

Vulnerability zoning of Ardabil city against earthquake risk

Sayyad Asghari Saraskanrood ^{1✉}, Elnaz Piroozi ²

1. Corresponding author, professor of Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: s.asghari@uma.ac.i

2., Ph.D. in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
E-mail: e.pirouzi@uma.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The danger of earthquakes always casts a shadow on human societies and causes irreparable damage to these societies. Therefore, preparing to deal with this crisis by identifying vulnerable points and fixing them is effective in reducing damages caused by earthquakes. Meanwhile, Ardabil City is not exempt from this rule due to the existence of numerous faults, seismic points, non-compliance with standards, etc. Based on this, the current research seeks to measure and evaluate the vulnerability of Ardabil City against the risk of earthquakes. For this purpose, first by examining research sources related to the subject, some of the most important factors affecting the occurrence of this phenomenon were prepared as independent variables. Valuation and standardization of the layers were done by using the fuzzy membership function and weighting of the criteria, using the CRITIC method. Finally, modeling was done using the MARCOS multi-criteria decision-making method. The results of the study showed, respectively; The factors of distance from the fault, land use, and distance from the earthquake center have the greatest influence on the occurrence of earthquakes in the region with the weight coefficient of 0.110, 0.104, and 0.102. In addition, according to the results of the research, 16.67% of the entire city of Ardabil has a high vulnerability potential and 30.27% has a relatively high vulnerability probability. Also, based on the results of the research, Ardabil city is at an average level in terms of the level of vulnerability to earthquake risk, the cities of Hir and Arallo are in the high vulnerability category and Somarin city is in the relatively high vulnerability zone. In addition, according to the findings of the research, 22.86 and 30.86 percent of the settlements and villages of Ardabil city, respectively; In the area with high and relatively high vulnerability, 13.14% in the area with moderate vulnerability, and respectively; 22.28 and 10.86% are located in the area with relatively low and low earthquake vulnerability.
Article history: Received :26 September 2023 Revised : 12 November 2023 Accepted : 19November 2023 Published : 18 February 2025	
Keywords: hazard, earthquake, zoning, GIS.	

Cite this article: Saraskanrood, S.A., Piroozi, E., (2025). Vulnerability zoning of Ardabil city against earthquake risk. *Journal of Geography and Planning*, 28 (90), 17-39. <http://doi.org/10.22034/gp.2023.58617.3190>

© The Author(s).

Publisher: University of Tabriz.



DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2023.58617.3190>

Introduction

Earthquake is a process related to long-term accumulation and sudden release of energy in nature (Yang, 2009: 206). Earthquakes as one of the most catastrophic and destructive types of natural hazards; Especially in developing countries, it has been discussed for a long time (Dongd and shan, 2013: 85). According to CRED data, between 2000 and 2020, earthquakes killed 72,114 people worldwide and affected 1,183,443,222 people (Lian et al., 2021:1). According to the reports of the United Nations, the most important natural disaster in Iran is an earthquake, and once every ten years, there is a devastating earthquake that causes many people to be homeless and killed (Mohammadpour, 2018, 78). Ardabil province, like many other parts of Iran, is one of the most accident-prone provinces of the country in terms of earthquakes.

Data and Method

The current research is of an applied type and its research method is an analysis based on the integration of data analysis, geographic information system, and the use of multi-criteria analysis techniques. ENVI, Ecognition, Arc GIS, Idrisi, and Excel software were used for image processing and data analysis. To study the earthquake risk, first, the effective factors (slope, height, Geology, land use, soil erosion, 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, information layers related to each of the factors were prepared in the geographic information system environment. The weighting of the investigated factors was done according to the critical method and the final analysis, using MARCOS multi-criteria methods.

Results and Discussion

According to the output of the MARCOS method, 363.86 square kilometers of the city's area is in the high vulnerability class and 660.47 square kilometers is in the relatively high vulnerability class. Also, 586.21 square kilometers of the area of the city have medium vulnerability potential and respectively 431.52 and 140.08 square kilometers have low and relatively low vulnerability potential. Examining the location of the villages in relation to the zoning of earthquake probability shows that 40 villages (equivalent to 22.86% of the villages in the city) are in the high vulnerability zone. In addition, 54 villages, which are equivalent to 30.86% of the villages of Ardabil city, are in the zone of relatively high vulnerability. Also, 23 villages (equivalent to 13.14 percent of the villages in the city) have medium vulnerability probability, 39 villages (equivalent to 22.28 percent of the villages in the city) have relatively low vulnerability potential, and 19 villages (equivalent to 10.86 percent of the villages) city) have a low probability of vulnerability. In addition, based on the results of the research, Ardabil City is located in a zone of moderate earthquake vulnerability. But the cities of Hir and Arallo are in the category of high vulnerability and the city of Somarin is in the category of relatively high vulnerability.

Conclusion

The results of this research showed that the factors of distance from the fault, land use, and distance from the epicenter of previous earthquakes with the greatest weight are the most important influencing factors in the occurrence of earthquakes in the study area. Although several factors play a role in the formation of critical points of earthquakes, the spatial characteristics of fault lines have a significant effect on increasing the vulnerability of population settlements in the city. In addition, the analysis of the final map shows the high vulnerability of the studied area in terms of earthquake occurrence, and the northern and southern areas of the city have the highest potential of vulnerability to earthquake risk. Because an earthquake can cause irreparable financial and human losses, responsible organizations must pay attention to the results of the current research and take appropriate protective measures by taking responsible and synergistic measures. And, of course, experts, put them on their agenda.

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله

صیاد اصغری سراسکانرود^۱، الناز پیروزی^۲

۱. نویسنده مسئول، استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: s.asghari@uma.ac.ir

۲. دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: e.pirouzi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ کلیدواژه‌ها: مخاطره، زمین‌لرزه، پهنه‌بندی، GIS	خطر زلزله همواره بر جوامع بشری سایه افکنده و خسارات جبران‌ناپذیری به این جوامع وارد می‌کند. بنابراین آمادگی برای مقابله با این بحران با شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و رفع آن‌ها در کاهش خسارات ناشی از زلزله مؤثر است. در این میان شهرستان اردبیل با توجه به وجود گسل‌های متعدد، نقاط لرزه‌خیز، عدم رعایت استانداردها و غیره، از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر به دنبال سنجش و ارزیابی آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله، می‌باشد. بدین منظور ابتدا با بررسی منابع پژوهشی مرتبط با موضوع، برخی از مهمترین عوامل مؤثر بر وقوع این پدیده، به عنوان متغیرهای مستقل تهیه شد. ارزش‌گذاری و استانداردسازی لایه‌ها، با استفاده از تابع عضویت فازی و وزن‌دهی معیارها، با بهره‌گیری از روش کرتیک انجام گردید. در نهایت مدل‌سازی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره مارکوس صورت گرفت. نتایج مطالعه نشان داد، به ترتیب؛ عوامل فاصله از گسل، کاربری اراضی و فاصله از کانون زلزله، با ضریب وزنی ۰/۱۱۰، ۰/۱۰۴ و ۰/۱۰۲، بیشترین تأثیرگذاری را در رخداد زمین‌لرزه منطقه دارند. به علاوه با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، ۱۶/۶۷ درصد، از کل شهرستان اردبیل، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و ۳۰/۲۷ درصد، دارای احتمال آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد است. همچنین بر اساس نتایج پژوهش، شهر اردبیل از نظر میزان آسیب‌پذیری در برابر خطر زلزله، در سطح متوسط می‌باشد و شهرهای هیر و آرالو در طبقه آسیب‌پذیری زیاد و شهر ثمرین در پهنه آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد قرار دارند. به علاوه، طبق یافته‌های پژوهش، ۲۲/۸۶ و ۳۰/۸۶ درصد از آبادی‌ها و روستاهای شهرستان اردبیل، به ترتیب؛ در پهنه با آسیب‌پذیری زیاد و نسبتاً زیاد، ۱۳/۱۴ درصد در پهنه با آسیب‌پذیری متوسط و به ترتیب؛ ۲۲/۲۸ و ۱۰/۸۶ درصد در پهنه با آسیب‌پذیری نسبتاً کم و کم، زلزله قرار دارند.

استناد: اصغری سراسکانرود، صیاد؛ پیروزی، الناز؛ (۱۴۰۳). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۸ (۹۰)، ۳۹-۱۷

<http://doi.org/10.22034/gp.2023.58617.3190>



© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

زلزله به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین و مخرب‌ترین انواع مخاطرات طبیعی؛ به ویژه در کشورهای در حال توسعه از دیرباز مطرح بوده است (دونگد و شان^۱؛ ۲۰۱۳: ۸۵). امروزه نزدیک به ۲۰ درصد جمعیت جهان در مناطق زلزله‌خیز فعال زندگی می‌کنند و در طول ۵۰ سال آتی، نیمی از شهرنشینان در ۵۰ شهر از بزرگترین شهرهای جهان در ۲۰۰ کیلومتری گسل‌هایی که زلزله‌هایی با بزرگی ۷ و بیشتر تولید می‌کنند، ساکن خواهند شد، یعنی ۹۰ درصد افراد در معرض خطر، زندگی می‌کنند (آتلان و همکاران^۲؛ ۲۰۰۴: ۸۳). طبق داده‌های CRED^۳، زمین‌لرزه‌ها بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ باعث کشته شدن ۷۲۱۱۴ نفر در سراسر جهان شدند و ۱۱۸۳۴۴۳۲۲ نفر را تحت تأثیر قرار دادند (لیان و همکاران^۴؛ ۲۰۲۱: ۱). ساختمان ژئومورفولوژیکی ایران تحت تأثیر فازهای آلی و فشار پلیت‌ها (فشار پلیت عربستان در جنوب غربی، صفحه اوراسیا در شمال و صفحه هند در جنوب شرقی)، حالت آنومالی دارد و به پایداری نسبی نرسیده است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۴۵). لذا به دلیل تداوم حرکت صفحه‌ها در این ناحیه پهناور فشارشی، شاهد فعالیت‌های لرزه‌ای به عنوان مهمترین مخاطره طبیعی هستیم (اسدی و زارع، ۱۳۹۴: ۷۱). ۹۰ درصد از شهرهای ایران، نسبت به زمین‌لرزه‌ای با قدرت ۵/۵ ریشتری آسیب‌پذیر هستند (پورمحمدی و مصیب‌زاده، ۱۳۸۷: ۱۱۸). طبق گزارشات سازمان ملل، مهم‌ترین سوانح طبیعی در ایران زلزله می‌باشد و در هر ده سال یکبار، شاهد زلزله ویرانگری می‌باشد که باعث بی‌خانمانی و کشته شدن عده زیادی می‌گردد که با نگاه به گذشته زلزله‌های مهیب بم، رودبار، طبس و بوئین زهرا از آن جمله هستند (محمدپور، ۱۳۹۸: ۷۸).

استان اردبیل هم مانند بسیار دیگری از نقاط ایران، از حادثه‌خیزترین استان‌های کشور، از نظر زمین‌لرزه، می‌باشد. برای مثال، در ۱۰ اسفند سال ۱۳۷۵ زمین‌لرزه‌ای به وقوع پیوست که ژرفای این زلزله ۴۴ کیلومتر بود، و بزرگی آن ۶/۱ در مقیاس Mw اعلام شده است. این زمین‌لرزه علاوه بر تخریب منازل و تأسیسات زیربنایی تعداد ۱۳۶ روستا به ۱۳۷ روستا هم در شهرستان‌های اردبیل، گرمی، مغان، مشکین‌شهر، سرعین و نیر زیان‌هایی وارد کرد. شمار کشته‌گان زلزله حدود ۱۱۰۰ نفر بوده است. تعداد زخمیان ۲۶۰۰ نفر برآورده شده است و بی‌خانمان‌شدگان نیز ۳۶۰۰۰ نفر اعلام شده است و حدود ۱۰ هزار راس احشام نیز در این حادثه کشته شده‌اند. شدت زمین‌لرزه به حدی بود که در اکثر شهرهای استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی، استان گیلان و زنجان احساس شد و در شهر اردبیل باعث وحشت مردم شد. پس از وقوع زلزله مذکور، زمین در استان اردبیل همچنان ناآرام بود بطوریکه تا پنج ماه بعد بیش از دو هزار و ۵۰۰ پس لرزه خفیف و متوسط در منطقه به ثبت رسید (سایت خبری ایران، سایت خبری ساوالان خبر). تصاویری از خسارات جانی و مالی ناشی از زلزله ۱۰ اسفند سال ۱۳۷۵ در شکل (۱)، نمایش داده شده است. تاکنون مطالعه‌ای به منظور پهنه‌بندی شهرستان اردبیل از لحاظ خطر زلزله با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره مارکوس، انجام نشده است. لذا در مطالعه حاضر، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله، با استفاده از این الگوریتم مد نظر قرار گرفته است، تا برآورد مناسبی از خطرپذیری شهرستان اردبیل در برابر زلزله با استفاده از داده‌های مکانی و توصیفی انجام گیرد، تأثیر هریک از معیارهای به کار رفته در میزان آسیب‌پذیری تعیین شود و با شناسایی مناطق اولویت‌دار از نظر خطر زمین‌لرزه، اقدامات لازم جهت کنترل، برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از منابع و استراتژی‌های مدیریت پایدار زمین به عمل آید.

¹ Dongd and shan

² Altan et al

³ Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

⁴ Lian et al



شکل (۱). تصاویری از خسارات جانی و مالی ناشی از زلزله رخ داده در مورخه ۱۳۷۵/۱۲/۱۰ اردبیل

منبع: سایت‌های داخلی

پیشینه و مبانی نظری

زلزله فرایندی در رابطه با انباشت طولانی مدت و آزاد شدن ناگهانی انرژی در طبیعت است (یانگ^۱؛ ۲۰۰۹: ۲۰۶). به عبارت دیگر به علت ذخیره شدن مقدار زیادی انرژی در درون زمین و با توجه به نظریه جابه‌جایی قاره‌ها، تغییرات عمده‌ای در قسمت سطحی زمین رخ می‌دهد که زلزله یکی از این تغییرات است (عابدینی و سرمستی، ۱۳۹۵: ۳۴). زلزله می‌تواند به اختلال در کارکرد اجتماع و اثرات فراوان انسانی، اقتصادی و محیط‌زیستی منجر گردد و عواقب زلزله، هم از نظر فراوانی و هم از نظر خساراتی که به بار می‌آورد، بر جامعه تأثیر می‌گذارد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۹۱). در شرایطی که ریسک‌ها و عدم قطعیت آن‌ها، از روند صعودی و فزاینده برخوردارند، نیاز به استراتژی برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمد امری حیاتی است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۹۲). لذا، ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله گام مهمی در برنامه‌ریزی، پیشگیری و کاهش آسیب‌پذیری زلزله است و آگاهی کامل از آسیب‌پذیری احتمالی، آمادگی جامعه را برای خطر افزایش می‌دهد (بیرکمن^۲؛ ۲۰۰۷: ۲۱) و تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاهی در برابر زلزله، یکی از راه‌های موثر جهت شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و تحت خطر است (حیدری‌مظفر و تاج‌بخشیان، ۱۴۰۱: ۷۵). انتخاب روش مناسب با هدف پهنه‌بندی موجب صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌ها می‌گردد، به همین دلیل، در دهه‌های اخیر از مدل‌های متفاوت و نوین متعددی به منظور پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زلزله استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه زمین‌لرزه، از جمله مخاطراتی می‌باشد که دارای گزینه‌ها و معیارهای چندگانه، هستند، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، از جمله روش‌هایی می‌باشد که امروزه بسیار مورد توجه زیاد پژوهشگران قرار گرفته است. از سوی دیگر با توجه به پیشرفت و تکنولوژی، به کارگیری تکنیک‌های جدید مانند GIS، برای تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیر ضروری می‌باشد (پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳: ۵۶). لذا، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند به برنامه‌ریزی سریع و مدیریت خطرات احتمالی منجر گردد (اصغری سراسکانرود و پیروزی، ۱۴۰۱: ۷۲).

در مورد بررسی خطر زلزله، تاکنون در ایران و سایر نقاط جهان توسط محققان مختلف با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای صورت گرفته است که بر عملکرد مطلوب این روش‌ها در پهنه‌بندی خطر زلزله تأکید داشتند؛ از جمله این تحقیقات، می‌توان به؛ ایمانی و پورخسروانی (۱۳۹۶)، با استفاده از منطق فازی و روش تحلیل شبکه‌ای،

¹ Yang

² Birkmann

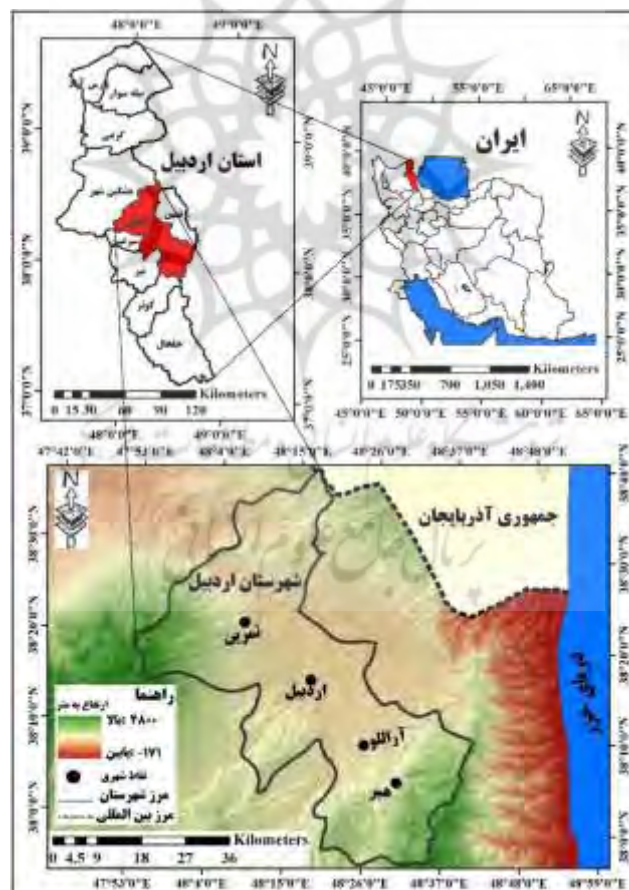
مناطق مخاطره‌آمیز شهرستان اردبیل را نظر زمین‌لرزه، حرکات دامنه‌ای، سیلاب و فرسایش پهنه‌بندی کردند. در این پژوهش، پهنه‌بندی زلزله با توجه به سه عامل لرزه‌خیزی، گسل و شیب صورت پذیرفته است و نتایج به دست آمده از پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی، نشان داده است، مناطق خطرناک عمدتاً در نزدیکی گسل‌ها و سنگ‌هایی با مقاومت اندک در برابر زلزله، قرار گرفته‌اند و تقریباً بخش‌های وسیعی از منطقه در شمال و جنوب، به‌ویژه بخش هیر، در پهنه بسیار خطرناک قرار دارد. رجبی و همکاران (۱۳۹۷)، به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان سقز در برابر سیل و زلزله با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی پرداختند و بررسی موقعیت قرارگیری روستاهای شهرستان سقز در ارتباط با پهنه‌بندی خطر نسبی زلزله نشان داد؛ ۱۴۵ روستا در پهنه با خطر پایین، ۱۳۵ روستا در پهنه با خطر متوسط لرزه‌خیزی قرار دارند و هیچ روستایی در پهنه با خطر نسبتاً بالای لرزه‌خیزی قرار نگرفته است. حسینی‌خواه و ضرابی (۱۳۹۸)، به بررسی نقش مدل ترکیبی تصمیم‌گیری واسپاس در شناسایی پهنه‌های لرزه‌خیز در مراکز جمعیتی شهرستان بهمنی پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داده است که، ۲۵۲ کیلومتر مربع معادل ۲۰ درصد از شهرستان بهمنی در پهنه بدون خطر، ۳۸۶ کیلومتر مربع در پهنه کم خطر، ۲۸۹ کیلومتر مربع از شهرستان در پهنه متوسط و ۱۴۹ کیلومتر مربع از شهرستان در پهنه با خطر بسیار بالا قرار دارد. خدادادی و همکاران (۱۳۹۹)، به تحلیل آسیب‌پذیری شهر کرج در برابر مخاطره زلزله با روش الکترو پرداختند و نتایج حاصله حاکی از آسیب‌پذیر بودن مناطق ۶، ۸، ۱۰ و ۷ شهرداری کرج در برابر زلزله است و حدود ۲۰ درصد از شهر کرج به دلیل نزدیکی به گسل و وجود تراکم بالای جمعیتی، ساختمانی، در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. آرامی و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از مدل ویکور به اولویت‌بندی سکونتگاه‌های روستایی بخش مرکزی شهرستان اردبیل، در معرض زلزله پرداختند و براساس خروجی نهایی حاصله از مدل ویکور، محدوده شمالی بخش مرکزی شهرستان اردبیل شامل: دهستان‌های ارسق شرقی و غربی که روستاهای نمونه خواجه بلاغی، گل تپه و آق قلعه را در برگرفته و در مجاورت گسل‌های اصلی می باشند، بیشتر در معرض خطر زلزله قرار دارند. خدادادی جید و پورزینعلی (۱۴۰۱)، با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی، پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل را مطالعه کردند و بر اساس یافته‌های پژوهش، بیشینه شتاب افقی زمین $0/43g$ می‌باشد که حاصل از چشمه‌ای است که گسل اصلی آن، گسل بزقوش با بزرگای گشتاوری $7/21$ می‌باشد. غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲)، تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سکونتگاه‌های انسانی شهرستان باشت با استفاده از مدل دیماثل فازی و GIS را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از پژوهش نشان داده است، از مساحت شهرستان باشت، $22/47$ درصد در پهنه زیاد و $9/47$ درصد در پهنه بسیار زیاد از خطر زلزله قرار دارد و $32/94$ درصد از آبادی‌ها و روستاهای شهرستان باشت در پهنه با خطر خیلی بالا، $23/52$ درصد در پهنه با خطر زیاد زلزله قرار دارد. یاریان و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، آسیب‌پذیری شهر سندر، در برابر زلزله را با استفاده از مدل‌های ترکیبی و شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند و ۱۵ عامل به عنوان عوامل موثر در اندازه‌گیری آسیب‌پذیری لرزه‌ای انتخاب شدند. بر اساس نتایج مدل هیبریدی میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی، به عنوان مدل بهینه تأیید شد که بر اساس نتایج این روش، ۴۴ درصد از فضای شهر سندر در طیف آسیب‌پذیری کم و بسیار کم و ۲۵ درصد در طیف آسیب‌پذیری متوسط و حدود ۳۲ درصد از مساحت شهر در طبقات آسیب‌پذیر قرار دارد. فرجی سبکبار و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، با استفاده از سیستم استنتاج فازی به ارزیابی فضایی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی تهران در برابر زلزله پرداختند. یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل آسیب‌پذیری بالای سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله است و پهنه‌بندی فضایی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی محدوده مطالعاتی، بیشترین شباهت را با شاخص آسیب‌پذیری واحدهای مسکونی دارد. فرهمند و همکاران^۳ (۲۰۲۲)، با بهره‌گیری از مدل سلسله‌مراتبی فازی، به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله پرداختند و نتایج نشان داد که حدود ۵۰ درصد از شهر در برابر زلزله آسیب‌پذیر است. به طور دقیق‌تر، حدود ۱۵۱۵۷۴ مترمربع، دارای درجه آسیب‌پذیری بسیار بالا و ۱۱۵۳۸۳۵۹ متر مربع دارای درجه

¹ Yariyan et al² Faraji Sabokbar et al³ Farahmand et al

آسیب‌پذیری بالایی در برابر زلزله است. شادمان و پوپ^۱ (۲۰۲۳)، با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ناحیه سیلپت بنگلادش پرداختند و با توجه به نتایج حاصله مشخص شده است که از نظر آسیب‌پذیری فیزیکی به ترتیب ۲۳٪، ۳۸٪، ۲۳٪، ۷٪ و ۹٪ از کل منطقه در طبقات بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم قرار دارد.

معرفی محدوده مورد مطالعه

شهرستان اردبیل در شمال غرب ایران در محدوده‌ی عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۳ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه قرار گرفته است (شکل ۲). وسعت این شهرستان ۲۱۸۲/۱۴ کیلومترمربع است. اردبیل از سمت شمال به قسمتی از شهرستان مشکین‌شهر، از شرق به استان گیلان (شهر مرزی و ساحلی آستارا و جنگل‌های طوالش) و شهرستان نمین، از جنوب به گیوی (کوثر)، از غرب به مشکین‌شهر و سرعین، از جنوب غرب به نیر محدود است. شهر اردبیل، به‌عنوان مرکز استان و بزرگ‌ترین شهر استان است. محدوده استان اردبیل بر اساس تقسیم‌بندی نبوی (۱۳۵۵)، درویش‌زاده (۱۳۸۲) در زون البرز (زیر پهنه البرز غربی و آذربایجان)، قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از نظر آب و هوایی، دارای هوای سرد در زمستان و هوای نسبتاً معتدل در تابستان می‌باشد. نوع اقلیم منطقه طبق فرمول دومارتن، نیمه‌خشک و طبق روش آمبرژه، نیمه‌خشک بسیار سرد است.



شکل (۲). نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه

¹ Shadmaan and Popy

مواد و روش‌ها

منابع داده‌ها و ابزارها

تحقیق حاضر با توجه به هدف مطالعه به صورت کاربردی و مبتنی بر روش پژوهش توصیفی-تحلیلی است. در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر در ایجاد خطر زمین‌لرزه محدوده مورد مطالعه، شامل: شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فرسایش خاک، 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 مطالعه‌ی منابع از کانال‌هایی چون مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، بررسی ادبیات موضوع و استفاده از نظرات کارشناسان و نیز پیمایش‌های میدانی و با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی شد. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی راه‌های ارتباطی و شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه‌ی خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. نقشه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک (۱۲/۵×۱۲/۵ متر) از سایت دانشگاه آلاسکا دریافت و محدوده مورد مطالعه استخراج شد و لایه‌های 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 رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی اردبیل، مشکین‌شهر و گیوی؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، با استفاده از تصاویر لندست هشت (سنجده OLI)، تاریخ ۲۰۲۲/۰۸/۰۵، استخراج شد. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi، انجام شد. سپس طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer، صورت گرفت. به منظور نقشه پراکنش زمین‌لغزش، از اطلاعات مربوط به بانک زمین‌لغزش استان اردبیل (۱۳۹۲)، استفاده گردید. نقشه کانون زلزله‌های پیشین، با بهره‌گیری از نقشه نقاط لرزه‌ای استان، اخذ شده از استانداری اردبیل به دست آمد و جهت بررسی فرسایش خاک نیز از نقشه فرسایش‌پذیری خاک استان اردبیل، اخذ شده از سازمان منابع طبیعی و امور آب‌خیزداری، استفاده گردیده است.

مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی با استفاده از روش مارکوس^۱

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش نیز به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۳- تعیین ایده‌آل و ضد ایده‌آل: در این بخش بر اساس روابط ۱ و ۲، مقادیر ایده‌آل (AI) و ضد ایده‌آل (AAI) مشخص می‌شود. در روابط زیر، عبارت B به معنی معیارهایی که جنبه سود و عبارت C به معنی معیارهای که جنبه هزینه دارند.

$$AI = \max x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \min x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۱}$$

$$AAI = \min x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \max x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۲}$$

۴- نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی: در پژوهش حاضر، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت. ۵- وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این پژوهش، جهت وزن‌دهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. ۶- محاسبه مطلوبیت هر گزینه: در این مرحله، بر اساس روابط ۳ و ۴، درجه مطلوبیت ایده‌آل K^+ و ضد ایده‌آل K^- گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

^۱ MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution)

$$K_{i+} = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$K_{i-} = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط فوق، $S_i (i=1,2,3,...m)$ جمع مقایر هر سطر در ماتریس وزن دار می‌باشد که از رابطه ۵، بدست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad \text{رابطه ۵}$$

۷- تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها: در این بخش با استفاده از رابطه ۶، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه می‌شود.

$$f(k_i) = \frac{k_i^+ + k_i^-}{1 + \frac{1-f(k_i^+)}{f(k_i^+)} + \frac{1-f(k_i^-)}{f(k_i^-)}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه فوق‌الذکر $f(k^-)$ ، عملکرد مطلوبیت ضد ایده-آل و $f(k^+)$ عملکرد مطلوب ایده‌آل برای هر گزینه می‌باشد که از روابط ۷ و ۸، محاسبه می‌شود. سپس بر اساس اعداد بدست آمده از $f(k)$ ، هر گزینه رتبه‌بندی انجام می‌شود. هر کدام از گزینه‌ها مقدار $f(k)$ بزرگتری داشت رتبه بهتری دارد (جهانگیری، ۱۴۰۰: ۶).

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^+}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^-}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۸}$$

وزن‌دهی کرتیک (اهمیت معیارها، از طریق همبستگی بین معیارها)

در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، پس از محاسبه انحراف معیار معیارهای مورد بررسی، ماتریس مقارنی به ابعاد $m \times m$ ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار j با معیارهای دیگر از روی رابطه ۹، محاسبه می‌شود.

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن C_{jk} معرف مجموع تضاد معیار j با معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد و r_{jk} همبستگی بین دو معیار k و j را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل j را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۰، محاسبه نمود.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن C_j ، معرف میزان اطلاعات معیار j و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار j را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای C_j بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند j از رابطه ۱۱، تعیین می‌گردد.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن W_j معرف وزن معیار j و C_k نشانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها

بدست می‌آید است (علی‌نژاد و خلیلی، ۱۹۹۰:۲۰۱۹). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کرتیک ابتدا در محیط ادیسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل، با استفاده از تابع REGRESS به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل اقدام گردید.

استانداردسازی فازی

در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین‌لرزه در شهرستان اردبیل، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد نمودن داده‌ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می‌گیرد (بایوم گرتل و همکاران، ۲۰۱۹:۵؛ اسمعیل‌پور و همکاران، ۱۴۰۱:۳۲). فلوچارت مربوط به فرآیند پژوهش، در شکل ۳، نمایش داده شده است.

جدول (۱). نوع توابع فازی ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار

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

منبع: (حیدری مظفر و تاج بخشیان، ۱۴۰۱)، (رحیمی شهید و همکاران، ۱۳۹۶)

¹ Alinezhad & Khalili

² Baumgartel et al



شکل (۳). فلوجارت مربوط به فرآیند تحقیق

یافته‌ها

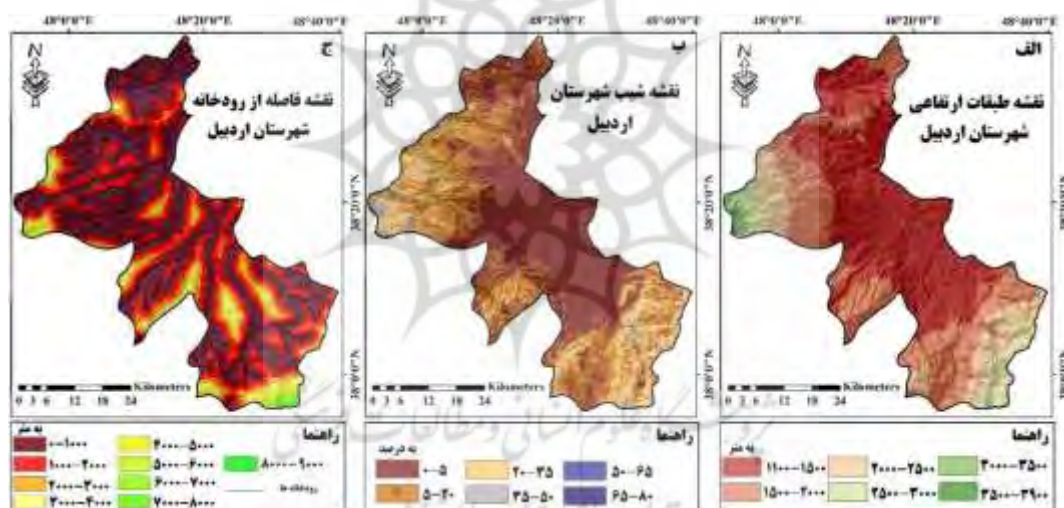
پهنه‌بندی وقوع زمین‌لرزه، باهدف ترسیم شدت و امکان وقوع زلزله انجام می‌گیرد. زلزله، بر اساس بسیاری از عوامل دینامیکی درونی زمین به وقوع می‌پیوندد و ساختارها و عوامل محیطی بسیاری به شکل‌گیری و شدت آن کمک می‌کنند. لذا، انتخاب و شناسایی مهمترین عوامل مؤثر در رخداد زلزله یکی از مراحل بسیار مهم می‌باشد. در این پژوهش به منظور ارزیابی و شناسایی مناطق دارای احتمال وقوع خطر زمین‌لرزه، با توجه به ویژگی‌های طبیعی و انسانی شهرستان اردبیل، از ۱۱ فاکتور مؤثر، شامل؛ شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فرسایش خاک، 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، استفاده گردیده است. لذا در ادامه عوامل مؤثر و دخیل در شکل‌گیری و آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل از لحاظ زلزله، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ارتفاع: ارتفاعات نقش به‌سزایی در تعیین تراکم جمعیت و بررسی میزان آسیب وارد شده بر منازل مسکونی، جانی، مالی در صورت بروز زلزله دارد (ریاحی و موسوی، ۱۴۰۰: ۱۰). شهرستان اردبیل، در ارتفاع ۱۱۰۰ تا ۳۹۰۰ متر از سطح دریا قرارگرفته است و ارتفاع متوسط شهرستان اردبیل حدود ۲۵۰۰ متر می‌باشد. چهره عمومی شهرستان اردبیل متأثر از ارتفاعات کوهستان‌های ساوالان (سبلان) تالش (باغروداغ) و بزغوش است که این عوامل طبیعی سبب محصور شدن آن شده‌اند. به علاوه، از مهم‌ترین بخش‌های مربوط به ناهمواری‌های این شهرستان وجود دشت اردبیل است. دشت اردبیل در بین دامنه‌های سبلان و رشته‌کوه تالش و بزغوش واقع شده و با وسعتی در حدود ۹۵ هزار هکتار در ارتفاع ۱۳۵۰ متری قرار دارد. زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند و ارتفاع متوسط اراضی کشاورزی حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. به طور کلی؛ ۱۰۸۳/۸۹ کیلومترمربع از مساحت محدوده در طبقه ارتفاعی ۱۵۰۰-۱۱۰۰ متر قرار دارد. طبقات ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۵۰۰، ۲۵۰۰-۲۰۰۰ و ۳۰۰۰-۲۵۰۰ متر، به ترتیب ۶۸۸/۸۵، ۲۶۳/۸۰ و ۱۱۲/۲۹ کیلومترمربع از مساحت محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دهند و به ترتیب؛ ۲۷/۶۵ و ۵/۶۶ کیلومترمربع، از مساحت محدوده دارای ارتفاع ۳۰۰۰-۳۵۰۰ و ۳۵۰۰-۳۹۰۰ متر، می‌باشد (شکل ۴ الف).

شیب: در بررسی شیب یک منطقه توزیع شیب نسبت به سطح آن، در مطالعات توپوگرافی منطقه حائز اهمیت می‌باشد، با افزایش شیب، میزان آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد (غضنفرپور و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۷). لذا، یکی از عوامل مهم در میزان آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها شیب منطقه مورد نظر می‌باشد که حتی در زمینه بعد از زلزله برای عملیات امدادسانی و برآورد میزان خسارات نیز یکی از عوامل مهم برای دستیابی آسان و راحت به آن منطقه محسوب می‌شود (ریاحی و موسوی، ۱۴۰۰: ۱۰) و هرچه مقدار شیب بیشتر باشد، پتانسیل آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. در محدوده مورد پژوهش، مقدار شیب بین ۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد و ۱۰۶۹/۷۶ کیلومترمربع از مساحت محدوده دارای شیب ۵-۰ درصد می‌باشد و طبقات شیب ۲۰-۵ و ۳۵-۲۰، به

ترتیب: ۶۹۳/۳۹ و ۳۵۶/۷۷، کیلومترمربع از سطح محدوده را شامل می‌شوند. همچنین به ترتیب ۴۴/۴۵، ۱۲/۸۲ و ۴/۹۵ کیلومترمربع از سطح محدوده، در طبقات شیب ۵۰-۳۵، ۶۵-۵۰ و ۸۰-۶۵ قرار گرفته است (شکل ۴ ب).

فاصله از رودخانه: در تمامی نقاط دنیا همیشه شهرها و یا روستاها در کنار و نزدیکی به منابع آبی به وجود آمده‌اند و منابع آبی ضمانت ادامه حیات تراکمت جمعیتی در یک منطقه می‌باشد. ولی نزدیکی بیش از حد به منابع آبی و ساخت ساز در بستر رودها در زمان مخاطرات طبیعی باعث خسارت‌های جانی و مالی می‌شود (ریاحی و موسوی، ۱۴۰۰: ۱۰). فاصله از آبراهه، در سطح محدوده بین صفر تا ۹۰۰۰ متر می‌باشد (شکل ۴ ج). رودهای متعددی در سطح دشت جریان دارند که مهم‌ترین آن‌ها رودخانه قره‌سو است که از ارتفاعات باغ‌روداغ در شرق اردبیل سرچشمه می‌گیرد، نیمه شمالی دشت را از شرق به غرب می‌پیماید و کلیه مسیل‌ها و رودخانه‌های ورودی به دشت به رودخانه قره‌سو می‌پیوندند. بخش‌های میانی دشت به‌ویژه زمین‌های حاشیه جنوبی قره‌سو تقریباً مسطح بوده و در فصول پرآبی در آن‌ها ماند آبی‌هایی تشکیل می‌گردد. حوضه آبریز این دشت با وسعت ۴۳۷۰ کیلومترمربع بخشی از حوضه رودخانه قره‌سو محسوب می‌شود. رودخانه قره‌سو تنها مسیر خروجی آب‌های سطحی می‌باشد که در حوالی روستای طالب قشلاقی (۲۰ کیلومتری شمال غربی اردبیل) از دشت خارج می‌گردد (فتائی و همکاران، ۱۳۹۱: ۶۷). رودخانه بالیخلی‌چای دیگر رودی است که با روند جنوب غربی- شمال شرقی در شمال شرقی شهر اردبیل به رودخانه قره‌سو می‌پیوندد و از دشت خارج می‌شود (مددی، ۱۳۸۴: ۱۴۵). به طور کلی، مساحت دو زیرحوضه بالیخلی‌چای و قوری‌چای به ترتیب ۶۲ ۹۸۱ و ۱۷ ۹۹ کیلومترمربع می‌باشد (داداش‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۳۴).



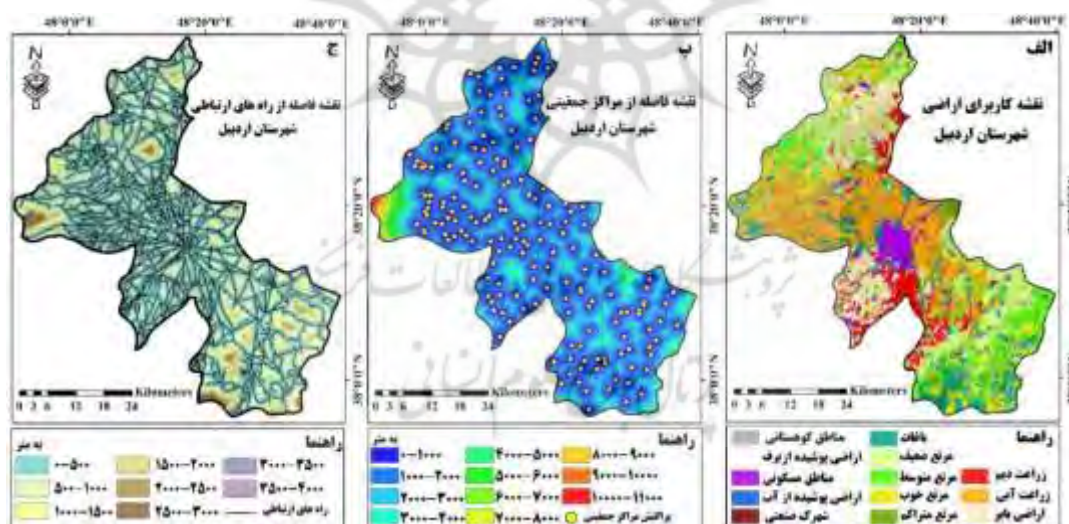
شکل (۴). نقشه طبقات ارتفاعی، شیب و فاصله از رودخانه محدوده مورد مطالعه

کاربری اراضی: کاربری زمین عامل اصلی در تهیه نقشه خطر زمین‌لرزه می‌باشد و کاربری‌های مختلف پتانسیل آسیب‌پذیری متفاوتی دارند انواع کاربری‌ها، در شهرستان اردبیل، به صورت زراعت دیم و آبی (به ترتیب با پوشش ۱۳۶/۴۱ و ۴۹۶/۷۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده)، باغات (۲۲۰/۵۴ کیلومترمربع)، اراضی بایر (۲۴۴/۳۱ کیلومترمربع)، مناطق مسکونی شهری و روستایی (۱۱۸/۹۳ کیلومترمربع)، مراتع فقیر، متوسط، خوب و متراکم (به ترتیب: ۳۷۵/۰۹، ۲۵۰/۹۲، ۲۷۵/۴۳ و ۲۴/۸۱ کیلومترمربع)، اراضی آبی (۵/۱۳ کیلومترمربع)، اراضی پوشیده از برف (۶/۸۳ کیلومترمربع)، شهرک صنعتی (مساحت ۳/۱۳ کیلومترمربع) و اراضی کوهستانی (۲۳/۸۷ کیلومترمربع)، می‌باشد (شکل ۵ الف).

فاصله از مراکز جمعیتی: مخاطرات طبیعی زلزله به عنوان یکی از مهمترین عوامل انهدامی سکونتگاه‌های شهری و روستایی شناخته شده‌اند و لذا این مراکز جمعیتی از مناطق بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. اما باید در نظر داشت که با توجه به گستردگی مناطق روستایی در کشور، حوزه تأثیر اکثر زلزله‌ها در مناطق روستایی کشور بوده است. از طرف دیگر، سازه‌های روستایی در کشور ما به علت قدمت، ضعف ساخت و ساز، نبود دانش فنی کافی و اجرایی و بهره‌گیری از مصالح کم دوام و نامرغوب، از

وضعیت نامطلوب برخوردار است. از این رو اکثر ساختمان‌های مناطق روستایی کشورمان در برابر زلزله بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند (علوی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۲۶). لذا، شناخت و تحلیل ریسک زلزله در نواحی روستایی در کاهش خسارات و تلفات آن‌ها، عامل تعیین‌کننده‌ای است. چرا که در چرخه مدیریت پیش از بحران، برنامه‌ریزی و شناخت خطرپذیری سکونتگاه‌های روستایی برای دستیابی به سیاست عدم اتلاف منابع و بهره‌گیری از حداکثر توان‌ها ضرورت دارد (آقایاری هیر و ذاکری میاب، ۱۳۹۵: ۱). شهرستان اردبیل از ۴ شهر، ۳ بخش و ۱۰ دهستان تشکیل شده است. بخش مرکزی شهرستان اردبیل (شامل: دهستان ارسق شرقی، دهستان بالغلو، دهستان سردابه، دهستان شرقی، دهستان کلخوران و شهر اردبیل)، بخش هیر (شامل: دهستان فولادلوی جنوبی، دهستان فولادلوی شمالی، دهستان هیر و دو شهرهای هیر، آراللو) و بخش ثمرین (شامل: دهستان غربی، دهستان دوجاق و شهر ثمرین) می‌باشد. فاصله از مراکز جمعیتی شهرستان، بین صفر تا ۱۱۰۰۰ متر می‌باشد (شکل ۵ ب).

فاصله از جاده: در شرایط عادی راه‌ها و شبکه‌های ارتباطی را می‌توان از مهم‌ترین ویژگی‌های مکان‌های سکونتگاهی دانست که بازتاب کالبدی مفهوم نیاز به دسترسی می‌باشند و می‌توانند افزایش مطلوبیت و ارتقاء کیفیت زندگی را سبب شوند. اما با وقوع حوادث و ایجاد شرایط بحرانی، شبکه ارتباطی و دسترسی به دلیل نجات و تداوم حیات انسانی اهمیتی برابر بیشتر از شرایط عادی را پیدا می‌کند (ریاحی و موسوی، ۱۴۰۰: ۱۰). شریان‌های ارتباطی مانند خیابان‌ها و معابر به عنوان نقاط اتصال و گریز در شهرها در موارد بحران‌های طبیعی نقش بسیار اساسی دارند (معصومی و رجب‌زاده نیارق، ۱۴۰۰: ۱۴۲). به‌طوری‌که در صورت مسدود شدن ممکن است خسارات و صدمات را به هنگام و بعد از وقوع زلزله به چندین برابر برسانند (احدث‌زاد روستی و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۷) و هر چه دسترسی به جاده‌های اصلی کم‌تر باشد، با توجه به اینکه امکان امدادسانی به این مناطق کم‌تر می‌شود، میزان تلفات افزایش می‌یابد (غضنفرپور و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۷). در محدوده مطالعاتی فاصله از جاده بین صفر تا ۴۰۰۰ متر می‌باشد (شکل ۵ ج).



شکل (۵). نقشه کاربری اراضی، فاصله از مراکز جمعیتی و فاصله از راه ارتباطی

زمین‌شناسی: عامل زمین‌شناسی به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در ایجاد خسارت ناشی از زمین‌لرزه به شمار می‌رود. اگر سری زمین‌شناسی سست‌تر باشد، باعث تشدید توان موج لرزه‌ای شده و هر قدر سری زمین‌شناسی سخت‌تر باشد باعث کم شدن توان انتقال موج زمین‌لرزه و در نتیجه تضعیف قدرت تخریبی زمین‌لرزه می‌گردد (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۷). بیشترین مساحت شهرستان اردبیل را سازندهای Qt2 (رسوبات دشت، تراس‌های آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌ها)، با مساحتی در حدود ۶۷۳/۴۰۱ کیلومترمربع (بیشتر در قسمت‌های مرکزی شهرستان) و Eav (آندزیت آتشفشانی)، با مساحتی به مقدار ۳۳۸/۹۰۶ کیلومترمربع (بیش‌تر در نواحی شمالی و جنوبی شهرستان) پوشانده است. همچنین، سازند Qt1 (رسوبات تراس‌های آبرفتی

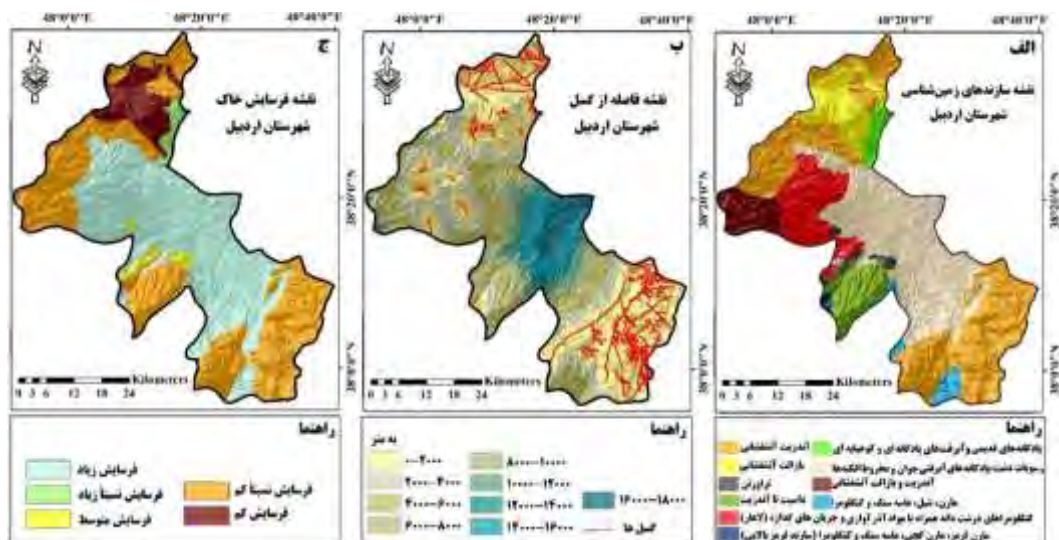
قدیمی و پایکوهی)، با مساحت ۳۱۶/۴۰ کیلومترمربع و سازند Qtz (تراورتن)، با مساحت ۳۲/۳۱۲ کیلومترمربع، کم‌ترین مقدار از مساحت شهرستان را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶ الف). مناطق شهری و روستایی شهرستان که بر روی رسوبات آبرفتی قرار دارند که استحکام زیادی نداشته و در صورت وقوع زلزله شدت آن بیشتر احساس می‌شود. به عنوان مثال؛ شهر اردبیل، در دشت اردبیل مستقر بوده و قسمت عمده آن را رسوبات دوران کواترنری پوشانده است. به طور کلی، شهر و محدوده‌های اطراف آن (شمال، غرب، شرق) بر روی رسوبات دشت و پادگانه‌های آبرفتی جوان و مخروط افکنه‌ها پراکنده شده است و در پهنه‌بندی زلزله، جزو مناطق با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا طبقه‌بندی می‌شود.

فاصله از گسل: زلزله و گسل با یکدیگر رابطه‌ای متقابل و دوطرفه دارند. یعنی وجود گسل‌های فراوان در یک منطقه باعث بروز زلزله می‌گردد. گسل‌ها می‌توانند نقش عمده‌ای در افزایش شدت و حتی در به وجود آوردن زلزله‌ها داشته باشند. بدیهی است تأسیس پدیده‌های انسان ساخت در حوالی گسل‌ها می‌تواند مقدار آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر زلزله را افزایش دهد. لذا با نزدیک شدن به محدوده گسل انتظار بالا رفتن مقدار آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۷). یکی از پارامترهای تعیین‌کننده خطرپذیری گسل‌ها، بعد فاصله است که در زمان فعالیت و رخداد زلزله، نسبت معکوس در شدت و ریسک آن دارد (رجبی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۸۷). لذا بعد فاصله به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی وقوع زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفت. فاصله از گسل در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۱۸۰۰۰ متر، می‌باشد (شکل ۶ ب). گسله‌های فعال در آذربایجان با مطالعاتی که از اوایل قرن بیستم به وسیله دستگاه‌های زلزله‌نگار انجام شده با زمین‌لرزه‌های کم عمق ویرانگر که اغلب بزرگی آن‌ها بیش از ۶/۵ هستند، همراه می‌باشد (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۲). گسل‌های شهرستان اردبیل به شکل شکستگی‌های کوچک و بزرگ، در بخش عمده‌ای از شهرستان به چشم می‌خورد. از مهم‌ترین گسل‌های ناحیه می‌توان به گسل احتمالی بالخلی‌چای، گسل‌های پیرامون سبلان، گسل خاوری اردبیل، گسل تالش، گسل نئور، گسل هیر، گسل دوپل و گسل بزقوش اشاره نمود که در لرزه‌خیزی منطقه کارا بوده و سبب ایجاد چندین زمین‌لرزه کوچک تا متوسط شده‌اند با توجه به نقش و اهمیت گسل‌ها در وقوع زلزله، در ادامه به تشریح ویژگی‌های این گسل‌ها پرداخته می‌شود. ۱- گسل احتمالی بالخلی-چای: این گسل، به طول حدود ۷۰ کیلومتر از دریاچه نئور اردبیل شروع و در شمال شرق دشت اردبیل توسط آبرفت‌های جوان کواترنری پوشیده شده و تا شهر آستارا ادامه دارد. از علائم عمده فعالیت نوزمین‌ساختی (نئوتکتونیک) این گسل، جابجایی رسوبات میوسن در نزدیکی روستای چای سفرو و کج‌شدگی آبرفت‌های جوان کواترنری است (عابدینی، ۱۳۹۲: ۶۲). ۲- گسل خاوری اردبیل: این گسل به موازات گسل هروآباد و گسل آستارا، با راستای شمال - جنوب در نقشه‌های زمین‌شناسی دیده می‌شود و ادامه این گسل به سمت شمال در نقشه آستارا به‌خوبی قابل ردگیری است که گدازه‌های ائوسن را بریده و به نظر می‌رسد به‌گونه‌ای وارونه عمل کرده و شیب آن به سمت خاور است و از جنوب نیز وارد نقشه انزلی می‌گردد. ۳- گسل نئور: گسل نئور با درازی بیش از ۷۰ کیلومتر در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق منطقه قرار دارد. این گسل، جزء گسل‌های فعال منطقه است و امتداد آن شمال‌شرقی - جنوب غربی بوده و دارای شیب ۷۵ الی ۸۵ درجه به سمت غرب است. این گسل و گسله‌های فرعی منشعب از آن در جهات مختلف یک منطقه خردشده بسیار وسیعی را، در اطراف خط‌الرأس کوه‌های تالش از روستای سیاه چول در دامنه شرقی تالش تا دریاچه نئور در جنوب باعث شده است. این گسل نشان‌دهنده مرز منطقه بالآمده تالش و فلات آتشفشانی آذربایجان است (مددی، ۱۳۹۴: ۳۷). ۴- گسل‌های پیرامون سبلان: تکاپو آتشفشان سبلان و خروج گدازه و مواد آذرآواری سبب ایجاد یک سری شکاف‌ها و گسل‌های ژرف در جهات مختلف در پیرامون کوه سبلان شده است در دامنه‌های جنوبی سبلان بر اساس مطالعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای ۲۵ گسل تشخیص داده شده است که هم‌اکنون آب‌های گرم معدنی منطقه از مسیر این گسل‌ها خارج می‌شوند (رجبی و سلیمانی، ۱۳۹۱: ۱۰۴). ۵- گسل هیر: این گسل با جهت شمال شرقی - جنوب غربی، حداقل به طول ۱۸ کیلومتر در غرب باغ‌وداغ به موازات گسل نئور و در جبهه کوهستان کشیده شده است. شاید بتوان این گسل را دنباله‌ی گسل ماسوله قلمداد نمود. در نتیجه عملکرد این گسل، سنگ‌های آتشفشانی بخش غربی گسل پایین افتاده است و منطقه خردشده در سطح وسیعی در امتداد گسل هیر (از روستای تفییه و کریق در شمال تا روستای چندای در جنوب) به وجود آمده است. این گسل نیز از نوع امتدادی است و در پیدایش دشت اردبیل تأثیر فراوان دارد. نگاه گسل مذکور به‌طرف غرب است؛

زیرا بلوک غربی آن به طرف پایین رفته و بلوک شرقی آن به طرف بالا آمده است (مددی، ۱۳۸۴: ۴۱). ۶- گسل دویل: این گسل به موازات گسل هیر و نئور در امداد جنوب غرب- شمال شرقی، کشیده شده است و هرچند که دنباله این گسل به سوی شمال شرقی بیش از ۶ کیلومتر نمایان نیست. قرار گرفتن گدازه‌های مگا‌پرفیر آندزیت در کنار نهشته‌های کواترنری دشت اردبیل، تغییر شیب ناگهانی، پیدایش یک منطقه آتره خردشده در مسیر گسل از علائم این گسل به شمار می‌رود. شیب و نگاه گسل به طرف غرب است و اختلاف سطح فاحش و پرشیبی را به طول ۶/۵ کیلومتر در مسیرش به وجود آورده است. این گسل تأثیر بسزایی در پیدایش دشت اردبیل ایفا نموده است (مددی، ۱۳۸۴: ۴۱). ۷- گسل بزقوش: گسل بزقوش که در قسمت جنوبی شهر اردبیل واقع شده است گسل فعالی می‌باشد که در طول سال‌ها باعث تلفات جانی و مالی فراوانی شده است که نمونه آن می‌توان به زلزله ۱۸۷۹ میلادی و زلزله ۱۳۷۵ که به کشته شدن هزاران نفر انجامید، اشاره کرد (محمدپور، ۱۳۹۸: ۷۸). گسل بزقوش دارای ۵۲ کیلومتر طول با راستای شمال شرق - جنوب غرب و شیب ۷۵ درجه به سمت شمال است. این گسل از نوع معکوس با حرکت قائم بوده و باعث جابه‌جایی واحدهای ولکانیکی ائوسن میانی شامل توف اسیدی خاکستری و ماسه توفی با گدازه آندزیت-بازالتی به همراه آهک نومولیت‌دار بر روی واحدهای میوسن زیرین تا میانی شامل تناوبی از شیل، ماسه‌سنگ مارنی با کنگلومرا و رسوبات کواترنری شده است (عبداللهی‌پور سراسکانرود، ۱۳۹۰: ۳). ۸- گسل دامنه باختری طالش: این گسل با روند شمال خاوری - جنوب باختری به درازای تقریبی ۱۵ کیلومتر قابل ردگیری است. ادامه این گسل به سوی شمال خاوری به وسیله نهشته‌های کواترنری پوشیده شده ولی دامنه آن در همان جهت در نقشه زمین‌شناسی آستارا قابل ردگیری است. به نظر می‌رسد که این گسل به حالت وارونه عمل کرده و شیب آن به سمت جنوب خاور باشد. به احتمال، این گسل و گسل خاور اردبیل در به وجود آوردن دشت اردبیل و تشکیل حوضه رسوبی نئوژن تأثیر به سزایی داشته‌اند. روند این گسل با روند چین‌های میوسن همبستگی دارد و تاقدیس بالیخلی‌چای همسو با آن است (مددی، ۱۳۸۴: ۴۰).

فرسایش خاک: محققان آزمایشگاه‌های علوم زمین رن، علوم زمین مونپلیه و مؤسسه فیزیک دو گلوب پاریس، با دانشگاه تابوان نشان داده‌اند که فرایندهای سطحی، یعنی فرسایش و رسوب‌گذاری، ممکن است باعث ایجاد زمین‌لرزه‌های کم عمق (عمق کمتر از پنج کیلومتر) شود. اگرچه تصور می‌شد که تکتونیک صفحه‌ای تنها مکانیسم پایداری است که می‌تواند بر فعالیت گسل تأثیر بگذارد، اما محققان نشان داده‌اند که فرایندهای سطحی مانند فرسایش و رسوب‌گذاری می‌توانند تنش‌های روی گسل‌های فعال را به اندازه کافی برای ایجاد زلزله‌های کم عمق افزایش دهند (استر و همکاران، ۲۰۱۴: ۲). به علاوه، یافته‌ها نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌توانند توپوگرافی کوهستانی را تغییر دهند و با ایجاد زمین‌لغزش، کوه‌ها را فرسایش دهند و الگوهای فرسایش پس از زمین‌لرزه‌ها به طور قابل توجهی تغییر می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱). شکل (۶ ج)، پتانسیل فرسایش خاک شهرستان اردبیل را نشان می‌دهد. به ترتیب؛ ۱۰۰۳/۱۴ و ۳۵/۴۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده، به صورت اراضی با پتانسیل فرسایش‌پذیری زیاد و نسبتاً زیاد می‌باشد و اراضی با پتانسیل فرسایش‌پذیری متوسط، ۳۳/۲۷، کیلومترمربع از سطح محدوده را شامل می‌شوند. همچنین به ترتیب؛ ۹۳۲/۶۰ و ۱۷۶/۹۹ کیلومترمربع از سطح محدوده، دارای فرسایش‌پذیری کم و نسبتاً کم است (شکل ۴ ب).

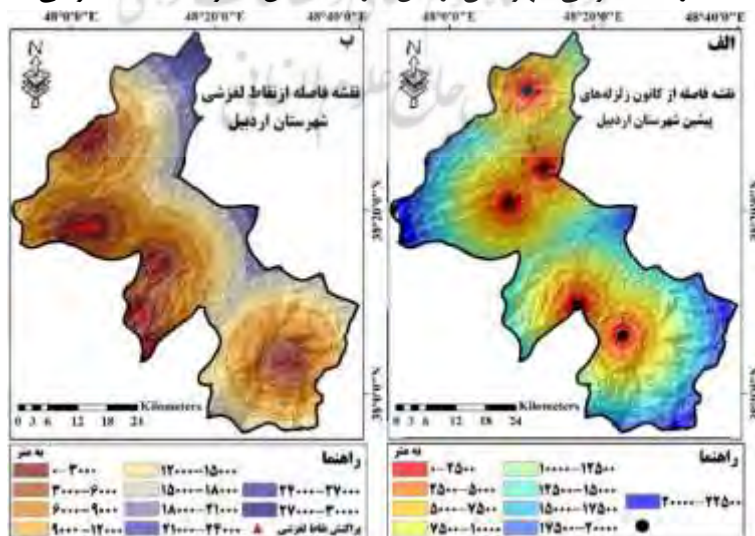
¹ Steer et al² Wang et al



شکل (۶). نقشه لیتولوژی، فاصله از گسل و فرسایش خاک محدوده مورد مطالعه

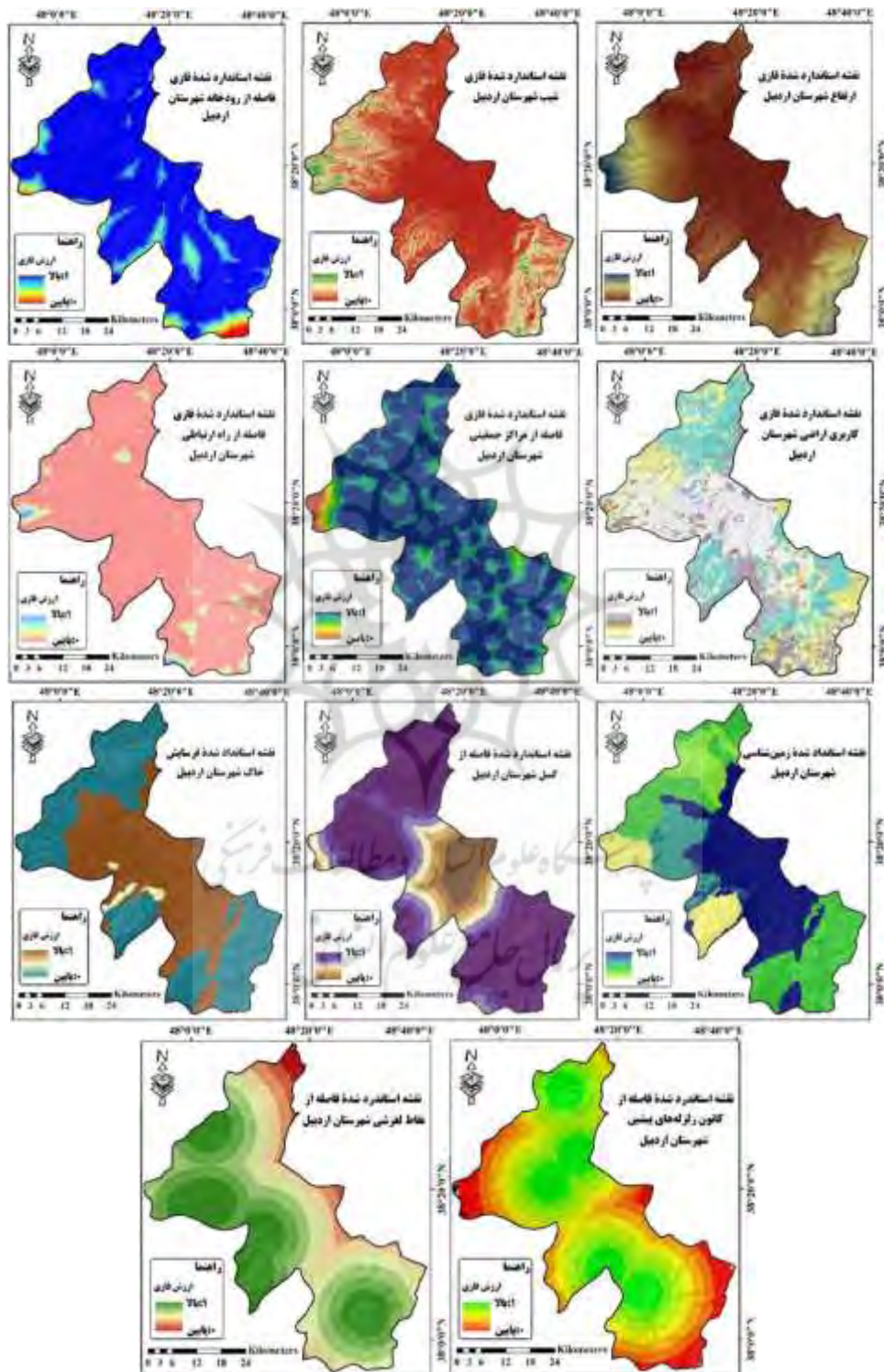
فاصله از کانون زلزله‌های پیشین: در شاخص نقاط لرزه‌خیز، لرزه‌هایی که تا ۲ هزار متری کانون‌های زلزله‌های رخ داد هستند، مقاومت بسیار کم تری در برابر انرژی آزاد شده زلزله خواهند داشت و با فاصله گرفتن از کانون زلزله از شدت آسیب‌پذیری کاسته خواهد شد (غضنفرپور و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۷). در محدوده مطالعاتی فاصله از کانون زلزله‌های پیشین، در حد فاصل صفر تا ۲۲۵۰۰ متر می‌باشد (شکل ۷ الف).

فاصله از نقاط لغزشی: مخاطرات زمینی دارای رفتار و خصوصیت منفرد می‌باشند، لیکن هر یک از آن‌ها در پهنه محیطی عمدتاً منشأ و عامل رخداد و همزادی مخاطره دیگری نیز می‌تواند باشد. به طور مثال؛ زمین‌لرزه می‌تواند در نقش ماشه حرکتی زمین‌لغزش عمل نماید. به‌طوری‌که بسیاری از لغزش‌های غیر فعال در زمان حدوث رویداد زمین‌لرزه دوباره فعال شده و در پاره‌ای از موارد فاجعه را تعمیم و بسط می‌بخشند (رجبی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۸۷). در بسیاری از زلزله‌های رخ داده در مناطق کوهستانی خسارات حاصل از زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، برابر یا حتی بیش از خسارات مستقیم ناشی از زلزله بوده است. زمین‌لغزش، علاوه بر تخریب سازه‌ها، می‌تواند جاده‌ها را مسدود کند و به خطوط انتقال آب، برق، نفت و گاز آسیب برساند. همچنین وقوع رانش زمین می‌تواند، موجب قطع عملیات امدادرسانی به زلزله‌زدگان شده و میزان خسارات را افزایش دهد (فاطمی عقدا و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۳۰). فاصله از نقاط لغزشی شهرستان اردبیل، در حد فاصل صفر تا ۳۰۰۰۰ متر می‌باشد (شکل ۷ ب).



شکل (۷). نقشه فاصله از کانون زلزله‌های پیشین و فاصله از نقاط لغزشی محدوده مورد مطالعه

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 با هم، از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره مارکوس، استفاده شده است. لذا، پس از تهیه نقشه‌های استاندارد شده هر یک از معیارهای مطرح (شکل ۸) و اعمال کردن وزن‌های مربوطه (جدول ۲)، نقشه‌های حاصله وارد تکنیک مورد بررسی شده و با اعمال مراحل مختلف، نقشه خروجی نهایی در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (شکل ۹).



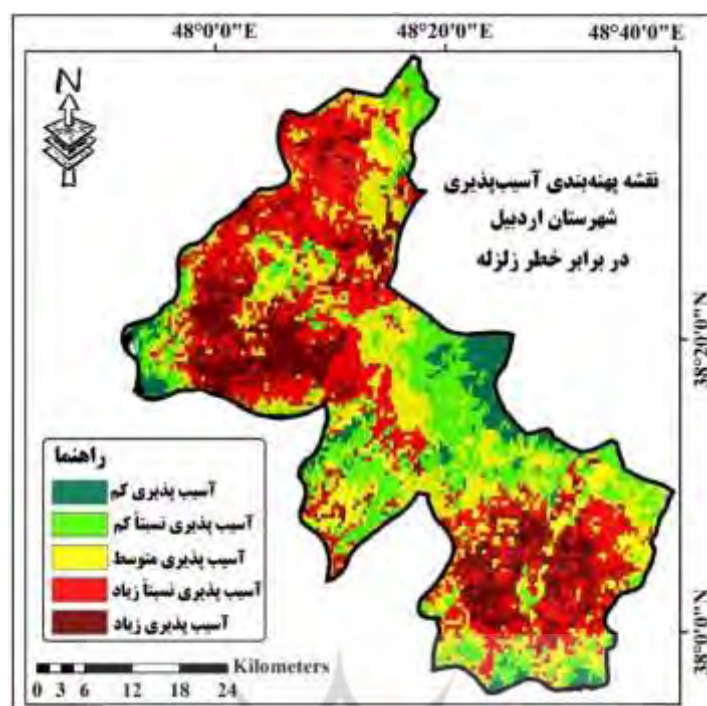
شکل ۸). نقشه استاندارد شده معیارها

جدول ۲). ماتریس همبستگی، ماتریس تضاد و محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کرتیک

ماتریس هم‌بستگی										
معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	مراکز جمعیتی	زمین-شناسی	گسل	فرسایش خاک	کاربری زمین-لغزش
شیب	۱	۰/۱۸۷	۰/۲۰۳	-۰/۰۲۳	-۰/۲۲۴	۰/۱۴۳	-۰/۳۳۲	-۰/۰۲۴	-۰/۲۴۵	۰/۱۱۲
ارتفاع	۰/۱۸۷	۱	۰/۱۳۷	-۰/۰۷۶	-۰/۰۸۷	۰/۱۰۲	-۰/۰۵۳	۰/۰۸۷	۰/۰۵۴	۰/۰۳۲
کانون زلزله	۰/۲۰۳	۰/۱۳۷	۱	-۰/۳۱۱	-۰/۶۵۴	۰/۵۳۲	-۰/۴۸۷	۰/۲۰۲	-۰/۳۸۷	۰/۲۱۵
رودخانه	-۰/۰۲۳	-۰/۰۷۶	-۰/۳۱۱	۱	۰/۲۳۲	-۰/۱۳۱	۰/۰۶۴	-۰/۱۲۸	۰/۰۵۳	-۰/۰۵۳
راه ارتباطی	-۰/۲۲۴	-۰/۰۸۷	-۰/۶۵۴	۰/۲۳۲	۱	-۰/۴۲۱	۰/۳۶۵	-۰/۰۸۵	۰/۲۶۱	۰/۰۴۱
مراکز جمعیتی	۰/۱۴۳	۰/۱۰۲	۰/۵۳۲	-۰/۱۳۱	-۰/۴۲۱	۱	-۰/۳۱۳	۰/۰۳۴	-۰/۱۳۱	۰/۰۹۳
زمین‌شناسی	-۰/۳۳۲	-۰/۰۵۳	-۰/۴۸۷	۰/۰۶۴	۰/۳۶۵	-۰/۳۱۳	۱	۰/۱۶۵	۰/۵۴۷	-۰/۱۹۴
گسل	-۰/۰۲۴	۰/۰۸۷	۰/۲۰۲	-۰/۱۲۸	-۰/۰۸۵	۰/۰۳۴	۰/۱۶۵	۱	۰/۱۶۷	۰/۱۱۵
فرسایش خاک	-۰/۲۴۵	۰/۰۵۴	-۰/۳۸۷	۰/۰۵۳	۰/۲۶۱	-۰/۱۳۱	۰/۵۴۷	۰/۱۶۷	۱	-۰/۲۰۳
کاربری	۰/۱۱۲	۰/۰۲۴	۰/۴۱۳	-۰/۰۴۸	۰/۰۲۱	۰/۱۳۳	-۰/۱۹۴	۰/۱۱۵	-۰/۲۰۳	۱
زمین لغزش	۰/۰۲۴	۰/۰۳۲	۰/۲۱۵	-۰/۰۵۳	۰/۰۴۱	۰/۰۹۳	-۰/۱۸۶	۰/۱۰۶	-۰/۲۱۱	۰/۱۰۷
ماتریس تضاد										
معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	مراکز جمعیتی	زمین-شناسی	گسل	فرسایش خاک	کاربری زمین-لغزش
شیب	۰	۰/۸۱۳	۰/۷۹۷	۰/۰۲۳	۰/۲۲۴	۰/۸۵۷	۰/۳۳۲	۰/۰۲۴	۰/۲۴۵	۰/۸۸۸
ارتفاع	۰/۸۱۳	۰	۰/۸۶۳	۰/۰۷۶	۰/۰۸۷	۰/۸۹۸	۰/۰۵۳	۰/۹۲۲	۰/۹۴۶	۰/۹۷۶
کانون زلزله	۰/۷۹۷	۰/۸۶۳	۰	۰/۳۱۱	۰/۶۵۴	۰/۴۶۸	۰/۴۸۷	۰/۷۹۸	۰/۳۸۷	۰/۵۸۷
رودخانه	۰/۰۲۳	۰/۰۷۶	۰/۳۱۱	۰	۰/۷۶۸	۰/۱۳۱	۰/۹۳۶	۰/۱۲۸	۰/۹۴۷	۰/۰۴۸
راه ارتباطی	۰/۲۲۴	۰/۰۸۷	۰/۶۵۴	۰/۷۶۸	۰	۰/۴۲۱	۰/۶۳۵	۰/۰۸۵	۰/۷۳۹	۰/۹۷۹
مراکز جمعیتی	۰/۸۵۷	۰/۸۹۸	۰/۴۶۸	۰/۱۳۱	۰/۴۲۱	۰	۰/۳۱۳	۰/۹۶۶	۰/۱۳۱	۰/۸۶۷
زمین‌شناسی	۰/۳۳۲	۰/۰۵۳	۰/۴۸۷	۰/۹۳۶	۰/۶۳۵	۰/۳۱۳	۰	۰/۸۳۵	۰/۴۵۳	۰/۱۹۴
گسل	۰/۰۲۴	۰/۹۲۲	۰/۷۹۸	۰/۱۲۸	۰/۰۸۵	۰/۹۶۶	۰/۸۳۵	۰	۰/۸۳۳	۰/۸۸۵
فرسایش خاک	۰/۲۴۵	۰/۹۴۶	۰/۳۸۷	۰/۹۴۷	۰/۷۳۹	۰/۱۳۱	۰/۴۵۳	۰/۸۳۳	۰	۰/۲۰۳
کاربری	۰/۸۸۸	۰/۹۷۶	۰/۵۸۷	۰/۰۴۸	۰/۹۷۹	۰/۸۶۷	۰/۱۹۴	۰/۸۸۵	۰/۲۰۳	۰
زمین لغزش	۰/۹۷۶	۰/۹۶۸	۰/۷۸۵	۰/۰۵۳	۰/۹۵۹	۰/۹۰۷	۰/۱۸۶	۰/۸۹۴	۰/۲۱۱	۰/۸۹۳
محاسبه وزن نهایی										
معیار	شیب	ارتفاع	کانون زلزله	رودخانه	راه ارتباطی	مراکز جمعیتی	زمین-شناسی	گسل	فرسایش خاک	کاربری زمین-لغزش
مجموع تضاد	۱۰/۱۷۹	۹/۶۰۲	۹/۳۶۳	۱۰/۴۲۱	۱۰/۵۵۱	۹/۹۵۹	۱۰/۴۲۴	۹/۳۷۰	۱۰/۰۹۵	۹/۵۲۰
انحراف معیار	۰/۲۳۷	۰/۱۸۷	۰/۲۷۸	۰/۱۸۷	۰/۱۸۹	۰/۲۴۶	۰/۲۳۴	۰/۲۹۹	۰/۲۰۳	۰/۳۷۸
میزان اطلاعات	۲/۴۱۲	۱/۷۹۵	۲/۶۰۲	۱/۹۵۳	۱/۹۹۴	۲/۴۴۹	۲/۳۳۴	۲/۸۰۱	۲/۰۴۹	۲/۶۴۶
وزن نهایی	۰/۰۹۴	۰/۰۷۰	۰/۱۰۲	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸	۰/۰۹۶	۰/۰۹۱	۰/۱۱۰	۰/۰۸۰	۰/۱۰۴

با توجه به خروجی حاصل از روش مارکوس، $۳۶۳/۸۶$ کیلومترمربع از مساحت شهرستان در طبقه‌ی با آسیب‌پذیری زیاد و $۶۶۰/۴۷$ کیلومترمربع، در طبقه آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد قرار دارد. همچنین $۵۸۶/۲۱$ کیلومترمربع از مساحت شهرستان، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط و به ترتیب $۴۳۱/۵۲$ و $۱۴۰/۰۸$ کیلومترمربع دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم و نسبتاً کم می‌باشند (جدول ۳). بررسی موقعیت روستاها در ارتباط با پهنه‌بندی احتمال وقوع زلزله نشان می‌دهد که، ۴۰ روستا (معادل $۲۲/۸۶$ درصد از روستاهای شهرستان)، در پهنه آسیب‌پذیری زیاد قرار گرفته‌اند. روستاهایی که در این طبقه قرار دارند، عبارتند از: روستاهای جمایران، طهماسب‌آباد، تقی دیزج، آق‌قلعه از دهستان ارشق شرقی؛ روستای حکیم قشلاقی از دهستان بالغلو؛ روستاهای علی‌آباد، اوزون بنیه، چنقرلو (بیوک آقا‌آباد)، بنه‌قباد‌آباد (قبادخان)، سید لر (امین‌الی یوردی)، بنه خرمندلی، سردابه، عزیزلو، شهرپور، خیارک، گیگل، باروق، میرنی، چناق رود (چناق بلاغ)، قره تپه سبلان (قره تپه)، دیچوپین، جمادی، وکیل‌آباد، حمل‌آباد، خشکه رود و شفیع‌گونی از دهستان سردابه؛ روستاهای شیخ احمد، کرد قشلاقی، هاوجا کندی، کلاته قشلاقی از دهستان غربی؛ روستاهای دلیلر، الاکلین، عباس‌آباد و مسجدلو از دهستان فولادلوی جنوبی؛ روستاهای دویل، خانگاه، مزرعه زمین دویل، شبلو، چن‌داب و گرگان از دهستان هیر. به علاوه، با توجه به نتایج حاصله، ۵۴ روستا، شامل: روستاهای قوش قیه سی، گل تپه، شریف بیگلر، الماس کندی، آبدارلو، قشلاق اوچ بلاغ، نقدی کندی، محمد جانلو، ایمیر، دریالار، لکه لو، پیر الوان، داشلوجه و - طالب قشلاقی واقع در دهستان ارشق شرقی؛ مادیه از دهستان بالغلو؛ روستاهای بنه مهدی‌خانلو، شمشیرخانه، گرجان، شالی کندی، ینگجه رضا بیگلر، حسنعلی کندی، سبلان (قلعه جوق سبلان)، کردکندی، اروانق (ارونا) و دیولق از دهستان سردابه؛ روستاهای اصلان قشلاقی، گندشمین، چراپا حاج علی کندی، امیرآباد، شندر شامی، کمر کندی، چوخوریوردی، علی قشلاق، ینگجه ملا محمدحسن، مختارآباد و جبه دار واقع در دهستان غربی؛ روستاهای کوزه توپراقی و قره داغلو از دهستان فولادلوی شمالی؛ روستاهای قره ولی، رزمگاه، کوره قلعه، قیه چمن و گ تپه از دهستان فولادلوی جنوبی؛ صومعه (صوما)، اردی، سامیان و قوجور واقع در دهستان کلخوران؛ روستاهای دمدمه، کوهساره، قشلاق محمد بیک، قشلاق محمد بیک علیا از دهستان هیر که معادل $۳۰/۸۶$ درصد از روستاهای شهرستان اردبیل هستند، در پهنه آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد، می‌باشند.

همچنین ۲۳ روستا (معادل $۱۳/۱۴$ درصد از روستاهای شهرستان)، از جمله؛ روستاهای چات قیه، الماس، گولی، زردآلو، نیار، حمید‌آباد، چهل گز، شیشه‌گران، کولانکوه، پیراقوم، سیدآباد، اینلو، پيله‌گلین، جیاوان، داش بلاغ، تازه کند شریف‌آباد، آقچه کند، بقرآباد، یامچی و آهو قلعه (آی قلعه)، دارای احتمال آسیب‌پذیری متوسط هستند. به علاوه، ۳۹ روستا (معادل $۲۲/۲۸$ درصد از روستاهای شهرستان)، از جمله؛ روستاهای آقاباقر، کمی‌آباد، گیلانده، سلطان‌آباد، آغ بلاغ آقاجان، انزاب‌علیا، زعفران، فیروز‌آباد، هل‌آباد، کلخوران شیخ (کلخوران علیا) و بنفشه‌درق، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری نسبتاً کم و ۱۹ روستا (معادل $۱۰/۸۶$ درصد از روستاهای شهرستان)، از جمله؛ روستاهای آغبلاغ رستم‌خانی، شام‌اسبی، تازه کند رضا‌آباد و پیرال‌قیر، دارای احتمال آسیب‌پذیری کم می‌باشند. به علاوه، تحلیل فضایی میزان آسیب‌پذیری نقاط شهری نشان می‌دهد که شهر اردبیل در پهنه آسیب‌پذیری متوسط زلزله قرار دارد و عمده‌ترین دلیل قرارگیری شهر اردبیل در این پهنه، فاصله زیاد آن نسبت به خطوط گسل‌های اصلی و فاصله از کانون زلزله‌های پیشین، شهرستان می‌باشد. ولی شهرهای هیر و آراللو در طبقه آسیب‌پذیری زیاد و شهر ثمرین در طبقه آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد، قرار دارند. البته بایستی در نظر داشت که، واقع شدن بعضی از پهنه‌ها در سطوح پایین آسیب‌پذیری و خطر، نشان‌دهنده وضعیت ایده‌آل آن‌ها نیست و فقط جایگاه آن پهنه را در مقایسه با سایر پهنه‌ها مشخص می‌کند.



شکل (۹). نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله با استفاده از روش مارکوس

جدول (۳). اطلاعات طبقات حاصل از به‌کارگیری الگوریتم چند معیاره مارکوس

مقدار آسیب- پذیری	آسیب‌پذیری زیاد	آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد	آسیب‌پذیری متوسط	آسیب‌پذیری نسبتاً کم	آسیب‌پذیری کم
مساحت (KM ²)	۳۶۳/۸۶	۶۶۰/۴۷	۵۸۶/۲۱	۴۳۱/۵۲	۱۴۰/۰۸
درصد %	۱۶/۶۷	۳۰/۲۷	۲۶/۸۶	۱۹/۷۸	۶/۴۲

از لحاظ معیار ارتفاع، سطوح ارتفاعی ۱۱۰۰ تا ۲۵۰۰ متری از احتمال آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار است. بررسی نقاط شهری و روستایی نیز، بیانگر این موضوع هست که شهر اردبیل، آرالو و ثمرین و ۸۱ روستای شهرستان (معادل ۴۶/۲۹ درصد از روستاهای شهرستان)، در ارتفاع ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر، قرار دارند. سطوح ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، شامل شهر هیر و ۶۴ روستا (معادل ۳۶/۵۷ درصد از روستاهای شهرستان)، می‌باشند. ۳۰ روستا (معادل ۱۷/۱۴ درصد از روستاهای شهرستان)، نیز در ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر، واقع شده‌اند و بالاتر از ۲۵۰۰ متر، روستایی مشاهده نمی‌گردد. مقایسه بین نقشه پهنه‌بندی شده با نقشه شیب نیز، نشان می‌دهد که نواحی آسیب‌پذیر، در طبقات شیب ۵ تا ۵۰ درصد، قرار دارند. به طور کلی، شهر اردبیل، آرالو و ثمرین به همراه ۸۶ روستا (معادل ۴۹/۱۴ درصد از روستاهای شهرستان)، در طبقات شیب صفر تا ۵ درصد می‌باشند. ۶۴ روستا (معادل ۳۶/۵۸ درصد از روستاهای شهرستان)، در شیب ۵-۲۰ درصد و شهر هیر و ۲۵ روستا (معادل ۱۴/۲۹ درصد از روستاهای شهرستان)، نیز در شیب ۲۰ تا ۳۵ درصد، واقع شده‌اند. با نظر به معیار فاصله از رودخانه، می‌توان نتیجه گرفت، مناطق بسیار آسیب‌پذیر، در فاصله نزدیک از رودخانه (صفر تا ۱۰۰۰ متر)، قرار دارند و تراکم جمعیتی شهرها و یا روستاها نیز، در کنار و نزدیکی به منابع آبی واقع شده است. به طوری که، شهر اردبیل، ثمرین، هیر و ۱۲۲ روستای شهرستان در حریم صفر تا ۱۰۰۰ متری از رودخانه جای گرفته‌اند. به ترتیب، شهر آرالو و ۳۶ روستا در فواصل ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و ۱۷ روستا نیز در فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری از رودخانه‌ها، قرار دارند. از لحاظ معیار کاربری اراضی، نواحی انسان‌ساخت (مناطق شهری و روستایی)، اراضی

زراعی و باغات، بیشترین مقدار از مساحت مناطق داری احتمال پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و نسبتاً زیاد را به خود اختصاص داده است. مقایسه نقشه فاصله از مراکز جمعیتی با نقشه پهنه‌بندی، نشان می‌دهد که پهنه‌های آسیب‌پذیر در فواصل نزدیک به این مناطق (از فاصله صفر تا حداکثر فاصله ۱۰۰۰ متری)، واقع شده است. از لحاظ معیار فاصله از راه ارتباطی، هر چند برخی از پهنه‌های آسیب‌پذیر در نواحی نزدیک به راه‌های ارتباطی می‌باشند، ولی بایستی اذعان داشت که نواحی دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالا، در فواصل نسبی دور از راه‌های ارتباطی و در فاصله ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری از راه ارتباطی نیز، قرار دارند.

در رابطه با نقشه زمین‌شناسی می‌توان گفت که طبقات بسیار آسیب‌پذیر، به طور عمده؛ در کنگلومرای درشت دانه همراه با مواد آذر آواری، آندزیت و رسوبات آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌ها قرار دارند. با توجه به نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهرستان اردبیل در برابر خطر زلزله، نقاط با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و نسبتاً زیاد، در فواصل صفر تا ۲۰۰۰ متری، از گسل واقع شده‌اند. لذا، طبق یافته‌های پژوهش؛ در شهرستان اردبیل ارتباط زلزله‌خیزی با فاصله از گسل، بسیار مشخص است و هر چه فاصله از گسل بیشتر باشد، به دلیل فاصله‌گیری از کانون بحران، میزان آسیب‌پذیری بسیار کاهش می‌یابد. بررسی موقعیت شهرهای شهرستان اردبیل در ارتباط با نقشه فاصله از گسل نشان داد، وجود گسل‌ها و سابقه لرزه‌خیزی آن‌ها و نیز قرارگیری شهرها، روی سازندهای سست آبرفتی از یک سو و ناهمگنی در شاخص‌های کالبدی، توسعه ساخت سازه‌های بلند و با اهمیت زیاد (به ویژه در مرکز شهر اردبیل) از سوی دیگر، همواره شهرها را در برابر زمین‌لرزه مستعد آسیب کرده است و بنابراین توجه به زلزله و خسارات ناشی از آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بررسی موقعیت روستاهای شهرستان اردبیل در ارتباط با نقشه فاصله از گسل نیز، نشان داد ۸۵ روستا (معادل ۴۸/۵۷ درصد از روستاهای شهرستان)، در فواصل صفر تا ۲۰۰۰ متری قرار گرفته‌اند و بررسی وضعیت و موقعیت قرارگیری روستاها، در ارتباط با خطوط گسل و نیز پهنه‌هایی که احتمال وقوع زلزله را دارند، نیز نشان‌دهنده این موضوع است که سکونت‌گزینی در این منطقه، بدون توجه به مخاطرات طبیعی از جمله زلزله بوده است. از آنجا که سکونتگاه‌های روستایی بیشتر از نقاط شهری در معرض آسیب قرار دارند، شناسایی و پهنه‌بندی سکونتگاه‌های روستایی در ارتباط با مخاطرات طبیعی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. به علاوه، مناطقی با آسیب‌پذیری زیاد و نسبتاً زیاد، در پهنه‌هایی با پتانسیل فرسایش زیاد، متوسط و نسبتاً کم مشاهده می‌شوند.

با بررسی موقعیت شهرهای شهرستان اردبیل و مقایسه آن با نقشه فاصله از کانون‌های لرزه‌خیزی، می‌توان بیان کرد که شهر ثمرین در فاصله ۲۵۰۰ متری از کانون زلزله‌های پیشین قرار دارد و شهرهای هیر و آرالو در فاصله ۵۰۰۰ متری واقع شده است. اما شهر اردبیل، در فاصله نسبی ۱۲۵۰۰ متری از این کانون‌های زلزله جای گرفته است و لذا پتانسیل آسیب‌پذیری کم‌تری نیز نسبت به دیگر شهرها دارد. ارزیابی موقعیت قرارگیری روستاهای شهرستان اردبیل نسبت به کانونهای لرزه‌خیزی نیز نشان می‌دهد که ۷ روستا (معادل ۴ درصد از روستاهای شهرستان)، در فاصله صفر تا ۲۵۰۰۰ متری از کانون‌های لرزه‌خیزی قرار دارند، به ترتیب؛ ۲۲ و ۳۰ روستا (معادل ۱۲/۵۷ و ۱۷/۱۴ درصد از روستاهای شهرستان)، در فاصله ۲۵۰۰-۵۰۰۰ و ۵۰۰۰-۷۵۰۰۰ متری قرار دارند و مابقی روستاها در فاصله بیش از ۷۵۰۰ متری قرار دارند. مقایسه بین نقشه پهنه‌بندی شده با نقشه فاصله از نقاط لغزشی نیز، نشان می‌دهد که نواحی آسیب‌پذیر، در فاصله نسبی صفر تا ۱۲۰۰۰ متری از این نقاط هستند و در حالت کلی، شهر هیر و ۲۹ روستا (معادل ۱۶/۵۷ درصد از روستاهای شهرستان)، در حریم صفر تا ۳۰۰۰ متری، ۳۲ روستا (معادل ۱۸/۲۹ درصد از روستاهای شهرستان)، در حریم ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متری، شهرهای اردبیل، ثمرین و ۳۷ روستا (معادل ۲۱/۱۴ درصد از روستاهای شهرستان)، در حریم ۶۰۰۰ تا ۹۰۰۰ متری، شهر آرالو و ۲۳ روستا (معادل ۱۳/۱۴ درصد از روستاهای شهرستان)، در حریم ۹۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ متری از نقاط لغزشی و مابقی روستاها، در فاصله بیش از ۱۲۰۰۰ متری واقع شده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، شناسایی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری محدوده‌های در معرض خطر وقوع زلزله در شهرستان اردبیل می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عوامل فاصله از گسل، کاربری اراضی، فاصله از کانون زلزله‌های پیشین با بیشترین وزن، به عنوان مهمترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زلزله در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. گرچه عوامل متعددی در شکل‌گیری نقاط بحرانی زلزله نقش دارند، اما ویژگی‌های فضایی خطوط گسل در تشدید آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های جمعیتی شهرستان تأثیر به‌سزایی دارد. بررسی‌های نهایی نشان می‌دهد که پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا، نزد یک به خطوط گسل هستند و به موازات فاصله گرفتن از خطوط گسل از شدت خطر زلزله هم کاسته می‌شود. ایمانی و پورخسروانی (۱۳۹۶) و آرامی و همکاران (۱۴۰۱)، نیز عامل فاصله از گسل را به عنوان مهمترین عامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی شهرستان اردبیل معرفی کرده‌اند و بیان داشته‌اند، نواحی که در مجاورت گسل‌های اصلی می‌باشند، بیشتر در معرض خطر زلزله قرار دارند. لذا نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعات پیشین انجام یافته، مطابقت و همخوانی بالایی دارد. به علاوه، تجزیه و تحلیل نقشه نهایی، با پوشش ۱۶/۶۷ درصدی پهنه‌های با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و مساحت ۳۰/۲۷ درصدی پهنه‌های دارای احتمال آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای منطقه مورد مطالعه، از لحاظ رخداد زمین‌لرزه می‌باشد و نواحی شمالی و جنوبی شهرستان، دارای بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری در برابر خطر زلزله هستند. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، شهر اردبیل در پهنه آسیب‌پذیری متوسط زلزله قرار دارد. ولی شهرهای هیر و آرالو در طبقه آسیب‌پذیری زیاد و شهر ثمرین در طبقه آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد، قرار دارند و استقرار یافتن کانون‌های شهری در پهنه‌های آسیب‌پذیر، این شهرها را در معرض تهدید و آسیب جدی قرار داده است.

با توجه به این امر که زلزله می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد، لازم است تا سازمان‌های متولی و مسئول از جمله؛ استانداری اردبیل، اداره کل مدیریت بحران، اداره کل راه و شهرسازی استان اردبیل، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، شهرداری‌ها، به نتایج پژوهش حاضر توجه کنند و با انجام اقدامات مسئولانه و هم‌افزایی لازم، اقدامات حفاظتی مناسب و البته کارشناسی شده توسط متخصصان، را در دستور کار خود قرار دهند. شایان ذکر می‌باشد که پس از زلزله رخ داده در مورخه ۱۳۷۵/۱۲/۱۰ اردبیل هرچند اقداماتی برای ایمن‌سازی مناطق مسکونی صورت گرفته است، اما همچنان پس از گذشت ۲۷ سال از آن فاجعه و علی‌رغم قرار گرفتن، بخش اعظمی از شهرستان اردبیل، بر روی گسل یا در فاصله نزدیک به گسل، این شهرستان آمادگی لازم در برابر زلزله‌های شدید را ندارد. بنابراین انجام اقداماتی، از جمله؛ جلوگیری از استقرار، صدور مجوز و ممانعت از ساخت‌وساز بر روی گسل‌ها، جلوگیری از استقرار و تمرکز سکونتگاه‌های شهری و روستایی در پهنه‌های با خطر بالا، تداوم و سرعت دادن به بحث مقاومت‌سازی اماکن روستایی و حتی شهری، اصلاح ساختار و تراکم جمعیتی و ساختمانی در نواحی با پهنه آسیب‌پذیری بالا برای کاهش آسیب‌رسانی، آگاه‌سازی عمومی در راستای اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع حوادث، آموزش‌های امدادی، دسترسی تمام سکونتگاه‌های شهری و روستایی به راه‌های ارتباطی و مراکز امداد رسان برای دسترسی سریع به مناطق بحرانی پس از وقوع زلزله، جهت کاهش آسیب‌های جانی و خسارات مالی ناشی از بحران زلزله در مراکز جمعیتی شهرستان اردبیل، امری ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

- احدنژادروشتی محسن؛ تیموری اصغر؛ طهماسبی‌مقدم حسین؛ واعظ لیواری مهناز. (۱۳۹۹). تحلیل فضایی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری در برابر زلزله با رویکرد مدیریت بحران (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهر زنجان)، *مخاطرات محیط طبیعی*، ۹ (۲۶): ۷۷-۹۰.
- آرامی ابراهیم؛ ایمانی بهرام؛ خلیفه ابراهیم. (۱۴۰۱). اولویت‌بندی سکونتگاه‌های روستایی در معرض مخاطرات (مورد مطالعه: بخش مرکزی شهرستان اردبیل)، *مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*، ۳ (۱): ۲۳۶-۲۱۹.
- اسدی زینب، 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): ۶۷-۷۸.
- اسفندیاری فریبا؛ غفاری گیلانده عطا؛ خداداد لطفی (۱۳۹۳). بررسی توان لرزه‌زایی گسل‌ها و برآورد تلفات انسانی ناشی از زلزله در مناطق شهری مطالعه موردی: (شهر اردبیل)، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۲ (۴): ۱۷-۳۶.
- اسمعیل‌پور مرضیه؛ لاله‌پور منیژه؛ ممقانی سمانه. (۱۴۰۱). ارزیابی میزان آسیب‌پذیری مسکن شهر تبریز در برابر مخاطره زلزله (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶ (۸۲): ۴۸-۲۷.
- اصغری سراسکانرود صیاد؛ پیروزی الناز. (۱۴۰۱). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره OWA، WLC، VIKOR و MABAC در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه گیوی‌چای استان اردبیل، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴ (۱): ۶۵-۹۴.
- آقایاری‌هیر محسن؛ ذاکری میاب کلثوم. (۱۳۹۵). ارزیابی ریسک زلزله مبتنی بر مخاطره و آسیب‌پذیری در نواحی روستایی مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان مرنند، *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۰ (۵۷): ۱-۲۱.

- ایمانی بهرام؛ پورخسروانی محسن. (۱۳۹۶). تحلیل فضایی پهنه‌های مخاطره آمیز شهرستان اردبیل، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۸ (۲): ۱۰۹-۱۲۸.
- پورمحمدی محمدرضا؛ کرمی محمدرضا. (۱۳۹۳). ترکیب مدل کرنل (KDE) و مدل AHP در ارزیابی خطر زلزله در بافت‌های حاشیه‌نشین و فرسوده شهری با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مطالعه موردی مناطق یک و پنج شهر تبریز، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۸ (۵۰): ۵۵-۸۸.
- پورمحمدی محمدرضا؛ مصیب‌زاده علی. (۱۳۸۷). آسیب‌پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله و نقش مشارکت محله‌ای در امدادسانی آن‌ها، جغرافیا و توسعه، ۶ (۱۲): ۱۴۴-۱۱۷.
- جهانگیری عباس. (۱۴۰۰). انتخاب بهترین فرآیند تصفیه‌ی فاضلاب در شهر فرمهین با استفاده از تصمیم‌گیری چند شاخصه، تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۶ (شماره ویژه): ۱-۱۱.
- حسینی‌خواه حسین؛ 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.
- حیدری مظفر مرتضی؛ تاج‌بخشیان مرضیه. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های شهرستان نهاوند در برابر زلزله، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱ (۳۴): ۷۸-۵۷.
- خدادادی فاطمه؛ انتظاری مژگان؛ ساسان‌پور فرزانه. (۱۳۹۹). تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با روش ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰ (۵۶): ۱۱۳-۹۳.
- خدادادی جید شاهین؛ پورزینعلی سعید. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی، مهندسی عمران مدرس. ۲۲ (۲): ۴۳-۵۷.
- داداش‌زاده زهرا؛ گلی مختاری لیلا؛ آراء هاید. (۱۳۹۳). کیاس فرسایشی و تحولات پیش‌بینی‌نشده چاله اردبیل، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۵ (۳): شماره ۳: ۲۴۲-۲۳۱.
- درویش‌زاده علی (۱۳۷۰). زمین‌شناسی ایران. تهران: نشر دانش‌آموز (وابسته به انتشارات امیر کبیر).
- رجبی معصومه؛ حجازی میراسدالله؛ روستایی شهرام؛ عالی‌نگین. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری مخاطرات طبیعی و ژئومورفولوژیکی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان سقز (مطالعه موردی سیل و زلزله)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۲): ۱۹۵-۱۸۳.
- رجبی معصومه؛ سلیمانی ابوالفضل. (۱۳۹۱). تحلیل و ارزیابی ویژگی‌های مورفوتکتونیک و نئوتکتونیک دامنه جنوبی کوهستان سبلان، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۷ (۴۵): ۹۷-۱۲۰.
- رحیمی‌شهید مجتبی؛ رحیمی نیما. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۱ (۲۲): ۱۰۹-۱۱۸.
- ریاحی وحید؛ موسوی مریم. (۱۴۰۰). سنجش میزان آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله (مورد مطالعه: دهستان بیان در شهرستان ایذه)، روستا و توسعه پایدار فضا، ۲ (۱): ۱۹-۱.
- عابدینی موسی. (۱۳۹۲). بررسی سازندهای مفر شهر توریستی سرعین با تأکید بر وضعیت توپوگرافی، تکتونیک و اقلیم جهت کاربری بهینه اراضی شهری با استفاده از GIS، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۴ (۱): ۶۸-۵۱.
- عابدینی موسی؛ ایرانی ویدا؛ اسفندیاری‌درآباد فریبا. (۱۴۰۱). بررسی اثرات ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با تأکید بر توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: نمین، آستارا، تالش)، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶ (۸۲): ۱۶۰-۱۴۵.
- عابدینی موسی؛ سرمستی نادر. (۱۳۹۵). ارزیابی ضریب آسیب‌پذیری کلانشهر تبریز در برابر خطر زلزله و برآورد تلفات انسانی، جغرافیای طبیعی، ۹ (۳۲): ۵۶-۳۲.

عابدینی موسی؛ عشقی چهاربرج علی؛ علوی سعیده. (۱۴۰۱). ارزیابی میزان تاب‌آوری کالبدی شهر در سناریوهای مختلف زلزله نمونه موردی: منطقه شش شهر تهران. *فضای جغرافیایی*، ۲۲ (۷۸): ۱۹۱-۲۱۱.

عبداللهی‌پور سراسکانرود ساناز؛ محجل محمد؛ سلگی علی؛ تقی‌پور کریم. (۱۳۹۰). ساختار پایه فشاری جنوب خاوری گسل تبریز در کوه‌های بزقوش، سی/مین‌گردهمایی علوم زمین (۱ اسفند ۱۳۹۱، تهران): ۸-۱.

علوی سیدعلی؛ رمضان نژاد یاسر؛ فتاحی احداالله؛ خلیفه ابراهیم. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی فضایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض مخاطرات محیطی با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره ویکور (مطالعه موردی: شهرستان تالش)، *برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۵ (۲۰): ۱۳۶-۱۲۵.

غضنفرپور حسین؛ حسینی‌خواه حسین؛ 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): ۳۶-۲۱.

فاطمی‌عقدا سیدمحمود؛ باقری وحید؛ مهدویفر محمدرضا. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های سریع ناشی از زلزله ۱۰ اسفند ۱۳۷۵، *زمین‌شناسی مهندسی*، ۸ (۳): ۲۳۱۹-۲۳۴۶.

فتائی ابراهیم؛ ندایی گیلارلو سمیه؛ سیدصادقیان نسیم؛ سید صفویان تقی؛ صادقی رامین. (۱۳۹۱). ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی چاه‌های بهره‌برداری دشت اردبیل، *زمین‌شناسی محیط‌زیست*، ۶ (۲۱): ۶۵-۷۶.

محمدی‌چنور؛ نظم‌فر حسین؛ اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۴۰۲). تحلیل وضعیت تاب‌آوری نهادی در برابر خطر زلزله در کلانشهر کرمانشاه، *جغرافیا و مطالعات شهری و منطقه‌ای*، ۱۲ (۴۵): ۱۷۲-۱۹۱.

محمدپور ابراهیم. (۱۳۹۸). مکان‌یابی مراکز اسکان موقت شهر اردبیل بعد از وقوع زلزله با استفاده از GIS، فصلنامه پژوهش‌های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی، ۱ (۲۱): ۷۷-۹۱.

مددی‌عقیل. (۱۳۸۴). بررسی عوامل مورفوژنز در دامنه شمال غربی تالش (باغروداغ) با تأکید بر مورفوتکتونیک و مورفودینامیک، رساله دکتری، اساتید راهنما: عبدالحمید رجایی و محمدحسین رضایی‌مقدم، دانشگاه تبریز.

معصومی محمدتقی؛ میلاد رجب‌زاده‌نیارق. (۱۴۰۰). بررسی میزان آسیب‌پذیری شبکه معابر شهر اردبیل در برابر سوانح طبیعی (زلزله) (مطالعه موردی: خیابان امام خمینی‌شهر)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۰ (۳۹): ۱۴۱-۱۶۱.

نبوی محمدحسن (۱۳۵۵). *دیپاچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران*. تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

- Ahadnejad-Rosheti Mohsen; Teymouri Asghar; Tahmasbi Moghaddam Hossein; Vaez Livari Mahnaz. (2019). Spatial analysis of vulnerability of urban road network to earthquakes with a crisis management approach (case study: central part of Zanjan city), *Natural Environment Hazards*, 9 (26): 77-90. [In persian]
- Arami Ebrahim; Imani Bahram; Khalifa Ebrahim. (2014). Prioritization of rural settlements exposed to hazards (case study: central part of Ardabil city), *Geographical Studies of Mountainous Areas*, 3 (1) 1: 219-236. [In persian]
- Asadi Zeinab, Zare Mehdi. (2015). Estimation of seismic power of faults and assessment of magnitude of prehistoric earthquakes from landslide data: a case study in Darreh-e-Noor (Central Alborz), *Earth Sciences*, 24 (95) 78-67. [In persian]
- Esfandiari Fariba; Ghafari Gilandeh Ata; Khodadad Lotfi (2014). Investigation of the seismic potential of faults and estimation of human casualties caused by earthquakes in urban areas: a case study: (Ardabil city), *Quantitative Geomorphology Research*, 2 (4): 17-36. [In persian]
- Esmailpour Marzieh; Lalehpour Manijeh; Mamghani Samaneh. (2014). Assessment of the vulnerability of Tabriz city housing to earthquake hazard (Case study: District 10 of the municipality), *Scientific Journal of Geography and Planning*, 26 (82): 27-48. [In persian]

- Asghari-Saraskanroud Sayyad; Pirooz Elnaz. (2013). Comparative evaluation of multi-criteria decision-making algorithms WLC, OWA, VIKOR and MABAC in landslide hazard zoning. Case study: Givi-Chay basin of Ardabil province, *Physical Geography Research*, 54 (1): 94-65. [In persian]
- Aghayari-Hir Mohsen; Zakeri Miyab-Kolsoom. (2016). Assessment of earthquake risk based on hazard and vulnerability in rural areas. Case study: Central part of Marand County, *Scientific Journal of Geography and Planning*, 20 (57): 1-21. [In persian]
- Imani Bahram; Pourkhosravani Mohsen. (2017). Analysis Spatial Risk Zones of Ardabil County, *Geography and Environmental Planning*, 28 (2): 109-128. [In persian]
- Pourmohammadi Mohammadreza; Karami Mohammadreza. (2014). Combining the Kernel Model (KDE) and the AHP Model in Earthquake Risk Assessment in Marginal and Deteriorated Urban Textures with the Help of Geographic Information System (GIS), Case Study of Regions One and Five of Tabriz City, *Scientific Journal of Geography and Planning*, 18 (50): 55-88. [In persian]
- Pourmohammadi Mohammadreza; Mosayebzadeh Ali. (2008). Vulnerability of Iranian Cities to Earthquakes and the Role of Neighborhood Participation in Their Relief, *Geography and Development*, 6 (12): 144-117. [In persian]
- Jahangiri Abbas. (2014). Selecting the best wastewater treatment process in Fermahin city using multi-criteria decision making, *Decision Making and Operations Research*, 6 (Special Issue): 1-11. [In persian]
- Hosseinihah H; Zarrabi Asghar. (2019). The role of WASPAS hybrid decision-making model in identifying seismic zones (case study: community centers of Bahmai County), *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6 (2): 147-164. [In persian]
- Heydari Mozaffar Morteza; Taj Bakhshian Marzieh. (2019). Zoning vulnerability of settlements in Nahavand County to earthquakes, *Natural Environment Hazards*, 11 (34): 57-78. [In persian]
- Khodadadi Fatemeh; Entezari Mojgan; Sasanpour Farzaneh. (2020). Urban vulnerability analysis against earthquake hazard using ELECTRE FUZZY method (case study: Karaj metropolis), *Applied Research in Geographical Sciences*, 20 (56): 93-113. [In persian]
- Khodadadijid Shahin; Pourzeinali Saeed. (1401). Seismic zoning of Ardabil city using deterministic hazard analysis and fuzzy system, *Modares Civil Engineering*, 22 (2): 43-57. [In persian]
- Dadashzadeh Zahra; Goli Mokhtari Leila; Ara Hayedeh. (2014). Erosion hypothesis and unforeseen developments of Ardabil sinkhole, *Geography and Environmental Planning*, 25 (3): No. 3: 242-231. [In persian]
- Darvishzadeh Ali (1991). *Geology of Iran*. Tehran: Danesh-e-Amooz Publishing (affiliated with Amir Kabir Publishing). [In persian]
- Rajabi Masoumeh; Hejazi Mir-Assadollah; Roustaei Shahram; Aali Negin. (2018). Vulnerability zoning of natural and geomorphological hazards in rural settlements of Saqez County (Case study of floods and earthquakes), *Quantitative Geomorphology Research*, 7 (2): 195-183. [In persian]
- Rajabi Masoumeh; Soleimani Abolfazl. (2012). Analysis and evaluation of morphotectonic and neotectonic features of the southern slope of Sabalan Mountain, *Geography and Planning*, 17 (45): 120-97. [In persian]
- Rahimi Shahid Mojtaba; Rahimi Nima. (2017). Earthquake hazard zoning using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System (GIS) Case study: Central part of Semirom County, *New Findings of Applied Geology*, 11 (22): 109-118. [In persian]
- Riahi Vahid; Mousavi Maryam. (2017). Measuring the vulnerability of rural settlements to earthquakes (case study: Pian rural district in Izeh city), *Rural and Sustainable Development of Space*, 2 (1): 1-19. [In persian]
- Abedini Musa. (2013). Study of the formations of the tourist city of Sarein with emphasis on the topographic, tectonic and climatic conditions for optimal use of urban lands using GIS, geography and environmental planning, 24 (1): 51-68. [In persian]
- Abedini Musa; Iraniani Vida; Esfandiari-Darabad Fariba. (2014). Study of the geomorphological effects of active tectonics and earthquake hazard zoning with emphasis on the seismicity of faults (case study: Namin, Astara, Talesh), *Scientific Journal of Geography and Planning*, 26 (82): 160-145. [In persian]

- Abedini Musa; Sarmasti Nader. (2016). Assessment of vulnerability coefficient of Tabriz metropolis against earthquake risk and estimation of human casualties, *Natural Geography*, 9 (32): 32-56. [In persian]
- Abedini Mousa; Eshghi Chaharborj Ali; Alavi Saeideh. (1401). Assessment of physical resilience of the city in different earthquake scenarios, case study: Tehran six-city area. *Geographical Space*, 22 (78): 191-211. [In persian]
- Abdolahipour Saraskanroud Sanaz; Mohajal Mohammad; Salgi Ali; Taghipour Karim. (2011). The compressional base structure of the southeast Tabriz fault in the Bozqosh Mountains, 30th Earth Sciences Conference (March 1, 2012, Tehran): 1-8. [In persian]
- Alavi Seyed Ali; Ramezanejad Yaser; Fattahi Ahadollah; Khalifa Ebrahim. (2015). Spatial zoning of settlements. [In persian]
- Ghazanfarpour Hossein, Hosseinihah Hossein, Kamali Baghbrahi Esmail. Seismic Risk and Vulnerability Analysis of Human Settlements in Basht County Using Fuzzy Dimatel and GIS Model, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(35): 21-36.[In persian]
- Fatemi Aqda Seyed Mahmoud, Bagheri Vahid, Mahdaviifar Mohammadreza. Zoning of Sarein Landslides Caused by the 10 March 1997 Earthquake, *Engineering Geology*, 8 (3): 2319-2346.
- Fataei Ebrahim, Nedaie Gilarloo Somayeh, Seyed Sadeghian Nasim, Seyed Safavian Taqi, Sadeghi Ramin. Groundwater Quality Assessment of Ardabil Plain Exploitation Wells, *Journal of Environmental Geology*, 6(21): 65-76.
- Mohammadi Chanvar, Nazmfar Hossein, Asghari Saraskanrud, Sayyad. Analyzing the Status of Institutional Resilience against Earthquake Risk in Kermanshah Metropolis, *Geography and Urban and Regional Studies*, 12(45): 172-191.
- Mohammadpour Ebrahim. (2019). Locating Temporary Housing Centers in Ardabil City after the Earthquake Using GIS, *Journal of Modern Research in Geographical Sciences, Architecture and Urban Planning*, 1(21): 77-91.
- Madadi Aqeel. (2005). Investigation of Morphogenesis Factors in the Northwest Slope of Talesh (Baghrudag) with Emphasis on Morphotectonics and Morphodic.
- 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, 231 p.
- Altan, M., Öztürk, 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, pp. 83-89.
- Baumgartel, A., Lukić, S., Belanović Simić, S., Kadović, R., (2019). Identifying Areas Sensitive to Wind Erosion- A Case Study of the AP Vojvodina (Serbia), *Appl Sci*, 19(23): 1-12.
- Birkmann, J., (2007). Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications, *Environmental hazards*, 7(1): 20-31.
- Dong, L., Jie S., (2013). A comprehensive review of earthquake induced building damage detection with remote sensing techniques, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84: 85–99.
- 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.
- 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.
- 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.
- Shadmaan, S., Popy, S., (2023). An assessment of earthquake vulnerability by multi-criteria decision-making method Geo, *hazard Mechanics*, 1 (1): 94-102.
- Steer, P., Simoes, M., Cattin, R. and Shyu, J. B. H., (2014). Erosion influences the seismicity of active thrust faults, *Nature Communications*, 5(5564): 1-7.

- Wang, J., Howarth, G.D., McClymont, E.L., Densmore, A.L., Fitzsimons, S.J., Croissant, T., Gröcke, D.R., West, M.D., Harvey, E.L., Frith, N.V., Garnett, M.H., Hilton, R.H., (2020). Long-term patterns of hillslope erosion by earthquake-induced landslides shape mountain landscapes, *Science Advances*, 6(23): 1- 9.
- Yang, W., Zeng, Z., Luo, W., (2009). Three- Level tectonic model for intraplate earthquakes, *Earth science frontiers*, 16 (1): 206- 217.
- Yariyan, P., Avand, M T., Soltani, F., Ghorbanzadeh, Blaschke, T., (2020). Earthquake Vulnerability Mapping Using Different Hybrid Models, *Symmetry*, 12 (405): 1-31.

