



Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm

Fariba Esfandiyari Darabad^{a*}, Masoud Rahimi^b, Mehrdad Vahabzadeh^c

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

^b Assistant professor in Geomorphology, Faculty of Literature and Human sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

^c Masters graduat in, Geomorphology and Environmental Management, Faculty of Social Sciences University of Mohaghegh Ardabili Ardabil, Iran.

Received: 30 April 2024

Revised: 29 May 2024

Accepted: 20 August 2024

Extended Abstract

Introduction

Rockfalls are a type of slope movement process that does not require a transporting medium (e.g., water) and predominantly occur under the influence of gravity (Dikau, 2006). The detachment of a single rock block or a volume of blocks from steep slopes is followed by motions mainly through the air. The fall trajectory is strongly controlled by the mean slope gradient, enabling different motion modes such as free-falling, bouncing, and rolling. Consequently, rockfalls present an unpredictable threat, especially along highways and railways, where they can cause damage to infrastructure or endanger human lives (Bostjančić et al., 2020). In high mountain regions, rockfall activity is thought to be changing due to accelerated climate warming and permafrost degradation, potentially resulting in increased activity and larger volumes involved in individual falls (Stoffel et al., 2024). Therefore, it is crucial to assess areas prone to rockfalls in mountainous regions. The aim of this research is to zone the risk of rockfalls along the Khalkhal–Shahroud road using a multi-layer perceptron algorithm.

* . Corresponding author: Fariba Esfandiyari Darabada Email: esfandiyari@uma.ac.ir Tel:+989120503281

How to cite this Article: Esfandiyari Darabad, F. , Rahimi, M. , & vahabzadeh, M. (2024). Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),1-26.



Material and Methods

The multi-layer perceptron algorithm is a modern machine learning model capable of solving complex problems. In this study, the necessary data were obtained from topographic maps at a scale of 1:25,000, geological maps at a scale of 1:100,000, a digital elevation model (DEM) with 12.5-meter resolution from the ALOS-PALSAR satellite, Sentinel data (spatial resolution of 10 meters), Google Earth satellite images, and field studies. In rockfall hazard zoning using GIS, the most critical component is the preparation of a rockfall distribution map or rockfall inventory. Fieldwork was conducted to identify rockfalls and prepare the inventory.

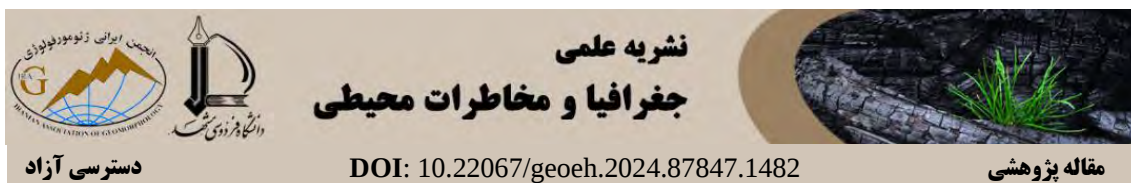
Results and Discussion

To identify the factors contributing to rockfall occurrence, field studies identified eight key factors: elevation, vegetation, slope aspect, distance from faults, distance from roads, geology, land use, and slope gradient. After pre-processing, all layers were entered into SPSS Modeler software, and the model was designed with 8 input neurons, 8 intermediate neurons, and 1 output neuron. The results revealed that, in the multi-layer perceptron algorithm, the geological layer had the highest weight value (0.20), followed by the land use layer (0.14) and distance from roads (0.12). In the model validation phase, the results demonstrated an AUC value of 0.9810 in the training phase and 0.9876 in the testing phase, indicating high model validity in both phases.

Conclusion

This research aimed to identify areas at risk of rockfall along the Khalkhal–Shahrud road using a multi-layer perceptron algorithm. The results highlight the significant influence of geological conditions on rockfall occurrences, emphasizing the need to consider slope instability in all spatial planning efforts in this region. It is recommended that future studies explore other machine learning models, such as support vector machines, to further evaluate rockfalls and related slope movements.

Key Words: Rockfall Hazard Zonation, Multilayer Perceptron Algorithm, Road Hazards, Khalkhal Road, Slope Stability Analysis.



پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

فریا اسفندیاری درآباد^۱ - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مسعود رحیمی - استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مهرداد وهاب‌زاده - کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۳۰

چکیده

ریزش سنگ یکی از پدیده‌هایی است که رخداد آن سبب ایجاد خسارات زیادی به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌شود؛ بنابراین ارزیابی نواحی مستعد رخداد ریزش سنگ در مناطق کوهستانی، امری ضروری است. هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه است. برای شناسایی عوامل مهم در رخداد ریزش سنگ با توجه به مطالعات میدانی ۸ عامل شناسایی شده که شامل ارتفاع، پوشش گیاهی، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شیب است. تمامی لایه‌ها بعد از فرایند پیش‌پردازش، وارد نرم‌افزار SPSS Modeler شده و مدل‌سازی با ۹ نورون ورودی، ۸ نورون میانه و ۱ خروجی طراحی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد در الگوریتم پرسپترون چندلایه، بیشترین ارزش وزنی را برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ اختصاص داده است. به لحاظ پراکنش طبقات خطرپذیری، ۹۸ درصد از طبقات خطرپذیری زیاد تا خیلی زیاد در بخش جنوبی منطقه گسترش دارد و بخش شمالی منطقه به لحاظ داشتن خطرپذیری در طبقه کم تا متوسط قرار گرفته است. همچنین در بخش اعتبار سنجی مدل، نتایج نشان داد که مقدار AUC در بخش آموزش عدد ۰/۹۸۱۰ و در بخش تست شبکه عدد ۰/۹۸۷۶ بوده است که این نیز نشان می‌دهد مدل در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار

بالایی بوده و در رتبه عالی قرار گرفته است. در نهایت پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای بررسی و ارزیابی ریزش سنگ و حرکات دامنه‌ای در این منطقه، از مدل‌های دیگر یادگیری ماشین استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: پهنه بندی خطر ریزش، الگوریتم پرسپرون چند لایه، مخاطرات جاده ایی، تجزیه و تحلیل پایداری دامنه، جاده خلخال.

۱- مقدمه

توسعه نظام شهری و روند افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر سبب توسعه سیستم حمل‌ونقل و شبکه ارتباطی در سرتاسر جهان شده است. ایجاد و توسعه شبکه ارتباطی یکی از عوامل مؤثر در آسیب و تغییر سیستم‌های مورفودینامیک در محیط طبیعی به‌ویژه مناطق کوهستانی محسوب می‌شود (Jaccard, Abbruzzese & Howald, 2020). ریزش سنگ به‌عنوان نوعی از حرکت دامنه‌ای طبقه‌بندی می‌شود که شامل جدا شدن یک یا چندین بلوک سنگ از یک صخره عمودی یا نزدیک به عمود بوده و با سقوط آزاد، جهش، غلتیدن مشخص می‌شود (Jiang, Li & Zhou, 2021). رخداد ناگهانی و سریع همراه با حجم مواد ریزش شده باعث شده است که مخاطره ریزش سنگ به‌عنوان یکی از ویرانگرترین و خطرناک‌ترین پدیده‌های ژئومورفیک شناخته شود (Guzzetti, Reichenbach & Ghigi, 2004). مکانیسم‌های ریزش سنگ به‌واسطه تأثیرات متعددی ایجاد می‌شود که به عوامل مختلفی اشاره دارد. این عوامل شامل تنش‌های کششی، تغییر شکل حرارتی، ساختارهای اتصال، افزایش فشار آب در حفره‌های موجود در توده‌های سنگ، فرسایش سطوح به دلیل باران شدید، فرآیندهای یخ‌زدن و آب‌شدن در مناطق سرد، تجزیه شیمیایی و هوازدگی سنگ و زلزله می‌باشد (Nakajima, Abe, Shinoda, Nakamura & Nakamura, 2021). همچنین از فعالیت‌های مهم انسانی در ریزش سنگ، عواملی از قبیل بارگذاری مواد بر روی دامنه، معدن‌کاوی، احداث سد، مخازن آب و عوارض خطی از قبیل جاده‌ها، راه‌آهن، خطوط لوله نفت و گاز، بسیار تأثیرگذارند (Abedini & Piroozi, 2020). شناخت عوامل مؤثر بر رخداد ریزش سنگ و تحلیل خطرات ناشی از این پدیده در مناطق مختلف از نیازهای اساسی و بسیار حیاتی برنامه‌ریزان است. بنابراین ایجاد یک استراتژی ایمن برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی و کاهش خسارات ناشی از وقوع آن جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار بسیار مهم و

ضروری بوده و ارائه یک مدل مناسب و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت محیط منطقه مطالعاتی، کمک شایانی به مراکز ذیصلاح نماید (Hatamifar, Mousavi & Alimoradi, 2012).

محور ارتباطی خلخال به بخش شاهرود به‌عنوان یک جاده درجه ۲ شناخته می‌شود که بخش شاهرود را به شهرستان خلخال وصل می‌کند که در یک دهه اخیر با توسعه شبکه ارتباطی در منطقه و عبور شبکه راه‌ها و نیز اهمیت اقتصادی، گردشگری و ترانزیتی، این محور مواصلاتی موردتوجه قرار گرفته است. محور ارتباطی خلخال به بخش شاهرود به خاطر قرارگیری در منطقه‌ی کوهستانی و شرایط ژئومورفیک و زمین‌شناسی خاص، مستعد وقوع حرکات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش سنگ است که در چند دهه‌ی اخیر با وقوع این نوع مخاطره، سبب ایجاد آسیب به تأسیسات انسانی و خسارات جانی و مالی فراوانی شده است؛ بنابراین شناخت نواحی مستعد حرکات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش سنگ برای کاهش خسارات به وجود آمده امری ضروری است. هدف این پژوهش پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه می‌باشد. نگهبان و همکاران (Negahban, Jahan Tighmand & Rahimi Herabadi, 2020) به جایگاه روش‌شناسی اثباتی و فرا اثباتی در مخاطرات ژئومورفولوژیک در آزادراه رودبار- رستم‌آباد پرداختند. این محققین به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین مناطق خطرناک به‌لحاظ ریزش سنگ در شیب بالا، فاصله کم از آبراهه، حساسیت بالای سنگ‌های آتشفشانی و کاربری اراضی بایر است. عابدینی و همکاران (Abedini, Mozafari & Faal Naziri, 2019) به بررسی و مقایسه کارایی مدل‌های ارزش اطلاعات و ضریب نسبت فراوانی و آنتروپی شانون در پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ جاده زنجان - تهم - طارم پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که در روش ارزش اطلاعات ۰/۲۳ درصد خطر خیلی‌زیاد تا زیاد تعلق گرفت. اصغری سراسکانرود و مظفری (Asghari Saraskanrod & Mozafari, 2020) به ارزیابی و مقایسه مدل‌های ضریب نسبت فراوانی و تحلیل شبکه در پهنه‌بندی ریزش سنگ پرداختند. ارزیابی مدل‌ها نشان داد، در مدل تحلیل شبکه شاخص‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۸۸ به‌دست آمده که نسبت مدل ضریب نسبت فراوانی از کیفیت و دقت بالاتری برخوردار است. اسکندری و همکاران (Eskandari, Nazarpour & Khayat, 2023) به

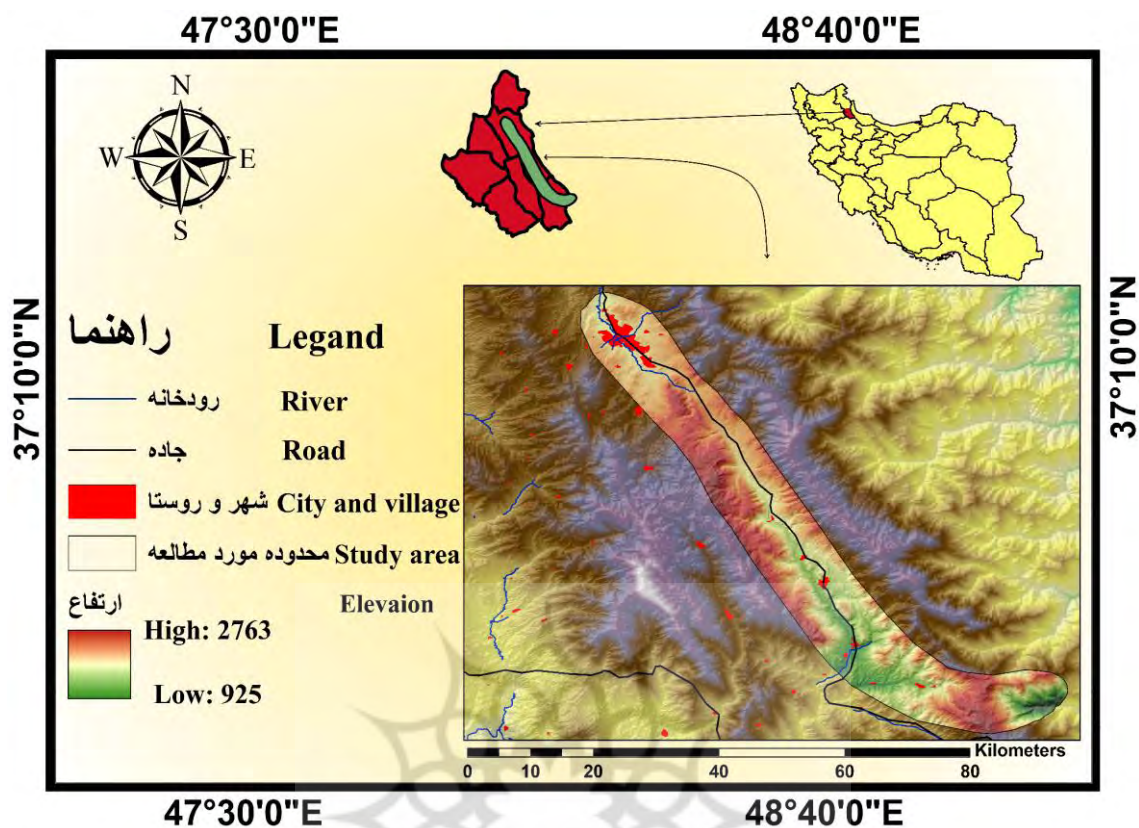
پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در آزادراه خرم‌آباد - پل زال پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که معیار فاصله از جاده با وزن ۰/۱۶ و جنس سنگ با وزن ۰/۱۶ مهم‌ترین معیارهای سنجش خطر ریزش سنگ هستند. امامی و یوسفی (Emami & Yousefi, 2023) به مقایسه کارایی برخی از مدل‌های یادگیری ماشین در تهیه نقشه حساسیت پذیری به حرکات توده‌ای (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری) پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که ارتفاع، زاویه شیب، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها عوامل بحرانی در وقوع حرکات توده‌ای هستند. فانوس و همکاران (Fanos, Pradhan,) (Alamri & Lee, 2020) به ارزیابی خطر ریزش سنگ با استفاده از داده‌های اسکن لیزری و مدل‌سازی سه‌بعدی در GIS (مطالعه موردی کشور مالزی) پرداختند و نتایج نشان داد که مدل هیبریدی پیشنهادی می‌تواند مناطق منبع ریزش سنگ را در مقیاس منطقه‌ای به‌دقت شناسایی کند. المولات و همکاران (Elmoulat, Brahim, Elmahsani, Abdelouafi & Mastere, 2021) به ارزیابی تأثیر فضایی سقوط سنگ بر اساس دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های حساسیت ریزش سنگ در مراکش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. بر اساس نتایج، عوامل فاصله از گسل با امتیاز ۰/۷۴ درصد و عامل شیب با امتیاز ۰/۶۶ بیش‌ترین نقش را در ریزش سنگ داشته است. نانه کران و همکاران (Nanehkan, Licai, Chen, Azarafza) (Yimin, 2022) به استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارائه نقشه‌های حساسیت خطر برای خرابی‌های ریزش سنگ در کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد قسمت شمالی منطقه مورد مطالعه دارای خطرات بالایی برای شکست‌های ریزش سنگ است و مدل MLP نتایج محافظه‌کارانه‌تری نسبت به طبقه‌بندی کننده‌های دیگر ارائه می‌دهد. سیریللو و همکاران (Cirillo, Zappa, Tangari, Brozzetti) (Ietto, 2024) به تجزیه و تحلیل سقوط سنگ از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد و مدل‌های سه‌بعدی در منطقه ایتالیا پرداختند. نتایج نشان داد که واژگونی سنگ و لغزش مسطح و فروپاشی خمشی مستقیم فراوان‌ترین نوع مخاطره در این منطقه محسوب می‌شود. لوکس و همکاران (Lucks, Stilla, Hoegner & Holst, 2024) به پایش فتوگرامتری ریزش سنگ در محیط‌های آلپ با استفاده از M3C2 و بردارهای حرکت ردیابی شده پرداختند و نتایج نشان داد که روش ارائه‌شده وضوح فضایی نقاط مشاهده‌شده را در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری سنتی با استفاده از نقاط مشخص شده بهبود می‌بخشد. مخاطرات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش سنگ یکی

از خطرناک‌ترین مخاطرات طبیعی است که می‌تواند خسارات جانی و مالی زیادی را ایجاد کند. محور خلخال به شاهرود نیز به علت قرارگیری در یک منطقه کوهستانی، رخداد ریزش سنگ خسارات زیادی را در منطقه ایجاد کرده است. بنابراین شناخت نواحی مستعد برای اخذ تدابیر پیشگیرانه و مدیریت بحران، امری ضروری به شمار می‌رود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محور ارتباطی خلخال به شاهرود به طول ۶۰ کیلومتر در جنوبی‌ترین نقطه شهرستان خلخال در محدوده سیاسی استان اردبیل با مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 17' 37''$ تا $35^{\circ} 35' 49''$ عرض شمالی و $41^{\circ} 27' 48''$ تا $47^{\circ} 35' 48''$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). از ارتفاعات منطقه می‌توان به رشته‌کوه‌های تالش (باغرو داغ) در شرق و ارتفاعات غربی (فلات آذربایجان) اشاره کرد که بیش‌ترین ارتفاع منطقه ۲۴۰۰ متر و کم‌ترین ارتفاع ۱۳۲۸ متر است. در مسیر جاده خلخال به شاهرود سازندهای مختلفی دیده می‌شود، در نزدیکی خلخال سنگ‌های جدیدتر به سن پلیوسن و ائوسن که شامل آندرزیت و گنگلومرا است قرار دارد. از ۵ کیلومتری روستای خمس تا جنوبی‌ترین بخش منطقه بیش‌تر سنگ‌های منطقه از نوع آهک و شیل را شامل می‌شود که قدیمی‌ترین آن‌ها مربوط به اواخر پالئوزویک است. منطقه به لحاظ تکتونیک بسیار فعال بوده و تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی چین‌خوردگی‌های مختلفی در منطقه به صورت طاق‌دیس و ناودیس دیده می‌شود. طی این فعالیت تکتونیک گسل‌ها و شکستگی‌های مختلفی در منطقه دیده می‌شود که از اصلی‌ترین آن‌ها، گسل هروآباد یا شاهرود چای اشاره است. همچنین میکرو گسل‌های مختلفی در منطقه دیده وجود دارد که طی مطالعات میدانی شناسایی شده است (Vahabzadeh, 2023).



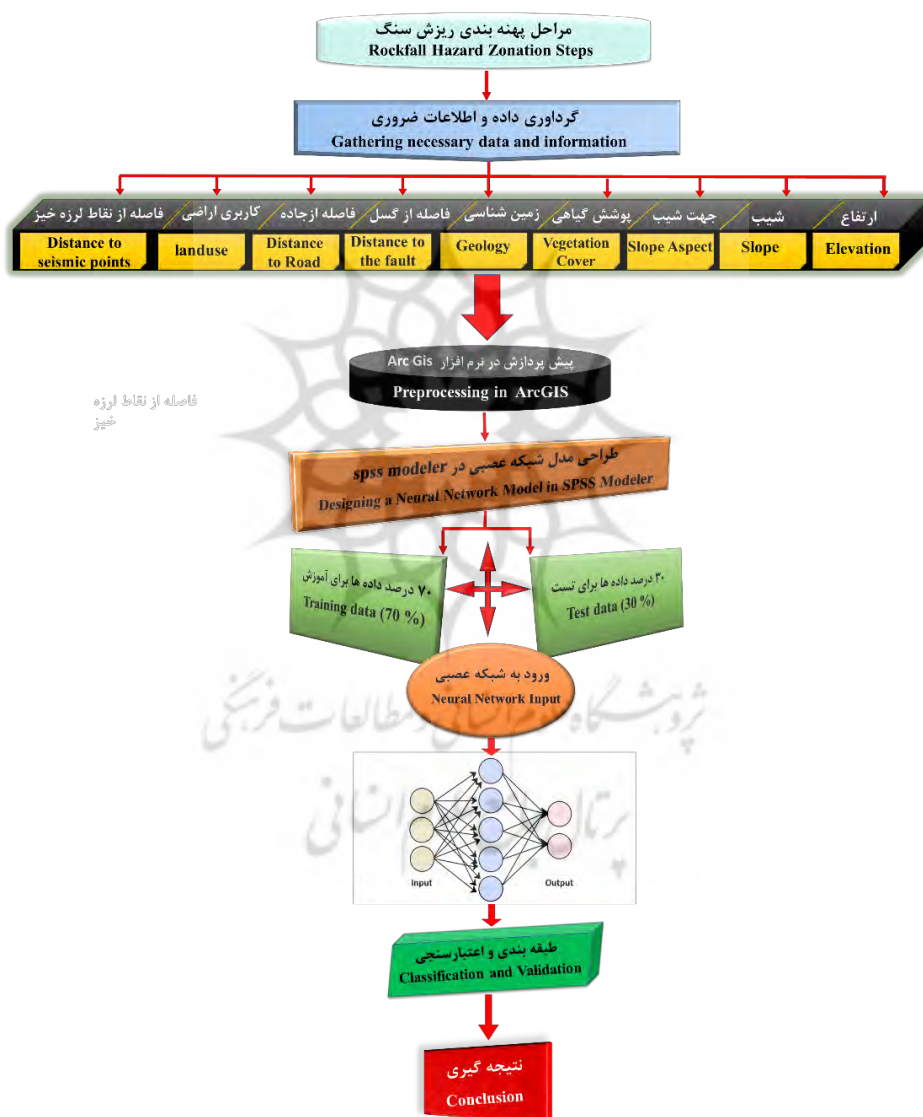
شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه

Fig.1. Study area location

۲-۲- روش انجام پژوهش

یکی از اساسی‌ترین مراحل انجام هر پژوهش جمع‌آوری داده و اطلاعات مختلف است در این پژوهش نیز داده و اطلاعات مختلفی به کار گرفته شده است که شامل: نقشه زمین‌شناسی استان اردبیل با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ که اطلاعات مربوط به گسل‌ها و لیتولوژی از این نقشه استخراج شده است. نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ که نقشه جاده‌ها و شبکه آبراهه اصلی از این نقشه استخراج شده و داده‌های میدانی نقاط ریزشی از طریق بازدید میدانی و دستگاه GPS برداشت شده است. داده‌ها و اطلاعات مهم سنجش‌ازدوری شامل: لایه پوشش گیاهی و لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای ماه ژوئن سال ۲۰۲۴ استخراج شده است. همچنین در بررسی دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی، ضریب کاپا ۰/۸۹ و صحت کلی

۹۲/۱۸ محاسبه گردید. نقشه ارتفاعی، نقشه شیب، نقشه جهت شیب از تصاویر ماهواره‌ای - ALOS PALSAR با قدرت تفکیک ۱۲ متری استخراج شده است. این پژوهش متکی بر کارهای میدانی، تحلیلی و آماری است. جهت تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها و اجرای مدل‌های تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS، SPSS Modeler، ENVI استفاده شده است (Vahabzadeh, 2023). تمام داده‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی در مرحله اول وارد نرم‌افزار Arc GIS شده و پردازش مقدماتی روی تمام لایه‌ها انجام شده است (شکل ۲)



شکل ۲-مراحل روش تحقیق

Fig.2. Steps of the research method

در این پژوهش آماده‌سازی تمام لایه‌های موردنیاز در پروسه پهنه‌بندی ریزش‌سنگ به‌صورت رستریایه انجام شده است. بنابراین تمام لایه‌های موردنیاز بعد از ایجاد شدن در نرم‌افزار Arc GIS باهم ادغام شده و یک تصویر رستری جدیدی ایجاد شده است. در این روش هر پیکسل شامل تمامی اطلاعات لایه‌های مورد استفاده را شامل می‌شود. لذا برای هر پیکسل با مشخصات تمامی لایه‌های دخیل، در صورت رخداد ریزش سنگ عدد یک و در صورت عدم رخداد ریزش سنگ مقدار صفر در نظر گرفته شده است (Esfandiary Darabad, Rahimi, Navidfar & Mehrvarz, 2020). این کار به این علت است که الگوریتم پرسپترون چندلایه تنها اطلاعات باینری را درک کرده و قادر است بر اساس مقادیر باینری سایر روابط و متغیرها را شناسایی و پیش‌بینی کند. مزیت این روش عدم هیچ‌گونه تغییرات از جانب کارشناس بر نتایج احتمالی پژوهش است (Yan et al., 2023). تصویر ادغام شده بعد از طبقه‌بندی برای مدل‌سازی الگوریتم پرسپترون چندلایه برای پهنه‌بندی ریزش سنگ وارد نرم‌افزار SPSS Modeler شده است. لایه اطلاعاتی آماده شده در محیط نرم‌افزار SPSS Modeler با نسبت ۷۰ درصد برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای اعتبار نتایج مدل طراحی شده است.

۲-۳- الگوریتم پرسپترون چندلایه

یکی از اجزای کلیدی در شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم پرسپترون چندلایه هستند که در پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری ادغام شده‌اند. الگوریتم پرسپترون چندلایه یک سازوکار محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آن‌ها، یک سری اطلاعات جدید را ارائه دهد (Lee, Ryu, Lee & Won, 2006). الگوریتم پرسپترون چندلایه اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت می‌کنند و برای هر یک از لایه‌های ورودی وزن اختصاص می‌دهد و وزن لایه‌ها را باهم ترکیب می‌کند. وزن‌های اختصاص داده شده در نهایت به لایه میانی منتقل می‌شوند و گره‌ها عملیات پردازش را بر روی وزن‌ها انجام می‌دهند (Delashmit & Manry, 2005). گره‌ها اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت کرده و با استفاده از وزن‌های خود، پردازش‌های مختلفی را اجرا می‌کنند و نتیجه این پردازش به‌صورت لایه خروجی از شبکه بهره‌مند می‌شود (Rana, Rawat, Bijalwan & Bahuguna, 2018). الگوریتم پرسپترون چندلایه شامل یک یا چندلایه میانی هستند که نورون‌های این لایه به‌عنوان نورون‌های مخفی شناخته می‌شوند و افزودن چندین لایه میانی باعث

افزایش توانایی شبکه در تحلیل‌های با پیچیدگی بالاتر می‌شود (Demuth, Beale, De Jess & Hagan, 2014). این الگوریتم‌ها به‌عنوان «شبکه‌های نظارت‌شده» شناخته می‌شوند به این معنا که نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل را می‌توان با مقادیر شناخته‌شده متغیرهای هدف مقایسه کرد (Rana et al., 2018). یکی از مزایای اصلی الگوریتم پرسپترون چندلایه در مقایسه با تکنیک‌های آماری کلاسیک، انعطاف‌پذیری و عدم وجود مفروضات توزیعی آن‌ها است (Yan et al., 2023). به‌عنوان مثال، الگوریتم پرسپترون چندلایه را می‌توان برای پیش‌بینی نتایج قطعی و پیوسته استفاده کرد. تعلیم الگوریتم پرسپترون چندلایه پیش‌خور شامل اختصاص وزن بین نورون‌ها بوده و در هر بار وزندهی، مجموعه‌های از ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب به‌عنوان نمونه به خدمت گرفته می‌شوند (Riedmiller & Leren, 2014). الگوهای احتمالاتی با یکدیگر برابر در نظر گرفته می‌شوند به این معنی که هیچ الگویی نسبت به سایر الگوها از اهمیت بیش‌تری برخوردار نیستند (Ramdhani et al., 2022). در ابتدا، وزن بین نورون‌ها به‌صورت تصادفی تعیین می‌گردد و سپس الگوی ارائه‌شده به شبکه با نتایج مطلوب مقایسه می‌شود، مسلماً خروجی‌های اولیه به نتایج مطلوب شبیه نبوده و دارای خطای نسبی نسبت به فاصله اقلیدسی بین خروجی محاسبه‌شده و نتایج مطلوب می‌باشد و از بین کم‌ترین میانگین خطا، وزن‌ها مطابق با میزان خطا، اصلاح شده و میزان آن‌ها کاهش می‌یابد (Zhao, Tian, Li & Ma, 2018).

۲-۴- روش طبقه‌بندی جنکس^۱

روش طبقه‌بندی جنکس در نرم‌افزار Arc Gis به‌عنوان یک روش مؤثر برای ترتیب‌دهی مقادیر در کلاس‌های مختلف ارائه‌شده است. این الگوریتم از یک‌روند تکراری برای گروه‌بندی داده‌ها استفاده می‌کند تا میانگین انحراف هر طبقه از میانگین کل را به حداقل برساند و به همراه آن، واریانس بین طبقه‌ها را به حداکثر افزایش دهد (Jahandar, Aghagolzadeh & Kazemitabar, 2020). مراحل این روش به شرح زیر بوده و تا زمانی که واریانس هر طبقه به کم‌ترین مقدار خود برسد، ادامه می‌یابد (Abdi Bastami, Memarian, Tajbakhsh & Azamy Rad, 2019).

۱. محاسبه مجموع مربع انحراف بین طبقات (SDBC)

¹ Jenks

۲. محاسبه مجموع مربع انحراف از میانگین (SDAM)^۱

۳. محاسبه مجموع مربع انحراف از میانگین طبقات (SDCM)^۲

پس از محاسبه مقادیر SDBC، از طبقه‌ای با بیش‌ترین مقدار SDBC به‌طرف طبقه‌ای که کم‌ترین مقدار SDBC را دارد یک واحد جابه‌جایی اعمال و انحراف طبقات جدید محاسبه می‌شود و این مراحل تا زمان به حداقل رسیدن مقدار انحراف طبقات ادامه می‌یابد که منجر به یافتن بهترین برازش واریانس^۳ (GVF) می‌گردد. مقادیر GVF بین صفر و یک متغیر بوده که صفر بدترین و یک بهترین برازش می‌باشد: (Abdi Bastami et al., 2019).

$$\text{رابطه (۱): } GVF = (SDAM - SDCM) / SDAM$$

۲-۵- اعتبار سنجی خروجی الگوریتم پرسپترون چندلایه

برای اعتبارسنجی داده‌ها و نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ از منحنی ROC در رابطه با خروجی داده‌ها استفاده شده است. منحنی ROC یک ابزار مؤثر روش‌ها برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های پیش‌بینی بوده که نشان‌دهنده این است که چقدر سیستم در تشخیص رخداد‌های مثبت و منفی موفق است (Gasemyan, Abedini, Roostai & Shirzadi, 2021). این منحنی یک محور x دارد که مقادیر عددی ورودی ریزش سنگ را که به‌عنوان عامل بی‌تأثیر در ریزش سنگ طبقه‌بندی شدند بر محور y که مقادیر عددی ورودی ریزش سنگ که به‌درستی شناخته شده‌اند را نمایش می‌دهد (Vahabzadeh, 2023).

$$\text{رابطه (۲): } X = \frac{n(tn)}{n(tn) + n(fn)} \quad (\text{Gasemyan et al., 2021})$$

$$\text{رابطه (۳): } Y = \frac{n(tp)}{n(tp) + n(fn)} \quad (\text{Gasemyan et al., 2021})$$

² Squared Deviations between Classes (SDBC)

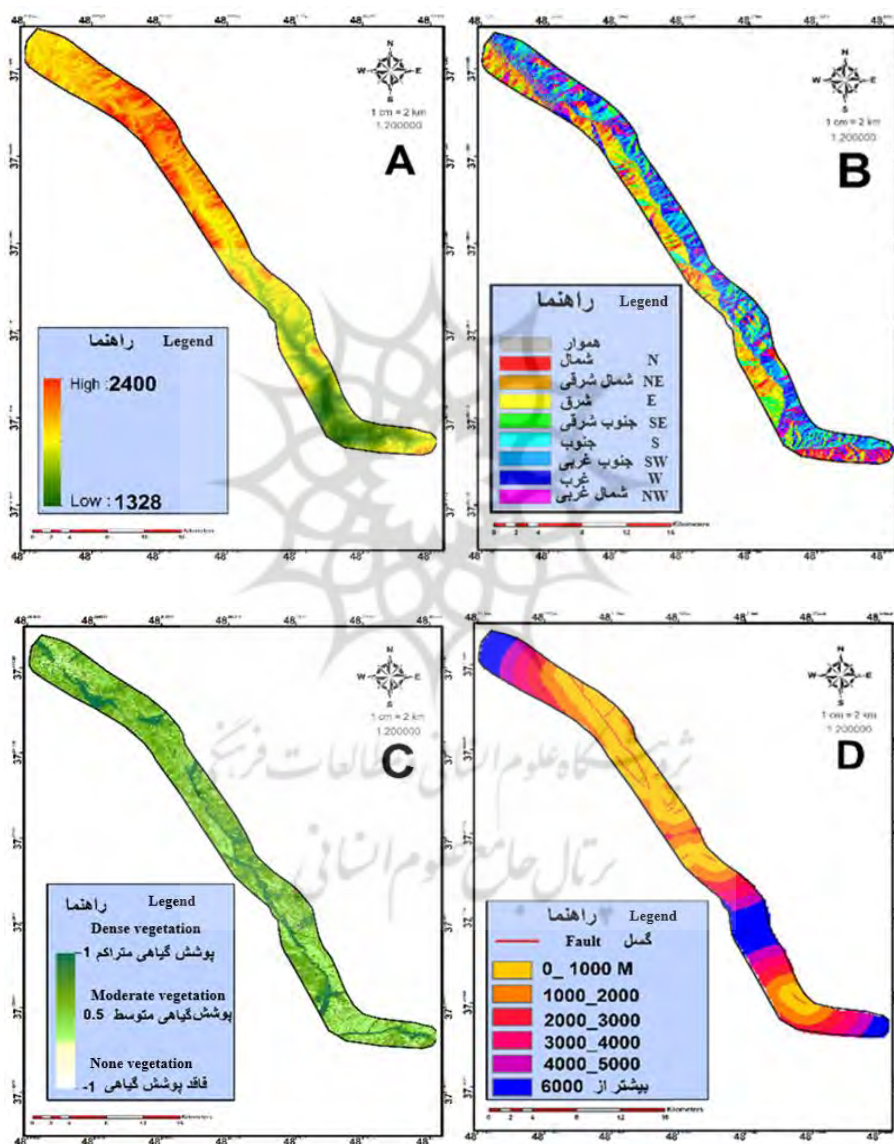
¹ Squared Deviations from the Array Mean (SDAM)

² Squared Deviations from the Class Means (SDCM)

³ Goodness of Variance Fit (GVF)

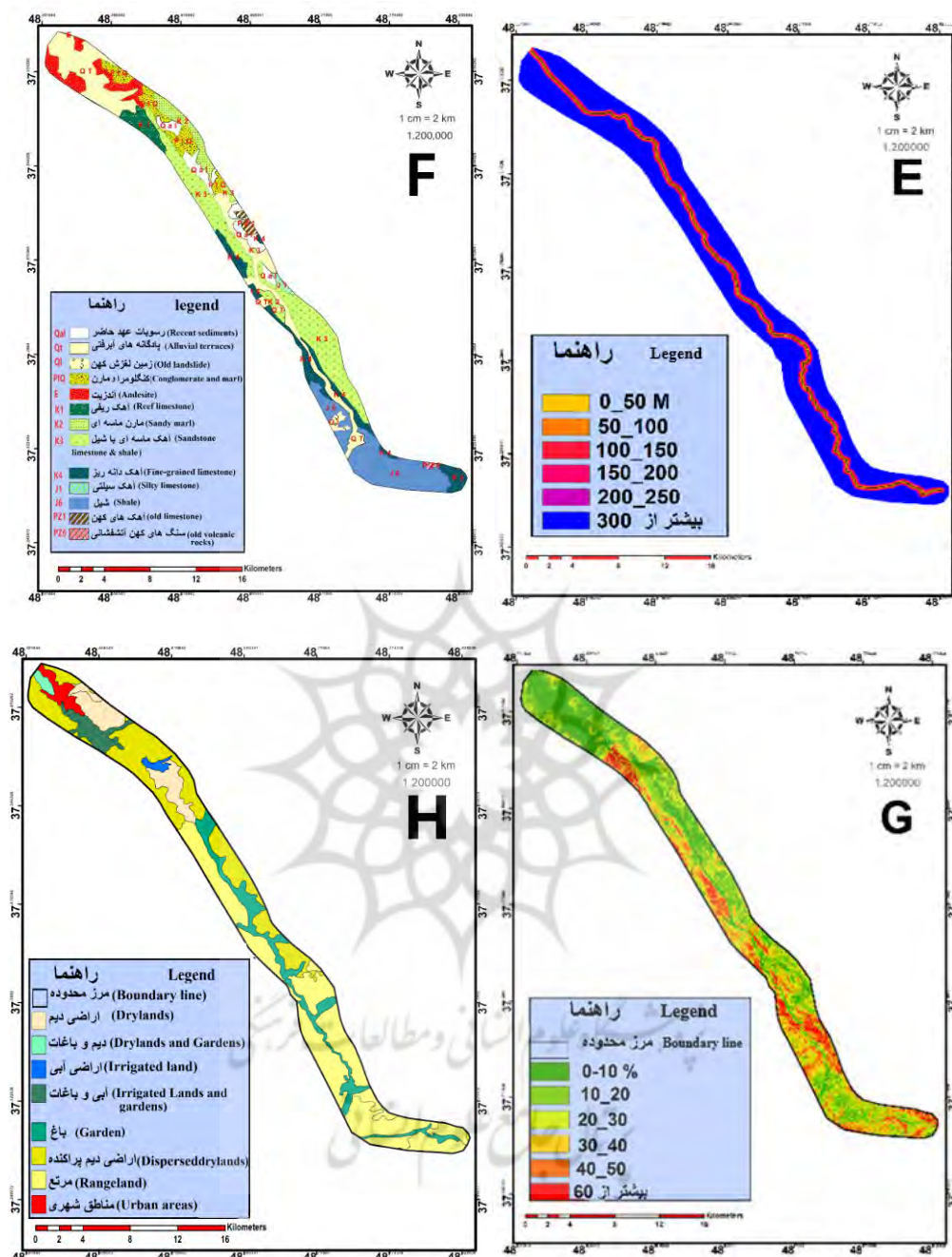
۳- نتایج و بحث

جهت مدل‌سازی و تهیه نقشه پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه، ۹ عامل انتخاب شده است (شکل ۳ تا ۵) که بعد از پیش‌پردازش و طبقه‌بندی وارد الگوریتم پرسپترون چندلایه شدند و مدل‌سازی انجام شده است.



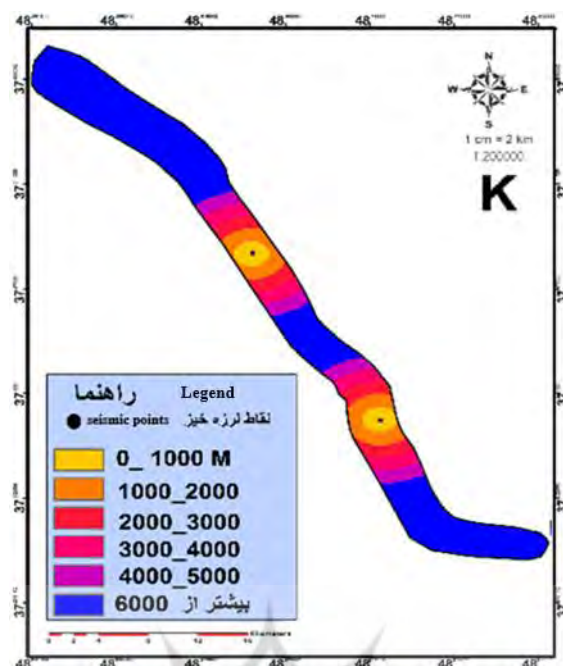
شکل ۳- A نقشه ارتفاع، B نقشه جهت شیب، C نقشه پوشش گیاهی، D نقشه فاصله از گسل

Fig.3. A Elevation Map B slope Aspect Map C Vegetation map D Distance to the fault



شکل ۴- E نقشه فاصله از جاده، F نقشه زمین شناسی، G نقشه شیب، H نقشه کاربری اراضی

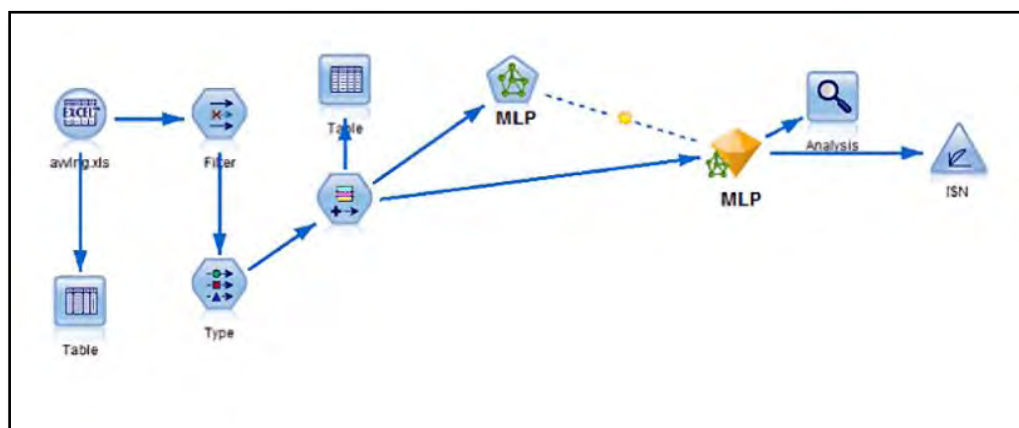
Fig.4. E Distance from Road F Geology Map G Slope Map H landuse Map



شکل ۵- K نقشه فاصله از نقاط لرزه‌خیز

Fig.5. K Distance from seismic points

در مرحله بعد اقدام به ساخت مدل در نرم‌افزار SPSS Modeler شده است. مدل اجرایی برای تحلیل خطر ریزش سنگ با ۹ نوروں ورودی و ۸ نوروں میانه و ۱ خروجی طراحی و اجرا شده است. در بخش اعتبار اولیه (شکل ۹) نشان‌دهنده این است که مدل طراحی شده ۹۸/۴ درصد در بخش فرایند آموزش و تخصیص درست داده‌ها موفق بوده است و می‌توان به نتایج آن اعتماد کرد. عموماً اعتبار اولیه مدل اگر بالای ۵۰ درصد باشد در روند مدل‌سازی و تحلیل می‌توان از خروجی آن استفاده کرد و در این پژوهش اعتبار اولیه از رتبه بسیار خوبی برخوردار است.



شکل ۶- مدل طراحی شده در SPSS Modeler

Fig.6. A model created in the SPSS Modeler

با توجه به (جدول ۱) نتایج نشان‌دهنده این است که در الگوریتم پرسپترون چندلایه بیش‌ترین ارزش وزنی برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ بوده که نشان‌دهنده این است که ریزش سنگ و خطرات ناشی از آن بیش‌تر وابسته به این متغیرها است. همچنین کم‌ترین مقادیر وزنی نیز مربوط به لایه‌های جهت شیب با مقدار ۰/۰۵، فاصله از گسل ۰/۰۹۸، فاصله از نقاط لرزه‌خیز ۰/۰۹۳ بوده که نشان‌دهنده این است که مقادیر اختصاص داده‌شده مدل بیش‌تر از عوامل تکنیکی، بر روی پارامترهای محیطی وابسته است. همچنین نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات امیرپور کوهساره (Amirpour Kohsareh, 2018) که به بررسی مخاطرات ژئومورفولوژیکی دامنه‌های جاده ارتباطی اردبیل سرچم با تأکید بر ریزش و لغزش با استفاده از مدل منطق فازی پرداخته است، دارای شباهت و تفاوت‌هایی می‌باشد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عامل زمین‌شناسی و شیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش و ریزش در منطقه دارد و متغیرهای فاصله از جاده، جهت شیب و ارتفاع در درجه دوم تأثیرات زیادی را می‌گذارند. همچنین در مقایسه با نتایج این تحقیق نیز مؤثرترین عامل در رخداد ریزش سنگ عامل زمین‌شناسی و کاربری اراضی همراه با فاصله از جاده می‌باشد که با توجه به نتایج دو پژوهش، شباهت‌های زیادی وجود دارد. همچنین در بخش مدل‌سازی در این تحقیق از الگوریتم پرسپترون چندلایه استفاده شده درحالی‌که در تحقیق امیرپور کوهساره (Amirpour Kohsareh, 2018) از مدل منطق فازی استفاده شده است.

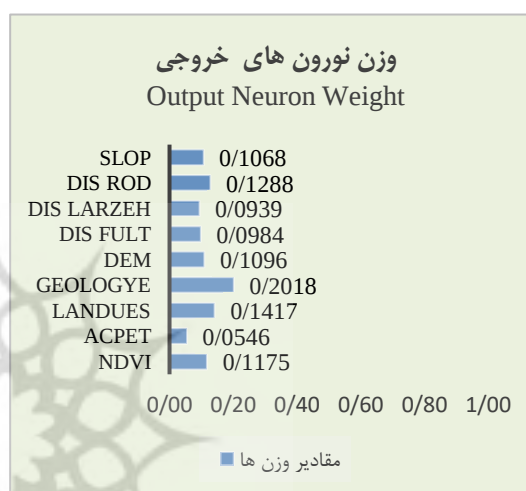
با توجه به عملکرد و نوع معماری هر دو مدل، الگوریتم پرسپترون چندلایه با توجه به معماری و الگوبرداری از شبکه عصبی مغز انسان، در طبقه‌بندی و پیش‌بینی متغیرها عملکرد خوبی نسبت به مدل منطق فازی دارد.

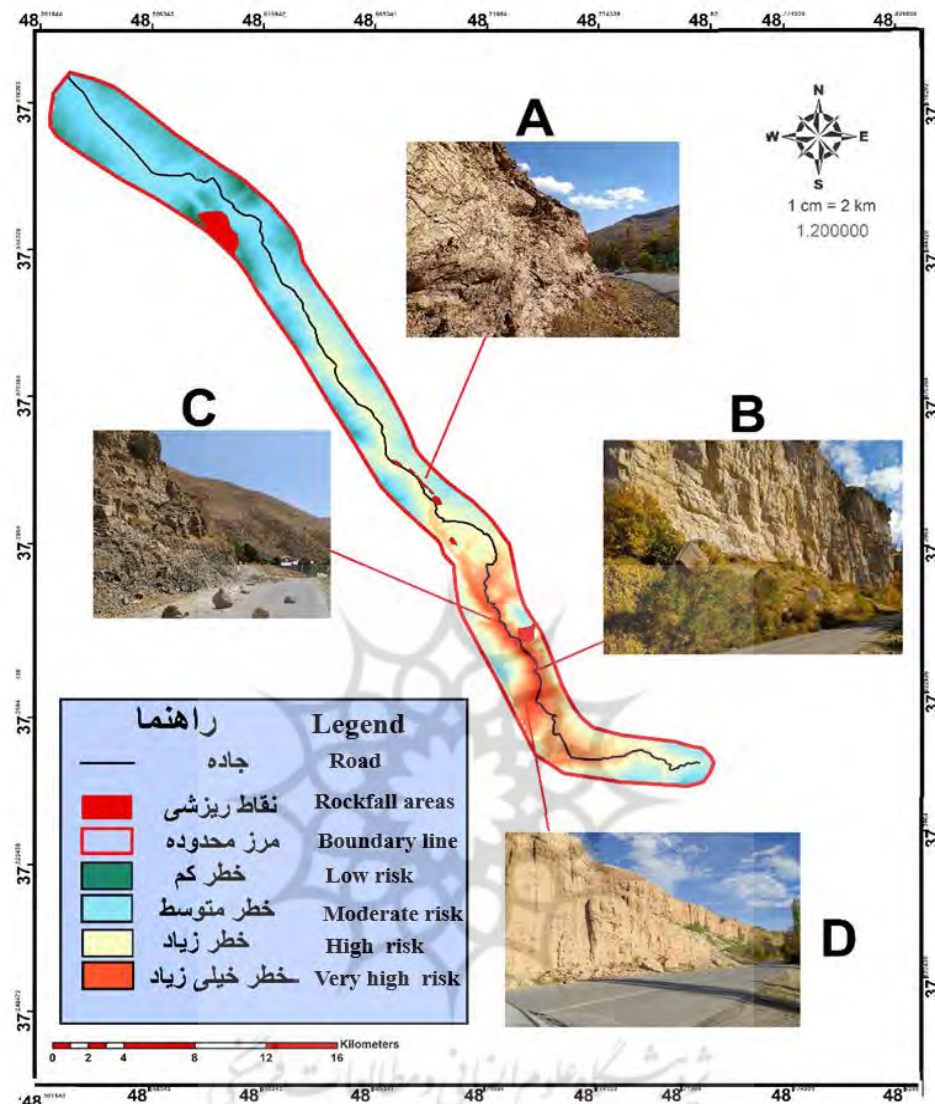
جدول ۱-مقادیر وزنی خروجی مدل

نورون ورودی	وزن نورون خروجی
Input Neuron	Output Neuron Weight
NDVI	0.1175
ASPECT	0.0546
LANDUES	0.1417
geology	0.2018
DEM	0.1096
dis fault	0.0984
dis larzeh	0.0939
dis rod	0.1288
SLOPE	0.1068

شکل ۷- نمودار وزنی خروجی مدل

Fig.7. Weighted graph of the model output





شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه: A محدوده روستای اسبو،

B محدوده روستای شال، C محدوده روستای شال، D محدوده روستای گیلوان

Fig.8. Rockfall risk zoning map using multilayer perceptron algorithm:

A Asbou vilage B Shal vilage C Shal vilage D Gilvan vilage

در ادامه بعد از اتمام مدل‌سازی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ، نقشه نهایی در چهار طبقه با روش جنکس طبقه‌بندی شده است. مساحت مناطق خطرناک در چهار رتبه به صورت: کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است. طبق (جدول ۲) نیز مساحت طبقات خطرپذیری نشان‌دهنده این است که در

الگوریتم پرسپترون چندلایه بیش‌ترین طبقه به لحاظ خطرپذیری دارای مقدار $27/99$ کیلومترمربع، برای طبقه خطرپذیری زیاد مقدار $31/61$ کیلومترمربع، در بخش خطرپذیری متوسط نیز مقدار $40/01$ کیلومترمربع، در طبقه خطرپذیری کم نیز مقدار $30/55$ کیلومترمربع اختصاص داده شده است. به لحاظ پراکنش طبقات خطرپذیری ۹۸ درصد از طبقات خطرپذیری زیاد تا خیلی زیاد در بخش جنوبی منطقه گسترش دارد و بخش شمالی منطقه به لحاظ داشتن خطرپذیری در طبقه کم تا متوسط قرار دارد. همچنین براساس تحلیل تأثیرگذاری عوامل ۹ گانه در رخداد ریزش سنگ، در عامل زمین‌شناسی بیش‌تر ریزش سنگ‌ها در لایه‌های سنگی مربوط به آهک و شیل می‌باشد. همچنین پهنه خطرپذیری زیاد تا خیلی‌زیاد نیز در بخش سنگ‌های آهک و شیل به سن ژوراسیک و کرتاسه گسترش دارند. لایه کاربری اراضی برای منطقه در ۸ طبقه، طبقه‌بندی شده است و از بین این طبقات، اراضی مرتعی بیش‌ترین تأثیر را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد، بیش‌تر این مراتع به‌صورت کوه‌ها و تپه‌های چین‌خورده است و این عامل در کنار استخراج سنگ‌آهک باعث شده ریزش سنگ در این بخش رخ دهد. فاصله از جاده به علت کوهستانی بودن منطقه در تأثیرگذاری رخداد ریزش سنگ، بسیار مهم است. لایه فاصله از جاده در ۶ طبقه و بین بازه ۵۰ تا ۳۰۰ متر اختصاص داده شده است. طبقات ۵۰ تا ۲۰۰ متری با جهت جغرافیایی جنوبی بیش‌ترین نقش را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد. لایه شیب نیز در طبقات ۳۰ تا ۶۰ درجه بالاترین تأثیر را در منطقه دارد همچنین جهت شیب نیز در جهت‌های جنوب، جنوب غربی، جنوب شرقی بیش‌ترین تأثیر را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد. عامل پوشش گیاهی نیز بین منفی ۱ تا مثبت ۱ طبقه‌بندی شده است، طبقات ۰/۵ تا ۱ بالاترین تأثیر را دارد. بیش‌تر پوشش گیاهی در منطقه به‌صورت گون و درختچه‌های متراکم است و رویش این پوشش گیاهی در شکاف و صخره سنگ‌های آهک باعث فشار به دیواره‌ها شده و سبب ریزش سنگ می‌شود. عامل فاصله از گسل و نقاط لرزه‌خیز نیز به‌عنوان عوامل تکتونیکی در طبقات ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متری طبقه‌بندی شده است و نسبت به سایر عوامل نقش کم‌تری دارند.

جدول ۲- مساحت طبقات خطرناک

Table-2 Range of the hazard classes

مساحت Area (km ²)	طبقات ارزیابی خطر ریزش سنگ بر اساس مدل پرسپترون چندلایه Range of the rockfall hazard classes using multilayer perceptron algorithm
30.55	خطرپذیری کم (Low risk class)
40.01	خطرپذیری متوسط (Moderate risk class)
37.61	خطرپذیری زیاد (High risk class)
27.99	خطرپذیری خیلی زیاد (Very high risk class)

۳-۱- اعتباری سنجی نتایج با نمودار ROC

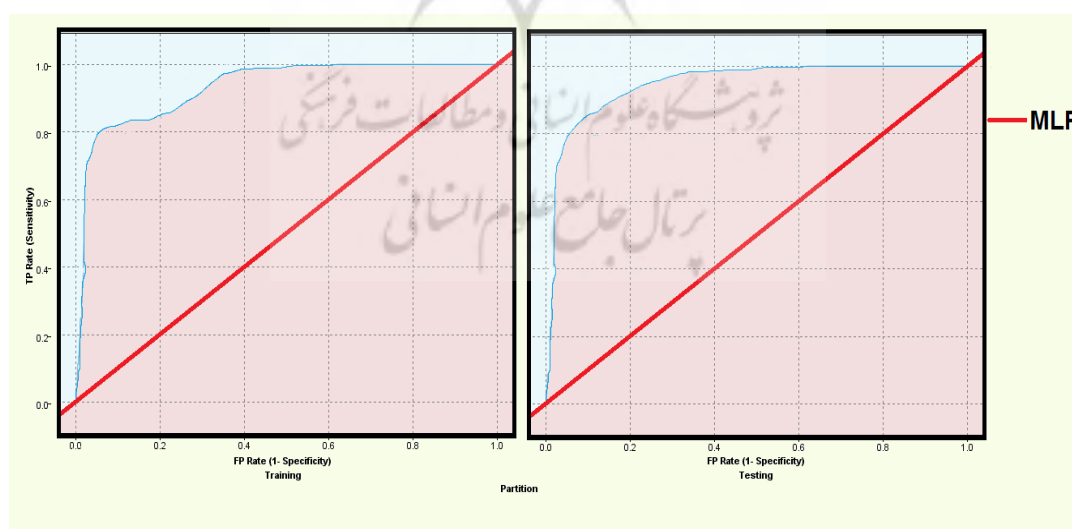
مقادیر ROC بین بازه ۰ تا ۱ بوده بنابراین هرچه مقدار ROC به ۱ نزدیک تر باشد مدل دارای اعتبار بالاتری است. این منحنی هم برای داده‌های آموزشی و هم برای داده‌های تست شبکه اجرا شده است. همچنین اعتبارسنجی بخش تست شبکه نیز به عنوان بخش نهایی در اعتبار سنجی شناخته می‌شود که برحسب نوع و میزان آموزش کیفیت داده‌های خروجی نیز متغیر است. با توجه به (جدول ۳) که میزان موفقیت مدل الگوریتم پرسپترون چندلایه را در شناخت مناطق فعال به لحاظ خطر ریزش سنگ نشان می‌دهد، مدل طراحی شده با مقدار ۹۸/۳۱ درصد در بخش آموزش توانسته مناطق خطرناک را شناسایی کند و تنها ۱/۶۲ درصد دارای خطا بوده و مناطق خطرناک به لحاظ خطر ریزش سنگ را نتوانسته مشخص کند. در بخش آموزش جمعاً ۷۰ درصد داده‌های کل استفاده شده که دارای مقدار ۴۶۹۸ عدد می‌باشد. از این تعداد ۴۶۲۲ عدد در زون خطرناک شناسایی شده و ۷۶ عدد دارای خطا بوده است. همچنین در بخش مهم تست الگوریتم پرسپترون چندلایه نیز خروجی مدل نمایان گر این است که دقت مدل برای شناسایی مناطق خطرناک ۹۸/۳۱ درصد بوده و تنها مقدار ۱/۶۹ درصد در شناخت مناطق خطرناک دچار خطا بوده است. از داده‌های مورد استفاده در بخش تست شبکه جمعاً ۳۰ درصد به مقدار ۲۰۱۲ عدد استفاده شده که از این مقدار ۱۹۷۸ عدد در زون خطرناک و تنها ۳۴ عدد به اشتباه شناسایی شده است.

جدول ۳- نتایج آموزش و تست مدل

Table3- Training and testing model results

Partition	Training		Testing	
Correct	4,622	98/38%	1978	98/31%
Wrong	76	1/62%	34	1/69%
Total	4,698		2012	

با توجه به شکل ۹ که در بخش اول مربوط به قسمت آموزش الگوریتم پرسپترون چندلایه است، میزان اعتبار نشان‌دهنده این است که مدل به‌خوبی آموزش‌دیده و توانسته بخش زیادی از مناطق خطرناک به لحاظ ریزش سنگ را شناسایی کند. معیار این منحنی به‌گونه‌ای است که خطوط رسم شده هرچه دارای فاصله بیشتری از منحنی قرمز اصلی باشد، دارای اعتبار بالایی است. همچنین در نمودار بالا منحنی آبی به سمت چپ مایل شده و به سمت بالا روانه شده که این حالت هم نمایانگر اعتبار بالایی مدل در بخش آموزش می‌باشد (Vahabzadeh, 2023). بنابراین آموزش صحیح مدل سبب شده که نتایج خروجی در بخش تست نیز روند اعتبار بالا را نشان دهند. مقدار AUC عدد ۰/۹۸۱۰ در بخش آموزش و ۰/۹۸۷۶ در بخش تست شبکه را نمایش می‌دهد که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی بوده و نتایج خروجی آن قابل‌اعتماد است.



شکل ۹- نمودار اعتبار سنجی ROC

Fig.9. ROC curves estimated for validity model

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه پرداخته است. بدین منظور از داده‌ها و اطلاعات مختلفی استفاده شده که شامل نقشه زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی، داده‌های سنجش‌ازدوری می‌باشد. ریزش سنگ یکی از پدیده‌های خطرناک در مناطق کوهستانی است که رخداد آن می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را بر تأسیسات انسانی و محیط طبیعی وارد کند. نتایج این پژوهش نشان داد، بیش‌ترین ارزش وزنی برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ بوده است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که ریزش سنگ و خطرات ناشی از آن بیشتر وابسته به این متغیرها می‌باشد. همچنین کم‌ترین مقادیر وزنی نیز مربوط به لایه‌های جهت شیب با مقدار ۰/۰۵، فاصله از گسل ۰/۰۹۸، فاصله از نقاط لرزه‌خیز ۰/۰۹۳ اختصاص داده شده که نشان‌دهنده این است که مقادیر اختصاص داده شده مدل، بیش‌تر از عوامل تکتونیکی، به پارامترهای محیطی وابسته است. قرارگیری سنگ‌های رسوبی مختلف مثل آهک و سنگ‌های تخریبی موجب شده که ساختمان دامنه‌ها در مواجهه با نیروهای دینامیک بیرونی پایداری خود را از دست بدهند. سنگ‌های آهک و شیل و بیش‌تر سنگ‌های رسوبی دارای مقاومت برشی کمی هستند و در مواجهه با آب و تداوم ذوب و یخ بستن، ترک‌های زیادی بر روی آن‌ها ایجاد می‌شود. همچنین سنگ‌های رسوبی به‌ویژه آهک و شیل در مواجهه با انحلال، قدرت کمی دارند و این عوامل باعث می‌شود که سطح برون‌زدگی سنگ در دامنه‌ها ناپایدار شده و تحت تأثیر یک عامل بیرونی شروع به ریزش سنگ کند. تغییرات کاربری اراضی چندان‌ی در منطقه از سوی افراد محلی و کشاورزی دیده نمی‌شود ولی بیش‌تر تغییرات کاربری اراضی جنبه صنعتی دارد و توسط فعالیت‌های معدنی مختلف در منطقه صورت گرفته شده است. منطقه موردنظر یکی از مناطق مستعد در جهت استخراج مواد معدنی مختلف است که وجود توده‌های سنگ‌آهک سبب شده معادن مختلفی در سطح منطقه فعالیت کنند. یکی از مشکلات این معادن قرارگیری آن‌ها در حریم جاده‌ای است که سبب شده بیش‌تر دامنه‌ها تحت اثر فعالیت معدن ناپایدار شود و آماده ریزش سنگ باشد. همچنین تغییرات و توسعه شبکه راه‌ها به‌ویژه در جاده خلخال به شاهرود در چند دهه اخیر سبب شده است که بیش‌تر دامنه‌های مشرف به جاده بریده شده و تبدیل به جاده شود. جاده‌های ارتباطی مهمی از منطقه عبور می‌کند که بر روند

توسعه اقتصادی و رشد صنعت حمل‌ونقل کل استان اردبیل تأثیر مثبتی دارد. به‌صورت کلی دخالت عوامل طبیعی در رخداد ریزش سنگ در منطقه نسبت به عوامل انسانی کم بوده و روند طبیعی چرخه تغییرات سطح دامنه به‌صورت متعادل در حال انجام است، درحالی‌که دخالت عوامل انسانی در این چرخه باعث شده است که روند تغییرات سرعت زیادی به خود بگیرد و رخداد ریزش سنگ در منطقه بیش‌تر شود.

همچنین الگوریتم پرسپترون چندلایه نشان داد که خروجی این مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست شبکه دارای اعتبار بالایی است و می‌توان در پهنه‌بندی ریزش سنگ مورد استفاده قرار گیرد. منحنی ROC دارای مساحت زیر منحنی زیادی است و مقدار AUC عدد ۰/۹۸۱۰ در بخش آموزش و ۰/۹۸۷۶ در بخش تست شبکه را نمایش می‌دهد که گویای این امر می‌باشد که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی است و در رتبه عالی قرار گرفته است. همچنین هم‌پوشانی مناطق خطرناک به لحاظ رخداد ریزش سنگ با نقاط واقعی برداشت‌شده با دستگاه GPS بالا بوده که نشان‌دهنده این است که اعتبار خروجی مدل قابل‌اعتماد است. درنهایت پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای مطالعه و ارزیابی ریزش سنگ و حرکات دامنه‌ای از مدل‌های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی استفاده شود. همچنین با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی و سایر عوامل، راهکارهای مدیریتی را می‌توان اتخاذ کرد که از رخداد مخاطرات دامنه‌ای در این محور جلوگیری کرده و درصد خسارات را کاهش داد. ازجمله این راهکارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- اصلاح زاویه و شیب دامنه‌ها.

۲- نصب توری‌های لانه‌زنبوری و همچنین پایداری سطح دامنه از طریق حفر عمودی در داخل سنگ‌های دامنه و جاگذاری میله‌های آهنی متناوب.

۳- عمل تخلیه مصنوعی با استفاده از مواد منفجره.

References

- Abdi Bastami, S., Memarian, H., Tajbakhsh, S. M., & Azamy Rad, M. (2019). Prioritization of landslide effective factors using logistic regression (Case study: A part of KopeDagh- Hezar Masjed Zone). *Journal of Watershed Management Reserch*, 10(19), 154-170. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.10.19.154>
- Abedini, M., & Piroozi, E. (2020). Landslide hazard Zoning with Using Combination Methods of Hot Spot, ANP and WLC (Case Study: Khalkhal County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(4), 19-36. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81836>
- Abedini, M., Mozafari, H., & Faal Naziri, M. (2019). Investigating and comparing the effectiveness of information value models and frequency ratio coefficient and Shannon's entropy in zoning rock fall risk (case study: Zanjan-Teham-Taram road). *Journal of the Geographical Studies of Mountainous Areas*, 3(1), 55-75. [In Persian] <http://dx.doi.org/Doi:10.52547/gsm.3.1.55>
- Amirpour Kohsareh, S. (2018). *Investigating geomorphological hazards of Ardabil to Sarcham road with emphasis on rockfall and landslide using fuzzy logic model*. Master's thesis, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]
- Asghari Saraskanrod, S., & Mozafari, H. (2020). Estimate and Comparison of Frequency Ratio and Network Analysis models in Rock falling Zoning(Case study Zanjan road to Taham and Tarom). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(4), 123-142. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.4.123>
- Cirillo, D., Zappa, M., Tangari, A. C., Brozzetti, F., & Ietto, F. (2024). Rockfall analysis from UAV-based photogrammetry and 3D models of a cliff area. *Drones*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.3390/drones8010031>
- Delashmit, W. H., & Manry, M. T. (2005). *Recent developments in multilayer perceptron neural networks*. Paper presented of the 17th Annual Memphis Area Engineering and Science Conference, MAESC (7). <https://ipnnl.uta.edu/publications/recent/>
- Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). *Neural network design*. United States: Martin Hagan. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2721661>
- Elmoulat, M., Brahim, L. A., Elmahsani, A., Abdelouafi, A., & Mastere, M. (2021). Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenviromental Disasters*, 8, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00192-0>
- Emami, S. N., & Yousefi, S. (2023). Comparison of the efficiency of some machine learning models for mass movement susceptibility mapping (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 33(2), 183-204. [In Persian] <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.345954.2003>

- Esfandiary Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A., & Mehrvarz, A. (2020). Assessment of landslide sensitivity by neural network method and Vector machine algorithm (Case study: Heyran Road -Ardebil province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 18-33. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_122210.html
- Eskandari, M. R., Nazarpour, A., & Khayat, N. (2023). Rockfall risk Mapping Using Multiple Criteria Decision Making (MCDM) AHP, and Fuzzy-Gamma methods in Khorramabad-Pole-Zal Freeway. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(35), 139-156. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.41400.1872>
- Fanos, A. M., Pradhan, B., Alamri, A., & Lee, C. W. (2020). Machine learning-based and 3d kinematic models for rockfall hazard assessment using LiDAR data and GIS. *Remote Sensing*, 12(11), 1755. <https://doi.org/10.3390/rs12111755>
- Gasemyan, B., Abedini, M., Roostai, S., & Shirzadi, A. (2021). Landslide susceptibility assessment using a novel ensemble algorithm based model (Case Study: Kamyaran city, Kurdistan province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(4), 130-146. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1400.9.4.8.6>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Ghigi, S. (2004). Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental management*, 34(2), 191-208. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0021-6>
- Hatamifar, R., Mousavi, S.H., & Alimoradi, M. (2012). Landslide hazard zonation using AHP model and GIS technique in Khoram Abad City. *Geography and Environmental Planning*, 23(3), 43-60. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1391.23.3.3.5>
- Jaccard, C. J., Abbruzzese, J. M., & Howald, E. P. (2020). An evaluation of the performance of rock fall protection measures and their role in hazard zoning. *Natural Hazards*, 104(1), 459-491. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04177-4>
- Jahandar, S., Aghagolzadeh, A., & Kazemitabar, J. (2020). Blind Recognition of Block Code Parameters in the Presence of High SNR Using Statistical Techniques. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 10(4), 373-381. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1398.10.4.4.2>
- Jiang, N., Li, H. B., & Zhou, J. W. (2021). Quantitative hazard analysis and mitigation measures of rockfall in a high-frequency rockfall region. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 3439-3456. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02137-1>
- Lee, S., Ryu, J. H., Lee, M. J., & Won, J. S. (2006). The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology*, 38, 199-220. <https://doi.org/10.1007/s11004-005-9012-x>
- Lucks, L., Stilla, U., Hoegner, L., & Holst, C. (2024). Photogrammetric rockfall monitoring in Alpine environments using M3C2 and tracked motion vectors. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100058>

- Nakajima, S., Abe, K., Shinoda, M., Nakamura, S., & Nakamura, H. (2021). Experimental study on impact force due to collision of rockfall and sliding soil mass caused by seismic slope failure. *Landslides*, 18, 195-216. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01461-z>
- Nanehkaran, Y. A., Licai, Z., Chen, J., Azarafza, M., & Yimin, M. (2022). Application of artificial neural networks and geographic information system to provide hazard susceptibility maps for rockfall failures. *Environmental Earth Sciences*, 81(19), 475. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10603-6>
- Negahban, S., Jahan Tighmand, S., & Rahimi Herabadi, S. (2020). Explaining the Position of Positivism and Critical Methods in Geomorphic Hazard (Case: Rockfalls Hazard on Rudbar-Rostamabad Freeway). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 52-66. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_109534.html
- Ramdhani, Y., Mustofa, H., Topiq, S., Alamsyah, D. P., Setiawan, S., & Susanti, L. (2022). *Sentiment analysis twitter based lexicon and multilayer perceptron algorithm*. Paper presented of the 10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM), Yogyakarta, Indonesia, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CITSM56380.2022.9936029>
- Rana, A., Rawat, A. S., Bijalwan, A., & Bahuguna, H. (2018). *Application of multi layer (perceptron) artificial neural network in the diagnosis system: a systematic review*. Paper presented of the 2018 International conference on research in intelligent and computing in engineering (RICE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/RICE.2018.8509069>
- Riedmiller, M., & Lernen, A. (2014). *Multi layer perceptron*. In Machine Learning Lab Special Lecture. Germany: University of Freiburg.
- Vahabzadeh, M. (2023). *Risk zoning of skirts on Khalkhal road to Shahroud using artificial neural network system*. Master's thesis, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]
- Yan, J., Zeng, S., Tian, B., Cao, Y., Yang, W., & Zhu, F. (2023). Relationship between highway geometric characteristics and accident risk: A multilayer perceptron model (MLP) approach. *Sustainability*, 15(3), 1893. <https://doi.org/10.3390/su15031893>
- Zhao, H., Tian, W. P., Li, J. C., & Ma, B. C. (2018). Hazard zoning of trunk highway slope disasters: a case study in northern Shaanxi, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 1355-1364. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1178-1>