

Seismic hazard analysis of the neighbouring cities of Dorouneh Fault system by two methods: deterministic and probabilistic based on slip rate

Mohammad Hosein Tahriri¹, Hamid Saffari^{2*}

1- Master of Science in Civil-Earthquake Engineering, faculty of civil, water & environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor in Civil-Earthquake Engineering, faculty of civil, water & environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Earthquake is one of the strongest natural phenomena that can cause significant human and financial losses to human societies. This phenomenon is caused by the sudden release of energy in seismic sources. By knowing the high-risk areas, using site earthquake hazard analysis studies and preventive planning, earthquake risks can be significantly reduced and probable risks caused by earthquakes can be prevented. In this research, the seismic hazard for the neighboring cities of Dorouneh fault system in North-East of Iran is investigated. The mentioned fault system has a total length of more than 700 km and its sliding rate is estimated at 2.5 mm per year. In order to analyze the earthquake hazard of the cities around this fault system, a complete seismic catalog was collected for analysis. Due to the dispersion of magnitude units in the catalog, all units were unified and in order to create statistical independence of the events, Reasenbergs algorithm was used. For faults whose slip rate was known, the slip rate was used in probabilistic hazard analysis. Finally, by identifying the linear and area sources of the studied area and using appropriate attenuation relationships, the results of the seismic risk analysis of the cities of Kashmar, Bardaskan, Tayebad, Bakharz, Torbat-e-Heydarieh, Khalilabad, Anabad and Salamei in two probabilistic (PSHA) and deterministic (DSHA) methods were calculated. The outputs of PSHA showed that the PGA in an earthquake with a return period of 475 years in some of the studied cities is higher than the values recommended by Iran's 2800 standard. For example, the cities of Anabad, Khalilabad, Bardaskan, and Kashmar have a PGA of 0.46, 0.37, 0.35, and 0.34 g, respectively, more than the values recommended in the 2800 standard (0.3 g in the area with high relative risk). Therefore, it seems necessary to use site specific hazard analysis for these cities to prevent probable damages.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 June 2023

Revise Date: 27 November 2023

Accept Date: 04 January 2024

Keywords:

Seismic hazard analysis
Probabilistic hazard analysis
Deterministic hazard analysis
Fault slip rate
Dorouneh Fault system PGA

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.398478.3127>

*Corresponding author: Hamid Saffari

Email address: h_saffari@sbu.ac.ir

تحلیل خطر لرزه ای شهر های همجوار سامانه گسلی درونه به دو روش تعینی و احتمالاتی بر اساس نرخ لغزش

محمدحسین تحریری^۱، حمید صفاری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

زلزله یکی از قوی ترین پدیده های طبیعی است که می تواند خسارات جانی و مالی قابل توجهی را به جوامع بشری تحمیل کند. این پدیده در اثر آزاد شدن ناگهانی انرژی در چشمه های لرزه زا ایجاد می شود. با شناختن مناطق پرخطر، استفاده از مطالعات تخصصی تحلیل خطر زلزله و برنامه ریزی پیشگیرانه می توان خطرات زلزله را به طور قابل توجهی کاهش داد و از خطرات احتمالی ناشی از زمین لرزه پیشگیری کرد. در این پژوهش، خطر لرزه ای برای شهرهای همجوار سامانه گسلی درونه در شمال شرق ایران مورد بررسی قرار گرفت. سامانه گسلی مذکور در مجموع طولی بیش از ۷۰۰ کیلومتر دارد و نرخ لغزش آن حدود ۲/۵ میلی متر در سال تخمین زده شده است. جهت تحلیل خطر زلزله شهرهای اطراف این سامانه گسلی، کاتالوگ لرزه ای کاملی جهت تجزیه و تحلیل گردآوری شد و با توجه به پراکندگی واحدهای بزرگای موجود در کاتالوگ، تمامی واحدها یکسان سازی و به منظور ایجاد استقلال آماری رویدادها از الگوریتم ریزبرگ استفاده شد. برای گسلهایی که نرخ لغزش آنها مشخص بود از آن در تحلیل خطر احتمالاتی استفاده شد. برای گسلهایی که نرخ لغزش آنها مشخص بود از آن در تحلیل خطر احتمالاتی استفاده گردید. در نهایت با شناسایی منابع خطی و سطحی منطقه مورد مطالعه و استفاده از روابط کاهندگی مناسب، نتایج تحلیل خطر لرزه ای شهرهای کاشمر، بردسکن، تایباد، باخرز، تربت حیدریه، خلیل آباد، انابد و سلامی در شمال شرق ایران به دو روش احتمالاتی (PSHA) و تعینی (DSHA) ارائه شد. خروجی های تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی نشان داد بیشینه شتاب سطح زمین در زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در برخی از شهرهای مورد مطالعه از مقادیر توصیه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ ایران بیشتر است. برای نمونه شهرهای انابد، خلیل آباد، بردسکن و کاشمر به ترتیب با بیشینه شتاب سطح زمین برابر با ۰.۴۶، ۰.۳۷، ۰.۳۵ و ۰.۳۴ g شتاب بیشتری از مقادیر توصیه شده در استاندارد ۲۸۰۰ (۰.۳g) در پهنه با خطر نسبی زیاد) دارند. بنابراین استفاده از تحلیل خطر ویژه ساختمان برای این شهرها جهت جلوگیری از خسارت های احتمالی ضروری به نظر می رسد.

کلمات کلیدی: تحلیل خطر لرزه ای، تحلیل خطر احتمالاتی، تحلیل خطر قطعی، نرخ لغزش گسل، سامانه گسلی درونه، بیشینه شتاب

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.398478.3127
۱۴۰۲/۰۳/۱۸	۱۴۰۲/۰۹/۰۶	۱۴۰۲/۱۰/۱۴	۱۴۰۲/۱۰/۱۴	۱۴۰۲/۰۶/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2024.398478.3127
*نویسنده مسئول:		حمید صفاری			
پست الکترونیکی:		h_saffari@sbu.ac.ir			

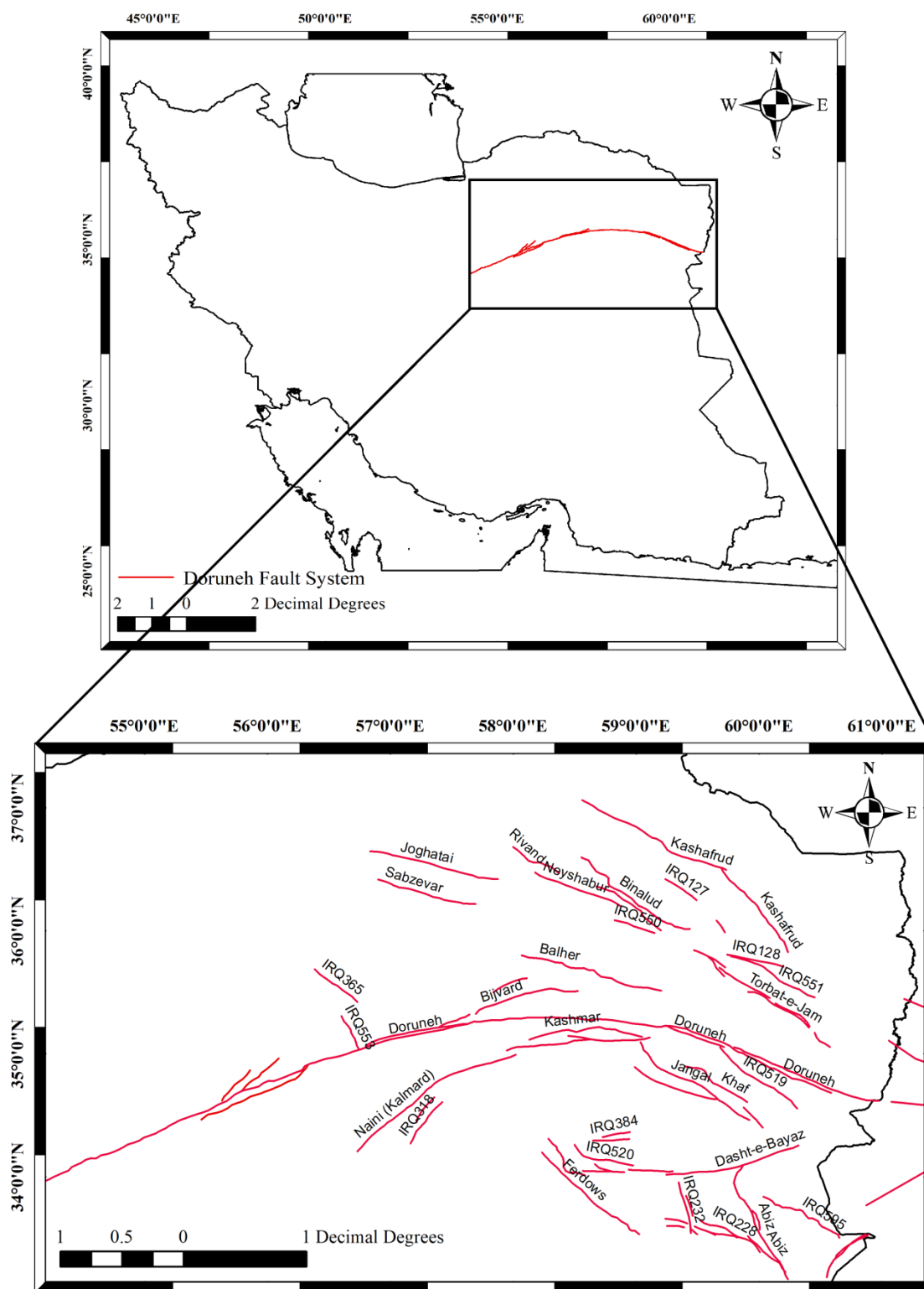
۱- مقدمه

زلزله یکی از بزرگ‌ترین مخاطرات طبیعی است که هر ساله خسارات زیادی را به مردم وارد می‌کند. امروزه زندگی میلیون‌ها نفر از مردم جهان با خطرات ناشی از زلزله روبرو هستند. میلیون‌ها دلار از زیرساخت‌های هر کشور همواره در معرض خطر صدمات ناشی از زلزله قرار دارند به طوری که در سال ۲۰۲۲ خسارات اقتصادی جهانی ناشی از زلزله حدود ۱۴ میلیارد دلار برآورد شده است [۱]. در دهه‌های گذشته، رشد روزافزون جمعیت همراه با گسترش شهرنشینی برنامه‌ریزی نشده و مدیریت ضعیف زمین، باعث افزایش خطر زلزله به‌ویژه در مناطق نزدیک گسل‌ها شده است. یکی از بهترین تلاش‌ها برای ارزیابی خطر زلزله، به‌ویژه در مناطق پرجمعیت شهری، بهره‌گیری از مطالعات تخصصی و علمی است. کاهش خطر زلزله مستلزم موقعیت‌یابی دقیق و طراحی سازه‌های ایمن در برابر زلزله و مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود است. این امر با انجام تحلیل خطر زلزله میسر است. چارچوب کلی تحلیل خطر لرزه‌ای شامل مراحل زیر است:

۱. جمع‌آوری و پردازش وقایع لرزه‌ای جهت شناخت و مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌ها
۲. مدل‌سازی منابع لرزه‌ای بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده
۳. انتخاب و به‌کارگیری معادلات پیش‌بینی حرکت زمین متناسب با ساختگاه
۴. تحلیل خطر احتمالی و تعیینی ساختگاه

با توجه به قرار گرفتن ایران در کمربند لرزه‌ای آلپ-همالیا و در محل برخورد ورقه‌های اوراسیا- عربستان، این کشور از نظر لرزه‌ای فعال محسوب می‌شود. با توجه به این موضوع رخ دادن زلزله در ایران امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از بزرگ‌ترین سامانه‌های گسلی در ایران سامانه گسلی درونه نام دارد. این سامانه گسلی بعد از گسل اصلی معکوس زاگرس، بزرگ‌ترین سامانه گسلی ایران است [۲]. سامانه گسلی درونه یا گسل بزرگ کویر [۳] برای اولین بار توسط ولمن [۴] معرفی شد. این سامانه گسلی در مجموع بیش از ۷۰۰ کیلومتر طول دارد. با توجه به هندسه خمیده این گسل می‌توان آن را به سه بخش تقسیم کرد. بخش شرقی از مرز افغانستان تا شهرستان تربت‌حیدریه دارای راستای شمال غربی جنوب شرقی است. شاخه‌ای از بخش شرقی این گسل جدا شده و با راستای تقریبی شرقی-غربی به داخل کشور افغانستان کشیده می‌شود که شاخه افغان سامانه گسلی درونه نامیده می‌شود. بخش میانی از شهرستان تربت‌حیدریه تا حوالی روستای انابد به صورت شرقی-غربی بوده و بخش غربی از انابد تا انارک به صورت شمال شرقی-جنوب غربی امتداد دارد. سازوکار بخش غربی گسل به صورت امتدادلغز چپ بر با مؤلفه معکوس، بخش مرکزی امتدادلغز چپ بر بدون مؤلفه معکوس و ناحیه شرقی به صورت معکوس می‌باشد [۵]. در آخرین تحقیقات موسوی و همکاران نرخ لغزش این گسل حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال تخمین زده شده است [۶]. از دیگر گسل‌های فعال در این منطقه می‌توان به گسل‌های تربت‌جام، نیشابور، بینالود، کشفرو، خواف، فردوس و... اشاره کرد (شکل ۱).

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های زلزله‌های رخ داده در مجاورت سامانه گسلی درونه و همچنین انجام تحلیل خطر لرزه‌ای برای شهرهای کاشمر، بردسکن، تایباد، باخرز، تربت‌حیدریه، خلیل‌آباد، انابد و سلامی در اطراف این سامانه گسلی در شمال شرق ایران می‌باشد.



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه و گسل‌های منطقه

۲- لرزه‌خیزی منطقه

وقایع لرزه‌ای را می‌توان به دودسته زمین‌لرزه‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی) و وقایع دستگاهی (بعد از ۱۹۰۰ میلادی) تقسیم کرد. اولین واقعه تاریخی منتسب به این سامانه گسلی مربوط به زلزله سال ۱۳۳۶ میلادی خواف [۷] می‌باشد. این زلزله با بزرگای ۷/۵ بزرگ‌ترین زلزله منتسب به این سامانه گسلی است. در سال ۱۶۱۹ میلادی نیز زلزله ویرانگری منطقه زاوه در خراسان را کاملاً ویران کرد [۷]. در سپتامبر سال ۱۹۰۳ میلادی مصادف با ۳ رجب ۱۳۲۱ هجری زلزله‌ی شدیدی آسیب‌های گسترده‌ای به منطقه‌ی کاشمر در خراسان رسانید. این زمین‌لرزه حدود ۳۵۰ تن را کشت [۷]. در مورد سابقه لرزه‌خیزی دستگاهی این سامانه گسلی می‌توان به زمین‌لرزه ۲۵ مه ۱۹۲۳ میلادی کاج درخت [۸] و زمین‌لرزه‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ میلادی در شهرستان کاشمر اشاره کرد. جدیدترین زلزله‌های این منطقه مربوط به زلزله ۲۷ اگوست سال ۲۰۱۰ تربت‌حیدریه با بزرگای گشتاور ۵/۹ و زلزله ۵ آپریل ۲۰۱۷ در فریمان با بزرگای گشتاور ۶/۱ و عمق ۱۰ کیلومتری زمین می‌باشد. رومرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت [۹].

۳- داده‌ها و روش پژوهش

هدف از برآورد خطر زمین‌لرزه، ارزیابی پارامترهای جنبش زمین (بیشینه شتاب، بیشینه سرعت و مانند آن) در مدت‌زمان معین است. برای دستیابی به این هدف ابتدا تمام اطلاعات تاریخی و دستگاهی منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شده و یک کاتالوگ جامع از زمین‌لرزه‌های منطقه تهیه شده است. برای استخراج زمین‌لرزه‌های دستگاهی از کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES)^۱ و برای زمین‌لرزه‌های تاریخی از کتاب تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران [۷] استفاده گردید.

روش‌های متفاوتی برای جمع‌آوری داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود، این موضوع باعث تفاوت مقیاس‌های بزرگای موجود در گزارش‌ها می‌شود. بنابراین گام بعدی در این پژوهش، شناسایی الگوریتم‌های ثبت مشخصات وقایع لرزه‌ای و مقیاس بزرگای آن‌ها است. در مطالعه حاضر برای یکسان‌سازی واحدهای بزرگا و جهت تبدیل این واحدها در کاتالوگ لرزه‌ای به بزرگای گشتاور (M_w) از روابط ارائه‌شده توسط شاهوار و همکاران [۱۰] که برای فلات ایران ارائه شده است، استفاده شد.

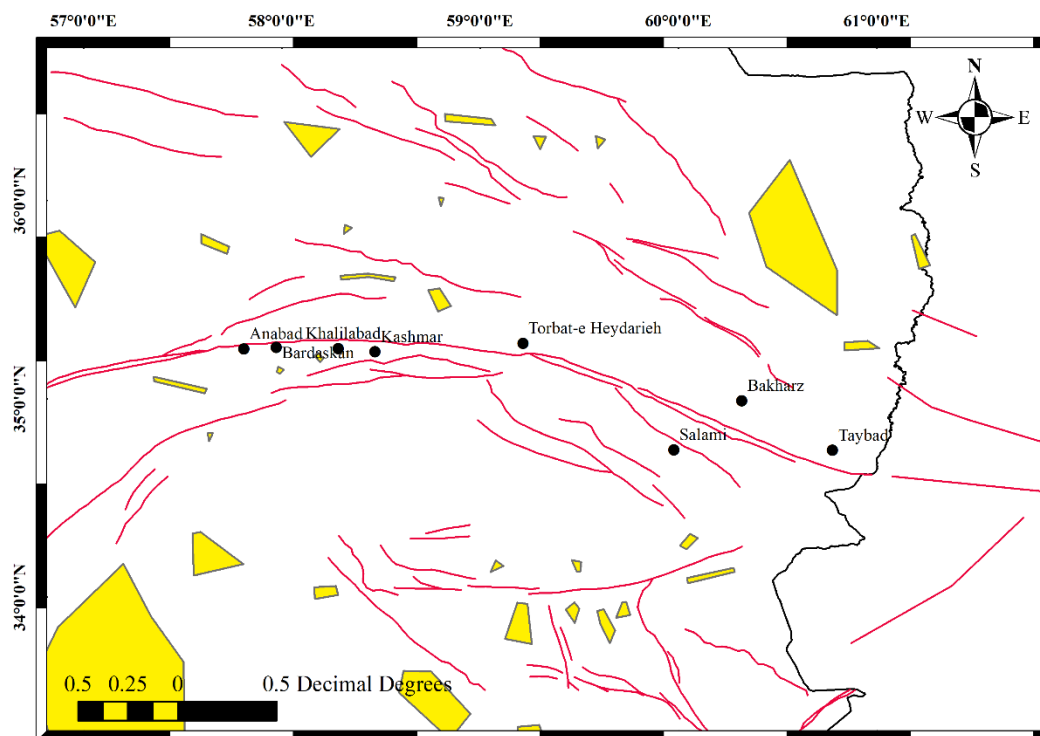
به‌طور کلی در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای، فرض می‌شود که زمین‌لرزه‌های رخ داده مستقل از مکان و زمان هستند. بنابراین مجموعه داده‌های لرزه‌ای باید به‌صورت پواسونی توزیع شوند. در این مطالعه، کاتالوگ نهایی پس از حذف رخداد‌های لرزه‌ای وابسته با استفاده از مدل ارائه‌شده توسط ریزنبرگ^۲ [۱۱] و به کمک افزونه zmap7 [۱۲] تهیه شد. این افزونه تحت نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود و به‌صورت رایگان در اختیار عموم قرار دارد.

۳-۱- شناسایی منابع لرزه‌ای

همان‌طور که اشاره شد، یکی از پیش‌نیازهای اساسی در مطالعات زلزله‌شناسی، جمع‌آوری داده‌های لرزه‌ای است. اطلاعات به‌دست‌آمده از این منابع، از جمله اجزای بسیار مهمی از مطالعه هستند که باید به‌دقت مورد تحلیل و پردازش قرار گیرند. تعیین مکانیزم گسل‌ها، هندسه چشمه‌های سطحی، طول گسیختگی و حداکثر زلزله منتسب به هر چشمه خروجی اصلی این بخش است. در منطقه مورد مطالعه ۸۳ چشمه لرزه‌زای فعال متشکل از چشمه‌های سطحی و خطی شناسایی شد. سازوکار و مشخصات هندسی گسل‌ها از نقشه‌های تهیه‌شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استخراج و برای محاسبه حداکثر زلزله منتسب به هر چشمه از روابط ارائه‌شده توسط ولز و کوپر اسمیت [۱۳] استفاده شد. همچنین حد پایین بزرگای لرزه‌ای در این مطالعه $M_w = 4/5$ در نظر گرفته شد. شکل ۲ چشمه‌های لرزه‌زای فعال در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از شهرهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

¹ International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

² Reasenber



شکل ۲: چشمه‌های لرزه‌ای فعال در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از شهرهای کاشمر، بردسکن، تایباد، باخرز، تربت‌حیدریه، خلیل‌آباد، انابد و سلامی در اطراف سامانه گسلی درونه در شمال شرق ایران

*گسل‌ها با خطوط قرمز و چشمه‌های سطحی با پلیگون‌های زرد مشخص شده‌اند.

۲-۳- روش تحلیل خطر احتمالاتی^۳

ارزیابی خطر بخشی از ارزیابی ریسک است و به‌طور گسترده در پیش‌بینی و پیشگیری از حوادث استفاده می‌شود [۱۴]، [۱۵]. روش‌های برآورد خطر زمین‌لرزه را می‌توان به دودسته روش احتمالاتی (PSHA) و روش تعینی (DSHA) تقسیم کرد [۱۶]. تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ توسط کرنل [۱۷] پیشنهاد شد. در این روش تمامی زلزله‌های ممکن در اطراف منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود تا یک مشخصه از حرکت زمین مانند شتاب، سرعت یا تغییر مکان بیشینه به همراه احتمال تجاوز از آن در یک دوره زمانی مشخص به دست آید. مراحل اصلی این روش عبارت‌اند از:

۱. جمع‌آوری و پردازش وقایع لرزه‌ای به‌منظور تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و مدل‌سازی آن‌ها
۲. مشخص کردن تابع چگالی احتمال فاصله و بزرگای زلزله‌ی محتمل در ساختگاه
۳. انتخاب روابط کاهندگی مناسب و سازگار با منطقه
۴. ارزیابی پارامترهای جنبش زمین

³ Probabilistic Seismic Hazard Analysis

۳-۳- روش تحلیل خطر تعیینی^۴

در این روش، رخداد خاصی از زلزله بر اساس گسل مسبب و فاصله از ساختگاه بر اساس نظرات کارشناسی انتخاب و با بهره‌گیری از روابط کاهندگی مناسب، مقدار پارامترهای جنبش زمین به دست می‌آید. این روش، صرفاً در مورد برخی سازه‌های خاص مانند سدها و نیروگاه‌ها که تخریب آن‌ها عواقب شدیدی ایجاد می‌کند، به کار می‌رود. در این روش تحلیل، از توزیع نرمال^۵ برای بررسی پراکنش داده‌ها و تحلیل خطر زلزله استفاده می‌شود. این توزیع یکی از مهم‌ترین توزیع‌های موجود در نظریه احتمالات است. با بهره‌گیری از این توزیع، صدک‌ها ۵۰٪، نصف داده‌ها را پوشش می‌دهد. با اضافه کردن یک انحراف استاندارد به این میزان، صدک ۸۴٪ به دست می‌آید که ۸۴٪ داده‌ها را پوشش می‌دهد. امروزه روش‌های جدیدی نیز تحت عنوان روش نوین تحلیل خطر تعیینی (NDSHA)^۶ نیز به کار گرفته می‌شود. ادبیات فنی این روش در حدود ۲۵ سال پیش توسط پانزا و همکاران معرفی شد [۱۸]، [۱۹]. این روش به‌طور قابل‌اعتماد و واقعی مجموعه گسترده‌ای از حرکات زمین‌لرزه‌ای را شبیه‌سازی می‌کند و مبتنی بر انتشار امواج زلزله است. اخیراً راستگو و همکاران [۲۰] برای ارزیابی خطر لرزه‌ای در بخش‌هایی از ایران از این روش استفاده کرده‌اند.

۳-۴- معادلات پیش‌بینی حرکت زمین^۸

یکی از عناصر کلیدی در تحلیل خطر زلزله، انتخاب روابط کاهندگی مناسب می‌باشد. این روابط بر اساس پارامترهای مدل لرزه‌ای مختلف مانند فاصله منبع لرزه‌ای تا مکان، بزرگی زلزله، طول گسل و نوع و سازوکار گسل توسعه یافته‌اند. به همین جهت روابط انتخابی باید با ساختار تکتونیکی و لرزه زمین ساختی منطقه مورد مطالعه سازگار باشند. در این پژوهش، برای محاسبه‌ی خطر لرزه‌ای از سه رابطه کاهندگی کمپل و بزرگنیا [۲۱]، چو و یانگز [۲۲] و بور و اتکینسون [۲۳] و با در نظر گرفتن نوع خاک هر منطقه استفاده شد و میانگین نتایج با وزن یکسان ارائه شده است. کمپل و بزرگنیا [۲۱]، چو و یانگز [۲۲] و بور و اتکینسون [۲۳] پژوهشگران مرکز تحقیقات زمین‌لرزه دانشگاه برکلی هستند که روابط خود را بر اساس بانک داده‌های شتاب‌نگاری زمین‌لرزه‌های نقاط مختلف جهان ارائه داده‌اند. در کلیه روابط، برآوردها با میرایی ۵ درصد مدنظر قرار گرفته است. در این مطالعه برای محاسبه خطر لرزه‌ای از نرم‌افزار EZ-FRISK 7.52 و با در نظر گرفتن اثرات جهت پذیری حوزه نزدیک از روش هوانگ و همکاران [۲۴]، جهت محاسبه و ارزیابی پارامترهای حرکت زمین استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

تحلیل خطر زلزله یک فرآیند علمی و مهندسی است که به منظور ارزیابی و تخمین میزان خطر زمین‌لرزه انجام می‌شود. این تحلیل به منظور تدوین استراتژی‌ها و برنامه‌های مدیریت خطر و آمادگی برای وقوع زمین‌لرزه ضروری است. در این مطالعه، رویکردهای مختلف برای تحلیل خطر زلزله بیان و به اهمیت آن‌ها در مدیریت خطر زلزله برای شهرها و مناطق زلزله‌خیز تأکید شده است. همان‌طور که پیش‌تر به تفصیل بیان شد، یکی از رویکردهای متداول برای تحلیل خطر زلزله، رویکرد احتمالاتی است. در این رویکرد، از تحلیل احتمالاتی استفاده می‌شود تا مقادیر محتمل پارامترهای حرکت زمین، مانند شدت زلزله و زمان وقوع آن، در یک منطقه مشخص در طی یک بازه زمانی خاص تخمین زده شود. رویکرد دیگر، رویکرد قطعی است. در این رویکرد تحلیل خطر لرزه‌ای، بر اساس بدبینانه‌ترین حالت بر اساس گسل مسبب و با توجه به فاصله از ساختگاه برآورد می‌شود.

نتایج تحلیل خطر زلزله، به‌ویژه برای شهرها و مناطقی که در معرض خطر زلزله قرار دارند از اهمیت بسیاری برخوردارند. این اطلاعات به مدیران شهری کمک می‌کنند تا اقدامات احتیاطی، ساختاری و مدیریتی مناسب را برای مقابله با خطر زلزله اتخاذ کنند. این تدابیر شامل تقویت سازه‌های قدیمی، اجتناب از ساخت سازه‌های جدید در مناطق خطرناک، و ایجاد طرح‌های اضطراری برای حالات فوری

⁴ Deterministic Seismic Hazard Analysis

⁵ Normal distribution

⁶ Fractile

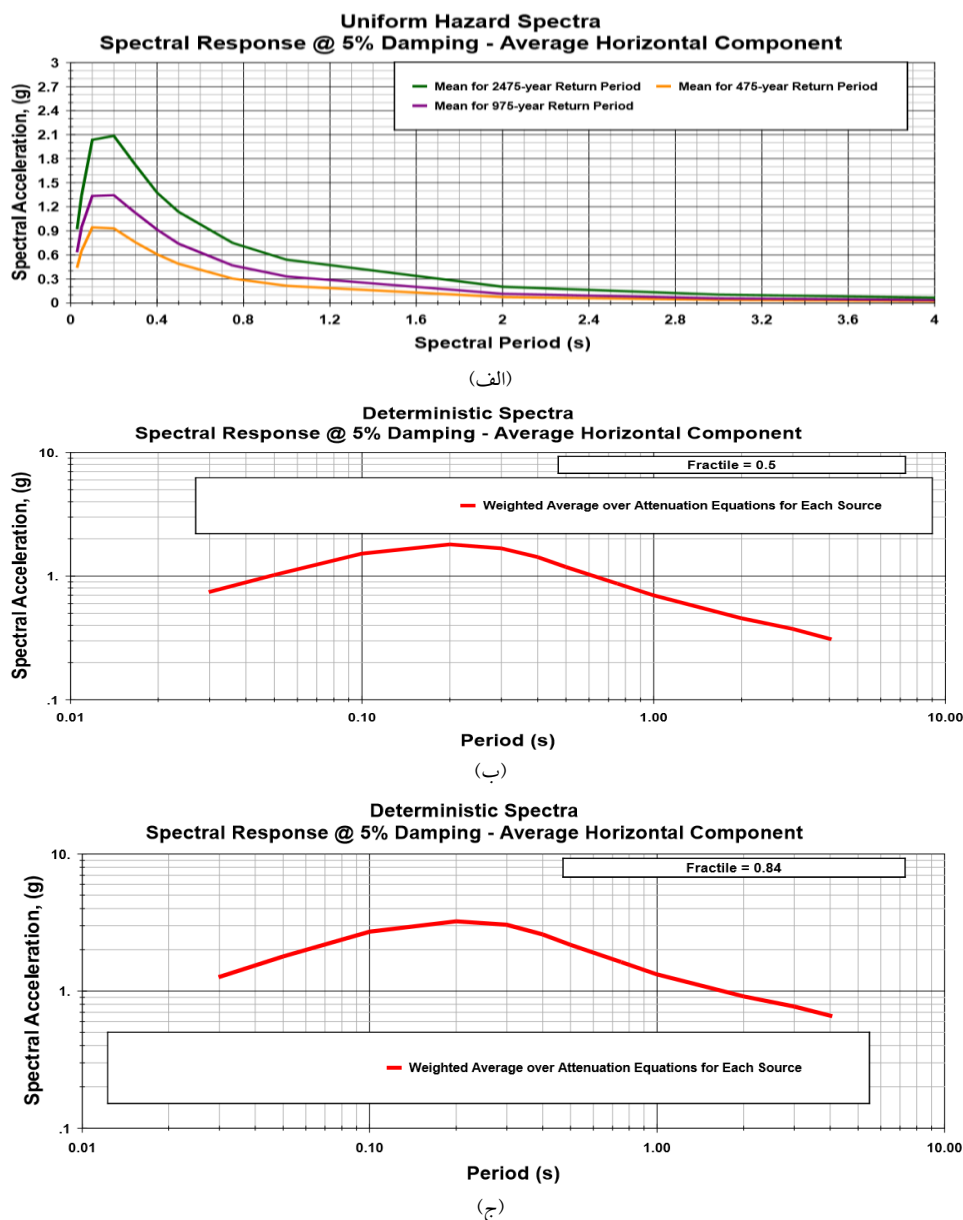
⁷ Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment

⁸ Ground motion prediction equations

زمین‌لرزه می‌شوند. این اقدامات به تضمین امنیت جانی و مالی شهروندان کمک می‌کنند و تأثیرات زلزله را به حداقل می‌رسانند. در ادامه، نتایج تحلیل خطر زلزله برای شهرهای مجاور سامانه گسلی درونه، ارائه می‌شود. خروجی تحلیل‌های لرزه‌ای در هر شهر نخست خروجی تحلیل خطر احتمالاتی به ازای سه دوره بازگشت (۹۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال) و سپس تحلیل خطر قطعی به ازای دو احتمال ۵۰٪ (میانه) و ۸۴٪ (میانگین به‌اضافه انحراف استاندارد) می‌باشد. ضمناً شرایط خاک ساختگاه بر اساس متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول در ایستگاههای شتابنگاری شهرهای مورد مطالعه که عموماً مستقر در فرمانداری‌ها و مرکز آن شهرها می‌باشد انتخاب شده است. برای محدود شهرهایی که ایستگاه شتابنگاری ندارند سرعت موج برشی متوسط تیپ ۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران لحاظ گردید. این مقادیر در جدول ۱ درج شده‌اند.

۱-۴- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر انابد

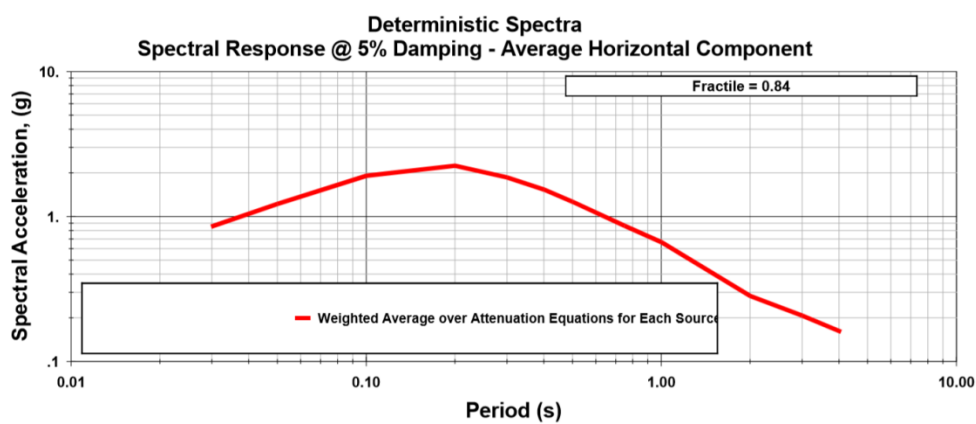
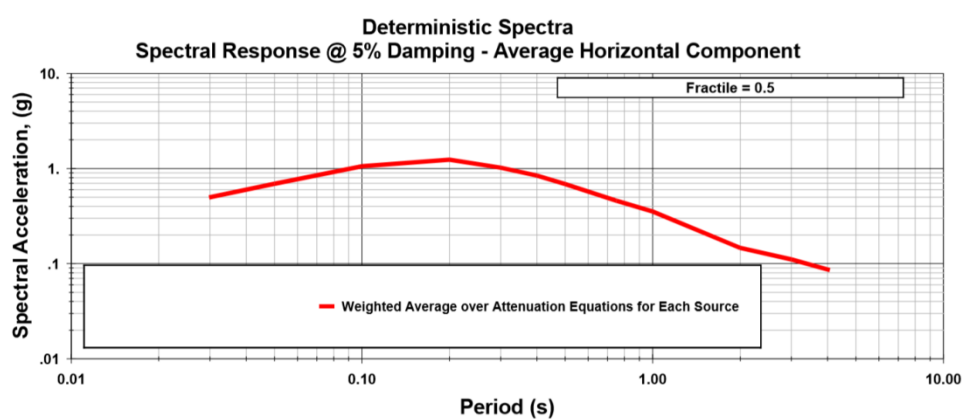
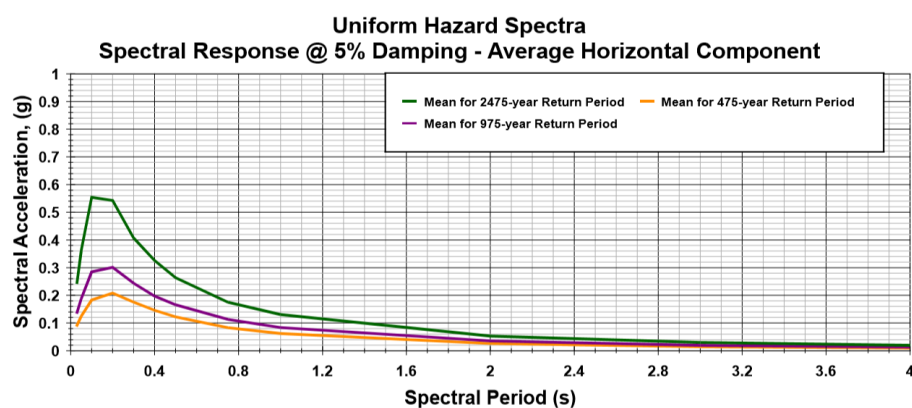
شهر انابد یکی از شهرهای مهم استان خراسان رضوی در ایران است. این شهر در فاصله‌ای نسبتاً نزدیک به شهرستان بردسکن قرار دارد و جمعیت این شهر بر اساس سرشماری نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، به تعداد ۶۱۶۸ نفر تخمین زده شده است. نتایج تحلیل خطر زلزله به دو رویکرد احتمالاتی و قطعی برای شهرستان انابد، در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ در صد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ در صد شهرستان انابد

۲-۴- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر باخرز

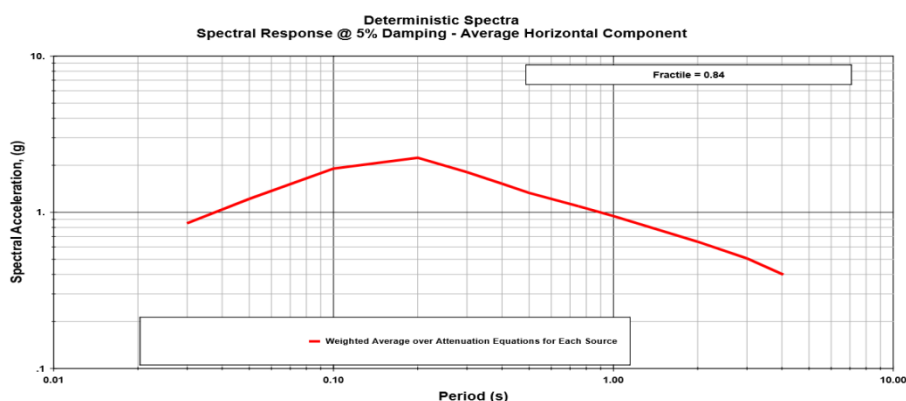
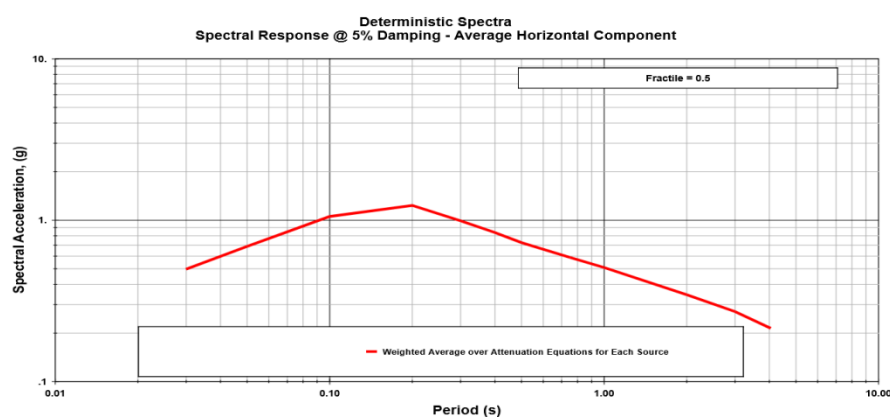
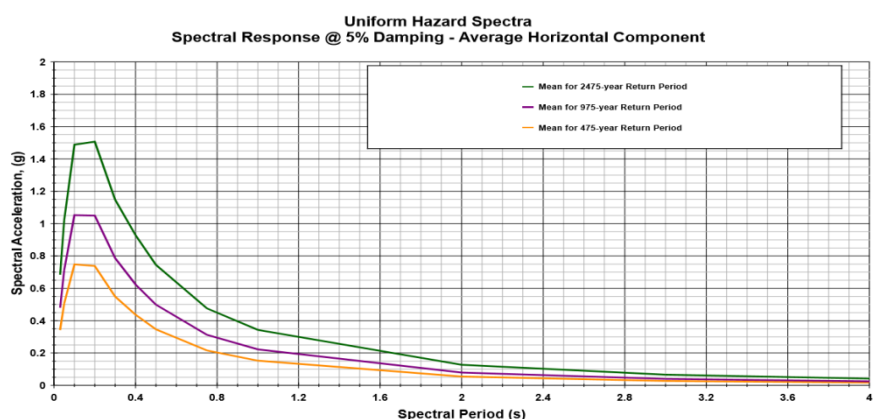
شهر باخرز، مرکز شهرستان باخرز در استان خراسان رضوی واقع شده و در شمال شرق ایران قرار دارد. باخرز یکی از شهرستان‌های تاریخی ایران است و بر پایه سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵ جمعیت این شهر ۹۰۴۴ نفر در ۲۵۳۶ خانوار بوده است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی شهرستان باخرز در شکل ۴ قابل‌رویت است.



شکل ۴: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ در صد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ در صد شهرستان باخرز

۳-۴- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر بردسکن

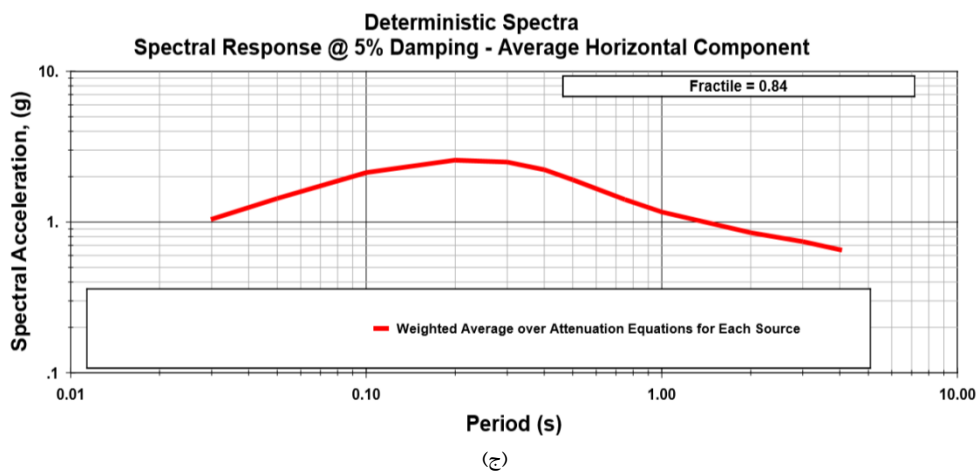
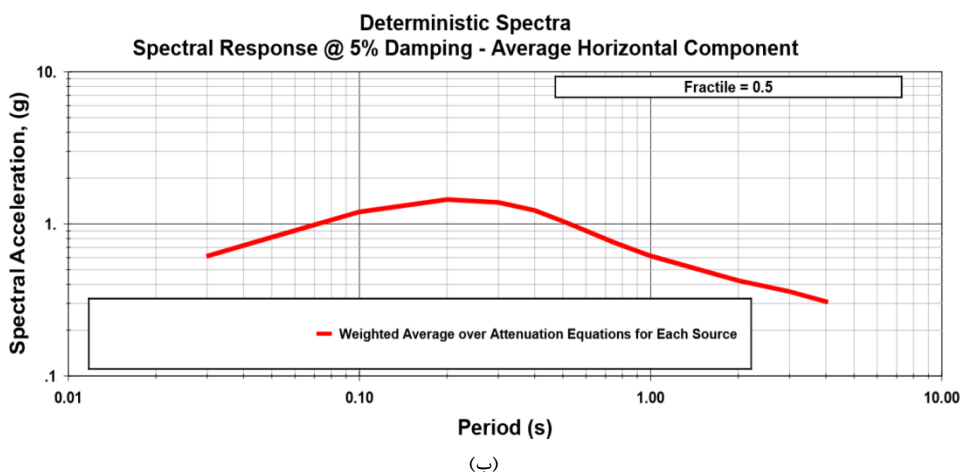
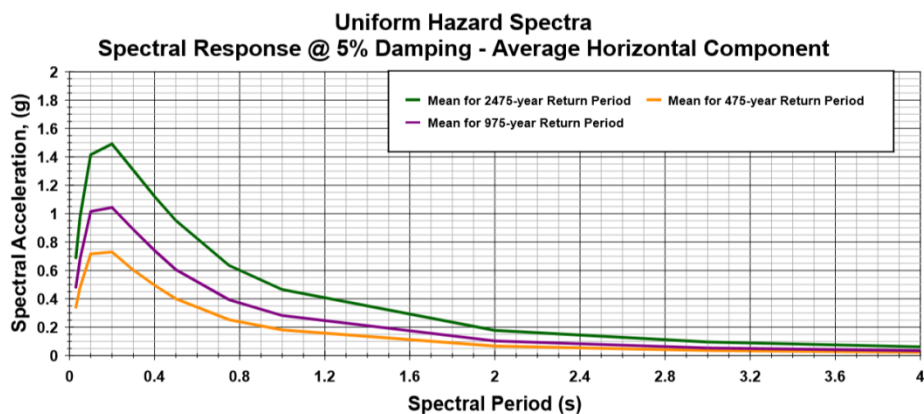
شهر بردسکن، یکی از شهرهای غرب استان خراسان رضوی در ایران است. این شهر به‌عنوان مرکز شهرستان بردسکن شناخته می‌شود و در سال ۱۳۹۵، تعداد ۲۸۲۳۳ نفر جمعیت در ۸۵۷۰ خانوار را در خود جای داده است. بردسکن در گذشته بر سر یکی از راه‌های اصلی تجاری خراسان به دیگر نقاط ایران از راه کویر قرار داشت. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی بردسکن در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ درصد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ درصد در شهرستان بردسکن

۴-۴- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کاشمر

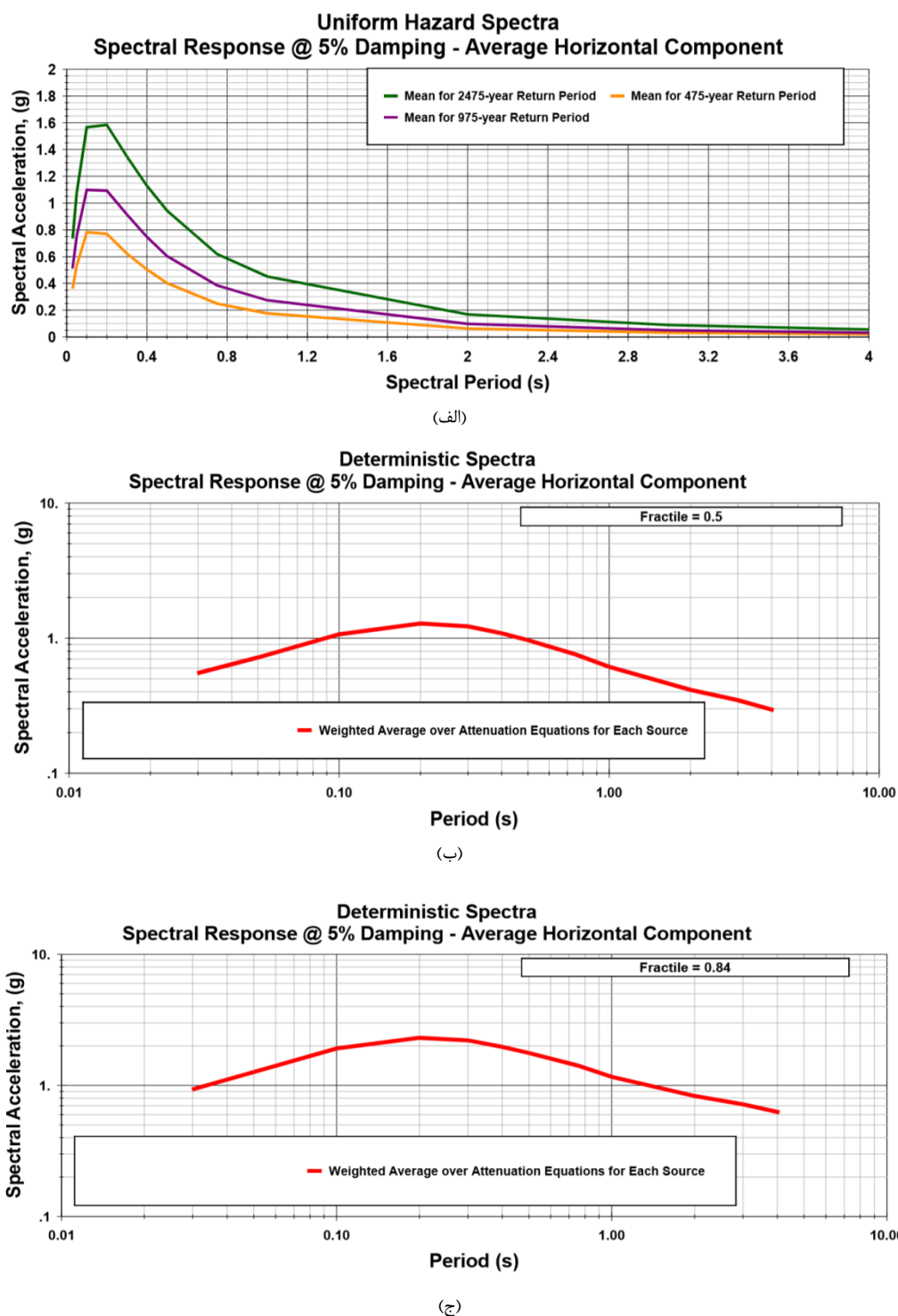
شهر کاشمر، مرکز شهرستان کاشمر، در شرق ایران و جنوب غربی استان خراسان رضوی، در حدود ۲۴۰ کیلومتری شهر مشهد قرار دارد. کاشمر در سال ۱۳۹۵، تعداد ۱۰۲۲۸۲ نفر جمعیت داشته است. کاشمر از شهرهای باستانی ایران و خاستگاه تمدن‌های پنج‌هزارساله نای است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی کاشمر در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ در صد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ در صد شهرستان کاشمر

۴-۵- تحلیل خطر لرزه‌ای خلیل‌آباد

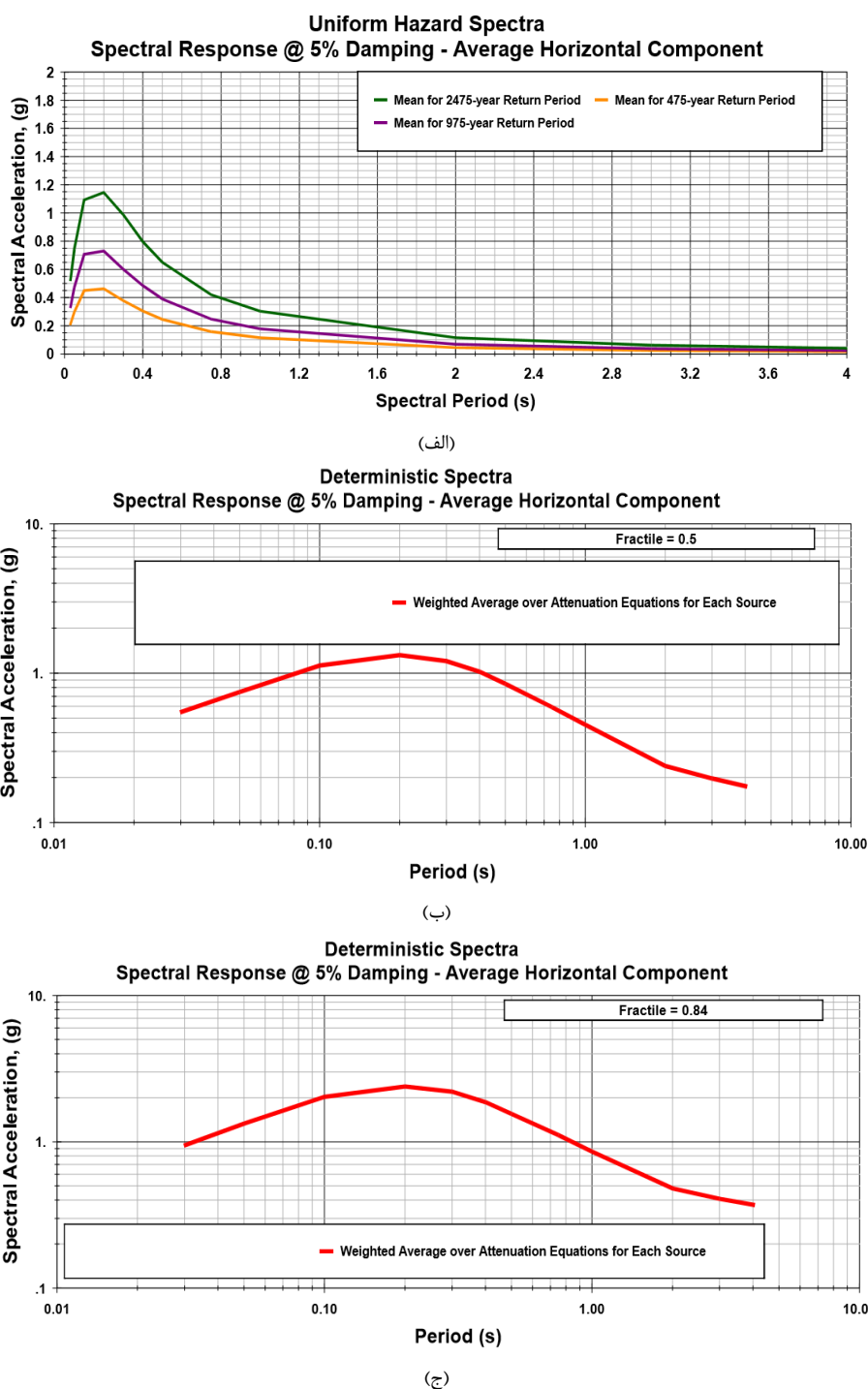
شهرستان خلیل‌آباد با جمعیت ۵۱۷۰۱ نفر بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ بین شهرستان‌های کاشمر و بردسکن قرار گرفته است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی خلیل‌آباد در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ درصد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ درصد شهرستان خلیل‌آباد

۴-۶- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر سلامی

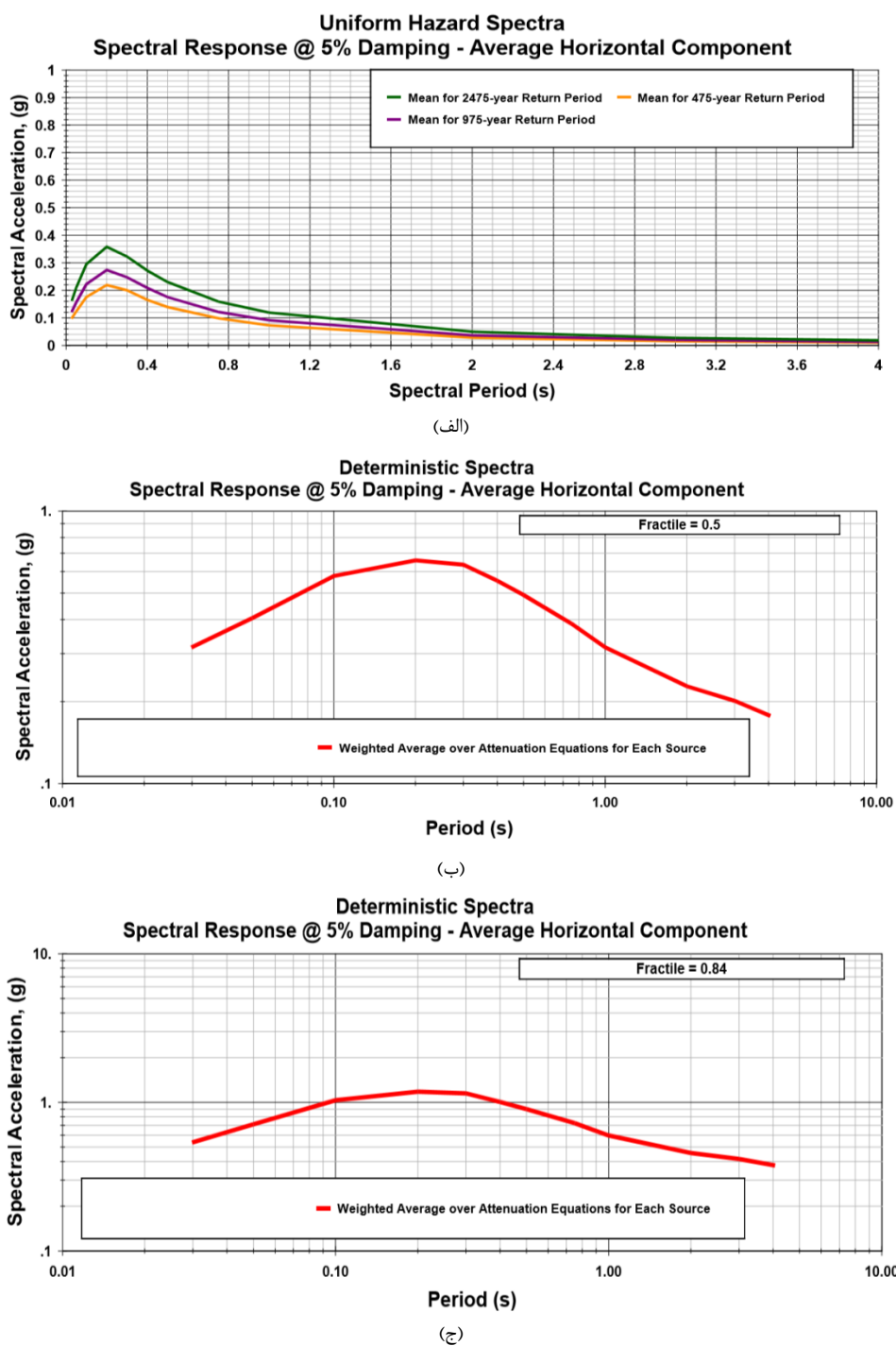
سلامی یا سلامه شهری تاریخی در شهرستان خواف واقع در استان خراسان رضوی است. این شهر دارای آثار تاریخی نظیر کوشک سلامی، سد سلامی و آسیاب دوقلو سلامی می‌باشد. مسافت این شهر تا مرکز شهرستان، حدود ۲۵ کیلومتر و جمعیت این شهر در سال ۱۳۹۵، ۷۵۵۵ نفر اندازه‌گیری شده است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی سلامی در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ در صد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ در صد شهرستان سلامی

۷-۴- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر تایباد

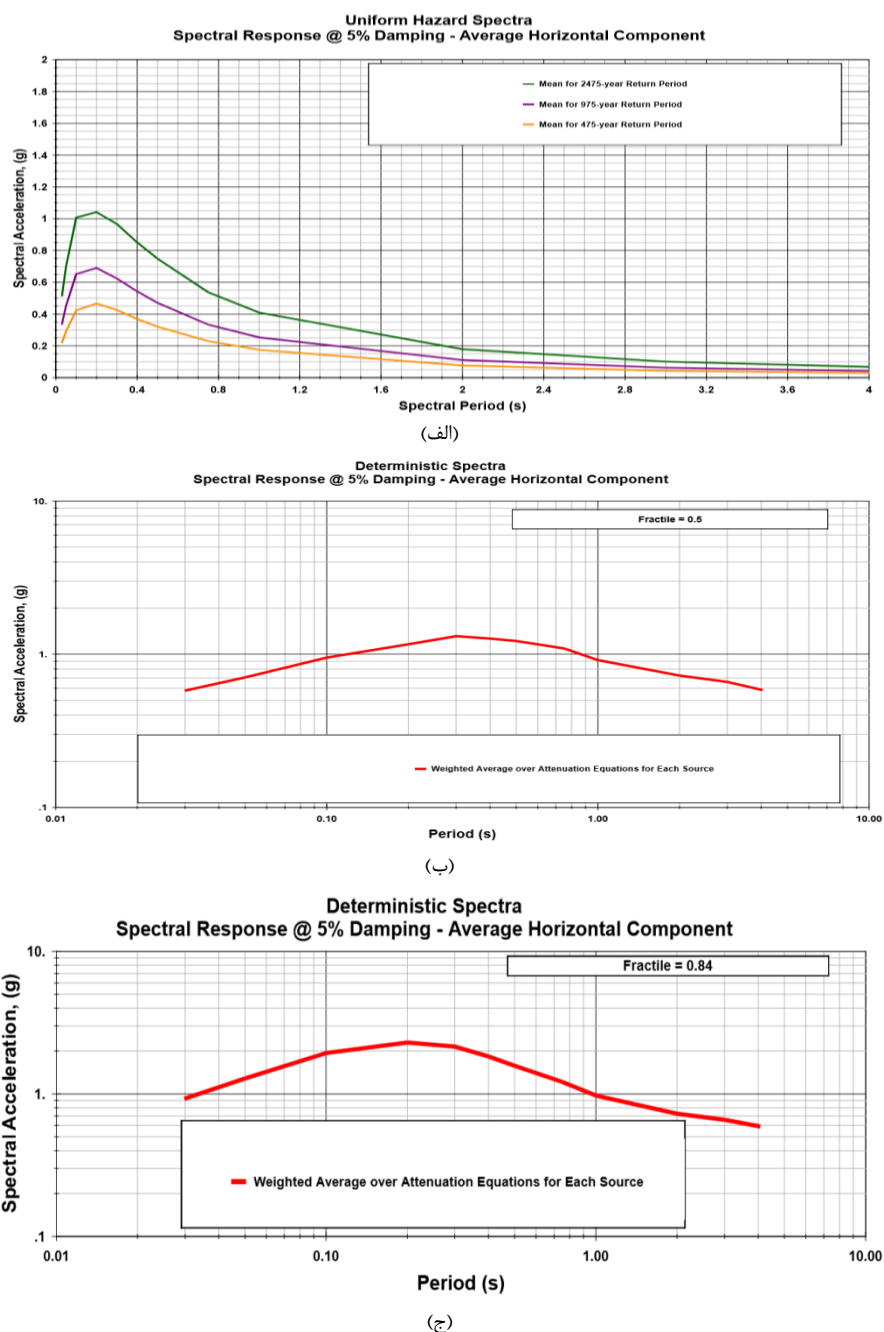
شهرستان تایباد یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی در شرق ایران است. در سال ۱۳۹۵، این شهرستان تعداد ۱۱۷۵۶۴ نفر جمعیت داشته است. این شهرستان به دلیل هم‌مرز بودن با کشور افغانستان از اهمیت بسیاری برای مبادلات کالا برخوردار است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی تایباد در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ در صد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ در صد شهرستان تایباد

۴-۸- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر تربت حیدریه

شهر تربت حیدریه، بزرگ‌ترین شهر در جنوب استان خراسان رضوی، در فاصله ۱۵۰ کیلومتری جنوب مشهد و ۱۰۰۵ کیلومتری تهران واقع شده و به‌عنوان پایتخت زعفران در جهان شناخته می‌شود. بر پایه سرشماری عمومی سال ۱۳۹۵ جمعیت این شهر ۱۴۰۰۱۹ نفر در ۴۳۰۲۹ خانوار بوده است. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی تربت حیدریه در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰: (الف) طیف پاسخ احتمالاتی با دوره بازگشت‌های مختلف، (ب) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۵۰ درصد و (ج) طیف پاسخ قطعی در سطح خطر ۸۴ درصد تربت حیدریه

۹-۴- بیشینه شتاب زمین

بیشینه شتاب زمین (PGA)^۹ برابر با حداکثر شتاب زمین است که در هنگام وقوع زلزله در مکان مورد نظر رخ می‌دهد. این پارامتر از معیارهای مهم در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و علت اصلی آسیب به سازه‌های موجود در هنگام زلزله می‌باشد. در جدول زیر بیشینه شتاب زمین برای شهرهای کاشمر، بردسکن، تایباد، باخرز، تربت حیدریه، خلیل‌آباد، انابد و سلامی در مجاورت سامانه گسلی درونه ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱: بیشینه شتاب زمین برای شهرهای مجاور سامانه گسلی درونه و مقایسه با شتاب مبنای طرح ارائه شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰

نام شهر	متوسط سرعت موج برشی ساختگاه (m/s)	بیشینه شتاب تحلیل خطر احتمالاتی (g)			بیشینه شتاب تحلیل خطر قطعی (g)		فاصله تا گسل درونه (km)	شتاب مبنای طرح بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ (g)
		ساله ۴۷۵	ساله ۹۷۵	ساله ۲۴۷۵	با احتمال ۵۰٪	با احتمال ۸۴٪		
انابد	۵۶۰	۰/۴۶۱	۰/۶۶۳	۰/۶۸۹	۰/۷۵۶	۱/۲۸۳	۳	۰/۳
باخرز	۵۶۰	۰/۰۹۲	۰/۱۳۸	۰/۲۴۶	۰/۵۰۳	۰/۸۶۱	۱۶	۰/۳
بردسکن	۹۹۲	۰/۳۴۷	۰/۴۸۵	۰/۶۸۹	۰/۵۰۱	۰/۸۵۹	۳	۰/۳
کاشمر	۴۹۴	۰/۳۴۱	۰/۴۸۳	۰/۶۹۱	۰/۶۱۷	۱/۰۵۲	۶	۰/۳
خلیل‌آباد	۵۶۰	۰/۳۷۱	۰/۵۲۲	۰/۷۴۵	۰/۵۵۴	۰/۹۳۹	۵	۰/۳
سلامی	۵۶۰	۰/۲۱۸	۰/۳۴۳	۰/۵۳۹	۰/۵۵۸	۰/۹۶۰	۱۹	۰/۳
تایباد	۵۶۹	۰/۱۰۱	۰/۱۲۵	۰/۱۶۶	۰/۳۱۸	۰/۵۴۲	۱۰	۰/۳
تربت حیدریه	۳۰۶	۰/۱۴۷	۰/۲۳۰	۰/۳۶۶	۰/۵۸۱	۰/۹۶۰	۵	۰/۳

زلزله طرح در آیین‌نامه به صورت زلزله‌ای که احتمال فراگشت آن در ۵۰ سال عمر مفید سازه، ده درصد باشد تعریف می‌شود. دوره بازگشت این زلزله ۴۷۵ سال است. دقت به خروجی‌های نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای و تحلیل و بررسی نتایج حاکی از آن است که تمامی شهرهای مورد مطالعه در آیین‌نامه ۲۸۰۰، با خطر نسبی زیاد و با شتاب مبنای طرح ۰/۳ طبقه‌بندی می‌شوند. اما این در حالی است که نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای برای برخی از این شهرها در دوره بازگشت ۴۷۵ ساله شتابی بیشتر از این مقدار را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که این تضاد بین نتایج تحلیل‌های خطر لرزه‌ای و مقررات آیین‌نامه نشان‌دهنده نیاز به بازنگری مقررات و شناسایی بهتر ریسک‌های زلزله‌ای در این مناطق باشد. این تجدیدنظر ممکن است از طریق اصلاح مقررات موجود یا ایجاد ضوابط و دستورالعمل‌های جدید برای مدیریت خطر زلزله صورت گیرد، تا سازه‌ها و زیرساخت‌های این شهرها بتوانند در مواجهه با زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و خطرناک‌تر، ایمنی و استحکام خود را حفظ کنند.

با توجه به مقادیر شتاب به دست آمده برای شهرهای انابد، بردسکن، کاشمر و خلیل‌آباد و تفاوت چشم‌گیر با شتاب ارائه شده در آیین‌نامه پیشنهاد می‌شود برای این شهر از طیف طرح ویژه ساختگاه جهت طراحی سازه‌های جدید بهره گرفته شود. این طیف با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی و لرزه‌شناسی تعیین می‌گردد. نکته قابل توجه این است که طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقادیر این طیف نباید کمتر از ۸۰٪ مقادیر طیف طرح استاندارد اختیار شود.

با توجه به داده‌های مندرج در جدول ۱، توصیه می‌شود تشکیل ضوابط و مقررات خاصی برای توسعه هر یک از این شهرها و حفظ احترام به حریم گسل‌ها انجام گیرد. به عنوان مثال، پیشنهاد می‌شود که شهر تربت حیدریه با توجه به فاصله نسبتاً کمی که از گسل درونه دارد (حدود ۵ کیلومتر)، صرفاً به سمت شمال گسترش پیدا کند. این تدابیر و مقررات می‌توانند به عنوان ابزارهای مهمی برای کاهش خطرات زلزله و محافظت از امنیت شهری مورد استفاده قرار گیرند.

⁹ Peak ground acceleration

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

مطالعه حاضر به منظور تحلیل خطر لرزه‌ای برای شهرهای تربت حیدریه، خلیل‌آباد، کاشمر، بردسکن، تایباد، باخرز، انابد و سلامی در مجاورت سامانه گسلی درونه به‌عنوان یکی از گسل‌های مهم و فعال کشور با طولی بالغ بر ۷۰۰ کیلومتر انجام گرفت. در این راستا، این پژوهش با استفاده از هر دو رویکرد احتمالاتی (PSHA) و قطعی (DSHA) در دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ ساله در محدوده ۱۵۰ کیلومتری هر شهر انجام شد. اهم نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر به شرح زیر است:

۱. با توجه به خروجی‌های تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی، شهرستان تایباد دارای کمترین بیشینه شتاب در دوره بازگشت‌های مختلف است.

۲. خروجی‌های تحلیل خطر احتمالاتی و قطعی حاکی از آن است که شهر انابد دارای بیشترین بیشینه شتاب در دوره بازگشت‌های مختلف می‌باشد و برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ، نیازمند توجه ویژه‌ای در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌باشد.

۳. استفاده از تحلیل خطر زلزله باعث ارزیابی دقیق‌تر از شتاب زلزله نسبت به آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌شود. مقایسه بیشینه شتاب زمین خروجی از تحلیل خطر لرزه‌ای در زلزله طرح (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و شتاب مبنای طرح ارائه‌شده از سوی آیین‌نامه ۲۸۰۰ نشانگر اختلاف زیاد مقادیر آیین‌نامه با نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای می‌باشد. به‌طوری‌که برخی از شهرها مقادیر شتاب کمتر و برخی از شهرها مقادیر شتاب بیشتری نسبت به آیین‌نامه دارند. استفاده از طیف طرح ویژه ساختگاه برای شهرهای دارای شتاب بیشتر از آیین‌نامه ۲۸۰۰ مانند شهرهای انابد، بردسکن و کاشمر جهت جلوگیری از خسارت‌های احتمالی ضروری است.

با توجه به اینکه تحلیل خطر زلزله بخشی ضروری و لاینفک در طراحی سازه‌ها می‌باشد، می‌توان با بهره‌گیری از نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای جهت طراحی لرزه‌ای سازه‌های جدید و یا مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در شهرهای لرزه‌خیز اقدام و تلفات جانی و مالی ناشی از زلزله را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. استفاده از روش‌های نوین تحلیل خطر تعینی برای ارزیابی دقیق‌تر خطر زلزله برای شهرهای مجاور گسل درونه به محققان بعدی پیشنهاد می‌گردد. در خاتمه به‌طور مؤکد توصیه می‌شود تا از توسعه ساخت‌وساز (مسکونی یا شهرهای صنعتی) در راستا و در مجاورت گسل درونه اجتناب گردد. همچنین توصیه می‌شود بجای بازسازی بافت‌های فرسوده شهرهای مورد مطالعه، تغییر محل آن‌ها تا فاصله گرفتن کافی از گسل درونه انجام گیرد.

مراجع

- [1] AON, "2021 Weather, Climate and Catastrophe Insight," p. 53, 2022, [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.aon.com%2Fgetmedia%2F1b516e4d-c5fa-4086-9393-5e6afb0eeded%2F20220125-2021-weather-climate-catastrophe-insight.pdf.aspx&clen=18822535&chunk=true>
- [2] M. Fattahi, R. T. Walker, M. M. Khatib, A. Dolati, and A. Bahroudi, "Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran," *Geophys. J. Int.*, vol. 168, no. 2, pp. 691–709, 2007, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x.
- [3] J. Stocklin and M. H. Nabavi, "Tectonic map of Iran," *Geol. Surv. Iran*, vol. 1, no. 5, 1973.
- [4] H. W. Wellman, "Active wrench faults of Iran, Afghanistan and Pakistan," *Geol. Rundschau*, vol. 55, no. 3, pp. 716–735, 1966, doi: 10.1007/BF02029650.
- [5] Y. Farbod, O. Bellier, E. Shabanian, and M. R. Abbassi, "Geomorphologic and structural variations along the Doruneh Fault System (central Iran)," *Tectonics*, vol. 30, no. 6, 2011.
- [6] Z. Mousavi *et al.*, "Constant Slip Rate on the Doruneh Strike-Slip Fault, Iran, Averaged Over Late Pleistocene, Holocene, and Decadal Timescales," *Tectonics*, vol. 40, no. 6, p. e2020TC006256, 2021.
- [7] N. Ambraseys and C. Melville, "A history of persian earthquakes cambridge univ," *Press. New York*, 1982.
- [8] J. Jackson and D. McKenzie, "Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan," *Geophys. J. Int.*, vol. 77, no. 1, pp. 185–264, 1984.
- [9] M. H. Tahiri and H. Saffari, "Investigating spatial and temporal changes of seismicity parameters along the Doruneh

- fault system,” *Sci. Q. J. Geosci.*, 2023, doi: 10.22071/gsj.2023.387658.2068.
- [10] M. P. Shahvar, M. Zare, and S. Castellaro, “A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900-2011),” *Seismol. Res. Lett.*, vol. 84, no. 2, pp. 233–249, 2013, doi: 10.1785/0220120144.
- [11] P. Reasenber and W. L. Ellsworth, “Aftershocks of the Coyote Lake, California, earthquake of August 6, 1979: a detailed study,” *J. Geophys. Res.*, vol. 87, no. B13, 1982.
- [12] S. Wiemer, “A software package to analyze seismicity: ZMAP,” *Seismol. Res. Lett.*, vol. 72, no. 3, pp. 373–382, 2001, doi: 10.1785/gssrl.72.3.373.
- [13] D. L. Wells and K. J. Coppersmith, “New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 84, no. 4, pp. 974–1002, 1994.
- [14] F. Yan, K. Xu, D. Li, and X. Zhang, “Hazard assessment for biomass gasification station using general set pair analysis,” *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 8307–8324, 2016.
- [15] V. Midzi *et al.*, “The 03 April 2017 Botswana M6. 5 earthquake: preliminary results,” *J. African Earth Sci.*, vol. 143, pp. 187–194, 2018.
- [16] N. Mirzaei, “Seismic zoning of Iran.” Ph. D. Dissertation]. Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, 1997.
- [17] C. A. Cornell, “Engineering seismic risk analysis,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [18] G. F. Panza, F. Vaccari, G. Costa, P. Suhadolc, and D. Fäh, “Seismic input modelling for zoning and microzoning,” *Earthq. Spectra*, vol. 12, no. 3, pp. 529–566, 1996.
- [19] G. F. Panza, F. Romanelli, and F. Vaccari, “Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation,” in *Advances in geophysics*, vol. 43, Elsevier, 2001, pp. 1–95.
- [20] M. Rastgoo, H. Rahimi, F. Romanelli, F. Vaccari, and G. F. Panza, “Neo-deterministic seismic hazard assessment for Alborz Region, Iran,” *Eng. Geol.*, vol. 242, pp. 70–80, 2018.
- [21] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia, “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*, vol. 24, no. 1, pp. 139–171, 2008. doi: 10.1193/1.2857546.
- [22] B. S. J. Chiou and R. R. Youngs, “An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra,” *Earthq. Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 173–215, 2008, doi: 10.1193/1.2894832.
- [23] D. M. Boore and G. M. Atkinson, “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,” *Earthq. Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 99–138, 2008, doi: 10.1193/1.2830434.
- [24] Y.-N. Huang, A. S. Whittaker, and N. Luco, “Maximum spectral demands in the near-fault region,” *Earthq. Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 319–341, 2008.