

Evaluation and Preparation of Seismic Zone Maps of Khorramabad City using a Hierarchical-Fuzzy Method

Siamak Baharvand ^{*1}, Jafar RahnamaRad ², Salman Soori ³

¹ Assistant Professor, Department of Geology, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

³ Young Researchers and Elite Club, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Abstract

The city of Khorramabad in Lorestan province is considered as one of the seismic cities of Iran due to its location on the Zagros earthquake zone. In this research, for more safety in residential areas and construction projects, seismic hazard zonation in Khorramabad city was studied using six environmental parameters including focal length of earthquakes, distance from major faults, and focal depth of earthquake events, earthquake acceleration, lithology, and slope. To this end, by using a seismic data catalog for the period from 1900 to 2018, maps of the focal lengths and the focal depths of earthquake events were prepared. Using the geologic and digital elevation maps, maps of distance from the fault, the lithology and the slope, and using a Deterministic Seismic Hazard Assessment (DSHA) and using the existing empirical relationships between the characteristics of the earthquake, the peak ground acceleration map (PGA) of the region was prepared. After providing the data layers, the map of each factor is standardized and weighed using fuzzy logic and hierarchical analysis process, respectively. By integrating all standardized layers in their weights, the final map of earthquake hazard zonation of the city was prepared using a hybrid hierarchical-fuzzy method. Based on the results of the above-mentioned method, 6.43%, 12.74%, 24.57%, 35.13% and 21.12% of the city's area are located in very low, low, moderate, high and very high risk classes, respectively.

Key words: Zoning, Earthquake, Khorramabad, Hierarchy-Fuzzy Method.



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۰، پیاپی ۷۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صص ۷۵-۹۰
نوع مقاله: پژوهشی
وصول: ۱۳۹۸/۰۳/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

ارزیابی و تهیه نقشه زون‌های لرزه‌ای شهر خرم‌آباد با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی

سیامک بهاروند^{*}، استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران
جعفر رهنماریاد، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران
سلمان سوری، کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

چکیده

شهر خرم‌آباد در استان لرستان به دلیل قرارگرفتن بر پهنه لرزه زمین‌ساخت زاگرس، یکی از شهرهای لرزه‌خیز ایران به شمار می‌آید. در این پژوهش به منظور ایمنی بیشتر در مناطق مسکونی و طرح‌های عمرانی، پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی در شهر خرم‌آباد با استفاده از شش مؤلفه محیطی شامل فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها از شهر خرم‌آباد، فاصله گسل‌های اصلی از شهر، عمق رخداد زمین‌لرزه‌ها، شتاب زمین‌لرزه، لیتولوژی و شیب مطالعه شد. بدین منظور نخست با بهره‌گیری از گردآوری کاتالوگ داده‌های لرزه‌خیزی در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸، نقشه عوامل فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها از شهر خرم‌آباد و عمق رخداد زمین‌لرزه‌ها تهیه شد، سپس با بهره‌گیری از نقشه زمین‌شناسی و خطوط رقومی ارتفاع منطقه، نقشه فاصله از گسل، لیتولوژی و شیب شهر خرم‌آباد و با روش قطعی زلزله‌طرح (DSHA) و بهره‌گیری از روابط تجربی موجود بین مشخصه‌های زلزله، نقشه شتاب افقی زمین‌لرزه‌های (PGA) منطقه به دست آمد. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، نقشه هریک از عوامل به ترتیب با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، استانداردسازی و وزن‌دهی شد. در نهایت با تلفیق همه لایه‌های استانداردسازی‌شده در وزن آنها، نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد با استفاده از روش تلفیقی سلسله‌مراتبی فازی تهیه شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از این روش به ترتیب ۶/۴۳، ۱۲/۷۴، ۲۴/۵۷، ۳۵/۱۳ و ۲۱/۱۲ درصد از مساحت شهر خرم‌آباد در کلاس‌های خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار گرفت. **واژه‌های کلیدی:** پهنه‌بندی، زلزله، خرم‌آباد، روش سلسله‌مراتبی فازی.

مقدمه

به دلیل مساعدبودن شرایط جغرافیایی، نبود مدیریت جامع محیطی و رعایت نکردن آستانه‌های محیطی، ایران، کشوری پرخطر به شمار می‌آید؛ به طوری که جزو ۱۰ کشور بلاخیز جهان قرار گرفته است (قائدرحمتی و همکاران، ۱۳۹۳: ۸۵). زلزله، یکی از فرایندهای ژئومورفیک درونی است که آثار تخریبی زیادی دارد و بعضی از شهرهای کشور ما را تهدید می‌کند. بی‌توجهی به خطر زمین‌لرزه در مکان‌گزینی شهرها و رعایت نکردن نکات فنی و ایمنی در ساخت تأسیسات و ساختمان‌ها، آثار زیان‌باری به دنبال دارد (نگارش، ۱۳۸۴: ۹۴).

طی صد سال گذشته بیش از یک‌هزار زلزله ویران‌کننده در هفتاد کشور جهان به وقوع پیوسته است و افزون بر ۱۵۰ میلیون نفر از این زلزله‌ها آسیب دیده‌اند (علمی‌زاده و هدایی، ۱۳۸۸: ۲). در این زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای تدوین روابط بین برنامه‌ریزی منطقه‌ای و مدیریت ریسک زلزله به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای، امری ضروری به نظر می‌رسد. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه زمانی نمود می‌کند که اولاً عوامل دخیل در لرزه‌زایی و محرک‌های لرزه‌ای به‌طور کامل شناخته شود و ثانیاً تمام عناصر یادشده با همدیگر در مدلی منسجم ارزیابی شوند. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد با بهره‌گیری از روش تلفیقی سلسله‌مراتبی فازی صورت گرفته است.

شهر خرم‌آباد، مرکز استان لرستان، بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر لرشین و از مهم‌ترین شهرهای غربی ایران است. این شهر کوهستانی در ارتفاع ۱۳۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. در این پژوهش

عوامل محیطی مؤثر بر خطر زمین‌لرزه تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری از مرکز آن مطالعه شده است.

روش سلسله‌مراتبی، روشی نیمه‌کیفی شامل یک ماتریس وزن‌دهی برمبنای مقایسه‌های زوجی بین عوامل است و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی مشخص می‌کند. این روش که ساعتی^۱ در سال ۱۹۸۰ ارائه کرده، برمبنای سه اصل تجزیه، قضاوت تطبیقی و سنتز اولویت‌ها استوار است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۵۳). منطق فازی نیز، یک منطق چند مقداری است؛ یعنی مؤلفه‌ها و متغیرهای آن علاوه بر اختیار اعداد ۰ یا ۱، تمامی مقادیر بین این دو عدد را نیز اختیار می‌کنند. تعلق هر عضو مجموعه مرجع به یک عضو زیرمجموعه خاص، قطعی نیست. این نبود قطعیت با نسبت‌دادن یک عدد بین ۰ و ۱ به این عضو انجام می‌گیرد. با تلفیق دو روش یادشده به روشی دست یافته‌ایم که ساختاری قابل درک بین تصمیم‌گیری چندمعیاره با مجموعه‌ای از داده‌های کمی و کیفی برقرار می‌کند. همچنین این روش وجود ساختاری مرتبه‌ای، مستقل و قابل فهم را ارائه و در نهایت ضریب ناسازگاری را کاهش می‌دهد. منطق سلسله‌مراتبی فازی تفکرات بشری را در استفاده از اطلاعات تقریبی و نامطمئن برای تصمیم‌گیری بازتاب و بیشترین انعطاف را در قضاوت و واقعی‌ترین و بهترین رابطه بین معیارها و متغیرها را ارائه می‌دهد (بهاروند و سوری، ۱۳۹۶: ۹۴).

پیشینه پژوهش

در زمینه ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تاکنون مطالعات زیادی در ایران و سایر نقاط جهان صورت

^۱ saati

گرفته است؛ از جمله:

قبادی و همکاران (۱۳۸۶) خطر زلزله را در شهرستان مسجد سلیمان ارزیابی کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین شتاب افقی ناشی از زمین‌لرزه‌های محتمل، $0.3g$ برآورد شده است.

امیراحمدی و آب‌باریکی (۱۳۹۳) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، ریز پهنه‌بندی خطر زلزله را در شهر سبزوار بررسی کردند. در این پژوهش که با تأکید بر عامل گسل انجام شده است، نتایج نشان داد بیش از ۱۱ کیلومترمربع از وسعت شهر در پهنه خطر بسیار زیاد قرار دارد.

رحیمی‌شهید و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، نقشه زون‌های لرزه‌ای گستره اصفهان را تهیه کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، لرزه‌خیزی منطقه از جهت شمال شرق به طرف جنوب غرب افزایشی است.

جلالیان و دادگر (۱۳۹۴) با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، آسیب‌پذیری بخش چورزق شهرستان طارم را در برابر زلزله پهنه‌بندی کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیش از ۶۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد واقع شده است.

قهرمانی و همکاران (۱۳۹۷) خطر زمین‌لرزه را به روش منطق فازی در منطقه دهک استان خراسان جنوبی بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده براساس مؤلفه‌های شتاب‌لرزه‌ای نشان داد شتابی که گسل دهک به روستاهای آن منطقه وارد می‌کند، معادل 0.58 شتاب ثقلی زمین است.

آسکان و همکاران^۱ (۲۰۱۵) خطر زلزله را در منطقه ارزیابی ترکیه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد

بیشترین مقدار شتاب زمین در مرکز شهر ارزینکن تقریباً ۱ گال است.

جیاناراکي و همکاران^۲ (۲۰۱۹) با استفاده از روش قطعی، خطر زمین‌لرزه را در شهر ایجیون یونان بررسی کردند. براساس نتایج، هماهنگی خوبی بین روش استفاده‌شده و زمین‌لرزه $6/4$ ریشتری سال ۱۹۹۵ این منطقه وجود داشته است.

لوی و همکاران^۳ (۲۰۱۸) با استفاده از روش قطعی و احتمالاتی، خطر زمین‌لرزه را در شبه‌جزیره مالزی بررسی کردند. نتایج براساس هر دو روش نشان داد شهرهای مرکزی و غربی شتاب افقی زیاد و روش‌های استفاده‌شده دقت زیادی دارند.

روش‌شناسی پژوهش

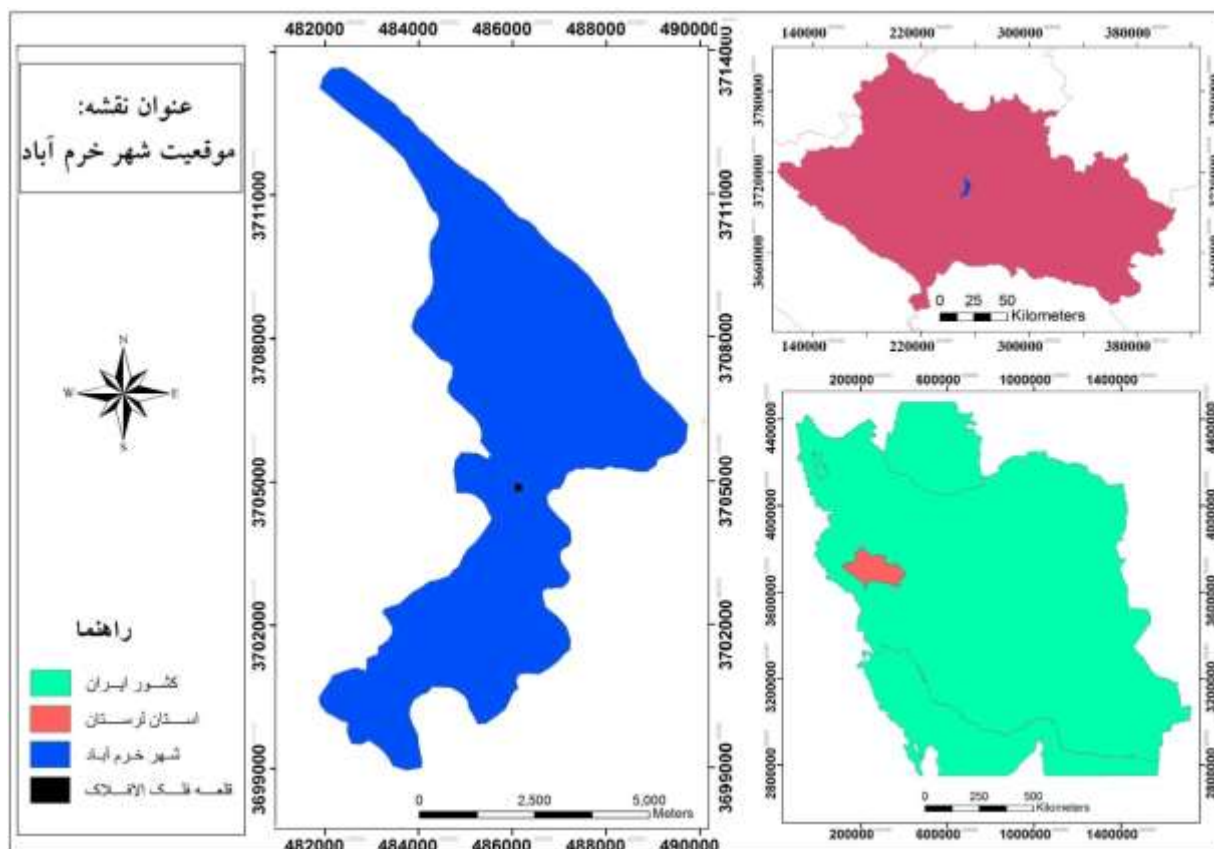
روش پژوهش

خرم‌آباد، یکی از شهرهای لرزه‌خیز ایران، در استان لرستان واقع شده است (شکل ۱). مراحل کلی پژوهش به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در این شهر شامل گردآوری اطلاعات، استانداردسازی با استفاده از توابع عضویت فازی، وزن‌دهی با استفاده از روش سلسله‌مراتبی، هم‌پوشانی لایه‌ها و در نهایت تعیین دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها با استفاده از روش گوتنبرگ - ریشتر است.

² Giannaraki et al.

³ Loi et al.

¹ Askan et al.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش

۱. نقشه عمق و فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها از شهر خرم‌آباد: به‌منظور تهیه نقشه فاصله از عمق و کانون زمین‌لرزه‌های رخ داده، نخست موقعیت جغرافیایی زمین‌لرزه‌ها از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ تعیین، با رقوم‌سازی این نقاط نقشه فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها از شهر خرم‌آباد ترسیم و با درون‌یابی به روش کریجینگ، نقشه عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز تهیه شد.

۲. نقشه فاصله گسل‌ها از شهر خرم‌آباد: بدین منظور نخست با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و تصاویر ماهواره‌ای، گسل‌های اصلی منطقه شناسایی و سپس با رقوم‌سازی آنها، نقشه فاصله از گسل‌های شهر خرم‌آباد ترسیم شد.

۳. شتاب زمین‌لرزه: به‌منظور تهیه نقشه شتاب

گردآوری اطلاعات: در این مرحله شش مؤلفه محیطی شامل فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها از مرکز شهر، فاصله گسل‌های اصلی از مرکز شهر، عمق رخداد زمین‌لرزه‌ها، شتاب افقی زمین‌لرزه، لیتولوژی و شیب بررسی شده است. عوامل مختلف در نظر گرفته شده به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در محدوده مطالعه‌شده با توجه به نکاتی از قبیل هدف، مقیاس کار و دقت قابل انتظار، بررسی زلزله‌های پیشین در ایران (میرزایی، ۱۳۸۱: ۱۰) و به‌ویژه در منطقه زاگرس، شرایط محیطی شهر، میزان تأثیرگذاری هر عامل و کافی و دردسترس بودن اطلاعات تعیین شده است. در مطالعه انجام‌شده، نقشه هریک از عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه به شرح زیر تهیه شده است.

سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، (R) فاصله محل مدنظر از گسل یا کانون زلزله برحسب کیلومتر، (M) بزرگی زمین‌لرزه برحسب ریشتر و (L) طول گسل برحسب کیلومتر است. شتابی که با این روابط حاصل می‌شود، شتاب افقی طرح نامیده و برحسب (g) بیان می‌شود.

۴. لیتولوژی: نقشه لیتولوژی محدوده مطالعه شده برمبنای نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد و مطالعات میدانی تهیه شده است.

۵. شیب: به منظور تهیه نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده است که از خطوط تراز نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه پژوهش در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

استانداردسازی معیارها: در مطالعه انجام شده به منظور استانداردسازی معیارهای استفاده شده از توابع عضویت منطق فازی استفاده شده است. یکی از اساسی‌ترین مباحث در نظریه فازی، بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است. اساس اختلاف روش‌های فازی با روش‌های دیگر، در تعریف تابع عضویت است. تابع عضویت به صورت درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیرمجموعه‌های آن تعریف و به شکل $\mu_C(X)$ نمایش داده می‌شود. برای به دست آوردن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد؛ بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل‌گیری و تعریف آن مؤثر است. در این پژوهش با استفاده از توابع عضویت خطی^۴ و تعریف شده کاربر^۵، نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر لرزه‌خیزی شهر خرم‌آباد به نقشه‌های فازی تبدیل شده‌اند.

افقی زلزله نخستین کار، تعیین بزرگی زمین‌لرزه محتمل برای گسل‌های اصلی است. برآورد بیشترین توان لرزه‌زایی هر یک از گسل‌ها برپایه رابطه میان طول گسل و بزرگی محاسبه شده است که مهاجر اشجعی و نوروزی پیشنهاد داده‌اند (رابطه ۱) (Mohajer Ashjai & Nowroozi, 1978: 249-260).

براساس پژوهش مانوئل بربریان (۱۳۶۴) در ارزیابی خطر زمین‌لرزه در تهران، نصف طول گسل در تولید زمین‌لرزه مدنظر قرار گرفته است. بی‌تردید تمام طول گسل در ذخیره‌سازی انرژی زلزله نقش ندارد؛ یعنی هرچه طول گسل بیشتر شود، با توجه به شرایط ژئومکانیکی زمین، طول گسیختگی ناشی از زلزله کمتر خواهد بود؛ بنابراین استفاده از نصف طول گسل در محاسبات دور از واقعیت نیست (قبادی و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۹).

$$M = \text{Log}L + 5.4 \quad (1)$$

برای تعیین شتاب زمین یا شتاب طرح در محل، مطالعات زیادی صورت گرفته است که در این پژوهش از روابط کمبل^۱ (۱۹۸۱)، (رابطه ۲)، دونوان^۲ (۱۹۷۳)، (رابطه ۳) و استوا^۳ (۱۹۷۰)، (رابطه ۴) استفاده شده است.

$$a = 1320e^{0.58M}/(R + 25)^{1.32} \quad (2)$$

$$a = 1080e^{0.5M}/(R + 25)^{1.32} \quad (3)$$

$$a = 1254e^{0.8M}/(R + 25)^2 \quad (5)$$

در روابط بالا، (a) شتاب حداکثر زمین برحسب

⁴ Linear

⁵ Userdefined

¹ Campbell

² Donovan

³ Esteva

و سپس دوره بازگشت برای زمین‌لرزه‌ها با بزرگای مشخص براساس روابط تجربی تعیین شده است. روش گوتنبرگ - ریشتر، معروف‌ترین و متداول‌ترین روشی است که برای توصیف میزان لرزه‌خیزی یک ناحیه استفاده می‌شود. در این روش وضعیت لرزه‌خیزی گستره طرح به صورت ریاضی معنادار و رابطه بزرگا - فراوانی رویداد زمین‌لرزه‌ها تعریف می‌شود که ضرایب ثابت آن نشان‌دهنده وضعیت لرزه‌خیزی ناحیه خواهد بود (همتی و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۲). رابطه گوتنبرگ - ریشتر به صورت زیر ارائه شده است:

$$\text{Log } N_c = a - bM \quad (5)$$

در آن، N_c فراوانی تجمعی زلزله‌های رخ داده در طول زمان بررسی برای زلزله‌ای با بزرگای خاص، a پارامتر لرزه‌خیزی منطقه که مقدار آن به تعداد زلزله‌های رخ داده در منطقه بستگی دارد، b پارامتر لرزه‌خیزی منطقه که مقدار آن به وضعیت تکنونیکی منطقه بستگی دارد و M بزرگی زمین‌لرزه است که در این پژوهش لرزه‌های با بزرگای $M_s \geq 4$ در دوره‌ای ۱۱۸ ساله از ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ برای منطقه خرم‌آباد در نظر گرفته شده است.

یافته‌های پژوهش

پهنه‌بندی مناطق زلزله‌خیز از اقدامات مفید برای کاستن از شدت خسارات ناشی از آن به شمار می‌آید؛ زیرا بدین وسیله استفاده از مناطق پرخطر محدود و از احداث بعضی بناها در این محدوده‌ها جلوگیری می‌شود. همچنین با مشخص کردن پهنه‌های خطر در شهر، تصمیم‌گیری درباره استقرار شریان‌های حیاتی در مناطق کم‌خطر امکان‌پذیر می‌شود.

اولویت‌بندی معیارها و وزن‌دهی آنها با استفاده

از روش سلسله‌مراتبی: در این پژوهش از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، یکی از مدل‌های چندمعیاره تصمیم‌گیری، برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد استفاده شده است. در تحلیل سلسله‌مراتبی، روش کار به این صورت است که نخست به منظور تعیین ارجحیت عوامل مختلف و تبدیل آنها به مقادیر کمی از قضاوت‌های شفاهی (نظر کارشناسی) بر مبنای مقایسه‌های زوجی استفاده می‌شود؛ به طوری که تصمیم‌گیرنده ارجحیت یک عامل را بر علق دیگر به صورت جدول (۱) در نظر می‌گیرد و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل می‌کند؛ سپس نتایج این مقایسه‌ها برای محاسبه شاخص ناسازگاری^۱ به نرم‌افزار Expert Choice وارد می‌شود. اگر شاخص محاسبه شده کمتر از ۰/۱ باشد، نتایج پذیرفته است؛ در غیر این صورت باید دوباره در وزن‌دهی تجدیدنظر شود.

جدول ۱. طبقه‌بندی ارجحیت مقادیر وزن‌ها براساس قضاوت کارشناسی (Saaty & Vargas, 2001: 103)

مقدار عددی وزن‌ها	توصیف زبانی ارجحیت طبقات
۹	کاملاً مهم یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	اهمیت بسیار قوی
۵	اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۲، ۴، ۶ و ۸	اولویت بین فواصل

تعیین دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها با بزرگای

مشخص: بدین منظور نخست از روش گوتنبرگ - ریشتر برای توصیف میزان لرزه‌خیزی منطقه استفاده

¹ Inconsistency

و سپس شتاب افقی ایجادشده بر شهر خرم‌آباد براساس روابط تجربی کمبل، دونوان و استوا تعیین شده است (جدول ۲). براساس محاسبات انجام شده بزرگی زلزله‌های ناشی از فعالیت گسل‌های محدوده اطراف شهر خرم‌آباد بین $6/21$ تا $7/09$ ریشتر و بزرگ‌ترین شتاب افقی (PGA) براساس رابطه دونوان، کمبل و استوا به ترتیب $0/366$ ، $0/345$ و $0/299$ گال است. با محاسبه شتاب افقی طرح بر مبنای (g)، امکان ارائه توصیفی از لرزه‌خیزی منطقه وجود دارد. نقشه شتاب افقی خطر لرزه‌خیزی گستره مدنظر در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ابزار تحلیلگر زمین‌آماری ترسیم شده است (شکل ۳). براساس آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران، اگر شتاب افقی طرح $0/35g$ ، $0/30g$ ، $0/25g$ و $0/2g$ باشد، خطر نسبی در منطقه به ترتیب بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم خواهد بود (مرکز تحقیقات مسکن، ۱۳۶۶: ۲۲). توزیع شتاب افقی در محدوده شهر خرم‌آباد نشان می‌دهد بخش‌های غربی شهر متأثر از شتاب لرزه‌ای بیشتر و قسمت‌هایی از جنوب شهر متأثر از شتاب افقی کمتر است.

بررسی عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد نشان می‌دهد:

- گسل‌ها به‌مثابه چشمه‌های لرزه‌ای، از مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی هستند که ارتباط آنها با وقوع زمین‌لرزه انکارناپذیر است (عباس‌پور و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۱۱). هرچه فاصله از گسل کمتر باشد، تنش در منطقه و ریسک رخداد زمین‌لرزه بیشتر می‌شود. بر این اساس بخش غربی شهر خرم‌آباد به دلیل فاصله نزدیک تا گسل خرم‌آباد (F8)، آسیب‌پذیرتر از سایر مناطق شهر است.

- گام نخست در بررسی ویژگی‌های لرزه‌خیزی یک گستره، گردآوری داده‌های پایه از زمین‌لرزه‌هایی است که پیش از این در گستره مدنظر روی داده است (بیت‌اللهی و معتمد، ۱۳۸۹: ۱). بررسی نقشه فاصله کانونی زمین‌لرزه‌های گذشته نشان می‌دهد بخش مرکزی شهر فاصله کمتری تا محل رخداد زمین‌لرزه‌های گذشته و پتانسیل لرزه‌خیزی بیشتری دارد. همچنین بررسی نقشه عمق کانونی نشان می‌دهد بخش شمال غربی به علت عمق کانونی کمتر و با توجه به اینکه رخداد زمین‌لرزه در سطوح کم عمق باعث تشدید زمین‌لرزه می‌شود، پتانسیل خطر بیشتری دارد.

- به‌منظور تهیه نقشه شتاب افقی زمین‌لرزه‌های شهر خرم‌آباد، پس از شناسایی گسل‌های اصلی منطقه (شکل ۲)، با استفاده از رابطه ۱، بزرگی زمین‌لرزه‌های محتمل براساس طول گسل‌ها محاسبه



شکل ۲. تصویر هوایی از گسل‌های اطراف شهر خرم‌آباد

جدول ۲. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی گسل‌های اطراف شهر خرم‌آباد (محاسبات: نگارندگان)

گسل	فاصله از شهر	طول	بزرگی (M)	شتاب افقی (کمبل)	شتاب افقی (دونوان)	شتاب افقی (استوا)	میانگین
F1	۵۴	۸۰	۷/۰۰	۰/۰۹۷	۰/۱۰۹	۰/۰۵۲	۰/۰۸۶
F2	۸۰	۴۰	۶/۷۰	۰/۰۵۳	۰/۰۶۴	۰/۰۲۳	۰/۰۴۶
F3	۵۷	۷۰	۶/۹۴	۰/۰۸۸	۰/۱۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۷۸
F4	۵۱	۱۰۰	۷/۰۹	۰/۱۰۸	۰/۱۲۰	۰/۰۶۰	۰/۰۹۶
F5	۶۹	۶۸	۶/۹۳	۰/۰۷۱	۰/۰۸۳	۰/۰۳۴	۰/۰۶۲
F6	۳۰	۸۴	۷/۰۲	۰/۱۷۰	۰/۱۷۷	۰/۱۰۹	۰/۱۵۲
F7	۴۴	۴۶	۶/۷۶	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵	۰/۰۵۶	۰/۰۹۱
F8	۸	۸۰	۷	۰/۳۶۶	۰/۳۴۵	۰/۲۹۹	۰/۳۳۶
F9	۱۷	۴۳	۶/۷۳	۰/۲۱۷	۰/۲۱۹	۰/۱۴۹	۰/۱۹۵
F10	۸۶	۷۸	۶/۹۹	۰/۰۵۷	۰/۰۶۹	۰/۰۲۶	۰/۰۵۰
F11	۷۵	۳۳	۶/۶۱	۰/۰۵۴	۰/۰۶۵	۰/۰۲۴	۰/۰۴۷
F12	۷۲	۱۳	۶/۲۱	۰/۰۴۵	۰/۰۵۶	۰/۰۱۸	۰/۰۳۹
F13	۷۵	۲۵	۶/۴۹	۰/۰۵۰	۰/۰۶۲	۰/۰۲۱	۰/۰۴۴
F14	۹۸	۲۱	۶/۴۲	۰/۰۳۵	۰/۰۴۵	۰/۰۱۳	۰/۰۳۱

آبرفتی و قسمت‌هایی از غرب شهر نیز از جنس آهک و مارن است.

- بررسی نقشه شیب منطقه نشان می‌دهد قسمت‌هایی از مناطق غربی و شمال شرق شهر به

- هرچه سازندهای منطقه سست‌تر باشند، امواج لرزه‌ای باعث ایجاد خسارات بیشتری در سطح منطقه خواهند شد. نقشه لیتولوژی منطقه نشان می‌دهد بخش وسیعی از سطح شهر خرم‌آباد از جنس رسوبات

پس از استانداردسازی داده‌ها، با توجه به اینکه هریک از لایه‌ها تأثیر متفاوتی بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه دارند، وزن‌دهی به لایه‌ها ضرورت می‌یابد. برای این کار از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. بدین منظور نخست با مقایسه زوجی (براساس جدول ۱) لایه‌ها دوبه‌دو با هم مقایسه و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور محاسبه وزن‌های هریک از فاکتورهای استفاده‌شده به نرم‌افزار Expert Choice انتقال داده شد. نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه ضریب ناسازگاری نشان داد مقایسه‌ها به‌درستی انجام شده است (جدول ۳).

دلیل شیب بیشتر، آسیب‌پذیرتر از سایر مناطق شهر هستند.

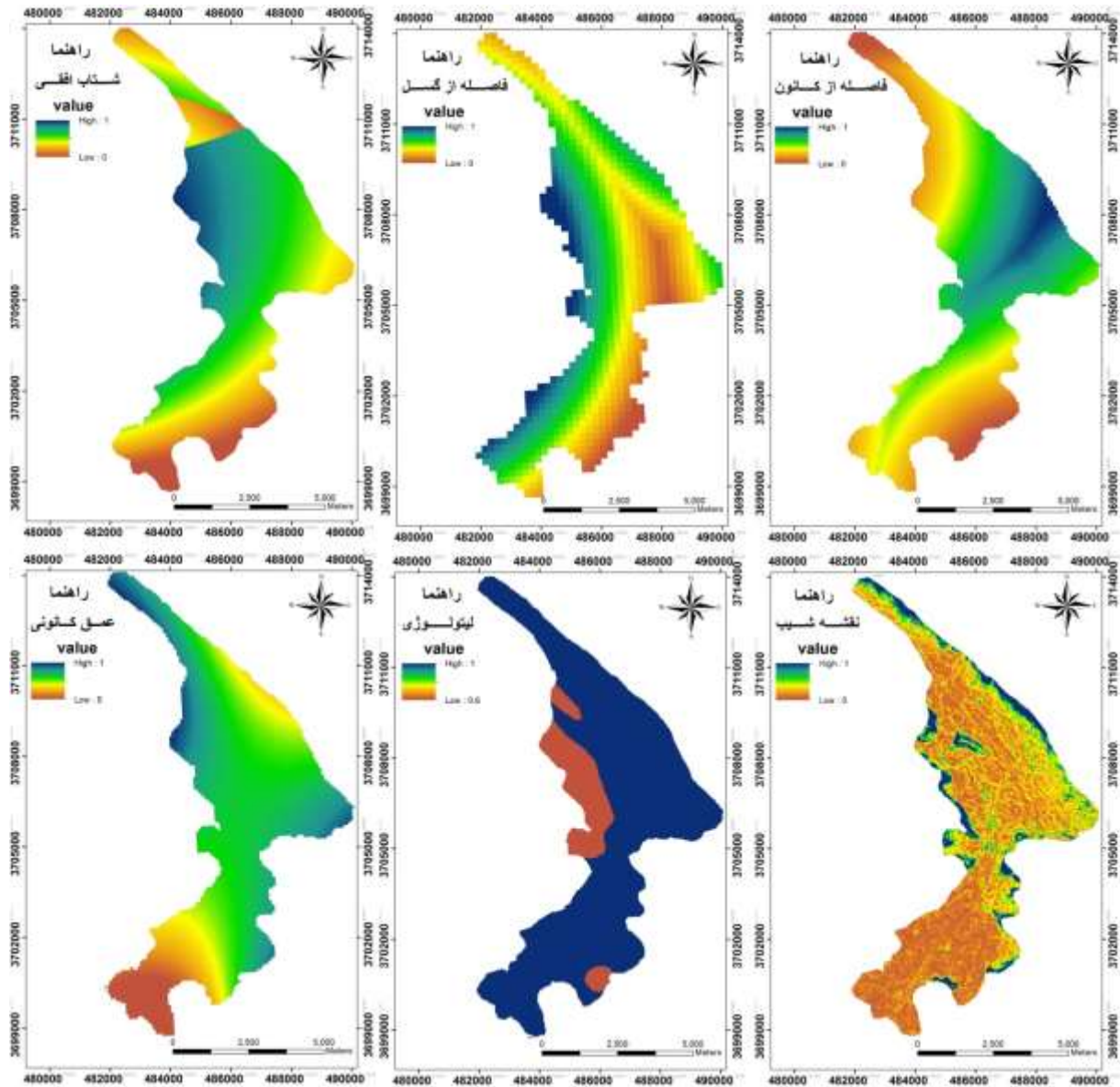
پس از آماده‌کردن لایه‌های مدنظر، استانداردسازی لایه‌ها انجام شده است. برای استانداردسازی داده‌ها، روش فازی به کار رفته است. نکته‌ای که باید در استانداردسازی لایه‌ها به آن توجه شود، انتخاب نوع تابع عضویت فازی است. در مطالعه انجام‌شده با توجه به تأثیر کلاس‌های هریک از عوامل در ایجاد رخداد زمین‌لرزه، از توابع عضویت خطی (شیب، فاصله از گسل، شتاب، عمق و فاصله کانونی زمین‌لرزه) و تابع عضویت تعریف‌شده کاربر (لیتولوژی) استفاده شده است (شکل ۳).

جدول ۳. مقایسه‌های زوجی عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد

ضریب ناسازگاری	وزن	عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه					
		شتاب افقی	فاصله از گسل	فاصله از کانون زمین‌لرزه	عمق کانونی زمین‌لرزه	لیتولوژی	شیب
	۰/۲۶۶	۱	۱	۲	۲	۳	شتاب افقی
	۰/۲۶۶	۱	۱	۲	۲	۳	فاصله از گسل
۰/۰۲	۰/۱۵۶	۱	۱	۱	۲	۳	فاصله از کانون زمین‌لرزه
	۰/۱۵۶	۱	۱	۱	۲	۳	عمق کانونی زمین‌لرزه
	۰/۰۹۱	۱	۱	۱	۱	۲	لیتولوژی
	۰/۰۶۴	۱	۱	۱	۱	۱	شیب

به ترتیب ۶/۴۳، ۱۲/۷۴، ۲۴/۵۷، ۳۵/۱۳ و ۲۱/۱۲ درصد از مساحت شهر خرم‌آباد در کلاس‌های خطر بسیار کم، کم، متوسط و بسیار زیاد قرار دارد. براساس نقشه تهیه‌شده، غرب شهر خرم‌آباد در پهنه با خطر بسیار زیاد است و بخش جنوبی حساسیت کمتری در برابر خطر زمین‌لرزه دارد.

درنهایت به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهر خرم‌آباد با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی، نقشه‌های فازی هریک از عوامل در وزن‌های به‌دست‌آمده براساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی ضرب و نقشه تمام عوامل هم‌پوشانی داده شد (شکل ۴). نتایج به‌دست‌آمده از نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی شهر خرم‌آباد نشان می‌دهد



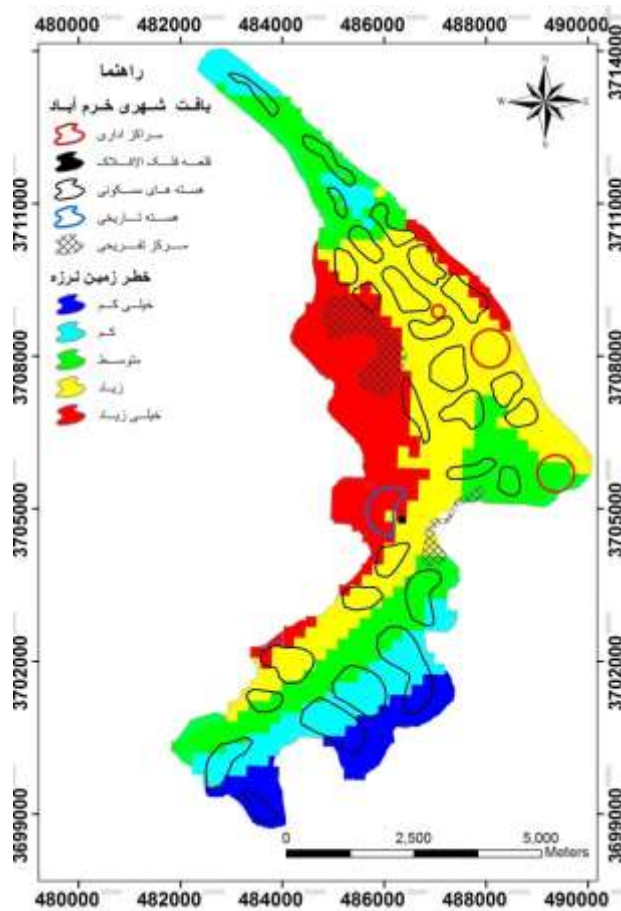
شکل ۳. نقشه استانداردسازی شده عوامل مؤثر بر خطر لرزه‌خیزی شهر خرم‌آباد

نسبت بافت فرسوده به کل مساحت شهر نزدیک به ۷ درصد است. غالباً این بخش‌ها از ابنیه و ساختمان‌های قدیمی تشکیل شده‌اند که عمر زیادی دارند و بسیاری از این ساختمان‌ها در گذشته براساس اصول معماری و شهرسازی ساخته نشده‌اند (شکل ۵). بسیاری از این ساختمان‌ها فوندانسیون و زیرسازی مناسبی ندارند و معابر آنها بسیار باریک است و در صورت بروز زلزله، حتی گاهی با کمترین لرزش

در مطالعه انجام‌شده، پس از تهیه نقشه خطر لرزه‌خیزی شهر خرم‌آباد، نقشه بافت شهری خرم‌آباد نیز تهیه شد. نتایج به‌دست‌آمده از تلفیق این نقشه‌ها نشان می‌دهد هسته تاریخی و بخش عمده‌ای از هسته‌های مسکونی شهر در پهنه با خطر لرزه‌خیزی زیاد و بسیار زیاد قرار دارند (شکل ۴). شهر خرم‌آباد با مساحت قانونی ۳۴۷۵ هکتار، ۲۸ محله و نقطه فرسوده با مساحتی نزدیک به ۲۶۰ هکتار دارد که

و بسیار زیاد، توجه به بافت فرسوده این شهر اهمیت ویژه‌ای دارد.

تخریب می‌شوند؛ بنابراین با توجه به قرارگیری بخش عمده‌ای از شهر خرم‌آباد در پهنه با پتانسیل خطر زیاد



شکل ۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در محدوده شهر خرم‌آباد

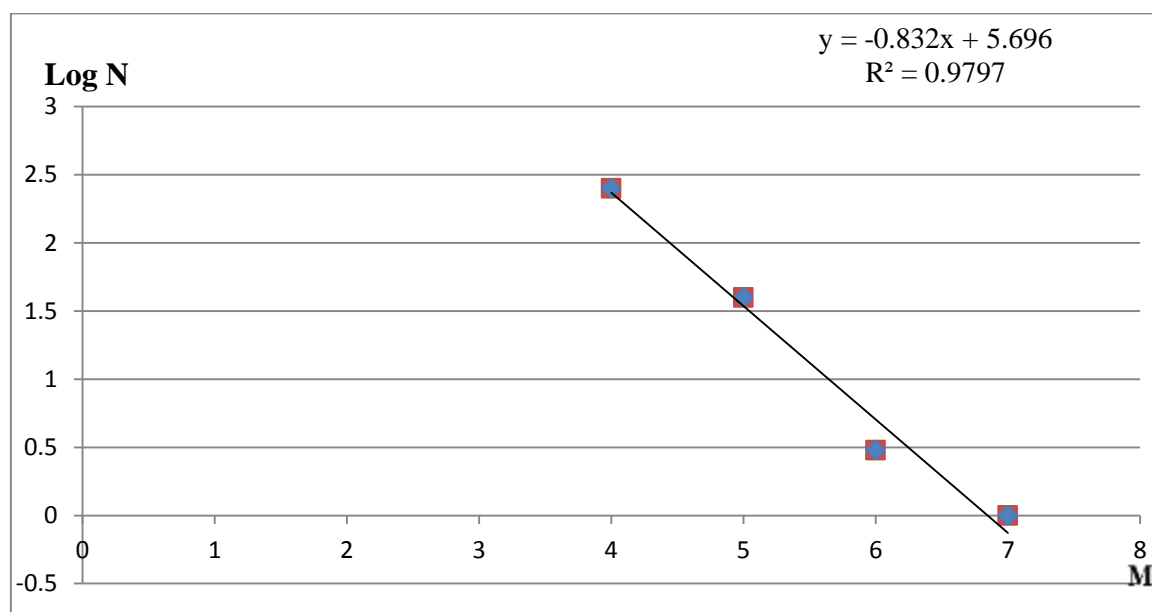


شکل ۵. نمایی از بافت فرسوده در محله‌های غربی شهر خرم‌آباد

زلزله‌های بزرگ به کوچک در منطقه خواهد بود (Novelo Casanova et al., 2006: 354).

در این مطالعه با محاسبه $\text{Log } N$ (فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها) و ترسیم آن برحسب M_s (بزرگی زمین‌لرزه)، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه یعنی a ($a=5.696$) و b ($b=0.832$) به دست آمده است (شکل ۶).

برآورد فرمول لرزه‌خیزی گستره مطالعه‌شده: در معادله گوتنبرگ - ریشتر، میزان a رابطه مستقیمی با استعداد لرزه‌خیزی خاستگاه مطالعه‌شده دارد؛ به بیان دیگر هرچه مقدار آن بیشتر باشد، تعداد زلزله‌های منطقه در بازه زمانی مدنظر بیشتر است؛ اما میزان b رابطه‌ای معکوس با مقدار تنش تجمع‌یافته در ناحیه دارد و کمبود آن نشان‌دهنده نسبت زیاد تعداد



شکل ۶- نمودار گوتنبرگ - ریشتر برای زمین‌لرزه‌های محدوده مطالعه‌شده

در این رابطه، T دوره بررسی بزرگی زمین‌لرزه‌هاست که در این مطالعه برابر با ۱۱۸ سال است. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در فاصله ۱۰۰ کیلومتری مرکز شهر خرم‌آباد نشان می‌دهد دوره بازگشت برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷، حدود ۱۵۸ سال است.

پس از رسم نمودار گوتنبرگ - ریشتر، با استفاده از رابطه ۶ و داده‌های به‌دست‌آمده برای مقادیر a و b ، محاسبه دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در فاصله ۱۰۰ کیلومتری مرکز شهر خرم‌آباد (فاصله زمانی بین وقوع دوباره یک زمین‌لرزه با بزرگی معین) امکان‌پذیر می‌شود (جدول ۴).

$$T = 10^{(bM-a)+\text{Log } t} \quad (6)$$

جدول ۴. دوره بازگشت برای زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای معین در محدوده اطراف شهر خرم‌آباد

تعداد وقوع در ۱۰۰ سال	دوره بازگشت (سال)	فراوانی جمعی	بزرگی (M)
۱۹۷/۷۴	۰/۵۰	۲۵۴	۴
۲۹/۱۱	۳/۴۳	۴۰	۵
۴/۲۸	۲۳/۳۳	۴	۶
۰/۶۳	۱۵۸/۴۵	۱	۷

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی‌های لرزه‌شناسی و تکنونیک منطقه نتایج زیر حاصل شده است:

۱. مهم‌ترین گسل تأثیرگذار بر محدوده مطالعه‌شده، گسل خرم‌آباد (F8) است. این گسل در ۸ کیلومتری غرب شهر خرم‌آباد واقع شده است و براساس رابطه کمبل توان ایجاد زمین‌لرزه‌ای با شتاب افقی $g = 0.366$ دارد.

۲. با توجه به اینکه بستر شهر خرم‌آباد از رسوبات آبرفتی کواترنری و تشکیلات آهکی مارنی تشکیل شده است، به دلیل سست‌بودن لیتولوژی بستر، شهر خرم‌آباد آسیب‌پذیری زیادی در برابر رخداد زمین‌لرزه دارد.

۳. در مطالعه انجام‌شده از روش گوتنبرگ - ریشتر برای تشریح چگونگی تغییر ویژگی‌های آماری خطر زمین‌لرزه استفاده شده است. مقدار زیاد a -value به‌دست‌آمده از این روش ($a=5.696$)، بیان‌کننده میزان زیاد لرزه‌خیزی و آهنگ زیاد رخداد در سطح منطقه است.

۴. نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها با استفاده از رابطه گوتنبرگ - ریشتر نشان می‌دهد تقریباً هر ۲۳ سال یک‌بار رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۶ در مقیاس ریشتر در محدوده ۱۰۰ کیلومتری اطراف شهر خرم‌آباد محتمل است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود سازه‌های ساخته‌شده طوری

طراحی شوند که در برابر زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیش از ۶ در مقیاس ریشتر مقاوم باشند.

۵. با توجه به افزایش شیب و تأثیرپذیری ساختارهای سنگی موجود در محدوده‌های پرخطر پیش‌بینی می‌شود مشکلات دیگری همچون ریزش بلوک‌های سنگی و زمین‌لغزه‌های مخرب بر شدت تخریب‌های احتمالی ناشی از زلزله در این منطقه بیفزاید؛ بنابراین تسلیح و مقاوم‌سازی دامنه‌ها و همچنین زهکشی مناسب منابع آبی در این‌گونه مناطق از شدت حرکات احتمالی می‌کاهد و ایمنی ساختگاه تأسیسات و بناهای موجود را در این منطقه بهبود می‌بخشد.

۶. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه شهر خرم‌آباد نشان می‌دهد بخش‌های غربی شهر متأثر از حساسیت لرزه‌ای بیشتری هستند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود گسترش و رشد شهر در مناطق غربی شهر متوقف و به سمت بخش‌های جنوبی شهر کشیده شود که در پهنه با خطر لرزه‌خیزی کمتری قرار دارد. همچنین پیشنهاد می‌شود مراکز حیاتی شهر در بخش‌های جنوبی مستقر شود تا در صورت وقوع زمین‌لرزه، کمک‌رسانی به سایر نقاط شهر متوقف نشود.

منابع

احمدی، عاطفه، موحد، علی، شجاعیان، علی، (۱۳۹۰).

ارائه الگوی بهینه مکان‌یابی فضای سبز شهری با

- دوره ۶، شماره ۴، ۵۹-۴۷.
- عباس‌پور، راضیه، موسوی، مرتضی، هیهات، محمودرضا، (۱۳۹۶). تحلیل فعالیت‌های لرزه‌زمین‌ساختی در گستره شهر طبس، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، دوره ۱۱، شماره ۴۲، ۱۲۷-۱۱۱.
- علمی‌زاده، هیوا، هدایی، علی‌اصغر، (۱۳۸۸). مدیریت بحران در ارتباط با خطر گسلش و زمین‌لرزه؛ مطالعه موردی: منطقه دشت سیلاخور، نشریه امداد و نجات، دوره ۱، شماره ۴، ۱۳-۵.
- قائدرحمتی، صفر، گندمکار، امیر، خوش‌کلام‌پور، امیر، (۱۳۹۳). ارزیابی متغیرهای تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری مسکن شهری در برابر زلزله؛ مطالعه موردی: شهر بروجرد، نشریه آمایش محیط، دوره ۷، شماره ۲۴، ۸۳-۱۰۴.
- قبادی، محمدحسین، چرچی، عباس، صفری، حجت‌الله، (۱۳۸۶). ارزیابی مقدماتی خطر زمین‌لرزه و نشت گاز در شهرستان مسجد سلیمان، مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، دوره ۵، شماره ۱۷، ۵۸-۴۵.
- قهرمانی، محترم، موسوی، مرتضی، خطیب، محمد مهدی، منصوری، هاشم، (۱۳۹۷). ارزیابی خطر زمین‌لرزه به روش منطق فازی در منطقه دهک (خراسان جنوبی)، نشریه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۶، شماره ۵۰، ۵۴-۴۱.
- مرکز تحقیقات مسکن، (۱۳۶۶). آیین‌نامه ۲۸۰۰ طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۲۱۲ ص.
- استفاده از GIS و روش AHP؛ منطقه مطالعه‌شده: منطقه ۷ شهرداری اهواز، نشریه آمایش محیط، دوره ۴، شماره ۱۵، ۱۶۲-۱۴۷.
- امیراحمدی، ابوالقاسم، آب‌باریکی، زکیه، (۱۳۹۳). ریزپهنه‌بندی خطر زلزله شهر سبزوار با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، نشریه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۲، شماره ۳۵، ۱۵۲-۱۳۳.
- بهاروند، سیامک، سوری، سلمان، (۱۳۹۶). مکان‌یابی دفن پسماندهای جامد شهری با استفاده از روش تلفیقی سلسله‌مراتبی فازی؛ مطالعه موردی: شهر کوه‌دشت، نشریه آمایش محیط، دوره ۱۰، شماره ۳۶، ۹۳-۱۰۸.
- بیت‌اللهی، علی، معتمد، پانته‌آ، (۱۳۸۹). محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی برای منطقه البرز مرکزی، پژوهش‌نامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دوره ۱۳، شماره ۳، ۸-۱.
- جلالیان، حمید، دادگر، حسین، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله با مدل AHP در محیط GIS؛ مطالعه موردی: بخش چورزق شهرستان طارم، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۶، شماره ۵۹، ۴۲-۲۹.
- رحیمی شهید، مجتبی، کارگران، فریبا، رحیمی، نیما، (۱۳۹۴). تهیه نقشه زون‌های لرزه‌ای گستره اصفهان با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی،

- Esteva, L., (1970). **Seismic risk and seismic design**. Ed, R.J. Hansen, Seismic design for Nuclear Power Plants. The M.I.T. Press, Pp 142-182.
- Giannaraki, G., Kassaras, I., Roumelioti, Z., Kazantzidou, D., Ganas A., (2019). **Deterministic seismic risk assessment in the city of Aigion (W. Corinth Gulf, Greece) and juxtaposition with real damage due to the 1995 Mw6.4 earthquake**, Bull Earthquake Eng., Vol 17 (2), Pp 603-634.
- Loi, D.W., Raghunandan, E.M., Swamy, V., (2018). **Revisiting seismic hazard assessment for Peninsular Malaysia using deterministic and probabilistic approaches**, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol 18, Pp 2387-2408.
- Mohajer Ashjai, A., Nowroozi, A.A., (1978). **Observed and probable intensity zoning of Iran**, Tectonophysics, Vol 49, Pp 249-260.
- Novelo- Casanova, D.A., Martinez- Bringas, A., Valdes-Gonzalez, C., (2006). **Temporal variations of QC - 1 and b values associated to the December 2000–January 2001, volcanic activity at the Popocatepetl, Mexico, volcano**, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol 251, Pp 347–358.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., (2001). **Models, methods, concepts, and applications of the Analytica Hierarchy process**, 1st ed. Kluwer Academic, Boston, 333 p.
- نگارش، حسین، (۱۳۸۴). **زلزله، شهرها و گسل‌ها**، نشریه پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۷، شماره ۵۲، ۹۳-۱۱۰.
- میرزایی، نوربخش، (۱۳۸۱). **پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران**، انتشارات دانش‌نگار، چاپ اول، تهران، مؤسسه ژئوفیزیک، ۱۸۳ ص.
- همتی، فریبا، زمانی قروه‌چمنی، بهزاد، مختاری، داوود، روستایی، شهرام، (۱۳۹۶). **بررسی توان لرزه‌زایی گسل بنااروان به روش قطعی و احتمالی**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۳۲، شماره ۴، ۶۹-۸۵.
- Askan, A., Karimzadeh, S., Asten, M., Kilic, N., Sisman, F., Erkmen, C., (2015). **Assessment of seismic hazard in the Erzincan (Turkey) region: construction of local velocity models and evaluation of potential ground motions**, Turkish Journal of Earth Sciences, Vol 24, Pp 529-565.
- Campbell, K.W., (1981). **Near-Source Attention of Peak Horizontal Acceleration**, Bulletin. Seismological Society of American, 71 (6), Pp 2039-2070.
- Donovan, N., (1973). **Earthquake hazards for buildings, Building practices for disaster mitigation**, building science series 46, Nat. Bur of, standards, U.S. Dept. of commerce, Washington D.C., Pp 82-111.

