



<https://gеп.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 34, Issue 2, No.90, Summer 2023, pp. 1- 4
Received: 16/01/2022 Accepted: 26/10/2022

Identification of Fault Lineaments and Earthquake Hazard Zoning Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Rumeshkan County, Lorestan Province

Siamak Baharvand¹ *, Alireza Firoozfar², Salman Soori³

1- Associate Professor, Department of Geology, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran
sbbaharvand53@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran
firoozfar@znu.ac.ir

3- M.Sc., Geology Engineering, Zamin Kavan South Company, Tehran, Iran
sa.so260@gmail.com

Abstract

As a natural hazard, earthquake has always caused destruction and loss of human life throughout history. Proper planning to prevent or reduce the destructive impact of earthquake hazard is of particular importance. In this study, to prevent and decrease the risk of this phenomenon, faults were detected and earthquake risk zoning was done in Rumeshkan County in Lorestan Province. For this purpose, first, the lineaments in the region were detected by using 2013 satellite images from Landsat 8 OLI sensors (row 37 and pass 166) and applying Directional Filters in ENVI software, as well as Lineament Extraction in Geomatica software. Afterwards, by comparing the lines with the constructed band combinations, the Digital Elevation Model (DEM) and geological map of the study area were investigated, the faults were separated, and their map was prepared in the Geographic Information System (ArcGIS). In this study, by using expert judgment method and AHP-Fuzzy, the factors that affected the risk of earthquakes in Rumeshkan County, including distance from fault, slope, geomorphology, lithology, and distance from epicenters of past earthquakes were weighted and the seismic hazard map of the region was prepared. According to the obtained results, 31.8, 34.3, 10.3,

*Corresponding Author

Baharvand, S., Firoozfar, A., & Soori, S. (2023). Identification of Fault Lineaments and Earthquake Hazard Zoning using Remote Sensing and GIS (Case study: Rumeshkan County, Lorestan Province). *Geography and Environmental Planning*, 34 (2), 1 -4.



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



10.22108/GEP.2022.132279.1484



20.1001.1.20085362.1402.34.2.1.8

14.6, and 9.0% of the area were in very low, low, medium, high, and very high hazard classes, respectively. Examination of the earthquake hazard sensitivity map showed that the highest sensitivity to seismic hazard was in the eastern parts of the county and that the central parts had very low and low risks; thus, settlement of population in the latter areas is recommended.

Keywords: earthquake, Rumeshkan, remote sensing, GIS, AHP-fuzzy

Introduction

Earthquakes have always been among the most important natural hazards. Every year, a large number of people in the world are affected by the adverse effects of earthquake. To decrease human and economic losses, as well as their social consequences, it is necessary to gain an accurate knowledge of the risks of earthquakes in different places based on the current knowledge and the latest reliable technologies. Risk zoning is an important approach in the pre-crisis management process that greatly assists planners and managers to take measures to reduce earthquakes earthquake vulnerability. The main issues are the selection of vulnerability criteria and the way of combining them, as well as selecting an appropriate model that can best represent the rate of vulnerability.

Today, with the increasing science advancement, satellites and satellite imagery have progressed; therefore, the use of remote sensing methods and satellite image processing appear to be highly efficient for identifying and studying geological phenomena, such as faults and lineaments. GIS is also one of the most powerful software in the field of environmental hazard mapping that contributes to efficient management of spatial and temporal data.

Methodology

Manual, automatic, and semi-automatic methods are used to extract the data of lineaments and faults. In this study, a semi-automatic method was used, which is a combination of automatic and manual methods and is more reliable with a good speed. For this purpose, the 2013 Landsat 8 images taken by OLI sensor (row 37 and pass 166) were analyzed.

In this study, first the lineaments in this area were extracted by applying Lineament Extraction Filter in Geomatica software. Then, by spatial highlighting and applying directional filters on 8-band images obtained from the Landsat 8 satellite image of OLI sensor, as well as creating band combinations, the faults in the area were manually identified.

AHP-fuzzy was used for earthquake hazard zoning in Rumeshkan County. In addition to the fault map of the region, other factors, including slope, geomorphology, lithology, and distance from the epicenters of past earthquakes, were used. The fuzzy hierarchical integrated model has a high efficiency in earthquake risk zoning due to removing the inherent inaccuracy and uncertainty of decision makers' perceptions and reflecting their opinions as a definitive number. After weighting the factors, by combining the maps in the environment of Geographic Information System (GIS) software, the earthquake zoning map of the region was prepared.

Discussion

In this research, after examining the factors affecting the earthquake risk, a map of each of the factors was prepared in the environment of ArcGIS software. The results obtained from the analysis of each factor were as follows:

The study of lithology and geomorphology of the region showed that due to the looseness of Quaternary alluvial sediments, this unit had the highest sensitivity to earthquake hazard and the highest weight was assigned to it.

Investigation of the area slope according to the expert judgments indicated that the highest

sensitivity to earthquake hazard was related to the highest slope degrees, which could be attributed to the low shear strength of materials at high slopes.

The results obtained from the study of the faults in the region revealed that sensitivity to earthquakes increased by decreasing distance from the faults because earthquakes themselves were caused by the movement of faults. Also, the sensitivity increased as the distances from the epicenters of past earthquakes decreased.

After examining the factors affecting earthquake risk, the map of each factor was fuzzified by using the fuzzy membership functions.

For this purpose, to standardize the maps, the slope and lithology maps were respectively obtained through incremental linear and Gaussian membership functions to determine distances from the faults, epicenters of old earthquakes, and geomorphology of the faults.

Considering the fact that each layer had a different impact on seismic hazard zoning, weighting of the layers and substrates was necessary. In the hierarchical analysis process, first, a pairwise comparison was done and the results were transferred to the Expert Choice software in order to calculate the weight of each factor. Based on the obtained findings, the fault layer had the most important role in preparing the seismic zoning map of the study area. According to the prepared lineament maps, the faults were mostly concentrated in the eastern parts of Rumeshkan County.

Conclusion

Most studies concerning fracture and fault modeling in each region depend on analysis of lineaments. In this research, a remote sensing technique (OLI sensor satellite imagery) was used to obtain an integrated digital map of the region's lineaments. The results showed that the use of a semi-automatic method was one of the fastest and most accurate approaches for extracting the maps of faults and fractures.

In this study, 5 factors were selected as effective factors in the seismic hazard zoning of Rumeshkan City. Prioritization of the factors by using the hierarchical analysis showed that the factors of distance from fault, distances from epicenters of past earthquakes, lithology, slope, and geomorphology played the most important roles in preparing the seismic hazard map, respectively.

According to the results of seismic hazard zoning, >23% of the area was in the high- and very high-risk classes, covering most of the eastern part of the study area. Combination of the residential area map with the earthquake risk zoning map also showed that the residential areas located in the eastern, western, and central parts were in high- and very high-risk classes, low- to medium-risk class, and very low- and low-risk classes, respectively. Chaqabol, the capital of the county, was located at the central part.

References

- Bimal, N., Yadav, O. P., & Murat, A. (2010). A fuzzy- AHP approach to prioritization of CIS attributes in target planning for automotive product development. *Expert System with Application Journal*, 37, pp. 6775- 6786.
- Fayaz, M., Romshoo, S. A., Rashid, I., & Chandra, R. (2022). Earthquake Vulnerability Assessment of the Built Environment in Srinagar City, Kashmir, Himalaya, Using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, pp. 1-35. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-155>
- Gannouni, S. and Gabtni, H. (2015). Structural Interpretation of Lineaments by Satellite Image Processing (Landsat TM) in the Region of Zahret Medien (Northern Tunisia). *Journal of Geographic Information System*, 7, pp. 119-127. doi: 10.4236/jgis.2015.72011

- Janardhana Raju, N., Reddy, T. V. K., & Munirathnam, P. (2006). Subsurface dams to harvest rainwater: A case study of the Swarnamukhi River Basin, southern India. *Hydrology Journal*, 14, pp. 526-531.
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2004). Multiattribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2), pp. 171-184.
- Pudi, R., Martha, T. R., Roy, P., Vinod, K., & Rao, R. (2021). Mesoscale seismic hazard zonation in the Central Seismic Gap of the Himalaya by GIS-based analysis of ground motion, site, and earthquake-induced effects. *Environ Earth Sci.*, 80, p. 613. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09907-w>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Varo, J., Sekac, T., & Jana, S. K. (2019). Earthquake hazard micro-zonation in Fiji islands: A research of Vitilevu Island. *IJRTE*, 8, pp. 2296-2307.
- Vahidnia, M. H., Alesheikh, A. A., & Alimohammadi, A. (2009). Hospital site selection using fuzzy AHP and its derivatives. *Journal of Environmental Management*, 90(10), pp. 3048-3056.
- Yassaghi, A. (2006). Integration of Landsat Imagery Interpretation and Geomagnetic Data on Verification of Deep-Seated Transverse Fault Lineaments in SE Zagros. *International Journal of Remote Sensing*, 56(12), pp. 152-167.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۴، پیاپی ۹۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۶-۱

وصول: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۴

مقاله پژوهشی

شناسایی خطواره‌های گسلی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان رومشکان، استان لرستان)

سیامک بهاروند^{*}، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خرم‌آباد، خرم‌آباد، ایران

sbbaharvand53@gmail.com

علیرضا فیروزفر، دانشیار، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

firoozfar@znu.ac.ir

سلمان سوری، کارشناس ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، شرکت زمین کاوان جنوب، تهران، ایران

sa.so260@gmail.com

چکیده

زمین‌لرزه، یکی از مخاطرات طبیعی، همواره در طول تاریخ باعث خرابی‌ها و از بین رفتن جان انسان‌های زیادی شده است. برنامه‌ریزی مناسب برای پیشگیری یا کاهش آثار مخرب خطر زمین‌لرزه اهمیت ویژه‌ای دارد؛ بنابراین در راستای پیشگیری و کاهش خطرپذیری این پدیده، اقدام به شناسایی گسل‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در سطح شهرستان رومشکان واقع در استان لرستان شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۳ لندست ۸ سنجنده OLI (ردیف ۳۷ و گذر ۱۶۶) و اعمال فیلترهای Directional در نرم‌افزار ENVI و Lineament Extraction ژئوماتیکا، خطواره‌های منطقه شناسایی شده است. سپس با مقایسه خطواره‌ها با ترکیبات باندی ساخته‌شده، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، گسل‌ها جدا و نقشه آنها در محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) تهیه شده است. در این پژوهش با استفاده از قضاوت کارشناسی و روش سلسله‌مراتبی-فازی عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه‌های شهرستان رومشکان شامل فاصله از گسل، شیب، ژئومورفولوژی، لیتولوژی و فاصله از کانون زمین‌لرزه‌های گذشته وزن‌دهی و نقشه خطر زمین‌لرزه‌های منطقه تهیه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده به‌ترتیب ۳۱/۸، ۳۴/۳، ۱۰/۳، ۱۴/۶ و ۹/۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. بررسی نقشه حساسیت خطر پدیده زمین‌لرزه نشان‌دهنده آن است که بیشترین حساسیت نسبت به خطر زمین‌لرزه در قسمت‌های شرقی شهرستان واقع شده است و بخش‌های مرکزی خطر خیلی کم و کم دارد که استقرار جمعیت در این مناطق پیشنهاد می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** زمین‌لرزه، رومشکان، سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، فرایند سلسله‌مراتبی فازی.

*نویسنده مسئول

بهاروند، سیامک، فیروزفر، علیرضا و سوری، سلمان. (۱۴۰۱). شناسایی خطواره‌های گسلی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان رومشکان، استان لرستان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴ (۲)، ۱-۱۶.



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



10.22108/GEP.2022.132279.1484



20.1001.1.20085362.1402.34.2.1.8

مقدمه

به دلیل مساعدبودن شرایط زمین‌شناسی، جغرافیایی و فقدان مدیریت جامع محیط و رعایت نکردن آستانه‌های محیطی، ایران به‌عنوان کشوری پرخطر به شمار می‌آید. به‌طوری که از حدود ۴۳ خطر طبیعی و تا حدی با دخالت انسان، حدود ۳۸ خطر در ایران شناسایی و ثبت شده و به دلیل تعدد، تنوع، تکرار و شدت وقوع خطرات طبیعی و ناآرامی محیط، ایران در ردیف ۱۰ کشور بلاخیز جهان قرار گرفته است (محمدی و مساعدی، ۱۳۸۴: ۳۸۸؛ امیراحمدی و همکاران ۱۳۹۳: ۲۴۲). کشور ایران در بخش میانی کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا واقع شده است (عبدالهی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۶۶). مقاومت صفحه ایران در برابر فشار وارده از طرف صفحات عربستان از جنوب غربی، هندوستان از شرق و سیبری از شمال شرقی به بروز گسل‌ها و شکستگی‌های متعددی منجر شده و فعالیت این گسل‌ها موجب شده است که ایران از مناطق مهم زلزله‌خیز دنیا محسوب شود (پاشاپور و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۱).

زمین‌لرزه‌ها همواره جزء مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که هرساله تعداد زیادی از مردم جهان گرفتار آثار نامطلوب آن می‌شوند. به‌منظور کاهش تلفات جانی و اقتصادی و تبعات اجتماعی آنها ضروری است که براساس دانش کنونی و آخرین فناوری‌های قابل‌اعتماد از خطر وقوع زمین‌لرزه در نقاط مختلف، شناختی دقیق به دست آورده شود (رحیمی شهید و رحیمی، ۱۳۹۶: ۱۰۹). پهنه‌بندی خطر، رویکرد مهمی از فرایند مدیریت پیش از بحران است که به برنامه‌ریزان و مدیران در آماده‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری کمک فراوانی می‌کند. مسئله اساسی، انتخاب معیارهای آسیب‌پذیری و نحوه ترکیب این معیارهاست و به‌علاوه، انتخاب مدلی مناسب است که به بهترین شیوه نشان‌دهنده میزان آسیب‌پذیری است (کریمی و امیریان، ۱۳۹۷: ۱۱۰).

امروزه با پیشرفت روزافزون علوم، ماهواره‌ها و تصاویر ماهواره‌ای نیز پیشرفت کرده‌اند؛ از این رو، استفاده از روش‌های سنجش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی و بررسی پدیده‌های زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها و خطواره‌ها بسیار کارآمد به نظر می‌رسد (Yassaghi, 2006, 153)؛ همچنین سیستم اطلاعات جغرافیایی یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه تهیه نقشه مخاطرات محیطی است که به مدیریت مؤثر داده‌های مکانی و زمانی کمک می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در زمینه شناسایی خطواره‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه مورد توجه پژوهشگران متعددی قرار گرفته است که از جمله آنها به مطالعاتی در ایران و سایر نقاط جهان اشاره می‌شود؛ مانند رشیدی و همکاران (۱۳۹۱) که خطواره‌های زمین‌ساختی پهنه گسله نایبند را با استفاده از روش‌های دورسنجی بررسی کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده گسل نایبند در بخش شمالی دارای ساختار دم اسبی بوده است و در شکل‌گیری زمین‌ساخت منطقه تأثیر بسزایی دارد؛ مهربانی و همکاران (۱۳۹۴) با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و تعیین ارتباط آنها با موقعیت گنبد‌های نمکی رخنمون‌یافته سری هرمز، خطواره‌های گسلی کمربند چین‌خورده-راندگی زاگرس را شناسایی کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین ارتباط بین خطواره‌ها با گنبد‌های نمکی در فاصله یک کیلومتری از گنبد‌های نمکی است؛ منصوریان و المدرسی (۱۳۹۶) با استفاده از روش سلسله‌مراتبی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه را در حوزه شهری نورآباد ممسنی استان فارس تهیه کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیش از ۴۶ درصد از مساحت منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد واقع شده است. رنجبری و

همکاران (۱۳۹۸) به شناسایی و استخراج گسل‌ها در پهنه گسلش قوشاداغ توجه کردند. در این پژوهش که با استفاده از الگوریتم Lineament Extraction انجام شده است، نتایج نشان‌دهنده آن بود که روش استفاده‌شده دقت زیادی در شناسایی خطواره‌ها دارد. اخلاص‌پور و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و به‌کارگیری روش منطق فازی، خطر زمین‌لرزه را در استان کرمان تحلیل کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، نوار کوه بنان، لکرکوه، گلباف، بم و گستره‌های بردسیر و ریگان در گستره خطر لرزه‌ای خیلی زیاد قرار دارند. گانونی و گابتنی^۱ (۲۰۱۵) با استفاده از روش استخراج خودکار به تفسیر هندسی خطواره‌ها در منطقه زهرت مدین در شمال تونس توجه کردند. اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده در مقایسه با نتایج ژئوفیزیک و همچنین مطالعات نقشه‌برداری قبلی نشان‌دهنده آن بود که روش استفاده‌شده از دقت خوبی برخوردار است. وارو^۲ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، پتانسیل خطر زمین‌لرزه را در سرزمین فیجی بررسی کردند. در این پژوهش که برای تحلیل از روش‌های سلسله‌مراتبی و تحلیل چند معیاره استفاده شده، نتایج نشان‌دهنده آن بود که ArcGIS به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل بلایای طبیعی به مدیران کمک کند؛ پودی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش سلسله‌مراتبی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شکاف مرکزی هیمالیا توجه کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان از آن داشت که پهنه‌های با خطر زیاد در کوهپایه‌ها واقع شده است؛ فایاز^۴ و همکاران (۲۰۲۲) خطر زمین‌لرزه را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در شهر سرینگار هیمالیا بررسی کردند. در این مطالعه که برای ادغام پارامترهای مؤثر در خطر زمین‌لرزه از روش سلسله‌مراتبی استفاده شده، نتایج نشان‌دهنده آن بود که بیش از ۷ درصد از مساحت منطقه در کلاس خطر زیاد قرار دارد.

این پژوهش با هدف شناسایی خطواره‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در سطح شهرستان رومشکان انجام شده است. استان لرستان و به تبع آن شهرستان رومشکان به علت قرارداشتن بر روی پهنه لرزه زمین‌ساخت زاگرس از نواحی لرزه‌خیز ایران به شمار می‌آید. وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب در ادوار مختلف از جمله زمین‌لرزه تاریخی سال ۳۳۴ قمری در شهر ماداکتو (دره شهر کنونی) در فاصله ۱۵ کیلومتری از محدوده مورد مطالعه بهترین گواه لرزه‌خیزی این منطقه است که ضرورت این مطالعه را بیش از پیش نمایان می‌کند.

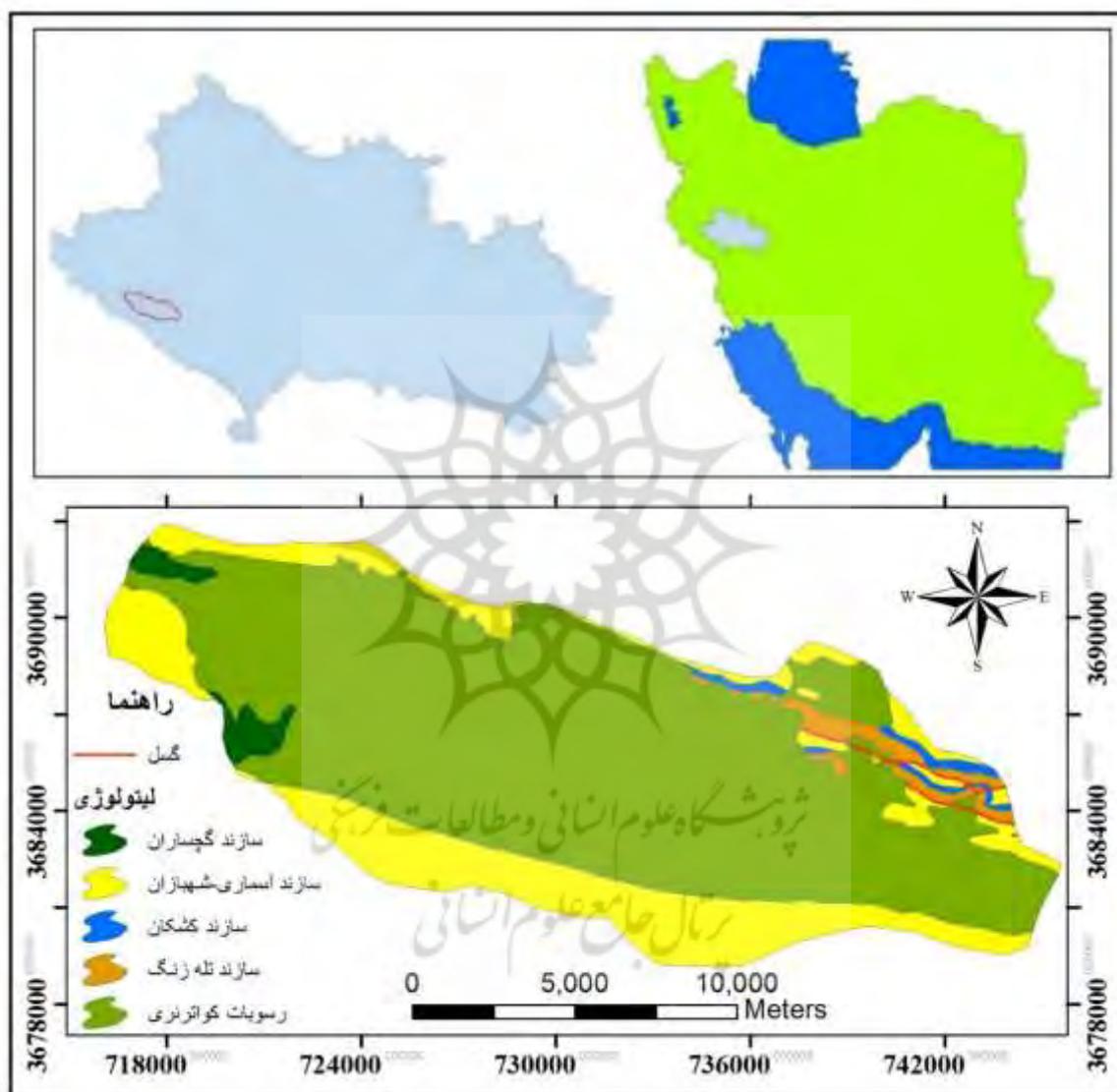
روش شناسایی پژوهش

مشخصات عمومی منطقه

شهرستان رومشکان در جنوب غرب استان لرستان واقع شده است. این شهرستان در بخش شمالی و غربی با شهرستان کوهدشت، در بخش شرقی با شهرستان پلدختر و در بخش جنوبی با شهرستان‌های دره‌شهر و بدره هم‌مرز است. محدوده مطالعه‌شده در زون زاگرس چین‌خورده واقع بوده است که به‌ترتیب سن، سازندهای گچساران (۲)

1. Gannouni and Gabtni
2. Varo
3. Pudi
4. Fayaz

درصد)، آسماری-شهبازان (۲۳/۱ درصد)، کشکان (۱/۲ درصد)، تله‌زنگ (۲/۳ درصد) و رسوبات کواترنری (۷۱/۵ درصد) از زمان میوسن پیشین تا عهد حاضر در سطح آن رخنمون دارند (شکل ۱). این شهرستان دارای آب‌وهوایی معتدل و نیمه خشک با متوسط بارندگی ۳۹۵ میلی‌متر در سال است. بیشینه و کمینه دما به ترتیب حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد در فصل تابستان و ۷ درجه زیر صفر در فصل زمستان است. در این مطالعه هسته مسکونی شهرستان رومشکان با مساحت ۲۳۰ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۸/۸ درجه بررسی شده است.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی شهرستان رومشکان

Figure (1) The Geographical Location and Geology Map of Rumeshkan County

شناسایی گسل‌های منطقه

به نقشه درآوردن خطواره‌ها و آنالیز آنها از طریق داده‌های سنجش از دور، ابزار مفیدی برای مطالعات تکتونیکی و ساختاری ناحیه‌ای است. ساختارهای زمین‌شناسی مانند شکستگی، گسل، درزه، زون‌های برشی و فولیاسیون خود را

در مطالعات سنجش از دور به صورت خطواره نشان می‌دهند (کمالی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴۰). روش استخراج خطواره‌ها و گسل‌ها به سه صورت دستی، اتوماتیک و نیمه اتوماتیک است. در این پژوهش از روش نیمه اتوماتیک استفاده شده است. روش نیمه اتوماتیک تلفیقی از دو روش اتوماتیک و دستی است که نسبت به سایر روش‌ها قابل اعتمادتر بوده است و سرعت خوبی دارد. بدین منظور تصاویر سال ۲۰۱۳ لندست ۸ اخذ شده با سنجنده OLI ردیف ۳۷ و گذر ۱۶۶، تجزیه و تحلیل شده است. علت انتخاب این تصاویر نسبت به تصاویر لندست ۷ برخورداری تصاویر لندست ۸ از قدرت تفکیک بیشتر است.

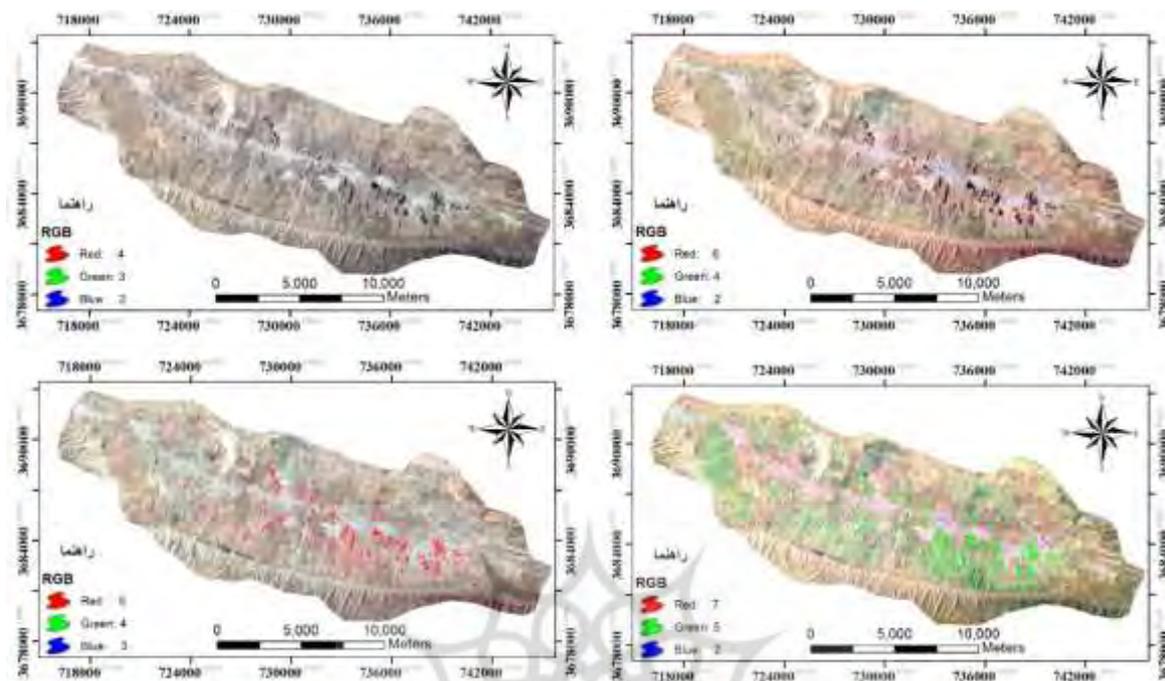
تصاویر ماهواره‌ای اغلب دارای اعوجاج هندسی و رادیومتریک بوده‌اند و نیاز به تصحیحات مکانی و طیفی دارند. در زمان ثبت تصویر با سنجنده ماهواره‌ای خطاهایی ایجاد می‌شود که شامل خطا در موقعیت هندسی پیکسل‌ها (خطای هندسی) و مقدار روشنایی اندازه‌گیری شده پیکسل‌ها (خطای رادیومتری) است. در مرحله پیش پردازش خطاهای رادیومتری و هندسی از تصاویر ماهواره‌ای حذف می‌شوند (عباسی و یساقی، ۱۳۹۰: ۲۱).

در این پژوهش ابتدا با اعمال فیلتر Lineament Extraction در نرم‌افزار ژئوماتیک^۱ به روش اتوماتیک خطواره‌های منطقه استخراج شده است. سپس با بارسازی مکانی و اعمال فیلترهای جهت‌دار بر روی باندها ۸ تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI و همچنین ایجاد ترکیبات باندها، گسل‌های منطقه به روش دستی شناسایی شده است. پس از شناسایی گسل‌ها، نتایج به دست آمده با بازدیدهای صحرائی صحت‌سنجی شد.

در بارسازی یا بهبود مکانی که بهبود محلی نیز نامیده می‌شود، مقدار عددی یک پیکسل با توجه به مقادیر پیکسل‌های اطراف آن بهبود می‌یابد. بارسازی مکانی با استفاده از اعمال فیلترهای مختلف بر روی تصاویر انجام می‌گیرد. اپراتورهای فیلتر به طور معمول پنجره‌های ۳*۳، ۵*۵ و یا ۷*۷ هستند و با اعمال بر تصویر، برای هر پیکسل با توجه به پیکسل‌های اطراف، مقدار جدیدی به دست می‌آورند و آن را ذخیره می‌کنند. در این پژوهش، به منظور شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها از فیلتر جهت‌ی Directional در جهات شمالی-جنوبی، شمال شرقی-جنوب غربی، شرقی-غربی و جنوب شرقی-شمال غرب استفاده شده است.

در ترکیبات باندها نیز به عنوان معمولی‌ترین تکنیک بارسازی تصویر، اختصاص دادن مقادیر رگومی در پیکسل‌های یک تصویر به رنگ‌های مشخص برای افزایش وضوح عمومی تصویر است. به این ترتیب، تصویری سیاه و سفید، به صورت رنگی دیده می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای به صورت تک باندها یا رنگی قابل نمایش هستند. در ترکیب چند باندها انرژی ثبت شده برای هر پیکسل در سه باندها اندازه‌گیری شده و در سه رنگ قرمز، سبز و آبی نمایش داده می‌شود. از باندهای OLI ترکیبات زیادی به دست می‌آید که با ترکیبات باندها در لندست ۷ متفاوت هستند. با توجه به اینکه از هر ترکیب چه نوع اطلاعاتی بهتر استخراج می‌شود، از آن ترکیب در کاربردی خاص استفاده می‌شود. به ترکیب RGB=432 در لندست ۸، رنگی حقیقی گفته می‌شود؛ زیرا رنگ‌هایی شبیه رنگ‌های طبیعی را به تصویر می‌دهند و به باقی ترکیبات، رنگی دروغین گفته می‌شود. در این پژوهش برای بررسی گسل‌ها بیشتر از ترکیبات ۴۳۲،

۵۴۳ گیاهان به رنگ قرمز دیده می‌شود، ۶۴۲ (تفکیک واحدهای سنگی) و ۷۵۲ (مطالعات زمین‌شناسی) استفاده شده است (شکل ۲).



شکل (۲) ترکیبات باندی ساخته شده برای مطالعه گسل‌های شهرستان رومشکان
Figure (2) Band compositions made to study the fault of Rumeshkan County

پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه

به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در سطح شهرستان رومشکان روش سلسله‌مراتبی-فازی به کار گرفته شده است. این روش با ایجاد ساختاری قابل‌درک بین تصمیم‌گیری چند معیاره با مجموعه‌ای از داده‌های کمی و کیفی، وجود ساختار مرتبه‌ای، مستقل و قابل‌فهم را ارائه داده است. در نهایت ضریب ناسازگاری را کاهش می‌دهد (Vahidnia et al., 2009). منطق سلسله‌مراتبی-فازی تفکرات بشری را در استفاده از اطلاعات تقریبی و نامطمئن برای تصمیم‌گیری بازتاب می‌دهد (Kahraman et al., 2004) و بیشترین انعطاف را در قضاوت و واقعی‌ترین و بهترین رابطه را بین معیارها و متغیرها ارائه می‌دهد (Bimal et al., 2010).

در این پژوهش علاوه بر نقشه گسل‌های منطقه عوامل دیگر شامل شیب، ژئومورفولوژی، لیتولوژی و فاصله از کانون زمین‌لرزه‌های گذشته استفاده شده است. عوامل مختلف در نظر گرفته شده به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با توجه به نکاتی از قبیل هدف، مقیاس کار و دقت قابل‌انتظار، شرایط منطقه، میزان اثرگذاری هر عامل و کافی و در دسترس بودن اطلاعات تعیین می‌شود. به‌طور کلی مراحل پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در جدول (۱) آمده است.

شیب: به‌منظور تهیه نقشه شیب از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه، به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Astrer در محیط نرم‌افزار ENVI و ArcGIS استفاده شده است. نقشه شیب برای منطقه مورد مطالعه در ۳ کلاس ۰-۵، ۵-۱۰ و بیشتر از ۱۰ درجه تهیه شده است.

لیتولوژی: نقشه لیتولوژی منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، ترکیب بانندی ۵۳۱ تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۳ لندست ۸ سنجنده OLI (ردیف ۳۷ و گذر ۱۶۶) و مطالعات میدانی برای تعیین مرز لایه‌ها تهیه شده است. لیتولوژی منطقه حاوی لایه‌هایی از آهک، دولومیت، رسوبات آواری، ژئوپس، مارن و رسوبات کواترنری است. فاصله از کانون زمین‌لرزه‌های گذشته: به‌منظور تهیه نقشه فاصله از کانون زمین‌لرزه‌های رخ داده، ابتدا موقعیت جغرافیایی زمین‌لرزه‌های از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۱ به‌دست‌آمده از سایت مرکز لرزه‌نگاری و ژئوفیزیک دانشگاه تهران جمع‌آوری و با رقومی‌سازی این نقاط نقشه فاصله کانونی زمین‌لرزه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شده است. ژئومورفولوژی: نقشه ژئومورفولوژی نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI، مدل رقومی ارتفاع و مطالعات میدانی و در تلفیق با نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه و ترسیم شده است. ژئومورفولوژی منطقه شامل دو واحد کوهستان و واحد دشت و آبرفت است. واحد کوهستان شامل ارتفاعات منطقه و واحد دشت و آبرفت مخلوطی از شن، ماسه و رس است.

جدول (۱) روش تهیه نقشه خطر زمین‌لرزه در شهرستان رومشکان

Table 1: Method of preparing an earthquake hazard map in Rumeshkan County



فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

معیارهای متفاوتی در ارتباط با پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه وجود دارد که هرکدام از این معیارها ارزش و وزن متفاوتی نسبت به یکدیگر دارد. در این پژوهش از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت بندی و وزن‌دهی عوامل استفاده شده است.

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از جامع‌ترین مدل‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری‌های چند معیاره است؛ زیرا این تکنیک‌ها امکان فرموله کردن مسئله را به‌صورت سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند و همچنین، امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در حل مسائل دارد. این فرایند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت می‌دهد و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد (Janardhana et al., 2006) (حاجی عزیزی و

همکاران، ۱۳۹۰: ۲۸). در تحلیل سلسله مراتبی، روش کار به این صورت است که ابتدا به منظور تعیین برتر بودن عوامل مختلف و تبدیل آنها به مقادیر کمی از قضاوت‌های شفاهی (نظر کارشناسی) بر مبنای مقایسات زوجی استفاده می‌شود. به طوری که تصمیم‌گیرنده برتر بودن یک عامل را نسبت به علل دیگر به صورت جدول (۲) در نظر می‌گیرد و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمی بین ۱ الی ۹ تبدیل می‌کند. سپس نتایج این مقایسات، برای محاسبه شاخص ناسازگاری به نرم افزار Expert Choice وارد می‌شود. اگر شاخص محاسبه شده کمتر از ۰/۱ باشد، نتایج مقبول است و در غیر این صورت باید دوباره در وزن‌دهی تجدیدنظر شود.

جدول (۲) مقیاس ارزیابی روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (Saaty, 1980)

Table (2) The AHP Evaluation Scale (Saaty, 1980)

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

منطق فازی

استانداردسازی: با تعیین مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری، لازم است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های GIS ذخیره شود. در اندازه‌گیری صفات، دامنه متنوعی از مقیاس‌ها استفاده می‌شود. بر همین اساس لازم است، ارزش‌های موجود در لایه‌های مختلف نقشه به واحدهای قابل مقایسه و در تناسب با هم تبدیل شود. با انجام دادن این کار نقشه‌های استاندارد و قابل مقایسه خواهیم داشت. یکی از روش‌های استانداردسازی، فازی است. عملیات فازی‌سازی، ورودی‌ها را می‌گیرد و با توابع عضویت مربوطه، یک درجه مناسب به هر یک نسبت می‌دهد. یکی از اساسی‌ترین مباحث در تئوری فازی بحث از تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است. اساس اختلاف روش‌های فازی با روش‌های دیگر، در تعریف تابع عضویت است. تابع عضویت به صورت درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیر مجموعه‌های آن تعریف و به شکل $\mu_C(X)$ نمایش داده می‌شود. برای به دست آوردن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد، بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل‌گیری و تعریف تابع عضویت مؤثر است (بهاروند و سوری، ۱۳۹۶: ۹۸).

اپراتورهای مدل منطق فازی: اپراتورهای مدل منطق فازی مشتمل بر عملگرهای اجتماع^۱، اشتراک^۲، ضرب جبری^۳، جمع جبری^۴ و عملگر گاما فازی^۵ است.

1. Fuzzy OR
2. Fuzzy AND
3. Fuzzy Algebraic Product
4. Fuzzy Algebraic Sum
5. Fuzzy Gamma

عملگر گاما فازی: این عملگر برحسب حاصل ضرب و جمع جبری فازی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

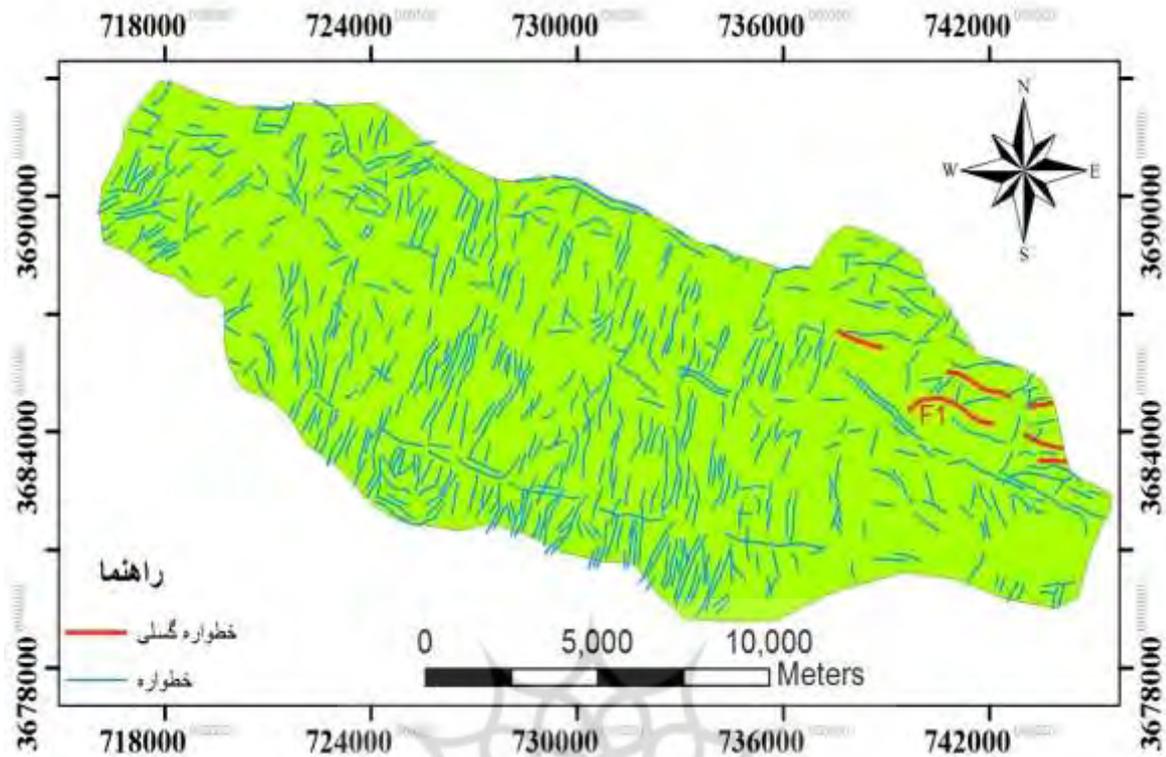
$$\mu_{\text{Combination}} = (\text{Fuzzy A I g . Sum})^{0^{\gamma}} * (\text{Fuzzy A I g . Pr oduct})^{0^{1-\gamma}} \quad (1)$$

که در آن γ پارامتر انتخاب شده در محدوده (۰ و ۱) است. وقتی γ برابر ۱ باشد، ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود. و وقتی $\gamma=0$ باشد، ترکیب اصلی برابر با حاصل ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح و آگاهانه γ بین صفر و یک مقادیری را در خروجی به وجود می‌آورد که نشان‌دهنده سازگاری انعطاف‌پذیر میان گرایش‌های کاهش و افزایشی دو عملگر جمع و ضرب فازی است. عملگر گاما نسبت به سایر عملگرهای فازی کاربرد بیشتری دارد و زمانی استفاده می‌شود که اثر برخی شواهد کاهش و برخی دیگر نیز افزایشی باشد؛ به همین دلیل در این پژوهش از عملگر گاما به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش به منظور داشتن یک نقشه رقومی یکپارچه از خطواره‌های منطقه، از تکنیک سنجش از دور استفاده شده است. تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع در کنار دانش زمین‌شناسی ابزار مناسبی برای استخراج خطواره‌ها است، در صورتی که نتایج حاصل از این استخراج دقت زیادی داشته باشد. نکته‌ای که در این روش باید به آن توجه کرد، استخراج تمامی خطواره‌های موجود اعم از لبه‌ها، مسیر رودخانه‌ها و جاده‌هاست که با تصمیم‌گیری کارشناس باید گسل‌های منطقه شناسایی و از سایر خطواره‌ها جدا شوند.

در پژوهش انجام شده پس از استخراج خطواره‌ها و مقایسه آنها با ترکیبات بانندی، نقشه مدل رقومی ارتفاع و زمین‌شناسی منطقه، خطواره‌های مربوط به گسل‌های شهرستان رومشکان از سایر خطواره‌ها جدا و نقشه ShapeFill آنها تهیه شده است (شکل ۳) که با مطالعات میدانی صحت‌سنجی آنها تأیید شد. شکل (۴) نشان‌دهنده نمایی از شاخه جنوب غربی گسل FI (در شکل ۳ موقعیت آن مشخص شده است) است که در امتداد آن به وضوح چشمه‌های گسلی دیده می‌شوند. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین تراکم گسل‌ها در قسمت شرقی منطقه است. نمودار رزیدیاگرام گسل‌های منطقه نشان‌دهنده آن است که این شکستگی‌ها دارای امتداد شمال غرب-جنوب شرق بوده و در راستای دیگر گسل‌های زاگرس، دارای سازوکار فشاری است (شکل ۵).



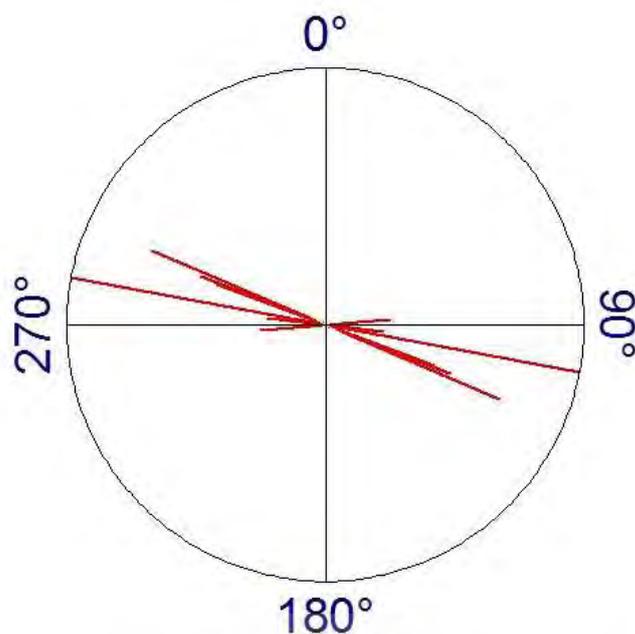
شکل (۳) نقشه خطواره‌ها و گسل‌ها در محدوده مورد مطالعه

Figure (3) Map of lines and faults in the study area



شکل (۴) نمایی از شاخه جنوبی غربی گسل F1

Figure (4) A view of the southwestern branch of fault F1



شکل (۵) رزیدیاگرام گسل‌های محدوده مورد مطالعه

Figure (5) Rose diagram of faults in the study area

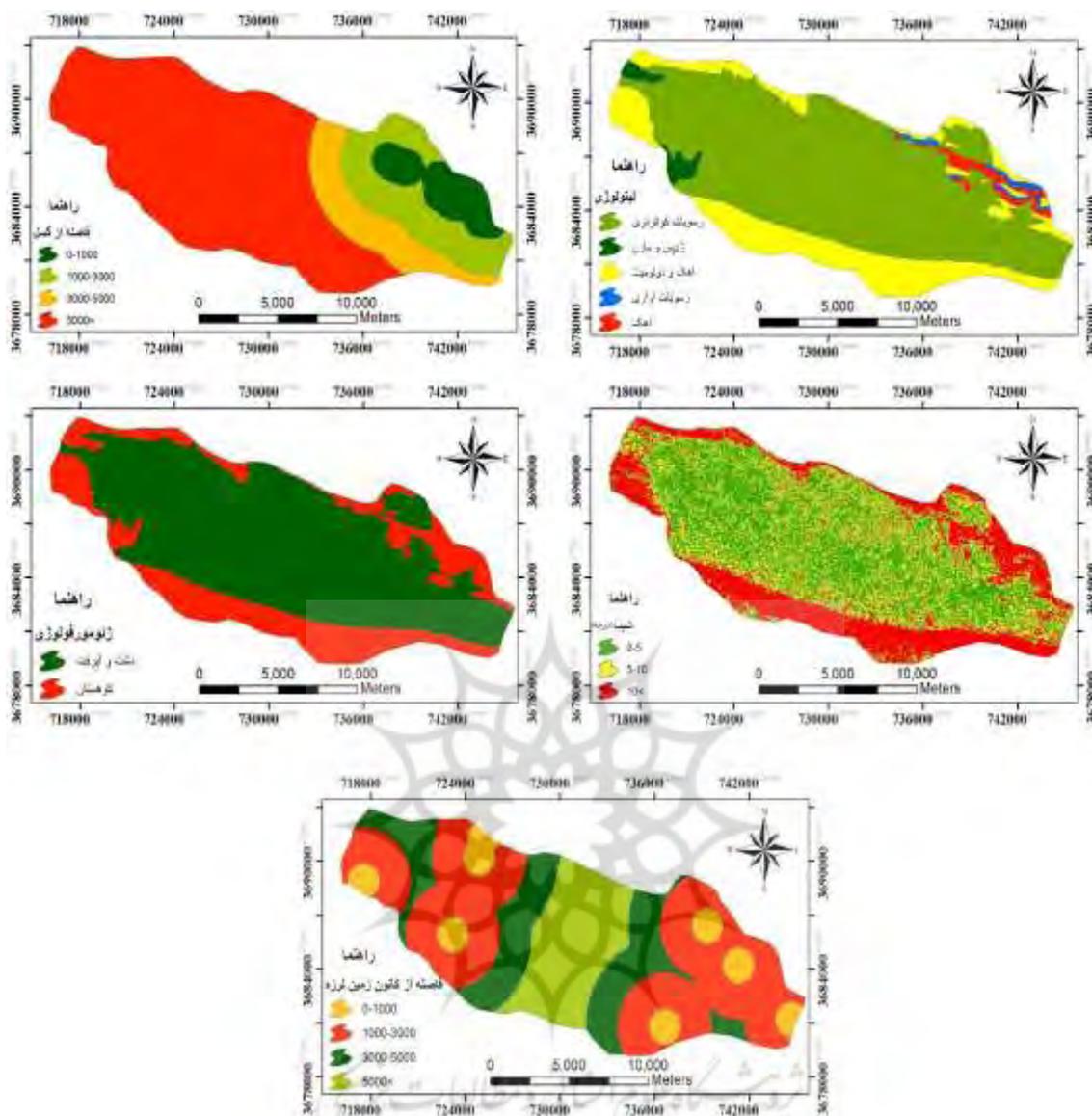
در این پژوهش پس از تعیین عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه، نقشه هر یک از عوامل در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده است (شکل ۶). نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل هر یک از عوامل به شرح زیر است:

بررسی لیتولوژی و ژئومورفولوژی منطقه نشان‌دهنده آن است که با توجه به سست‌بودن رسوبات کواترنری و آبرفتی، این واحد بیشترین حساسیت را نسبت به خطر زمین‌لرزه دارد و بیشترین وزن به آنها تعلق می‌گیرد.

بررسی شیب منطقه براساس قضاوت کارشناسی نشان‌دهنده آن است که بیشترین حساسیت نسبت به خطر زمین‌لرزه در درجات زیاد شیب قرار دارد. علت آن، پایین‌بودن مقاومت برشی مصالح در شیب‌های بالاست.

نتایج به‌دست‌آمده از بررسی گسل‌های منطقه نشان‌دهنده آن است که با کاهش فاصله از این عامل حساسیت نسبت به زمین‌لرزه افزایش می‌یابد؛ چون زمین‌لرزه‌ها خود در اثر حرکت گسل‌ها به وجود می‌آیند؛ همچنین با کاهش فاصله از نقاط کانونی زمین‌لرزه‌های گذشته، حساسیت بیشتر می‌شود.

پس از بررسی عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه، با استفاده از توابع عضویت فازی نقشه هر یک از عوامل فازی‌سازی شده است. به این منظور برای استانداردسازی نقشه‌های فاصله از گسل، کانون زمین‌لرزه‌های قدیمی و ژئومورفولوژی از تابع عضویت خطی کاهشی، نقشه شیب از تابع خطی افزایشی و نقشه لیتولوژی از تابع عضویت گوسی استفاده شده است.



شکل (۶) نقشه عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهرستان رومشکان

Figure (6) Map of factors affecting earthquake hazard zonation in Rumeshkan County

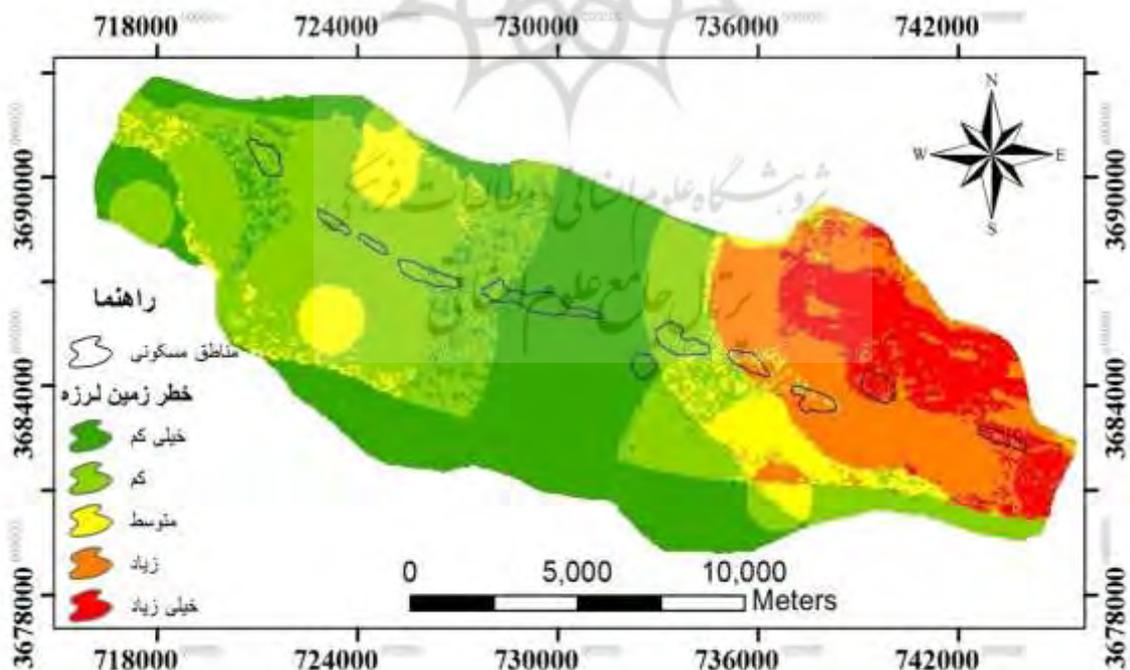
با توجه به اینکه هر یک از لایه‌ها تأثیر متفاوتی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه دارند، وزندهی به لایه‌ها ضرورت می‌یابد. برای این کار از قضاوت کارشناسی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. در روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی ابتدا با مقایسه زوجی لایه‌ها دو به دو با هم مقایسه و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور محاسبه اوزان هر یک از فاکتورهای استفاده‌شده به نرم‌افزار Expert Choice انتقال داده شد. نتایج حاصل‌شده از محاسبه ضریب ناسازگاری نشان‌دهنده آن بود که مقایسه‌ها به‌درستی انجام شده است (جدول ۳). براساس نتایج، لایه گسل بیشترین نقش را در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه‌های محدوده مورد مطالعه دارد.

جدول (۳) ماتریس مقایسه‌ای عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لرزه

Table (3) The Comparison Matrix of the Factors Used in the earthquake Hazard Zonation

ضریب ناسازگاری	وزن	عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه					
		فاصله از کانون زمین‌لرزه	ژئومورفولوژی	لیتولوژی	فاصله از گسل	شیب	
۰/۰۲	۰/۱۱۵	۰/۳۳	۲	۰/۵	۰/۳۳	۱	شیب
	۰/۴۰۶	۲	۵	۳	۱		فاصله از گسل
	۰/۱۶۶	۰/۵	۳	۱			لیتولوژی
	۰/۰۶۳	۰/۲۵	۱				ژئومورفولوژی
	۰/۲۴۹	۱					فاصله از کانون زمین‌لرزه

در انتها برای تهیه نقشه خطر زمین‌لرزه، در محیط نرم‌افزار ArcMap از عملگر گامای ۰/۹ فازی استفاده و نقشه عوامل پنجگانه با یکدیگر تلفیق شد (شکل ۷). طبق نتایج به دست آمده به ترتیب ۳۱/۸، ۳۴/۳، ۱۰/۳، ۱۴/۶ و ۹/۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.



شکل (۷) نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در شهرستان رومشکان

Figure (7) The earthquake Hazard Zonation Map of Rumeshkan County

نتیجه‌گیری

بیشتر مطالعات مربوط به مدل‌سازی شکستگی و گسل‌های هر منطقه به آنالیز خطواره‌ها وابسته است. در این مطالعه به منظور داشتن یک نقشه رقوم یکنواخت از خطواره‌های منطقه، از تکنیک سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI) استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن بود که استفاده از روش نیمه اتوماتیک یکی از سریع‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای استخراج گسل‌ها و شکستگی‌هاست.

در این پژوهش، ۵ عامل به‌عنوان مؤثر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در سطح شهرستان رومشکان انتخاب شده است. اولویت‌بندی عوامل با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی نشان‌دهنده آن بود که به‌ترتیب عوامل فاصله از گسل، فاصله از کانون زمین‌لرزه‌های گذشته، لیتولوژی، شیب و ژئومورفولوژی بیشترین نقش را در تهیه نقشه خطر زمین‌لرزه دارند.

براساس نتایج، از پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه بیش از ۲۳ درصد از مساحت منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که این نواحی بیشتر بخش شرقی گستره موردبررسی را در برمی‌گیرد. تلفیق نقشه مناطق مسکونی با پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه نیز نشان‌دهنده آن بود که مناطق مسکونی واقع در بخش شرقی در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد، مناطق غربی و مرکزی در کلاس خطر خیلی کم و کم قرار دارند که شهر چقابل به‌عنوان مرکز شهرستان در بخش مرکزی واقع شده است.

با توجه به قرارگیری مناطق مسکونی بر روی رسوبات آبرفتی به‌خصوص در مناطق شرقی شهرستان، پیشنهاد می‌شود که تمام ساخت‌وسازها براساس آیین‌نامه‌های عمرانی انجام شوند و مناطق مسکونی از استحکام لازم بهره‌مند باشند؛ همچنین پیشنهاد می‌شود، تا حد امکان استقرار جمعیت در بخش‌های مرکزی و غربی شهرستان متمرکز شود.

منابع

- اخلاص پور، پیام، عباس‌نژاد، احمد، نعمتی، مجید (۱۴۰۰). بررسی خطر زمین‌لرزه استان کرمان با کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی و به‌کارگیری روش منطق فازی. نشریه علوم زمین خوارزمی، دوره ۷، شماره ۲، <http://gnf.khu.ac.ir/article-1-2784-fa.html>
- امیراحمدی، ابوالقاسم، ابراهیمی، مجید، حبیب‌الهیان، محمود، زنگنه‌اسدی، محمدعلی (۱۳۹۳). بررسی ناپایداری ژئومورفولوژیک دامنه‌ای به روش آنالاکان با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کلات در ارتفاعات هزار مسجد). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۹، شماره ۱۱۵، صص ۲۵۹-۲۴۱.
- بهاروند، سیامک، سوری، سلمان (۱۳۹۶). مکان‌یابی دفن پسماندهای جامد شهری با استفاده از روش تلفیقی سلسله‌مراتبی-فازی (مطالعه موردی: شهر کوه‌دشت). نشریه آمایش محیط، دوره ۱۰، شماره ۳۶، صص ۱۰۸-۹۳.
- پاشاپور، حجت‌الله، قربانی، رامین، فرهادی، ابراهیم، درودی‌نیا، عباس (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: کلان شهر تبریز). نشریه آمایش محیط، دوره ۱۲، شماره ۴۵، صص ۷۰-۴۹.

- حاجی‌عزیزی، شیوا، خیرخواه‌زرکش، میرمسعود، شریفی، اسماعیل (۱۳۹۰). انتخاب مکان مناسب احداث سد زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به دو روش مکانی و غیرمکانی (مطالعه موردی: حوضه پیشکوه شهرستان تفت استان یزد). نشریه کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی، دوره ۲، صص ۲۷-۳۸.
- رشیدی، محدثه، الماسیان، محمود، سلطانی، ماهیار، عزیززاده، مهران (۱۳۹۱). بررسی خطواره‌های زمین‌ساختی پهنه گسله نایند (از شهداد تا نایندگان) با استفاده از روش‌های دورسنجی. فصلنامه علوم زمین، دوره ۷، شماره ۲۳، صص ۱-۱۴.
- رحیمی شهید، مجتبی، رحیمی، نیما (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم). نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۲۲، صص ۱۰۹-۱۱۸.
- رنجبری، احد، عابدینی، موسی، مختاری، داود، ولیزاده، کامران (۱۳۹۸). شناسایی و استخراج گسل‌ها بر پایه GIS&RS و شواهد ژئومورفیک فعالیت آن‌ها در پهنه گسلی قوشاداغ در شمال غرب ایران. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۴، شماره ۷۴، صص ۸۹-۱۰۱.
- عباسی، ثریا، یساقی، علی (۱۳۹۰). استفاده از تصاویر لندست و داده‌های زمین‌مغناطیسی در شناسایی خطواره‌های گسلی و تحلیل خاستگاه آنها در ناحیه لرستان، زاگرس چین‌خورده. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۳، شماره ۱، صص ۱۹-۳۳.
- عبداللهی، علی‌اصغر، شرفی، حجت‌اله، صباحی، یاسر (۱۳۹۷). تاب‌آوری نهادی و کالبدی-محیطی اجتماعات شهری در جهت کاهش بحران‌های طبیعی، زلزله (مطالعه موردی: شهر کرمان). نشریه آمایش محیط، دوره ۱۱، شماره ۴۲، صص ۱۸۶-۱۶۵.
- کرمی، محمدرضا، امیریان، سهراب (۱۳۹۷). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهری ناشی از زلزله با استفاده از مدل Fuzzy-AHP (مطالعه موردی شهر تبریز). نشریه برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، دوره ۳، شماره ۱۰، صص ۱۱۰-۱۲۴.
- کمالی، زهرا، سرکاری‌نژاد، خلیل، رهنماد، جعفر (۱۳۹۲). بررسی ساختاری فروبوم دشت ارژن با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و خش‌لغزهای گسلی. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۹، شماره ۲، صص ۱۳۵-۱۴۸.
- محمدی، امین و مساعدی، ابوالفضل (۱۳۸۴). بررسی کارایی مدل حائری-سمیعی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه قویجق استان گلستان). دومین کنفرانس سراسری آب‌خیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صص ۳۸۷-۳۹۴.
- منصوریان، الهه، الحسینی‌المدرسی، علی (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در حوزه شهری نورآباد ممسنی فارس برای مدیریت بحران شبکه‌ی گاز، با استفاده از مدل AHP در محیط GIS. نشریه مدیریت بحران، دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۸۱-۹۴.

مهرابی، علی، داستانیپور، محمد، رادفر، شهباز، وزیر، محمدرضا، درخشانی، رضا (۱۳۹۴). شناسایی خطواره‌های گسلی کمربند چین خورده-رانندگی زاگرس بر پایه تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و تعیین ارتباط آنها با موقعیت گنبد‌های نمکی رخنمون‌یافته سری هرمز با استفاده از تحلیل GIS. نشریه علوم زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۵، صص ۱۷-۳۲.

- Bimal, N., Yadav, O.P. & Murat, A. (2010). A fuzzy- AHP approach to prioritization of CIS attributes in target planning for automotive product development. *Expert System with Application Journal*, 37:6775- 6786.
- Fayaz, M., Romshoo, S.A., Rashid, I. & Chandra, R. (2022). Earthquake Vulnerability Assessment of the Built Environment in Srinagar City, Kashmir Himalaya, Using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1-35, <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-155>.
- Gannouni, S., & Gabtni, H. (2015). Structural interpretation of lineaments by satellite image processing (Landsat TM) in the region of zahret medien (Northern Tunisia). *Journal of Geographic Information System*, 7, 119-127, doi: 10.4236/jgis.2015.72011.
- Janardhana Raju, N., reddy, T. V. K., & Munirathnam, P. (2006). Subsurface dams to harvest rainwater- a case study of the Swarnamukhi River basin. Southern India. *Hydrology Journal*, 14, 526-531.
- Kahraman, C., Cebeci, U. & Ruan, D. (2004). Multiattribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2): 171-184.
- Pudi, R., Martha, T. R., Roy, P., Vinod, K., & Rao, R. (2021). Mesoscale seismic hazard zonation in the Central Seismic Gap of the Himalaya by GIS-based analysis of ground motion, site and earthquake-induced effects. *Environ Earth Sci*, 80, 613, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09907-w>.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Varo, J., Sekac, T., & Jana, S. K. (2019). Earthquake hazard micro zonation in Fiji islands: a research of vitilevu Island. *IJRTE*, 8, 2296-2307.
- Vahidnia, M.H., Alesheikh, A.A. & Alimohammadi, A. (2009). Hospital site selection using fuzzy AHP and its derivatives. *Journal of Environmental Management*, 90(10): 3048-3056.
- Yassaghi, A. (2006). Integration of Landsat Imagery Interpretation and Geomagnetic Data on Verification of Deep-Seated transverse Fault Lineaments in SE Zagros. *International Journal of Remote Sensing*, 56 (12), 152-167.