

## Research Paper



## Accuracy of landslide potential hazard maps of Kurdistan dam watershed using Full Consistency Method (FUCOM), Best Worst Method (BWM) and Analytic Hierarchy Process (AHP) methods



Alireza Ildoromi\*<sup>1</sup>, Mehdi Sepehri<sup>2</sup>



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2023.55538.1682

**Reference to this article:** Ildoromi, Alireza; Sepehri, Mehdi; (2023). Accuracy of landslide potential hazard maps of Kurdistan dam watershed using Full Consistency Method (FUCOM), Best Worst Method (BWM) and Analytic Hierarchy Process (AHP) methods. *Hydrogeomorphology*, 10(37): 63 – 80.

## Keywords

Statistical models, hierarchical analysis, geological variables, Kurdistan.

Receive Date: 2023/02/22

Accept Date: 2023/04/30

Available: 2024/01/20

## A B S T R A C T

Identifying areas prone to landslides with proper accuracy is one of the primary measures in managing and reducing damages, especially in the watershed areas of dams. In this research, landslide sensitivity was zoned using statistical models in the Kurdistan Dam watershed and the most appropriate model was introduced. First, the studied area was determined and with field observations, the number of 9 landslides was recorded and a landslide distribution map was prepared. In the next step, the factors affecting the occurrence of landslides including geology, rainfall, land use, distance from the river, distance from the fault, slope and height were identified and then a map of these factors was prepared. To determine the rate of each of the effective factors in the occurrence of landslides, the map of each information layer of the effective factors is integrated with the distribution map of the landslide and using AHP, BWM and FUCOM statistical models, separate information layers are weighted and By overlapping different layers, the final landslide risk zoning maps were prepared and compared. The results showed that land use in AHP and BWM methods and rainfall lines, in addition to land use in FUCOM method, have the greatest effect and the criteria of height, distance from the fault and slope respectively in the three AHP, BWM and FUCOM methods have the least effect on the occurrence of landslides. The results of zoning maps showed that most of the landslides occurred in the northern half of the region, often in pasture lands, in slopes of more than 20%, and near faults Also, the results showed that the lithological variable has a great role on the occurrence of landslides in the studied area. In general, the results showed that in AHP and BWM methods, the number of required pairwise comparisons increases significantly with the number of compared parameters, and in this case, the uncertainty of opinions increases, which shows the superiority of the FUCOM method over It shows well in other ways.

\* Corresponding Author: Alireza Ildoromi

E-mail: [a.ildoromi@malayeru.ac.ir](mailto:a.ildoromi@malayeru.ac.ir)

1. Alireza Ildoromi, Professor of Natural Engineering Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University

2. Mehdi Sepehri, Doctor of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University ([sepehri\\_mehdi@ymail.com](mailto:sepehri_mehdi@ymail.com))

## Introduction

In recent years, the landslide susceptibility map made it possible to assess the landslide risk potential, which has been increasingly developed (Bara et al., 2019). In this regard, the multi-criteria decision analysis (MCDA) technique has been widely used to integrate, identify or rank control factors, especially in the analysis of natural hazards and adaptation. Determining the weight of criteria is one of the basic issues in multi-criteria analysis models, but choosing the appropriate method to determine the weight of criteria in multi-criteria decision-making problems is a more important step that complicates the decision-making process. The weight of the criteria can significantly affect the outcome of the decision-making process, therefore, it should pay special attention to the objective factors of the weight of the criteria (Pamokar et al., 2018). In recent years, there has been no study on landslide risk zoning with BWM and FUCOM multi-criteria decision-making methods. On contrary, many studies have been conducted with other decision-making methods such as AHP, ANP, and Shannon entropy. Bara et al. (2019) assessed landslides using sensitivity models and their comparison in the western region of the Indian continent by remote sensing. They concluded that a landslide occurs under the influence of a set of conditions and factors such as height, slope, lithology, and geomorphology. In addition to these external factors, precipitation, tectonics, and human activity are also very effective in the frequency of landslides. In this study, multi-criteria decision-making methods AHP, BWM, and FUCOM were used and their accuracy in determining the effective factors in the occurrence and risk zoning of landslides in the Kurdistan dam area has been evaluated.

## Methodology

In this research, the study area was first determined to achieve an accurate assessment of landslide risk zoning methods in the Kurdistan Dam area. Then, the number of 9 landslides was recorded and a landslide distribution map was prepared with field observations. In the next step, the factors affecting the occurrence of landslides in the research area including geology, rainfall, land use, distance from the river, distance from the fault, slope, and height were identified. Then, the map of these factors was prepared, and separate information layers were prepared for each of the effective features. To determine the rate of each of the effective factors in the occurrence of landslides, the map of each of the information layers of the effective factors was integrated with the distribution map of landslides, and the individual information layers were weighted using AHP, BWM, and FUCOM statistical models. In addition, by overlaying different layers, the final landslide risk zoning maps were prepared and divided into five classes with very low, low, medium, high, and very high-risk potential and the comparison and validity test was done.

## Results and Discussion

According to the results of the survey of zoning forms, the spatial spread of landslide hazard potential in the studied area is almost the same in all three methods and most landslides are concentrated in the northern half of the area. But in all three of the AHP, BWM, and FUCOM methods, each of the areas with very low to very high risk potential covers approximately 20% of the studied area. Generally, the number of required pairwise comparisons dramatically increases in AHP and BWM methods with the number of compared parameters. In this case, the uncertainty of the opinions increases and shows the superiority of FUCOM over other methods which is related to the limitation in assigning initial weights to related criteria. In the AHP and BWM methods, the decision makers used a limited 9-point table for this task, while in the FUCOM method, they used integer, decimal or pre-defined scale values for pairwise comparison of criteria. The results of the accuracy assessment and comparative comparison of the basin landslide risk prediction in the models, by examining the degree of confidence of the pairwise comparisons, show that the FUCOM method has more acceptable accuracy than the AHP and BWM methods.

## Conclusions

At present, due to the difference in environmental conditions and the methods used, the application of each landslide risk zoning model requires proving their validity and accuracy. The current study presents three methods of AHP, BWM, and FUCOM based on multi-criteria decision-making principles to prepare maps of landslide risk potential in Kurdistan. In the three mentioned methods, out of the seven mentioned parameters, the land use parameter in AHP and BWM methods and the parallel rainfall line parameter in the FUCOM method have the greatest effect on the occurrence of landslides, and the criteria of height, distance from the fault and slope respectively in the three methods AHP, BWM, and FUCOM have the least effect on the occurrence of landslides. In addition, the final maps obtained from the three mentioned methods show that 70% of the landslides are concentrated in the northern half of the region and mostly in pasture lands, which make up about 50% of the basin surface but lands with agricultural and garden use in total with 50% of the basin area include about 30% of landslides.

## References

- Bera, S., Guru, B., & Ramesh, V. (2019). Evaluation of landslide susceptibility models: A comparative study on the part of Western Ghat Region, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 39-52.
- Hong, H., Pradhan, B., Jebur, M.N., Bui, D.T., Xu, C. & Akgun, A. (2016). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 40-52.
- Pamucar, D., Stevic, Z., Sremac, S. (2018). A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM), *Symmetry*, 10, 393-402.



## مقاله پژوهشی



## ارزیابی دقت نقشه‌های پتانسیل خطر زمین لغزش حوضه آبریز سد کردستان با استفاده از روش‌های AHP، BWM و FUCOM

علیرضا ایلدرمی\*<sup>۱</sup>، مهدی سپهری<sup>۲</sup>



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت‌یو کامانز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: ایلدرمی، علی‌رضا؛ سپهری، مهدی، (۱۴۰۲). عنوان مقاله ارزیابی دقت نقشه‌های پتانسیل خطر زمین لغزش حوضه آبریز سد کردستان با استفاده از روش‌های AHP، BWM و FUCOM. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۷): ۸۰-۶۳.

DOI:10.22034/hyd.2023.55538.1682



## چکیده

کلیدواژه‌ها: مدل های آماری، تحلیل سلسله مراتبی، متغیر زمین شناسی کردستان.

شناسایی نواحی مستعد وقوع زمین لغزشها با دقت مناسب یکی از اقدامات اولیه در مدیریت و کاهش خسارات به ویژه در حوضه‌های آبریزدها محسوب می‌شود. در این پژوهش، حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های آماری در حوضه آبریز سد کردستان پهنه‌بندی و مناسب‌ترین مدل معرفی شد. ابتدا محدوده مورد مطالعه تعیین موقعیت و با مشاهدات میدانی تعداد ۹ لغزش ثبت و نقشه پراکنش زمین لغزش تهیه گردید. در مرحله بعد عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش شامل زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، شیب و ارتفاع شناسایی و سپس نقشه این عوامل تهیه شد. برای تعیین نرخ هر یک از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش، نقشه هریک از لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر با نقشه پراکنش زمین لغزش ادغام و با استفاده از مدل‌های آماری AHP، BWM و FUCOM لایه‌های اطلاعاتی جداگانه وزن‌دهی و با همپوشانی لایه‌های مختلف، نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تهیه و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که کاربری اراضی در روش‌های AHP و BWM و خطوط همباران بعلاوه کاربری اراضی در روش FUCOM بیشترین تأثیر و معیارهای ارتفاع، فاصله از گسل و شیب به ترتیب در سه روش AHP، BWM و FUCOM کمترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارند. نتایج بررسی نقشه‌های پهنه بندی نشان داد که بیشترین لغزش‌ها در نیمه شمالی منطقه و اغلب در اراضی مرتعی و در شیب‌های بیش از ۲۰ درصد و در نزدیکی گسل‌ها رخ داده است. همچنین نتایج نشان داد که متغیر سنگ‌شناسی بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه نقش زیادی دارد. به طور کلی نتایج نشان داد که در روش‌های AHP و BWM تعداد مقایسه‌های جفتی مورد نیاز به‌طور چشمگیری با تعداد پارامترهای مورد مقایسه افزایش و در این حالت، عدم اطمینان نظرات افزایش می‌یابد، که برتری روش FUCOM را نسبت به سایر روش‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

\* نویسنده مسئول: نام و نام خانوادگی نویسنده مسئول: علیرضا ایلدرمی

رایانامه: a.ildoromi@malayeru.ac.ir

۱- استاد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر

۲- دکتری مدیریت آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

در سال‌های اخیر امکان ارزیابی پتانسیل خطر زمین لغزش با استفاده از تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش فراهم و توسعه فزاینده‌ای پیدا کرده (برا و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۹) و به‌روشنی مؤثری جهت ارزیابی و مدیریت کاهش خطر تبدیل شده است (هونگ و همکاران، ۲۰۱۶). بر اساس گزارش وقایع زلزله‌های جهانی به‌طور متوسط زمین لغزش‌ها باعث میلیاردها دلار خسارت اقتصادی در کشورهایی چون ژاپن، هند، ایتالیا و آمریکا می‌شوند (باسو و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۲۵۳) و نشان می‌دهد که زمین لغزش مخاطره‌ای است که اغلب به فراوانی روی می‌دهد (بروکس و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲). به همین دلیل بیشتر تحقیقات دهه اخیر در رابطه با موضوع پهنه بندی خطر زمین لغزش انجام شده، اما مطالعات معدودی در زمینه استفاده از روش‌های تطبیقی در رابطه با ارزیابی زمین لغزشها و پهنه‌بندی و افزایش دقت نقشه‌های خطر زمین لغزش صورت گرفته است (کاستانزو و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۲۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خصوص پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره BWM و FUCOM مطالعه‌ای انجام نگرفته است، اما با سایر روش‌های تصمیم‌گیری همچون ANP، AHP و آنتروپی شانون مطالعات زیادی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است: ایلدرمی و همکاران (۲۰۱۸) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه‌ی آبریز عشوند با استفاده از مدل تراکم سطح، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، رگرسیون لجیستیک و منحنی ROC نشان دادند که به‌ترتیب مدل‌های رگرسیون لجیستیک و AHP مدل‌های مناسب پهنه‌بندی به شمار می‌آیند. مقصودی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی عوامل مؤثر بر مخاطره زمین لغزش‌های بالادست سد لتیان با استفاده از روش‌های ارزیابی آنتروپی و فازی نشان دادند که مدل آنتروپی از دقت بیشتری برخوردار است. بختیاری و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مقایسه و ارزیابی پهنه‌بندی زمین لغزش با سه روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی و تراکم سطح در در حوضه آبریز سیمره هومیان نشان دادند که روش شبکه‌ی عصبی دارای دقت قابل قبولی است. عابدینی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجان شرقی به این نتیجه رسیدند که در وقوع زمین لغزشها، عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین و کاربری اراضی کمترین نقش را داشته‌اند. نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی در حوضه آبریز کمه، استان اصفهان دریافتند که اپراتور فازی، بالاترین مقدار Qs را در میان سایر اپراتورهای فازی دارد. یوسفی و همکاران (۲۰۲۰) نیز خطر زمین لغزش را با استفاده از مدل ترکیبی ANP و منطق فازی در حوضه صلوات‌آباد سنندج مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که معیارهای شیب و زمین‌شناسی، بیشترین وزن را در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش به‌خود اختصاص داده‌اند. تیموری و همکاران (۲۰۲۰) در پهنه بندی حساسیت و اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی استان لرستان، نشان دادند که عوامل بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت وقوع زمین لغزش بودند. حجازی و همکاران (۲۰۲۱) در پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و تاپسیس در پایین دست سد سنندج، نشان دادند که مدل شبکه عصبی پرسپترون دارای خطای کمتر و با جغرافیای منطقه سازگاری بهتری دارد. اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۲۱)، در تحلیل مدل‌های تحلیل شبکه و منطق فازی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش جاده سراب - نیر، نشان دادند که میزان بارش و ارتفاع نسبت به سایر عوامل تأثیر بیشتری در ایجاد نواحی پرخطر ایفا می‌کنند روستایی و همکاران (۲۰۲۱) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، نشان داد که لایه‌های جهت شیب دامنه، کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، و فاصله از رودخانه بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش حوضه را داشته‌اند. ایلدرمی و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه آبریز سد کردستان نشان دادند که مدل‌های ارزش اطلاعاتی و LNRF از عملکرد بهتر و دقیق‌تری برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه برخوردارند. نجفی ایگدیر و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی کاربرد مدل‌های آماری دو متغیره در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز نالوچای نشان دادند که مدل تراکم سطح و ارزش اطلاعاتی از کارایی بالایی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در مناطق نیمه خشک و مرطوب برخوردار هستند.

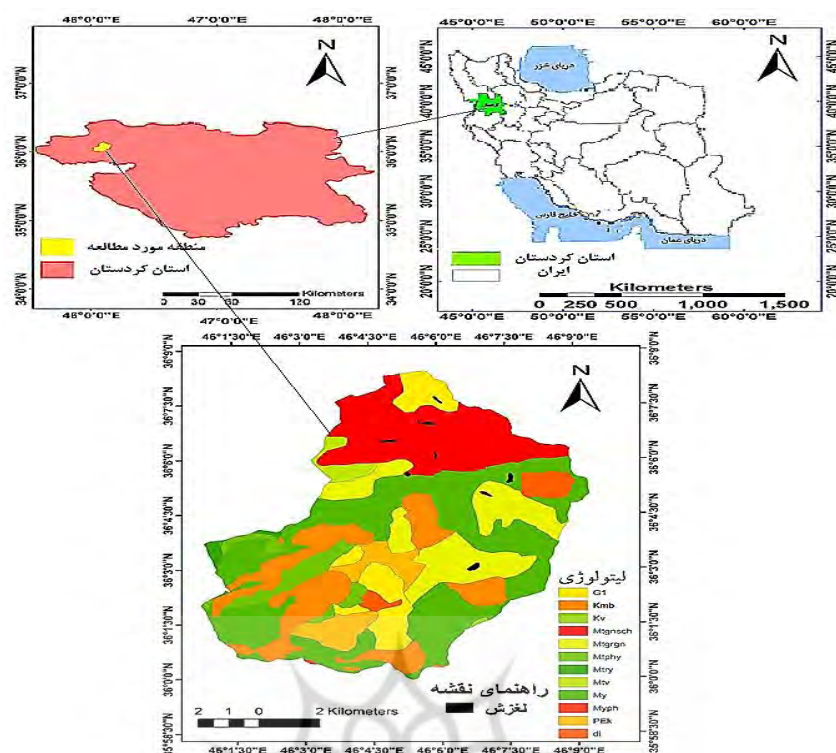
ژائو و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تئوری آنتروپی شانون، روش جامع فازی و فرایند سلسله مراتبی تحلیلی (AHP) برای مدل سازی ارزیابی حساسیت به زمین لغزش شهرستان ژنان (Zhen'an)، استان شانکسی (Shan'xi) نشان داند که روش آنتروپی شانون از دقت پیش بینی بیشتری در مقایسه با مدل های (AHP-fuzzy) برخوردار است. خان و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل های ماشین بردار و آنتروپی، در شمال پاکستان، به این نتیجه رسیدند که روش کمی ماشین بردار در شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر در رخداد لغزش دارای دقت قابل قبولی می باشد. تیان و همکاران (۲۰۱۸) از ترکیب روش های تاپسیس، ویکور و بدترین - بهترین به منظور انتخاب و کنترل مناسب تکنولوژی مواد آلی در سیستم های کشاورزی و کلر استفاده نمودند. نتایج آن ها نشان داد که روش بهترین - و بدترین از دقت بهتری در تحلیل عوامل مؤثر و تحلیل سلسله مراتبی برخوردار است. برا و همکاران (۲۰۱۹) در ارزیابی زمین لغزش با استفاده از مدل های حساسیت و مقایسه آن ها در منطقه غرب قاره هند، با سنجش از دور به این نتیجه رسیدند که یک زمین لغزش تحت تأثیر مجموعه ای از شرایط و عواملی مانند ارتفاع، شیب، لیتولوژی، ژئومورفولوژی و غیره رخ می دهد که می بایست عوامل دیگری چون بارش، تکتونیک و فعالیت انسانی مؤثر بر فراوانی وقوع زمین لغزش را با دقت کیفیت و ارجحیت مورد توجه و ارزیابی قرار داد. اکبری و همکاران (۲۰۲۱)، در یک پژوهشی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، روش بهترین بدترین (BWM) و روش سازگاری کامل (FUCOM) نقشه های پتانسیل آب زیرزمینی در دشت سرخس در شمال شرق ایران را در چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی کردند. نتایج نشان داد که روش FUCOM با دقت مناسب تری نسبت به روش های AHP و BWM نقشه تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی را تهیه می کند. بالینتا و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از روش های فازی و AHP و تکنیک های مختلف MCDA نقشه خطر سیل را تهیه نمودند. نتایج اعتبارسنجی با استفاده از داده های سیل تاریخی شهر ماریکینا نشان داد که روش ها و تکنیک های MCDA از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

نتایج تحقیقات انجام شده در ایران و خارج از کشور حاکی از آن است که در بیشتر پژوهش های انجام شده برای پهنه بندی خطر زمین لغزش به علت تفاوت شرایط محیطی و روش های به کار گرفته شده امکان مقایسه نتایج حاصله از الگوهای مختلف با یکدیگر نیست و به کارگیری هر یک از آن ها مستلزم اثبات صحت و دقت بیشتر آن از دیگری است. با توجه به ویژگی های زمین شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیمی حوضه سد کردستان و دقت زیاد مدل های آماری و با توجه به دقت و صحت کم روش های تجربی و تعیینی (زیرا هر یک از روش های تجربی برای منطقه خاصی ابداع شده اند) در این بررسی سعی شده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره AHP، BWM و FUCOM استفاده و دقت آن ها در تعیین عوامل مؤثر در رخداد و پهنه بندی خطر لغزش ارزیابی شود. با توجه به اینکه در حوضه مورد مطالعه وجود پارامترهای لازم و مؤثر برای رخداد زمین لغزش سبب افزایش خطر این پدیده در سطح حوضه شده، لذا پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه حساس سد کردستان می تواند گام مؤثری در جهت ارزیابی و اتخاذ مدل های مناسب حفاظتی در راستای تثبیت دامنه های لغزشی و کاهش رسوب ورودی حاصل از لغزشها به مخزن سد باشد

## مواد و روش

### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد کردستان با مساحت ۱۲۰۱۵ هکتار در شمال شرقی شهرستان سقز استان کردستان و در محدوده طول جغرافیای "۱۴° ۴۰' ۰۰" تا "۴۲° ۰۹' ۴۰" و عرض جغرافیایی "۳۶° ۰۴' ۰۰" تا "۳۶° ۰۰' ۰۸" واقع و حداکثر ارتفاع حوضه ۲۶۵۴ متر و حداقل ارتفاع ۱۶۰۲ متر از سطح دریا می باشد. میزان بارندگی حوضه به طور متوسط ۷۰۰ میلی متر و متوسط درجه حرارت آن ۱۱ درجه سانتی گراد است. حوضه مورد مطالعه در زون دگرگونی سنندج - سیرجان قرار گرفته و از واحدهای سنگی دگرگونی، آذرین و رسوبی شامل شیست، گرانیت، شیل، آهک، دولومیت و ماسه سنگ با گسل ها و شکستگی های فراوان تشکیل شده و دارای اقلیم سرد مرطوب کوهستانی است. (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان کردستان

Fig (1): The location of the study area in Iran and Kurdistan province

## روش تحقیق

در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با توجه به ویژگی‌های زمین شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی و عوامل محیط زیستی و انسانی تعداد ۷ عامل موثر در رخداد زمین لغزش شامل زمین شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته و لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc/GIS10.3 با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی - ۱:۵۰۰۰۰، زمین شناسی، ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۴۰۰۰۰:۱، تصاویر ماهواره‌ای + ETM و DEM (۵۰ متر) حوضه تهیه گردید. نقشه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی به وسیله نقشه رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه گسل از نقشه زمین شناسی و نقشه آبراهه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی تهیه شدند. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای + ETM و Landsat 8 سال ۲۰۲۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و براساس داده‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی استان کردستان تهیه و نقشه بارش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه طی دوره ۱۳۵۰ - ۱۳۹۹ و روش درون‌یابی کریجینگ حاصل شد. به منظور بررسی و ثبت لغزش‌های رخ داده در حوضه سد کردستان در محیط Arc/GIS10.3 ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای + ETM و Landsat 8 سال ۲۰۲۱ و نرم افزار Google Earth، مشاهدات میدانی و بررسی اسناد و مدارک موجود در اداره کل منابع طبیعی استان کردستان تعداد ۹ لغزش مشخص و سپس با استفاده از دستگاه GPS مختصات نقاط لغزشی به نرم‌افزار Arc/GIS منتقل و نقشه پراکنش زمین لغزش‌های حوضه تهیه شد. در مرحله بعد با امتیازدهی به عوامل مؤثر و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، BWM و FUCOM تمامی لایه‌ها جداگانه وزن‌دهی و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با روی هم‌گذاری لایه‌ها به وسیله نرم‌افزار Arc/GIS10.3 و Arc/map تهیه گردید. همچنین به منظور ارزیابی صحت و مقایسه تطبیقی برای پیش‌بینی خطر زمین لغزش حوضه در مدل‌ها، یافتن درجه اطمینان مقایسات جفتی، تشکیل بردارهای مقایسه، در روش BWM و مقایسه بسیار کمتر، اعتبارسنجی نتایج از طریق انحراف از حداکثر

سازگاری و روش سازگاری، (OMC) و مقایسه آن‌ها، در روش FUCOM و با در نظر گرفتن قابلیت انتقال‌پذیری در مقایسه جفت معیارها و حذف مسئله افزونگی مقایسات در جفت معیارها، در هر سه روش AHP، BWM و FUCOM انجام شده است.

### روش AHP

یکی از روش‌های کارآمد و مورد توجه در ارزیابی خطر زمین‌لغزش در تکنیک‌های MCDM، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) می‌باشد، که به شکل گسترده در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (بادی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). روش AHP یک روش تصمیم‌گیری اساسی برای رسیدگی به مسائل پیچیده است که در آن ابتدا مسائل پیچیده به ترتیب سلسله‌مراتبی طبقه‌بندی، مرتب و سپس برای دستیابی به مقادیر دقیق وزن بر اساس اهمیت آن‌ها درجه‌بندی می‌شوند (جنیفر و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷). که در فرآیند بعدی برای تخمین سهم مربوط به هر یک از عوامل کلیدی، وزن‌های مرتبط با هر یک از عوامل با استفاده از روش جمع رتبه‌ای محاسبه و سپس بردارهای ویژه ماتریس زوجی محاسبه و برای بهینه‌سازی روش‌های محاسبه وزنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. (جدول ۱).

جدول ۱: مقیاس مقایسه‌ای بین دو معیار در روش AHP (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۸)

Table 1: Comparative scale between two criteria in the AHP method (Yousfi et al., 2018)

ارزش	وضعیت مقایسه i نسبت به j	توضیح
۱	ترجیح یکسان	شاخص i نسبت به j اهمیت برابر دارد و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند.
۳	کمی مرجح	گزینه یا شاخص i نسبت به j کمی مهمتر است.
۵	خیلی مرجح	گزینه یا شاخص i نسبت به j مهمتر است.
۷	خیلی زیاد مرجح	گزینه i دارای ارجحیت خیلی بیشتری از j است.
۹	کاملاً مرجح	گزینه i از j مطلقاً مهمتر و قابل مقایسه با j نیست.
۶-۴-۲	بینابین	ارزش‌های بینابین را نشان می‌دهد مثلاً ۸، بیانگر اهمیتی زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ برای i است.

برای اطمینان از ماتریس مقایسه زوجی معرف، شاخص سازگاری با مقدار قابل قبول محاسبه و اعتبارسنجی شد. این شاخص به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Consistency Index} = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (1)$$

$$\text{Consistency Ratio} = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

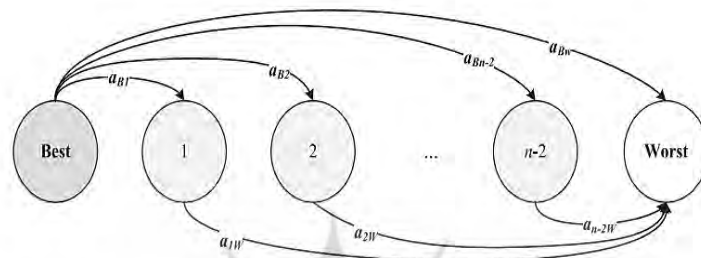
مقادیر ویژه و رتبه ماتریس مقایسه‌ای هستند و سپس نسبت سازگاری به صورت زیر محاسبه شد: n و  $\lambda_{\max}$  که در آن، که در آن، CI شاخص سازگاری است و RI شاخص تصادفی است که به تعداد معیارهای مورد استفاده در ماتریس زوجی وابسته است (یوسفی و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۳۹۸).

1. Badi et al  
2. Jenifer et al  
3. Yousefi et al



روش بهترین-بدترین (BWM)

BWM از روش های جدید تصمیم گیری چند معیاره است که توسط رضایی<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) معرفی شده است. اساس این روش اندازه گیری معیارها با مقایسه زوجی است. در BWM با تعیین اولویت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها و ترجیح کلیه معیارها بر بدترین ملاک با تعیین مقیاس بین ۱ تا ۹، وزن معیارها مشخص می شود. روش بهترین-بدترین برای اختصاص وزن مناسب به معیارها و زیرمعیارهای در نظر گرفته شده برای تصمیم گیری ارائه شده است. این روش بر مبنای مقایسات زوجی و بهره گیری از مدل برنامه ریزی خطی استوار است. در این روش به جای انجام مقایسات زوجی برای تمامی شاخص ها (معیارها و زیرمعیارها) با یکدیگر که در رویکرد تحلیل سلسله مراتبی انجام می گیرد، از بین شاخص ها بهترین و بدترین شاخص را انتخاب و بقیه شاخص ها را با این دو شاخص مقایسه نموده و در نهایت با استفاده از یک مدل ریاضی، وزن های مرتبط با هر شاخص تعیین می گردد. این روش دارای ویژگی هایی از قبیل کاهش تعداد مقایسات زوجی و قابلیت اتکای بیشتر نتایج به دست آمده است (شکل ۲).



شکل ۲: الگوی روش بهترین-بدترین  
Fig 2: Pattern of the best-worst method

- در این بررسی ساختار فرآیند BWM و گام های ابتدایی به شرح زیر هستند (رضایی، ۲۰۱۵):
- گام ۱: جمع آوری و شناسایی مشترک معیارها؛ تحلیل ادبیات، ایده های تخصصی و دیگر اشکال ممکن.
  - گام ۲: تعیین و انتخاب بهترین و بدترین پارامترها براساس ایده ها و دیدگاه های متخصصان.
  - گام ۳: طراحی ماتریس ارجحیت با افزودن اعداد بین ۱ تا ۹ براساس مقایسه بهترین معیار نسبت به سایر موارد.  

$$A_j = (a_{1B}, a_{2B}, a_{3B}, \dots, a_{nB}) \tag{3}$$
  - گام ۴: طراحی ماتریس ارجحیت با افزودن اعداد بین ۱ تا ۹ بر اساس مقایسه بدترین معیار نسبت به سایر موارد.  

$$A_j = (a_{1W}, a_{2W}, a_{3W}, \dots, a_{nW}) \tag{4}$$
  - گام ۵: از طریق برآورد وزن های نهایی و بهینه  $W^*1, W^*2, W^*3, \dots, W^*n$  با حل مدل بهینه سازی زیر، یافتن مقدار نسبی پارامترها صورت می پذیرد.

$$\text{Min}_{\text{maz}_i} = \left\{ \left| \left( \frac{W_B}{W_j} \right) - a_{Bj} \right|, \left| \left( \frac{W_j}{W_w} \right) - a_{jw} \right| \right\} \tag{5}$$

منوط به  $\sum_j w_j = 1$

در این روش تبدیل مدل (۳) به مدل (۴) برای یافتن وزن های بهینه  $(W^*1, W^*2, W^*3, \dots, W^*n)$  و مقدار سطح اطمینان بهینه  $\xi^*$  آسان است.

$$\text{Min } \xi \tag{6}$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \text{ for all } j \quad \left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jw} \right| \leq \xi \text{ for all } j \quad \sum_j^w W_j = 1$$

$$W_j \geq 0 \text{ for all } j$$

که در آن  $W_B$  و  $W_w$  وزن‌ها را به ترتیب، از لحاظ بهترین و بدترین پارامترها نشان می‌دهند.  $a_{Bj}$  اولویت نسبت به معیار  $j$  برای مناسب‌ترین (بهترین) معیار و  $a_{jw}$  اولویت نسبت به کم‌اهمیت‌ترین (بدترین) معیار برای معیار  $j$  می‌باشند. گام ۶: برآورد نسبت سازگاری (CR) برای بررسی درجه قابلیت اطمینان مقایسات جفتی با استفاده از معادله (۴). شاخص سازگاری (CI) همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، درست مانند فرآیند AHP به ارزیابی مقدار CR کمک می‌کند. مقدار CR (نزدیک به صفر) به معنی سازگاری بالاتر است، در حالی که مقدار بالاتر CR (نزدیک به یک) نشان‌دهنده سازگاری پایین‌تر مقایسه جفتی است.

$$\text{Consistency Ratio} = \frac{\xi}{CI} \quad (7)$$

جدول ۲: مقادیر CI برای روش BWM  
Table 2: CI values for BWM method

$a_{BW}$	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
CI(max $\xi^*$ )	۰	۰/۴۴	۱	۱/۶۳	۲/۳	۳	۳/۷۳	۴/۴۷	۵/۲۳

### روش سازگاری کامل (FUCOM)

روش FUCOM مبتنی بر اصول مقایسه زوجی معیارها، اعتبارسنجی نتایج از طریق انحراف از حداکثر سازگاری و روش سازگاری کامل است که با استفاده از آن می‌توان به تعداد کم مقایسات زوجی معیارها (فقط  $n-1$  مقایسه) و اعتبارسنجی نتایج را به خوبی انجام داد. (پاموکار و همکاران، ۲۰۱۸). در روش سازگاری (FUCOM) با اجرای یک الگوریتم ساده با قابلیت اعتبارسنجی مدل با تعیین انحراف از سازگاری کامل (DFC) مقایسه‌ها با دقت بیشتری انجام می‌شود و به دلیل کاهش ذهنیت تصمیم‌گیرنده یکی از دقیق‌ترین و شناخته شده‌ترین مدل‌های ذهنی محسوب می‌شود. چرا که به تعداد کمی از مقایسه‌های زوجی معیارها نیاز داشته، امکان تعریف DFC مقایسه و ارزیابی شرایط گذر را به دقت کمی سازی می‌نماید. در مقایسه زوجی معیارها در FUCOM ارائه یک مدل جدید برای تعیین وزن معیارها در بررسی لغزش هدف اصلی است که فقط به  $n-1$  نیاز دارد. لذا با توجه به مقایسه زوجی معیارها با اعمال هر مقیاس (اعم از عدد صحیح یا اعشاری) در این مدل امکان محاسبه درجه سازگاری مقایسه و اعتبارسنجی نتایج با رعایت کامل شرایط گذر ریاضی فراهم می‌شود. بعلاوه محاسبه مقادیر قابل اعتماد ضرایب وزنی معیارهایی را که به قضاوت عقلانی کمک می‌کنند، امکان پذیر می‌سازد. بنابراین در مقایسه روش FUCOM با سایر روش‌های ذهنی رایج مانند BWM و AHP به نظر می‌رسد که مزایای FUCOM در رابطه با مدل‌های ذهنی موجود بیشتر باشد. به طور کلی روند به‌دست آوردن وزن معیارهای مختلف به شرح زیر است:

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (8)$$

که در آن  $n$  نشان‌دهنده رتبه معیار مشاهده شده می‌باشد. اگر تصمیمی برای وجود دو یا چند معیار از یک معنی مشابه وجود داشته باشد، علامت مساوی به جای " $>$ " بین این معیارها در عبارت قرار می‌گیرد (رابطه ۸).

گام ۲: تعیین بردارهای اهمیت مقایسه‌ای معیارهای ارزیابی:

$$\phi = \phi_{1/2}, \phi_{2/3}, \dots, \phi_{k/(k+1)} \quad (9)$$

که در آن  $\phi_{k/(k+1)}$  منعکس‌کننده مقداری (اولویت) است که معیار رتبه  $j(k)$  نسبت به معیار رتبه  $j(k+1)$  دارد.

گام ۳: مقادیر نهایی وزن معیارهای ارزیابی تعیین می‌شوند  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  که باید دو محدودیت داشته باشد:

محدودیت ۱: نسبت وزن معیار برابر با اهمیت نسبی معیار مشاهده شده، یعنی:

$$\frac{W_k}{W_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (10)$$

محدودیت ۲: وزن های محاسبه شده باید شرایط انتقال پذیری ریاضی را برآورده کنند، یعنی:

$$\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)} \quad (11)$$

گام ۴: تعریف مدلی برای تعیین اوزان نهایی معیار.

$$\min_x \quad (12)$$

s.t.

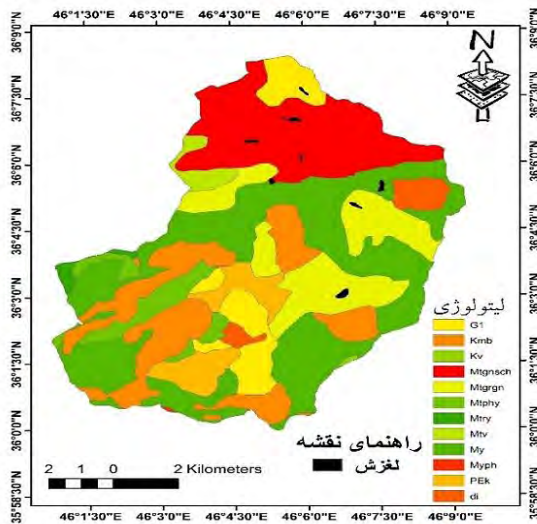
$$\left| \frac{W_{j(k)}}{W_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi \quad \forall_j \quad \left| \frac{W_{j(k)}}{W_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi \quad \forall_j \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1, \forall_j$$

$$w_j \geq 0, \forall_j$$

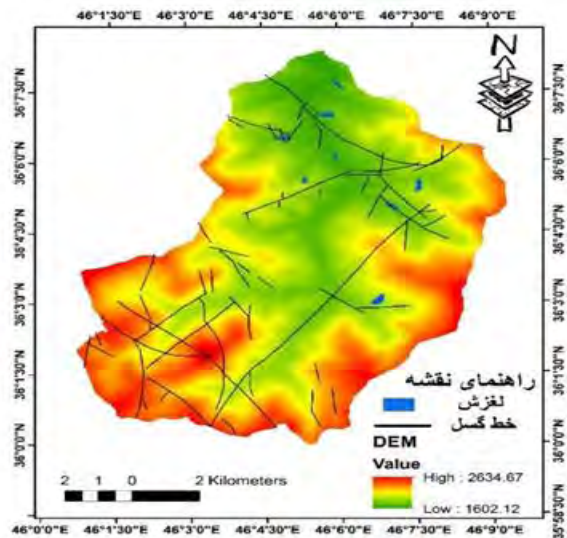
گام ۵: محاسبه مقادیر نهایی ارزیابی معیارها / زیرمعیارها  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  T.

### یافته ها

بررسی نقشه های عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش های حوضه سد کردستان نشان داد که هریک از معیارها با درجه و وزن مشخص در رخداد لغزش های حوضه موثرند. به طوری که تحلیل شرایط لیتولوژیکی محدوده مورد مطالعه نشان داد که لغزشها در واحدهای سنگی نظیر فلدسپات، کوارتز، میکاشیست، شیست سبز، فیلیت، متاریولیت و فیلونیت رخ داده است. بررسی نقشه لیتولوژی و لغزش و مشاهدات میدانی نشان می دهد که سنگ های دگرگونی میکا شیست، شیست سبز و فیلیت به علت خاصیت ورقه ورقه شدن و جهت یافتگی باعث لغزش لایه های فوقانی در حوضه شده اند. (شکل ۳). بررسی رابطه بین فاصله از گسل و وقوع زمین لغزش، نشان می دهد که کل زمین لغزش های رخ داده در فواصل کمتر از ۱۰۰۰ متری از گسل مشاهده شده و از آن فاصله به بعد لغزشی رخ نداده و نشان دهنده تأثیر مستقیم گسل های منطقه در وقوع زمین لغزش است که این موضوع با توجه به قرارگیری منطقه در زون سندج-سیرجان که فعال ترین و نا آرام ترین زون ساختمانی ایران به شمار می آید، منجر به پویایی و ناپایداری روند رخداد زمین لغزش در محدوده و نهایتاً به دلیل لرزه خیزی و به دنبال آن وقوع زمین لغزش در منطقه شده است. (شکل ۴). از لحاظ ارتفاعی نیز زمین لغزش ها در ارتفاع ۲۲۰۰ متری رخ داده اند و در طبقات بالاتر از آن، هیچ زمین لغزشی گزارش نشده است. از این رو می توان به تأثیر بسیار زیاد متغیر سنگ شناسی به دلیل غالب بودن و گسترش سنگ های دگرگونی جهت یافته و ورقه ای در این طبقه ارتفاعی بر وقوع زمین لغزش پی برد (شکل ۵). نتایج حاصل از بررسی بارش نیز نشان می دهد که بیشترین وقوع لغزش ها در محدوده همباران ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی متری رخ داده است و در طبقات ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی متری و ۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی متری لغزش های کمتری اتفاق افتاده است (شکل ۶). بررسی عامل شیب نیز نشان دهنده این است که تقریباً ۲۰ درصد زمین لغزش ها در شیب های ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ درصد رخ داده اند. این در حالی است که بیشترین مساحت منطقه را طبقات با شیب بیش از ۲۰ درصد پوشش می دهد و حدود ۸۰ درصد لغزش ها در این طبقات واقع شده اند. بررسی ها نشان می دهد که با فاصله از جاده بر تراکم زمین لغزش افزوده می شود و بیشتر زمین لغزش ها در فواصل بیش از ۵۰ متری از جاده مشاهده می شوند که علت آن را می توان به موقعیت جاده های منطقه مورد مطالعه در نواحی نسبتاً هموار و مسطح با شیب کم نسبت داد؛ و نشان می دهد که در صورت وجود جاده در نواحی با شیب زیاد و مرتفع احتمال تأثیر این پارامتر (جاده) بر وقوع زمین لغزش افزایش می یابد.

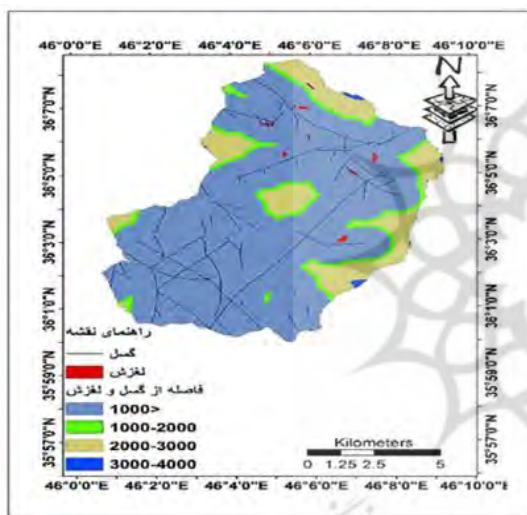


شکل ۴: نقشه مدل رقمی ارتفاعی و لغزش‌های حوضه

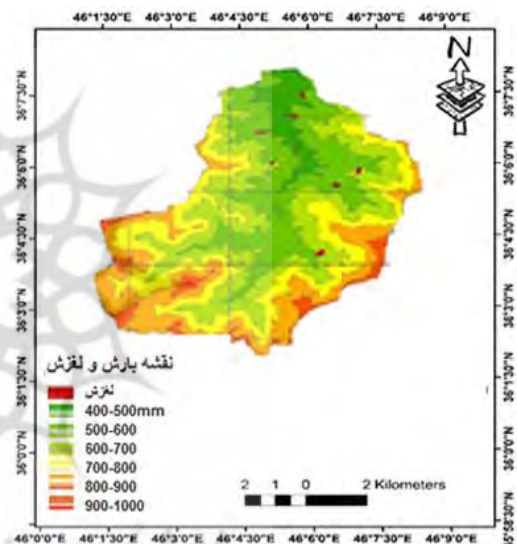


شکل ۳: نقشه لیتولوژی و لغزش حوضه

Fig 4: Map of the elevation digital model and landslides of the basin Fig 3: Lithology and landslide map of the basin



شکل ۶: نقشه بارش و لغزش حوضه



شکل ۵: نقشه فاصله از گسل و لغزش حوضه

Fig 6: Rainfall and landslide map of the basin

Fig 5: Map of the distance from the fault and of the basin landslide

نتایج بررسی روش‌های پهنه‌بندی نشان می‌دهد که روش FUCOM بر اساس یک رابطه ریاضی و تا حدی ساده نسبت به سایر روش‌های دیگر به خوبی از توانایی قابل قبولی در محاسبه ضرایب وزنی معتبر برخوردار بوده و نتایج قابل اعتماد و قضاوت منطقی و معتبری به منظور تصمیم‌گیری ارائه داده است. بنابراین کاربرد این مدل و دقت قابل قبول آن نسبت به روش‌های سنتی دیگر مانند روش‌های AHP، BWM، قابل توجه است. بعلاوه نتایج بیانگر این است که ضرائب وزنی معیارهای لغزش در روش BWM تا حدودی نزدیکتر به روش FUCOM بوده و تفاوت بسیاری با داده‌های روش AHP دارند. در روش FUCOM برای محاسبه وزن‌های معیارهای یک مسئله با  $n$  معیار (معیارهای پتانسیل خطر زمین لغزش) فقط نیاز به  $n-1$  مقایسه زوجی از معیارها دارد، در حالی که برای روش‌های AHP و BWM، این مقایسه جفتی به ترتیب به  $2n-3$  و  $(n-1)/2$  خواهد رسید. به طور کلی، در روش‌های AHP و BWM تعداد مقایسه‌های جفتی مورد نیاز به طور چشمگیری با تعداد پارامترهای مورد مقایسه افزایش یافته و در این حالت، عدم اطمینان نظرات افزایش می‌یابد. که این موضوع برتری دیگر روش FUCOM را نسبت به سایر روش‌ها که مربوط به محدودیت در تخصیص وزن‌های اولیه به معیارهای مرتبط است را به خوبی نشان می‌دهد. نتایج بررسی جدول (۳) نشان می‌دهد که روش FUCOM مقادیر بهینه ضرایب وزن را با دقت مناسب و قابل قبولی ارائه داده و تأثیر ذهنی و ناهم‌هنگی ترجیحات کارشناسان به مقادیر نهایی وزن معیارها را به خوبی کاهش داده است. با

مقایسه روش FUCOM با روش های دیگر مشخص شد که استحکام و عینیت مدل FUCOM یکی از مهمترین مزایای است که برای بدست آوردن همان نتایج است که در مدل های BWM و AHP تنها با انجام مقایسه n-1 معیارها انجام می شود. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که در مقیاس های اندازه گیری مختلف به منظور نمایش ترجیحات کارشناسان، مدل FUCOM از انعطاف پذیری، دقت مناسب تر و کاربرد قابل قبولی نسبت به دوروش دیگر برخوردار است. چراکه در روش های AHP و BWM، تصمیم گیرندگان از یک جدول ۹ نقطه ای محدود برای این کار استفاده کرده اند، در حالی که در روش FUCOM، تصمیم گیرندگان از مقادیر صحیح، اعشاری یا مقادیر مقیاس از پیش تعریف شده برای مقایسه جفتی معیارها استفاده نموده اند، که این وضعیت و نتایج در جدول (۳) به خوبی ارائه شده است. به طوری که نتایج ارزیابی صحت و مقایسه تطبیقی پیش بینی خطر زمین لغزش حوضه در مدل ها، با بررسی درجه اطمینان مقایسات جفتی، تشکیل بردارهای مقایسه، در روش BWM و مقایسه بسیار کمتر از طریق انحراف از حداکثر سازگاری و روش سازگاری (OMC) و مقایسه آن ها، در روش FUCOM و با در نظر گرفتن قابلیت انتقال پذیری در مقایسه جفت معیارها و حذف مسئله افزونگی مقایسات در جفت معیارها، در هر سه روش AHP، BWM و FUCOM نشان می دهد که روش FUCOM از دقت قابل قبول تری نسبت به روش های AHP، BWM، برخوردار است. نتایج نشان داد که در سه روش مذکور از بین هفت پارامتر ذکر شده، کاربری اراضی در روش های AHP و BWM و پارامتر خطوط همباران بعلاوه کاربری اراضی در روش FUCOM بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارا می باشند و معیارهای ارتفاع، فاصله از گسل و شیب به ترتیب در سه روش AHP، BWM و FUCOM، کمترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارند. با قرار دادن موقعیت زمین لغزش ها روی نقشه های پهنه بندی نهایی، مشخص شد که از ۹ زمین لغزش رخ داده در منطقه تقریباً پنج زمین لغزش در پهنه خطر زیاد و خیلی زیاد، دو زمین لغزش در پهنه خطر متوسط و دو زمین لغزش در پهنه خطر کم واقع شده و بیشترین لغزش ها در نیمه شمالی منطقه و اغلب در اراضی مرتعی و در شیب های بیش از ۲۰ درصد و در نزدیکی گسل ها رخ داده که بیشترین تطابق را با روش FUCOM را داراست. همچنین نتایج نشان داد که متغیر سنگ شناسی بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه نقش زیادی دارد. به طور کلی نتایج نشان داد که در روش های AHP و BWM تعداد مقایسه های جفتی مورد نیاز به طور چشمگیری با تعداد پارامترهای مورد مقایسه افزایش و در این حالت، عدم اطمینان نظرات افزایش می یابد، در حالی که این وضعیت در روش FUCOM به حداقل رسیده که برتری روش FUCOM نسبت به سایر روش ها را نشان می دهد (جدول ۳).

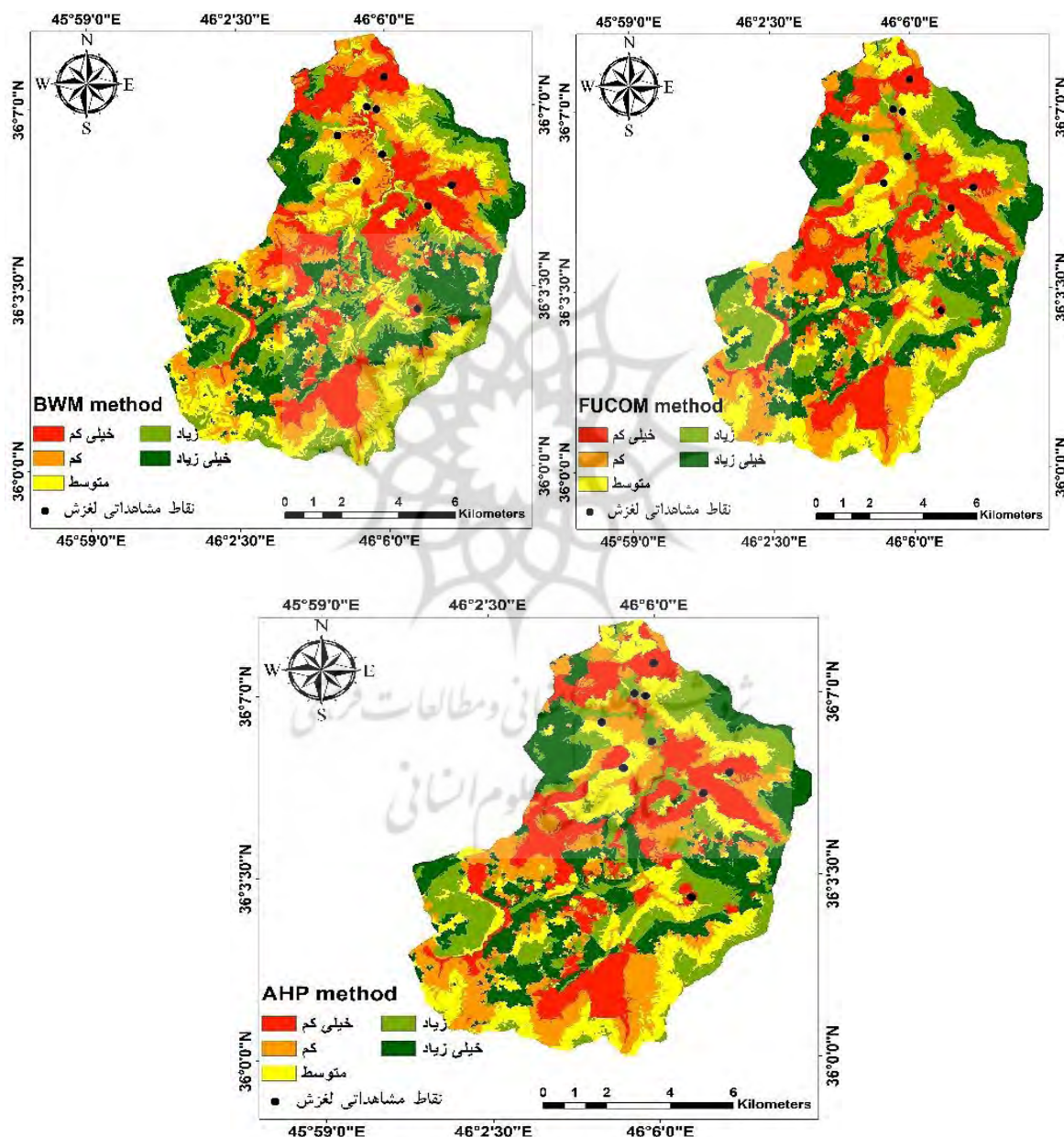
جدول ۳: وزن های اختصاص داده شده به هر پارامتر با استفاده از روش های AHP، BWM و FUCOM

Table 3: Weights assigned to each parameter using AHP, BWM and FUCOM methods

متغیرهای مربوط به پهنه بندی خطر زمین لغزش	وزن (AHP)	وزن (BWM)	وزن (FUCOM)
ارتفاع	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۱۷
شیب	۰/۰۵	۰/۱۴۴	۰/۰۸
فاصله از گسل	۰/۰۹	۰/۰۶۴	۰/۱۴
فاصله از جاده	۰/۱۹	۰/۰۷۲	۰/۱۴
خطوط همباران	۰/۰۶	۰/۰۹۶	۰/۵
کاربری اراضی	۰/۳۳	۰/۲۸۸	۰/۲۹

بررسی نقشه های پتانسیل خطر زمین لغزش (شکل ۷) که براساس روش کلاس بندی گشتاورهای طبیعی (Natural breaks) در محیط GIS، تهیه شده اند، نشان می دهد که بیشترین لغزش ها در نیمه شمالی منطقه و بیشتر در اراضی مرتعی متمرکز شده، که حدود ۵۰ درصد سطح حوضه را شامل شده و نشان می دهد که حدود ۷۰ درصد لغزش ها در این محدوده رخ داده است. اما اراضی با کاربری زراعی و باغ به طور مجموع ۵۰ درصد از سطح حوضه را در بر می گیرند و حدود ۳۰ درصد لغزش ها را شامل می شوند. علت آن را می توان فعالیت های انسانی نظیر بوته کنی در مراتع و چرای بیش از حد دام و تخریب مراتع و از بین رفتن پوشش گیاهی طبیعی عنوان کرد، که سست شدن خاک های منطقه در نتیجه تخریب پوشش گیاهی، منجر به ناپایداری دامنه ها شده است. نتایج بررسی روش های AHP،

FUCOM و BWM، در ارزیابی مساحت پنج پهنه خطر همراه با تعداد لغزش‌های رخ داده در هر کلاس در منطقه مورد مطالعه (جدول ۴) حاکی از آن است که در هر سه روش AHP، BWM و FUCOM، هر کدام از پهنه‌ها با پتانسیل خطر خیلی کم تا خیلی زیاد تقریباً ۲۰ درصد منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. هر چند که نتایج بررسی اشکال پهنه‌بندی نشان می‌دهند که گسترش مکانی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه در هر سه روش تقریباً یکسان و بیشترین لغزش‌ها در نیمه شمالی منطقه متمرکز شده‌اند، اما در روش‌های AHP، BWM تنها کاربری اراضی و در روش FUCOM، علاوه بر کاربری اراضی، میزان بارندگی در منطقه به عنوان مهمترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش معرفی شده‌اند که دقت نظر روش FUCOM را به اثبات می‌رساند؛ چراکه بیشترین وقوع لغزشها در محدوده همباران ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متری در مراتع رخ داده و در طبقات ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متری و ۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متری لغزش‌های کمتری اتفاق افتاده که به دلیل پوشش خاکی سطحی و کم ضخامت است.



شکل ۷: نقشه‌های پتانسیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های AHP، BWM و FUCOM

Fig 7: Landslide risk potential maps using AHP, BWM and FUCOM methods

جدول ۴: ارتباط مساحت و تعداد لغزشهای موجود در پهنه های پتانسیل خطر زمین لغزش با استفاده از روش های AHP، BWM و FUCOM

Table 4: The relationship between the area and the number of landslides in the landslide risk potential zones using AHP, BWM and FUCOM methods

FUCOM		BWM		AHP		کلاس
تعداد لغزشها	مساحت (درصد)	تعداد لغزشها	مساحت (درصد)	تعداد لغزشها	مساحت (درصد)	
-	۲۰	-	۱۹/۸	-	۱۹/۹	خیلی کم
۲	۱۹/۸	-	۲۰/۴	۲	۱۹/۷	کم
۲	۲۰/۲	۲	۱۹/۹	۲	۲۰/۳	متوسط
۲	۱۹/۹	۴	۲۰/۳	۲	۱۹/۹	زیاد
۳	۲۰/۱	۳	۱۹/۶	۳	۲۰/۲	خیلی زیاد

### بحث و نتیجه گیری

در حال حاضر به کارگیری هر یک از مدل های پهنه بندی خطر زمین لغزش به علت تفاوت شرایط محیطی و روش های به کار گرفته شده مستلزم اثبات صحت و دقت بیشتر آنها می باشد. در سال های اخیر در کنار موضوع توسعه و گسترش روش ها و مدل های پهنه بندی خطر زمین لغزش به همراه اصلاح آنها، روش های ارزیابی و مقایسه تطبیقی و صحت و دقت مدل های آماری بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این بررسی براساس مقایسه نتایج روش جدید FUCOM با روش های ذهنی BWM و AHP نشان داده شد که از بین تمام نمونه هایی که در آنها مقایسه انجام شده، می توان نتیجه گرفت که روش FUCOM نتایج بهتری نسبت به سایر روش ها به خصوص از نظر سازگاری ارائه داده است. با این حال، باید این واقعیت را در نظر گرفت که تفاوت زیادی در تعداد مقایسه معیارها، به خصوص در رابطه با روش AHP وجود دارد. بنابراین، می توان انتظار داشت که در موارد خاص ارائه نتایج متفاوت، به عنوان یک مشکل اساسی تنها با به کار بستن روش های مختلف حل می شود. هر چند که در مقایسه با روش های ارائه شده در این بررسی، چنین موردی وجود نداشت، اما چنین احتمالی را نباید از بررسی خارج نمود. بنابراین همانند سایر مدل های ذهنی AHP، BWM، در مدل FUCOM نیز برای تعیین وزن معیارها تأثیر ذهنی تصمیم گیرنده بر مقادیر نهایی وزن معیارها به شکل مؤثری وجود دارد، و این موضوع به ویژه در مراحل اول و دوم FUCOM که در آن تصمیم گیرندگان معیارها را بر اساس ترجیحات شخصی خود رتبه بندی می کنند و مقایسه های زوجی معیارهای رتبه بندی شده را انجام می دهند به خوبی مشهود است. با این حال، در بررسی معیارهای رخداد زمین لغزش سد کردستان به خوبی مشخص شد که بر خلاف مدل های ذهنی تحلیل شده، روش FUCOM تغییرات قابل توجه کمتری در مقادیر به دست آمده از ضرایب وزنی معیار نسبت به مقادیر بهینه ارائه داده است. چراکه در تعداد زیادی از آزمون ها مقادیر به دست آمده از ضرایب وزنی معیارها برابر با مقادیر بهینه آنها بود و در نتیجه، انحراف  $DFC \approx 0$  شده است. به طور کلی نتایج نشان می دهد که الگوریتم FUCOM باعث انحرافات اضافی ناچیز می شود و در نهایت منجر به نتایج قابل اطمینان تری می گردد که در بسیاری از موارد، برابر با مقادیر بهینه هستند. نتایج نشان داد که در سه روش مذکور از بین هفت پارامتر ذکر شده، پارامتر کاربری اراضی در روش های AHP و BWM و پارامتر خطوط همباران بعلاوه کاربری اراضی در روش FUCOM بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارا می باشند و مشخص شد که از ۹ زمین لغزش رخ داده در منطقه تقریباً پنج زمین لغزش در پهنه خطر زیاد و خیلی زیاد، دو زمین لغزش در پهنه خطر متوسط و دو زمین لغزش در پهنه خطر کم واقع شده و بیشترین لغزشها در نیمه شمالی منطقه و اغلب در اراضی مرتعی و در شیب های بیش از ۲۰ درصد و در نزدیکی گسل ها رخ داده که بیشترین تطابق را با روش FUCOM را داراست. همچنین نتایج نشان داد که متغیر سنگ شناسی بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه نقش زیادی دارد. به طور کلی نتایج نشان داد که در روش های AHP و BWM تعداد مقایسه های جفتی مورد نیاز به طور چشمگیری با تعداد پارامترهای مورد مقایسه افزایش و در این حالت، عدم اطمینان نظرات افزایش می یابد، در حالی که این وضعیت

در روش FUCOM به حداقل رسیده که برتری روش FUCOM نسبت به سایر روش‌ها را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود به منظور تثبیت زمین لغزشها بیشترین توجه به وضعیت تغییر کاربری اراضی شده و مدل‌های دیگری در پایش و دقت سنجی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش جهت برنامه‌ریزی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه توصیه می‌شود تا این مدل‌ها از طریق کاربرد نظریه‌های عدم قطعیت مختلف، مانند مجموعه‌های نوتروسوفیک و فازی، اعداد ناهموار، تئوری خاکستری و غیره گسترش یابد. چراکه گسترش روش FUCOM با استفاده از نظریه‌های عدم قطعیت، امکان پردازش داده‌ها با دقت مناسب را برای متخصصان فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که در این روش‌ها ترجیحات و مقایسه‌ها بر اساس داده‌هایی انجام می‌شود که تا حدی یا حتی بسیار ناشناخته هستند و این موضوع امکان بیان آسان‌تر ترجیحات تصمیم‌گیرنده را فراهم می‌کند و همزمان به ذهنیت و کمبود اطلاعات در مورد پدیده‌های خاص کمک فراوانی می‌نماید، که می‌بایست به خوبی مورد توجه قرار گیرد.

#### منابع

- Abedini, M., Ranjbari, A., & Mokhtari, D. (2020). Landslide risk analysis using ANP and LR models in GIS environment (Case study of Ghoshadagh-Arasbaran fault zone in East Azerbaijan), *Quantitative Geomorphological Research Paper*, 8(1), 70-88. (in persian).
- Akbari, M., Meshram, S.G., Krishna, R., Pradhan, B., Shadeed, S., Khedher, K.M., Sepehri, M., Ildoromi, A.R., Alimerzaei, F., & Darabi, F. (2021). Identification of the groundwater potential recharge zones using MCDM models: full consistency method (FUCOM), best worst method (BWM) and analytic hierarchy process (AHP), *Water Resour Manage*, 35(14):4727-4745. (in persian).
- Asghari Saraskanroud, S., Palizban, D., Emami, H., & Qala, A. (2021). Evaluation of Fuzzy Logic and Network Analysis Models for Mapping Landslide Sensitivity Case Study: (Sarab - Nir Road), *Geography and Planning Journal*, 24(73), 1-22. (in persian).
- Badi, I., & Abdulshahed, A. (2019). Ranking the Libyan airlines by using full consistency method (FUCOM) and analytical hierarchy process (AHP). *Operational Research in Engineering Sciences, Theory and Applications*, 2(1), 1-14. (in persian).
- Balbenta, M.J., Capistrano, A.D.P., David, J.T., Tenaja, H.T., Poso, F.D., & Solomon, M.B. (2021). Generation of flood hazard maps in Marikina City using GIS-MCDA interval rough AHP (IR'AHP). In: *IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*.
- Basu, T., & Pal, S. (2019). RS-GIS based morphometrical and geological multi-criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 63(3), 1253-1269.
- Bera, S., Guru, B., & Ramesh, V. (2019). Evaluation of landslide susceptibility models: A comparative study on the part of Western Ghat Region, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 39-52.
- Broeckx, J., Vanmaercke, M., Duchateau, R., & Poesen, J. (2018). A data-based landslide susceptibility map of Africa, *Earth-Science Reviews*, 185, 102-121.
- Bakhtiari, M.; Gomeh, Z., & Memarian, H. (2019). Comparison of three methods of fuzzy hierarchical analysis process, artificial neural network and surface density in quantitative evaluation and landslide sensitivity zoning in GIS environment (Case study: Seymareh Homian watershed), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(27), 19 to 40 (in persian).
- Costanzo, D., E. Rotigliano, C. Irigaray, J. D. Jimenez-Pervarez, & Chacon, J. (2012). Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain), *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12, 327-340.



- Hong, H., Pradhan, B., Jebur, M.N., Bui, D.T., Xu, C., & Akgun, A. (2016). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines, *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 40-52.
- Hijazi, A., Rezaei Moghadam, M., H., & Naseri, A. (2020). Landslide hazard zoning using artificial neural network models and TOPSIS downstream of Sanandaj Dam, *Hydrogeomorphology Journal*, 7(24), 65-82. (in persian).
- Ildoromi, A., Nouri, H., Mohammadipour, M., & Mousavi, M. (2018). Investigation of effective factors and landslide risk zoning using surface density model, hierarchical analysis (AHP) and logistic regression in Ashvand watershed, *Environmental Erosion Research*, 7,(28), 1-23. (in persian).
- Ildoromi, A., Ebadi, F. (2021). Evaluation of efficiency of landslide hazard zoning models of Kurdistan dam watershed, *Journal of Quantitative Geomorphology Research*, 10(2), 64-83. (in persian).
- Jenifer, M. A., & Jha, M. K. (2017). Comparison of Analytic Hierarchy Process, Catastrophe and Entropy techniques for evaluating groundwater prospect of hard-rock aquifer systems, *Journal of Hydrology*, 548, 605-624.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, A., Mian, A., Bacha, S., & Chiara, C. (2018). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, The Egyptian, *Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 10 (16), 103-104. (in persian).
- Maghsoudi, M., Mohammad Khan, Sh., Pirani, P., Riahi, S. (1397). Investigation of Factors Affecting Landslide Risk Upstream of Latian Dam Using Entropy and Fuzzy Assessment Methods, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 28, 1-17 . (in persian).
- Najafi Imdir, A., Rustai, S., Hijazi, S., A., Rajabi, M., & Jalali, N. (2021). The use of two-variable statistical models in landslide risk zoning in the Nazlochai catchment, *Hydrogeomorphology Journal*, 8(27), 1-17. (in persian).
- Najafi Imdir, A., Rustai, (2019). Prioritization of affecting factors on the landslide occurrence using the logistic regression model (Case study: Nazlochai basin), *Hydrogeomorphology Journal*, 7(23), 59-81. (in persian).
- Nojavan, m., Shah Zaidi, S., Davoodi, M., & Amin Raaya, H. (2020). Landslide risk zoning using a combination of two models of hierarchical and fuzzy analysis process (Case study: Kameh watershed, Isfahan province), *Journal of Quantitative Geomorphology Research*, 7(4), 142-159. [in persian].
- Pamucar, D., Stevic, Z., & Sremac, S. (2018). A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 10, 393.
- Pamučar, D., Petrović, I., & Ćirović, G. (2018). Modification of the Best–Worst and MABAC methods: A novel approach based on interval-valued fuzzy-rough numbers. *Expert Systems with Applications*, 91, 89-106.
- Pamučar, D., Lukovac, V., Božanić, D., Komazec, N. (2018). Multi-criteria FUCOM-MAIRCA model for the evaluation of level crossings: Case study in the Republic of Serbia. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl*, 1, 108–129.
- Pamučar, D., Stević, Z., & Sremac, S. (2018), A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: *Full Consistency Method (FUCOM)*, 10(9), 393.
- Rezaei, J., Wang, J., & Tavasszy, L. (2015). Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method. *Expert Syst. Appl*, 42, 9152–9164. (in persian).
- Rezaei, J. (2016), Best-worst multi-criteria decision-making method: *Some properties and a linear model*, 64, 126–130. (in persian).
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. [in persian].
- Rezaei, J. (2020). A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19(3), 891-907. (in persian).
- Rostaei, S., Mokhtari, D., & Ashrafi Fini, Z. (2019). Landslide hazard zonation in Taleghan watershed using Shannon entropy index, *Journal of Geography and Planning*, 24(71), 125- 150. (in persian).

- Teymouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020), Susceptibility Zoning and Prioritization of the Factors Affecting Landslide Using MaxEnt, Geographic Information System and Remote Sensing Models (Case study: Lorestan Province), *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179. (in persian).
- Tian, Z. P., Wang, J. Q., & Zhang, H. Y. (2018). An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, 72, 636-646.
- Yousefi, H., & Yarahmadi, Y. (2020). Landslide risk assessment using a combined model of network analysis (ANP) and fuzzy logic (Case study: Salavat Abad Basin, Sanandaj), *Journal of Echo Hydrology*, 6 (4): 993-1002. (in persian).
- Zhao, H., Yao, L., Mei, G., Liu, T., & Ning, Y. (2017). A fuzzy comprehensive evaluation method based on AHP and entropy for a landslide susceptibility map. *Entropy*, 19(8), 396.

