

Research Paper



Avalanche Hazard Zoning Using LNRF and Shannon Entropy Models

Case Study: Part of Haraz Road, Poldokhtar-Vana



Eisa Jokar Sarhangi^{*1}, Ghasem Lorestani², Vahid Falah³



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI: 10.22034/HYD.2023.54970.1674

Reference to this article: Jokar Sarhangi, E; Lorestani, Gh; Falah, V (2023). Avalanche Hazard Zoning Using LNRF and Shannon Entropy Models Case Study: Part of Haraz Road, Poldokhtar-Vana. *Hydrogeomorphology*, 10(35): 66-81.

Keywords

Avalanche, Shannon Entropy, LNRF, Haraz Road, Northern Iran.

Receive Date: 2023/01/16

Accept Date: 2023/04/15

Available: 2023/07/21

ABSTRACT

The studied area on the Haraz Road from Poldakhter to Vana is prone to avalanches due to its cold mountain climate. The purpose of this research is to determine the most important factors affecting the occurrence of avalanches and its risk zoning using LNRF and Shannon Entropy models. For this purpose, the criteria of snow cover, elevation, slope, aspect, slope curvature, landuse and distance from the road have been used. The results of determining the most important factors affecting the occurrence of avalanches in the studied area using Shannon's Entropy model showed that the aspect, landuse, distance from the road and snow cover with weights of 0.541, 0.143, 0.129 and 0.083 respectively are more important. Avalanche risk zoning maps show that the highest avalanche risk is due to the location of these areas at an altitude of 2100-2700 meters and a slope of 30-60 degrees with the direction of the northeastern and northern slopes. Evaluation of avalanche risk zoning maps using the empirical probability index (P) indicates the appropriateness of Shannon entropy and LNRF models in the region, but the application of Shannon entropy has led to an increase in map accuracy up to 97%.

*** Corresponding Author: Eisa Jokar Sarhangi**

E-mail: e.jokar@umz.ac.ir

1. Associate Professor of Geomorphology, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

2. Assistant Professor of Geomorphology, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

3. M.A. OF Natural Hazard, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

Extended Abstract

1- Introduction

Snow avalanches threaten towns and roads in steep mountainous regions (Gruber and Bartelt, 2007). The occurrence of avalanches is caused by environmental conditions, including snow bed, the severity, and direction of the wind, new snow fallen, the non-attachment of new snow crystals to old snow, snow melted across the day, suitable slope, etc., which together with other factors, could cause severe avalanches (Mott et al, 2010). Studies conducted on avalanches in Iran are very limited (Heydari et al, 2015). Past literature suggests that in all cases, slope, the hillside direction, and height are the most important factors affecting the occurrence of avalanches.

The Haraz mountainous road is one of the main link axes of the northern country, which is prone to avalanches due to its specific morphological conditions. The occurrence of avalanches since the establishment of this road up to now has caused a large number of material damage, even claiming some lives over the years (Ghanavati and Karimi, 2009). For this, the goal of this present study was to understand the factors affecting the cause of avalanches and prioritize those factors and compare the efficiency of the Shannon Entropy and LNRF models to achieve more accurate avalanche hazard zoning maps of the Haraz Road.

2- Methodology

The area under study is located in the province of Mazandaran, Iran, and is part of the access road of Haraz, which begins from Poldokhtar in the southwest and extends down to the proximity of the Vana village in its northeast. This area covers an area of 10942 hectares on the geographical location of 35°48'05" to 35°55'49" north latitude and 52°00' 38" to 52°16'57" east longitude.

This study used Shannon entropy and LNRF models to zone avalanche hazards on the Haraz Road from Poldokhtar to Vana, and to determine the most important effective factors. The input data included the points where samples were taken from snow avalanche areas (the model's dependent variable) and mapping the factors affecting those areas (the model's independent variables). At first, satellite images on Google Earth software were used to pinpoint the areas with the largest amount of snowfall, and also several avalanche-prone points. Then, to complete the data and better identify the avalanche-prone areas, field observations were made, as the situation of avalanches was recorded using the GIS device. Also, the existing data sources, including data from the General Department of Road and Urbanization of Mazandaran Province and avalanche protectors were used. Upon preparing the avalanche scattering map, the digital elevation model (DEM) with a resolution power of 30 m (the USGS site) was used to provide elevation layers, slope, hillside direction, and the hillside curve. To determine the surfaces covered with snow, Landsat satellite images (2015 to 2019) on the Google Earth Engine were used. Here, the snow surface index or NDSI was used to determine the snow-covered surfaces. As well, to provide ground land use and Landcover map, the Google Earth Engine system was used which is a new product of Sentinel satellite images, a subset of the Copernicus Global Service¹ ImageCollection (CGLS).

In the next stage, maps of the affecting criteria and factors were crossed with the avalanche scattering map in the GIS environment, and the level of avalanches for any of the classes of the criteria was determined. Then, using Equation (1), the LNRF coefficient of each of the classes was calculated, where A is the area of avalanches that occurred in a unit of the map and E is the average avalanches that occurred in all units of a map. If this coefficient is less than 0.67, the weight of the class is zero and its hazard is low; on the other hand, if the LNRF coefficient ranges from 0.67 to 1.33, the weight of the class is 1 or medium, while the coefficient of over 1.33 has a class weight of 2 with a high hazard (Gupta and Joshi, 1990).

$$\text{LNRF} = \frac{A}{E} \quad (1)$$

1- ee. ImageCollection("COPERNICUS/Landcover/100m/Proba-V-C3/Global")

This study used the Shannon entropy model to weigh the factors and to zone the avalanches occurrence hazard in the region. To implement this model, all the criteria and factors, mentioned in the previous model, were used as inputs to the model with a similar geographical coordinates system, and the decision-making matrix (x_{ij}) was created. This matrix was then normalized and the weight of the criterion (W_j) was finally determined, which was calculated by dividing d_j (uncertainty) by the sum of the d_j s (Asgarpour, 2009).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j} \quad (2)$$

The resulting weights in this model were used as a context for all the affecting criteria, which produced the avalanches hazard zoning map of the region. There are various methods to evaluate the models, and this study used the empirical probability index of P .

3- Results and Discussion

The goal of this study was to determine the most important factors affecting the occurrence of avalanches and to provide hazard zoning on the Haraz Road from Poldokhtar to Vana using the Shannon entropy and LNRF models. To this aim, such criteria as snow cover, height, slope, hillside direction, hillside curve, land use, and distance from the road were used. The results of the most important factors affecting the occurrence of avalanches in the studied region using the Shannon entropy model suggested that hillside direction, land use, distance from the road, and snow cover held the highest importance at 0.541, 0.143, 0.129, and 0.083, respectively.

A study of the avalanches hazards on the hillside direction indicated that high-risk zones were situated on the northeastern and northern angles of the region. According to the findings by Samani et al. (2011), the factor of slope direction, led by slope and height factors, contributed most to the occurrence of avalanches due to its effects on the amount of solar heat absorption and the melting of snow layers, with vegetation coming in the next rank. A study of the land use of the studied area in the Haarz Valley indicated that avalanche hazards were higher due to the mountainous region and the lack of soil thickness in weaker pastures. Scoring avalanche passageways, Ahmadi and Nasri (2007) gave the highest priority to the topography and soil surface, and vegetation conditions. In the facies of stone and rock outcrop, the snow cover is not so thick, because dark stones melt the snow by absorbing the heat. Unless short bushes are buried under the snow, they may cause the snow to attach to the hillside and reduce the probability of avalanches. However, as soon as it is covered with snow, the avalanche risk increases rapidly. Also, Arman and Salajegheh's study (2007) concluded that at the height of 3500 m of the basin, if the snow height reaches over 25 cm, ball-shaped avalanches occur due to the sloped hillsides and the force of the snow weight. Finally, using the weights obtained for each of the affecting criteria and factors, avalanches hazard zoning was mapped by using the Shannon entropy and LNRF models.

4- Conclusions

This study investigated the variables and factors affecting the occurrence of avalanches on the Haraz Road from Poldokhtar to Vana, including snow cover, height, slope, hillside direction, land use, and distance from the road. Then, the LNRF model was used to provide the avalanche hazard zoning in the region. Also, the Shannon entropy model was used to determine the importance of each of the variables and to zone the avalanche hazards. The findings revealed that the variables of hillside direction, vegetation, land use, and snow cover were respectively more effective in the occurrence of avalanches. As the importance of each of the variables was determined, the layers required were prepared, and the overlap of the layers based on the weights of each layer produced an avalanche hazard zoning map in the region. Avalanche hazards zoning maps of the region indicated that the highest hazards pertained to the highlands of 2100-2700 m and the slope of 30-60° in the northern and northeastern directions. To evaluate the models, the location of avalanches, not used to model and map the zoning, were applied. Meanwhile, matching them with the prepared zoning maps yielded the empirical probability (P) of 94% for the LNRF model, and 97% for the Shannon entropy model, suggesting the avalanches hazard zoning models for the region under study were appropriate. According to the avalanches hazard zoning map using the Shannon entropy model, which was more acceptable, around

15% of the region's area over the road path from Poldokhtar to Vana was subjected to the highly hazardous zones.

5- References

- Ahmadi, H., & Nasri, M. (2007). An investigation on avalanche zoning in Se Pestan valley watershed (Fereidunshahr, Isfahan province) using GIS techniques, *Journal of the Iranian Natural Resources*, 60(1), 13-32.
- Arman, N., & Salajegheh, A. (2008). The survey of avalanche- pron regions for determining the effective factors (Case study: Shian & Torivar basin of Kordestan province), *Journal of the Iranian Natural Resources*, 60(4), 1099-1116.
- Asgarpour, M. J. (2009). Multiple criteria decision making, University of Tehran, 399p.
- Ghanavati, E., & Karimi, J. (2009). Avalanche hazard zoning on Haraz Road based on geomorphological characteristics, *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 9(7), 83-100.
- Gruber, U., & Bartelt, P. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS, *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1472-1481.
- Gupta RP, Joshi BC. (1990). Landslide hazard zoning using the GIS approach (A case study from the Ramganga catchment). *Himalayas Engineering Geology*, 28(1), 119–131.
- Heydari, M., Davoudian, A., & Zare Bidaki, R. (2015). Survey the Avalanche-Prone Area Using Geographical Information System (Case Study: Tang Darkesh Varkesh, Chaharmahal and Bakhtiari province), *GeoRes*, 30(1), 225-238.
- Mott, R., Grunewald, T., Schirmer, M., Wirz, V., Lehning, M., (2010). Understanding snow deposition on mountain slopes, *Journal of Geophysical Research*, 12: EGU2010-12248, 95-104.
- Nazari samani, A.A., Rajaei, A., & Motamed Vaziri, B., (2011). Avalanche hazard zoning based on field data in order to provide controlling strategies in Semirom Region, Isfahan, *Journal of Range and Watershed Management*, 64(4), 477-491.

مقاله پژوهشی



پهنه‌بندی خطر بهمن با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و LNRF مطالعه موردی: بخشی از جاده هراز، پلدختر- وانا



عیسی جوکار سرهنگی^{۱*}، قاسم لرستانی^۲، وحید فلاح^۳



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: جوکار سرهنگی، عیسی؛ لرستانی، قاسم؛ فلاح، وحید (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر بهمن با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و LNRF مطالعه موردی: بخشی از جاده هراز، پلدختر- وانا. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۵): ۸۱-۶۶.

DOI: 10.22034/HYD.2023.54970.1674



چکیده

منطقه مورد مطالعه در مسیر جاده هراز از پلدختر تا وانا، با آب و هوای سرد کوهستانی البرز مرکزی برای وقوع بهمن مستعد است. هدف از این پژوهش تعیین مهم‌ترین عوامل موثر در وقوع بهمن و پهنه‌بندی خطر آن با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و LNRF است. برای این منظور از معیارهای پوشش برف، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای دامنه، کاربری اراضی و فاصله از جاده استفاده شده است. نتایج تعیین مهم‌ترین عوامل موثر در وقوع بهمن منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل آنتروپی شانون نشان داد که به ترتیب جهت دامنه، کاربری اراضی، فاصله از جاده و پوشش برف با وزن‌های ۰/۵۴۱، ۰/۱۴۳، ۰/۱۲۹ و ۰/۰۸۳ اهمیت بیشتری دارند. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر بهمن برای منطقه نشان می‌دهند که بیشترین خطر بهمن در قسمت‌های جنوبی و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه قرار دارد که به دلیل قرار گرفتن این مناطق در ارتفاعات ۲۷۰۰-۲۱۰۰ متر و شیب ۶۰-۳۰ درجه با جهت دامنه‌های شمال شرقی و شمالی می‌باشد. ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر بهمن با استفاده از شاخص احتمال تجربی (P) حاکی از مناسب بودن مدل‌های آنتروپی شانون و LNRF در منطقه است، اما کاربرد آنتروپی شانون منجر به افزایش دقت نقشه تا ۹۷ درصد شده است.

کلیدواژه‌ها

بهمن، آنتروپی شانون، LNRF، جاده هراز، شمال ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

* نویسنده مسئول: عیسی جوکار سرهنگی

رایانامه: e.jokar@umz.ac.ir

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۳- کارشناس ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۱- مقدمه

سقوط بهمن یکی از پدیده‌های مناطق برف‌گیر است که اگر به صورت علمی با آن برخورد نشود ممکن است خطرات فراوان و مشکلات جبران ناپذیری در مسیرهای ارتباطی مناطق کوهستانی، تفرج گاه‌ها و معادن به وجود آورد (قنوتی و کریمی، ۱۳۸۸: ۸۳). سقوط بهمن، زیستگاهها و جاده‌ها را در مناطق کوهستانی پر شیب تهدید می‌کند. از آنجاکه در کشور ایران، نزولات آسمانی در نقاط کوهستانی به صورت برف است، شرایط تشکیل بهمن نیز وجود دارد (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۵: ۵۵). مناطق بهمن خیز ایران بر روی دو رشته کوه اصلی یعنی البرز و زاگرس واقع شده است. از نظر وفور وقایع بهمن رشته کوه البرز مرکزی دارای بیشترین تکرار حادث می‌باشد (احمدی و نصری، ۱۳۸۶: ۱۴). وقوع بهمن می‌تواند باعث تخریب جاده‌ها شده و تهدیدی برای شهرک‌ها و ساختمان‌ها و از همه مهمتر تلفات جانی می‌شود (گروبر و بارتلد، ۲۰۰۷: ۶۱). وقوع بهمن تابع شرایط محیطی از قبیل بستر برف، شدت و جهت باد، شیب مناسب و غیره است که با حضور این عوامل کنار یکدیگر امکان وقوع بهمن به شدت افزایش می‌یابد. (مات و همکاران، ۲۰۱۰: ۲). نگاهی به حوادث سقوط بهمن‌های متعدد که متأسفانه منجر به خسارات جانی و مالی فراوانی گردیده است، نیاز به آشنایی با بهمن و نحوه وقوع آن را افزایش می‌دهد. از این‌رو ضرورت دارد در راستای پیشگیری و کاهش خسارات از چنین سوانح طبیعی، عوامل موثر بر شکل‌گیری بهمن شناسایی و ارزیابی شده و ضمن شناسایی محل‌های وقوع بهمن، نقشه پهنه‌بندی خطر بهمن در منطقه با کمک تکنولوژی‌های جدید تهیه گردد.

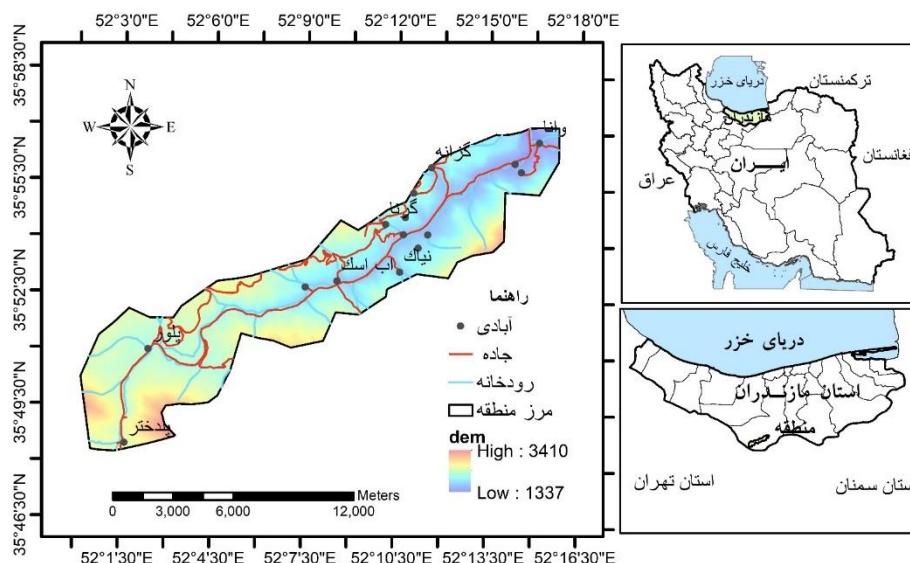
مطالعات انجام شده در مورد بهمن در ایران بسیار محدود است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۲۷). برخی از این مطالعات، عوامل موثر در وقوع بهمن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند و مناطق پرخطر و مسیر اصلی حرکت بهمن‌ها را معین نمودند که از جمله آنها می‌توان به نظری‌سامانی و همکاران (۱۳۹۰)، حیدری و همکاران (۱۳۹۴)، ووی کلوتز (۲۰۰۹) و او میرژانوآ و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد. در بیشتر این مطالعات، عامل جهت شیب، شیب و ارتفاع دارای بیشترین تاثیر در وقوع بهمن‌ها شناخته شدند. اسد امراجی و همکاران (۱۳۹۲) به عامل پوشش برف و پوشش گیاهی نیز توجه نمودند و به این نتیجه رسیده‌اند که در مناطق با عمق بیش از یک متر برف و بدون پوشش گیاهی و شیب بین ۲۰ تا ۶۰ درجه بیشترین امکان وقوع بهمن وجود دارد. برخی دیگر، به پهنه‌بندی خطر بهمن با استفاده از مدل‌های مختلف پرداختند که از جمله آنها می‌توان به مطالعات قنوتی و کریمی (۱۳۸۸) با استفاده از مدل AHP، نیری و همکاران (۱۳۹۵) با دو مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و همچنین احمدی و مرادی (۱۳۹۸) با استفاده از مدل شبکه عصبی اشاره نمود.

از مدل آنتروپی شانون استفاده‌های مختلفی شده است. پیچفورد و همکاران (۲۰۱۵) برای مدل‌سازی پتانسیل فرسایش رودخانه‌ها (SEP) و مریانجی و رمضانی (۱۳۹۹) برای تعیین میزان اثرگذاری عوامل موثر بر سیل‌خیزی استان همدان از حداکثر آنتروپی استفاده کرده‌اند. همچنین تیموری و اسدی نلیوان (۱۳۹۸) در استان لرستان، حنیفی نیا و همکاران (۱۳۹۹) در آبخیز چریک آباد ارومیه و سپنگ و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه بانوپالی- بری هند برای پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش از مدل آنتروپی شانون استفاده کرده‌اند که براساس ارزیابی آنها عملکرد این مدل مناسب است. از پژوهش‌هایی که در آنها از مدل LNRF استفاده شده است، زارع و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه خارستان فارس و عبادی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه سد چراغ‌ویس کردستان نتیجه‌گیری کردند که عملکرد مدل LNRF برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش بهتر است.

جاده کوهستانی هراز یکی از محورهای اصلی ارتباطی شمال کشور می‌باشد که به علت شرایط خاص ژئومورفولوژیکی در بخش‌هایی از مسیر آن زمینه مناسبی جهت سقوط بهمن ایجاد شده است، به‌طوری که وقوع این پدیده از ابتدای احداث این جاده تاکنون منجر به ایجاد خسارت مالی فراوانی شده است و حتی در بعضی از سال‌ها خسارات جانی تاسف باری را به وجود آورده است (قنوتی و کریمی، ۱۳۸۸: ۸۴). از این‌رو هدف از این پژوهش شناخت عوامل موثر در ایجاد بهمن و اولویت‌بندی این عوامل و همچنین مقایسه کارایی مدل‌های آنتروپی شانون و LNRF به منظور دستیابی به نقشه‌های پهنه‌بندی دقیق‌تر از خطر بهمن در بخشی از جاده هراز است.

۲- مواد و روش

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، بخشی از جاده ارتباطی هراز است که از پلدختر در غرب و جنوب غربی منطقه شروع شده و تا آبادی وانا در شمال شرقی آن ادامه دارد. این منطقه با مساحت ۱۰۹۴۲ هکتار در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ} 48' 05''$ الی $35^{\circ} 55' 49''$ عرض شمالی و $38^{\circ} 00' 52''$ الی $37^{\circ} 16' 52''$ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع بیشینه و کمینه در منطقه به ترتیب ۱۳۱۷ و ۳۴۱۰ متر از سطح دریا می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

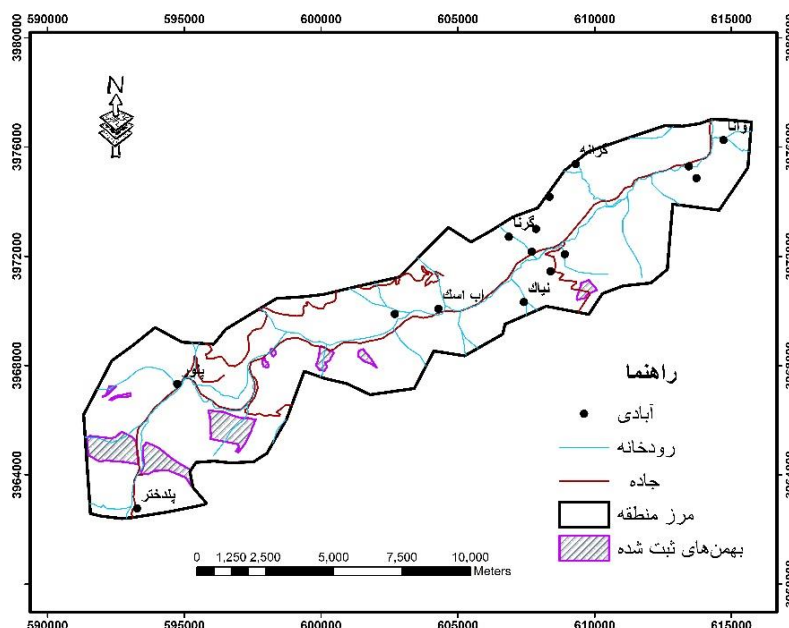
Fig (1): Geographical location of the study area

در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی خطر بهمن در مسیر جاده هراز از پلدختر تا وانا و همچنین تعیین مهم‌ترین عوامل موثر از مدل‌های آن‌تروپی شانون و LNRF استفاده شده است. داده‌های ورودی شامل نقاط نمونه برداری از مناطق بهمن برفی (متغیر وابسته مدل) و تهیه نقشه‌های عوامل موثر در آن (متغیرهای مستقل مدل) می‌باشند. در ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده از نرم افزار گوگل ارث، مناطق با بارش برف زیاد و همچنین تعدادی از نقاط بهمن خیز منطقه شناسایی شدند. سپس برای تکمیل اطلاعات و شناسایی دقیق مکان‌های بهمن خیز، نسبت به بازدید و مشاهده میدانی اقدام گردید و موقعیت بهمن‌ها در دامنه‌های مسلط به جاده هراز از پلدختر تا وانا به وسیله دستگاه GPS ثبت گردید. همچنین از منابع اطلاعاتی موجود از قبیل اداره کل راه و شهرسازی استان مازندران وجود بهمن‌گیرها در منطقه استفاده شد (شکل ۲) و نقشه پراکنش بهمن برفی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۳).



شکل (۲): نمونه‌ای از بهمن‌گیر در مسیر ارتباطی جاده هراز در حوالی آب اسک (منبع: نگارندگان)

Fig (2): An example of an avalanche stuck in the Haraz road near Ab Ask



شکل (۳): نقشه پراکنش بهمن در مسیر ارتباطی جاده هزار از پلدختر تا وانا (منبع: نگارندگان)

Fig (3): Avalanche distribution map on Haraz road from poldakhter to Vana

بعد از تهیه نقشه پراکنش بهمن، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت USGS برای تهیه لایه‌های ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای دامنه استفاده شد. به منظور تشخیص سطوح پوشیده از برف در سامانه گوگل ارث انجین از تصاویر ماهواره ای (2015/2019) لندست استفاده شد که در آن برای تشخیص سطوح پوشیده شده از برف از شاخص سطح برف یا NDSI کمک گرفته می شود. به علت انعکاس پایین برف در باند های مادون قرمز و انعکاس بالا در باندهای مرئی، این شاخص می تواند در تشخیص پوشش برف از سایر پدیده ها مفید باشد. شاخص NDSI با داده های سنجنده MODIS با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می شود (هال و همکاران، ۲۰۰۲).

$$NDSI = \frac{(band4 - band6)}{(band4 + band6)} \quad (1)$$

حاصل به کارگیری شاخص NDSI این است که پیکسل هایی با ارزش ۱- تا ۱+ ایجاد شد. ارزش هایی که از ۱- تا صفر باشد نشان دهنده مناطقی است که برف در آن ها وجود ندارد و از صفر تا ۱+ مناطقی را شامل می شود که برف با توجه به سنگینی و سبکی ضرایب مثبت را به خود اختصاص می دهد. هر قدر عمق برف بیشتر باشد، عدد مورد نظر به ۱ نزدیکتر و هر چه کم عمق تر باشد به صفر متمایل می شود.

برای تهیه نقشه پوشش و کاربری زمین از سامانه گوگل ارث انجین استفاده شده که یک محصول جدید از تصاویر ماهواره ای سنتینر در مجموعه خدمات جهانی کوپرنیک (CGLS) است و تخمین های مناسبی را برای پوشش گیاهی و انواع پوشش زمین ارائه می کند. این نقشه های پوشش زمین از سال ۲۰۱۹ برای کل کره زمین ارائه شده است.^۱ برای تهیه نقشه فاصله از جاده نیز از نقشه توپوگرافی و تصاویر گوگل ارث استفاده شده است. در مرحله بعد، هر یک از نقشه های معیارها و عوامل موثر با نقشه پراکنش بهمن در محیط GIS قطع داده شد و سطح بهمن برای طبقات معیارها مشخص شد. سپس با استفاده از رابطه ۲ ضریب LNRF برای هر کدام از طبقات محاسبه گردید. چنانچه این ضریب کمتر از ۰/۶۷ باشد، وزن طبقه صفر و خطر آن کم خواهد بود. اگر ضریب LNRF بین ۰/۶۷ تا ۱/۳۳ باشد، وزن طبقه یک یا متوسط خواهد بود و ضریب بالاتر از ۱/۳۳ وزن ۲ با خطر زیاد را نشان می دهد (گوپتا و جوشی، ۱۹۹۱).

$$LNRF = \frac{A}{E} \quad (2)$$

که در آن A مساحت بهمن رخ داده در یک واحد نقشه و E میانگین بهمن رخ داده در کل واحدهای یک نقشه است.

در مسائل تصمیم گیری چند معیاره و بخصوص مسائل تصمیم گیری چند شاخصه، داشتن و دانستن اوزان نسبی شاخص های موجود، گام مؤثری در فرایند حل مسئله بوده و مورد نیاز است. از جمله روش های تعیین وزن های شاخص ها مدل آنتروپی شانون است. از این رو در این پژوهش از مدل آنتروپی شانون جهت وزن دهی عوامل و پهنه بندی خطر وقوع بهمن در منطقه استفاده شده است. برای اجرای این مدل، تمامی معیارها و

¹- ee.ImageCollection("COPERNICUS/Landcover/100m/Proba-V-C3/Global")

عوامل یاد شده در مدل قبلی به عنوان ورودی مدل با سیستم مختصات یکسان جغرافیایی مورد استفاده قرار گرفت و ماتریس تصمیم‌گیری (xij) ایجاد شد. سپس این ماتریس نرمال شده که هر لایه نرمال شده مطابق با رابطه ۳ به صورت pij تعریف شده است.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

در قدم بعدی، مقدار Eij که ارزش آنتروپی است، تعیین شد. در واقع آنتروپی Eij از رابطه ۴ محاسبه شد و k نیز به عنوان یک ضریب ثابت از رابطه ۵ به دست آمد. (n تعداد معیارها می باشد)

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln p_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$K = \ln(n) \quad (5)$$

در ادامه، عدم اطمینان یا مقدار dj (درجه انحراف هر معیار) محاسبه شد که از کسر مقدار Eij از عدد یک به دست می‌آید.

$$D_j = 1 - E_j \quad (6)$$

سرانجام وزن معیار Wj محاسبه شد که در واقع وزن نهایی هر معیار است و برابر با تقسیم dj بر مجموع dj ها می‌باشد (اصغریور، ۱۳۸۵).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j} \quad (7)$$

وزن های به دست آمده در این مدل به عنوان بستری برای تمامی معیارهای موثر به کار گرفته شد که براساس آن (رابطه ۸) نقشه ی پهنه بندی خطر بهمن در منطقه با آن به دست آمد.

(۸)

$$X_1 \text{ تا } X_7 \text{ به ترتیب معیارهای پوشش برف، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای دامنه، کاربری اراضی و فاصله از جاده هستند.}$$

در این رابطه، X1 تا X7 به ترتیب معیارهای پوشش برف، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای دامنه، کاربری اراضی و فاصله از جاده هستند. شایان ذکر است که برای اجرای مدل‌ها، ۷۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی و ۳۰ درصد آنها جهت ارزیابی و اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای ارزیابی مدل‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از شاخص احتمال تجربی P استفاده شده است. بدین منظور پس از تهیه نقشه های پهنه بندی، با قطع دادن این نقشه‌ها با ۳۰ درصد از نقاط بهمن ثبت شده منطقه که در مدل سازی و تهیه نقشه های پهنه بندی مذکور استفاده نشد، سطح بهمن‌ها در طبقات مختلف خطر تعیین و در مرحله بعد با استفاده از رابطه ۹ میزان دقت مدل‌ها محاسبه شد.

$$P = \frac{KS}{S} \quad (9)$$

در این رابطه P احتمال تجربی، KS مساحت بهمن‌ها در رده‌های خطر متوسط به بالا و S مساحت کل بهمن‌های منطقه است. مدلی که میزان P آن بیشتر باشد، برای پهنه‌بندی خطر بهمن در منطقه مناسب‌تر است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تهیه نقشه پهنه بندی خطر وقوع بهمن در منطقه با اجرای مدل LNRF

برای بررسی نقش هر یک از عوامل در وقوع بهمن و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر آن در منطقه مورد مطالعه، نقشه پراکنش بهمن با نقشه های عوامل و معیارهای موثر در آن قطع داده شد. نتایج محاسبات ضریب LNRF و وزن هر یک از طبقات معیارهای وقوع بهمن برای منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور تشخیص سطح پوشش برف از شاخص NDSI استفاده شده و نقشه آن به ۴ طبقه با شاخص کمتر از ۰/۳۵، ۰/۳۵-۰/۶۰، ۰/۶۰-۰/۹۵ و ۰/۹۵-۰/۱۰۰ طبقه بندی شده است (شکل ۴). بررسی شاخص برف نشان داد که بیشترین ضریب LNRF با رقم ۳/۱۷۰ به طبقه چهارم و NDSI بالای ۰/۶ اختصاص دارد و رابطه بین آنها مستقیم است. در این راستا، آرمان و سلاجقه (۱۳۸۶) نشان دادند در ارتفاعات ۳۵۰۰ متری چنانچه ارتفاع برف به بیش از ۲۵ سانتیمتر برسد، بهمن گلوله‌ای در اثر شیب‌دار بودن دامنه‌ها و نیروی وزن برف به وجود می‌آید و اگر ضخامت برف به ۷۰ سانتیمتر برسد، خطر سقوط بهمن جدی است. به منظور بیان ارتباط بین عامل ارتفاع و بهمن‌های رخ داده در منطقه، نقشه طبقات ارتفاعی در ۵ طبقه کمتر از ۱۸۰۰، ۱۸۰۰-۲۱۰۰، ۲۱۰۰-۲۴۰۰، ۲۴۰۰-۲۷۰۰ و ۲۷۰۰ متر تهیه شده است (شکل ۴). از نظر ارتفاع، بیشترین ضریب LNRF در طبقات ۲۱۰۰-۲۴۰۰ و ۲۴۰۰-۲۷۰۰ متری از سطح دریا ثبت شده و طبقه ارتفاع ۱۸۰۰-۱۳۳۷ متری کمترین ضریب را به خود اختصاص داد (جدول ۱). نتایج مونتان (۲۰۰۹) نیز نشان داد در ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متری از سطح دریا در صورت مساعد بودن شرایط جوی امکان سقوط بهمن وجود دارد. از سوی دیگر، بهمن برفی معمولاً در ارتفاعات بسیار بالا کمتر اتفاق می‌افتد و اگر در ارتفاعات بالا اتفاق بیفتد به دلیل وزش باد شدید می‌باشد.

طبقه بندی نقشه شیب برای منطقه مورد مطالعه در ۵ طبقه ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵، ۴۵-۶۰، ۶۰-۷۵ و ۷۵-۹۰ درجه تهیه گردید. بررسی این عامل نشان می‌دهد که طبقه شیب ۳۰-۴۵ و ۴۵-۶۰ درجه بیشترین و طبقه شیب ۰-۱۵ درجه کمترین ضریب LNRF را به خود اختصاص

داده است. به نظر مک‌کلانگ (۲۰۱۳) نیز خطر سقوط بهمن با زاویه شیب به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و از این نظر، هرچه شیب تندتر از ۲۵ درجه باشد، "بهمن تند" در نظر گرفته می‌شود.

بررسی جهت دامنه در ارتباط با رخداد بهمن در منطقه نشان داد که اگرچه بهمن‌ها در هر جهت دامنه ای حرکت می‌کنند، اما بیشترین ضریب LNRF مربوط به دامنه‌های شمال شرقی و شمال و کمترین مقدار برای جهت جنوب می‌باشد. در این راستا، ایکاساس و فانتوبا (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که بیشتر بهمن‌ها در شیب‌های رو به شمال، شرق و شمال شرق حرکت می‌کنند. بررسی انحنای دامنه نشان می‌دهد که بیشترین ضریب LNRF به دامنه‌های مسطح و کمترین مقدار به دامنه‌های محدب در منطقه اختصاص دارد. فیشر (۲۰۱۲) نیز نشان داد دامنه‌های محدب عموماً نسبت به دامنه‌های مقعر ایمنی کمتری دارند، اما در دامنه‌های مقعر نیز می‌تواند بهمن ریزش کند. شیب‌های صاف از نظر آماری باعث ایجاد بهمن بیشتر و حوادث ناشی از بهمن بیشتر نسبت به سایر انواع دامنه‌ها می‌شوند.

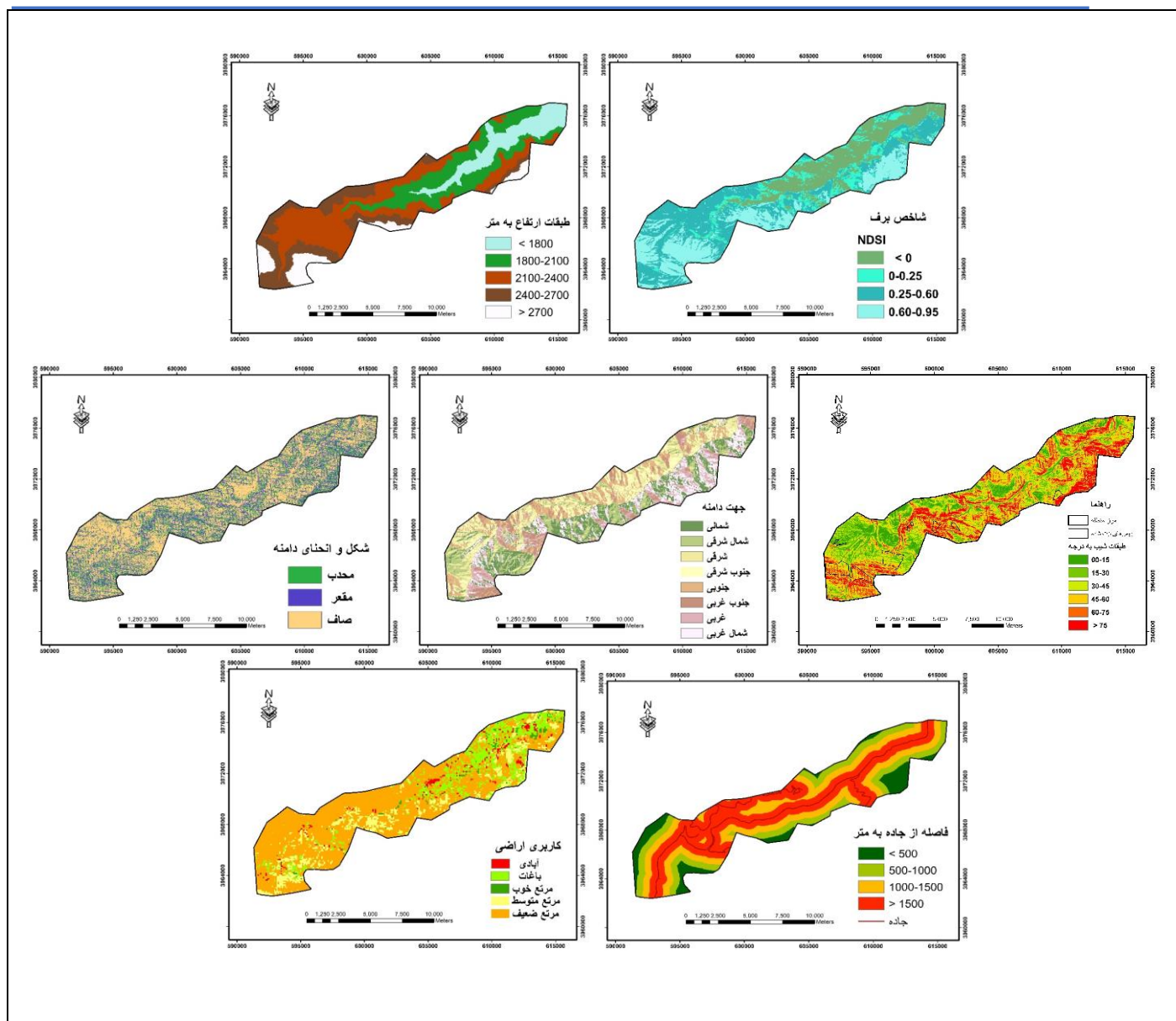
نقشه طبقه بندی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، ۵ نوع کاربری منطقه مسکونی، باغات، مرتع خوب، مرتع متوسط و مرتع ضعیف را در بر می‌گیرد. ضریب LNRF محاسبه شده برای معیار کاربری اراضی نشان می‌دهد که مرتع ضعیف بیشترین تأثیر را در وقوع بهمن‌ها در منطقه دارد و مرتع متوسط با فاصله زیاد پس از آن قرار دارد. نقشه فاصله از جاده نیز که در ۴ طبقه کمتر از ۵۰۰، ۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰ و بیشتر از ۱۵۰۰ متر تهیه گردید، نشان می‌دهد بیشترین ضریب LNRF با رقم ۱/۵۳۲ مربوط به طبقه اول و فاصله ۵۰۰-۰ متری می‌باشد.

وزن نهایی هر واحد نقشه برابر با جمع جبری وزن مربوط به مجموعه معیارهای مؤثر در آن طبقه و پیکسل است که در این پژوهش با هم‌پوشانی و ترکیب مجموعه نقشه‌های مذکور حاصل شده است. هر چه ضریب حاصل شده در هر واحد بیشتر باشد، نشان دهنده پرخطر بودن وقوع بهمن در منطقه است و هر چه این ضریب به سمت صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کم خطر بودن وقوع آن است. شکل ۵ نقشه نهایی پهنه‌بندی وقوع بهمن در منطقه را پس از طبقه بندی به درجات خطر نشان می‌دهد. بر این اساس ۱۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه در معرض خطر خیلی زیاد و ۲۰ درصد در معرض خطر زیاد وقوع بهمن قرار دارد.

جدول (۱): ضریب LNRF و وزن هر طبقه از عوامل مؤثر در وقوع بهمن در منطقه

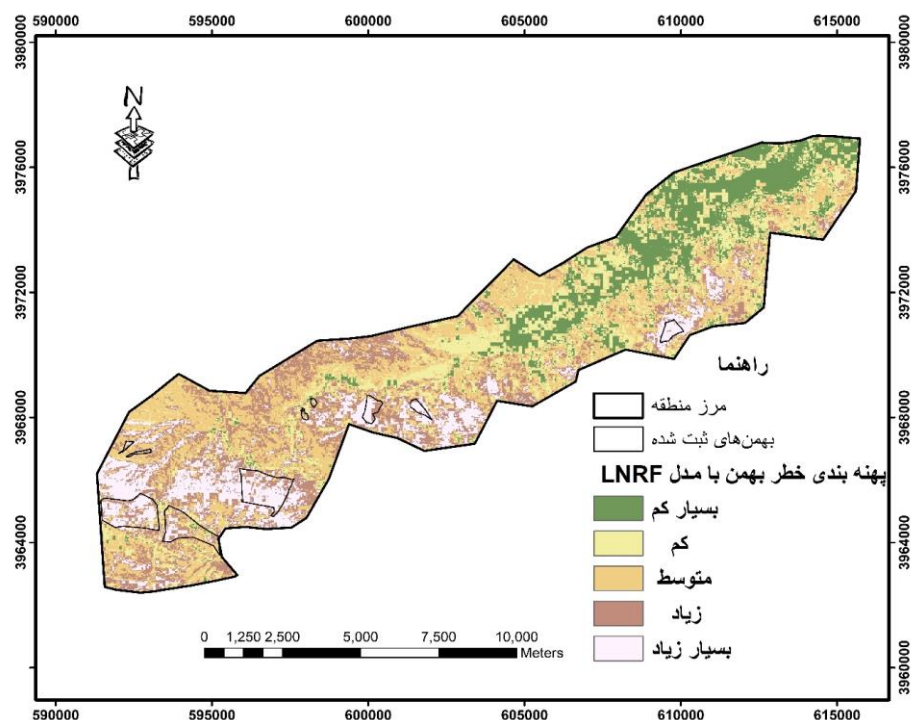
Table (1): LNRF coefficient and weight of each class of factors affecting the occurrence of avalanches in the area

طبقه	برف		ارتفاع		شیب		جهت دامنه		انحنای دامنه		کاربری اراضی		فاصله از جاده	
	وزن	ضریب	وزن	ضریب	وزن	ضریب	وزن	ضریب	وزن	ضریب	وزن	ضریب	وزن	ضریب
۱	۰	۰/۰۰۱	۰	۰	۰	۰/۱۱۳	۲	۱/۹۰۰	۱	۰/۷۳۱	۰	۰/۰۵۵	۲	۱/۵۳۲
۲	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۳۹	۱	۰/۷۹۹	۳	۲/۵۴۶	۲	۱/۵۹۸	۰	۰/۶۲۷	۲	۱/۳۹۱
۳	۱	۰/۸۱۸	۲	۱/۶۳۰	۲	۱/۵۰۳	۱	۱/۰۶۷	۱	۰/۶۷۰	۰	۰/۰۴۳	۱	۰/۷۸۳
۴	۲	۳/۱۷۰	۲	۲/۰۳۴	۲	۱/۸۲۳	۰	۰/۱۱۸	۰	۰/۱۱۸	۱	۰/۸۲۱	۰	۰/۲۹۱
۵			۱	۱/۲۹۵	۱	۱/۱۰۸	۱	۰/۰۲۶	۰	۰/۰۲۶	۲	۳/۴۵۱		
۶					۰	۰/۶۵۱	۰	۰/۳۰۰						
۷							۱	۱/۱۴۹						
۸							۱	۰/۸۸۹						



شکل (۴): نقشه‌های عوامل و معیارهای خطر بهمن در منطقه (منبع: نگارندگان)

Fig (4): Maps of avalanche risk factors and criteria in the area



شکل (۵): نقشه پهنه بندی خطر وقوع بهمن در منطقه با استفاده از مدل LNRF (منبع: نگارندگان)

Fig (5): Map of avalanche risk zoning in the area using LNRF model

۲-۳- تهیه نقشه پهنه بندی خطر بهمن در منطقه با اجرای مدل آنتروپی شانون

برای تهیه نقشه پهنه بندی با مدل آنتروپی شانون نیز در گام اول لایه های هفت معیار موثر در خطر وقوع بهمن به صورت رستر درآمده و میزان آنها کمی شده است. با توجه به ویژگی های برداشت شده از ده خطر بهمن برفی منطقه، بر اساس جدول شماره ۲ امتیاز هر لایه برای بهمن ها در منطقه تعیین و ماتریس تصمیم گیری (Xij) تشکیل شد. جدول ۳ ماتریس تشکیل شده را به صورت نرمال نشان می دهد. هر لایه نرمال شده مطابق با رابطه ۲ به صورت pij تعریف شده است.

جدول (۲): ماتریس آنتروپی کمی شده عوامل موثر در وقوع بهمن ها (Xij)

Table (2): Quantified Entropy matrix of factors affecting the occurrence of avalanches (xij)

شماره بهمن	برف	ارتفاع	شیب	جهت دامنه	انحنای دامنه	کاربری اراضی	فاصله از جاده
۱	۲/۵۴۷	۱/۶۸۵	۱/۳۴۶	۰/۹۶۷	۱/۱۶۷	۱/۷۶۶	۱/۱۹۷
۲	۲/۶۹۱	۱/۶۲۴	۱/۳۵۹	۱/۹۴۶	۱/۱۱۳	۲/۶۵۳	۱/۱۱۳
۳	۲/۶۹۴	۱/۸۱۱	۱/۲۷۹	۲/۰۱۷۹	۱/۲۳۱	۲/۹۹۵	۱/۳۲۸
۴	۲/۰۹۰	۱/۶۸۵	۱/۳۹۰	۲/۰۳۰	۲/۲۴۴	۳/۳۳۴	۱/۴۵۵
۵	۰/۰۸۸	۱/۵۷۶	۱/۱۶۶	۲/۰۳۳	۱/۱۲۳	۲/۴۲۷	۱/۴۸۹
۶	۱/۱۹۸	۱/۳۲۶	۱/۵۵۱	۱/۲۲۲	۱/۱۰۵	۰/۸۰۳	۱/۵۳۳
۷	۱/۷۳۰	۱/۶۳۱	۱/۲۹۷	۱/۴۷۴	۱/۰۳۲	۱/۵۵۴	۱/۵۳۳
۸	۳/۱۷	۱/۶۳۱	۱/۴۷۰	۱/۰۷۴	۱/۳۰۵	۳/۴۴۴	۱/۵۳۳
۹	۱/۶۴۶	۱/۹۱۶	۰/۶۶۰	۰/۸۳۷	۱/۴۰۸	۳/۴۵۲	۰/۸۳۴
۱۰	۲/۰۳۲	۲/۰۳۶	۰/۵۹۱	۱/۲۴۵	۱/۴۵۳	۳/۴۵۲	۰/۲۹۱

جدول (۳): ماتریس نرمال عوامل موثر در وقوع بهمن‌ها (pij)

Table (3): Normal matrix of factors affecting the occurrence of avalanches (pij)

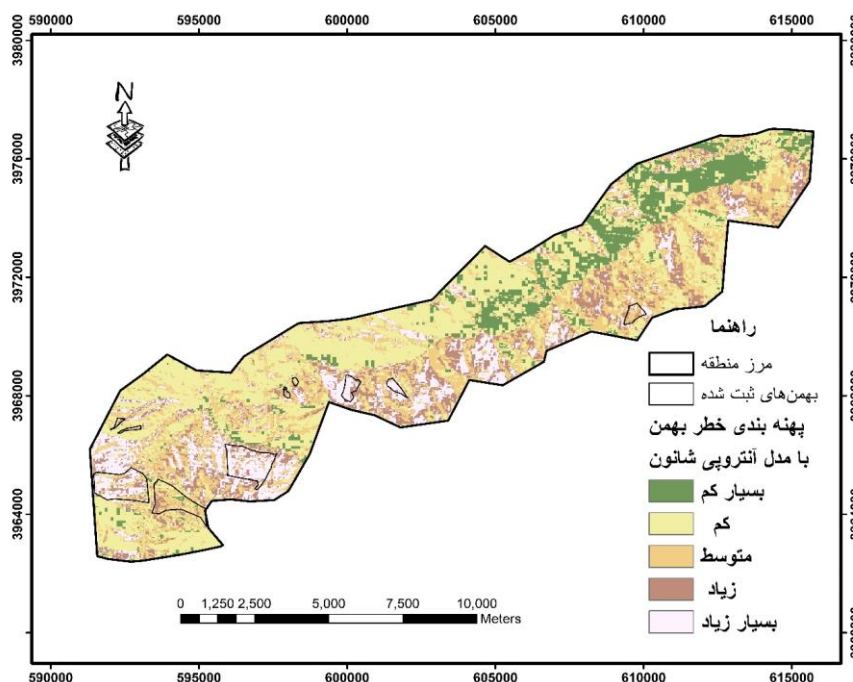
شماره بهمن	برف	ارتفاع	شیب	جهت دامنه	انحنای دامنه	کاربری اراضی	فاصله از جاده	نتایج
۱	۰/۱۰۷	۰/۰۹۹	۰/۱۱۱	۰/۰۶۵۱	۰/۰۹۶	۰/۰۶۸	۰/۰۹۷	
۲	۰/۱۱۳	۰/۰۹۵	۰/۱۱۲	۰/۱۳۱	۰/۰۹۱	۰/۱۰۲	۰/۰۹۰	
۳	۰/۱۱۳	۰/۱۰۷	۰/۱۰۵	۰/۱۳۵	۰/۱۰۱	۰/۱۱۵	۰/۱۰۷	
۴	۰/۱۲۲	۰/۰۹۹	۰/۱۱۴	۰/۱۳۶	۰/۱۰۲	۰/۱۲۸	۰/۱۱۸	
۵	۰/۱۳۰	۰/۰۹۳	۰/۰۹۶	۰/۱۳۶	۰/۰۹۲	۰/۰۹۳	۰/۱۲۱	
۶	۰/۰۵۰	۰/۰۷۸	۰/۱۲۸	۰/۰۸۲	۰/۰۹۰	۰/۰۳۱	۰/۱۲۴	
۷	۰/۰۷۳	۰/۰۹۶	۰/۱۰۷	۰/۰۹۹	۰/۰۸۴	۰/۰۶۰	۰/۱۲۴	
۸	۰/۱۳۳	۰/۱۱۳	۰/۱۲۱	۰/۰۷۲	۰/۱۰۷	۰/۱۳۳	۰/۲۴	
۹	۰/۰۶۹	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۶	۰/۱۱۵	۰/۱۳۳	۰/۰۶۷	
۱۰	۰/۰۸۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۸۳	۰/۱۱۹	۰/۱۳۳	۰/۰۲۳	

محاسبه آنتروپی هر شاخص در جدول ۴ ارائه شده است. آنتروپی E_j از رابطه ۳ محاسبه شد و k نیز از رابطه ۴ به دست آمد. در ادامه مقدار d_j (درجه انحراف) مطابق با رابطه ۵ محاسبه شد که بیان می کند شاخص مربوطه (d_j) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم گیری در اختیار تصمیم گیرنده قرار می دهد. هر چه مقادیر اندازه گیری شده شاخصی به هم نزدیک باشند نشان دهنده آنست که گزینه های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. جدول ۴ مقدار وزن هر معیار (W_j) را نیز نشان می دهد که از رابطه ۶ بدست آمده و برابر با تقسیم d_j بر مجموع d_j ها است. نتایج نشان می دهد که میزان تاثیر معیارها و عوامل موثر در وقوع بهمن‌ها در منطقه مورد مطالعه متفاوت است و بهمن‌ها بیشتر تحت تاثیر جهت دامنه ها و کاربری اراضی در منطقه قرار دارند. سرانجام با استفاده از وزن‌های به دست آمده برای هر یک از معیارها و عوامل موثر، نقشه پهنه‌بندی خطر بهمن با مدل آنتروپی شانون تهیه گردید. شکل ۶ نقشه نهایی پهنه‌بندی وقوع بهمن در منطقه را پس از طبقه بندی به درجات خطر نشان می‌دهد. بر این اساس به ترتیب ۱۵ و ۲۴ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه در معرض خطر خیلی زیاد و زیاد وقوع بهمن قرار دارد.

جدول (۴): شاخص آنتروپی، درجه انحراف و وزن معیارها و عوامل موثر در وقوع بهمن‌ها

Table (4): Entropy index, degree of deviation and weight of criteria and factors affecting the occurrence of avalanches

شاخص	برف	ارتفاع	شیب	جهت دامنه	انحنای دامنه	کاربری اراضی	فاصله از جاده
شاخص آنتروپی (E_j)	۰/۹۸۳۰	۰/۹۹۷۳	۰/۹۸۳۸	۰/۸۸۸۹	۰/۹۹۷۵	۰/۹۷۰۵	۰/۹۷۳۵
درجه انحراف (d_j)	۰/۰۱۶۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۱۶۱	۰/۱۱۱	۰/۰۰۲۴	۰/۰۲۹۴	۰/۰۲۶۴
وزن معیارها و عوامل (w_j)	۰/۰۸۲۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۷۸۶	۰/۵۴۱۴	۰/۰۱۱۹	۰/۱۴۳۶	۰/۱۲۹



شکل (۶): نقشه پهنه بندی خطر بهمن در منطقه با استفاده از مدل آنتروپی شانون (منبع: نگارندگان)

Fig (6): Avalanche hazard zoning map in the area Using Shannon Entropy Model

۴- نتیجه گیری

پهنه‌بندی خطر بهمن در هر منطقه مستلزم به کارگیری حجم بالایی از داده‌ها و اطلاعات متنوع است و برای رسیدن به این منظور در این پژوهش، عوامل مؤثر بر وقوع بهمن شامل پوشش برف، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای دامنه، کاربری اراضی و فاصله از جاده در مسیر ارتباطی هراز از پلدختر تا وانا مورد توجه قرار گرفته است. پس از تهیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی عوامل مذکور و طبقه‌بندی آن‌ها، فراوانی سطح بهمن در هر طبقه با استفاده از همپوشانی نقشه‌ی پراکنش بهمن‌ها با هر یک از لایه‌های عوامل مشخص شد و ضریب LNRF طبقات محاسبه گردید. بررسی شاخص برف نشان داد که بیشترین حساسیت بهمن با ضریب $3/17$ به شاخص NDSI بالای $0/6$ اختصاص دارد و رابطه بین آنها مستقیم است. چرا که پوشش برف با توجه به سنگینی و سبکی ضرایب LNRF مختلفی را به خود اختصاص داده و هر قدر پوشش و عمق برف بیشتر باشد، شاخص حاصل از آن به عدد ۱ نزدیک‌تر و خطر بهمن بیشتر است. از نظر ارتفاع، بیشترین حساسیت بهمن با ضریب LNRF $2/03$ مربوط به طبقه ارتفاعی $2700-2400$ متر است و به طور کلی در ارتفاعات بالا که بارش معمولاً به صورت برف است، خطر بهمن بیشتر می‌باشد.

بررسی شیب در ارتباط با خطر بهمن نشان داد که بیشترین ضریب مربوط به طبقه شیب $45-60$ درجه و همچنین $30-45$ درجه است، چرا که وقتی شیب به بالای 30 درجه می‌رسد، توده برفی تعادل خود را از دست داده و به سمت پایین کشیده می‌شود. در واقع، هر چه شیب تندتر باشد، گران‌تر تلاش می‌کند تا آن را به سمت پایین دامنه بکشد. نتایج ارتباط پراکنش بهمن با جهت دامنه در منطقه مورد مطالعه نشان داد که دامنه‌های شمال شرقی و شمالی به ترتیب با ضرایب $2/55$ و $1/9$ بالاترین خطر را به خود اختصاص داده‌اند. تفاوت در آفتاب‌گیری جهات مختلف دامنه‌ها، شرایط دمایی متفاوت خاک و هوا را به وجود می‌آورد و تابش آفتاب بر هر واحد سطح زمین در دامنه‌های شمالی کمتر از شیب‌های جنوبی است، از این رو، در دامنه‌های شمالی و شمال شرقی پوشش برفی بیشتر بوده و بهمن بیشتری نیز رخ می‌دهد.

بررسی شکل شیب و انحنای دامنه نشان داد که مقعر، محدب و یا مسطح بودن یک شیب در خطر بهمن تفاوت‌هایی ایجاد می‌کند، اما بیشترین ضریب با رقم $1/9$ در دامنه‌های صاف و مسطح دیده شده است. در این دامنه‌ها، به طور معمول نیروهای مقاوم مانند اصطکاک مواد دامنه‌ای کمتر است و بیشتر منجر به سقوط بهمن می‌شود. بررسی کاربری اراضی نشان داد که بیشتر بهمن‌های منطقه با ضریب $3/45$ در مراتع ضعیف رخ داده است. در این مناطق تا زمانی که بوته‌های کوتاه در زیر برف مدفون نشده‌اند، سبب اتصال برف به دامنه شده و احتمال وقوع بهمن کاهش می‌یابد؛ اما همین که توسط برف پوشیده شد خطر بهمن به سرعت افزایش می‌یابد. همچنین در منطقه مورد مطالعه بیشترین خطر بهمن با ضریب $1/53$ در فاصله 500 متری از جاده‌ها دیده شد. جاده‌ها شیب تعادل روی دامنه‌ها را بهم زده و بریدگی‌هایی را بوجود می‌آورند که باعث افزایش خطر بهمن می‌شوند. از طرفی استفاده از وسایل نقلیه زمینی ارتعاشاتی را در پوشش برفی ایجاد می‌کند که باعث سقوط بهمن در نزدیکی جاده‌ها می‌شود.

پس از محاسبه سطح بهمن‌ها در طبقات مختلف عوامل و تعیین مقدار LNRF آنها، نقشه پهنه‌بندی خطر بهمن در منطقه با این مدل (رابطه ۱) به دست آمد. اما در این مدل، همه عامل‌های مؤثر بر وقوع بهمن اهمیت و وزن یکسانی دارند، از این رو در پژوهش حاضر از مدل آنتروپی شانون

برای به دست آوردن میزان اهمیت هر یک از عوامل و اولویت بندی آنها و همچنین پهنه بندی خطر بهمن در منطقه استفاده شده است. نتایج نشان داد که به ترتیب متغیرهای جهت دامنه، کاربری اراضی، فاصله از جاده و پوشش برف اهمیت و تأثیر بیشتری در وقوع بهمن در منطقه دارند. این نتیجه با یافته های سایر محققان از جمله احمدی و مرادی (۱۳۹۸) و نظری سامانی و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد. عامل جهت دامنه به خاطر تأثیر بر مقدار جذب حرارت خورشیدی و ذوب شدن لایه های برف، بیشترین نقش را در وقوع بهمن دارد.

سرانجام با مشخص شدن میزان اهمیت و وزن هر یک از متغیرها به کمک مدل آنتروپی شانون، لایه های مورد نیاز تهیه شد و از همپوشانی این لایه ها با توجه به وزن هر لایه، نقشه پهنه بندی خطر وقوع بهمن در منطقه تهیه گردید. به منظور ارزیابی مدل ها، از رابطه ۹ و موقعیت بهمن هایی که در مدل سازی و تهیه نقشه های پهنه بندی بکار گرفته نشد، استفاده گردید. با قطع دادن آن با نقشه های پهنه بندی تهیه شده میزان p برای مدل LNRF، ۹۴ درصد و برای مدل آنتروپی شانون ۹۷ درصد به دست آمد که بیانگر مناسب بودن این مدل ها در پهنه بندی خطر بهمن برای منطقه مورد مطالعه است. با توجه به نقشه پهنه بندی خطر بهمن با مدل آنتروپی شانون که اهمیت عامل ها را یکسان در نظر نمی گیرد و از مطلوبیت بیشتری برخوردار است، در حدود ۱۵ درصد از سطح منطقه در مسیر جاده از پلدختر تا وانا در پهنه های خطر بسیار زیاد بهمن قرار دارد. برای جلوگیری از آسیب های جانی و مالی ناشی از خطر بهمن در این مناطق لازم است اقدامات حفاظتی بیشتری صورت گیرد.

۵- منابع

- Ahmadi, H., & Nasri, M. (2007). An investigation on avalanche zoning in Se Pestan valley watershed (Fereidunshahr, Isfahan province) using GIS techniques, *Journal of the Iranian Natural Resources*, 60(1), 13-32.
- Ahmadi, V., & Moradi, M. (2019). Avalanche zoning using artificial neural network (MLP) models (Case study: mountainous area of north Alborz province), *GEJ*, 10 (3), 1-14.
- Arman, N., & Salajegheh, A. (2008). The survey of avalanche- pron regions for determining the effective factors (Case study: Shian & Torivar basin of Kordestan province), *Journal of the Iranian Natural Resources*, 60(4), 1099-1116.
- Asadamraji, M., Saffarzadeh, M., Hassanpour, S., & Rasooli, N. (2014). Presentation a Risk Model of Avalanche Points in Mountainous Roads (Case Study: Chalous- Karaj Road), *MCEJ*, 13(5), 15-28.
- Asgarpour, M. J. (2009). Multiple criteria decision making, *University of Tehran*, 399p.
- Ebadi, F., Ildoromi, A., Nouri, H., & Babaei, K. (2019). Landslide Hazard Zoning at the Cheragh Veis Dam Watershed of Kurdistan Using the IRAT and LNRF Models, *Watershed Management Research Journal*, 32(3), 37-52.
- Bergua, S. B., Piedrabuena, M. A. P., & Alfonso, J. L. M. (2019). Snow avalanches, land use changes, and atmospheric warming in landscape dynamics of the Atlantic mid-mountains (Cantabrian Range, NW Spain). *Applied Geography*, 107, 38-50.
- Ghanavati, E., & Karimi, J. (2009). Avalanche hazard zoning on Haraz Road based on geomorphological characteristics, *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 9(7), 83-100.
- Gruber, U., & Bartelt, P. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS, *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1472-1481.
- Gupta RP, Joshi BC. (1990). Landslide hazard zoning using the GIS approach (A case study from the Ramganga catchment). *Himalayas Engineering Geology*, 28(1), 119-131.
- Hanifinia, A., Nazarnejad, H., Najafi, S., & Kornejady, A. (2020). Prioritization of Effective Factors on Landslide Occurrence and Mapping of its Sensitivity in CherekAbad Watershed, Urmia Using Shannon Entropy Model, *Watershed Management Research Journal*, 33(4), 30-46.
- Heydari, M., Davoudian, A., & Zare Bidaki, R. (2015). Survey the Avalanche-Prone Area Using Geographical Information System (Case Study: Tang Darkesh Varkesh, Chaharmahal and Bakhtiari province), *GeoRes*, 30(1), 225-238.
- ICasas, P. F., & Fontoba, S. R. (2007). Using GIS data in am: n-AC k cellular automaton to perform an avalanche simulation, *GISRUk*, Proceedings of the Geographical Information Science Research UK Conference, 45-51.
- Maryanaji, Z., & Ramezani, A. (2020). Analysis of the effect of factors affecting flooding in Hamadan province using Shannon entropy model and GIS. *Hydrogeomorphology*, 7(23), 207-185.
- McClung, D. M. (2013). Effects of triggering mechanism on snow avalanche slope angles and slab depths from field data, *Natural hazards*, 69(3), 1721-1731.
- Mott, R., Grunewald, T., Schirmer, M., Wirz, V., Lehning, M., (2010). Understanding Snow deposition on mountain slopes, *Journal of Geophysical Research*, 12: EGU2010-12248, 95-104.

- Nayyeri, H., Karami, M.R., & Charehkhah, B. (2016). Zonation of Avalanche Pathways of Kurdistan Province, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 3(2), 35-50.
- Nazari samani, A.A., Rajaei, A., & Motamed Vaziri, B., (2011). Avalanche hazard zoning based on field data in order to provide controlling strategies in Semirom Region, Isfahan, *Journal of Range and Watershed Management*, 64(4), 477-491.
- 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.
- Omirezhanova, Z. T., Urazaliev, A. S., & Aimenov, A. T. (2015). GIS for Predicting the Avalanche Zones in the Mountain Regions of Kazakhstan. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 40, 39-44.
- Pitchford, J., Strager, M., Riley, A., Lin, L., & Anderson, J. (2015). Modelling streambank erosion potential using maximum entropy in a central Appalachian watershed. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 367, 122-127.
- Singh, P., Sharma, A., Sur, U., & Rai, P. K. (2021). Comparative landslide susceptibility assessment using statistical information value and index of entropy model in Bhanupali-Beri region, Himachal Pradesh, India, *Environment Development and Sustainability*, 23(4), 5233-5250.
- Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020). Susceptibility Zoning and Prioritization of the Factors Affecting Landslide Using MaxEnt, Geographic Information System and Remote Sensing Models (Case study: Lorestan Province). *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179.
- Voiculescu, M. (2009). Snow avalanche hazards in the Făgăraș massif (Southern Carpathians): Romanian Carpathians-Management and perspectives, *Natural hazards*, 51(3), 459-475.
- Zare, M., Shabani, M., Soleimanpour, S., & Rostami Ravari, A. (2018). Landslide Risk Assessment Using LNRF and WPINF Models in Kharestan Watershed, Fars Province. *Watershed Management Research Journal*, 31(1), 23-36.