



Landslide Susceptibility Assessment using VIKOR and Ordered Weighted Averaging Methods A Case Study of Savadkuh County

Moslem Dehnavi Eelagh¹ , Parham Pahlavani²  

1- School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: moslem.dehnavi@ut.ac.ir

2- (Corresponding Author) School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: pahlavani@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

28 November 2023

Received in revised form:

24 February 2024

Accepted:

30 March 2024

Available online:

3 May 2024

Keywords:

Landslide,
Shannon entropy,
Frequency Ratio (FR),
Ordered Weighted
Averaging (OWA),
VIKOR.

ABSTRACT

Landslides can occur due to human activities and environmental factors that have destructive effects. Reaching zoning of the risk of this phenomenon can help to make decisions to reduce losses and damages caused by this phenomenon. In this study, to prepare a landslide risk map, various natural factors including height, slope, slope direction, precipitation, soil type, distance from the waterway and distance from the fault have been used. Also, the historical information on the earthquake occurrence has been used to estimate the effect of each criterion and sub-criteria. For this purpose, by using the frequency ratio (FR) method, the impact of sub-criteria and by using Shannon's entropy method, the weight of each criterion has been calculated. Also, after calculating the weights of criteria and sub-criteria, VIKOR and weighted average (OWA) methods have been used to prepare a risk map. Based on the obtained results, the criterion of soil type with a weight value of 0.33 has the most effective weight. To compare different methods, the FR criterion has been used, which based on the results obtained, the OWA method has better results for α values equal to 10 and 2.

Cite this article: Dehnavi Eelagh, M., & Pahlavani, P. (2024). Landslide Susceptibility Assessment using VIKOR and Ordered Weighted Averaging Methods A Case Study of Savadkuh County. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (1), 41-59.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.366517.1007792>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Landslides or range movements are natural phenomena that can have irreparable effects. The intervention of human activities such as road construction, tunnel digging, tree cutting, and mining activities can aggravate this phenomenon. Of course, environmental factors such as heavy rains, earthquakes, and lowering the underground water level can cause this phenomenon. Landslides, by destroying the people's public property and environment, make the continuation of human life a severe problem. It is very important to identify the prone areas and prepare hazard maps, followed by planning to manage the conditions after the landslide event, and it helps the planners to make the necessary preparations before any disaster occurs. To consider In this study, the VIKOR method is used as one of the MCDM methods. Based on the review of previous studies, this method has not been used in other studies in accordance with the subject of this study. Also, the criteria used in this study include elevation, slope, slope direction, precipitation, soil type, distance from the fault, distance from the river, and distance from waterways, which are weighted by Shannon's entropy method and Frequency ratio.

Methodology

Shannon entropy- Frequency Ratio(FR): This method is widely used in multi-criteria decision-making, and considering that it can determine the importance of the criteria without needing an expert's opinion and calculate the weight for each criterion, it is of interest. Also, this method can be useful when there is a lot of inconsistency between experts' opinions. First, the probability density (E_{ij}) of landslide occurrence for each class of the desired factor is calculated. The FR is equivalent to the ratio of the relative percentage of the number of relevant events in a certain class to the relative percentage of the area of the class in the studied area. After that, the entropy value is calculated. Also, in the next step, the information value should be calculated. The information value shows the importance of the relevant factor in creating the event, and the larger its value, the higher the

importance of that factor. Finally, to reach the weight of each factor, the information value must be multiplied by the value of the average FR.

VIKOR: This method ranks the options by calculating how close each option is to the ideal solution, which receives the decision matrix and the criteria's weight vector as input. In the first step, the data should be normalized. After normalization, the values of the decision matrix must be multiplied by the weight of each criterion to reach the value of the weighted normalized matrix. In the next step, partial agreement with the ideal answer and partial disagreement with the ideal solution (should be calculated. This method uses a linear relationship in terms of and to evaluate and ranking options.

OWA: The OWA method is one of the information integration methods based on priority weighting. The information integration is given a weight based on the priority of the information source among other information sources. Two sets of weights can be included in OWA. The set of weights of the criteria that were calculated in this study using the Shannon entropy-frequency ratio method. The weight of the criteria specifically determines the importance of each information source. The set of order weights is specified for each priority. The order weight is determined according to the rank and position of the information source compared to other information sources.

Results and Discussion

The layers of information used in this study include slope layer, aspect, elevation, distance from the fault, distance from the rivers, soil type, and precipitation. This study was conducted in Savadkuh county of Mazandaran province. Based on the values obtained, the criteria of soil type and elevation with weight weights of 0.33 and 0.23, respectively, have the greatest effect in causing landslides. Also, the criterion of distance from the rivers with a weight of 0.01 has had the least effect.

Among the different soil types, the Malisol (mol) type has the greatest effect in causing landslides with an impact of 0.68% compared to other types, which is due to the fact that this soil is always moist and soft, It

has a high potential in creating landslides. Also, for the sub-criteria related to elevation, the highest number of landslides occurred at elevations of 100 to 1200 meters above sea level, which are actually hillsides. This phenomenon has been less at higher altitudes, which can be attributed to the type of soil at higher altitudes, mostly rocks and stones. According to the obtained map, 72.08% of the points were placed in very high and high-risk areas, and its rate was 10.8% for low and very low-risk areas. Also, 19.82% of the points are located in medium-risk areas, which is a significant amount, and it seems that other factors can be considered in determining the event's potential.

Conclusion

After calculating the weight of the criteria and sub-criteria, VIKOR and OWA methods were used to combine different layers. As a result, eight landslide risk zoning maps were obtained. The maps obtained from the OWA method for α values equal to 10 and 2 have the best results based on the DR criteria. Based on the obtained maps, the northern regions of the region have a higher potential for this phenomenon to occur, and the soil type of the northern regions and lower altitudes (domains) have increased the potential for this phenomenon to occur. Also, agricultural activities increase the probability of occurrence, which is higher in the northern regions. Based on the obtained results, it can be said that the OWA method, which produces a wide range of outputs, can be a suitable method for reducing the issue of uncertainty because of different values of

α and comparing the obtained maps. In reality, you can choose the best result. Therefore, one of the advantages of this method over the VIKOR method is the reduction of uncertainty.

Also, based on the results obtained from this study, the high number of points in each class cannot be used as a measure of accuracy alone because, for example, in the OWA method with an α value equal to zero, more than 95% of the points are in the high-risk class. At the same time, more than 87% of the region's area was placed in this class, which caused more points to be placed. The DR method was a criterion for comparing different ways by considering the relative number of points and the relative area of the corresponding class. The maps obtained from this study can be used to improve road safety and make better decisions in the design of roads, railways, and power transmission lines.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ویکور و میانگین وزنی مرتب‌شده مطالعه موردی شهرستان سوادکوه

مسلم دهنوی نیلاق^۱، پرهام پهلوانی^۲

۱- گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: moslem.dehnavi@ut.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: pahlavani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۱/۱۱

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۰۲/۱۴

واژگان کلیدی:

آنتروپی شانون،
زمین‌لغزش،
نسبت فراوانی،
میانگین وزنی مرتب‌شده،
ویکور.

زمین‌لغزش می‌تواند به سبب فعالیت‌های انسانی و عوامل محیطی رخ دهد که اثرات مخربی در پی دارد. رسیدن به یک پهنه‌بندی از خطر وقوع این پدیده می‌تواند به اتخاذ تصمیم‌هایی در جهت کاهش تلفات و خسارات ناشی از این پدیده کمک کند. در این مطالعه با هدف تهیه یک نقشه خطرپذیری رخداد زمین‌لغزش، عوامل طبیعی مختلفی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، جنس خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل به کار گرفته شده‌اند. همچنین از اطلاعات تاریخی رخداد زلزله به منظور برآورد میزان اثر هر معیار و زیر معیار استفاده شده است که به این منظور با به‌کارگیری روش نسبت فراوانی (FR)، میزان اثر زیرمعیارها و با استفاده از روش آنتروپی شانون، وزن هر معیار محاسبه شده است. همچنین پس از محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها از روش‌های ویکور (VIKOR) و میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA) برای تهیه نقشه خطرپذیری استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، معیار جنس خاک با مقدار وزن 0.33 دارای بیشترین وزن مؤثر بوده است. برای مقایسه روش‌های مختلف از معیار FR استفاده شده است که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده روش OWA به ازای مقادیر α برابر با 10 و 2 نتایج بهتری داشته است.

استناد: دهنوی نیلاق، مسلم و پهلوانی، پرهام. (۱۴۰۳). ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ویکور و میانگین وزنی مرتب‌شده مطالعه موردی شهرستان سوادکوه. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶ (۱)، ۴۱-۵۹.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.366517.1007792>

مقدمه

زمین‌لغزش یا حرکات دامنه‌ای یکی از پدیده‌های طبیعی می‌باشد که می‌تواند هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم زیادی در پی داشته باشد (بابلی مؤخر و همکاران، ۱۳۹۶). این پدیده می‌تواند با دخالت فعالیت‌های انسانی نظیر راه‌سازی، حفر تونل، قطع درختان و فعالیت‌های معدنی تشدید شود. البته عوامل طبیعی نظیر باران‌های شدید، زلزله‌ها و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند سبب ایجاد این پدیده شوند. زمین‌لغزش‌ها با تخریب اموال عمومی مردم و محیط زندگی آنان، ادامه زندگی انسان‌ها را با مشکل جدی روبرو می‌کند (یالچین و همکاران، ۲۰۱۱). این پدیده بیشتر در مناطق کوهستانی رخ می‌دهد (هاتانچی و موراکی، ۲۰۰۹). شناسایی مناطق مستعد و تهیه نقشه‌های خطر و به دنبال آن برنامه‌ریزی برای مدیریت شرایط پس از رخداد زمین‌لغزش بسیار حائز اهمیت می‌باشد و به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا قبل از وقوع هر اتفاقی آمادگی‌های لازم را در نظر بگیرند. برای تهیه نقشه‌های خطرپذیری این پدیده در ابتدا باید عوامل مختلفی که در ایجاد آن نقش دارند مشخص گردند. امروزه استفاده از ابزارهای سیستم اطلاعات مکانی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تکنیک‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، سبب شده است که فرآیند تلفیق اطلاعات مختلف به منظور تهیه نقشه‌های موضوعی نظیر خطرپذیری زمین‌لغزش آسان گردد. همچنین روش‌های متنوعی برای وزن دهی لایه‌ها و تلفیق آنان مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به مرور مطالعات مختلف در زمینه زمین‌لغزش پرداخته شده است.

برخی مطالعات از روش تحلیل شبکه (ANP) برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده کرده‌اند به‌عنوان مثال (بهمنی و همکاران، ۱۴۰۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ اقدام به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش نمودند. زمین‌لغزش‌های موجود در منطقه با دقت ۹۴ درصد و ضریب کاپای ۹۱ درصد شناسایی و استخراج گردیده‌اند. (نظری بیاتبانی و همکاران، ۱۴۰۱) به منظور تعیین پهنه‌های حساس به خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از قضیه بیز و ANP، ۹ عامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش شامل لیتولوژی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، گسل، جاده‌سازی، شبکه زهکشی و بارش را در نظر گرفتند. همچنین (روستائی و همکاران، ۱۳۹۳) از رویکرد ANP برای این منظور استفاده کرده‌اند.

برخی مطالعات بر مبنای هوش مصنوعی انجام گرفته‌اند. به‌عنوان مثال (بلواسی و همکاران، ۱۳۹۴) با پیاده‌سازی دو مدل شبکه عصبی مصنوعی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، مقایسه‌ای بین این دو روش به منظور تهیه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش انجام دادند. بدین منظور لایه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از گسل و آبراهه در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با ضریب کاپای ۰/۹۰ روش کارآمدتری نسبت به مدل تحلیل سلسله‌مراتبی بوده است. (حجازی و همکاران، ۱۳۹۹) بین دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل تاپسیس به منظور تهیه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مقایسه‌ای انجام دادند. در مدل تاپسیس از روش آنتروپی شانون برای وزن دهی به معیارها استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل شبکه عصبی پرسپترون دارای خطای کمتر و انطباق بیشتری بوده است. (سدیدی و مالکی، ۱۴۰۱) به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مختلف از قبیل ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک پرداخته‌اند. بر اساس ارزیابی حاصل از دقت برای الگوریتم‌ها بر اساس منحنی ROC چنین مشخص نموده است که ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک به ترتیب مقدار صحت ۰/۷۶، ۰/۸۷ و ۰/۸۴ را داشته‌اند.

1. Geospatial Information System (GIS)
2. Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
3. Remote Sensing (RS)

علاوه بر روش های گفته شده در مطالعات فوق، روش های رگرسیونی، نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد (شریفی پیچون و شیرانی، ۱۴۰۰). همچنین روش های مبتنی بر MCDM می توانند بسیار متنوع باشد به عنوان مثال (انتظاری و جلیلیان، ۱۳۹۸) از روش ELECTRE-1 که کمتر به آن پرداخته شده است، به منظور تهیه نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش استفاده نموده اند. همان طور که در مرور مطالعات گفته شد، روش های آماری که در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته اند بیشتر بر روی روش آنتروپی شانون و نسبت فراوانی متکی بوده اند که علاوه بر مطالعات گفته شده (فلاح ززولی و همکاران، ۱۳۹۸؛ اطنابی و همکاران، ۱۴۰۰؛ جاویدان و همکاران، ۱۴۰۱) از روش های آنتروپی شانون، ارزش اطلاعات و مدل های آماری به منظور پهنه بندی زمین لغزش استفاده کرده اند. همچنین برخی مطالعات به دنبال روشی برای بهبود نحوه وزن دهی لایه ها در این زمینه بوده اند. به عنوان مثال (امین عطایی و همکاران، ۱۳۹۸) از روش LNSF^۱ برای تعیین وزن معیارهای مختلف برای پهنه بندی زمین لغزش استفاده نموده اند. همچنین (محرمی و ارگانی، ۱۳۹۹) از روش FBWM^۲ به منظور وزن دهی لایه ها استفاده کرده اند.

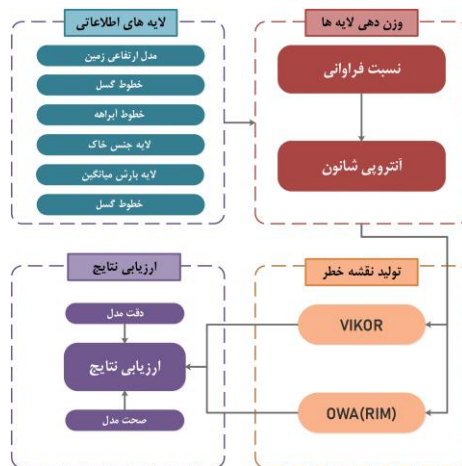
هدف از این مطالعه بررسی عوامل طبیعی تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش و تهیه نقشه پهنه بندی خطر رخداد بر اساس عوامل مرتبط بوده است. همچنین با توجه به مسئله عدم قطعیت در نتایج، نقشه های متنوعی بر اساس درجه خوش بینی به اثر عوامل تولید شده اند. با توجه به مطالعات پیشینه، که روش های متعددی برای تولید نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش استفاده شده است، ولی به نظر می رسد با توجه به گستردگی روش های مبتنی بر MCDM هنوز جای کار زیادی برای بررسی دقیق روش های مختلف باقی مانده است. به همین منظور در این مطالعه از روش ویکور^۳ به عنوان یکی از روش های MCDM استفاده شده است. با بررسی صورت گرفته بر روی مطالعات قبلی، این روش متناسب با موضوع این مطالعه، در سایر مطالعات استفاده نشده است. به این منظور از روش میانگین وزنی مرتب شده (دهنوی ئیلاق و پهلووانی، ۱۴۰۲) با استفاده از کمیت سنج منظم افزایشی RIM^۵ به منظور تلفیق اطلاعات استفاده شده و نتایج آن با روش ویکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعات پیشینه استفاده از این تکنیک به منظور حل مسئله عدم قطعیت دیده نشده است. همچنین معیارهای مورد استفاده در این مطالعه شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، جنس خاک، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از آبراه ها می باشند که برای وزن دهی آنان از روش آنتروپی شانون و نسبت فراوانی استفاده شده است. در ادامه و در بخش روش شناسی تحقیق، تئوری های مربوط به روش های مورد استفاده، بحث شده و سپس در بخش یافته های پژوهش، پیاده سازی روش ها و نتایج بحث شده است. در نهایت در بخش بحث و نتیجه گیری، به نتایج حاصل از این مطالعه و پیشنهاد های آتی پرداخته شده است.

روش پژوهش

در این بخش روش پیشنهادی مطالعه توضیح داده شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ساختار روش تحقیق از چهار بخش شامل لایه های اطلاعاتی، وزن دهی لایه ها، تولید نقشه خطر و ارزیابی نتایج تشکیل شده است. لایه های اطلاعاتی با استفاده از آنالیزهای GIS قرار گرفته و برای استفاده در مدل ها آماده می شوند. وزن دهی لایه ها شامل دو تکنیک نسبت فراوانی و آنتروپی شانون می باشد. همچنین برای تولید نقشه های خطر از تکنیک ویکور و OWA به

1. Landslide Nominal Susceptibility Factor (LNSF)
2. Fuzzy Best-Worst Method (FBWM)
3. VIKOR
4. Ordered Weighted Averaging (OWA)
5. Regular Increasing Monotone (RIM)

همراه کمیت RIM استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از تکنیک‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه روش‌های موردنظر به‌طور کامل‌تر توضیح داده شده‌اند.



شکل ۱. ساختار روش پیشنهادی مطالعه

روش آنتروپی شانون - نسبت فراوانی

آنتروپی شانون در سال ۱۹۴۸ توسط شانون ارائه شد (شانون، ۱۹۴۸). این روش در تصمیم‌گیری چندمعیاره کاربرد فراوانی دارد و با توجه به اینکه بدون نیاز به نظر کارشناس می‌تواند میزان اهمیت معیارها را مشخص کرده و برای هر معیار وزنی محاسبه کند، مورد توجه می‌باشد. همچنین زمانی که بین نظرات کارشناسان ناسازگاری زیادی وجود داشته باشد این روش می‌تواند مفید باشد (دوویدی^۱ و شارما^۲، ۲۰۲۲). مطابق مطالعه (نقیبی و همکاران، ۲۰۱۵)، مدل آنتروپی شانون-نسبت فراوانی در ادامه توضیح داده شده است. در ابتدا مقدار چگالی احتمال (E_{ij}) رخداد زمین‌لغزش برای هر کلاس از عامل موردنظر، طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$E_{ij} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^{N_j} FR} \tag{رابطه ۱}$$

که FR مقدار نسبت فراوانی هدف موردنظر در هر کلاس از عامل موردنظر می‌باشد. در رابطه ۱، تعداد کل کلاس‌های هر عامل با N_j نشان داده شده است. نسبت فراوانی معادل با نسبت درصد نسبی تعداد رخداد مربوطه در یک کلاس مشخص، به درصد نسبی مساحت کلاس در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. همچنین مقدار آنتروپی طبق رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$H_j = - \frac{\sum_{j=1}^{N_j} E_{ij} \log_2 E_{ij}}{\log_2 N_j} \tag{رابطه ۲}$$

که H_j مقدار آنتروپی برای عامل j ام می‌باشد. همچنین در مرحله بعد باید ضریب اطلاعات محاسبه گردد که طبق رابطه ۳ به دست می‌آید. ضریب اطلاعات میزان اهمیتی را که عامل مربوطه در ایجاد رخداد در پی دارد، نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن بزرگ‌تر باشد اهمیت بالاتر آن عامل را نشان می‌دهد.

$$I_j = 1 - H_j \tag{رابطه ۳}$$

1. Dwivedi
2. Sharma

که I_j ضریب اطلاعات مربوط به عامل z ام می باشد. در نهایت برای رسیدن به وزن هر کدام از عوامل، باید مقدار ضریب اطلاعات (I_j) در مقدار نسبت فراوانی میانگین ضرب گردد. رابطه ۴ نحوه محاسبه را نشان می دهد.

$$w_j = I_j \times \overline{FR} \quad \text{رابطه ۴}$$

که w_j وزن مربوط به عامل (معیار) مربوطه در ایجاد رخداد مدنظر می باشد که با مقادیر I_j و \overline{FR} نسبت مستقیم دارد و مقدار میانگین مقادیر نسبت فراوانی برای تمامی کلاس های متعلق به یک عامل می باشد. بعد از تعیین وزن هر عامل، باید لایه های اطلاعاتی را تلفیق نمود که در ادامه روش ویکور به عنوان روش تلفیق در این مطالعه توضیح داده شده است.

روش ویکور

این روش در سال ۱۹۹۸ توسط اپریکوویچ ارائه شده است (اپریکوویچ، ۱۹۹۸). این روش با محاسبه میزان نزدیکی هر گزینه به جواب ایده آل، به رتبه بندی گزینه ها می پردازد که ماتریس تصمیم و بردار وزن معیارها را به عنوان ورودی دریافت می کند. در مرحله اول باید بی بعد سازی داده ها انجام شود که این امر مطابق رابطه ۵ صورت می گیرد.

$$r_{ij} = \frac{|a_j^+ - a_{ij}|}{|a_j^+ - a_j^-|} \quad \text{رابطه ۵}$$

که a_j^+ و a_j^- به ترتیب بهترین و بدترین مقدار برای معیار z ام بوده و a_{ij} و r_{ij} به ترتیب مقادیر ماتریس تصمیم قبل و بعد از فرآیند بی بعد سازی می باشند. مقدار r_{ij} عددی بین صفر و یک می باشد که هرچه مقدار آن کوچک تر باشد، نشان از ارجحیت آن گزینه می باشد. بعد از بی بعد سازی، مقادیر ماتریس تصمیم باید در وزن هر معیار ضرب گردد تا به مقادیر ماتریس بی بعد موزون (t_{ij}) برسیم. در گام بعد باید موافقت جزئی با جواب ایده آل (S_i) و مخالفت جزئی با جواب ایده آل (R_i) طبق روابط ۶ و ۷ مورد محاسبه قرار گیرد.

$$S_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$R_i = \max_{j \in J} (t_{ij}) \quad \text{رابطه ۷}$$

این روش برای ارزیابی و رتبه بندی گزینه ها، از رابطه ای خطی بر حسب S_i و R_i استفاده می نماید که مطابق رابطه ۸ تعریف می گردد.

$$Q_i = v \times \left(\frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1-v) \times \left(\frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در رابطه ۸، مقدار v ، وزن مطلوبیت کلی بوده که میزان تأثیر موافقت جزئی با جواب ایده آل را در فرآیند رتبه بندی نشان می دهد و مکمل این مقدار یعنی $1-v$ نشان دهنده میزان تأثیر مخالفت جزئی با جواب ایده آل می باشد. همچنین S^+ ، S^- ، R^+ و R^- مطابق رابطه ۹ به دست می آید.

$$\begin{cases} S^+ = \min(S_i) \\ S^- = \max(S_i) \end{cases} \quad \begin{cases} R^+ = \min(R_i) \\ R^- = \max(R_i) \end{cases} \quad \text{رابطه ۹}$$

میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA)

روش OWA از روش‌های تلفیق اطلاعات بر مبنای وزن دهی اولویت مبنای می‌باشد. در واقع تلفیق اطلاعات بر اساس اینکه منبع اطلاعاتی چه اولییتی در بین سایر منابع اطلاعاتی دارد، وزنی به آن تعلق می‌گیرد. در OWA می‌توان دو مجموعه وزن را دخالت داد. مجموعه وزن معیارها که در این مطالعه با استفاده از روش آنتروپی شانون - نسبت فراوانی محاسبه شده‌اند. وزن معیارها به‌طور خاص میزان اهمیت هر کدام از منابع اطلاعاتی را مشخص می‌کند. مجموعه وزن ترتیبی که برای هر اولویت مشخص می‌گردد. در واقع وزن ترتیبی متناسب با رتبه و جایگاه منبع اطلاعاتی در مقایسه با سایر منابع اطلاعاتی مشخص می‌گردد. عملگر OWA به‌صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌گردد:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{u_j v_j}{\sum_{j=1}^n u_j v_j} \right) z_{ij} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که u_j وزن معیار z_{ij} ، v_j وزن ترتیبی برای معیار z_{ij} مقدار معیار z_{ij} برای گزینه i ام می‌باشد. همچنین n تعداد کل معیارها می‌باشد. مهم‌ترین مسئله در روش OWA محاسبه وزن‌ها می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، وزن معیارها با استفاده از روش آنتروپی شانون - نسبت فراوانی محاسبه شده‌اند. در این مطالعه از کمیت‌های زبانی شامل At least one، Few، Some، Many، Most و All استفاده شده است. برای تبدیل این کمیت‌های زبانی به مدل‌های ریاضی از کمیت سنج زبانی Q به‌صورت رابطه ۱۱ استفاده می‌گردد.

$$Q(p) = p^\alpha \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که p عددی بین صفر و یک بوده و α متناسب با کمیت زبانی موردنظر تغییر می‌کند. در این مطالعه از کمیت سنج منظم افزایشی RIM استفاده شده است. این کمیت سنج می‌تواند بر اساس Orness های مختلف، وزن‌های متفاوتی ارائه دهد. مثلاً زمانی که α خیلی کوچک و نزدیک به صفر باشد، با کمیت زبانی At least one معادل بوده و مسئله را در شرایط بسیار خوش‌بینانه حل می‌نماید. همچنان که مقدار α افزایش می‌یابد میزان خوش‌بینانگی کاهش می‌یابد تا جایی که وقتی α به سمت بی‌نهایت میل کند، مسئله در شرایط بسیار بدبینانه حل می‌گردد که با کمیت زبانی All معادل است. در این مطالعه برای محاسبه وزن ترتیبی، از رابطه ۱۲ استفاده شده است:

$$v_j = \left(\sum_{c=1}^j u_c \right)^\alpha - \left(\sum_{c=1}^{j-1} u_c \right)^\alpha \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که می‌توان با تنظیم پارامتر α ، کمیت زبانی و استراتژی حل مسئله را مشخص نمود. بنابراین رابطه OWA به‌صورت رابطه ۱۳ بازنویسی می‌گردد.

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left(\left(\sum_{c=1}^j u_c \right)^\alpha - \left(\sum_{c=1}^{j-1} u_c \right)^\alpha \right) z_{ij} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

شاخص‌های دقت

جهت بررسی و تجزیه و تحلیل میزان دقت و صحت مدل پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش روابط مختلفی وجود دارد. در این مطالعه از روابط دقت مدل (P) و صحت مدل (QS) استفاده شده است. دقت مدل (P) نسبت تعداد زمین‌لغزش با پهنه‌بندی‌های متوسط به بالا بر تعداد کل زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. این مقدار طبق رابطه ۱۴ محاسبه می‌گردد.

$$P = \frac{KS}{S} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن P احتمال تجربی، KS تعداد لغزش ها در پهنه های خطر متوسط به بالا و S تعداد کل لغزش های منطقه است. هر چه احتمال تجربی به یک نزدیک تر باشد، مدل برای پهنه بندی خطر زمین لغزش مناسب تر و دارای دقت بیشتری است. همچنین مقدار صحت مدل (QS) مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه می گردد.

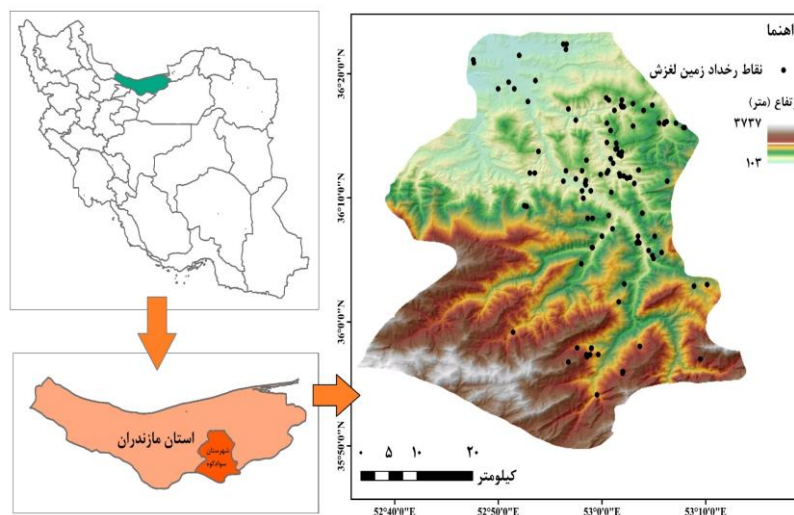
$$DR_i = \frac{R_L^i}{R_A^i} \tag{رابطه ۱۵}$$

$$QS = \sum_{i=1}^n (DR - 1)^2 \times R_A^i \tag{رابطه ۱۶}$$

که DR_i نسبت تراکمی برای کلاس i ام، R_L^i نسبت تعداد نقاط لغزش کلاس i ام به کلاً نقاط لغزش در منطقه، R_A^i نسبت مساحت کلاس i ام به مساحت کل منطقه و n تعداد کل کلاس ها می باشد. هر چه مقدار QS باشد، کلاسه بندی با دقت بهتری صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان سوادکوه یکی از شهرستان های استان مازندران در شمال ایران قرار گرفته است و بر اساس سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، دارای جمعیتی بالغ بر ۴۳۹۱۳ نفر می باشد که با توجه به مساحت ۲۰۷۸ هکتاری این شهرستان، تراکم آن معادل ۹/۳۲ نفر بر هر کیلومتر مربع می باشد. منطقه سوادکوه در یک دره وسیع طولانی و در دامنه های شمالی رشته کوه های البرز مرکزی واقع شده است. حوزه کلی این ناحیه از منتهی الیه جلگه های جنوبی، و ۳۰ کیلومتری دریای خزر آغاز شده و با شیب بسیار تند به سوی جنوب کشیده می شود. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا به صورت تقریبی بین ۷۰۰ تا ۳۰۰۰ متر متغیر می باشد. محدوده این شهرستان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است که در شکل ۱ محدوده جغرافیایی این شهرستان نشان داده شده است.

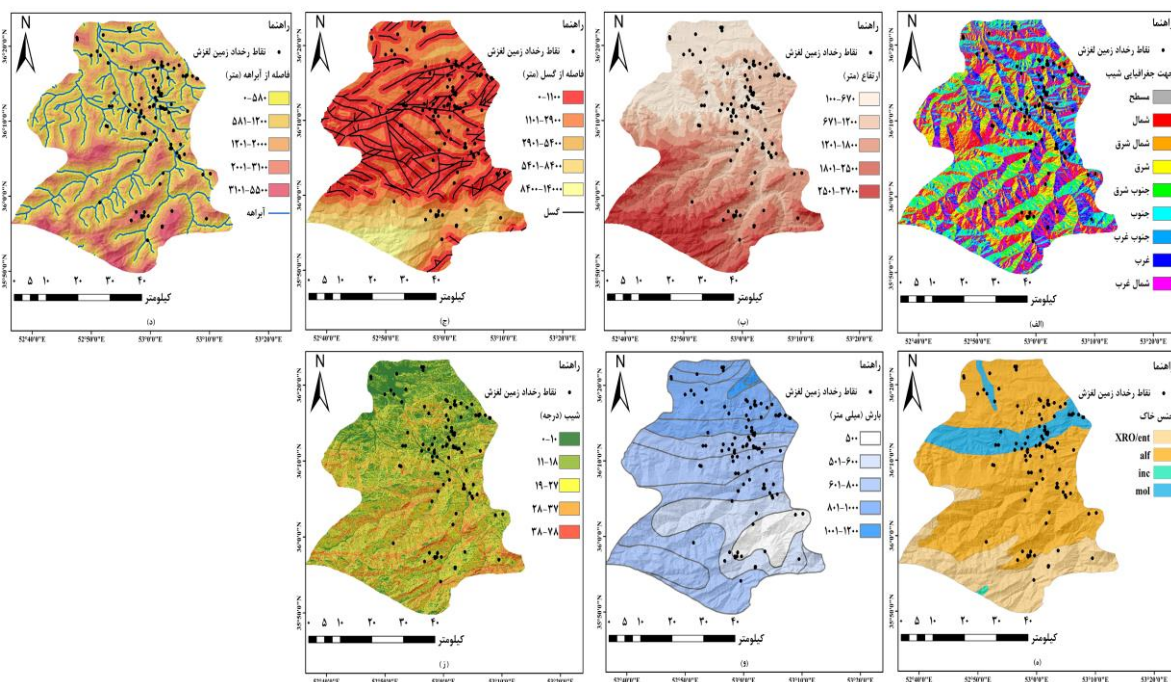


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه

یافته‌ها

پیااده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش فرآیند پیاده‌سازی روش پیشنهادی، بیان شده است. برای تولید لایه شیب و جهت شیب از مدل ارتفاعی منطقه که تفکیک مکانی ۳۰ متر داشته است، استفاده شده است و در محیط ArcGIS Pro صورت گرفته است. همچنین لایه‌های فاصله از گسل و فاصله از آبراهه نیز در محیط ArcGIS Pro تولید شدند. برای لایه بارش از منحنی میزان‌های بارش سالانه برای استان مازندران استفاده گردید. همچنین علاوه بر لایه‌های ذکر شده، از اطلاعات تاریخچه رخداد زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه استفاده گردید که در این لایه اطلاعاتی، موقعیت مناطق دارای رخداد به صورت نقطه‌ای ثبت شده است. در شکل ۳ نقشه مربوط به لایه‌های اطلاعاتی ذکر شده، نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این مطالعه شامل الف-جهت شیب، ب-ارتفاع، ج-فاصله از گسل، د-فاصله از آبراهه، ه-جنس خاک، و-بارش و ز-شیب

در ادامه فرآیند محاسبه وزن معیارهای مختلف با استفاده از رویکرد آنتروپی شانون – نسبت فراوانی آمده است که این فرآیند در جدول ۱ نشان داده شده است. در ابتدا زیرمعیارهای مربوط به معیارهای اصلی مشخص شدند به این صورت که برای معیارهای ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، بارش و شیب، ۵ زیر معیار و برای لایه جنس خاک متناسب با تعداد کلاس‌های مربوطه، ۴ زیر معیار در نظر گرفته شد. همچنین معیار جهت شیب با توجه به تعداد جهات اصلی و فرعی جغرافیایی به ۹ زیر معیار تقسیم‌بندی گردید.

جدول ۱. محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش آنتروپی شانون - نسبت فراوانی

وزن نهایی	W	I	H	E	FR	درصد نسبی مساحت	درصد نسبی رخداد	زیر معیار	معیار اصلی
ارتفاع	۰/۲۹	۰/۱۹۸۷	۰/۲۳	۰/۷۷	۰/۱۱	۰/۴۹	۲۰/۳۷	۱۰۰-۶۷۰	۴۶/۸۵
								۶۷۱-۱۲۰۰	۲۴/۳۹
								۱۲۰۱-۱۸۰۰	۹/۹۱
								۱۸۰۱-۲۵۰۰	۵/۴۰
فاصله از گسل	۰/۱۳	۰/۰۸۳۳	۰/۱۲	۰/۸۸	۰/۳۳	۱/۱۶	۱۰/۱۳	۲۵۰۱-۳۷۰۰	۰/۹۰
								۳۷۰۱-۵۴۰۰	۶/۹۴
								۵۴۰۱-۸۴۰۰	۰/۹۰
								۸۴۰۱-۱۴۰۰۰	۰/۰۰
فاصله از آبراهه	۰/۰۱	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۶۶	۲۰/۶۰	۰-۱۱۰۰	۵۷/۶۶
								۱۱۰۱-۲۹۰۰	۲۹/۷۳
								۲۹۰۱-۵۴۰۰	۱۱/۷۱
								۵۴۰۱-۸۴۰۰	۰/۹۰
بارش	۰/۰۸	۰/۰۵۱۷	۰/۰۶	۰/۹۴	۰/۱۹	۰/۸۳	۵۱/۰۴	۰-۵۸۰	۴۴/۱۴
								۵۸۱-۱۲۰۰	۲۷/۹۳
								۱۲۰۱-۲۰۰۰	۱۳/۵۱
								۲۰۰۱-۳۱۰۰	۱۰/۸۱
شیب	۰/۰۴	۰/۰۲۸۰	۰/۰۳	۰/۹۷	۰/۲۰	۰/۹۳	۲۵/۲۴	۳۱۰۱-۵۵۰۰	۳/۶۱
								۵۵۰۱-۸۴۰۰	۴/۲۷
								۸۴۰۱-۱۴۰۰۰	۰/۰۰
								۱۴۰۰۱-۲۰۰۰۰	۱/۲۳
جنس خاک	۰/۴۱	۰/۲۷۷۷	۰/۲۹	۰/۷۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۰	۰-۱۰	۲۸/۸۳
								۱۱-۱۸	۳۱/۵۳
								۱۹-۲۷	۲۳/۴۲
								۲۸-۳۷	۱۱/۷۱
جهت شیب	۰/۰۴	۰/۰۲۹۵	۰/۰۳	۰/۹۷	۰/۱۰	۰/۸۷	۱۰/۳۹	XRO/ent	۵/۴۰
								inc	۰/۰۰
								alf	۶۴/۸۷
								mol	۲۹/۷۳
								مسطح	۴/۵۰
								شمال	۵/۴۱
								شمال شرق	۱۳/۵۱
								شرق	۱۰/۸۱
جنوب شرق	۹/۰۱								
جنوب	۱۸/۰۲								
جنوب غرب	۱۱/۷۱								
غرب	۱۶/۲۲								
شمال غرب	۱۰/۸۱								

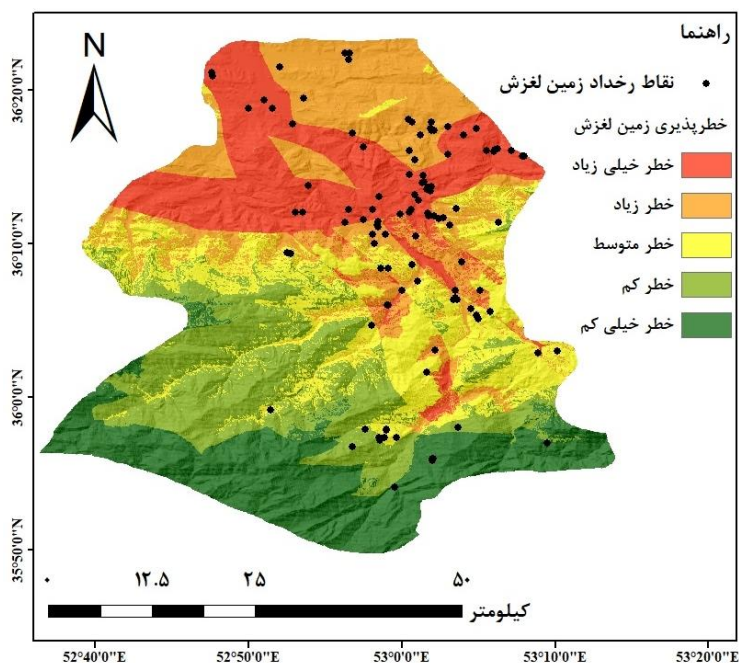
با محاسبه مقدار FR برای هر زیر معیار درواقع میزان اثر آن زیر معیار در مقایسه با سایر زیرمعیارها، در ایجاد پدیده زمین لغزش به دست آمده است که به دنبال آن وزن هر معیار محاسبه شده است. در مرحله بعد تلفیق لایه ها با استفاده از روش ویکور صورت گرفته است که به این منظور ابتدا لایه های اطلاعاتی بر اساس مقدار FR مربوط به هر زیر معیار باز

طبقه‌بندی‌اشدند که معادل مقادیر ماتریس تصمیم در روش ویکور می‌باشند. پس از آن مقادیر هر معیار نرمال شده و در وزن محاسبه‌شده در شکل ۱، ضرب گردید که معادل ماتریس بی‌بعد موزون می‌باشد. در مرحله بعد مقدار R_i و S_i برای هر گزینه محاسبه شد که با توجه به اینکه گزینه‌ها در سطح پیکسل در نظر گرفته شده‌اند، دو لایه رستری S و R به دست آمد که هر پیکسل حاوی مقدار R_i و S_i بوده است. در ادامه پس از محاسبه S و R ، طبق رابطه ۸، S^+ ، S^- ، R^+ و R^- به دست آمد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر R^+ ، R^- ، S^+ و S^-

S^+	S^-	R^+	R^-
۰/۰۱۱۲۵	۰/۹۴۵۶۵۱	۰/۰۰	۰/۳۳

همچنین مقدار ۷ به‌عنوان پارامتر تنظیم‌کننده روش ویکور، در این مطالعه ۰/۵ در نظر گرفته شده است. سپس برای تهیه نقشه خطرپذیری از رابطه ۷ استفاده شد که نتیجه آن در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴. نقشه خطرپذیری زمین لغزش با استفاده از روش ویکور

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است منطقه مورد مطالعه به پنج کلاس با عنوان‌های خطر خیلی زیاد، خطر زیاد، خطر متوسط، خطر کم و خطر خیلی کم تقسیم‌بندی شده است که مناطق شمالی منطقه دارای خطرپذیری بیشتری در مقایسه با مناطق جنوبی بوده‌اند. همچنین بیشتر نقاط رخداد هم در کلاس‌های خطر خیلی زیاد و خطر زیاد قرار گرفته‌اند. در جدول ۳، اطلاعات مربوط به تعداد و درصد نقاط رخداد موجود در هر کلاس آمده است.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به تعداد و درصد نقاط رخداد موجود در هر کلاس بر اساس روش ویکور

کلاس	تعداد نقاط رخداد	درصد نقاط رخداد
خطر خیلی زیاد	۴۷	۴۲/۳۵
خطر زیاد	۳۳	۲۹/۷۳
خطر متوسط	۲۲	۱۹/۸۲
خطر کم	۴	۳/۶۰
خطر خیلی کم	۵	۴/۵۰

مطابق با جدول ۳ می توان گفت ۷۲/۰۸ درصد از نقاط رخداد زمین لغزش، در کلاس های خطر خیلی زیاد و خطر زیاد قرار گرفته اند همچنین فقط ۸/۱۰ درصد از نقاط در محدوده با خطر کم و خطر خیلی کم قرار گرفته اند. بنابراین می توان گفت تطبیق پذیری خروجی به دست آمده با اطلاعات واقعی مناسب می باشد.

همچنین در ادامه روش OWA با استفاده از کمیت سنج RIM مورد به ازای مقادیر مختلف α پیاده سازی شده است. به این منظور ابتدا مقادیر مربوط به معیارهای مختلف، در سطح پیکسل از بزرگ به کوچک مرتب شدند. در واقع پیکسل های متناظر در لایه های مختلف به صورت نزولی مرتب شدند که در نهایت منجر به تولید هفت لایه اطلاعاتی گردید که هر لایه، یک رتبه از ترتیب نزولی را نشان می دهد. به عنوان مثال لایه اول تولید شده شامل مقادیر بیشینه هر پیکسل در مقایسه با پیکسل های متناظر در سایر معیارها می باشد که در روش OWA به عنوان جایگاه اول شناخته می شود. به همین صورت لایه آخر تولید شده شامل مقادیر کمینه پیکسل ها می باشد که به عنوان جایگاه آخر در روش OWA شناخته می شود.

بعد از تولید لایه های مربوط به جایگاه های اول تا هفتم (تعداد لایه ها)، وزن مربوط به هر لایه نیز تولید گردید. این وزن ها که وزن معیارها محسوب می گردند، به صورت پیکسل به پیکسل برای هر جایگاه تولید گردید. به عنوان مثال برای لایه جایگاه بیشینه، با توجه به اینکه هر پیکسل مقدار کدام معیار را درون خود دارد، معادل وزن همان معیار در پیکسل متناظر ذخیره گردید و لایه ای جداگانه به عنوان لایه وزن معیارها تولید شد. با این کار برای اعمال عملگر OWA، به راحتی می توان دو لایه رستری را در هم ضرب نمود و مقادیر وزن ها را اعمال نمود.

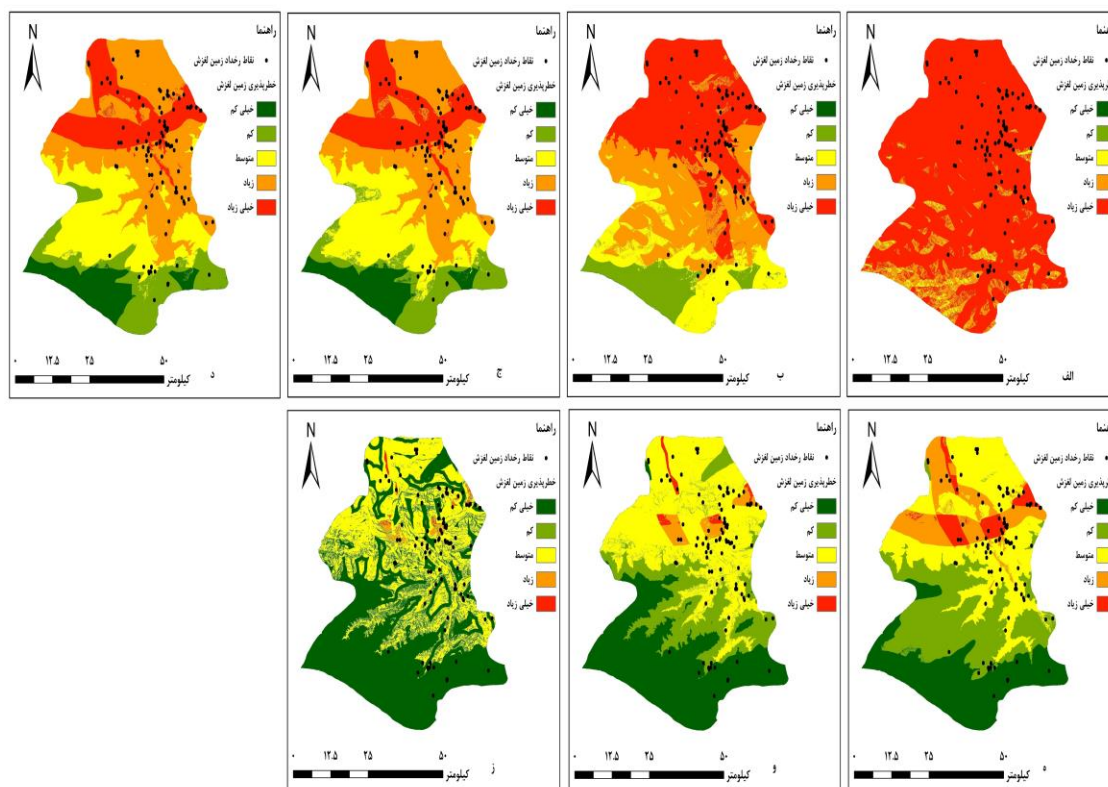
برای محاسبه وزن ترتیبی نیز از کمیت سنج RIM استفاده گردید و مقادیر مختلف α از صفر تا بی نهایت مورد استفاده قرار گرفت و نقشه های پهنه بندی خطر در سطوح مختلف «خوش بینانه بودن» و «بدبینانه بودن» تولید گردید. بعد از تولید نقشه های پهنه بندی مختلف تعداد نقاط رخداد در هر کلاس خطرپذیری شمارش گردید که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. اطلاعات مربوط به تعداد و درصد نقاط رخداد موجود در هر کلاس بر اساس مقادیر مختلف α در روش OWA

طبقه بندی	$\alpha=۰$	$\alpha=۰/۱$	$\alpha=۰/۵$	$\alpha=۱$	$\alpha=۲$	$\alpha=۱۰$	α
خیلی زیاد	۱۰۶	۸۳	۴۲	۳۹	۱۴	۴	۲
زیاد	۴	۲۰	۵۲	۵۵	۲۴	۱۰	۵
متوسط	۱	۷	۱۱	۱۰	۵۳	۷۴	۶۲
کم	۰	۱	۶	۷	۱۲	۱۱	۳
خیلی کم	۰	۰	۰	۰	۸	۱۲	۳۹

با توجه به جدول ۴، زمانی که مقدار α ، صفر می باشد تقریباً تمامی نقاط (۱۱۰ نقطه از ۱۱۱ نقطه)، در محدوده با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته اند. با افزایش مقدار α مناطقی که قبلاً دارای کلاس خطرپذیری خیلی زیاد و زیاد بودند، به مناطق با خطرپذیری کمتر تبدیل می شوند که منجر به افزایش تعداد نقاط رخداد در سایر کلاس ها شده است. در واقع این موضوع به ماهیت روش OWA و کمیت سنج RIM برمی گردد که طبقه بندی بر اساس کدام استراتژی انجام شده است.

در حالتی که α عددی کوچک باشد، هر منطقه‌ای که در یکی از معیارها، مستعد رانش باشد، به‌عنوان ناحیه خطرپذیر شناسایی می‌گردد که این موضوع منجر به تولید پهنه بزرگی برای کلاس‌های با خطرپذیری زیاد و خیلی زیاد می‌گردد. به‌طور عکس در حالتی که مقدار α به سمت بی‌نهایت میل داده شد، مناطق بسیار کوچک‌تری در کلاس با خطر خیلی زیاد و زیاد قرار گرفتند زیرا فقط مناطقی دارای خطرپذیری بالا شناخته شدند که در تمامی معیارها دارای استعداد وقوع رانش بودند. بنابراین با افزایش α مناطق دارای خطرپذیری خیلی زیاد و زیاد کوچک‌تر شده و به دنبال آن مناطق دارای خطرپذیری‌های کمتر افزایش پیدا کرده است. در شکل ۵ نقشه پهنه‌بندی خطر به ازای مقادیر مختلف α نشان داده شده است.



شکل ۵. نقشه خطرپذیری زمین‌لغزش به ازای مقدار α برابر با: الف- صفر، ب- ۰/۱، ج- ۰/۵، د- ۱، ه- ۲، و- ۱۰ و بی‌نهایت

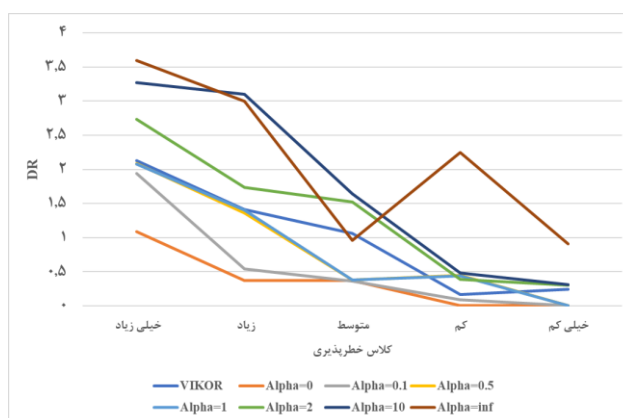
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، روش OWA منجر به تولید تعدادی نقشه پهنه‌بندی خطر شده است که در مقایسه با روش ویکور که فقط یک نقشه تواید کرده است، روش مناسب‌تری در کاهش عدم قطعیت محسوب می‌گردد. در ادامه برای مقایسه بیشتر نتایج OWA و ویکور، مقایسه‌ای بروی مقادیر DR برای هر حالت شده است. در واقع برای محاسبه DR درصد نسبی نقاط در هر کلاس بر مساحت نسبی آن کلاس تقسیم شده است. این معیار به‌عنوان پارامتری برای مقایسه حالات گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۵ نتایج این مقایسه آورده شده است.

جدول ۵. مقایسه روش های مختلف بر اساس معیار FR

QS	P	DR	درصد نسبی مساحت	درصد نسبی	کلاس خطرپذیری	روش
۰/۵۵	۹۱/۸	۲/۱۳	۱۹/۹	۴۲/۳	خیلی زیاد	ویکور
		۱/۴۱	۲۱/۱	۲۹/۷	زیاد	
		۱/۰۶	۱۸/۶	۱۹/۸	متوسط	
		۰/۱۷	۲۱/۱	۳/۶	کم	
		۰/۲۴	۱۹/۳	۴/۶	خیلی کم	
۰/۰۶	۱۰۰	۱/۰۹	۸۷/۷	۹۵/۵	خیلی زیاد	OWA($\alpha=0$)
		۰/۳۷	۹/۸	۳/۶	زیاد	
		۰/۳۷۵	۲/۴	۰/۹	متوسط	
		.	۰/۱	.	کم	
		.	تقریباً صفر	.	خیلی کم	
۰/۵۷	۹۹/۱	۱/۹۴	۳۸/۵	۷۴/۸	خیلی زیاد	OWA($\alpha=0.1$)
		۰/۵۴	۳۳/۴	۱۸	زیاد	
		۰/۳۶	۱۷/۶	۶/۳	متوسط	
		۰/۰۹	۱۰/۴	۰/۹	کم	
		.	۰/۱	.	خیلی کم	
۰/۹۳	۹۴/۵	۲/۰۹	۱۸/۱	۳۷/۸	خیلی زیاد	OWA($\alpha=0.5$)
		۱/۳۶	۳۴/۴	۴۶/۸	زیاد	
		۰/۳۸	۲۵/۸	۹/۹	متوسط	
		۰/۴۵	۱۲/۲	۵/۵	کم	
		.	۹/۵	.	خیلی کم	
۰/۸۳	۹۳/۶	۲/۰۸	۱۶/۹	۳۵/۱	خیلی زیاد	OWA($\alpha=1$)
		۱/۴۰	۳۵/۴	۴۹/۵	زیاد	
		۰/۳۸	۲۳/۹	۹/۰	متوسط	
		۰/۴۴	۱۴/۵	۶/۴	کم	
		.	۹/۳	.	خیلی کم	
۰/۵۱	۸۱/۹	۲/۷۳	۴/۶	۱۲/۶	خیلی زیاد	OWA($\alpha=2$)
		۱/۷۴	۱۲/۴	۲۱/۶	زیاد	
		۱/۵۲	۳۱/۴	۴۷/۷	متوسط	
		۰/۳۹	۲۷/۶	۱۰/۸	کم	
		۰/۳۰	۲۴/۰	۷/۳	خیلی کم	
۰/۵۷	۷۹/۳	۳/۲۷	۱/۱	۳/۶	خیلی زیاد	OWA($\alpha=10$)
		۳/۱۰	۲/۹	۹/۰	زیاد	
		۱/۶۴	۴۰/۶	۶۶/۷	متوسط	
		۰/۴۸	۲۰/۷	۹/۹	کم	
		۰/۳۱	۳۴/۶	۱۰/۸	خیلی کم	
۰/۱۲	۶۲/۲	۳/۶	۰/۵	۱/۸	خیلی زیاد	OWA($\alpha \rightarrow \infty$)
		۳/۰	۱/۵	۴/۵	زیاد	
		۰/۹۶	۵۸/۲	۵۵/۹	متوسط	
		۲/۲۵	۱/۲	۲/۷	کم	
		۰/۹۱	۳۸/۵	۳۵/۱	خیلی کم	

همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقدار DR برای روش ها و کلاس های مختلف خطرپذیری محاسبه شده است. بر اساس رابطه DR که نسبت درصد نسبی نقاط به درصد نسبی مساحت می باشد، هرچه مناطق محدوده های دارای خطرپذیری خیلی زیاد و زیاد، کوچک تر بوده و نواحی باشند که اکثر نقاط در آنجا قرار گرفته اند، به این معنا می باشد که پهنه بندی با دقت بالاتری صورت گرفته است. مثلاً در حالتی که مقدار α صفر بوده است، بیش از ۸۷ درصد از منطقه دارای خطرپذیری خیلی زیاد بوده است که همین موضوع سبب قرارگیری بیش از ۹۵ درصد نقاط در این کلاس بوده است.

درحالی که نقشه به دست آمده نمی‌تواند کارایی بالایی برای تصمیم‌گیرندگان داشته باشد زیرا پهنه‌بندی دقیقی ارائه نداده است. بنابراین پهنه‌بندی‌های می‌تواند کارا باشد که تا حد امکان تقسیم‌بندی مناسبی از نظر درجه خطرپذیری ارائه دهد که تعداد بیشتری از نقاط در کلاس‌های پرخطر و تعداد کمتری از آنان در کلاس‌های کم‌خطر قرار گیرند. در واقع انتظار می‌رود مقدار DR در مناطق پرخطر بالا بوده و با کاهش میزان خطرپذیری، مقدار DR نیز کاهش یابد. همچنین برای روش ویکور مقدار P و QS به ترتیب برابر با $91/8$ و $0/55$ بوده است و برای روش OWA، مقدار P با افزایش مقدار α ، روندی کاهشی داشته است و از مقدار ۱۰۰ تا $62/2$ کاهش یافته است. مقدار QS نیز روندی متغیر داشته است و برای حالتی که α برابر با $0/5$ بوده است، مقدار QS بیشترین مقدار ($0/93$) را داشته است. همچنین در حالتی که α به سمت بی‌نهایت میل داده شده است، مقدار QS کمترین مقدار ($0/12$) را داشته است. شکل ۵ نمودار تغییرات DR برای کلاس‌های خطرپذیری مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار تغییرات مقدار DR برحسب کلاس خطرپذیری برای روش‌های مختلف

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، تمامی نمودارها جز روش $OWA(\alpha \rightarrow \infty)$ ، دارای روندی نزولی هستند. بر اساس آنچه گفته شد روشی بهتر عمل کرده است که در کلاس‌های پرخطر دارای مقدار DR بیشتر و در کلاس‌های کم‌خطر دارای مقدار DR کمتری بوده باشد. بنابراین می‌توان گفت روش‌های $OWA(\alpha=10)$ و $OWA(\alpha=2)$ که دارای مقدار DR بیشتری بوده‌اند، وضعیت بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها داشته‌اند.

بحث

بر اساس مقادیر حاصل از روش نسبت فراوانی و آنتروپی شانون، معیارهای جنس خاک و ارتفاع با وزن‌های به ترتیب $0/41$ و $0/29$ دارای بیشترین اثر در ایجاد زمین‌لغزش بوده‌اند که با مطالعات (فلاح ززولی و همکاران، ۱۳۹۸)، (نجفی ایگدیر و روستایی، ۱۳۹۹)، (شریفی پیچون و شیرانی، ۱۴۰۰) و (نظری بیاتبانی و همکاران، ۱۴۰۱) سازگار بوده است. همچنین معیار فاصله از آبراهه با وزن $0/01$ کمترین اثر را داشته است. همچنین در بین رده‌های خاکی مختلف، رده مالیسول (mol) با تأثیر $0/68$ درصدی در مقایسه با سایر رده‌ها بیشترین اثر را در ایجاد زمین‌لغزش داشته است که با توجه به اینکه این خاک همیشه مرطوب و نرم می‌باشد، دارای پتانسیل بالایی در ایجاد زمین‌لغزش می‌باشد. همچنین برای زیرمعیارهای مرتبط با ارتفاع، بیشترین تعداد زمین‌لغزش در ارتفاعات ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر از سطح دریا رخ داده است که در

واقع همان دامنه ها می باشند. در ارتفاعات بالاتر این پدیده کمتر بوده است که می توان علت آن را جنس خاک در ارتفاعات بالا دانست که بیشتر به صورت صخره و سنگ هستند.

پس از محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها، از روش های ویکور و OWA به منظور تلفیق لایه های مختلف استفاده شده که در نتیجه آن، هشت نقشه پهنه بندی خطر رخداد زمین لغزش به دست آمد. نقشه های به دست آمده از روش OWA به ازای مقادیر α برابر با ۱۰ و ۲ دارای بهترین نتیجه بر اساس معیار DR بوده اند. بر اساس نقشه های به دست آمده مناطق شمالی منطقه، دارای پتانسیل بالاتری در رخداد این پدیده بوده اند که جنس خاک مناطق شمالی و ارتفاعات کمتر (دامنه ها) سبب افزایش پتانسیل رخداد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده می توان گفت که روش OWA که طیف گسترده ای از خروجی ها را تولید می کند، می تواند برای کاهش موضوع عدم قطعیت روشی مناسب باشد زیرا به ازای مقادیر مختلف α و مقایسه نقشه های به دست آمده با واقعیت می توان بهترین نتیجه را انتخاب نمود. بنابراین یکی از مزایای این روش بر روش ویکور، همین موضوع کاهش عدم قطعیت می باشد.

برای مقایسه روش پیشنهادی این مطالعه با سایر مطالعات، از معیارهای P, DR, QS استفاده شده است. برای مثال مقدار P در مطالعه (فلاح ززولی و همکاران، ۱۳۹۸) در بهترین حالت برابر ۸۶ درصد بوده است در حالی که در این مطالعه برای روش ویکور به مقدار ۹۱/۸ و با روش OWA در بهترین حالات با لحاظ نمودن معیار DR، به مقادیر ۸۱/۹ درصد رسیده ایم. همچنین مطالعه (شریفی پیچون و شیرانی، ۱۴۰۰) تقریباً به مقدار ۸۵ درصد برای معیار P رسیده اند. (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱) به مقدار QS برابر با ۰/۵۲۹ رسیده اند که در مقایسه با مقادیر به دست آمده در این مطالعه، تفاوت معناداری مشاهده شده است. مقادیر QS در این مطالعه بر اساس روش ویکور، ۰/۵۵ و با روش OWA، تا ۰/۹۳ هم به دست آمده است.

همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، بالا بودن تعداد نقاط در هر کلاس نمی تواند به تنهایی به عنوان معیاری برای دقت باشد چرا که به عنوان مثال در روش OWA با مقدار α برابر با صفر، بیشتر از ۹۵ درصد از نقاط در کلاس پرخطر قرار گرفتند در حالی که بیشتر از ۸۷ درصد مساحت منطقه در این کلاس قرار گرفته بود و سبب می شد تعداد بیشتری از نقاط در این کلاس قرار بگیرند. روش DR توانست با در نظر گرفتن هر دو معیار تعداد نسبی نقاط و مساحت نسبی کلاس مربوطه، معیاری برای مقایسه روش های مختلف باشد. نقشه های به دست آمده از این مطالعه می توانند به عنوان ابزاری برای ارتقای سطح ایمنی در راه ها، تصمیم گیری بهتر در طراحی مسیر جاده ها، خطوط راه آهن و خطوط انتقال نیرو باشد. به عنوان مثال یکی از مهم ترین کاربردهای این گونه نقشه ها در مطالعات راه سازی می باشد به این صورت که نواحی پرخطر به عنوان یک قید محدودکننده عمل می کنند تا مسیری با کمترین پتانسیل زمین لغزش طراحی گردد.

نتیجه گیری

در این مطالعه تلاش شد تا با استفاده از روش های مبتنی بر تصمیم گیری چندمعیاره و تلفیق اطلاعات، نقشه های خطر رخداد زمین لغزش تولید گردد. به این منظور عوامل طبیعی مختلفی در تحلیل خطرپذیری مورد استفاده قرار گرفتند و بررسی ها نشان داد که عوامل طبیعی می توانند تأثیر بسزایی در افزایش خطرپذیری رخداد زمین لغزش داشته باشند. این مطالعه با استفاده از تاریخچه داده های زمین لغزش در منطقه صورت گرفته است و با فرض قرار دادن این موضوع که داده ها از صحت و دقت برخوردار بوده اند، نقشه های خطر تولید شده اند. لازم به ذکر است که در انتخاب منطقه مورد مطالعه، توزیع و تعداد نقاط رخداد مدنظر قرار گرفته است تا بتوان نقشه هایی با قطعیت بالاتر تولید نمود. همچنین نقشه های خطرپذیری

که تولید می‌شوند می‌توانند دارای عدم قطعیت نیز باشند که در این مطالعه روش OWA با استفاده از کمیت RIM، توانسته است نقشه‌های مختلفی را تولید کند که این تنوع نقشه‌ها علاوه بر اینکه می‌تواند عدم قطعیت مسئله را مدیریت کند، به استفاده‌کنندگان از نقشه‌ها انعطاف بیشتری می‌دهد تا بتوانند تصمیمات بهتری اخذ نمایند. همچنین روش OWA توانسته به نتایج بهتری نسبت به روش ویکور به‌عنوان یک روش مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره برسد. این سبک نقشه‌ها به مهندسان و مسئولان شهری در اموری نظیر راه‌سازی و طراحی پروفیل‌های طولی و عرضی مسیر، برنامه‌ریزی امداد و نجات قبل از وقوع حادثه به‌منظور استقرار تیم‌های امدادی در مناطق پرخطر و تصمیم‌گیری در طرح‌های کلان منطقه به‌منظور کاهش اثرات سوء این پدیده بر روند زندگی شهروندان، کمک شایانی می‌کند.

به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات آینده می‌توان به‌اضافه کردن معیارهای بیشتر نظیر فاصله از سکونتگاه‌ها، سنگ‌شناسی منطقه، سطح آب‌های زیرزمینی و سایر معیارها اشاره نمود که در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به این داده‌ها، در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین با توجه به طیف گسترده روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌توان سایر روش‌های وزن دهی و تلفیق مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند. همچنین پرداختن به موضوعاتی نظیر امداد و نجات پس از وقوع زمین‌لغزش و مکان‌یابی مناطق مناسب برای استقرار نیروهای امداد و نجات می‌تواند موردنظر قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه عوامل متعددی در تشدید و افزایش نرخ زمین‌لغزش مؤثر هستند، هدف از این مطالعه بررسی عوامل طبیعی مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش بوده است. در صورت وجود اطلاعات کامل از جنبه‌های مختلف می‌توان نقشه‌های مربوط به اثر فعالیت‌های انسانی را در ایجاد این پدیده تولید کرده و با ادغام نتایج در سطح تصمیم، به نقشه‌های خطر بر اساس تمامی عوامل رسید. همچنین بررسی میدانی منطقه مورد مطالعه به‌منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی و یا صحت‌سنجی روش پیشنهادی می‌تواند در مطالعات آتی صورت گیرد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

اطنابی، سید محمدرضا؛ نیازمردی، سعید و علی‌عباسپور، رحیم. (۱۴۰۰). روشی جدید بر مبنای ترکیب روش‌های آماری برای افزایش دقت نقشه‌های حساسیت به مخاطرات زمین‌لغزش (مطالعه موردی: استان مازندران). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸(۲)، ۱۱۷-۱۱۹

- امین عطائی، رضا؛ اخوان، سحر و نظامیوند چگینی، امیر هوشنگ. (۱۳۹۸). پهنه بندی استعداد وقوع زمین لغزش در منطقه رودبار به روش LNSF. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۱۲)، ۳۳-۱۹. doi:10.22131/sepehr.2020.38605
- انتظاری، مزگان و جلیلیان، طاهره. (۱۳۹۸). اولویت بندی حوضه های آبخیز از نظر ریسک خطر وقوع زمین لغزش در استان کرمانشاه بر اساس مدل تصمیم گیری چندمعیاره (ELECTRE-1). *هیدروژئومورفولوژی*، ۶(۱۸)، ۳۸-۱۹. doi:20.1001.1.23833254.1398.6.18.2.1
- بابلی مؤخر، حمید؛ تقیان، علیرضا و شیرانی، کوروش. (۱۳۹۷). به کارگیری شاخص های مورفومتری در بهینه سازی نقشه های پهنه بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل های احتمالاتی. *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۰(۴)، ۷۷۳-۷۴۷. doi:10.22059/JPHGR.2018.259803.1007234
- بلواسی، ایمانعلی؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ نیکجو، محمدرضا و ولیزاده کامران، خلیل. (۱۳۹۴). مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی با فرایند تحلیل سلسله مراتبی در ارزیابی خطر زمین لغزش. *دانش مخاطرات*، ۲(۲)، ۲۵۰-۲۲۵. doi:10.22059/JHSCI.2015.55063
- بهمنی، سیران؛ زنگنه تبار، زهرا؛ محمدی، سارا و مطاعی، سارا. (۱۴۰۰). شناسایی و پهنه بندی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از روش شیء گرا و تحلیل شبکه (ANP) (مطالعه موردی: حوضه آبریز شاهرود چایی شهرستان خلخال). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۰(۳)، ۳۹-۵۹. doi:10.22067/GEOEH.2021.67924.1006
- جاویدان، نرگس؛ کاویان، عطاالله؛ رجیبی، سجاد، پورقاسمی، حمیدرضا؛ کنوشنتی، کریستین و جعفریان، زینب. (۱۴۰۱). شناسایی مهم ترین عوامل پیش بینی کننده در تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۴(۳)، ۳۳۲-۳۴۶. doi:20.1001.1.22519300.1401.14.3.4.9
- حجازی، اسدالله؛ رضایی مقدم، محمدحسین و ناصری، عدنان. (۱۳۹۹). پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی و تاپسیس در پایین دست سد سنندج. *هیدروژئومورفولوژی*، ۷(۲۴)، ۸۲-۶۵. doi:20.1001.1.23833254.1399.7.24.4.2
- دهنوی ئیلاق، مسلم و پهلوانی، پرهام. (۱۴۰۲). تهیه نقشه خطرپذیری آلاینده PM2.5 شهر تهران با استفاده از الگوریتم میانگین وزنی مرتب شده. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۱)، ۲۸-۱۵. doi:10.22059/JHSCI.2023.355953.767
- روستائی، شهرام؛ خدائی قشلاق، لیلا و خدائی قشلاق، فاطمه. (۱۳۹۳). ارزیابی روش های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سد (مطالعه موردی: سد قلعه چای). *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۴۶(۴)، ۵۰۸-۴۹۵. doi:10.22059/JPHGR.2014.53000
- سدیدی، جواد و مالکی، رضا. (۱۴۰۱). مقایسه الگوریتم های ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک در پهنه بندی خطر زمین لغزش در جاده مه آباد سردشت. *کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم محیطی*، ۲(۴)، ۱۰۰-۸۱. doi:10.22034/rsgi.2022.15839
- شریفی پیچون، محمد؛ شیرانی، کوروش و شیرانی، مائده. (۱۴۰۰). اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی مطالعه موردی: حوضه آبریز وهرگان-غرب استان اصفهان. *هیدروژئومورفولوژی*، ۸(۲۶)، ۲۴۷-۲۸۷. doi:10.1016/j.catena.2011.01.014
- فلاح ززولی، محمد؛ وفایی نژاد، علیرضا؛ آل شیخ، علی اصغر و مدیری، مهدی. (۱۳۹۸). پهنه بندی احتمال وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در محیط GIS مطالعه موردی: بخش رودبار الموت شرقی-استان قزوین. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۱۲)، ۱۳۶-۱۲۳. doi:20.1001.1.25883860.1398.28.112.8.1
- محرمی، میثم؛ ارگانی، میثم. (۱۳۹۹). پتانسیل یابی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از مدل FBWM (مطالعه موردی: شهر تبریز). *آمایش سرزمین*، ۱۲(۲)، ۵۹۳-۵۷۱. doi:10.22059/JTCP.2020.295295.670058
- نظری بیاتپانی، فرنگیس؛ جعفریگلو، منصور؛ محمدخان، شیرین؛ مقصودی، مهران. (۱۴۰۱). پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در منطقه کلور با استفاده از مدل ترکیبی قضا به بیز-ANP. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۲)، ۲۱-۱. doi:10.22067/GEOEH.2021.69988.1048

References

- Aminataei, R., Akhavan, S., & Nezamivand chegini, A. (2020). Zoning of landslide susceptibility in Rudbar area with LNSF method. *Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 19-33. doi:10.22131/sepehr.2020.38605 [in Persian]
- Atyabi, S. M., Niazmardi, S., & Ali Abbaspour, R. (2021). A novel method based on combing statistical methods for improving the accuracy of landslide susceptibility maps (case study: Mazandaran province). *Environmental Management Hazards*, 8(2), 99-117. doi:10.22059/JHSCI.2021.319366.629 [in Persian]
- Baboli Moakher, H., Taghian, A., & Shirani, K. (2018). Application of Morphometric Indices in Optimization of Landslide Susceptibility Zonation Using Probabilistic Methods. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(4), 747-773. doi:10.22059/JPHGR.2018.259803.1007234 [in Persian]
- Bahmani, S., Zangneh Tabar, Z., Mohammadi, S., & Mataee, S. (2021). Identification and zoning of landslide prone areas using object-oriented method and network analysis (ANP) (Case study: Shahroudchai catchment area of Khalkhal city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 39-59. doi:10.22067/GEOEH.2021.67924.1006 [in Persian]
- Balvasi, I., Rezaei Moghaddam, M. H., Nikjo, M. R., & Valizadeh Kamran, K. (2015). Comparison of Artificial Neural Network Model With Analytical Hierarchy Process In Landslide Hazard Assessment Using Geographic Information Systems. *Environmental Management Hazards*, 2(2), 225-250. doi:10.22059/JHSCI.2015.55063 [in Persian]
- Dwivedi, P. P., & Sharma, D. K. (2022). Application of Shannon entropy and CoCoSo methods in selection of the most appropriate engineering sustainability components. *Cleaner Materials*, 5, 100118. doi:10.1016/j.clema.2022.100118
- Dehnavi Eelagh, M., & Pahlavani, P. (2023). Preparation of PM2. 5 Pollution Hazard Map of Tehran Using Ordered Weighted Averaging Algorithm. *Environmental Management Hazards*, 10(1), 15-28. doi:10.22059/JHSCI.2023.355953.767 [in Persian]
- Entezari, M., & Jalilian, T. (2019). Ranking Sub Watersheds Based on Landside Hazard in Kermanshah Province (Iran) Using ELECTRE I. *Hydrogeomorphology*, 6(18), 19-38. doi:20.1001.1.23833254.1398.6.18.2.1 [in Persian]
- Fallah Zazuli, M., Vafaei Nezhad, A., Alesheikh, A. A., Modiri, M., & Aghamohammadi, H. (2020). Landslide hazard zoning using Shannon Entropy and Information Value models in GIS environment - Case study: East Rudbar-e Alamut District-Qazvin Province. *Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 123-136. doi:20.1001.1.25883860.1398.28.112.8.1 [in Persian]
- Hattanji, T., & Moriwaki, H. (2009). Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: Implications for forecasting travel distance of future landslides. *Geomorphology*, 103(3), 447-454. doi:10.1016/j.geomorph.2008.07.009
- Hejazi, A., Rezaeimoghaddam, M., & Naseri, A. (2020). Landslide hazard zoning using artificial neural network models and TOPSIS downstream of Sanandaj Dam. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 65-82. doi:20.1001.1.23833254.1399.7.24.4.2 [in Persian]
- Javidan, N., Kaviani, A., Rajabi, S., Pourghasemi, H., Conoscenti, C., & Jafarian, Z. (2022). Identification the most important predictors in landslide susceptibility mapping using Maximum Entropy Model. *Watershed Engineering and Management*, 14(3), 332-346. doi:20.1001.1.22519300.1401.14.3.4.9 [in Persian]
- Moharrami, M., & Argany, M. (2020). Evaluating the Potential of Landslide Susceptible Areas Using FBWM Model: A Case Study of Tabriz City. *Town and Country Planning*, 12(2), 571-593. doi:10.22059/JTCP.2020.295295.670058 [in Persian]
- Naghbi, S. A., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Rezaei, A. (2015). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*, 8, 171-186. doi:10.1007/s12145-014-0145-7
- Nazari bayatiani, F., Jafar Beglou, M., Mohammad Khan, S., & Maghsoudi, M. (2022). Landslide Hazard Zonation in Kolor Region Using Bayes' Theorem-ANP Hybrid Model. *Journal of*

- Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 1-21. doi:10.22067/GEOEH.2021.69988.1048 [in Persian]
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Faculty of civil engineering, Belgrade*, 2(1), 5-21.
- Roostaei, S., Khodaei Geshlag, L., & Khodaei Geshlag, F. (2014). Assessment of Analysis Network Process and Heuristic Method in the Investigation of Landslide Potential in the Axis Range and Reservoir Dams (Case Study: Ghalea Chai Dam). *Physical Geography Research*, 46(4), 495-508. doi:10.22059/JPHGR.2014.53000 [in Persian]
- Sadidi, J., & Maliki, R. (2022). Using machine learning-based models for landslide susceptibility mapping in Mahabad-Sardasht road. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(4), 100-181. doi:10.22034/rsgi.2022.15839 [in Persian]
- Shannon, C. E. (1948). A note on the concept of entropy. *Bell System Tech. J*, 27(3), 379-423.
- Sharifi Paichoon, M., Shirani, K., & 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. doi:10.22034/hyd.2021.12902 [in Persian]
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A., & 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. doi:10.1016/j.catena.2011.01.014