University of Tehran Press

Environmental *Hazards* Management

Home Page: https://jhsci.ut.ac.ir

Iranian Hazardology Association

Online ISSN: 2383-0530

Evaluation and zoning of the vulnerability of Khalkhal City against the environmental hazard of earthquake

Elnaz Piroozi[1], Sayyad Asghari Saraskanrood[2*], Batool Zeinali[3]

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. Email: e.pirouzi@uma.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. Email: s.asghari@uma.ac.ir
3. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. Email: zeynali.b@uma.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 10 October 2023
Revised 21 November 2023
Accepted 22 November 2023
Published 11 December 2023

Keywords:
hazard,
earthquake,
GIS,
MCDM.
Khalkhal City.

ABSTRACT

Earthquake, as one of the natural hazards, causes irreparable damage to humans and the environment, and assessing the vulnerability of an earthquake is an important step in planning, preventing, and reducing the damage caused by it. Khalkhal City has a high potential for earthquake occurrence due to the existence of many faults and seismic points. However, despite the importance of the subject, the evaluation and zoning of Khalkhal city's vulnerability to earthquakes has not been investigated yet. Based on this, the current research seeks to evaluate the vulnerability of this city against the risk of earthquakes. For this purpose, first, the effective parameters were identified by examining the resources and paying attention to the environmental conditions of the city. Then, the standardization of the layers was done using the fuzzy membership function and the weighting of the criteria using the CRITIC method. Finally, using the MARCOS multi-criteria analysis method, a five-level vulnerability map was prepared. The results of the study showed that the factors of distance from the fault, land use, and distance from the epicenter, respectively; With the weighting coefficient of 0.133, 0.120, and 0.113, have the greatest impact on the occurrence of earthquakes in the region. In addition, according to the results of the research, 24.53 and 15.83 percent of the city's area has a high and very high vulnerability potential. Also, based on the findings of the research, the cities of Kolur and Hashtjin, along with 28 villages of the city, have a high vulnerability potential, and Khalkhal city and 42 villages of the city are also in the zone of high vulnerability. Therefore, to reduce potential risks, appropriate planning should be done in vulnerable areas. In addition, according to the results, the accuracy of the MARCOS method is excellent in evaluating the vulnerability of Khalkhal City against earthquakes, with the level under the curve (0.86).

Cite this article: Piroozi, E.; Asghari Saraskanrood, S. & Zeinali, B. (2023). Evaluation and zoning of the vulnerability of Khalkhal City against the environmental hazard of earthquake. *Environmental Hazards Management*, 10 (3), 245-260. DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.366500.796

© Elnaz Piroozi, Sayyad Asghari Saraskanrood, Batool Zeinali.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.366500.796

Introduction

Earthquake is one of the most catastrophic natural disasters that affect humans [2]. Today, nearly 20 percent of the world's population lives in active earthquake-prone areas [1]. On average, an earthquake occurs in Iran every seven years with loss of life and property [3]. According to Iran's earthquake risk zoning map, Khalkhal City is in the high-risk zone and earthquake is one of the threatening risks in this city.

Materials and methods

The current research is applied and the research method is quantitative-analytical. To process images and analyze data, ENVI, Ecognition, Arc GIS, Idrisi, and Excel software have been used. To study the earthquake risk, first, the effective factors (slope, dem, Geology, land use, distance from the epicenter of previous earthquakes, distance from landslides, distance from communication road, distance from population centers (cities and villages), the distance from the river and the distance from the fault) were identified according to the natural and human conditions of the area. In the next step, the layers of information related to each of the factors were prepared in the environment of the geographic information system, and the evaluation and standardization of the standard maps were done together using the fuzzy method. The weighting of the investigated factors was done according to the CRITIC method and the final analysis, using MARCOS multi-criteria methods.

Discussion

According to the output of the MARCOS method, 68.421 square kilometers of the area of Khalkhal City is in the highly vulnerable class. Examining the location of cities and villages shows that the two cities of Kolur and Hashtjin, along with 28 villages (equal to 18.67% of the villages in the city), are in a very vulnerable zone. Also, 653.60 square kilometers of the area of the city, including Khalkhal city and 42 villages (equivalent to 28% of the total villages of the city), have high vulnerability potential. In addition, the spatial analysis of the seismic vulnerability of Khalkhal City shows that 725.15 square kilometers of the city area, which covers 40 villages (equal to 26.67 percent of the city's villages), has the potential for vulnerability. has an average of 615.66 square kilometers of the area of Khalkhal city has low vulnerability potential (including 31 villages and equal to 20.67% of the total villages of the city). 91.247 square kilometers of the city's area has very low vulnerability (including 9 villages and equal to 6% of the city's villages)**.**

Conclusion

The results of this research showed that the factors of distance from the fault, land use, and distance from the epicenter of the earthquake are the most important influencing factors in the occurrence of earthquakes in Khalkhal city. Analysis of the final map shows the high vulnerability of Khalkhal city in terms of earthquake risk. Considering that earthquakes are accompanied by irreparable financial and human losses, it is necessary for responsible organizations to pay attention to the results of the current research and to prioritize responsible and appropriate protection measures, of course, expertized by experts. In addition, according to the obtained results, the accuracy of the MARCOS method in evaluating the vulnerability of Khalkhal City against earthquake risk is excellent, with the level under the curve (0.86).

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: https://jhsci.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر مخاطرهٔ محیطی زمین‌لرزه

الناز پیروزی[۱]، صیاد اصغری سراسکانرود[۲*]، بتول زینالی[۳]

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: e.pirouzi@uma.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه:s.asghari@uma.ac.ir

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zeynali.b@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

کلیدواژه:
مخاطره،
زمین‌لرزه،
GIS،
MCDM
شهر خلخال.

چکیده

زلزله یکی از مخاطرات طبیعی است که خسارات جبران‌ناپذیری را به انسان و محیط تحمیل می‌کند. ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله گام مهمی در برنامه‌ریزی، پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از آن است. در شهرستان خلخال با توجه به وجود گسل‌های متعدّد و نقاط لرزه‌خیز، احتمال وقوع زمین‌لرزه زیاد است. ولی علی‌رغم اهمیت موضوع تا کنون ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر زمین‌لرزه بررسی نشده است. پژوهش حاضر در پی ارزیابی آسیب‌پذیری این شهرستان در برابر خطر زلزله است. بدین منظور با بررسی منابع و با توجه به شرایط محیطی شهرستان، ابتدا شاخص‌های مؤثر شناسایی شدند. سپس استانداردسازی لایه‌ها با استفاده از تابع عضویت فازی و وزن‌دهی معیارها با بهره‌گیری از روش کرتیک انجام گرفت. در نهایت با بهره‌گیری از روش تحلیل چندمعیارهٔ مارکوس، نقشهٔ آسیب‌پذیری در پنج طبقه تهیه شد. نتایج نشان داد که عوامل فاصله از گسل، کاربری اراضی و فاصله از کانون زلزله، به‌ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۳۳، ۰/۱۲۰ و ۰/۱۱۳، بیشترین تأثیرگذاری را در رخداد زمین‌لرزه در منطقه دارند. همچنین ۲۴/۵۳ و ۱۵/۸۳ درصد از مساحت شهرستان دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد است. براساس یافته‌های پژوهش، شهر کلور و هشتجین به‌همراه ۲۸ روستای شهرستان، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بسیار زیادند و شهر خلخال و ۴۲ روستا از روستاهای شهرستان نیز در پهنهٔ آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. از این‌رو به‌منظور کاهش خطرهای احتمالی باید برنامه‌ریزی متناسب در پهنه‌های آسیب‌پذیر صورت پذیرد. همچنین طبق نتایج دقت روش MARCOS در ارزیابی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر زلزله با سطح زیرمنحنی (۰/۸۶) عالی است.

استناد: الناز ، پیروزی؛ اصغری سراسکانرود، صیاد و زینالی، بتول (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر مخاطرهٔ محیطی زمین‌لرزه. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰ (۳)، ۲۴۵-۲۶۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.366500.796

© الناز پیروزی، صیاد اصغری سراسکانرود، بتول زینالی.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.366500.796

مقدمه

مخاطرات از دو منشأ متفاوت ایجاد می‌شوند: ۱. مخاطرات طبیعی؛ ۲. مخاطرات ناشی از فناوری و فعالیت‌های بشر [۱۳].

مخاطرات طبیعی از جمله زمین‌لغزش، سیل، زلزله، توفان، فرسایش خاک و سونامی هستند [۱۹] که هر لحظه در جهان امکان وقوع دارند و سبب تخریب منابع درآمدی و امکانات زیستی می‌شوند، سلامت ساکنان را به خطر می‌اندازند و همیشه خطری برای توسعه به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به شمار می‌روند [۵]. در این میان زلزله که فرایندی در زمینهٔ انباشت طولانی‌مدت و آزاد شدن ناگهانی انرژی در طبیعت است [۳۱]، از دیرباز از فاجعه‌بارترین و مخرب‌ترین انواع مخاطرات طبیعی محسوب می‌شده است [۲۵]؛ به‌طوری که زمین‌لرزه‌ها بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ سبب کشته شدن ۷۲۱۱۴ نفر در سراسر جهان شدند و ۱۱۸/۳۴۴/۳۲۲ نفر را تحت تأثیر قرار دادند [۲۹]. امروزه نزدیک به ۲۰ درصد جمعیت جهان در مناطق زلزله‌خیز فعال زندگی می‌کنند [۲۱]. ساختمان ژئومورفولوژیکی ایران به‌دلیل تأثیرپذیری از فازهای آلپی و فشار پلیت‌های شمالی و جنوبی، حالت آنومالی دارد و به پایداری نسبی نرسیده است [۱۲]. به‌دلیل تداوم حرکت صفحه‌ها در این ناحیهٔ پهناور فشارشی، شاهد فعالیت‌های لرزه‌ای به‌عنوان مهم‌ترین مخاطره طبیعی هستیم [۲]. به‌طور میانگین در ایران هر هفت سال یک زلزلهٔ قوی با خسارت جانی و مالی زیاد رخ داده است [۶]. وقوع زلزله‌های شدید و تلفات و خسارات فراوان انسانی، اقتصادی و محیط زیستی آن بشر را به فکر تدوین برنامه‌ای زیربنایی به‌منظور کاهش خطرها و آسیب‌های ناشی از این پدیدهٔ طبیعی واداشته است [۲۰]. تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در برابر زلزله از راه‌های مؤثر در زمینهٔ شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و تحت خطر است [۸].

براساس نقشهٔ خطر زمین‌لرزهٔ ایران (تهیه‌شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله) شهرستان خلخال در پهنهٔ خطر زیاد قرار دارد و به لحاظ وجود گسل‌های فعال و متعدد، زمین‌لرزه جزو مخاطرات تهدیدکنندهٔ بالقوه در این شهرستان است. بررسی بخشی از شواهد تاریخی و تحقیقات علمی نیز نشان می‌دهد که خلخال منطقهٔ لرزه‌خیزی است که زلزله‌های شدید نیز در آن رخ داده است. برای مثال پس از زلزلهٔ ۱۴ دی ۱۳۷۴ با بزرگی ۶/۷ ریشتر و پس‌لرزه‌های آن در محدودهٔ خلخال، بسیاری از روستاها تا سکرآباد، لمبر، هل‌آباد و ایلخچی ویران شدند و ۱۱۰۰ نفر جان خود را از دست دادند. زمین‌لرزهٔ ۴/۳ ریشتری خلخال در دی‌ماه ۱۳۸۸ به واحدهای مسکونی و دامی تعدادی از روستاهای این شهرستان خسارت وارد کرد. زلزلهٔ اسفند ۱۳۸۹، ۱۷۰ میلیارد و ۴۰۰ میلیون ریال خسارت مالی در پی داشت و به ساختمان ۲۰ مدرسه، ۸۷۵ واحد مسکونی شهری و ۴۸۷ واحد مسکونی روستایی در بخش مرکزی خلخال خسارت وارد کرد. زلزلهٔ شهریور ۱۳۹۶ با بزرگی ۴/۳ ریشتر به ترک‌خوردگی دیوارهای برخی اماکن شهری و روستایی و مرگ چند نفر منجر شد. در ۳۱ تیر ۱۴۰۱ زمین‌لرزه‌ای به بزرگی تقریبی ۴/۱ ریشتر شهرستان خلخال را لرزاند. زلزلهٔ ۳/۳ ریشتری در ۱۱ دی‌ماه ۱۴۰۱ در شهرستان خلخال در عمق ۶ کیلومتری زیرزمین رخ داد و کانون زلزله با شهر خلخال فاصلهٔ ۴ کیلومتری داشت. این زمین‌لرزه‌ها نیز با خسارات جانی و مالی همراه بودند (سایت‌های خبری داخلی). از این‌رو با توجه به اهمیت موضوع و با نظر به اینکه تاکنون پژوهشی به‌منظور پهنه‌بندی شهرستان خلخال از لحاظ خطر زلزله انجام نگرفته است، در تحقیق حاضر، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های شهرستان خلخال در برابر خطر زلزله با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ مارکوس مدنظر قرار گرفت تا برآورد مناسبی از خطرپذیری این شهرستان در برابر زلزله با استفاده از داده‌های مکانی و توصیفی انجام گیرد، تأثیر هریک از معیارهای به‌کاررفته در شدت آسیب‌پذیری تعیین شود و با شناسایی مناطق اولویت‌دار از نظر خطر زمین‌لرزه، اقدامات لازم برای کنترل، برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار زمین به عمل آید. نتایج پژوهش با معرفی روش تحلیل چندمعیارهٔ مارکوس در زمینهٔ انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لرزه در مناطقی با شرایط طبیعی و انسانی مشابه محدودهٔ شهرستان خلخال می‌تواند بسیار مفید باشد و مدنظر پژوهشگران، مسئولان و سیاستگذاران قرار گیرد.

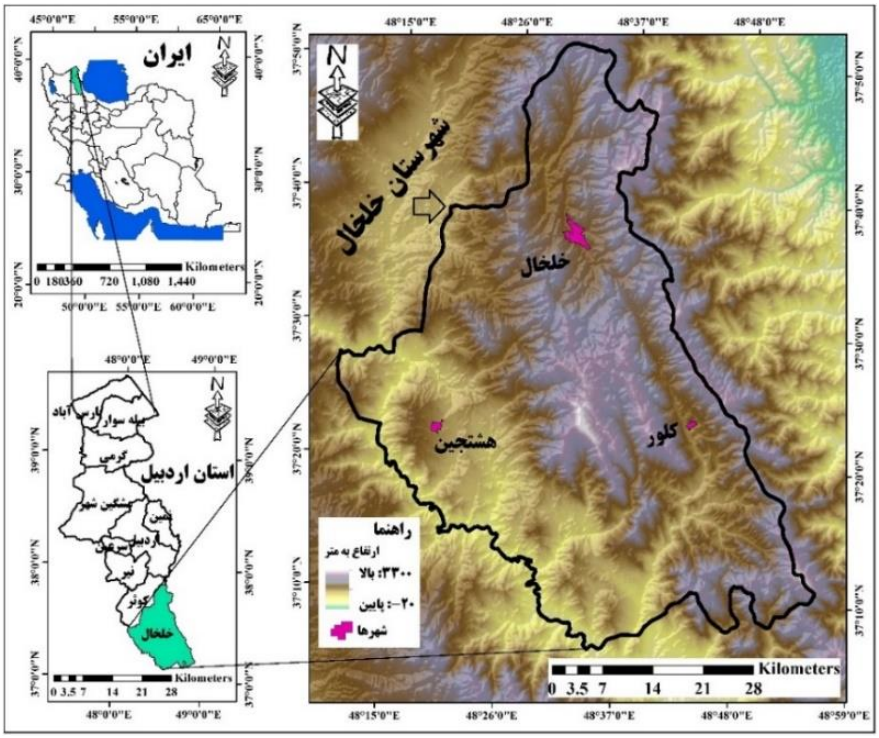
پیشینهٔ پژوهش

زمین‌لرزه مخرب‌ترین حادثه طبیعی و از مهم‌ترین عوامل تلفات بشری و خسارات اقتصادی شایان توجه محسوب می‌شود

[۱۵]. ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله گام مهمی در برنامه‌ریزی، پیشگیری و کاهش خسارات آن است. با رشد و توسعهٔ فناوری‌های نوین، تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات و محیط ارائهٔ نمایش این نقشه‌ها نیازمند استفاده از ابزارهای کارامدتری است. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان تعیین مقدار اهمیت همهٔ معیارها و ادغام آنها در یک شاخص ترکیبی را فراهم می‌آورند تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند بهترین گزینه را شناسایی کنند [۳۴]. در چند دههٔ اخیر روش‌های تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌طور گسترده در یکپارچه‌سازی، شناسایی یا رتبه‌بندی عوامل تأثیرگذار و به‌ویژه در تجزیه‌وتحلیل مخاطرات طبیعی به‌کار گرفته شده‌اند [۱۸]. از سوی دیگر استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به‌منظور مدیریت، تفسیر و آماده‌سازی داده‌های فضایی برای مدل‌سازی، فرصت‌ها و چالش‌های زیادی را فراهم می‌کند [۲۴]. از این‌رو استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با رویکردی تلفیقی، می‌تواند به برنامه‌ریزی سریع و مناسب و همچنین مدیریت خطرات احتمالی منجر شود [۳]. دربارهٔ بررسی خطر زلزله با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پژوهش‌های گسترده‌ای صورت گرفته است که در همهٔ آنها بر عملکرد مطلوب این روش‌ها تأکید شده است. برای مثال حسینی‌خواه و ضرابی (۱۳۹۸) به بررسی نقش مدل ترکیبی تصمیم‌گیری واسپاس در شناسایی پهنه‌های لرزه‌خیز در مراکز جمعیتی شهرستان بهمئی پرداختند [۷]. خدادادی و همکاران (۱۳۹۹) آسیب‌پذیری شهر کرج در برابر مخاطره زلزله را با روش الکتره بررسی کردند [۹]. آرامی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل ویکور به اولویت‌بندی سکونتگاه‌های روستایی بخش مرکزی شهرستان اردبیل در معرض زلزله پرداختند [۱]. غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲) آسیب‌پذیری لرزه‌ای سکونتگاه‌های انسانی شهرستان باشت را با استفاده از مدل دیماتل فازی بررسی کردند [۱۶]. یاریان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های ترکیبی چندمعیاره و شبکهٔ عصبی مصنوعی پرداختند [۳۲]. فرجی سبکبار و همکاران (۲۰۲۱) در زمینهٔ آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی تهران در برابر زلزله با استفاده از سیستم استنتاج فازی تحقیق کردند [۲۷]. فرهمند و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از مدل سلسله‌مراتبی فازی، آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله را بررسی کردند [۲۶]. شادمان و پوپی (۲۰۲۳) با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ناحیهٔ سیلهت بنگلادش پرداختند [۳۰].

منطقهٔ پژوهش

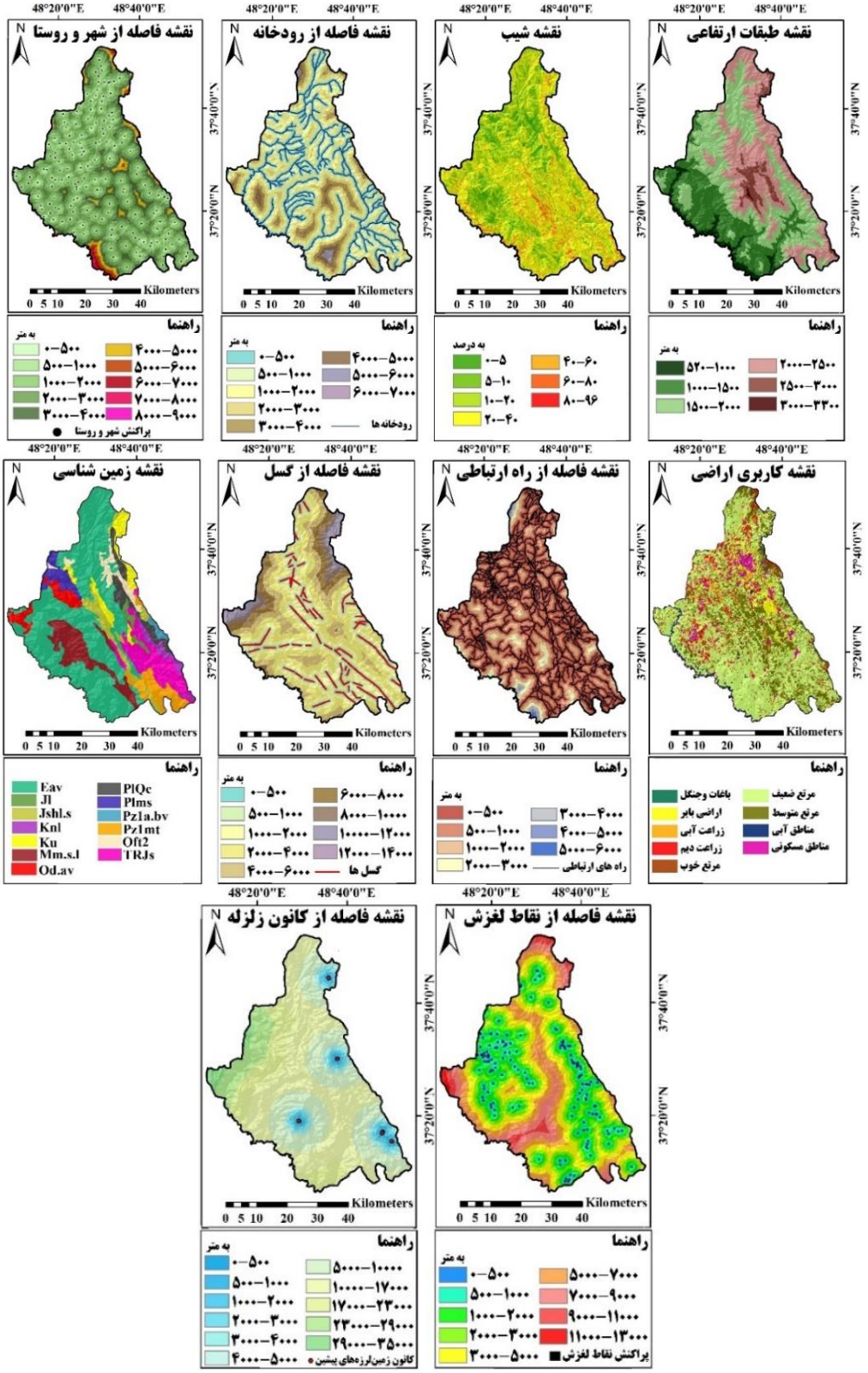
شهرستان خلخال با وسعت ۲۶۶۴ کیلومترمربع در جنوب استان اردبیل بین ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقهٔ طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقهٔ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این شهرستان از شمال با شهرستان کوثر، از شرق با استان گیلان، از جنوب با استان زنجان و از غرب با شهرستان میانهٔ آذربایجان شرقی هم‌مرز است. ارتفاع بلندترین نقطهٔ شهرستان ۳۳۰۰ متر (قلهٔ آق‌داغ) و ارتفاع پست‌ترین نقطه ۵۲۰ متر (در حاشیهٔ رودخانه قزل‌اوزن) است. قلهٔ آق‌داغ بعد از سبلان دومین قلهٔ مرتفع استان محسوب می‌شود و تقریباً در جنوب شهرستان خلخال واقع شده است. قلهٔ عجم نیز در قسمت شمالی شهرستان واقع شده است و با ارتفاع ۳۰۰۹ متر دومین قلهٔ بلند شهرستان خلخال محسوب می‌شود. از دیگر ارتفاعات شهرستان می‌توان به پلنگان، اوجقاز، آلوچه‌داغ و ازناو به‌ترتیب با ارتفاع ۲۶۴۰، ۲۵۵۰، ۲۱۹۰ و ۱۹۵۰ متر اشاره کرد. از لحاظ زمین‌ساختی محدودهٔ شهرستان در زون البرز (زیرپهنهٔ البرز غربی و آذربایجان) قرار دارد. در شهرستان خلخال رود قزل‌اوزن و شاخه‌های آن مانند ازنوچایی، نورعلی‌چایی، قئز باخان‌چایی، هیروچایی، آرپاچایی و شاهرود جریان دارد. منطقه از نظر آب‌وهوایی دارای هوای سرد در زمستان و هوای به‌نسبت معتدل در تابستان است. نوع اقلیم منطقه طبق فرمول دومارتن و سلیانینوف نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانهٔ شهرستان ۳۰۰ میلی‌متر است و بهمن و مرداد به‌ترتیب سردترین و گرم‌ترین ماه‌ها هستند.



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت منطقهٔ پژوهش (منبع: نگارندگان پژوهش)

روش‌شناسی پژوهش

نوع تحقیق حاضر کاربردی و روش پژوهش معیاری- تحلیلی است. در این پژوهش ابتدا عوامل مؤثر در ایجاد خطر زمین‌لرزهٔ محدوده شامل شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از کانون زلزله‌های پیشین، فاصله از نقاط لغزشی، فاصله از راه ارتباطی، فاصله از مراکز جمعیتی (شهر و روستاها)، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل با مطالعه و مرور منابع از کانال‌هایی همچون مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، بررسی ادبیات موضوع و پیمایش نظرها و عقاید افراد صاحب‌نظر و نیز بررسی‌های میدانی با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی شد. در مرحلهٔ بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی راه‌های ارتباطی و شبکهٔ آبراهه با استفاده از نقشهٔ خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل تهیه شد. نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک (۱۲/۵×۱۲/۵ متر) از سایت دانشگاه آلاسکا دریافت و محدودهٔ پژوهش استخراج شد و لایهٔ شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از دستورهای slope در Arc map تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها با استفاده از نقشهٔ رقومی‌شدهٔ استان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. کاربری اراضی محدوده با استفاده از تصاویر سنجندهٔ لندست ۹ (تاریخ: ۲۰۲۲/۰۸/۵) و طبقه‌بندی شیءگرا با استفاده از نرم‌افزار Envi وEcognition استخراج شد. به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش از اطلاعات مربوط به بانک زمین‌لغزش استان اردبیل (۱۳۹۲) استفاده شد. نقشهٔ کانون زلزله‌های پیشین نیز با بهره‌گیری از نقشهٔ نقاط لرزه‌ای کشور اخذشده از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به‌دست آمد. نقشهٔ معیارهای مطرح در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر زلزله در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نقشهٔ معیارهای مطرح در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر خطر زلزله (منبع: یافته‌های پژوهش)

مراحل تهیه نقشهٔ پهنه‌بندی با استفاده از روش مارکوس[1]

روش مارکوس شامل هفت مرحله است. اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. گام دوم تشکیل ماتریس تصمیم است که ماتریس تصمیم این روش به‌صورت معیار–گزینه است. یعنی ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مسئله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه دربارهٔ هر معیار است. در گام سوم، ایدئال و ضد ایدئال تعیین می‌شود. نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی، گام چهارم است. استاندارد کردن داده‌ها، همسان کردن دامنهٔ تغییرات داده‌ها بین صفر و ۱ یا یک دامنهٔ مشخص دیگر است. مرحلهٔ استانداردسازی با توجه به تابع عضویت فازی انجام گرفته است (جدول ۱). در مجموعه‌های فازی به حداکثر عضویت مقدار ۱ و به حداقل عضویت مقدار عددی صفر تعلق می‌گیرد [۲۳، ۳۳].

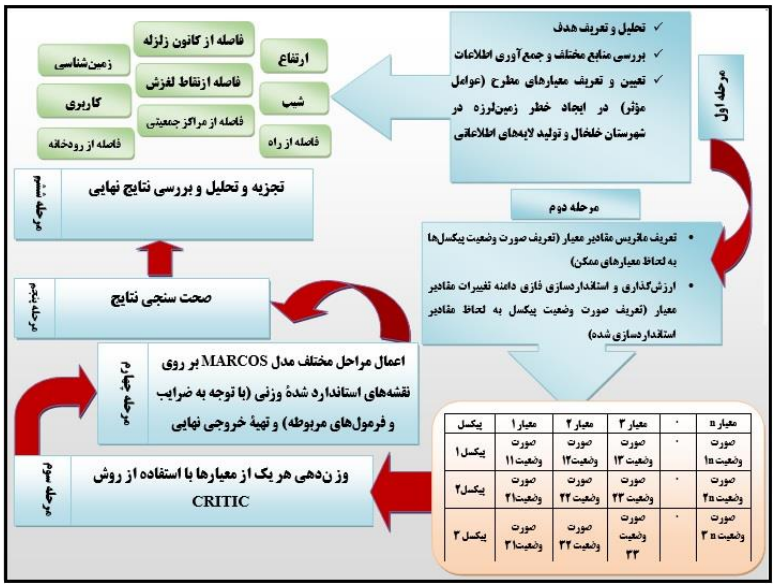
جدول ۱. نوع توابع فازی‌ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با افزایش شیب، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی
طبقات ارتفاعی	با افزایش ارتفاع، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها براساس اهمیت آن در شدت آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه و سپس فازی کردن	تابع بزرگ فازی
فاصله از راه ارتباطی	در مناطق دورتر از راه ارتباطی، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی
زمین‌شناسی	اختصاص کدها براساس اهمیت آن در شدت آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه و سپس فازی کردن	تابع بزرگ فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور گسل، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از مراکز جمعیتی	در مناطق مجاور مراکز جمعیتی، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از کانون زلزله	در فواصل نزدیک کانون زلزله، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از نقاط لغزشی	در مناطق مجاور نقاط لغزشی ، آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی

[۸، ۱۰]

در گام پنجم به وزن‌دار کردن ماتریس نرمال پرداخته شد. در این پژوهش برای وزن‌دهی عوامل از روش کرتیک استفاده شد. در این روش داده‌ها براساس میزان همبستگی و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها تجزیه‌وتحلیل می‌شوند و با توجه به مقادیر همبستگی، تضاد و انحراف معیار هر عامل، میزان اطلاعات محاسبه می‌شود. سپس وزن نهایی هر معیار از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات همهٔ معیارها به‌دست می‌آید [۲۱]. در اجرای مراحل وزن‌دهی کرتیک ابتدا در محیط نرم‌افزار ادریسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل با استفاده از تابع REGRESS به‌دست آمد و در مرحلهٔ بعد ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. به نظر می‌رسد که استفاده از روش کرتیک در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند گامی برای حل معضل استقلال صفات از یکدیگر باشد که به‌هنگام مقایسهٔ زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و فرایند تحلیل شبکه‌ای و در شرایط تحقق نیافتن همبستگی بین صفات عینیت می‌یابد. در ششمین گام از روش مارکوس، مطلوبیت هر گزینه تعیین می‌شود و در نهایت در مرحلهٔ آخر، تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام می‌گیرد [۴، ۲۸]. بعد از تهیهٔ خروجی نهایی، با توجه به اینکه منحنی تشخیص عملکرد نسبی (راک[2])، از کارامدترین روش‌های پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی است [۱۷]، صحت خروجی نهایی با توجه به نقشهٔ کانون زلزله‌های پیشین با استفاده از این روش بررسی شد. فلوچارت فرایند پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

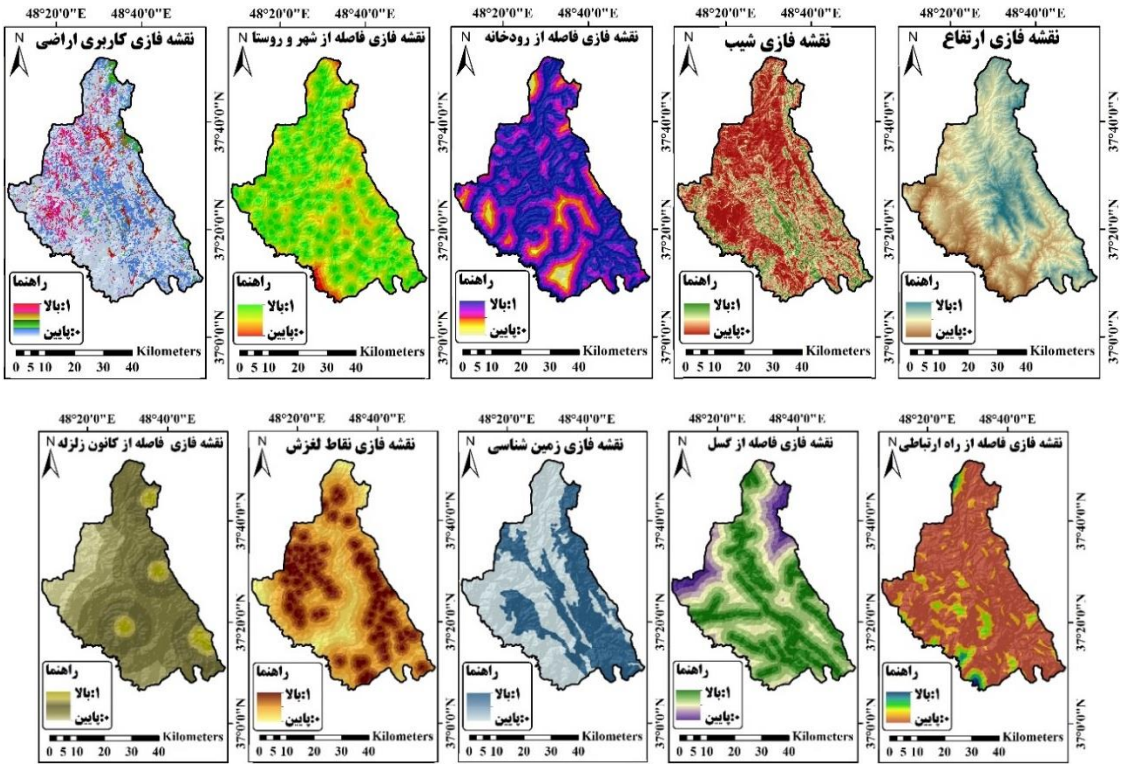
1. MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution)
2. ROC (Receiver operating characteristic)



شکل ۳. فلوچارت فرایند تحقیق (منبع: نگارندگان پژوهش)

یافته‌های پژوهش

پس از تعیین معیارهای مؤثر در پهنه‌بندی و شناسایی وزن معیارها، باید لایه‌های اطلاعاتی را با استفاده از یک روش مناسب با هم تلفیق کرد. در این تحقیق برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی از مدل تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ مارکوس استفاده شد. از این‌رو پس از تهیهٔ نقشه‌های استانداردشدهٔ هر یک از معیارهای مطرح (شکل ۴) و اعمال وزن‌های مربوط (با توجه به نتایج جدول‌های ۲ تا ۴)، نقشه‌های حاصل وارد تکنیک مدنظر شد و با اجرای دیگر مراحل به‌صورت عملیات ریاضی روی لایه‌های استانداردشدهٔ وزنی، نقشهٔ خروجی نهایی در پنج طبقهٔ با آسیب‌پذیری بسیار زیاد تا بسیار کم به‌دست آمد (شکل ۵).



شکل ٤. نقشهٔ استانداردشدهٔ معیارها (منبع: یافته‌های پژوهش)

جدول ۲. ماتریس همبستگی معیارها

معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	شهر و روستا	زمین‌شناسی	گسل	کاربری	زمین‌لغزش
شیب	۱	۰/۲۰۱	۰/۲۴۳	-۰/۰۴۱	-۰/۳۵۴	۰/۱۸۶	-۰/۲۹۴	-۰/۰۹۷	۰/۲۱۷	۰/۰۸۳
ارتفاع	۰/۲۰۱	۱	۰/۱۲۱	-۰/۰۸۲	-۰/۱۲۲	۰/۲۳۱	-۰/۰۷۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۱	۰/۰۴۳
کانون زلزله	۰/۲۴۳	۰/۱۲۱	۱	-۰/۴۰۴	-۰/۷۵۲	۰/۶۴۱	-۰/۵۹۲	۰/۲۵۴	۰/۳۹۸	۰/۲۶۵
رودخانه	-۰/۰۴۱	-۰/۰۸۲	-۰/۴۰۴	۱	۰/۳۱۲	-۰/۱۸۶	۰/۰۸۷	-۰/۱۷۷	-۰/۰۶۴	-۰/۰۴۲
راه ارتباطی	-۰/۳۵۴	-۰/۱۲۲	-۰/۷۵۲	۰/۳۱۲	۱	-۰/۶۳۶	۰/۴۰۵	-۰/۱۲۵	۰/۰۴۳	۰/۰۶۳
شهر و روستا	۰/۱۸۶	۰/۲۳۱	۰/۶۴۱	-۰/۱۸۶	-۰/۶۳۶	۱	-۰/۲۹۷	۰/۰۵۱	۰/۱۸۵	۰/۰۸۳
زمین‌شناسی	-۰/۲۹۴	-۰/۰۷۶	-۰/۵۹۲	۰/۰۸۷	۰/۴۰۵	-۰/۲۹۷	۱	۰/۲۴۱	-۰/۱۶۷	-۰/۰۸۶
گسل	-۰/۰۹۷	۰/۰۸۱	۰/۲۵۴	-۰/۱۷۷	-۰/۱۲۵	۰/۰۵۱	۰/۲۴۱	۱	۰/۰۹۸	۰/۱۶۵
کاربری	۰/۲۱۷	۰/۰۶۱	۰/۳۹۸	-۰/۰۶۴	۰/۰۴۳	۰/۱۸۵	-۰/۱۶۷	۰/۰۹۸	۱	۰/۱۷۳
زمین‌لغزش	۰/۰۸۳	۰/۰۴۳	۰/۲۶۵	-۰/۰۴۲	۰/۰۶۳	۰/۰۸۳	-۰/۰۸۶	۰/۱۶۵	۰/۱۷۳	۱

جدول ۳. ماتریس تضاد معیارها

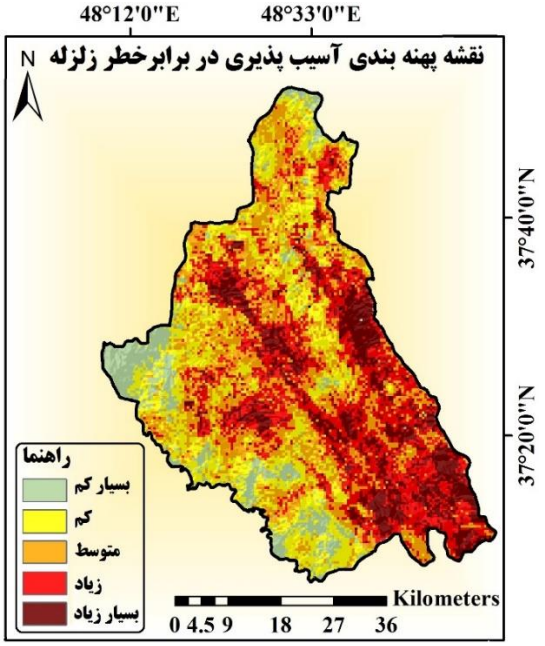
معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	شهر و روستا	زمین‌شناسی	گسل	کاربری	زمین‌لغزش
شیب	۰	۰/۷۹۹	۰/۷۵۷	۱/۰۴۱	۱/۳۵۴	۰/۸۱۴	۱/۲۹۴	۱/۰۹۷	۰/۷۸۳	۰/۹۱۷
ارتفاع	۰/۷۹۹	۰	۰/۸۷۹	۱/۰۸۲	۱/۱۲۲	۰/۷۶۹	۱/۰۷۶	۰/۹۱۹	۰/۹۳۹	۰/۹۵۷
کانون زلزله	۰/۷۵۷	۰/۸۷۹	۰	۱/۴۰۴	۱/۷۵۲	۰/۳۵۹	۱/۵۹۲	۰/۷۴۶	۰/۶۰۲	۰/۷۳۵
رودخانه	۱/۰۴۱	۱/۰۸۲	۱/۴۰۴	۰	۰/۶۸۸	۱/۱۸۶	۰/۹۱۳	۱/۱۷۷	۱/۰۶۴	۱/۰۴۲
راه ارتباطی	۱/۳۵۴	۱/۱۲۲	۱/۷۵۲	۰/۶۸۸	۰	۱/۶۳۶	۰/۵۹۵	۱/۱۲۵	۰/۹۵۷	۰/۹۳۷
شهر و روستا	۰/۸۱۴	۰/۷۶۹	۰/۳۵۹	۱/۱۸۶	۱/۶۳۶	۰	۱/۲۹۷	۰/۹۴۹	۰/۸۱۵	۰/۹۱۷
زمین‌شناسی	۱/۲۹۴	۱/۰۷۶	۱/۵۹۲	۰/۹۱۳	۰/۵۹۵	۱/۲۹۷	۰	۰/۷۵۹	۱/۱۶۷	۱/۰۸۶
گسل	۱/۰۹۷	۰/۹۱۹	۰/۷۴۶	۱/۱۷۷	۱/۱۲۵	۰/۹۴۹	۰/۷۵۹	۰	۰/۹۰۲	۰/۸۳۵
کاربری	۰/۷۸۳	۰/۹۳۹	۰/۶۰۲	۱/۰۶۴	۰/۹۵۷	۰/۸۱۵	۱/۱۶۷	۰/۹۰۲	۰	۰/۸۲۷
زمین‌لغزش	۰/۹۱۷	۰/۹۵۷	۰/۷۳۵	۱/۰۴۲	۰/۹۳۷	۰/۹۱۷	۱/۰۸۶	۰/۸۳۵	۰/۸۲۷	۰
مجموع تضاد	۸/۸۵۶	۸/۵۴۲	۸/۸۲۶	۹/۵۹۷	۱۰/۱۶۶	۸/۷۴۲	۹/۷۷۹	۸/۵۰۹	۸/۰۵۶	۸/۲۵۳

جدول ٤. محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کرتیک

معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	شهر و روستا	زمین‌شناسی	گسل	کاربری	زمین‌لغزش
انحراف معیار	۰/۲۵۵	۰/۱۹۶	۰/۲۸۸	۰/۱۶۸	۰/۱۹۱	۰/۲۶۵	۰/۲۴۷	۰/۳۵۲	۰/۳۳۷	۰/۲۴۳
میزان اطلاعات	۲/۲۵۸	۱/۶۷۴	۲/۵۴۱	۱/۶۱۲	۱/۹۴۱	۲/۳۱۶	۲/۴۱۵	۲/۹۹۵	۲/۷۱۴	۲/۰۰۵
وزن نهایی	۰/۱۰۰	۰/۰۷۴	۰/۱۱۳	۰/۰۷۱	۰/۰۸۶	۰/۱۰۳	۰/۱۰۷	۰/۱۳۳	۰/۱۲۰	۰/۰۸۹

با توجه به خروجی حاصل از روش مارکوس، ۴۲۱/۶۸ کیلومترمربع از مساحت شهرستان در طبقهٔ با آسیب‌پذیری بسیار زیاد قرار دارد. بررسی موقعیت شهرها و روستاها در زمینهٔ پهنه‌بندی احتمال وقوع زلزله نیز نشان می‌دهد که دو شهر کلور و هشتجین به‌همراه ۲۸ روستا (معادل ۱۸/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) در پهنهٔ آسیب‌پذیری بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. از جمله روستاهای واقع در این طبقه می‌توان به مجره، خمس، گزاز، اسبو، شال، دیز، علی‌آباد، ماجلان، احمدآباد، اسکستان، گندم آباد، ترزنق و آل‌هاشم اشاره داشت. همچنین ۶۵۳/۶۰ کیلومترمربع از مساحت شهرستان دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد است که این طبقه شامل شهر خلخال و ۴۲ روستا (۲۸ درصد از مجموع روستاهای شهرستان) است. روستاهای مورستان، خوجین، خانقاه بفراجرد، زرتشت‌آباد، گورانسراب، دمدل، کندرق، مرجین، کهل، رکن‌آباد، جعفرآباد، ازناوسر، برندق، تیل، ویو، کرین، زندرق، سوسهاب و زاهوان از نمونه روستاهای واقع در این طبقه هستند. افزون‌بر این، تحلیل فضایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرستان

خلخال نشان می‌دهد که ۷۲۵/۱۵ کیلومترمربع از مساحت شهرستان که ۴۰ روستا (۲۶/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) را پوشش می‌دهد، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط است که روستاهای لمبر، چامبر، کلار، نیاخرم، اردبیلق، کمر، سقیزچی، کمر، غفورآباد، چناران، ارجلیک، سنجبدله و یلوجه از روستاهای واقع در این طبقه هستند. ۶۱۵/۶۶ و ۲۴۷/۹۱ کیلومتر مربع از مساحت شهرستان خلخال به‌ترتیب دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم (شامل ۳۱ روستا معادل ۲۰/۶۷ درصد از مجموع روستاهای شهرستان) و بسیار کم (شامل ۹ روستا معادل ۶ درصد از مجموع روستاهای شهرستان) هستند (جدول ۵). البته باید در نظر داشت که واقع شدن بعضی از پهنه‌ها در سطوح اندک آسیب‌پذیری و خطر نشان‌دهندهٔ وضعیت مطلوب آنها نیست و فقط جایگاه آن پهنه را در مقایسه با پهنه‌های دیگر مشخص می‌کند.



شکل ۵. نقشهٔ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر خطر زلزله با استفاده از روش مارکوس (منبع: یافته‌های پژوهش)

جدول ۵. اطلاعات طبقات به‌دست‌آمده از الگوریتم چندمعیارهٔ مارکوس

مقدار آسیب‌پذیری	آسیب‌پذیری بسیار زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	آسیب‌پذیری متوسط	آسیب‌پذیری کم	آسیب‌پذیری بسیار کم
مساحت (KM2)	۴۲۱/۶۸	۶۵۳/۶۰	۷۲۵/۱۵	۶۱۵/۶۶	۲۴۷/۹۱
درصد%	۱۵/۸۳	۲۴/۵۳	۲۷/۲۲	۲۳/۱۱	۹/۳۱

بحث

بررسی معیار ارتفاع در سطح شهرستان نشان می‌دهد که به‌طور کلی ۱۲۸/۱۷۳ کیلومترمربع از مساحت شهرستان در طبقهٔ ارتفاعی ۱۰۰۰–۵۲۰ متر قرار دارد. طبقات ارتفاعی ۱۵۰۰–۱۰۰۰، ۲۰۰۰–۱۵۰۰ و ۲۵۰۰–۲۰۰۰ متر به‌ترتیب ۶۳۴/۱۹۸، ۹۴۹/۶۹۵ و ۷۹۰/۶۵۸ کیلومتر مربع از مساحت محدوده را پوشش می‌دهند و ۱۵۶/۴۷۸ و ۴/۷۹۸ کیلومتر مربع از مساحت محدوده به‌ترتیب دارای ارتفاع ۳۰۰۰–۲۵۰۰ و ۳۵۰۰–۳۰۰۰ متر است. مقایسهٔ نقشهٔ نهایی پهنه‌بندی با نقشهٔ ارتفاع شهرستان خلخال بیانگر آن است که سطوح ارتفاعی ۳۳۰۰–۱۵۰۰ متری از احتمال آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند. ولی همان‌طور که ریاحی و موسوی (۱۴۰۰) نیز در پژوهش خود بیان کرده‌اند، ارتفاعات از لحاظ تراکم سکونتگاهی (تعداد نقاط شهری و روستایی) و بررسی شدت آسیب واردشده بر منازل مسکونی و آسیب‌های جانی و مالی در صورت بروز زلزله اهمیت می‌یابند [۱۱] و با توجه به اینکه شهر خلخال و کلور به‌همراه ۹۰ روستا (۶۰ درصد از روستاهای شهرستان) در ارتفاع ۲۰۰۰–۱۵۰۰ متر قرار دارند و سطوح ارتفاعی ۲۵۰۰–۲۰۰۰ متری نیز شامل ۲۷ روستا (۱۸ درصد از روستاهای شهرستان) هستند و در ارتفاع بیشتر از ۲۵۰۰

متر فقط دو روستا دیده می‌شود، به نظر می‌رسد که طبقهٔ ارتفاعی ۲۵۰۰–۱۵۰۰ متری را باید طبقهٔ آسیب‌پذیر در برابر زلزله در شهرستان خلخال دانست. از عوامل مهم در شدت آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها شیب منطقه است. ریاحی و موسوی (۱۴۰۰) و غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲) نیز اشاره داشته‌اند که با افزایش شیب، آسیب‌پذیری افزایش پیدا می‌کند و در عملیات امدادرسانی و برآورد شدت خسارات بعد از زلزله نیز شیب از نظر دستیابی آسان و راحت به منطقه اهمیت می‌یابد [۱۱، ۱۶]. در محدودهٔ پژوهش، شیب بین صفر تا ۹۶ درصد است و ۹۴/۳۲۹ کیلومترمربع از مساحت محدوده دارای شیب ۵–۰ درصد است. طبقات شیب ۱۰–۵ و ۲۰–۱۰ درصد به‌ترتیب ۳۲۳/۶۲۳ و ۸۲۷/۵۶۳ کیلومتر مربع از سطح محدوده را شامل می‌شوند. همچنین ۱۰۹۴/۴۹۲، ۳۰۲/۷۳۱، ۲۰/۸۱۸ و ۰/۴۴۴ کیلومتر مربع از سطح محدوده به‌ترتیب در طبقات شیب ۴۰–۲۰، ۶۰–۴۰، ۸۰–۶۰ و ۹۶–۸۰ درصد قرار دارد. به‌طور کلی شهر خلخال و هشتجین به‌همراه ۹ روستا (۶ درصد از روستاهای شهرستان) در طبقهٔ شیب کمتر از ۵ درصد قرار دارند. شهر کلور و ۱۳۳ روستا (۸۸/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) در شیب ۴۰–۵ درصد قرار دارند و ۶ روستا (۴ درصد از نقاط روستایی شهرستان) دارای شیب ۶۰–۴۰ درصد هستند و در طبقات شیب بیش از ۶۰ درصد نقاط سکونتگاهی دیده نمی‌شود. از این‌رو شیب‌های ۲ تا ۶۰ درصد پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری دارند.

انواع کاربری در شهرستان خلخال به‌صورت زراعت دیم و آبی (به‌ترتیب با پوشش ۱۶۹/۸۹ و ۹۶/۰۱ کیلومترمربع از مساحت محدوده) باغ (۲۲/۶۱ کیلومترمربع)، اراضی بایر (۱۵۱/۵۰ کیلومترمربع)، مناطق مسکونی شهری و روستایی (۲۱/۰۳ کیلومتر مربع)، مراتع فقیر، متوسط، خوب (به‌ترتیب با ۱۵۲۳/۲۲، ۵۸۷/۷۰ و ۸۷/۱۱ کیلومترمربع)، اراضی پوشیده از آب (با مساحت ۴/۹۳ کیلومترمربع) است. از لحاظ معیار کاربری اراضی، نواحی انسان‌ساخت (مناطق شهری و روستایی)، اراضی زراعی و باغ‌ها، بیشترین مقدار از مساحت مناطق دارای احتمال پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و به‌نسبت زیاد را در بر گرفته‌اند. مخاطرهٔ طبیعی زلزله از مهم‌ترین عوامل انهدامی سکونتگاه‌های شهری و روستایی است و از این‌رو این مراکز جمعیتی از مناطق بسیار آسیب‌پذیرند. اما همان‌طور که حیدری‌مظفر و تاج‌بخشیان (۱۴۰۱)، رحیمی‌شهید و رحیمی (۱۳۹۶) و علوی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش‌های خود تأکید داشته‌اند، با توجه به گستردگی مناطق روستایی در کشور، حوزهٔ تأثیر بیشتر زلزله‌ها در مناطق روستایی کشور بوده است [۸، ۱۰، ۱۴]. از طرف دیگر، سازه‌های روستایی در ایران به‌علت قدمت، ضعف ساخت‌وساز، نبود دانش فنی کافی و اجرایی و بهره‌گیری از مصالح کم‌دوام و نامرغوب، به وضعیت نامطلوبی دچارند. از این‌رو بیشتر ساختمان‌های مناطق روستایی کشور در برابر زلزله بسیار آسیب‌پذیرند و روستاهای شهرستان خلخال نیز از این قاعده مستثنا نیستند. فاصله از مراکز جمعیتی شهرستان بین صفر تا ۹۰۰۰ متر است. مقایسهٔ نقشهٔ فاصله از مراکز جمعیتی با نقشهٔ پهنه‌بندی نشان می‌دهد که پهنه‌های آسیب‌پذیر در فواصل نزدیک به این مناطق (از فاصله صفر تا حداکثر ۱۰۰۰ متری) واقع شده‌اند.

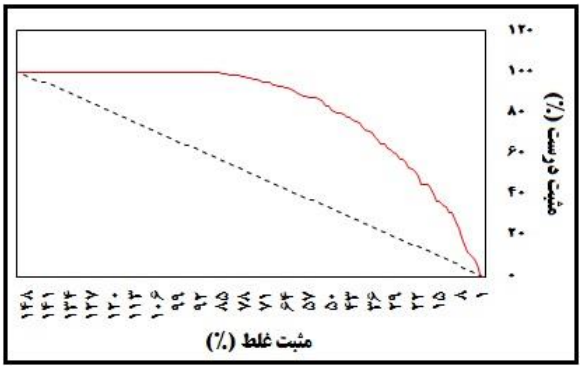
فاصله از آبراهه، در سطح محدوده بین صفر تا ۷۰۰۰ متر است. نزدیکی بیش از حد به منابع آبی و ساخت‌وساز در بستر رودها در زمان مخاطرات طبیعی سبب خسارت‌های جانی و مالی می‌شود. با نظر به معیار فاصله از رودخانه، می‌توان نتیجه گرفت که مناطق بسیار آسیب‌پذیر در فاصلهٔ نزدیک از رودخانه (اغلب از فاصلهٔ صفر تا ۲۰۰۰ متری و در برخی نقاط نیز حداکثر تا ۴۰۰۰ متر) قرار دارند و تراکم جمعیتی شهرها یا روستاها نیز در نزدیک به منابع آبی است. به‌طوری که شهر خلخال و کلور به‌همراه ۷۳ روستای شهرستان در حریم صفر تا ۵۰۰ متری از رودخانه جای گرفته‌اند. شهر آراللو و ۲۹ روستا در فواصل ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ و شهر هشتجین به‌همراه ۳۶ روستا نیز به‌ترتیب در فاصلهٔ ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متری از رودخانه‌ها قرار دارند. در شهرستان خلخال فاصله از جاده در حد فاصل صفر تا ۶۰۰۰ متر است و مسیر ارتباطی اسالم–خلخال، اردبیل–خلخال و میانه–خلخال مهم‌ترین محورهای ارتباطی این شهرستان محسوب می‌شوند. هرچه دسترسی به جاده‌های اصلی کمتر باشد، با توجه به کاهش امکان امدادرسانی به این مناطق، تلفات و آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد.

عامل زمین‌شناسی از شاخص‌های اصلی در ایجاد خسارت ناشی از زمین‌لرزه به شمار می‌رود. خدادادی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که اگر سست‌تر بودن سری زمین‌شناسی، سبب تشدید توان موج لرزه‌ای و سخت‌تر بودن سری زمین‌شناسی سبب کاهش توان انتقال موج زمین‌لرزه و در نتیجه تضعیف قدرت تخریبی زمین‌لرزه می‌شود [۹]. در شهرستان خلخال نیز رسوبات دشت، تراس‌های آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌ها، شیل خاکستری روشن و ماسه‌سنگ، مارن، شیل،

ماسه‌سنگ و کنگلومرا بسیار آسیب‌پذیرند؛ به‌طوری‌که مناطق شهری و روستایی شهرستان روی رسوبات آبرفتی قرار دارند که استحکام زیادی ندارند و در صورت وقوع زلزله شدت آن بیشتر احساس می‌شود. برای مثال شهر خلخال در دشت خلخال قرار دارد و قسمت عمدهٔ آن را رسوبات دوران کواترنری پوشانده است که در پهنه‌بندی زلزله جزو مناطق با پتانسیل لرزه‌خیزی زیاد طبقه‌بندی می‌شود. وجود گسل‌های فراوان در هر منطقه سبب بروز زلزله می‌شود و از شاخص‌های تعیین‌کنندهٔ خطرپذیری گسل ها بعد فاصله است که در زمان فعالیت و رخداد زلزله نسبت معکوس با شـــدت و ریســـک آن دارد. حیدری‌مظفر و تاج‌بخشیان (۱۴۰۱)، رحیمی شهید و رحیمی (۱۳۹۶) و علوی و همکاران (۱۳۹۴) نیز در تحقیقات خود بر این موضوع تأکید داشته‌اند [۸، ۱۰، ۱۴]. فاصله از گسل در محدوده بین صفر تا ۱۴۰۰۰ متر است. گسل‌های شهرستان خلخال به‌شکل شکستگی‌های کوچک و بزرگ در بخش عمده‌ای از شهرستان به چشم می‌خورد. از مهم‌ترین گسل‌های ناحیه می‌توان به گسل تالش، گسل نئور و گسل دوئل اشاره کرد که در لرزه‌خیزی منطقه مؤثرند و سبب ایجاد چند زمین‌لرزه کوچک تا متوسط شده‌اند. با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان خلخال در برابر خطر زلزله نقاط با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد در فواصل صفر تا ۲۰۰۰ متری از گسل واقع شده‌اند که افزون‌بر شهرهای خلخال، هشتجین و کلور، ۹۷ روستا (معادل ۶۶/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) نیز در این فاصله از گسل جای دارند.

غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهش خود بیان داشته‌اند که در شاخص نقاط لرزه‌خیز لرزه‌هایی که در فواصل نزدیک به کانون‌های زلزله‌های پیشین هستند، مقاومت بسیار کمتری در برابر انرژی آزادشدهٔ زلزله خواهند داشت و با فاصله گرفتن از کانون زلزله از شدت آسیب‌پذیری کاسته خواهد شد [۱۶]. در محدودهٔ پژوهش، فاصله از کانون زلزله‌های پیشین در حد فاصل صفر تا ۳۵۰۰۰ متر است. سه شهر خلخال، هشتجین و کلور، به همراه ۱۱۰ روستای شهرستان در فاصله صفر تا ۱۵هزارمتری از کانون زلزله‌های پیشین قرار دارند و طبق خروجی نهایی مطالعهٔ حاضر، پهنه‌های آسیب‌پذیری به‌طور عمده در فواصل نزدیک به کانون زمین‌لرزه‌های پیشین قرار دارند. در زمان زمین‌لرزه بسیاری از لغزش‌های غیرفعال دوباره فعال می‌شوند و حتی در بسیاری از زلزله‌های رخداده، خسارات حاصل از زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، برابر یا حتی بیش از خسارات مستقیم ناشی از زلزله است. فاصله از نقاط لغزشی شهرستان خلخال، در حد فاصل صفر تا ۱۳۰۰۰ متر است. مقایسهٔ بین نقشهٔ پهنه‌بندی‌شده با نقشهٔ فاصله از نقاط لغزشی نیز نشان می‌دهد که نواحی آسیب‌پذیر به‌طور عمده در فاصلهٔ صفر تا ۵۰۰۰ متری از این نقاط هستند و در حالت کلی، شهرهای خلخال، هشتجین و کلور و ۱۲۱ روستا (۸۰/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) نیز در حریم صفر تا ۵۰۰۰ متری از نقاط لغزشی واقع شده‌اند.

اعتبارسنجی نتایج حاصل از به‌کارگیری روش مارکوس به‌وسیلهٔ منحنی ROC، مقدار سطح زیرمنحنی (۰/۸۶) را نشان می‌دهد. با توجه به طبقه‌بندی ارائه‌شده برای سطح زیرمنحنی (۱–۰/۹: عالی، ۰/۹–۰/۸: خیلی خوب، ۰/۸–۰/۷: خوب، ۰/۷–۰/۶: متوسط، ۰/۶–۰/۵: ضعیف) دقت روش مارکوس در تشخیص مناطق دارای احتمال وقوع خطر زلزلهٔ شهرستان خلخال در طبقهٔ عالی قرار دارد (شکل ۶).



شکل ٦. منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیرمنحنی مربوط به نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زلزلهٔ شهرستان خلخال (منبع: یافته‌های پژوهش)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این تحقیق نشان داد که عوامل فاصله از گسل، کاربری اراضی و فاصله از کانون زلزله‌های پیشین با بیشترین وزن، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زلزله در شهرستان خلخال هستند. در مجموع دو پهنهٔ با آسیب‌پذیری بسیار زیاد و زیاد، ۴۰/۳۶ درصد از مساحت شهرستان را پوشش می‌دهند که سه شهر خلخال، هشتجین، کلور و ۷۰ روستا (۴۶/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان) در این پهنه‌ها قرار دارند. از این‌رو نتایج پژوهش حاکی از آسیب‌پذیری زیاد این شهرستان از لحاظ رخداد خطر زمین‌لرزه است. با توجه به اینکه زلزله ممکن است خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی داشته باشد، سازمان‌های متولی و مسئول به‌ویژه سازمان مدیریت بحران شهرستان، شهرداری‌ها، نظام مهندسی، ادارهٔ کل راه و شهرسازی و بنیاد مسکن انقلاب اسلامی شایسته است که به نتایج پژوهش حاضر توجه نمایند و اقداماتی مانند جلوگیری از استقرار، صدور مجوز و ممانعت از ساخت‌وساز روی گسل‌ها، جلوگیری از استقرار و تمرکز سکونتگاه‌های شهری و روستایی در پهنه‌های پرخطر، تداوم و سرعت دادن به موضوع مقاوم‌سازی اماکن روستایی و حتی شهری، آگاه‌سازی عمومی در راستای اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع حوادث، آموزش‌های امدادی و دسترسی همهٔ سکونتگاه‌های شهری و روستایی به راه‌های ارتباطی و مراکز امدادرسان برای دسترسی سریع به مناطق بحرانی پس از وقوع زلزله را در دستور کار قرار دهند.

همچنین با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی حاصل از این پژوهش و صحت‌سنجی آن می‌توان نتیجه گرفت که روش مارکوس به‌منزلهٔ یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از دقت زیادی برای بررسی خطر زلزله برخوردار است. از این‌رو نتایج این پژوهش با یافته‌های تحقیقات حسینی‌خواه و ضرابی (۱۳۹۸)، خدادادی و همکاران (۱۳۹۹)، آرامی و همکاران (۱۴۰۱)، غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲)، یاریان و همکاران (۲۰۲۰)، فرجی سبکبار و همکاران (۲۰۲۱)، فرهمند و همکاران (۲۰۲۲) و شادمان و پوپی (۲۰۲۳) مبنی بر اینکه رویکرد GIS- MCDM ابزار راهنمای قدرتمند و عملی برای تحقیق دربارهٔ مخاطرهٔ زلزله و مرجعی برای مدیریت کارامدتر این مخاطره در آینده است همخوانی دارد [۵، ۷، ۱، ۱۳، ۲۶، ۲۲، ۲۱، ۲۵]. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش حاضر با توجه به استفاده از روش تحلیل چندمعیارهٔ مارکوس در انتخاب روش مناسب با هدف بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در برابر خطر زمین‌لرزه توجه پژوهشگران را جلب کند.

تقدیر و تشکر: این مقاله مستخرج از طرح دورهٔ پسادکتری است که با حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی انجام گرفته است. از این‌رو تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌داریم.

منابع

[۱] آرامی، ابراهیم؛ ایمانی، بهرام؛ و خلیفه، ابراهیم (۱۴۰۱). اولویت‌بندی سکونتگاه‌های روستایی در معرض مخاطرات (مورد مطالعه: بخش مرکزی شهرستان اردبیل). *مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*، ۳ (۱)، ۲۱۹-۲۳۶.

[۲] اسدی، زینب؛ و زارع، مهدی (۱۳۹۴). برآورد توان لرزه‌زایی گسل‌ها و ارزیابی بزرگای زمین‌لرزه‌های پیش از تاریخ از داده‌های زمین‌لغزش مطالعه موردی در دره نور (البرز مرکزی). *علوم زمین*، ۲۴ (۹۵)، ۶۷-۸۹.

[۳] اصغری‌سراسکانرود، صیاد؛ و پیروزی، الناز (۱۴۰۱). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ WLC، OWA، VIKORو MABACدر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ گیوی‌چای استان اردبیل). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴ (۱)، ۶۵-۹۴.

[۴] جهانگیری، عباس (۱۴۰۰). انتخاب بهترین فرایند تصفیهٔ فاضلاب در شهر فرمهین با استفاده از تصمیم‌گیری چندشاخصه. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*، ۶ (شمارهٔ ویژه)، ۱-۱۱.

[۵] حاجی‌زاده، فاضل؛ و ایستگلدی، مصطفی (۱۳۹۷). تحلیلی بر تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی با تأکید بر زلزله (مطالعهٔ موردی: دهستان حومهٔ شهرستان لامرد). مدیریت *مخاطرات محیطی*، ۵(۱)، ۶۷-۸۳.

[۶] حسین‌زاده ده‌آبادی، علی‌اصغر؛ ارگانی، میثم؛ و درویشی بلورانی، علی (۱۳۹۸). بررسی و استخراج تخریب‌های ساختمانی ناشی از وقوع زلزله با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک زیاد. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۶(۳)، ۲۳۹-۲۵۷.

[۷] حسینی‌خواه، حسین؛ و ضرابی، اصغر (۱۳۹۸). نقش مدل ترکیبی تصمیم‌گیری WASPAS در شناسایی پهنه‌های لرزه‌خیز (پژوهش موردی: مراکز جمعیتی شهرستان بهمئی). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶(۲)، ۱۴۷-۱۶۴.

[۸] حیدری‌مظفر، مرتضی؛ و تاج‌بخشیان، مرضیه (۱۴۰۱). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های شهرستان نهاوند در برابر زلزله. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴)، ۵۷-۷۸.

[۹] خدادادی، فاطمه؛ انتظاری، مژگان؛ و ساسان‌پور، فرزانه (۱۳۹۹). تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطرهٔ زلزله با روش ELECTRE FUZZY (مطالعهٔ موردی: کلانشهر کرج). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۰(۵۶)، ۹۳-۱۱۳.

[۱۰] رحیمی شهید، مجتبی؛ و رحیمی، نیما (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعهٔ موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم). *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، ۱۱(۲۲)، ۱۰۹-۱۱۸.

[۱۱] ریاحی، وحید؛ و موسوی، مریم (۱۴۰۰). سنجش میزان آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله (مورد مطالعه: دهستان پیان در شهرستان ایذه). *روستا و توسعهٔ پایدار فضا*، ۲(۱)، ۱-۱۹.

[۱۲] عابدینی، موسی؛ ایرانی، ویدا؛ و اسفندیاری‌درآباد، فریبا (۱۴۰۱). بررسی اثرات ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با تأکید بر توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعهٔ موردی: نمین، آستارا، تالش). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۸۲)، ۱۴۵-۱۶۰.

[۱۳] عزیزی، میلاد؛ فاطمی‌قمی، سیدمحمدتقی؛ و جولای، فریبرز (۱۴۰۲). ارائهٔ مدل برای پیش‌بینی شدت تخریب ساختمان‌ها و تلفات ناشی از ریزش آن‌ها حین وقوع زلزله تحت سناریوهای مختلف (مطالعهٔ موردی: کلانشهر کرمانشاه). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۹۱-۱۰۵.

[۱۴] علوی، سید علی؛ رمضان‌نژاد، یاسر؛ فتاحی، احدالله؛ و خلیفه، ابراهیم (۱۳۹۴). پهنه‌بندی فضایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض مخاطرات محیطی با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ ویکور (مطالعهٔ موردی: شهرستان تالش). *برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۵(۲۰)، ۱۲۵-۱۳۶.

[۱۵] علی‌دادیانی، بهاره؛ زارع، مهدی؛ درستیان، آرزو؛ اشجع اردلان، افشین؛ و حسینی، سیدکیوان (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر فرونشست بر روند لرزه‌خیزی دشت ورامین و دشت شهریار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۱۳۷-۱۵۱.

[۱۶] غضنفرپور، حسین؛ حسینی‌خواه، حسین؛ و کمالی باغراهی، اسماعیل (۱۴۰۲). تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سکونتگاه‌های انسانی شهرستان باشت با استفاده از مدل دیماتل فازی و Gis. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲(۳۵)، ۲۱-۳۶.

[۱۷] محمدنیا، ملیحه؛ و فلاح قالهری، غلامعباس (۱۳۹۷). شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۸ (۴۸)، ۱۱۷-۱۳۲.

[۱۸] محمودی وانعلیا، نرجس؛ ارگانی، میثم؛ و جلوخانی نیارکی، محمدرضا (۱۴۰۰). تهیهٔ نقشهٔ چندخطرهٔ استان مازندران با استفاده از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ مکانی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸ (۴)، ۳۹۵-۴۱۱.

[۱۹] معماری، گلان؛ شهابی، هیمن؛ و زندی، جلال (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محور بوکان- سردشت با استفاده از مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۱۶۵-۱۸۱.

[۲۰] میردهقان اشکذری، سید احمد؛ المدرسی، سید علی؛ رضایی، محمدرضا؛ نوجوان بشنغیان، محمدرضا؛ و خبازی، مصطفی (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری شهر یزد در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های ترکیبی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۹ (۳)، ۲۰۵-۲۱۷.

[21] Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). *International Series in Operations Research & Management Science*, 277, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9

[22] Altan, M., Özturk, F., & Ayday, C. (2004). Preliminary Earthquake Risk Management Strategy Plan of Eskisehir, Turkey by using GIS. *Space and Satellite Sciences Research Institute Anadolu University*, Eskisehir, Turkey, 7th AGILE Conference on Geographic Information Science. https://www.academia.edu/56227850

[23] Baumgertel, A., Luki´c, S., Belanovi´c Simi´c, S., & Kadovi´c, R. (2019). Identifying Areas Sensitive to Wind Erosion- A Case Study of the AP Vojvodina (Serbia). *Appl Sci*, 19(23), 1-12. https://doi.org/10.3390/app9235106

[24] Chen, Y., Ye, Z., Liu, H., Chen, R., Liu, Z., & Liu, H.A. (2021). GIS-Based Approach for Flood Risk Zoning by Combining Social Vulnerability and Flood Susceptibility: A Case Study of Nanjing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (21), 1-17. https://doi.org/10.3390/ijerph182111597

[25] Dong, L., & Shan, J. (2013). A comprehensive review of earthquake induced building damage detection with remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84, 85-99. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.06.011

[26] Farahmand, GH., Samet, K., Golmohammadi, NH., & Patel, N. (2022). Vulnerability zoning of urban areas against earthquake (case study: Urmia city). *Geodesy and Cartography*, 48(3), 160-169. https://doi.org/10.3846/gac.2022.14788

[27] Faraji Sabokbar, H., Badri, S. A., & Tahmasi, B. (2021). Spatial Assessment of Vulnerability to Earthquake in Rural Settlements Using a Fuzzy Inference System (Case Study: Rural Settlements in the Tehran Metropolitan Area). *Journal of Sustainable Rural Development*, 5(2), 175-188. https://dorl.net/dor/20.1001.1.25383876.2021.5.2.1.7

[28] Jafarzadeh Ghoushchi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., & Vitale, A. (2023). Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Comput & Applic*, 35, 4549–4567. https://doi.org/10.1007/s00521-022-07929-4

[29] Lian, P., Zhuo, Z., Qi, Y., Xu, D., & Deng, X. (2021). The impacts of training on farmers' preparedness behaviours of earthquake disaster—evidence from earthquake-prone settlements in rural China. *Agriculture*, 11(8): 726, 1-17. https://doi.org/10.3390/agriculture11080726

[30] Shadmaan, S., & Popy, S. (2023). An assessment of earthquake vulnerability by multi-criteria decision making method. *Geohazard Mechanics*, 1 (1), 94-102. https://doi.org/10.1016/j.ghm.2022.11.002

[31] Yang, W., Zeng, Z., & Luo, W. (2009). Three- Level tectonic model for intraplate earthquakes, *Earth science frontiers*, 16 (1): 206- 217. https://doi.org/10.1016/S1872-5791(08)60073-1

[32] Yariyan, P., Avand, M T., Soltani, F., Ghorbanzadeh, & Blaschke, T. (2020). Earthquake Vulnerability Mapping Using Different Hybrid Models. *Symmetry*, 12 (3), 1-31. https://doi.org/10.3390/sym12030405

[33] Zhang, Y., Zhang, J., & Dong, L. (2023). Fuzzy Logic Regional Landslide Susceptibility Multi-Field Information Map Representation Analysis Method Constrained by SpatialCharacteristics of Mining Factors in Mining Areas. *Processes*, 11 (4), 985, 1-33. https://doi.org/10.3390/pr11040985

[34] Zhu, H., & Liu, F. (2021). A group-decision-making framework for evaluating urban flood resilience: a case study in yangtze river. *Sustain*, 13(2), 1–16. https://doi.org/10.3390/su13020665