



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 33, Issue 4, No.88, Winter 2023, pp. 1- 4
Received: 15/02/2022 Accepted: 20/08/2022

Urban Vulnerability Rating against Earthquake Hazard Using ELECTRE FUZZY Model: A Case Study of Kerman City

Narjes Salari¹, Mojgan Entezari^{2*}, Mostafa Khabazi³

1- Ph.D. student of Geomorphology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

narjes.salari94@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Natural geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

m.entezari@geo.ui.ac.ir

3- Associate professor of geomorphology, shahid bahonar university, kerman., kerman. Iran

Mostafakhabazi@uk.ac.ir

Abstract

Due to the location of Kerman city on the border of mountains and plains, there are several faults in its vicinity, some of which can cause very destructive earthquakes. The city has a very old central core in terms of architecture and is mainly made of brick and mud buildings that have a high level of vulnerability. Based on this, detailed and scientific studies of seismic vulnerability are among the necessities of Kerman urban management. Therefore, this city was chosen as the study area in this study. The information research and analysis methods were database-based methods and ELECTRE FUZZY model. In this study, quality of buildings, household density in a residential unit, width of passages, distance from the faults, distance from medical centers, access to the fire-fighting station, access to green space, access to temporary accommodation centers, and land use were examined. The results indicated that the 4th and 5th urban areas of Kerman City were the most vulnerable areas against earthquakes. The vulnerability zoning of earthquake risk in this city revealed that the areas of high

*Corresponding Author

salari, N., entezari, M & khabazi, M. (2023). Urban vulnerability rating against earthquake hazard with ELECTRE FUZZY model (case study: Kerman city). *Geography and Environmental Planning*, 33 (4), 1-4.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<https://doi.org/10.22108/gep.2022.132688.1491>



20.1001.1.20085362.1401.33.4.7.1

vulnerability were 28 and 23% in Zones 4 and 5, respectively. More than 50% of the area with high vulnerability rating was located in these areas. Also, Urban Areas 1, 3, and 2 were in the next ranks of high vulnerability zone, respectively.

Keyword: earthquake, fault, old texture of Kerman, Vulnerability

Introduction

Due to the location of Iran on one of the two seismic belts in the world and existence of many faults in this country, occurrence of earthquakes in the Iranian plateau is normal. Due to the location of Kerman City on the border of mountains and plains, there are several faults in its vicinity, some of which can cause very destructive earthquakes. The city has a very old central core in terms of architecture and is mainly made of brick and mud buildings that have a high level of vulnerability. Considering the importance of the issue of assessing vulnerability of cities to earthquakes, as well as the issues of geography and urban planning, GIS method and spatial and descriptive data of the main components and behavioral elements were utilized to make an appropriate estimate of the risk of earthquake and determine the effect of each vulnerability factor in the mentioned city.

Methodology

A descriptive-analytical research was done through data analysis method according to database-based methods and by using GIS-based software. The physical factors of urban planning in this study were as follows: 1) quality of building, 2) household density in a residential unit, 3) width of passage, 4) distance from fault, 5) distance from medical center, 6) access to the fire-fighting station, 7) access to green space, 8) access to temporary accommodation center, and 9) land use. Fuzzy model was used for weighting the factors and the weighting factors were placed in a function to identify vulnerability of the city fabric using GIS.

Discussion

Fuzzyization could be done directly by using algorithms or logic expressions. The method of number Fuzzyization used in this research included the two methods of direct and expert calculations. In the expert calculation method, after determining the amplitude of changes in each parameter, the domains were classified based on the previous studies and then, they were manually calculated according to reality and weighted according to the experts' opinions. After matching the areas specified in the detailed plan of the city with the comprehensive urban plan map, the boundaries of urban areas were carefully determined and then, each parameter was given tabular information in Arc

Map. After assigning the data to each layer, weighting was performed according to the vulnerability spectrum of each parameter. The classifications were based on the previous studies and research.

After obtaining the fuzzy data, the ELECTRE method was used to integrate the fuzzy layers with each other and deduce the final map that showed the effect of each parameter in vulnerability against the different real risks of earthquake.

Conclusion

By investigating and evaluating the seismic vulnerability of Kerman City, analyzing the information collected based on database-based methods, and using the ELECTRE FUZZY model and the mentioned criteria, the high vulnerability of Kerman Regions 4 and 5 were determined. In general, based on the vulnerability zoning of earthquake risk in Kerman, the areas of high vulnerability were obtained to be 28 and 23% in Zones 4 and 5, respectively. In fact, more than 50% of the area with high vulnerability rating was located in these areas. Also, Urban Areas 1, 3, and 2 were in the next ranks of high vulnerability zone, respectively. The percentages of medium vulnerability areas were 13 and 15% in Regions 4 and 5, respectively. Moreover, the percentages of low vulnerability areas were 59 and 62% in Regions 4 and 5, respectively.

References

- Antonioni Gigliola, G., & Cozzani, Valerio. (2007). *A Methodology for the Quantitative Risk, Triggered by Seismic Events*. Journal of Hazardous Materials, Assessment of Major Accidents.
- Bazazanlotfi, S., & Rahimi, M. (2017). *A Study on Vulnerability of Urban Neighborhoods to Earthquake (Case Study: Farahzad Neighborhood, Tehran)*. Journal of Civil Engineering and Materials Application, 1(1):1-7. [https://doi: 10.15412/J.JCEMA.12010101](https://doi.org/10.15412/J.JCEMA.12010101).
- Estrada, M., Zavala, C., Lazares, F., & Morales, J. (2012). *GIS Tool for Calculating Repair Cost of Buildings Due to Earthquakes Effects (CCRE - CISMID)*. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, pp 1695- 1698.
- Sadrykia, M., Delavar, M., & Zare, M. (2017). *A GIS-Based Fuzzy Decision Making Model for Seismic Vulnerability Assessment in Areas with Incomplete Data*, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017, 6(4): 119, doi: 10.3390/ijgi6040119.
- Saafizadeh, M., & Bagheripour, M. H. (2019). *Evaluation of peak ground acceleration for the city of Kerman through seismic hazard analysis*. Scientia Iranica A (2019) 26(1), 257-272.

- Shamsipour, A. A., &Shekhi, M. (2010). Zoning of Sensitive Area and Environment Vulnerable in West of Fars Province using Fuzzy and AHP Classification, *Physical Geography Research Quarterly*, 73(73):53-68.
- Wang, X., & Triantaphyllou, E. (2008). Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods. *Omega*, Vol. 36, pp. 45 – 63.

رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با مدل ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: شهر کرمان)

نرجس سالاری، دانشجوی دکتری رشته مخاطرات ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان
narjes.salari94@gmail.com
مژگان انتظاری^{*}، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان
m.entezari@geo.ui.ac.ir
مصطفی خبازی، دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه شهید باهنر کرمان. ایران
.mostafakhabazi@uk.ac.ir

چکیده

به دلیل قرارگیری شهر کرمان در مرز کوه و دشت، گسل‌های متعددی در محدوده و مناطق مجاور این شهر وجود دارد که بعضی از آنها موجب بروز زلزله‌های بسیار مخرب می‌شود. این شهر از نظر معماری دارای یک هسته مرکزی بسیار قدیمی و اغلب از ساختمان‌های خشتی و گلی است که میزان آسیب‌پذیری زیادی دارد. بر این اساس، بررسی‌های دقیق و علمی آسیب‌پذیری لرزه‌ای از ضروریات مدیریت شهری کرمان و دلیل اصلی انتخاب این شهر به‌عنوان منطقه مورد مطالعه است. روش پژوهش و تجزیه و تحلیل اطلاعات، مبتنی بر پایگاه داده و مدل Electre Fuzzy است که در این پژوهش معیارهای کیفیت این‌بیه (ساختمان‌ها)، تراکم خانوار در هر واحد مسکونی، عرض معابر، فاصله از گسل، فاصله از مراکز درمانی، دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی، دسترسی به فضای سبز، دسترسی به مراکز اسکان موقت و کاربری اراضی استفاده شد. نتایج حاصل حاکی از آن است که منطقه ۴ و ۵ شهری کرمان، آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر وقوع زلزله است. در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری خطر زلزله در شهر کرمان مساحت آسیب‌پذیری زیاد در منطقه ۴/۲۸ درصد و در منطقه ۵/۲۳ درصد است. بیش از ۵۰ درصد مساحت با رتبه‌بندی آسیب‌پذیری زیاد در این مناطق واقع شده است. همچنین مناطق شهری ۱، ۳ و ۲ به ترتیب در رتبه‌های بعدی پهنه آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد.
واژه‌های کلیدی: زلزله، گسل، بافت قدیم کرمان، آسیب‌پذیری

*نویسنده مسؤول

انتظاری، مژگان، سالاری، نرجس و خبازی، مصطفی. (۱۴۰۱). رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با مدل ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: شهر کرمان). *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۳ (۴)، ۱۱۳-۱۳۴.



مقدمه

مخاطرات طبیعی جزء جداناپذیر محیط‌زیست انسان‌هاست که مرزی نمی‌شناسد، یک منطقه کوچک تا یک قاره و حتی کل دنیا را تحت تأثیر قرار می‌دهد و خسارات فراوانی را بر جای می‌گذارد. کشور ما به دلیل وسعت، تنوع اقلیمی و شرایط جغرافیایی و زمین‌شناسی، همه‌ساله تلفات و خسارت فراوانی را از مخاطرات طبیعی متحمل می‌شود (انتظاری و غلامی، ۱۳۹۴). با توجه به واقع شدن ایران بر روی یکی از دو کمربند زلزله‌خیز جهان و وجود گسل‌های فراوان، وقوع زلزله در فلات ایران امری طبیعی است. براساس پژوهش‌های انجام‌شده، علت اصلی وقوع زمین‌لرزه‌های ایران، حرکت و فشار صفحه عربستان به سمت شمال در اثر بازشدن دریای سرخ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه ایران از شمال با صفحه اوراسیا، از شرق با صفحه هند و از غرب با صفحه آنتولی احاطه شده است، تحت تأثیر نیروهای فشارشی صفحه عربستان فشرده و ضخیم می‌شود که حاصل آن، گسل‌ها و چین‌خوردگی‌های متعددی از جمله گسل‌هایی در راستای شمال غرب- جنوب شرق است. امروزه با توجه به رشد سریع جمعیت به تبع آن، توسعه ساخت‌وسازها، هر روز بر فشار نیازهای زمینی بشر افزوده می‌شود. بهره‌برداری از مناطق اطراف شهرها و روستاها برای ایجاد خانه و تأسیسات اقتصادی و صنعتی فزونی می‌یابد و گاهی سکونتگاه‌های جدید استقرار اجباری دارد؛ اما آنچه حائز اهمیت است، وضعیت اسفبار شهرها و کلان‌شهرهایی است که روی گسل‌ها یا در مجاورت آن ساخته می‌شود و در معرض خطر زلزله قرار دارد.

دشت کرمان یک چاله زمین‌ساختی از نوع فروزمین فشاری است (عباس‌نژاد، ۱۳۸۳) که به لحاظ زمین‌شناسی به ایران مرکزی تعلق دارد. ارتباط آن با کوه‌های اطراف به‌طور معمول از نوع گسلی است. بسیاری از این گسل‌ها فعال است و شهر را کم و بیش تهدید می‌کند. به دلیل قرارگیری شهر کرمان در مرز کوه و دشت، گسل‌های متعددی در محدوده و مناطق مجاور این شهر وجود دارد. تعدادی از آنها موجب بروز زلزله‌های قوی‌تر از ۷ ریشتر می‌شود. تاکنون زلزله‌های تاریخی متعددی در نزدیکی شهر کرمان رخ داده که باعث آسیب به آن شده است (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

این شهر از نظر معماری دارای یک هسته مرکزی بسیار قدیمی و اغلب از ساختمان‌های خشتی و گلی است که میزان آسیب‌پذیری زیادی دارد. در حواشی این هسته مرکزی، کمربندی جدا می‌شود که ساختمان‌های آن، آجری قدیمی با سقف اغلب قوسی است. آسیب‌پذیری این ساختمان‌ها نسبت به گروه اول کمتر و در مجموع زیاد است. قسمت دیگری از شهر، ساختمان‌های آجری و تیرآهنی و با سن کمتر از ۲۰ سال است که شامل بخش‌های وسیعی از شهر می‌شود. آخرین واحد تفکیک‌شده، بخش‌هایی از شهر است که به‌طور کامل تازه‌ساز بوده و از نوع اسکلت فلزی، بتن آرمه یا سایر انواع دارای شناژ است. در مجموع مقاومت این واحد بیش از سایر واحدهاست.

بافت قدیم شهر کرمان با وجود تراکم جمعیتی زیاد، ابنیه‌ای با کیفیت کالبدی نامناسب و سازه‌های بی‌دوام، معابر کم‌عرض و آسیب‌پذیری زیاد در برابر حوادث طبیعی به‌خصوص زلزله دارد. با توجه به اهمیت موضوع ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله در مباحث مربوط به جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، در این پژوهش سعی شده است تا با به‌کارگیری روش منطق فازی در محیط GIS و با استفاده از داده‌های مکانی و توصیفی اجزا و عناصر اصلی و

رفتاری، برآورد مناسبی از خطرپذیری شهر کرمان در برابر زلزله صورت گیرد و تأثیر هر یک از معیارهای به‌کاررفته در میزان آسیب‌پذیری تعیین شود. ابعاد کالبدی، محسوس‌ترین و مهم‌ترین بخش برنامه‌ریزی شهری در کاهش آثار زلزله است. شکل و کالبد شهر، شامل عناصر مختلفی است که سازمان‌دهی آنها از طریق برنامه‌ریزی و طراحی شهری صورت می‌گیرد. شاخص‌های کالبدی و برنامه‌ریزی شهری این پژوهش عبارت است از: ۱. تراکم خانوار در واحد مسکونی ۲. فاصله از گسل ۳. عرض شبکه معابر ۴. دسترسی به فضای سبز ۵. فاصله از مراکز درمانی ۶. کیفیت ابنیه ۷. دسترسی به مراکز آتش‌نشانی ۸. دسترسی به اسکان موقت ۹. کاربری اراضی. با وجود تراکم زیاد جمعیت در بافت‌های قدیمی شهر کرمان و مجاورت آن با گسل‌های لرزه‌خیز، لازم است با دیدی همه‌جانبه مسئله آسیب‌پذیری این شهر در برابر زلزله بررسی و در این راستا، برنامه‌ریزی‌های دقیق، انجام و سیاست‌های اصولی اتخاذ شود.

سوابق پژوهش

تا به حال تحلیل‌ها و ارزیابی‌های متعددی در ارتباط با آسیب‌پذیری در برابر زلزله در قالب پژوهش‌های گوناگون انجام گرفته است. با مشاهده پژوهش‌های انجام‌شده گفته می‌شود که مدل‌های زیادی برای ارزیابی و کاهش آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله مطرح شده است.

امینی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش تحلیل جهت‌گیری زلزله دسامبر ۲۰۱۷ کرمان، به گسل‌های زلزله‌خیز این منطقه اشاره کردند و بیان داشتند که توان لرزه‌زایی بعضی از گسل‌های منطقه بیش از ۶ ریشتر است.

خدادادی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی، آسیب‌پذیری شهری را در برابر مخاطره زلزله با روش Electre Fuzzy در کلان‌شهر کرج بررسی کردند. در این پژوهش، معیارهای مصالح ساختمانی، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه، تراکم جمعیت، تراکم ساختمان، مساحت قطعات، عرض معابر، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از مراکز درمانی، فاصله از فضای باز عمومی، فاصله از تأسیسات شهری و سازگاری کاربری‌ها استفاده شده است. نتایج حاصله حاکی از آسیب‌پذیر بودن مناطق ۱، ۶، ۷ و ۸ کلان‌شهر کرج در برابر زلزله است.

صفی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی و رویکرد تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالی (PSHA) سرعت شتاب زمین را برای شهر کرمان ارزیابی و نتایج را به صورت برآورد احتمالی PGA برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۷۵، و ۴۷۵ سال ارائه کردند.

صدری‌کیا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سه روش AHP، تکنیک مجموعه‌های فازی و روش Topsis، آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه را در مناطقی ارزیابی کردند که داده‌های ناکافی دارد. نمونه موردی آنها در این مطالعه، شهر تبریز بود. شاخص‌های بررسی‌شده در پژوهش آنها شامل شیب، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، نوع بافت، سن بافت، سطح آب زیرزمینی، تعداد طبقات و سن ساختمان‌ها بود. با توجه به نتایج به‌عمل‌آمده، روش فازی در تعیین تأثیرات معیارهای آسیب‌پذیری لرزه‌ای اولویت بیشتری دارد.

غضنفرپور و حامدی (۱۳۹۶) در شناسایی و سطح‌بندی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری کرمان در مقابل زلزله، شاخص‌هایی چون نوع مصالح، تراکم جمعیت، عرض معابر، نوع کاربری و تراکم سازه‌ای را بررسی و بیان

کردند که بافت‌های شهر کرمان با ۱۱/۷ درصد آسیب‌پذیری بسیار زیاد، ۱۴/۱ درصد آسیب‌پذیری زیاد، ۱۳/۳ درصد آسیب‌پذیری متوسط، ۱۵/۵ درصد آسیب‌پذیری کم، ۴۵/۹ درصد آسیب‌پذیری خیلی کم دارد که نشان‌دهنده وضعیت نامناسب بافت‌های این شهر است.

سیوندی‌پور (۱۳۹۶) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و تجزیه و تحلیل آماری، احتمال رخداد زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵/۴ ریشتر را در مناطق مختلف استان کرمان بررسی کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین احتمال وقوع زلزله در این استان، در مناطق جنوبی و با احتمال ۶/۳۸ درصد پیش‌بینی شده است.

کاظمی‌نیا و میمندی‌پاریزی (۱۳۹۶) در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر کرمان معیارهایی از جمله ویژگی‌های ساختمان‌ها (قدمت، تعداد طبقات یا ارتفاع، نوع کاربری ساختمان‌ها و تراکم جمعیتی)، فاصله از تأسیسات زیربنایی آسیب‌پذیر شهری (گاز و پمپ بنزین) و معیارهای مربوط به ویژگی‌های زمین‌ساختی را بررسی کردند که نشان از آن دارد که بیشترین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، مربوط به مناطق ۱ و ۴ شهر کرمان است.

اخلاص‌پور و همکاران (۱۳۹۵) نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه استان کرمان را تهیه کردند که با توجه به این نقشه، شمال شهر کرمان جزو مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد به شمار می‌آید.

کریمی‌کردآبادی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود با استفاده از مدل ترکیبی Fuzzy-Ahp و به‌کارگیری نرم‌افزارهای Arc GIS و Expert Choice، پهنه‌بندی خطر زلزله و تأثیر آن را در امنیت شهری منطقه یک شهر تهران بررسی کردند. متغیرها و شاخص‌های به کار گرفته شده برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زلزله در منطقه یک کلان‌شهر تهران شامل: کاربری اراضی، فاصله از مراکز خدمات شهری، زمین‌شناسی، فاصله از گسل‌ها، فاصله از جاده، ناپایداری مصالح و فاصله از مناطق پرتراکم جمعیت است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده آن است که منطقه یک کلان‌شهر تهران به شدت در خطر زلزله‌خیزی قرار دارد و مناطق با خطر خیلی زیاد و زیاد حدود ۵۰ درصد مساحت منطقه یک را در برمی‌گیرد.

جلالیان و همکار (۱۳۹۴) با استفاده از مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، روش تحلیل چند معیاری فضایی و به‌کارگیری پنج شاخص گسل، جنس زمین، شیب، زمین لغزش و تراکم جمعیت به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری زلزله در بخش چورزق شهرستان طارم اقدام کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان‌دهنده آن است که بخش عمده‌ای از شهرستان طارم و سکونتگاه‌های روستایی منطقه در پهنه‌های با خطر زیاد (۴۵/۷۱ درصد) و خیلی زیاد (۱۴/۷۱ درصد) قرار گرفته است.

امینی‌ورکی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی، دیدگاه‌های حاکم را بر آسیب‌پذیری شهرها در برابر مخاطرات محیطی و استخراج مؤلفه‌های اثرگذار در آن با استفاده از روش کیو بررسی و با تجمیع دیدگاه‌های مختلف، مؤلفه‌های اثرگذار را در آسیب‌پذیری شهرها شناسایی و تعیین کردند. یافته‌های پژوهش بر پایه تحلیل عاملی کیو نشان‌دهنده سه دیدگاه در زمینه آسیب‌پذیری شهری در ایران است.

پور موسوی و همکاران (۱۳۹۳) ساختمان‌های منطقه ۳ شهر تهران را با روش Fuzzy و AHP ارزیابی کردند و نتایج حاصل از پژوهش حاکی از این بود که مصالح بی‌دوام و کم‌مقاوم در ساخت‌وسازها، زیادبودن عمر ساختمان‌ها، مکان‌یابی ساخت‌وسازها بر روی زمین‌های ناپایدار، رعایت نکردن استانداردهای ساخت‌وساز از جمله آیین‌نامه ۲۸۰۰، تمرکز و تراکم زیاد جمعی و برج‌سازی با پژوهش‌های ضعیف از جمله عوامل آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله است.

یاری‌قلی و همکاران (۱۳۹۳) آسیب‌پذیری اجتماعی نواحی چهارگانه شهر ابهر را در برابر زلزله تحلیل کردند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن عواملی همچون توزیع جمعیت در گروه‌های سنی پرخطر هنگام زلزله، اشتغال، سواد، تعداد معلولان، کاربری‌های پرخطر و ... در قالب سه شاخص جمعیت، اقتصادی-اجتماعی و فاصله فیزیکی نسبت به کاربری‌های خطرناک و ضروری بررسی شده است. روش Electre برای رتبه‌بندی نواحی شهر ابهر از لحاظ شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی استفاده شده است؛ همچنین در این پژوهش، برای وزن‌دهی به معیارها از AHP استفاده شده است. یافته‌های حاصل نشان‌دهنده آن است که آسیب‌پذیری اجتماعی نتیجه‌ای از نابرابری‌های اجتماعی در جوامع شهری است. به طوری که ناحیه ۲ بیشترین و ناحیه ۴ کمترین میزان آسیب‌پذیری اجتماعی را در برابر زلزله دارد.

قنبری و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهش خود به شناسایی و پهنه‌بندی محدوده شهر تبریز از نظر میزان آسیب‌پذیری در مقابل خطر زمین‌لرزه توجه کردند. سپس با استفاده از توابع تحلیلی نرم‌افزار GIS و مدل‌های وزن‌دهی معیار، تحلیل سلسله‌مراتبی و شاخص همپوشانی نقشه نهایی پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهر در مقابل زلزله تهیه شد. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) لرزه‌خیزی شهر کرمان را بررسی کردند. براساس نقشه خطر به‌دست‌آمده از شهر کرمان (نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین) میزان خطر در بخش‌های مرکزی، باختری و همچنین بخش‌هایی از جنوب شهر به شدت افزایش می‌یابد که سازه‌های موجود در این بخش‌ها در اثر زلزله احتمالی به شدت ویران خواهد شد.

شمسی‌پور (۲۰۱۰) در پژوهش خود با استفاده از روش AHP و منطق فازی مناطق حساس و محیط‌های آسیب‌پذیر را در غرب استان فارس پهنه‌بندی کرد و نتیجه گرفت با توجه به اینکه تاکنون پژوهش دقیقی در زمینه مناطق حساس و آسیب‌پذیر از لحاظ مخاطرات ژئومورفیک صورت نگرفته است، پژوهش‌های ترکیبی در زمینه آسیب‌پذیری مناطق مختلف استان و مخاطرات طبیعی با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی و داده‌های موجود بسیار لازم و ضروری است.

احدنژاد و همکاران (۱۳۸۸) در ارزیابی آسیب‌پذیری بافت فرسوده فیض‌آباد شهر کرمانشاه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی شاخص‌هایی چون قدمت ساختمان‌ها، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه، نوع مصالح، نوع کاربری و سطح اشتغال را بررسی کردند. نقشه استخراج‌شده نهایی نشان‌دهنده میزان آسیب‌پذیری کلی محله در برابر زلزله است.

آنتونیون و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی، سناریوهای مختلف زلزله را طراحی و با استفاده از مدل RISK-UE، آسیب‌پذیری منطقه لیگوریا را در ایتالیا شناسایی کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیرات زلزله بر تأسیسات صنعتی در شهرها با استفاده از اطلاعات زلزله‌های پیشین بررسی و با الگوریتمی ارزیابی می‌شود.

چنین پژوهش‌هایی هرچند در سطح جهانی مورد توجه نسبی بوده است، در کشور ایران و به‌خصوص در شهر کرمان کم‌تر به آن توجه شده است. پژوهش‌های اندکی به صورت پراکنده در مناطق مختلف استان در زمینه مخاطرات طبیعی (لغزش، زمین‌لرزه و سیل) صورت گرفته که در همه آنها کمتر مسئله آسیب‌پذیری بررسی شده است. در این پژوهش، تحلیل و شناخت آسیب‌پذیری شهری از مخاطرات ژئومورفیک به عنوان اقدامی ابزاری برای پیشگیری از زایش فاجعه بر مبنای زیستن در نواحی پرخطر مورد توجه قرار گرفته است که مهم‌ترین تفاوت این پژوهش با سایر تحقیقات در زمینه مخاطرات طبیعی است.

همچنین جدول (۱) نشان‌دهنده پیشینه‌ای از پژوهش‌های گذشته و انواع شاخص‌های به‌کاررفته برای آسیب‌پذیری شهری در راستای مخاطره زمین‌لرزه است که در تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری از آنها بهره‌گرفته می‌شود.

جدول (۱) شاخص‌های مورداستفاده برای آسیب‌پذیری شهری مخاطره زمین‌لرزه در پژوهش‌های گذشته

Table (1) Indicators used for urban vulnerability to earthquake risk in previous studies

محقق - سال نشر اثر	شاخص‌های مورداستفاده برای پهنه‌بندی خطر
احدنژاد (۱۳۸۸)	قدمت ساختمان‌ها، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و نوع مصالح، نوع کاربری و سطح اشتغال
ساسان‌پور (۱۳۸۹)	دسترسی به فضاهای باز عمومی، دسترسی به معابر، فاصله از گسل، مساحت و اندازه قطعات
منزوی (۱۳۸۹)	تراکم جمعیت، فضاهای باز عمومی، کاربری اراضی، مساحت و اندازه قطعات و نوع مصالح
فراهانی (۱۳۹۰)	تعداد طبقات، کیفیت ابنیه، دسترسی به معابر، مساحت و اندازه قطعات و نوع مصالح
فرج‌زاده اصل و همکاران (۱۳۹۰)	تراکم جمعیت، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، کاربری اراضی و جنس زمین
قنبری (۱۳۹۲)	تراکم جمعیت، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، دسترسی به فضاهای باز عمومی، دسترسی به معابر، کاربری اراضی، مساحت و اندازه قطعات و تراکم ساختمان
پورعبدل (۱۳۹۲)	تراکم جمعیت، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، دسترسی به فضاهای باز عمومی، دسترسی به معابر، فاصله از مراکز درمانی، تأسیسات شهری و فاصله از گسل
مشک‌ساز (۱۳۹۲)	فاصله از گسل، کاربری اراضی، مساحت و اندازه قطعات و تراکم ساختمان
اسفندیاری (۱۳۹۳)	تراکم جمعیت، تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، دسترسی به معابر، فاصله از مراکز درمانی، فاصله از گسل، کاربری اراضی، نوع مصالح و تراکم ساختمان
حاتمی‌نژاد (۱۳۹۳)	تراکم جمعیت، دسترسی به فضاهای باز عمومی، دسترسی به معابر، فاصله از مراکز درمانی، فاصله از گسل، مساحت و اندازه قطعات، نوع مصالح، تراکم ساختمان و جنس زمین
تقوایی (۱۳۹۴)	تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، دسترسی به معابر، فاصله از مراکز درمانی، فاصله از گسل، کاربری اراضی و مساحت و اندازه قطعات
غضنفرپور و حامدی (۱۳۹۶)	نوع مصالح، تراکم جمعیت، عرض معابر، نوع کاربری و تراکم سازه‌ای
کاظمی‌نیا و میمند (۱۳۹۶)	قدمت، تعداد طبقات، نوع کاربری ساختمان‌ها، تراکم جمعیتی، فاصله از تأسیسات زیربنایی آسیب‌پذیر شهری (گاز و پمپ بنزین) و ویژگی‌های زمین‌ساختی
ساسان‌پور (۱۳۹۶)	تعداد طبقات، کیفیت ابنیه، جنس مصالح، عرض معابر، دسترسی به فضای باز، فاصله از گسل، کاربری اراضی، مساحت قطعات و قدمت ابنیه
استرادا (۲۰۱۲)	تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، کاربری اراضی، نوع مصالح، جنس زمین
بزازان‌لطفی - (۲۰۱۷)	فاصله از گسل، کاربری اراضی
صدری‌کیا - (۲۰۱۷)	تعداد طبقات، کیفیت ابنیه و جنس مصالح، فاصله از گسل، نوع مصالح و جنس زمین

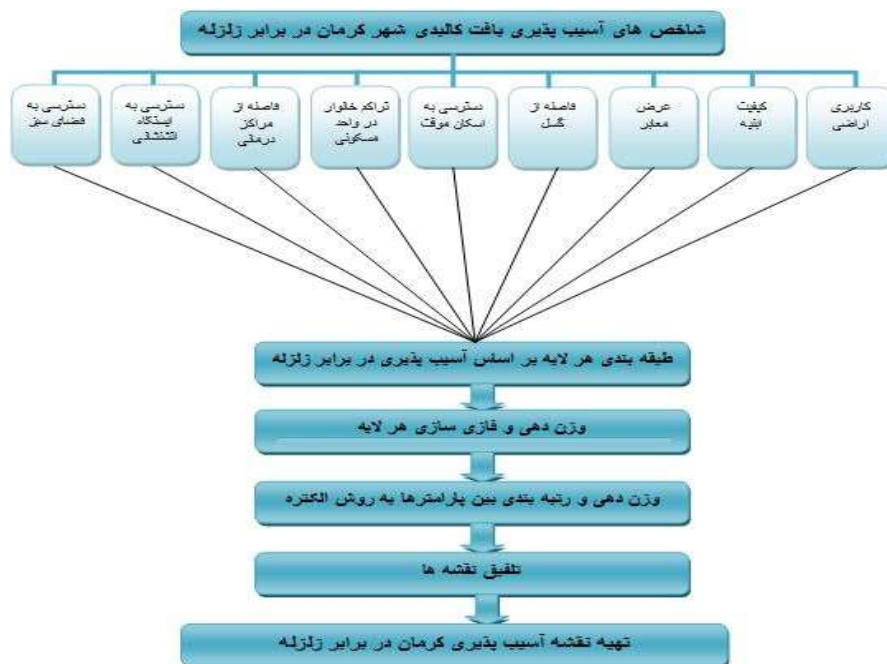
روش پژوهش

این پژوهش از نظر روش تحقیق، توصیفی-تحلیلی و از نظر هدف، کاربردی محسوب می‌شود که وضعیت آسیب‌پذیری ناشی از مخاطره زلزله را در محدوده شهر کرمان تبیین می‌کند. ابزار گردآوری داده‌ها در این پژوهش مشتمل بر اسناد و مدارک نوشتاری، داده‌های آماری (آمار کمی و کیفی)، اسناد تصویری و بررسی‌های میدانی است.

همچنین در این پژوهش از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، نقشه‌های شهری، مدل ارتفاع رقومی (DEM)، نقشه طبقات ارتفاعی، نقشه شیب و گسل‌های اصلی و فرعی بهره گرفته شده است. جامعه مورد مطالعه شامل مناطق پنج‌گانه شهری کرمان است. در این پژوهش از مرزها و تقسیم‌بندی مناطق استفاده شد که در آن کالبد شهر کرمان محدوده‌هایی را به نام طرح جامع شهر کرمان (بدون حریم مناطق) در بر گرفته بود. این تقسیم‌بندی به صورت مناطق، به‌تازگی در شهر کرمان از سوی کارشناسان مربوطه صورت پذیرفته است. روش تجزیه و تحلیل اطلاعات طبق روش‌های مبتنی بر پایگاه اطلاعات و با استفاده از نرم‌افزارهای مبتنی بر رویکرد سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. به‌منظور وزن‌دهی به شاخص‌ها و متغیرهای مورد استفاده از مدل فازی استفاده و سپس برای شناخت میزان آسیب‌پذیری بافت کالبدی شهر، با استفاده از GIS شاخص‌های وزن‌دار شده در یک تابع قرار داده شده است.

معرفی متغیرها و شاخص‌ها

با در نظر داشتن پارامترهای موجود و روش مورد استفاده در پژوهش، شکل (۱) نشان‌دهنده فلوچارت شاخص‌ها و مراحل پژوهش است.



شکل (۱) مراحل و شاخص‌های مورد استفاده برای آسیب‌پذیری شهری مخاطره زمین‌لرزه

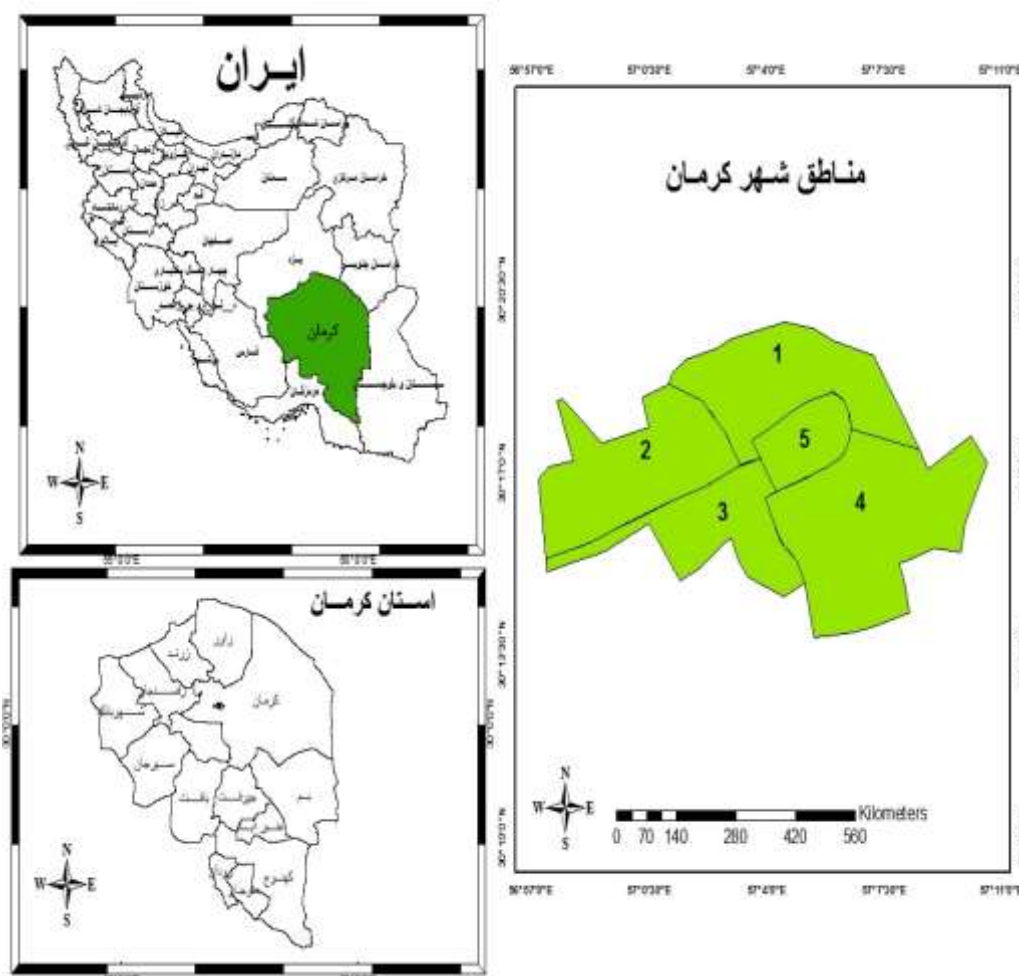
Figure (1) Steps and indicators used for urban vulnerability to earthquake risk

محدوده و قلمرو پژوهش

شهر کرمان در جنوب خاور ایران، در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۹ دقیقه خاوری و عرض جغرافیایی ۵۷ درجه تا ۵۷ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. یکی از کلان‌شهرهای ایران و

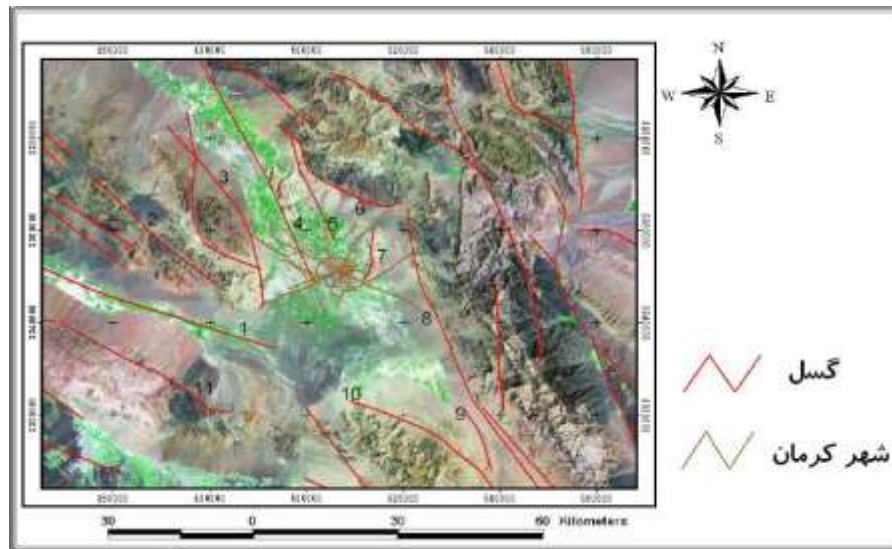
مرکز استان کرمان پهناورترین استان ایران در جنوب شرقی قرار دارد. جمعیت این شهر طبق سرشماری براساس آمار سال ۹۵ معادل ۷۳۸/۷۲۴ نفر بوده و بزرگ‌ترین شهر در جنوب خاور کشور است. این شهر با ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا در حاشیه شمال خاوری دشت کرمان قرار گرفته است (شکل ۲).

وجود گسل‌های متعدد و فعال در منطقه، که طی فازهای تکتونیکی پیشین شکل گرفته، استان کرمان را در کمربند زلزله‌خیز ایران قرار داده است. تلاقی گسل‌های نایبند، گوک (گلباف) و لکرکوه در شمال شرق شهر کرمان پیچیدگی خاصی در زمین‌ساخت منطقه ایجاد کرده و یک گره تکتونیکی به وجود آورده است که خطر لرزه‌خیزی زیادی دارد. گسل کوهبنان، لکرکوه و نایبند در شمال کرمان، گسل گوک و شهداد در مرکز و گسل‌های بم و سبزواران در جنوب استان جنباترین گسل‌های منطقه را تشکیل می‌دهد. گسل‌های محدوده شهر کرمان: ۱. گسل باغین ۲. گسل داوران ۳. گسل الغدیر ۴. گسل کرمان-زنگی‌آباد ۵. گسل شمال کرمان ۶. گسل تراستی کوهبنان ۷. گسل صاحب‌الزمان ۸. گسل شرق دشت کرمان ۹. گسل ماهان ۱۰. گسل جوپار ۱۱. گسل جنوب دشت باغین در شکل (۳) مشخص شده است (اخلاص پور و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل (۲) موقعیت شهر کرمان

Figure (2) Location of Kerman city



شکل (۳) گسل‌های محدوده شهر کرمان (اخلاص‌پور و همکاران، ۱۳۹۲)

Figure (3) Faults in the area of Kerman cit

بحث و نتایج

فازی‌سازی داده‌ها

فازی‌سازی به صورت مستقیم صورت می‌گیرد و با استفاده از الگوریتم‌ها یا عبارات منطقی انجام می‌شود. شیوه استفاده شده برای فازی‌سازی اعداد در این پژوهش مبتنی بر دو روش، محاسبه مستقیم و کارشناسانه است. در روش محاسبه کارشناسانه بعد از تعیین دامنه تغییرات هر پارامتر، دامنه‌ها براساس پژوهش‌های قبلی طبقه‌بندی شده و سپس به صورت دستی، منطبق با واقعیت و طبق نظر کارشناسان وزن‌دهی می‌شود.

برای ایجاد لایه‌ها و مجموعه‌های فازی، توابع ریاضی چون آستانه خطی سیگموئیدال، S شکل، هایپریولیک و ... به کار برده می‌شود؛ به عنوان مثال، اگر برای خطرپذیری بافت شهری تغییری مانند نزدیکی به گسل

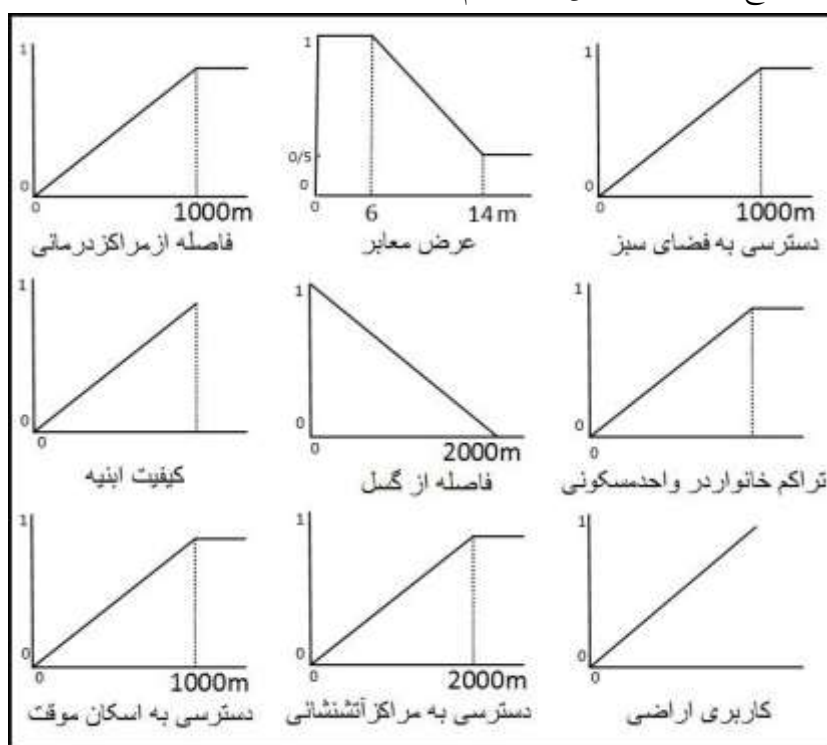
بررسی شود، تعیین درجه عضویت به شرح مقابل است:

$$F(x) \begin{cases} \text{امتیاز (1)} \rightarrow \text{متر } x < 2000 \\ \text{امتیاز} = \frac{x_{max} - X}{\Delta x} \rightarrow \text{متر } 4000 < x < 2000 \\ \text{امتیاز (0)} \rightarrow \text{متر } x < 4000 \end{cases}$$

بدین معنی که مقدار فازی نقطه ۲۰۰۰ متری از گسل برابر با (۱)، مقدار فازی نقطه ۴۰۰۰ متری از گسل برابر با (۰) و مقدار فازی نقطه ۲۶۰۰ با استفاده از تابع آستانه خطی برابر با ۰/۶۶ خواهد بود. برای تمام لایه‌های دیگر همین عملیات پیاده‌سازی و فضای منطقه ارزش‌گذاری می‌شود. توانایی سیستم GIS در آنالیز رستری نقشه، امکان پیاده‌سازی تکنیک‌های مختلفی چون فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی را فراهم می‌کند؛ زیرا با تعیین آستانه مثبت و منفی داده‌ها (۰ تا ۱ و نه صفر و یک) درجه عضویت متغیرها مشخص می‌شود (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۷).

وزندگی و طبقه‌بندی آسیب‌پذیری هرکدام از متغیرها

پس از تطبیق دقیق نواحی مشخص شده در طرح تفصیلی شهر کرمان با نقشه طرح جامع شهری، حدود و مرزهای مناطق به دقت مشخص شد. سپس به هر پارامتر در Arc Map اطلاعات جدولی مربوطه داده شد. پس از تخصیص داده‌ها به هر لایه، با توجه به طیف آسیب‌پذیری هرکدام از پارامترها، وزندگی پارامترها صورت گرفت. شایان ذکر است که اساس طبقه‌بندی‌ها براساس مطالعات و پژوهش‌های پیشین بوده است. توابع مربوط به هرکدام از پارامترها و وزندگی به آنها براساس توابع موجود در شکل (۴) انجام شد:



شکل (۴) توابع شاخص‌های مورداستفاده در تعیین آسیب‌پذیری زلزله کرمان به روش فازی

Figure (4) Function of indicators used to determine Kerman earthquake vulnerability by fuzzy method

مدل ELECTRE

برای ایجاد رتبه‌بندی گزینه‌های ارائه‌شده، الگوریتم با معرفی روابط برتری قوی و ضعیف به گزینه‌ها ترتیب می‌دهد. روش الگوریتم مبتنی بر ارزیابی دو شاخص است: شاخص همخوانی و ناهمخوانی که برای هر زوج از گزینه‌ها تعریف می‌شود. شاخص همخوانی برای زوج (k, l) قدرت این فرضیه را که گزینه k حداقل به خوبی گزینه l است، اندازه‌گیری می‌کند. شاخص ناهمخوانی، قدرت شواهد علیه این فرضیه را اندازه‌گیری می‌کند. در الگوریتم، ماتریس همخوانی برای هر زوج از گزینه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(k, l) = \frac{\sum_{j \in c(k, l)} w_j}{\sum_{j=1}^m w_j}$$

جایی که $C(k, l)$ مجموعه معیارهایی است که به ازای آنها گزینه k برابر یا بهتر از گزینه l ، وزن معیار w_j و

m تعداد معیارهاست.

ماتریس ناهمخوانی برای زوج (k, l) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$NI(k, l) = \frac{\max_j [x_{lj} - x_{kj}]}{\delta}$$

جایی که x_{ij} عملکرد گزینه i ام تحت معیار j ام و δ بیشترین اختلاف بین عملکرد گزینه‌ها در هر معیار است.

$$\delta = \max_{(k,l),j} |x_{lj} - x_{kj}|$$

بعد از محاسبه شاخص‌های همخوانی و ناهمخوانی برای هر زوج از گزینه‌ها، روابط برتری قوی و ضعیف با مقایسه این شاخص‌ها با دو مقدار آستانه‌ای (I^*, NI^*) برای برتری قوی و (I^-, NI^-) ضعیف محاسبه می‌شود. زوج (I^*, NI^*) به عنوان آستانه‌های همخوانی و ناهمخوانی برای روابط برتری قوی و زوج (I^-, NI^-) به عنوان آستانه‌های همخوانی و ناهمخوانی برای روابط برتری ضعیف تعریف می‌شود؛ جایی که $I^* > I^-$ و $NI^* < NI^-$. سپس روابط برتری طبق رابطه‌های زیر ساخته می‌شود:

اگر $I(k, l) \geq I^*$ و $NI(k, l) \leq NI^*$ و $I(l, k) \geq I^*$ و $NI(l, k) \leq NI^*$ آنگاه گزینه k قویا به گزینه l ترجیح داده می‌شود.

اگر $I(k, l) \geq I^-$ و $NI(k, l) \leq NI^-$ و $I(l, k) \geq I^-$ و $NI(l, k) \leq NI^-$ آنگاه گزینه k به طور ضعیف به گزینه l ترجیح داده می‌شود. مقادیر I^* و NI^* و I^- و NI^- به وسیله تصمیم‌گیرنده اتخاذ می‌شود.

در مرحله بعد، فرایند پیش رتبه‌بندی نزولی و صعودی برای به دست آوردن دو مجموعه به کار گرفته می‌شود. اولین مجموعه با پیش رتبه‌بندی نزولی از طریق انتخاب بهترین گزینه (گزینه‌ای که به گزینه‌های دیگر ترجیح داده می‌شود) و حرکت به سمت بدترین گزینه به دست می‌آید. مجموعه دوم با پیش رتبه‌بندی صعودی ساخته می‌شود. در این مورد ابتدا، بدترین گزینه‌ها (گزینه‌ای که با گزینه‌های دیگر ترجیح داده می‌شود) انتخاب می‌شود و رتبه‌بندی با اختصاص بهترین گزینه به پایان می‌رسد.

آخرین مرحله، ترکیب کردن این دو مجموعه برای به دست آوردن رتبه‌بندی نهایی است. روشی معمولی برای تعیین رتبه بندی نهایی، استفاده از تقاطع بین دو مجموعه صعودی و نزولی است. بدین صورت که «گزینه k برتر از گزینه l است» اگر و تنها اگر در هر دو مجموعه، k برتر از l باشد یا در رتبه یکسانی نسبت به l قرار گرفته باشد. اگر گزینه k در یکی از مجموعه‌ها برتر از گزینه l باشد؛ اما در مجموعه دیگری l برتر از k باشد، در رتبه‌بندی نهایی دو گزینه مقایسه‌ناپذیر خواهد بود. (وانگ و تریانتافیلو، 2008).

شاخص‌های مورد استفاده در تعیین میزان آسیب‌پذیری شهر کرمان در مقابل زلزله

تراکم خانوار در واحد مسکونی

شاخص تراکم خانوار در واحد مسکونی نشان‌دهنده کفایت یا کمبود تعداد واحدهای مسکونی موجود در رابطه با تعداد خانوارهای موجود است. این شاخص، که وضعیت سکونت خانوار را در واحد مسکونی تعریف می‌کند، هرچه قدر به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وضعیت مناسب‌تری به لحاظ سکونت است و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، حاکی از بی‌خانمان بودن یا زندگی بیش از یک خانوار در یک واحد مسکونی است. تراکم زیاد خانوار در واحد مسکونی موجب ایجاد مشکل هنگام زلزله و اختلال در امر امداد رسانی زمان بروز حادثه می‌شود. تخلیه ساکنان در این واحدها کندتر انجام می‌شود. در شهر کرمان تعداد زیادی

از بلوک‌هایی، که بیش از یک خانوار در واحد مسکونی در آن ساکن هستند، در بخش جنوبی (منطقه ۴) شهر دیده می‌شود که تعداد خانوارها در هر واحد گاهی به ۴ خانوار نیز رسیده است. جدول (۲) نشان‌دهنده ارتباط بین تراکم خانوار در واحد مسکونی و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است. شایان ذکر است که اساس طبقه‌بندی‌ها براساس مطالعات و پژوهش‌های پیشین بوده است (از جمله پژوهش خدادادی و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول (۲) رابطه آسیب‌پذیری و تراکم خانوار در واحد مسکونی

table (2) Vulnerability and Households density in a residential unit

وزن فازی متغیر	تراکم خانوار در واحد مسکونی	میزان آسیب‌پذیری
۰	۱	آسیب‌پذیری کم
۰/۵	۲ تا ۱	آسیب‌پذیری متوسط
۱	۴ تا ۲	آسیب‌پذیری زیاد

کیفیت ساختمان‌ها (عمر ساختمان)

این شاخص تأثیر بسیار مهمی بر میزان آسیب‌پذیری ساختمان دارد. احتمال مقاومت ساختمان‌های با کیفیت زیاد (نوساز) در مقابل زلزله، نسبت به ساختمان‌های مخروبه و مرمتی بیشتر است. شایان ذکر است که قدمت یک سازه همیشه رابطه مستقیمی با کیفیت ندارد؛ اما در بیشتر موارد ساختمان‌هایی با سن بیش از ۳۰ سال، نیاز به تعمیر اساسی دارد؛ در عین حال رعایت نکردن اصول آیین‌نامه زلزله در ساخت و ساز ساختمان نیز باعث کاهش کیفیت بنا می‌شود. به‌طور کلی با افزایش عمر بناهای ساختمانی، آسیب‌پذیری آنها در برابر زلزله افزایش می‌یابد. ابنیه شهر کرمان به سه دسته: بادوام، نیمه بادوام و کم‌دوام تقسیم شده است که بیشترین بناهای کم‌دوام و نیمه بادوام در بافت‌های قدیمی و در مناطق ۴ شهری واقع شده است. جدول (۳) نشان‌دهنده ارتباط بین کیفیت ابنیه و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۳) رابطه آسیب‌پذیری و کیفیت ابنیه

table (3) Vulnerability and Quality of buildings

وزن فازی متغیر	کیفیت ابنیه	میزان آسیب‌پذیری
۰	نوساز (بادوام)	آسیب‌پذیری کم
۰/۵	مرمتی (نیمه دوام)	آسیب‌پذیری متوسط
۱	تخریبی (کم‌دوام)	آسیب‌پذیری زیاد

دسترسی به فضای سبز

فضای سبز، نقش مهمی در کاهش وسعت عمل و نتایج بیشتر حوادث طبیعی و مصنوعی دارد. یکی از مهم‌ترین عملکردهای آنها هنگام بروز زلزله، جداسازی یک منطقه خطرناک از دیگری و بدین ترتیب متمرکز کردن فعالیت نیروهای مخرب و جلوگیری از تخریب زنجیره‌ای بناهاست. هرچه کاربری‌های شهری، بیشتر به فضاهای سبز نزدیک‌تر باشد، آسیب‌پذیری کمتری دارد. بیشترین دسترسی به فضای سبز دارای ارزش عددی ۰ و دورترین فاصله از آنها دارای ارزش ۱ خواهد بود. مابقی به نسبت فاصله ارزش عددی کسب می‌کند. جدول (۴) نشان‌دهنده ارتباط بین دسترسی به فضای سبز و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۴) رابطه آسیب‌پذیری و دسترسی به فضای سبز

tabel (4) Vulnerability and Access to green space

وزن فازی متغیر	دسترسی به فضای سبز	میزان آسیب‌پذیری
۰	بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی کم
طبق تابع خطی مربوطه	حداصل کمترین و بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری متوسط
۱	کمترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

عرض شبکه معابر

آسیب‌پذیری معابر، ساختار فضایی معابر را بررسی می‌کند و در زمینه تخلیه عمومی به کار می‌رود تا قسمت‌های آسیب‌پذیر ساختار شهری مشخص شود. آسیب‌پذیری به ساختار شبکه به این دلیل اهمیت می‌یابد که در شبکه راه‌ها، هرچه تعداد تقاطع‌ها و لوپ‌ها بیشتر و معابر عرض بیشتری داشته باشد، دسترسی و امداد رسانی سریع‌تر و راحت‌تر انجام می‌گیرد؛ زیرا در صورت مسدود شدن یا تخریب یکی از راه‌ها، می‌توان از مسیرهای دیگر به محل مدنظر رسید. از سوی دیگر، باید به مقوله ترافیک معابر و جریان رفت و آمد در شبکه‌های ارتباطی، به‌ویژه در ساعات اوج تردد توجه ویژه‌ای کرد. با مطالعه وضعیت معابر، قسمت‌های آسیب‌پذیر در زمان تخلیه مشخص می‌شود. در این میان، سهولت دسترسی نقش حیاتی دارد. هنگام وقوع زلزله، بسیاری از معابر شهری بر اثر ریزش آوار ساختمانی مسدود خواهد شد و این مسئله، زمینه اختلال و تأخیر در عملکرد سیستم مدیریت بحران پس‌لرزه را فراهم خواهد کرد. منطقه مرکزی شهر کرمان، که شامل بازار و مناطق پیرامونی آن است (مناطق ۵ و ۴)، با توجه به تعداد زیاد مراجعان مشکلاتی به‌لحاظ شکل و عرض معبر دارد که پاسخ‌گویی نیاز کنونی مراجعان نیست. معابر بافت کهنه و قدیمی به علت عرض کم و تقاطع‌های نامناسب با یکدیگر هنگام بروز زلزله فاجعه‌آفرین است.

جدول (۵) نشان‌دهنده ارتباط بین عرض شبکه معابر و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۵) رابطه آسیب‌پذیری و عرض شبکه معابر شهری

tabel (5) Vulnerability and Width of passages

وزن فازی متغیر	عرض شبکه معابر	میزان آسیب‌پذیری
۰	معابر با عرض بیش از ۱۴ متر	آسیب‌پذیری کم
۰/۵	معابر با عرض ۹ تا ۱۴ متر	آسیب‌پذیری متوسط
۱	معابر با عرض ۶ متر و کمتر	آسیب‌پذیری زیاد

فاصله از مراکز درمانی

فاصله نزدیک از مراکز درمانی (بیمارستان و درمانگاه)، امداد و نجات در زمان پس از وقوع زلزله تأثیر به‌سزایی در انتقال مصدومان در کمترین زمان ممکن به این مراکز، برای امداد رسانی و نجات جان آنها دارد. این شاخص بیشتر با زمان بعد از وقوع حادثه در ارتباط است؛ از این رو، دسترسی سریع و آسان به مراکز امداد و نجات، موجب تسریع

عملیات امداد و نجات و خدمات‌رسانی می‌شود. در شهر کرمان، بیمارستان‌ها و درمانگاه‌های متعددی وجود دارد که اغلب آنها در بخش مرکزی شهر متمرکز شده است. جدول (۶) نشان‌دهنده ارتباط بین فاصله از مراکز درمانی و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۶) رابطه آسیب‌پذیری و فاصله از مراکز درمانی

table (6) Vulnerability and Distance from medical centers

وزن فازی متغیر	فاصله از مراکز درمانی	میزان آسیب‌پذیری
۰	کمترین فاصله	آسیب‌پذیری خیلی کم
طبق تابع خطی مربوطه	حداقل کمترین و بیشترین فاصله	آسیب‌پذیری متوسط
۱	بیشترین فاصله	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی

یکی از شاخص‌های موردبررسی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله، دسترسی به مراکز آتش‌نشانی است. این شاخص با هدف تأمین ایمنی شهر و شهروندان و در راستای امداد‌رسانی در مواقع ایجاد بحران به‌خصوص حوادثی چون زلزله، برای کاهش خسارات جانی و مالی بررسی و مطالعه قرار می‌شود. دسترسی نداشتن مناسب به مرکز آتش‌نشانی سبب افزایش میزان تلفات جانی و مالی شهروندان می‌شود. موقعیت ایستگاه‌های آتش‌نشانی و شعاع عملکرد هر ایستگاه در محدوده پیرامونی خود از جمله شاخص‌هایی است که ارزیابی می‌شود. در شهر کرمان بیشترین مناطقی که دسترسی مناسبی نسبت به ایستگاه آتش‌نشانی ندارد، در منطقه ۴ قرار دارد. جدول (۷) نشان‌دهنده رابطه بین میزان دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی و آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۷) رابطه آسیب‌پذیری و دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی

table (7) Vulnerability and Access to the fire-fighting station

وزن فازی متغیر	دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی	میزان آسیب‌پذیری
۰	بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی کم
طبق تابع خطی مربوطه	حداقل کمترین و بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری متوسط
۱	کمترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

دسترسی به اسکان موقت

در راستای ارائه پاسخ مناسب هنگام بروز بحران زلزله لازم است مکان‌هایی برای استقرار و اسکان موقت در سطح شهر در نظر گرفته شود. استقرار این اماکن باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که امکان دسترسی به آنها در تمامی بخش‌های شهر وجود داشته باشد. در صورت دسترسی نداشتن مناسب به مکان‌های اسکان موقت امکان وارد شدن خسارات جانی به شهروندان وجود دارد. پراکنش فضاهای باز و ایمن برای اسکان موقت در شهر کرمان نشان‌دهنده این است که اغلب این مکان‌ها در بخش‌های مرکزی دیده می‌شود و تراکم این فضاها در بخش‌های میانی و حاشیه‌ای کمتر است. جدول (۸) نشان‌دهنده ارتباط بین دسترسی به اسکان موقت و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۸) رابطه آسیب‌پذیری و دسترسی به اسکان موقت

tabel (8) Vulnerability and Access to temporary accommodation centers

وزن فازی متغیر	دسترسی به اسکان موقت	میزان آسیب‌پذیری
۰	بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی کم
طبق تابع خطی مربوطه	حدافاصل کمترین و بیشترین دسترسی	آسیب‌پذیری متوسط
۱	کمترین دسترسی	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

فاصله از گسل

گسل‌ها نقش عمده‌ای در افزایش شدت و حتی به وجود آوردن زلزله‌ها دارد. بدیهی است تأسیس پدیده‌های انسان‌ساخت در حوالی گسل‌ها مقدار آسیب‌پذیری آنها را در برابر زلزله افزایش می‌دهد؛ بنابراین با نزدیک شدن به محدوده گسل انتظار زیاد شدن مقدار آسیب‌پذیری می‌رود. منطقه ۴ شهر کرمان کمترین فاصله را با گسل دارد. جدول (۹) نشان‌دهنده ارتباط بین فاصله از گسل و میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله است.

جدول (۹) رابطه آسیب‌پذیری و فاصله از گسل

tabel (9) Vulnerability and Distance from the fault

وزن فازی متغیر	فاصله از گسل	میزان آسیب‌پذیری
۰	بیشترین فاصله	آسیب‌پذیری خیلی کم
طبق تابع خطی مربوطه	حدافاصل کمترین و بیشترین فاصله	آسیب‌پذیری متوسط
۱	کمترین فاصله	آسیب‌پذیری خیلی زیاد

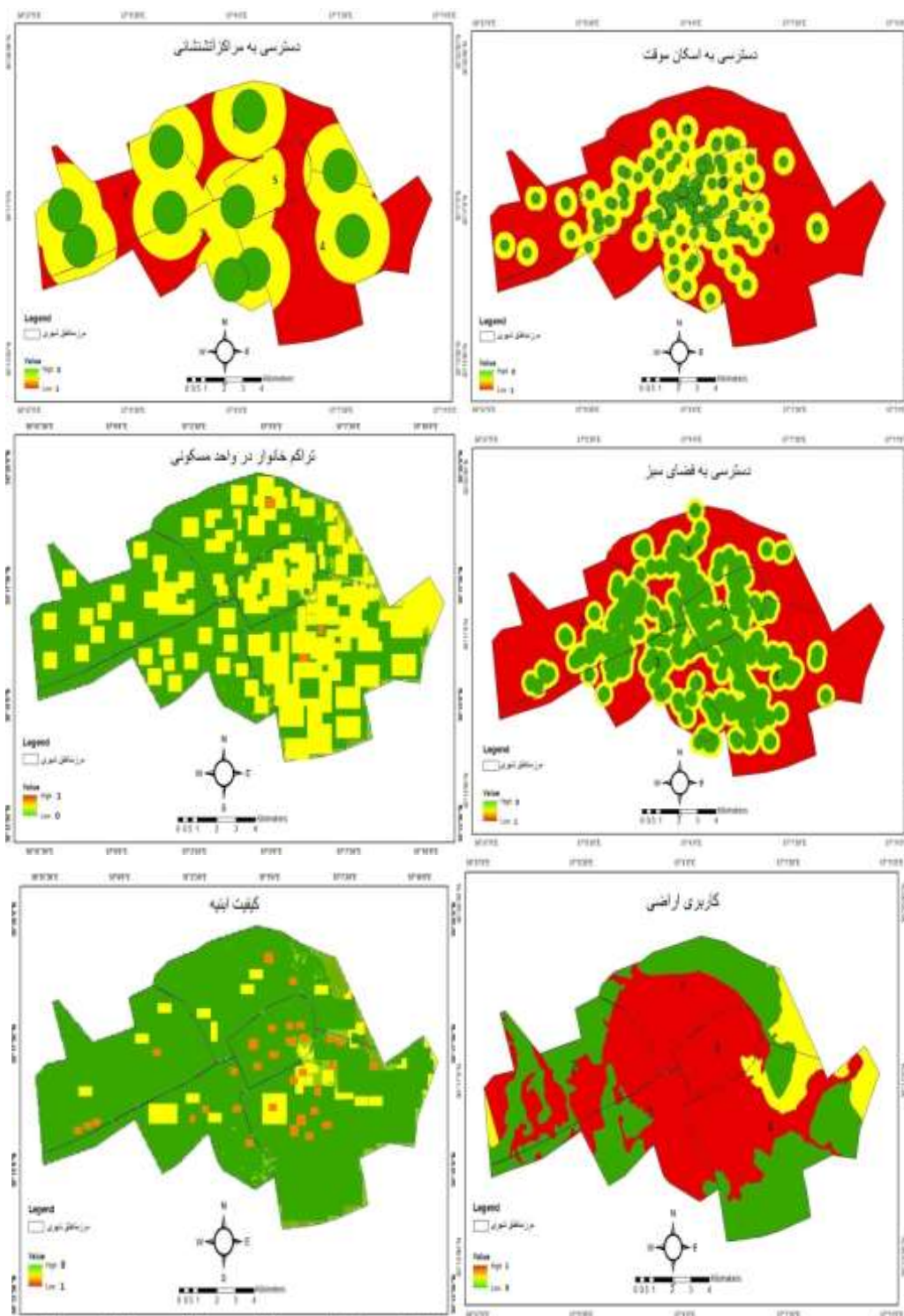
کاربری اراضی

کاربری‌های مسکونی یکی از مهم‌ترین کاربری‌هایی است که در سطح اراضی شهری به‌طور گسترده وجود دارد؛ در عین حال کاربری‌هایی در شهر وجود دارد که در بحث چگونگی کنترل بحران ناشی از زلزله و کاهش اثرات سوء آن، اهمیت حیاتی پیدا می‌کند. قرارگیری ساختمان‌ها کنار یکدیگر در میزان آسیب‌پذیری مؤثر است؛ مثل قرارگیری تأسیسات و تجهیزات شهری کنار کاربری مسکونی که باعث ایجاد خسارت جانی و مالی می‌شود. جدول (۱۰) نشان‌دهنده ارتباط بین کاربری اراضی و آسیب‌پذیری است.

جدول (۱۰) رابطه آسیب‌پذیری و نوع کاربری اراضی

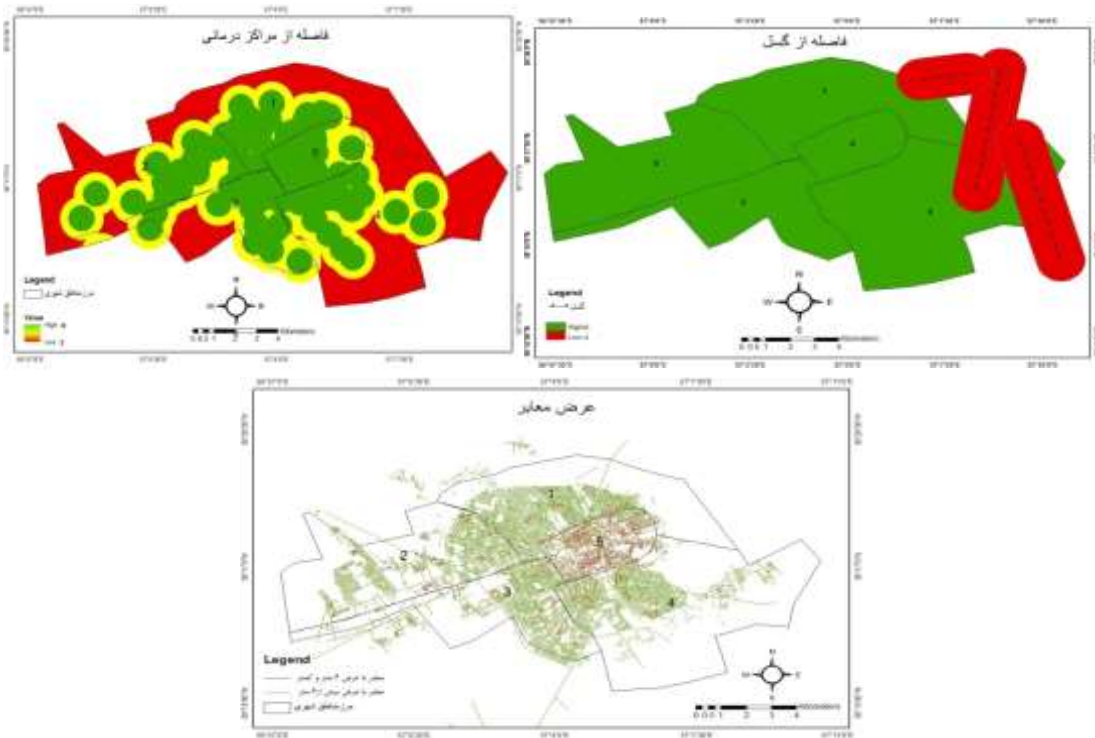
tabel (10) Vulnerability and land use

وزن فازی متغیر	کاربری اراضی	میزان آسیب‌پذیری
۰	کاربری‌های بایر و فضای سبز و باغ	آسیب‌پذیری کم
۰/۵	کاربری‌های مسکونی، تجاری، خدماتی و ...	آسیب‌پذیری متوسط
۱	کاربری‌های حساس و استراتژیک	آسیب‌پذیری زیاد



شکل (۵) نقشه فازی آسیب‌پذیری خطر زلزله در کرمان ناشی از پارامترهای دسترسی به اسکان موقت، دسترسی به مراکز آتش‌نشانی، کیفیت ابنیه، دسترسی به فضای سبز، تراکم خانوار در واحد مسکونی و کاربری اراضی

Figure (5) Fuzzy map of earthquake risk vulnerability in Kerman due to the parameters of Quality of buildings, Households density in a residential unit, Access to the fire-fighting station, Access to green space, Access to temporary accommodation centers and land use.

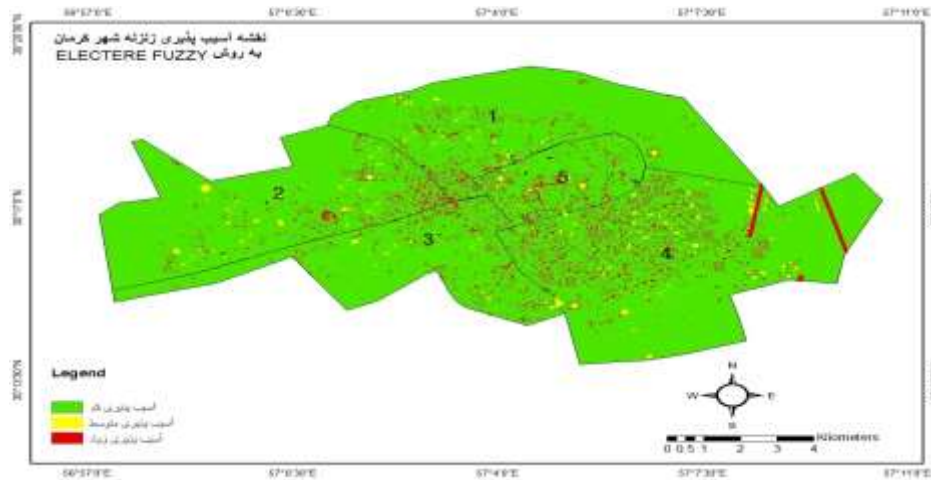


شکل (۶) نقشه فازی آسیب‌پذیری خطر زلزله در کرمان ناشی از پارامترهای فاصله از مراکز درمانی، فاصله از گسل و عرض معابر

Figure (6) Fuzzy map of earthquake risk vulnerability in Kerman due to the parameters of Distance from medical centers, Distance from the fault and Width of passages.

تهیه نقشه نهایی آسیب‌پذیری خطر زلزله در شهر کرمان

به‌منظور تهیه نقشه نهایی برای رتبه‌بندی بین طبقات مختلف هر پارامتر از گامای فازی استفاده شد. پس از فازی‌سازی داده‌های فوق به‌منظور تلفیق لایه‌های فازی شده با یکدیگر و استنتاج نقشه نهایی و رتبه‌بندی بین پارامترهای مختلف از روش Electre بهره برده شده است تا نقشه‌های فازی شده هر پارامتر وزن‌دار شود و میزان تأثیر هر پارامتر در آسیب‌پذیری در برابر مخاطره زلزله متفاوت و واقعی باشد.



شکل (۷) نقشه آسیب‌پذیری خطر زلزله در شهر کرمان با روش ELECTRE FUZZY

Earthquake risk vulnerability map in Kerman city by ELECTRE FUZZY method Figure (7)

با پژوهش‌های انجام‌گرفته در این پژوهش و براساس یافته‌های آن مشخص شد، رعایت‌نکردن اصول شهرسازی طبق آنچه در آیین‌نامه و استاندارد ۲۸۰۰ زلزله است، تا چه اندازه میزان آسیب‌پذیری مناطق مجاور گسل را هنگام بروز زلزله بیشتر می‌کند. طبق یافته‌های فوق، در منطقه زلزله‌خیزی مانند شهر کرمان، در ارتباط با فاصله از گسل، بسیار مشخص است که هرچه فاصله از گسل بیشتر باشد، به دلیل فاصله‌گیری از کانون بحران میزان آسیب‌پذیری پایین می‌آید. تعیین حریم گسل و میزان رعایت فاصله سازه‌ها از گسل به‌عنوان مهم‌ترین مسائل مربوط به زمین‌لرزه در مهندسی زلزله مطرح است. پهنه حریم گسل با توجه به ویژگی‌های گسل متفاوت است. به باور بربریان و همکاران (۱۳۶۴)، تعیین حریم برای هر گسل فعال با در نظر گرفتن عوامل طول و نوع و میزان جابه‌جایی گسل، بافرهای عددی مشخصی در نظر گرفته می‌شود. منطقه ۴ شهر کرمان، که کمترین فاصله را با گسل دارد، رعایت حریم گسل یکی از مواردی است که توجه به آن الزامی است؛ همچنین در ارتباط با عرض معابر براساس یافته‌های پژوهش مشخص شد، هرچه عرض معابر در مناطق تحت گسل بیشتر باشد، هنگام وقوع زلزله میزان آسیب‌پذیری بسیار کمتر خواهد بود. عریض‌تر بودن معابر نه تنها هنگام زلزله با فروریزی ساختمان‌ها فضای بیشتری را برای تخلیه در اختیار قرار می‌دهد، به‌منظور امداد و خدمات‌رسانی سرعت عمل امدادگران را بیشتر کرده و در نتیجه اثرگذاری مثبت بسیار بیشتری به‌همراه دارد. وجود فضاهای سبز، یکی از عوامل مهم در کاهش اثرات ناشی از زلزله است؛ زیرا هنگام وقوع حادثه مأمّن گاهی برای ساکنان منطقه خواهد بود. از سویی دیگر، هرچه دسترسی به مراکز آتش‌نشانی و اماکن اسکان موقت بیشتر باشد، امکان واردشدن خسارات جانی و مالی کمتری وجود دارد و از میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله کاسته می‌شود. نزدیکی به مراکز درمانی نیز از شدت آسیب‌پذیری در برابر زلزله می‌کاهد؛ در عین حال وجود کاربری‌های استراتژیک و حساس کنار کاربری‌های مسکونی بر آسیب‌پذیری در مقابل زلزله مناطق می‌افزاید؛ همچنین تراکم زیاد خانوار در هر واحد مسکونی موجب زیادشدن جمعیت در هر واحد می‌شود و هنگام زلزله مشکلات و آسیب‌هایی ایجاد می‌کند. جدول زیر مساحت پهنه‌های آسیب‌پذیری مختلف در هر منطقه شهر کرمان است.

جدول (۱۱) مساحت پهنه‌های آسیب‌پذیری مختلف در مناطق شهر کرمان

table (11) The area of different vulnerable zones in the areas of Kerman city

مناطق شهر کرمان	آسیب‌پذیری زیاد	آسیب‌پذیری متوسط	آسیب‌پذیری کم
۱	۱۰ درصد	۴ درصد	۸۶ درصد
۲	۶ درصد	۵ درصد	۸۹ درصد
۳	۹ درصد	۳ درصد	۸۸ درصد
۴	۲۸ درصد	۱۳ درصد	۵۹ درصد
۵	۲۳ درصد	۱۵ درصد	۶۲ درصد

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته در این پژوهش و براساس یافته‌هایی که از ارزیابی پارامترهای مؤثر در خطر آسیب‌پذیری زلزله دریافت شد، در تحلیل وضعیت شبکه معابر شهر کرمان مشکلات شبکه معابر اغلب مربوط به عرض معابر و طرح هندسی تقاطع‌هاست. منطقه مرکزی شهر که شامل بازار و مناطق پیرامونی آن است (مناطق ۵ و ۴) با توجه به تعداد زیاد مراجعان مشکلاتی به‌لحاظ شکل و عرض معبر دارد که پاسخ‌گوی نیاز کنونی مراجعان

نیست. معابر بافت کهنه و قدیمی به علت عرض کم و تقاطع‌های نامناسب با یکدیگر هنگام بروز زلزله فاجعه‌آفرین است. در تحلیل شاخص تراکم خانوار در واحد مسکونی، تراکم خانوار در واحد مسکونی نشان‌دهنده کفایت یا کمبود تعداد واحدهای مسکونی موجود در ارتباط با تعداد خانواده‌هاست. سهم زیادی از بلوک‌هایی که بیش از یک خانوار در واحد مسکونی در آن ساکن هستند در بخش جنوبی (منطقه ۴) شهر دیده می‌شود. تعداد خانوارها در هر واحد گاهی به ۴ خانوار نیز رسیده است. بلوک‌هایی که وضعیت خوبی نسبت به تراکم خانوار در واحد مسکونی دارد، بیشتر در شمال غرب مستقر شده است. در تحلیل کیفیت ابنیه، میزان دوام بناها به لحاظ مصالح و اسکلت به‌کاررفته در آن بررسی قرار می‌شود. بدین منظور ابنیه شهر کرمان به سه دسته: بادوام، نیمه بادوام و کم‌دوام تقسیم شده است که بیشترین بناهای کم‌دوام و نیمه بادوام در بافت‌های قدیمی و در مناطق ۴ شهری واقع شده است. در تحلیل فاصله از مراکز درمانی برای سنجش میزان فاصله بلوک‌های شهری از مراکز درمانی لازم است موقعیت این مراکز و سطح پوشش آنها شناسایی شود. براساس اطلاعات موجود در سطح شهر کرمان ۱۶۴ مرکز درمانی وجود دارد که اغلب آنها در بخش مرکزی شهر متمرکز شده است. یکی دیگر از شاخص‌های موردبررسی دسترسی به فضای سبز در سطح شهر است. فضای سبز به هنگام بروز زلزله به‌مانند فضای باز مأمّن‌گاهی برای افراد است. دسترسی نامناسب سبب کاهش کیفیت زندگی و عدم تأمین رفاه شهروندان به‌خصوص هنگام بروز زلزله می‌شود. یکی از شاخص‌های موردبررسی فاصله از گسل است. در پیرامون شهر کرمان گسل‌هایی وجود دارد که یکی از آنها در بخش جنوب شرقی قرار دارد که منطقه ۴ شهر کرمان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. با توجه به خطرآفرین‌بودن این گسل‌ها و احتمال واردکردن آسیب‌های جانی و مالی در زمان وقوع زلزله لازم است برای ساخت‌وساز در این بخش‌ها حریم قانونی رعایت شود. در بررسی‌ها مشاهده می‌شود برخی از ساخت‌وسازها حریم ایمنی تعیین‌شده را رعایت نکرده است. بررسی شاخص دسترسی به مراکز آتش‌نشانی هنگام بروز زلزله با هدف تأمین ایمنی شهر و شهروندان و در راستای امداد رسانی به‌موقع برای کاهش خسارات جانی و مالی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ارزیابی نحوه عملکرد ایستگاه‌های آتش‌نشانی از طریق سنجش ۲۰۰۰ متری شعاع هر ایستگاه در محدوده پیرامون خود است. این شاخص نیز در سطح شهر کرمان ارزیابی شد؛ همچنین در راستای ارائه پاسخ مناسب هنگام بروز زلزله لازم است مکان‌هایی برای استقرار و اسکان موقت در سطح شهر در نظر گرفته شود. پراکنش فضاهای باز و ایمن برای اسکان موقت در شهر کرمان نشان‌دهنده این است که اغلب این مکان‌ها در بخش‌های مرکزی دیده می‌شود و تراکم این فضاها در بخش‌های میانی و حاشیه‌ای کمتر است. تحلیل شاخص کاربری‌های اراضی نیز نشان‌دهنده غلبه واحدهای مسکونی و حساس به واحدهای بایر و سبز است که حاکی از خطر زیاد آسیب‌پذیری ناشی از کاربری است. درنهایت براساس ارزیابی و بررسی‌های مربوط به آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر کرمان و تجزیه و تحلیل اطلاعات جمع‌آوری‌شده با توجه به روش‌های مبتنی بر پایگاه اطلاعاتی، بهره‌گیری از مدل Electre Fuzzy و معیارهای مذکور نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد مناطق ۴ و ۵ شهر کرمان است. به‌طور کلی در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری خطر زلزله در شهر کرمان مساحت آسیب‌پذیری زیاد در منطقه ۴/۲۸ درصد و در منطقه ۵/۲۳ درصد است، بیش از ۵۰ درصد مساحت با رتبه‌بندی آسیب‌پذیری زیاد در این مناطق واقع شده است؛ همچنین مناطق شهری ۱، ۳ و ۲ به ترتیب در رتبه‌های بعدی پهنه آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد؛ همچنین درصد مساحت آسیب‌پذیری متوسط در منطقه ۴، ۱۳ درصد و در منطقه ۵/۱۵ درصد و درصد مساحت آسیب‌پذیری کم در منطقه ۴/۵۹ درصد و در منطقه ۵/۶۲ درصد است.

منطقه ۴ در بخش‌های جنوب و جنوب شرقی شهر گسترده شده است و مساحتی بالغ بر ۳۴۹۶ هکتار را در برمی‌گیرد. این منطقه در پیرامون بخش مرکزی شهر و دارای بافت نامنظم و متصل به بافت کهنه است که محله‌های سرسبیل، سرآسیاب، محوطه قلعه اردشیر و جنگل قائم بخش زیادی از مساحت این منطقه را به خود اختصاص داده است. منطقه ۵ نیز شامل بخش مرکزی و بافت کهن شهر است که متشکل از بازار و مجموعه‌های وابسته به آن است به همراه بخش حاشیه‌ای که متشکل از محله‌های مسکونی قدیمی، مراکز محله و آثار باارزش تاریخی است. نتایج حاصل از این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل Electre Fuzzy و معیارهای مذکور با نتایج پژوهش حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) که لرزه‌خیزی شهر کرمان را بررسی کردند و براساس نقشه خطر به دست آمده از شهر کرمان (نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین) بیان داشتند که میزان خطر در بخش‌های مرکزی، باختری و همچنین بخش‌هایی از جنوب شهر به شدت افزایش می‌یابد که سازه‌های موجود در این بخش‌ها در اثر زلزله احتمالی به شدت ویران خواهند شد، مطابقت داشته است.

فهرست منابع و مأخذ

- احدنژاد، محسن، سعیدی، شهرام، زنگیشه‌ای، سجاد، زنگنه، علیرضا (۱۳۸۸). ارزیابی آسیب‌پذیری بافت‌های فرسوده شهری در برابر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: محله فیض‌آباد کرمانشاه). سمینار ملی کاربرد GIS در برنامه‌ریزی اقتصادی اجتماعی و شهری.
- اخلاص‌پور، پیام، عباس‌نژاد، احمد، نعمتی، مجید (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر زلزله استان کرمان با کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP. دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری، تبریز.
- اخلاص‌پور، پیام، عباس‌نژاد، احمد، نعمتی، مجید (۱۳۹۲). پهنه‌بندی خطر زلزله در استان کرمان با کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی (gis) و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاری (فازی و ahp)، پایان‌نامه وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- اسفندیاری درآباد، فریبا، غفاری، عطا، لطفی، خداداد (۱۳۹۳). ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها از گسل‌های پیرامونی با استفاده از روش TOPSIS در محیط GIS مطالعه موردی: شهر اردبیل. مجله مخاطرات محیطی، ۲(۲)، ۷۹-۴۳.
- امینی‌ورکی، سعید، مدیری، مهدی، شمسایی، فتح‌الله، قنبری‌نسب، علی (۱۳۹۳). شناسایی دیدگاه‌های حاکم بر آسیب‌پذیری شهرها در برابر مخاطرات محیطی و استخراج مؤلفه‌های تأثیرگذار در آن با استفاده از روش کیو. فصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، ۳(۳)، ۱۸-۵.
- انتظاری، مژگان، غلامی، مجید (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی مخاطرات زمینی نواحی جغرافیایی ایران. انتشارات نگارخانه، چاپ اول.
- بربریان، مانوئل، قریشی، منوچهر، ارژنگ روشن، بهرام، مهاجر اشجعی، احمد (۱۳۶۴). تحقیقات نوکتونیک عمیق، زلزله‌تکتونیک و خطر زلزله، پهنه‌گسلی در تهران و اطراف، گزارش ۵۶، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- پورعبدل، علیرضا (۱۳۹۲). تحلیل آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در بافت کالبدی شهر کرج. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی.
- پور موسوی، سیدموسی، شماعتی، علی، احدنژاد، محسن، عشقی چهاربرج، علی، خسروی، سمیه (۱۳۹۳). ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر با مدل Fuzzy AHP و GIS مطالعه موردی: منطقه ۳ شهرداری تهران، فصلنامه علمی - پژوهشی جغرافیا و توسعه شماره ۳۴، ۱۳۸-۱۲۱.
- تقوایی، علی‌اکبر، نیکوپرست، سارا (۱۳۸۵). مدیریت بحران در شهرها. مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت بحران‌ها در شهرهای دارای بافت تاریخی، دانشگاه یزد.
- جلالیان، حمید، دادگر، حسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله با مدل AHP، مطالعه موردی بخش چورزق شهرستان طارم. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶(۳)، ۴۲-۲۹.
- حاتمی‌نژاد، حسین، منوچهری، ایوب، آهار، حسن، سالکی، محمدعلی (۱۳۹۳). ارزیابی و پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر تبریز با استفاده از منطق fuzzy با تلفیق AHP و Topsis. پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۴۶(۴)، ۷۱۷-۶۹۷.
- حسن‌زاده، رضا، عباس‌نژاد، احمد، علوی، اکبر، شریفی‌تشنیزی، ابراهیم (۱۳۹۰). تحلیل خطر لرزه‌های شهر کرمان با تأکید بر کاربرد GIS در ریز پهنه‌بندی مقدماتی درجه ۲. مجله علوم زمین. سال بیست و یکم، شماره ۸۱، ۳۰-۲۳.
- خدادادی، فاطمه، انتظاری، مژگان، ساسان‌پور، فرزانه (۱۳۹۹). تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با روش ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۶)، بهار ۹۹.
- ساسان‌پور، فرزانه، موسی‌وند، جعفر (۱۳۸۹). تأثیر عوامل انسان‌ساخت در تشدید پیامدهای مخاطرات طبیعی در محیط‌های کلان‌شهری با کاربرد منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۳(۱۶): ۵۰-۲۹.
- ساسان‌پور، فرزانه، شماعتی، علی، افسر، مجید، سعیدپور، شراره (۱۳۹۶). بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر در برابر مخاطرات طبیعی (زلزله) مطالعه موردی محله محتشم کاشان. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۶(۱۴)، ۱۲۲-۱۰۳.
- سیوندی‌پور، عباس (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زلزله استان کرمان با استفاده از تحلیل‌های آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی. فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳ و ۴ پاییز و زمستان ۱۳۹۶، ۹-۱.
- عباس‌نژاد، احمد (۱۳۸۳). حفرة فروکش کارستی در اختیار آباد - شمال باختری کرمان. فصلنامه علمی - پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم، شماره ۵۲-۵۱، ص ۲۸۵-۳۵.
- غضنفرپور، حسین، حامدی، محدثه (۱۳۹۶). سطح‌بندی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهر کرمان براساس معیارهای منطق فازی، نشریه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۵، شماره ۴۸، ۱۵۳-۱۶۹.
- فراهانی، نفیسه (۱۳۹۰). نقش مدیریت بحران زلزله در سامان‌دهی کالبدی-فضایی بافت‌های فرسوده شهری، نمونه مورد مطالعه: شهر اراک (محله رودکی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته برنامه‌ریزی شهری دانشگاه خوارزمی.

- فرج‌زاده‌اصل، منوچهر، احدنژاد، محسن، امینی، جمال (۱۳۹۰). ارزیابی آسیب‌پذیری مسکن شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی منطقه ۹ شهرداری تهران). مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، ۳(۹)، ۱۹-۳۶.
- قنبری، ابوالفضل، محمدعلی سالکی، قاسمی، معصومه (۱۳۹۲). پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهرها در مقابل خطر زمین‌لرزه نمونه موردی: شهر تبریز. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۵(۵)، ۲۱-۳۵.
- کاظمی‌نیا، عبدالرضا، میمندی پاریزی، صدیقه (۱۳۹۶). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر کرمان در مقابل زلزله با استفاده از GIS. نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره هشتم، شماره ۳، ۳۱-۴۷.
- کریمی کردآبادی، مرتضی، نجفی، اسماعیل (۱۳۹۴). ارزیابی خطر زلزله با استفاده مدل ترکیبی FUZZY-AHP در توسعه و امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران). مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۲(۸)، ۷۷-۹۵.
- مشک‌ساز، پریسا، ایزدی، حسن، سلطانی، علی، بذرگر، محمدرضا (۱۳۹۳). ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی بافت‌های شهری در برابر زلزله در روش RADIUS نمونه موردی: منطقه ۳ شهرداری شیراز. پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۱(۱)، ۱۱۵-۱۲۹.
- منزوی، مهشید، سلیمانی، محمد، تولایی، سیمین، چاووشی، اسماعیل (۱۳۸۹). آسیب‌پذیری بافت‌های فرسوده بخش مرکزی شهر تهران در برابر زلزله (مورد مطالعه: منطقه ۱۲). پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۷۳(۷۳)، ۱-۱۸.
- یاری‌قلی، وحید، نوروزی، محمدجواد، کلانتری، بهرنگ (۱۳۹۳). ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی نواحی شهری در برابر زلزله با استفاده از مدل ELECTRE (مطالعه موردی: ابهر). مجله جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۱۱، ۸۷-۱۰۱.
- Antonioni Gigliola, G., & Cozzani, Valerio. (2007). **A Methodology for the Quantitative Risk, Triggered by Seismic Events**. Journal of Hazardous Materials, Assessment of Major Accidents.
- Bazazan lotfi, S., & Rahimi, M. (2017). **A Study on Vulnerability of Urban Neighborhoods to Earthquake (Case Study: Farahzad Neighborhood, Tehran)**. Journal of Civil Engineering and Materials Application, 1(1):1-7. <https://doi: 10.15412/J.JCEMA.12010101>.
- Estrada, M., Zavala, C., Lazares, F., & Morales, J. (2012). **GIS Tool for Calculating Repair Cost of Buildings Due to Earthquakes Effects (CCRE - CISMID)**. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, pp 1695- 1698.
- Sadrykia, M., Delavar, M., & Zare, M. (2017). **A GIS-Based Fuzzy Decision Making Model for Seismic Vulnerability Assessment in Areas with Incomplete Data**, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017, 6(4): 119, <https://doi: 10.3390/IJGI. 6040119>.
- Saafizadeh, M., & Bagheripour, M. H. (2019). **Evaluation of peak ground acceleration for the city of Kerman through seismic hazard analysis**. Scientia Iranica A (2019) 26(1), 257-272.
- Shamsipour, A. A., & Shekhi, M. (2010). **Zoning of Sensitive Area and Environment Vulnerable in West of Fars Province using Fuzzy and AHP Classification**, Physical Geography Research Quarterly, 73(73):53-68.
- Wang, X., & Triantaphyllou, E. (2008). **Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods**. Omega, Vol. 36, pp. 45 – 63.