



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Landslide hazard mapping in Bukan - Sardasht road using the weight of evidence and evidential belief function models

Golan Memari¹ | Himan Shahabi^{2*} | Jalal Zandi³

1. Department of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran. Email: golanmemari67@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran. Email: h.shahabi@uok.ac.ir

3. Expert of the General Department of Natural Resources and Watershed Management of Kurdistan Province, Iran. Email: jalal.zandi2010@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received 02 August 2023

Revised 11 September 2023

Accepted 13 September 2023

Published 16 September 2023

Keywords:

Landslide hazard mapping, Advanced data mining algorithm, Weight of Evidence (WOE), Evidential Belief Function (EBF), Bukan– Sardasht Road.

ABSTRACT

The aim of this study is landslides mapping along the Bukan-Sardasht mountain communication road of West Azerbaijan province, using the data mining methods of Weight of Evidence (WOE) and Evidential Belief Function (EBF) using geographic information system (GIS) and Remote sensing technique was done. Twelve influential factors in the occurrence of landslides including layers: lithology, slope degree, slope direction, NDVI index, distance from rivers, the shape of the normal curvature of the range, shape of the transverse curvature of the range, shape of the longitudinal curvature of the range, distance to fault, distance to road, rainfall and elevation have been identified as effective factors in the occurrence of landslides in the study area and were used to prepare the landslide sensitivity map of the study area. The spatial coordinates of 109 landslide points in the studied city were recorded. About 30% of the recorded landslides (32 landslide points) were isolated as test landslides completely randomly and the remaining 77 landslide points were included in the analysis as training landslides. In the WOE and EBF methods, information value values and weights assigned to each of the factors were made using statistical calculations in Excell software, and after algebraic summing of all layers with the help of raster calculations; a Landslide susceptibility map was prepared. The prediction accuracy of the different models used in this study was measured using the ROC curve. The area under the ROC curve in the EBF method was equal to 0.910 and obtained the highest value. The weighted evidence method with the value of the area under the ROC curve equal to 0.893 showed very acceptable estimates in the zoning of landslides in the studied area. Considering the experimental landslides located in the landslide susceptibility classes, it reveals the fact that by increasing the landslide susceptibility classes in both methods, the density of landslides in these areas has been significantly increased, and this is while the experimental landslides did not play a role in the modeling and confirm the correctness of the zoning map.

Cite this article: Memari, G.; Shahabi, H. & Zandi, J. (2023). Landslide hazard mapping in Bukan - Sardasht road using the weight of evidence and evidential belief function models. *Environmental Hazards Management*, 10 (2), 165-181. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.364694.791>



© Golan Memari, Himan Shahabi, Jalal Zandi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.364694.791>

Introduction

Communication ways can be one of the most basic elements in the progress of civilizations and provide the grounds for economic growth and development of different regions. Natural disasters, including landslides, floods, earthquakes, storms, soil erosion, and tsunamis, cause great damage to property and human life, among which landslides are recognized as one of the most important natural disasters worldwide. Landslides are one of the most important environmental hazards in mountainous

areas, they have adverse consequences such as the destruction of human lives, economic problems, death, and harm to the lives of humans and other living beings, disrupting infrastructure and Vital arteries causing the destruction of the tourism industry and historical and cultural monuments.

Landslide occurrences in Iran are one of the most important natural disasters, and they suddenly disturb the morphology of the earth's surface in mountainous areas and lead to a lot of financial and human losses. According to preliminary estimates, 500 billion rials of financial damage is caused to the country by landslides in Iran every year. Natural factors such as rainfall, geology, soil type, river flooding, and earthquakes due to the activation of faults along with other human factors such as road construction and road trenches for the purpose of road development and widening cause roadside landslides in mountainous areas every year. Therefore, for the purpose of zoning the landslides occurring on the roads, it is very necessary to use GIS spatial prediction models. According to the above-mentioned materials, the current research was conducted in order to zone the risk of landslides in the Bukan-Sardasht mountain road using the Evidential Belief Function and Weight of Evidence models.

Materials and Methods

After the investigations carried out in the studied area, twelve factors including lithological layers, distance from the fault, degree of slope, direction of slope, vegetation differentiation index, distance from the waterway, normal curve shape of the range, vertical curvature of the range, horizontal curvature of the range, Rainfall, distance from the road and height above sea level were found to be effective factors in the occurrence of landslides in the study area. During field investigations and control of satellite images, 109 cases of landslides were observed on the surface of the Bukan-Sardasht Road, and the reason for these instabilities was excavation and loss of the foot of the slope as a result of road construction activities, as well as erosion of waterways and erosion of river banks. By identifying the landslide areas, the first step in preparing the landslide susceptibility map was done.

Result and discussion

The communication axis of Bukan-Sardasht is a mountain road and has many landslides. According to the visits made in the study area, 109 small and large landslide points were recorded in the studied basin. From a total of 109 observed slip points. There are factors related to topography, geology, climate, permeability, slope, waterways network, and human factors such as road network and land use changes that cause landslides. Therefore, twelve influential factors including geological factors, slope degree, slope direction, normal slope curvature, transverse curvature, longitudinal curvature, height above sea level, NDVI, distance from faults, distance from road, distance from waterway and rainfall using two the weighted evidence model (Woe) and the definite evidence function model (EBF) were used to determine the landslide risk potential.

They had made comparisons between statistical and probabilistic methods and concluded that Woe and EBF methods had a higher area under the ROC curve and showed that these methods have high accuracy in preparing landslide susceptibility maps, which the present study also expresses their opinion. Yalchin et al. (2011) [1] also compared the methods of frequency ratio, weighted evidence, and logistic regression, and they obtained the area value under the ROC curve for each of the mentioned methods as 0.890, 0.903, and 0.840 respectively. brought that it indicated a very good estimate of the weighted evidence method compared to other methods. According to the area under the curve obtained from the definite evidence function method in the present study, the results of this research are consistent with the studies of Shahabi et al., (2023) [2] and Tawakolifar et al., (2023) [3]. The above researchers had proposed various statistical methods such as weighting of evidence, frequency ratio logistic regression, and artificial neural network as suitable tools in preparing the landslide susceptibility map, and the results obtained from this research also express the opinion. it is them.

Conclusion

In this study, evaluation and comparison between two data mining methods of weighted evidence and conclusive evidence function were done. The validation of the results with the Rock Index (ROC) indicated that the methods used in this study had a very good ability to predict the areas with landslide susceptibility in the area around Bukan-Sardasht road, and in the meantime, the method is subject to definitive evidence with the level Under the ROC curve equal to 0.910 with a standard error of 0.044,

compared to the weighted evidence method with the area under the ROC curve equal to 0.893, had better predictions. There are many influencing factors on the occurrence of landslides and the selection. The most important factors in the occurrence of landslides are of great importance in this study twelve factors were used. It seems that other factors such as the intensity of rainfall, soil texture, and underground water (springs) are also factoring that trigger and cause landslides in the study area and it is suggested that they be considered in future studies.

References

- [1]. Yalcin, A. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics, and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85, 274-287.
- [2]. Shahabi, H., Ahmadi, R., Alizadeh, M., Hashim, M., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., Wolf, I.D. and Ariffin, E.H., (2023). Landslide Susceptibility Mapping in a Mountainous Area Using Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 15(12), p.3112.
- [3]. Tavakolifar, R., Shahabi, H., Alizadeh, M., Bateni, S.M., Hashim, M., Shirzadi, A., Ariffin, E.H., Wolf, I.D. and Shojae Chaeikar, S. (2023). Spatial Prediction of Landslides Using Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study of the Saqqez-Marivan Mountain Road in Iran. *Land*, 12(6), p.1151.



پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محور بوکان - سردشت با استفاده از مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی

گلان معماری^۱ | هیمن شهابی^{۲*} | جلال زندی^۳

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: golanmemari67@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: h.shahabi@uok.ac.ir
۳. کارشناس اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: jalal.zandi2010@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

یادداشت پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

کلیدواژه:

الگوریتم پیشرفته داده‌کاوی،

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش،

تابع شواهد قطعی،

شواهد وزنی،

محور بوکان-سردشت.

هدف این پژوهش، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در طول محور ارتباطی کوهستانی بوکان-سردشت در استان آذربایجان غربی است. این کار با استفاده از روش‌های داده‌کاوی مدل شواهد وزنی و مدل تابع شواهد قطعی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و فنون سنجش از دور انجام گرفت. دوازده عامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش شامل لایه‌های سنگ‌شناسی، درجه شیب، جهت شیب، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه، شکل انحنای معمولی دامنه، شکل انحنای عرضی دامنه، شکل انحنای طولی دامنه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، مقدار بارندگی سالانه و ارتفاع از سطح دریا عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در منطقه تشخیص داده شدند و برای تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش منطقه از آنها استفاده شد. مختصات مکانی ۱۰۹ نقطه لغزشی در شهرستان یادشده ثبت شد. حدود ۳۰ درصد از لغزش‌های ثبت شده (۳۲ نقطه لغزشی) به‌عنوان زمین لغزش‌های آزمایشی به‌صورت کاملاً تصادفی جدا شده و ۷۷ نقطه لغزشی باقی‌مانده به‌عنوان لغزش‌های آموزشی وارد آنالیزها شدند. در روش شواهد وزنی (WOE) و تابع شواهد قطعی (EBF) مقادیر ارزش اطلاعاتی و وزن‌های اختصاص یافته به هر یک از عوامل با استفاده از محاسبات آماری در نرم‌افزار اکسل صورت گرفت و پس از جمع جبری همه لایه‌ها، نقشه حساسیت به زمین لغزش آماده شد. دقت پیش‌بینی مدل‌های مختلف با استفاده از سطح زیرمنحنی ROC سنجیده شد. سطح زیرمنحنی ROC در روش تابع شواهد قطعی (EBF) برابر با ۰/۹۱۰ بود و بیشترین مقدار را کسب کرد و روش شواهد وزنی نیز با مقدار سطح زیرمنحنی ROC معادل با ۰/۸۹۳ برآوردهای بسیار قابل قبولی در پهنه‌بندی زمین لغزش‌های منطقه نشان داد. با ملاحظه زمین لغزش‌های آزمایشی واقع شده در طبقات حساسیت وقوع زمین لغزش این واقعیت را آشکار می‌سازد که با افزایش طبقات حساسیت وقوع زمین لغزش در هر دو روش به‌صورت چشمگیری بر تراکم زمین لغزش‌ها در این مناطق افزوده شده است، درحالی که زمین لغزش‌های آزمایشی در مدل‌سازی‌ها تأثیری نداشته‌اند و صحت نقشه پهنه‌بندی را تأیید می‌کنند.

استناد: معماری، گلان؛ شهابی، هیمن و زندی، جلال (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محور بوکان-سردشت با استفاده از مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی. مدیریت

مخاطرات محیطی، ۱۰ (۲)، ۱۶۵-۱۸۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.364694.791>

© گلان معماری، هیمن شهابی، جلال زندی. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.364694.791>



مقدمه

راه‌های ارتباطی را می‌توان از اساسی‌ترین عناصر در پیشرفت تمدن‌ها دانست که زمینه‌های رشد و توسعه اقتصادی مناطق مختلف را فراهم می‌آورند. بلایای طبیعی از جمله زمین‌لغزش، سیل، زلزله، توفان، فرسایش خاک و سونامی، خسارات زیادی به اموال و زندگی انسان وارد می‌کنند که در بین آنها زمین‌لغزش از مهم‌ترین بلایای طبیعی جهان محسوب می‌شود [۳۱]. زمین‌لغزش از مهم‌ترین مخاطرات محیطی در نواحی کوهستانی است [۱۹] و پیامدهای نامطلوبی مانند تخریب زندگی‌های انسانی، مشکلات اقتصادی، مرگ‌ومیر و صدمه رساندن به حیات انسان و دیگر موجودات زنده، مختل شدن زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی و از بین رفتن صنعت گردشگری و آثار تاریخی و فرهنگی را دارد. پیش‌بینی و پهنه‌بندی صحیح رخداد زمین‌لغزش در هر منطقه افزون‌بر کاهش مخاطرات و خسارات ناشی از بروز زمین‌لغزش، تأثیر مهمی در تحلیل و پیش‌بینی درست این مخاطره طبیعی در هر منطقه جغرافیایی دارد [۲۵، ۲۸].

عوامل اصلی زمین‌لغزش‌ها در ایران عبارت‌اند از توپوگرافی شیبدار، بارش شدید، واحدهای سنگی ضعیف، زمین‌لرزه و رفتارهای انسانی مخاطره‌آمیز در زمینه تغییر کاربری اراضی زمین [۴]. مناطق شمالی و غربی ایران به دلیل شرایط اقلیمی و توپوگرافی همواره در معرض خطر زمین‌لغزش قرار دارند. اصولاً شناخت مناطق در معرض خطر زمین‌لغزش، مسئله‌ای مهم در مطالعات زمین‌لغزش به شمار می‌آید.

شناخت این عوامل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، پتانسیل واقعی ناحیه را بهتر می‌سنجد و یک ناحیه را از نظر خطرپذیری به چند زیر ناحیه تقسیم می‌کند تا کار برنامه‌ریزی و پهنه‌بندی این مخاطره را آسان‌تر کند [۱۲]. اولین قدم مهم در ارزیابی حساسیت به زمین‌لغزش، پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش در مقیاسی منطقه‌ای است [۲۲].

شناخت و آگاهی از حرکات زمین‌لغزش و پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش در مسیرهای جاده‌ای برای برنامه‌ریزی مناسب کاربری زمین ضروری است؛ این ابزار استاندارد است که از فعالیت‌های تصمیم‌گیری پشتیبانی می‌کند [۱۳]. در دهه‌های اخیر، عملی و مؤثر بودن استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مکانی GIS برای ارزیابی مدل‌سازی حساسیت به زمین‌لغزش و پایش مستمر این مخاطره طبیعی اثر بسیار مهمی داشته‌اند [۲۳].

پژوهش‌های مختلفی در زمینه پتانسیل‌یابی رخداد زمین‌لغزش انجام گرفته است. روستایی و همکاران (۱۳۹۹) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنتروپی شانون بررسی کردند و دریافتند که عوامل جهت شیب، کاربری اراضی و ارتفاع بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش در منطقه پژوهش دارند [۶]. در پژوهشی دیگر قاسمیان و همکاران (۱۳۹۶) حساسیت زمین‌لغزش را در شهرستان کامیاران با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار بررسی کردند. یافته‌های آنها حاکی از عملکرد مناسب مدل در زمینه پتانسیل‌یابی خطر زمین‌لغزش بود [۱۰].

میرزانی و شهابی (۱۳۹۸)، مخاطره زمین‌لغزش را در جاده کوهستانی سنندج - کامیاران بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل شواهد وزنی^۱ (WOE) نسبت به مدل تابع شواهد قطعی^۲ (EBF) مقدار AUC^۳ بیشتری دارد و بهترین مدل برای پیش‌بینی مکانی خطر زمین‌لغزش در منطقه پژوهش است [۹]. چنگ و همکاران (۲۰۲۱)، در بررسی خطر زمین‌لغزش در تایوان دریافتند که مدل جنگل تصادفی عملکرد مناسبی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش دارد [۱۷].

با توجه به مطالب یادشده، تاکنون در محور مطالعاتی، پژوهش علمی به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی انجام نگرفته است؛ از این‌رو در پژوهش حاضر به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مسیر کوهستانی بوکان - سردشت از دو مدل تابع شواهد قطعی (EBF) و شواهد وزنی (WOE) استفاده شد و در نهایت قدرت پیش‌بینی و کارایی مدل‌ها به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در مسیر تحت بررسی انجام گرفت.

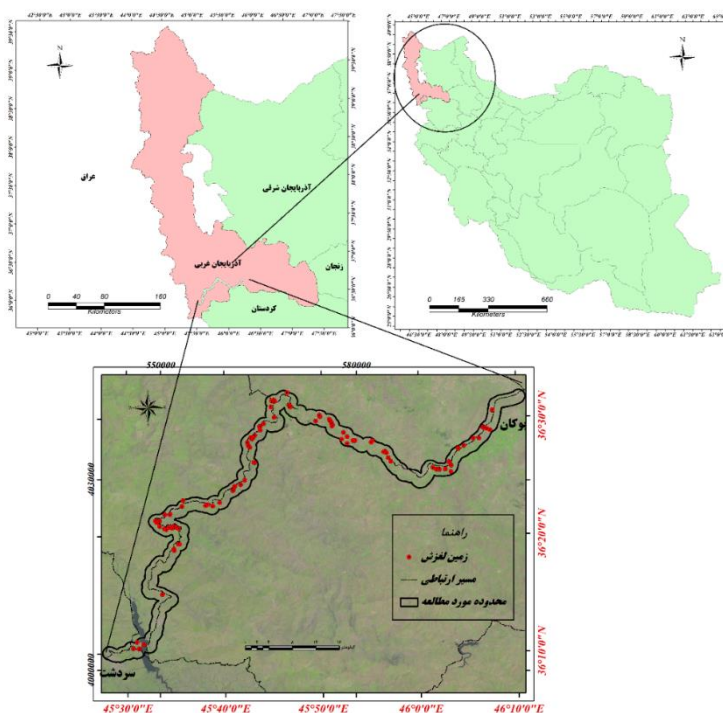
1. Weight of Evidence

2. Evidential Belief Function

3. Area under the ROC Curve

معرفی منطقه پژوهش

جاده بوکان - سردشت به طول ۱۳۸ کیلومتر یکی از جاده‌های کوهستانی و برفگیر استان آذربایجان غربی است. به دلیل تعریض و احداث مقاطعی از مسیر جدید، زمین لغزش‌ها و سنگ‌افتان‌های زیادی در طول محور جاده رخ داده است. مختصات جغرافیایی این محور بین عرض جغرافیایی شمالی $Y = 40.2285$ تا $Y = 40.43178$ و طول جغرافیایی شرقی $X = 542145$ تا $X = 604908$ برحسب سیستم UTM قرار گرفته است. پژوهش حاضر در محدوده حریم یک کیلومتری طرفین محور ارتباطی شهر بوکان تا ورودی شهر سردشت با مساحت ۲۵۴۶۵ هکتار انجام گرفت. موقعیت محور ارتباطی تحت بررسی در استان آذربایجان غربی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت محور ارتباطی بوکان - سردشت در استان آذربایجان غربی و کشور ایران.

نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

ضمن بررسی‌های صحرایی و کنترل تصاویر ماهواره‌ای ۱۰۹ لغزش در محور بوکان - سردشت مشاهده شد. دلیل ناپایداری‌ها خاک‌برداری و برداشتن پاشنه دامنه در اثر فعالیت‌های راه‌سازی و نیز فرسایش آبراه‌های و زیرکنی کناره‌های رودخانه بوده است. با شناسایی نواحی لغزش‌یافته اولین اقدام در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش انجام گرفت (شکل ۲).



شکل ۲. نمایی از ناپایداری دامنه‌ای در طول مسیر ارتباطی (۲۰ کیلومتری بوکان - سردشت) (عکس از نگارنده، ۱۴۰۰)

مواد و روش‌ها

تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش

پس از بررسی‌های انجام‌گرفته و پژوهش‌های علمی مشابه در زمینه موضوع، دوازده عامل شامل لایه‌های سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، درجه شیب، جهت شیب، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه، شکل انحنا معمولی دامنه، انحنا عمودی دامنه، انحنا افقی دامنه، بارندگی، فاصله از جاده و ارتفاع از سطح دریا، عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه پژوهش تشخیص داده شدند.

ابتدا نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ رقومی‌شده منطقه پژوهش و اطراف آن از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد. سپس فایل رقومی تهیه‌شده که ماهیت برداری دارد به کمک نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به ساختار رستری و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تبدیل شد. در نهایت نقشه طبقات ارتفاع با شش کلاس تهیه شد. درجه شیب عاملی در افزایش تنش برشی و تسهیل حرکت‌های دامنه‌ای است؛ بنابراین با افزایش درجه شیب احتمال حرکات توده‌ای تشدید می‌شود. برای تهیه این عامل از مدل رقومی ارتفاع استفاده و به کمک تحلیل‌های ArcGIS 10.8 نقشه شیب با پنج طبقه تهیه شد.

اهمیت عامل جهت شیب در حرکات دامنه‌ای به‌واسطه دریافت انرژی خورشیدی، بارندگی، باد، نگهداشت رطوبت و وجود پوشش گیاهی و در نهایت ایجاد شرایط هوازگی و تخریب سنگ‌ها و تغییر نفوذپذیری آنهاست. نقشه جهت شیب نیز از مدل رقومی ارتفاع با نه طبقه تهیه شد. نقش شکل شیب آن گونه است که شیب‌های مقعر به‌واسطه نگه داشتن آب و اشباع لایه‌های زیرزمینی عاملی برای حرکت توده خاک و سنگ می‌شوند. شیب‌های محدب عاملی برای افزایش انرژی جنبشی، حرکت در راستای شیب و ایجاد تنش برشی هستند. برای تهیه این نقشه از ابزار Curvature در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد.

برای تهیه نقشه گسل‌ها و خطواره‌ها حوضه از نقشه زمین‌شناسی ورقه سردشت در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل 2B و همچنین پیمایش‌های صحرایی استفاده شد. پس از رقومی‌سازی خطواره‌ها، بافرهایی در اطراف آنها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 ایجاد و برای تحلیل‌های بعدی به فرمت رستری تبدیل شده و به شش طبقه تقسیم شدند. به‌منظور تهیه نقشه شبکه هیدروگرافی از مدل رقومی ارتفاع حوضه، با بهره‌گیری از اکستنشن Arc Hydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 نقشه شبکه آبراهه‌ها به‌صورت برداری تهیه شد. برای بیان حد تأثیر شبکه زهکشی در ایجاد زمین‌لغزش‌ها، فاصله از شبکه زهکشی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به دست آمد و به پنج طبقه تقسیم شد. برای تهیه نقشه نشان‌دهنده مقدار پوشش گیاهی، از تصویر تصحیح‌شده ماهواره سنتینل منطقه به تاریخ ۲۳ می ۲۰۲۱ استفاده شد. شایان ذکر است که تصاویر ماهواره سنتینل 2B از اینترنت به نشانی <https://earthexplorer.usgs.gov> به‌راحتی قابل دریافت است. شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی^۱ (NDVI)، شاخص گرافیکی ساده‌ای است که در تحلیل‌ها و اندازه‌گیری‌های سنجش از دور و ارزیابی وجود یا نبود پوشش گیاهی هر منطقه به‌کار گرفته می‌شود. با توجه به اینکه پوشش گیاهی در باند قرمز بیشترین جذب و طبیعتاً کمترین بازتابش و در باند مادون قرمز نزدیک، کمترین جذب و به‌تبع آن بیشترین بازتابش را دارد، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی می‌تواند پوشش گیاهی را از پدیده‌های دیگر تفکیک و مقدار تراکم آن را مشخص کند. رابطه مربوط به محاسبه شاخص NDVI به‌شکل زیر است:

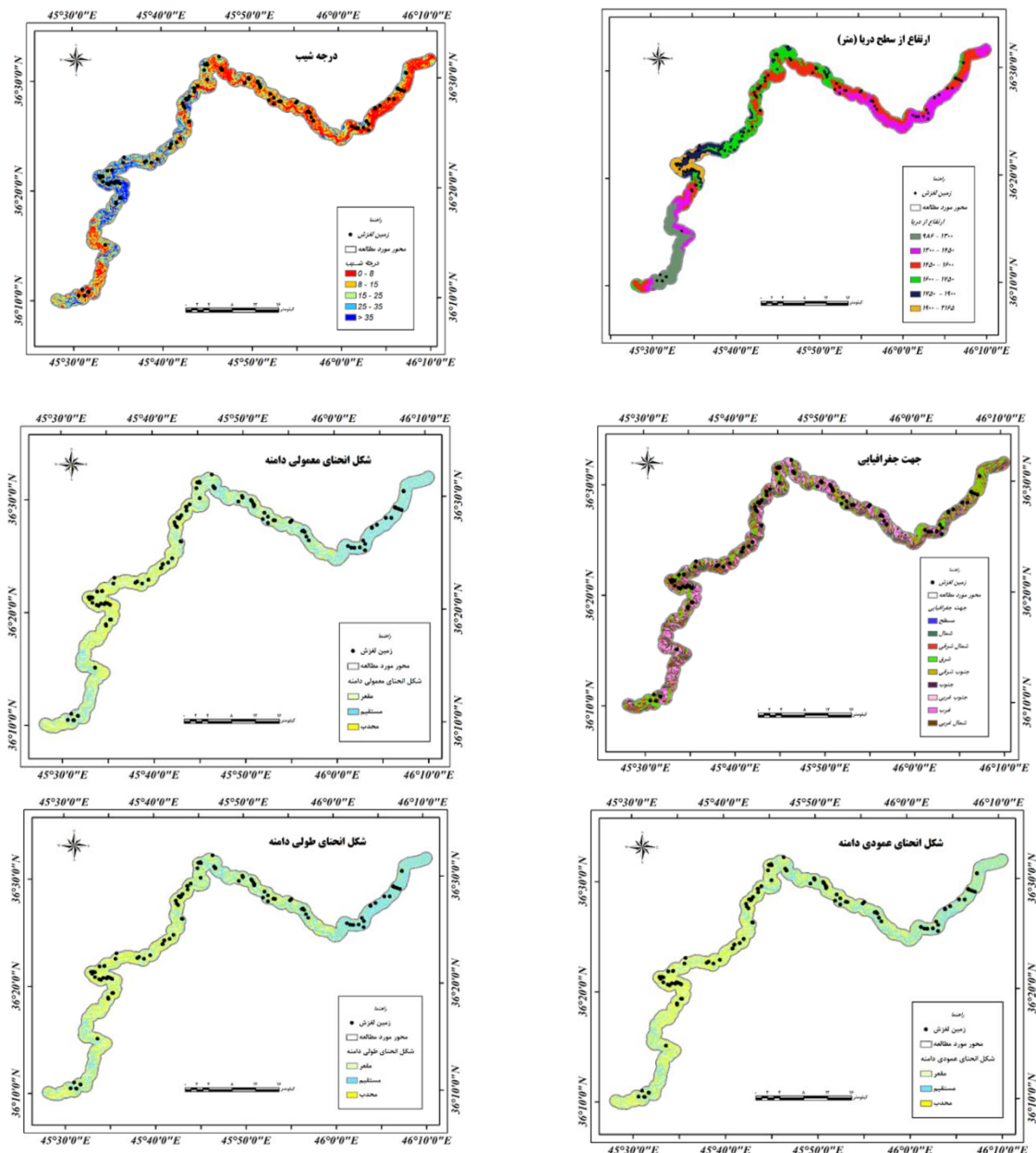
$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

که NIR باند مادون قرمز نزدیک و R باند قرمز است.

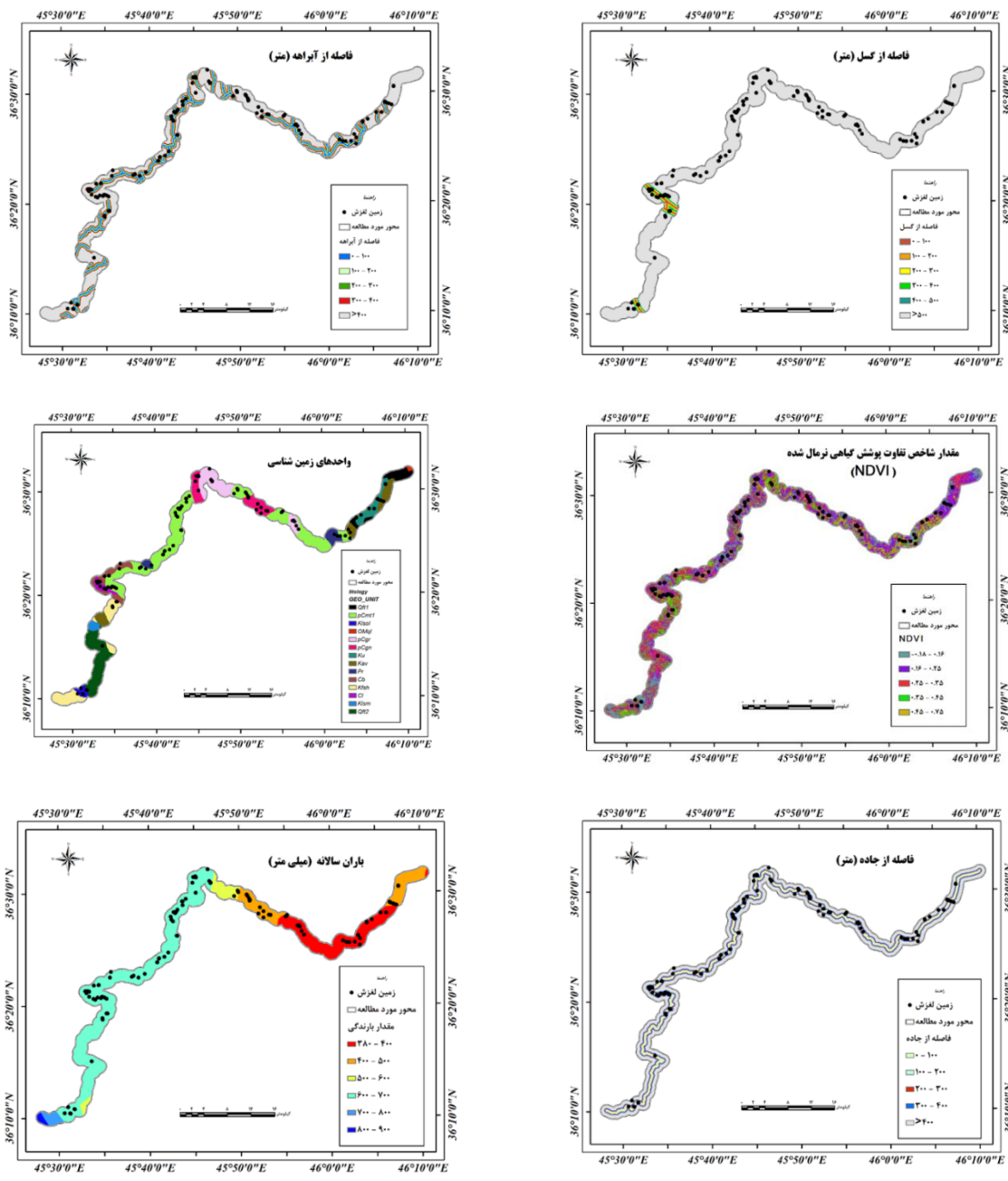
با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ورقه سردشت در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و بازدیدهای به‌عمل‌آمده به‌خصوص در مناطق مرزی، واحدهای سنگ‌شناسی کنترل شدند و محدوده تحت بررسی به‌صورت پلی‌گون در بستر نرم‌افزار ArcGIS 10.8 جدا شده و

براساس میزان حساسیت سنگ‌ها به حرکات توده‌ای در چهار دسته از حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. مبنای طبقه‌بندی حساسیت سنگ‌ها به زمین‌لغزش براساس قدمت سازندهای زمین‌شناسی تعیین شد. به‌طور معمول هرچه سازندهای زمین‌شناسی قدمت بیشتری داشته باشند استحکام بیشتری دارند و برعکس سازندهای جوان‌تر، سست‌تر، منفصل‌تر و نفوذپذیرترند و به‌راحتی آب در آنها نفوذ می‌کند و در معرض خطر زمین‌لغزش قرار می‌گیرند [۱].

نقشه فاصله از جاده با رقومی کردن خطوط جاده اصلی در منطقه پژوهش از روی نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ تهیه و به پنج طبقه دسته‌بندی شد. برای تهیه نقشه مقدار بارندگی سالانه از میانگین بارش‌های سالانه ایستگاه‌های موجود در محور ارتباطی بوکان - سردشت و اطراف آن استفاده شد. داده‌های نقطه‌ای بارش سالانه با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی براساس فاصله معکوس^۱ (IDW) در محیط ArcMap به سطح منطقه تعمیم داده شد و به فرمت رستری با اندازه سلول ۲۰×۲۰ مترمربع درآمد و طبقه‌بندی مجدد روی آن صورت گرفت. نقشه پارامترهای مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش در شکل ۳ ارائه شده است.



1. Inverse distance weighted



شکل ۳. نقشه عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

مدل شواهد وزنی^۱ WOE

این روش برای مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه، برای هر عامل در صورت وجود یا نبود زمین‌لغزش در محل، وزنی را محاسبه می‌کند. تعیین وزن برای هر عامل از طریق ادغام هر کدام از لایه‌های عاملی با نقشه پراکنش زمین‌لغزش انجام می‌گیرد؛ سپس برای هر عامل با استفاده از معادله‌های زیر وزن محاسبه می‌شود.

$$W_i^+ = \log \left[\frac{P(B_i/S)}{P(B_i)} S \right]$$

$$W_i^- = \log \left[\frac{P(B_i/\bar{S})}{P(B_i)} \bar{S} \right]$$

(۲)

1. Weight of evidence

در این مدل، مقادیر وزنی به‌طور معمول دامنه‌ای بین اعداد مثبت و منفی دارند که بیانگر نقش بیشتر و کمتر متغیر در ایجاد زمین‌لغزش است. در روش شواهد وزنی (WOE) مقادیر ارزش اطلاعاتی و وزن‌های اختصاص‌یافته به هر یک از عوامل با استفاده از محاسبات آماری در نرم‌افزار اکسل تعیین گرفت و پس از درج این مقادیر در جدول بانک اطلاعاتی نرم‌افزار ArcGIS 10.8 روی لایه‌ها با استفاده از تابع Lookup نقش هر عامل تعیین شد. پس از آماده‌سازی تک‌تک لایه‌ها که سیستم مختصات یکسان و اندازه سلول یکسانی نیز دارند در محیط GIS پس از جمع جبری همه لایه‌ها به کمک محاسبات ریاضی روی نقشه‌های رستری، نقشه حساسیت به زمین‌لغزش به روش WOE به‌دست آمد.

– مدل تابع شواهد قطعی (EBF^۱)

اصطلاحاتی که در این مدل به کار می‌رود شامل Bel یا درجه اطمینان، Dis درجه عدم اطمینان، Unc درجه عدم قطعیت و Pls درجه معقولیت در محدوده صفر تا ۱ است. بخش اصلی این تئوری توسط درجه اطمینان و درجه معقولیت ارائه می‌شود. به همین دلیل درجه معقولیت بزرگ‌تر یا مساوی درجه اطمینان است. داده‌های استخراج‌شده از EBF همبستگی مکانی بین فاکتورهای مؤثر و رخداد زمین‌لغزش و همبستگی مکانی بین کلاس‌های هر یک از فاکتورهای مؤثر را پیش‌بینی می‌کند [۹]. روابط مدل توسط معادله‌های زیر برآورد می‌شود. این معادله‌ها برای تعریف ادغام لایه‌های Bel، Dis، Pls و Unc تعریف می‌شوند.

$$Disbelief\ Dis = \frac{Dis_1 + Dis_2 + \dots + Dis_n}{\beta}$$

$$Uncertainty\ Unc = \frac{\sum_{i=2}^n (Unc_{i-1} Unc_i + Bel_2 Unc_{i-1} + Dis_{i-1} Unc_i + Dis_1 Unc_{i-1})}{\beta} \quad (3)$$

$$Plusibility\ Pls = Bel + Unc$$

$$\beta = 1 - \sum_{i=2}^n (Bel_{i-1} Dis_i - Dis_{i-1} Bel_i)$$

اعتبارسنجی و مقایسه نتایج

اعتبارسنجی و مقایسه نتایج روش‌های آماری استفاده‌شده در این پژوهش با محاسبه شاخص ویژگی‌های عامل نسبی^۲ (ROC) و میزان فراوانی زمین‌لغزش‌های آزمایشی در طبقات حساسیت به زمین‌لغزش به‌دست آمد. محاسبه فراوانی لغزش، تراکم زمین‌لغزش را در هر پهنه نشان می‌دهد. پهنه‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد مقدار فراوانی زیاد، و پهنه‌های با خطر بسیار کم مقدار فراوانی کمتری را نشان می‌دهند [۲۶]. همچنین نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش به‌دست‌آمده از روش‌های WOE و EBF به پنج طبقه براساس Natural Break تقسیم شد و درصد وقوع زمین‌لغزش‌های آزمایشی در طبقات خطر به‌دست آمد و با همدیگر مقایسه شد و در نهایت پیشنهادهای اجرایی در استفاده از مدل‌ها ارائه شد.

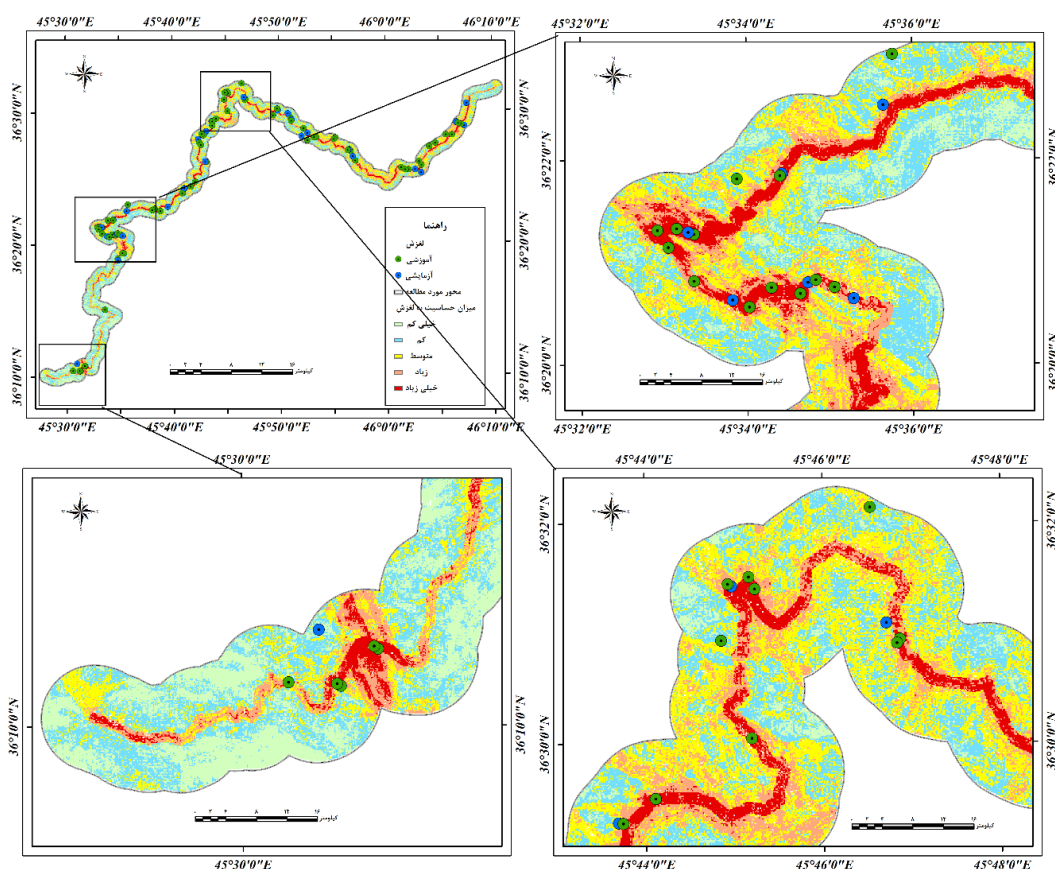
نتایج

بررسی نقشه زمین‌شناسی نشان داد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در واحدهای مارنی و شیلی و سازند لالون (ماسه‌سنگ و میکا) اتفاق افتاده است. بررسی نقشه شیب نشان داد که شیب‌های بین ۸ تا ۱۵ درجه بیشترین تأثیر را در ایجاد زمین‌لغزش‌های محور تحت بررسی داشته‌اند. وزن‌دهی نقشه جهت شیب نشان داد که بیشترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش مربوط به جهات جغرافیایی جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی است. طبقات ارتفاعی در منطقه پژوهش در شش طبقه ارتفاعی با دامنه‌های تقریباً ۱۵۰ متری تقسیم شد تا تغییرات ارتفاعی بین ۹۶۵ متر تا ۲۱۶۵ متر در بالاترین نقطه محور تحت بررسی معلوم شود. بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه پژوهش در ارتفاع ۱۹۰۰ تا ۲۱۶۵ متر جای گرفته‌اند.

1. Evidential Belief Function

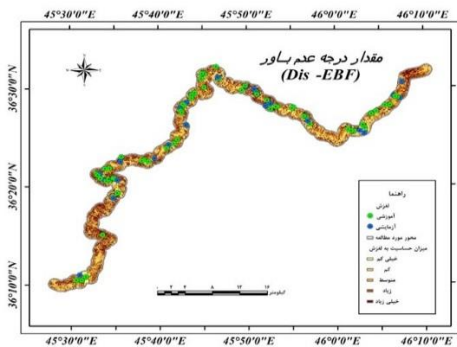
2. Relative Operating Characteristic

با توجه به ارتباط زمین‌لغزش‌ها و تراکم پوشش گیاهی، از لحاظ نظری مقادیر وقوع زمین‌لغزش در نواحی دارای تراکم پوشش گیاهی اندک بیشتر است. در نواحی دارای پوشش گیاهی زیاد، به دلیل تأثیر سیستم ریشه‌ای در پایدارسازی خاک و مواد سطحی، احتمال وقوع زمین‌لغزش کمتر می‌شود. با افزایش فاصله از آبراهه‌ها، احتمال وقوع زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. ارتباط میان احتمال وقوع زمین‌لغزش و فاصله از جاده‌ها نشان داد که با افزایش فاصله از جاده‌ها، احتمال وقوع زمین‌لغزش کم می‌شود. شکل انحنای معمولی شیب و انحنای عمودی، شکل مستقیم همبستگی مثبتی با وقوع زمین‌لغزش دارد و بیشترین زمین‌لغزش‌های منطقه پژوهش را شامل می‌شود. بیشترین امتیاز مثبت در رخدادهای لغزش‌های محور یادشده در فواصل ۰ تا ۱۰۰ متر و سپس در فاصله ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر قرار دارد و با افزایش فاصله از گسل‌ها به خصوص در فواصل بیشتر از ۵۰۰ متر از تعداد لغزش‌ها کاسته می‌شود. پس از درج این مقادیر در جدول بانک اطلاعاتی نرم‌افزار ArcGIS 10.8 روی لایه‌ها با استفاده از تابع Lookup نقش هر عامل تعیین شد. پس از آماده‌سازی لایه‌ها نقشه حساسیت به زمین‌لغزش به روش WOE به دست آمد (شکل ۴).

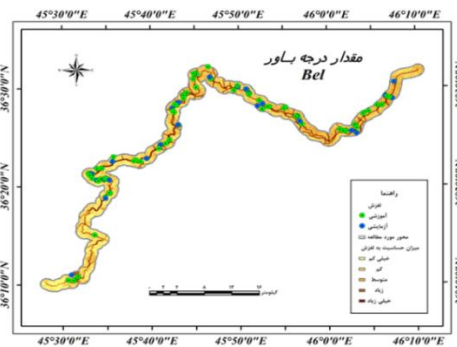


شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش WOE

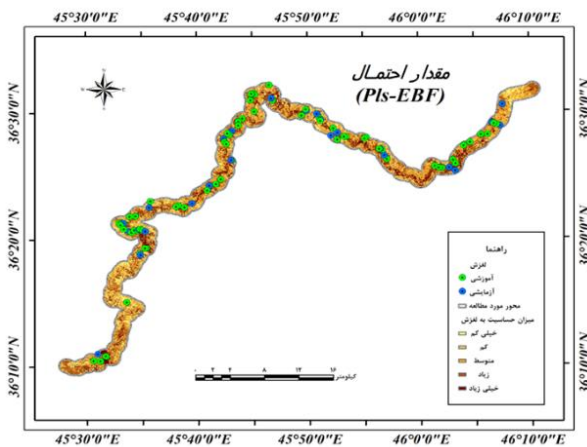
داده‌های استخراج‌شده از روش EBF همبستگی مکانی بین عوامل مؤثر و رخداد زمین‌لغزش و همبستگی مکانی بین طبقات هر یک از عوامل مؤثر را پیش‌بینی می‌کند. پارامترهای روابط مدل توسط معادله‌ها برای ادغام لایه‌های Bel (درجه باور) (شکل ۵)، Dis (عدم باور) (شکل ۶)، Pls (احتمال) و Unc (عدم اطمینان) (شکل ۷) استفاده شدند و در نهایت نقشه حساسیت به زمین‌لغزش به روش مدل تابع شواهد قطعی در سطح محور ارتباطی بوکان-سردشت تهیه شد (شکل ۸).



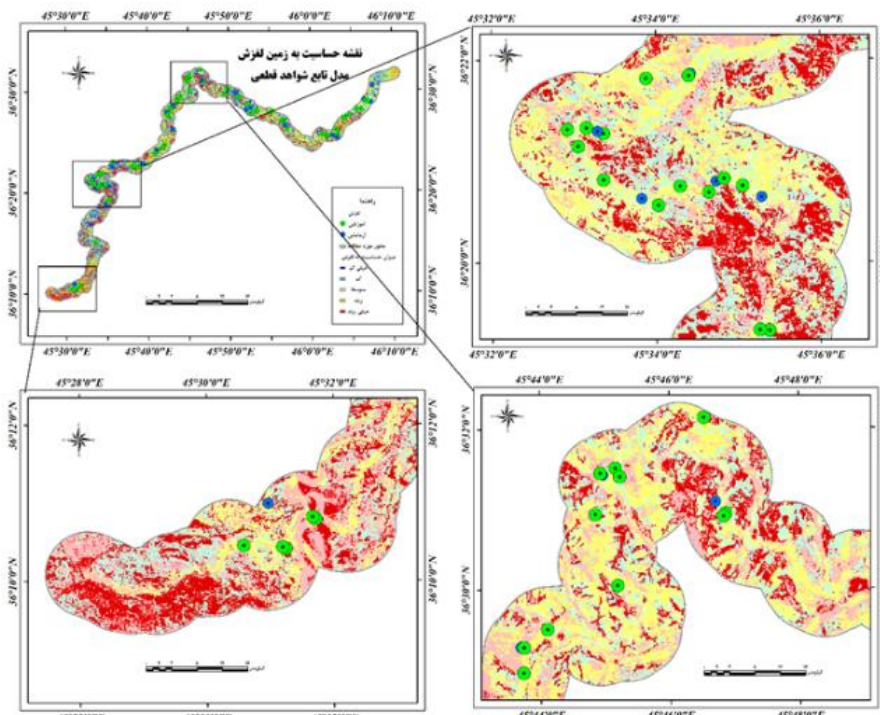
شکل ۶. مقدار Dis (عدم باور) در مدل EBF



شکل ۵. مقدار Bel (درجه باور) در مدل EBF

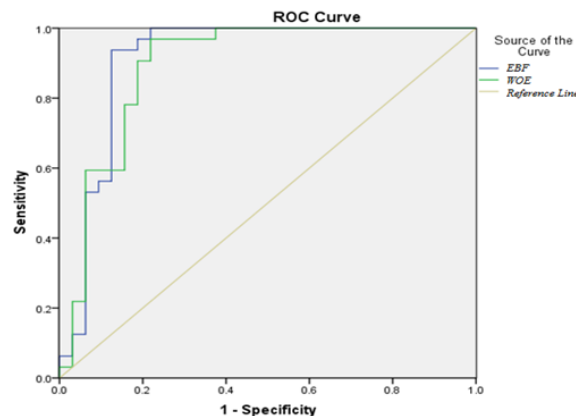


شکل ۷. مقدار Pls (احتمال) در مدل EBF



شکل ۸. نقشه حساسیت به زمین لغزش حاصل از مدل تابع شواهد قطعی (EBF) منطقه پژوهش

دقت هر مدل با محاسبه ویژگی‌های عامل نسبی (ROC) ارزیابی شد. قابلیت پیش‌بینی مدل به‌وسیله سطح زیرمنحنی مشخص می‌شود (شکل ۹). سطح زیرمنحنی (AUC) در روش شواهد وزنی (WOE) $0/893$ به‌دست آمد و خطای استاندارد $0/044$ است که به این معناست که دقت مدل در تعیین حساسیت وقوع زمین‌لغزش در این روش $89/3$ درصد است. در روش تابع شواهد قطعی (EBF) زیرمنحنی ویژگی‌های عامل نسبی $0/910$ و خطای استاندارد قابل قبول $0/043$ به‌دست آمد. بنابراین دقت تعیین حساسیت به وقوع لغزش در این روش 91 درصد است. بر این اساس، روش تابع شواهد قطعی بیشترین دقت را در تخمین زمین‌لغزش‌های منطقه پژوهش دارد و پس از آن، روش شواهد وزنی نیز دقت بسیار قبولی ارائه می‌کند.



شکل ۹. ارزیابی منحنی ROC در مدل‌های حساسیت به زمین‌لغزش

بحث

محور ارتباطی بوکان- سردشت جاده‌ای کوهستانی و دارای زمین‌لغزش‌های متعددی است. با توجه به بازنده‌های انجام‌گرفته در محدوده تحقیق، 109 نقطه لغزشی کوچک و بزرگ در محدوده ثبت شد. از کل 109 نقطه لغزش مشاهداتی عوامل مرتبط با توپوگرافی، زمین‌شناسی، اقلیم، نفوذپذیری، درجه شیب، شبکه آبراهه‌ها، عوامل انسانی نظیر شبکه جاده‌ها و تغییرات کاربری اراضی وجود دارند که موجب وقوع زمین‌لغزش می‌شوند [۲۰، ۳۰]. بنابراین، دوازده عامل تأثیرگذار شامل عوامل زمین‌شناسی، درجه شیب، جهت شیب، انحنای معمولی شیب، انحنای عرضی دامنه، انحنای طولی دامنه، ارتفاع از سطح دریا، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از گسل‌ها، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و مقدار بارندگی با استفاده از دو مدل شواهد وزنی (WOE) و تابع شواهد قطعی (EBF) برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شدند.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی، چهارده واحد لیتولوژیکی در منطقه پژوهش وجود دارد. اما بیشتر زمین‌لغزش‌های منطقه در هشت واحد لیتولوژیکی آن رخ داده‌اند. بیشترین فراوانی وقوع زمین‌لغزش در سازندهای لالون، مارن و شیل و نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر دیده می‌شود. بافت این سنگ‌ها از نوع دانه‌ای و سن این واحدها مربوط به کرتاسه و کواترن است. واحدهای سنگ‌های دگرگونی‌شده و آذرین کمترین فراوانی وقوع زمین‌لغزش را در منطقه پژوهش دارند. بیشترین لغزش‌های منطقه براساس روش داده‌کاوی شواهد وزنی (WOE) در طبقه با حساسیت زیاد اتفاق افتاده است و طبقه سنگ‌شناسی با حساسیت کم اثر منفی در رخداد زمین‌لغزش نشان می‌دهد و نتیجه‌گیری می‌شود که واحدهای لیتولوژی حساس به زمین‌لغزش تأثیر مثبتی در رخداد زمین‌لغزش دارند و برعکس واحدهای سنگی مقاوم در رخداد زمین‌لغزش تأثیر منفی دارند و از بروز زمین‌لغزش جلوگیری می‌کنند. درجه شیب از عوامل محرک حرکت‌های توده‌ای است و افزایش شیب موجب افزایش تنش برشی و گسیختگی دامنه می‌شود [۲]، بنابراین انتظار داریم که با افزایش درجه شیب و همچنین ارتفاع از سطح دریا فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌ها افزایش یابد. در این پژوهش بیشترین رخداد زمین‌لغزش در طبقات شیب 8 تا 15 درجه مشاهده می‌شود. تأثیر شیب‌های کمتر از 8 درجه در ایجاد زمین‌لغزش‌های منطقه ناچیز است و در شیب‌های بیشتر از 15 درجه نیز مقادیر وجود زمین‌لغزش کاهش یافته است. به نظر می‌رسد که در شیب‌های بیشتر و ارتفاعات بالا به دلیل وجود برونزدهای سنگی و نبود خاک، حرکت‌های لغزشی مشاهده

نمی‌شود و بیشتر حرکات در نواحی مرتفع‌تر از ۲۲۰۰ متر از نوع سنگ افت هستند. این نتایج به‌طور تقریبی با یافته‌های بسیاری از محققان همخوانی دارد، به‌طوری که این محققان بر این باورند که حساسیت وقوع زمین‌لغزش در شیب‌های متوسط از شیب‌های ملایم و تند بیشتر است و فقط در میزان شیب اختلاف نظر وجود دارد. پورقاسمی و همکاران (۱۳۸۹) شیب‌های ۳۰ تا ۴۰ درصد [۴]، مرادی و همکاران (۱۳۸۹) شیب‌های ۳۰ تا ۴۰ درصد [۱۱]، لی و همکاران (۲۰۰۷) شیب‌های ۲۶ تا ۳۰ درصد [۲۱] و بوی و همکاران (۲۰۱۲) شیب‌های ۲۰ تا ۴۰ درصد را محدوده دارای حرکات لغزشی معرفی کرده‌اند [۱۶].

یکی از دلایل اصلی وقوع لغزش‌ها در این محدوده، تغییرات در کاربری اراضی و قطع جنگل‌هاست که بدون توجه به پتانسیل واقعی سرزمین اغلب به باغ تبدیل شده‌اند. این شرایط زمانی تشدید می‌شود که ویژگی‌های فیزیوگرافی نظیر شیب نیز مزید بر علت شده و حرکت توده‌های مستعد لغزش را در نبود ریشه‌های درختان تشدید کرده است. مقادیر شاخص NDVI نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است. در این پژوهش، بیشترین تأثیر ایجاد لغزش در طبقات شاخص NDVI کمتر از ۰/۲۵ است؛ یعنی نواحی با پوشش گیاهی ضعیف و اراضی تخریب‌یافته بیشترین وقوع زمین‌لغزش را دارند که این نتایج با تحقیقات احمدی و همکاران (۱۳۸۲) [۲]، شادفر و همکاران (۱۳۸۷) [۸]، اشقی فراهانی و همکاران (۱۳۸۴) [۳]، مرادی و همکاران (۱۳۸۹) [۱۱]، ارکان‌اوغلو و همکاران (۲۰۱۴) [۱۸] و زارع و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. این پژوهشگران نیز دریافته بودند که دخالت انسان از طریق تغییر در کاربری اراضی و استفاده نادرست از پتانسیل‌های منطقه و به‌طور کلی رعایت نکردن اصول آمایش سرزمین و تخصیص متناسب اراضی موجب بروز بحران از قبیل ایجاد فرسایش تخریبی و حرکات توده‌ای می‌شود [۷].

در خصوص گسل‌های فعال و عناصر ساختاری در منطقه، با افزایش فاصله از گسل‌ها و عناصر ساختاری موجود در منطقه پژوهش از روند افزایش وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه پژوهش کاسته شده است. شیب‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش دارند و کمترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های شمال شرقی و شمالی و شمال غربی است. دلیل فراوانی لغزش‌ها در شیب‌های جنوبی ممکن است ضعف پوشش گیاهی و نیز تکرار پدیده ذوب و یخبندان باشد. تحلیل‌های این پژوهش نشان داد که بین فراوانی وقوع زمین‌لغزش در شکل شیب‌های معمولی، انحنای افقی و انحنای عمودی به‌صورت مقعر، مستقیم و محدب در منطقه پژوهش اختلافات معنی‌داری دیده می‌شود. شیب‌های مستقیم بیشترین تأثیر را در ایجاد زمین‌لغزش دارند که ممکن است به‌دلیل همسو بودن شیب ساختمانی لایه‌ها و شیب توپوگرافی باشد. با توجه به میزان تأثیر طبقات فاصله از آبراهه با وقوع زمین‌لغزش‌ها مشخص می‌شود که ارتباط مستقیمی بین وجود زمین‌لغزش‌ها و طبقات فاصله تا ۳۰۰ متری از آبراهه دیده می‌شود که ناشی از زیربری رود و حفر و کاوش پاشنه دامنه است. در طبقات فواصل بیشتر از ۳۰۰ متر از آبراهه از تأثیر وقوع لغزش کاسته می‌شود. با توجه به نقش حساسیت زمین‌لغزش تهیه‌شده به روش شواهد وزنی، حدود ۷/۶۲ درصد از کل منطقه پژوهش، ناحیه با حساسیت خیلی زیاد است. با همپوشانی زمین‌لغزش‌های آزمایشی روی نقشه حساسیت مشخص شد که درصد زمین‌لغزش‌های متناظر با هر طبقه حساسیت به‌ترتیب از خیلی کم تا خیلی زیاد است. حدود ۷ درصد منطقه پژوهش در طبقه با حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته و ۸۳ درصد زمین‌لغزش‌های آزمایشی در این نواحی واقع شده‌اند. نسبت تراکم وقوع زمین‌لغزش‌های آزمایشی در نواحی خیلی زیاد و برابر با ۹/۳۵ است که عدد بزرگی است که با یافته‌های چنگ و همکاران (۲۰۲۱) که با استفاده از هیستوگرام فراوانی وقوع زمین‌لغزش در نواحی با حساسیت خیلی زیاد به نتایج مشابهی دست یافته بودند مطابقت دارد [۱۷]. در روش شواهد وزنی (WOE) این مقدار برابر با ۰/۸۹۳ بود و در روش شواهد قطعی نیز با مقدار سطح زیرمنحنی ROC معادل با ۰/۹۱۰ پیش‌بینی بسیار قابل قبول‌تری در حساسیت‌یابی زمین‌لغزش‌های منطقه پژوهش از خود نشان داد که با یافته‌های محققانی مانند بیلفارد و همکاران (۲۰۱۲) و میرزانی و شهبابی (۱۳۹۸) مطابقت دارد [۹، ۱۵]. پژوهشگران ذکرشده نیز با انجام دادن مقایسه‌هایی بین روش‌های آماری و احتمالاتی نتیجه گرفتند که روش‌های WOE و EBF از سطح زیرمنحنی ROC بالاتری برخوردار است و این روش‌ها دقت زیادی در تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش دارند که پژوهش حاضر نیز تأییدکننده نظر آنهاست. یالچین و همکاران (۲۰۱۱) نیز مقایسه‌ای بین روش‌های نسبت فراوانی، شواهد وزنی و رگرسیون لجستیک انجام داده بودند. آنها مقدار سطح زیر منحنی ROC را برای هر یک از روش‌های مذکور به‌ترتیب ۰/۸۹۰، ۰/۹۰۳ و ۰/۸۴۰ به‌دست آورده بودند که حاکی از تخمین بسیار خوب روش شواهد

وزنی نسبت به روش‌های دیگر بود [۲۹]. با توجه به سطح زیرمنحنی به‌دست‌آمده از روش تابع شواهد قطعی در پژوهش حاضر، نتایج این تحقیق با یافته‌های شهابی و همکاران (۲۰۲۳) و توکلی فر و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد [۲۷، ۲۴].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دو روش داده‌کاوی شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی ارزیابی و مقایسه شدند. اعتبارسنجی نتایج با شاخص ROC مشخص کرد که روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش از توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی نواحی با حساسیت زمین‌لغزش محدوده اطراف جاده بوکان - سردشت برخوردار بوده‌اند و روش تابع شواهد قطعی با داشتن سطح زیر منحنی ROC برابر با ۰/۹۱۰ همراه با خطای استاندارد ۰/۰۴۴، نسبت به روش شواهد وزنی با سطح زیرمنحنی ROC برابر با ۰/۸۹۳ پیشگویی‌های بهتری داشته است. عوامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش متعددند و انتخاب مهم‌ترین عوامل در رخداد لغزش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش از دوازده عامل استفاده شد. به نظر می‌رسد عوامل دیگری مانند شدت بارندگی، بافت خاک و آب‌های زیرقشری (چشمه‌ها) و فشار هیدرواستاتیک ناشی از آنها، نیز از عوامل محرک و مسبب زمین‌لغزش در منطقه پژوهش‌اند که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرند. نیز پیشنهاد می‌شود پهناهای لغزشی بزرگ موجود در این منطقه به‌صورت ویژه و منفرد از لحاظ سرعت و جهت حرکت زمین‌لغزش پایش شوند تا جنبه‌های ناشناخته این پدیده آشکارتر شده و رفتارسنجی شود. همچنین پدیده زمین‌لغزش، مناطق مسکونی و راه‌های ارتباطی منطقه را تهدید می‌کند بنابراین باید اقدامات مدیریتی و تمهیدات لازم هرچه زودتر اعمال شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود که روش به‌کاررفته در این تحقیق در مسیرهای ارتباطی دیگر که با این پدیده مواجه‌اند بررسی و نتایج آن مقایسه شود.

منابع

- [۱] احمدی، حسن؛ و فیض‌نیا، سادات (۱۳۸۵). سازندهای دوره کوتاه‌تر (مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی)، چ ۲، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲] احمدی، حسن؛ اسمعیلی، اباذر؛ فیض‌نیا، سادات؛ و شریعت جعفری، محسن (۱۳۸۲). پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و تحلیل سلسله‌مراتبی. *منابع طبیعی ایران*، ۵۶ (۴): ۳۲۳-۳۳۴.
- [۳] اشقلی فراهانی، عقیل؛ تشنه‌لب، محمد؛ غیومیان، جعفر؛ و فاطمی عقدا، سید محمد (۱۳۸۴). بررسی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: منطقه رودبار). *مجله علوم دانشگاه تهران*، ۳۱ (۱)، ۴۳-۶۴.
- [۴] پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ و محمدی، مجید (۱۳۸۹). کاربرد سامانه اطلاعات مکانی و مدل احتمالی Weight of evidence در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی رسانه‌های اطلاعات مکانی GIS، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- [۵] حسین‌آبادی، مهدی؛ موسوی، مرتضی؛ و ناظمی، محمد (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه و زمین‌لغزش به روش منطق فازی در رشته‌کوه باقران (جنوب بیرجند). *جغرافیا و توسعه*، ۱۷ (۵۵)، ۱۵۳-۱۷۴.
- [۶] روستایی، شهرام؛ کشکی، مختار؛ و اشرفی، زهرا (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنتروپی شانون. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۴ (۷۱)، ۱۲۵-۱۵۰.
- [۷] زارع، محمد؛ جوری، محمدحسن؛ عسکری‌زاده، دیانا؛ سالاریان، تینا؛ و فخرقاسمی، مونا (۱۳۹۵). تحلیل خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز ماسوله با استفاده از تئوری دمپستر- شيفر (Dempster - Shafer) و GIS. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۷ (۱۳)، ۲۰۹-۲۱۷.
- [۸] شادفر، صمد؛ قدوسی، جمال؛ خلخالی، سید علی؛ و کلارستاقی، عطالله (۱۳۸۷). بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دومتغیره و LNRF در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز جنت رودبار). *پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی*، ۷۸، ۵۶-۶۶.
- [۹] میرزانی، صالح؛ و شهابی، هیمن (۱۳۹۸). ارزیابی و پیش‌بینی مکانی مخاطره زمین‌لغزش در جاده کوهستانی سندر- کامیاران با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی. *مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)*، ۶ (۴)، ۳۱۷-۳۴۰.
- [۱۰] قاسمیان، بهاره؛ عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ و شیرزادی، عطالله (۱۳۹۶). ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۳ (۳)، ۱۵-۳۶.
- [۱۱] مرادی، حمیدرضا؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ و مهدوی فر، محمدرضا (۱۳۸۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هراز). *علوم محیطی*، ۷ (۴)، ۱۲۹-۱۴۲.
- [۱۲] یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی؛ و زارع، غلامرضا (۱۳۹۱). به‌کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳، ۱۲۵-۱۴۲.
- [13] Akgun A., (2012), A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*, 9, 93-106.
- [14] Assilzadeh, H., Levy, J. K., & Wang, X. (2010). Landslide catastrophes and disaster risk reduction: A GIS framework for landslide prevention and management. *Remote Sensing*, 2(9): 2259-2273.
- [15] Bilifard, F., Jaboyedoff, M., & Satori, M. (2003). Rock fall hazard mapping a long a mountainous road in Switzerland using a GIS-based paramte rating approach. *The journal of Natural Hazard and Earth System Sciences*, 3, 431-438.
- [16] Bui, D. T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W., Mohammadi, A., Ahmad, B. Bin., Panahi, M., Hong, H., & Tian, Y. (2018). Landslide detection and susceptibility mapping by AIRSAR data using support vector machine and index of entropy models in Cameron Highlands. *Malaysia. Remote Sensing*, 10(10).
- [17] Cheng, Y.S., Yu, T.T. & Son, N.T. (2021). Random forests for landslide prediction in tsengwen river watershed, central taiwan. *Remote Sensing*, 13(2), 199.
- [18] Ercanoglu, M. & Gokceoglu, C. (2004) Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75(3-4), 229-250.
- [19] Intarawichian, N., & Dasananda, S., (2010). Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chaem watershed, northern Thailand. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 17(3): 55-65.
- [20] Jaiswal, P., van Westen, C. J., & Jetten, V. (2010). Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering geology*, 116(3-4), 236-250.

- [21] Lee, S., Ryu, J. H., & Kim, I. S. (2007). Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides*, 4(4), 327-338.
- [22] Pradhan, B. & Lee, S., (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environ Earth Sci*, 60:1037–1054.
- [23] Shahabi H., Hashim M., & Ahmad BB., (2015). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran. *Environ Earth Sciences*, 73:8647–8668
- [24] Shahabi, H., Ahmadi, R., Alizadeh, M., Hashim, M., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., Wolf, I.D. & Ariffin, E.H. (2023). Landslide Susceptibility Mapping in a Mountainous Area Using Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 15(12), p.3112.
- [25] Shen, H., Huang, F., Fan, X., Shahabi, H., Shirzadi, A., Wang, D., Peng, C., Zhao, X. & Chen, W. (2022). Improving the performance of artificial intelligence models using the rotation forest technique for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp.1-16.
- [26] Suzen, M.L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng. Geol.* 71, 303–321.
- [27] Tavakolifar, R., Shahabi, H., Alizadeh, M., Bateni, S.M., Hashim, M., Shirzadi, A., Ariffin, E.H., Wolf, I.D. & Shojae Chaeikar, S. (2023). Spatial Prediction of Landslides Using Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study of the Saqqez-Marivan Mountain Road in Iran. *Land*, 12(6), 1151.
- [28] Voigt, S.; Kemper, T.; Riedlinger, T.; Kiefl, R.; Scholte, K.; & Mehl, H. (2007). Satellite image analysis for disaster and crisis-management support. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 45, 1520–1528.
- [29] Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C. & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.
- [30] Yeh, H. H., Liu, P. L., & Synolakis, C. (Eds.). (2008). *Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup* (Vol. 10). World Scientific.
- [31] Yilmaz, I. (2010), Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine. *Environmental Earth Sciences*, 61(4), 821-836.
- [32] Zhang, Y. G., Chen, X. Q., Liao, R. P., Wan, J. L., He, Z. Y., Zhao, Z. X., ... & Su, Z. Y. (2021). Research on displacement prediction of step-type landslide under the influence of various environmental factors based on intelligent WCA-ELM in the Three Gorges Reservoir area. *Natural Hazards*, 107(2), 1709-1729.