

## Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province

Amin Salehpour Jam<sup>1\*</sup>, Jamal Mosaffaie<sup>1</sup>, Samad Shadfar<sup>1</sup>, Faramarz Sarfaraz<sup>2</sup>

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
2. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Qazvin, Iran

\* Corresponding author: [aminpourjam@scwmri.ac.ir](mailto:aminpourjam@scwmri.ac.ir)

(Received: 16 November 2024

Revised: 01 December 2024

Accepted: 21 December 2024)

### Extended Abstract

**Introduction:** Landslides are a natural hazard that cause human and financial losses. This phenomenon also results in significant environmental damage through land degradation in landslide-prone areas. In this regard, it is important to prepare landslide hazard maps to effectively plan for landslide risk management. In recent years, multi-attribute decision-making (MADM) methods have been used in landslide hazard mapping. This study aims to evaluate the performance of widely used hybrid MADM methods, including AHP-SAW, AHP-TOPSIS, and AHP-VIKOR for creating landslide hazard maps in the Qezel Owzan region, Qazvin Province.

**Materials and methods:** In the present study, various causal factors, including rainfall, slope angle, slope aspect, lithology, altitude, land use, distance to roads, distance to faults, and distance to streams, were considered as effective indicators for predicting landslide occurrence. Two normalization methods were employed, namely, the Min-Max normalization method for the SAW method and the vector normalization method for the TOPSIS and VIKOR methods. In addition, the group decision-making method in the Analytical Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weights of causal factors based on the perspectives of 12 experts. Furthermore, the Quality sum (Qs) index and the Area Under the Curve (AUC) values of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were used to validate the performance of the different MADM methods used in this study.

**Results and Discussion:** The Qs values for the AHP-SAW, AHP-TOPSIS, and AHP-VIKOR methods were calculated as 0.241, 0.262, and 0.626, respectively. Also, the AUC values for these three methods were calculated 0.769, 0.786, and 0.805, respectively, so that they are within the acceptable and excellent acceptance range. In this study, the AHP-VIKOR method is introduced as the best method for producing a landslide hazard map. One of the disadvantages of using hybrid MADM methods is their reliance on the precise calculation of the weights of causal factors, which heavily depends on expert's view points in the AHP method. To address this, the group decision-making method was applied in AHP to improve weights calculations. It is worth noting that the AHP-SAW method used in this study, which demonstrates acceptable accuracy in producing landslide hazard maps, has also been introduced in other studies as a simple and efficient method. Although the SAW method is a simple weighting method based on normalizing the decision matrix data, determining the weights of the indicators, and aggregating the indicators based on the weighted average method, it is widely used in environmental assessments. Additionally, the Density Ratio (Dr) values of different landslide hazard classes, calculated for the VIKOR method, exhibit an upward trend from areas with very low potential for landslide occurrence (class I) to areas with very high potential for landslide occurrence (class V). This trend highlights the VIKOR method capability for producing landslide hazard maps in the study area.

**Conclusion:** The evaluation of hybrid MADM methods based on performance evaluation indicators, indicated acceptable (AHP-SAW and AHP-TOPSIS) and excellent (AHP-VIKOR) performance of methods for producing landslide hazard maps. Due to the presence of areas with high to very high landslide hazard potential in this region, planning for landslide risk management is strongly recommended. Although landslide distribution maps are beneficial for evaluating MADM methods, the lack of reliance on these maps during the MADM process is one of the strengths of this approach. However, accurately determining the weights of causal factors remains a challenge. To enhance the weight calculation process, using the group decision-making method in AHP is highly advisable.

**Keywords:** AHP; Causal factors; Decision matrix; Group decision-making; MADM

Citation: Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Shadfar, S., & Sarfaraz, F. (2025). Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 1-24. doi= 10.22034/iwm.2024.2045897.1189

### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## نگاشت خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین

امین صالح‌پورجم<sup>۱\*</sup>، جمال مصفایی<sup>۱</sup>، صمد شادفر<sup>۱</sup>، فرامرز سرفراز<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

\*نویسنده مسئول: [aminpourjam@scwmri.ac.ir](mailto:aminpourjam@scwmri.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

( تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶ )

### چکیده مبسوط

**مقدمه:** زمین‌لغزش‌ها از جمله مخاطرات طبیعی هستند که باعث خسارات جانی و مالی می‌شود. همچنین، این پدیده منجر به خسارات زیست محیطی قابل توجهی از طریق تخریب زمین در مناطق مستعد زمین لغزش می‌شود. در این ارتباط، تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش برای برنامه‌ریزی موثر برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش دارای اهمیت است. در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM) در نگاشت خطر زمین‌لغزش استفاده شده است. این مطالعه باهدف ارزیابی عملکرد روش‌های ترکیبی MADM شامل AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای نگاشت خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قزل‌اوزن در استان قزوین انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در تحقیق حاضر، انواع عوامل علی به‌صورت نقشه‌های بارش، زاویه و جهت شیب، سنگ‌شناسی، ارتفاع، کاربری اراضی و فاصله از جاده، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه به عنوان شاخص‌های موثر برای پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش در نظر گرفته شدند. در این مطالعه از دو روش نرمال‌سازی شامل روش نرمال‌سازی Min-Max برای روش SAW و روش نرمال‌سازی برداری برای روش‌های TOPSIS و VIKOR استفاده شد. همچنین، از روش تصمیم‌گیری گروهی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به‌منظور تعیین اوزان عوامل علی بر اساس دیدگاه ۱۲ کارشناس خبره استفاده شد. علاوه بر این، از شاخص‌های مجموع کیفیت (QS)، مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) و منحنی‌های مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برای صحت‌سنجی عملکرد روش‌های مختلف MADM مورد بررسی در این تحقیق استفاده شد.

**نتایج و بحث:** مقادیر QS برای روش AHP-SAW، ۰/۲۴۱، برای روش AHP-TOPSIS ۰/۲۶۲ و برای روش AHP-VIKOR، ۰/۶۲۶ محاسبه شد. همچنین، مقادیر AUC برای این سه روش به ترتیب ۰/۷۶۹، ۰/۷۸۶ و ۰/۸۰۵ محاسبه شد که در محدوده پذیرش قابل‌قبول و عالی قرار دارند. در این مطالعه، روش AHP-VIKOR به‌عنوان بهترین روش تولید نقشه خطر زمین‌لغزش معرفی می‌شود. یکی از معایب استفاده از مدل‌های ترکیبی MADM، محاسبه دقیق اوزان عوامل علی مبتنی بر دیدگاه کارشناسی بر اساس روش AHP است، به‌طوری‌که اوزان به دست آمده قویاً بستگی به دیدگاه کارشناس نظر دهنده دارد. در این مطالعه به‌منظور بهبود دقت در محاسبه اوزان معیارها، از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP استفاده شد. باید توجه داشت که روش AHP-SAW به کار رفته در این مطالعه که از صحت قابل‌قبولی در تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش برخوردار است، در دیگر مطالعات نیز، به‌عنوان روشی ساده و کارآمد برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش معرفی شده است. همچنین، اگرچه روش SAW، یک روش وزن‌دهی ساده مبتنی بر نرمال‌سازی داده‌های ماتریس تصمیم، تعیین اوزان شاخص‌ها و تجمیع شاخص‌ها بر اساس روش میانگین وزنی است، اما از کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی‌های زیست‌محیطی نیز برخوردار است. علاوه بر این، مقادیر Dr طبقات مختلف خطر زمین‌لغزش محاسبه شده برای روش VIKOR، دارای یک روندی تقریباً صعودی از مناطق با خطر بسیار پایین به زمین‌لغزش (طبقه I) به سمت مناطق با خطر بسیار زیاد به زمین‌لغزش (طبقه V) هستند. این روند نشان‌دهنده قابلیت بالای روش VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج ارزیابی روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی عملکرد، نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول (AHP-SAW) و عالی (AHP-TOPSIS) و عالی (AHP-VIKOR) روش‌ها برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش بود. با توجه به حضور پهنه‌های با خطر زیاد تا خیلی‌زیاد در منطقه مورد مطالعه، برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش قویاً برای منطقه توصیه می‌شود. اگرچه نقشه پراکنش زمین‌لغزش در ارزیابی روش‌های MADM مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما عدم نیاز به استفاده از این نقشه‌ها در فرایند MADM به‌منظور تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش از نقاط قوت روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. با این حال، تعیین صحیح اوزان شاخص‌های علی از جمله چالش‌های مطرح در کاربست این روش‌ها است که برای بهبود فرایند محاسبه اوزان، استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تصمیم‌گیری گروهی؛ عوامل علی؛ ماتریس تصمیم؛ AHP؛ MADM

**استناد:** صالح‌پور جم، ا.، مصفایی، ج.، شادفر، ص.، و سرفراز، ف. (۱۴۰۴). نگاشت خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۱-۲۴.

### حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

## مقدمه

زمین لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که خسارات جانی و مالی آن، منجر به انواع مشکلات اجتماعی و اقتصادی برای ساکنان حوزه‌های آبخیز می‌شود (Díaz *et al.*, 2020). همچنین، این پدیده از طریق تخریب اراضی، خسارات زیست‌محیطی بارزی را در عرصه مربوطه به دنبال دارد (Khan *et al.*, 2011; Parkash, 2023)؛ بنابراین، مدیریت ریسک زمین لغزش برای کاهش وقوع و خسارات ناشی از آن ضروری است. در این ارتباط، نگاشت (تولید نقشه) حساسیت زمین لغزش، طبقه‌بندی پتانسیل خطر زمین لغزش و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری منطقه نقش مهمی را در مدیریت ریسک زمین لغزش و کاهش مخاطرات مربوطه داراست (Dai *et al.*, 2002; Mosaffaie *et al.*, 2023).

عوامل مختلف از قبیل بارندگی، کاربری اراضی، واحدهای سنگ‌شناسی، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله تا گسل و فاصله تا جاده و آبراهه می‌توانند در نگاشت حساسیت به زمین لغزش و تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر زمین لغزش دخالت داشته باشند (Yalcin, 2011; Chen *et al.*, 2018; Pourghasemi & Rahmati, 2018; Achu *et al.*, 2023). همچنین، انواع روش‌های کمی و کیفی نیز در تهیه این نقشه‌ها دخالت دارند که انتخاب بهترین روش تهیه این نقشه‌ها مبتنی بر صحت‌سنجی مربوطه، از جمله مسائل اصلی تحقیق در مطالعات مربوطه است (Merghadi *et al.*, 2020; Naceur, *et al.*, 2022). در این راستا، توسعه روزافزون سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، امکان استفاده از انواع روش‌ها را برای تولید نقشه‌های حساسیت زمین لغزش تسهیل نموده است (Huang *et al.*, 2022; Miao *et al.*, 2023).

تاکنون انواع روش‌های کمی و کیفی برای نگاشت خطر زمین لغزش ارائه شده است (Aleotti & Chowdhury, 1999; Pourghasemi *et al.*, 2018).

برای ارزیابی خطر زمین لغزش روش‌های کمی و کیفی مختلفی وجود دارد. برخلاف روش‌های کمی، روش‌های کیفی بیشتر متکی به تجربه و قضاوت کارشناسان هستند (Aleotti & Chowdhury, 1999). در این ارتباط، روش تحلیل زمین‌ریخت‌شناسی از جمله روش‌های نگاشت کیفی زمین لغزش است (Van Westen *et al.*, 2003). به‌طور کلی، روش‌های نگاشت خطر زمین لغزش را می‌توان در چهار گروه اصلی فنون اکتشافی، قطعی، آماری و احتمالاتی مبتنی بر نقشه پراکنش زمین لغزش طبقه‌بندی نمود (Abella & Van Westen, 2008; Akgun, 2012). برای نمونه، تاکنون نگاشت حساسیت زمین لغزش با در نظر گرفتن عوامل علی<sup>۱</sup> (عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش) با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره (Arabameri *et al.*, 2019; Ozioko & Igwe, 2020)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Bragagnolo *et al.*, 2020)، روش‌های احتمالاتی مبتنی بر نقشه پراکنش زمین لغزش (Ozdemir, 2020) و منطق فازی (Tsangaratos, 2018) انجام شده است.

در سال‌های اخیر، انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه<sup>۲</sup> (MADM) در نگاشت خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Pourghasemi & Rossi, 2017; Bhagya *et al.*, 2023). این روش‌ها در گروه روش‌های اکتشافی GIS مبنا قرار می‌گیرند (Tomashevskii & Tomashevskii, 2021). به‌طور کلی، روش‌های MADM یکی از انواع روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۳</sup> (MCDM) هستند که در ارتباط با شاخه‌ای از علم به نام تحقیق در عملیات هستند (Triantaphyllou *et al.*, 1998). امروزه فنون

1- Causal factors

2- Multi-attribute decision-making

3- Multi-criteria decision-making

ضروری است. در مطالعات پیشین، روش AHP بیشتر به صورت انفرادی یا در ترکیب با سایر روش‌های غیر MADM برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش استفاده شده است. در این مطالعه از روش AHP برای تعیین اوزان عوامل علی در ترکیب با سایر روش‌های MADM به صورت ترکیبی با روش‌های SAW، TOPSIS و VIKOR به عنوان یک مدل ترکیبی استفاده شده است. همچنین، با توجه به اینکه روش‌های MADM بیشتر مبتنی بر ارزش متوسط شاخص‌ها در واحدهای کاری، اقدام به تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش می‌کنند (Salehpour Jam *et al.*, 2021)، در این مطالعه از فرایندی پیکسل‌مبنا برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش استفاده شده است. عملکرد مدل‌های ترکیبی استفاده شده با استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم (Dr)، شاخص مجموع کیفی (Qs) و همچنین با روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه طرح قزل‌اوزن بخشی از حوضه رودخانه سفیدرود است که در شمال غربی استان قزوین واقع شده است. این حوضه دارای مساحت ۱۵۱۶۲۶ هکتار بوده و به ترتیب کمینه و بیشینه ارتفاع آن ۲۴۸ و ۲۹۶۰ متر است (شکل ۱). این حوضه دارای کاربری‌های اراضی مختلفی همچون مرتع، جنگل، اراضی بدون پوشش، زراعت آبی و دیم است که به ترتیب، اراضی مرتعی با دارا بودن مساحت ۱۱۴۴۱۴ هکتار (۷۵/۳۷ درصد) و اراضی عاری از پوشش گیاهی با مساحت ۵۸۸/۵ هکتار (۰/۳۹ درصد)، بیشینه و کمینه مساحت را در این حوضه به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). کمینه و بیشینه بارندگی متوسط سالانه این حوضه، به ترتیب ۲۰۹ و ۴۶۵ میلی‌متر است (شکل ۳). این حوضه دارای ۴۸ روستا است که این روستاها تقریباً در تمامی گستره منطقه،

تصمیم‌گیری چندشاخصه به طور گسترده‌ای در پهنه‌بندی پتانسیل مخاطراتی مانند سیل (Vojtek *et al.*, 2021)، بیابان‌زایی و تخریب اراضی (Salehpour *et al.*, 2019)، زلزله (Jam *et al.*, 2020) و غیره استفاده شده است. در این مطالعه، از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۴</sup> (AHP) پیشنهاد شده توسط Saaty (1980) برای تعیین اوزان معیارها و از تکنیک ترتیب اولویت بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل<sup>۵</sup> (TOPSIS) پیشنهاد شده توسط Yoon و Hwang (۱۹۸۱) و روش ویکور<sup>۶</sup> (VIKOR) پیشنهاد شده توسط Opricovic (۱۹۹۸) برای نگاشت خطر زمین لغزش استفاده شده است.

در میان این روش‌ها، روش AHP بیشترین فراوانی کاربرد را در تولید نقشه خطر زمین لغزش داشته است (Chen *et al.*, 2016; Basu & Pal, 2020; Andriani *et al.*, 2024). همچنین، روش TOPSIS به طور گسترده در مطالعات مخاطرات چندگانه مانند زمین لغزش و سایر مخاطرات مورداستفاده قرار گرفته است (Sheikh *et al.*, 2019; Thakur & Mohanty, 2023).

این مطالعه باهدف ارزیابی عملکرد مدل‌های پرکاربرد ترکیبی MADM برای تولید نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز قزل‌اوزن استان قزوین انجام شد. این حوضه از جمله حوضه‌هایی است که در سال‌های اخیر، مبتنی بر رخداد متعدد زمین لغزش به خصوص در قسمت‌های مرکزی و غربی خود، توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین به عنوان کارفرما، در قالب یک قرارداد پژوهشی، تحت مطالعه قرار گرفت، که مقاله جاری، نتیجه این مطالعه است. بر این اساس، تهیه نقشه خطر زمین لغزش به عنوان یک لایه مهم برای مدیریت ریسک زمین لغزش

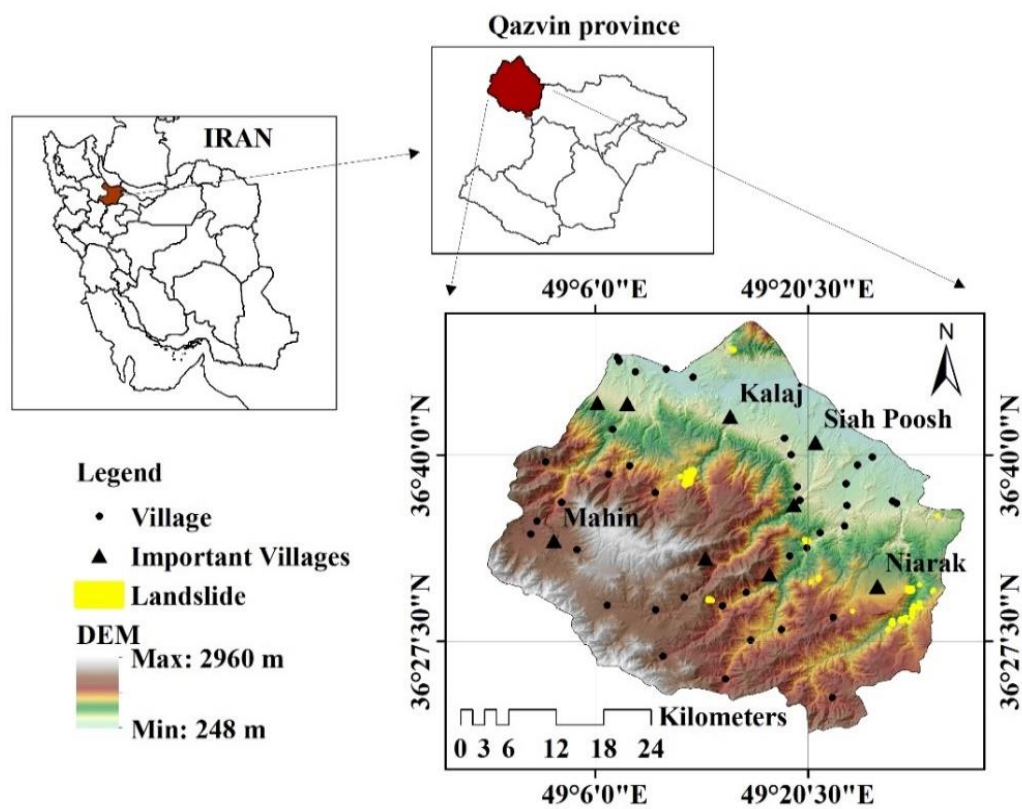
4- Analytic Hierarchy Process

5- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

6 - Viekriterijumsko Kompromisno Rangiranje

تولید محصولات زراعی دیم شامل گندم، جو و حبوبات (به‌طور خاص عدس) و یونجه آبی (کشت آبی) و نیز باغات زیتون، انار و گردو است. همچنین، صنایع منطقه به صورت محدود شامل صنایع تبدیلی، کارخانه سیمان و صنایع تولید انرژی پاک (توربین‌های بادی) است.

پراکنش یافته‌اند. روستاهای آلتین‌کش، کلج، سیاه‌پوش، شاهوران، نیارک، حسین‌آباد، سنگان علیا، پلنگه و ماهین از جمله روستاهای مهم این منطقه هستند (شکل ۱). همچنین در این حوضه، اراضی کشاورزی بیشتر در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن توسعه یافته‌اند. در این ارتباط، منابع درآمدی بخش کشاورزی و باغی روستاهای حوضه، مربوط به کشت و



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قزل‌اوزن در کشور و استان قزوین

Figure 1- The location of Qezel Owzan watershed in the country and Qazvin Province

### ایجاد لایه‌های علی

در این مطالعه عوامل علی به دو دسته تقسیم شدند: (۱) عوامل علی با مقادیر اولیه. این نقشه‌ها که با مقادیر اولیه خویش در تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده شدند، شامل نقشه‌های بارش، زاویه شیب، جهت شیب و نقشه‌های فاصله‌ای هستند؛ (۲) عوامل

### روش تحقیق

در این مطالعه از پرکاربردترین روش‌های ترکیبی MADM شامل AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای نگاشت حساسیت زمین‌لغزش استفاده شد. بدین منظور فرایندی مشتمل بر مراحل ذیل به انجام رسید:

علی با مقادیر ثانویه. این عوامل مشتمل بر نقشه‌های موضوعی طبقه‌بندی شده‌ای هستند که با مقادیر ثانویه حاصل از روش AHP در نگاشت حساسیت زمین‌لغزش مشارکت نموده‌اند و شامل نقشه‌های سنگ‌شناسی، ارتفاع و کاربری اراضی بودند. در این مطالعه، لایه‌های موضوعی و پیکسل‌های مربوطه به-ترتیب به‌عنوان شاخص‌ها و گزینه‌های روش‌های ترکیبی MADM در نظر گرفته شدند.

### لایه‌های زاویه و جهت شیب

لایه‌های زاویه و جهت از جمله لایه‌های پرکاربرد در نگاشت حساسیت زمین‌لغزش هستند (Katz et al., 2024; Mao et al., 2014) و نقش مهمی در تحلیل پایداری شیب دارند (Zakaria et al., 2018). در این راستا نقشه‌های زاویه شیب و جهت شیب به‌صورت جداگانه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و لایه DEM با تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه‌شده از سازمان نقشه‌برداری کشور ایجاد شد (شکل ۳).

### لایه بارندگی

این لایه یکی از لایه‌های مهم در فرآیند تولید نقشه حساسیت به زمین‌لغزش است (Pourghasemi et al., 2024; Mao et al., 2013). لایه بارندگی متوسط سالانه با استفاده از لایه DEM و معادله گرادیان بارندگی مربوطه توسط ماشین حساب رستری نرم‌افزار ArcGIS 10.8 ایجاد شد (شکل ۴). گرادیان بارندگی در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۴۰۰ با استفاده از داده‌های آماری بارندگی متوسط سالانه ۱۶ ایستگاه هواشناسی سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو پس از بازسازی نواقص آماری، ایجاد شد (رابطه ۱).

$$Y = 0.094 X + 186.25 \quad (1)$$

به‌طوری‌که: X ارتفاع بر حسب متر و Y بارندگی متوسط سالانه بر حسب میلی‌متر است.

### لایه‌های فاصله از جاده، گسل و آبراهه

این لایه‌ها نقش مهمی در مطالعات نگاشت حساسیت زمین‌لغزش دارند (Zhu et al., 2019; Mao et al., 2024).

### لایه طبقه‌بندی شده سنگ‌شناسی منطقه

نقشه سنگ‌شناسی دارای نقشی کلیدی در فرآیند نگاشت حساسیت زمین‌لغزش است (Meena et al., 2021; Pourghasemi et al., 2019). در این مطالعه از نقشه‌های برداری زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. سپس، نقشه طبقه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش واحدهای سنگی بر اساس امتیاز به دست آمده از طبقه‌بندی انجام‌شده توسط Peyrowan و Shariat Jafari (۲۰۱۳) ایجاد شد. این نقشه موضوعی طبقه‌بندی شده، دارای مقادیری از ۱ تا ۵ است که به‌ترتیب نشان‌دهنده حساسیت به رخداد زمین‌لغزش از خیلی کم تا خیلی زیاد است (شکل ۴).

### لایه‌های طبقات ارتفاعی و کاربری اراضی

لایه‌های ارتفاعی و کاربری اراضی از دیگر نقشه‌های مهم در مطالعات حساسیت زمین‌لغزش هستند (Hong et al., 2018; Mao et al., 2024). کاربری‌های اراضی ارزش‌های متفاوتی از حساسیت به زمین‌لغزش دارند و معمولاً با استفاده از روش AHP وزن‌دهی می‌شوند (Achu & Reghunath, 2017). در این راستا از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۴ استفاده شد، به‌طوری‌که وزن‌دهی به انواع کاربری‌های حوضه شامل زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع، جنگل و اراضی لخت (فاقد پوشش) با استفاده

گروه خبرگان (۱۲ خبره)، نسبت سازگاری قضاوت‌ها بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد (Saaty & Peniwati, 2013). سپس، تجمیع قضاوت‌ها با استفاده از میانگین هندسی مقادیر نظیر در ماتریس‌های تصمیم، بررسی سازگاری قضاوت‌ها برای ماتریس تجمیعی تصمیم و همچنین، محاسبه اوزان شاخص‌ها انجام شد (Saaty, 2012).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

که در آن RI:، نمایه ناسازگاری تصادفی قابل اکتساب از جدول ۱ و CI، نمایه سازگاری است که مبتنی بر رابطه ۳ محاسبه شد (Saaty, 2012).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

که در آن:

n، تعداد گزینه‌های ماتریس تصمیم و  $\lambda_{max}$ ، میانگین مقادیر بردار سازگاری است.

از روش AHP انجام شد (شکل ۳ و جدول ۲). همچنین، با توجه به ارتباط بین بارندگی و ارتفاع از سطح دریا و وجود یخبندان در ارتفاعات حوضه، طبقات ارتفاعی حساسیت متفاوتی نسبت به زمین‌لغزش دارند که معمولاً بر اساس روش AHP وزن‌دهی می‌شوند (Ozdemir, 2020; Salehpour, 2021). در این مطالعه، شش طبقه ارتفاعی شامل ۰-۵۰۰، ۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰۰-۲۵۰۰ و ۲۵۰۰-۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴)؛ بنابراین، تعیین مقادیر ثانویه برای انواع طبقات ارتفاعی و کاربری‌های اراضی با استفاده از روش AHP انجام شد که بزرگی مقادیر مربوطه، نشانه اهمیت آن‌ها در رخداد زمین‌لغزش است.

بدین منظور پس از ایجاد ماتریس مقایسات زوجی به صورت پرسشنامه AHP و تکمیل آن‌ها توسط کار

جدول ۱- نمایه‌های سازگاری تصادفی (Saaty, 2012)

Table 1- Random consistency index (Saaty, 2012)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، تصاویر تاریخی گوگل ارث (Landsat/Copernicus)، نقشه زمین‌شناسی و درنهایت بررسی‌های میدانی استفاده شد. با توجه به وسعت زیاد حوضه، بررسی‌های میدانی یکی از دشوارترین مراحل مطالعه بود که ۷ ماه به طول انجامید. لایه پراکنش زمین‌لغزش در شکل ۱ ارائه شده است. در این راستا، حداقل و حداکثر مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده در این حوضه، به ترتیب ۰/۶۷ و ۱۰۸/۸۵ هکتار است. در شکل ۲، نمونه‌هایی از زمین‌لغزش رخ داده در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

## لایه پراکنش زمین‌لغزش

لایه پراکنش زمین‌لغزش از جمله لایه‌های مهمی است که در فرایند صحت‌سنجی خروجی مدل‌ها دخالت داده می‌شود (Sharma et al., 2024). با توجه به اینکه بیشتر زمین‌لغزش‌های رخ داده در این حوضه، از نوع چرخشی هستند، بنابراین در این تحقیق زمین‌لغزش‌های چرخشی در نظر گرفته شد. در این مطالعه، دو ویژگی زمین‌لغزش شامل مساحت و مکان، مدنظر قرار گرفت و در صحت‌سنجی نهایی حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه این لایه از نقشه پراکنش زمین‌لغزش ایجاد شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، تفسیر



شکل ۲- نمونه‌هایی از زمین لغزش رخ داده در مجاورت روستای سیردان  
Figure 2- Examples of landslides that occurred near Sirdan village

$$N_{ij} = \frac{\text{Max } x_{ij} - x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}} \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (6)$$

$$N_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (7)$$

که در آن:  $P_{ij}$ ، مقادیر نرمال شده شاخص‌های مثبت،  $N_{ij}$ ، مقادیر نرمال شده شاخص‌های منفی و  $X_{ij}$ ، مقدار هر شاخص برای هر گزینه است.

### محاسبه اوزان شاخص‌ها

در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری گروهی با کاربرد AHP برای تعیین اوزان شاخص‌ها استفاده شد. بدین منظور از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با مشارکت ۱۲ کارشناس خبره به شرح مراحل ذکر شده پیشین و روابط (۲) و (۳) استفاده شد.

### محاسبه نمایه SAW

نمایه SAW، یک نمایه نرمال شده وزنی برای اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس شاخص‌ها است (رابطه ۸). این نمایه، نمایه‌ای یکپارچه است که با روش میانگین وزنی با استفاده از مقادیر نرمال شده حاصل از

### فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه

در این مطالعه اقدام به تولید نقشه حساسیت زمین لغزش مبتنی بر متداول‌ترین فنون MADM مشتمل بر AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP- VIKOR شد. بدین منظور، پس از محاسبه شاخص‌ها، اقدام به ایجاد ماتریس تصمیم مبتنی بر فرایندی سلول‌مبنا با هدف نگاشت زمین لغزش گردید. این ماتریس شامل مقادیر شاخص‌ها برای گزینه‌های مختلف (پیکسل‌ها) است. در این مطالعه، نگاشت حساسیت زمین لغزش مبتنی بر فنون MADM به قرار مراحل ذیل انجام شد:

### نرمال‌سازی شاخص‌ها

نرمال‌سازی شاخص‌ها به منظور مقایسه مقادیر آن‌ها با یکدیگر مبتنی بر ماهیت بدون بعد داده‌های نرمال شده، ضروری است ( Papathanasiou & Ploskas, 2018). در این مطالعه از دو روش نرمال‌سازی شامل روش نرمال‌سازی Min-Max برای روش SAW (معادلات ۴ و ۵) و روش نرمال‌سازی برداری برای روش‌های TOPSIS و VIKOR (معادلات ۶ و ۷) استفاده شد.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min } x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}} \quad (4)$$

**محاسبه نمایه TOPSIS**

به منظور محاسبه نمایه TOPSIS ابتدا راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت ( $A^+$ ) و منفی ( $A^-$ ) به ترتیب بر اساس روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شد (Hwang & Yoon, 1981).

$$A^+ = \{(v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+)\} = \{(\max_i v_{ij} | j \in S_B), (\min_i v_{ij} | j \in S_C)\} \quad (9)$$

$$A^- = \{(v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-)\} = \{(\min_i v_{ij} | j \in S_B), (\max_i v_{ij} | j \in S_C)\} \quad (10)$$

که در آن:  $f_{ij}$  ارزش گزینه مورد نظر برای هر شاخص در ماتریس نرمال موزون است. سپس، مقادیر سودمندی ( $S_j$ ) و تاسف ( $R_j$ ) شاخص‌ها بر اساس روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه شد.

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (16)$$

$$R_j = \max \left[ W_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (17)$$

که در آن  $f_i^*$  و  $f_i^-$  به ترتیب، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال موزون برای هر ستون است.

در نهایت، نمایه VIKOR ( $Q_j$ ) مبتنی بر رابطه (۱۸) محاسبه شد.

$$Q_j = V \times \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1 - V) \times \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-} \quad (18)$$

که در آن:  $S^-$  بیشینه میزان  $S_j$ ؛  $S^*$  کمینه میزان  $S_j$ ؛  $R^-$  بیشینه میزان  $R_j$ ؛  $R^*$  کمینه میزان  $R_j$  و  $V$  برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

**صحت‌سنجی مدل‌ها**

به منظور ارزیابی مدل‌های نگاشت حساسیت زمین‌لغزش، از یک‌سو، اقدام به محاسبه شاخص‌های نسبت تراکم (Dr) و مجموع کیفیت (Qs) شد و از سوی دیگر، از روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده

روش نرمال‌سازی Min-Max و اوزان شاخص‌های حاصل از روش AHP قابل محاسبه است (Papathanasiou & Ploskas, 2018).

$$V_{ij} = \sum_{i=1}^n W_j \cdot X_{ij} \quad (8)$$

که در آن:  $V_{ij}$  نمایه SAW؛  $W_j$  وزن شاخص  $j$  ام و  $X_{ij}$  مقدار نرمال‌شده شاخص  $j$  ام برای گزینه  $i$  ام است.

به طوری که  $S_B$  و  $S_C$  به ترتیب مجموعه معیارهای سود و هزینه را نشان می‌دهند.

سپس، فاصله اقلیدسی هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت ( $di^+$ ) و منفی ( $di^-$ ) محاسبه شد (روابط ۱۱ و ۱۲). در نهایت، نمایه TOPSIS ( $R_i$ ) به عنوان مقدار نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل محاسبه شد (رابطه ۱۳).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \forall i \in I. \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \forall i \in I. \quad (12)$$

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \text{ For } i \in I. \quad (13)$$

**محاسبه نمایه VIKOR**

به منظور محاسبه شاخص VIKOR ابتدا راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت ( $fi^*$ ) و منفی ( $fi^-$ ) به ترتیب بر اساس روابط ۱۴ و ۱۵ تعیین شد (Opricovic, 1998).

$$f_i^* = \max f_{ij} . j = 1. 2. \dots . m \quad (14)$$

$$f_i^- = \min f_{ij} . j = 1. 2. \dots . m \quad (15)$$

دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۴۲۷/۲ متر از دیگر لایه‌های علی‌تهیه شده در این پژوهش هستند (شکل ۴). به‌طور کلی، در فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه، شاخص‌ها و گزینه‌ها سازنده جدول ماتریس تصمیم هستند (Papathanasiou & Ploskas, 2018). در این ارتباط، گزینه‌ها می‌توانند به‌صورت واحدهای کاری حاصل از رویهم‌اندازی و تقاطع دو یا چند لایه منتخب (Karimpour Reyhan *et al.*, 2007)، یک لایه شبکه‌ای منظم دارای ابعاد سلولی مشخص به‌منظور استخراج ارزش‌های مرتبط با هر شاخص (Salehpour *Jam et al.*, 2021) و یا پیکسل یا سلول‌های نظیر عوامل علی‌دارای ساختار رستری (Salehpour *et al.*, 2023) تعریف شوند. در این مطالعه، مبتنی بر ارزش‌های سلول‌های لایه‌های علی‌اقدام به تولید لایه خطر زمین لغزش مبتنی بر فرایندی رستمینا با کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه شد. ماتریس مقایسات زوجی و مقادیر CR به دست آمده از روش AHP در جدول ۲ ارائه شده است. در این ارتباط، مقادیر CR حاصل از تصمیم‌گیری گروهی در AHP برای ماتریس‌های تصمیم مربوط به کاربری‌های اراضی، طبقات ارتفاعی و عوامل علی‌به‌ترتیب برابر با ۰/۰۸۹، ۰/۰۵۸ و ۰/۰۵۱ به دست آمد. با توجه به اینکه نسبت سازگاری ماتریس مقایسات کمتر از ۰/۱ است، سازگاری قضاوت‌ها و به‌تبع آن، اوزان به دست آمده، قابل قبول است (Saaty, 2012). یکی از معایب استفاده از مدل‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه، محاسبه دقیق اوزان عوامل علی‌مبتنی بر دیدگاه کارشناسی توسط روش AHP است (Basu & Pal, 2020)، به‌طوری‌که اوزان به دست آمده قویاً بستگی به دیدگاه کارشناس نظر دهنده دارد. در این مطالعه به‌منظور بهبود دقت در محاسبه اوزان معیارها، از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP با استفاده از فرمول‌نویسی در نرم‌افزار Excel استفاده شد. این روش قویاً برای تعیین اوزان معیارها مورد تأکید قرار گرفته است (Saaty, 2012).

(ROC) استفاده شد. شاخص‌های  $Dr$  و  $Qs$  توسط Gee (۱۹۹۲) پیشنهاد شده است که به‌ترتیب از طریق معادلات ۱۹ و ۲۰ قابل محاسبه هستند.

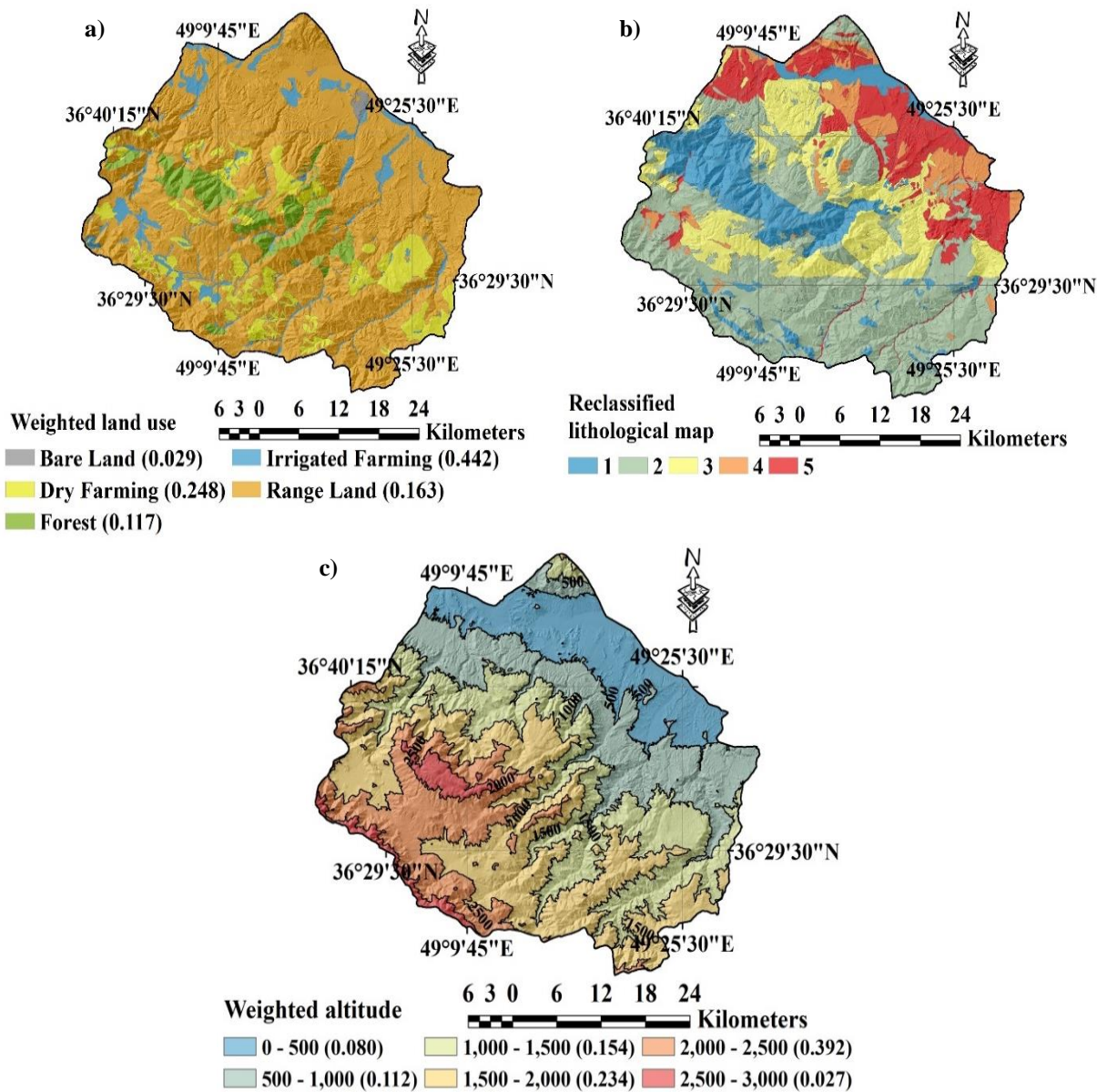
$$Dr = \frac{\frac{S_i}{A_i}}{\frac{\sum_i^n S_i}{\sum_i^n A_i}} \quad (19)$$

$$Qs = \sum_1^n ((Dr - 1)^2 \times S) \quad (20)$$

که در آن:  $S_i$ ، مساحت کل زمین لغزش‌ها در هر منطقه خطر،  $A_i$ ، مساحت هر منطقه خطر در نقشه حساسیت زمین لغزش،  $n$ ، تعداد منطقه خطر و  $S$ ، نسبت مساحت زمین لغزش در هر منطقه خطر به مساحت کل است. همچنین، منحنی‌های ROC و مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های MADM توسط ترسیم نرخ مثبت کاذب (FPR) در برابر نرخ مثبت واقعی (TPR) استفاده شد (Pourghasemi *et al.*, 2013; Bui *et al.*, 2020). این نمودار گرافیکی و مقادیر AUC مربوطه، از طریق نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 22 به دست آمد.

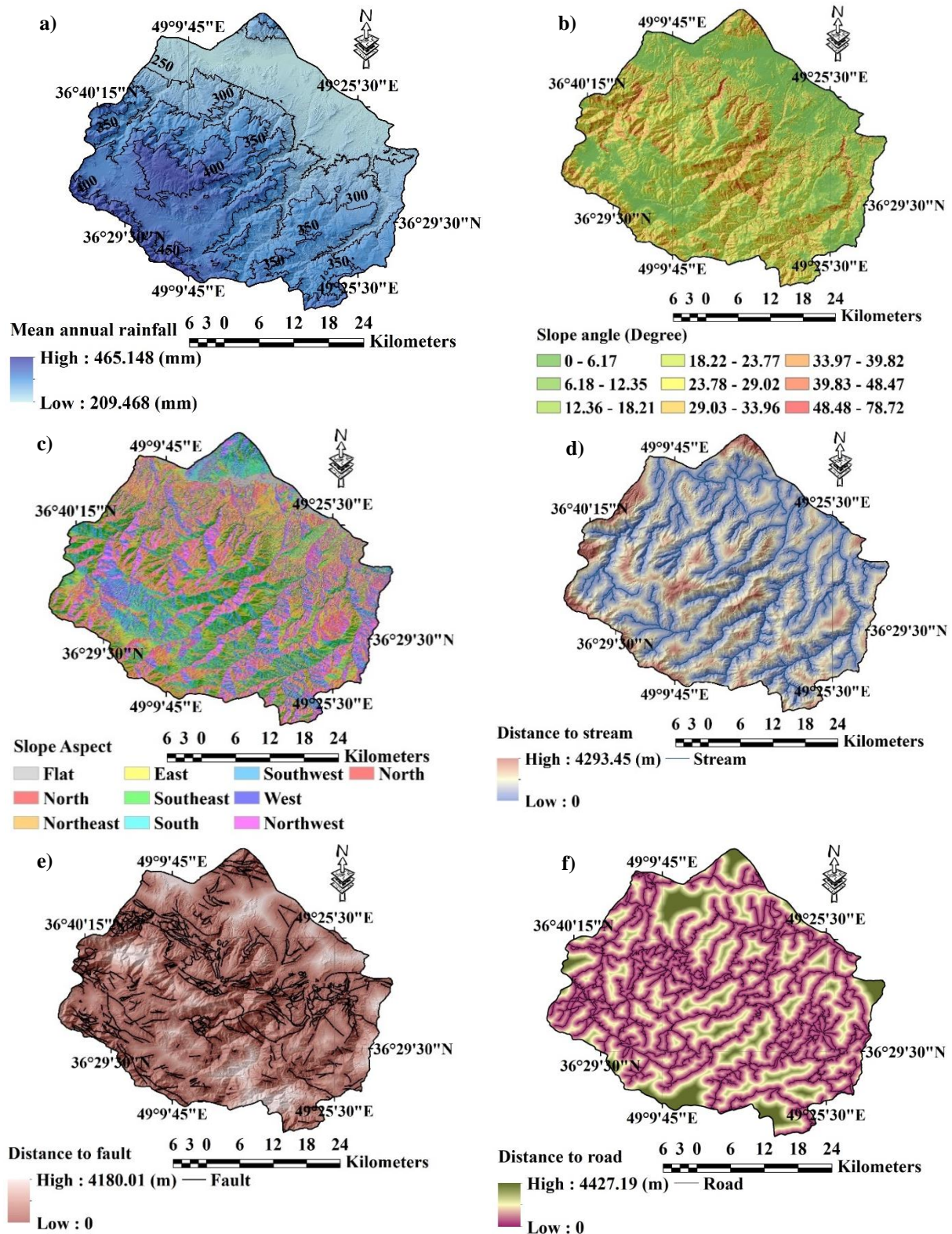
## نتایج و بحث

انواع لایه‌های علی مؤثر در رخداد زمین لغزش در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. لایه‌های کاربری اراضی و طبقات ارتفاعی توسط روش AHP با مجموع اوزان برابر یک در هر لایه و لایه زمین‌شناسی، توسط روش Peyrowan و Shariat Jafari (۲۰۱۳) از حساسیت به رخداد زمین لغزش خیلی کم (ارزش یک) تا خیلی زیاد (۵) امتیازدهی شدند (شکل ۳). همچنین، لایه بارندگی متوسط سالانه با دامنه مقادیر ۲۰۹/۵ تا ۴۶۵/۲ میلی‌متر، لایه زاویه شیب با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۷۸/۷ درجه، لایه جهت شیب شامل انواع جهات شیب، لایه فاصله تا آبراهه با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۲۹۳/۵ متر، لایه فاصله تا گسل با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۱۸۰/۰ متر و لایه فاصله تا جاده با



شکل ۳- لایه‌های موضوعی مرتبط با عوامل علی دارای مقادیر ثانویه (طبقه‌بندی شده): (الف) کاربری اراضی طبقه‌بندی شده، (ب) زمین‌شناسی طبقه‌بندی شده و (ج) طبقات ارتفاعی موزون

Figure 3- The schematic layers related to causal factors with secondary values (classified): (a) Reclassified land use, (b) Reclassified lithological map, and (c) Reclassified altitude



شکل ۴- لایه‌های موضوعی مرتبط با عوامل علی دارای مقادیر اولیه (طبقه‌بندی نشده): (الف) بارندگی متوسط سالانه، (ب) زاویه شیب، (ج) جهت شیب، (د) فاصله تا آبراهه، (ه) فاصله تا گسل و (و) فاصله تا جاده

Figure 4- The schematic layers related to causal factors with primary values (unclassified): (a) Mean annual rainfall, (b) Slope angle, (c) Slope aspect, (d) Distance to stream, (e) Distance to fault, and (f) Distance to road

جدول ۲- ماتریس مقایسات زوجی، اوزان شاخص‌ها و نسبت سازگاری قضاوت‌ها

Table 2- The pairwise comparison matrix, the weights of the attributes, and the consistency ratio of judgments

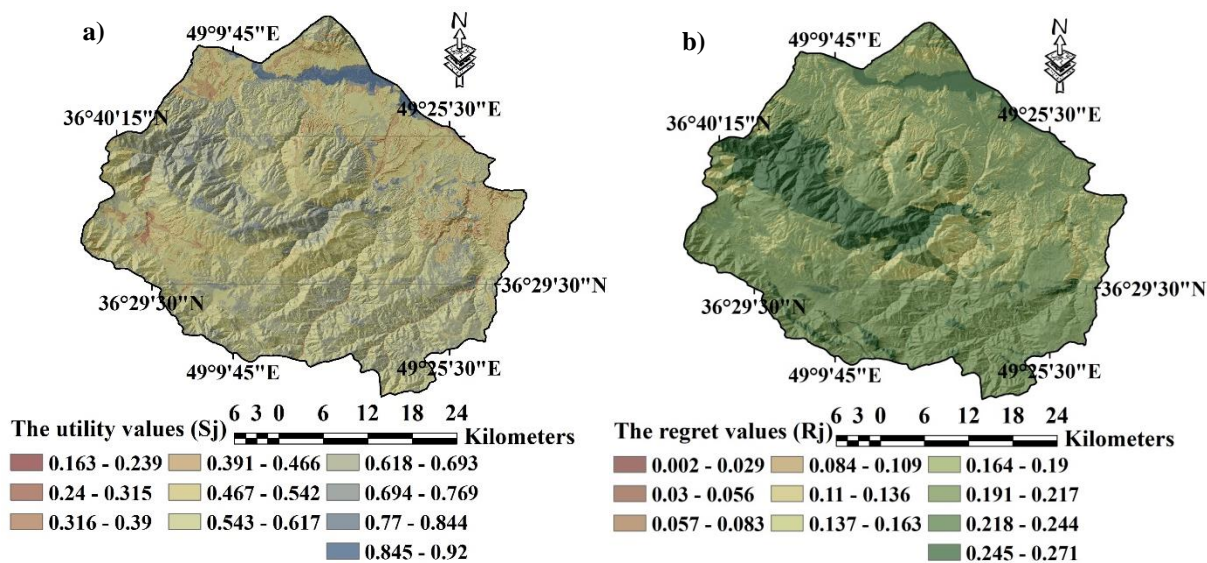
شاخص (کاربری اراضی) Attribute (Land Use)		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
نوع (Type)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
کشت آبی	1	0.442							
کشت دیم	0.31 1	0.248							
اراضی لخت (اراضی صخره‌ای)	0.12 0.12 1	0.029 0.098 1.110 0.089							
جنگل	0.27 0.34 7.47 1	0.117							
اراضی مرتعی	0.29 0.38 7.91 2.26 1	0.163							
شاخص (ارتفاع) Attribute (Elevation)		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
طبقه / Class (m)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
0-500	1	0.080							
500-1000	2.29 1	0.112							
1000-1500	2.09 2.21 1	0.154							
1500-2000	2.19 2.62 2.39 1	0.234 0.073 1.250 0.058							
2000-2500	3.86 3.37 2.92 2.27 1	0.392							
2500-3000	0.17 0.16 0.16 0.15 0.13 1	0.027							
شاخص‌ها Attributes		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
نام (Name)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
سنگ‌شناسی	1	0.271							
درجه شیب	0.42 1	0.226							
جهت شیب	0.35 0.36 1	0.100							
بارندگی	0.25 0.30 0.46 1	0.082							
فاصله تا گسل	0.16 0.15 0.30 0.30 1	0.030 0.073 1.450 0.051							
فاصله تا آبراهه	0.16 0.16 0.33 0.31 2.11 1	0.037							
فاصله تا جاده	0.15 0.13 0.27 0.27 0.46 0.46 1	0.024							
ارتفاع	0.23 0.17 0.38 0.34 3.47 2.37 3.27 1	0.058							
کاربری اراضی	0.41 0.42 2.61 3.29 5.82 6.14 4.96 4.37 1	0.170							

همخوان با این نتایج، این عوامل به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در نگاشت خطر زمین‌لغزش در دیگر مطالعات نیز معرفی شده‌اند (Pourghasemi *et al.*, 2012; Bahrami *et al.*, 2020; Salehpour Jam *et al.*, 2023).

مقادیر سودمندی ( $S_j$ ) و تاسف ( $R_j$ ) شاخص‌ها و نیز، نزدیکی نسبی به راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت ( $di^+$ ) و منفی ( $di^-$ ) به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده

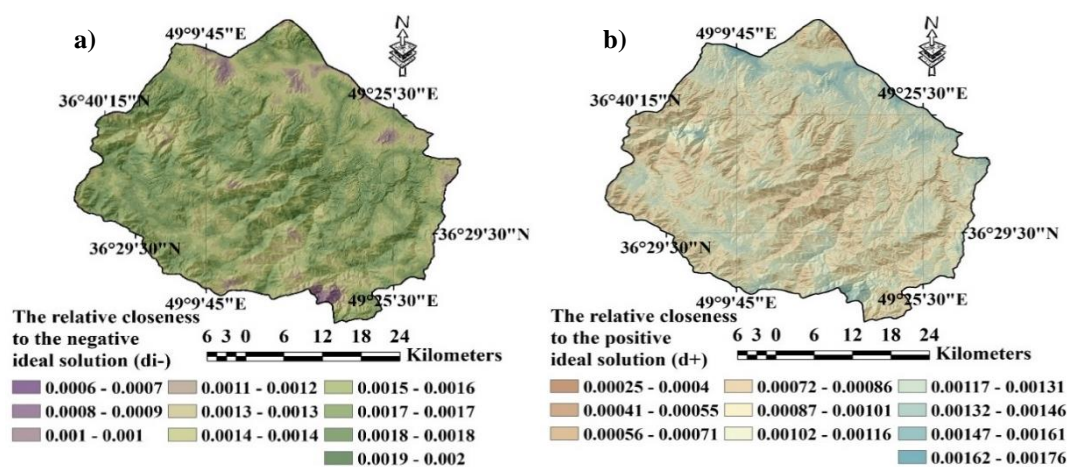
نتایج نشان می‌دهد که کشت آبی و دیم به ترتیب مهم‌ترین کاربری‌هایی هستند که باعث وقوع زمین‌لغزش می‌شوند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که از بین نه شاخص منتخب برای تولید نقشه خطر زمین‌لغزش، شاخص‌های سنگ‌شناسی و فاصله تا جاده بیشترین و کمترین وزن را از دیدگاه کارشناسان دارند. همچنین شاخص‌های سنگ‌شناسی، درجه شیب، کاربری اراضی و جهت شیب به ترتیب اهمیت اول تا چهارم را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲).

است. همچنین، مقادیر حدی آن‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- مقادیر سودمندی و تاسف شاخص‌ها: (الف) مقادیر سودمند ( $S_j$ ) و (ب) مقادیر تاسف ( $R_j$ ) (نقشه‌ها بدون بعد هستند)

Figure 5- The utility and regret values of the indicators: (a) the utility values ( $S_j$ ) and (b) the regret values ( $R_j$ ) (maps are dimensionless)

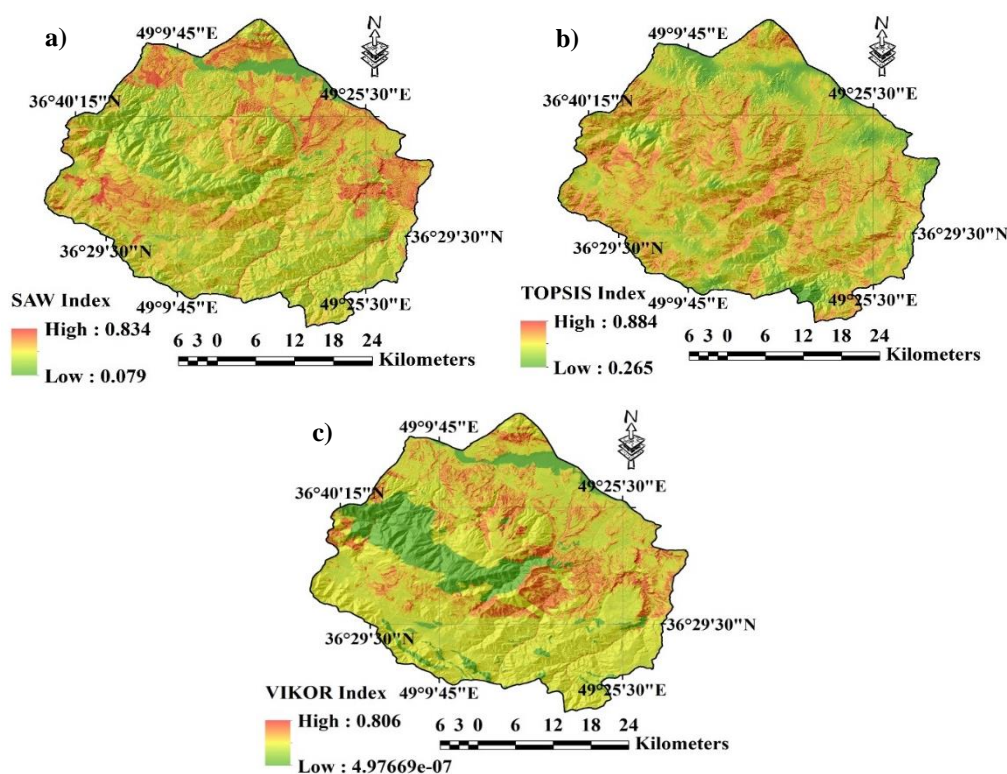


شکل ۶- نزدیکی نسبی به راه‌حل‌های ایده‌آل منفی و مثبت: (الف) راه‌حل ایده‌آل منفی ( $d_i^-$ ) و (ب) راه‌حل ایده‌آل مثبت ( $d_i^+$ ) (نقشه‌ها بدون بعد هستند)

Figure 6- The relative closeness to the negative and positive ideal solutions: (a) the negative ideal solution ( $d_i^-$ ) and (b) the positive ideal solution ( $d_i^+$ ) (maps are dimensionless)

مقادیر هر یک از شاخص‌ها از صفر تا یک متغیر است. همچنین، مقدار بالاتر هر شاخص به معنای حساسیت بیشتر در برابر وقوع زمین لغزش است.

نقشه‌های خطر زمین لغزش تولیدشده توسط روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه شامل AHP-TOPSIS، AHP-SAW و AHP-VIKOR در شکل ۷ ارائه شده است. لازم به توضیح است که دامنه



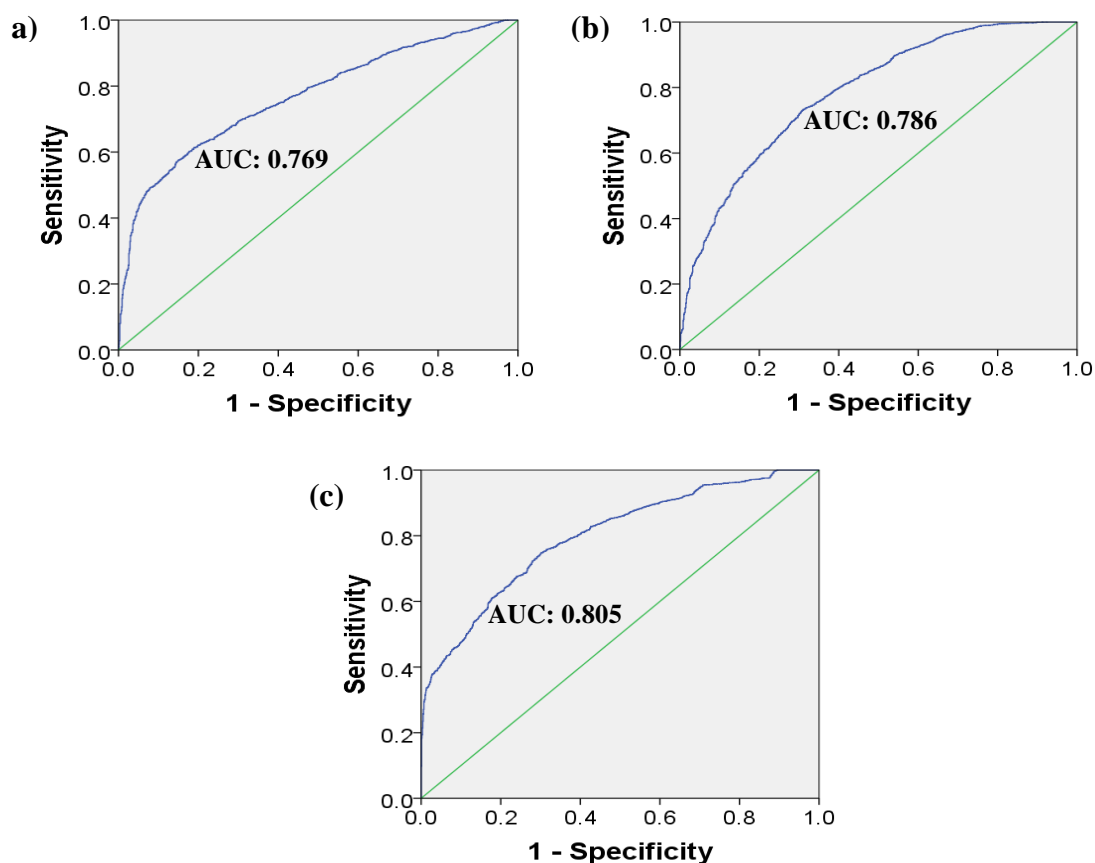
شکل ۷- لایه‌های خطر زمین‌لغزش تولید شده توسط روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه: (الف) روش SAW، (ب) روش

#### VIKOR و (ج) روش

Figure 7- Landslide hazard layers produced by MADM methods: (a) SAW method, (b) TOPSIS method, and (c), VIKOR method

محدوده پذیرش قابل قبول و عالی قرار دارند، به طوری که صحت روش‌های MADM برای SAW و TOPSIS، قابل قبول و برای روش VIKOR، عالی است؛ بنابراین، در این مطالعه، روش VIKOR به عنوان بهترین روش تولید نقشه خطر زمین‌لغزش معرفی می‌شود. همخوان با این نتایج، Salehpour و Jam و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که روش VIKOR مبتنی بر شاخص صحت‌سنجی AUC، از دقت بسیار بالایی (عالی) در تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در آبخیز الموت برخوردار است. علاوه بر این، این روش به عنوان روشی مناسب برای تولید سایر نقشه‌های خطر نیز معرفی شده است (Sari, 2021; Ma et al., 2022).

منحنی‌های ROC و مقادیر AUC مربوط به روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر AUC روش SAW، ۰/۷۶۹، روش TOPSIS، ۰/۷۸۶ و روش VIKOR، ۰/۸۰۵ است. بر این اساس، روش‌های SAW و VIKOR به ترتیب دارای کمینه (۰/۷۶۹) و بیشینه (۰/۸۰۵) مقادیر AUC هستند (شکل ۸). بر اساس حدود قابل قبول ارائه شده توسط Hosmer و همکاران (۲۰۱۳)، محدوده مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۰/۷، ۰/۷ تا ۰/۸، ۰/۸ تا ۰/۹، و مساوی یا بزرگ‌تر از ۰/۹، به ترتیب نشان‌دهنده حدود پذیرش ضعیف، قابل قبول، عالی و کاملاً عالی در تائید صحت روش‌ها هستند. بر این اساس، تمامی نقشه‌های مشتق شده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه، در



شکل ۸- منحنی‌های ROC و مقادیر AUC روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه: (الف) SAW، (ب) TOPSIS و (ج) VIKOR

Figure 8- ROC curves and AUC values of MADM methods: (a) SAW, (b) TOPSIS, and (c) VIKOR

چندشاخصه در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین، مقادیر شاخص Qs و پارامترهای محاسباتی مربوطه در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر Qs به دست آمده برای روش SAW، ۰/۲۴۱، روش TOPSIS، ۰/۲۶۲ و روش VIKOR، ۰/۶۲۶ است (جدول ۳). در این ارتباط، روش‌های SAW و VIKOR به ترتیب دارای حداقل و حداکثر مقدار Qs هستند؛ بنابراین، مبتنی بر شاخص Qs، روش VIKOR به عنوان بهترین روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای تولید نقشه خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، مقادیر Dr طبقات مختلف خطر زمین لغزش محاسبه شده برای روش VIKOR، دارای یک روندی تقریباً صعودی از مناطق با خطر بسیار پایین به زمین لغزش (طبقه I) به سمت مناطق با خطر بسیار زیاد به

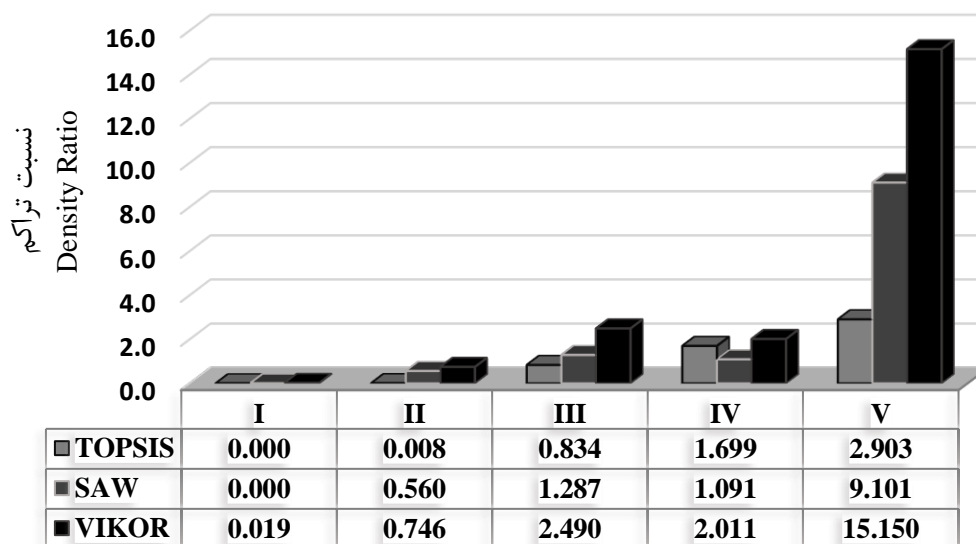
اعتبارسنجی روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه در این پژوهش نشان می‌دهد که این روش‌ها مانند سایر روش‌های کمی استفاده شده در نگاشت خطر زمین لغزش از قبیل رگرسیون لجستیک (Nhu *et al.*, 2020)، شبکه عصبی مصنوعی (Moayedi *et al.*, 2024)، منطق فازی (Nwazelibe *et al.*, 2023) و نسبت فراوانی (Asmare, 2023) از اعتبار قابل قبول و عالی در نگاشت خطر زمین لغزش برخوردارند. همچنین، در این مطالعه از شاخص‌های نسبت تراکم (Dr) و مجموع کیفیت (Qs) نیز برای مقایسه دقت روش‌ها استفاده شد. این شاخص‌ها از جمله شاخص‌های پرکاربرد برای تعیین صحت روش‌ها هستند (Roy *et al.*, 2019; Salehpour Jam *et al.*, 2023). مقادیر Dr طبقات مختلف حساسیت به زمین لغزش به دست آمده از روش‌های تصمیم‌گیری

زمین‌لغزش (طبقه V) هستند (شکل ۹). این روند نشان‌دهنده قابلیت بالای روش VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است (Pradhan & Lee, 2010).

جدول ۳- شاخص Qs و پارامترهای محاسباتی آن

Table 3- The Qs index and its computational parameters

روش Method	طبقه Class	مساحت کل زمین‌لغزش‌ها در هر منطقه خطر (هکتار) Si (ha)	مساحت منطقه خطر (هکتار) Ai (ha)	نسبت تراکم Dr	نسبت مساحت زمین‌لغزش در هر منطقه خطر به مساحت کل S	مجموع کیفیت Qs
SAW	I	0.000	2912.400	0.000	0.019	0.241
	II	53.402	54130.041	0.560	0.357	
	III	186.081	82102.141	1.287	0.541	
	IV	23.490	12233.490	1.091	0.081	
	V	3.970	247.760	9.101	0.002	
TOPSIS	I	0.000	583.190	0.000	0.004	0.262
	II	0.210	14031.510	0.008	0.093	
	III	139.750	95151.429	0.834	0.628	
	IV	123.244	41127.923	1.699	0.271	
	V	3.740	731.780	2.903	0.005	
VIKOR	I	0.781	23515.881	0.019	0.155	0.626
	II	122.818	93495.417	0.746	0.617	
	III	107.171	24451.320	2.490	0.161	
	IV	35.960	10155.296	2.011	0.067	
	V	0.213	7.980	15.150	0.000	



شکل ۹- نسبت تراکم (Dr) طبقات مختلف خطر زمین‌لغزش محاسبه‌شده برای روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه

Figure 9- The density ratio (Dr) of different landslide hazard classes calculated for MADM methods

مطالعات نیز، به‌عنوان روشی ساده و کارآمد برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش معرفی شده است (Ashournejad, 2019; Ercanoglu *et al.*, 2021).

باید توجه داشت که روش SAW به کار رفته در این مطالعه که از صحت قابل‌قبولی در تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش برخوردار است (شکل ۸)، در دیگر

به‌طورکلی، نتایج ارزیابی روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی عملکرد، نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول (AHP-SAW و AHP-TOPSIS) و عالی (AHP-VIKOR) روش‌ها برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش است، به‌طوری‌که روش AHP-VIKOR به‌عنوان بهترین روش برای تولید نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

عدم وجود نقشه به‌روز پراکنش زمین‌لغزش، مهمترین چالش پژوهش جاری است، به‌طوری‌که به‌روزرسانی این نقشه، زمان بسیاری را به خود اختصاص داد.

اگرچه نقشه پراکنش زمین‌لغزش در ارزیابی روش‌های MADM مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما عدم نیاز به استفاده از این نقشه‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری چندشاخصه به‌منظور تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش از نقاط قوت روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. با این حال، تعیین صحیح اوزان شاخص‌های علی از جمله چالش‌های مطرح در کاربست این روش‌ها است که برای بهبود فرایند محاسبه اوزان، استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP توصیه می‌شود. علاوه بر این، با توجه به حضور پهنه‌های با پتانسیل خطر زیاد تا خیلی‌زیاد زمین‌لغزش در این منطقه، برنامه‌ریزی با هدف مدیریت ریسک زمین‌لغزش قویاً پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، کاربست نقشه خطر زمین‌لغزش در برنامه‌ریزی برای آمایش سرزمین پیشنهاد می‌شود. همچنین، ارزیابی این روش‌ها همگام با ارزیابی دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه و نیز سایر روش‌های کمی نگاشت خطر زمین‌لغزش پیشنهاد می‌گردد.

### سپاسگزاری

این پژوهش در قالب پروژه تحقیقاتی با شناسه‌ی ۰-۱۵۸-۹۷۰-۰۰۸-۲۹-۲۹-۴ با حمایت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین و نیز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به انجام رسیده است.

همچنین، اگرچه روش SAW، یک روش وزن‌دهی ساده مبتنی بر نرمال‌سازی داده‌های ماتریس تصمیم، تعیین اوزان شاخص‌ها و تجمیع شاخص‌ها بر اساس روش میانگین وزنی است (Papathanasiou & Ploskas, 2018)، اما از کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی‌های زیست‌محیطی نیز برخوردار است (Mosaffaie et al., 2021).

با توجه به اینکه روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بر اساس ویژگی‌های مناطق مختلف ممکن است در طبقات مختلفی از حدود قابل‌قبول AUC در مرحله اعتبارسنجی قرار گیرند (Akay, 2021; Khalil et al., 2022; Salehpour Jam et al., 2023)، اعتبارسنجی هم‌زمان آن‌ها در مناطق دیگر برای انتخاب بهترین روش توصیه می‌شود. همچنین، اعتبارسنجی هم‌زمان این روش‌ها همگام با سایر روش‌های نگاشت زمین‌لغزش به‌منظور انتخاب بهترین روش، پیشنهاد می‌شود.

نقشه خطر زمین‌لغزش به دست آمده از روش VIKOR نشان می‌دهد که ۱۱۷۰۱۱/۳۰ هکتار (۷۷/۱۷ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر خیلی کم تا کم، ۲۴۴۵۱/۳۲ هکتار (۱۶/۱۳ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر متوسط و ۱۰۱۶۳/۲۸ هکتار (۶/۷۰ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر زیاد تا خیلی‌زیاد است (جدول ۳). همچنین، با توجه به حضور پهنه‌های با خطر زیاد تا خیلی‌زیاد در منطقه مورد مطالعه، برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش قویاً برای منطقه توصیه می‌شود.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه از پرکاربردترین روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مشتمل بر AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش مبتنی بر تحلیل‌های رستمینا استفاده شد.

همکار در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، صمیمانه سپاسگزاری و قدردانی می‌کنند.

نویسندگان بدین‌وسیله از کارشناسان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین و نیز کارکنان

## References

- Abella, E. A. C., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94(3-4), 453-466. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.038>
- Achu, A. L., Aju, C. D., Di Napoli, M., Prakash, P., Gopinath, G., Shaji, E., & Chandra, V. (2023). Machine-learning based landslide susceptibility modelling with emphasis on uncertainty analysis. *Geoscience Frontiers*, 14(6), 101657. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101657>
- Achu, A. L., & Reghunath, R. (2017). Application of analytical hierarchy process (AHP) for Landslide Susceptibility Mapping: A study from southern Western Ghats, Kerala, India. In Proceedings of the 3rd Disaster, Risk and Vulnerability Conference (pp. 33-41).
- Akay, H. (2021). Flood hazards susceptibility mapping using statistical, fuzzy logic, and MCDM methods. *Soft Computing*, 25(14), 9325-9346. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05903-1>
- 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(1), 93-106. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0283-7>
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58, 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Andriani, A., Adji, B. M., Putri, E. E., & Safira, L. F. (2024). Assessment of factors causing landslides using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, 4(1), 51-64. <https://doi.org/10.51662/jiae.v4i1.127>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Sohrabi, M., & Kalantari, Z. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using numerical risk factor bivariate model and its ensemble with linear multivariate regression and boosted regression tree algorithms. *Journal of Mountain Science*, 16(3), 595-618. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5168-y>
- Ashournejad, Q., Hosseini, A., Pradhan, B., & Hosseini, S. J. (2019). Hazard zoning for spatial planning using GIS-based landslide susceptibility assessment: a new hybrid integrated data-driven and knowledge-based model. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4236-0>
- Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern ethiopia. *Scientific African*, 19, e01470. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470>
- Basu, T., & Pal, S. (2020). A GIS-based factor clustering and landslide susceptibility analysis using AHP for Gish River Basin, India. *Environment, development and sustainability*, 22, 4787-4819. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00406-4>
- Bhagya, S. B., Sumi, A. S., Balaji, S., Danumah, J. H., Costache, R., Rajaneesh, A., Gokul, A., Chandrasenan, C. P., Quevedo, R. P., Johny, A., & Sajinkumar, K. S. (2023). Landslide susceptibility assessment of a part of the Western Ghats (India) employing the AHP and F-AHP models and comparison with existing susceptibility maps. *Land*, 12(2), 468. <https://doi.org/10.3390/land12020468>
- Bragagnolo, L., Da Silva, R. V., & Grzybowski, J. M. V. (2020). Artificial

- neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. *Catena*, 184, 104240. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104240>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., Van Liem, N., & Trinh, P. T. (2020). Comparing the prediction performance of a Deep Learning Neural Network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. *Catena*, 188, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426>
- Chen, W., Li, W., Chai, H., Hou, E., Li, X., & Ding, X. (2016). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4795-7>
- Chen, W., Peng, J., Hong, H., Shahabi, H., Pradhan, B., Liu, J., & Duan, Z. (2018). Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Science of the total environment*, 626, 1121-1135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.124>
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, 64(1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Díaz, S. R., Cadena, E., Adame, S., & Dávila, N. (2020). Landslides in Mexico: their occurrence and social impact since 1935. *Landslides*, 17(2), 379-394. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01285-6>
- Ercanoglu, M., Balcılar, M., Aydın, F., Aydemir, S., Deveci, G., & Çintimur, B. (2021). ARAS: a web-based landslide susceptibility and hazard mapping system. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Volume 5 Catastrophic Landslides and Frontiers of Landslide* Science 5th, 301-307. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60319-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60319-9_33)
- GEE, M. D. (1992). *Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability*. In International symposium on landslides (pp. 947-952).
- Hong, H., Liu, J., Bui, D. T., Pradhan, B., Acharya, T. D., Pham, B. T., ..., & Ahmad, B. B. (2018). Landslide susceptibility mapping using J48 Decision Tree with AdaBoost, Bagging and Rotation Forest ensembles in the Guangchang area (China). *Catena*, 163, 399-413. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.005>
- Hosmer Jr, D.W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R.X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Huang, J., Wu, X., Ling, S., Li, X., Wu, Y., Peng, L., & He, Z. (2022). A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 86954-86993. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23732-z>
- Hwang, C.L., & Yoon, K., (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making*, 58-191. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)
- Jena, R., & Pradhan, B. (2020). Integrated ANN-cross-validation and AHP-TOPSIS model to improve earthquake risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101723. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101723>
- Karimpour Reyhan, M., Salehpour Jam, A., Kianian, M. K., & Jahani, D. (2007). Investigation of pedological criterion on land degradation in quaternary rock units (case study: Rude-Shoor watershed area). *DESERT*, 12(1), 77-84.
- Khalil, U., Imtiaz, I., Aslam, B., Ullah, I., Tariq, A., & Qin, S. (2022). Comparative analysis of machine learning and multi-criteria decision making techniques for landslide susceptibility mapping of Muzaffarabad district. *Frontiers in*

- Environmental Science*, 10, 1028373. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1028373>
- Khan, A. N., Collins, A. E., & Qazi, F. (2011). Causes and extent of environmental impacts of landslide hazard in the Himalayan region: a case study of Murree, Pakistan. *Natural Hazards*, 57, 413-434. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9621-7>
- Ma, Y., Guga, S., Xu, J., Liu, X., Tong, Z., & Zhang, J. (2022). Assessment of maize drought risk in Midwestern Jilin Province: A comparative analysis of TOPSIS and VIKOR models. *Remote Sensing*, 14(10), 2399. <https://doi.org/10.3390/rs14102399>
- Mao, Y., Li, Y., Teng, F., Sabonchi, A. K., Azarafza, M., & Zhang, M. (2024). Utilizing hybrid machine learning and soft computing techniques for landslide susceptibility mapping in a Drainage Basin. *Water*, 16(3), 380. <https://doi.org/10.3390/w16030380>
- Meena, S. R., Mishra, B. K., & Tavakkoli Piralilou, S. (2019). A hybrid spatial multi-criteria evaluation method for mapping landslide susceptible areas in kullu valley, himalayas. *Geosciences*, 9(4), 156. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040156>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>
- Miao, F., Zhao, F., Wu, Y., Li, L., & Török, Á. (2023). Landslide susceptibility mapping in Three Gorges Reservoir area based on GIS and boosting decision tree model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02394-4>
- Moayedi, H., Xu, M., Naderian, P., Dehrashid, A. A., & Thi, Q. T. (2024). Validation of four optimization evolutionary algorithms combined with artificial neural network (ANN) for landslide susceptibility mapping: A case study of Gilan, Iran. *Ecological Engineering*, 201, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107214>
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., & Sarfaraz, F. (2023). Landslide risk assessment based on susceptibility and vulnerability. *Environment, Development and Sustainability*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03093-4>
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R., & Kousari, M. R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land use policy*, 100, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>
- Naceur, H. A., Abdo, H. G., Igmoullan, B., Namous, M., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., & Al-Mutiry, M. (2022). Performance assessment of the landslide susceptibility modelling using the support vector machine, radial basis function network, and weight of evidence models in the N'fis river basin, Morocco. *Geoscience Letters*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00249-4>
- Nhu, V.H., Shirzadi, A., Shahabi, H., Singh, S. K., Al-Ansari, N., Clague, J.J., ..., & Ahmad, B. B. (2020). Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2749. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082749>
- Nwazelibie, V. E., Unigwe, C. O., & Egbueri, J. C. (2023). Testing the performances of different fuzzy overlay methods in GIS-based landslide susceptibility mapping of Udi Province, SE Nigeria. *Catena*, 220, 106654.

- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106654>
- Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of civil engineering, Belgrade, 2(1), 5-21.
- Ozdemir, A. (2020). A comparative study of the frequency ratio, analytical hierarchy process, artificial neural networks and fuzzy logic methods for landslide susceptibility mapping: Taşkent (Konya), Turkey. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4129-4157. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01284-8>
- Ozioko, O. H., & Igwe, O. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping using heuristic and bivariate statistical methods for Iva Valley and environs Southeast Nigeria. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7951-9>
- Papathanasiou, J., & Ploskas, N. (2018). *Multiple criteria decision aid. In Methods, Examples and Python Implementations*, Vol. 136. Springer.
- Parkash, S. (2023). Lessons learned from landslides of socio-economic and environmental significance in India. *In Progress in Landslide Research and Technology*, Volume 1 Issue 2, 2022 (pp. 309-315). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18471-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18471-0_23)
- Peyrowan, H. R., & Shariat Jafari, M. (2013). Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2013.101843> (In Persian)
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., & Fatemi Aghda, S.M. (2013). Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69, 749-779. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0728-5>
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63, 965-996. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>
- Pourghasemi, H.R., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162, 177-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022>
- Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2017). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2), 609-633. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1919-2>
- Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Amiri, M., Eskandari, S., & Santosh, M. (2021). Landslide susceptibility assessment and mapping using state-of-the art machine learning techniques. *Natural Hazards*, 108(1), 1291-1316. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04732-7>
- Pourghasemi, H. R., Teimoori Yansari, Z., Panagos, P., & Pradhan, B. (2018). Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3531-5>
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 747-759. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016>
- Roy, J., Saha, S., Arabameri, A., Blaschke, T., & Bui, D. T. (2019). A novel ensemble approach for landslide susceptibility mapping (LSM) in Darjeeling and

- Kalimpong districts, West Bengal, India. *Remote Sensing*, 11(23), 2866. <https://doi.org/10.3390/rs11232866>
- Saaty, T. L. (2012). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation*. RWS publications, USA.
- Saaty, T. L., & Peniwati, K. (2013). *Group decision making: drawing out and reconciling differences*. RWS publications.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Sarfaraz, F., Shadfar, S., & Akhtari, R. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Natural Hazards*, 108, 1025-1046. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04718-5>
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., & Tabatabaei, M. R. (2023). Raster-based landslide susceptibility mapping using compensatory MADM methods. *Environmental Modelling & Software*, 159, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105567>
- Salehpour Jam, A., Peyrowan, H. R., Tabatabaei, M. R., Sarreshtehdari, A., & Mosaffaie, J. (2019). An assessment of the land degradation potential using the TOPSIS method (Case study: rangelands overlooking the city of Eshtehard, the province of Alborz). *Watershed Management Research Journal*, 32(4), 79-93. <https://doi.org/10.22092/WMEJ.2019.126535.1227> (In Persian)
- Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644>
- Sharma, N., Saharia, M., & Ramana, G. V. (2024). High resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning and geospatial big data. *Catena*, 235, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107653>
- Sheikh, V., Kornejady, A., & Ownegh, M. (2019). Application of the coupled TOPSIS–Mahalanobis distance for multi-hazard-based management of the target districts of the Golestan Province, Iran. *Natural Hazards*, 96, 1335-1365. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03617-0>
- Thakur, D. A., & Mohanty, M. P. (2023). A synergistic approach towards understanding flood risks over coastal multi-hazard environments: Appraisal of bivariate flood risk mapping through flood hazard, and socio-economic-cum-physical vulnerability dimensions. *Science of the Total Environment*, 901, 166423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166423>
- Tomashevskii, I., & Tomashevskii, D. (2021). A non-heuristic multicriteria decision-making method with verifiable accuracy and reliability. *Journal of the Operational Research Society*, 72(1), 78-92. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1650621>
- Triantaphyllou, E., Shu, B., Sanchez, S.N., & Ray, T. (1998). Multi-criteria decision making: an operations research approach. *Encyclopedia of electrical and electronics engineering*, 15(1998), 175-186.
- Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Nikolakopoulos, K., Angelitsa, V., & Iliia, I. (2018). Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7548-6>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30, 399-419.

- <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.00000007097.42735.9e>
- Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Pham, Q. B., Lee, S., Arshad, A., & Anh, D.T. (2021). Comparison of multi-criteria-analytical hierarchy process and machine learning-boosted tree models for regional flood susceptibility mapping: a case study from Slovakia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1153-1180. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1912835>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>
- Zhu, A. X., Miao, Y., Liu, J., Bai, S., Zeng, C., Ma, T., & Hong, H. (2019). A similarity-based approach to sampling absence data for landslide susceptibility mapping using data-driven methods. *Catena*, 183, 104188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104188>