 6/7$ و ۲۰۰ کشته (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) از آن جمله هستند. بر اساس تقسیم‌بندی ایران به پنج ایالت لرزه‌زمین‌ساختی (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸)، استان گلستان در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان و کپه داغ قرار دارد. بیشتر زمین‌لرزه‌های استان ناشی از فعالیت دو گسل قدیمی شمال البرز و خزر است که با شاخه‌های متعدد با سازوکار معکوس و مؤلفه راستالغز با شیب به سمت جنوب در گستره استان مشاهده می‌شوند (شاه‌پسندزاده، ۱۳۸۳). به‌طور کلی از شمال به جنوب استان، خطر زمین‌لرزه بیشتر می‌شود. شمال شرق استان به دلیل وجود گسل مراوه تپه یکی از کانون‌های لرزه‌خیز استان محسوب می‌شود. در ویرایش چهارم آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰، مرکز این استان یعنی شهر گرگان با تراکم جمعیتی زیاد، یکی از شهرهای با میزان خطر زیاد زمین‌لرزه معرفی شده است. از آنجایی که در شرایط فعلی تنها راه مقابله با زمین‌لرزه، مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر جنبش‌های نیرومند زمین و کاهش نسبی خسارات ناشی از زمین‌لرزه‌هاست، برآورد مطمئن و بررسی میزان خطر زمین‌لرزه برای مناطق پرمخاطره‌ای مانند استان گلستان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

راهکار پیشنهادی کرنل (۱۹۶۸)، مرسوم‌ترین روش برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه (PSHA) است. در بسیاری از مناطق کره زمین از جمله ایران، به دلایل مختلف به اندازه کافی اطلاعات زمین‌لرزه‌ای از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه وجود ندارد؛ بنابراین راهکارهای متعددی جهت

غلبه بر این مشکل و دستیابی به نتایج پذیرفتنی معرفی شده است. شی و همکاران (۱۹۹۲) با استفاده از مفهوم تابع توزیع مکانی (spatial distribution function) راهکاری برای رفع مشکل کمبود داده ارائه دادند که برخی منابع آن را روش احتمالاتی اصلاح شده نامیده‌اند (برای نمونه، میرزائی، ۱۹۹۷؛ شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷ و موسوی بفرولی و همکاران، ۱۳۹۳). در مقاله حاضر از این روش جهت برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه استفاده شده است. در این روش، کمبود اطلاعات زمین‌لرزه‌ای برخی چشمه‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی، دیرینه‌زلزله‌شناسی و به‌ویژه لرزه‌زمین‌ساختی و تکیه بر فرض تشابه زمین‌ساختی جبران می‌شود (برای نمونه، شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷؛ موسوی بفرولی و همکاران، ۱۳۹۳ و دهقان منشادی و همکاران، ۱۳۹۶).

نتایج تحلیل خطر به روش احتمالاتی، ناشی از مشارکت همه چشمه‌ها با در نظر گرفتن بزرگای زمین‌لرزه (M) و فاصله چشمه‌ها تا ساختگاه (R) است و سهم جداگانه هر چشمه، در برآورد صورت‌گرفته مشخص نیست. برای مشخص شدن سهم نسبی رویدادهای مختلف در هر چشمه در خطر برآوردشده، مفهوم واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه مطرح شده است (بارانی و همکاران، ۲۰۰۹). در ابتدا، در محاسبات واهم‌افزایی، خطر زمین‌لرزه برای دو کمیت M و R تفکیک می‌شدند (مک‌گویر و شدلاک، ۱۹۸۱). مک‌گویر (۱۹۹۵) پارامتر انحراف معیار پراکندگی جنبش نیرومند زمین نسبت به مقدار میانگین پیش‌بینی شده (ε) را نیز در محاسبه واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه اضافه کرد؛ چون علاوه بر دو پارامتر M و R ، مقدار ε نیز در احتمال فزونی پارامتر جنبش زمین تأثیرگذار است. فرایند واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه، مشارکت نسبی بازه‌های بزرگ، فاصله و پارامتر ε را در میانگین آهنگ فزونی سالانه برای یک مقدار معین پارامتر جنبش زمین در هر ساختگاه تفکیک

زمین‌لرزه را در استان گلستان با استفاده از کاتالوگی مشتمل بر ۲۷۰ رویداد دستگاهی، ۹ رویداد تاریخی و ۲۵ چشمه پهنه‌ای لرزه‌زا پهنه‌بندی کردند. ایشان از راهکار شی و همکاران (۱۹۹۲) در تعیین λ برای هر چشمه لرزه‌زا و نرم‌افزار SEISRISKIII استفاده کردند و رابطه تضعیف جهانی آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) را به‌کاربردند. در سال‌های اخیر، پژوهشگران علاوه بر انتشار چندین کاتالوگ یکنواخت زمین‌لرزه‌ها برای ایران (برای نمونه، موسوی بفرولی و بابایی، ۲۰۲۰)، روابط تضعیف متعددی مختص ایران و حتی مختص نواحی لرزه‌زمین‌ساختی ایران ارائه کرده‌اند (برای نمونه، صداقتی و پزشک، ۲۰۱۷؛ زعفرانی و همکاران، ۲۰۱۸ و فرچپور و همکاران، ۲۰۱۹). حساسیت و اهمیت برآورد خطر زمین‌لرزه در نواحی پرمخاطره‌ای مانند استان گلستان ایجاب می‌کند با استفاده از این مطالعات و داده‌ها، نتایج معتبرتری به‌دست‌بیاید. در مقاله حاضر از به‌روزترین داده‌های زمین‌لرزه‌ای برای گستره مورد مطالعه استفاده و در نهایت، کاتالوگی مشتمل بر ۱۵۱۶ زمین‌لرزه دستگاهی و ۲۱ زمین‌لرزه تاریخی تهیه شده است. از روابط تضعیف مختص ایران برای محاسبه PGA و شتاب طیفی (SA) استفاده شده است. از آنجا که روابط تضعیف استفاده‌شده مختص ایران در کتابخانه نرم‌افزار OpenQuake (پاگانی و همکاران، ۲۰۱۴) موجود نبود، از امکان تعریف روابط تضعیف جدید در نسخه توسعه‌پذیر نرم‌افزار استفاده شد. کدهای مربوط به هر یک از روابط تضعیف در محیط پایتون نوشته شده است. همچنین برای تعیین میزان مشارکت پارامترهای مختلف مؤثر بر مقدار PGA، بزرگا، جابه‌جایی و انحراف معیار، برای اولین بار واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای استان گلستان انجام شده است. کلیه مقادیر PGA، SA و واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه، مطابق تقسیم‌بندی آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰ ایران، برای خاک نوع یک و با استفاده از نرم‌افزار OpenQuake به‌دست‌آمده است.

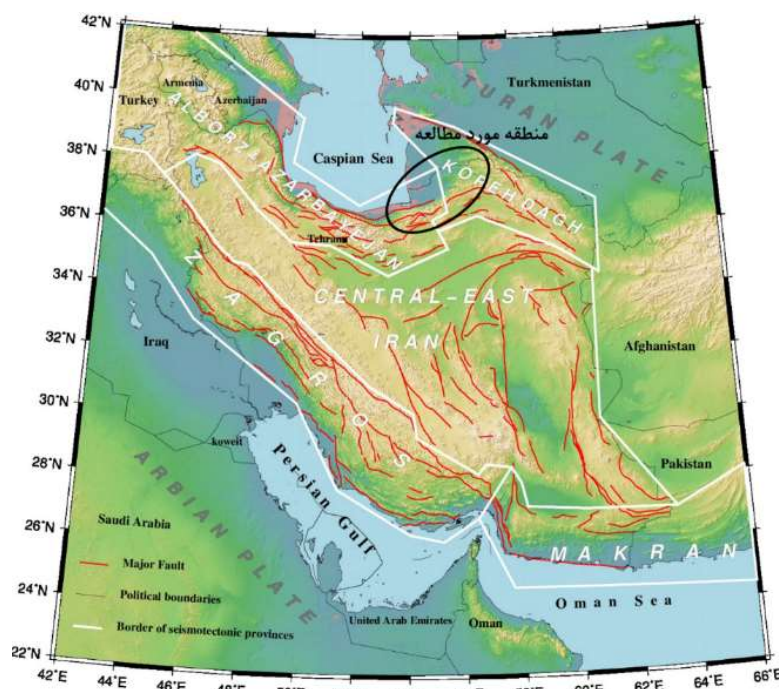
می‌کند. به این ترتیب، معلوم می‌شود کدام رویداد زمین‌لرزه (M، R و ϵ)، خطر را در ساختگاه کنترل می‌کند. کاربرد روش واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه در سال‌های ابتدایی معرفی این روش، بیشتر منحصر به مطالعات قبل از ساخت تأسیسات هسته‌ای و نیروگاه‌ها بود، ولی امروزه در مهندسی به‌طور گسترده‌تر استفاده می‌شود. شناخت گروه-های M-R- ϵ که خطر زمین‌لرزه را در یک ساختگاه کنترل می‌کنند، برای بسیاری از کاربردهای مهندسی که منحنی-های خطر برای آنها کافی نیستند، اهمیت زیادی دارد؛ برای مثال راهنمای مهمی برای شبیه‌سازی یا انتخاب تاریخچه زمانی مناسب حرکت زمین جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها، تحلیل روان‌گرایی خاک یا مطالعات پایداری شیب است (بارانی و همکاران، ۲۰۰۹).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساخت این منطقه از ایران صورت گرفته است. شاه‌پسندزاده (۱۳۸۳) بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر گرگان به شعاع ۲۵۰ کیلومتر، پارامترهای لرزه‌خیزی یعنی مقدار β ، متوسط نرخ رویداد سالانه زمین‌لرزه‌ها (λ) و بیشینه بزرگای چشمداشتی را از نظر آماری با استفاده از روش کیکو و سلفول (۱۹۹۲) محاسبه کرده است. مهدویان (۱۳۹۲) با توجه به مطالعات لرزه‌خیزی-لرزه‌زمین‌ساختی، گسل‌های لرزه‌زای استان گلستان را شناسایی کرد و با استفاده از روابط تضعیف کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۳)، آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) و روش کرنل (۱۹۶۸)، بیشینه شتاب زمین (PGA) را در چهار پهنه برای استان گلستان محاسبه کرد. نعمتی و همکاران (۲۰۱۳)، برای شناخت بهتر ویژگی‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی گستره البرز شرقی، با نصب شبکه لرزه‌نگاری موقت به مدت شش ماه به بررسی ریزلرزه‌خیزی و لرزه-زمین‌ساخت جنوب دریای خزر پرداختند و سازوکار کانونی، عمق زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های گستره مورد نظر را بررسی کردند. عبدالله زاده و همکاران (۲۰۱۴) خطر

۲ لرزه‌زمین ساخت گستره مورد مطالعه

بر اساس تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) که در آن، ایران به پنج ایالت لرزه‌زمین ساختی تقسیم شده است، بخش‌های غربی منطقه مورد مطالعه در ایالت لرزه‌زمین ساختی البرز-آذربایجان و بخش‌های شرقی آن در ایالت لرزه‌زمین ساختی کپه‌داغ قرار گرفته است (شکل ۲). واحد زمین‌شناسی البرز که به صورت یک تاقدیس مرکب در حاشیه شمالی ایران مرکزی با امتداد کلی شرقی-غربی از آذربایجان تا خراسان ادامه دارد، در جنوب با گسل مشاء، گسل ترود و گسل سمنان از ایران مرکزی جدا می‌شود. مرز شمالی آن ساختار گسل معکوس خزر است که موجب جدا شدن البرز از پوسته خزر و دشت گرگان شده است. مرز شرقی آن با ایالت لرزه‌زمین ساختی کپه‌داغ واضح نیست و بر اساس اطلاعات مربوط به فعالیت لرزه‌ای

و تغییر روند ساختاری زمین‌شناسی تعیین شده است. مجموعه رشته کوه‌های بینالود و کپه‌داغ پهنه‌ای کوهستانی را ایجاد کرده‌اند که ایالت لرزه‌زمین ساختی کپه‌داغ را تشکیل می‌دهند (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸). در این مطالعه گسل‌های واقع در استان گلستان و گسل‌های اطراف تا فاصله تقریبی ۱۵۰ کیلومتر دورتر از مرزهای استان گلستان بررسی شده‌اند. با توجه به اهمیت شناسایی گسل‌های با توان لرزه‌زایی در تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، در یک بخش از مطالعه حاضر به شناسایی گسل‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه و ویژگی‌های مربوط به لرزه‌خیزی آنها پرداخته شده است. اطلاعات کلی مربوط به گسل‌های فعال استان که در این مطالعه منظور شده‌اند در جدول ۱ و تعدادی از زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی خسارت‌بار استان در جدول ۲ آمده است.



شکل ۲. ایالت‌های اصلی لرزه‌زمین ساختی ایران که میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) تعیین کرده‌اند (برگرفته از موسوی بفرئی و همکاران، ۱۳۹۳). بیضی سیاه‌رنگ، منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات کلی گسل‌های فعال استان گلستان.

ردیف	نام گسل	طول تقریبی (km)	سازوکار غالب	امتداد غالب	جهت شیب	سال وقوع رویدادها (میلادی) و بزرگای آنها (داخل پرانتز)
۱	خزر	>۶۰۰	معکوس + راستالغز چپگرد	شرق-غرب	جنوب	۱۸۷۴؛ (۶/۵) ۱۴۸۵؛ (۷/۲) ۱۸۰۵؛ ۱۸۰۹؛ (۶/۵) ۱۸۲۵؛ (۶/۷) ۱۹۳۵؛ (۶/۸) ۱۹۴۴؛ (۵/۴) ۱۹۷۱؛ (۵/۳) ۱۹۹۹؛ ۲۰۰۴؛ (۶/۴)
۲	شمال البرز	>۵۰۰	معکوس + راستالغز چپگرد	شرق-غرب	جنوب	۱۱۲۷؛ (۶/۸) ۱۳۰۱؛ (۶/۵) ۱۹۳۵؛ (۵/۸) ۱۹۳۵؛ (۶/۸) ۱۹۵۷؛ ۱۹۷۱؛ (۵/۲) ۱۹۹۲؛ (۵/۳) ۲۰۲۰؛ (۵/۴)
۳	آستانه	۷۵	معکوس + راستالغز چپگرد	شمال شرق- جنوب غرب		احتمالاً ۸۵۶ (۷/۹)
۴	دامغان	>۱۰۰	معکوس	شرق-غرب	شمال	احتمالاً ۸۵۶ (۷/۹)
۵	عطاری	۱۲۰	معکوس + راستالغز چپگرد	شمال غرب- جنوب شرق	جنوب غرب	
۶	مراوه تپه	۱۶۵	معکوس	شرق-غرب	شمال غرب	۱۸۱۰؛ (۶/۵) ۱۹۷۴؛ (۵/۸)
۸	تکل کوه- گرماب	۱۲۰	معکوس + راستالغز چپگرد	شرق-غرب	شمال	
۹	میامی	۱۵۰	راستالغز راستگرد + معکوس	شمال شرق- جنوب غرب	جنوب	
۱۰	جاجرم	۷۰	معکوس	شمال شرق- جنوب غرب		۱۸۸۳ (۶)
۱۱	گمیشان	۴۰	معکوس	شرق-غرب	جنوب	۱۴۷۰؛ (۵/۸) ۱۹۷۰؛ (۶/۷) ۲۰۰۴؛ (۵/۶) ۲۰۰۵؛ (۵/۳)
۱۲	رباط قره بیل	۸۰	راستالغز چپگرد	شرق-غرب		۹۴۳ (۷/۶)
۱۳	ترود	۱۲۰	راستالغز چپگرد	شمال شرق- جنوب غرب	جنوب	
۱۴	درونه	>۷۰۰	معکوس و بیشتر راستالغز چپگرد	شمال شرق- جنوب غرب		۱۹۰۳؛ (۶/۲) ۱۹۲۳؛ (۵/۲)
۱۵	کپه داغ	۳۵۰	معکوس + راستالغز راستگرد	شمال غرب- جنوب شرق	جنوب	۱۹۴۸ (۷)
۱۶	سبزوار	۶۰	معکوس	غرب-شرق	شمال	
۱۷	اسفراین	۱۷۰	معکوس	شمال غرب- جنوب شرق	شمال	
۱۸	باغان- گرماب	۶۰	معکوس + راستالغز راستگرد	شمال غرب- جنوب شرق		۱۹۲۹ (۷/۳)

جدول ۲. تعدادی از زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی خسارت‌بار استان گلستان.

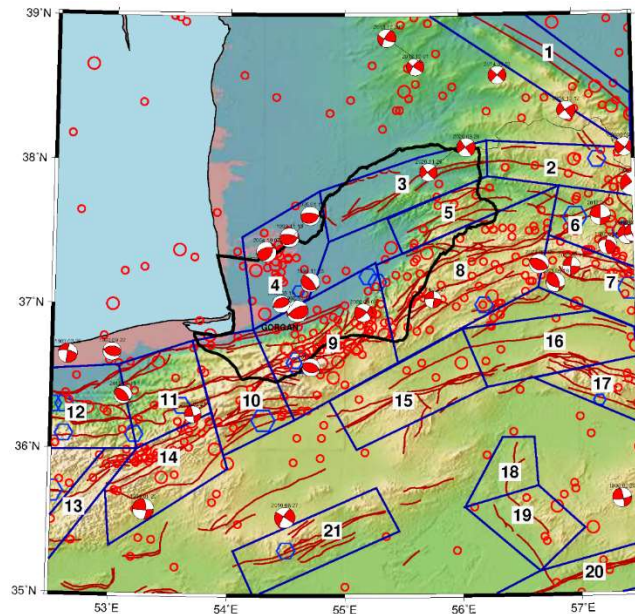
ردیف	زمان	مکان	بزرگای زمین‌لرزه، میزان خسارات گزارش شده
۱	۸۷۴	گرگان	۶/۲، کشته شدن ۲۰۰۰ سرباز
۲	۱۴۷۰	گرگان	۵/۸، ویرانی روستاهای اطراف از جمله آبسکون
۳	۱۴۹۸	گنبد کاووس	۶/۴، کشته شدن ۱۰۰۰ نفر
۴	۱۹۷۰/۷/۳۰	قربانوه (مراوه‌تپه)	۶/۷، تخریب ۴۰ روستا و کشته شدن ۲۰۰ نفر
۵	۱۹۷۴/۳/۷	مراوه‌تپه	۵/۸
۶	۱۹۸۵/۱۰/۲۹	علی‌آباد	۶/۱
۷	۱۹۹۹/۱۱/۱۹	گرگان	۵/۴
۸	۲۰۰۴/۱۰/۷	آق‌قلا	۵/۶
۹	۲۰۰۵/۱/۱۰	آق‌قلا	۵/۳

۳ چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه

یکی از مراحل اصلی برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و برآورد بیشینه بزرگای لرزه‌خیزی هر چشمه است. در تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه فرض بر این است که زمین‌لرزه‌های بزرگ، ترجیحاً در محل وقوع زمین‌لرزه‌های قبلی روی می‌دهند و در ساختارهای با خصوصیات زمین‌ساختی مشابه، زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای یکسان می‌تواند رخ دهد و گزارش نشدن زمین‌لرزه روی یک ساختار، دلیلی بر نبود پتانسیل وقوع زمین‌لرزه در آن نیست (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹). در هر چشمه زمین‌لرزه احتمال رویداد زمین‌لرزه با هر بزرگای تا بیشینه بزرگایی که برای آن چشمه برآورد می‌شود، در همه جای آن یکسان است. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و کاتالوگ به‌روز زمین‌لرزه‌ها و بر پایه مطالعات میرزائی و همکاران (۱۹۹۹) و موسوی بفرونی و همکاران (۱۳۹۳) تعداد بیست و یک چشمه پهنه‌ای بالقوه زمین‌لرزه در منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۵۵۰ کیلومتر در ۴۵۰ کیلومتر تعیین شده است. در شکل ۲ موقعیت گسل‌ها، محل رویداد زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی، سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (برگرفته از گزارش پایگاه GCMT) و محل چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه با شماره آنها نشان داده شده است. برای برآورد بیشینه

بزرگای محتمل در هر چشمه علاوه بر بیشینه بزرگای زمین‌لرزه روی داده در چشمه از رابطه تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) نیز استفاده شده است. در جدول ۴ بیشینه بزرگای نسبت داده شده به هر چشمه معرفی شده است.

با توجه به کمبود داده‌های زمین‌لرزه‌ای برای چشمه‌های تعیین شده، برای تعیین لرزه‌خیزی چشمه‌ها از تابع توزیع مکانی استفاده شده است که در مطالعات مختلف از آن با روش اصلاح شده شی و همکاران (۱۹۹۲) یاد می‌شود (مانند شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷؛ موسوی بفرونی و همکاران، ۱۳۹۳). ابتدا با استفاده از رهیافت کیکو و سلفول (۱۹۹۲) و با استفاده از کاتالوگ یک‌دست زمین‌لرزه‌های مستقل برگرفته از موسوی بفرونی و بابائی ماهانی (۲۰۲۰) و با در نظر گرفتن یک دسته داده تاریخی قبل از ۱۹۰۰ میلادی و پنج دسته داده دستگاهی مطابق بازه‌های زمانی تعیین شده در موسوی بفرونی و بابائی ماهانی (۲۰۲۰)، پارامترهای لرزه‌خیزی کل منطقه مورد مطالعه تعیین شده است. برای این منطقه، شیب خط گوتنبرگ-ریشتر، $b = \beta / \ln(10) = 0.92$ و نرخ متوسط رویداد سالانه برای $M_{\min} = 4.0$ و $\lambda = 9 \pm 1$ و بیشینه بزرگای زمین‌لرزه محتمل، $M_{\max} = 8.0$ تعیین شده است. برای در نظر گرفتن لرزه‌خیزی زمینه، وقوع زمین‌لرزه



شکل ۲. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت گستره مورد مطالعه. در نقشه، گسل‌ها (خطوط قرمز)، مرز استان گلستان (خط ضخیم سیاه)، چشمه‌های پهنه‌ای بالقوه زمین‌لرزه (نواحی تفکیک‌شده با خطوط آبی)، رومرکز زمین‌لرزه‌های دستگاهی (پس از ۱۹۰۰) (دایره‌های قرمز) و رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰) (شش ضلعی‌ها) دیده می‌شوند. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها برگرفته از GCMT است.

۴ روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین

بر اساس مطالعه فرهادی و همکاران (۲۰۱۹) که روابط تضعیف جنبش نیرومند محلی، منطقه‌ای و جهانی را به روش‌های مختلف با داده‌های شتاب‌نگاری ایران مقایسه کرده‌اند، سه رابطه تضعیف زعفرانی و همکاران (۲۰۱۸)، صدقاتی و پزشک (۲۰۱۷) و فرچپور و همکاران (۲۰۱۹) که در دسته روابط محلی قرار دارند، نسبت به بقیه بیشترین همخوانی را با داده‌های ایران دارند؛ لذا در این مطالعه با استفاده از درخت منطقی از این سه رابطه تضعیف با وزن برابر استفاده شده است. هر سه رابطه با در نظر گرفتن اثر چشمه، مسیر انتشار و شرایط ساختگاهی، میانگین هندسی مؤلفه‌های افقی بیشینه شتاب PGA و شتاب طیفی SA را در دوره تناوب‌های مختلف برآورد می‌کنند. علی‌رغم تعریف تعداد زیادی از روابط تضعیف در کتابخانه نرم‌افزار OpenQuake، هیچ‌کدام از سه رابطه نام‌برده در کتابخانه نرم‌افزار موجود نبودند؛ بنابراین از امکان تعریف روابط تضعیف جدید در نسخه توسعه‌پذیر نرم‌افزار استفاده

با بزرگای بین $M_{\min} = 4/0$ و $M_{\text{background}} = 6/0$ بر مبنای $b = 0/92$ و $\lambda = 8/87$ در همه نقاط منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی شده است. سپس با استفاده از رابطه (۱) نرخ رویداد سالانه برای هر بازه بزرگا به پهنای $0/5$ برای کل منطقه به دست آمده است (شی و جانگک، ۱۹۹۶):

$$\lambda_{m_j} = \frac{2\lambda e^{-\beta(m_j - m_{\min})} sh(0.5\beta\Delta M)}{1 - e^{-\beta(m_{\max} - m_{\min})}} \quad (1)$$

که در آن، λ و β پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه، مقدار m_j میانه مربوط به هر بازه بزرگا و ΔM بازه بزرگا است. این مقادیر برای چهار بازه بزرگا در سطر آخر جدول ۳ با عنوان مجموع آمده است. با استفاده از مفهوم تابع توزیع مکانی و عواملی از قبیل میزان اطمینان در تعیین چشمه، جایگاه زمین‌ساختی چشمه، عناصر ساختاری واقع در چشمه و زمین‌لرزه‌های روی داده در آن، نرخ رویداد سالانه مربوط به هر بازه بزرگا بین چشمه‌ها تقسیم شده است که نتیجه آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. نرخ رویداد سالانه زمین‌لرزه در هریک از بازه‌های بزرگا برای چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه.

شماره چشمه	$\lambda(6/1-6/5)$	$\lambda(6/6-7/0)$	$\lambda(7/1-7/5)$	$\lambda(7/6-8/0)$
۱	۰/۰۰۵۳۰۱	۰/۰۰۲۱۱۱	۰/۰۰۱۷۳۲	
۲	۰/۰۰۴۱۲۵	۰/۰۰۱۴۵۶		
۳	۰/۰۰۴۳۳	۰/۰۰۱۵۵۶		
۴	۰/۰۰۴۳۶۳	۰/۰۰۱۲۸۳		
۵	۰/۰۰۳۳۶۲	۰/۰۰۱۴۳۹		
۶	۰/۰۰۵۵۵۳	۰/۰۰۲۹۳۶	۰/۰۰۱۸۲۵	۰/۰۰۱۳۲۴
۷	۰/۰۰۴۹۹۸	۰/۰۰۱۱۴۱	۰/۰۰۰۷۰۶	
۸	۰/۰۰۵۸۵۹	۰/۰۰۲۲۵۶		
۹	۰/۰۰۵۱۵۹	۰/۰۰۲۱۹۶	۰/۰۰۱۴۰۳	
۱۰	۰/۰۰۳۹۸۷	۰/۰۰۱۵۲	۰/۰۰۱۰۸۵	
۱۱	۰/۰۰۳۷۶۲	۰/۰۰۱۴۲۳		
۱۲	۰/۰۰۳۹۷۶	۰/۰۰۱۵۵۲		
۱۳	۰/۰۰۱۸۶۱	۰/۰۰۰۶۰۹		
۱۴	۰/۰۰۴۱۵۵	۰/۰۰۰۶۷		
۱۵	۰/۰۰۳۷۸۵	۰/۰۰۱۴۲۵		
۱۶	۰/۰۰۳۸۲۳	۰/۰۰۱۳۹۸		
۱۷	۰/۰۰۵۴۲۲	۰/۰۰۱۷۷۷	۰/۰۰۱۱۱۲	
۱۸	۰/۰۰۱۶۷۳			
۱۹	۰/۰۰۱۵۶۷			
۲۰	۰/۰۰۴۹۸	۰/۰۰۱۵۱۵	۰/۰۰۱۱۰۵	
۲۱	۰/۰۰۳۹۳	۰/۰۰۱۵۴۲	۰/۰۰۱۲۶۷	
مجموع	۰/۰۸۶۰۰۹	۰/۰۲۹۸۰۶	۰/۰۱۰۲۳۵	۰/۰۰۱۳۲۴

شد. کدهای مربوط به هریک از سه رابطه در محیط پایتون نوشته شد و پس از گذراندن موفق مراحل آزمایش، در نسخه توسعه یافته نرم افزار قرار گرفت و در محاسبات خطر زمین لرزه از آنها استفاده شد.

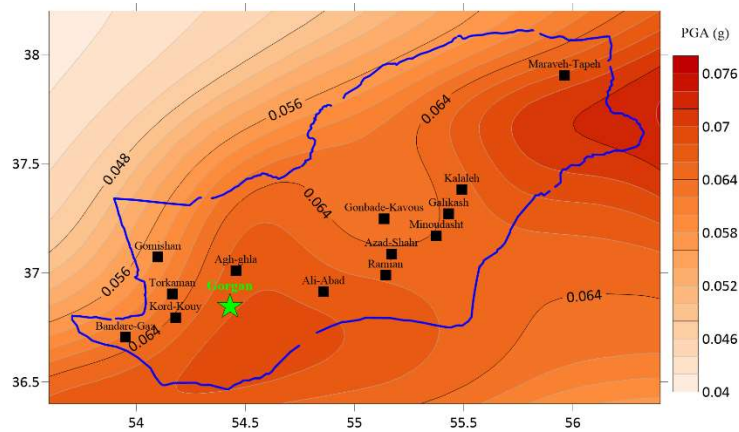
۵ برآورد خطر زمین لرزه

برای برآورد خطر زمین لرزه در استان گلستان، لرزه خیزی زمینه برای کل منطقه و لرزه خیزی تعداد بیست و یک چشمه بالقوه زمین لرزه در نظر گرفته شد و با استفاده از سه رابطه تضعیف با وزن های برابر در نرم افزار OpenQuake محاسبات انجام شد. هریک از چشمه ها به شبکه ای از نقاط به فاصله ۲ کیلومتر تقسیم و احتمال رویداد تمام

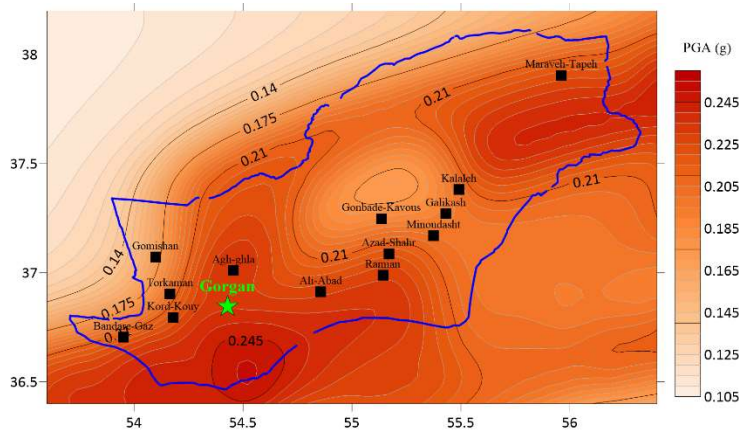
زمین لرزه های هر چشمه در هریک از نقاط شبکه آن چشمه به طور مساوی فرض شد. منطقه مورد مطالعه به شبکه ای شامل ۸۲۰۰ نقطه به فاصله ۵ کیلومتر از یکدیگر تقسیم شد و هر نقطه یک ساختگاه سنگی در نظر گرفته شد. برای هر ساختگاه، مقادیر بیشینه شتاب زمین PGA و شتاب طیفی SA در دوره تناوب های ۰/۲، ۱ و ۲ ثانیه برای دوره های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۰/۶۳٪، ۱۰٪ و ۲٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) محاسبه شده است. از آنجا که نتایج برای پهنه استان گلستان (تقریباً با فاصله ۱۵۰ کیلومتر از حاشیه منطقه مورد مطالعه به سمت داخل) اعتبار دارد، در شکل های ۳ تا ۱۴، نقشه های پهنه بندی خطر

شده که در دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برآورد شده است. در این نمودار مقادیر Sa و PGA در دوره تناوب ۰/۱ ثانیه که بیشینه شتاب طیفی را دارد، برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال مشخص شده است.

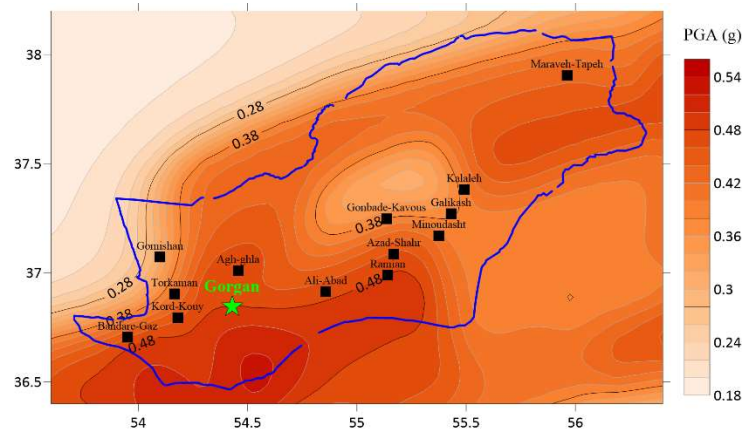
زمین‌لرزه برای این محدوده شامل استان گلستان نمایش داده شده است. در این نقشه‌ها موقعیت هریک از شهرستان‌های استان مشخص شده است که بر اساس آنها میزان خطر در هر شهرستان برآورد می‌شود. در شکل ۱۵ نمودار شتاب طیفی در دوره تناوب‌های ۰ تا ۴ ثانیه برای ساختگاهی روی سنگ بستر واقع در شهر گرگان نشان داده



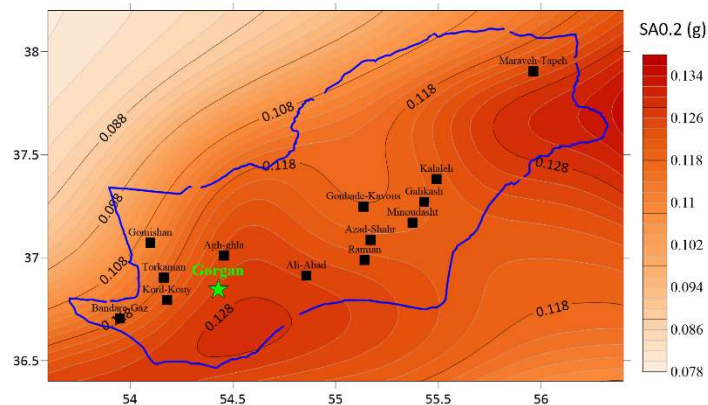
شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین در استان گلستان با ۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



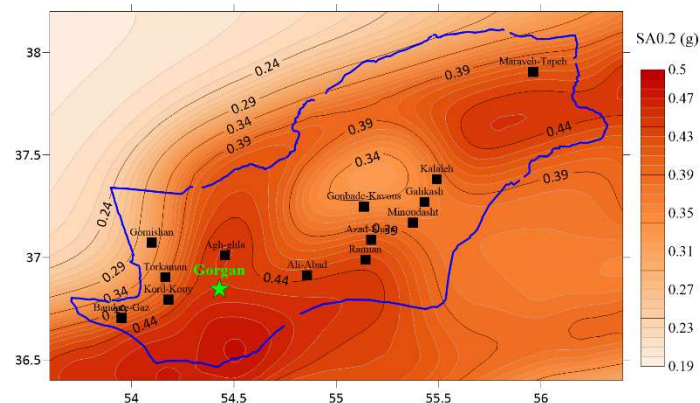
شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین در استان گلستان با ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



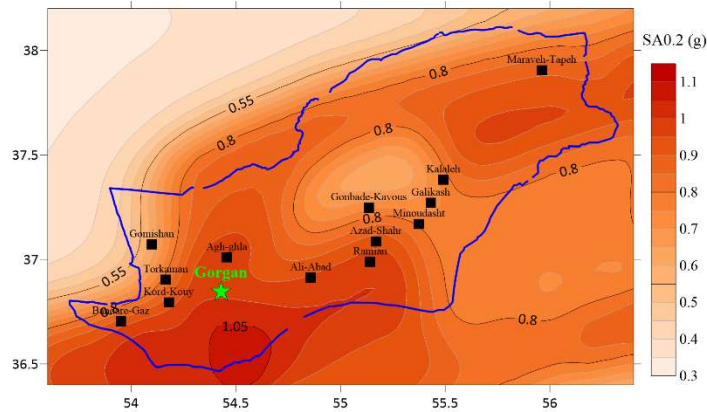
شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین در استان گلستان با ۲٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) بر روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



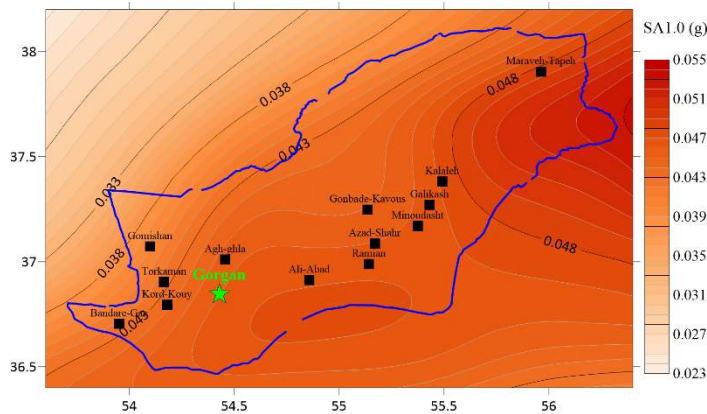
شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی دوره تناوب ۰/۲ ثانیه در استان گلستان با ۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



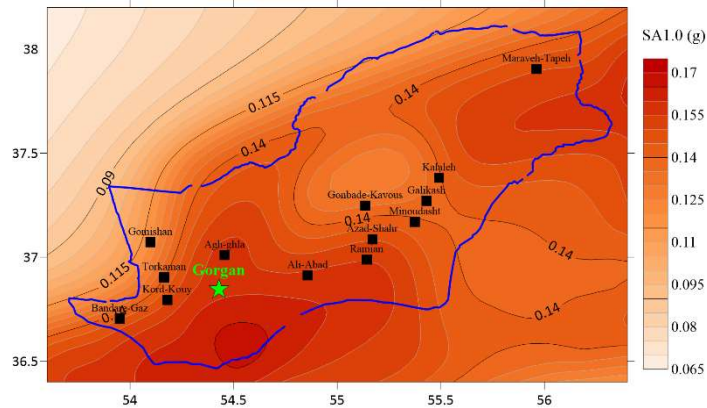
شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه در استان گلستان با ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



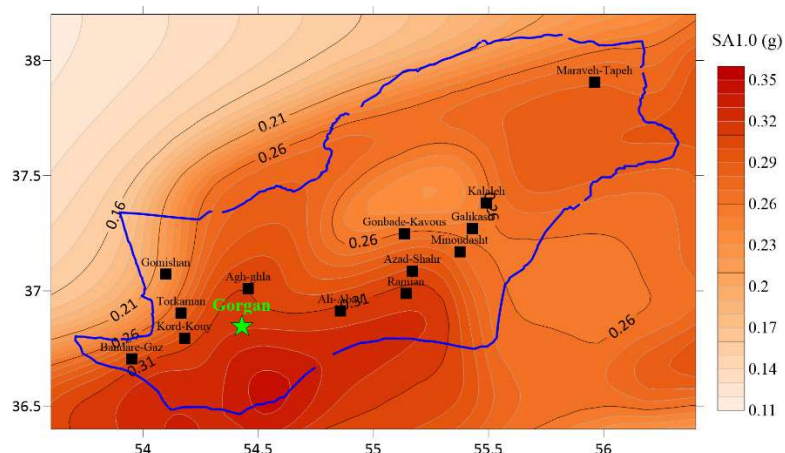
شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه در استان گلستان با ۲٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



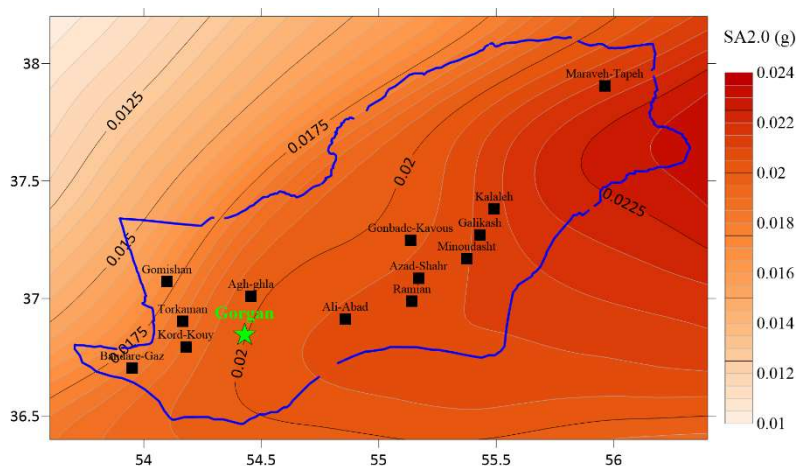
شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۱ ثانیه در استان گلستان با ۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



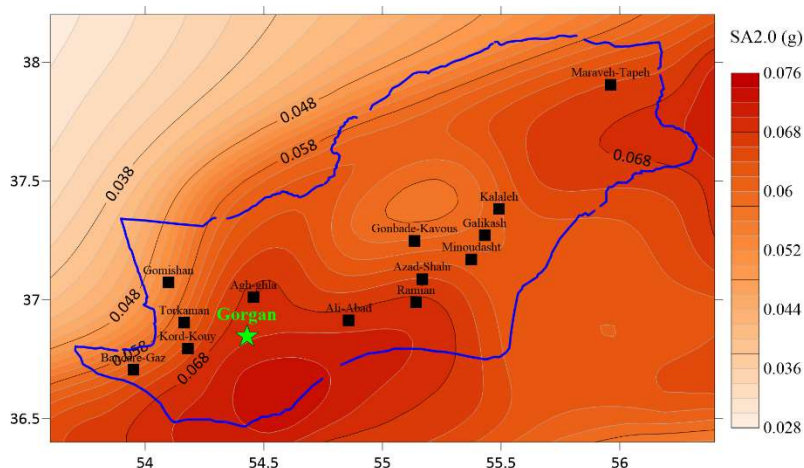
شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۱ ثانیه در استان گلستان با ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



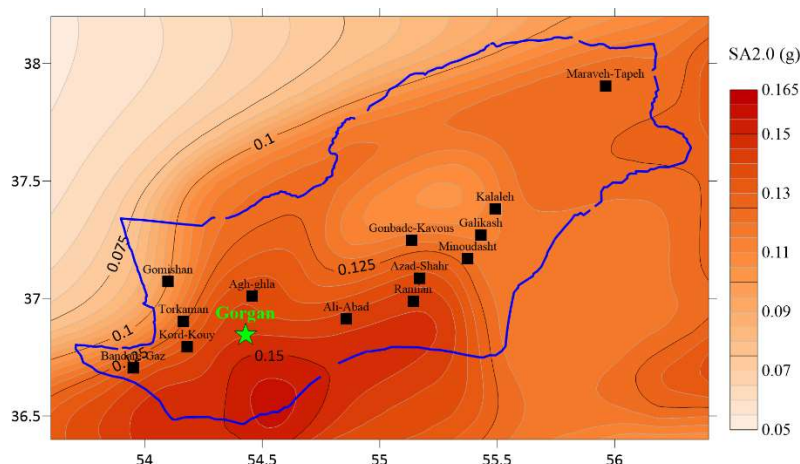
شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۱ ثانیه در استان گلستان با ۲٪ احتمال فرونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



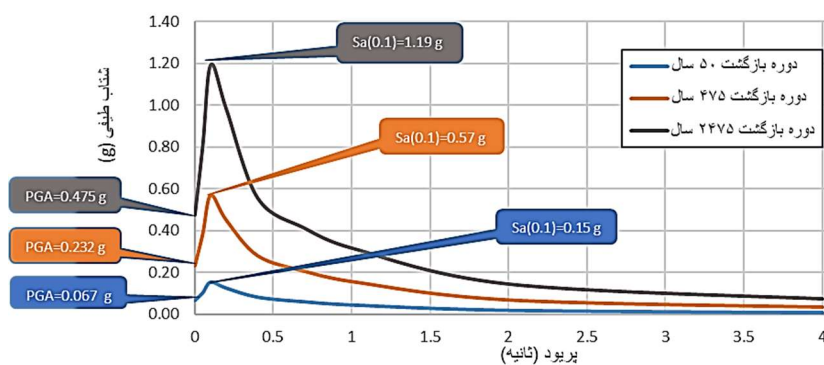
شکل ۱۲. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۲ ثانیه در استان گلستان با ۳٪ احتمال فرونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۲ ثانیه در استان گلستان با ۱۰٪ احتمال فرونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.



شکل ۱۴. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره تناوب ۲ ثانیه در استان گلستان با ۲٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) روی سنگ بستر. خطوط آبی مرز استان را نشان می‌دهند.

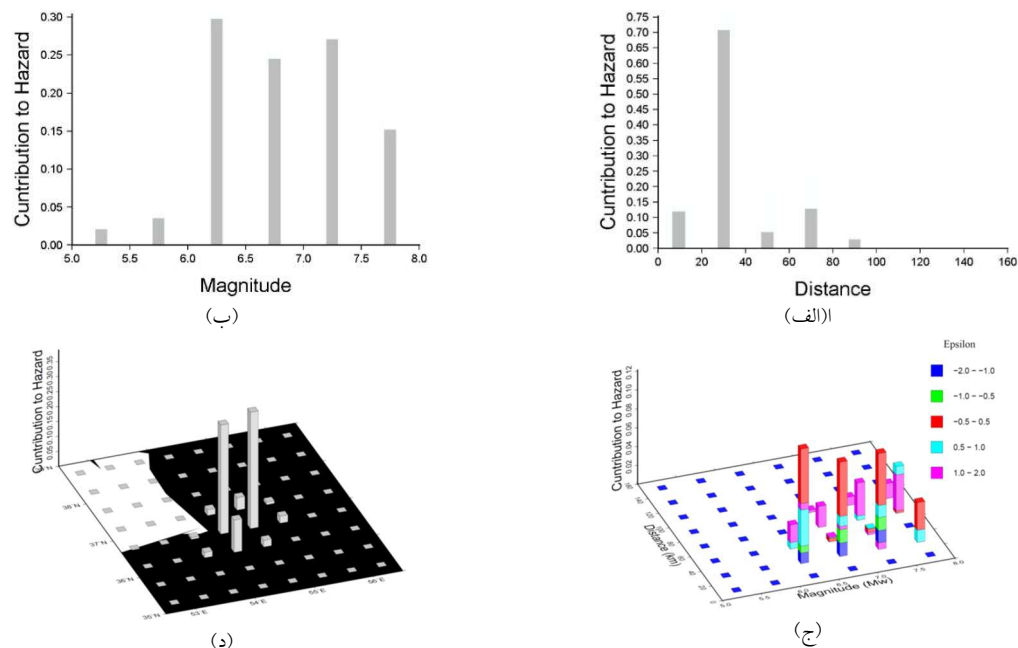


شکل ۱۵. نمودار شتاب طیفی برآوردشده برای ساختمانی واقع بر سنگ بستر در شهر گرگان برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

بزرگا، فاصله، تعداد انحراف معیار و طول و عرض جغرافیایی، برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال انجام شده است. در شکل ۱۶ نتایج واهم‌افزایی برای PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ سال برای نقطه‌ای در شهر گرگان نشان داده شده است که همان سهم هریک از خانک‌های بزرگا، فاصله، تعداد انحراف معیار و طول و عرض جغرافیایی در خطر برآوردشده است. نمودار شکل ۱۶-د نشان می‌دهد برای PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ سال که به روش احتمالاتی برآورد شده است، فعالیت قطعاتی از سامانه گسلی خزر و بخش‌های شرقی گسل شمال البرز واقع در جنوب و جنوب غرب شهر گرگان بیشترین سهم مشارکت را در خطر برآوردشده دارند.

۶ واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای ساختمانی واقع در شهر گرگان

در این مطالعه به منظور واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه در ساختمانی واقع در شهر گرگان با مختصات ۵۴/۴۳ درجه طول شرقی و ۳۶/۸۵ درجه عرض شمالی، بزرگای زمین‌لرزه بین ۵ تا ۸ به شش خانک با فاصله ۰/۵ واحد، تعداد انحراف معیار بین ۲ و ۲- به پنج خانک، فاصله از چشمه به خانک‌هایی مساوی با پهنای ۲۰ کیلومتر و طول و عرض جغرافیایی به خانک‌هایی مساوی با پهنای ۰/۵ درجه تقسیم و از تابع جرمی احتمال (PMF) استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار OpenQuake واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه مربوط به بیشینه شتاب جنبش زمین و شتاب طیفی در دوره تناوب‌های ۰/۲، ۱/۰ و ۲/۰ ثانیه شامل پارامترهای



شکل ۱۶. نتایج واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای ساختمانی واقع در شهر گرگان مربوط به بیشینه شتاب جنبش زمین برحسب g برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) (الف) واهم‌افزایی فاصله (ب) واهم‌افزایی بزرگا (ج) واهم‌افزایی سه‌بعدی فاصله، بزرگا و تعداد انحراف معیار (د) واهم‌افزایی جغرافیایی.

این اساس، مؤثرترین سناریوی ایجادکننده $PGA = 0.235g$ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در ساختمانی واقع در شهر گرگان با مقادیر $\bar{M}w = 6/6$ ، $\bar{R} = 18km$ و $\bar{\epsilon} = 0/3$ تعیین شده است. مقایسه نتایج برای PGA و Sa در دوره تناوب‌های مختلف برای دوره‌های بازگشت مختلف نشان می‌دهد با افزایش دوره بازگشت، در سناریوی زمین‌لرزه تعیین شده افزایش میانگین بزرگا، کاهش میانگین فاصله و افزایش میانگین تعداد انحراف معیار مشاهده می‌شود؛ یعنی با افزایش دوره بازگشت، سناریوی زمین‌لرزه بزرگ‌تر و در فاصله کمتر از ساختمانی مؤثرتر است. برای نمونه نتایج برای Sa در دوره تناوب ۱/۰ ثانیه در دوره بازگشت ۵۰ سال، مؤثرترین سناریو با بزرگای ۶/۴ در فاصله ۶۰ کیلومتری ساختمانی تعیین شده است، درحالی‌که در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، مؤثرترین سناریو با بزرگای ۶/۸ در فاصله ۱۳ کیلومتری ساختمانی تعیین شده است. مقایسه نتایج برای Sa در دوره

در واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه، برای معرفی محتمل‌ترین مقادیر R ، M و ϵ که ممکن است در ایجاد یک سطح مشخص شتاب زمین مشارکت کنند، از دو گروه پارامتر میانگین بزرگا (\bar{M})، میانگین فاصله (\bar{R}) و میانگین تعداد انحراف معیار ($\bar{\epsilon}$) یا مد بزرگا (\bar{M})، مد فاصله (\bar{R}) و مد تعداد انحراف معیار ($\bar{\epsilon}$) استفاده می‌شود. مقادیر مد به نحوه تقسیم‌بندی خانک‌ها و پهنای آنها حساس است؛ یعنی با تقسیم‌بندی‌های مختلف برای خانک‌ها، برای مد نتایج متفاوتی به دست می‌آید، ولی مقادیر میانگین به نحوه تقسیم‌بندی خانک‌ها و پهنای آنها حساس نیستند (بازورو و کرنل، ۱۹۹۹). در این مطالعه برای معرفی مؤثرترین سناریوهای ایجادکننده پارامتر جنبش نیرومند زمین از مقادیر میانگین استفاده شده است. نتایج واهم‌افزایی میانگین بزرگا، فاصله و تعداد انحراف معیار برای PGA و Sa در دوره تناوب‌های ۰/۱، ۱/۰ و ۲/۰ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در جدول ۴ آمده است. بر

سناریو با بزرگای ۶/۶ در فاصله ۱۹ کیلومتری ساختگاه تعیین شده است، درحالی‌که در دوره تناوب ۲/۰ ثانیه، مؤثرترین سناریو با بزرگای ۶/۷ در فاصله ۲۸ کیلومتری ساختگاه تعیین شده است.

تناوب‌های مختلف برای هر یک از دوره‌های بازگشت نشان می‌دهد با افزایش دوره تناوب، میانگین بزرگا و میانگین فاصله افزایش می‌یابند؛ برای مثال نتایج برای Sa در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه در دوره بازگشت ۴۷۵ سال مؤثرترین

جدول ۴. نتایج واهم‌افزایی میانگین بزرگا (\bar{M})، میانگین فاصله (\bar{R}) و میانگین تعداد انحراف معیار ($\bar{\varepsilon}$) برای Sa و PGA در دوره تناوب‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۲/۰ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای ساختگاهی واقع در شهر گرگان.

نوع شتاب	دوره بازگشت	\bar{M}	\bar{R} (km)	$\bar{\varepsilon}$
PGA	۵۰	۶/۲	۴۲	۰/۲
	۴۷۵	۶/۶	۱۸	۰/۳
	۲۴۷۵	۶/۹	۱۰	۰/۵
Sa(0.2)	۵۰	۶	۴۲	۰/۳
	۴۷۵	۶/۶	۱۹	۰/۴
	۲۴۷۵	۶/۸	۱۲	۰/۶
Sa(1.0)	۵۰	۶/۴	۶۰	۰/۲
	۴۷۵	۶/۷	۲۶	۰/۵
	۲۴۷۵	۶/۸	۱۳	۰/۶
Sa(2.0)	۵۰	۶/۵	۶۲	۰/۴
	۴۷۵	۶/۷	۲۸	۰/۵
	۲۴۷۵	۶/۹	۱۳	۰/۵

۷ نتیجه‌گیری

به نواحی دیگر می‌تواند تحت تأثیر شتاب بیشتر زمین قرار گیرد. بیشینه شتاب زمین در این مناطق برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال بین $0.21g$ و $0.25g$ برآورد شده است. برای همین دوره بازگشت، نتیجه مطالعه شاه‌پسندزاده (۱۳۸۳)، $0.29g$ و نتیجه مطالعه موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳)، $0.228g$ بوده است که به نتایج مطالعه فعلی نزدیک است. به‌منظور تعیین مؤثرترین چشمه لرزه‌زا در بیشینه شتاب جنبش زمین و شتاب طیفی برآوردشده در دوره تناوب‌های ۰/۲، ۰/۱ و ۲/۰ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در شهر گرگان، واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه برای پارامترهای فاصله، بزرگا، تعداد انحراف معیار و طول و عرض جغرافیایی انجام شده است. نتایج واهم‌افزایی خطر زمین‌لرزه نشان می‌دهد رویدادی با بزرگای $M_w = 6.6$ ، فاصله $\bar{R} = 18 \text{ km}$ و تعداد انحراف معیار $\bar{\varepsilon} = 0.3$ ،

برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه در استان گلستان، پارامترهای لرزه‌خیزی بیست و یک چشمه لرزه‌زا در محدوده استان گلستان و نواحی پیرامون آن تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری از مرزهای استان با استفاده از درخت منطقی و تعداد سه رابطه از جدیدترین رابطه‌های تضعیف جنبش نیرومند زمین مختص ایران تعیین شد. بیشینه شتاب زمین و شتاب طیفی در دوره تناوب‌های ۰/۲، ۱ و ۲ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای نقاطی به فاصله ۵ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه تعیین و نتایج به‌صورت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان گلستان و نمودار شتاب طیفی برای ساختگاه سنگی در شهر گرگان ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مناطقی از جنوب غرب و شمال شرق استان از جمله شهر گرگان نسبت

- zoning of Golestan region, Iran: *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **18**(4), 427-456.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., and Smit, P. M., 2005, Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**(1), 1-53.
- Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*: Cambridge University Press.
- Barani, S., Spallarossa, D., and Bazzurro, P., 2009, Disaggregation of probabilistic ground-motion hazard in Italy: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(5), 2638-2661.
- Bazzurro, P., and Cornell, C. A., 1999, Disaggregation of seismic hazard: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**, 501-520.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2003, Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(1), 314-331.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**(5), 1583-1606.
- Farajpour, Z., Pezeshk, S., and Zare, M., 2019, A new empirical ground-motion model for Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **109**(2), 732-744.
- Farhadi, A., Farajpour, Z., and Pezeshk, S., 2019, Assessing predictive capability of ground-motion models for probabilistic seismic hazard in Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **109**(5), 2073-2087.
122. Kijko, A. and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 120-134.
- McGuire, R. K., 1995, Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 1275-1284.
- McGuire, R. K., and Shedlock, K. M., 1981, Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**, 1287-1308.
- مؤثرترین سناریوی ایجادکننده PGA برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در ساختگاهی واقع در شهر گرگان است. نتایج واهم‌افزایی بر اساس طول و عرض جغرافیایی نشان می‌دهد گسل‌های خزر و شمال البرز بیشترین سهم را در میزان خطر زمین‌لرزه برای شهر گرگان دارند. مقایسه نتایج برای PGA و Sa در دوره تناوب‌های مختلف برای دوره‌های بازگشت مختلف نشان می‌دهد با افزایش دوره بازگشت، میانگین بزرگا، افزایش و میانگین فاصله، کاهش می‌یابد؛ یعنی سناریوی زمین‌لرزه بزرگ‌تر و در فاصله کمتر از ساختگاه مؤثرتر است و با افزایش دوره تناوب در شتاب طیفی، میانگین بزرگا و میانگین فاصله افزایش می‌یابد؛ یعنی سناریوی زمین‌لرزه بزرگ‌تر و در فاصله بیشتر از ساختگاه مؤثرتر است.
- ### منابع
- دهقان منشادی، س. ه.، میرزائی، ن.، اسکندری قادی، م.، شعبانی، ا.، ۱۳۹۶، بررسی کاربرد آهنگ لغزش گسل‌ها در پهنه‌بندی مستقل از زمان خطر زمین‌لرزه در منطقه کرمان- غرب بلوک لوت: *مجله ژئوفیزیک ایران*، **۱۱**(۲)، ۳۶-۶۲.
- شاه‌پسندزاده، م.، ۱۳۸۳، زلزله‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساخت گستره استان گلستان، شمال خاور ایران: کنفرانس بین‌المللی زلزله (یادآور فاجعه بم)، ۸ تا ۱۰ ادی ۱۳۸۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- موسوی بفرویی، س. ح.، میرزائی، ن.، شعبانی، ا.، اسکندری قادی، م.، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها: *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۴۰**(۴)، ۱۵-۳۸.
- مهدویان، ع.، ۱۳۹۲، پهنه‌بندی لرزه‌ای استان گلستان: *فصلنامه علمی علوم زمین*، **۲۳**(۸۹)، ۱۶۵-۱۷۴.
- Abdollahzadeh, G., Khanmohammadi, L., and Zahedi Tajrishi, F., 2014, Modified probabilistic approach for seismic hazard

prediction of PGA and pseudo spectral accelerations using Iranian strong-motion data: *Journal of Seismology*, **22**(1), 263-285.

- Mirzaei, N., 1997, Seismic Zoning of Iran: dissertation, Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing. People's Republic of China.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Researches*, **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**(1), 17-30.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., and Babaie Mahani, A., 2020, A comprehensive earthquake catalogue for the Iranian Plateau (400 B.C. to December 31, 2018): *Journal of Seismology*, <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>.
- Nemati, M., Hollingsworth, J., Zhan, Z., Javad Bolourchi, M., and Talebian, M., 2013, Microseismicity and seismotectonics of the south caspian lowlands, NE Iran: *Geophysical Journal International*, **193**(3), 1053-1070.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., et al., 2014, OpenQuake Engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model: *Seismological Research Letters*, **85**(3), 692-702, doi: <https://doi.org/10.1785/0220130087>.
- Sedaghati, F., and Pezeshk, S., 2017, Partially nonergodic empirical ground-motion models for predicting horizontal and vertical PGV, PGA, and 5% damped linear acceleration response spectra using data from the Iranian Plateau: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107**(2), 934-948.
- Shabani, E., and Mirzaei, N., 2007, Probabilistic seismic hazard assessment of the Kermanshah-Sanandaj region of Western Iran: *Earthquake Spectra*, **23**(1), 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 principle and methodology of seismic zonation: *Acta Seismologica Sinica* **5**, 305-314.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(4), 974-1002.
- Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., and Soghrat, M. R., 2018, Empirical equations for the

Probabilistic seismic hazard assessment and disaggregation of seismic hazard in golestan and adjacent areas

Seyed Hasan Mousavi-Bafrouei ^{1*} and Seyed Hadi Dehghan-Manshadi ²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran

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

(Received: 13 April 2022, Accepted: 01 June 2022)

Summary

In the present study, probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) and disaggregation of seismic hazard in Golestan and adjacent areas have been conducted. The study area includes Golestan province and surrounding areas to about 150 km away from the geographical borders of the province. For this purpose, at the first stage, geological and seismotectonic studies, including the tectonic features, faults dimensions, and faults mechanism in the study area have been studied. The seismicity parameters including b-value, annual mean occurrence rate (λ) and maximum possible magnitude (M_{max}) of the study area are evaluated based on the uniform catalog containing historical and instrumental earthquakes from 400 BC to the end of 2021 AD with magnitudes ranging from 3.5 to 7.5 on the Mw scale. Based on the geological and seismological information of the study area, 21 areal seismic source zones have been identified. Using the spatial distribution function, the annual mean occurrence rate of earthquakes of each seismic source has been determined in different magnitude intervals. The latest three local ground motion prediction equation models of the Iranian plateau, have been employed to assess the peak ground acceleration (PGA) and spectral acceleration (SA) in periods of 0.2, 1, and 2 seconds for return periods of 50, 475 and 2475 years. A three branches logic tree with the same weight has been used to apply the GMPEs. The GMPEs are specific to Iran and used for the first time in the study area. The entire study area is divided into points that are 5 km apart. Subsequently, the PGA and SA have been calculated for each point with the OpenQuake software package. The results are presented in the form of seismic hazard zoning maps in Golestan province and spectral acceleration curves for Gorgan city. The calculations are on the bedrock site condition according to the Iranian code of practice for seismic resistant design on building (Standard No. 2800 4th edition). In order to determine the most effective seismic source in the PGA of the Gorgan, the disaggregation of PSHA has been conducted on the parameters of distance, magnitude, the number of standard deviations (ϵ), and latitude and longitude. The most probable scenario of maximum acceleration in Gorgan has been introduced. The results show that some areas of the Gorgan, Kord-Kouy, Agh-Ghala and Ali-Abad in southwest and Maraveh-Tapeh in northeast of the province can be affected by more ground acceleration than other areas so that the maximum ground acceleration in these areas for the return period of 475 years is 0.21g to 0.25g. The disaggregation of PSHA for Gorgan city shows that the Caspian and North Alborz faults have the most substantial contribution in the PGAs of Gorgan.

Keywords: Seismic hazard assessment, logic tree, Golestan, seismicity, peak ground acceleration, disaggregation