



Assessing the level of vulnerability of urban areas against earthquake crisis using weighted overlay technique and RADIUS model (case study: Ardabil city)

Akbar Samadi¹, Rafat Shahmari Ardjani^{2✉}, Alireza Poursheikhian³, Seyyede Sedighe Hasanimehr⁴, Hossein Asghari⁵

1. Ph.D. Student, Department of Geography and Urban Planning, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

E-mail: adura1400@yahoo.com

2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Geography, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

E-mail: r.shahmari@iau-astara.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Geography, Astara Branch, Islamic Azad University, Asrata, Iran.

E-mail: arpoursheykhian45@gmail.com

4. Associate Professor, Department of Geography, Astara Branch, Islamic Azad University, Asrata, Iran.

Email: ss.hasanimehr@iau.astara.ac.ir

5. Assistant Professor, Department of Geography, Astara Branch, Islamic Azad University, Asrata, Iran.

Email: h.asghari@iau-astara.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 26 October 2023

Revised : 26 January 2024

Accepted :31 January 2024

Published :18 February 2025

Keywords:

Vulnerability,

Earthquake,

AHP Model,

RADIUS Model,

Ardabil city.

Earthquake is considered as one of the most catastrophic and destructive types of natural hazards that cause extensive damage to property and assets, especially in urban areas, and cause many human casualties by destroying buildings and urban infrastructure. Therefore, the first and most basic step in crisis management in order to reduce the effects of an earthquake is to identify vulnerable levels against this crisis. In this regard, the present research was written with the aim of evaluating the level of vulnerability of Ardabil city against the earthquake crisis. The research method in the present study is mixed (quantitative and qualitative) with practical purpose and analytical and exploratory nature. The statistical population of the research also included managers and elites of Ardabil city, and the sample size was determined through the Delphi method of 20 experts. Also, in line with information analysis, have been used AHP technique in Expert Choice software, Weighted Overlay method in GIS software, and RADIUS damage estimation model. The findings of the research show that by examining 15 criteria, the criteria of distance from the fault, proximity to hazardous uses and access to service centers have the most importance (influence) to assess vulnerability to earthquakes. Also, according to the evaluation of the examined criteria and its integration in the fuzzy overlay method, it was found that about 13% of the tissue of Ardabil city is in the zone of very high vulnerability and about 18% is in the zone of high vulnerability. On the other hand, the results of the RADIUS model show that 13853 buildings are subject to destruction, 36% of them are in region 1 and 29% of them are in region 4. Also, the number of injured in the possible earthquake is estimated to be 67117 and the number of dead is 3113.

Cite this article: Samadi, A., Shahmari Ardjani, R., & Poursheikhian, A. Hasanimehr,SS. Asghari,H (2025). Assessing the level of vulnerability of urban areas against earthquake crisis using weighted overlay technique and RADIUS model (case study: Ardabil city). *Journal of Geography and Planning*, 28 (90), 197-220.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.58990.3198>



© The Author(s). DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2024.58990.3198>

Introduction

Earthquake has been considered as one of the most catastrophic and destructive types of natural hazards, especially in developing countries. The establishment of many human settlements in the lands that are at risk of earthquakes has made it inevitable to pay attention to policies, plans and programs to reduce the damage and manage the crisis; Because the occurrence of an earthquake is sudden and it can reflect on a wide level of a region and different dimensions and even put national issues under the radius. Considering the importance of identifying the level of vulnerability in the approach of crisis management and planning and design based on the existing situation, the purpose of this research is to evaluate the level of vulnerability of Ardabil city against the earthquake crisis. The city of Ardabil is facing the risk of an earthquake due to the location of several faults around the city and the history of smooth seismicity. In addition to this, the city of Ardabil has special features such as the centrality of the province and of course the high population, the concentration of most of the administrative and economic centers of the province, the presence of dilapidated and dense structures, etc., places this city among the sensitive centers that are exposed to the risks of Natural hazards, especially earthquakes. Therefore, knowing the vulnerable areas of the city can provide the preparations for proper crisis planning and management of the city, especially in the aspect of prevention and preparation against the earthquake crisis.

Data and Method

Considering that the current research seeks to develop practical knowledge in order to measure the level of vulnerability of Ardabil city against the earthquake crisis, therefore, the research method is practical in terms of purpose and analytical and exploratory in nature. In this regard, in the first place, the criteria affecting the vulnerability of Ardabil city against the earthquake crisis were identified and using the Delphi method of experts (20 elites and managers) and using the AHP technique in the Expert Choice software, the coefficient and priority of each criterion was determined. In the next step, fuzzy raster layers were prepared for each criterion in GIS software, and finally, the final vulnerability map of the city was obtained through the Fuzzy Overlay command and combining the layers. Also, in this research, the RADIUS method was used to estimate the damage caused by the earthquake in Ardabil city (destruction of buildings and human casualties).

Results and Discussion

The findings of the research show that out of the 15 examined criteria, the criteria of distance from the fault, proximity to hazardous uses and access to service centers were the most important for assessing vulnerability to earthquakes, and the least important was related to the slope level criterion. Be Also, about 13% of the fabric of Ardabil city is in the zone of high vulnerability and about 18% is in the zone of high vulnerability. Therefore, it can be said that about 31% of the fabric of Ardabil city is highly vulnerable to the earthquake crisis. On the other hand, the results of the RADIUS model show that 13853 buildings are subject to destruction, 36% of them are in region 1 and 29% of them are in region 4. Also, the number of injured in the possible earthquake is estimated to be 67117 and the number of dead is 3113.

Conclusion

Nowadays, one of the most important dangers that always threaten cities is the risk of an earthquake. Therefore, the city of Ardabil remains like many cities due to being located on several active faults, including sensitive areas and exposed to the dangers of earthquakes, which sooner or later will face such a challenge. Therefore, damage reduction and crisis management and ultimately empowering Ardabil city against risks such as earthquakes are necessary and necessary. In this regard, the current study was written with the aim of evaluating the level of vulnerability of the urban areas of Ardabil against the earthquake crisis, in order to identify vulnerable areas and prioritize plans and programs according to different levels of the city. The investigations carried out indicate that about 31% of the texture of Ardabil city is highly vulnerable to the earthquake crisis. The existence of informal and dilapidated textures in the context of the city with short-lived houses and dilapidated infrastructures has made a wide area of the city vulnerable to earthquakes. Also, fundamental deficiencies in land and urban housing laws and the urban crisis management system have taken advantage of the cause and increased the vulnerability of the city against possible risks. Also, the results show that most of the building destruction and human casualties caused by the possible earthquake will be related to the peripheral areas of the city, especially the north, east and southeast, and the planning and crisis management of these areas is the priority of the urban management system.



ارزیابی سطح آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر بحران زلزله با استفاده از تکنیک همپوشانی وزنی و مدل RADIUS (مطالعه موردی: شهر اردبیل)

اکبر صمدی^۱، رفعت شه‌ماری اردجانی^۲، علیرضا پورشیخیان^۳، سیده صدیقه حسنی‌مهر^۴، حسین اصغری^۵

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. رایانامه: adura1400@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه جغرافیا، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. تبریز، ایران. رایانامه: r.shahmari@iau-astara.ac.ir

۳. استادیار گروه جغرافیا، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. ایران. رایانامه: arpoursheykhian45@gmail.com

۴. دانشیار گروه جغرافیا، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. رایانامه: ss.hasanimehr@iau.astara.ac.ir

۵. استادیار گروه جغرافیا، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. رایانامه: h.asghari@iau-astara.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

زلزله به‌عنوان یکی از فاجعه‌بارترین و مخرب‌ترین انواع مخاطرات طبیعی محسوب می‌گردد که با خرابی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری، خسارت‌های گسترده‌ای را به اموال و دارایی‌ها به‌ویژه در نواحی شهری وارد کرده و تلفات انسانی بسیاری را موجب می‌گردد. بنابراین اولین و اساسی‌ترین مرحله در راستای برنامه‌ریزی و مدیریت بحران به‌منظور کاهش اثرات زلزله، شناسایی سطوح آسیب‌پذیر در برابر این بحران می‌باشد. در این راستا، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی سطح آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر بحران زلزله نگارش شده است. روش تحقیق در مطالعه‌ی حاضر آمیخته (کمی و کیفی) با هدف کاربردی و ماهیت تحلیلی و اکتشافی می‌باشد. جامعه‌ی آماری تحقیق نیز شامل مدیران و نخبگان شهر اردبیل بوده که حجم نمونه از طریق روش دلفی خبرگان ۲۰ تعیین گردیده است. همچنین در راستای تجزیه و تحلیل اطلاعات از تکنیک AHP در نرم‌افزار Expert Choice، روش Weighted Overlay در نرم‌افزار GIS و همچنین مدل تخمین خسارت RADIUS استفاده شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که با بررسی ۱۵ معیار، معیارهای فاصله از گسل، همجواری با کاربری‌های خطرزا و دسترسی به مراکز خدمات‌رسان بیشترین اهمیت (تأثیر) را جهت ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله داشته‌اند. همچنین با توجه به ارزش‌گذاری معیارهای مورد بررسی و تلفیق آن در روش همپوشانی فازی مشخص گردید که حدود ۱۳ درصد از بافت شهر اردبیل در پهنه‌ی آسیب‌پذیری خیلی زیاد و حدود ۱۸ درصد در پهنه‌ی آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. از طرفی نتایج مدل RADIUS نشان می‌دهد که تعداد ۱۳۸۵۳ ساختمان در معرض تخریب قرار دارند که ۳۶ درصد آنها در منطقه ۱ و ۲۹ درصد آنها در منطقه ۴ می‌باشند. همچنین تعداد مجروحان در زلزله‌ی احتمالی ۶۷۱۱۷ و تعداد کشته‌شدگان ۳۱۱۳ برآورد شده است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

کلیدواژه‌ها:

آسیب‌پذیری،

زلزله، مدل AHP،

مدل RADIUS،

شهر اردبیل

استناد: صمدی، اکبر؛ شه‌ماری اردجانی، رفعت؛ و پورشیخیان، علیرضا؛ حسنی‌مهر، سیده صدیقه (۱۴۰۳). ارزیابی سطح آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر

بحران زلزله با استفاده از تکنیک همپوشانی وزنی و مدل RADIUS (مطالعه موردی: شهر اردبیل). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۸ (۹۰)، ۱۹۷-۲۲۰



<http://doi.org/10.22034/gp.2024.58990.3198>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

امروزه اکثر جمعیت جهان در مناطق شهری ساکن هستند و طبق پیش‌بینی‌های سازمان ملل تا سال ۲۰۵۰ حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی خواهند کرد (Chen, 2021:72; UN, 2016:1). در این راستا با توجه به رشد فزاینده‌ی شهرنشینی، شهرها به‌عنوان بستر وقوع حوادث دارای اهمیت زیادی می‌باشند (پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳:۵۶) و شناخت فضاهای شهری و برنامه‌ریزی و طراحی مناسب آن‌ها راهی به سوی برآوردن نیازهای گوناگون شهروندان در سه بعد پیشگیری، مقابله و اقدامات پس از بحران محسوب می‌گردد (Ceferino et al, 2020:2; Faturechi and Miller-Hooks, 2015:3). بنابراین در راستای برخورد با انواع بحران‌ها بررسی وضعیت موجود در ابعاد مختلف (Olsen et al, 2023:2) و توجه به اصل شناخت، عامل اولیه و اساسی می‌باشد (Eriksson, 2023:2) و برنامه‌ریزی و طراحی شهری بایستی با توجه به این اصل فضاهای شهری را قادر سازد تا گزینه‌های متعددی را در هر زمان جهت مقابله و کاهش خطرپذیری و اثرات بحران ارائه نماید (Cremen et al, 2022:2). در این بین، زلزله به‌عنوان یکی از فاجعه‌بارترین و مخرب‌ترین انواع مخاطرات طبیعی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مطرح بوده است (Dong and Shan, 2013:85; Heilig, 2012:555). استقرار بسیاری از سکونتگاه‌های انسانی در سرزمین‌هایی که در خطر وقوع زلزله قرار دارند، لزوم توجه به سیاست‌ها، طرح‌ها و برنامه‌هایی را برای کاهش آسیب و مدیریت بحران اجتناب‌ناپذیر ساخته است؛ چراکه وقوع زلزله، ناگهانی است و می‌تواند در سطح وسیعی از یک منطقه و ابعاد مختلف بازتاب داشته باشد و حتی مسائل ملی را تحت شعاع قرار دهد (Heinzlef et al, 2020:3). ابعاد حادثه گاه آنچنان وسیع می‌باشد که نیازمند توجه و پشتیبانی در سطح بین‌المللی است. در چنین شرایطی در نظر داشتن کاهش آسیب‌پذیری و مدیریت بحران اجزاء لاینفک برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شود (Chen and Miller-Hooks, 2012:985; Gehl et al, 2022:3996). با توجه به اهمیت شناسایی سطح آسیب‌پذیری در رویکرد مدیریت بحران و برنامه‌ریزی و طراحی بر مبنای وضعیت موجود، هدف از تحقیق حاضر ارزیابی سطح آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر بحران زلزله می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که ایران به لحاظ شرایط جغرافیایی و زمین‌شناختی در زمره کشورهای است که آسیب‌پذیری بسیار زیادی در برابر سوانح طبیعی از جمله زلزله دارد، به‌طوری‌که ۳۱/۷ درصد از کل مساحت آن در مناطقی واقع شده که در معرض سوانح طبیعی بوده و اسکاپ در گزارش سوانح مرتبط با مخاطرات تکتونیکی، ایران را جزء ده کشور اول دنیا ذکر می‌کند (UNESCO, 2010:509). شهر اردبیل نیز با توجه به قرار گرفتن چندین گسل در اطراف شهر و سابقه‌ی لرزه‌خیزی هموار با خطر وقوع زلزله مواجه است. علاوه بر این برخورداری شهر اردبیل از ویژگی‌های خاصی از جمله مرکزیت استان و بالطبع بالا بودن جمعیت، تمرکز اکثر مراکز اداری و اقتصادی استان، وجود بافت‌های فرسوده و پرتراکم و غیره، این شهر را در زمره مراکز حساسی قرار می‌دهد که در معرض خطرات ناشی از وقوع مخاطرات طبیعی به‌ویژه زلزله قرار دارد. در حال حاضر این مجموعه عوامل باعث شده تا سطح آسیب‌پذیری شهر اردبیل و شهروندان آن در برابر مخاطرات طبیعی به‌ویژه زلزله بالا باشد. بنابراین شناخت مناطق آسیب‌پذیر شهر می‌تواند مقدمات برنامه‌ریزی و مدیریت بحران مناسب شهر به‌ویژه در بعد پیشگیری و آمادگی را در برابر بحران زلزله فراهم سازد. با توجه به اهداف مدنظر تحقیق پاسخگویی به سؤال‌های زیر اساس کار پژوهش حاضر می‌باشد:

- سطوح مختلف شهر اردبیل از منظر آسیب‌پذیری در برابر بحران زلزله در چه وضعیتی قرار دارند؟
- میزان آسیب‌پذیری سطوح مختلف شهر اردبیل از منظر تخریب ساختمان‌ها و تلفات انسانی در صورت وقوع زلزله‌ی احتمالی چگونه است؟

پیشینه تحقیق

در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها در برابر بحران زلزله مطالعات و پژوهش‌های متعددی طی سالیان اخیر انجام گرفته است که در ادامه به برخی از پژوهش‌های مرتبط با موضوع اشاره می‌گردد.

مشک‌سار و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی با ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی بافت منطقه‌ی ۳ شهرداری شیراز در برابر زلزله در روش RADIUS، به این نتایج دست یافته‌اند که در صورت وقوع زلزله‌ای با بزرگی ۷/۴ ریشتر، بیش از یک‌سوم بناهای منطقه

تخریب خواهد شد و حدود ۳۷۰۰ نفر کشته و ۳۰۵۰۸ زخمی برجا خواهد ماند. همچنین نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بافت ارگانیک، شبکه‌ی ارتباطی نامنظم و نبود تجهیزات شهری مناسب، آسیب‌پذیری شهرها را در برابر زلزله افزایش می‌دهد. جعفرنیا و همکاران (۱۳۹۸)، در تحقیق خود به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در شهر لار پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که در حدود ۲۹ درصد از مساحت ساخته‌شده‌ی شهر لار در معرض آسیب‌پذیری بسیار زیاد تا زیاد قرار دارد، حدود ۱۷ درصد در شرایط متوسط آسیب‌پذیری و حدود ۵۴ درصد نیز در محدوده‌ی آسیب‌پذیری کم تا بسیار کم قرار می‌گیرند. همچنین مشخص گردید که هسته‌ی مرکزی شهر قدیم لار با توجه به قرارگیری آن در بافت فرسوده و نبود راه‌های شریانی و همچنین دوری از ایستگاه‌های آتش‌نشانی، درمانگاه و بیمارستان و تراکم بالای ساختمان‌ها و کیفیت پایین ابنیه از آسیب‌پذیرترین نقاط این شهر می‌باشد. خدمت‌زاده و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی به تحلیل شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری با رویکرد مدیریت بحران زلزله در شهر ارومیه پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در مناطق با شیب‌های بیشتر از ۲۰ درصد و نواحی با تراکم جمعیتی بالا بیشترین آسیب‌پذیری مشاهده می‌شود. نواحی با آسیب‌پذیری خیلی زیاد با ۳۴/۱۲ درصد، زیاد با ۱۱/۸۱ درصد، متوسط با ۳۰/۴۷ درصد، کم با ۲۰/۸۹ درصد و خیلی کم با ۲/۷ درصد از مساحت بلوک‌های آماری را به خود اختصاص دادند. در حالت کلی می‌توان گفت که ۴۵/۹۳ درصد از محدوده‌ی مورد مطالعه بر اساس معیارهای استفاده‌شده در تحلیل آسیب‌پذیرند. میردهقان اشکذری و همکاران (۱۴۰۱)، در پژوهشی با ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری شهر یزد در برابر زلزله با این نتایج دست یافته‌اند که براساس سناریوی گسل انار، ۲۱ درصد شهر آسیب خواهد دید و منطقه‌ی ۲ آسیب‌پذیرتر از بقیه‌ی مناطق است؛ براساس سناریوی گسل مهریز-تفت نیز ۳۸ درصد شهر آسیب خواهد دید و منطقه‌ی ۲ آسیب‌پذیرتر از مناطق دیگر است. غضنفرپور و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی به تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سکونتگاه‌های انسانی شهرستان باشت پرداخته‌اند. نتایج پژوهش حاکی از آن است که از مساحت ۱۰۳۷/۶۴ کیلومترمربع شهرستان باشت، ۱۵۰/۸۰ کیلومترمربع معادل ۱۴/۵۳ درصد، در پهنه‌ی بدون خطر و ۲۸۲/۲۵ کیلومترمربع معادل ۲۷/۲۵ درصد در پهنه‌ی کم‌خطر، ۲۷۳/۲۹ کیلومترمربع معادل ۲۶/۳۳ درصد در پهنه‌ی متوسط، ۲۳۳/۲۰ کیلومترمربع معادل ۲۲/۴۷ درصد در پهنه‌ی زیاد و ۹۸/۳۲۰ کیلومترمربع معادل ۹/۴۷ درصد در پهنه‌ی بسیار زیاد از خطر زلزله قرار دارند. همچنین نتایج حاصل از خطر زلزله نشان می‌دهد که شهر باشت بر روی پهنه با خطر بالای زلزله قرار دارد. سارما و سوتاپا^۱ (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ای با ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های RCC^۲ گوهواتی^۳ هند در برابر زلزله به این نتایج دست یافته‌اند که از مجموع ۳۱ بخش شهر، پنج بخش با بالاترین تراکم جمعیت و ساختمان‌های بلند به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیر در برابر زلزله در نظر گرفته شده‌اند. پربادی^۴ و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی تحت عنوان یادگیری از بلایای زلزله‌ی گذشته: نیاز به سیستم مدیریت دانش برای افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها در اندونزی به این نتایج دست یافته‌اند که کمبود اطلاعات و دانش در مورد عملکرد تاب‌آوری زیرساخت‌ها در هنگام زلزله در اندونزی، تصمیم‌گیری مبتنی بر دانش در برنامه‌ریزی، توسعه و بهره‌برداری از زیرساخت‌های تاب‌آور را محدود کرده است. از این‌رو، توسعه‌ی یک سیستم مدیریت دانش برای زیرساخت‌های مقاوم در برابر زلزله در اندونزی، برای نجات جان بیشتر و کاهش اختلالات اقتصادی ناشی از آسیب‌های زیرساختی و در نتیجه کمک به دستیابی به اهداف توسعه‌ی پایدار ضروری می‌باشد. گل^۵ و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی تحت عنوان مدیریت ترافیک جاده‌ای اضطراری در شرایط پس از زلزله در شبکه‌ی جاده‌ای رشته‌کوه پیرنه^۶ (فرانسه) به این نتایج دست یافته‌اند که سیستم تصمیم‌گیری پشتیبانی به‌منظور مدیریت بحران پس از زلزله بایستی چندین گزینه‌ی سفر همچون سریع‌ترین

1 - Sarmah and Sutapa

^۲ - RCC بتن متراکم‌شده‌ی غلتکی با اسلامپ صفر می‌باشد که شامل سنگ‌دانه‌هایی با دانه‌بندی متراکم، ماسه، مصالح سیمانی و آب است.

3 - Guwahati

4 - Pribadi

5 - Gehl

6 - Pyrenees mountain range

یا امن‌ترین مسیرها از منطقه‌ی آسیب‌دیده به بیمارستان‌های نزدیک یا از مراکز نجات به منطقه‌ی آسیب‌دیده را مورد ارزیابی و مشخص نماید. کاپوکو^۱ و همکاران (۲۰۲۲)، نیز در پژوهش خود تحت عنوان تاب‌آوری شهری و ساخت محیطی پایدار و ایمن با تأکید بر سوانح طبیعی به این نتایج دست یافته‌اند که تاب‌آوری به‌عنوان یک فرآیند پویا با دیدگاه بین رشته‌ای و مشارکت‌های چندجانبه و با تأکید بر سیاست‌گذاری و حکمروایی، سازگاری در برابر آشفتگی‌های بیرونی و داخلی و کاهش آسیب‌پذیری‌های شهری را فراهم می‌نماید. بروسا^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، نیز در مطالعه‌ای تحت عنوان ایمن‌سازی کلیسای مدونا دل‌سوله^۳ در مرحله‌ی اضطراری زلزله‌ی ۲۰۱۶ (پس از زلزله)، به نقش و قابلیت همکاری بازیگران مختلف به‌عنوان ابزاری برای کاهش خطر لرزه‌ای میراث ساخته‌شده‌ی آسیب‌دیده پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که قابلیت همکاری در آمادگی در برابر خطر می‌تواند به‌طور مؤثر در میان بازیگران مختلف درگیر در حفاظت از میراث فرهنگی در مرحله‌ی اضطراری پس از زلزله توسعه یابد. همچنین نتایج این پژوهش اهمیت آمادگی در برابر خطر را نشان می‌دهد، زیرا یک واکنش سریع می‌تواند به‌طور مؤثر پیامدهای منفی بر میراث ساخته‌شده را کاهش دهد. در عین حال، مزیت دستیابی به قابلیت همکاری خوب همه‌ی بازیگران درگیر در حفاظت از میراث فرهنگی در مرحله‌ی اضطراری را نشان می‌دهد، زیرا آنها می‌توانند به‌طور قابل توجهی ایمنی باقیمانده‌ی بناهای تاریخی آسیب‌دیده را افزایش دهند.

بررسی پیشینه‌ی پژوهشی نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری شهر در برابر مخاطرات محیطی به‌ویژه زلزله در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است و هرکدام از این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های مختلف به ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها اقدام نموده‌اند. در تحقیق حاضر که به نوعی نوآوری آن محسوب می‌گردد ارزیابی آسیب‌پذیری شهر با بهره‌گیری از دو مدل متفاوت یعنی همپوشانی وزنی و مدل RADIUS مدنظر می‌باشد. به عبارتی بهره‌گیری از مدل‌های مختلف به ارائه‌ی نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر خواهد انجامید و در همین راستا، تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های مختلف و تطبیق نتایج به‌دنبال شناسایی وضعیت آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله می‌باشد.

مبانی نظری

وقوع زمین‌لرزه در یک منطقه، پدیده‌ای پیچیده‌ای است که فرآیندهای زمانی-مکانی در مقیاس‌های مختلف را دربر می‌گیرد (Zhou and Leung, 2017:121) و ساخت‌وسازها به‌ویژه در نزدیک گسل‌ها را با خطر لرزه‌خیزی بسیار بالایی روبه‌رو می‌سازد (Tielin and Wei, 2017:138). درواقع، عمده‌ترین تلفات انسانی زلزله ناشی از آسیب وارده به ساختمان‌ها و سازه‌ها بوده (اسمعیل‌پور و همکاران، ۲۸:۱۴۰۱) و طبق برآوردهای انجام‌شده در زلزله‌های به‌وقوع پیوسته در جهان بالای ۷۵ درصد از مرگ‌ومیرها در زلزله ناشی از ریزش مستقیم ساختمان‌ها بوده و اگر حوادث ثانویه زلزله را هم به آن اضافه کنیم، بیش از ۹۰ درصد مرگ‌ومیرها به ریزش ساختمان‌ها برمی‌گردد (مشک‌سار و همکاران، ۱۰۸:۱۳۹۷). همچنین بیشترین خسارت فیزیکی و تلفات انسانی چنین حوادثی نتیجه‌ی نبود برنامه‌ریزی و ضعف در استانداردهای ساختمانی و زیرساخت‌ها است (Kreimer, 2003:2; Linares and Alejandra, 2012:2). علاوه بر خسارات فیزیکی و تلفات انسانی، زلزله دارای اثرات منفی در ابعاد مختلف می‌باشد (قائدرحمتی و عظیمی‌نیا، ۲۸۰:۱۳۹۶). در این راستا، کاس^۴ و همکاران (۲۰۱۴)، شوک، افسردگی، سردرگمی و نگرانی‌های اجتماعی و ژوه^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، خشم و عصبانیت، جرم و رفتار مجرمانه را از اثرات منفی زلزله ذکر کرده‌اند. همچنین بر اساس پژوهش‌های آئوکی^۶ (۲۰۱۴) و وانگ و لیو^۱ (۲۰۱۲)، سطح اقتصادی، بهداشتی، شادی و رفاه افراد پس از

1 - Kapucu

2 - Brusa

3 - Madonna del Sole

4 - Cas

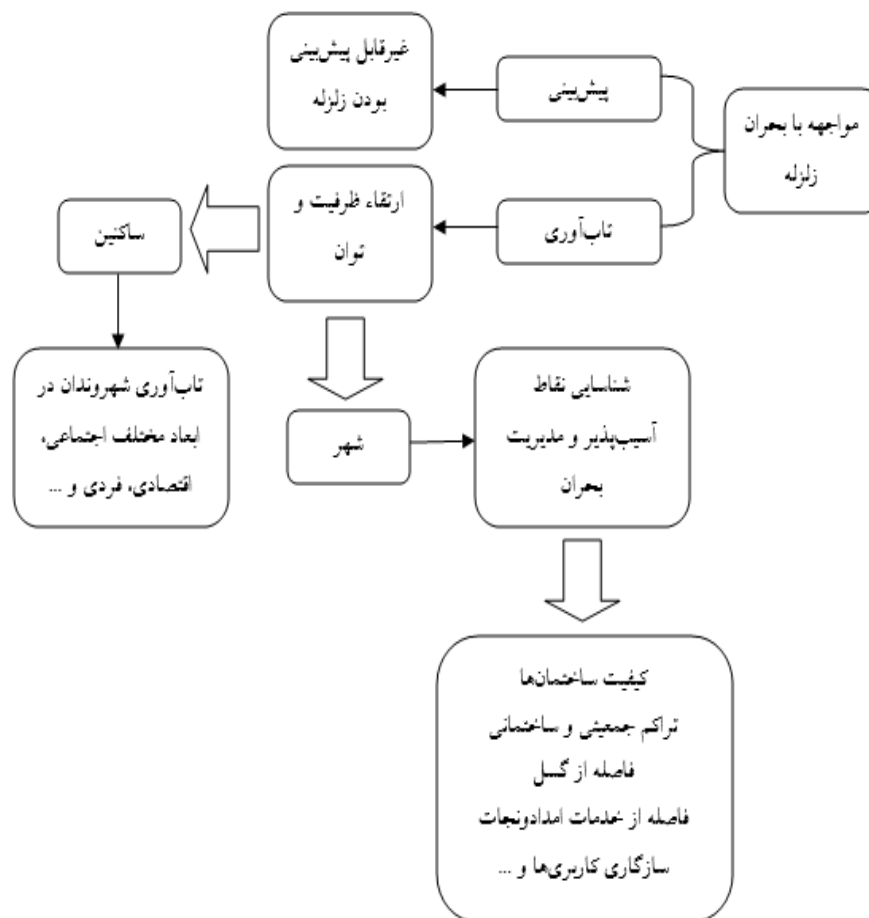
5 - Xu

6 - Aoki

زلزله به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و برنامه‌ریزی و طراحی شهرها بر این مبنا به منظور جلوگیری از خسارات مختلف زلزله ضرورتی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

آسیب‌پذیری در برابر خطرات زلزله یک مسئله‌ی بزرگ در شهرهای کشورهای در حال توسعه است که نرخ رشد سریع جمعیت را تجربه می‌کنند، اما در برنامه‌ریزی و آماده‌سازی مناسب برای خطرات طبیعی، مانند زلزله، ناتوان هستند (Heilig, 2012:555). انتظار می‌رود که رشد جمعیت شهری در دهه‌های آینده افزایش یابد (Chen, 2021:72)، که این موضوع منجر به افزایش توسعه‌ی ساختار فیزیکی شهری و ساخت‌وسازهای اضافی در شهرها می‌شود (Sharifi and Yamagata, 2014:1492). بر این اساس، آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی در شهرها می‌تواند در آینده حتی شدیدتر شود. این آسیب‌ها می‌تواند منجر به پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی گردند که به‌طور تصاعدی رشد می‌کنند (Heinzlef et al, 2020:3). در این راستا، در مواجهه با سوانح دو نوع راهبرد کلی مطرح است: راهبرد پیش‌بینی و راهبرد تاب‌آوری. راهبرد اول برای آمادگی روبه‌رو شدن با مشکلات و معضلات به‌کار می‌رود و راهبرد دوم برای مقابله با مشکلات ناشناخته استفاده می‌شود (Normandin et al, 2011:2). با توجه به اینکه بلایای طبیعی به‌ویژه زلزله غیرقابل پیش‌بینی هستند؛ می‌بایست با به‌کارگیری راهبرد دوم، ظرفیت و توان ساکنین و شهر برای مقاومت و زندگی در کنار بلایا را بهبود بخشید. در این راستا شناسایی نقاط آسیب‌پذیر گامی اساسی محسوب می‌شود که می‌توان اولویت‌های مداخله در بافت‌ها و فضاهای مختلف را مشخص نماید. بدین منظور نیاز به بررسی ابعاد مختلف همچون وضعیت تراکم جمعیتی و ساختمانی، کیفیت ساختمان‌ها، فاصله از گسل، فاصله از مراکز امدادرسانی و سازگاری کاربری‌ها احساس می‌گردد (Deverell et al, 2019:487).

همچنین می‌توان عنوان کرد که در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله دو دسته‌ی کلی عوامل انسان‌ساخت و طبیعی تأثیرگذارند؛ عواملی که انسان‌ساز تلقی می‌شود و نحوه‌ی تکوین و روند تغییرات آن بیشتر جنبه‌ی انسانی دارد و در حالت کلی نتیجه‌ی دخالت مستقیم انسان است و عواملی که مبنای تشکیل آنها ریشه‌ای طبیعی دارد و این در حالی می‌باشد که چگونگی رفتار و دخالت‌های انسانی می‌تواند در چگونگی بروز و ظهور این نوع از شرایط طبیعی در زندگی بشری نقش تعیین‌کننده داشت (Jaiswal and Wald, 2010:1019). عوامل انسانی شامل نوع مصالح، کیفیت ابنیه، تراکم جمعیت، بعد خانوار، کاربری اراضی، معابر، تعداد طبقات، تراکم ساختمان‌ها و تأسیسات خطرزا است. عوامل طبیعی نیز شامل سازندهای طبیعی، فاصله از گسل، حداکثر شتاب زلزله، مدت تداوم زلزله می‌باشد (Tang and Wen, 2009:873). همچنین بر اساس تجربیات حاصله از زلزله‌هایی که تاکنون در اکثر نقاط دنیا رخ داده‌اند و با بررسی علل اساسی و مؤثر در تخریب ساختمان‌ها بر اثر وقوع زلزله، بیشتر متخصصان بر این اعتقاد هستند که خسارت‌های وارده بر ساختمان‌ها به‌طور فراوانی بستگی به ساخت زمین محل سازه دارد و به همین دلیل هم در کشورهایی که کارهای پژوهشی گسترده‌ای بر روی مسئله‌ی مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله انجام داده‌اند، در پاره‌ای از موارد تخریب ساختمان به هنگام زلزله در شرایطی صورت گرفته است که ساختمان به‌صورت نسبتاً سالم بر روی زمین افتاده است و این در شرایطی است که نقش اساسی را در تخریب سازه، زمین و شرایط زمین‌شناسی به عهده داشته است (Haitao et al, 2017:120). با توجه به مطالب ارائه‌شده می‌توان مدل مفهومی تحقیق را به شرح شکل (۱) ترسیم نمود.



شکل (۱). مدل مفهومی تحقیق

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۲)

داده و روش‌ها

با توجه به اینکه تحقیق حاضر به دنبال توسعه‌ی دانش کاربردی در راستای سنجش سطح آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر بحران زلزله است، لذا روش تحقیق از نظر هدف، کاربردی بوده و از نظر ماهیت تحلیلی و اکتشافی می‌باشد. در این راستا در وهله‌ی اول معیارهای تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری شهر در برابر بحران زلزله بر اساس مطالعات اسنادی شناسایی و با استفاده از روش دلفی خبرگان (۲۰ نفر از نخبگان و مدیران) و بهره‌مندی از تکنیک AHP در نرم‌افزار Expert Choice به تعیین ضریب و ارجحیت هرکدام از معیارها پرداخته شده است. ویژگی‌های گروه خبرگان در جدول (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است با توجه به اهمیت موضوع از طریق روش نمونه‌گیری غیرتصادفی هدفمند جهت تعیین حجم نمونه استفاده گردیده است. همچنین در راستای انتخاب معیارهای تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری شهر در برابر زلزله پس از مطالعات اسنادی، طی دو مرحله تشکیل گروه‌های کانونی و از طریق سؤالات باز به جمع‌بندی معیارها در شهر اردبیل پرداخته شده و در نهایت پرسشنامه‌ی بسته تدوین گردیده است.

جدول (۱). ویژگی‌های گروه دلفی خبرگان

تعداد	سمت	تعداد	تحصیلات	تعداد	سن	تعداد	جنسیت
۴	شهرداری	۷	فوق لیسانس	۱	۱۹ تا ۲۹ سال	۱۷	مرد
۶	مدیریت بحران			۴	۳۰ تا ۳۹ سال		
۳	شهرداری و برنامه‌ریزی شهری	۱۳	دکتری	۱۲	۴۰ تا ۴۹ سال	۳	زن
۷	مهندسی عمران-مهندسی زلزله			۳	۵۰ سال و بالا		

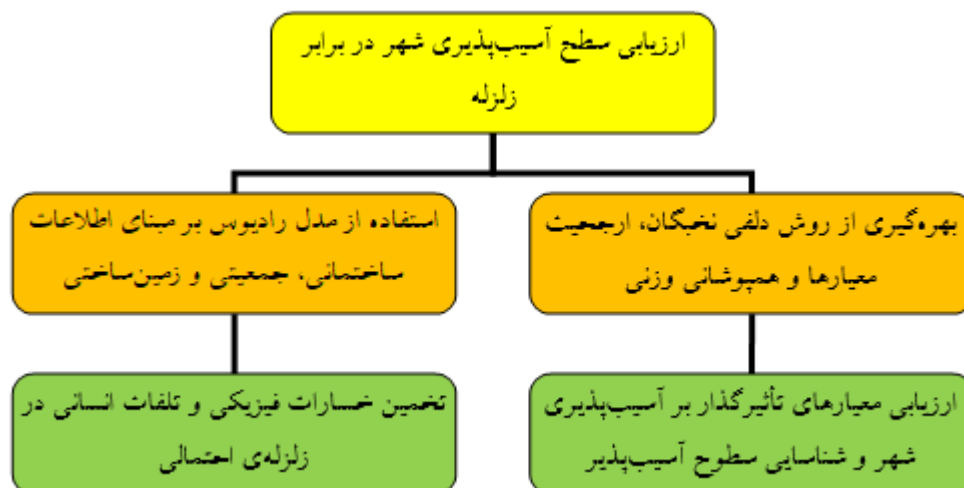
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۲)

در مرحله‌ی بعدی به تهیه‌ی لایه‌های رستری برای هر معیار در نرم‌افزار GIS اقدام گردیده و در نهایت نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری شهر از طریق دستور Weighted Overlay و تلفیق لایه‌ها به‌دست آمده است. همچنین در تحقیق حاضر به‌منظور تخمین آسیب‌های ناشی از زلزله در شهر اردبیل (تخریب ساختمان‌ها، شریان‌های حیاتی و تلفات انسانی) از روش RADIUS استفاده شده است. در روش RADIUS اطلاعات پایه شامل برآورد شدت لرزه‌ای، خسارات وارده به ساختمان‌ها، داده‌های تراکم جمعیتی، نوع ساختمان‌ها و توزیع آن‌ها، اندازه و حد و مرز منطقه‌ی مورد مطالعه و نوع خاک می‌باشد. از طرفی داده‌های به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر نیز بر اساس اطلاعات موجود در آرشیو شهرداری اردبیل و همچنین سازمان‌های زمین‌شناسی استان اردبیل و لرزه‌نگاری ایران به شرح زیر می‌باشد:

- (۱) نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان اردبیل (تهیه‌شده از سازمان زمین‌شناسی استان اردبیل)؛
 - (۲) نقشه‌ی بلوک‌های آماری شهر اردبیل در راستای بررسی تراکم‌های جعبیتی و ساختمانی و کیفیت ساختمان‌ها (تهیه‌شده از شهرداری اردبیل)؛
 - (۳) نقشه‌ی معابر و شریان‌های حیاتی شهر؛
 - (۴) نقشه‌ی گسل‌ها (با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی گسل‌های فعال ایران)؛
 - (۵) نقشه‌ی بزرگی زمین‌لرزه‌ها و فاصله از مرکز سطحی زمین‌لرزه‌ها (تهیه‌شده از مؤسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران).
- به‌طور کلی فرآیند روش RADIUS نیز به شرح زیر است:

شبکه‌بندی منطقه (برای تخمین خسارات نیاز به شبکه‌بندی منطقه‌ی مورد بررسی بوده و مساحت این شبکه از ۵۰۰ مترمربع تا ۲ کیلومترمربع متغیر می‌باشد که در تحقیق حاضر برای افزایش دقت نتایج ۶۰۰ مترمربع تعیین شده است)، تعیین وضعیت خاک منطقه (جنس خاک به چهار دسته‌ی سنگ سخت، سنگ نرم، خاک متوسط و خاک نرم قابل تقسیم است که جنس خاک محدوده‌ی مورد نرم و متوسط یعنی رس و ماسه می‌باشد)، طبقه‌بندی ساختمان‌ها (طبقه‌بندی ساختمان‌ها بر مبنای مصالح به‌کاررفته در آنها، کاربری و تعداد طبقات قابل انجام است) و تدوین سناریو (موقعیت نسبت به گسل، عمق، بزرگی و زمان وقوع زلزله).

به‌طور کلی فرآیند انجام کار در پژوهش حاضر به شرح شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲). فرایند انجام تحقیق

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۲)

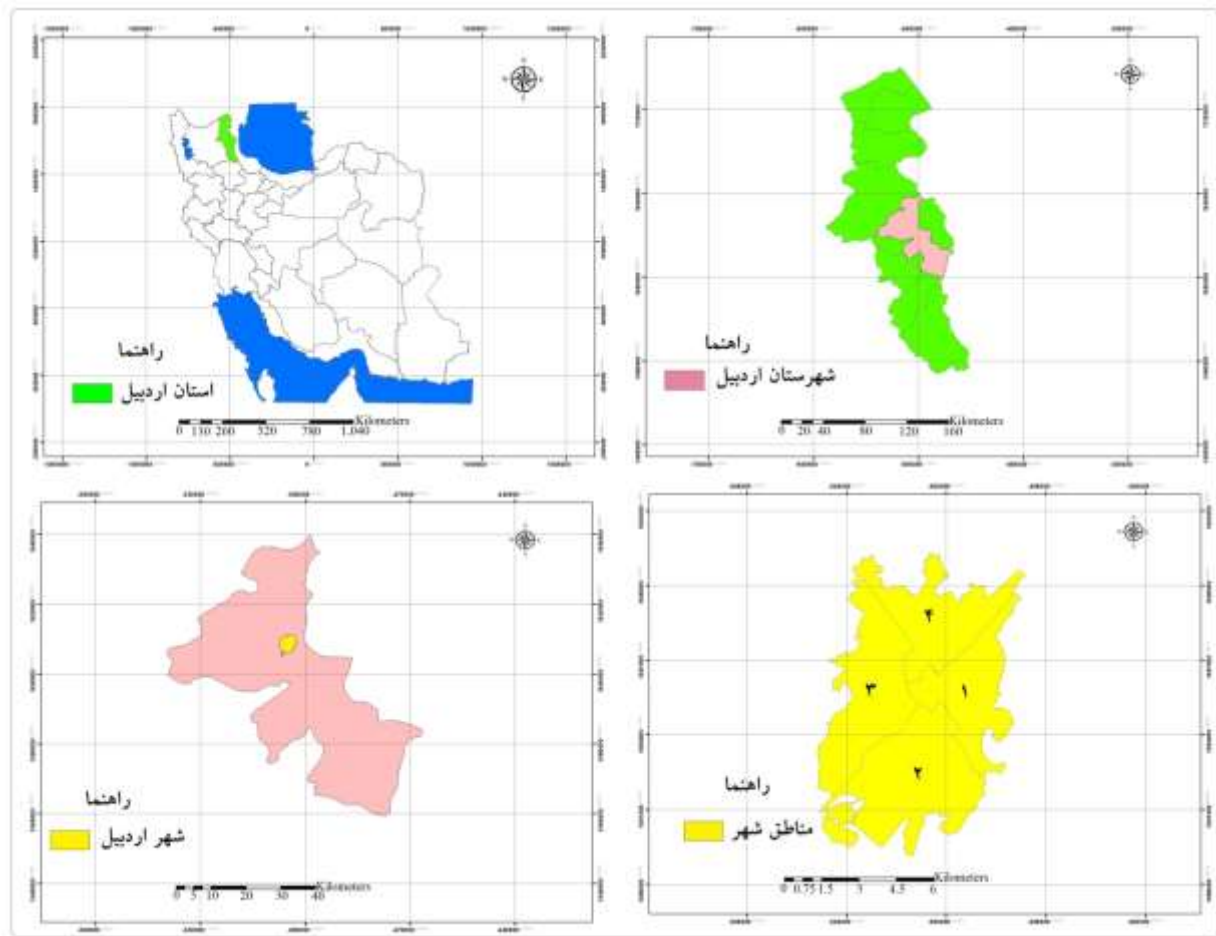
در مورد اهمیت و دقت مدل AHP می‌توان عنوان کرد که این مدل روشی برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری و انتخاب بهترین گزینه برای زمانی است که تصمیم‌گیرنده دارای معیارهای متعدد می‌باشد. همچنین این مدل یک سنتز ریاضی و یک شیوه‌ی جبری تصمیم‌گیری با مقیاس نسبی است. در این روش با استفاده از یک شبکه‌ی سیستمی، شاخص‌های مختلف و ضوابط و معیارهای چندگانه با ساختارهای چندسطحی اولویت‌دار برای رتبه‌بندی یا تعیین اهمیت گزینه‌های مختلف یک فرآیند تصمیم‌گیری پیچیده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی نیز می‌توان بیان داشت که AHP یک ابزار تصمیم‌گیری چندمنظوره‌ی قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای حل مسائل پیچیده با در نظرگیری جنبه‌های کیفی و کمی است (Ozdagoglu and Ozdagoglu, 2007:66). همچنین شاخص سازگاری در این مدل (کمتر از ۰/۱) نشانگر دقت و اعتماد به نتایج حاصل از مقایسه‌ی زوجی معیارها و انتخاب گزینه‌های ایده‌آل می‌باشد.

مدل RADIUS نیز به‌علت تبدیل PGA (شدت زلزله) به شدت مرکالی اصلاح‌شده، به‌کارگیری تابع آسیب‌پذیری برای انواع ساختمان‌ها، به‌کارگیری تابع خسارات تلفات برای تراکم‌های مختلف ساختمانی و انسانی و محاسبه‌ی تابع میرایی و تقویت عوامل خاک از دقت بالایی در محاسبات خود برخوردار است.

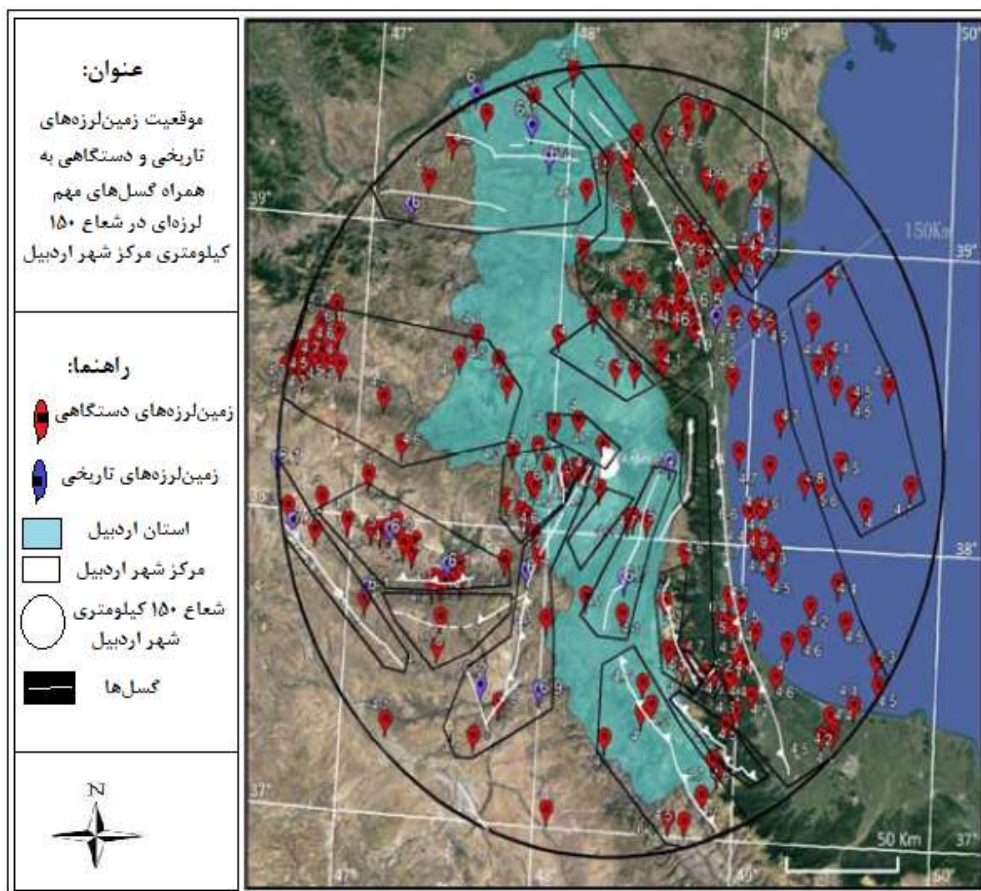
همچنین دقت این مدل در ارائه‌ی نتایج در سازمان بین‌المللی مخاطرات زمین آمریکا و همچنین پژوهش‌های مختلف مانند (مشک‌سار و همکاران، ۱۳۹۲؛ Westen et al, 2004؛ Gulati, 2006)، مورد تأیید قرار گرفته است.

معرفی محدوده‌ی مورد مطالعه

شهر اردبیل مرکز استان و شهرستان اردبیل می‌باشد. این شهر در شمال غربی کشور و در موقعیت ریاضی ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۴۵ متر می‌باشد. این شهر در میان کوه‌های تالش و سیلان استقرار یافته و دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل می‌باشد. جمعیت شهر اردبیل بر اساس نتایج نهایی سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، ۶۰۵۹۹۲ هزار نفر بوده است که از این جهت، هجدهمین شهر پرجمعیت ایران به شمار می‌رود. همچنین شهر اردبیل را زنجیره‌ای از گسل‌ها همچون گسل نئور، گسل آستارا، گسل سرعین، گسل دویل و گسل هیر احاطه کرده است. این گسل‌ها و سابقه‌ی لرزه‌خیزی آنها و همین‌طور قرارگیری شهر اردبیل روی سازندهای سست ابرفتی همواره شهر اردبیل را در برابر وقوع زمین‌لرزه مستعد آسیب ساخته است. در شکل (۳) موقعیت جغرافیایی شهر اردبیل و در شکل (۴) موقعیت زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی به همراه گسل‌های مهم لرزه‌ای در شعاع ۱۵۰ کیلومتری مرکز شهر اردبیل نمایش داده شده است.



شکل (۳). موقعیت جغرافیایی شهر اردبیل در ایران و استان اردبیل
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۲)



شکل (۴). موقعیت زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی به همراه گسل‌های مهم لرزه‌ای در شعاع ۱۵۰ کیلومتری مرکز شهر اردبیل
 منبع: (خدادی جید و پورزینلی، ۱۴۰۱)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی شهر اردبیل در برابر زلزله

الف) شناسایی شاخص‌های تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله
 به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی شهر اردبیل در برابر زلزله و تعیین شاخص‌های تأثیرگذار بر آن از روش اسنادی استفاده شده و با بهره‌مندی از گروه دلفی خبرگان این شاخص‌ها بومی گردیده‌اند که در جدول (۲) نظریات حجم نمونه ارائه شده است.

جدول (۲). ماتریس معیارها و زیرمعیارها و تعیین سطح آسیب‌پذیری آن‌ها

معیار	زیرمعیار	آسیب‌پذیری خیلی کم	آسیب‌پذیری کم	آسیب‌پذیری متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	آسیب‌پذیری خیلی زیاد
اسکان غیررسمی C1	بافت اسکان غیررسمی	۱	۳	۵	۷	۹
بافت فرسوده C2	بافت فرسوده	*				*
تراکم ناخالص جمعیتی C3	کمتر از ۳۰ نفر در هکتار	*				
	۳۱ تا ۹۰ نفر در هکتار		*			
	۹۱ تا ۱۴۰ نفر در هکتار			*		
تراکم ساختمانی C4	۱۴۱ تا ۲۰۰ نفر در هکتار				*	
	بیش از ۲۰۰ نفر در هکتار					*
	کمتر از ۵۰ درصد	*				
	۵۰ تا ۱۰۰ درصد		*			

ارزیابی سطح آسیب پذیری مناطق شهری در برابر بحران زلزله با استفاده از ... | صمدی وشهماری اردجانی وپورشخیان و دیگران ۲۰۷

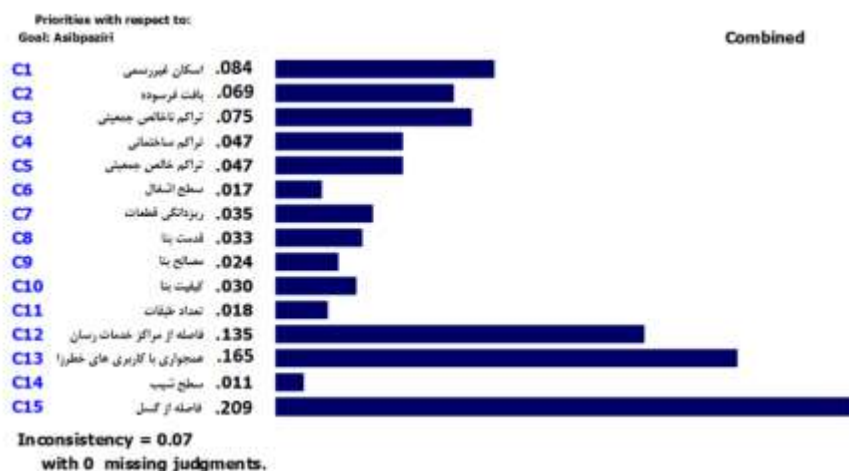
		*			۱۰۰ تا ۱۵۰ درصد	
	*				۱۵۰ تا ۲۰۰ درصد	
*					بیش از ۲۰۰ درصد	
			*		کمتر از ۱۵۰ نفر در هکتار	تراکم خالص جمعیتی C5
			*		۱۵۰ تا ۳۰۰ نفر در هکتار	
	*				۳۰۰ تا ۴۰۰ نفر در هکتار	
*					بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰ نفر در هکتار	
			*		۰ تا ۲۰ درصد	سطح اشغال C6
			*		۲۰ تا ۴۰ درصد	
		*			۴۰ تا ۶۰ درصد	
	*				۶۰ تا ۸۰ درصد	
*					۸۰ تا ۱۰۰ درصد	
			*		بیش از ۴۰۰ مترمربع	ریزدانگی قطعات C7
			*		۳۰۰ تا ۴۰۰ مترمربع	
	*				۲۰۰ تا ۳۰۰ مترمربع	
*					کمتر از ۱۰۰ مترمربع	
			*		زیر ۵ سال	قدمت بنا C8
			*		۵ تا ۱۰ سال	
		*			۱۰ تا ۱۵ سال	
	*				۱۵ تا ۳۰ سال	
*					بیش از ۳۰ سال	
			*		اسکلت بتنی	مصالح بنا C9
			*		اسکلت فلزی	
		*			آجر و آهن	
*	*				آجر و چوب خشت و گل	
			*		در حال ساخت	کیفیت بنا C10
			*		نوساز	
		*			مرمتی	
*	*				تخریبی مخروبه	
			*		یک طبقه	تعداد طبقات C11
			*		دو طبقه	
		*			سه طبقه	
	*				چهار طبقه	
*					پنج طبقه و بیشتر	
			*		زیر ۲۵۰ متر	فاصله از مراکز خدمات رسان C12
			*		۲۵۰ تا ۵۰۰ متر	
		*			۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر	
*	*				بیش از ۱۰۰۰ متر	
			*		بیش از ۱۰۰۰ متر	فاصله از کاربری‌های خطرزا C13
			*		۷۵۰ تا ۱۰۰۰ متر	
		*			۵۰۰ تا ۷۵۰ متر	

					۲۵۰ تا ۵۰۰ متر	
	*				کمتر از ۲۵۰ متر	
				*	کمتر از ۵ درصد	شیب C14
			*		۵ تا ۸ درصد	
		*			۸ تا ۱۵ درصد	
	*				۱۵ تا ۲۵ درصد	
	*				بیش از ۲۵ درصد	
				*	بیش از ۲۰۰۰ متر	فاصله از گسل C15
			*		۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	
	*				۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر	
*					کمتر از ۵۰۰ متر	

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲ مستخرج از روش دلفی خبرگان)

ب) تعیین ضریب ارجحیت (اهمیت) معیارها بر مبنای مدل AHP

برای تعیین ضریب ارجحیت (اهمیت) معیارها و تحلیل وزن معیارها و زیرمعیارها در مدل AHP از دیدگاه خبرگان و نرم‌افزار Expert Choice استفاده شده است. در این مدل اندازه‌گیری مقادیر و اهمیت نسبی با مقایسه‌های زوجی و به کمک طیف ۱ تا ۹ انجام می‌گیرد. از جمع‌بندی ۲۰ پرسشنامه که کارشناسان خبره برای وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها تکمیل کرده بودند، جدول (۳) حاصل گردید. همچنین در محاسبه‌ی روش AHP بررسی میزان سازگاری دارای اهمیت است. این میزان نشان می‌دهد که تا چه اندازه می‌توان به اولویت‌های حاصل از اعضای گروه و یا اولویت‌های جداول ترکیب، اعتماد کرد. در پژوهش حاضر با توجه به شکل (۵) نرخ سازگاری با خطای ۰/۰۷ برآورد گردیده است، که نشانگر سازگاری لازم در قضاوت‌ها می‌باشد.



شکل (۵). میزان سازگاری وزن معیارها و زیرمعیارها در مدل AHP

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

همچنین بر اساس جدول (۳) معیار فاصله از گسل، همجواری با کاربری‌های خطرزا و دسترسی به مراکز خدمات‌رسان بیشترین اهمیت را جهت ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله داشته است و کمترین اهمیت مربوط به معیار سطح شیب می‌باشد.

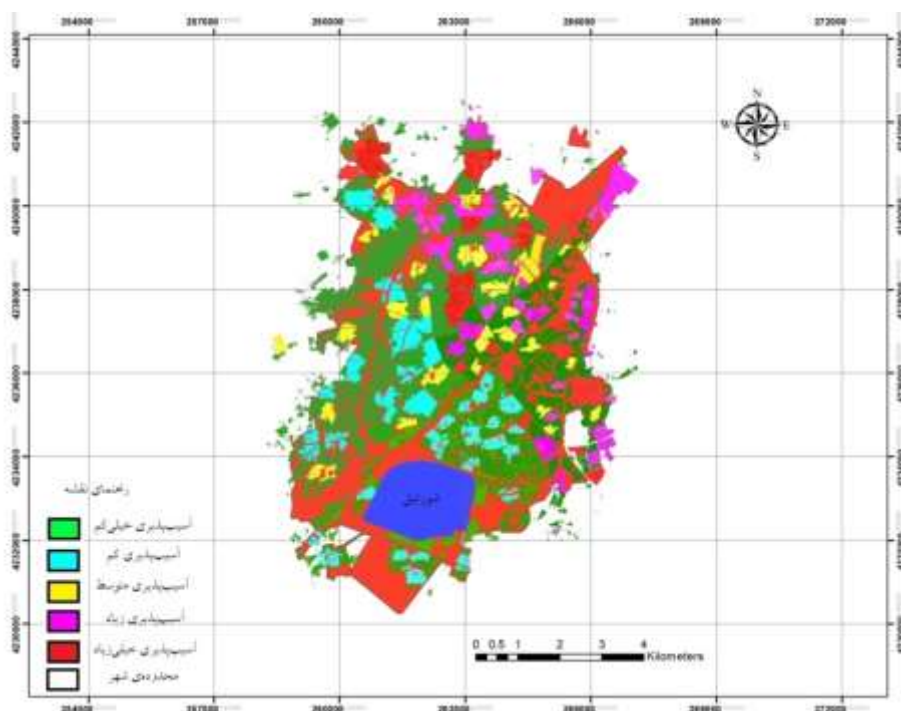
جدول (۳). مقایسه‌ی زوجی معیارها

معیارها	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	وزن
C1	۱	۳	۲	۴	۲	۵	۲	۲	۴	۲	۲	۰/۳	۰/۳	۶	۰/۳	۰/۰۸۴
C2	۰/۳	۱	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۴	۲	۵	۰/۳	۰/۳	۶	۰/۲	۰/۰۶۹
C3	۰/۵	۰/۵	۱	۴	۳	۴	۳	۴	۴	۲	۴	۰/۳	۰/۳	۶	۰/۲	۰/۰۷۵
C4	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۱	۲	۴	۲	۲	۳	۲	۳	۰/۳	۰/۲	۷	۰/۲	۰/۰۴۷
C5	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۵	۰/۲	۰/۲	۵	۰/۲	۰/۰۴۷
C6	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۱	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۴	۰/۱	۰/۰۱۷
C7	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۱	۲	۲	۲	۴	۰/۳	۰/۲	۳	۰/۲	۰/۰۳۵
C8	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۱	۳	۱	۳	۰/۲	۰/۲	۵	۰/۲	۰/۰۳۳
C9	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۳	۱	۱	۲	۰/۳	۰/۲	۴	۰/۲	۰/۰۲۴
C10	۰/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۱	۳	۰/۳	۰/۲	۳	۰/۲	۰/۰۳۰
C11	۰/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۰۱۸
C12	۳	۳	۳	۴	۵	۶	۴	۵	۴	۴	۶	۱	۰/۵	۹	۰/۵	۰/۱۳۵
C13	۳	۴	۴	۵	۶	۷	۵	۶	۶	۶	۶	۰/۲	۱	۵	۰/۳	۰/۱۶۵
C14	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۱	۰/۱	۰/۰۱۱
C15	۴	۵	۵	۶	۷	۷	۵	۵	۵	۵	۶	۲	۳	۷	۱	۰/۲۰۹

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

ج) استخراج نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله

در نهایت برای تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله پس از آنکه وزن‌های هر معیار با استفاده از روش AHP مورد محاسبه قرار گرفت، برای هر یک از معیارها، لایه‌ای در محیط GIS تهیه شد و سپس وزن هر کدام از معیارها از طریق دستور Raster Calculator در لایه‌های مربوطه اعمال گردید. بعد از عملیات وزن‌دهی و تهیه‌ی لایه‌های رستری و اعمال وزن‌های به‌دست آمده از جدول دودویی، از دستور Weighted Overlay برای تلفیق لایه‌ها استفاده شده است تا نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری شهر اردبیل یعنی شکل (۶) تولید گردد. قابل ذکر است که در همپوشانی وزنی ابتدا باید کلاس‌بندی انجام گیرد. در این تحقیق، تمامی لایه‌ها به ۵ کلاس تقسیم‌بندی گردیده است.



شکل (۶). نقشه‌ی آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله حاصل از تلفیق لایه‌ها (همپوشانی وزنی)

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

با توجه به شکل (۶) و جدول (۴) و در نظر گیری ۵ طیف برای شناسایی وضعیت موجود، می‌توان عنوان کرد که حدود ۱۳ درصد از بافت شهر اردبیل در پهنه‌ی آسیب‌پذیری خیلی‌زیاد و حدود ۱۸ درصد در پهنه‌ی آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. بنابراین می‌توان بیان داشت که حدود ۳۱ درصد از بافت شهر اردبیل در برابر بحران زلزله به شدت آسیب‌پذیر است.

جدول (۴). میزان آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله

میزان آسیب‌پذیری	امتیاز	مساحت به هکتار	درصد
آسیب‌پذیری خیلی کم	۱	۱۶۲۲/۲	۲۶/۶
آسیب‌پذیری کم	۳	۱۵۴۵/۳	۲۵/۳
آسیب‌پذیری متوسط	۵	۱۰۴۹/۸	۱۷/۲
آسیب‌پذیری زیاد	۷	۱۱۰۰/۲	۱۸
آسیب‌پذیری خیلی زیاد	۹	۷۸۲/۵	۱۲/۹

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

همچنین در راستای تخمین دقت اطلاعات حاصل از نتایج آسیب‌پذیری شهر در راستای وقوع زلزله، در شکل (۷) همپوشانی نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری با بافت‌های غیررسمی و فرسوده‌ی شهر انجام شده که نشان‌دهنده‌ی همپوشانی بافت‌های فرسوده و غیررسمی با سطوح آسیب‌پذیر بالا می‌باشد.

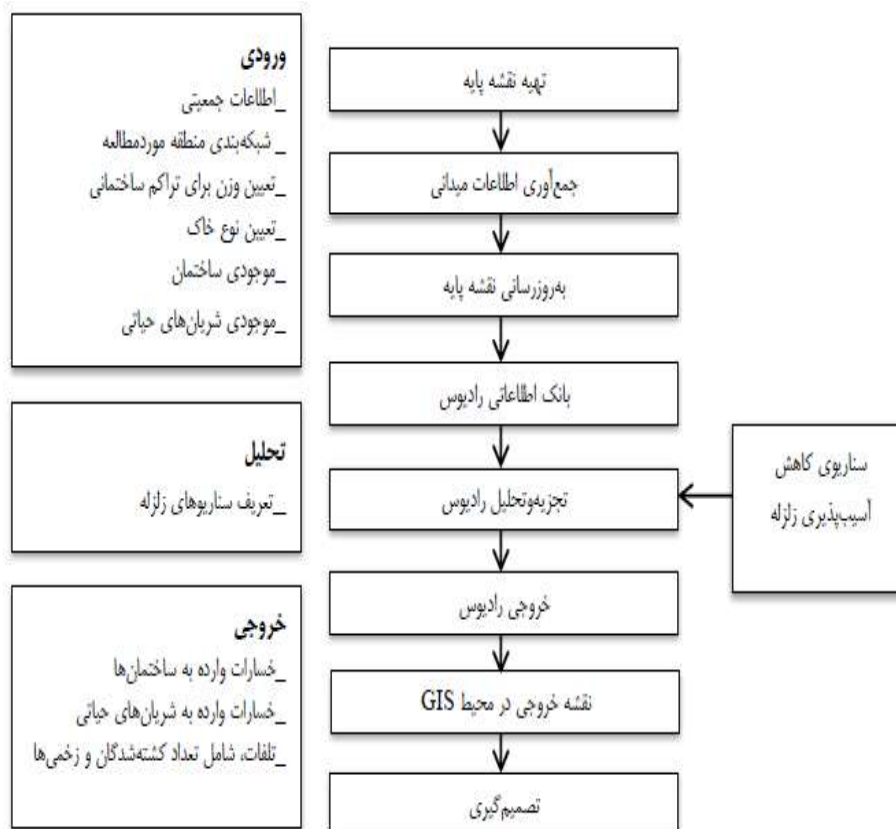


شکل (۷). همپوشانی مناطق آسیب پذیر شهر اردبیل در برابر زلزله با بافت های فرسوده و غیررسمی

منبع: (یافته های تحقیق، ۱۴۰۲)

ارزیابی آسیب پذیری شهر اردبیل (تخریب ساختمان ها و تلفات انسانی) بر مبنای مدل RADIUS

در مطالعات تخمین آسیب، ارزیابی میزان احتمالی تخریب ساختمان ها و تلفات انسانی (مجروحان و کشته شدگان) ناشی از زلزله ضروری است. در این قسمت با استفاده از مدل رادیوس به ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای شهر اردبیل پرداخته شده است. در مدل رادیوس، معرفی سناریوی پیشنهادی اولین گام در ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای در هر گستره ی مطالعاتی است. در این راستا، برای تهیه و تدوین یک سناریوی خسارت زلزله، باید ناحیه ی هدف مشخص شود و با توجه به زمین شناسی و موقعیت گسل ها، بایستی بزرگی، مرکز زلزله و مدل افت قدرت موج تعیین گردد. همچنین در این روش از نقشه ی معابر و شریان های حیاتی، تراکم جمعیتی و تراکم ساختمانی به منظور سنجش خسارات ساختمانی، انسانی و شریان ها استفاده می گردد. به طور کلی مراحل روش رادیوس به شرح شکل (۸) می باشد.



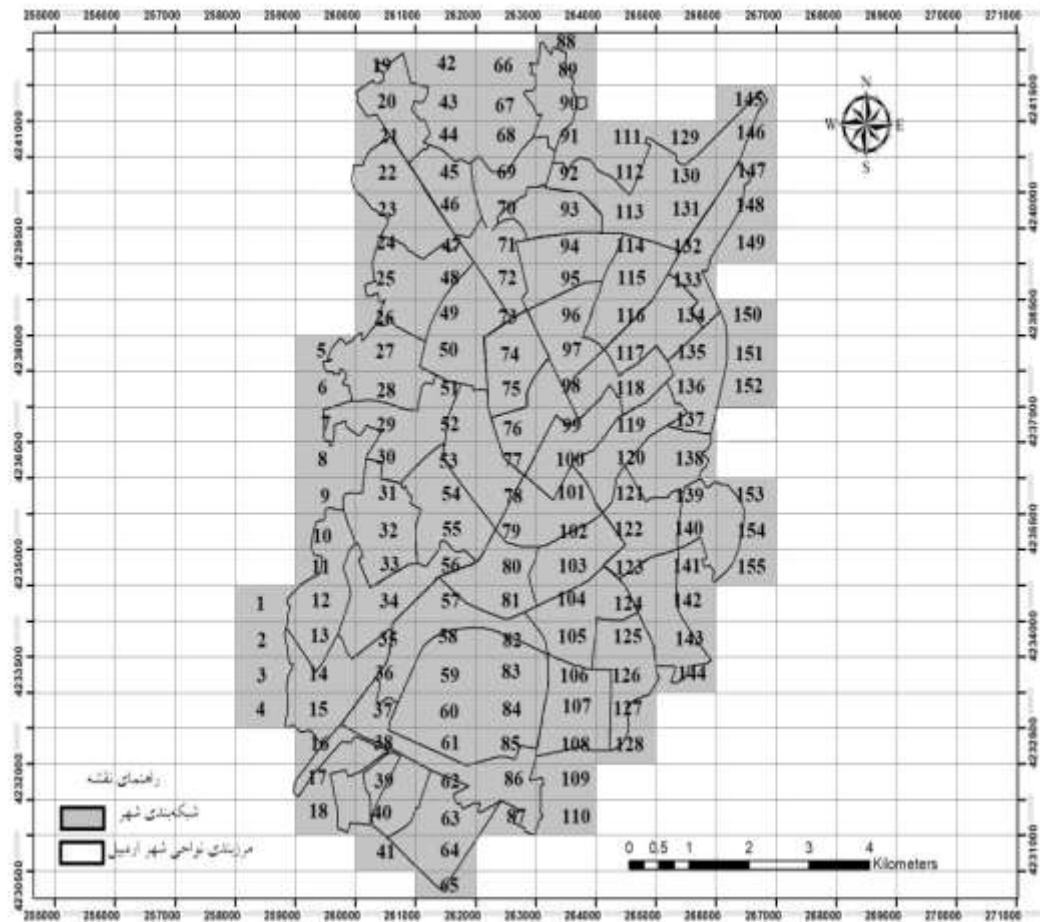
شکل (۸). نمودار گردش کار و مراحل مدل رادیوس در پژوهش حاضر

منبع: (نکارندگان، ۱۴۰۲)

بدین منظور شاخص‌های انتخاب‌شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای در پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

الف) شبکه‌بندی

با توجه به اینکه در مناطق شهری، هر بخش از منطقه دارای خصوصیات مختلفی از قبیل زمین، نوع و کاربری متفاوت ساختمان‌ها و همچنین اطلاعات آماری متفاوت است، برای برآورد و تخمین خسارات، شهر اردبیل به ۱۵۵ شبکه‌ی مساوی (۶۰۰ متر در ۶۰۰ متر) تقسیم و اطلاعات مورد نیاز به تفکیک هر شبکه وارد نرم‌افزار Arc GIS شده که در شکل (۹) قابل مشاهده است.



شکل (۹). شبکه بندی شهر اردبیل در مدل رادیوس

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۲)

(ب) جنس خاک

وضعیت خاک منطقه در میزان خسارات ناتی از زلزله مؤثر است، زیرا وضعیت زمین به طور مستقیم، لرزش زمین و اثرات لرزه‌ای را تشدید می‌کند. رادیوس طبقه بندی ساده‌ای برای جنس خاک پیشنهاد می‌کند که در این طبقه بندی جنس خاک به چهار دسته‌ی سنگ سخت، سنک نرم، خاک متوسط و خاک نرم قابل تقسیم است که جنس خاک محدوده‌ی مورد مطالعه نرم و متوسط یعنی رس و ماسه می‌باشد.

(ج) طبقه بندی ساختمان‌ها

آگاهی از تعداد ساختمان‌های موجود، نوع کاربری، نوع و جنس ساختمان‌ها و تعداد طبقه در هر شبکه برای محاسبه‌ی میزان خسارات ضروری است، طبقه بندی ساختمان‌ها مطابق مدل رادیوس در منطقه‌ی مورد مطالعه در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵). گروه‌بندی ساختمان‌ها مطابق با مدل رادیوس

تعداد	مشخصات	ساختمان
۳۴۱	نوع ۱: ساختمان‌هایی با مصالح بنایی و غیرمقاوم در برابر زلزله‌های احتمالی، ساخته شده از آجر، کاه‌گل با سقف‌ها و دیوارهای بدون شناژ	مسکونی
۱۷۵۹۲	نوع ۲: سازه‌های ترکیبی، سازه‌های غیراستاندارد و غیرمنطبق با آئین‌نامه‌های ساختمانی، ارتفاع تا سه طبقه	
۹۵۶	نوع ۳: ساخت ترکیبی بتن مسلح-URM: ساخت‌وساز قدیمی و تخریب‌شده که مطابق با تمهیدات قانون ساختمان‌سازی نیست، ارتفاع ۴ تا ۶ طبقه	
۱۱۴۵۲	نوع ۴: ساختمان‌هایی با اسکلت فلزی یا بتن مسلح، مهندسی‌ساز، نوساز و چندین طبقه	
۱۰۹	نوع ۱: ساختمان مدارس تا دو طبقه	آموزشی
۱۸	نوع ۲: ساختمان مدارس بالاتر از دو طبقه	
۲۵	نوع ۱: بیمارستان‌های کوچک و متوسط	درمانی
۱۳	نوع ۲: بیمارستان‌های بزرگ	
۸۵۶۹	مراکز خرید	تجاری
۳۲۲	ساختمان‌ها و تأسیسات صنعتی	صنعتی

منبع: (نگارنگان، ۱۴۰۲)

(د) معابر و شریان‌های حیاتی

گروه‌بندی شریان‌های حیاتی شهر اردبیل در جدول (۶) آورده شده است.

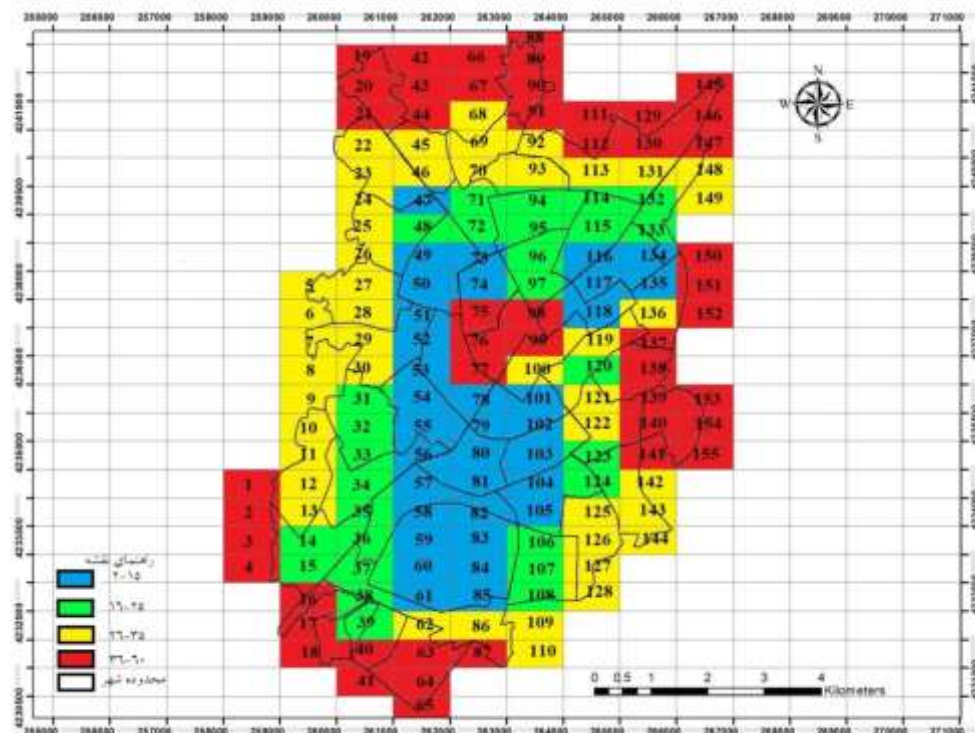
جدول (۶). شریان‌های حیاتی شهر اردبیل

توصیف	واحد	میزان	شریان‌های حیاتی
جاده‌های محلی به مناطق اطراف	کیلومتر	۱۱	جاده نوع اول
شاهراه‌ها و بزرگراه‌ها	کیلومتر	۴۸۹	جاده نوع دوم
	تعداد	۰	پل
	تعداد	۰	تونل
تعداد دکل‌های برق	تعداد	۴۵	برق ۱
تعداد ایستگاه‌های برق	تعداد	۷	برق ۲
طول خطوط آب و فاضلاب	کیلومتر	۸۶۳	آب ۱
تعداد ایستگاه‌های پمپاژ آب	تعداد	۲	آب ۲
تعداد ایستگاه‌های آب و فاضلاب صنعتی	تعداد	۱	آب ۳
تعداد آب‌انبارها و آب‌بندها	تعداد	۰	مخزن آب ۱
تعداد مخازن مرتفع	تعداد	۰	مخزن آب ۲
تعداد ایستگاه‌های پمپ‌بنزین و غیره	تعداد	۱۶	سوخت‌های بنزینی و گازوئیلی

منبع: (نگارنگان، ۱۴۰۲)

(و) سناریوهای زلزله

علاوه بر اطلاعات ارائه‌شده، سایر داده‌های مورد نیاز برای سناریوهای زلزله‌ی شهر اردبیل به شرح زیر می‌باشد. محل وقوع خطر: محل وقوع خطر زلزله محدوده‌ی شهر اردبیل تعریف گردیده است. گسل فعال: فرض اساسی در شهر اردبیل و وقوع زمین‌لرزه‌ی احتمالی، فعال شدن گسل‌های پیرامون شهر (با توجه به دیدگاه خبرگان در این تحقیق گسل آستارا) می‌باشد. ساعت وقوع زلزله: در پژوهش حاضر ساعت زلزله‌ی فرضی ۱۲ تعیین شده است. شدت زلزله: با توجه به مصاحبه با متخصصان مدیریت بحران و زلزله در شهر اردبیل، شدت زلزله‌ی فرضی ۸ ریشتر در نظر گرفته شده است. عمق زلزله: عمق زلزله در شهر اردبیل ۱۰ کیلومتر فرض شده است. با توجه به مفروضات کلی و بر مبنای مدل رادیوس وضعیت آسیب‌پذیری لرزه‌ای و خسارات و تلفات ناشی از آن در شهر اردبیل به شرح شکل (۱۰) و جدول (۷) و (۸) می‌باشد.



شکل (۱۰). نقشه‌ی درصد تخریب ساختمان‌های اردبیل ناشی از زلزله‌ی احتمالی گسل آستارا

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

جدول (۷). آمار احتمالی خسارات ساختمانی و تلفات انسانی اردبیل ناشی از زلزله‌ی احتمالی گسل آستارا

منطقه	تعداد ساختمان‌های تخریب‌شده	تعداد مجروحان (شدید و متوسط)	تعداد کشته‌شدگان
۱	۵۰۱۷	۲۲۱۱۹	۱۰۹۲
۲	۹۲۱	۹۵۶۱	۳۲۱
۳	۳۸۲۶	۱۵۶۹۲	۷۴۴
۴	۴۰۸۹	۱۹۷۴۵	۹۵۶

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

۱ - گسل آستارا یا گسل تالش یک گسل تراسی با راستای شمالی-جنوبی است که در طول ۱۴۰۰ کیلومتر از ناحیه‌ی آستارا تا قفقاز کشیده شده است. این گسل در زمین‌ریخت‌شناسی منطقه نقش بزرگی داشته و فروافتادگی دریای خزر در شرق آن بسیار آشکار است. ریخت‌شناسی منطقه نشان‌دهنده‌ی عملکرد یک گسل معکوس با افت بسیار زیاد میان کوه‌های تالش و دریای خزر است؛ به طوری که نهشته‌های پالئوزوئیک را در کنار نهشته‌های جوان قرار می‌دهد. سازوکار ژرفی گسل آستارا، نشان‌گر شیب بسیار ملایم صفحه‌ی گسل به سمت جنوب‌غربی است. این گسل توان لرزه‌ای دارد و در زمین‌لرزه‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۵۳ قفقاز سازوکار فشاری داشته است. همچنین انتخاب این گسل در تحقیق حاضر به‌خاطر فاصله‌ی نزدیکتر به شهر اردبیل و داشتن شتاب بیشتر نسبت به سایر گسل‌ها است.

جدول (۸). درصد احتمالی خسارات شریان‌های حیاتی اردبیل ناشی از زلزله‌ی احتمالی گسل آستارا

منطقه	جاده نوع ۱	جاده نوع ۲	برق ۱	برق ۲	خطوط آب و فاضلاب	جایگاه‌های بنزین
۱	۱۳/۲	۳/۱	۳/۸	۲۱/۲	۳۶/۲	۱۳/۲
۲	۱/۷	۰/۵	۱/۴	۱۰/۷	۱۳/۴	۲/۸
۳	۴/۵	۱/۸	۲/۶	۱۵/۱	۲۵/۶	۳۱/۲
۴	۹/۱	۲/۲۰	۳/۲	۱۹/۶	۳۰/۲۵	۲۹/۷

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بر مبنای مدل رادیوس، بیشتر تخریب‌های ساختمانی و تلفات انسانی ناشی از زمین‌لرزه‌ی احتمالی مربوط به مناطق حاشیه‌ای شهر و به‌ویژه شمال، شرق و جنوب شرقی می‌باشد. از طرفی بر مبنای مدل استخراج‌شده تعداد ۱۳۸۵۳ ساختمان در معرض تخریب قرار دارند که ۳۶ درصد آنها در منطقه ۱ و ۲۹ درصد آنها در منطقه ۴ می‌باشند. همچنین تعداد مجروحان در زلزله‌ی احتمالی ۶۷۱۱۷ و تعداد کشته‌شدگان ۳۱۱۳ برآورد شده است. به‌طور کلی به‌ترتیب مناطق ۱، ۴، ۳ و ۲ بیشترین خسارات فیزیکی و انسانی را در شرایط وقوع زلزله‌ی احتمالی خواهند داشت.

بحث و بررسی

پیش‌بینی و توانمندسازی (تاب‌آوری) دو راهبرد کلی در مواجهه با سوانح محسوب می‌شوند. در مورد سوانح و بلایایی همچون زلزله که غیرقابل پیش‌بینی هستند، راهبرد دوم یعنی توانمندسازی (تاب‌آوری) مطرح می‌باشد. در این راستا، گل و همکاران (۲۰۲۲)، اعتقاد دارند تاب‌آور نمودن جوامع در برابر سوانح طبیعی از طریق شناخت وضعیت موجود آسیب‌پذیری امکان‌پذیر می‌باشد. این موضوع ضمن شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و توانمندسازی آنها، نقش اساسی در کاهش اثرات سوانح طبیعی خواهد داشت.

همچنین سوانحی همچون زلزله با قدرت تخریب‌پذیری بالا و خسارات مالی و جانی بسیار، دارای پیامدهای متعددی در ابعاد مختلف می‌باشد که از مهمترین آنها می‌توان به شوک، افسردگی و خشم (کاس و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۶) و کاهش شادی و رفاه افراد (آتوکی، ۲۰۱۴؛ وانگ و لیو، ۲۰۱۲) اشاره کرد. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و برنامه‌ریزی و طراحی شهرها بر این مبنا به‌منظور جلوگیری از خسارات مختلف زلزله ضرورتی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

از طرفی در شناسایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بهره‌مندی از رویکردهای متنوع می‌تواند به افزایش دقت در رویکردهای اجرایی مواجهه با این بحران یاری‌رسان باشد. جایسوال و والد (۲۰۱۰)، چگونگی رفتار و دخالت‌های انسانی در مواجهه با سوانح طبیعی را ناشی از شناخت دقیق با بهره‌مندی از رویکردهای متنوع ذکر کرده‌اند. بنابراین در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری شهر اردبیل از دو رویکرد AHP و RADIUS استفاده شده است.

درنهایت بررسی تطبیقی پژوهش حاضر با پیشینه‌ی تحقیق نیز حاکی از آن است که نتایج پژوهش حاضر تأییدی از نتایج پژوهش‌های مشک‌سار و همکاران (۱۳۹۲) و سارما و سوتاپا (۲۰۱۸)، در راستای آسیب‌پذیری بالای مناطق پرتراکم در صورت وقوع زلزله و پژوهش جعفرنیا و همکاران (۱۳۹۸)، در آسیب‌پذیری بالای بافت فرسوده و غیررسمی می‌باشد. همچنین تفاوت پژوهش حاضر با مطالعات پیشین بهره‌مندی از دو رویکرد همپوشانی وزنی و رادیوس در ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله است که نتایج این دو مدل با اندکی تفاوت نتایج یکسانی را ارائه می‌دهد. بررسی پژوهش حاضر با پژوهش‌های مرتبط با رادیوس نیز حاکی از آن است که در پژوهش‌های مشک‌سار و همکاران (۱۳۹۲)، گولاتی (۲۰۰۶) و وسترن و همکاران (۲۰۰۴) نیز همچون پژوهش حاضر از معیارهای شبکه‌بندی منطقه، وضعیت خاک منطقه، طبقه‌بندی ساختمان‌ها بر مبنای مصالح به‌کاررفته در آنها، کاربری و تعداد طبقات و تدوین سناریو (با توجه به گسل‌ها و لرزه‌های احتمالی)، به‌منظور ارزیابی و تخمین خسارات استفاده گردیده است.

نتیجه‌گیری

امروزه یکی از مهمترین مخاطراتی که همواره شهرها را تهدید می‌نماید خطر وقوع زلزله است. از این‌رو، شهر اردبیل هم بمانند بسیاری از شهرها با توجه به قرارگرفتن بر روی چندین گسل فعال، ازجمله مناطق حساس و در معرض خطرات ناشی از وقوع زلزله است که دیر یا زود چنین چالشی را پیش‌رو خواهد داشت. لذا کاهش آسیب و مدیریت بحران و در نهایت توانمندسازی شهر اردبیل در برابر مخاطراتی همچون زلزله لازم و ضروری است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی سطح آسیب‌پذیری مناطق شهری اردبیل در برابر بحران زلزله نگارش شده است تا با شناسایی مناطق آسیب‌پذیر به اولویت‌بندی طرح‌ها و برنامه‌ها مطابق با سطوح مختلف شهر اقدام نمود. بررسی‌های به‌عمل آمده حاکی از آن است که حدود ۳۱ درصد از بافت شهر اردبیل در برابر بحران زلزله به شدت آسیب‌پذیر است. وجود بافت‌های غیررسمی و فرسوده در متن شهر با مسکن کم‌دوام و زیرساخت‌های فرسوده موجب آسیب‌پذیری سطح گسترده‌ای از شهر در برابر زلزله گردیده است. همچنین کاستی‌های اساسی در قوانین زمین و مسکن شهری و نظام مدیریت بحران شهری مزیت بر علت شده و آسیب‌پذیری شهر را در برابر مخاطرات احتمالی افزایش داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بیشتر تخریب‌های ساختمانی و تلفات انسانی ناشی از زمین‌لرزه‌ی احتمالی مربوط به مناطق حاشیه‌ای شهر و به‌ویژه شمال، شرق و جنوب شرقی خواهد بود و برنامه‌ریزی و مدیریت بحران این مناطق در اولویت نظام مدیریت شهری است.

در نهایت، بر مبنای یافته‌های تحقیق، اجرای راهکارهای ذیل می‌تواند در نیل به کاهش آسیب‌پذیری شهر اردبیل در برابر زلزله مؤثر واقع شود:

- ✓ جلوگیری از گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی و اعطای تسهیلات مناسب در راستای مقاوم‌سازی مسکن بافت‌های غیررسمی و فرسوده؛
- ✓ اتخاذ سیاست‌های سختگیرانه به‌منظور جلوگیری از گسترش شهر در امتداد گسل‌های پیرامون شهر به‌ویژه مناطق شرقی؛
- ✓ اتخاذ سیاست‌های بهسازی و نوسازی بافت‌های فرسوده‌ی شهری با رویکرد بازآفرینی پایدار شهری به‌ویژه در مناطق حاشیه‌ای شمالی و شرقی شهر (مناطق ۱ و ۴)؛
- ✓ بهینه‌سازی کاربری‌ها و جابه‌جایی کاربری‌های خطرزا در محدوده‌ی مرکزی شهر و منطقه ۴؛
- ✓ اتخاذ تدابیری برای اطمینان از قرار نگرفتن کاربری‌های ناسازگار در کنار یکدیگر؛
- ✓ افزایش تعداد و ارتقاء کیفیت مراکز درمانی و امدادسانی در شهر جهت خدمات‌دهی به هنگام وقوع زلزله؛
- ✓ اعطای تسهیلات مناسب برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها؛
- ✓ برنامه‌ریزی جمعیتی مناسب در راستای کاهش تراکم جمعیتی در مناطق آسیب‌پذیر؛
- ✓ نظارت مستمر در ساخت‌وسازهای مناطق آسیب‌پذیر (مناطق حاشیه‌ای و مرکز) به‌منظور کاهش اثرات زلزله‌های احتمالی؛
- ✓ ایجاد سازوکارهایی برای تسهیل آمدوشد وسایل نقلیه‌ی اضطراری همچون آتش‌نشانی، آمبولانس و ... در مناطق با نفوذپذیری پایین.

منابع

- اسمعیل‌پور، مرضیه؛ لاله‌پور، منیژه و ممقانی، سمانه (۱۴۰۱). ارزیابی میزان آسیب‌پذیری مسکن شهر تبریز در برابر مخاطره زلزله (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۸۲)، ۲۷-۴۸.
- پورمحمدی، محمدرضا و 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. جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۸(۵۰)، ۵۵-۸۸.
- جعفرنیا، افشین؛ خرم‌بخت، احمدعلی و قنبری، عبدالرسول. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با استفاده از منطق فازی در GIS. *مطالعه موردی شهر لار. جغرافیای طبیعی*، ۱۲(۴۳)، ۱۰۵-۱۲۲.
- خدادی جید، شاهین و پورزینلی، سعید. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اربیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی. *مهندسی عمران مدرس*، ۲۲(۲)، ۴۳-۵۷.
- خدمت‌زاده، علی؛ موسوی، میرنجف و یوسف‌زاده، اردشیر. (۱۴۰۰). تحلیل شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری با رویکرد مدیریت بحران زلزله (مطالعه موردی: شهر ارومیه). *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی*، ۱۶(۵۴)، ۴۳-۶۲.
- 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.
- قائدرحمتی، صفر و عظیمی‌نیا، بابک (۱۳۹۶). ارزیابی میزان تراکم و ارتباط آن با آسیب‌پذیری لرزه‌ای (نمونه موردی: منطقه چهار شهرداری تهران). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۱(۶۱)، ۲۷۹-۲۹۸.
- مشک‌سار، پریسا؛ ایزدی، حسن؛ سلطانی، علی و بذرگر، محمدرضا. (۱۳۹۲). ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی بافت‌های شهری در برابر زلزله در روش RADIUS (نمونه‌ی موردی: منطقه‌ی ۳ شهرداری شیراز). *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱(۱)، ۱۱۵-۱۲۹.
- مشک‌سار، پریسا؛ پیوسته‌گر، یعقوب و شمس‌الدینی، علی. (۱۳۹۷). ارزیابی طیف آسیب‌پذیری لرزه‌ای با معیار تلفات انسانی (نمونه موردی: منطقه ۳ کلان‌شهر شیراز). *دانش شهرسازی*، ۲(۳)، ۹۹-۱۱۳.
- میردهقان اشکذری، سیداحمد؛ المدرسی، سیدعلی؛ رضایی، محمدرضا؛ نوجوان بشنغیان و محمدرضا، خبازی، مصطفی. (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری شهر یزد در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های ترکیبی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۹(۳)، ۲۱۷-۲۰۵.

- Esmailpour, Marzieh; Lalepour, Manijeh and Mamghani, Samaneh (2019). Assessing the vulnerability of Tabriz housing to earthquake hazards (case study: District 10 of the municipality). *Geography and Planning*, 26(82), 27-48. [In persian]
- Pourmohammadi, Mohammad Reza and Karami, Mohammad Reza. (2014). Combining the Kernel Model (KDE) and AHP Model in Assessing Earthquake Risk in Marginal and Deteriorated Urban Textures with the Help of Geographic Information System (GIS), Case Study of Districts One and Five of Tabriz City. *Geography and Planning*, 18(50), 55-88. [In persian]
- Jafarnia, Afshin; Khorrambakht, Ahmad Ali and Ghanbari, Abdol Rasoul. (2019). Zoning of Earthquake Vulnerability Using Fuzzy Logic in GIS, Case Study of Lar City. *Physical Geography*, 12(43), 122-105. [In persian]
- Khodadi Jaid, Shahin and Porzinelli, Saeed. (1401). Seismic zoning of Erbil city using deterministic hazard analysis and fuzzy system. *Civil Engineering Modares*, 22(2), 57-43. [In persian]
- Khedmatzadeh, Ali; Mousavi, Mirnajef and Yousefzadeh, Ardeshir. (1400). Analysis of urban vulnerability indices with earthquake crisis management approach (case study: Urmia city). *Human Settlement Planning Studies*, 16(54), 62-43. [In persian]

- Ghazanfarpour, Hossein; Hosseinikhah, Hossein and Kamali Baghrahi, Esmaeil. (1402). Seismic risk and vulnerability analysis of human settlements in Basht county using fuzzy Dematel model and GIS. *Natural Environment Hazards*, 12(35), 36-21. [In persian]
- Qaedrahmati, Safar and Aziminia, Babak (2017). Assessment of density and its relationship with seismic vulnerability (case study: District 4 of Tehran Municipality). *Geography and Planning*, 21(61), 298-279. [In persian]
- Meshksar, Parisa; Izadi, Hassan; Soltani, Ali and Bazrgar, Mohammad Reza. (2013). Assessment of physical vulnerability of urban textures to earthquakes using the RADIUS method (case study: District 3 of Shiraz Municipality). *Geographical Research in Urban Planning*, 1(1), 115-129. [In persian]
- Meshksar, Parisa; Pashagar, Yaghoub and Shamsaldini, Ali. (2018). Assessment of seismic vulnerability spectrum using human casualties criterion (case study: District 3 of Shiraz Metropolitan City). *Danesh Shahr-e-Sari*, 2(3), 113-99. [In persian]
- Mirdehghan Ashkazari, Seyed Ahmad; Al-Madrasi, Seyed Ali; Rezaei, Mohammad Reza; Nawar Bashangian and Mohammad Reza, Khabazi, Mustafa. (1401). Assessment and analysis of the vulnerability of Yazd city to earthquakes using hybrid models. *Environmental Risk Management*, 9(3), 217-205.[In persian]
- Aoki, Y. (2014). *More Schooling, Less Youth Crime? Learning from an Earthquake in Japan*. IZA Discussion Paper, No. 8619.
- Brusa, E., Chesi, C., & Torre, S.D. (2023). Securing the church of Madonna del Sole during the emergency phase of 2016 earthquake: interoperability of different actors as an instrument for reducing seismic risk of damaged built heritage. *Procedia Structural Integrity*, 44, 275–282.
- Cas, A. G., Frankenberg, E., Suriastini, W., & Thomas, D. (2014). The impact of parental death on child well-being: evidence from the Indian Ocean tsunami. *Demography*, 51(2), 437-457.
- Ceferino, L., Mitrani-Reiser, J., Kiremidjian, A., Deierlein, G., & Bambar´en, C. (2020). Effective plans for hospital system response to earthquake emergencies. *Nature Communications*, 11(1), 1–12.
- Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). Optimal team deployment in urban search and rescue. *Transportation Research Part B: Methodological*, 48(8), 984–999.
- Chen, T.L., & Lin, Z.H. (2021). Impact of land use types on the spatial heterogeneity of extreme heat environments in a metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 72, 1-11.
- Cremen, G., Bozzoni, F., Pistorio, S., & Galasso, C. (2022). Developing a risk-informed decision-support system for earthquake early warning at a critical seaport. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 1-13.
- Deverell, E., Alvinus, A., & Hede, S. (2019). Horizontal collaboration in crisis management: an experimental study of the duty officer function in three public agencies. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 10(4), 484–508.
- 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.
- Eriksson, K. (2023). Organisational learning without fire? Risk analyses as a basis for developing crisis management capabilities. *Safety Science*, 163, 1-8.
- Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2015). Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: a comprehensive review. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(1), 1-13.
- Gehl, P., Auclair, S., Fayjaloun, R., & Meresse, P. (2022a). Decision support for emergency road traffic management in post-earthquake conditions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 1-16.
- Gehl, P., Fayjaloun, R., Sun, L., Tubaldi, E., Negulescu, C., Ozer, E., & D’Ayala, D. (2022b). Rapid earthquake loss updating of spatially distributed systems via sampling-based Bayesian inference. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 3995–4023.
- Gulati, B., (2006). *Earthquake Risk Assessment of Buildings Applicability of HAZUS in Dehradun, India*. M.Sc Thesis, International Institute for Geo- information Science and Earth Observation, Supervisors: M.J.G. Mark Brussel, Sandeep Maithani and Cees J van Westen.

- Haitao, L., Dongqing, Z., & Zhaoxia, G. (2017). Comparison study on two post-earthquake rehabilitation and reconstruction modes in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23, 119-130.
- Heilig, G.K. (2011). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA), Population Division, Population Estimates and Projections Section: New York, NY, USA.
- Heinzlef, C., Robert, B., H'emon, Y., & Serre, D. (2020). Operating urban resilience strategies to face climate change and associated risks: Some advances from theory to application in Canada and France. *Cities*, 104, 1-15.
- Jaiswal, K., & Wald, D. (2010). An empirical model for global earthquake fatality estimation. *Earthquake Spectra*, 26(4), 1017-1037.
- Kapucu, N., Ge, Y., Martín, Y., & Williamson, Z. (2022). Urban resilience for building a sustainable and safe environment. *Urban Governance*, 1, 10-16.
- Kreimer, A., Arnold, A., & Carlin, A. (2003). *Building safer cities, the future of disaster risk, Disaster risk management series*. The World Bank.
- Linares, R., & Alejandra, R. (2012). Panama Prepares the City of David for Earthquakes. *Project highlights*, 9, 1-4.
- Normandin J.M., Therrien M.C., & Tanguay G.A. (2011). City strength in times of turbulence: strategic resilience indicators. *Urban Affairs Association 41st Conference*, New Orleans.
- Olsen, M., Oskarsson, P-A., Jallberg, N., Granasen, M., & Nordstrom, J. (2023). Exploring collaborative crisis management: A model of essential capabilities. *Safety Science*, 162, 1-13.
- Ozdogoglu, G., & Ozdogoglu, A. (2007). *Comparison of AHP and Fuzzy AHP for the multicriteria decision making processes with linguistic evaluations*. Istanbul Ticaret Universitesi Fen Bilimleri Dergisi Yıl: 6 Sayı: 11 Bahar 2007/1 s. 65-85.
- Pribadi, K.S., Abduh, M., Wirahadikusumah, R.D., Hanifa, N.R., Irsyam, M., Kusumaningrum, P., & Puri, E. (2021). Learning from past earthquake disasters: The need for knowledge management system to enhance infrastructure resilience in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 1-14.
- Sarmah, T., & Sutapa, D. (2018). Earthquake Vulnerability Assessment for RCC Buildings of Guwahati City using Rapid Visual Screening. *Procedia engineering*, 212, 214-221.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2014). Resilient urban planning: Major principles and criteria. *Energy Procedia*, 61, 1491-1495.
- Tang, A., & Wen, A. (2009). An intelligent simulation system for earthquake disaster assessment. *Computers & Geosciences*, 35(5), 871-879.
- Tielin, L., & Wei, Z. (2017). Earthquake responses of near-fault building clusters in mountain cities considering viscoelasticity of earth medium and process of fault rupture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99, 137-141.
- UN educational, scientific and cultural organization (2010). UNESCO and sustainable development, at: [http:// UNESCO](http://UNESCO).
- Wang, X., & Liu, K. (2012). *Earthquake and Mental Health, Post Traumatic Stress Disorders in a Global Context*. ISBN: 978-953-307-825-0. In Tech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/post-traumatic-stress-disorders-in-a-global-context/earthquake-and-mental-health>.
- Westen, C.V., Slob, S., Montoya, L., & Boerboom, L. (2004). *Application of GIS for earthquake hazard and risk assessment: Kathmandu, Nepal*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, ITC, P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands, pp 1-10.
- Xu, J., Dai, J., Rao, R., & Xie, H. (2016). The association between exposure and psychological health in earthquake survivors from the Longmen Shan Fault area: the mediating effect of risk perception. *BMC public health*, 16(1), 417.
- Zhou, Y., & Leung, C. (2017). The oscillatory tendency of interevent direction in earthquake sequences. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 478(15), 120-130.