

A Comparative Evaluation of MABAC and CODAS Multi-Criteria Decision Algorithms in Landslide Risk Zoning (Case Study: Kowsar County)

Aghil Madadi ^{1 *}, Elnaz Piroozi ², Mehdi Faal Naziri ³

1- Associate professor of Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran

(*Corresponding Author Email: aghil48madadi@yahoo.com)

2- PhD Candidate of Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran

3- MSc of Remote Sensing and GIS, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran

1- Introduction

The landslide as one of the mass movements consists of rapid movement or the slow motion of rock, earth, or the sum of both, on the downstream side under the stress of gravity. Landslides are considered dangerous and catastrophic phenomena so that the identification of landslide prone areas and the production of accurate zoning maps of landslide sensitivity are important topics for risk management studies. One of the most important and widely used methods of studying landslides is zoning. The division of lands into separate areas, as well as the ranking of areas according to the degree of landslide risk, is called zoning. In the present study, the study area is Kowsar County, which has a high potential for landslides in terms of the specific situation of the region, such as topography (mountainous and high basin), high slope, the presence of loose and unstable surface materials on resistant structures and climatic conditions.

2- Methodology

The present study is of applied type and its research method is based on remote sensing techniques, GIS, and the use of multi-criteria analysis techniques. ENVI, Ecognition, Arc GIS, Idrisi, and Excel software have been used for image processing and data analysis. Criteria required in this research are slope, slope direction, elevation classes of lithology, land use, soil, precipitation, distance from communication road, distance from the waterway, and distance from the fault, according to the natural and human conditions of the region. Information layers of communication routes and waterway networks were obtained using the map of communication lines and rivers of Ardabil province. Slope layers for slope direction were prepared using the digital elevation model. Using the geological map of Givi (scale 1: 100000), layers related to lithology (rock resistance) as well as faults were prepared. In order to extract the land use of the city, the object-oriented method, the nearest neighborhood algorithm, and Sentinel 2 satellite images were used. To prepare the soil map, the soil map of Ardabil province with a scale of 1:50,000 was used. The rainfall map of the city was also drawn using meteorological and rainfall station data and the IDW interpolation method. In order to perform the steps of MABAC and CODAS algorithms, fuzzy membership functions were used for standardizing the criteria. Then, in order to weight the criteria, the critic method was used.

3- Discussion

In this study, distance from the road, distance from the waterway, digital elevation model, distance from the fault, precipitation, land use, slope, aspect slope, soil, and lithology were identified as factors affecting the area. Then, fuzzy membership functions, the above-mentioned elements became fuzzy maps. The following results were obtained with respect to each element:

- Height: height changes of each region as an effective factor in the creation of mass movements.
- Slope: the slope is mainly determined in spatial distribution and landslide intensity.
- Slope direction: gradient orientation plays an undeniable role in the amount and type of weathering of rocks, absorption, receiving solar energy, vegetation concentration, and moisture content.
- Lithology: the kind of geological formation of each region plays an important role in the development of sliding zones.

- Distance from fault: the path of potential faults is on unstable points of the earth.
- Soil: the soil of each region is an effective factor in the creation of domain movements.
- Precipitation: precipitation has an effect on pore water pressure and groundwater-surface, increasing amplitude and displacement and elimination of lateral stresses as a driving factor in landslide occurrence.
- Distance from waterway: water flowing through the surface (runoff) and water that penetrates the material.
- Distance from the road: the road is the natural state of the domain and causes vertical gashes in the slope.
- Land use criteria: certainly, the type of land use always plays a decisive role in environmental changes, especially the creation and intensification of range movements.

Based on the zoning done using the MABAC method, 211.99 and 298.85 km² of the area are in very high-risk and high-risk classes, respectively. Based on the results of using the CODAS method, 106.90 and 222.02 km² of the area were in high-risk and high-risk categories, respectively. In order to validate the slip potential zoning maps, using CODAS and MABAC methods, a sample of selected high-risk pixels was examined according to the set criteria. Examination of high-risk points showed that these areas were mainly in the slope of 20 to 35%. The road factor plays a very important role in creating slippery movements due to under-passing and removing the heel of the slope and changing the slope of the slopes.

4- Conclusions

The results of the study indicated the high power of Kosar city in terms of the occurrence of sliding movements. Slope factors, land use, soil, and lithology were the most important factors involved in creating landslides in the study area. Also, the results of comparing the models showed that the MABAC model provided a larger area of landslide risk than the CODAS model. It is expected that the results of this study will pave the way for better and more scientific management of competent managers and planners in this field.

Keywords: Risks, Mass Movements, MCDM, ROC Index.

References:

- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. International Series in Operations Research & Management Science, Vol 277, Springer, Cham.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., & Shahabi, H. (2018). Performance Evaluation of the Gis-Based Data Mining Techniques of Best-First Decision Tree, Random Forest, and Naïve Bayes Tree for Landslide Susceptibility Modeling. *Journal of Science of the Total Environment*, 644, 1006-1018.
- Colkesen, I., Sahin, E., & Kavzoglu, T. (2016). Susceptibility Mapping of Shallow Landslides Using Kernel-Based Gaussian Process, Support Vector Machines and Logistic Regression. *Journal of African Earth Sciences*, 118, 53-64.

- Crosta, B. G. (2009). Dating, Triggering, Modeling, and Hazard Assessment of Large Landslides. *Journal of Geomorphology*, 103, 1-4.
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide Characteristics and Slope in Stability Modeling using GIS Lantau Island Hong Kong. *Journal of Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- Davis, J., & Blesius, L. (2015). A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model. *Journal of Entropy*, 17(6), 4271-4292.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The Critic Method. *Journal of Computers and Operations Research*, 22(7), 763-770.
- Feizizadeh, B., Roodposhti, M. S., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-Based Extended - Fuzzy Multi-Criteria Evaluation for Landslide Susceptibility Mapping. *Journal of Computers & Geosciences*, 73, 208-221.
- Gigović, L., Drobnjak, S., & Pamučar, D. (2019). The Application of the Hybrid Gis Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Best–Worst Methodology for Landslide Susceptibility Mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 79.
- Gomez, H., & Kavzoglu, T. (2005). Assessment of Shallow Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Journal of Engineering Geology*, 78(1-2), 11-27.
- Gorum, T., Fan, X., van Westen, C. J., Huang, R. Q., Xu, Q., Tang, C., & Wang, G. (2011). Distribution Pattern of Earthquake-Induced Landslides Triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Geomorphology*, 133(3-4), 152-167.
- Haque, U., Da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopoi, W., Andersen, P., Luk, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., & Wuo, J. H. (2019). The Human Cost of Global Warming: Deadly Landslides and Their Triggers (1995–2014). *Journal of Science of the Total Environment*, 682, 673-684.
- Kadavi, P. R., Lee, C. W., & Lee, S. (2018). Application of Ensemble-Based Machine Learning Models to Landslide Susceptibility Mapping. *Journal of Remote Sensing*, 10(8), 1252.
- Kerekes, A. H., Poszet, S. L., & Andrea, G. Á. L. (2018). Landslide Susceptibility Assessment Using the Maximum Entropy Model in a Sector of the Cluj–Napoca Municipality, Romania. *Revista De Geomorfologie*, 20(1), 130-146.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio, A Case Study of Northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24.
- Mathew, M., & Sahu, S. (2018). Comparison of New Multi-Criteria Decision Making Methods for Material Handling Equipment Selection. *Journal of Management Science Letters*, 8(3), 139-150.
- Negnevitsky, M. (2002). *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. England: Addison Wesley/Pearson Education.
- Pontius, R. G., & Schneider, L. C. (2001). Land-Cover Change Model Validation by the ROC Method for the Ipswich Watershed, Massachusetts, USA. *Journal of Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 85(1–3), 239-248.

- Rossi, M., Guzzetti, F., Salvati, P., Donnini, M., Napolitano, E., & Bianchi, C. (2019). A Predictive Model of Societal Landslide Risk in Italy. *Journal of Earth-Science Reviews*, 196, 1-19.
- Shafique, M., Van Der Meijde, M., & Khan, M. A. (2016). A Review of the 2005 Kashmir Earthquake-Induced Landslides; From a Remote Sensing Prospective. *Journal of Asian Earth Sciences*, 118, 68-80.
- Sorbi, A., & Farrokhnia, A. (2018). Landslide Hazard Evaluation and Zonation of Karaj-CHaluse Road (North of Iran). *International Journal of Geography and Geology*, 7(2), 35-44.
- Tajudin, N., Yaacob, N., Mohdali, D., & Adnan, N. (2018). Rainfall – Landslide Potential Mapping Using Remote Sensing and GIS at Ulu Kelang, Selangor, Malaysia. *Conference Series Earth and Environmental Science*, 169, 1-8.
- Vojtekova, J., & Vojtek, M. (2020). Assessment of Landslide Susceptibility at A Localspatial Scale Applying the Multi-Criteria Analysis and GIS: A Case Study from Slovakia. *Journal of Geomatics, Natural Hazards, and Risk*, 11(1), 131-148.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. A., & Yomraliglu, T. (2011). A GIS- Based Comparative Study of Feguency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Bivariate Statistics and Logistics Metids for Land Slide Susceptibility Mapping in Trabzon, NE Turkey. *Journal of Geomorphology*, 85, 274-287.
- Yesilnacar, E. K. (2005). *The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey*. PhD Thesis, Department of Geometrics the University of Melbourne.



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۸۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صص ۲۴-۱

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۶/۱۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۸

ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره MABAC و CODAS

در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش؛ نمونه پژوهش: شهرستان کوثر

عقیل مددی^{*}، دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

aghil48madadi@yahoo.com

الناز پیروزی، دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

piroozelnaz@yahoo.com

مهدی فعال نذیری کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

mehdifn1373@gmail.com

چکیده

زمین‌لغزش، یکی از فرایندهای مهم محیطی به‌ویژه در چشم‌اندازهای مناطق کوهستانی به شمار می‌آید. شناسایی مناطق حساس و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، گامی مهم در مسیر پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع این پدیده است. شهرستان کوثر (گیوی) با داشتن چهره کوهستانی و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، لیتولوژی، اقلیمی و انسانی، شرایط لازم را برای شکل‌گیری حرکات لغزشی دارد؛ بنابراین هدف این پژوهش، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این شهرستان است. برای دستیابی به هدف پژوهش، نخست عوامل مؤثر بر ایجاد زمین‌لغزش در شهرستان شامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، لیتولوژی، خاک، کاربری اراضی، بارش، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده با توجه به مرور منابع مختلف، مطالعات میدانی و مشورت با کارشناسان شناسایی شد؛ سپس برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام شد. در مرحله بعد ارزش‌گذاری و استانداردسازی نقشه‌های معیار با استفاده از تابع عضویت فازی و وزن‌دهی عوامل با استفاده از روش کرتیک انجام شد؛ همچنین تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از روش‌های MABAC و CODAS به‌منابۀ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شد. با توجه به نتایج پژوهش به ترتیب عوامل شیب، کاربری اراضی، خاک و لیتولوژی، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. با توجه به خروجی روش MABAC به ترتیب ۱۷/۸۹ و ۲۵/۲۲ درصد از مساحت محدوده در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر و براساس نتایج حاصل از مدل CODAS به ترتیب ۹/۰۷ و ۲۲/۱۸ درصد از مساحت محدوده در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد الگوریتم CODAS با سطح زیر منحنی ۰/۸۳۹ در برآورد حساسیت زمین‌لغزش محدوده مطالعه‌شده نسبت به الگوریتم MABAC با سطح زیر منحنی ۰/۷۵۳ از صحت بیشتر و در نتیجه قابلیت بیشتری برخوردار است. نتایج پژوهش حاکی از پتانسیل زیاد شهرستان کوثر از لحاظ رخداد حرکات زمین‌لغزش است و نشان می‌دهد مناطق بسیار پرخطر و پرخطر در شیب‌های ۲۰-۳۵ درصد، کاربری‌های زراعی و مراتع ضعیف و سازندهایی با زیربنای سنگ سخت و مواد رسوبی و سست سطحی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: مخاطرات، حرکت دامنه‌ای، MCDM، شاخص ROC

*نویسنده مسؤول

Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/gep.2020.124723.1348](https://doi.org/10.22108/gep.2020.124723.1348)

مقدمه

زمین لغزش، یکی از حرکت‌های توده‌ای شامل حرکت تند یا کند مواد سنگی، خاکی یا مجموع هر دو روی دامنه به سمت پایین متأثر از نیروی جاذبه است (Crosta, 2009: 1). زمین لغزش‌ها، پدیده‌هایی خطرناک و فاجعه‌بار محسوب می‌شوند (Haque et al., 2019: 676; Rossi et al., 2019: 3). وقوع زمین لغزش آثار زیادی در مقیاس محلی و جهانی در اقتصاد داشته است و همه‌ساله هزاران نفر در سرتاسر جهان زندگی‌شان را به دلیل زمین لغزش از دست می‌دهند (Yalcin et al., 2011: 275)؛ برای نمونه براساس برآوردهای اولیه سالیانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارات مالی بر اثر زمین لغزش‌ها به کشور ایران وارد می‌شود (احمدی و طالبی اسفندرانی، ۱۳۸۰: ۳۲۴). تلفات سنگین زمین لغزش از عوامل طبیعی و عوامل فعال خارجی ناشی می‌شوند؛ عوامل طبیعی عبارت‌اند از: عامل زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی یا نوع خاک، ویژگی انسجام ساختاری، مقاومت برشی مواد، شرایط آب‌های زیرزمینی و اثر آن)، هندسه شیب (شیب، جهت، ارتفاع و انحنا شیب) و زمین یا پوشش زمین؛ عوامل خارجی که عموماً باعث لغزش زمین می‌شوند، عبارت‌اند از: بارندگی، لرزه‌خیزی و فعالیت‌های انسانی مانند فعالیت‌های ساختمانی و آماده‌سازی خاک برای کشاورزی در مناطق کوهستانی (Sorbi and Farrokhnia, 2018: 36).

شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش و تولید نقشه‌های دقیق منطقه‌بندی حساسیت به زمین لغزش از موضوعات مهم برای مطالعات مدیریت خطر است (Colkesen, 2016: 54). بررسی و مطالعه در زمینه خطر زمین لغزش و شناخت مناطق پرخطر در زندگی و فعالیت‌های انسانی اهمیت دارد؛ همچنین مطالعه این مخاطره برای شناخت نواحی امن به منظور رشد و توسعه زیستگاه‌های گیاهی و جانوری، ایجاد راه‌های ارتباطی، انتخاب مسیرهای انتقال نیرو، مکان‌گزینی محلی برای سکونتگاه‌های جدید و... اهمیت دارد و متخصصان امر به آن توجه دارند (سفیدگری و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۸).

از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های مطالعه زمین لغزش‌ها، پهنه‌بندی است. تقسیم زمین به نواحی جداگانه و همچنین رتبه‌بندی نواحی را با توجه به درجه خطر زمین لغزش‌ها، «پهنه‌بندی» می‌نامند (شریعت جعفری، ۱۳۷۵: ۱۴۸). نقشه‌های پهنه‌بندی به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان در عرصه‌های مختلفی چون مدیریت و حفاظت خاک و منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های عمرانی و توریستی، مکان‌یابی اراضی مناسب برای توسعه شهر و روستا، برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی، تعیین مسیر راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و انرژی کمک می‌کند (کرم، ۱۳۸۳: ۱۳۳).

شهرستان کوثر به لحاظ وضعیت خاص منطقه مانند توپوگرافی (کوهستانی و مرتفع بودن حوضه)، شیب زیاد، وجود مواد سطحی سست و نامقاوم روی سازندهای مقاوم و شرایط اقلیمی (به‌ویژه به علت بارش‌های بهاری و نیز ذوب برف‌ها در فصل بهار) پتانسیل زیادی برای وقوع زمین لغزش دارد. به دلیل اینکه وقوع لغزش‌ها به آسیب‌ها و خسارات متعدد از جمله تخریب راه‌های ارتباطی، پرشدن بستر رودخانه‌های دائمی منطقه و مخزن سد گیوی از رسوب و نیز فرسایش خاک در منطقه منجر می‌شود، مطالعه عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه‌بندی شهرستان از لحاظ پتانسیل بالقوه و بالفعل به منظور ارائه راه‌حل‌ها و شیوه‌های مناسب برای مهار و کنترل زمین لغزش ضروری است.

مطالعات ارزنده‌ای به‌ویژه در سال‌های اخیر با روش‌های مختلفی به‌منظور بررسی زمین‌لغزش‌ها در نواحی مختلف ایران و جهان انجام شده است؛ برای نمونه موسوی و همکاران (۱۳۹۵) خطر زمین‌لغزش را با استفاده از تحلیل‌های چندمعیاره WLC و TOPSIS در حوضه آبخیز ایزه پهنه‌بندی کردند. نتایج مطالعه نشان داد عوامل ارتفاع و لیتولوژی، مهم‌ترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش‌ها در محدوده است و مدل WLC قابلیت بهتری در پهنه‌بندی زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی داشته است.

مددی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل ELECTRE، خطر زمین‌لغزش را در حوضه آبخیز آق‌لاقان‌چای پهنه‌بندی کردند. با توجه به نتایج مطالعه، زیرحوضه نیر و ایرنجی با شیب‌های ۱۵-۳۰ درصد با زیربنای سنگ سخت به همراه مواد رسوبی و سست سطحی به ترتیب پتانسیل بیشتری برای وقوع زمین‌لغزش دارند و در نهایت کارایی روش الکتراه تأیید شد.

انتظاری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از فنون چندمعیاره AHP و VIKOR خطر زمین‌لغزش را در استان البرز پهنه‌بندی کردند. نتایج مطالعه نشان داد معیارهای شیب، طبقات ارتفاعی و کاربری اراضی اثر فزاینده‌ای در برابر زمین‌لغزش دارند و ۳۳/۰۹ درصد از سطح استان در طبقه با خطر زیاد قرار دارد. نتایج مطالعه همچنین نشان داد روش ویکور دقت زیادی در پهنه‌بندی زمین‌لغزش دارد.

فیضی‌زاده و همکاران^۱ (۲۰۱۴) حساسیت زمین‌لغزش را در حوضه رودخانه ایزه با استفاده از روش چندمعیاره فازی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد روش چندمعیاره فازی، دقت زیادی را در نقشه حساسیت به رانش زمین ایجاد می‌کند و به ترتیب حدود ۵۳٪ و ۳۱٪ از لغزش‌های شناخته‌شده در منطقه در طبقه «حساسیت بسیار زیاد» و «حساسیت زیاد» قرار دارند.

تاج‌الدین و همکاران^۲ (۲۰۱۸) در اولوکلانج^۳ واقع در کشور مالزی با استفاده از GIS و سنجش از دور و عوامل شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و به‌ویژه با تأکید بر نقش بارش، زمین‌لغزش را مطالعه کردند. نتایج مطالعه در ۵ طبقه خطر بسیار کم تا بسیار زیاد به دست آمد و کارایی روش WLC به‌مثابه روش تحلیل چندمعیاره با توجه به رخدادهای زمین‌لغزش در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ تأیید شد.

گیگووایس و همکاران^۴ (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره و پانزده معیار خطر زمین‌لغزش را در بخش غربی جمهوری صربستان مطالعه کردند. در این مطالعه در مجموع ۱۰۸۲ مکان لغزش شناسایی شد. نتایج اعتبارسنجی تأیید کرد استفاده از روش تحلیل چندمعیاره دقت زیادی دارد.

1. Feizizadeh et al.

2. Tajudin et al.

3. Ulu Kelang

4. Gigovic et al.

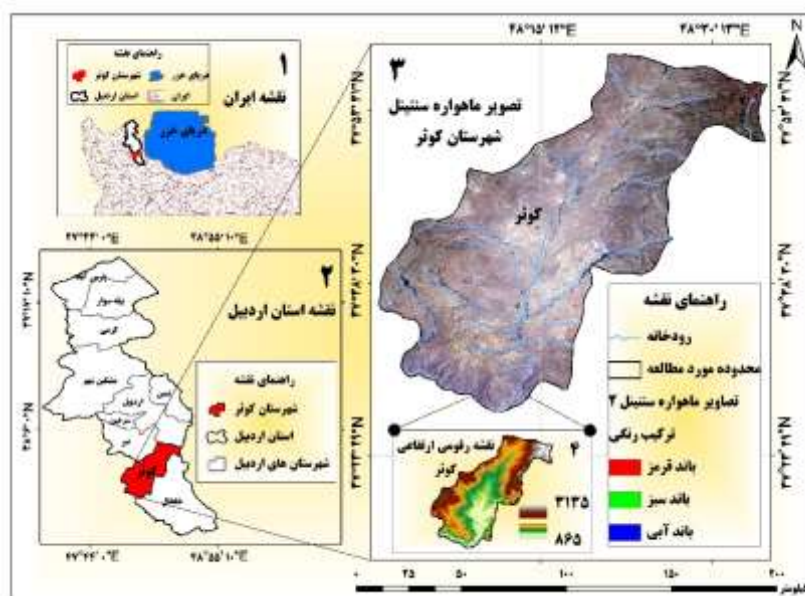
وجتک‌ووا و وجتک^۱ (2020) با استفاده از روش AHP، استعداد لغزش زمین را در شهر هاندلوای اسلواکی^۲ ارزیابی کردند. با توجه به نتایج مطالعه، شیب مهم‌ترین عامل است و ۵۱/۹ درصد از کل منطقه کلاس حساسیت زیاد و بسیار زیاد دارد؛ همچنین با مقایسه نتایج مطالعه با نقشه پراکنش لغزش موجود، صحت نتایج تأیید شد. در نهایت می‌توان گفت با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی که عمدتاً وقت‌گیر و هزینه‌بر و بیشتر با خطا همراه هستند، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با یک رویکرد تلفیقی، علاوه بر سودآوری، موجب تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص مواقع بحرانی و اضطراری می‌شود و به صدور نتایج مناسب می‌انجامد؛ بنابراین در سال‌های اخیر از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استقبال زیادی شده است و در این بررسی نیز از روش‌های MABAC و CODAS که براساس رویکرد برنامه‌ریزی مطلوب و بهینه‌سازی چندمعیاره پایه‌ریزی شده‌اند، به مثابه قاعده تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در شهرستان کوثر استفاده خواهد شد؛ به علاوه روش‌های MABAC و CODAS در امر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای نخستین بار در این مطالعه استفاده شده و تاکنون در زمینه خطر زمین‌لغزش از این روش‌های تصمیم‌گیری استفاده نشده است؛ بنابراین نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند برای پژوهشگران، مسئولان و سیاست‌گذاران به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش بسیار جالب باشد.

معرفی منطقه پژوهش

شهرستان کوثر (گیوی) با مساحت ۱۲۷۹/۷۴ کیلومترمربع در طول جغرافیایی ۴۸° ۱ تا ۴۸° ۳۳ و عرض جغرافیایی ۳۷° ۲۷ تا ۳۷° ۵۷ و در فاصله ۸۵ کیلومتری اردبیل قرار دارد (شکل ۱). این شهرستان از شمال با شهرستان اردبیل، از شرق با شهرستان خلخال و از غرب و جنوب با شهرستان‌های نیر و میانه همسایه است. شهرستان کوثر شامل دو بخش فیروزآباد و مرکزی و چهار دهستان به نام‌های سنجبد شمالی، سنجبد غربی، سنجبد جنوبی و زرج‌آباد و ۱۲۱ روستاست. در این شهرستان واحدهای مختلف سنگ‌شناسی منطقه به صورت آتشفشانی و رسوبی گسترده شده است. بخش بزرگی از منطقه از سازندهای سست و فرسایش‌پذیر کواترنری (Qal, Qt₂, Qt₁) و مارن‌های خاکستری، رس و قرمز ژپس‌دار (Ngms) پوشیده شده است؛ بنابراین شهرستان کوثر از مناطق فرسایش‌پذیر و مستعد لغزش است و انواع فرسایش آبی سطحی، ورقه‌ای، شیاری و همچنین انواع مختلف حرکات دامنه‌ای به ویژه زمین‌لغزش در آن دیده می‌شود و به همین علت مقادیر زیادی بار معلق رسوبی دارد.

1. Vojtekova & Vojtek

2. Handlová



شکل ۱. نقشه موقعیت شهرستان کوثر (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 1. Location map of Kowsar township

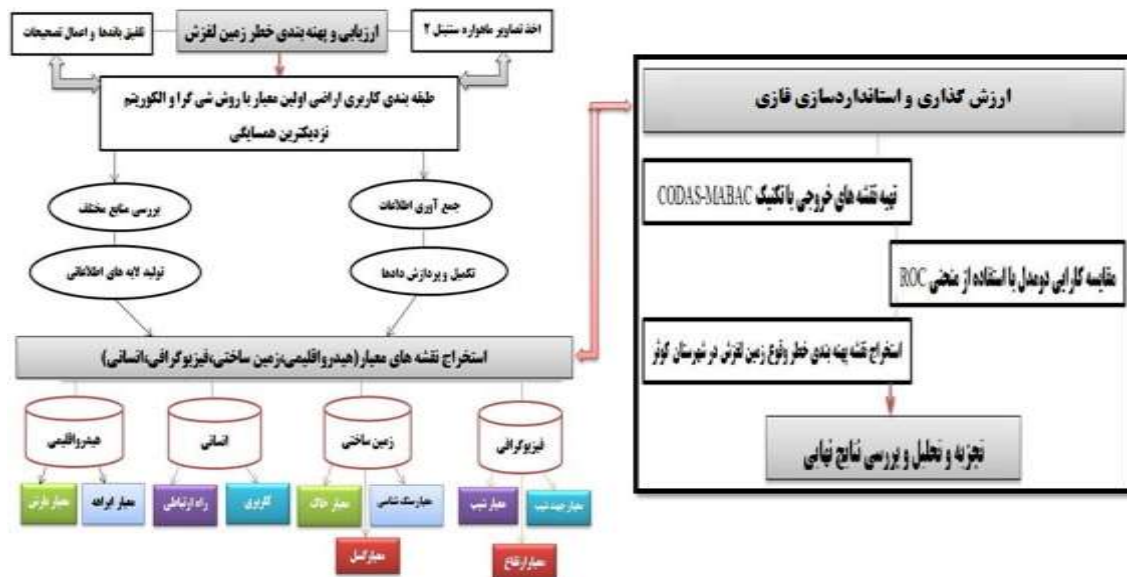
روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی و روش آن، تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها و تکنیک‌های دورسنجی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چندمعیاره است. برای پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای ENVI، Arc GIS، Idrisi، و Excel بهره گرفته شده است. در مرحله نخست با در نظر داشتن شرایط طبیعی و همچنین انسانی محدوده مطالعاتی، مطالعه منابع و پیشینه پژوهشی درباره موضوع پژوهش و استفاده از نظرات کارشناسان و متخصصان ذی‌ربط، عوامل مهم دخیل در ایجاد زمین‌لغزش شهرستان شناسایی شد. در مرحله بعد برای ایجاد نقشه‌های معیارهای بررسی شده در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام شد. در ادامه لایه‌های اطلاعاتی راههای ارتباطی و شبکه آبراهه با استفاده از نقشه خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل تهیه شد. لایه‌های شیب و جهت شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر دانلودشده از سایت vertex.daac.asf.alaska.edu تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی گیوی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ترسیم شد.

در پژوهش حاضر با هدف استخراج کاربری اراضی شهرستان کوثر، نخست تصویر ماهواره سنتینل ۲ (به دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب) از سایت زمین‌شناسی آمریکا (earthexplorer.usgs.gov) برای تاریخ ۱۶ آگوست سال ۲۰۲۰ و در گذر و ردیف ۳۳/۱۶۷ اخذ شد (دلیل انتخاب تصویر ماه آگوست، وجود پوشش گیاهی کافی و نبود ابر و وضوح تصویر برای استخراج عوارض موجود است). گفتنی است برای استخراج نقشه کاربری اراضی از باندهای مرئی و مادون قرمز استفاده و سپس به منظور آماده‌سازی تصاویر، تصحیحات هندسی و رادیومتریکی روی تصاویر با استفاده از روش Flaash در نرم‌افزار Envi 5.3 انجام شد؛ سپس طبقه‌بندی با روش شی‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار

Ecognition صورت گرفت و پس از اعمال فیلتر، نقشه نهایی حاصل شد. برای تهیه نقشه خاک محدوده پژوهش، از نقشه خاک استان اردبیل، مستخرج از نقشه خاک کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ استفاده شده است. نقشه بارش شهرستان نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و روش درونیابی IDW ترسیم شد. برای انجام مراحل الگوریتم‌های MABAC و CODAS، با توجه به این امر که هریک از معیارها واحدهای متفاوتی در اندازه‌گیری دارند، استاندارد کردن آنها پیش از ترکیب لایه‌ها ضروری است (سلمان ماهینی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۹۰).

به عملیات یکسان‌سازی داده‌ها در دامنه مشخصی (مانند بین صفر تا یک) «استانداردسازی» گفته می‌شود (آشور، ۱۳۹۰: ۱۳۱). در مطالعه حاضر از تابع عضویت فازی به منظور استانداردسازی معیارها در دامنه بین صفر تا یک استفاده شده است؛ همچنین در مرحله وزن‌دهی، برای وزن‌دهی معیارها در این مطالعه از روش کرتیک استفاده شده است. در این روش، وزن‌دهی داده‌ها با توجه به میزان تضاد، همبستگی و انحراف معیار میان معیارها ارزیابی می‌شود (Diakoulaki et al., 1995: 766). پس از محاسبه انحراف معیار مربوط به هریک از عوامل، ماتریس مقارنی از ضرایب همبستگی معیارها در ابعاد $m \times m$ و سپس تضاد موجود بین معیارها محاسبه می‌شود. روش‌های وزن‌دهی مبتنی بر مقایسه زوجی مانند AHP و ANP با مشکل استقلال صفات از یکدیگر در شرایط تحقق نیافتن همبستگی بین صفات مواجه هستند و استفاده از روش کرتیک گامی در جهت حل این معضل است (مددی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۲۹). شکل ۲، روند انجام پژوهش را به صورت کلی نمایش می‌دهد.



شکل ۲. فلوچارت مراحل پژوهش (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 2. Flowchart of research stages

تکنیک ماباک (MABAC)

۱. تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: نخستین گام در این روش، تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است.
۲. تشکیل ماتریس تصمیم: دومین گام، تشکیل ماتریس تصمیم است. ماتریس تصمیم در این روش به صورت

معیار- گزینه است؛ یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مسئله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز درواقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است (رابطه ۱).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱}$$

۳. نرمال‌سازی ماتریس تصمیم: در این گام باید ماتریس تصمیم مرحله دوم را نرمال کرد. در این مطالعه ارزش‌گذاری و نرمال‌سازی با استفاده از تابع عضویت فازی انجام شد. درایه‌های ماتریس تصمیم با x_{ij} و درایه‌های ماتریس تصمیم نرمال با n_{ij} نمایش داده می‌شود (رابطه ۲).

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۲}$$

۴. وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این گام با استفاده از رابطه زیر، ماتریس نرمال را وزن‌دار می‌کنیم. در رابطه ۳، W وزن معیارهاست (باید از روش‌های دیگر نظیر CRITIC، AHP و ANP به دست آید که در آن عناصر ماتریس نرمال شده (N) را نشان می‌دهد؛ W_i ضرایب وزنی معیار را نشان می‌دهد.

$$V_{ij} = W_j * (n_{ij} + 1) \quad \text{رابطه ۳}$$

۵. تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس (g): در رابطه ۴، v_{ij} عناصر ماتریس وزنی (V) و m تعداد کل گزینه‌های جایگزین را نشان می‌دهد؛ پس از محاسبه مقدار g_i ، ماتریس محدوده‌های تقریبی مرزی با توجه به معیارهای G با فرمت $N \times 1$ شکل می‌گیرد و n تعداد کل معیارهایی را نشان می‌دهد که گزینه‌های ارائه شده برای آنها انتخاب می‌شود.

$$g_i = (\prod_{j=1}^m v_{ij})^{1/m} \quad \text{رابطه ۴}$$

بنابراین اگر n معیار داشته باشید، یک ماتریس $G1 \times n$ به صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۵):

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_n] \quad \text{رابطه ۵}$$

۶. محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از رابطه ۶، فاصله گزینه‌ها تا ناحیه g به دست می‌آید؛ درواقع باید ماتریس وزن‌دار را از ماتریس g کم کرد.

$$Q = V - G \quad \text{رابطه ۶}$$

پس از مشخص شدن ماتریس Q ، با استفاده از حد بالای مساحت ($G+$) و حد پایین مساحت ($G-$) وضعیت هر گزینه مشخص می‌شود؛ بر این اساس گزینه A_i به اجتماع مجموعه یادشده متعلق است. حد بالای مساحت ($G+$)، ناحیه‌ای است که گزینه ایدئال مثبت در آن قرار دارد و حد پایین مساحت ($G-$)، ناحیه‌ای است که گزینه ضد ایدئال در آن قرار دارد. میزان تعلق گزینه A_i به اجتماع بالا براساس رابطه ۷ به دست می‌آید. برای انتخاب گزینه A_i به مثابه بهترین فرم از مجموعه، لازم است حداکثر معیارهای ممکن به منطقه تقریبی فوقانی ($G+$) تعلق داشته باشد. مقدار بیشتر $q_i \in G+$ نشان می‌دهد گزینه جایگزین به گزینه جایگزین ایدئال نزدیک‌تر است؛ در حالی که مقدار کمتر $q_i \in G-$ نشان می‌دهد گزینه جایگزین به گزینه ضد ایدئال نزدیک‌تر است.

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۷}$$

۷. انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک (MABAC)، با استفاده از رابطه ۸، امتیاز نهایی هر گزینه مشخص و براساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شود.

$$S_i = \sum(q_{ij}); i = 1.2 \dots n; j = 1.2 \dots m \quad \text{رابطه ۸}$$

محاسبه مقادیر توابع معیار با گزینه‌ها به مثابه مجموع فاصله‌های جایگزین از مناطق تقریبی مرزی q_i به دست می‌آید. با جمع کردن عناصر ماتریس Q در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها به دست می‌آید. در این رابطه، n تعداد معیارها را نشان می‌دهد و m تعداد گزینه است (Alinezhad and Khalili, 2019: 193- 198).

تکنیک کوداس (CODAS)

۱. تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: نخستین گام در این روش، تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است.
۲. دومین گام در این روش، تشکیل ماتریس تصمیم است. در ماتریس تصمیم‌گیری روش کوداس نیز ستون‌ها شامل معیارها و سطرها شامل گزینه‌های پژوهش هستند. حالت کلی ماتریس تصمیم به صورت رابطه ۹ است.

$$x = [x_{IJ}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۹}$$

۳. سومین گام، استانداردسازی ماتریس تصمیم است. در این مطالعه، استانداردسازی و ارزش‌گذاری به صورت توأم با استفاده از روش فازی انجام شده است.

۴. چهارمین گام روش CODAS، تشکیل ماتریس نرمال وزن‌دار است؛ یعنی باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کرد. این وزن با روش‌هایی از جمله آنتروپی شانون، ANP، AHP و CRITIC به دست می‌آید.
۵. در این گام باید فواصل اقلیدسی (Euclidean distance) و تاکسی (Taxicab distances) از ایدئال منفی را محاسبه کرد. این فواصل از روابط ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آیند. در این روابط، ns_j ایدئال منفی معیارهاست.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad \text{رابطه ۱۱}$$

۶. در این گام باید ماتریس ارزیابی نسبی را با استفاده از رابطه ۱۲ ایجاد کرد. در این رابطه Ψ نشان‌دهنده یک تابع آستانه برای تشخیص برابری فاصله اقلیدسی دو گزینه است.

$$h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

۷. در این گام با جمع مقادیر h_{ik} گزینه‌ها، می‌توان آنها را رتبه‌بندی کرد؛ هرچه مقدار H_i بزرگ‌تر باشد، گزینه رتبه بهتری دارد (Mathew and Sahu, 2018: 140- 141).

ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش

منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)، از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی است (محمدی و پورقاسمی، ۱۳۹۶: ۱۶۳؛ محمدنیا و همکاران، ۱۳۹۷: ۴۲). منحنی ROC، نموداری است که در آن روی محور افقی، پیکسل‌هایی ترسیم می‌شود که وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش را با مدل به‌درستی پیش‌بینی کرده‌اند (مثبت درست)^۱ و روی محور عمودی نسبت پیکسل‌هایی ترسیم می‌شود که نادرست پیش‌بینی شده‌اند (مثبت غلط)^۲. درحقیقت منحنی ROC، یک نمایش تصویری از موازنه بین میزان خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از نقاط برش (همان مقادیر مربوط به رده‌های خطر) است. مساحت زیر این منحنی AUC نام دارد و مدلی با بیشترین مقدار AUC، عملکرد نسبی بهتری دارد (Pontius and Schneider, 2001: 241).

معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش شهرستان کوثر

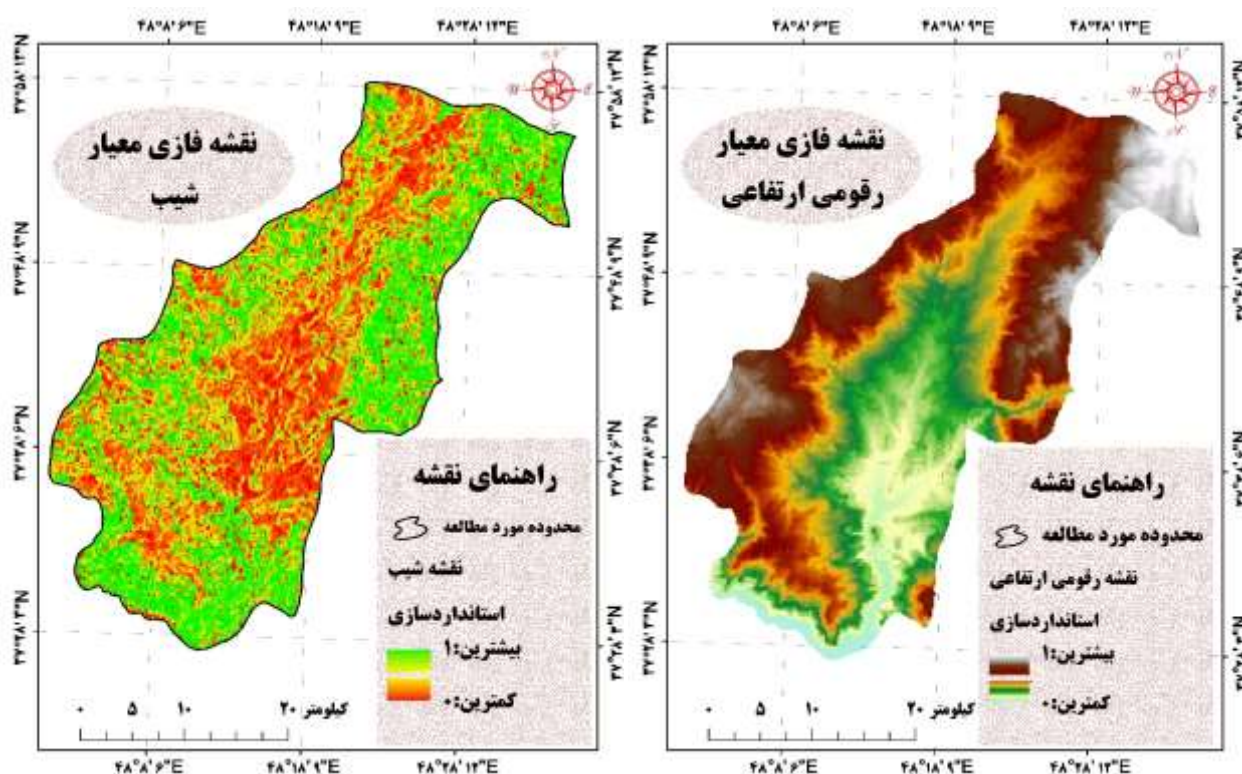
شناخت عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و پهنه‌بندی آن در مناطق مختلف بسیار ضروری است. در این پژوهش عوامل فاصله از راه ارتباطی، فاصله از آبراهه، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، بارش، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، خاک و لیتولوژی به‌مثابه عوامل مؤثر در منطقه شناسایی شد؛ سپس با استفاده از توابع عضویت فازی به‌صورت نقشه‌های فازی درآمد.

ارتفاع: تغییرات ارتفاعی هر منطقه، عامل مؤثر در ایجاد حرکات توده‌ای محسوب می‌شود (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳: ۸۹). تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه بر میزان پوشش گیاهی، تغییرات دمایی، هوازدگی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار خواهد بود (Kadavi et al., 2018: 12). هرچه ارتفاع از سطح دریا بیشتر شود، حساسیت به زمین‌لغزش نیز بیشتر می‌شود (محمدی و پورقاسمی، ۱۳۹۶: ۱۶۵). ارتفاع متوسط در شهرستان کوثر حدود ۲۳۰۰ متر است و بیشتر نقاط ارتفاعی آن در قسمت شمال شرق و جنوب غرب قرار گرفته‌اند. در مطالعه حاضر به ترتیب ارتفاع ۸۶۵ و ۳۱۳۵ متر، کمترین و بیشترین ارزش فازی را دریافت کردند (شکل ۳).

شیب: شیب عمدتاً توزیع فضایی و شدت زمین‌لغزش را تعیین می‌کند (Shafique et al., 2016: 69). شیب از شاخص‌های توپوگرافیک مهم است و در اصل پایه و اساس حرکات دامنه‌ای محسوب می‌شود (Chen et al., 2018: 1010). وجود شیب، تشدیدکننده دیگر عوامل طرح در زمین‌لغزش است. اگر در دامنه‌ای همه شرایط یکسان باشد، افزایش شیب به افزایش حساسیت در برابر رانش زمین منجر می‌شود (Dai and Lee, 2002: 382; Kerekes et al., 2018: 284). با توجه به مقدار شیب موجود در منطقه (۰-۵۵ درصد)، ارزش‌گذاری بر مبنای درجه عضویت فازی در حد فاصل بین ۰-۱ طیف‌بندی شده است (شکل ۴). هرچه به عدد ۱ نزدیک می‌شویم، درجه تناسب برپایه عمل شیب به‌منظور وقوع لغزش افزایش می‌یابد. درمقابل هرچه شیب از مقدار بحرانی کمتر یا بیشتر می‌شود، دامنه ارزش هم کاسته می‌شود.

1. Specificity

2. Sensitivity



شکل ۳. نقشه استاندارد شده معیار طبقات ارتفاعی

شکل ۴. نقشه استاندارد شده معیار شیب

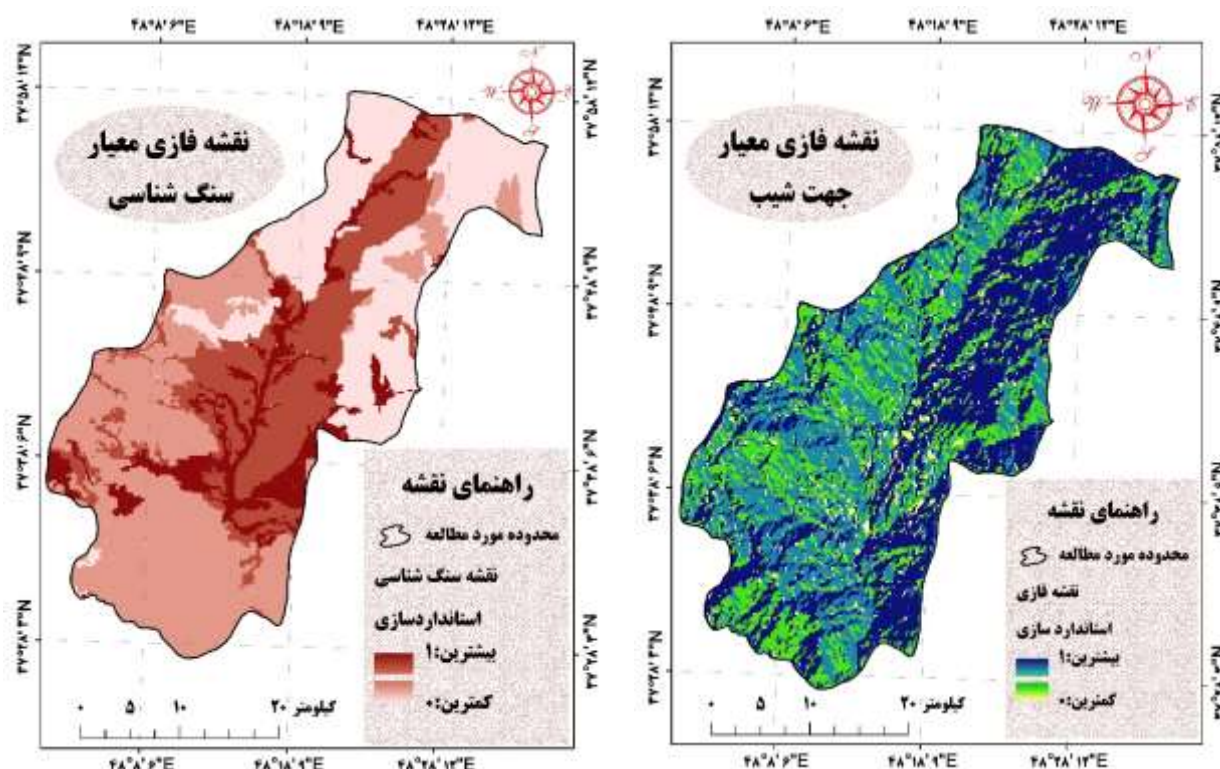
(نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 3. Standardized map of elevation class criteria

Figure 4. Standardized map of slope criterion (Authors, 2020)

جهت شیب: جهت شیب در مقدار درجه حرارت، میزان رطوبت، نوع و تراکم پوشش گیاهی و در نهایت در نوع و مقدار هوازدگی نقش بسیار زیادی دارد. در حالت کلی دامنه‌های شمالی به دلیل برخورداری از رطوبت بیشتر، ماندگاری زیاد و طولانی مدت برف و تبخیر کمتر (به دلیل پشت به آفتاب بودن دامنه) برای لغزش بسیار مستعد است (مددی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۳۱)؛ بنابراین دامنه‌های شمالی و غربی به ترتیب بیشترین ارزش فازی را دریافت کردند (شکل ۵).

لیتولوژی: نوع سازند زمین‌شناسی هر ناحیه نقش مهمی در گسترش پهنه‌های لغزشی دارد. ویژگی‌های لیتولوژیک به صورت گسترده‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی همچون استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسطحی و احتمال وقوع زمین لغزش تأثیر می‌گذارد. لیتولوژی به همراه شیب، ماهیت و شدت زمین لغزش را تعیین می‌کند (Khan et al., 2019: 20). سطح شهرستان کوثر از واحدهای متعدد آتشفشانی و نیز رسوبی تشکیل شده است؛ از جمله این واحدها گدازه‌های آندزیتی و داسیتی، تراکی آندزیت، بازالت و ایگنمبریت و توف به همراه سنگ‌های رسوبی تراورتن، پادگانه‌های آبرفتی جوان و قدیمی و مستعد فرسایش است و هریک از این سازندها مقاومت متفاوتی دارند. در مناطقی که سنگ‌ها با مواد آبرفتی و دیگر سازندهای سطحی عموماً مستعد برای ایجاد لغزش پوشیده شده است، ارزشی زیاد را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶. نقشه استاندارد شده معیار لیتولوژی

شکل ۵. نقشه استاندارد شده معیار جهت شیب

(نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 5. Standardized map of aspect criterion

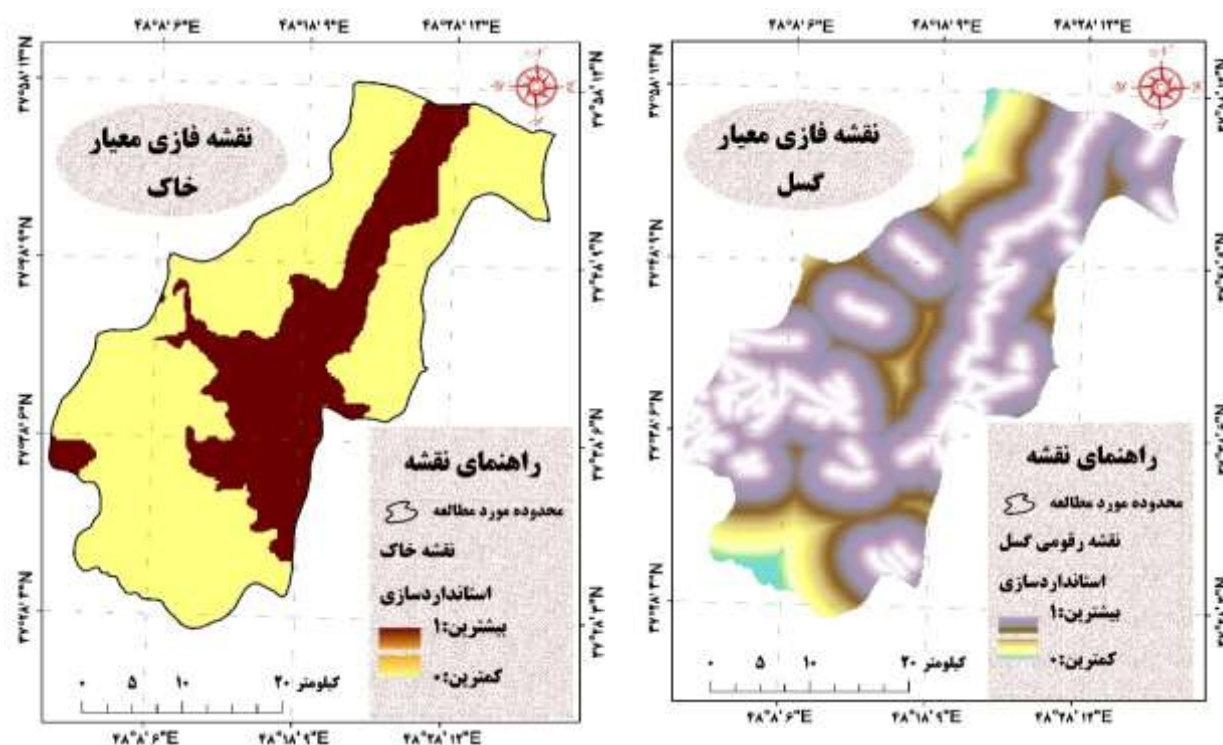
Figure 6. Standardized map of Lithology criterion (Authors, 2020)

فاصله از گسل: با توجه به اینکه مسیر گسل‌های بالقوه بر نقاط ناپایدار زمین منطبق است و همچنین به دلیل گسیختگی در دامنه‌ها و ایجاد شکستگی در لایه‌ها و خردشدگی توده‌های سنگی، عموماً در مسیر سیستمی از درزها و شکاف‌ها ایجاد و در نتیجه نفوذ آب به داخل زمین موجب کاهش مقاومت برشی دامنه می‌شود (روزبهرانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۵). در مناطقی که پراکندگی خطوط گسل بیشتر از سایر نقاط باشد، می‌توان شاهد تعدد وقوع حرکات توده‌ای به‌ویژه وقوع لغزش‌ها بود (شاهزیدی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۵۲). حرکت گسل نیز به نوعی شروع لغزش در دامنه است؛ بنابراین به‌منظور بررسی نقش گسل در ایجاد زمین‌لغزش‌ها، نقشه فاصله از گسل تهیه می‌شود (خامه‌چیان و همکاران، ۱۳۸۶: ۵۹).

از گسل‌های اصلی منطقه مطالعاتی، گسل فیروزآباد-مجدر است که با طولی بیش از ۵۰ کیلومتر، راستای شمال-شمال خاوری و جنوب-جنوب باختری دارد. این گسل با عبور از محدوده آلتراسیون‌های حاصل از فرسایش شیمیایی آندزیت‌های پورفیری و ایجاد شیب زیاد، باعث وقوع زمین‌لغزش‌هایی در روستای عینال‌آباد شده است. در حد بین روستاهای گرم‌خانه در جنوب حوضه و شهر گیوی در بخش غربی حوضه، یک گسل تراستی بزرگ دیده می‌شود که باعث روراندگی سنگ‌های آهک کرتاسه بالا روی بخش‌های ولکانوئوسن شده است. راستای عمومی این گسل شمال غرب به جنوب شرق است و با روند کلی تکتونیکی منطقه همسوست. گسل مدنظر در نیمه شمالی به چند شاخه فرعی تر تقسیم می‌شود. طول عمومی این گسل حدود ۲۰ کیلومتر است و به نظر می‌رسد در مجموع

شاخه‌ای از گسل فیروزآباد- مجدر باشد که نیمه شمالی آن به چندین شاخه فرعی تقسیم می‌شود (فیض‌الله‌پور و رجبی، ۱۳۹۳: ۱۶۹-۱۷۰). گسل اصلی دیگر منطقه، گسل گیوی است که راستای شمالی- جنوبی و طولی نزدیک به ۱۴۰ کیلومتر دارد و مرز رسوبات مزوزوئیک و سنگ‌های آتشفشانی را در شرق و رسوبات نئوژن را در غرب خود تشکیل داده است. فاصله از گسل در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۱۲۰۰۰ متر است و با افزایش آن دامنه ارزشی اختصاص داده‌شده به این معیار کاهش شد و برعکس (شکل ۷).

خاک: از معیارهای مهم هر منطقه که در ایجاد زمین‌لغزش دخیل است، معیار خاک است. به‌منظور پهنه‌بندی زمین‌لغزش، خاک‌های ریزدانه ارزش زیاد فازی دریافت کردند؛ خاک‌های ریزدانه‌ای که از درصد زیادی رس، مارن و سیلت تشکیل شده‌اند و عمق زیادی دارند و به محض وجود سایر شرایط مانند شیب زیاد و افزایش رطوبت خاک در اثر بارش‌های فصلی یا ذوب برف‌ها با هم خوردن حالت کلوئیدی و چسبندگی خاک از توده اصلی جدا می‌شوند و به سمت پایین دامنه‌ها حرکت می‌کنند (شکل ۸).



شکل ۷. نقشه استاندارد شده معیار فاصله از گسل

شکل ۸. نقشه استاندارد شده معیار خاک

(نویسندگان، ۱۳۹۹)

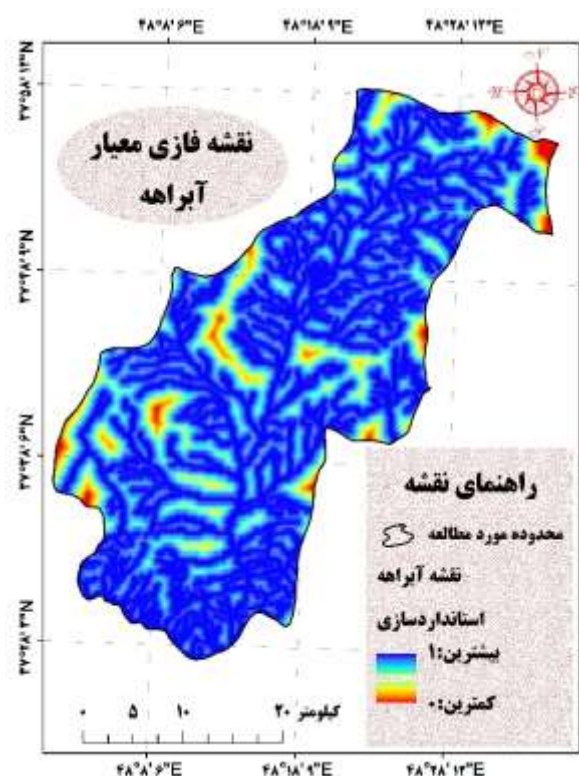
Figure 7. Standardized map of Distance from fault criterion

Figure 8. Standardized map of soil criterion (Authors, 2020)

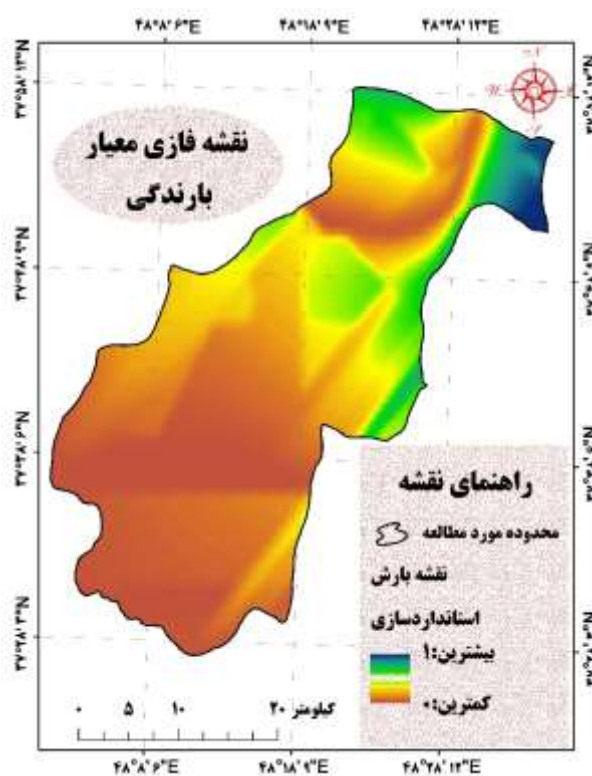
بارندگی: بارش با تأثیر بر فشار آب منفذی و سطح آب زیرزمینی، افزایش بار دامنه و زیرشویی و از بین بردن تکیه‌گاههای جانبی به‌مثابه یک عامل محرک در وقوع زمین‌لغزش عمل می‌کند (کورکی‌نژاد، ۱۳۸۳: ۲۸؛ Davis and Blesius, 2015: 4287). به‌طور کلی پس از بارندگی‌های سنگین یا ذوب برف‌ها به‌ویژه در فصل بهار، بیشترین ناپایداری‌ها و گسیختگی دامنه‌ای شکل می‌گیرد (شادفر و یمانی، ۱۳۸۶: ۱۷).

در شهرستان کوثر میانگین بارش سالیانه حدود ۳۵۰ میلی‌متر است و بیشترین مقدار بارش به ماه‌های اردیبهشت و فروردین مربوط است. با توجه به نقش بارش به‌ویژه بارش‌های بهاری در افزایش تنش برشی و شکل‌گیری لغزش، مناطق با بارش زیاد (بیش از ۵۰۰ میلی‌متر) که عمدتاً در نواحی کوهستانی و مرتفع گسترده شده‌اند، ارزش زیاد و مناطق با بارش کم، ارزش کم دریافت کردند (شکل ۹).

فاصله از شبکه آبراهه: آب‌های بر سطح دامنه (رواناب‌ها) و آب‌هایی که در بین مواد نفوذ می‌کنند، از عوامل تحریک‌کننده مواد دامنه‌ای هستند. رودخانه‌ها با نفوذ آب و برش در نتیجه فرسایش و اشباع دامنه‌ها، نقشی منفی در پایداری یک دامنه بازی می‌کنند (Gorum et al., 2011: 158)؛ به بیان دیگر هرجایی که شیب دامنه‌ها افزایش زیادی داشته و جنس سازنده‌ها نیز مناسب باشد، آبراهه‌ها با زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها در ایجاد لغزش نقش بسیار مهمی دارند. رودخانه‌های شویرچای، سنگورچای، گیوی‌چای، نیلق‌چای و لیکوان‌چای از رودخانه‌های دائمی و پرآب شهرستان هستند. شعبه‌های رودخانه‌ها به‌راحتی مواد سطحی و خاک را می‌شویند و با خود حمل می‌کنند. با شسته‌شدن این مواد، محل اتصال دامنه به دره به‌صورت پرتشیب درمی‌آید و گاهی زمین‌لغزش‌هایی را ایجاد می‌کند و این امر بیشتر در دامنه‌های شمالی دیده می‌شود. فاصله از رودخانه در شهرستان مدنظر بین صفر تا ۴۰۰۰ متر است. در نقشه استاندارد شده فاصله از آبراهه (شکل ۱۰)، نواحی منطبق بر فواصل نزدیک به شبکه آبراهه، با دامنه ارزشی زیاد نمایش داده شده‌اند و برعکس.



شکل ۱۰. نقشه استاندارد شده معیار فاصله از آبراهه



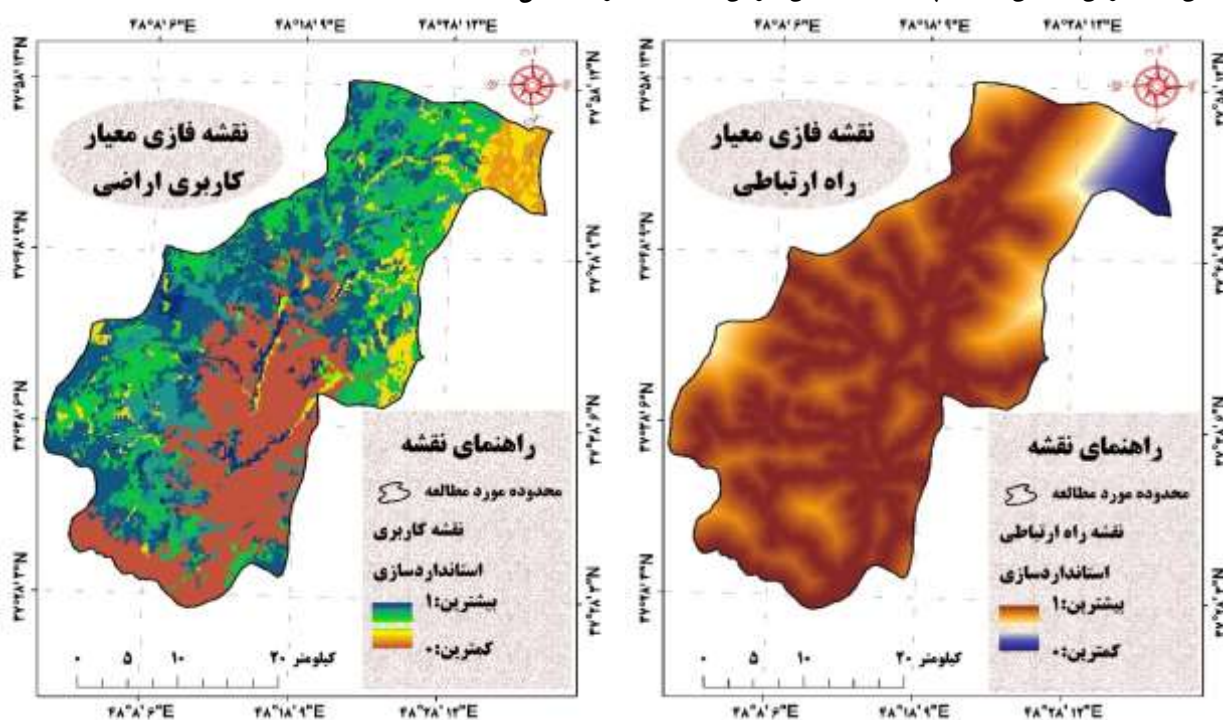
شکل ۹. نقشه استاندارد شده معیار بارش

(نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 9. Standardized map of rainfall criterion

Figure 10. Standardized map of distance from the river criterion (Authors, 2020)

فاصله از جاده: جاده‌ها وضعیت طبیعی دامنه را بر هم می‌زنند و موجب به وجود آمدن بریدگی‌های عمودی در دامنه می‌شوند. این موضوع به افزایش فشار بر بخش پایین جاده و افزایش زمین‌لغزش در اطراف جاده می‌انجامد (محمدی و پورقاسمی، ۱۳۹۶: ۱۶۴). در حالت کلی بررسی عامل فاصله از جاده به دلیل زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها در مطالعه وقوع حرکات دامنه‌ای نقش بسیار مهمی دارد و با ایجاد ترانشه برای احداث راه ارتباطی و از بین رفتن پایه دامنه‌ها ناپایداری شکل می‌گیرد (Gomez and Kavzoglu, 2005: 12). در محدوده مطالعاتی فاصله از جاده در حد فاصل صفر تا ۱۳۵۰۰ متر است و فواصل نزدیک به جاده ارزشی زیاد (ارزش ۱) دریافت کردند و برعکس (شکل ۱۱). معیار کاربری اراضی: به‌طور مسلم نوع کاربری اراضی همیشه نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات محیطی به‌ویژه ایجاد و تشدید حرکات دامنه‌ای دارد. استفاده از زمین به‌صورت غیرمستقیم بر ثبات شیب تأثیرگذار است. فعالیت‌هایی مانند خاک‌برداری و پرکردن یا در کل فعالیت‌های انسانی در اطراف تپه‌ها سبب افزایش فشار روی ناپایداری شیب دامنه‌ها می‌شود. انواع کاربری‌ها در شهرستان کوثر به‌صورت زراعت دیم با مساحت ۲۳/۵۱ کیلومترمربع، زراعت آبی با مساحت ۱۳/۶۹ کیلومترمربع، مراتع ضعیف با مساحت ۳۳۵/۰۷ کیلومترمربع، مراتع متوسط با مساحت ۱۴۸/۸۶ کیلومترمربع، مراتع خوب با مساحت ۲۹۹/۴۷ کیلومترمربع، باغ‌ها با مساحت ۹۵/۴۸ کیلومترمربع، مناطق کوهستانی با مساحت ۲۶/۹۷ کیلومترمربع، مناطق انسان‌ساخت با مساحت ۶/۹۲ کیلومترمربع، اراضی صاف و مسطح با مساحت ۳۲۹/۸۱ کیلومترمربع و مناطق آبی با مساحت ۲/۲۷ کیلومترمربع است. کاربری زراعی (دیم و آبی) با توجه به رعایت‌نشدن تناوب زراعی، کشت در اراضی شیب‌دار و افزایش رطوبت خاک با آبیاری و نفوذ دادن آب بیشتر به زمین، بیشترین ارزش را در پهنه‌بندی زمین‌لغزش دریافت کرد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱. نقشه استاندارد شده معیار راه ارتباطی شکل ۱۲. نقشه استاندارد شده معیار کاربری اراضی

(نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 11. Standardized map of distance from the road criterion

Figure 12. Standardized map of land use criterion (Authors, 2020)

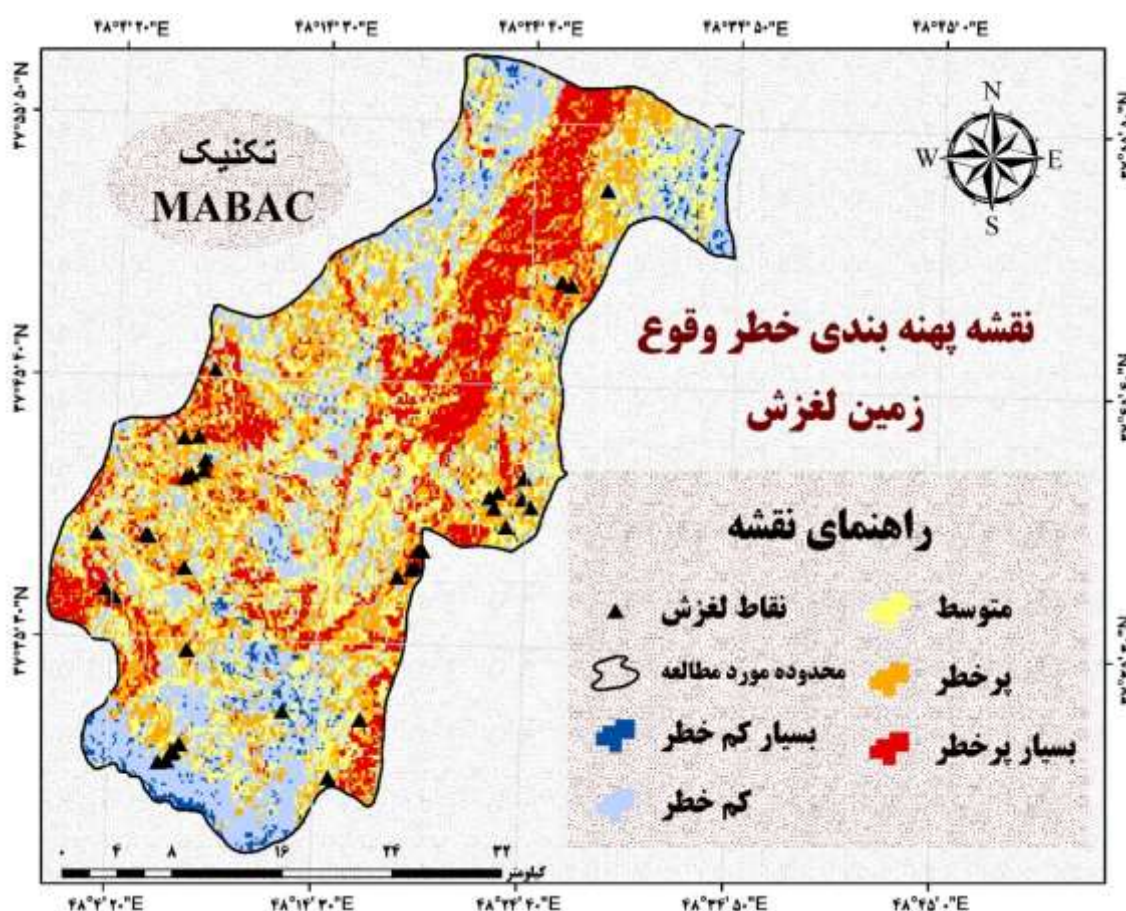
یافته‌های پژوهش

پس از استخراج نقشه‌های هریک از معیارها و اعمال وزن‌های حاصل از روش کرتیک (جدول ۱) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک‌های بررسی‌شده، نقشه نهایی پهنه‌بندی لغزش در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر به دست آمد (شکل ۱۳ و ۱۴).

جدول ۱. محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کرتیک (نویسندگان، ۱۳۹۹)

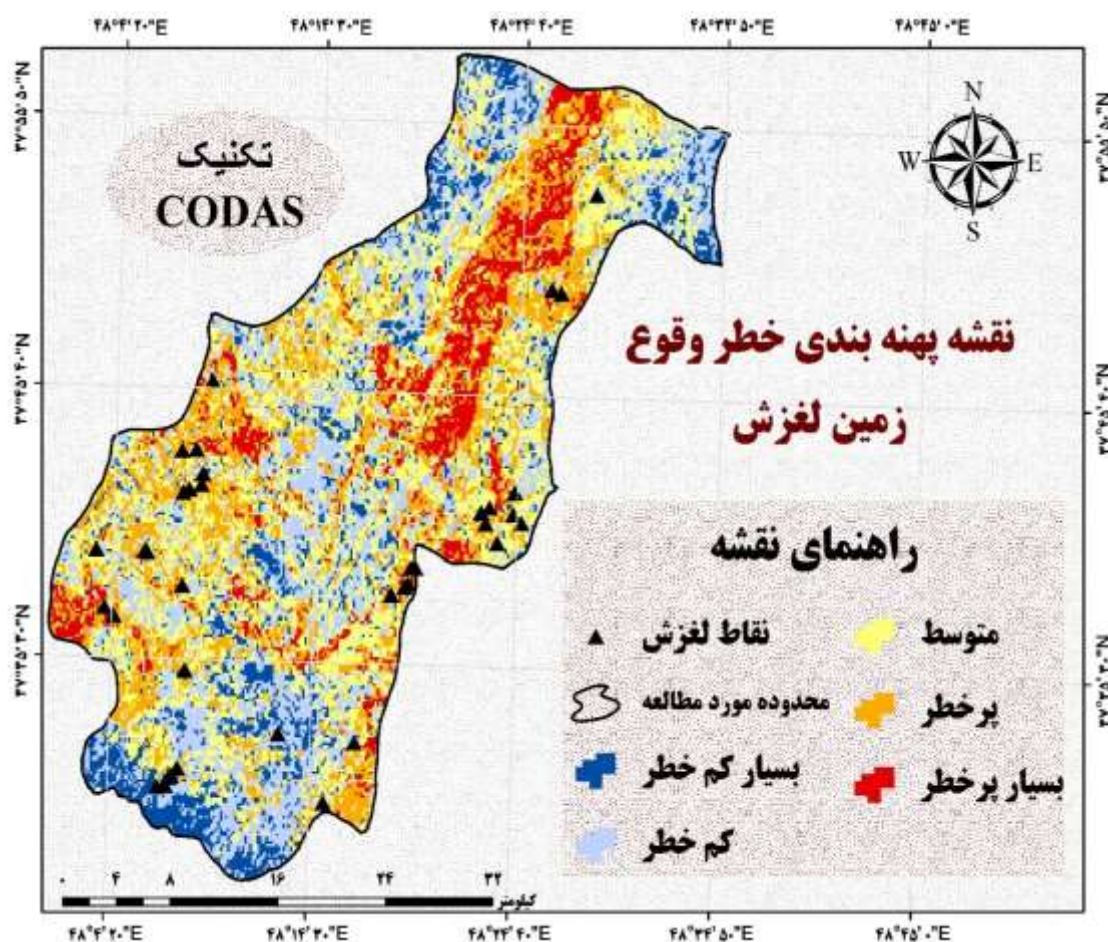
Table 1. Calculation of final weight of criteria using Critic method (Authors, 2020)

معیار	کاربری	خاک	گسل	لیتولوژی	بارش	راه	رودخانه	ارتفاع	جهت شیب	شیب
مجموع تضاد	۸/۸۱	۸/۹۹	۸/۴۸	۹/۳۳	۹/۳۰	۹/۸۱	۹/۲۳	۹/۴۱	۸/۶۱	۹/۳۶
انحراف معیار	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۱	۰/۱۶	۰/۲۶	۰/۳۵
میزان اطلاعات	۳/۱۲	۳/۰۷	۱/۵۸	۲/۶۵	۰/۸۷	۱/۵۶	۱	۱/۵۵	۲/۳۰	۳/۳۴
وزن نهایی	۰/۱۴۸	۰/۱۴۵	۰/۰۷۵	۰/۱۲۵	۰/۰۴۱	۰/۰۷۴	۰/۰۴۷	۰/۰۷۳	۰/۱۰۹	۰/۱۵۸



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (MABAC)؛ (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 13. Landslide Hazard Zoning Map (MABAC); (Authors, 2020)



شکل ۱۴. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (CODAS)؛ (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 14. Landslide Hazard Zoning Map (CODAS); (Authors, 2020)

براساس پهنه‌بندی صورت‌گرفته با استفاده از روش MABAC، ۲۱۱/۹۹ و ۲۹۸/۸۵ کیلومترمربع از مساحت منطقه به ترتیب در کلاس‌های بسیار پرخطر و پرخطر قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از به‌کارگیری روش CODAS، ۱۰۶/۹۰ و ۲۲۶/۰۲ کیلومترمربع از مساحت منطقه به ترتیب در کلاس بسیار پرخطر و پرخطر است (جدول ۲).

جدول ۲. مساحت کلاس‌های طبقه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک CODAS و MABAC

(نویسندگان، ۱۳۹۹)

Table 2. Area of landslide risk classification using CODAS and MABAC techniques (Authors, 2020)

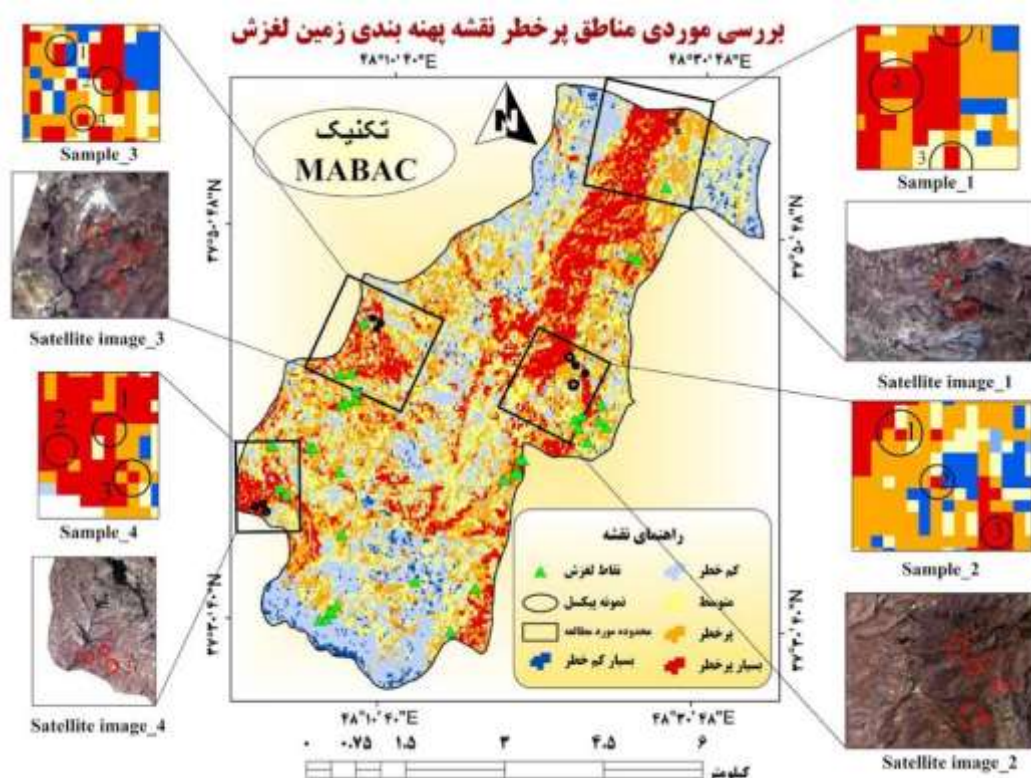
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	CODAS
						مساحت (KM ²)
						درصد %
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	MABAC
						مساحت (KM ²)
						درصد %
۱۳۰/۳۷	۳۲۴/۷۸	۳۵۵/۲۳	۲۶۶/۰۲	۱۰۶/۹۰		
۱۱/۰۱	۲۷/۳۰	۳۰/۱۲	۲۲/۱۸	۹/۰۷		
۲۸/۲۲	۳۴۸/۷۱	۲۹۷/۰۹	۲۹۸/۸۵	۲۱۱/۹۹		
۲/۳۹	۲۹/۴۳	۲۵/۰۷	۲۵/۲۲	۱۷/۸۹		

به منظور اعتبارسنجی و مستندکردن نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش با استفاده از روش‌های CODAS و MABAC در این قسمت سعی شده است پیکسل‌های بسیار پرخطر مورد به مورد به لحاظ تمامی معیارهای مطالعه شده بررسی شود (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). به طور قطع انطباق نقاط پرخطر با ارزش‌های واقعی ثبت شده از معیارها که با توجه به نقشه‌های رقومی به دست آمده است، به درک ملموس‌تر نتیجه حاصل کمک زیادی می‌کند. بررسی نقاط بسیار پرخطر نشان داد این مناطق به طور عمده در خروجی هر دو مدل در شیب ۲۰ تا ۳۵ درصد قرار دارند و در این مقدار شیب، مواد سطحی و اصولاً ریزدانه که مستعد لغزش‌اند، با جذب آب و افزایش رطوبت به حد سیلانی می‌رسند و با افزایش تنش‌های برشی و گسیختگی مواد در دامنه شروع به حرکت می‌کنند؛ همچنین مناطق پرخطر در مناطق با بارش (۲۵۰-۳۵۰ میلی‌متر) قرار دارند و لغزش‌های شهرستان در پی بارش‌های سنگین یا به دنبال ذوب برف‌ها در فصل بهار و در سازندهای مستعد (ریزدانه و سست) شکل می‌گیرند؛ نقاط بسیار پرخطر ارائه شده در هر دو مدل نیز به طور عمده در خاک‌های لیتوسول (با ۲/۲۶ درصد رس، ۴۰ درصد سیلت و ۳۳ درصد ماسه، گروه هیدرولوژیک C و D) قرار دارند؛ بدین صورت که خاک‌های ریزدانه که عمق زیادی نیز دارند، براساس آبدیاری افزایش حجم می‌یابند و در همین حال به دلیل زهکش ضعیف مدت‌زمان زیادی مرطوب می‌مانند و در نتیجه نیروی وزن توده و شیب زیاد زمین از قسمت‌های زیرین جدا می‌شوند و به سمت پایین حرکت می‌کنند؛ به علاوه با توجه به خروجی حاصل از دو روش و بررسی موردی نقاط پرخطر، نقاط دارای پتانسیل خطر بسیار زیاد در هر دو مدل در طبقات ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر قرار گرفته‌اند. در رابطه با عامل جهت شیب، نقاط بسیار پرخطر ارائه شده در مدل CODAS عمدتاً در دامنه‌های شمالی و سپس دامنه‌های غربی، و با توجه به خروجی نهایی مدل MABAC، نقاط دارای احتمال خطر بسیار زیاد در جهات شیب شمالی، غربی، شرقی و جنوب غربی قرار دارند.

بررسی خروجی حاصل از هر دو روش نشان می‌دهد از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی و مراتع بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد را به خود اختصاص داده است. این موضوع با توجه به رعایت نشدن تناوب زراعی، تخریب پوشش گیاهی در اثر تبدیل اراضی مرتعی به زراعی، کشت دیم در اراضی شیب‌دار (از جمله کشت غلات به صورت دیم در اراضی شیب‌دار و به ویژه کشت روی شیب‌های بالای ۲۰ درصد) و افزایش رطوبت خاک با آبیاری و نفوذ دادن آب بیشتر به زمین پذیرفته است؛ به علاوه مردم محلی با چرای بیش از حد دام‌های خود در مراتع باعث نابودی پوشش گیاهی می‌شوند و به روند رخداد زمین لغزش پس از وقوع بارش‌های سیل آسا سرعت می‌بخشند. عبور دادن دکل‌های فشار قوی برق، لوله‌کشی گاز و آب، افزایش تعداد دام و استفاده بیش از ظرفیت مراتع و عبور دادن آبراهه از روی دامنه برای آبیاری اراضی کشاورزی و باغ‌ها، از جمله دیگر فعالیت‌های انسانی در اراضی اطراف مناطق شهری و روستایی در منطقه است.

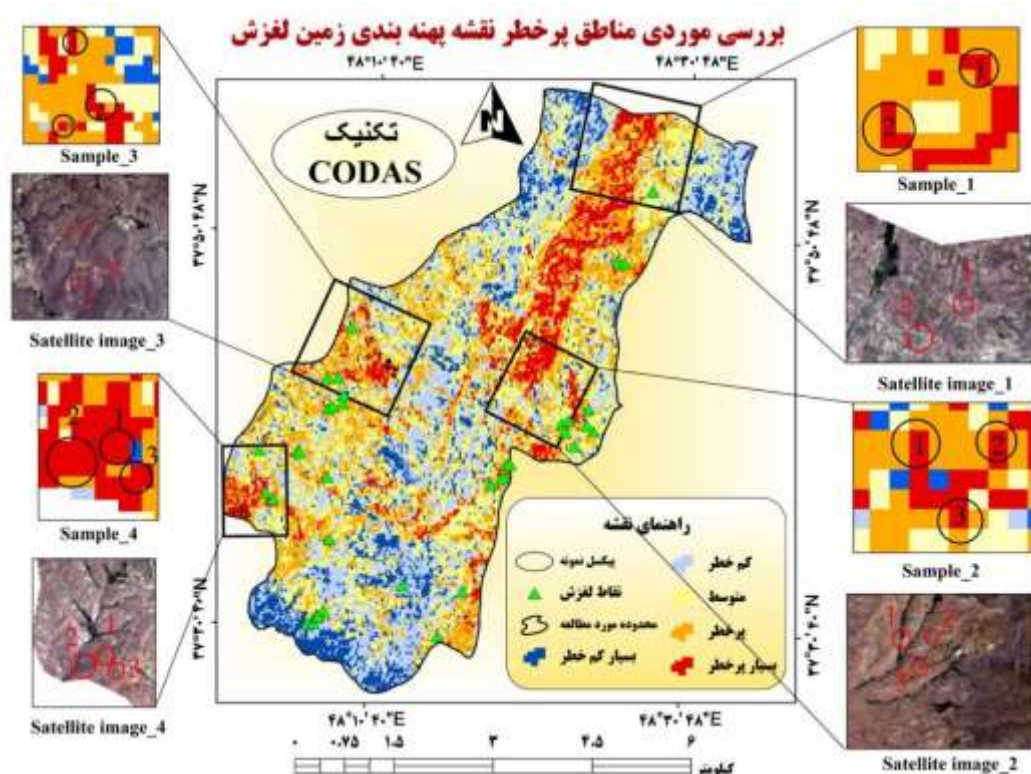
بررسی عامل لیتولوژی نیز نشان می‌دهد سازندهای نامقاوم که عمدتاً سازندهای سست کواترنری هستند (Qt2): پادگانه آبرفتی جدید، Qal: رسوبات رودخانه‌ای جدید، Ngm.s: تناوب مارن خاکستری و قرمز ریزس‌دار با ماسه سنگ و کنگلومرا، Oms: میکروکنگلومرا، ماسه سنگ و مارن)، حساسیت زیادی به وقوع لغزش دارند و بزرگ‌ترین لغزش‌های منطقه روی مارن‌هایی رخ داده‌اند که بر کنگلومراها قرار گرفته‌اند؛ به علاوه بخش وسیعی از محدوده از

سنگ‌های آندزیت پرفیری و مگاپورفیری ائوسن تشکیل شده و هوازدگی فلدسپات‌های موجود در این سنگ‌ها و تشکیل کانی‌های رسی، زمینه وقوع زمین‌لغزش‌های بزرگ و کوچکی را روی دامنه‌های شیب‌دار به وجود آورده است. همچنین اراضی پرخطر معرفی شده حاصل از روش پژوهش نشان می‌دهد اراضی بسیار پرخطر در نقشه نهایی هر دو مدل به‌طور نسبی در فواصل نزدیک جاده، رودخانه و به‌ویژه گسل قرار دارند. در این زمینه می‌توان گفت عامل جاده به دلیل زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها در ایجاد حرکات لغزشی نقش بسیار مهمی دارد. به دلیل اینکه بخشی از فعالیت‌های جاده‌سازی در سطح شهرستان (به‌ویژه جاده‌های روستایی) غیراصولی و بدون توجه به اصول مهندسی است، احداث راه‌ها از یک سو به دلیل ایجاد ترانشه و تغییر وزن ناشی از خاک‌برداری و خاک‌ریزی، زیربری دامنه و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها به ایجاد زمین‌لغزش در منطقه منجر می‌شود؛ از سوی دیگر احداث جاده با از بین بردن پوشش مرتعی در دامنه‌های پرشیب باعث می‌شود هنگام بارش بهاری و ذوب برف زمینه برای زمین‌لغزش ایجاد شود. از جمله لغزش‌های جاده‌ای در منطقه، لغزش‌های مکرر در جاده اردبیل-خلخال طی سال‌های اخیر است. رودخانه‌ها (به‌ویژه رودخانه‌های دائمی و پرآب گیوی‌چای، نیلق‌چای، لیکوان‌چای و سنگورچای) با زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه مواد دامنه‌ای در ایجاد زمین‌لغزش اهمیت دارند و همچنین گسل‌ها (به‌ویژه گسل‌های اصلی فیروزآباد-مجدر و گیوی) به گسیختگی در دامنه‌ها و ایجاد شکستگی در لایه‌ها و خردشدگی توده‌های سنگی و در نتیجه نفوذ آب به داخل زمین و کاهش مقاومت برشی دامنه منجر می‌شوند.



شکل ۱۵. بررسی موردی مناطق بسیار پرخطر در نقشه نهایی حاصل از مدل MABAC (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 15. A case study of very high risk areas in the final map of the MABAC model (Authors, 2020)



شکل ۱۶. بررسی موردی مناطق بسیار پرخطر در نقشه نهایی حاصل از مدل CODAS (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 16. A case study of very high risk areas in the final map of the CODAS model (Authors, 2020)

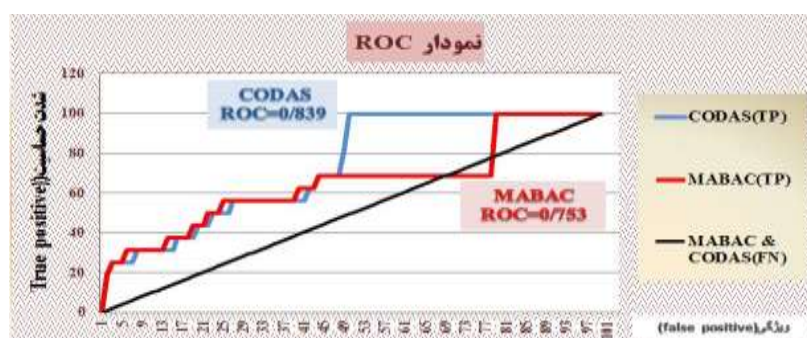
مهم‌ترین چالش موجود در زمینه پهنه‌بندی، چگونگی و دقت روش تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش است و پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ارائه کرده‌اند. نتایج حاصل از هم‌پوشانی، خروجی حاصل از مدل MABAC با پراکنش نقاط لغزشی، نشان داد ۱۶/۶۷ از نقاط پراکنش لغزش‌ها در سطح شهرستان در طبقه بسیار پرخطر و ۳۸/۸۹ از نقاط پراکنش لغزشی در طبقه پرخطر قرار دارند. با توجه به خروجی حاصل از مدل CODAS نیز به ترتیب ۱۱/۱۱ و ۳۸/۸۹ درصد از نقاط لغزشی در دو طبقه بسیار پرخطر و پرخطرند (جدول ۳)؛ به‌علاوه برای مستندسازی بیشتر اعتبار نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش به دست آمده از پژوهش سعی شده است هریک از تکنیک‌های به‌کاررفته با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شود. در منحنی ROC، سطح زیر منحنی با عنوان AUC بیان‌کننده مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و رخ نداده (عدم وقوع زمین‌لغزش) است. نتایج ارزیابی نشان داد مقدار سطح زیر منحنی در مدل MABAC، ۰/۷۵۳ و در مدل CODAS، ۰/۸۳۹ است. با توجه به طبقه‌بندی ارائه‌شده برای سطح زیر منحنی (۰/۹-۱: عالی، ۰/۸-۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط، ۰/۵-۰/۶: ضعیف) (Negnevitsky, 2002: 394; Yesilnacar, 2005: 237)، دقت روش ماباک در طبقه خوب و دقت روش کوداس در طبقه خیلی خوب قرار دارد (شکل ۱۷). این بخش از نتایج مطالعه با نتایج پژوهش‌های افرادی چون موسوی و

همکاران (۱۳۹۵)، مددی و همکاران (۱۳۹۷)، انتظاری و همکاران (۱۳۹۸)، فیضی‌زاده و همکاران^۱ (۲۰۱۴)، تاج‌الدین و همکاران^۲ (۲۰۱۸)، گیگووایس و همکاران^۳ (۲۰۱۹) و وچتک‌ووا و وچتک^۴ (۲۰۲۰) مطابقت دارد؛ بدین صورت که آنها نیز معتقدند برای شناسایی مناطق دارای زمین‌لغزش، روش‌های تحلیل چندمعیاره کارایی زیادی دارند.

جدول ۳. تعداد و درصد نقاط پراکنش لغزشی در هر طبقه خطر (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Table 3. Number and percentage of slip scatter points in each hazard class (Authors, 2020)

مدل MABAC					
بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر	طبقه خطر
۶	۱۴	۹	۶	۱	تعداد
۱۶/۶۷	۳۸/۸۹	۲۵	۱۶/۶۷	۲/۷۷	درصد
مدل CODAS					
بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر	طبقه خطر
۴	۱۴	۱۰	۵	۳	تعداد
۱۱/۱۱	۳۸/۸۹	۲۸/۷۸	۱۳/۸۹	۸/۳۳	درصد



شکل ۱۷. منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 17. Relative performance detection curve and area below the curve related to landslide zoning maps

(Authors, 2020)

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعه حاکی از پتانسیل زیاد شهرستان کوثر از لحاظ رخداد حرکات لغزشی است. عوامل شیب، کاربری اراضی، خاک و لیتولوژی، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی است و مناطق بسیار پرخطر و پرخطر به‌طور عمده در شیب ۲۰ تا ۳۵ درصد، کاربری‌های زراعی و مراتع، خاک لیتوسول با درصد

1. Feizizadeh et al.
2. Tajudin et al.
3. Gigovic et al.
4. Vojtekova and Vojtek

زیاد رس و سیلت و مارن و در سازندهایی با زیربنای سنگ سخت به همراه مواد رسوبی و سست سطحی قرار دارد؛ همچنین براساس نتایج مقایسه مدل‌ها، مدل MABAC پهنه بیشتری از منطقه را در معرض خطر زمین‌لغزش نسبت به مدل CODAS نشان می‌دهد؛ اما با توجه به پژوهش‌های میدانی و استفاده از شاخص عملکرد نسبی (ROC) در شهرستان کوثر، می‌توان نتیجه گرفت در خروجی حاصل از مدل CODAS همبستگی زیادی بین نقشه حساسیت نسبت به لغزش تهیه‌شده و نقشه پراکنش زمین‌لغزش وجود دارد و این مدل نتایج قابل قبول‌تری را ارائه کرده است. با توجه به دقت مناسب مدل CODAS، استفاده از این مدل در شناسایی نقاط پرخطر از لحاظ رخداد زمین‌لغزش به‌ویژه در مناطق کوهستانی پیشنهاد می‌شود.

اراضی بسیار پرخطر و پرخطر، اراضی‌ای هستند که نباید تخریب شوند و کارهای غیراصولی در آنها انجام شود؛ کارهایی از قبیل تخریب پوشش گیاهی بر اثر تبدیل اراضی مرتعی به زراعی و کاهش کمی و کیفی پوشش گیاهی بر اثر چرای بی‌رویه دام‌ها، کشت دیم در اراضی شیب‌دار، رعایت نشدن تناوب زراعی و احداث و دستکاری‌های غیراصولی جاده یا تغییر مسیر جاده؛ بلکه باید اقداماتی مانند تعدیل کاهش شیب دامنه ارتفاعات مشرف به مسیر احداث جاده، کاهش گیاهان مناسب، ایجاد سیستم زهکشی مناسب، حذف سازند ریزدانه و برداشت آن از سطح دامنه انجام شود. انتظار می‌رود این پژوهش و نتایج حاصل از آن، راهگشای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه شود.

منابع

- آشور، حدیثه، (۱۳۹۰). بررسی و تحلیل تناسب و جاذبه‌های شهرک صنعتی آمل در مکان‌گزینی واحدهای صنعتی (صنایع کوچک و متوسط)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری و روستایی، استاد راهنما: غفاری گیلانده، عطا، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی.
- احمدی، حسن، طالبی اسفندرانی، علی، (۱۳۸۰). بررسی عوامل مؤثر در ایجاد حرکات توده‌ای؛ منطقه اردل استان چهارمحال و بختیاری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۵۴، شماره ۴، ۳۲۳-۳۲۹.
- انتظاری، مژگان، خدادادی، فاطمه، ساسان‌پور، فرزانه، (۱۳۹۸). تحلیل و پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژیک (لغزش و سیل) استان البرز با استفاده از مدل‌های AHP-VIKOR و FR، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۱، شماره ۱، ۱۸۳-۱۹۹.
- خامه‌چیان، ماشاءالله، راکعی، بابک، عبدالملکی، پرویز، گیاه‌چی، پانته‌آ، (۱۳۸۶). کاربرد سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش؛ مطالعه موردی: ناحیه سفیدار گله در استان سمنان، مجله علوم دانشگاه تهران، دوره ۳۳، شماره ۳، ۵۷-۶۴.
- روزبهبانی، حبیبه، ایلدرمی، علیرضا، دشتی، مریم، (۱۳۸۹). بررسی عوامل وقوع حرکات توده‌ای با مدل INRF؛ مطالعه موردی: حوضه سد کلان ملایر، همایش کاربرد جغرافیای طبیعی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه آزاد اسلامی خرم‌آباد، لرستان، ۱-۱۰.

- سفیدگری، رضا، غیومیان، جعفر، فیض‌نیا، سادات، (۱۳۸۴). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز دماوند، مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب (صص ۵۷۴-۵۸۰)، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ۱-۷.
- سلمان ماهینی، عبدالرسول، ریاضی، برهان، نعیمی، بابک، بابایی کفکایی، ساسان، جوادی لاریجانی، عظیمه، (۱۳۸۷). ارزیابی توان طبیعت گردی شهرستان بهشهر بر مبنای روش ارزیابی چندمعیاره با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره ۱۱، شماره ۱، ۱۷۸-۱۸۹.
- شادفر، صمد، یمانی، مجتبی، (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز جلیسان با استفاده از مدل LNRF، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۴۰، شماره ۱، ۱۱-۲۳.
- شاه‌زیدی، سمیه، نوجوان، محمدرضا، داوودی، محمود، امین‌الرعیایی، هاجر، (۱۳۹۸). پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و فازی؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، ۱۲-۱۵۹.
- شریعت‌جعفری، محسن، (۱۳۷۵). زمین‌لغزش و مبانی و اصول پایدار شیب‌های طبیعی، چاپ اول، تهران، انتشارات سازه.
- عابدینی، موسی، قاسمیان، بهاره، شیرزادی، عطاءالله، (۱۳۹۳). مدل سازی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک؛ مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۲، شماره ۳۷، ۸۵-۱۰۲.
- فیض‌الله‌پور، مهدی، رجبی، معصومه، (۱۳۹۳). پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه رودخانه گیوی‌چای با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه از نوع پیش‌خور پس‌انتشار (BP)، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۱۲، شماره ۳۶، ۱۶۱-۱۸۰.
- کرم، عبدالمیر، (۱۳۸۳). کاربرد مدل ترکیب خطی وزین (WLC) در پهنه‌بندی زمین‌لغزش؛ مطالعه موردی: منطقه سرخون چهارمحال و بختیاری، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۲، شماره ۴، ۱۳۱-۱۴۶.
- کورکی‌نژاد، مسعود، (۱۳۸۳). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، رشد آموزش زمین‌شناسی، شماره ۳۹، ۲۴-۳۰.
- محمدنیا، ملیحه، امیراحمدی، ابوالقاسم، زندی، رحمان، (۱۳۹۷). استفاده از مدل آنتروپی در ارزیابی مخاطره زمین‌لغزش در مسیر جاده پیشنهادی طبقه- درود (مشهد- نیشابور)، جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۱، شماره ۲، ۳۷-۵۸.
- محمدی، مجید، پورقاسمی، حمیدرضا، (۱۳۹۶). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت آن با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی؛ مطالعه موردی: بخشی از استان گلستان، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، دوره ۸، شماره ۱۵، ۱۶۱-۱۷۰.
- مددی، عقیل، غفاری گیلانده، عطا، پیروزی، الناز، (۱۳۹۴). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ویکور؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق‌لاقان‌چای، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۳، شماره ۴، ۱۲۴-۱۴۱.

مددی، عقیل، پیروزی، الناز، شکرزاده فرد، الهام، (۱۳۹۷). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز آق‌لاقان‌چای با استفاده از مدل ELECTRE، فصلنامه فضای جغرافیایی، جلد ۱۸، شماره ۶۴، ۱۷۷-۱۹۹.

موسوی، معصومه، عابدینی، موسی، اسماعیلی عوری، اباذر، مدنی، فاطمه، (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های فازی چندمعیاره در محیط GIS؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز ایزه-خوزستان، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال ۷، شماره ۱۴، ۷۸-۸۷.

- Alinezhad, A., Khalili, J., (2019). **New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)**, International Series in Operations Research & Management Science, Vol 277, Springer, Cham.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., Shahabi, H., (2018). **Performance evaluation of the gis-based data mining techniques of best-first decision tree**, random forest, and naïve bayes tree for landslide susceptibility modeling, Science of the Total Environment, Vol 644, Pp 1006- 1018.
- Colkesen, I., Sahin, E., Kavzoglu, T., (2016). **Susceptibility mapping of shallow landslides using kernel-based Gaussian process**, support vector machines and logistic regression, Journal of African Earth Sciences, Vol 118, Pp 53- 64.
- Crosta, B.G., (2009). **Dating, triggering, modeling and hazard assessment of large landslides**, Geomorphology, Vol 103, Pp 1- 4.
- Dai, F.C., Lee, C.F., (2002). **Landslide Characteristics and Slope in Stability Modeling using GIS Lantau Island Hong Kong**, Geomorphology, Vol 42, Pp 213- 228.
- Davis, J., Blesius, L., (2015). **A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model**, Entropy, Vol 17, Issue 6, Pp 4271- 4292.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L., (1995). **Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method**, Computers and Operations Research, Vol 22, Issue 7, Pp 763-770.
- Earthexplorer.usgs.gov
- Feizizadeh, B., Shadman Roodposhti, M., Jankowski, P., Blaschke, T., (2014). **A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping**, Comput Geosci, Vol 73, Pp 208-221.
- Gigovic, L., Drobnjak, S., Pamucar, D., (2019). **The Application of the Hybrid GIS Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Best–Worst Methodology for Landslide Susceptibility Mapping**, International journal of Geo-Information, Vol 8, Issue 2, Pp 1- 29.
- Gomez, H., Kavzoglu, T., (2005). **Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin**, Venezuela, Engineering Geology, Graupe, Daniel, Principles of artificial neural network, Vol 78, Pp 11- 27.
- Gorum, T., Fan, X., Van Westen, C., Huang, R., Xu, Q., Tang, C., Wang, G., (2011). **Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake**, Geomorphology, Vol 133, Issues 3- 4, Pp 152- 167.
- Haque, U., Paula, F.d., Silva Graziella, Devoli., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopoi, W., Andersen, P., Luk, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wuo, J.H., (2019). **The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995- 2014)**, Science of The Total Environment, Vol 682, Pp 673- 684.
- Kadavi, P., Lee, C.W., Lee, S., (2018). **Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping**, Remote Sensing, Vol 10, Issue 8, Pp 1- 18.
- Kerekes, A., Poszet, S., Gal, A., (2018). **Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj–Napoca Municipality**, Romania, Revista de geomorfologie, Vol 20, Pp 130- 146.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M., Mian, A., Safeer, U., Shah, Chiara, C., (2019). **Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Volume 22, Issue 1, Pp 11- 24.

- Mathew, M., Sahu, S., (2018). **Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection**, Management Science Letters, Vol 8, Pp 139- 150.
- Negnevitsky, M., (2002). **Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems**, Addison Wesley/Pearson Education, Harlow, England.
- Pontius, R.G., Schneider, L.C., (2001). **Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed**, Massachusetts, USA, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol 85, Issues 1- 3, Pp 239- 248.
- Rossi, M., Guzzetti, F., Salvati, P., Donnini, M., Napolitano, E., Bianchi, C., (2019). **A predictive model of societal landslide risk in Italy**, Earth-Science Reviews, Vol 196, Pp 1- 19.
- Shafique, M., Van der Meijde, M., Khan, M.A., (2016). **A review of the 2005 Kashmir earthquake-induced landslides; from a remote sensing prospective**, J. Asian Earth Sci, Vol 118, Pp 68- 80.
- Sorbi, A., Farrokhnia, A., (2018). **Landslide hazard evaluation and zonation of Karaj-Chaluse road (North of Iran)**, International Journal of Geography and Geology, 7, Issues 2, Pp 35- 44.
- Tajudin, N., Yaacob, N., mohdali, D., Adnan, N., (2018). **Rainfall – landslide potential mapping using remote sensing and GIS at Ulu Kelang, Selangor, Malaysia**, Conference Series Earth and Environmental Science, Vol 169, Pp 1- 8.
- Vertex.daac.asf.alaska.edu
- Vojtekova, J., Vojtek, M., (2020). **Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia**, Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol 11, Issue 1, Pp 131- 148.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.A., Yomraliglu, T., (2011). **A GIS- based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics methods for land slide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey**, Geomorphology, Vol 85, Pp 274- 287.
- Yesilnacar, E.K., (2005). **The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey**, PhD Thesis, Department of Geomatics the University of Melbourne.