



Analyzing the Factors Influencing Avalanche Occurrence Using Multivariate Statistical Methods (Case Study: Karaj Dam Watershed)

Majid Kazemzadeh ^{1*}, Zahra Noori ²

¹ Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdows University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 30 January 2026

Revised: 11 April 2026

Accepted: 15 April 2026

Available Online: 19 April 2026

Keywords:

Avalanche Occurrence

Multivariate Statistical Analysis

Cluster Analysis

Discriminant Function Analysis

Karaj Dam

ABSTRACT

Avalanches are among the most significant natural hazards in the mountainous regions of the Central Alborz, particularly in areas with tourism activities and sensitive infrastructure, where they pose a serious threat to human life and economic systems. The objective of this study is to identify and analyze the factors influencing avalanche occurrence in the upstream area of the Karaj Dam watershed using multivariate statistical methods. Avalanche occurrence data for the period 2023–2024 were collected based on field observations and local evidence, including 150 avalanche points and 142 non-avalanche points used as control data. In addition, 20 topographic, morphometric, geological, land use, and climatic variables were extracted using a 10 m resolution Digital Elevation Model (DEM), station-based climatic records, and thematic maps. Principal Component Analysis (PCA) was applied to reduce data dimensionality and extract dominant underlying patterns. Hierarchical clustering using Ward's method was performed to group variables with similar characteristics, and Discriminant Function Analysis (DFA) was used to differentiate avalanche-prone and non-avalanche areas. The PCA results led to the extraction of six independent components that collectively explained 81.51% of the total variance. Based on the clustering outcomes, the variables influencing avalanche occurrence were categorized into three homogeneous clusters. The DFA results showed that Relative Slope Position, Valley Depth, Topographic Wetness Index, and Distance to River had the highest discriminative power between avalanche and non-avalanche areas. The overall classification accuracy of the model was 85.9%, while the cross-validation accuracy reached 84.5%, demonstrating the high effectiveness of multivariate statistical approaches in predicting avalanche occurrence.

* Corresponding author: Majid Kazemzadeh

E-mail address: Kazemzadeh@um.ac.ir

How to cite this article: Kazemzadeh, M., & Noori, Z. (2026). Analyzing the Factors Influencing Avalanche Occurrence Using Multivariate Statistical Methods (Case Study: Karaj Dam Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 118-140. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.97613.1644>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Avalanches are one of the most significant natural hazards in the mountainous regions of the Central Alborz, particularly in areas with tourism activities and sensitive infrastructure. Avalanches pose a serious threat to human lives and economic activities, especially in areas with tourism and critical infrastructure. Every year, avalanches cause considerable damage to residential areas, transportation routes, and vital infrastructures. Therefore, identifying areas prone to avalanches and implementing appropriate measures to control and mitigate them plays a crucial role in managing and reducing the impacts of this natural phenomenon. Several factors influence the formation and occurrence of avalanches, with the most important being snow cover characteristics, meteorological factors such as the type and amount of precipitation, temperature, and morphological features including slope, aspect, elevation, slope curvature, land use, and geological conditions. In recent years, global climate changes, which are primarily associated with rising temperatures, have significantly altered weather patterns in terms of spatial and temporal distribution. This warming affects the formation, stability, and transformation of snow cover, which in turn influences avalanche occurrence. The increase in temperature enhances the freeze-thaw cycles, contributing to the formation of weak layers in snow masses. Therefore, the objective of this research is to identify and analyze the factors affecting avalanche occurrence in the upstream area of the Karaj Dam watershed, including the sub-watersheds of Velayat Rud, Kasil Nesa, and Varange Rud, using multivariate statistical methods.

Material and Methods

In this study, the factors influencing avalanche occurrence were analyzed, focusing on morphological, topographical, climatic, and environmental characteristics. For this purpose, 20 factors affecting avalanche occurrence were considered, including morphometric, topographical, geological, geomorphological, land use, and climatic variables. Avalanche occurrence data were collected based on field observations, historical evidence, and surveys conducted between 2023 and 2024. A total of 150 avalanche-prone points from 50 potential areas were identified, and 142 non-avalanche points were selected as control data. To reduce data dimensions and identify the most significant factors, Principal Component Analysis (PCA) was used. For clustering areas with similar features, hierarchical clustering with the Ward method was employed. Then, to differentiate and compare avalanche-prone and non-prone areas, Discriminant Function Analysis (DFA) was applied. Statistical tests such as KMO, Bartlett's test, Wilks' Lambda, and cross-validation were used to evaluate the models. The statistical and processing analyses in this study were performed using ArcGIS, SAGA GIS, SPSS, and R software.

Results and Discussion

The results of the Principal Component Analysis (PCA) showed that six principal components were extracted, which explained 81.51% of the total data variance. The first component indicated the relative position of the slope and the distance from rivers, the second component showed elevation, precipitation, and temperature, and the third component represented plan curvature and slope length index. Other components highlighted slope, terrain ruggedness index, aspect, and profile curvature, showing the role of topography and solar radiation in avalanche occurrence. Hierarchical clustering analysis identified three homogeneous clusters: The first cluster included topographic ruggedness index (TRI), slope, aspect, valley depth (VD), topographic wetness index (TWI), analytical hillshading (AH), elevation, and precipitation, representing areas with unstable slopes and high snow accumulation. The second cluster included plan curvature (PL), convergence index (CI), topographic position index (TPI), profile curvature (PRL), distance from rivers (RD), relative position of slopes (RSP), vector ruggedness index (VRM), slope length (LS), and distance from faults (DTF), which indicated areas influenced by morphometric and geomorphological features. The third cluster included only temperature, which separately represented the climatic effects. This clustering analysis indicates that avalanche occurrence is influenced by a combination of morphometric, environmental, and climatic factors, and it allows for accurate

identification of avalanche-prone areas. Discriminant Function Analysis (DFA) showed significant differences between avalanche and non-avalanche groups (Wilks' Lambda = 0.432, $p = 0.001$). The relative position of the slope (RSP), valley depth (VD), and topographic wetness index (TWI) were identified as the most important factors distinguishing avalanche-prone areas. The DFA model correctly classified 85% of the points, and its accuracy was 84% in cross-validation. The results suggest that the selected topographic and environmental indices well represent the spatial pattern of avalanche occurrence. Moreover, 88.7% of avalanche-prone areas were found to have pasture land use. In terms of geology, the majority of the area lies in the Karaj formation (56.1%), Quaternary deposits (9.2%), and the Shemshak formation (5.7%). Avalanche occurrence is the result of a complex interaction of topographic, environmental, and climatic factors, and the models can be useful for avalanche risk prediction and management. The results obtained can be applied in the preventive management of hazards, land use planning, and reducing human and financial losses, especially in high-traffic tourist areas such as the Dizin Ski Resort.

Conclusion

The results of this study showed that avalanche occurrence in the upstream area of the Karaj Dam watershed is the result of a complex and multidimensional interaction of topographic, geomorphological, and climatic factors, and no single variable can explain the spatial pattern of this phenomenon. Principal Component Analysis (PCA) revealed the dominant structures between environmental variables by reducing data dimensions, showing that the elevation-precipitation-temperature gradient, the relative position of slopes to the drainage network, surface geometry of the slope, and moisture conditions are among the most significant components affecting snow mass instability. The extraction of six independent components, which explain more than 80% of the total data variance, indicates the high potential of this method for simplifying and interpreting complex environmental data. Hierarchical clustering results showed that the factors affecting avalanche occurrence could be categorized into three main groups: factors related to terrain roughness and slope, geomorphological factors guiding avalanche movement, and the climatic factor of temperature. Discriminant Function Analysis (DFA) confirmed the key role of some variables in distinguishing between avalanche-prone and non-prone areas. The relative position of the slope, valley depth, topographic wetness index, and distance from rivers were identified as the most important distinguishing factors. In contrast, variables such as vector ruggedness index, slope aspect, and distance from faults showed limited influence on distinguishing avalanche-prone areas. Therefore, this study demonstrates that the combined use of multivariate statistical methods can be an effective tool for identifying key factors, reducing uncertainty, and improving avalanche risk zoning in mountainous areas.

Acknowledgements

The authors would like to thank financial supporting of Ferdowsi University of Mashhad (Project No. 64099) in the present study.



تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع بهمن با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد کرج)

مجید کاظم زاده^{۱*}، زهرا نوری^۲

^۱ گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ گروه مهندسی احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶ کلمات کلیدی: وقوع بهمن تحلیل آماری چندمتغیره تحلیل خوشه‌ای تحلیل تابع تشخیص سد کرج	بهمن یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی البرز مرکزی است که به ویژه در نواحی دارای کاربری گردشگری و زیرساخت‌های حساس، تهدیدی جدی برای جان انسان‌ها و فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع بهمن در بالادست حوزه آبخیز سد کرج با بهره‌گیری از روش‌های آماری چندمتغیره است. در این پژوهش، داده‌های وقوع بهمن طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ بر اساس مشاهدات میدانی و شواهد محلی گردآوری شد که شامل ۱۵۰ نقطه بهمنی و ۱۴۲ نقطه غیربهمنی به عنوان داده‌های کنترل بود. همچنین، ۲۰ متغیر توپوگرافی، مورفولوژیکی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اقلیمی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری، داده‌های ایستگاهی هواشناسی و نقشه‌های موضوعی استخراج گردید. برای کاهش ابعاد داده‌ها و استخراج الگوهای اصلی از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. همچنین، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به روش Ward برای گروه‌بندی متغیرهای مشابه و تحلیل تابع تشخیصی (DFA) برای تفکیک مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن به کار رفت. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی منجر به استخراج شش مؤلفه مستقل شد که در مجموع ۸۱/۵۱ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند. بر اساس نتایج خوشه‌بندی، متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن در قالب سه خوشه‌ی همگن طبقه‌بندی شدند. تحلیل تابع تشخیصی نشان داد که شاخص موقعیت نسبی شیب، عمق دره، شاخص رطوبت توپوگرافی و فاصله تا رودخانه بیشترین قدرت تمایز را بین مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن داشتند. دقت کلی مدل ۸۵/۹ درصد و دقت اعتبارسنجی متقابل ۸۴/۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بالای روش‌های آماری چندمتغیره در پیش‌بینی وقوع بهمن است.

مقدمه

وقوع بهمن هر ساله موجب خسارت‌های زیادی به مناطق مسکونی و زیرساخت‌های جاده‌ای می‌شود. از این‌رو شناسایی مناطق مستعد وقوع بهمن و اجرای راهکارهای کنترل و مهار آن نقش مهمی در مدیریت اثرات این پدیده طبیعی دارد (Kazemzadeh, Noori & Jahantigh, 2022a). عوامل مختلفی در شکل‌گیری و وقوع بهمن نقش دارند که از جمله مهمترین عوامل شامل ویژگی‌های پوشش برف مانند ضخامت لایه‌های برف، چگالی، نوع برف، پارامترهای هواشناسی مانند بارش، سرعت و جهت باد و دمای هوا و ویژگی‌های موفولوژیکی مانند شیب، جهت، ارتفاع، انحنای دامنه، خاک، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و غیره هستند (Eiselt & Graversen, 2025). امروزه تغییرات اقلیم جهانی که عمدتاً با گرمایش همراه است، تغییرپذیری قابل‌توجهی در عوامل هواشناسی از نظر توزیع مکانی و زمانی ایجاد کرده است (Wang et al., 2024). بر اساس پژوهش انجام شده در ایران در خصوص روند تغییرات دمای هوای حداکثر، میانگین و حداقل طی دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۷، نتایج، نشان‌دهنده افزایش دمای هوا به میزان ۰/۴۶ تا ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر ۱۰ سال بوده است (Kazemzadeh, Noori, Jamali, Ghorbani & Ahmadi, 2022b). مطالعات مختلف در ایران نشان می‌دهد که روندهای دمایی این منطقه با الگوهای جهانی هم‌راستا بوده و افزایش تدریجی دمای هوا را نشان می‌دهد (Tabri & Talaei, 2011; Malekian & Kazemzadeh, 2016). این گرمایش از طریق ساز و کارهای متعدد بر شکل‌گیری و پایداری پوشش برفی و وقوع بهمن تأثیر می‌گذارد. دماهای بالاتر باعث افزایش فراوانی چرخه‌های ذوب - انجماد می‌شوند که به شکل‌گیری لایه‌های ضعیف در توده برف کمک می‌کند. افزون بر این، هوای گرم‌تر توان نگهداری رطوبت بیشتری دارد که اغلب منجر به بارش برف سنگین‌تر شده و می‌تواند لایه‌های موجود برف را بیش از حد بارگذاری کرده و خطر بهمن را افزایش دهد. این فرآیندها نشان‌دهنده ارتباط بین گرمایش منطقه‌ای و افزایش خطر وقوع بهمن، به ویژه در دوره‌های تغییرات سریع شرایط جوی هستند (Rakhymberdina et al., 2025). در نتیجه، تغییرات اقلیمی در این منطقه بر خطر وقوع بلایای طبیعی، از جمله بهمن، تأثیر گذاشته و بر اهمیت پیش‌بینی و ارزیابی دقیق این مخاطرات تأکید می‌کند.

درخصوص وقوع بهمن و عوامل مؤثر بر آن و همچنین پیامدهای آن مطالعات مختلفی در ایران و جهان صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، در پژوهشی به بررسی رابطه بین برف با عوامل فیزیوگرافی مانند ارتفاع، شیب و جهت در پهنه‌های شمال غربی کشور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع، میزان برف افزایش یافته است، اما با افزایش شیب میزان تجمع برف کاهش یافته است و دامنه‌های شمالی و شمال شرقی دارای پوشش برف بیشتری بوده‌اند (Salahi, Halabian, Zeinali & Kashani, 2024). ارزیابی نوع داده‌های ورودی و دقت آن‌ها در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر بهمن برفی در محدوده آبشار آب سفید شهرستان الیگودرز به روش داده محور (مبتنی بر آنتروپی شانون و رگرسیون لجستیک) نشان داد که معیارهای مرتبط با پوشش گیاهی و شیب (عامل انرژی) بیشترین تأثیر را در رخداد بهمن برفی دارند (Kavoosi & Nazarisamani, 2023). بررسی عوامل مؤثر در وقوع بهمن یعنی درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، دما، بارش، کاربری اراضی، نوع سازند، نوع خاک و جاده و اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر در ریزش بهمن با استفاده از روش تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) در حوزه‌ی آبخیز پيله رود، استان اردبیل نشان داد که بیشترین تأثیر در وقوع بهمن مربوط به عوامل درجه شیب، جهت دامنه و ارتفاع از سطح دریا بوده و حدود ۲۰/۸ درصد از منطقه در معرض خطر بالای بهمن قرار دارد (Gholinia, Esmali, Asghari, Abedini & Badrzadeh, 2016). در مطالعه‌ای با هدف تعیین نقش عوامل مؤثر بر رخداد بهمن و پهنه‌بندی آن در محور میگون - شمشک استان تهران، نتایج نشان داد که شکل دامنه، ارتفاع، شیب، جهت و رخنمون‌های سنگی مهم‌ترین عامل مؤثر بر رخداد بهمن بودند (Nosrati, Kiashemshaki &

(Hoseinzadeh, 2016). در بررسی تأثیر فاکتورهای هواشناسی در وقوع بهمن در شرق قزاقستان با استفاده از روش‌های آماری مانند آنالیز همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) نتایج آنالیز نشان داد که مهمترین متغیرهای تأثیرگذار بر وقوع بهمن شامل دمای هوا، عمق برف، سرعت و جهت باد است (Rakhymberdina et al., 2025). در مطالعه‌ای در کوهستان Sar در سیبری با استفاده از روش تحلیلی سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نتایج نشان داد که فاکتورهایی مانند شیب، توپوگرافی، بارش و دما بیشترین تأثیر را بر وقوع بهمن دارند (Durlević et al., 2022). در مجموع روش‌های نظارت نشده مانند خوشه‌بندی^۲ (Horton, 2025) (Herla & Haegeli, 2025) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Greenacre et al., 2022) به شناسایی الگوهای پنهان در داده‌ها کمک می‌کنند که می‌تواند برای درک عوامل مؤثر بر وقوع بهمن جهت مدل‌سازی بهمن مفید باشد. بنابراین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که پیش‌بینی وقوع بهمن نیازمند روشی جامع است که همه متغیرهای تأثیرگذار را در نظر بگیرد تا ارزیابی ریسک بهمن و سیستم‌های کنترل بهمن در مناطق کوهستانی را ارتقاء دهد.

هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع بهمن در حوزه آبخیز ولایت‌رود، استان البرز با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره است. برای این منظور، ۲۰ متغیر توپوگرافی و موفولوژیکی، محیطی، ژئومورفولوژیکی و اقلیمی شامل ارتفاع، شیب، شاخص‌های توپوگرافی، دما، بارش، فاصله تا رودخانه و دیگر شاخص‌های رطوبتی و زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفتند. با بهره‌گیری از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌های کلیدی کاهش‌یافته و الگوهای مشترک بین متغیرها استخراج شد. سپس، با استفاده از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، مناطق وقوع بهمن بر اساس شباهت عوامل محیطی گروه‌بندی شدند و در نهایت، از تحلیل تابع تشخیص (DFA)^۳ برای تعیین قدرت تفکیک و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر در تمایز مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن استفاده گردید. نتایج این مطالعه می‌تواند به پهنه‌بندی ریسک بهمن و مدیریت پیشگیرانه مناطق مستعد کمک کند و ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی منابع طبیعی و کاهش خسارات جانی و مالی فراهم آورد.

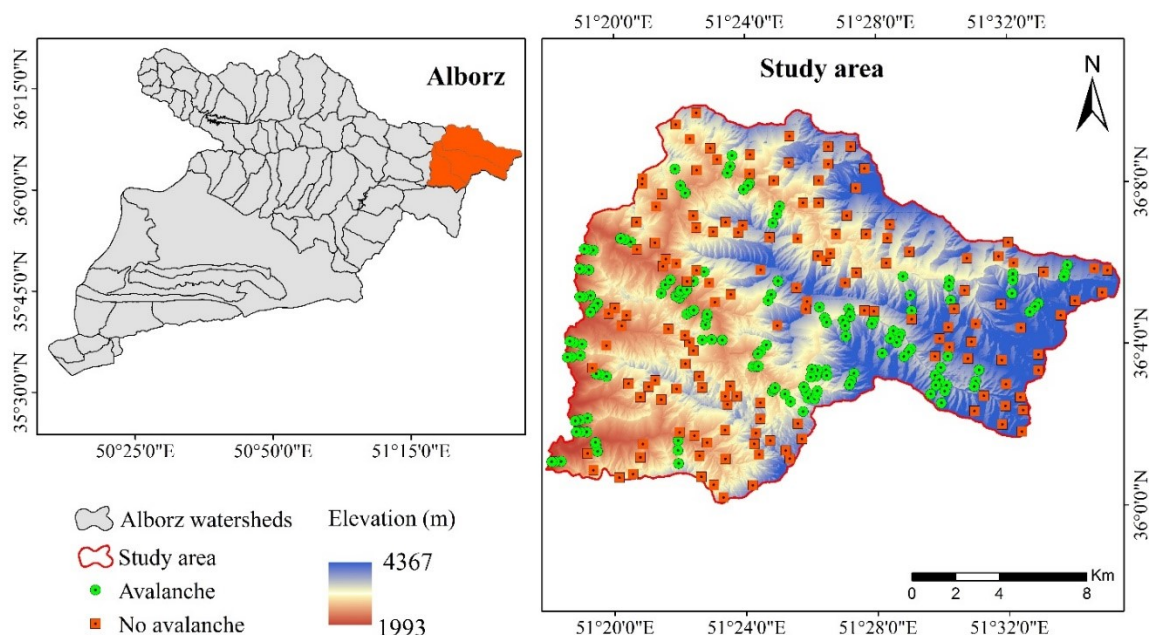
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل حوضه آبخیز مرکزی البرز و به طور خاص زیرحوضه‌های کسبل - نسا، ولایت‌رود و وارنگه‌رود می‌باشد. این مناطق تحت تأثیر مهم‌ترین پدیده‌های متنوع و پیچیده زمین‌شناسی البرز قرار دارند (Shayan, Ghelichi & Yamani, 2017). این منطقه کوهستانی در شمال استان البرز، ایران، قرار دارد و مساحتی تقریباً برابر با ۲۷۲/۵ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. میانگین بارش سالانه منطقه؛ حدود ۸۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن برابر با ۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. بیش از ۹۰ درصد کاربری زمین را مراتع تشکیل می‌دهند. از نظر زمین‌شناسی، سنگ‌های غالب منطقه شامل «عضو توف میانی» از دوره نئوژن است که شامل توف‌های سبز با ضخامت زیاد سازند کرج، جریان‌های گدازه کوچک، شیل، پیروکلاستیک‌ها، کنگلومرا و سنگ آهک می‌باشد. بیشترین مساحت منطقه دارای کاربری مرتع (۹۳ درصد)، سپس رخنمون سنگی (۳/۱ درصد) و اراضی باغی (۱/۲ درصد) می‌باشد و سایر کاربری‌ها مساحت ناچیزی را به خود اختصاص داده‌اند. منطقه مورد مطالعه میزبان پیست بین‌المللی دیزین است که سالانه پذیرای صدها گردشگر و ورزشکار است. محبوبیت دیزین به عنوان مقصد اسکی و کوه‌نوردی، این منطقه را به یکی از نقاط با خطر بالای وقوع بهمن تبدیل کرده و اهمیت آن را برای ارزیابی مخاطرات و مدیریت ریسک بهمن افزایش می‌دهد (شکل ۱).

1- Principal Component Analysis

2- Clustering

3- Discriminant Function Analysis



شکل ۱- موقعیت و مشخصات منطقه مورد مطالعه و نقاط وقوع و عدم وقوع بهمن

Fig. 1. Location and characteristics of the study area and the points of avalanche and non- avalanche

مواد و روش‌ها

عوامل مؤثر در وقوع بهمن

تجمع برف و وقوع بهمن تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و اقلیمی قرار دارند (Liu et al., 2023a; Denissova et al., 2024). ویژگی‌های مورفومتریک حوضه مانند شیب، جهت شیب، ارتفاع و میزان انحراف شیب از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده توزیع فضایی تجمع برف، پایداری لایه‌های برف و مکان‌های شروع بهمن محسوب می‌شوند (Fazzini et al., 2021). در این پژوهش، متغیرهای توپوگرافی و محیطی مؤثر بر وقوع بهمن شامل ۱۸ شاخص مورد بررسی قرار گرفتند. این شاخص‌ها شامل ارتفاع^۱، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)^۲، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)^۳، شاخص ناهمواری برداری (VRM)^۴، سایه‌روشن تحلیلی (AH)^۵، شیب^۶، جهت شیب^۷، انحنای پلان (PL)^۸، انحنای پروفیل (PRL)^۹، شاخص همگرایی (CI)^{۱۰}، طول-شیب (LS)^{۱۱}، فاصله تا رودخانه (RD)^{۱۲}، عمق دره (VD)^{۱۳}، موقعیت نسبی شیب (RSP)^{۱۴}، دمای هوا (TEM)^{۱۵}، بارش سالانه^{۱۶}، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)^{۱۷} و فاصله از گسل (DTF)^{۱۸} می‌باشند. این شاخص‌ها از مدل رقومی ارتفاع با دقت ۱۰ متر استخراج و با استفاده از ابزارهای ArcGIS و SAGA GIS محاسبه شدند و نقش مهمی در تحلیل وقوع بهمن دارند. علاوه بر این، دو فاکتور کیفی کاربری اراضی^{۱۹} و سازندهای زمین‌شناسی^{۲۰} نیز برای مطالعه انتخاب شدند، اما به دلیل ماهیت کیفی، در

- 1 - Elevation
- 2 - Topographic Position Index
- 3 - Topographic Ruggedness Index
- 4 - Vector Ruggedness Measure
- 5 - Analytical Hillshading
- 6 - Slope
- 7 - Aspect
- 8 - Plan Curvature
- 9 - Profile Curvature
- 10 - Convergence Index

- 11 - Length-Slope
- 12 - Distance to River
- 13 - Valley Depth
- 14 - Relative Slope Position
- 15 - Temperature
- 16 - Rainfall
- 17 - Topographic Wetness Index
- 18 - Distance to Fault
- 19 - Land Use Type
- 20 - Geological Formations

مراحل تحلیل آماری وارد نشدند؛ با این حال، این دو فاکتور در تحلیل‌های کیفی و بررسی محل وقوع بهمن در بخش نتایج مورد استفاده قرار خواهند گرفت. لازم به ذکر است نقشه‌های پایه زمین‌شناسی و کاربری اراضی از مطالعات پایه تفصیلی و اجرایی حوزه آبخیز سد کرج استفاده شده است.

داده‌های میدانی

در این پژوهش، داده‌های وقوع بهمن‌ها بر اساس مشاهدات محلی، رویدادهای تاریخی و بررسی‌های میدانی انجام‌شده در سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ جمع‌آوری شد و بر اساس آن، ۱۵۰ نقطه محل وقوع از ۵۰ محدوده پلیگون مستعد وقوع بهمن شناسایی گردید. این مناطق شامل سه بخش شروع، مسیر حمل و تجمع بهمن بر اساس شیب و مشاهدات میدانی بودند؛ به‌طوری‌که مناطق شروع دارای شیب بیش از ۳۰ درجه، مسیرها بین ۱۵ تا ۳۰ درجه و مناطق تجمع، شیب کمتر از ۱۵ درجه داشتند (McClung & Schaerer, 2006). علاوه بر این، ۱۴۲ نمونه شامل نقاط غیر مناطق بهمنی به‌عنوان داده‌های کنترل و گروه‌بندی تحلیل‌های آماری انتخاب شد. همچنین در این تحقیق از میانگین سالانه داده‌های هواشناسی شامل بارش و دما، حاصل از ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای استان البرز استفاده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر یک بهمن وقوع یافته در جاده ولایت رود، مسیر پیست بین المللی دیزین

Fig. 2. Image of an occurred avalanche in Velayat Road road, Dizin International Ski Resort

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، یکی از روش‌های آماری چند متغیره است که به طور گسترده برای کاهش ابعاد داده‌های چند متغیره استفاده می‌شود و اساس این روش بر ماتریس کوواریانس- واریانس و ماتریس همبستگی استوار است (Wold, Esbensen & Geladi, 1987). این روش امکان شناسایی گروه‌هایی از متغیرها با واریانس مشترک و استخراج مؤلفه‌های غیرهمبسته را فراهم می‌کند (Noori, Khakpour, Omidvar & Farokhnia, 2010; Kazemaddeh & Malekian, 2017). داده‌ها شامل ۱۸ متغیر کمی با ۱۵۰ نمونه بودند. پیش از انجام تحلیل، کفایت نمونه با آزمون کایزر-مایر-اولکین^۱ (KMO) و قابلیت انجام تحلیل با آزمون کرویت بارتلت^۲ بررسی گردید. سپس، مؤلفه‌های اصلی با استفاده از معیار مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک استخراج شدند. برای بهبود تفسیر و شفافیت نتایج، از چرخش واریماکس^۳ با نرمال‌سازی کایزر استفاده شد، که باعث متمرکز شدن بارهای عاملی بزرگ‌تر و کوچک‌تر شد و امکان شناسایی ساختار روشن‌تری بین متغیرها را فراهم کرد (Zare Chahouki, 2010). این روش به شناسایی گروه‌های همبسته از متغیرها و تعیین مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر وقوع بهمن کمک کرد (شکل ۳).

1 - Kaiser-Meyer-Olkin

2 - Bartlett's Test of Sphericity

3 - Varimax Rotation

خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی^۱ (HC)

هدف اصلی تحلیل خوشه‌ای، ایجاد گروه‌ها یا خوشه‌هایی است که تنوع درون گروهی آن‌ها حداقل و تنوع بین گروهی آن‌ها حداکثر باشد، به طوری که گروه‌ها از یکدیگر به وضوح متمایز شوند (Kaufman & Rousseeuw, 2005). خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، رایج‌ترین روش تحلیل خوشه‌ای است که تشابه ذاتی بین نمونه‌ها را بر اساس ویژگی‌هایشان تعیین می‌کند و معمولاً نتایج آن با یک نمودار درختی (دندروگرام) نمایش داده می‌شود (Everitt, Landau, Leese & Stahl, 2011). فاصله بین نمونه‌ها با استفاده از معیار فاصله اقلیدسی مربعی محاسبه و الگوریتم Ward برای ادغام خوشه‌ها به کار گرفته شد تا مجموع واریانس درون خوشه‌ها حداقل شود. نتایج خوشه‌بندی با دندروگرام نمایش داده شد و تعداد خوشه‌های بهینه با توجه به تغییرات ناگهانی در فواصل اتصال تعیین گردید (Zare Chahouki, 2010; Kazemaddeh & Malekian, 2017). این خوشه‌ها نمایانگر گروه‌هایی از مناطق با ویژگی‌های مشابه هستند و در تحلیل وقوع بهمن و مدیریت خطر زمین‌لغزش قابل استفاده می‌باشند (Rakhyberdina et al., 2025) (شکل ۳).

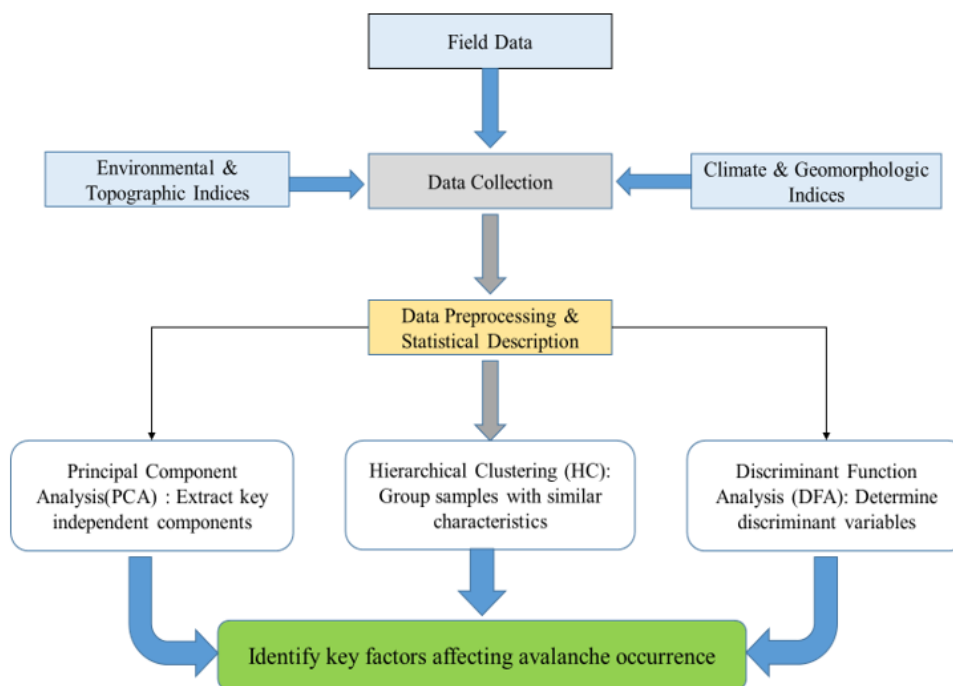
تحلیل تابع تشخیص^۲ (DFA)

در این مطالعه، به منظور تعیین قدرت تفکیک و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر در تمایز مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن، از تحلیل تابع تشخیصی استفاده شد. این روش با استفاده از ترکیب خطی متغیرهای مستقل، امکان طبقه‌بندی نمونه‌ها به گروه‌های از پیش تعیین شده را فراهم می‌کند. این روش توانایی تعیین متغیرهایی که بیشترین نقش را در تمایز بین گروه‌ها دارند، فراهم می‌کند و دقت پیش‌بینی مدل بر اساس درصد نمونه‌های به درستی طبقه‌بندی شده ارزیابی شد. به عبارتی تحلیل تابع تشخیصی روش آماری است که متغیرهای قابل تمایز میان دو گروه یا بیشتر را استخراج می‌کند، گروه‌هایی که به طور ذاتی از قبل تعیین شده‌اند. زمانی که هدف پژوهشگر یافتن روابطی است تا بتواند اثر هر یک از متغیرهای مستقل را بر متغیر گروه‌بندی شده مشخص کند، این روش بسیار مفید خواهد بود. تابع تشخیص، رابطه‌ای است که با داشتن ویژگی‌های هر فرد یا نمونه، می‌توان پیش‌بینی کرد که به کدام گروه تعلق دارد (Zare Chahouki, 2010; Kazemaddeh & Malekian, 2017). برای بررسی تفاوت‌های میان دو گروه نقاط بهمن شامل "نقاط وقوع بهمن" (گروه یک) و "نقاط عدم وقوع بهمن" (گروه صفر)، ابتدا داده‌های ۲۹۲ نقطه جمع‌آوری شدند که شامل ۱۵۰ نقاط وقوع بهمن و ۱۴۲ نقاط عدم وقوع بهمن بودند. سپس ۱۸ متغیر مختلف از ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی مانند ارتفاع، شاخص TPI، TRI، شیب، میزان بارندگی و سایر ویژگی‌های محیطی انتخاب شدند. پس از آن، آزمون Box's M برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار در ماتریس‌های کوواریانس گروه‌ها انجام شد. برای شناسایی اثر متغیرهای مختلف بر تفکیک گروه‌ها، تحلیل تشخیص خطی فیشر انجام شد که ضرایب تابع تمایز برای هر متغیر محاسبه و متغیرهایی با تأثیر بیشتر شناسایی شدند. در ادامه، آزمون Wilks' Lambda برای ارزیابی قدرت مدل تمایز انجام شد که نشان داد این مدل توانایی بالایی در تفکیک گروه‌ها دارد. همچنین، برای بررسی همبستگی میان متغیرها و تأثیرات آن‌ها در تفکیک گروه‌ها، تحلیل ساختار ماتریس انجام شد. در نهایت، برای ارزیابی دقت مدل، از روش ارزیابی تقاطعی^۳ استفاده شد (Zare Chahouki, 2010). تمام مراحل پژوهش شامل آزمون‌ها و روش‌های آماری چند متغیره در نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۵ و R version 4.3.2 انجام شده است (شکل ۳).

1 - Hierarchical Clustering

2 - Discriminant Function Analysis

3 - Cross-validation



شکل ۳- فلوچارت تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع بهمن با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره

Fig. 3. Flowchart of analyzing affecting factors on the avalanche using multivariate statistical methods

نتایج و بحث

آمار توصیفی متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن

آمار توصیفی ۱۸ متغیر مؤثر بر وقوع بهمن در جدول ۱ ارائه شده است. تعداد نمونه‌ها برای تمامی متغیرها ۱۵۰ می‌باشد. میانگین ارتفاع منطقه ۲۸۶۸ متر با انحراف معیار ۴۸۴ و میانگین شیب ۴۸/۶۰ درصد با انحراف معیار ۲۲ است. شاخص‌های توپوگرافی مانند TRI و TPI به ترتیب میانگین ۳/۱۲ (انحراف معیار ۱/۳۸) و ۶/۶۷- (انحراف معیار ۶/۸۳) را نشان می‌دهند. مقادیر این شاخص‌ها نشان‌دهنده کوهستانی بودن منطقه است. شاخص‌های ناهمواری سطح زمین مانند VRM با میانگین ۰/۰۳ و انحراف معیار نزدیک صفر، نوسان کمی دارند. متغیرهای اقلیمی و محیطی از جمله بارش و دما، به ترتیب دارای میانگین ۷۲۸ میلی‌متر (انحراف معیار ۶۷) و ۶/۶۷- درجه سانتی‌گراد (انحراف معیار ۱/۸۴) هستند. همچنین، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) میانگین ۱۰/۵۷ (انحراف معیار ۲/۵۱) را نشان می‌دهد که بیانگر شرایط رطوبتی متوسط منطقه می‌باشد.

ماتریس همبستگی بین ۱۸ متغیر مورفولوژی و توپوگرافی، اقلیمی و محیطی مؤثر بر وقوع بهمن در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برخی متغیرها دارای همبستگی مثبت یا منفی قابل توجه با یکدیگر هستند. به عنوان مثال، ارتفاع منطقه (Elevation) با دما (TEM) همبستگی منفی قوی (-۰/۸۶) دارد، در حالی که بارش همبستگی مثبت بالایی (۱/۰) نشان می‌دهد. شاخص توپوگرافی ناهمواری (TRI) با شیب (Slope) همبستگی بسیار بالایی (۰/۹۹) دارد که بیانگر رابطه مستقیم بین ناهمواری زمین و شیب است. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) با انحنای پلان (PL) و انحنای پروفیل (PRL) همبستگی قابل توجه مثبتی نشان می‌دهد، در حالی که با شاخص ناهمواری برداری (VRM) همبستگی منفی دارد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بیشترین همبستگی منفی را با TRI (-۰/۷) و شیب (-۰/۷۲) نشان می‌دهد، که بیانگر تأثیر مستقیم شیب و ناهمواری زمین بر وضعیت رطوبتی سطح است. علاوه بر این، فاصله تا رودخانه (RD) با موقعیت نسبی شیب (RSP) همبستگی بسیار بالایی (۰/۹۳) دارد و عمق دره (VD) با ارتفاع و با RSP همبستگی منفی نشان می‌دهد. شاخص فاصله از گسل (DTF) بیشترین همبستگی مثبت را با ارتفاع

(۰/۴۳) و بارش (۰/۴۳) دارد. به طور کلی، این همبستگی‌ها نشان می‌دهد که برخی از متغیرهای توپوگرافی و محیطی با یکدیگر روابط قوی دارند و می‌توانند به صورت گروهی در تحلیل‌های بعدی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی مورد استفاده قرار گیرند.

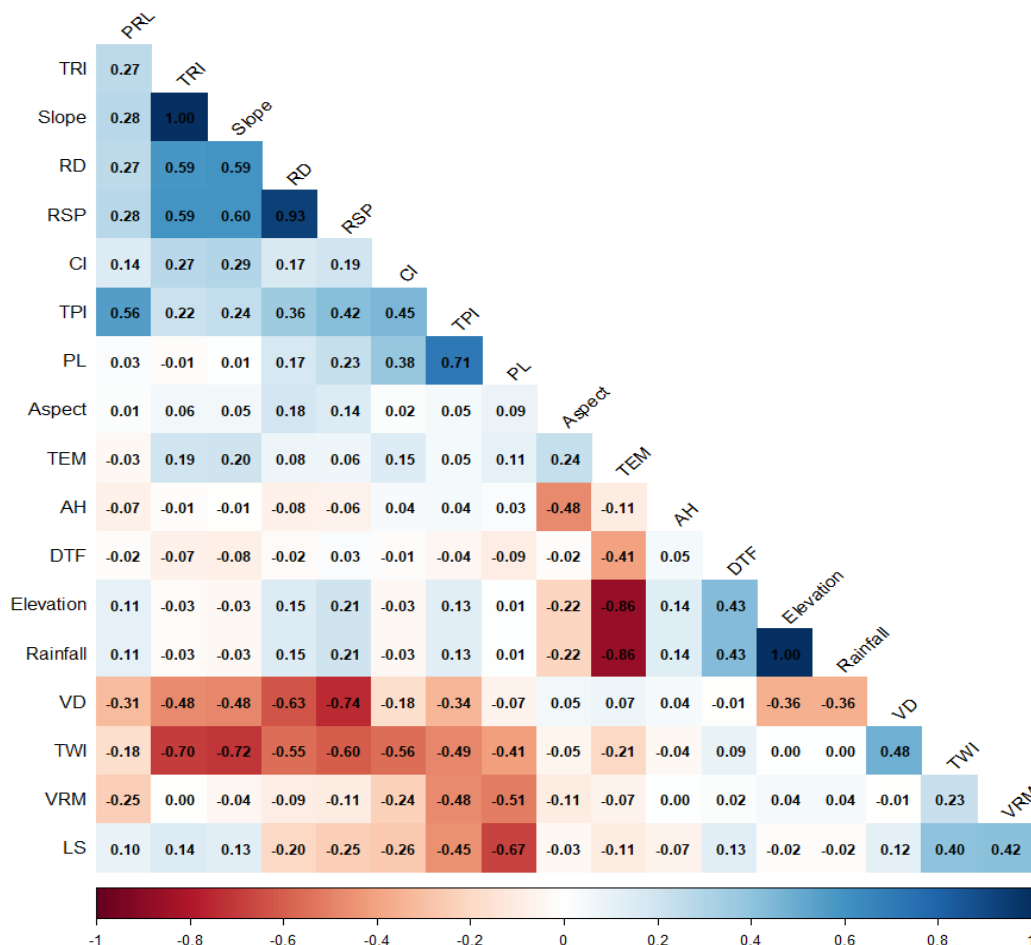
جدول ۱- آمار توصیفی ۱۸ متغیر مؤثر بر وقوع بهمن

Table 1- Descriptive statistics of 18 variables influencing avalanche occurrence

	Descriptive Statistics		
	Mean	Std. Deviation	Analysis N
Elevation	2868.60	484.00	150
TPI	-6.76	6.83	150
TRI	3.12	1.38	150
VRM	0.003	0.00	150
AH	0.76	0.28	150
Slope	48.60	22.02	150
Aspect	3.20	1.99	150
PL	0.00	0.01	150
PRL	0.00	0.00	150
CI	-3.64	10.56	150
LS	56.47	41.31	150
RD	48.08	69.61	150
VD	240.91	117.09	150
RSP	0.19	0.25	150
TEM	-6.67	1.84	150
Rainfall	728.80	67.70	150
TWI	10.57	2.51	150
DTF	461.66	399.84	150

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) عوامل مؤثر بر وقوع بهمن

برای بررسی کفایت نمونه و قابلیت انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی، آزمون KMO و کروییت بارتلت انجام شد. مقدار KMO برابر با ۰/۶۸۲ به دست آمد که نشان‌دهنده کفایت نمونه برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. نتایج آزمون بارتلت نیز با مقدار تقریباً مربع کای ۴۷۰۸ در سطح معناداری ۹۹ درصد، معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهند که ماتریس همبستگی متغیرها با یکدیگر مناسب است و داده‌ها برای انجام PCA مناسب می‌باشند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس معیار مقدار ویژه بزرگتر از یک، تعداد ۶ مؤلفه اصلی استخراج شد. این ۶ مؤلفه در مجموع ۸۱/۵۰ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند که نشان‌دهنده توان بالای این مؤلفه‌ها در توضیح تغییرات متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن است. مؤلفه اول با مقدار ویژه ۵/۱۰، بیشترین سهم از واریانس کل را به خود اختصاص داده و به تنهایی ۲۸/۳۲ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند. مؤلفه دوم با مقدار ویژه ۳/۳۴، ۱۸/۵۸ درصد از واریانس را توضیح داده و مجموع واریانس تبیین شده توسط دو مؤلفه اول به ۴۶/۹۰ درصد می‌رسد. مؤلفه سوم با مقدار ویژه ۲/۵۳، ۱۴/۰۷ درصد از واریانس را تبیین کرده و مجموع واریانس تجمعی سه مؤلفه نخست را به ۶۰/۹۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مؤلفه‌های چهارم، پنجم و ششم به ترتیب با مقادیر ویژه ۱/۴۸، ۱/۲۰ و ۱/۰۲، سهمی معادل ۸/۲۴، ۶/۶۵ و ۵/۶۵ درصد از واریانس کل را تبیین می‌کنند. پس از چرخش مؤلفه‌ها^۱، توزیع واریانس میان مؤلفه‌ها متعادل‌تر شده و تفسیر ساختار مؤلفه‌ها بهبود یافته است، به گونه‌ای که هر مؤلفه نقش مشخص‌تری در توضیح متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن ایفا می‌کند (شکل ۵).



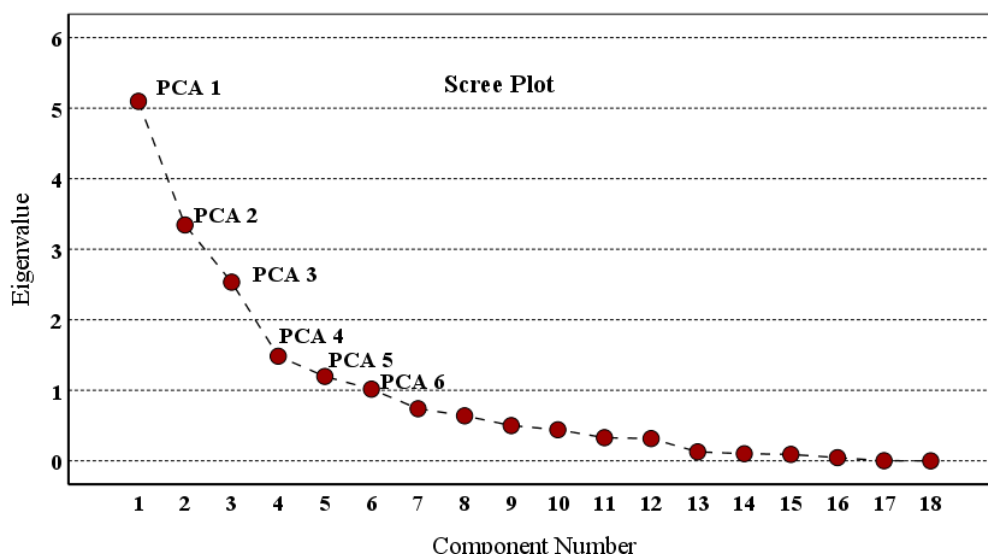
شکل ۴- ماتریس همبستگی بین متغیرهای مورفولوژی و توپوگرافی، محیطی و اقلیمی مؤثر بر وقوع بهمن

Fig. 4. Correlation matrix of morphological, topographic, environmental, and climatic variables influencing avalanche occurrence

جدول ۲- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای عوامل مؤثر بر وقوع بهمن

Table 2- Results of Principal Component Analysis (PCA) of factors influencing avalanche occurrence

Component	Total Variance Explained								
	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	5.10	28.32	28.32	5.10	28.32	28.32	3.82	21.25	21.25
2	3.34	18.58	46.90	3.34	18.58	46.90	3.13	17.38	38.63
3	2.53	14.07	60.97	2.53	14.07	60.97	2.89	16.08	54.71
4	1.48	8.24	69.21	1.48	8.24	69.21	1.86	10.34	65.06
5	1.20	6.65	75.86	1.20	6.65	75.86	1.55	8.60	73.65
6	1.02	5.65	81.51	1.02	5.65	81.51	1.41	7.85	81.51



شکل ۵- مقادیر ویژه برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی عوامل مؤثر بر وقوع بهمن

Fig. 5. Eigenvalue of Principal Component Analysis (PCA) for factors affecting avalanche occurrence

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی با چرخش واریماکس نشان داد (جدول ۳) که شش مؤلفه مستقل در مجموع ۸۱/۵۱ درصد از واریانس کل متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن را تبیین می‌کنند. مؤلفه اول که بیشترین بار عاملی را به موقعیت نسبی شیب (۰/۹۲) و فاصله از رودخانه (۰/۹۰) اختصاص داده است، بیانگر نقش موقعیت توپوگرافی دامنه‌ها و ارتباط آن‌ها با شبکه زهکشی در کنترل شرایط مستعد بهمن می‌باشد. مؤلفه دوم با بارهای بسیار بالای ارتفاع و بارش (۰/۹۴) و بار منفی قوی دما (۰/۹۰-)، نشان‌دهندهٔ گرادیان ارتفاع - اقلیم و تأثیر شرایط سرد و مرطوب بر ناپایداری توده‌های برف است. در مطالعه‌ای که توسط راخیم‌بردینا و همکاران (Rakhymberdina et al., 2025) با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام شد، مشخص گردید که وقوع بهمن ناشی از ترکیب پیچیده‌ای از پارامترهای هواشناسی و توپوگرافی است. مؤلفه سوم با، بار بالای انحنای پلان (۰/۹۰) و بار منفی شاخص طول شیب (۰/۸۶-)، نقش شکل هندسی دامنه در تمرکز تنش و مسیر حرکت بهمن را برجسته می‌سازد. در مؤلفه چهارم، شیب (۰/۶۳) و شاخص ناهمواری زمین (۰/۶۲) بیشترین تأثیر را داشته و شاخص رطوبت توپوگرافی بار منفی قابل توجهی (۰/۶۱-) نشان می‌دهد. مؤلفه پنجم با، بار بالای جهت دامنه (۰/۸۵) بیانگر کنترل شرایط انرژی تابشی بر پایداری برف بوده و در نهایت مؤلفه ششم با بار بسیار بالای انحنای پروفیل (۰/۹۳) اهمیت ساختار طولی دامنه در گسترش وقوع بهمن را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات بسیاری نشان داده است که استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی در اولویت‌بندی معیارهای مهم مرتبط با مسئله‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بسیار کمک می‌کند و به طور گسترده‌ای در بررسی مخاطرات و بلایای طبیعی مانند بهمن کاربرد دارد (Chabuk et al., 2017; Benítez, Carpitella, Certa & Izquierdo, 2020; Liang & Yang, 2022; Maceika, Bugajev, Šostak & Vilutienė, 2021; Varol, 2022).

جدول ۳- بار عاملی برای هر کدام از مؤلفه‌های اصلی با دوران واریماکس

Table 3- Factor loadings of each principal component after Varimax rotation

Rotated Component Matrix ^a (Component)						
	1	2	3	4	5	6
Elevation	0.20	0.94	0.04	-0.10	-0.15	0.05
TPI	0.27	0.05	0.70	0.19	-0.03	0.52
TRI	0.67	-0.13	-0.21	0.62	-0.01	0.15
VRM	0.09	0.03	-0.64	-0.14	-0.10	-0.35
AH	-0.05	0.06	0.06	0.09	-0.82	-0.07
Slope	0.67	-0.14	-0.18	0.63	-0.02	0.16
Aspect	0.06	-0.14	0.08	0.04	0.85	-0.04
PL	0.07	-0.03	0.89	0.12	0.01	0.00
PRL	0.22	0.04	0.04	0.05	0.03	0.93
CI	0.04	-0.01	0.42	0.70	-0.04	0.06
LS	-0.17	0.05	-0.86	0.10	0.06	0.25
RD	0.89	0.02	0.13	0.08	0.14	0.05
VD	-0.82	-0.20	-0.05	-0.01	0.06	-0.15
RSP	0.92	0.07	0.19	0.09	0.11	0.06
TEM	0.07	-0.90	0.07	0.15	0.13	-0.05
Rainfall	0.20	0.94	0.04	-0.10	-0.15	0.05
TWI	-0.59	0.10	-0.36	-0.61	0.06	0.03
DTF	-0.16	0.67	-0.09	0.26	0.17	-0.08

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

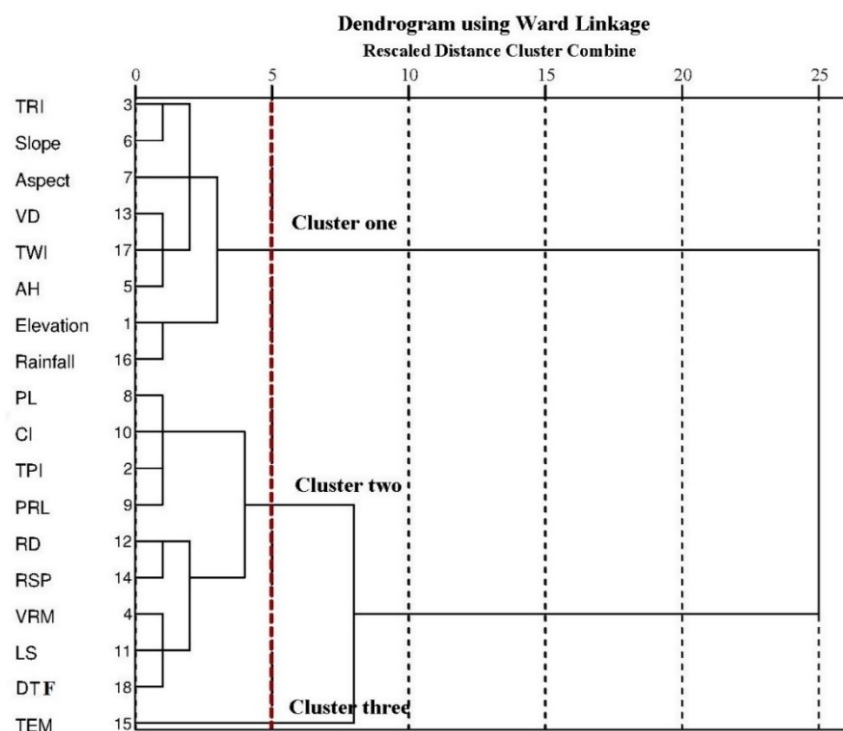
a. Rotation converged in 10 iterations.

نتایج خوشه‌بندی مناطق مستعد وقوع بهمن

نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیمی و محیطی نشان داد که مناطق مستعد وقوع بهمن در منطقه مورد مطالعه به سه خوشه اصلی تقسیم می‌شوند. دندروگرام حاصل، روند تغییرات در فاصله‌های اتصال خوشه‌ها را نشان داد و امکان تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها را فراهم کرد (شکل ۶). خوشه اول شامل شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)، شیب، جهت شیب، عمق دره (VD)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، سایه‌روشن تحلیلی (AH)، ارتفاع و بارش است و نمایانگر تأثیر توأم عوامل توپوگرافی و عوامل اقلیمی بر وقوع بهمن می‌باشد. خوشه دوم شامل انحنای پلان (PL)، شاخص همگرایی (CI)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، انحنای پروفیل (PRL)، فاصله تا رودخانه (RD)، موقعیت نسبی شیب (RSP)، شاخص ناهمواری برداری (VRM)، طول شیب (LS) و فاصله از گسل (DTF) است و نشان‌دهنده مناطق تحت تأثیر ویژگی‌های مورفومتریک و ژئومورفولوژیکی می‌باشد. خوشه سوم تنها شامل دمای محیط است که اثرات اقلیمی را به صورت مجزا نمایان می‌کند. این تحلیل خوشه‌ای نشان می‌دهد که وقوع بهمن تحت تأثیر ترکیبی از عوامل مورفومتریک، محیطی و اقلیمی قرار دارد و امکان شناسایی مناطق حساس به وقوع بهمن را با دقت بالا فراهم می‌کند. مطالعات بسیاری بر اهمیت پیچیدگی ارتباط بین عوامل ژئومورفولوژیکی و عوامل اقلیمی در شکل‌گیری وقوع بهمن تأکید داشته‌اند (Yang, Li & Wang, 2023b; Maggioni & Gruber, 2003; Wen, Xiang, Cai, Su & Yan, 2016; Hao et al., 2021; Liu, Chen,).

تحلیل خوشه‌بندی نه تنها امکان دسته‌بندی مناطق مستعد بهمن بر اساس شباهت‌های توپوگرافی، اقلیمی و محیطی را فراهم کرد، بلکه به شناسایی الگوهای پیچیده و روابط همبسته بین متغیرها کمک کرد. به عنوان مثال، خوشه اول نشان‌دهنده مناطقی با شیب‌های تند و تجمع بالای برف است که بیشتر در شروع بهمن نقش دارند، در حالی که خوشه دوم بر نقش ویژگی‌های مورفومتریک و ژئومورفولوژیکی در هدایت مسیر و فرود بهمن تأکید دارد و خوشه سوم اثر مستقیم شرایط اقلیمی، به ویژه دما را برجسته می‌کند. این طبقه‌بندی کمک می‌کند تا اولویت‌بندی مناطق پرخطر برای پیشگیری و مدیریت ریسک بهمن انجام شود و نشان می‌دهد که وقوع بهمن نتیجه تعامل پیچیده بین عوامل محیطی و اقلیمی است. علاوه بر این، خوشه‌بندی مسیر مناسبی برای انتخاب شاخص‌های

کلیدی مؤثر در مدلسازی حساسیت بهمن ارائه می‌دهد و امکان ساده‌سازی تحلیل‌های پیش‌بینی و نقشه‌برداری ریسک را فراهم می‌کند.



شکل ۶- دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی سلسه‌مراتبی عوامل مؤثر بر وقوع بهمن در منطقه مورد مطالعاتی

Fig. 6. Dendrogram obtained from hierarchical cluster analysis of factors affecting avalanche occurrence in the study area

نتایج تحلیل تابع تشخیص در تفکیک مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن

جدول آزمون‌های برابری میانگین گروه‌ها به منظور بررسی تفاوت‌های معنی‌دار میان گروه‌های مختلف بر اساس ویژگی‌های مختلف به کار می‌رود. در این آزمون از معیار Wilks' Lambda برای ارزیابی معنی‌داری تفاوت‌ها استفاده می‌شود. مقادیر p-value نشان‌دهنده سطح معنی‌داری آزمون‌ها هستند؛ به این معنی که هر کدام از ویژگی‌ها مثل Slope, AH, TPI, Elevation و غیره که دارای p-value کمتر از ۰/۰۵ هستند، نشان‌دهنده وجود تفاوت‌های معنی‌دار بین گروه‌ها در آن ویژگی خاص است. به عبارت دیگر، این ویژگی‌ها قادرند گروه‌ها را به طور مؤثر از یکدیگر تفکیک کنند. از طرف دیگر، ویژگی‌هایی مانند VRM, Aspect و DTF با p-value بالاتر از ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری میان گروه‌ها ایجاد نمی‌کنند و بنابراین به نظر می‌رسد در تفکیک گروه‌ها نقشی نداشته باشند. این آزمون به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که ویژگی‌های تأثیرگذار بر تفاوت گروه‌ها را شناسایی کرده و بر اساس آن تحلیل‌های بعدی را انجام دهد (جدول ۴).

نتایج آزمون‌های مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنادار میان گروه‌ها است. آزمون Box's M نشان داد که فرضیه برابری ماتریس‌های کوواریانس رد شده است ($p\text{-value} < 0.001$)، که نشان‌دهنده تفاوت‌های معنادار در ویژگی‌های گروه‌ها است. همچنین، نتایج Eigenvalues نشان می‌دهد که تنها یک تابع تمایز برای توضیح ۱۰۰ درصد واریانس داده‌ها کافی است ($\text{Eigenvalue} = 1.316$) و $\text{Canonical Correlation} = 0.754$) که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر تابع تمایز در تفکیک گروه‌ها است.

علاوه بر این، Wilks' Lambda برابر با ۰/۴۳۲ با کای اسکور ۲۳۵/۶ و $p\text{-value} < 0.001$ ، که به وضوح تأکید دارد بر این که تفاوت‌های معناداری میان گروه‌ها وجود دارد و تابع تمایز به طور مؤثر این تفاوت‌ها را شناسایی کرده است (جدول ۵).

جدول ۴- جدول آزمون‌های برابری میانگین گروه‌ها برای تحلیل تابع تشخیص

Table 4- Test of Equality of Group Means for Discriminant Function Analysis

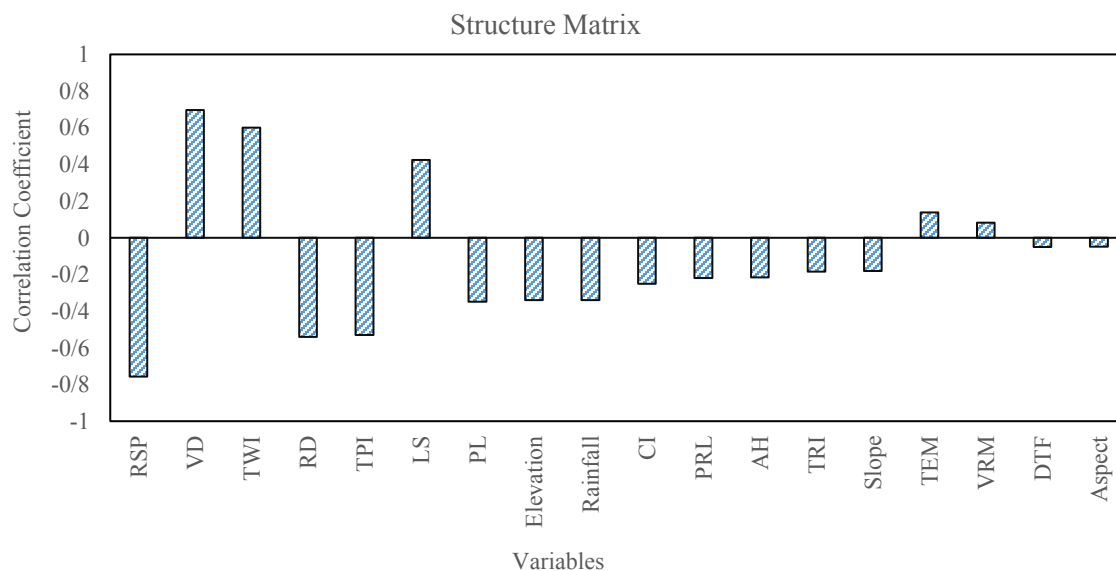
Tests of Equality of Group Means					
	Wilks' Lambda	F	df1	df2	Sig.
Elevation	0.87	43.73	1.00	289.00	0.00
TPI	0.73	106.93	1.00	289.00	0.00
TRI	0.96	12.85	1.00	289.00	0.00
VRM	0.99	2.63	1.00	289.00	0.11
AH	0.94	17.70	1.00	289.00	0.00
Slope	0.96	12.52	1.00	289.00	0.00
Aspect	1.00	0.92	1.00	289.00	0.34
PL	0.86	45.94	1.00	289.00	0.00
PRL	0.94	18.34	1.00	289.00	0.00
CI	0.92	23.88	1.00	289.00	0.00
LS	0.81	68.75	1.00	289.00	0.00
RD	0.72	110.98	1.00	289.00	0.00
VD	0.61	183.99	1.00	289.00	0.00
RSP	0.57	217.97	1.00	289.00	0.00
TEM	0.98	7.28	1.00	289.00	0.01
Rainfall	0.87	43.72	1.00	289.00	0.00
TWI	0.68	137.05	1.00	289.00	0.00
DTF	1.00	1.00	1.00	289.00	0.32

جدول ۵- نتایج آزمون‌های آماری Wilks' Lambda و Box's M برای تابع استخراج شده

Table 5- Results of Box's M and Wilks' Lambda for Extracted Function

Table 3. Results of Box's M and Wilks' Lambda for Extracted Function				
Test Results				
Box's M		1606.72		
F	Approx.	9.86		
	df1	153.00		
	df2	255083.94		
	Sig.	0.00		
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.				
Eigenvalues				
Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	1.316 ^a	100.00	100.00	0.75
a. First 1 canonical discriminant functions were used in the analysis.				
Wilks' Lambda				
Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	Df	Sig.
1	0.43	235.58	17.00	0.00

نتایج حاصل از تحلیل تمایز دوگروهی (۰ = عدم وقوع بهمن و ۱ = وقوع بهمن) نشان داد که تابع تمایز اول نقش مؤثری در جداسازی مناطق مستعد وقوع بهمن از مناطق فاقد آن دارد (شکل ۷). بر اساس ماتریس ساختاری، متغیر موقعیت نسبی شیب (RSP) با بیشترین ضریب همبستگی مطلق با تابع تمایز ۰/۷۶ مهم‌ترین عامل تمایز دهنده، بین دو گروه محسوب می‌شود که بیانگر نقش تعیین کننده موقعیت مکانی سلول‌ها بر روی دامنه در وقوع بهمن است. پس از آن، عمق دره (VD) با همبستگی مثبت بالا (۰/۶۹) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با مقدار همبستگی (۰/۶۰) تأثیر قابل توجهی در تفکیک مناطق دارای بهمن نشان دادند که حاکی از اهمیت شرایط تجمع رطوبت و موقعیت‌های فرورفته توپوگرافی در وقوع بهمن می‌باشد. فاصله تا رودخانه (RD) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) نیز به ترتیب با ضرایب همبستگی منفی (۰/۵۴) و (۴/۵۳) در زمره متغیرهای کلیدی قرار گرفتند. علاوه بر این، شاخص طول شیب (LS) با همبستگی متوسط مثبت (۰/۴۲)، انحنا پلان (PL)، ارتفاع از سطح دریا و شاخص همگرایی (CI) با مقادیر همبستگی بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵، نقش ثانویه‌ای در تفکیک دو گروه ایفا کردند. در مقابل، متغیرهایی نظیر ناهمواری برداری (VRM) با کمترین مقدار همبستگی (۰/۰۸)، فاصله از گسل (DTF) (۰/۰۵) و جهت شیب -۰/۰۵ - کمترین تأثیر را در تابع تمایز داشته و نقش محدودی در تشخیص مناطق مستعد وقوع بهمن نشان دادند. به طور کلی، نتایج بیانگر آن است که شاخص‌های مرتبط با موقعیت نسبی شیب، عمق ناهمواری‌ها و شرایط رطوبتی سطح زمین مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده الگوی مکانی وقوع بهمن در منطقه مورد مطالعه هستند (جدول ۶). در مطالعه‌ای که فلویور و مک کلونگ (Floyer & McClung, 2003) با استفاده از تابع تشخیص برای طبقه‌بندی مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن انجام دادند، مشخص شد که ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی اهمیت بسیاری در شناسایی و پیش‌بینی مناطق وقوع بهمن دارند. رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2019) نشان دادند که موقعیت نسبی شیب (RSP) و طول شیب (LS) و لیتولوژی مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر وقوع بهمن هستند.



شکل ۷- نتایج حاصل از تحلیل تمایز دوگروهی (۰ = عدم وقوع بهمن و ۱ = وقوع بهمن) بر اساس ماتریس ساختاری

Fig. 7. Results of Two-Group Discriminant Analysis (0 = No Avalanche, 1 = Avalanche) Based on the Structural Matrix

برای ارزیابی صحت و دقت مدل، از تکنیک ارزیابی تقاطعی استفاده شد. در این روش، دقت مدل در پیش‌بینی گروه‌ها با استفاده از داده‌های آموزشی و آزمون‌های تصادفی ارزیابی شد. نتایج طبقه‌بندی نشان داد که مدل تمایز دوگروهی توانسته است به طور کلی ۸۵/۹ درصد از موارد اصلی را به درستی در گروه‌های وقوع بهمن (گروه یک) و عدم وقوع بهمن (گروه صفر) دسته‌بندی کند. در گروه مناطق فاقد وقوع بهمن، ۹۲/۲ درصد موارد به درستی شناسایی شدند و تنها ۷/۸ درصد به اشتباه به گروه دارای بهمن تعلق گرفتند. برای گروه مناطق با وقوع بهمن، ۸۰ درصد از موارد به درستی طبقه‌بندی شدند و ۲۰ درصد به گروه صفر (یا عدم وقوع بهمن) اختصاص یافتند. در اعتبارسنجی متقابل، دقت کلی مدل ۸۴/۵ درصد بود، که نشان‌دهنده پایداری عملکرد مدل در شناسایی مناطق مستعد وقوع بهمن است. همچنین، همانند داده‌های اصلی، دقت تشخیص گروه صفر کمی بالاتر از گروه یک بود، که بیانگر کمی چالش در پیش‌بینی دقیق تمام سلول‌های مستعد وقوع بهمن است. این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های توپوگرافی و محیطی انتخاب شده توانسته‌اند با دقت مناسب، الگوی مکانی وقوع بهمن را در منطقه مطالعه بازنمایی کنند. تحلیل حاضر می‌تواند به پژوهشگران کمک کند تا در انتخاب و استفاده از متغیرهای مهم برای مدل‌های پیش‌بینی و مدیریت ریسک‌های جغرافیایی، تصمیمات بهتری بگیرند.

جدول ۶- نتایج ارزیابی صحت و دقت تابع تشخیص عوامل مؤثر بر وقوع بهمن

Table 6- Evaluation Results of Diagnostic Function Accuracy for Avalanche-Causing Factors

Classification Results ^{a,c}			Predicted Group Membership		Total
Original	Count	Code	0	1	
		0	130.0	11.0	141
		1	30.0	120.0	150
		0	92.2	7.8	100
Cross-validated ^b	Count	1	20.0	80.0	100
		0	128.0	13.0	141
		1	32.0	118.0	150
		0	90.8	9.22	100
	%	1	21.3	78.67	100

a. 85.9% of original grouped cases correctly classified.

b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.

c. 84.5% of cross-validated grouped cases correctly classified.

تأثیر کاربری اراضی و زمین‌شناسی بر وقوع بهمن

با توجه به نقشه کاربری اراضی (شکل ۸) بیشترین مساحت منطقه دارای کاربری مرتع (۹۳ درصد)، سپس رخنمون سنگی (۳/۱ درصد) و اراضی باغی (۱/۲ درصد) می‌باشد و سایر کاربری‌ها دارای مساحت ناچیزی می‌باشند. بررسی تأثیر کاربری اراضی منطقه در وقوع بهمن نشان داد که ۸۸/۷ درصد نقاطی که مستعد وقوع بهمن در منطقه هستند و بهمن در آن‌ها رخ داده است دارای کاربری مرتع بوده است، سایر کاربری‌های مناطق مستعد وقوع بهمن، شامل اراضی باغی با ۴/۷ درصد، بستر آبراهه‌ها با ۳/۳، رخنمون‌های سنگی با ۲ درصد و مناطق مسکونی ۱/۳ درصد بوده‌اند. پوشش گیاهی و کاربری اراضی با تأثیر بر تجمع برف و پایداری توده‌های برف، تأثیر چشمگیری بر دینامیک بهمن و شکل‌گیری آن دارند (Peitzsch, Martin-Mikle, Hendrikx, Birkeland & Fagre, 2024). گونه‌های گیاهی مانند درختچه‌ها، گون و گونه‌های خشبی با تأثیر بر تجمع برف و ایجاد زبری در سطح زمین وقوع بهمن را کاهش داده درحالی که گونه‌هایی مانند گراس‌ها با ایجاد سطوح صاف و صیقلی باعث افزایش شکل‌گیری بهمن می‌شوند. به‌طور کلی مناطقی با پوشش گیاهی جنگلی و انبوه با کاهش تجمع برف بر روی زمین منجر به کاهش پتانسیل ایجاد بهمن می‌شوند.

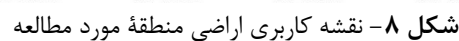


Fig. 8. Land Use Map of the Study Area

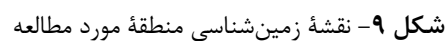


Fig. 9. Geological Map of the Study Area

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که وقوع بهمن در بالادست حوضه آبخیز سد کرج نتیجه تعامل پیچیده و چند بعدی عوامل توپوگرافی، ژئومورفولوژیکی و اقلیمی است و هیچ متغیری به تنهایی قادر به توضیح الگوی مکانی این پدیده نمی باشد. تحلیل مؤلفه های اصلی با کاهش ابعاد داده ها، ساختارهای غالب بین متغیرهای محیطی را آشکار ساخت و نشان داد که گرادیان ارتفاع - بارش - دما، موقعیت نسبی دامنه ها نسبت به شبکه زهکشی، هندسه سطح دامنه و شرایط رطوبتی از مهم ترین مؤلفه های مؤثر بر ناپایداری توده های برف هستند. بنابراین روش استخراج شش مؤلفه مستقل که بیش از ۸۰ درصد واریانس کل داده ها را تبیین می کنند، بیانگر توان بالای این روش در ساده سازی و تفسیر داده های پیچیده محیطی است.

نتایج خوشه بندی سلسله مراتبی نشان داد که متغیرهای مؤثر بر وقوع بهمن را می توان به سه گروه اصلی شامل عوامل مرتبط با ناهمواری و شیب دامنه ها، عوامل ژئومورفولوژیکی هدایت کننده مسیر حرکت بهمن و عامل اقلیمی دما تفکیک کرد. این تفکیک بیانگر آن است که فرآیند وقوع بهمن در منطقه مورد مطالعه، نه تنها تحت تأثیر شرایط شروع بهمن، بلکه متأثر از ویژگی های مسیر و نواحی تجمع نیز می باشد.

تحلیل تابع تشخیصی (DFA) نقش کلیدی برخی متغیرها را در تفکیک مناطق وقوع و عدم وقوع بهمن به طور کمی تأیید کرد. شاخص موقعیت نسبی شیب، عمق دره، شاخص رطوبت توپوگرافی و فاصله تا رودخانه به عنوان مهم ترین عوامل تمایز دهنده شناسایی شدند که نشان دهنده اهمیت موقعیت مکانی سلول ها بر روی دامنه، تمرکز رطوبت و ارتباط با شبکه زهکشی در کنترل پایداری برف است. در مقابل، متغیرهایی نظیر ناهمواری برداری، جهت شیب و فاصله از گسل تأثیر محدودی در تفکیک مناطق مستعد بهمن نشان دادند. دقت بالای مدل تمایز، چه در داده های اصلی و چه در اعتبارسنجی متقابل، نشان دهنده قابلیت اعتماد این رویکرد در تحلیل مخاطره بهمن می باشد.

در مجموع، این پژوهش نشان می دهد که استفاده تلفیقی از روش های آماری چندمتغیره می تواند ابزاری کارآمد برای شناسایی عوامل کلیدی، کاهش عدم قطعیت و بهبود پهنه بندی خطر بهمن در مناطق کوهستانی باشد. نتایج به دست آمده می توانند در مدیریت پیشگیرانه مخاطرات، برنامه ریزی کاربری اراضی و کاهش خسارات جانی و مالی، به ویژه در مناطق پرتردد و گردشگری مانند پیست دیزین، مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، ترکیب این روش ها با داده های زمانی برف و مدل های یادگیری ماشین، به منظور افزایش دقت پیش بینی خطر بهمن، مورد توجه قرار گیرد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل حمایت مالی از پژوهش حاضر با کد طرح ۶۴۰۹۹ سپاسگزاری می کنند.

References

- Benítez, J., Carpitella, S., Certa, A., & Izquierdo, J. (2020). Constrained consistency enforcement in AHP. *Applied Mathematics and Computation*, 380, 125273. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125273>
- Chabuk, A., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., Pusch, R., & Laue, J. (2017). Combining GIS applications and method of multi-criteria decision-making (AHP) for landfill siting in Al-Hashimiyah Qadhaa, Babylon, Iraq. *Sustainability*, 9(11), 1932. <https://doi.org/10.3390/su9111932>
- Denissova, N., Nurakynov, S., Petrova, O., Chepashev, D., Daumova, G., & Yelisseyeva, A. (2024). Remote Sensing Techniques for Assessing Snow Avalanche Formation Factors and Building Hazard Monitoring Systems. *Atmosphere*, 15(11), 1343. <https://doi.org/10.3390/atmos15111343>

- Durlević, U., Valjarević, A., Novković, I., Ćurčić, N. B., Smiljić, M., Morar, C., ... & Lukić, T. (2022). GIS-Based Spatial Modeling of Snow Avalanches Using Analytic Hierarchy Process. A Case Study of the Šar Mountains, Serbia. *Atmosphere*, 13(8), 1229. <https://doi.org/10.3390/atmos13081229>
- Eiselt, K. U., & Graversen, R. G. (2025). Past and future changes in avalanche problems in northern Norway estimated with machine-learning models. *Egusphere*, 2025-4685. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4685>
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis* (5th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Cluster+Analysis%2C+5th+Edition-p-9780470749913>
- Fazzini, M., Cordeschi, M., Carabella, C., Paglia, G., Esposito, G., & Miccadei, E. (2021). Snow avalanche assessment in mass movement-prone areas: Results from climate extremization in relationship with environmental risk reduction in the Prati di Tivo area (Gran Sasso Massif, Central Italy). *Land*, 10(11), 1176. <https://doi.org/10.3390/land10111176>
- Floyer, J. A., & McClung, D. M. (2003). Numerical avalanche prediction: Bear pass, British Columbia, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3), 333-342. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00074-0)
- Gholinia, F., Esmali, A., Asghari, S., Abedini, M., & Badrzadeh, M. (2016). Avalanche hazard using Analytical Hierarchy Process (AHP) Model (Case Study: Pilerood Watershed, Ardabil Province). *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 1-6. https://www.wmji.ir/article_697019.html?
- Greenacre, M., Groenen, P. J. F., Hastie, T., D'Enza, A. I., Markos, A., & Tuzhilina, E. (2022). Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2, 100. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w>
- Hao, J., Mind'je, R., Liu, Y., Huang, F., Zhou, H., & Li, L. (2021). Characteristics and hazards of different snow avalanche types in a continental snow climate region in the Central Tianshan Mountains. *Journal of Arid Land*, 13(4), 317-331. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0058-5>
- Horton, S., Herla, F., & Haegeli, P. (2025). Clustering simulated snow profiles to form avalanche forecast regions. *Geoscientific Model Development*, 18(1), 193-209. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-193-2025>
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2005). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Kavoosi, O., & Nazarisamani, A. (2023). Evaluation of the role of input data type on the accuracy of snow avalanche hazard map with Shannon's entropy data-driven approach. *Quantitative Geomorphological Researchs*, 12(2), 59-71. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_169972_en.html
- Kazemzadeh, M., & Malekian, A. (2017). Analysis of the surface water quality parameters in the Aji-Chai Watershed based on the multivariate statistical techniques. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(2), 465-478. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.109430.779>
- Kazemzadeh, M., Noori, Z., & Jahantigh, M. (2022a). Analysis and simulation of affecting factors on snow avalanche occurrence using RAMMS model, Velayat Rood in Central Alborz, Alborz Province. *Watershed Engineering and Management*, 16(3), 450-468. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357252.1949>
- Kazemzadeh, M., Noori, Z., Jamali, S., Ghorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2022b). Forty years of air temperature change over Iran reveals linear and nonlinear warming. *Journal of Meteorological Research*, 36(3), 462-477. <https://doi.org/10.1007/s13351-022-1184-5>
- Liang, J., & Yang, J. (2022). Application of the AHP method on the optimization with undesirable priorities. *Engineering with Computers*, 38(Suppl 3), 2137-2153. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01359-x>
- Liu, J., Zhang, T., Hu, C., Wang, B., Yang, Z., Sun, X., & Yao, S. (2023a). A study on avalanche-triggering factors and activity characteristics in Aerxiangou, West Tianshan Mountains, China. *Atmosphere*, 14(9), 1439. <https://doi.org/10.3390/atmos14091439>
- Liu, Y., Chen, X., Yang, J., Li, L., & Wang, T. (2023b). Snow avalanche susceptibility mapping from tree-based machine learning approaches in ungauged or poorly-gauged regions. *Catena*, 224, 106997. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106997>

- Maceika, A., Bugajev, A., Šostak, O. R., & Vilitienė, T. (2021). Decision tree and AHP methods application for projects assessment: a case study. *Sustainability*, 13(10), 5502. <https://doi.org/10.3390/su13105502>
- Maggioni, M., & Gruber, U. (2003). The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3), 407-419. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00080-6)
- Malekian, A., & Kazemzadeh, M. (2016). Spatio-temporal analysis of regional trends and shift changes of autocorrelated temperature series in Urmia Lake Basin. *Water Resource Management*, 30, 785-803, <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1190-9>
- McClung, D., & Schaerer, P. A. (2006). *The Avalanche Handbook* (3rd ed.). The Mountaineers Books. <https://www.mountaineers.org/books/books/the-avalanche-handbook-4th-edition>
- Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., & Farokhnia, A. (2010). Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistic. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 5856-5862. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.028>
- Nosrati, K., Kiashemshaki, S., & Hoseinzadeh, M. M. (2016). Prediction of snow avalanche -susceptibility in Meigun-Shemshak road using rare events logistic regression. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(1), 55-68. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v5i1.47116>
- Peitzsch, E. H., Martin-Mikle, C., Hendriks, J., Birkeland, K., & Fagre, D. (2024). Characterizing vegetation and return periods in avalanche paths using lidar and aerial imagery. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 56(1), 2310333. <https://doi.org/10.1080/15230430.2024.2310333>
- Rafique, A., Dasti, M. Y., Ullah, B., Awwad, F. A., Ismail, E. A., & Saqib, Z. A. (2023). Snow avalanche hazard mapping using a GIS-based AHP approach: A case of glaciers in northern Pakistan from 2012 to 2022. *Remote Sensing*, 15(22), 5375. <https://doi.org/10.3390/rs15225375>
- Rahmati, O., Ghorbanzadeh, O., Teimurian, T., Mohammadi, F., Tiefenbacher, J. P., Falah, F., & Bui, D. T. (2019). Spatial modeling of snow avalanche using machine learning models and geo-environmental factors: Comparison of effectiveness in two mountain regions. *Remote Sensing*, 11(24), 2995. <https://doi.org/10.3390/rs11242995>
- Rakhymberdina, M., Denisova, N., Bekishev, Y., Daumova, G., Konečný, M., Assylkhanova, Z., & Kapasov, A. (2025). Investigation of the Regularities of the Influence of Meteorological Factors on Avalanches in Eastern Kazakhstan. *Atmosphere*, 16(6), 723. <https://doi.org/10.3390/atmos16060723>
- Salahi, B., Halabian, A. H., Zeinali, B., & Kashani, A. (2024). Analyzing the relationship between snow cover and physiographic factors in the northwestern mountainous area of Iran. *Quantitative Geomorphological Researchs*, 13(2), 195-218. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.456313.1501>
- Shayan, S., Ghelichi, E., & Yamani, M. (2017). Geomorphologic and Environmental Hazards Assessment in Karaj-Chaloos Way (Karaj to Kandowan Tunnel). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(2), 1-16. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.46291>
- Tabari, H., & Talaei, P. H. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global Planetary Change*, 79, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.008>
- Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A., & Bebi, P. (2012). Snow avalanches in forested terrain: Influence of forest parameters, topography, and avalanche characteristics on runout distance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44(4), 509-519. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-44.4.509>
- Varol, N. (2022). Avalanche susceptibility mapping with the use of frequency ratio, fuzzy and classical analytical hierarchy process for Uzungol area, Turkey. *Cold Regions Science and Technology*, 194, 103439. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103439>

- Wang, H., Wang, B. B., Cui, P., Ma, Y. M., Wang, Y., Hao, J. S., ... & Li, C. Y. (2024). Disaster effects of climate change in High Mountain Asia: State of art and scientific challenges. *Advances in Climate Change Research*, 15(3), 367-389. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2024.06.003>
- Wen, L., Xiang, L., Cai, Y., Su, F., & Yan, Z. (2016). Research on the formation mechanism of avalanches. *Journal of Mountain Science*, 34, 1-11.
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1-3), 37-52. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)
- Zare Chahouki, M. R. (2010). *Data Analysis in Natural Resources Research Using SPSS Software*. Jahad Daneshgahi Publishing Center (Academic Center for Education, Culture and Research), Tehran. [In Persian]