



Landslide risk modeling using fuzzy hierarchical analysis: the case study of Savadkuh city

Saleh Arekhi ¹✉, Mahran Akbarian Sorkhi ², Somia Emadaddian ³

1. (Corresponding Author) *Department of Geography, Faculty of human sciences, Golestan University, Gorgan, Iran*

E-mail: S.arekhi@gu.ac.ir

2. *Department of Geography, Faculty of human sciences, Golestan University, Gorgan, Iran*

E-mail: mehranakbaryan@yahoo.com

3. *Department of Geography, Faculty of human sciences, Golestan University, Gorgan, Iran*

E-mail: s.emadodin@gu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

10 June 2024

Received in revised form:

31 August 2024

Accepted:

2 October 2024

Available online:

8 November 2024

Keywords:

*Landslide Zoning,
Frequency Ratio,
Quality Summation,
Savadkuh City,
GIS.*

ABSTRACT

Landslides are one of the natural phenomena that cause a lot of financial and human losses in the country every year. Therefore, identifying landslide-prone areas to use methods to prevent or deal with slope instability is very important to reduce their hazard and risk. Landslides have always been a serious threat to human habitation. The aim of this study is to use the fuzzy hierarchical process method for landslide risk zoning in Savadkuh through information layers and factors affecting landslides. In the present study, using the landslide points taken from the city, landslide zones were identified in the region. Factors such as altitude, slope, aspect, geology, soil layer, land-use, distance from the fault, and distance from the road and the river were studied as influential variables in landslides. In order to prepare the layers and classify each of them for each variable, the method of combining the landslide layer and the desired variable was used, and in fact, the same method was used to determine the fuzzy membership using the frequency ratio model. After calculating the frequency ratio and fuzzy membership of the classes, the fuzzy set operators, including addition, multiplication, and gamma of 0.7, 0.8 and 0.9, were used as methods to overlap the classified variables with the fuzzy membership values to Landslide zoning maps should be prepared in the study area. In order to select the optimal method from fuzzy overlap operators, two methods of quality summation (Qs) and precision method (P) were used to determine which operator or fuzzy method has better accuracy for landslide risk zoning in Savadkuh. The value of the quality summation index, which shows the comparison and evaluation of methods in comparison with each other, indicates that the 0.8 gamma fuzzy operator has the highest value of Qs among other fuzzy operators.

Citation: Arekhi, S., Akbarian Sorkhi, M., & Emadaddian, S. (2024). Landslide risk modeling using fuzzy hierarchical analysis: the case study of Savadkuh city. *Geographical planning of space quarterly journal*, 14 (3), 171-195.

doi: <http://doi.org/10.30488/gps.2024.411849.3675>



© The Author (s)

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the natural phenomena that play a role in the transformation and erosion of landforms, which, after earthquakes and floods, cause the most damage to human and natural facilities. The increase in population and human activities, such as the degradation of forests and pastures, agricultural lands and the development of construction in these areas, reveal issues such as the dangers arising from this issue. Therefore, the identification of morphogenic phenomena is of particular importance. By preparing and reviewing the landslide risk zoning map, it is possible to create areas for reducing risk and damage, properly planning and developing cities, and organizing and strengthening vulnerable settlements. The purpose of this research is to identify the most important factors affecting landslides in Swadkoh city in Mazandaran province and zoning the landslides that occurred in this area in order to take a step towards solving possible problems due to the occurrence of this phenomenon.

Methodology

This research method is descriptive and analytical, and its type is practical. The required information and data have been collected using documentary studies. ArcGIS10.8 software was used for data analysis.

This research methodology consists of four parts. First, the landslide points recorded in Swadkoh are converted into landslide zones. Second, the effective variables (independent variable) in the occurrence of landslide phenomenon (dependent variable) are identified. Using the frequency ratio method, the relative weight of each class of each variable is calculated to use them in the preparation of risk zoning maps.

These calculated relative weights make the layers that, in the next research stage, from their overlapping, landslide risk zoning maps in the region are prepared using the mentioned models. These maps will be prepared based on the frequency ratio of landslide areas to non-slide areas and overlapping functions of the models based

on raster or grid analysis. The independent variables used in zoning can be considered as slope factors, slope aspect, elevation, lithology or geology, land use, faults, waterways and communication networks. Finally, by combining the distribution map of landslides in the city and risk zoning maps in the ArcGIS environment, we evaluate and compare the fuzzy operators of landslide risk zoning using the two methods of total quality (Qs) and method accuracy (P) and the appropriate operator is selected according to the investigated area and it is suggested to investigate different classes of landslide risk in Swadkoh.

Results and discussion

According to the calculated relative weights, the distance from the road variable with a coefficient of (0.359) is considered as the most effective factor in the occurrence of landslides in Swadkoh city based on expert opinions. The distance variable from the waterway is in the second degree with (0.233). After that, the variables of distance from the fault with the coefficient (0.133), geology (0.104), soil science (0.058), land use (0.043), slope (0.026), slope aspect (0.021) and elevation(0.019) in the next degrees. The occurrence of landslides is located in the study area.

The total quality index (Qs) value, which shows the comparison and evaluation of the methods in comparison with each other, indicates that the gamma fuzzy operator with 0.8 with 7.09 has the highest value (Qs) among other fuzzy operators. So, this operator is introduced as the optimal operator for the landslide risk zoning of the study area. After that, the index value (Qs) for gamma is 0.9, which is a value of 5 higher than that of other fuzzy operators. The qualitative addition values for the gamma operator were calculated as 0.7, and addition and fuzzy multiplication as 4.62.

Therefore, the most appropriate method of overlapping fuzzy logic in preparing the landslide risk map of Swadkoh city is Gamma 0.8. The values calculated for the accuracy index (P) also show that the highest value was obtained for the gamma operator of 0.8, which indicates that this operator is more accurate than other operators.

Conclusion

Due to the presence of rainfall and humidity, the slopes with the north aspect play an effective role in creating sliding movements in the region, and its phase membership value for the studied region was also areas made of marl are effective in causing landslides. The effective factor of the road shows its obvious role in the occurrence of landslides in the region with the fuzzy membership values obtained for its different categories; the category with a distance of less than 6000 meters from the road has the highest amount of fuzzy membership, and the category with a distance of more than 20000 meters from the road has the lowest amount of fuzzy membership. The combination of landslide zones in the distance layer from the waterway also indicates that most landslides are in the layer with a distance of 0 to 600 meters from the waterway. The lowest fuzzy membership value was obtained for distances above 3000 meters from the waterway. The most fuzzy membership among land uses was calculated for combined garden and agricultural land, and the lowest value was calculated for pasture land, stone outcrop and built land use. Concerning the distance layer from the fault, based on the frequency ratio method, the layer with a distance of 0 to 3000 meters has the most. The areas with distances of more than 10000 meters have the least impact on landslides in Swadkoh.

According to the calculated relative weights, the distance from the road variable with a coefficient of (0.359) was the most effective factor in the occurrence of landslides in Swadkoh. The distance variable from the waterway is in the second degree with (0.233). After that, the variables of distance from the fault with the coefficient (0.133), geology (0.104), soil science (0.058), land use (0.043), slope (0.026), slope aspect (0.021) and height (0.019) in the next degrees. The occurrence of landslides is located in the study area.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

مدل سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مطالعه موردی: شهرستان سوادکوه

صالح ارخی^۱✉، مهران اکبریان سرخی^۲، سمیه عمادالدین^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. Email: s.arekhi@gu.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. Email: mehranakbaryan@yahoo.com

۳- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. Email: s.emadodin@gu.ac.ir

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی | زمین لغزش یکی از پدیده‌های طبیعی است که در تحول و فرسایش اشکال زمین نقش داشته و زمانی که جوامع انسانی را تحت تأثیر قرار دهد، تبدیل به مخاطره خواهد شد. شهرستان سوادکوه در جنوب شرق استان مازندران قرار دارد. تغییرات حاصل در منطقه نتیجه تغییر کاربری اراضی، آبیاری و زهکشی، انشعاب رودخانه‌ها و کانال‌های آبیاری و تغییرات توپوگرافی منطقه است و سبب شده این منطقه با وقوع زمین لغزش‌های بزرگ و فراوان همراه باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از نقاط لغزشی برداشت شده از شهرستان، اقدام به شناسایی پهنه‌های لغزش در منطقه گردید. عواملی مثل ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در وقوع لغزش‌های منطقه بررسی شدند. جهت تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر یک از آن‌ها برای هر متغیر، از روش تلفیق لایه زمین لغزش و متغیر موردنظر استفاده شد و در واقع همان روش تعیین عضویت فازی با استفاده از مدل نسبت فراوانی است. پس از محاسبه نسبت فراوانی و عضویت فازی طبقات، اپراتورهای مجموعه فازی گام‌های ۰،۷، ۰،۸ و ۰،۹ به‌عنوان روش‌های همپوشانی متغیرهای رده‌بندی شده با مقادیر عضویت فازی مورد استفاده قرار گرفتند تا نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه تهیه شوند. به‌منظور انتخاب روش بهینه از میان اپراتورهای همپوشانی فازی، از دو روش مجموع کیفیت و دقت روش استفاده شد تا مشخص شود که کدام اپراتور یا روش فازی دقت بهتری برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در شهرستان سوادکوه دارد. مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد، حاکی از آن است که اپراتور فازی گام‌های ۰،۸ با ۷،۰۹ بالاترین مقدار QS را در میان سایر اپراتورهای فازی دارد |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱ | |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱ | |
| تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸ | |
| واژگان کلیدی: پهنه‌بندی زمین لغزش، نسبت فراوانی، مجموع کیفی، شهر سوادکوه، GIS | |

استناد: ارخی، صالح؛ اکبریان سرخی، مهران و عمادالدین، سمیه. (۱۴۰۳). مدل سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مطالعه موردی: شهرستان سوادکوه. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۴ (۳)، ۱۹۵-۱۷۱.

<http://doi.org/10.30488/gps.2024.411849.3675>

مقدمه

زمین لغزش یکی از پدیده‌های طبیعی است که در تحول و فرسایش اشکال زمین نقش دارد که پس از زلزله و سیل بیشترین خسارت را به تأسیسات انسانی و طبیعی دارد (نوجوان و حیاتی، ۱۳۹۲). افزایش جمعیت و فعالیت‌های انسانی چون تخریب جنگل‌ها و مراتع، اراضی کشاورزی و توسعه ساخت‌وساز در این نواحی مسائلی چون مخاطرات ناشی از این مسئله را آشکار می‌سازد. بنابراین شناسایی پدیده‌های مرفوژنیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (لن و همکاران، ۲۰۰۴). با تهیه و بررسی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش می‌توان زمینه‌های کاهش خطر و خسارت، برنامه‌ریزی صحیح و توسعه شهرها، ساماندهی و مقاوم‌سازی سکونتگاه‌های آسیب‌پذیر را ایجاد کرد. شهرستان سوادکوه در جنوب شرق استان مازندران قرار دارد. بررسی پراکنش زمین لغزش‌ها در این شهرستان نشان می‌دهد که زمین لغزش‌های زیادی رخ داده است و از دامن‌های ناپایداری و دارای پتانسیل بالایی برخوردار هستند.

در ارتباط با پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها و حرکات توده‌ای تاکنون در مجامع علمی بین‌المللی و ایران مطالعات زیادی با روش‌های مختلف انجام شده است. ایلماز (۲۰۱۷)، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه ترکیه را به چهار روش رگرسیون لجستیک، احتمال شرطی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم برداری انجام داد. نتایج تحقیق نشان داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی دقیق‌تر از سایر مدل‌ها خطر وقوع زمین لغزش را ارزیابی کرده است. همچنین مدل احتمال شرطی نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر است و سازگاری بسیار زیادی با سیستم اطلاعات جغرافیایی دارد. وونگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل فازی حساسیت رانش زمین را در اطراف استان گوئیژو چین ارزیابی نمودند و نتیجه گرفتند که مدل فازی بر اساس تابع دوزنقه‌ای روش کارآمدی برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در این منطقه است. وان (۲۰۱۹)، با استفاده از سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری فضایی به استخراج عوامل اصلی زمین لغزش برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در کشور تایوان پرداخت و از مدل آنروپی برای بخش‌بندی و برطرف کردن عدم قطعیت عوامل مختلف زمین لغزش استفاده کرد. نتایج نشان داد که این تحقیق رویکرد مهمی برای تهیه نقشه خطرپذیری زمین لغزش است. فلاشی و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از رگرسیون لجستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دره رودخانه سرچیو ایتالیا را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تفسیر نتایج با استفاده از رگرسیون لجستیک آسان‌تر است اما شبکه‌های عصبی مصنوعی روابط بین متغیرها را بهتر بیان می‌کند. عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل فازی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را در حوضه قوری‌چای استان اردبیل تهیه کردند و نتیجه گرفتند که عملگر فازی گامای ۰/۹ بهترین انطباق‌پذیری را با نقشه زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه دارد. احمدی و همکاران (۲۰۲۲)، در ایتالیا با استفاده از دو روش فاکتور اطمینان و تئوری فازی به ارزیابی و مقایسه خطر لغزش پرداختند. مقایسه این دو روش نشان داد که مدل فاکتور اطمینان با تعیین ۸۸/۸۷ درصد در ارزیابی خطر زمین لغزش با ضریب کاپا ۰/۸۷۱ از تئوری فازی Dempster-Shafer با ۸۸/۳۳ درصد در ارزیابی خطر لغزش با ضریب کاپا ۰/۷۸۳ کارایی بالاتری برخوردار است. یمانی و همکاران (۱۳۹۷)، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محیط GIS تهیه نمودند. نتایج حاکی از آن است که نواحی پرخطر، متأثر از عامل زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. از عوامل مؤثر دیگر در وقوع این پدیده در منطقه مورد مطالعه می‌توان به شیب، بارندگی، ارتفاع، فاصله از شبکه زهکشی اشاره نمود. اکبری و همکاران (۱۳۹۹)، به تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تلفیقی فازی - فرآیند تحلیل شبکه (ANP) در حوضه فاروب رومان پرداختند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده کارایی مدل فازی - فرآیند تحلیل شبکه (ANP) در مدل‌سازی حساسیت

1. Analytical Hierarchy Process

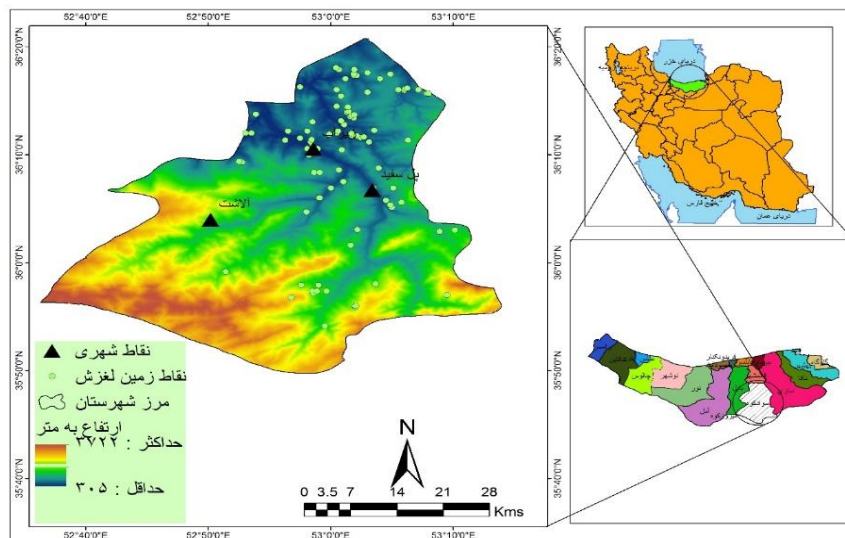
2. Analytic Network Process

زمین‌لغزش است به طوری که در اعتبارسنجی مدل از طریق منحنی مدل منحنی عامل نسبی (ROC)، میزان AUC، ۰/۸۳ با میزان خطای استاندارد ۰/۰۷ و مقدار p-value برابر صفر، به دست آمد. رحیم‌پور و همکاران (۱۴۰۰)، به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه آبریز سردول چای با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پرداخته‌اند. برای انجام این تحقیق فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزار GIS تهیه شد، سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice وزن دهی به عوامل صورت گرفت. نتایج نهایی به دست آمده از تحقیق حاضر نشان داد که عامل زمین‌شناسی بیشترین وزن را داشته است. همچنین نقشه پهنه‌بندی نشان داد که نواحی شرقی، جنوب شرقی و جنوب غربی حوضه به دلیل به وجود سازندهای رسوبی و پادگانه‌های قدیمی و کاربری مراتع ضعیف و جهت شیب شمالی و غربی بیشترین حساسیت را برای وقوع زمین‌لغزش دارا هستند. پژوهش حاضر بر آن است تا به بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر این پدیده به منظور شناسایی مناطق حساس و دارای پتانسیل خطر بالای لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های Fuzzy و AHP و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS جهت ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب برای مقابله با بحران ناشی از زمین‌لغزش، کاهش خسارات آن و بهبود وضعیت زیست‌محیطی شهرستان مطالعاتی بپردازد. پس از تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با مدل‌های ذکر شده، از دو روش مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) جهت تعیین مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای منطقه استفاده می‌شود.

محدوده مورد مطالعه

شهرستان سوادکوه یکی از شهرستان‌های استان مازندران است که با ۵۴۴۷ کیلومتر مربع وسعت در قسمت جنوبی استان مازندران واقع شده است. این شهرستان در دامنه شمالی کوه‌های البرز مرکزی واقع شده که از شمال به شهرستان قائم‌شهر، از جنوب به فیروزکوه، از غرب به شهرستان بابل و از شرق به شهرستان ساری محدود می‌گردد. این شهرستان در بین عرض جغرافیائی ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه نیمکره شمالی و در بین طول جغرافیائی ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه نیمکره شرقی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۰۵ و ۳۷۲۲ متر می‌باشد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان به همراه نقاط لغزشی در شکل (۱) نشان داده شده است.

1. Receiver Operating Characteristic
2. Quality Sum
3. Percision



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و ایران

روش پژوهش

روش این پژوهش توصیفی و تحلیلی و نوع آن کاربردی بوده و با استفاده از مطالعات اسنادی، اطلاعات و داده‌های مورد نیاز گردآوری شده است. لایه‌های اطلاعاتی از قبیل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و خاک‌شناسی می‌باشند. این منابع اطلاعاتی به‌عنوان ابزار اصلی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند و از نرم‌افزار ArcGis 10.8 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده گردید. همچنین با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI سال (۲۰۲۱) زمین‌لغزش‌های منطقه شناسایی شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، تمام لایه‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی زمین‌لغزش به صورت رستری تبدیل گردید. پژوهش حاضر ضمن بررسی خطر زمین‌لغزش در شهرستان سوادکوه، به ارزیابی میزان دقت عملگرهای منطق فازی جهت تعیین مناسب‌ترین عملگر برای تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی می‌پردازد. روش‌شناسی این پژوهش مشتمل بر چهار بخش است؛ در ابتدا نقاط زمین‌لغزش ثبت شده از شهرستان سوادکوه به پهنه‌های لغزشی تبدیل می‌شوند. در بخش دوم، متغیرهای مؤثر (متغیر مستقل) در وقوع پدیده زمین‌لغزش (متغیر وابسته) شناسایی شده و با استفاده از روش نسبت فراوانی، میزان وزن نسبی هر طبقه از هر متغیر جهت استفاده از آن‌ها در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر محاسبه می‌گردد. این وزن‌های نسبی محاسبه شده، لایه‌هایی را می‌سازند که در مرحله بعدی پژوهش از همپوشانی آن‌ها با استفاده از مدل‌های ذکر شده، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه تهیه می‌شوند. تهیه این نقشه‌ها بر اساس نسبت فراوانی پهنه‌های زمین‌لغزش به پهنه‌های بدون لغزش و تابع‌های همپوشانی مدل‌ها بر مبنای تحلیل رستر یا شبکه صورت خواهد گرفت. متغیرهای مستقل مورد استفاده در پهنه‌بندی را می‌توان عوامل شیب، جهت دامنه، ارتفاع، لیتولوژی یا زمین‌شناسی، کاربری اراضی، گسل، آبراهه و شبکه ارتباطی برشمرد. در نهایت، با تالاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های شهرستان و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط ArcGIS، به ارزیابی و مقایسه اپراتورهای فازی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از دو روش مجموع کیفیت (Qs) و دقت روش (P) پرداخته می‌شود و اپراتور مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی انتخاب می‌شود و برای بررسی کلاس‌های مختلف خطر رخداد زمین‌لغزش در شهرستان سوادکوه پیشنهاد می‌گردد.

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

اولین قدم در فرایند AHP ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی از موضوع موردبررسی می‌باشد که در آن اهداف، معیارها، گزینه‌ها و ارتباط بین آن‌ها نشان داده می‌شود. چهار مرحله بعدی در فرایند سلسله مراتبی محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها در صورت وجود، محاسبه وزن گزینه‌ها، محاسبه امتیاز نهایی گزینه‌ها و بررسی سازگاری منطقی قضاوت را شامل می‌شود. در این تحقیق به ترتیبی که در زیر آورده شده است به تعیین وزن لایه‌های مربوط به معیارهای مختلف با استفاده از روش AHP و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه در استان مازندران و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های رخ داده پرداخته شد.

تشکیل ساختار سلسله مراتبی

طرح پرسشنامه و جمع‌آوری نظرات کارشناسان مختلف در مورد میزان اهمیت و ارزش هر کدام از معیارها نسبت به تعیین هدف با توجه به جدول ۹ کمیته ساعتی. جدول (۱) مقیاس ۹ کمیته ساعتی را نشان می‌دهد.

- ✓ تشکیل ماتریس مقایسه زوجی معیارها
- ✓ محاسبه میانگین هندسی هر سطر از ماتریس مقایسه زوجی
- ✓ نرمالیزه کردن میانگین‌های هندسی

$$\text{وزن آن معیار} \times \text{وزن گزینه نسبت به آن معیار} = \sum_{\text{به ازای هر معیار}} \text{وزن نهایی هر گزینه}$$

جدول ۱. مقیاس ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه دودویی معیارها

| مقدار عددی | ترجیحات (قضاوت شفاهی) |
|---------------|---|
| ۹ | کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر |
| ۷ | ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی |
| ۵ | ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی |
| ۳ | کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر |
| ۱ | ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان |
| ۸ و ۶ و ۴ و ۲ | ترجیحات بین فواصل فوق |

منبع: (Satty, 1993)

بررسی سازگاری

یکی از مزیت‌های فرایند تحلیل سلسله مراتبی امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام‌شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها است. به همین منظور ضریب سازگاری ساعتی که از تقسیم شاخص سازگاری به شاخص تصادفی بودن حاصل می‌شود برآورد می‌گردد. چنانچه این ضریب کوچک‌تر یا مساوی ۰,۱ باشد سازگاری در قضاوت‌ها موردقبول است در غیر این صورت باید در قضاوت‌ها تجدیدنظر شود.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

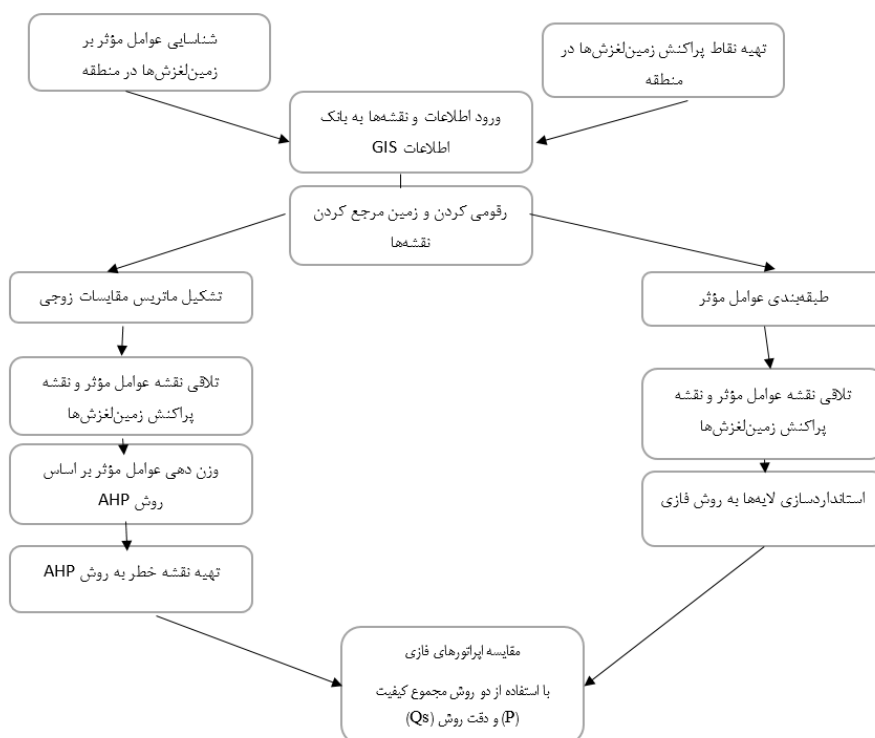
در این مرحله با توجه به افزایشی، کاهش یا افزایشی - کاهش بودن ارزش معیارها در تعیین هدف موردنظر با استفاده از نظر کارشناسی به طبقات مختلف آن‌ها ارزشی از ۱ الی ۹ تحت عنوان سطوح برازندگی داده شد.

روش منطق فازی

در ارتباط با به کارگیری منطق فازی، باید اشاره نمود که در تحلیل تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، تئوری فازی معمول‌ترین روش برای بحث و بررسی عدم قطعیت‌ها شناخته شده است. برای تعیین ارتباط زمین‌لغزش‌ها با عوامل مؤثر در وقوع آن و نیز تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی، نقشه‌های عوامل مؤثر با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تلفیق می‌شود. به این ترتیب تعداد زمین‌لغزش در هر کدام از معیارها به دست می‌آید (اصغر پور، ۱۳۸۸). در مدل فازی هر عضو هم‌زمان در مجموعه‌های مختلف ولی به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و نیز خود این دو حد را می‌پذیرد (رجایی، ۱۳۸۲).

عملیات روی مجموعه‌های فازی

در اجرای تکنیک فازی به عملگرهایی نظیر OR (اجتماع)، AND (اشتراک)، Product (ضرب)، Sum (جمع جبری) و Gamma (گاما) نیاز می‌باشد. در عملگر OR پیکسلی که فقط از نظر یک نقشه مناسب بوده و ارزش یک داشته باشد و از لحاظ سایر لایه‌های اطلاعاتی دارای ارزش صفر باشد، در نقشه خروجی تلفیق یافته و ارزش یک می‌گیرد و مناسب تشخیص داده می‌شود. عملگر AND فقط پیکسلی که در تمامی نقشه‌های پایه ارزش یک دارد، در نقشه نهایی ارزش یک خواهد داشت و جزء مناطق مناسب قرار می‌گیرد. عملگر Product موجب می‌شود تا اعداد مجموعه‌ها کوچک‌تر شده و به سمت صفر میل کنند؛ اما عملگر Sum بر خلاف عملگر Product موجب می‌گردد تا اعداد به سمت یک میل نمایند. جهت تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر Product و دقت خیلی کم عملگر Sum عملگر دیگری به نام Gamma تعریف شده است. مقدار گامای تعدیل‌کننده بین صفر و یک است و از طریق قضاوت کارشناسانه تعیین می‌شود. گامای صفر معادل ضرب فازی و گامای یک معادل جمع فازی است.



شکل ۲. نمودار جریان مراحل تحقیق

صحت سنجی و مقایسه مدل‌ها

در این مرحله با تالاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های شهرستان و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط ArcGIS به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) پرداخته می‌شود و مدل مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی انتخاب می‌گردد. برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از روش‌های پهنه‌بندی، نسبت تراکم (Dr) به کار می‌رود (جده و سرکار، ۱۹۹۳).

صحت یا مجموع کیفیت (Qs)

برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکمی محاسبه گردد، که این محاسبه در قالب رابطه زیر صورت می‌پذیرد. که در آن S_i = مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده خطر؛ A_i = مساحت زمین رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی و n = تعداد رده‌های خطر می‌باشد.

$$Dr = \frac{\frac{S_i}{A_i}}{\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n A_i}}$$

تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به‌طور صحیح تهیه شده‌اند. از رده‌های خطر کم تا رده‌های پرخطر به‌صورت صعودی است. در یک روش (نقشه) پهنه‌بندی، تراکم لغزش رده یا $Dr=1$ معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و رده دارای $Dr=2$ ، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه است. بنابراین هرچه تفکیک بین رده‌های خطر به‌وسیله شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش (نقشه) دارای دقت بیشتری می‌باشد، مقدار مجموع کیفیت (Qs) که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد، نشان‌دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش منطقه است. در این رابطه Qs = مجموع کیفیت؛ Dr = نسبت تراکم؛ S = نسبت مساحت خطر به مساحت کل منطقه و n = تعداد کلاس خطر می‌باشد (جده و سرکار، ۱۹۹۳).

$$Qs = \sum_{i=1}^n ((Dr - 1)^2 \times S)$$

معمولاً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف در گستره صفر تا ۷ قرار می‌گیرد. در ارزیابی روش‌ها، هرچه مقدار مجموع کیفیت (Qs) در روشی بیشتر باشد، آن روش صحت یا مطلوبیت بیشتری در تفکیک خواهد داشت.

دقت روش (P)

نسبت مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر بالا و خیلی بالا به مساحت کل آن پهنه‌ها که از رابطه زیر به دست می‌آید، که P = دقت روش در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا، KS = مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا و S = مساحت پهنه‌های خطر مرتبط است (جده و سرکار، ۱۹۹۳).

$$P = KS/S$$

تعریف توابع عضویت متغیرها

هدف از تعریف تابع عضویت برای فاکتورها، وزن دهی تدریجی و پیوسته به آن فاکتورها است. انتخاب توابع عضویت به‌منظور پهنه‌بندی لغزش زمین اهمیت به‌سزایی دارد. لذا با توجه به ماهیت هر فاکتور تابع عضویت هر لایه در بخش Fuzzy Membership تعیین شد که به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲. نوع توابع استفاده شده به عوامل زمین لغزش در نرم افزار ArcGIS10.8

| پارامتر | شیب | ارتفاع | جهت | زمین شناسی | کاربری | خاکشناسی | فاصله از | فاصله | فاصله |
|--------------|-------|--------|------|------------|--------|----------|----------|---------|-------|
| تابع | فازی | فازی | فازی | فازی بزرگ | فازی | فازی | آبراهه | از جاده | فاصله |
| مورد استفاده | گوسین | بزرگ | بزرگ | گوسین | گوسین | بزرگ | کوچک | کوچک | گسل |

محاسبه وزن لایه و ضریب اهمیت معیارها

در مرحله آخر هر کدام از لایه‌ها دارای اهمیت و ضریب تأثیرگذاری متفاوتی هستند که جهت محاسبه این ضریب از مدل سلسله مراتبی (AHP) استفاده گردید. بدین ترتیب که ابتدا ۹ معیار پژوهش از طریق مقایسه زوجی توسط کارشناس امتیازدهی شدند سپس به منظور محاسبه امتیاز هر معیار نرم افزار Expert Choice استفاده گردید و میزان تأثیرگذاری هر لایه و درجه اهمیت آن مشخص شد.

یافته‌ها

شناخت عوامل مؤثر بر زمین لغزش و پهنه‌بندی آن در مناطق مختلف بسیار ضروری می‌باشد و عواملی چون ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، کاربری اراضی، فاصله از گسل، زمین شناسی و خاک شناسی به عنوان عوامل مؤثر در منطقه شناسایی گردید (شکل ۳ تا ۱۱) و سپس با استفاده از توابع عضویت فازی به صورت نقشه‌های فازی درآمدند.

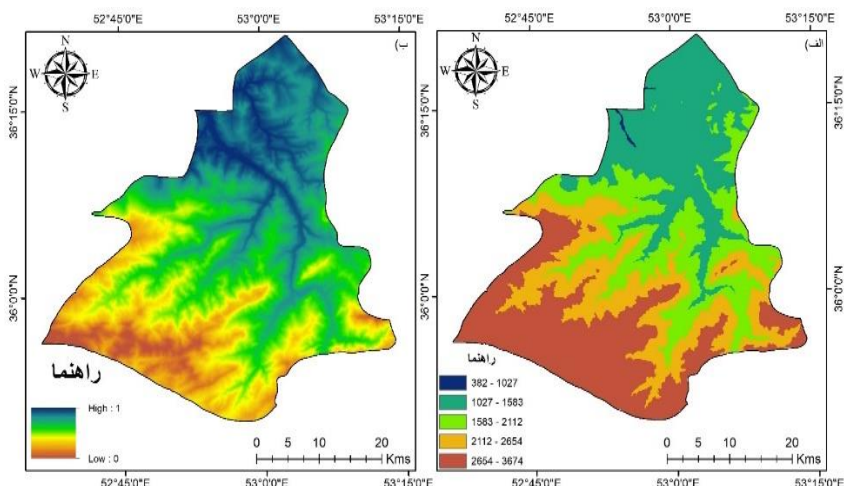
انتخاب معیارهای (عوامل) مؤثر در تهیه نقشه خطر زمین لغزش

متغیر ارتفاع

این عامل، جهت رواناب‌ها و میزان تراکم شبکه زهکشی را کنترل می‌کند و در میزان رطوبت خاک و شیب دامنه‌ها تأثیر دارد. ارتفاع منطقه مورد مطالعه دامنه‌ای از ۳۰۵ تا ۳۷۲۲ متر را شامل می‌شود. بر اساس عضویت فازی محاسبه شده از تلفیق طبقات این عامل با پهنه‌های لغزشی منطقه، پایین‌ترین طبقه ارتفاعی ۳۰۵ تا ۱۲۰۰ متر دارای بالاترین تابع فازی (عدد ۱) و از ارتفاع ۲۵۰۰ متر به بالا پهنه لغزشی وجود ندارد و عضویت فازی این محدوده صفر به دست آمد. در ارتفاعات بالاتر معمولاً بارش به صورت برف اتفاق می‌افتد که در مقایسه با بارش باران تأثیر کمتری بر افزایش پتانسیل رخداد زمین لغزش دارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که احتمال وقوع زمین لغزش‌ها در پهنه‌های با ارتفاع پایین‌تر بیشتر باشد.

جدول ۳. مساحت طبقات ارتفاع (متر) و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات ارتفاع (متر) | وزن زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|--------------------|---------------|---------------|------------|
| ۱ | ۱۰۲۷-۳۸۲ | ۰/۵۲۴ | ۲۷۹/۳ | ۰/۱۷ |
| ۲ | ۱۵۸۳-۱۰۲۷ | ۰/۲۴۳ | ۴۲۰۸۸/۸ | ۲۶/۲۳ |
| ۳ | ۲۱۱۲-۱۵۸۳ | ۰/۱۷۲ | ۳۶۰۲۷/۸ | ۲۲/۴۵ |
| ۴ | ۲۶۵۴-۲۱۱۲ | ۰/۱۵۳ | ۳۴۸۷۰/۸ | ۲۱/۷۳ |
| ۵ | ۳۶۷۴-۲۶۵۴ | ۰/۰۸۴ | ۴۷۱۴۸/۵ | ۲۹/۳۹ |



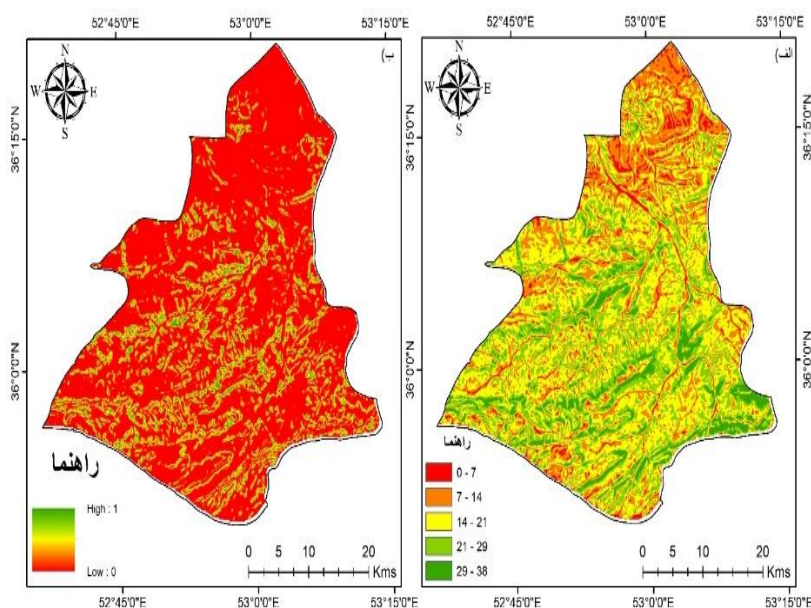
شکل ۳. الف: نقشه طبقات ارتفاع، ب: نقشه فازی شده متغیر ارتفاع

متغیر شیب

شیب و مورفولوژی دامنه‌ها تأثیر زیادی در وقوع پدیده زمین‌لغزش دارد (دای و همکاران، ۲۰۰۲). بیشترین مقدار عضویت فازی در طبقه شیب ۲۹ تا ۳۸ درجه و کمترین مقدار عضویت طبقه شیب ۷ و کمتر از آن دارد. با افزایش شیب، مقدار عضویت فازی داشته است. بنابراین با افزایش شبیه منطقه، احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴. مساحت طبقات شیب (درجه) و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات شیب (درجه) | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|------------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | ۷-۰ | ۰/۰۶۸ | ۹۵۷۷/۹ | ۶/۰۸ |
| ۲ | ۱۴-۷ | ۰/۱۳۴ | ۳۷۴۶۴/۲ | ۲۳/۸۱ |
| ۳ | ۲۱-۱۴ | ۰/۲۶۸ | ۵۸۹۱۷/۱ | ۳۷/۴۴ |
| ۴ | ۲۹-۲۱ | ۰/۳۴۸ | ۳۸۵۴۱/۵ | ۲۴/۴۹ |
| ۵ | ۳۸-۲۹ | ۰/۵۲۹ | ۱۲۸۵۷/۳ | ۸/۱۷ |



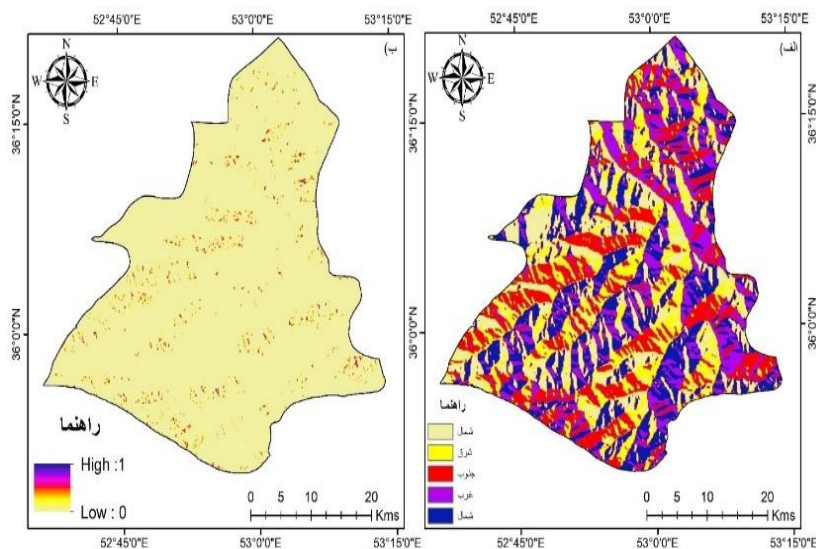
شکل ۴. الف: نقشه طبقات شیب (درجه)، ب: نقشه فازی شده متغیر شیب

متغیر جهت شیب

جهت شیب دامنه نیز به عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر در ایجاد حرکات توده‌ای است. در حالت کلی، دامنه‌های شمالی و غربی به دلیل برخورداری از برف و رطوبت، نقش مؤثری در ایجاد حرکات توده‌ای ایفا می‌کنند. بر اساس آن، دامنه‌های شمالی با مقدار ۰/۵۲۴ بیشترین و دامنه‌های جنوبی با مقدار ۰/۰۵۵ کمترین مقدار عضویت یا تأثیرگذاری در وقوع زمین‌لغزش‌ها را دارا می‌باشند.

جدول ۵. مساحت طبقات جهت شیب و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات جهت شیب | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|---------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | شمال | ۰/۵۲۴ | ۳۶۱۷۰/۳ | ۲۲/۵۵ |
| ۲ | شرق | ۰/۱۰۵ | ۲۷۷۴۳/۸ | ۱۷/۲۹ |
| ۳ | جنوب | ۰/۰۵۵ | ۳۱۷۴۹ | ۱۹/۷۹ |
| ۴ | غرب | ۰/۲۰۶ | ۲۶۱۶۱/۱ | ۱۶/۳۱ |



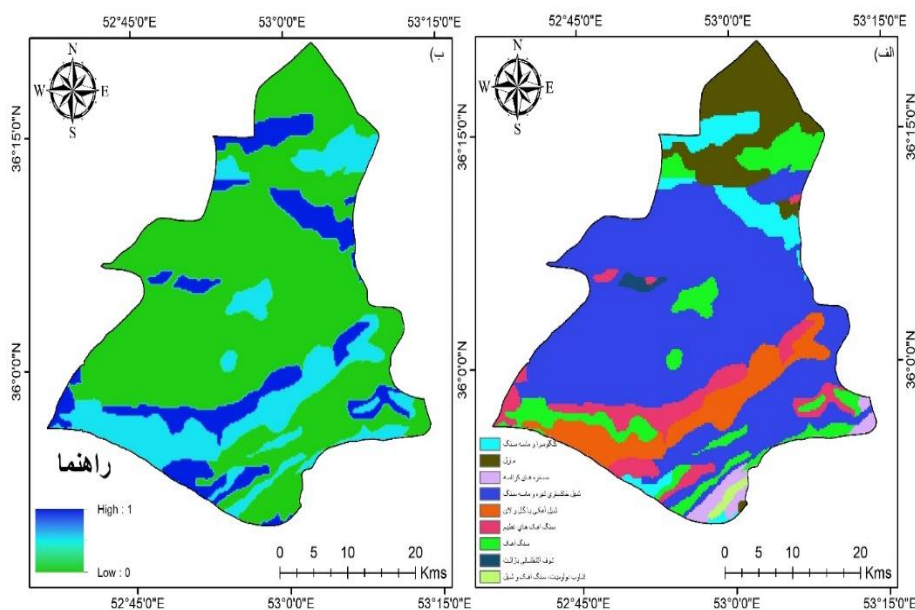
شکل ۵. الف: نقشه طبقات جهت شیب، ب: نقشه فازی شده متغیر جهت شیب

متغیر زمین‌شناسی

زمین‌شناسی و ساختار متنوع آن باعث اختلاف در پایداری و مقاومت سنگ‌ها و همچنین تنوع جنس خاک می‌شود. نوع سازند زمین‌شناسی هر ناحیه نقش مهمی در گسترش پهنه‌های لغزشی دارد. با توجه به وزن‌های نسبی محاسبه‌شده واحد مارن با عضویت فازی ۱ دارای بیشترین میزان تأثیرگذاری در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه می‌باشد. این واحد متعلق به سازند مارن‌های قرمز، آهک، ژئیس و دولومیت است. مارن یکی از حساس‌ترین سازندهای زمین‌شناسی نسبت به وقوع حرکات توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش می‌باشد که گسترش آن در هر مکانی با وقوع زمین‌لغزش همراه است. در واقع، مارن‌ها رسوبات ریزدانه، منفصل و حساس به انواع فرسایش و حرکات توده‌ای می‌باشند. پس‌از آن، واحد سنگ‌آهک با عضویت فازی ۰/۲۱۸ دومین واحد لیتولوژی تأثیرگذار در رخداد لغزشی منطقه است.

جدول ۶. مساحت طبقات زمین‌شناسی و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات زمین‌شناسی | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|------------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | مارل | ۰/۵۳۳ | ۶۱۲۵/۲ | ۱۰/۱۶ |
| ۲ | ماسه‌سنگ | ۰/۱۰۸ | ۳۳۵۰۶/۵ | ۵۵/۳۵ |
| ۳ | سنگ‌آهک | ۰/۲۱۸ | ۶۱۶۹/۳ | ۱۰/۱۸ |
| ۴ | کنگومرا | ۰/۰۱۸ | ۳۴۱۰/۵ | ۵/۶۳ |
| ۵ | سازند لار | ۰/۱۵۴ | ۴۵۷۹ | ۷/۵۶ |
| ۶ | بازالت | ۰/۰۲۵ | ۳۱۳/۵ | ۰/۵۱ |
| ۷ | سازند دالی چای | ۰/۰۳۸ | ۵۰۰۲/۲ | ۸/۲۶ |
| ۸ | صخره‌های کرتاسه | ۰/۰۷۶ | ۱۱۱۵/۳ | ۱/۸۵ |
| ۹ | دولومیت و شیل | ۰/۳۰۷ | ۲۹۴/۵ | ۰/۴۸ |



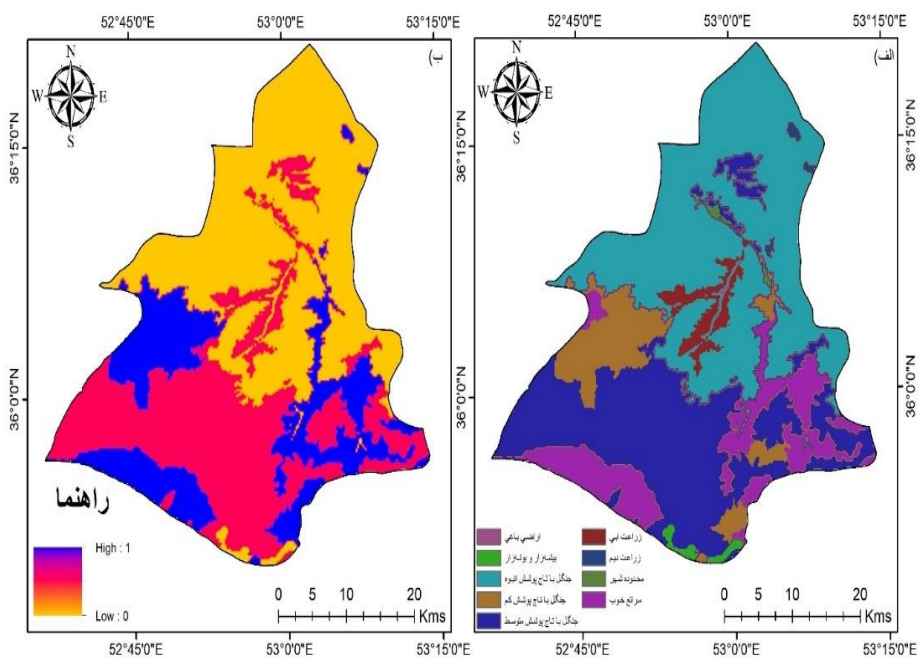
شکل ۶. الف: نقشه طبقات زمین‌شناسی، ب: نقشه فازی شده متغیر زمین‌شناسی

متغیر کاربری اراضی

نوع کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی نقش تعیین‌کننده در تغییرات محیطی دارند. در بسیاری از موارد مکان‌گزینی این کاربری‌ها نامناسب بوده و باعث ایجاد نابسامانی و اختلال در اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸). علت این‌که پهنه‌هایی با کاربری جنگل با تاج پوشش کم بیشترین تأثیرگذاری را بر وقوع پهنه‌های لغزشی در منطقه دارند می‌تواند به دخالت فعالیت‌های انسانی در محدوده این کاربری‌ها و فرسایش ناشی از آن باشد. زیرا در این پهنه‌ها شرایط تشکیل خاک‌های نرم و سست فراهم است و دست‌کاری غیراصولی می‌تواند منجر به ناپایداری دامنه‌ها شود، این در حالی است که در اراضی با پوشش مرتعی، اراضی باغی و نواحی بیشه‌زار با توجه به وضعیت پوشش سطحی زمین، احتمال وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه به صفر نزدیک می‌باشد.

جدول ۷. مساحت طبقات کاربری اراضی و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات کاربری اراضی | ضریب زیرمعیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|------------------------|---------------|---------------|------------|
| ۱ | اراضی باغی | ۰/۰۶۹ | ۲۱۰/۹ | ۰/۳۵ |
| ۲ | جنگل با تاج پوشش انبوه | ۰/۱۵۹ | ۲۵۷۹۶/۳ | ۴۲/۶۱ |
| ۳ | زراعت آبی | ۰/۱۷۵ | ۱۷۷۲/۷ | ۲/۹۲ |
| ۴ | زراعت دیم | ۰/۱۵۲ | ۱۸۲/۴ | ۰/۳۱ |
| ۵ | مراتع خوب | ۰/۰۴۶ | ۷۴۴۸ | ۱۲/۳۱ |
| ۶ | جنگل با تاج پوشش کم | ۰/۲۳۷ | ۵۳۲۹/۵ | ۸/۸۱ |
| ۷ | جنگل با تاج پوشش متوسط | ۰/۱۹۲ | ۱۹۱۹۷/۶ | ۳۱/۷۱ |
| ۸ | بیشهزار و بوتهزار | ۰/۰۳۱ | ۴۳۳/۲ | ۰/۷۱ |
| ۹ | محدوده شهر | ۰/۱۰۵ | ۱۷۲/۹ | ۰/۲۸ |



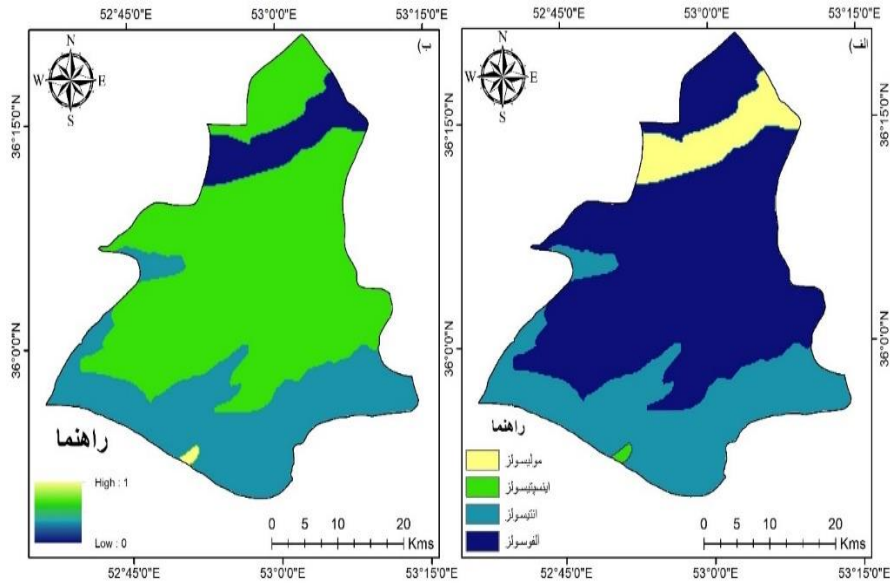
شکل ۷. الف: نقشه طبقات کاربری اراضی، ب: نقشه فازی شده متغیر کاربری اراضی

متغیر خاکشناسی

نوع خاک تأثیر زیادی در ایجاد حرکات توده‌ای دارند. به‌منظور تأثیر خاک‌های مختلف بر روی پدیده زمین‌لغزش این لایه تهیه گردید و به‌منظور استفاده در مدل این لایه به چهار طبقه تقسیم‌بندی شد و به هر کلاس کد جداگانه‌ای داده شد. از آنجایی که این لایه به‌صورت وکتور بوده، به هر یک از رکوردها کد داده شد و سپس به لایه رستری تبدیل شد.

جدول ۸. مساحت طبقات خاکشناسی و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات خاکشناسی | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|----------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | مولیسولز | ۰/۳۱۶ | ۴۴۶۶/۹ | ۷/۳۷ |
| ۲ | انتیسولز | ۰/۰۵۵ | ۱۸۲۰۵/۸ | ۳۰/۰۷ |
| ۳ | آلفوسولز | ۰/۵۲۲ | ۳۷۷۱۶/۹ | ۶۲/۲۹ |
| ۴ | اینسپتیسولز | ۰/۰۲۴ | ۱۵۳/۹ | ۰/۲۵ |



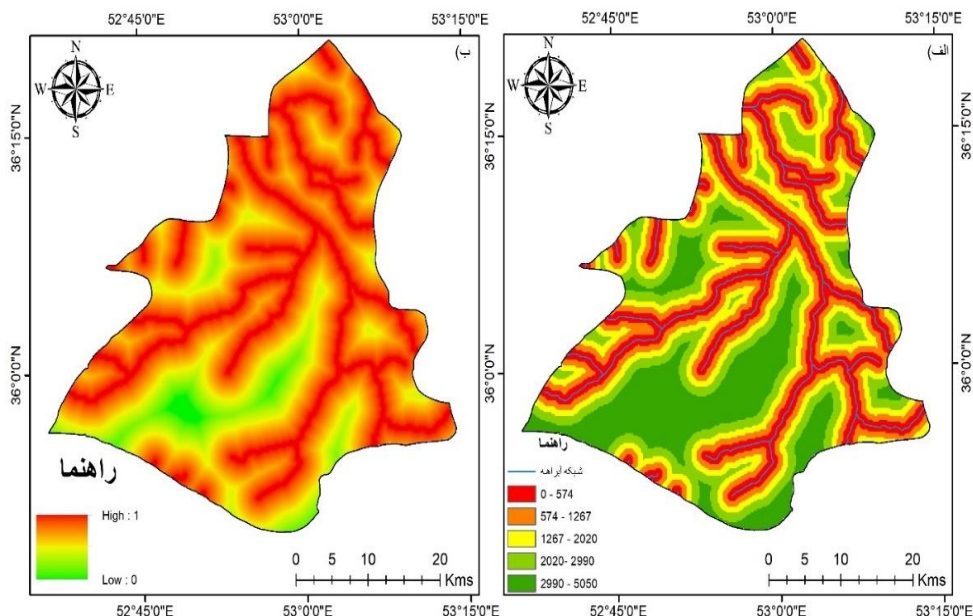
شکل ۸. الف: نقشه طبقات خاک (منبع: نگارنده)، ب: نقشه فازی شده متغیر خاک شناسی

متغیر فاصله از آبراهه

آبراهه‌ها به دلیل وجود زهکشی آب و دیوارهای پرشیب معمولاً دارای لغزش بیشتری هستند، در شهرستان سوادکوه، تلفیق پهنه‌های لغزشی با لایه فاصله از آبراهه بیان می‌کند که بیشترین پراکنش زمین لغزش‌ها و در نتیجه بیشترین مقدار عضویت فازی در طبقه ۰ تا ۵۷۴ متر از آبراهه‌های سطح شهرستان قرار دارند و نشان می‌دهد که پهنه‌های نزدیک به مسیر آب‌های جاری دارای پتانسیل بالایی برای وقوع زمین لغزش می‌باشند. به عبارتی میان فاصله از آبراهه و وقوع زمین لغزش در منطقه مورد بررسی رابطه معکوس وجود دارد.

جدول ۹. مساحت طبقات فاصله از آبراهه (متر) و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات فاصله از آبراهه (متر) | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|-----------------------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | ۵۷۴-۰ | ۰/۵۵۲ | ۳۳۷/۵۸ | ۲۰/۶۷ |
| ۲ | ۱۲۶۷-۵۷۴ | ۰/۲۵۱ | ۳۵۵/۵۱ | ۲۱/۷۷ |
| ۳ | ۲۰۲۰-۱۲۶۷ | ۰/۲۶۲ | ۳۲۷/۵۹ | ۲۰/۰۶ |
| ۴ | ۲۹۹۰-۲۰۲۰ | ۰/۱۱۱ | ۲۹۸/۲۳ | ۱۸/۲۶ |
| ۵ | ۵۰۵۰-۲۹۹۰ | ۰/۰۷۴ | ۳۱۳/۶۶ | ۱۹/۲۱ |



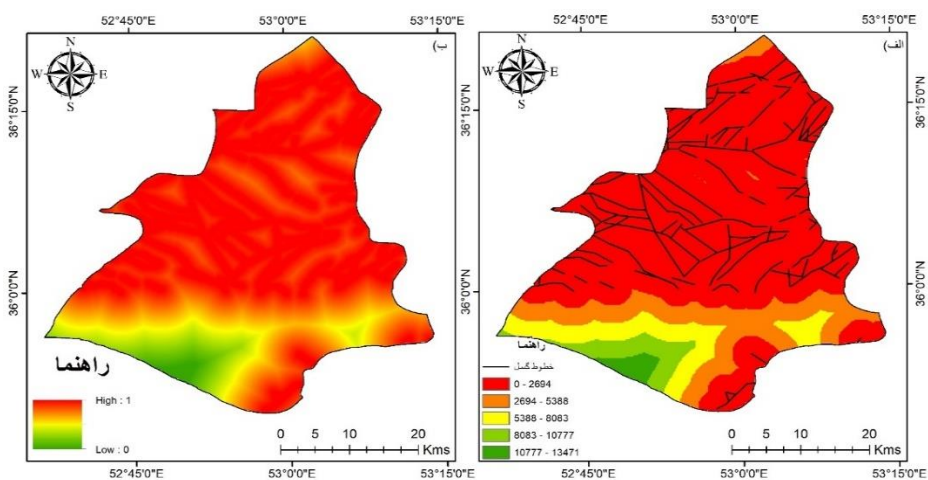
شکل ۹. الف: نقشه طبقات فاصله از آبراهه، ب: نقشه فازی شده متغیر فاصله از آبراهه

متغیر فاصله از گسل

در مناطقی که پراکندگی خطوط گسل بیشتر از سایر نقاط باشد می‌توان شاهد تعدد وقوع حرکات توده‌ای به خصوص وقوع لغزش‌ها بود، عوامل تکتونیکی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث ناپایداری دامنه‌ها و لغزش می‌گردند (رجایی، ۱۳۸۲)، خطر زمین‌لغزش در نواحی که فاصله کمتری از گسل دارند بیشتر می‌باشد.

جدول ۱۰. مساحت طبقات فاصله از گسل (متر) و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات فاصله از گسل (متر) | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|--------------------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | ۰-۲۶۹۴ | ۰/۵۴۷ | ۴۳۴۰۹/۳ | ۷۱/۶۹ |
| ۲ | ۲۶۹۴-۵۳۸۸ | ۰/۳۷۸ | ۸۷۶۰/۹ | ۱۴/۴۷ |
| ۳ | ۵۳۸۸-۸۰۸۳ | ۰/۲۶۱ | ۵۱۵۲/۸ | ۸/۵۱ |
| ۴ | ۸۰۸۳-۱۰۷۷۷ | ۰/۱۲۵ | ۲۳۴۸/۴ | ۳/۸۷ |
| ۵ | ۱۰۷۷۷-۱۳۴۷۱ | ۰/۰۶۸ | ۸۷۲/۱ | ۱/۴۴ |



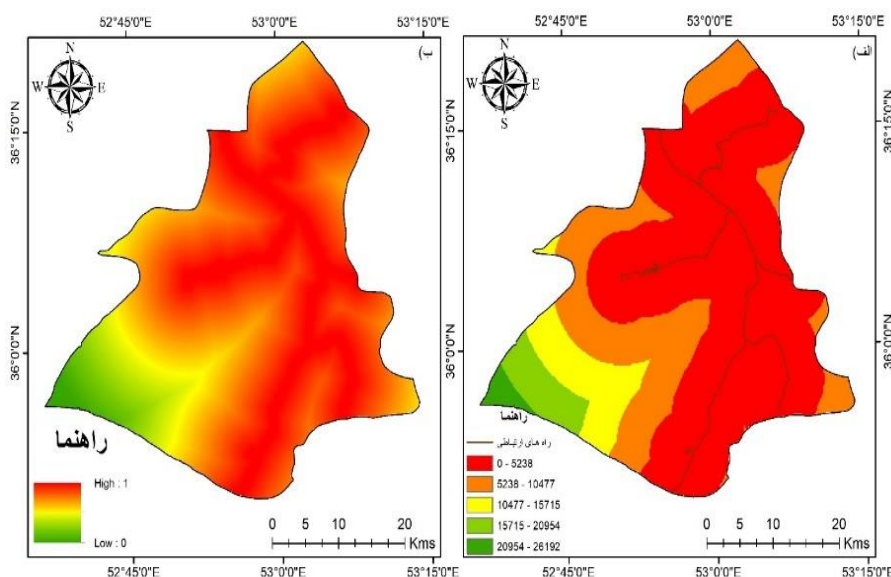
شکل ۱۰. الف: نقشه طبقات فاصله از گسل، ب: نقشه فازی شده متغیر فاصله از گسل

فاصله از جاده‌ها

جاده با تغییر توپوگرافی منطقه و کاهش فشار در پاشنه شیب باعث تولید تنش‌های کششی می‌گردد. شیب در حالت طبیعی دارای تعادل بوده ولی پس از احداث جاده به دلیل تأثیر ناخوشایند ناشی از جاده مانند تغییر توپوگرافی تغییر شیب و تغییر شرایط زهکشی دچار ناپایداری می‌گردد. با توجه به جدول (۱۱) نقاطی که در فاصله صفر تا ۵۲۰۰ متری جاده‌ها قرار دارند داری بیشترین وزن نسبی اهمیت می‌باشند. با افزایش فاصله از جاده این اهمیت و خطر وقوع زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. نقاطی که در خارج از این محدوده قرار می‌گیرند دارای خطر نسبی صفر می‌باشند.

جدول ۱۱. مساحت طبقات فاصله از جاده (متر) و وزن زیر معیارهای آن

| کد | طبقات فاصله از جاده (متر) | ضریب زیر معیار | مساحت (هکتار) | درصد مساحت |
|----|---------------------------|----------------|---------------|------------|
| ۱ | ۵۲۳۸-۰ | ۰/۵۴۷ | ۳۷۹۴۳ | ۶۲/۶۷ |
| ۲ | ۱۰۴۷۷-۵۲۳۸ | ۰/۴۵۶ | ۱۴۱۳۷/۹ | ۲۳/۳۵ |
| ۳ | ۱۵۷۱۵-۱۰۴۷۷ | ۰/۲۶۱ | ۴۹۶۴/۷ | ۸/۲۱ |
| ۴ | ۲۰۹۵۴-۱۵۷۱۵ | ۰/۱۲۵ | ۲۷۳۴/۱ | ۴/۵۱ |
| ۵ | ۲۶۱۹۲-۲۰۹۵۴ | ۰/۰۶۸ | ۷۶۳/۸ | ۱/۲۶ |



شکل ۱۱. الف: نقشه طبقات فاصله از جاده، ب: نقشه فازی شده متغیر فاصله از جاده

پس از آن که وزن معیار هر رده از متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی محاسبه شد، تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی با استفاده از اپراتورهای جمع، ضرب، گامای ۰/۷، گامای ۰/۸ و گامای ۰/۹ انجام گرفت. جهت استفاده از این اپراتورها، وزن نسبی با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی به دست آمد. با توجه به متغیر مؤثر، ماتریسی به ابعاد ۹×۹ در محیط نرم‌افزاری Expert Choice تشکیل شد. سپس با استفاده از میانگین نظرات کارشناسی، سطح اول این ماتریس تکمیل شد تا سطح دوم آن نیز محاسبه شود؛ ماتریس سطح اول و دوم متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های شهرستان سوادکوه در جدول (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱۲. ماتریس مقایسات زوجی عوامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه

| عوامل | ارتفاع | جهت شیب | شیب | کاربری اراضی | خاک‌شناسی | زمین‌شناسی | فاصله از گسل | فاصله از آبراهه | فاصله از جاده |
|-----------------|--------|---------|-----|--------------|-----------|------------|--------------|-----------------|---------------|
| ارتفاع | ۱ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۴ | ۱/۳ | ۱/۴ | ۱/۵ | ۱/۷ | ۱/۹ |
| جهت شیب | ۲ | ۱ | ۱/۲ | ۱/۴ | ۱/۴ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۵ | ۱/۹ |
| شیب | ۲ | ۲ | ۱ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/۵ | ۱/۹ |
| کاربری اراضی | ۴ | ۴ | ۳ | ۱ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱/۵ | ۱/۷ | ۱/۹ |
| خاک‌شناسی | ۳ | ۴ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱/۵ | ۱/۷ |
| ژئومورفولوژی | ۴ | ۹ | ۷ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱/۲ | ۱/۵ | ۱/۵ |
| فاصله از گسل | ۵ | ۷ | ۷ | ۵ | ۳ | ۲ | ۱ | ۱/۴ | ۱/۳ |
| فاصله از آبراهه | ۷ | ۵ | ۵ | ۷ | ۵ | ۵ | ۴ | ۱ | ۱/۴ |
| فاصله از جاده | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۵ | ۳ | ۴ | ۱ |
| جمع | ۳۷ | ۴۱/۵ | ۳۶ | ۲۸/۸۳ | ۲۰/۲۴ | ۱۴/۱۷ | ۹/۵۱ | ۶/۳۳ | ۲/۳۷ |

جدول ۱۳. ماتریس مقایسات زوجی نرمالیزه شده و محاسبه بردار وزن عوامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه

| عوامل | ارتفاع | جهت شیب | شیب | کاربری اراضی | خاک‌شناسی | زمین‌شناسی | فاصله از گسل | فاصله از آبراهه | فاصله از جاده |
|-----------------|--------|---------|--------|--------------|-----------|------------|--------------|-----------------|---------------|
| ارتفاع | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۴۶ |
| جهت شیب | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۴۶ |
| شیب | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۴۶ |
| کاربری اراضی | ۰/۱۰۸ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۸۳ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۴۶ |
| خاک‌شناسی | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۸۳ | ۰/۱۰۴ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۶۰ |
| ژئومورفولوژی | ۰/۱۰۸ | ۰/۲۱۶ | ۰/۱۹۴ | ۰/۱۰۴ | ۰/۱۴۸ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۵۲ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۸۴ |
| فاصله از گسل | ۰/۱۳۵ | ۰/۱۶۸ | ۰/۱۹۴ | ۰/۱۷۳ | ۰/۱۴۸ | ۰/۱۴۱ | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۳۹ | ۰/۱۴۰ |
| فاصله از آبراهه | ۰/۱۸۹ | ۰/۱۲۰ | ۰/۱۳۸ | ۰/۲۴۲ | ۰/۲۴۶ | ۰/۳۵۲ | ۰/۴۲۰ | ۰/۱۵۷ | ۰/۱۰۵ |
| فاصله از جاده | ۰/۲۴۳ | ۰/۲۱۶ | ۰/۲۵۰ | ۰/۳۱۲ | ۰/۳۴۵ | ۰/۳۵۲ | ۰/۳۱۵ | ۰/۶۳۱ | ۰/۴۲۱ |
| بردار وزن | ۰/۰۱۹۸ | ۰/۰۲۱۵ | ۰/۰۲۶۱ | ۰/۰۴۳۸ | ۰/۰۵۸۶ | ۰/۱۰۴۳ | ۰/۱۳۳۵ | ۰/۲۳۳۳ | ۰/۳۵۹۲ |

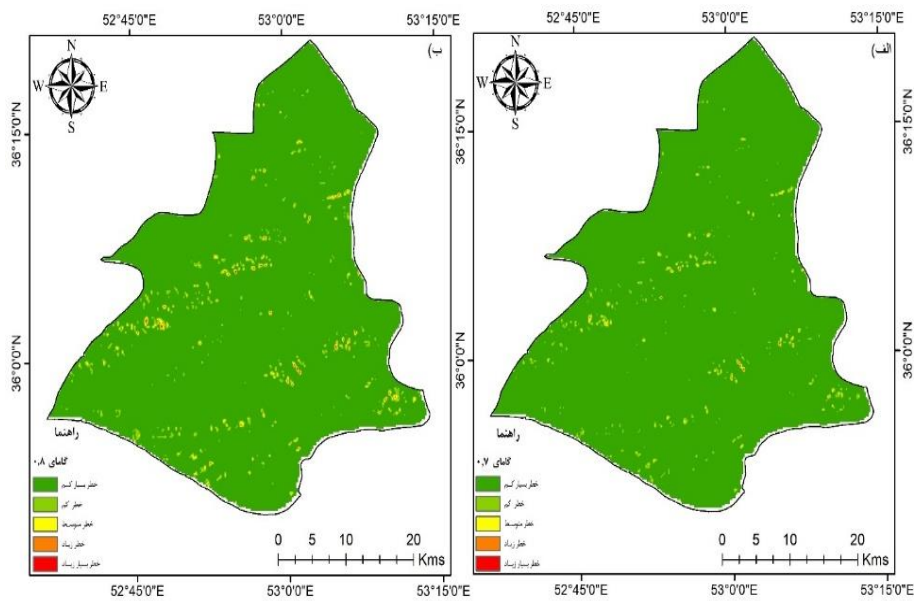
پس از تشکیل اولویت‌بندی، برای بی‌بعد کردن داده‌ها و به دست آوردن وزن پارامترها از روش میانگین حسابی استفاده شد. با توجه به وزن‌های نسبی محاسبه‌شده، متغیر فاصله از جاده با ضریب (۰/۳۵۹) به‌عنوان مؤثرترین عامل در وقوع پهنه‌های لغزشی شهرستان سوادکوه بر اساس نظرات کارشناسی مطرح است. متغیر فاصله از آبراهه با (۰/۲۳۳) در درجه دوم قرار دارد. پس‌از آن متغیرهای فاصله از گسل با ضریب (۰/۱۳۳)، زمین‌شناسی (۰/۱۰۴)، خاک‌شناسی (۰/۰۵۸)، کاربری اراضی (۰/۰۴۳)، شیب (۰/۰۲۶)، جهت شیب (۰/۰۲۱) و ارتفاع (۰/۰۱۹) در درجه‌های بعدی تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی قرار دارند. شکل عمومی معادله به‌دست‌آمده از اجرای مدل AHP در رابطه زیر آورده شده است.

$$Y = (0.104 \times \text{Geology}) + (0.026 \times \text{slope}) + (0.359 \times \text{Road}) + (0.058 \times \text{Soil}) + (0.043 \times \text{Land use}) + (0.233 \times \text{River}) + (0.133 \times \text{Fault}) + (0.021 \times \text{Aspect}) + (0.019 \times \text{Elevation})$$

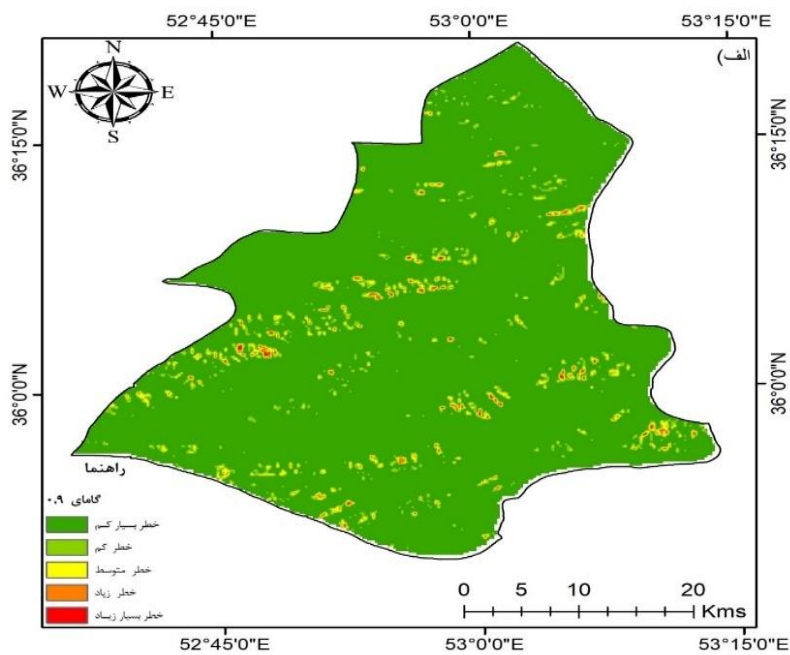
پس از وزن‌دار کردن هر متغیر بر اساس وزن‌های نسبی به‌دست‌آمده از تحلیل سلسله مراتبی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه بر اساس سه اپراتور همپوشانی منطبق فازی تهیه گردید. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را در شهرستان سوادکوه نشان می‌دهند. نقشه‌های پهنه‌بندی در پنج رده تهیه‌شده‌اند. در جدول (۱۴) مساحت و درصد مساحت پنج رده خطر ارائه‌شده است.

جدول ۱۴. مساحت رده‌های خطر زمین‌لغزش در نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه‌شده با اپراتورهای فازی

| طبقه | طبقه خطر | جمع فازی | | گاما ۰٫۷ | | گاما ۰٫۸ | | گاما ۰٫۹ | |
|------|----------------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| | | مساحت (هکتار) | درصد | مساحت (هکتار) | درصد | مساحت (هکتار) | درصد | مساحت (هکتار) | درصد |
| ۱ | خطر بسیار کم | ۱۰۶۳۸/۶ | ۶/۶۹ | ۱۵۶۱۹۷/۷ | ۹۸/۳۵ | ۱۵۴۲۲۹/۱ | ۹۷/۱۱ | ۱۴۹۸۸۳/۹ | ۹۴/۳۸ |
| ۲ | خطر کم | ۱۶۳۶۵/۹ | ۱۰/۳۱ | ۱۵۸۱ | ۰/۹۹ | ۲۴۹۳/۹ | ۱/۵۷ | ۴۱۶۱/۶ | ۲/۶۲ |
| ۳ | خطر متوسط | ۳۶۳۶۸/۱ | ۲۲/۹۱ | ۶۸۳/۴ | ۰/۳۴ | ۱۱۷۸/۱ | ۰/۷۵ | ۲۴۸۸/۸ | ۱/۵۶ |
| ۴ | خطر زیاد | ۴۸۸۹۳/۷ | ۳۰/۷۸ | ۲۵۵ | ۰/۱۶ | ۶۱۷/۱ | ۰/۳۸ | ۱۵۵۵/۵ | ۰/۹۷ |
| ۵ | خطر بسیار زیاد | ۴۶۵۳۷/۵ | ۲۹/۳۱ | ۸۶/۷ | ۰/۰۵۴ | ۲۸۵/۶ | ۰/۱۷ | ۷۱۴ | ۰/۴۴ |



شکل ۱۲. الف: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با گامای ۰٫۷، ب: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با گامای ۰٫۸



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با گامای ۰٫۹

ارزیابی دقت روش پهنه‌بندی

یافته‌های حاصل از محاسبه مقادیر شاخص‌های مجموع کیفیت و دقت روش در جدول (۱۵) آورده شده است.

جدول ۱۵. ارزیابی صحت و دقت اپراتورهای فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

| مدل پهنه‌بندی | رده خطر لغزش | مساحت پهنه به کیلومتر مربع (Ai) | مساحت لغزش پهنه به کیلومتر مربع (Si) | نسبت تراکمی (Dr) | درصد مساحت (S) | QS در هر رده | مجموع کیفیت (QS) | دقت روش (P) |
|---------------|--------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------|--------------|------------------|-------------|
| Gamma0.7 | ۱ | ۱۵۶۱۹۷/۷ | ۳/۲ | ۰/۵ | ۰/۹۵ | ۰/۳۳۸ | ۴/۶۲ | ۰/۰۶ |
| | ۲ | ۱۵۸۱ | ۲/۹ | ۸/۹۲ | ۰/۰۵ | ۲/۹۹۸ | | |
| | ۳ | ۶۸۳/۴ | ۰/۶ | ۱۶/۲۶ | ۰/۰۱ | ۱/۲۶۴ | | |
| | ۴ | ۲۵۵ | ۰/۰۸ | ۱۱/۶۱ | . | ۰/۱۱۴ | | |
| | ۵ | ۸۶/۷ | . | . | . | . | | |
| | Sum | ۱۵۸۸۰۳/۸ | ۶/۸ | | | | | |
| Gamma0.8 | ۱ | ۱۵۴۲۲۹/۱ | ۱/۶ | ۰/۳۹ | ۰/۸ | ۰/۴۰۲ | ۷/۰۹ | ۰/۰۷ |
| | ۲ | ۲۴۹۳/۹ | ۲/۴۸ | ۲/۱ | ۰/۱۷ | ۰/۲۱۱ | | |
| | ۳ | ۱۱۷۸/۱ | ۲/۵ | ۱۸/۴۱ | ۰/۰۲ | ۶/۰۵۲ | | |
| | ۴ | ۶۱۷/۱ | ۰/۲۱ | ۱۵/۷ | . | ۰/۴۲۵ | | |
| | ۵ | ۲۸۵/۶ | ۰/۰۱ | ۲/۴۷ | . | ۰/۰۰۱ | | |
| | Sum | ۱۵۸۸۰۳/۸ | ۶/۸ | | | | | |
| Gamma0.9 | ۱ | ۱۴۹۸۸۳/۹ | ۰/۳۹ | ۰/۱۷ | ۰/۳۴ | ۰/۳۳۳ | ۵ | ۰/۰۲ |
| | ۲ | ۴۱۶۱/۶ | ۲/۰۱ | ۰/۵۳ | ۰/۵۵ | ۰/۱۲ | | |
| | ۳ | ۲۴۸۸/۸ | ۲/۹ | ۴/۳۶ | ۰/۱ | ۱/۱۰۳ | | |
| | ۴ | ۱۵۵۵/۵ | ۱/۴ | ۲/۰۸ | ۰/۰۱ | ۳/۸۸ | | |
| | ۵ | ۷۱۴ | ۰/۱۱ | ۱۰/۴۳ | . | ۰/۱۳۸ | | |
| | Sum | ۱۵۸۸۰۳/۸ | ۶/۸ | | | | | |

با توجه به این یافته‌ها، نسبت تراکمی در هر ۳ روش به کار گرفته شده است. ضمن تفکیک‌پذیری خوب، متناسب با افزایش خطر پهنه‌ها رو به فزونی نهاده است. با مدل‌هایی که پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش درست انجام شود با افزایش رده خطر، نسبت تراکم هم افزایش پیدا می‌یابد. مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد حاکی از آن است که اپراتور فازی گامای ۰/۸ با ۷/۰۹، بالاترین مقدار (QS) را در میان سایر اپراتورهای فازی دارد. پس این اپراتور به‌عنوان اپراتور بهینه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. پس از آن مقدار شاخص (QS) برای گامای ۰/۹ با مقدار ۵ بالاتر از سایر اپراتورهای فازی می‌باشد. مقادیر جمع کیفی برای اپراتور گامای ۰/۷ جمع و ضرب فازی ۴/۶۲ محاسبه گردید. بنابراین، مناسب‌ترین روش همپوشانی منطق فازی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه گامای ۰/۸ است. بررسی مقادیر محاسبه شده برای شاخص دقت (P) هم نشان‌دهنده این نکته است که بیشترین مقدار آن برای اپراتور گامای ۰/۸ به دست آمده است که بیانگر دقت بیشتر این اپراتور نسبت به سایر اپراتورها پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه است. مقادیر نسبت تراکم (Dr) نشان می‌دهد نقشه خطر صحیح تهیه شده است. زیرا از رده‌های خطر کم تا رده‌های پرخطر، مقدار نسبت تراکم به صورت صعودی می‌باشد.

بحث

در این پژوهش ابتدا همه نقشه‌های معیارها شامل ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، جهت شیب، کاربری زمین، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، خاکشناسی و فاصله از راه‌ها با استفاده از توابع فازی، فازی شدند و به صورت نقشه‌های فازی درآمدند. عضویت فازی رده‌های عامل مؤثر شیب نشان می‌دهد که با افزایش شیب، آستانه ناپایداری دامنه افزایش می‌یابد و احتمال

وقوع حرکات توده‌ای مثل زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. بیشترین عضویت فازی بین شیب‌های ۳۰ تا ۴۰ درجه و کمترین به شیب‌های ۵ درجه و کمتر از آن اختصاص داده شده است. دامنه‌ها با جهت شمالی به دلیل برخورداری از بارش و رطوبت، نقش مؤثری در ایجاد حرکات لغزشی منطقه ایفا می‌کنند و مقدار عضویت فازی آن برای منطقه مورد مطالعه نیز ۰/۵۲۴ به دست آمد. پهنه‌هایی که از جنس مارن در ایجاد وقوع زمین‌لغزش مؤثرند. عامل مؤثر جاده، نقش بارز خود را بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه با مقادیر عضویت فازی به دست آمده برای رده‌های مختلف آن، به خوبی نشان می‌دهد؛ رده با فاصله کمتر از ۶۰۰۰ متر از جاده دارای بیشترین مقدار عضویت فازی بوده و رده با فاصله‌های بیشتر از ۲۰۰۰۰ متری از جاده کمترین مقدار عضویت فازی را دارد. تلفیق پهنه‌های لغزشی در لایه فاصله از آبراهه هم بیانگر این امر است که بیشترین پراکنش زمین‌لغزش‌ها در طبقه با فاصله ۰ تا ۶۰۰ متر از آبراهه قرار دارند. کمترین مقدار عضویت فازی هم برای فاصله‌های بالای ۳۰۰۰ متر از آبراهه به دست آمد. بیشترین مقدار عضویت فازی در بین کاربری‌ها برای اراضی ترکیبی باغی و زراعی و کمترین مقدار آن برای کاربری اراضی مرتعی، بیرون‌زدگی سنگی و ساخته شده محاسبه شد. در ارتباط با لایه فاصله از گسل، بر اساس روش نسبت فراوانی، طبقه با فاصله ۰ تا ۳۰۰۰ متر دارای بیشترین و پهنه‌های با فواصل بیش از ۱۰۰۰۰ متر دارای کمترین مقدار تأثیرگذاری در وقوع زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه می‌باشند.

با توجه به ۹ متغیر مؤثر، ماتریس ۹×۹ در نرم‌افزار Expert Choice تشکیل و با توجه به وزن‌های نسبی محاسبه شده متغیر فاصله از جاده با ضریب (۰/۳۵۹) به عنوان مؤثرترین عامل در وقوع پهنه‌های لغزشی شهرستان سوادکوه بر اساس نظرات کارشناسی مطرح است. متغیر فاصله از آبراهه با (۰/۲۳۳) در درجه دوم قرار دارد. پس از آن متغیرهای فاصله از گسل با ضریب (۰/۱۳۳)، زمین‌شناسی (۰/۱۰۴)، خاک‌شناسی (۰/۰۵۸)، کاربری اراضی (۰/۰۴۳)، شیب (۰/۰۲۶)، جهت شیب (۰/۰۲۱) و ارتفاع (۰/۰۱۹) در درجه‌های بعدی تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی قرار دارند. پس از رسیدن به رابطه و وزن دار کردن هر متغیر بر اساس وزن‌های نسبی به دست آمده از تحلیل سلسله مراتبی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه بر اساس سه اپراتور همپوشانی منطق فازی گامای ۰/۷، گامای ۰/۸ و گامای ۰/۹ تهیه گردید. نسبت تراکمی در هر ۳ روش به کار گرفته شده، ضمن تفکیک‌پذیری خوب، متناسب با افزایش خطر پهنه‌ها رو به فزونی نهاده است. مدل‌هایی که پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را درست انجام داشته باشند، با افزایش رده خطر، نسبت تراکم هم افزایش پیدا می‌کند. با افزایش رده خطر در هر کدام از اپراتورهای همپوشانی و در نتیجه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مقدار نسبت تراکم رده‌ها افزایش نشان می‌دهند. مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد که اپراتور فازی گامای ۰/۸ با ۷,۰۹، بالاترین مقدار QS را در میان سایر اپراتورهای فازی دارد؛ پس این اپراتور به عنوان اپراتور بهینه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. پس از آن مقدار شاخص QS برای گامای ۰/۹ با مقدار ۵ بالاتر از سایر اپراتورهای فازی می‌باشد. مقادیر جمع کیفی برای اپراتور گامای ۰/۷ کمتر از دو روش ذکر شده است. بنابراین، مناسب‌ترین روش همپوشانی منطق فازی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش شهرستان سوادکوه گامای ۰/۸ است. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات نادری (۲۰۱۲)، سوری و همکاران (۲۰۱۴)، اصغری و بلواسی (۲۰۱۸)، میرنظری و همکاران (۲۰۱۵)، رستمی و همکاران (۲۰۱۹)، بویی و همکاران (۲۰۱۲)، شامپاتی و همکاران (۲۰۰۷) ولی (۲۰۰۷) مطابقت دارد. بررسی مقادیر محاسبه شده برای شاخص دقت (P) هم نشان‌دهنده این نکته است که بیشترین مقدار آن برای اپراتور گامای ۰/۸ به دست آمده است که بیانگر دقت بیشتر این اپراتور نسبت به سایر اپراتورها پهنه‌بندی خاطر زمین‌لغزش است.

نتیجه گیری

زمین لغزش یکی از بلایای طبیعی مخاطره آمیز است که هر ساله دولت و مؤسسات پژوهشی جهت کاهش نسبی خطرات و افزایش میزان پایداری دامنه ها و ارزیابی میزان خسارت جهت نشان دادن توزیع فضایی آن تلاش می کنند. با توجه به مقادیر وزن نسبی محاسبه شده که تقریباً در مورد بیشتر لایه ها ارتباط منطقی میان احتمال وقوع زمین لغزش و مقادیر ارزشی آن ها برقرار است. برای نمونه این ارتباط در مورد لایه های فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه به صورت معکوس بوده یعنی با افزایش فاصله از محل هر عارضه احتمال وقوع لغزش کاهش می یابد. در بحث متغیر شیب رابطه خطی مستقیم تا مقداری افزایش شیب برقرار است، اما در شیب های بسیار زیاد، احتمال رخداد کاهش می یابد. میزان تأثیرگذاری هر متغیر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی به دست آمد. با توجه به اینکه بیشتر مناطق و نواحی آسیب پذیر در برابر زمین لغزش در نزدیکی رودخانه ها و آبراهه ها و شیب های تند بوده اند، باید سعی شود با یک برنامه ریزی ادامه دار و نظارت دقیق از ساخت و سازهای غیراصولی در حریم رودخانه ها و شیب های تند که خصوصاً دارای آسیب پذیری بیشتری هستند، جلوگیری به عمل آید. اقدامات اولیه مناسب در هنگام وقوع بحران یکی از موارد مهم است. پیش زمینه این اقدامات مناسب، آموزش صحیح است. پیشنهاد می شود کارگاه های آموزشی با محوریت مدیریت بحران (زمین لغزش) برای آموزش و آگاهی شهروندان برگزار شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق جهت مطالعات بیشتر پیشنهاد می گردد نقشه پهنه بندی منطقه را با استفاده از روش دیگری تهیه نمود و با نقشه تهیه شده در این تحقیق مقایسه گردد. پیشنهاد می شود قبل از به کارگیری هر روشی برای پهنه بندی پارامترهای مورد نظر و لایه های اطلاعاتی به دقت انتخاب و آنالیز گردد. به دلیل اهمیت فاکتور لیتولوژی در تهیه نقشه های پهنه بندی توصیه می گردد اطلاعات لیتولوژیک منطقه توسط کارشناسان این امر جمع آوری گردد. از آنجاکه زمین لغزش های رخ داده در منطقه نقش اساسی در تهیه انواع نقشه های پهنه بندی دارد، لذا اطلاعات کامل مربوط به این زمین لغزش ها به طور دقیق جمع آوری گردد. در صورت تهیه اطلاعات کامل مربوط به لغزش ها و شرایط منطقه می توان نقشه پهنه بندی خطر و ریسک را برای منطقه تهیه نمود.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش های انجام پژوهش سهم برابر داشتند

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

از حمایت مالی دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان در انجام این پژوهش قدردانی می گردد.

منابع

اصغریور، محمدجواد. (۱۳۸۸). *تصمیم گیری های چند معیاره تهران، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.*

- اکبر، سمیه؛ رنجبر، حجت‌اله؛ کرمی‌نسب، سعید و عبدالمالکی، علی. (۱۳۹۲). ارزیابی خطر زمین‌لغزش به کمک مدل فازی دانش‌مبنا و روش ترکیبی فازی-اوزان شاهد در منطقه مسکونی جیرفت. فصلنامه زمین‌شناسی مهندسی، ۷ (۱)، ۱۶۲۲-۱۶۰۱.
- امین‌عطایی، رضا. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی و پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان.
- ایرانمنش، حسین. (۱۳۹۴). گزارش مقدماتی زمین‌لغزش روستای باریکان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بهینافر، ابوالفضل؛ قنبرزاده، هادی و منصور، دانشور، محمدرضا. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ناپایداری به روش‌های AHP و احتمال. فضای جغرافیایی، ۲۷، ۷۸-۵۵.
- حق‌شناس، ابراهیم. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب در حوضه آبخیز طالقان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم دانشگاه تربیت مدرس.
- جلالی، نادر. (۱۳۹۶). ارزیابی تعدادی از روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه طالقان. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- رجایی، عبدالحمید. (۱۳۸۲). کاربرد جغرافیای طبیعی در برنامه‌ریزی شهری و روستایی. تهران: انتشارات سمت.
- شادفر، صمد (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مطالعه موردی حوضه آبخیز چالکرو. مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، ۷۵، ۱۱۸-۱۲۶.
- شقلی‌فراهانی، عقیل. (۱۳۹۶). ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
- فاطمی‌عقدا، سیدمحمود؛ غیومیان، جعفر؛ تشنه‌لب، محمد و اشقلی‌فراهانی، عقیل. (۱۳۹۸). بررسی خطر زمین‌لغزش با استفاده از سیستم فازی در منطقه رودبار. مجله علوم دانشگاه تهران، ۳۱ (۱)، ۶۴-۴۳.
- عبادی‌نژاد، سیدعلی؛ یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران و شادفر، صمد. (۱۳۸۶). ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین لغزش (مطالعه موردی حوزه آبخیز شیرو). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱ (۲)، ۳۹-۴۴.
- کمک‌پناه، علی؛ منتظر القائم، سعید و چدنی، امیرجعفر (۱۳۷۳). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در ایران، زمین‌لغزه و مروری بر زمین‌لغزه‌های ایران (جلد اول). پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- متکان، علی اکبر؛ سمیعا، جلال؛ پورعلی، سیدحسین و صفایی، مهرداد. (۱۳۸۸). مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز لاجیم. زمین‌شناسی ژئوتکنیک. زمین‌شناسی کاربردی، ۵ (۴)، ۳۱۸-۳۲۵.
- محمدخان، شیرین. (۱۳۹۷). ساخت مدل منطقه‌ای خطر حرکات توده‌ای با استفاده از ویژگی‌های کیفی، تحلیل سلسله‌مراتبی AHP مطالعه موردی حوضه آبخیز طالقان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- نادری، فتح‌الله. (۲۰۱۶). کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، ۹۴، ۸۵-۷۴.
- نوجوان، محمد و رضا، حیاتی. (۱۳۹۲). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز سیاه‌خور اسلام‌آباد غرب با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). جغرافیایی سرزمین، ۱۰ (۲)، ۸۱-۹۲.

References

- Abedini, M., & Fathi, M.H. (2014). Landslide risk sensitivity zoning in Khalkhal Chay watershed using multi-criteria models. *Journal of Quantitative Geomorphology*, 2(4), 71-85. [In Persian]
- Abedini, M., & Ghasemyan, B. (2015). Landslide hazard zoning in bijar town using analytical hierarchy method (AHP), *Geography and Planning*, 19 (52), 205-227. [In Persian]

- Ahmadi Kamarpashti, M., & Behzadpour, M. (2010). Temporary Housing in Earthquake. *Journal of Safety Message*, 7(8), 1-7. [In Persian]
- Akbar, S., Ranjbar, H., Karminsab, S., & Abdul Maliki, A. (2017). Landslide risk assessment using knowledge-based fuzzy model and fuzzy-control combined weights method in Jiroft residential area, *Journal of Engineering Geology*, Kharazmi University, 7(1), 1601-1622. [In Persian].
- Amino Ataei, R. (2018). *Landslide zoning and prediction using GIS*. Master Thesis, Faculty of Engineering, University of Guilan. [In Persian]
- Asghari, S., & balvasi, I. (2018). A Comparison of Artificial Neural Network Model with Fuzzy logic model In Landslide Hazard Assessment. *quantitative geomorphological researches*, 7(2), 158-182. [In Persian]
- Asgharpour, M.J. (2009). *Multi-Criteria Decision Making*. Tehran: University of Tehran Press. [In Persian]
- Atkinson, P.M., & Massari, R. (1998). Generalized linearmodelling of landslide susceptibility in the central apennines Italy. *Computer Geoscience*, 24, 373- 385. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00117-9)
- Behniafar, A., Qanbarzadeh, H., & Mansouri Daneshvar, M.R. (2019). Landslide Hazard Zoning and Instability by AHP and Probability Methods. *Journal of Geographical Space*, 27, 55-78. [In Persian]
- Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. (2012). Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro fuzzy inference system and GIS, *Computers and Geosciences*, 45:199-211. <http://doi.10.1016/j.cageo.2011.10.031>
- Bui, D.T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O.B. (2012). Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *CATENA*, 96: 28-40.
- Champati-Ray, P.K., Dimri, S., Lakhera, R.C., & Sati, S. (2007). Fuzzy-based method for landslide hazard assessment in an active seismic zone of Himalaya. *Landslides*, 4, 101-111. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0068-6>
- Dai, F.C., Lee, C.f., & Ngai, Y.Y. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Ebadatinejad, S.A., Yamani, M., Maghsoudi, M., & Shadfar, S. (2019). Evaluating the Efficiency of Fuzzy Logic Operators in Determining Landslide Capacity in Shiroud Watershed. *Journal of Watershed Management Engineering*, 1(2), 39-44 [In Persian]
- Ermini, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial Neural Networks applied to landslide Susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327-343. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.025>
- Fatemieh Aqda, S.M., Ghayoumian, J., & Tashnehlab, M. (2017). Investigation of landslide risk using fuzzy system in Rudbar region. *Journal of Science*, 31(1), 64-43. [In Persian].
- Feruzjah, A. (2011). *The role of urban development plans (comprehensive and detailed) in reducing the vulnerability of the city of Babel to earthquakes*. Master Thesis in Geography and Urban Planning, Tarbiat Modares University. [In Persian]
- Gee, M.D. (1992). Classification of landslides hazard zonation methods and a test of predictive capability. *Proceedings of 6th International Symposium on Landslide*, 56-48.
- Gorsevski, P.V., Jankowski, P., & Gessler, P.E. (2006). Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics*, 35, 121-146.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: An aid to a sustainable development. *Geomorphology*, 31, 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Haghshenas, I. (2015). *Landslide risk zoning and its relationship with sediment production in Taleghan watershed*. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Faculty of Science. [In Persian]

- Hosseinzadeh, M.M., Thorati, M.R., Mansouri, A., Mirbagheri, B., & Khezri, S. (2009). Risk zoning of mass movements using logistic regression model. *Journal of Background Iranian Studies*, 3(11), 27-37. [In Persian]
- Iranmanesh, H. (2015). *Preliminary landslide report of Barikan village*. Geological Survey and Mineral Exploration Organization. [In Persian]
- Jade, S., & Sarkar, S. (1993). Statistical models for slope instability classifications engineering. *Geology*, 36, 91-98. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(93\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90021-4)
- Jalali, N. (2016). evaluation of a number of landslide risk zoning methods in the Taleghan basin, final report of the research project of the Soil Conservation and Watershed Research Institute. [In Persian]
- Jalali, N. (2017). Evaluation of a number of landslide risk zoning methods in Taleghan basin. *final report of research project of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. [In Persian]
- Kamranzad, F., Mohsel Afshar, A., Mojarb, M., & Memarian, H. (2015). Landslide risk zoning in Tehran province using data-driven methods and hierarchical analysis. *Journal of Earth Sciences*, 7, 114 - 101. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41372> [In Persian].
- Keshavarz Bakhshayesh, M. (2016). Landslide hazard zonaton of polroud dam site using analytic hierarchical process (AHP) method. *Engineering geology*, 10 (2), 3483-3500. <http://10.18869/acadpub.jeg.10.2.3483> [In Persian]
- Komak panah, A., & Montazer Al-Qaim, S. (1994). *Proceedings of the first specialized workshop to review landslide damage reduction strategies in the country*. Tehran: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. [In Persian]
- Komakpanah, A., Montazer Al-Qaim, S., & Chadani, A.J. (2015). *Landslide Hazard Zoning in Iran, Landslide and Overview of Iran Landslides (Volume I)*. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. [In Persian]
- Lantada, N., Pujades, L., & Barbat, A. (2009). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A Comparison, *Nat Hazard*. P. 51. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9212-4>
- Lee, S. (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52(4), 615-623. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0491-y>
- Memarian, H. (2008). *Engineering Geology and Geotechnics*. Fifth Edition, University of Tehran Press. [In Persian]
- Mirnazari, J., Shahabi, H., & Khezri, S. (2015). Assessment and Zoning of Landslide Hazard Using AHP Model and Fuzzy Logic Operators in Posht Tang Watershed of Sar Pole Zahab (Kermanshah Province). *Geography and Development Iranian Journal*, 12(37), 53-70. [In Persian]. <http://10.22111/gdij.2015.1819>
- Mohammad Khan, S. (2018). *Building a regional mass movement risk model using qualitative features, AHP hierarchical analysis, a case study of the Taleghan watershed*. Master's thesis of the Faculty of Natural Resources, Tehran University. [In Persian]
- Motavali, S., Hosseinzadeh, M., & Jamshidi Saleh, Z. (2012). Landslide risk zoning in Shalmanrud basin of Guilan by AHP hierarchical analysis method. *Iranian Journal of Natural Ecosystems*, 4: 92-75. <http://10.22067/geoeh.2022.77009.1239> [In Persian]
- Mutkan, A.A., Samia, J., Pourali, S.H., & Safaei, M. (2020). Fuzzy Logic and Remote Sensing Models for Landslide Hazard Zoning in Lajim Watershed. *Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology)*, 5(4), 325-318. [In Persian].
- Naderi, F. (2012). Applying fuzzy logic to mapping susceptibility of landslide in Chardavel watershed in Elam province. *Watershed Management Research*, 94,74. [In Persian]
- Naderi, F. 2016. Application of fuzzy logic in landslide risk zoning in Chardavol watershed of Ilam. *Watershed Management Research*, 94, 85-74.
- Naderi, F., Naseri, B., Karimi, H., & Habibi Bibalani, G.H. (2010). Efficiency evaluation of different landslide susceptibility mapping methods (Case study: Zangvan watershed, Ilam

- province). *First international conference of soil and roots engineering relationship (LANDCON1005), Ardebil Province, Iran. From 24 May 2010 to 26 May 2010.* [In Persian]
- Nojovan, M., & Reza, H. (2013). Landslide hazard zoning of the Siah Khor watershed of West Islamabad using the Analytical Hierarchy (AHP) method, *Geographical Research*, 10(2), 81-92. [In Persian]
- Pablo, López., Qüense, J., Henríquez, C., & Martínez, C. (2021). Applicability of spatial prediction models for landslide susceptibility in land-use zoning instruments: a guideline in a coastal settlement in south-central Chile, *Geocarto International*, 151. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1939440>
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., & Schneiderbauer, C. (2012). Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Geomorphology*, 151, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.003>
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.023>
- Qasemian, B., Abedini, M., Rustaei, Sh., & Shirzadi, I. (2018). Comparative study of vector support machine models and tree logistics to assess landslide sensitivity (Case study: Kamyaran city, Kurdistan province). *Natural Geography*, 12(39), 68-47. <https://doi:10.1007/s12665-019-8562-z> [In Persian]
- Rajaei, A.H. (2003). *Application of natural geography in urban and rural planning.*, first edition. Tehran: Samat Publications. [In Persian]
- Ramezani, B., & Ebrahimi, H. (2009). Landslide and its stabilization strategies, *Geography of Environmental Management*, 2(3), 129-139. [In Persian]
- Rostami, Z., Modaresi, A., & Jamali, A. (2019). The Zoning of danger of landslide by using the fuzzy region (the case study: the Watershed in Cham Gordlan dam in Elam). *Journal of Natural environment hazards*, 8(22), 1-18. [In Persian]
- Satty, T. (1980). *The analytical hierarchical process: planning, priority setting, resource allocation.* New York: Mc Graw-Hill. <https://www.amazon.com/Analytic-Hierarchy-Process-Planning-Allocation/dp/0070543712>
- Shadfar, S. (2019). Landslide hazard zoning using hierarchical analysis method, case study of Chalkrod watershed. *Journal of Research and Construction in Natural Resources*, 75, 118-126.
- Shadfar, S. (2020). Landslide Hazard Zoning Using Hierarchical Analysis Method, Case Study of Chalkroud Watershed. *Journal of Research and Construction in Natural Resources*, 75, 118-126. [In Persian].
- Shaqli-Farahani, A. (2017). *risk assessment of instability of natural ranges in Rudbar region using fuzzy theory.* Master's thesis, Faculty of Science, Tarbiat Moalem University, Tehran. [In Persian]
- Shirani, K., & Arabameri, A.R. (2015). "Landslide hazard zonation using logistic regression method (Case study: Dez-e-Oulia Basin)". *Journal of Water and Soil Science*, 19 (72), 321-335. [In Persian]
- Shirani, K., Ghiomanian, J., & Mokhtari, A. (2005). "Investigation and evaluation of bivariate and multivariate statistical data in landslide hazard zonation". *Journal of Water and Watershed*, 2: 47-36. <https://doi.org/10.3390/rs9040304> [In Persian].
- Shuai, Z., & Zhou, Z. (2021). *A Comparative Study of Landslide Susceptibility Mapping Using SVM and PSO-SVM Models Based on Grid and Slope Units.* Mathematical Problems in Engineering, PP.15. <https://doi.org/10.1155/2021/8854606>
- Soori, S., Bharvand, S., & Farhadinejad, T. (2014). Landslide hazard zonation using Fuzzy logic (A case study: ChamSangar watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 4(4), 47-60. [In Persian]

- Telun Daniel, M., Tham Fatt, N.Y., Farid, A.K., & Joy, J.P. (2021). Landslide Susceptibility Modeling Using a Hybrid Bivariate Statistical and Expert Consultation Approach in Canada Hill, Sarawak, Malaysia, *frontiers in Earth Science*, 1-15. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.616225>
- Wang, L.J., Kazuhide, S., & Shuji, M. (2013). "Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based On FCM sampling strategy". *Computers & Geosciences*, 57, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.006>
- Wati, S., Hastuti, T., Wijoyo, S., & Pinem, F. (2010). "Landslide susceptibility mapping with heuristic approach in mountainous area, A Case study in Tawangmangu Sub District, central Java, Indonesia". *Int Arch Photo RS Spat Inf Sci*, 38 (8), 248-253.
- Wong, W.D., Xie, C.M., & Du, X.G. (2018). Landslide susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory. *Mining Science and Technology (China)*, 19(3), 399-404. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60075-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60075-2)
- Zhu, L., Changming, W., Donghe, M., & Kaleem Ullah, J.K. (2021). Exploring the potential relationship between the occurrence of debris flow and landslides. *Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, PP.1247–1262. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1247-2021>
- Zongji, Y., Jianping, Q., & xiaogang, Z. (2010). Regional Landslide Zonation Based on Entropy Method in Three Gorges - Area, China. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, (FSKD 2010). <https://doi:10.1109/FSKD.2010.5569097>