

**Comparative evaluation of WLC, OWA, VIKOR, and MABAC multi-criteria decision-making methods in landslide risk zoning
Case study: Givi-chay watershed of Ardabil province**

Sayyad asghari Saraskanrood^{1*}, Elnaz Piroozi².

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

2- PhD in Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 27 December 2021

Accepted: 26 April 2022

Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the most important geomorphological processes that affect the evolution of landscapes in mountainous areas, which in some cases also lead to catastrophic events (Hattanji and Moriwaki, 2009). In recent decades, due to the increasing trend of damages caused by natural disasters, especially landslides, the category of forecasting and preventing damages has been seriously discussed (Izadi and Entezari, 2013). Landslide risk zoning maps can provide an effective and efficient tool for planners and decision-makers to identify suitable zones for future development (Ghobadi Alamdari, 2019). The use of GIS and multi-criteria decision-making methods, with an integrated approach, can accelerate the planning process in the diagnosis of critical and emergency cases and lead to the issuance of appropriate results.

Givi Chay watershed with an area of 1814 square kilometers is one of the sub-basins of Sefidroud, which is in the coordinates of 48 degrees and 4 minutes and 20 seconds to 48 degrees and 40 minutes and 12 seconds east longitude and 37 degrees and 26 minutes and 3 seconds. Up to 37 degrees and 55 minutes and 55 seconds north latitude, it is located in the south of Ardabil province and within the city of Khalkhal and Givi. This watershed is from the north to Qarasu watershed and the heights of Turka, Pileh, Chaleh Marz and, Gondab, from the west to Qarnaqo river catchment and from the east to Agh-e-Uler, Navroud and, Talesh mountain ranges and from the south to the basin. The catchment area of the Ghezal Ozan River is limited. The minimum and maximum height of the Givi Chay watershed, are respectively; 873 and 3025 meters. Geologically, the study area is located in the West Alborz-Azerbaijan tectonic zone.

Methodology

The present research is of applied type and its research method is analytical based on the combination of data analysis, GIS, and the use of multi-criteria analysis techniques. ENVI, Arc GIS, Idrisi, and Excel software have been used for image processing and data analysis. In this study, first the effective factors in Landslide (including slope, aspect, Elevation classes, lithology, land use, precipitation, distance from the communication road, distance from the waterway and distance from the fault), according to the natural and human conditions of the region were identified. In the next step, information layers related to each factor were prepared in the GIS environment. The information layers of curved lines, communication roads, and waterway networks were obtained by digitization from the topographic map of Givi and Khalkhal cities with a scale of 1: 50,000, and the slope and aspect layers were prepared using a

*. Corresponding Author (Email: s.asghari@uma.ac.ir)

digital elevation model. Information layers related to lithology (rock resistance) and faults, by digitization from the geological map of Givi, Khalkhal-Rezvanshahr, and Masouleh; Prepared at a scale of 1: 100,000. To extract the land use of the study area, first geometric and atmospheric corrections were made on the images using the Flaash method in Envi software. Then the classification was done by object-oriented method and nearest neighbor algorithm in Ecognition software, and the results obtained from the classification of uses in the present study, both in terms of individual uses and in terms of total accuracy and kappa statistics, are acceptable (greater than 85 Percent), in relation to the information produce. The precipitation map of the basin was drawn using meteorological and rainfall station data and the method of precipitation gradient equation ($P: 0.11104H + 193.24$). To prepare a landslide risk map, WLC, OWA, VIKOR, and MABAC multi-criteria decision algorithms, fuzzy standardization and cortical weighting method have been used. Landslide zoning maps have been evaluated using the relative performance detection curve (ROC).

Results and discussion

According to the output obtained by using the WLC method, 427.352 square kilometers of basin area is in the high-risk class and 599.237 square kilometers is in the high-risk class. According to the landslide hazard zoning map obtained from the OWA method, respectively; 284.262 and 670.628 square kilometers of the basin area are very high-risk and high-risk classes. According to the hazard map obtained from the VIKOR method, high-risk and high-risk classes, respectively, occupied 745.457 and 394.471 square kilometers of the basin area. Also, the results obtained using the MABAC method show coverage of 572.900 square kilometers of high-risk floor and 551.030 square kilometers of the high-risk floor of the basin area.

Results of output overlap of the studied models, with a scattering of landslide points; Showed that according to WLC, OWA, VIKOR, and MABAC multi-criteria decision algorithms, respectively, 37.84, 46.73, 59.46, and 48.65% of the slip points in the high-risk category and 37.84, 51.35, 24.33 and 35.14% of slip points are in a high-risk category. The matching of slippery surfaces and hazardous zones shows that at the output of all the studied algorithms, the areas in the high-risk, high-risk category have the largest area of landslide surfaces. In addition, in the low-risk classes introduced by the multi-criteria algorithms, a limited number of landslides are observed, and in the low-risk classes, no distribution of landslides occurs in the basin. Therefore, it can be concluded that due to the distribution of landslides in each of the hazard classes, all the studied algorithms and especially the Vikor method by covering 22 landslides in a very high-risk class, of high relative accuracy in They have a landslide risk assessment.

Conclusion

According to the results, respectively; Slope factors with a weight of 0.16, lithology with a weight of 0.15, and land use with a weight of 0.13 had the most role in the occurrence of landslides in the basin, according to the output of the studied algorithms, area Low and very low-risk areas have the lowest area in the basin. On the other hand, medium, high, and very high-risk zones have the largest area of the basin. It can be said that the results of this study indicate the high power of the Givi-chay basin in terms of the occurrence of landslides. Due to the distribution of landslides in each of the hazard classes, all studied algorithms have a high relative accuracy in landslide risk assessment. According to the validation results, the area under the ROC curve for OWA, VIKOR, and MABAC methods was calculated to be 0.72, 0.73, 0.85 and 0.76, respectively. Therefore, the accuracy of OWA, WLC and MABAC methods is very good and the accuracy of the VIKOR method is excellent.

Keywords: Slope movement, Risks, AUC, GIS.

ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره WLC، OWA، VIKOR و MABAC در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه گیوی چای استان اردبیل

صیاد اصغری سراسکانرود^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

الناز پیروزی - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

چکیده

هدف از این پژوهش پهنه‌بندی حوضه گیوی چای، واقع در استان اردبیل، به لحاظ رخداد زمین‌لغزش، با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. در این راستا عوامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و بارش به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بررسی شدند. نخست، لایه‌های اطلاعاتی معیارها در GIS تهیه شد. ارزش‌گذاری و استانداردسازی لایه‌ها با استفاده از تابع عضویت فازی و وزن‌دهی معیارها با بهره‌گیری از روش CRITIC انجام گردید. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر برای مطالعه زمین‌لغزش از روش‌های MCDM استفاده فراوانی می‌شود، در این مطالعه نیز تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره WLC، OWA، VIKOR، و MABAC انجام شد. با توجه به نتایج مطالعه، به‌ترتیب عوامل شیب با وزن ۰/۱۶، لیتولوژی با وزن ۰/۱۵، و کاربری اراضی با وزن ۰/۱۳ در وقوع زمین‌لغزش حوضه بیشترین نقش را دارند. همچنین، طبق نتایج حاصله، به‌ترتیب، با توجه به الگوریتم‌های WLC، OWA، VIKOR، و MABAC، ۲۳/۵۵، ۰۷/۶۶، ۴۱/۱۵، و ۳۱/۵۶ درصد از مساحت حوضه، در طبقه بسیار پرخطر و ۳۳/۰۱، ۳۶/۹۵، ۲۱/۷۳، و ۳۰/۳۶ درصد در طبقه پرخطر قرار دارند. با توجه به نتایج صحت‌سنجی، مساحت زیر منحنی ROC، برای روش‌های WLC، OWA، VIKOR، و MABAC به‌ترتیب ۰/۷۳، ۰/۷۳، ۰/۸۵، و ۰/۷۶ محاسبه شد. بنابراین، دقت روش‌های OWA، WLC، و MABAC خیلی خوب و دقت روش VIKOR عالی است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی مناطق دارای احتمال وقوع بالای زمین‌لغزش، می‌تواند راه‌گشایی برای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه شود.

واژگان کلیدی: حرکت دامنه‌ای، مخاطرات، AUC، GIS.

مقدمه

مطابق برآوردهای دفتر هماهنگ‌کننده امداد رسانی سازمان ملل متحد، بلایا و سوانح طبیعی همه‌ساله در حدود ۳۰-۵۰ میلیارد دلار امریکا ضرر و زیان اقتصادی در کل دنیا تحمیل می‌کنند (ساندرس و کلارک، ۲۰۱۱: ۱۳۰). بنابراین، می‌توان بیان کرد که بلایا و سوانح طبیعی یکی از دغدغه‌های مهم در سطح جهان محسوب می‌شوند و تعداد زیادی از آن‌ها اصولاً ژئومورفولوژیکی به‌شمار می‌روند. پدیده زمین‌لغزش جزو فرایندهای ژئومورفولوژیکی مهمی به‌شمار می‌رود که تحول چشم‌اندازها در نواحی کوهستانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در برخی موارد حوادث فاجعه‌باری را نیز رقم می‌زند (هاتانجی و موربواسکی، ۲۰۰۹: ۴۴۸). زمین‌لغزش‌ها در بین بزرگ‌ترین بلایا و سوانح طبیعی رده هفتم را از نظر تلفات جانی به خود اختصاص داده‌اند و بالغ بر ۱۷ درصد تلفات جانی حاصل از بلایای طبیعی را شامل می‌شوند (علی‌محمدلو، ۲۰۱۳: ۲۲۰). زمین‌لغزش شامل حرکت تند یا کند مواد سنگی، خاکی، یا مجموع هر دو روی دامنه به سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه است (کروستا، ۲۰۰۹: ۲). تلفات عظیم زمین‌لغزش ناشی از عوامل طبیعی و عوامل فعال خارجی است. از عوامل طبیعی دخیل در وقوع زمین‌لغزش می‌توان به زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی یا نوع خاک، ویژگی انسجام ساختاری، مقاومت برشی مواد، شرایط آب‌های زیرزمینی و اثر آن)، هندسه شیب (شیب، جهت، ارتفاع، و انحنای) و زمین یا پوشش زمین اشاره کرد. بارندگی، لرزه‌خیزی، و فعالیت‌های انسانی (فعالیت‌های ساختمانی و آماده‌سازی خاک برای کشاورزی در مناطق کوهستانی) از عوامل خارجی مؤثر در ایجاد لغزش زمین‌اند (سربی و فرخ‌نیا، ۲۰۱۸: ۲۳۰). در دهه‌های اخیر با توجه به روند افزایشی خسارت‌های ناشی از سوانح طبیعی، بالاخص زمین‌لغزش، مقوله پیش‌بینی و جلوگیری از خسارت‌های وارده به‌طور جدی مطرح شده است (ایزدی و انتظاری، ۱۳۹۲: ۳۳). شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و تولید نقشه‌های دقیق منطقه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش از موضوعات مهم برای مطالعات مدیریت خطر است و به‌منظور کاهش بلایای زمین‌لغزش حیاتی است (کلکسن و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۴؛ رابی و همکاران، ۲۰۲۲: ۱). نقشه‌های پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌توانند ابزار مؤثر و کارآمدی برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در راستای شناسایی پهنه‌های مناسب جهت توسعه آبی در اختیار قرار دهند.

امروزه، از یک سو، سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶: ۳۴۸) و در سال‌های اخیر برای مطالعه زمین‌لغزش مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM^۱ استفاده می‌شود (آهر و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۶۱؛ عرب‌عامری و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۳۹۰). بنابراین، می‌توان گفت استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شود و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان انجام شده و توانایی تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، بهاروند و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از روش WLC^۲، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه ده‌سفید لرستان پرداختند و نتایج مطالعه نشان داد به ترتیب ۳/۶۹ و ۲۹/۴۳ درصد از محدوده در کلاس خطر خیلی زیاد و زیاد قرار دارند. همچنین در این مطالعه با استفاده از شاخص احتمال تجربی مطلوبیت عملکرد مدل WLC تأیید شده است. حجازی و همکاران (۱۳۹۸) پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز حاجیلرچای را با استفاده از مدل VIKOR مطالعه کردند. نتایج مطالعه

1 Multi-criteria decision making

2 Weighted Linear Combination

نشان داد به ترتیب ۲۰/۲۲ و ۲۵/۳۸ درصد از مساحت حوضه دارای احتمال وقوع زمین‌لغزش خیلی زیاد و زیاد است و همچنین نتایج مطالعه نشان از هم‌خوانی نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده و لغزش‌های موجود بوده که این موضوع بیانگر صحت نقشه حاصله و دقت روش ویکور است. مددی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ MABAC و^۲ CODAS در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان کوثر (استان اردبیل) پرداختند. با توجه به نتایج مطالعه، به ترتیب عوامل شیب، کاربری اراضی، خاک، و لیتولوژی بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. با توجه به خروجی روش MABAC به ترتیب ۱۷/۸۹ و ۲۵/۲۲ درصد و طبق نتایج حاصل از مدل CODAS به ترتیب ۹/۰۷ و ۲۲/۱۸ درصد از مساحت محدوده در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر می‌باشند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد دقت روش ماباک در طبقه خوب و دقت روش کوداس در طبقه خیلی خوب قرار دارد. اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای خطر وقوع زمین‌لغزش شهرستان پاوه را با استفاده از روش‌های^۳ OWA و^۴ ANN ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، با توجه به خروجی مدل OWA، به ترتیب ۱۵/۵۳ و ۲۶/۶۴ درصد از منطقه در دو طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند و طبق خروجی شبکه عصبی ۱۹/۸۸ و ۲۹/۸۲ درصد از منطقه در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر واقع شده است و در نهایت، با مقایسه دو روش، مشخص شد که مدل OWA دارای دقت بالاتری نسبت به روش ANN بوده است. نادری و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد گلال استان ایلام با استفاده از مدل VIKOR پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، معیارهای زمین‌شناسی، شیب، و بارش بیشترین ضریب اهمیت را کسب کردند و زیرحوضه‌های بان سوهان، پلکانه، و حاجی‌بختیار بیشترین حساسیت‌پذیری را دارند. به علاوه، از انطباق نقشه‌های پهنه‌بندی و زمین‌لغزش‌های منطقه، صحت نقشه حاصله و کارایی مدل ویکور تأیید شده است. میشل و سمتا (۲۰۱۶)، به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری رانش زمین در استان سیمبو، پاپوا گینه نو از روش WLC استفاده کردند. با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب ۲۶/۸۸ و ۱۴/۴۱ درصد از پوشش منطقه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد و، با توجه به نقاط لغزشی موجود، کلاس‌های خطر به دست آمده از مدل WLC دقیق است. جیگووایس و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش‌های WLC و OWA، در قسمت غربی جمهوری صربستان خطر زمین‌لغزش را بررسی کردند. با توجه به نتایج مطالعه، تجزیه و تحلیل چندمعیاره دارای دقت بسیار بالایی است و به ترتیب ۷۷۶/۳ کیلومتر مربع (۱۵ درصد) و ۱۱۲۶ کیلومتر مربع (۲۱/۸ درصد) از محدوده در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. دیکشیت و همکاران (۲۰۲۰) ارزیابی خطر زمین‌لغزش در Phuentsholing بوتان را با بهره‌گیری از روش WLC بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داده که ۱۱/۷ درصد از منطقه در رده خطر بالا قرار دارد و عوامل زمین‌شناسی، شیب، و بارندگی بیشترین اهمیت را در زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. به علاوه، طبق نتایج حاصله، کارایی روش WLC، با توجه به رخدادهای زمین‌لغزش در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴، تأیید شد. صالح‌پور جم و همکاران (۲۰۲۱)، با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۵ LIM،^۶ TOPSIS و VIKOR، حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز الموت ایران را مطالعه کردند. با توجه به نتایج مطالعه، مساحت زیرمنحنی ROC برای LIM، TOPSIS و VIKOR به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸۵ و ۰/۸۴ محاسبه شد. بنابراین، دقت مدل‌های MCDM برای مدل TOPSIS قابل قبول و برای VIKOR عالی است. همچنین، طبق نتایج حاصل از این مطالعه بیان شده است که، با توجه به وجود مناطق با پتانسیل بالا و بسیار بالا، مدیریت ریسک زمین‌لغزش در این حوضه بسیار مهم است و به طور کلی نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های MCDM

1 Multi-Attributive Border Approximation area Comparison

2 COMbinative Distance-based Assessment

3 Ordered Weighted Averaging

4 Artificial Neural Networks

5 Landslide index method

6 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

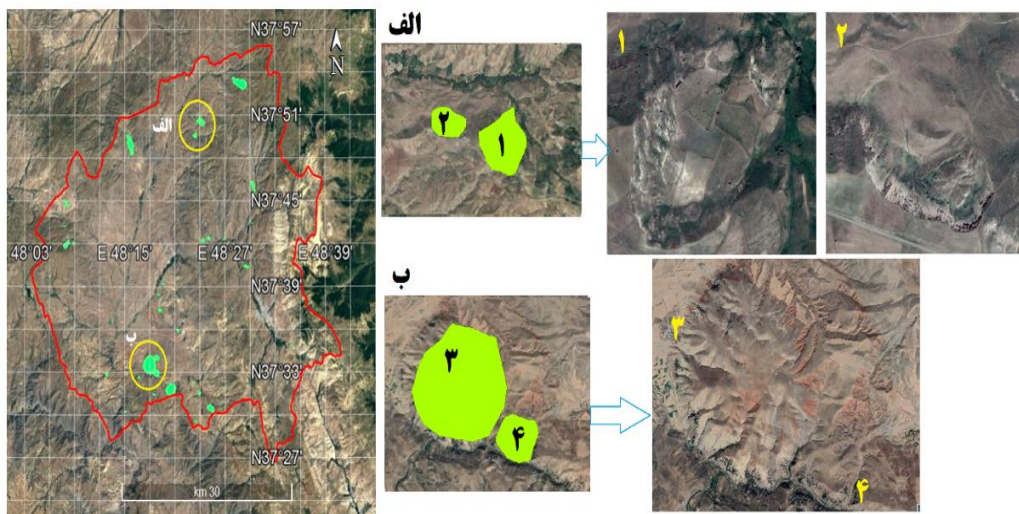
عملکرد خوب مدل‌ها را برای تولید خطر زمین‌لغزش نشان می‌دهد. علاوه بر مطالعاتی که در مناطق مختلف ایران و جهان با استفاده از روش‌های چندمعیاره انجام پذیرفته است، اشاره به مطالعات هرچند محدودی که در رابطه با موضوع زمین‌لغزش در حوضه گیوی‌چای انجام شده است لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این رابطه می‌توان اشاره کرد مددی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای خطر زمین‌لغزش در بخشی از حوضه گیوی‌چای را با استفاده از روش LIM بررسی کردند. نتایج نشان داد به ترتیب ۵۷/۸ و ۳۰/۲ درصد از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و نقاط پرخطر بیشتر در مناطقی با بارش ۳۷۵-۴۰۵ میلی‌متر، شیب ۱۷-۳۳ درصد، طبقات ارتفاعی بین ۱۵۱۲-۱۹۲۷ متر و کاربری‌های زراعی، مرتع، و باغات قرار دارند. رجبی و فیض‌الله‌پور (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه، به بررسی خطر زمین‌لغزش در قسمتی از حوضه گیوی‌چای پرداختند. طبق نتایج به دست آمده به ترتیب طبقات بسیار پرخطر و پرخطر ۱۱ و ۷۰ درصد از مساحت محدوده را تشکیل می‌دهند و بیشتر مناطق با خطر خیلی زیاد در مناطق شرقی و جنوب شرق منطقه قرار می‌گیرد. همچنین، وجود سازندهای زمین‌شناسی مستعد، غالب بودن کاربری زراعی و مراتع به رخداد زمین‌لغزش در محدوده منجر شده است.

حوضه گیوی‌چای از حوضه‌های شمال غرب ایران است. بخش اعظمی از مساحت حوضه کوهستانی و پرشیب است و نیز اغلب کاربری اراضی به صورت زمین‌های کشاورزی، مراتع، و باغات است که به دلیل استفاده غیراصولی و بی‌رویه از اراضی (به ویژه زراعی) پتانسیل وقوع زمین‌لغزش حوضه زیاد است و این فرایند در کنار وقوع طغیان‌های رودخانه باعث کاهش عمر مفید سد گیوی و کانال‌های واقع بر روی این رودخانه می‌شود. با توجه به این امر که تاکنون با استفاده از روش‌های تحلیل چندمعیاره خطر زمین‌لغزش در این حوضه مطالعه و بررسی نشده است، در مطالعه حاضر پتانسیل زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چندمعیاره و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی مد نظر قرار گرفته است تا با شناسایی مناطق اولویت‌دار از نظر خطر زمین‌لغزش اقدامات لازم جهت کنترل زمین‌لغزش حوضه و برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از منابع و استراتژی‌های مدیریت پایدار زمین به عمل آید. به علاوه، نتایج حاصل از این پژوهش، با معرفی بهترین روش تحلیل چندمعیاره، می‌تواند در زمینه انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌هایی با شرایط طبیعی و انسانی مشابه با محدوده حوضه گیوی‌چای بسیار مفید بوده و مورد توجه قرار گیرد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی، و استفاده از فنون تحلیل چندمعیاره است. برای پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI، Idrisi، و Excel بهره‌گیری شده است. برای بررسی خطر زمین‌لغزش، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، نخست باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شود و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شود. بدین منظور، در این مطالعه، نخست عوامل مؤثر (شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از راه ارتباطی، فاصله از آبراهه، و فاصله از گسل)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی شد. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی راه‌های ارتباطی و شبکه آبراهه با استفاده از نقشه خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل تهیه شد. لایه‌های شیب و جهت شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر دانلود شده از سایت vertex.daac.asf.alaska.edu به ترتیب با استفاده از دستورهای slope و aspect در Arc map تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی گیوی،

خلخال-رضوان‌شهر، و ماسوله با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر سنجنده لندست هشت، سنجنده OLI به شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۳، تاریخ ۲۰/۰۶/۲۰۲۰، اخذ شده از سایت earthexplorer.usgs.gov استفاده شده است. در این راستا، نخست تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi، انجام شد. سپس، طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها در مطالعه حاضر، چه از نظر تک‌تک کاربری‌ها چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد) در ارتباط با اطلاعات تولید شده برخوردار است. نقشه بارش حوضه نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و با استفاده از روش معادله گرادیان بارش (P:0.11104H+193.24) ترسیم شد. بدین صورت در محیط Arc map، در Raster Calculator، در اجرای معادله گرادیان بارش، به جای H، نقشه طبقات ارتفاعی جای‌گذاری شد و در نهایت نقشه بارش به دست آمد. به منظور تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش حوضه، که نشان‌دهنده مجموعه‌ای لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه بوده و به آگاهی در مورد مکان‌های لغزش‌ها منجر می‌شود، از اطلاعات مربوط به بانک زمین‌لغزش استان اردبیل (۱۳۹۲) استفاده شد و برای بررسی صحت اطلاعات مربوط به نقاط لغزشی، نسبت به بررسی موقعیت همه لغزش‌های رخ داده در حوضه، با توجه به پیمایش‌های میدانی و با استفاده از تصاویر Google Earth اقدام شد و در کل ۳۷ نقطه لغزشی در سطح حوضه شناسایی شد و نقشه نهایی نقاط لغزشی حوضه ترسیم گردید (شکل ۳).



شکل شماره ۱. نقشه موقعیت زمین‌لغزش‌ها به همراه نمایش واضح‌تر تعدادی از نقاط لغزشی بر روی تصاویر Google Earth

مراحل روش WLC (ترکیب خطی وزنی)

یکی از روش‌های متداول در ارزیابی چندمعیاری که کاربرد وسیعی پیدا کرده است روش تلفیقی خطی وزن دار است. ارزیابی‌ها توسط عملگر WLC به‌طور کلی شامل مراحل زیر است: ۱. تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش؛ ۲. تشکیل ماتریس تصمیم؛ ۳. هر لایه نقشه معیار را به صورت استاندارد درمی‌آوریم؛ ۴. وزن‌های معیار را تعیین می‌نماییم؛ ۵. لایه‌های نقشه استاندارد شده وزنی را ایجاد می‌کنیم (ضرب لایه‌های نقشه استاندارد شده در وزن‌های متناظر)؛ ۶. با اعمال عملیات همپوشی جمعی بر روی لایه‌های نقشه استاندارد شده وزنی، نمره یا امتیاز کل را در رابطه با هر گزینه به دست می‌آوریم؛ گزینه‌ای که دارای بالاترین امتیاز (رتبه) باشد بهترین گزینه شناخته می‌شود. به‌طور رسمی، در قاعده تصمیم‌گیری برای ارزیابی هر گزینه یا A_i ، از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$A_i = \sum_j w_j x_{ij}$$

رابطه ۱

که در آن x_{ij} معرف نمره گزینه i ام در ارتباط با صفت j ام و w_j مشتمل بر یک وزن استاندارد شده است؛ به گونه‌ای که $\sum w_j = 1$ وزن‌ها اهمیت نسبی هر صفت را به نمایش می‌گذارد. با تعیین ارزش حداکثر $A_j = i$ ، اولویت‌دارترین گزینه انتخاب می‌شود (گنجه‌بیان و همکاران، ۲۰۲۰: ۴۵).

مراحل روش OWA (میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی)

روش OWA تلفیق یک جمع وزنی با الویت‌بندی معیارهای ارزیابی بوده و علاوه بر وزن معیارها الویت‌بندی آن‌ها را نیز لحاظ می‌کند و الویت‌بندی وزن‌ها امکان کنترل مستقیم معیارها را فراهم می‌نماید (رهنما و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۲). جاذبه روش OWA این است که محقق می‌تواند به واسطه دوباره مرتب‌سازی و تغییر پارامترهای معیار، دامنه وسیعی از نقش‌ها و پیشنهادها گوناگون و پیش‌بینی را تولید کند (میرآبادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۷). ترکیب ارزیابی‌ها توسط عملگر OWA به طور کلی شامل سه مرحله زیر است: ۱. تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش؛ ۲. تشکیل ماتریس تصمیم؛ ۳. مرتب‌سازی متغیرهای ورودی (استانداردسازی)؛ ۴. تعیین وزن‌های مرتبط با عملگر OWA، با استفاده از یک روش مناسب؛ ۵. به کارگیری عملگر OWA، برای ترکیب گزینه‌های مرتب‌شده؛ بعد از به کارگیری وزن‌های معیار، آن معیاری که بالاترین ارزش را دارد، اولین وزن ترتیبی را به دست می‌آورد، معیاری که بالاترین ارزش بعدی را داشته باشد در دومین وزن ترتیبی قرار می‌گیرد و الی آخر (رابطه ۲).

$$\text{رابطه ۲} \quad w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

رابطه ۲ نشان می‌دهد که w_1 به معیاری تخصیص می‌یابد که با بالاترین ارزش معیار در رابطه با گزینه مورد نظر مشخص شده است. در حالی که w_2 در ملازمت با بالاترین ارزش معیار بعدی در رابطه با همان گزینه مطرح می‌شود و w_n نیز به پایین‌ترین ارزش معیار اختصاص می‌یابد (فیضی‌زاده و بلاشکه، ۲۰۱۲: ۳).

مراحل مدل Vikor (راهکار توافقی و بهینه‌سازی چندمعیاره)

مدل Vikor مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است. تأکید این روش بر رتبه‌بندی و انتخاب از مجموعه‌ای از گزینه و تعیین راه‌حل توافقی برای مسئله با معیارهای متضاد است (چن و انگ، ۲۰۰۹: ۲۳۵). مراحل الگوریتم پیاده‌سازی ویکور دارای گام‌های زیر است: ۱. تشکیل ماتریس تصمیم با توجه به تعداد معیارها، تعداد گزینه‌ها، و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف ماتریس تصمیم؛ ۲. بی‌مقیاس کردن یا استانداردسازی ماتریس تصمیم؛ ۳. تعیین بردار وزن معیار، به عبارت دیگر، در این مرحله وزن‌های اختصاص یافته به هر صفت را تعیین می‌کنیم؛ ۴. تعیین بهترین مقدار (f_j^*) و بدترین مقدار (f_j^-) برای معیارها؛ ۵. محاسبه مقدار سودمندی یا حداکثر مطلوبیت (S) و مقدار تأسف (R). در این مرحله مقدار S با توجه به رابطه ۳ و R با توجه به رابطه ۴ محاسبه می‌شود که w_j مقدار وزن مواد برای معیار j و f_{ij} هر نقشه معیار است.

$$\text{رابطه ۳} \quad S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$$

$$\text{رابطه ۴} \quad R_i = \text{Max} \left\{ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right\}$$

۶. محاسبه شاخص VIKOR (مقدار Q) است. مقدار Q با توجه به رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۵} \quad Q_i = v \left[\frac{S_i - S^-}{S^* - S^-} \right] + (1 - v) \left[\frac{R_i - R^-}{R^* - R^-} \right]$$

در فرمول فوق $R^* = \text{Max} R_i$ ، $R^- = \text{Min} R_i$ ، $S^* = \text{Max} S_i$ ، $S^- = \text{Min} S_i$ است. در این روابط

$\frac{R^* - R^-}{R_i - R^-}$ بیان‌کننده نرخ فاصله از حد ایده‌آل است. $R_i - R^-$ ، با توجه به میزان توافق گروه V ، به‌عنوان بیان‌کننده نرخ فاصله از حد ضد ایده‌آل و پارامتر تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود. در صورت توافق بالا مقدار آن بیش از $0/5$ ، در صورت توافق با اکثریت آرا مقدار آن مساوی $0/5$ و در صورت توافق پایین مقدار آن کمتر از $0/5$ خواهد بود. مقدار Q تابعی از S_i و R_i است. در این مطالعه این مقدار $0/5$ در نظر گرفته شد؛ V مرتب‌کردن گزینه‌ها بر اساس مقادیر R ، S ، و Q است. در این مرحله با توجه به مقادیر R ، S ، و Q گزینه‌ها در سه گروه از کوچک‌تر به بزرگ‌تر مرتب می‌شوند و در نهایت گزینه‌ای به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که در هر سه گروه به‌عنوان گزینه برتر شناخته شود (علی‌نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹: ۲۳؛ کیم و اهن، ۲۰۲۰: ۲).

مراحل روش MABAC (مقایسه چندشاخصه محدوده تقریبی مرزها)

۱. تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش؛ ۲. ماتریس تصمیم در این روش به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مسئله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است؛ ۳. نرمال‌سازی ماتریس تصمیم؛ در این گام باید ماتریس تصمیم مرحله دوم را نرمال کرد؛ ۴. وزن‌دار کردن ماتریس نرمال؛ ۵. تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس (g): در رابطه ۶ عناصر ماتریس وزنی (V) و m تعداد کل گزینه‌های جای‌گزین را نشان می‌دهد. پس از محاسبه مقدار g_i ماتریس محدوده‌های تقریبی مرزی با توجه به معیارهای G با فرمت $N \times 1$ شکل می‌گیرد و n تعداد کل معیارهایی را که گزینه‌های ارائه‌شده برای آن‌ها انتخاب می‌شود نشان می‌دهد. بنابراین، اگر n معیار داشته باشید، یک ماتریس $G1 \times n$ به صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۷):

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_n] \quad \text{رابطه ۷}$$

۶. محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از رابطه ۸، فاصله گزینه‌ها تا ناحیه g به‌دست می‌آید. در واقع، باید ماتریس وزن‌دار را از ماتریس g کم کرد.

$$Q = V - G \quad \text{رابطه ۸}$$

پس از مشخص شدن ماتریس Q ، می‌توان با استفاده از حد بالایی مساحت ($G+$) و حد پایینی مساحت ($G-$) وضعیت هر گزینه را مشخص کرد. بر این اساس گزینه A_i متعلق به اجتماع مجموعه یادشده است. حد بالای مساحت ($G+$) ناحیه‌ای است که گزینه ایده‌آل مثبت در آن قرار دارد و حد پایینی مساحت ($G-$) ناحیه‌ای است که گزینه ضد ایده‌آل در آن قرار دارد. میزان تعلق گزینه A_i به اجتماع بالا بر اساس رابطه ۹ به‌دست می‌آید. برای انتخاب گزینه A_i ، به‌عنوان بهترین فرم از مجموعه، لازم است که حداکثر معیارهای ممکن به منطقه تقریبی فوقانی ($G+$) تعلق داشته باشد. مقدار بالاتر $q_i \in G+$ نشان می‌دهد که گزینه جای‌گزین به گزینه جای‌گزین ایده‌آل نزدیک‌تر است، در حالی که مقدار پایین‌تر $q_i \in G-$ نشان می‌دهد که گزینه جای‌گزین به گزینه جای‌گزین ضد ایده‌آل نزدیک‌تر است.

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۹}$$

۷. انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک (MABAC)، با استفاده از رابطه ۱۰، امتیاز نهایی هر گزینه مشخص و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

$$S_i = \sum(q_{ij}); i = 1.2 \dots n; j = 1.2 \dots m \quad \text{رابطه ۱۰}$$

محاسبه مقادیر توابع معیار توسط گزینه‌ها به‌عنوان مجموع فاصله‌های جای‌گزین از مناطق تقریبی مرزی q_i به‌دست می‌آید. با جمع کردن عناصر ماتریس Q در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها به‌دست می‌آید. در این رابطه n

تعداد معیارها را نشان می‌دهد و m تعداد گزینه است (علی‌نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹: ۱۹۳؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۱۱).

وزن‌دهی CRITIC (اهمیت معیارها از طریق همبستگی بین معیارها)

در این روش داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها تجزیه و تحلیل می‌شود. در این روش، پس از محاسبه انحراف معیار معیارهای مورد بررسی، ماتریس متقارنی به ابعاد $m \times m$ ایجاد می‌شود که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار Z با معیارهای دیگر از روی رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن C_{jk} معرف مجموع تضاد معیار Z با معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد و r_{jk} همبستگی بین دو معیار k و Z را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل Z را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه کرد.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن C_j معرف میزان اطلاعات معیار Z و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار Z را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای C_j بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند Z از رابطه ۱۳ تعیین می‌شود.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن W_j معرف وزن معیار Z و C_k بیانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از $k = 1$ شروع می‌شود و تا $k = m$ ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات همه معیارها به دست می‌آید (علی‌نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹: ۱۹۹؛ تاش و آیتک آده، ۲۰۱۹: ۵۳۰). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کرتیک، نخست در محیط ادریسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل با استفاده از تابع REGRESS به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل اقدام گردید.

در اجرای همه الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و برای دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین‌لغزش در حوضه گیوی‌چای، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد کردن داده‌ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می‌گیرد (بایوم‌گرتل و همکاران، ۲۰۱۹: ۵؛ حسینی، ۲۰۱۹: ۱۳).

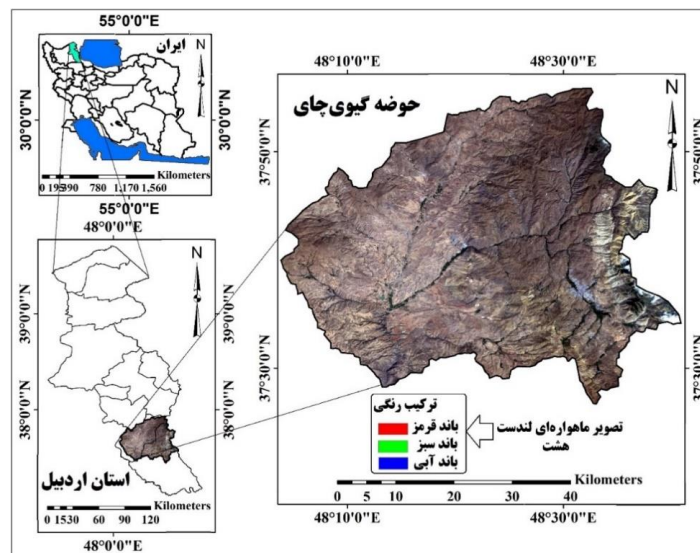
جدول شماره ۱. نوع توابع فازی ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
جهت شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش و سپس فازی کردن	تابع بزرگ فازی
طبقات ارتفاعی	با افزایش ارتفاع خطر زمین‌لغزش افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از راه ارتباطی	در مناطق مجاور راه ارتباطی، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور گسل، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
بارش	با افزایش مقدار بارش، خطر زمین‌لغزش افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی

ارزش‌گذاری معیارها با توجه به شرایط طبیعی و انسانی محدودده و با توجه به مطالعات پیشین شامل ال جازولی و همکاران (۲۰۱۹)، کرکس (۲۰۱۸)، مددی و همکاران (۱۳۹۹)، کدوی و همکاران (۲۰۱۸)، خان و همکاران (۲۰۱۹)، آلسواین و پرادهن (۲۰۱۶)، چن و همکاران (۲۰۱۷)، خامه‌چیان و همکاران (۱۳۸۶)، دای و لی (۲۰۰۲)، بوی و همکاران (۲۰۱۱)، شریفی پیچون و همکاران (۱۴۰۰) انجام شده است.

محدوده مورد مطالعه

حوضه گیوی‌چای با مساحت ۱۸۱۵ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های آبریز سفیدرود است که در مختصات ۴۸ درجه و ۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه و ۱۲ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه و ۳ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۵۵ ثانیه عرض شمالی در جنوب استان اردبیل و در محدوده شهرستان‌های خلخال و گیوی واقع شده است (شکل ۲). این حوضه از شمال به حوضه آبریز قره‌سو و ارتفاعات ترکا، پيله، چاله‌مرز، و گنداب، از غرب به حوضه آبریز رودخانه قرنقو، و از شرق به حوضه آبریز رودخانه‌های آق‌اولر، ناورود، و رشته‌کوه‌های تالش، و از جنوب به حوضه آبریز پایاب رودخانه قزل‌اوزن محدود می‌شود (فیض‌اله‌پور، ۱۳۹۱: ۵۲). حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه گیوی‌چای به ترتیب ۸۷۰ و ۳۰۰۵ متر است. از نظر زمین‌ساختی، منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌ساختی البرز غربی - آذربایجان قرار دارد. حوضه گیوی‌چای، با توجه به شرایط اقلیمی، فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، و انسانی حاکم بر محدوده، بسیار مستعد وقوع زمین‌لغزش است و نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در سطح حوضه در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل شماره ۲. نقشه موقعیت حوضه گیوی‌چای در کشور ایران و استان اردبیل



شکل شماره ۳. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌ها رخ داده در سطح حوضه: (الف) زمین‌لغزش در اطراف روستای فیروزآباد، (ب) زمین‌لغزش در اطراف شهر گیوی و کج شدن درختان در اثر رانش، (ج) زمین‌لغزش در جاده کوثر - خلخال، (د) زمین‌لغزش در شرق روستای سکرآباد در مارن‌های قرمز ژیبس دار

بحث و یافته‌ها

ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش

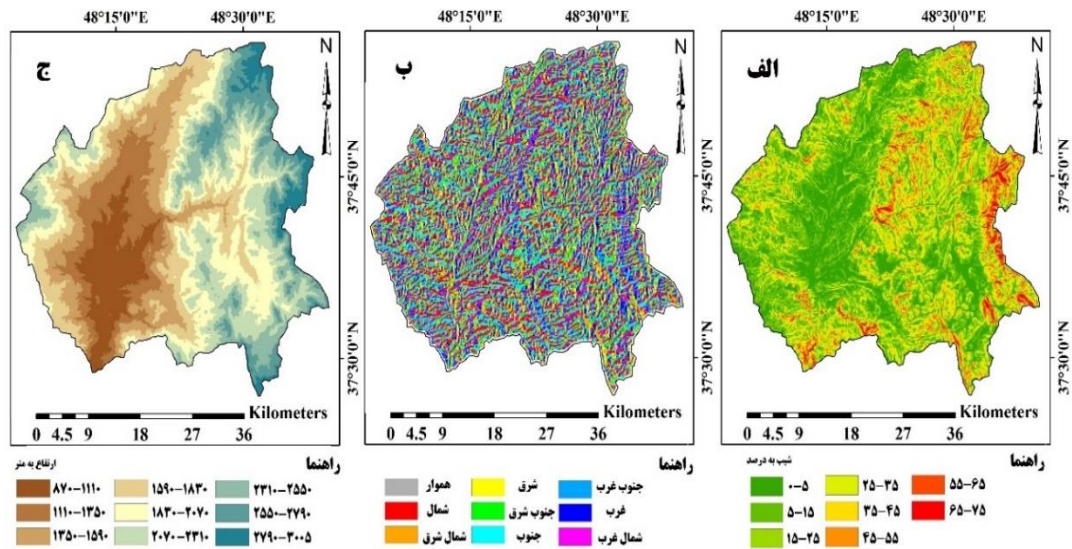
پس از تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش، لازم است تا صحت مدل حساسیت به زمین لغزش مورد استفاده و مورد بررسی قرار گیرد. منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی است (محمدنیا و فلاح قالمهری، ۱۳۹۷: ۱۱۹). در منحنی ROC، در محور افقی، پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع زمین لغزش به وسیله مدل را به درستی پیش‌بینی کرده (مثبت درست) و در محور عمودی نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند (مثبت غلط) ترسیم می‌شود (جورسفسکی، ۲۰۰۶: ۳۹۸). طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی (AUC) به صورت ۰/۹-۱: عالی، ۰/۸-۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط، ۰/۵-۰/۶: ضعیف است (ناندی و شاکور، ۲۰۱۰: ۳۹۴). مدلی که بیشترین مقدار AUC را دارا باشد دارای عملکرد نسبی بالاتری است.

معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه گیوی چای

شیب: شیب از شاخص‌های توپوگرافیک مهم است و عامل اصلی دخیل در وقوع زمین لغزش در نظر گرفته می‌شود (ال جازولی و همکاران، ۲۰۱۹: ۴). وجود شیب تشدیدکننده دیگر عوامل مطرح در زمین لغزش است. اگر در یک دامنه‌ای کلیه شرایط یکسان باشد، افزایش یافتن شیب به افزایش حساسیت در برابر رانش زمین منجر می‌شود (کرکس، ۲۰۱۸: ۱۳۵). در حوضه گیوی چای مقدار شیب بین ۰ تا ۷۵ درصد است. در مجموع، ۱۰۳۵/۱۲ کیلومتر مربع از مساحت حوضه دارای شیب ۰-۱۵ و ۶۶۹/۰۵ کیلومتر مربع دارای شیب ۱۵-۳۵ است. به ترتیب شیب‌های ۳۵-۵۵ و ۵۵-۷۵ درصد نیز ۸۲/۱۶ و ۲۸/۶۹ کیلومتر مربع از مساحت حوضه را پوشش می‌دهند. حوضه گیوی چای با داشتن متوسط شیب ۳۸ درصد مستعد برای لغزش است (شکل ۴- الف).

جهت شیب: جهت شیب در مقدار درجه حرارت، میزان رطوبت، نوع و تراکم پوشش گیاهی، و در نهایت در نوع و همچنین مقدار هوازگی نقش بسیار بالایی دارد (مددی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰). ۲۴۶/۷۸ کیلومتر مربع از مساحت حوضه دارای جهت شیب شمالی، ۲۱۵/۱۴ کیلومتر مربع شمال شرقی، ۲۲۵/۱۳ کیلومتر مربع شمال غربی، ۲۰۸/۸۱ کیلومتر مربع غرب، ۲۱۳/۵۸ کیلومتر مربع شرق می‌باشند. همچنین، به ترتیب ۲۱۹/۲۶، ۲۱۸/۰۷ و ۲۶۸/۱۹ کیلومتر مربع در جهات جنوب شرقی، جنوب غربی، و جنوب قرار دارند (شکل ۴- ب).

ارتفاع: متغیر ارتفاع بسیاری از ویژگی‌های محیطی تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش را تحت تأثیر قرار می‌دهد که از جمله می‌توان به کنترل‌های ارتفاع بر عناصر اقلیمی، پوشش گیاهی، و فرایندهای هوازگی اشاره کرد (کدوی و همکاران، ۲۰۱۸: ۵). بر اساس تصویر DEM، منطقه (شکل ۴- ج)، طبقات ارتفاع حوضه، به ۹ طبقه از ۸۷۰-۱۱۱۰ متر تا ۲۷۹۰-۳۰۰۵ متر کلاسه‌بندی شد. متوسط ارتفاع حوضه آبریز گیوی چای ۱۹۳۸ متر از سطح آزاد دریاهاست. حداقل ارتفاع منطقه در حدود ۸۷۰ متر است که در محل تقریبی تلاقی رودخانه گیوی چای به رودخانه قزل اوزن واقع شده است. حداکثر ارتفاع در سطح این حوضه نیز ۳۰۰۵ متر از سطح دریاست. حوضه دارای اختلاف ارتفاع زیادی است. این اختلاف ارتفاع بالغ بر ۲۱۳۵ متر است و این مقدار اختلاف ارتفاع باعث تنوع محیطی و همچنین انرژی دینامیکی بالا در سطح حوضه مطالعاتی شده است.

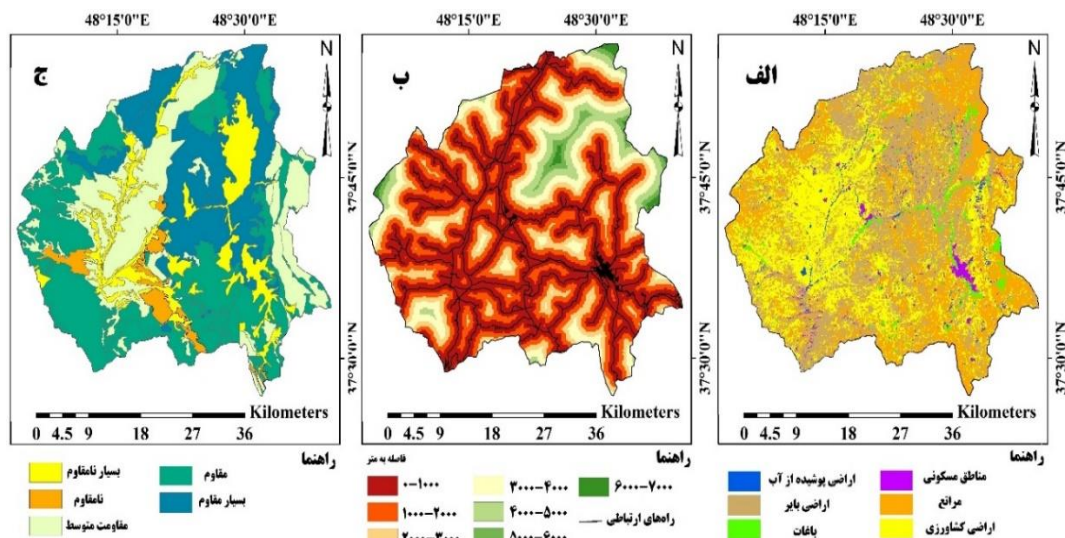


شکل شماره ۴. نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه گیوی چای (الف) نقشه شیب، (ب) نقشه جهت شیب، (ج) نقشه طبقات ارتفاعی

کاربری اراضی: تغییر کاربری اراضی تحت تأثیر عوامل مربوط به نیازهای جمعیت، مانند تبدیل زمین‌های کشاورزی و جنگلی به مناطق شهری، تبدیل جنگل به زمین‌های کشاورزی، و کاهش شیب برای توسعه زیرساخت‌ها قرار دارد. کاربری زمین عامل اصلی در تهیه نقشه خطر زمین لغزش است (ال جازولی و همکاران، ۲۰۱۹: ۴). انواع کاربری‌ها در حوضه به صورت کشاورزی با مساحت ۷۵۴/۹۳ کیلومترمربع، مراتع با مساحت ۸۱۲/۳۰ کیلومترمربع، باغات با مساحت ۵/۳۰ کیلومترمربع، اراضی بایر با مساحت ۲۲۹/۸۴ کیلومترمربع، مناطق مسکونی با مساحت ۸/۸۷ کیلومترمربع، و اراضی پوشیده از آب با مساحت ۳/۷۸ کیلومترمربع است (شکل ۵- الف).

فاصله از جاده: فاصله تا جاده‌ها یکی از عوامل اصلی انسانی است که بر وقوع زمین لغزش تأثیر می‌گذارد (جمال آبادی و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۲). در هنگام کارهای عمرانی، برخی از رانش‌های زمین به دلیل زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها ایجاد می‌شود (ال جازولی و همکاران، ۲۰۱۹: ۴). در محدوده مطالعاتی فاصله از جاده در حد فاصل صفر تا ۷۰۰۰ متر است (شکل ۵- ب). راه‌های ارتباطی اردبیل- خلخال و گیوی- خلخال از لحاظ خطر زمین لغزش بسیار پرخطر محسوب می‌شوند و به‌طور مکرر در این محورهای ارتباطی شاهد وقوع لغزش‌های کوچک و بزرگ هستیم.

لیتولوژی: ویژگی‌های لیتولوژیک به صورت گسترده‌ای بر خصوصیات فیزیکی همچون استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسطحی و احتمال وقوع زمین لغزش تأثیر می‌گذارد و به همراه شیب، ماهیت، و شدت زمین لغزش را تعیین می‌کند (خان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۲). به‌طور کلی، سنگ‌شناسی یک عامل مکرر در تجزیه و تحلیل حساسیت به زمین لغزش است (آلسواین و پرادهن، ۲۰۱۶: ۷۰۹). نقشه سنگ‌شناسی استخراج‌شده نشان داد که منطقه مورد مطالعه با انواع واحدهای سنگ‌شناسی پوشانده شده است. از جمله این واحدها می‌توان به گدازه‌های آندزیتی و داسیتی، تراکی آندزیت، بازالت و توف، به همراه سنگ‌های رسوبی تراورتن، پادگانه‌های آبرفتی جوان و قدیمی و مستعد فرسایش اشاره کرد که هر یک از این سازندها از مقاومت متفاوتی برخوردارند. از لحاظ مقاومت، سازندهای محدوده به پنج طبقه- از مقاومت بسیار کم تا مقاومت بسیار زیاد- تقسیم شده است. به ترتیب ۲۵۴/۹۸ و ۶۴/۰۸ کیلومترمربع از مساحت حوضه دارای مقاومت بسیار کم و کم است. ۴۳۸/۴۲ کیلومترمربع از سطح حوضه را سازندهایی با مقاومت متوسط پوشانده است و به ترتیب سازندهایی با لیتولوژی مقاوم و بسیار مقاوم ۶۲۲/۱۴ و ۴۳۵/۴۰ کیلومترمربع از مساحت حوضه را تشکیل داده است (شکل ۵- ج).

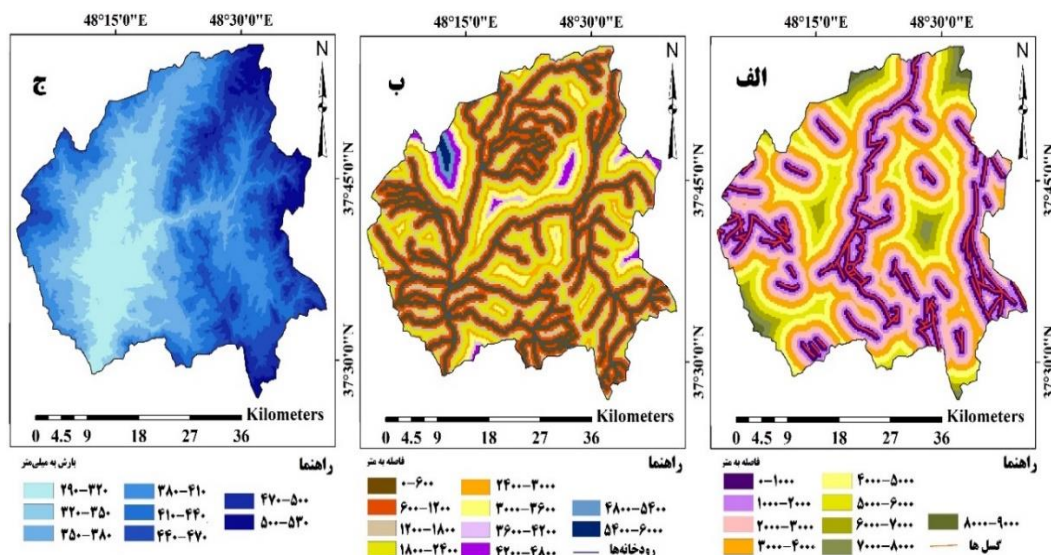


شکل شماره ۵. نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه گیوی چای: الف) نقشه کاربری اراضی، ب) نقشه فاصله از راه ارتباطی، ج) نقشه لیتولوژی

فاصله از گسل: مناطق نزدیک به گسل به‌طور کلی بسیار مستعد رانش زمین‌اند، زیرا قدرت سنگ‌های اطراف گسل به دلیل شکست زمین‌ساختی کاهش می‌یابد (چن و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۱۴). حرکت گسل نیز می‌تواند به نوعی شروع لغزش در دامنه باشد. بنابراین، به‌منظور بررسی نقش گسل در ایجاد زمین‌لغزش‌ها، نقشه فاصله از گسل تهیه می‌شود (خامه‌چیان و همکاران، ۱۳۸۶: ۵۹). فاصله از گسل در حوضه مطالعاتی بین صفر تا ۸۵۰۰ است (شکل ۶- الف). گسل‌های اصلی منطقه همسو با راستای گسترش ساختمان‌های چین‌خورده، یعنی شمال غرب- جنوب شرق توسعه و پراکندگی دارند. از جمله اصلی‌ترین گسل‌های موجود در محدوده منطقه می‌توان اشاره کرد به: گسل‌های فیروزآباد- مجدر (با طولی بیش از ۵۰ کیلومتر، دارای راستای شمال- شمال خاوری و جنوب- جنوب باختری که با عبور از محدوده آلتراسیون‌های حاصل از فرسایش شیمیایی آندزیت‌های پورفیری و ایجاد شیب زیاد باعث فرسایش و وقوع زمین‌لغزش‌هایی در غرب حوضه شده است. طبقات مارنی و ماسه‌سنگی نئوژن در مجاورت این گسل در محدوده گیوی پایین تا ۸۵ درصد شیب پیدا کرده‌اند و ادامه این گسل وارد رودخانه گیوی چای شده و این خط گسلی در این بخش توسط رسوبات جوان پوشیده شده است؛ در بین روستای گرم‌خانه و رودخانه گیوی چای گسل معکوس دیگری دیده می‌شود که به روراندگی آهک‌های کرتاسه بر روی واحدهای ولکانو آئوسن منجر شده است. گسل گیوی (دارای راستای شمالی- جنوبی و طولی نزدیک به ۱۴۰ کیلومتر است و مرز رسوبات مزوزوئیک و سنگ‌های آتشفشانی در شرق و رسوبات نئوژن را در غرب خود تشکیل می‌دهد؛ گسل مجره (با طولی قریب به ۱۵ کیلومتر در جنوب شرق حوضه رخساره‌های مختلف کرتاسه را تحت تأثیر قرار داده است) (رجبی و فیض‌اله‌پور، ۱۳۹۳: ۱۶۹).

فاصله از شبکه آبراهه: رودخانه‌ها نقش عمده‌ای در توسعه زمین‌لغزش ایفا می‌کنند و می‌توانند به زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها منجر شوند؛ در نتیجه، فرسایش و اشباع دامنه‌ها ممکن است بر شروع زمین‌لغزش تأثیر بگذارد (دای و لی، ۲۰۰۲: ۲۱۹؛ بوی و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴۲۱). حوضه آبریز گیوی چای متشکل از رودخانه‌های اصلی به نام‌های هروچای، آریاچای، و گیوی چای است. هروچای از ارتفاعات جنوب شهر خلخال سرچشمه گرفته و به‌سوی شمال جریان دارد. آریاچای تقریباً در همان امتداد ولی در جهت مخالف از شمال به جنوب جاری است. هر دو رود در پایین‌دست به هم پیوسته و جریان به سمت غرب منحرف شده و ارتفاعات ما بین خلخال و گیوی را با دره تنگ و عمیقی بریده و به شهر گیوی می‌رسد. در این منطقه این رود به نام گیوی چای معروف است. رودخانه‌های اصلی، پس از دریافت جریان رودخانه‌های فرعی سنگورچای، نیلق چای، و گزاز، به رودخانه قزل‌اوزن تخلیه می‌شود. فاصله از آبراهه در حوضه مطالعاتی بین صفر تا ۶۰۰ متر است (شکل ۶- ب).

بارندگی: بارندگی یکی از عوامل بسیار مهم در ایجاد یا تسریع زمین‌لغزش‌هاست. نقش آب در گسیختگی شیب‌ها و وقوع آن‌ها و همچنین به‌صورت عامل کاهش‌دهنده مقاومت برشی سطوح است (شریفی پیچون و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۴۸). مقدار بارش سالیانه در حوضه مطالعاتی ۲۹۰-۵۳۰ میلی‌متر و میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۰۰ میلی‌متر است (شکل ۶-ج). چهار ماه خرداد، تیر، مرداد، و شهریور کم‌بارش‌ترین ماه‌های سال در سطح منطقه‌اند و بیشترین مقدار بارش حوضه مربوط به ماه‌های فروردین و اردیبهشت است. به علاوه، مناطقی با بارش زیاد عمدتاً در نواحی کوهستانی و مرتفع حوضه گسترده شده‌اند و مناطقی با بارش کم در واحد دشت و کم‌ارتفاع حوضه قرار دارند.

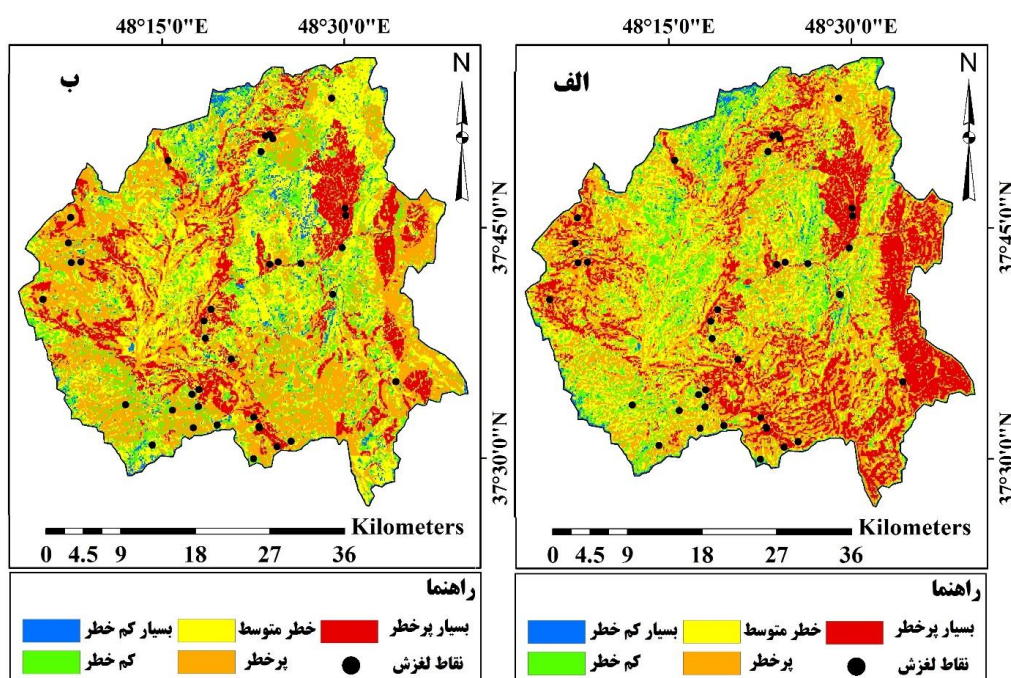


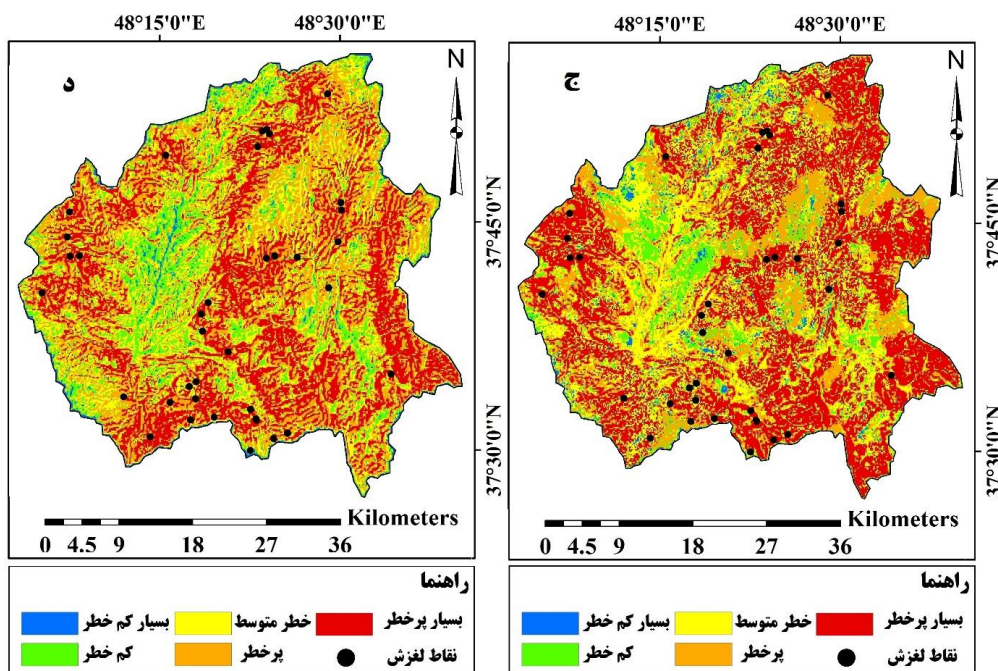
شکل ۶. نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای: الف) نقشه فاصله از گسل، ب) نقشه فاصله از رودخانه، ج) نقشه بارش سالیانه

پس از استخراج نقشه‌های هر یک از معیارها و اعمال کردن وزن‌های مربوطه حاصل از روش کرتیک (جدول ۲) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک‌های مورد بررسی، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در پنج طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر به‌دست آمد (شکل ۷). با توجه به خروجی حاصل از به‌کارگیری روش WLC، ۴۲۷/۳۵۲ کیلومترمربع از مساحت حوضه در کلاس بسیار پرخطر و ۵۹۹/۲۳۷ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد. طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌دست‌آمده از روش OWA، به‌ترتیب ۲۸۴/۲۶۲ و ۶۷۰/۶۲۸ کیلومترمربع از مساحت حوضه را طبقات بسیار پرخطر و پرخطر تشکیل می‌دهند. با توجه به نقشه خطر به‌دست‌آمده از روش VIKOR، به‌ترتیب طبقات بسیار پرخطر و پرخطر ۷۴۵/۴۵۷ و ۳۹۴/۴۷۱ کیلومترمربع از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، بر اساس نتایج حاصل از به‌کارگیری روش MABAC، ۵۷۲/۹۰۰ کیلومترمربع از مساحت حوضه در طبقه بسیار پرخطر و ۵۵۱/۰۳۰ کیلومترمربع در طبقه پرخطر قرار دارد (جدول ۳). به‌طور کلی، با توجه به خروجی حاصل از همه الگوریتم‌های مورد مطالعه، پهنه‌هایی با خطر کم و خیلی کم دارای کمترین مساحت در سطح حوضه‌اند. از طرف دیگر، پهنه‌هایی با خطر متوسط، زیاد، و خیلی زیاد بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول شماره ۲. ماتریس همبستگی، ماتریس تضاد و محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کرتیک

ماتریس همبستگی									
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	لیتولوژی	گسل	رودخانه	بارش
شیب	۱	۰/۰۷۷	۰/۳۰۵	-۰/۰۷۰	-۰/۲۰۸	-۰/۳۰۷	-۰/۱۱۳	-۰/۰۳۹	۰/۳۰۵
جهت شیب	۰/۰۷۷	۱	-۰/۰۶۴	۰/۰۲۰	۰/۰۸۰	۰/۰۳۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۲	-۰/۰۶۴۶
ارتفاع	۰/۳۰۵	-۰/۰۶۴	۱	۰/۰۰۴	-۰/۴۷۰	-۰/۳۱۶	۰/۰۵۰	-۰/۱۲۲	۱
کاربری	-۰/۰۷۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۱	۰/۰۴۷	۰/۱۲۳	۰/۰۳۵	-۰/۰۳۷	۰/۰۰۴
راه ارتباطی	-۰/۲۰۸	۰/۰۸۰	-۰/۴۷۰	۰/۰۴۷	۱	-۰/۲۳۷	۰/۰۱۵	۰/۱۳۸	-۰/۴۷۰
لیتولوژی	-۰/۳۰۷	۰/۰۳۴	-۰/۳۱۶	۰/۱۲۳	-۰/۲۳۷	۱	۰/۱۲۶	۰/۱۱۲	-۰/۳۱۶
گسل	-۰/۱۱۳	۰/۰۶۵	۰/۰۵۰	۰/۰۳۵	۰/۰۱۵	۰/۱۲۶	۱	-۰/۰۷۳	۰/۰۵۰
رودخانه	-۰/۰۳۹	۰/۰۶۲	-۰/۱۲۲	-۰/۰۳۷	۰/۱۳۸	۰/۱۱۲	-۰/۰۷۳	۱	-۰/۱۲۲
بارش	۰/۳۰۵	-۰/۰۶۴۶	۱	۰/۰۰۴	-۰/۴۷۰	-۰/۳۱۶	۰/۰۵۰	-۰/۱۲۲	۱
ماتریس تضاد									
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	لیتولوژی	گسل	رودخانه	بارش
شیب	۰	۰/۹۲۲	۰/۶۹۴	۱/۰۷۰	۱/۲۰۸	۱/۳۰۷	۱/۸۸۶	۱/۰۳۹	۰/۶۹۴
جهت شیب	۰/۹۲۲	۰	۱/۰۶۴	۰/۹۷۹	۰/۹۱۹	۰/۹۶۵	۰/۹۳۵	۰/۹۳۷	۱/۶۴۶
ارتفاع	۰/۶۹۴	۱/۰۶۴	۰	۰/۹۹۵	۱/۴۷۰	۱/۳۱۶	۰/۹۴۹	۱/۱۲۲	۰
کاربری	۱/۰۷۰	۰/۹۷۹	۰/۹۹۵	۰	۰/۹۵۲	۰/۸۷۶	۰/۹۶۴	۱/۰۳۷	۰/۹۹۵
راه ارتباطی	۱/۲۰۸	۰/۹۱۹	۱/۴۷۰	۰/۹۵۲	۰	۰/۷۶۲	۰/۹۸۴	۰/۸۶۱	۱/۴۷۰
لیتولوژی	۱/۳۰۷	۰/۹۶۵	۱/۳۱۶	۰/۸۷۶	۰/۷۶۲	۰	۰/۸۷۳	۰/۸۸۷	۱/۳۱۶
گسل	۱/۸۸۶	۰/۹۳۵	۰/۹۴۹	۰/۹۶۴	۰/۹۸۴	۰/۸۷۳	۰	۱/۰۷۳	۰/۹۴۹
رودخانه	۱/۰۳۹	۰/۹۳۷	۱/۱۲۲	۱/۰۳۷	۰/۸۶۱	۰/۸۸۷	۱/۰۷۳	۰	۱/۱۲۲
بارش	۰/۶۹۴	۱/۶۴۶	۰	۰/۹۹۵	۱/۴۷۰	۱/۳۱۶	۰/۹۴۹	۱/۱۲۲	۰
محاسبه وزن نهایی									
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	لیتولوژی	گسل	رودخانه	بارش
مجموع تضاد	۷/۸۲۴	۸/۳۶۹	۷/۶۱۳	۷/۸۷۲	۸/۶۳۱	۸/۳۰۵	۷/۶۱۶	۸/۰۸۲	۸/۱۹۴
انحراف معیار	۰/۳۲۷	۰/۲۲۷	۰/۱۶۶	۰/۲۶۵	۰/۱۷۴	۰/۳۰۵	۰/۱۸۲	۰/۱۵۳	۰/۱۶۶
میزان اطلاعات	۲/۵۶۰	۱/۹۰۳	۱/۲۶۸	۲/۰۹۲	۱/۵۰۴	۲/۵۳۴	۱/۳۸۹	۱/۲۴۲	۱/۳۶۵
وزن نهایی	۰/۱۶۱	۰/۱۱۹	۰/۰۷۹	۰/۱۳۱	۰/۰۹۴	۰/۱۵۹	۰/۰۸۷	۰/۰۷۸	۰/۰۸۶





شکل شماره ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای: الف) خروجی حاصل از روش WLC، ب) خروجی حاصل از روش OWA، ج) خروجی حاصل از روش VIKOR، د) خروجی حاصل از روش MABAC

جدول شماره ۳. مساحت کلاس‌های طبقه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره WLC،

MABAC و VIKOR, OWA

میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	
مساحت (KM ²)	۴۵,۰۶۴	۲۵۰,۸۱۴	۴۹۲,۵۶۰	۵۹۹,۲۳۷	۴۲۷,۳۵۲	WLC
درصد%	۲,۴۸	۱۳,۸۲	۲۷,۱۴	۳۳,۰۱	۲۳,۵۵	
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	
مساحت (KM ²)	۶۸,۱۷۸	۲۵۹,۹۶۴	۵۳۱,۹۹۵	۶۷۰,۶۲۸	۲۸۴,۲۶۲	OWA
درصد%	۳,۷۶	۱۴,۳۲	۲۹,۳۱	۳۶,۹۵	۱۵,۶۶	
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	
مساحت (KM ²)	۵۰,۴۰۴	۱۷۶,۵۲۳	۴۴۸,۱۷۲	۳۹۴,۴۷۱	۷۴۵,۴۵۷	VIKOR
درصد%	۲,۷۸	۹,۷۳	۲۴,۶۹	۲۱,۷۳	۴۱,۰۷	
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	
مساحت (KM ²)	۴۸,۷۲۶	۲۳۶,۱۰۴	۴۰۶,۲۶۷	۵۵۱,۰۳۰	۵۷۲,۹۰۰	MABAC
درصد%	۲,۶۹	۱۳	۲۲,۳۹	۳۰,۳۶	۳۱,۵۶	

بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد از لحاظ معیار شیب، طبق خروجی الگوریتم WLC، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد بین شیب‌های ۵۵-۸ درصد قرار دارند و با توجه به خروجی OWA، مقدار شیب نقاط پرخطر و بسیار پرخطر بین ۴۵-۹ است. بررسی خروجی VIKOR و مقایسه با نقشه شیب نشان می‌دهد که مقدار شیب نقاط پرخطر و بسیار پرخطر بین ۵۰-۱۰ درصد قرار دارد. نتیجه حاصل از MABAC، نشان‌دهنده این امر است که نقاط بسیار پرخطر و پرخطر بین شیب‌های ۵۰-۱۰ درصد هستند. مقایسه بین نقاط لغزشی موجود در حوضه با نقشه شیب حوضه نیز نشان می‌دهد تعداد ۲۴ نقطه از لغزش‌ها در شیب ۱۵-۲۵ درصد، ۹ مورد در شیب‌های ۲۵-۳۵ درصد، ۳ مورد در شیب‌های ۳۵-۴۵ درصد و یک نمونه نیز در شیب ۴۵-۵۵ درصد رخ داده است. در طبقات شیب پایین‌تر از ۱۵ درصد و بالاتر از ۵۵ درصد، نقطه لغزشی مشاهده نمی‌شود. معمولاً بر روی دامنه‌هایی با شیب بیش از ۵۵ درصد ضخامت خاک و احتمال خطر زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. شیب‌های کمتر از ۱۵

درصد، از نظر توزیع فضایی، در قسمت‌های پایین‌دست حوضه پراکنده شده‌اند که در آن شدت ناهمواری تا حد زیادی کاسته شده است. همچنین، عرض دره گیوی چای در این محدوده افزایش پیدا کرده که نقش زیادی در تعدیل ناهمواری‌های منطقه داشته است. بنابراین، از نظر متغیر شیب احتمال وقوع زمین‌لغزش در این پهنه‌ها کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، می‌توان اذعان داشت که از لحاظ معیار شیب خروجی همه الگوریتم‌ها پذیرفتنی است، ولی نتیجه حاصل از دو الگوریتم VIKOR و MABAC پذیرفتنی‌تر است.

در رابطه با عامل جهت شیب، نقاط بسیار پرخطر و پرخطر ارائه‌شده توسط همه الگوریتم‌ها در دامنه‌های شمالی و غربی و سپس دامنه‌هایی با جهات شمال شرقی و شرقی قرار دارند. بررسی نسبت بین نقاط لغزشی و معیار جهت شیب نشان داده است که بخش اعظمی از لغزش‌های موجود در حوضه به ترتیب در دامنه‌هایی با جهات شمالی (۴۸/۶۵ درصد از نقاط لغزشی) و غرب (۳۲/۴۳ درصد از نقاط زمین‌لغزش) رخ داده است. دامنه‌های شمالی، غربی، و شمال غربی به دلیل دریافت بارش زیاد، ماندگاری بلندمدت برف، و داشتن رطوبت بیشتر، برای لغزش بسیار مستعد است. به علاوه، ۲/۷۰ درصد از لغزش‌ها در هر یک از جهات شمال شرقی، شرقی، جنوب، و جنوب غربی و ۸/۱۱ درصد از لغزش‌ها در جهات جنوب شرقی مشاهده می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده از نظر معیار جهت شیب پذیرفتنی است.

بررسی مقایسه‌ای بین معیار ارتفاع و خروجی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد، با توجه به نتیجه WLC، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر در سطوح ارتفاعی ۳۰۰-۹۰۰ متر قرار دارند. با توجه به خروجی OWA، نقاط دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد بین ارتفاع ۱۰۳۶-۳۰۰۰ است. نتیجه حاصل از VIKOR نشان‌دهنده این امر است که نقاط بسیار پرخطر و پرخطر بین ارتفاع ۱۰۰۰-۳۰۰۰ هستند. بررسی خروجی MABAC و مقایسه با نقشه طبقات ارتفاعی نشان می‌دهد که نقاط پرخطر و بسیار پرخطر در سطوح ارتفاعی ۹۵۰-۳۰۰۰ متر قرار دارند. با مقایسه بین نقاط لغزشی موجود در حوضه با نقشه طبقات ارتفاعی حوضه، به طور کلی در ارتفاعات پایین‌تر از ۱۱۱۰ متر و بالاتر از ۲۵۵۰ متر حوضه پراکنش نقاط لغزشی دیده نمی‌شود. ارتفاع پایین و وجود اراضی کم‌شیب در قسمت‌های پایین‌دست حوضه تا حدودی به عنوان یک عامل محدودکننده زمین‌لغزش مطرح است، زیرا نقش چندانی در افزایش بارش، تراکم پوشش گیاهی، و سایر متغیرهای تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش ایفا نمی‌کند. در ترازهای ارتفاعی بسیار مرتفع حوضه نیز خشونت عناصر اقلیمی و غلبه مورفولوژی تند و پرتگاهی باعث تبدیل فرایندهای لغزشی به سایر فرایندهای ناپایدار دامنه‌ای از قبیل سقوط سنگ‌ها و واژگونی‌ها می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان گفت که رخداد زمین‌لغزش در ترازهای میانی حوضه از احتمال وقوع بالاتری برخوردار است. ۲۴/۳۲ درصد از نقاط لغزشی در ارتفاعات ۱۱۰-۱۵۹۰ متر، ۴۰/۵۵ درصد در ارتفاعات ۱۵۹۰-۱۸۳۰، ۲۹/۷۳ درصد در سطوح ارتفاعی ۱۸۳۰-۲۰۷۰، و ۵/۴۱ درصد نیز در مناطقی با ارتفاع ۲۰۷۰-۲۵۵۰ قرار دارند. بنابراین، از لحاظ معیار ارتفاع نیز نتایج الگوریتم‌های مورد بررسی مطلوب است.

بررسی خروجی حاصل از همه روش‌ها نشان می‌دهد که از لحاظ معیار کاربری اراضی کاربری زراعی و مراتع بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. در رابطه با نسبت بین پراکنش نقاط لغزشی و معیار کاربری قابل ذکر است که بیشترین پراکنش لغزش‌ها در کاربری زراعی (۵۱/۳۵ درصد از نقاط لغزشی) و مراتع (۴۳/۲۴ درصد از نقاط لغزشی) است و ۵/۴۱ درصد از نقاط لغزشی موجود در کاربری باغات قرار گرفته است. می‌توان گفت رعایت نکردن تناوب زراعی، کشت در اراضی شیب‌دار، چرای بیش از حد دام‌ها در مراتع، و نابودی پوشش گیاهی به رخداد زمین‌لغزش در کاربری‌های کشاورزی و مراتع سرعت بخشیده است. لذا، نتایج حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده از نظر معیار کاربری نیز پذیرفتنی است.

در رابطه با نقشه لیتولوژی می‌توان گفت که با توجه به نقشه پهنه‌بندی حاصل از به‌کارگیری روش WLC و OWA،

طبقات بسیار پُرخطر و پُرخطر در سازندهایی با مقاومت بسیار کم، کم، و متوسط قرار دارند. طبق نتایج الگوریتم‌های VIKOR و MABAC، مناطق دارای خطر زیاد و بسیار زیاد، علاوه بر سازندهایی با مقاومت بسیار کم، کم، و متوسط، در مناطقی با لیتولوژی مقاوم نیز دیده می‌شوند. نسبت پراکنش لغزش‌ها با معیار لیتولوژی نشان می‌دهد به ترتیب ۲۱/۶۲ و ۲۴/۳۲ درصد از لغزش‌های رخ داده در حوضه در سازندهایی با مقاومت بسیار کم و کم (Qt2): پادگانه اُبرفتی جدید، Qal: رسوبات رودخانه‌ای جدید، Ngm.s: تناوب مارن خاکستری و قرمز ژپس‌دار با ماسه‌سنگ و کنگلومرا، Oms: میکرو کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن) رخ داده است و حتی بزرگ‌ترین لغزش‌های منطقه بر روی مارن‌هایی که بر روی کنگلومراها قرار گرفته‌اند رخ داده است. با توجه به وجود خمیره رسی بالا و سخت‌شدگی نسبتاً کم، اجزای کنگلومراهای واقع در سازند قرمز پایینی نیز استعداد رانش و لغزش زیادی در دامنه‌های شیب‌دار دارند. ۳۲/۴۴ درصد نقاط لغزشی نیز در سازندهایی با لیتولوژی متوسط (Ngc: کنگلومرای قرمز، Oms: میکرو کنگلومرا، ماسه‌سنگ، و مارن) قرار دارند. به علاوه، زمین‌لغزش‌های بزرگ و کوچکی بر روی دامنه‌های شیب‌دار متشکل از سنگ‌های آندزیت پرفیری و مگاپورفیری ائوسن ایجاد شده است (فلدسپات‌های موجود در این سنگ‌ها و تشکیل کانی‌های رسی زمینه وقوع به وجود آورده است). بنابراین، نتایج روش‌ها از لحاظ عامل لیتولوژی پذیرفتنی است. به‌ویژه، نتایج الگوریتم‌های VIKOR و MABAC، با توجه به در نظر داشتن مناطقی با سازندهای آندزیت پرفیری و مگاپورفیری ائوسن دقیق‌تر است.

با در نظر داشتن عامل بارش، به این نتیجه می‌توان رسید که طبق نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش WLC، مناطق با پتانسیل خطر زیاد و بسیار زیاد در مناطقی با بارش ۳۲۰-۴۷۰ میلی‌متر قرار دارند. نتایج به‌دست‌آمده از روش OWA نیز بیانگر این امر است که مقادیر بارشی در مناطق دارای پتانسیل خطر مابین ۳۱۰-۴۸۰ میلی‌متر قرار گرفته است. مقدار بارش، طبق نتیجه نهایی مدل MABAC، بین ۳۱۰ تا ۴۷۰ میلی‌متر است. با توجه به خروجی حاصل از روش VIKOR نیز مقادیر بارشی نقاط بسیار پُرخطر و پُرخطر بین ۳۱۰ تا ۴۶۰ میلی‌متر است. بررسی نسبت نقاط لغزشی و مقادیر بارش نیز نشان می‌دهد بیشترین فراوانی پراکنش نقاط لغزشی موجود در حوضه در مقدار بارشی ۳۸۰-۴۱۰ میلی‌متر (۴۸/۶۵ درصد از زمین‌لغزش‌های موجود) قرار دارد و سطوحی با مقدار بارش ۳۵۰-۳۸۰ میلی‌متر نیز ۲۱/۶۲ درصد از نقاط لغزش را شامل می‌شوند. به‌علاوه، ۱۶/۲۲ و ۱۳/۵۱ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه در سطوح بارشی ۳۰۰-۳۵۰ و ۴۰۰-۴۴۰ میلی‌متر قرار دارند. می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ معیار بارش نیز نتایج روش‌های مورد استفاده تقریباً پذیرفتنی است. ولی با توجه به این امر که نقاط لغزشی موجود در حوضه در مناطقی با مقدار بارش ۳۰۰-۴۵۰ میلی‌متر قرار دارند و با نظر به اینکه طبق خروجی حاصل از روش MABAC نقاط دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد بیشتر در همین محدوده بارشی قرار دارند (با توجه به حداقل و حداکثر مقادیر بارش معرفی شده به‌عنوان مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد)، می‌توان اذعان کرد که خروجی حاصل از روش MABAC پذیرفتنی‌تر از دیگر روش‌ها به‌نظر می‌رسد.

از لحاظ معیار فاصله از راه ارتباطی، باید اشاره کرد که به‌ترتیب طبق خروجی‌های حاصل از روش‌های WLC، OWA، VIKOR و MABAC، مناطق بسیار پُرخطر و پُرخطر از فاصله صفر تا ۳۵۰ متری از راه ارتباطی قرار دارند. مقایسه نقاط لغزشی و نقش موضوعی راه ارتباطی حاکی از این امر است که در بین نقاط لغزشی موجود ۱۸/۹۲ درصد در فاصله ۵۰-۵۰ متری، ۵/۴۱ درصد در فاصله ۵۰-۱۰۰ متری، ۲/۷۱ درصد در فاصله ۱۰۰-۲۰۰ متری، و ۲۴/۳۲ نیز در فاصله ۲۰۰-۴۰۰ متری از جاده قرار دارند و ۴۸/۶۴ نقاط لغزشی در فاصله بیش از ۱۰۰۰ متری واقع شده‌اند. بنابراین، می‌توان گفت اراضی بسیار پُرخطر و پُرخطر، به‌طور نسبی، در فواصل نزدیک از جاده قرار دارند. از زمره لغزش‌های جاده‌ای در منطقه در طی سال‌های اخیر می‌توان اشاره کرد به لغزش‌های مکرر در جاده خلخال-گیوی (کوثر) و لغزش‌های مربوط به جاده اردبیل-خلخال (در مسیر جاده اردبیل به خلخال، بخش اعظم منطقه از مارن‌های خاکستری و قرمز ژپس‌دار مستعد به

زمین لغزش پوشیده شده است).

بر اساس نتایج بررسی معیار فاصله از گسل، طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حاصل از همه الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، نقاط بسیار پرخطر و پرخطر تا فواصل ۳۰۰ متری از گسل واقع شده‌اند. مقایسه نقشه فاصله از گسل با نقشه پراکنش نقاط لغزشی نشان می‌دهد ۲۱٫۶۲ درصد از زمین لغزش‌های حوضه در فاصله ۵۰-۵۰۰ متری از گسل ایجاد شده است. به ترتیب ۸٫۱۱ و ۵٫۴۰ درصد از نقاط لغزشی موجود نیز در فواصل ۲۰۰-۵۰ و ۲۰۰-۵۰۰ قرار دارد و مابقی نقاط لغزشی در فواصل زیاد از گسل رخ داده‌اند. لذا، گسل‌ها (به‌ویژه گسل‌های اصلی فیروزآباد-مجرد و گیوی) به گسیختگی در دامنه‌ها و ایجاد شکستگی در لایه‌ها و خردشدگی توده‌های سنگی و در نتیجه نفوذ آب به داخل زمین و کاهش مقاومت برشی دامنه منجر می‌شوند. به‌عنوان مثال، گسله فیروزآباد-مجرد با عبور از محدوده آتراسیون‌های حاصل از فرسایش شیمیایی آندزیت‌های پورفیری و ایجاد شیب زیاد باعث وقوع زمین لغزش‌هایی در روستای عینال‌آباد شده است.

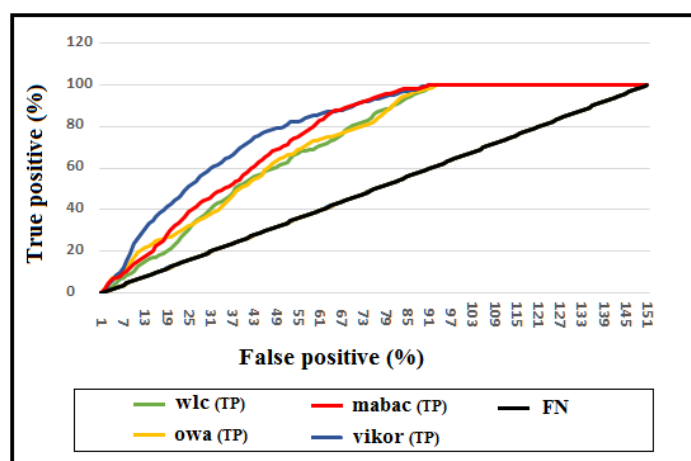
از لحاظ معیار فاصله از رودخانه، می‌توان نتیجه گرفت به ترتیب طبق خروجی‌های حاصل از روش‌های WLC، OWA، VIKOR و MABAC، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر تا فاصله ۳۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. نسبت پراکنش لغزش‌ها با این معیار مورد بررسی نشان می‌دهد که به‌طور کلی ۳۵٫۱۴ درصد از زمین لغزش‌های رخ داده در حوضه در فاصله ۱۰-۱۰۰ متری از رودخانه‌ها اتفاق افتاده است. در فواصل ۱۰ تا ۲۰۰ متری از رودخانه‌ها، نقاط لغزشی دیده نمی‌شود و ۲۴٫۳۲ درصد نقاط لغزشی درست در فاصله ۲۰ متری از رودخانه‌ها شکل گرفته است و مابقی نقاط لغزشی در فواصل نسبی دورتر از شبکه رودخانه‌های حوضه قرار دارند. بنابراین، می‌توان بیان کرد که اغلب نقاط لغزشی موجود در حوضه در فواصل نزدیک از رودخانه رخ داده است و رودخانه‌ها (به‌ویژه رودخانه‌های دائمی و پُر آب هیروچای، آرپاچای، و گیوی‌چای)، با زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه در رخداد لغزش‌های محدوده، دارای اهمیت‌اند و مناطق پرخطر بیشتر بستر طغیانی رود را شامل می‌شود و این بخش از حوضه در معرض مستقیم فرسایش توسط جریان رود است. مخصوصاً در محل پیچ مقعر مائدرها به دلیل افزایش سرعت جریان رود و عمل زیربری عمل تخریب شدیدتر است و وجود سازندهای آبرفتی حساس از عوامل مهم هستند که رودخانه‌های اصلی بیشتر تحت تأثیر بوده است. بنابراین، می‌توان اذعان کرد که از نظر معیارهای فاصله از راه ارتباطی فاصله از گسل و رودخانه نیز نتایج حاصل از الگوریتم‌های چندمعیاره، قابل قبول، و نزدیک به واقعیت موجود در محدوده است.

نتایج حاصل از هم‌پوشانی خروجی حاصل از مدل‌های مورد بررسی با پراکنش نقاط لغزشی (جدول ۴) نشان داد که به ترتیب با توجه به الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره WLC، OWA، VIKOR و MABAC، ۳۷٫۸۴، ۲۹٫۷۳، ۵۹٫۴۶ و ۴۸٫۶۵ درصد از نقاط لغزشی در طبقه بسیار پرخطر و ۳۷٫۸۴، ۵۱٫۳۵، ۲۴٫۳۳ و ۳۵٫۱۴ درصد از نقاط لغزشی در طبقه پرخطر قرار دارند. بنابراین، با توجه به جدول ۴، می‌توان بیان کرد تطبیق سطوح لغزش یافته و پهنه‌های مواجهه با خطر نشان می‌دهد که در خروجی حاصل از همه الگوریتم‌های مورد بررسی، مناطقی که در رده بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند دارای بیشترین تعداد و درصد از سطوح لغزشی‌اند. به علاوه، در طبقات کم‌خطر معرفی شده توسط الگوریتم‌های چندمعیاره مورد بررسی، تعداد محدودی از نقاط لغزش مشاهده می‌شود و در طبقات کم‌خطر معرفی شده نیز هیچ پراکنشی از نقاط لغزشی رخ داده در حوضه دیده نمی‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به پراکنش زمین لغزش‌های موجود در هر یک از طبقات خطر، همه الگوریتم‌های مورد بررسی و به‌خصوص روش ویکور با پوشش ۲۲ نقطه لغزشی در طبقه بسیار پرخطر از دقت نسبی بالایی در ارزیابی خطر زمین لغزش برخوردارند.

جدول شماره ۴. تعداد و درصد نقاط پراکنش لغزشی در هر طبقه خطر

مدل WLC					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۱۴	۱۴	۶	۳	-
درصد	۳۷٫۸۴	۳۷٫۸۴	۱۶٫۲۱	۸٫۱۱	-
مدل OWA					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۱۱	۱۹	۶	۱	-
درصد	۲۹٫۷۳	۵۱٫۳۵	۱۶٫۲۲	۲٫۷۰	-
مدل VIKOR					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۲۲	۹	۵	۱	-
درصد	۵۹٫۴۶	۲۴٫۳۳	۱۳٫۵۱	۲٫۷۰	-
مدل MABAC					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۱۸	۱۳	۵	۱	-
درصد	۴۸٫۶۵	۳۵٫۱۴	۱۳٫۵۱	۲٫۷۰	-

جهت مستندسازی بیشتر اعتبار نقشه‌های پهنه‌بندی، دقت هر یک از تکنیک‌های مورد استفاده با منحنی ROC ارزیابی شده است. طبق نتیجه به دست آمده، به ترتیب مقدار سطح زیر منحنی در مدل WLC ۰٫۷۲، OWA ۰٫۷۳، VIKOR ۰٫۸۵ و در مدل MABAC ۰٫۷۶ است. با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی، دقت روش‌های OWA، WLC و MABAC خیلی خوب و دقت روش VIKOR در طبقه عالی قرار دارد (شکل ۸).



شکل شماره ۸. منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه گیوی چای

نتیجه‌گیری

پدیده زمین لغزش در زمره یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای به شمار می‌رود که هرساله تلفات و خسارات مالی و جانی بسیاری بر زندگی انسان‌ها تحمیل می‌کند. در این رابطه، شناسایی مناطق مستعد رخداد زمین لغزش از ملزومات مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توسعه‌ای و عمرانی محسوب می‌شود و اقدام به پهنه‌بندی با کاربست مدل‌های مختلف یکی از رویکردهایی به شمار می‌رود که از طریق آن می‌توان پهنه‌های حساس و مستعد برای لغزش‌های آینده را شناسایی کرد. در پژوهش حاضر شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از راه ارتباطی، فاصله از آبراهه، و

فاصله از گسل به عنوان عوامل مؤثر در وقوع خطر زمین لغزش در منطقه شناسایی شد و سپس با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه گیوی‌چای پرداخته شد. در این مطالعه مرحله مربوط به وزن‌دهی عوامل با استفاده از روش CRITIC انجام شده است و با توجه به نتایج به دست آمده به ترتیب عوامل شیب با وزن ۰/۱۶، لیتولوژی با وزن ۰/۱۵، و کاربری اراضی با وزن ۰/۱۳ بیشترین نقش را در وقوع زمین لغزش حوضه به خود اختصاص دادند. مددی و همکاران (۱۳۹۲) و رجیبی و فیض‌الله‌پور (۱۳۹۳) نیز در مطالعات خود به بررسی خطر زمین لغزش در حوضه گیوی‌چای پرداخته‌اند و هرچند با بررسی نقاط معرفی شده به عنوان مناطق بسیار پرخطر و پرخطر به نقش عوامل شیب (به خصوص شیب ۱۷-۳۳ درصد)، کاربری (به ویژه، کاربری‌های زراعی، مرتع، و باغات)، وجود سازندهای زمین‌شناسی مستعد در وقوع زمین لغزش‌های حوضه گیوی‌چای تأکید داشته‌اند، باید اذعان کرد که در این مطالعات صرفاً به معرفی مناطق پرخطر پرداخته شده است و وزن‌دهی معیارها و تعیین اولویت و نقش معیارها ارزیابی نشده است. به بیان دیگر، روش‌های مورد استفاده در این پژوهش‌ها، که به ترتیب عبارت از مدل LIM و مدل پرسپترون چندلایه از نوع پیشخور پس‌انتشار است، فاقد توانایی تعیین وزن معیارها در وقوع خطر زمین لغزش‌اند. اما در مطالعه حاضر، وزن و اهمیت معیارها، به عنوان یکی از مراحل عملیاتی مربوط به اجرای مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با استفاده از روش وزن‌دهی CRITIC، ارزیابی شده است. با توجه به اینکه در وزن‌دهی CRITIC، وزن معیارها، با توجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده تعیین می‌شود و کارشناسان در تعیین اهمیت معیارها دخالت و نقشی ندارند، استفاده از این روش در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند گامی در جهت حل معضل استقلال صفات از یکدیگر باشد که به هنگام مقایسه زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و در شرایط عدم تحقق همبستگی بین صفات عینیت می‌یابد.

با توجه به خروجی حاصل از الگوریتم‌های مورد مطالعه، پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم دارای کمترین مساحت در سطح حوضه‌اند. از طرف دیگر، پهنه‌هایی با خطر متوسط، زیاد، و خیلی زیاد بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. می‌توان گفت نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از ریسک بالای حوضه گیوی‌چای از لحاظ رخداد حرکات لغزشی است. مددی و همکاران (۱۳۹۲) و رجیبی و فیض‌الله‌پور (۱۳۹۳) در مطالعاتی که در زمینه بررسی خطر زمین لغزش در بخشی از حوضه گیوی‌چای داشته‌اند به این نتیجه دست یافتند که طبقات بسیار پرخطر و پرخطر بخش اعظمی از مساحت محدوده را تشکیل می‌دهند و پتانسیل خطر زمین لغزش در این حوضه بسیار زیاد است. با توجه به پراکنش زمین لغزش‌های موجود در هر یک از طبقات خطر همه الگوریتم‌های مورد بررسی از دقت نسبی بالایی در ارزیابی خطر زمین لغزش برخوردارند. مقایسه مدل‌ها نسبت به یکدیگر، با توجه به نتایج حاصل از منحنی ROC، نشان داد دقت روش‌های OWA، WLC، و MABAC خیلی خوب است و روش VIKOR از نظر دقت در طبقه عالی قرار دارد. بنابراین، نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های MCDM در مطالعه حاضر همانند نتایج حاصل از مطالعات بهاروند و همکاران (۱۳۹۶)، حجازی و همکاران (۱۳۹۸)، مددی و همکاران (۱۳۹۹)، اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۰)، نادری و همکاران (۱۴۰۰)، میشیل و همکاران (۲۰۱۶)، گیگووایس و همکاران (۲۰۱۹)، دیکشیت و همکاران (۲۰۲۰)، و صالح‌پور جم و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد خوب مدل‌های تحلیل چندمعیاره را برای تولید خطر زمین لغزش نشان می‌دهد. اما نکته‌ای که باید در نظر داشت این امر است که روش VIKOR با سطح زیر منحنی ۰/۸۵ از دقت نسبی بالاتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها جهت مطالعه خطر زمین لغزش برخوردار است و از امتیازهای مهم این روش آن است که به طور هم‌زمان می‌توان از شاخص‌ها و معیارهای عینی و ذهنی استفاده کرد و رتبه‌بندی و اطلاعات قابل توجهی را در مورد فاصله نسبی هر گزینه نسبت به نقطه ایده‌آل در اختیار کاربر قرار می‌دهد. انتظار می‌رود این مطالعه و نتایج حاصل از این تحقیق، با

معرفی مناطق دارای احتمال وقوع بالای زمین‌لغزش، راه‌گشایی برای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه گردد و در نواحی‌ای با پتانسیل خطر بالا با انجام اقدامات حفاظتی و آبخیزداری مناسب و البته کارشناسی‌شده توسط متخصصان از وقوع زمین‌لغزش‌های احتمالی در سطح حوضه گیوی‌چای جلوگیری شود. به علاوه، نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی بهترین روش تحلیل چندمعیاره، به‌منظور مطالعه خطر زمین‌لغزش در امر انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌هایی با شرایط طبیعی و انسانی مشابه با محدوده حوضه گیوی‌چای می‌تواند بسیار مفید باشد و مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) اصغری سراسکانرود، ص؛ امامی، ر. و پیروزی، الف. (۱۴۰۰). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های OWA و ANN (مطالعه موردی: شهرستان پاوه)، *مخاطرات محیط طبیعی*، دوره ۱۰، شماره ۲۸، صص ۱۳۱-۱۵۰.
- ۲) ایزدی، ز. و انتظاری، م. (۱۳۹۲). زمین‌لغزش‌های ایران (معرفی، عوامل، و مدیریت)، *رشد آموزش جغرافیا*، صص ۳۲-۳۷.
- ۳) بهاروند، س؛ سارویی، ح. و سوری، س. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار، *مطالعه موردی: حوضه ده یقید، استان لرستان*، فصل‌نامه *جغرافیای طبیعی*، دوره ۱۰، شماره ۳۵، صص ۷۵-۸۶.
- ۴) جمال‌آبادی، ج؛ صفری، ف؛ برآبادی، ع. و آل محمد، م. (۱۴۰۰). شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در دهستان ژارود بر اساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه، *مدیریت بحران*، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۴۷-۵۵.
- ۵) حجازی، الف؛ روستایی، ش. و رنجبریان شادباد، م. (۱۳۹۸). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل ویکور، در *حوضه آبریز حاجیلرچایی، جغرافیای طبیعی*، دوره ۱۲، شماره ۴۴، صص ۵۱-۵۶.
- ۶) خامه‌چیان، م؛ راکعی، ب؛ عبدالملکی، پ. و گیاهیچی، پ. (۱۳۸۶). کاربرد سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، *مطالعه موردی: ناحیه سفیدار گله در استان سمنان*، *مجله علوم دانشگاه تهران*، دوره ۳۳، شماره ۳، صص ۵۷-۶۴.
- ۷) رجبی، م. و فیض‌الله‌پور، م. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های حوضه رودخانه گیوی‌چای با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه از نوع پیش‌خور پس‌انتشار (BP)، *فصل‌نامه جغرافیا و توسعه*، دوره ۱۲، شماره ۳۶، صص ۱۶۱-۱۸۰.
- ۸) رهنما، م. ر؛ آقاجانی، ح. و فتاحی، م. (۱۳۹۱). مکان‌یابی دفن زباله با ترکیب روش میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی (OWA) و GIS در مشهد، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۱، شماره ۳، صص ۸۷-۱۰۵.
- ۹) شریفی بیجون، م؛ شیرانی، ک. و شیرانی، م. (۱۴۰۰). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی مطالعه موردی: حوضه آبریز و هرگان - غرب استان اصفهان، *هیدروژئومورفولوژی*، دوره ۸، شماره ۲۶، صص ۱۳۹-۱۶۳.
- ۱۰) فیض‌الله‌پور، م. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش در حوضه رودخانه گیوی‌چای با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، رساله دکتری، م. رجبی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تبریز.
- ۱۱) محمدنیا، م. و فلاح‌قالهری، غ.ع. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، سال ۱۸، شماره ۴۸، صص ۱۱۷-۱۳۲.
- ۱۲) مددی، ع؛ پیروزی، الف. و فعال‌نذیری، م. (۱۳۹۹). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره MABAC و CODAS در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش؛ نمونه پژوهش: شهرستان کوثر، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، سال ۳۱، شماره ۴، صص ۱-۲۴.
- ۱۳) مددی، ع؛ نوعی، ب. و اسمعیلی، الف. (۱۳۹۲). ارزیابی خطر زمین‌لغزش و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل LIM و به‌کارگیری تکنیک GIS در حوضه آبخیز گیوی‌چای، اردبیل، *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۷، شماره ۴۳، صص ۲۶-۳۰۷.

- (۱۴) میرآبادی، م؛ هاشمی، ه. و امینی، ج. (۱۳۹۶). کاربرد مدل AHP و روش میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی (OWA) در مکان‌یابی محل دفن مواد زاید شهرستان بوکان با استفاده از Arc GIS و IDRISI، *فضای جغرافیایی*، جلد ۱۷، شماره ۶۰، صص ۳۹-۵۴.
- (۱۵) نادری، ف. الف؛ ناصری، ب. و بسطامی، ن. الف. (۱۴۰۰). کارایی مدل ویکور در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد گلال استان ایلام، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۱۰، شماره ۱، صص ۲۱-۳۹.
- 16) Aher, P.; Adinarayana, J. and Gorantiwar, SD. (2013). Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J*, 15(1):11-18.
- 17) Alimohammadlou, Y.; Najafi, A. and Yalcin, A. (2013). Landslide process and impacts: A proposed classification method, *Catena*, 104: 219-232.
- 18) Alinezhad, A. and Khalili, J. (2019). New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). *International Series in Operations Research & Management Science*, vol. 277, Springer, Cham.
- 19) Althuwaynee, O. F. and Pradhan, B. (2016). Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 8(2): 1-27.
- 20) Arab Ameri, A.; Pourghasemi, H.R. and Cerda. A. (2018). Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, *Science of The Total Environment*, 613-614: 1385-1400.
- 21) Asghari Saraskanrood, S.; Emami, R. and Piroozi, E. (2021). Evaluation and zonation of Landslide hazard with using OWA and ANN methods (case study: Paveh Township). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(28): 131-150.
- 22) Baharvand, S.; Saroei, H. and Suri, S. (2017). Landslide hazard zoning using weighted linear combination method, Case study: Deh Yaghid Basin, Lorestan Province, *Physical Geography Quarterly*, 10(35): 75-86.
- 23) Baumgertel, A.; Lukić, S.; Belanović Simić, S. and Kadović, R. (2019). Identifying Areas Sensitive to Wind Erosion- A Case Study of the AP Vojvodina (Serbia). *Appl Sci*, 19(23): 1-12.
- 24) Bou kheir, R.; Cerdan, O. and Abdelah, C. (2006). Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82: 347-359.
- 25) Bui, D.T.; Lofman, O.; Revhaug, I. and Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59(3):1413-1444.
- 26) Chen, W.; Panahi, M. and Pourghasemi, H.R. (2017). Performance evaluation of GIS-based new ensemble data mining techniques of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with genetic algorithm (GA), differential evolution (DE), and particle swarm optimization (PSO) for landslide spatial modelling. *CATENA*, 157: 310-324.
- 27) Chen, L.Y. and Wang, T.C. (2009). optimizing partner's choice in IS/IT outsourcing projects: The strategic decision of fuzzy VIKOR, *International Journal of. Production Economics*, 120 (1): 233-242.
- 28) Colkesen, I.; Sahin, E. and Kavzoglu, Taskin (2016). Susceptibility mapping of shallow landslides using kernel-based Gaussian process, support vector machines and logistic regression, *Journal of African Earth Sciences*, 118: 53-64.
- 29) Crosta, B. G. (2009). Dating, triggering, modeling and hazard assessment of large landslides, *Geomorphology*, Vol. 103: 1-4.
- 30) Dai, F. and Lee, C. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-228.
- 31) Dikshit, A.; Sarkar, R.; Pradhan, B.; Acharya, S. and Alamri, AM. (2020). Spatial Landslide Risk Assessment at Phuentsholing, Bhutan. *Geosciences*, 10(4): 1-17.
- 32) El Jazouli, A.; Barakat, A. and Khellouk, R. (2019). GIS-multi-criteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvirom Disasters*, 6, 3.

- 33) Feyzolahpour, M. (2012). *Zoning of landslide prone areas in Givichay river basin using artificial neural network model*, PhD thesis, Rajabi, M., Faculty of Geography, University of Tabriz.
- 34) Feizizadeh, B. and Blaschke, T. (2012). Uncertainty Analysis of GIS-based Ordered Weighted Averaging Method for Landslide Susceptibility Mapping in Urmia Lake Basin, Iran, Conference: *Giscience*, 1-5.
- 35) Ganjaeian, H.; Rezaei Arefi, M.; Peysoozi, T. and Emami, K. (2020). Zonning susceptible areas of landslide using WLC and OWA methods -A case study in Mountain cliff Khan, Iran, *Sustainability Earth Review*, 1(2): 43-51.
- 36) Georgiou, D.; Mohammed, E.S. and Rozakis, S. (2015). Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy*, 75: 459-467.
- 37) Gigovic, L.; Drobnjak, S. and Pamucar, D. (2019). The Application of the Hybrid GIS Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Best-Worst Methodology for Landslide Susceptibility Mapping. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 8, 79.
- 38) Gorsevski, P.V.; Gessler, P.E.; Foltz, R.B. and Elliot, W.J. (2006). Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS*, 10: 395-415.
- 39) Hattanji, T. and Moriwaki, H. (2009). Implications for forecasting travel distance of future landslides. *Geomorphology*, Vol. 103, Issue 3: 447-454.
- 40) Hejazi, A.; Roustaei, Sh. and Ranjbarian Shadbad, M. (2019). Landslide risk assessment and zoning using Vickor model, in Hajilerchai catchment. *Physical Geography Quarterly*, 12(44): 51-65.
- 41) Hoseini, H. (2019). Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation. *Information Processing in Agriculture*, 6(1): 11-19.
- 42) Izadi, Z. and Entezari, M. (2013). Iran Landslides (Introduction, Factors and Management), *Growth of Geography Education*, 32-37.
- 43) Jamalabadi, J.; Safari, F.; Borabadi, A. and Al-Mohammad, M. (2021). Identification and zoning of susceptible area of landslide in the Javroud rural district. *Emergency Management*, 10(2): 47-55.
- 44) Kadavi, P.; Lee, C.W. and Lee, S. (2018). Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping, *Remote Sensing*, Vol. 10, Issue 8: 1-18.
- 45) Khomehchian, M.; Rakaei, B.; Abdolmaleki, P. and Giahchi, P. (2007). Application of Artificial Neural Network for Landslide Hazard Zonation, Case study: Sefidar Goleh area in Semnan province, *Journal of Science*, University of Tehran, 33 (2): 57-64.
- 46) Kerekes, A.; Poszet, S. and Gal, A. (2018). Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj-Napoca Municipality. Romania, *Revista de geomorfologie*, Vol .20: 130-146.
- 47) Khan, H.; Shafique, M.; Khan, M.; Mian, A.; Safeer, U. and Chiara, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 22 (1): 11-24.
- 48) Kim, J. H. and Ahn, B.S. (2020). The Hierarchical VIKOR Method with Incomplete Information: Supplier Selection Problem, *Sustainability*, 12(22): 1-15.
- 49) Madadi, A.; Noee, B. and Esmali, A. (2013). Landslide Hazard Assessment and Zoning Using LIM Model by GIS in Givi Chay Watershed, Ardebil. *Geography and Planning*, 17(43): 307-326.
- 50) Madadi, A.; Piroozi, E. and Faal Naziri, M. (2021). A Comparative Evaluation of MABAC and CODAS Multi-Criteria Decision Algorithms in Landslide Risk Zoning (Case Study: Kowsar County). *Geography and Environmental Planning*, 31(4): 1-24.
- 51) Michael, E.A. and Samanta, S. (2016). Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2, 88.
- 52) Mirabadi, M.; Hashemi, S. H. and Amini J. (2017). Applying AHP model and Ordered Weighted Average method in Locating Waste Disposal Site of bookan city by using Arc GIS and IDRISI Geographical space, 17 (60): 39-54.

- 53) Mohammadnia, M. and Fallah, G. (2018). Landslides susceptibility mapping using fuzzy logic and AHP. *Researches in Geographical Sciences*, 18 (48): 115-130.
- 54) Naderi, F.; Naseri, B. and Bastami, N. (2021). Efficiency of Victor model in landslide risk zoning in the watershed of Galal Dam in Ilam Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(1): 21-39.
- 55) Nandi, A. and Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110: 11-20.
- 56) Rabby, Y.W.; Li, Y.; Abedin, J. and Sabrina, S. (2022). Impact of Land Use/Land Cover Change on Landslide Susceptibility in Rangamati Municipality of Rangamati District, Bangladesh. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11 (89): 1-16.
- 57) Rahnama, M.; Aquajani, H. and Fattahi, M. (2012). Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information Systems for landfill site selection: A case study using ordered weighted average in Mashhad. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(3): 87-106.
- 58) Rajabi, M. and Feyzolahpour, M. (2014). Zoning the Landslides of Givichay River Basin by Using Multi-Layer Perceptron Model. *Geography and Development Iranian Journal*, 12(36): 161-180.
- 59) Salehpour Jam, A, ; Mosaffaie, A. and Sarfaraz, F. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Nat Hazards*, 108: 1025-1046.
- 60) Sanders, M. H. and Clark, P. D. (2010). *Geomorphology: Processes, Taxonomy and Applications*. Nova Science Publishers, Inc. 216 P.
- 61) Sharifi Paichoon, M.; Shirani, K. and Shirani, M. (2021). Prioritization of Factors Affecting the Occurrence of Landslides and Zoning Its Sensitivity Using Multiple Linear Regression Case Study: Vahargan Catchment-west of Isfahan Province. *Hydrogeomorphology*, 8(26): 163-139.
- 62) Sorbi, A. and Farrokhnia, A. (2018). Landslide hazard evaluation and zonation of Karaj-CHaluse road (North of Iran). *International Journal of Geography and Geology*, 7 (2): 2305-7041.
- 63) Tuş, A. and Aytaç Adalı, E. (2019). The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem. *Opsearch*, 56(3): 528-538.
- 64) Wang, J.; Wei, G.; Wei, C. and Wei, Y. (2020). MABAC method for multiple attribute group decision making under q-rung orthopair fuzzy environment, *Defence Technology*, 16 (1): 208-216.