

**Uroš Durlević<sup>1\*</sup>**

*\* University of Belgrade, Faculty of Geography, Serbia*

## **GEOSPATIAL MODELING OF SNOW AVALANCHES ON THE ŠAR MOUNTAINS, BALKAN PENINSULA**

**Abstract:** Snow avalanches are among the most significant natural hazards worldwide in high mountain areas. Mapping the spatial distribution of avalanches is one of the initial steps in avalanche management. In this study, geospatial modeling was performed for the territory of the Šar Mountains on a total area of 1602 km<sup>2</sup>. The first step in the research is to collect data on past avalanche occurrences in Serbia and North Macedonia and create a database in geographic information systems (GIS). The second step involves the application of the SAFI–Flow-R method and the analysis of three natural and anthropogenic factors: snow cover, terrain slope, and land use. The third step involves modeling (propagation) of avalanches in the Flow-R 2.0 software package, and the creation of synthesis maps based on the thickness of the triggered snow layer. Based on the law of friction and other software algorithms, avalanche modeling was performed from the starting zone through the movement zone to the accumulation zone. The results show that 26.6% of the area is susceptible to snow avalanches, with a potentially triggered snow layer thickness of 50 cm. The fourth step is the analysis and zoning of vulnerable settlements and the proposal of environmental protection measures. The settlements susceptible to avalanches are Restelica, Brod, Mušnikovo, and the "Brezovica" ski center in Serbia, while in North Macedonia, the settlements of Bozovce, Vešala, and the "Popova Šapka" ski center are vulnerable. The results obtained may be useful for decision-makers, national park managers, and mountain rescue services in Serbia and North Macedonia in terms of adequate environmental management and adoption of protection measures.

**Keywords:** snow avalanches, Šar Mountains, modeling, SAFI–Flow-R, GIS, remote sensing, environment

### **Introduction**

Due to the intensification of climate change and the increase in climate extremes, natural disasters threaten nature and the human environment (Manojlović et al., 2021; Ćurić et al., 2022; Milevski et al., 2024; Valjarević, 2024). Snow avalanches are a typical natural hazard

---

<sup>1</sup> uros.durlevic@gef.bg.ac.rs (corresponding author)  
Uroš Durlević (<https://orcid.org/0000-0003-3497-5239>)

characteristic of high-mountainous areas characterized by very low air temperatures and a significant thickness of snow cover (Turquet et al., 2024; Cetinkaya & Kocaman, 2024). Snow avalanches are defined as a phenomenon that occurs by the release, movement, and accumulation (deposition) of snow on a topographic surface under the influence of gravity (Rahmati et al., 2019; Yang et al., 2024). In addition to snow, avalanches often include a pedological layer, rock debris, and plants that the avalanche transports to the accumulation zone (Durlević et al., 2022; Chu et al., 2024). Depending on their size, medium- and large-scale avalanches can have a negative impact on the environment, causing damage to ecosystems, landscapes, existing infrastructure, etc. (Kumar et al., 2019; Yang et al., 2020).

The initiation of snow avalanches is influenced by specific geomorphological (terrain slope), meteorological (wind speed, air temperature, precipitation), biogeographic (land use), hydrological (snow layer structure), and anthropogenic factors (Akay, 2021; Nishimura et al., 2021; Bian et al., 2022; Hao et al., 2023).

Depending on the place of origin, natural conditions, and water content, there are several types of snow avalanches: slab (dry and wet), loose snow avalanches (dry and wet), powder avalanches, ice avalanches, cornice avalanches, gliding avalanches, and slush avalanches (Tremper, 2008). In the territory of the Šar Mountains, slab, gliding, and loose snow avalanches are most common. Due to small differences in the structure and distribution of all types of avalanches, the same parameters are used for all types in geospatial modeling.

Over the past 15 years, numerous methods and models for spatial modeling of avalanches have been developed. The most commonly used are multi-criteria analysis, numerical modeling, and machine learning.

Multi-criteria analysis involves the use of a large number of natural and anthropogenic conditions and their evaluation in geographic information systems using various methods, such as the analytical-hierarchical process (AHP) and the Best-Worst model (BWM) (Nasery & Kalkan, 2021; Konurhan et al., 2023; Rafique et al., 2023; Xi & Mei, 2023). Fuzzy logic is often integrated into multi-criteria analysis models (Varol, 2021). Numerical modeling involves the use of digital elevation models and 2-D avalanche modeling in specialized software packages such as RAMMS, FLO-2D, and Flow-R (Horton et al., 2013; Košová et al., 2022; Martini et al., 2023). The advantage of multi-criteria analysis and numerical modeling is that it provides relevant final results without prior avalanche inventories. In the case of a large number of mapped avalanches, authors often resort to using several machine learning models: support vector machine, random forest, multivariate discriminant analysis, logistic regression, gradient boosting machines, etc. (Choubin et al., 2019; Wen et al., 2022; Iban & Bilgilioglu, 2023).

The study used GIS tools, remote sensing, open data, and the SAFI–Flow-R method to perform geospatial modeling of the Šar Mountains, a national park in Serbia and North Macedonia. This is the first study of the spatial distribution of avalanches in the entire Šar Mountains area, so the results have international significance in adequate management of national parks, local governments, and tourist centers within the study area.

## Material and methods

### Study area

The study area includes the Šar Mountains, one of the largest mountain ranges on the Balkan Peninsula. On the territory of Serbia, a part of the mountain is protected as a national park (1993), while the entire mountain range with its foothills represents the planned border of the national park (Institute for Nature Conservation of Serbia, 2024). In North Macedonia, Šar Mountains was declared a national park in 2021. The total study area is 1602 km<sup>2</sup>.

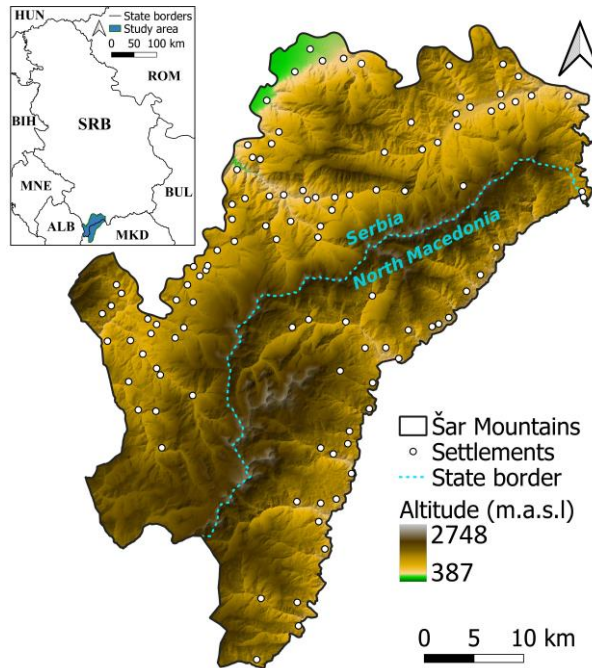


Fig. 1. Geographical position of the Šar Mountains

The lowest point is 387 meters high near the settlement of Grejkovce (Serbia), while the highest is Titov Vrh (2748 m) in North Macedonia (Fig. 1). The status of a national park was obtained due to the highly diverse flora and fauna: 1800 plant species, 147 species of butterflies, 200 species of birds, and 45 species of reptiles and amphibians (Institute for Nature Conservation of Serbia, 2024). In addition to the rich flora and fauna, this area has specific landforms such as glacial and periglacial. This is because of the active Pleistocene glaciation during which glaciers were formed on the Šar Mountains (Menković & Milivojević, 2021). A certain number of cirques are now filled with water, so there are more than 30 permanent glacial lakes in this territory.

In addition to being one of Europe's most important ecological points, Šara is characterized by extremely low temperatures and large amounts of snow during the winter period. In this part of the year, the average maximum depth of snow cover at altitudes above 1700 meters is 150-200 cm. In leeward ravines, the snow thickness can be up to five meters

(Durlević et al., 2024). The large amount of snow and the occurrence of temperature inversions during the winter period cause the formation of different types of snow layers. Recreational skiers who ski off-piste in the tourist centers of "Brezovica" and "Popova Šapka" are particularly at risk. Due to the formation of a weak layer, the pressure caused by winter sports participants can be sufficient to trigger an avalanche.



*Fig. 2. Snow avalanches and environmental impact on the Šar Mountains (Flickr, 2015)*

Avalanches in the Šar Mountains endanger human lives, residential buildings, roads, and biodiversity (Fig. 2). According to existing estimates, more than 100 people have died since 1800 from avalanches in the Šar Mountains. Accidents have been recorded on both the northern and southern slopes. In the settlement of Restelica (Gora municipality, Serbia), an avalanche killed ten people and buried 11 houses on 11 February 2012 (Durlević et al., 2023).

Outside the marked trails in the territory of the ski center "Brezovica" (Serbia), avalanches kill several skiers almost every year. On February 13, 2024, the famous American skier Katherine Rigby died from the consequences of a snow avalanche, which was activated at the location "Orlovo Gnezdo" in the Šar Mountains. In the settlement of Bozovce (North Macedonia), on February 13, 1956, an avalanche caused the death of three people, while seven were injured (Krivokapić, 1969). Due to the large number of avalanches in the entire territory of the national park, it is important to create maps of the spatial distribution of snow avalanches. There are 112 settlements within the study area, of which 80 are in Serbia and 32 in North Macedonia, including tourist centers.

## **Methodology**

### ***SAFI–Flow-R approach***

The anatomy of a snow avalanche consists of a starting zone, a movement zone, and a deposition zone. In order to determine the locations where a snow avalanche is activated, the Snow avalanche formation index (SAFI) was developed in 2024. It includes three factors in its calculation: the Normalized Difference Snow Index (NDSI), the slope of the terrain, and the land use.

The NDSI is obtained by remote sensing, that is, by analyzing satellite images during the winter months. The formula for the NDSI is (Hall et al., 1995):

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}, \quad (1)$$

where: Green – green spectral channel; SWIR – short-wave infrared spectral channel.

Satellite images for the territory of the Šar Mountains were processed for January and February from 2020 to 2024. The mission of the images is Sentinel-2, while the cloudiness of each image content is less than 1% (Copernicus Open Access Hub, 2024). NDSI values can range from -1 to +1. Pixel values greater than 0.4 indicate the presence of snow cover on the topographic surface (Stojković et al., 2023). The maximum NDSI value (+1) indicates complete snow dominance and significant snow cover depth. According to estimates from field research on the Šar Mountains, pixel values above 0.6 indicate a greater thickness of snow that can be triggered and cause an avalanche. The spatial resolution of the pixels is 12.5 m.

The slope of the terrain is the most important geomorphological condition for the occurrence of snow avalanches. In most cases, the slope of the terrain is the highest during avalanche formation and decreases with the process of avalanche deceleration and snow accumulation. According to research and standards of the Utah Avalanche Center (USA), snow avalanches form on terrain slopes of 20–60° (Utah Avalanche Center, 2024). Data on terrain slope were obtained using a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 12.5 meters (Alaska Satellite Facility, 2024).

Land use is a biogeographic factor that affects the formation and path of avalanche material. Bare surfaces (rocky areas) and territories with low vegetation (meadows, pastures) are suitable locations for avalanche formation. Dense forest stands prevent the formation of slab avalanches and represent an important natural barrier during the movement and accumulation of avalanches (Sykes et al., 2024). Land use data were taken from the Environmental Systems Research Institute (2024) geospatial database formed based on satellite images of the Sentinel-2 mission with a spatial resolution of 10 m.

In the GIS, values were assigned for all three criteria in the range from 0 to 1, with 0 indicating unsuitable areas for avalanche formation, while 1 indicates suitable areas for snow avalanches' activation (Tab.1).

*Table 1. Parameters for the calculation of the SAFI index.*

Criteria	Categories	Ratings
Snow cover (SC) / NDSI	-1 – 0.6	0
	> 0.6	1
Slope (S)	0–20°	0
	20–60°	1
	>60°	0
Land use (LU)	Forests, settlements, water bodies	0
	Meadows, pastures, bare areas, agricultural areas	1

The results of the SAFI index are obtained based on the formula (Durlević et al., 2024):

$$SAFI = SC \cdot S \cdot LU, \quad (2)$$

where: SC – snow cover; S – terrain slope; LU – land use.

The SAFI map shows suitable areas for avalanche activation, with a value of 1 (Fig. 3). After this calculation, the Flow-R software program analyzes potential avalanche movement and accumulation zones.

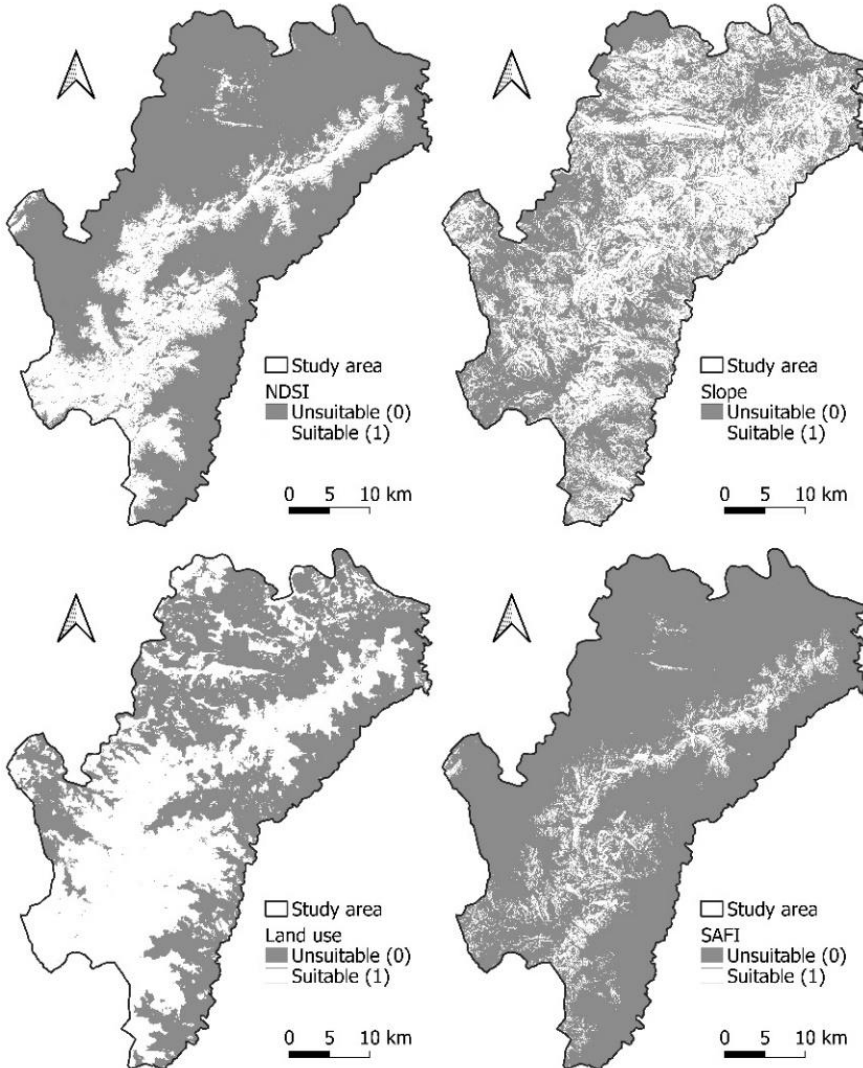


Fig. 3. Maps of natural factors and snow avalanche formation index (SAFI)

Flow-R software was developed for the purpose of processing regional gravity hazard assessments (snow avalanche, debris flow, rockfall, shallow landslide) based on GIS (Horton et al., 2013). The software identifies the source area of instability using the results obtained from the SAFI index.

It defines the process distance based on the principles of propagation probability and the friction law (Holmgren, 1994). The model consists of two primary components: automatic source area identification and propagation estimation (Fischer et al., 2016; Noël et al., 2023). The probability of avalanche flow hazard is calculated using flow direction algorithms and persistence functions.

Perla et al. (1980) described the friction model to analyze avalanche propagation. This model relies on a nonlinear friction law derived as a solution to the equation of motion for estimating flow dynamics. The law determines the flow velocity ( $V_i$ ) at the end of the segment (Perla et al., 1980):

$$\begin{aligned} V_i &= (a_i \omega (1 - \exp b_i) + V_0^2 \exp b_i)^{\frac{1}{2}} \\ a_i &= g (\sin \beta_i - \mu \cos \beta_i) \\ b_i &= \frac{-2L_i}{\omega}, \end{aligned} \quad (3)$$

where:  $\mu$  is the friction parameter,  $\omega$  is the mass-to-drag ratio,  $\beta_i$  is the slope angle of the segment,  $V_0$  is the velocity at the beginning of the segment,  $L_i$  is the length of the segment, and  $g$  the acceleration due to gravity. Segments represent parts of an avalanche flow. All the mentioned computational processes are embedded in the Flow-R software.

## Results and Discussion

Geographic information systems are a modern tool that plays an important role in depicting the spatial distribution of natural hazards and other environmental phenomena and processes (Durlević, 2021; Gulan et al., 2023; Vujović et al., 2024). After analyzing the snow cover, slope, and land use, maps of the spatial distribution of avalanches in the Šar Mountains were obtained using the Flow-R software. Two modeling maps were produced. The first has a potential thickness of activated snow of 50 cm, and the second has a potential thickness of the activated snow layer of 3 m. The propagation model with a potential activated layer of 50 cm shows that 425.99 km<sup>2</sup> of the area on the Šar Mountains is vulnerable to avalanches (Fig. 4). Physical-geographic, the susceptible terrains are the bare areas below the Šar Mountains ridge (from the Morava peak in the southwest to Ljuboten in the northeast), the southwestern slopes of Koritnik (2393 m), the southern slopes of Ošljak (2212 m), the southern slopes of Ostrvica (2092 m) and the bare slopes at the foot of the Tromeda peak (1934 m). From an environmental perspective, the following settlements are susceptible to avalanches: Restelica, Brod, Mušnikovo, and the "Brezovica" ski center in Serbia, as well as Bozovce, Vešala, and the "Popova Šapka" ski center in North Macedonia. Restelica and Brod are settlements in the municipality of Gora, Mušnikovo is located in the territory of the city of Prizren, while the ski center "Brezovica" belongs to the municipality of Štrpce. In the territory of North Macedonia, Bozovce, Vešala, and the ski center "Popova Šapka" are settlements in the municipality of Tetovo.

An alpine climate characterizes the aforementioned peaks, while the settlements are located at the contact of a temperate and an alpine climate.

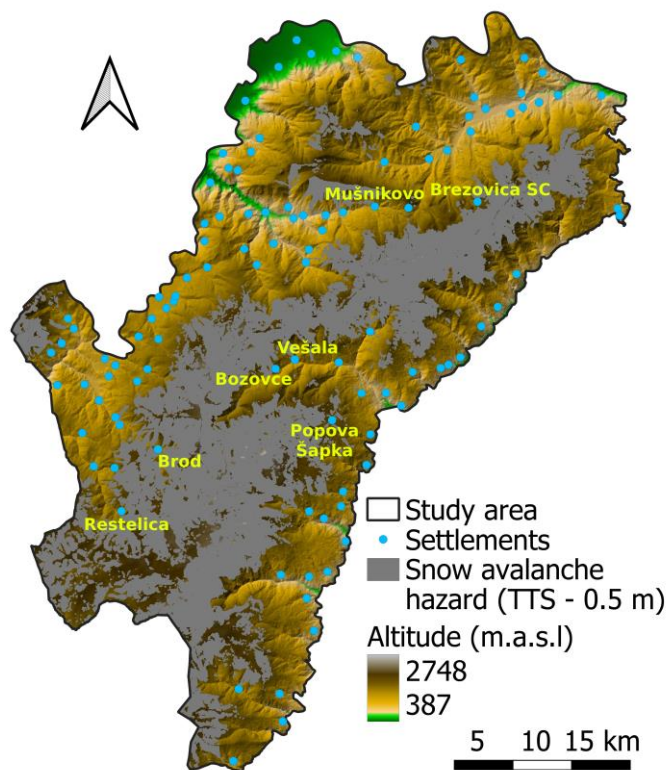


Fig. 4. Geospatial distribution of snow avalanches at a triggered snow of 50 cm

All the mentioned settlements represent areas where the activated snow layer would potentially accumulate and thus endanger the local population. The second map indicates the vulnerable areas at a thickness of the potentially activated layer of 3 m. In this scenario, 433.9 km<sup>2</sup> of the Šar Mountains would be susceptible to snow avalanches, which comprise 27% of the study area (Fig. 5). These are the same peaks and settlements. Still, the zone of accumulated snow would be significantly larger.

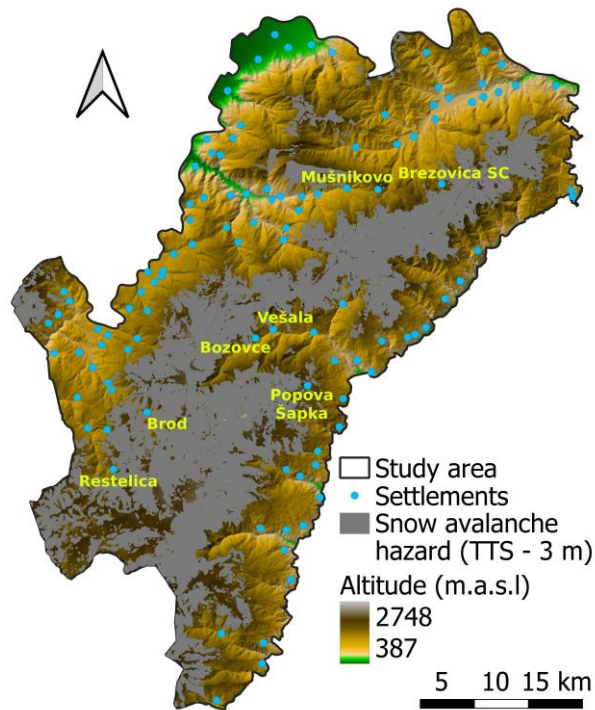


Fig. 5. Geospatial distribution of snow avalanches at a triggered snow of 3 m

The results can be confirmed by field research. In the case of more detailed modeling, analysis of high-resolution satellite images of the terrain and snow cover (1 m) is necessary to precisely zone residential buildings within the settlement that are at risk from the potential effects of snow avalanches (Denissova et al., 2024).

In order to mitigate their impact, it is necessary to apply combined protection measures: structural measures (supporting structures), temporary measures, planning measures, and afforestation.

For the area of the Šar Mountains, the first modern research, or avalanche mapping, began in the late 1980s (Динић, 1990). The analysis of the territory's avalanche vulnerability in GIS packages was first carried out in 2021 for the territory of the Štrpce municipality when the AVAPI (Avalanche Potential Index) was developed, which analyzed four natural factors: exposure, terrain roughness, snow depth, and land use. The results indicated that 9.1 km<sup>2</sup> of the Štrpce municipality is susceptible to avalanches (Durlević et al., 2021). A year later, the avalanche vulnerability of the Šar Mountains was analyzed using the AHP method, where 14 criteria were included, and the final results were classified into four classes. A high level of vulnerability was found for 20% of the Šar Mountains territory (Serbia) and 15 settlements that are partially or fully threatened (Durlević et al., 2022). In 2023, when nine natural and anthropogenic criteria were analyzed, another multi-criteria analysis method was applied for the same area – the Best-Worst Method (BWM). The results identified four settlements (Restelica, Kruševo, Prevalac, ski center "Brezovica") as potentially endangered (Durlević et al., 2023). In 2024, SAFI–Flow–R was used for the spatial distribution of avalanches on the northern slopes of the Šar Mountains, where it showed

very high predictive power (AUC=94%). This approach represents a universal avalanche modeling index that has certain advantages over machine learning models and classical multi-criteria analysis methods:

1. Simple application of the model and processing of open data;
2. Regional snow avalanche modeling. Areas larger than 1000 km<sup>2</sup> can be modeled in a relatively short period;
3. Complete modeling of avalanches from the starting zone to the snow deposition zone;
4. Possibility of geospatial modeling without a previous avalanche inventory;
5. Due to the analysis of the most significant natural conditions (snow, terrain slope, and land use), this method can also be used in other high-mountain areas worldwide.

In addition to Flow-R, the RAMMS and FLO-2 models, which have already been used for avalanche prediction in mountain areas of Slovakia and Italy, can be used for numerical modeling of avalanches (Kořová et al., 2022; Martini et al., 2023).

For future avalanche research in the Šar Mountains and other mountainous regions in Serbia, it is necessary to collect field data and create a high-resolution digital elevation model (less than 1 meter) to gain more precise insight into vulnerable residential buildings and roads. In Slovenia, researchers used DEM with a resolution of 0.5 m to determine the spatial distribution of avalanches (Komac et al., 2023).

## Conclusion

Many snow avalanches occur on the Šar Mountains during the winter months. The likelihood of negative environmental impacts increases if the avalanche flow is large. Snow avalanche modeling was performed using the SAFI-Flow-R method, which used open data, GIS, and remote sensing. Maps of the geospatial distribution of avalanches represent the starting point for adopting environmental protection measures. Two scenarios were developed: avalanches in the form of triggered snow with a thickness of 50 cm and 3 m. Through office work, field research, and visual analysis, vulnerable mountain terrains were identified, as well as settlements on the territory of Serbia (Restelica, Brod, Mušnikovo, and the ski center "Brezovica") and North Macedonia (Bozovce, Vešala, and the ski center "Popova Šapka"). The susceptible areas with a depth of triggered snow of 0.5 m cover an area of 425.99 km<sup>2</sup>, while avalanches of 3 m depth potentially endanger 433.9 km<sup>2</sup>. The research is important because other settlements predisposed to this natural disaster, in addition to previously recorded avalanches in Restelica and Bozovce, have been identified.

For further research, it is necessary to install meteorological stations in vulnerable settlements to monitor the state of all climatic elements, especially snowfall and wind. It is also necessary to implement other avalanche protection measures, such as afforestation, construction of retaining dams, and prohibition of skiing outside clearly marked trails in ski centers. The results of the study form the starting point for the development of an avalanche risk reduction strategy. Decision-makers, civil protection, mountain rescue services, and national park managers should coordinate all activities related to avalanche forecasting and protection measures. The data from this study can be used to develop a snow avalanche database as an integral part of the natural disaster cadastre. This database could be useful for better planning activities related to mitigating avalanches and other natural disasters in the Šar Mountains National Park area.

Acknowledgments: The study was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract number 451-03-136/2025-03/200091).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Publisher's Note: Serbian Geographical Society stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

© 2025 Serbian Geographical Society, Belgrade, Serbia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Serbia.

## References

- Akay, H. (2021). Spatial modeling of snow avalanche susceptibility using hybrid and ensemble machine learning techniques. *Catena*, 206, Article 105524. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105524>
- Alaska Satellite Facility (2024). *ALOS PALSAR*. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Bian, R., Huang, K., Liao, X., Ling, S., Wen, H., & Wu, X. (2022). Snow avalanche susceptibility assessment based on ensemble machine learning model in the central Shaluli Mountain. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 880711. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.880711>
- Cetinkaya, S., & Kocaman, S. (2024). Integrating Sequential Backward Selection (SBS) and CatBoost for Snow Avalanche Susceptibility Mapping at Catchment Scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(9), Article 312. <https://doi.org/10.3390/ijgi13090312>
- Choubin, B., Borji, M., Mosavi, A., Hosseini, S.F., Singh, P. V., & Shamshirband, S. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 577, Article 123929. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123929>
- Chu, D., Liu, L., Wang, Z., Nie, Y., & Zhang, Y. (2024). Snow Avalanche Hazards and Avalanche-Prone Area Mapping in Tibet. *Geosciences*, 14(12), Article 353. <https://doi.org/10.3390/geosciences14120353>
- Copernicus Open Access Hub (2024). *Copernicus Data Space Ecosystem*. <https://dataspace.copernicus.eu/>
- Ćurić, V., Durlević, U., Ristić, N., Novković, I., & Čegar, N. (2022). GIS application in analysis of threat of forest fires and landslides in the Svrljiški Timok Basin (Serbia). *Bulletin of the Serbian Geographical Society*, 102(1), 107-130. <https://doi.org/10.2298/GSGD2201107C>
- 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>
- Динић, Ј. (1990). Општина Штрпце, Сиринићка жупа. Одлике природне средине. Географски институт "Јован Цвијић" САНУ.
- Durlević, U. (2021). Assessment of torrential flood and landslide susceptibility of terrain: Case study - Mlava River Basin (Serbia). *Bulletin of the Serbian Geographical Society*, 101(1), 49-75. <https://doi.org/10.2298/GSGD2101049D>

- Durlević, U., Novković, I., Lukić, T., Valjarević, A., Samardžić, I., Krstić, F., Batočanin, N., Mijatov, M., & Ćurić, V. (2021). Multihazard susceptibility assessment: A case study – Municipality of Štrpce (Southern Serbia). *Open Geosciences*, 13(1), 1414-1431. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0314>
- Durlević, U., Valjarević, A., Novković, I., Ćurčić, N. B., Smiljić, M., Morar, C., Stoica, A., Barišić, D., & 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), Article 1229. <https://doi.org/10.3390/atmos13081229>
- Durlević, U., Novković, I., Bajić, S., Milinčić, M., Valjarević, A., Čegar, N., & Lukić, T. (2023). Snow Avalanche Hazard Prediction Using the Best-Worst Method—Case Study: The Šar Mountains, Serbia. In J. Rezaei, M. Brunelli & M. Mohammadi (Eds.), *Advances in Best-Worst Method* (pp. 211-216). Springer: Cham, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40328-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40328-6_12)
- Durlević, U., Valjarević, A., Novković, I., Vujović, F., Josifov, N., Krušić, J., Komac, B., Djekić, T., Singh, S. K., Jović, G., Radojković, M., & Ivanović, M. (2024). Universal Snow Avalanche Modeling Index Based on SAFI–Flow-R Approach in Poorly-Gauged Regions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(9), Article 315. <https://doi.org/10.3390/ijgi13090315>
- Environmental Systems Research Institute (2024). Sentinel-2 Land Cover Explorer. Environmental Systems Research Institute.
- Fischer, V.F., Keiler, M., & Zimmermann, M. (2016). Modelling of individual debris flows using Flow-R: A case study in four Swiss torrents. In G. Koboltschnig (Ed.), *13th Congress Interpraevent* (pp. 257-264). International Research Society, Lucerne.
- Flickr (2015). *Restelica avalanche*. <https://www.flickr.com/photos/aljabak85/16360629194>
- Gulan, L., Stajic, J. M., Zeremski, T., Durlević, U., & Valjarević, A. (2022). Radionuclides and Metals in the Parks of the City of Belgrade, Serbia: Spatial Distribution and Health Risk Assessment. *Forests*, 13(10), 1648. <https://doi.org/10.3390/f13101648>
- Hall, D.K., Riggs, G.A., & Salomonson, V.V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Hao, J., Zhang, X., Cui, P., Li, L., Wang, Y., Zhang, G., & Li, C. (2023). Impacts of Climate Change on Snow Avalanche Activity Along a Transportation Corridor in the Tianshan Mountains. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 510-522. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00475-0>
- Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Process*, 8, 327-334. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405>
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 13, 869-885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Iban, M.C. & Bilgilioglu, S.S. (2023). Snow avalanche susceptibility mapping using novel tree-based machine learning algorithms (XGBoost, NGBoost, and LightGBM) with explainable Artificial Intelligence (XAI) approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37, 2243-2270. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02392-6>

- Institute of Nature Conservation of Serbia. Protected Areas (2024). National Park Šar Planina. <https://www.zzps.rs/wp/np-sar-planina/?lang=en>
- Konurhan, Z., Yücesan, M. & Gul, M. (2023). Avalanche Risk Analysis by a Combined Geographic Information System and Bayesian Best-Worst Method. In J. Rezaei, M. Brunelli & M. Mohammadi (Eds.), *Advances in Best-Worst Method* (pp. 193-210). Springer: Cham, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40328-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40328-6_11)
- Komac, B., Ciglič, R., Hrvatin, M., Volk Bahun, M., Štaut, L., & Zorn, M. (2023). Geografski atlas naravnih nesreč v Sloveniji. *Geografski Vestnik*, 95(1), 119–151. <https://doi.org/10.3986/GV95105>
- Košová, V., Molokáč, M., Čech, V., & Jesenský, M. (2022). Avalanche Hazard Modelling within the Kráľova Hoľa Area in the Low Tatra Mountains in Slovakia. *Land*, 11(6), Article 766. <https://doi.org/10.3390/land11060766>
- Krivokapić, D. (1969). *Šar planina*. Turistička štampa.
- Kumar, S., Srivastava, K.P., Snehmani & Bhatiya, S. (2019). Geospatial probabilistic modelling for release area mapping of snow avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 165, Article 102813. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102813>
- Manojlović, S., Sibinović, M., Srejić, T., Hadud, A., & Sabri, I. (2021). Agriculture Land Use Change and Demographic Change in Response to Decline Suspended Sediment in Južna Morava River Basin (Serbia). *Sustainability*, 13(6), Article 3130. <https://doi.org/10.3390/su13063130>
- Martini, M., Baggio, T., & D'Agostino, V. (2023). Comparison of two 2-D numerical models for snow avalanche simulation. *Science of The Total Environment*, 896, Article 165221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165221>
- Menković, Lj., & Milivojević, M. (2021). Glacial morphology of the Šara Mountains. *Bulletin of the Serbian Geographical Society*, 101(1), 1-29. <https://doi.org/10.2298/GSGD2101001M>
- Milevski, I., Aleksova, B., Lukić, T., Dragičević, S. & Valjarević, A. (2024). Multi-hazard modeling of erosion and landslide susceptibility at the national scale in the example of North Macedonia. *Open Geosciences*, 16(1), Article 20220718. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0718>
- Nasery, S. & Kalkan, K. (2021). Snow avalanche risk mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis: The case of Van, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, Article 782. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07112-4>
- Nishimura, K., Barpi, F. & Issler, D. (2021). Perspectives on Snow Avalanche Dynamics Research. *Geosciences*, 11(2), Article 57. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020057>
- Noël, F., Nordang, S. F., Jaboyedoff, M., Digout, M., Guerin, A., Locat, J. & Matasci, B. (2023). Comparing Flow-R, Rockyfor3D and RAMMS to Rockfalls from the Mel de la Niva Mountain: A Benchmarking Exercise. *Geosciences*, 13(7), Article 200. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070200>
- Perla, R., Cheng, T.T. & McClung, D.M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26(94), 197-207. <https://doi.org/10.3189/S002214300001073X>
- Rafique, A., Dasti, M. Y. S., Ullah, B., Awwad, F. A., Ismail, E. A. 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), Article 5375. <https://doi.org/10.3390/rs15225375>

- Rahmati, O., Ghorbanzadeh, O., Teimurian, T., Mohammadi, F., Tiefenbacher, J. P., Falah, F., Pirasteh, S., Ngo, P. -T. T. & 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), Article 2995. <https://doi.org/10.3390/rs11242995>
- Stojković, S., Marković, D., & Durlević, U. (2023). Snow Cover Estimation Using Sentinel-2 High Spatial Resolution Data. A Case Study: National Park Šar Planina (Serbia). In N. Ademović, E. Mujčić, M. Mulić, J. Kevrić & Ž. Akšamija (Eds.), *Advanced Technologies, Systems, and Applications VII* (pp. 507-519). Springer: Cham, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5_39)
- Sykes, J., Toft, H., Haegeli, P. & Statham, G. (2024). Automated Avalanche Terrain Exposure Scale (ATES) mapping—Local validation and optimization in western Canada. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 24, 947-971. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-947-2024>
- Tremper, B. (2008). *Staying alive in avalanche terrain (Second edition)*. The Mountaineers Books.
- Turquet, A., Wuestefeld, A., Svendsen, G. K., Nyhammer, F. K., Nilsen, E. L., Persson, A. P. -O. & Refsum, V. (2024). Automated Snow Avalanche Monitoring and Alert System Using Distributed Acoustic Sensing in Norway. *GeoHazards*, 5(4), 1326-1345. <https://doi.org/10.3390/geohazards5040063>
- Utah Avalanche Center (n.d.). Blog: Steepness. <https://utahavalanche-center.org/blog/16386>
- Valjarević, A. (2024). GIS and remote sensing methods in predicting the dissipation time of rural settlements under the influence of climate change in the Republic of Serbia, *Journal of Urban Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.12.002>
- Varol, N. (2021). 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, Article 103439. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103439>
- Vujović, F., Čulafić, G., Valjarević, A., Brđanin, E., & Durlević, U. (2024). Comparative Geomorphometric Analysis of Drainage Basin Using AW3D30 Model in ArcGIS and QGIS Environment: Case Study of the Ibar River Drainage Basin, Montenegro. *Agriculture and Forestry*, 70, 217-230. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.1.15>
- Wen, H., Wu, X., Liao, X., Wang, D., Huang, K. & Wünnemann, B. (2022). Application of machine learning methods for snow avalanche susceptibility mapping in the Parlung Tsangpo catchment, southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 198, Article 103535. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103535>
- Xi, N. & Mei, G. (2023). Avalanche Susceptibility Mapping by Investigating Spatiotemporal Characteristics of Snow Cover Based on Remote Sensing Imagery along the Pemo Highway—A Critical Transportation Road in Tibet, China. *Water*, 15(15), Article 2743. <https://doi.org/10.3390/w15152743>
- Yang, J., Li, C., Li, L., Ding, J., Zhang, R., Han, T. & Liu, Y. (2020). Automatic Detection of Regional Snow Avalanches with Scattering and Interference of C-band SAR Data. *Remote Sensing*, 12(17), Article 2781. <https://doi.org/10.3390/rs12172781>
- Yang, J., Li, L. & Liu, Y. (2024). Dynamic spatiotemporal quantification of avalanches in the Central Tianshan Mountains by integrating air-space-ground collaborative sensing and snow field-terrain filters. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), Article 2432525. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2432525>

## Урош Дурлевић<sup>1\*</sup>

\* Универзитет у Београду, Географски факултет, Србија

### ГЕОПРОСТОРНО МОДЕЛОВАЊЕ СНЕЖНИХ ЛАВИНА НА ШАР ПЛАНИНИ, БАЛКАНСКО ПОЛУОСТРВО

**Апстракт:** Снежне лавине представљају један од најзначајнијих природних хазарда у високопланинским областима широм света. Израда карата просторне дистрибуције снежних лавина представља један од почетних корака у управљању снежним лавинама. У овој студији извршено је геопросторно моделовање за територију Шар планине на укупној површини од 1602 km<sup>2</sup>. Први корак у истраживању јесте прикупљање података о досадашњим појавама снежних лавина у Србији и Северној Македонији и формирање базе података у географским информационим системима (ГИС). Други корак подразумева примену SAFI-Flow-R методе и анализу три природна и антропогена фактора: снежни покривач, нагиб терена и намену земљишта. Трећи корак укључује моделовање, односно пропагацију снежних лавина у софтверском пакету Flow-R 2.0 и креирање синтетичких карата на основу дебљине покреног снежног слоја. Применом закона трења и других алгоритама у софтверу, извршено је моделовање лавина од стартне зоне, преко зоне кретања до зоне акумулације. Резултати показују да је 26.6% укупне површине угрожено лавинама, при чему је дебљина потенцијално покреног снежног слоја 50 cm. Четврти корак представља анализу и зонирање угрожених насеља, као и предлог мера за заштиту животне средине. Угрожена насеља снежним лавинама су: Рестелица, Брод, Мушничово и ски центар "Брезовица" у Србији, док су у Северној Македонији рањива насеља Бозовце, Вешала и ски центар "Попова Шапка". Добијени резултати могу бити од користи доносиоцима одлука, управљачима националних паркова и горским службама спасавања у Србији и Северној Македонији за адекватно управљање животном средином и доношење мера заштите.

**Кључне речи:** снежне лавине, Шар планина, моделовање, SAFI-Flow-R, ГИС, даљинска детекција, животна средина

<sup>1</sup> uros.durlevic@gef.bg.ac.rs (аутор за кореспонденцију)  
Урош Дурлевић (<https://orcid.org/0000-0003-3497-5239>)

## Увод

Услед интензивирања климатских промена и повећања броја климатских екстрема, природне непогоде представљају велику претњу по природу и човекову околину (Manojlović et al., 2021; Ćurić et al., 2022; Milevski et al., 2024; Valjarević, 2024). Снежне лавине су типичан природни hazard карактеристичан за високопланинске пределе који су одликују веома ниским температурама ваздуха и значајном дебљином снежног покривача (Turquet et al., 2024; Cetinkaya & Kocaman, 2024). Снежне лавине се дефинишу као појава која настаје ослобађањем, кретањем и акумулацијом (депозицијом) снега на топографској површини под утицајем силе гравитације (Rahmati et al., 2019; Yang et al., 2024). Поред снега, у састав лавина неретко улази лед, педолошки слој, остаци стена и биљке које лавина транспортује до зоне акумулације (Durlević et al., 2022; Chu et al., 2024). У зависности од величине, лавине средњих и великих размера могу нанети значајне последице по животну средину, изазвати оштећења екосистема, пејзажа, постојеће инфраструктуре итд. (Kumar et al., 2019; Yang et al., 2020).

На покретање снежних лавина утичу специфични геоморфолошки (нагиб терена), метеоролошки (брзина ветра, температура ваздуха, падавине), биогеографски (намена земљишта), хидролошки (структура снежних слојева) и антропогени фактори (Akay 2021; Nishimura et al., 2021; Bian et al., 2022; Hao et al., 2023).

У зависности од места настанка, природних услова и садржаја воде, постоји неколико типова снежних лавина: плочасте (суве и влажне), лавине растреситог снега (сувог и влажног), прашинасте лавине, ледене лавине, веначне лавине, клизне лавине и бујичне лавине (Tremper, 2008). На територији Шар планине највише су заступљене плочасте, клизне и лавине растреситог снега. Због малих разлика у структури и дистрибуцији свих типова лавина, приликом геопросторног моделовања користе се исти параметри за све типове.

Током последњих 15 година, развијене су бројне методе и модели за просторно моделовање лавина, од којих се најчешће примењују: вишекритеријумска анализа, нумеричко моделовање и машинско учење.

Вишекритеријумска анализа подразумева коришћење великог броја природних и антропогених услова, њихову евалуацију у географским информационим системима применом различитих метода, попут аналитичко-хијерархијског процеса (АНП) и Best-Worst модела (BWM) (Nasery & Kalkan, 2021; Konurhan et al., 2023; Rafique et al., 2023; Xi & Mei, 2023). Неретко је фази логика интегрисана у моделе вишекритеријумске анализе (Varol, 2021). Нумеричко моделовање подразумева примену дигиталних модела висина и 2-D моделовања снежних лавина у специјализованим софтверским пакетима попут RAMMS, FLO-2D и Flow-R (Horton et al., 2013; Kořová et al., 2022; Martini et al., 2023). Предност вишекритеријумске анализе и нумеричког моделовања јесте добијање релевантних финалних резултата без претходног инвентара снежних лавина. У случају да постоји велики број мапираних снежних лавина, аутори често прибегавају коришћењу бројних модела машинског учења: Support vector machine, Random forest, Multivariate discriminant analysis, Logistic regression, Gradient Boosting Machines итд. (Choubin et al., 2019; Wen et al., 2022; Iban & Bilgilioglu, 2023).

У студији је коришћењем ГИС алата, даљинске детекције, отворених података и SAFI–Flow-R методе извршено геопросторно моделовање Шар планине, националног парка у Србији и Северној Македонији. Ово је прво истраживање просторне дистрибуције лавина на комплетној територији Шаре, тако да резултати имају међународни значај за потребе адекватнијег управљања националним парковима, локалним самоуправама и туристичким центрима унутар простора истраживања.

## Материјали и методе

### *Простор истраживања*

Простор истраживања обухвата Шар планину, један од највећих планинских масива на Балканском полуострву. На територији Србије један део планине је заштићен као национални парк, док читав планински масив са подножјем представља планирану границу националног парка (Завод за заштиту природе Србије, 2024). У Северној Македонији је током 2021. године Шар планина проглашена националним парком. Укупна површина истраживаног простора износи 1602 km<sup>2</sup>. Најнижа тачка је висине 387 метара недалеко од насеља Грејковце (Србија), док је највиша Титов врх (2748 m) у Северној Македонији (Сл. 1). Статус националног парка добијен је због изузетно разноврсног биљног и животињског света: 1800 биљних врста, 147 врста лептира, 200 врста птица и 45 врста гмизаваца и водоземаца (Завод за заштиту природе Србије, 2024).

*Сл. 1. Географски положај Шар планине (погледати у енглеској верзији текста, стр. 147)*

Поред богате флоре и фауне, на овом простору постоје специфични облици у рељефу попут глацијалног и периглацијалног. Разлог томе јесте активна плеистоцена глацијација током које су формиран ледници на Шар планини (Menković & Milivojević, 2021). Одређен број циркова је данас испуњен водом, тако да на овој територији постоји више од 30 сталних глацијалних језера.

Осим што је једна од најзначајнијих еколошких тачака Европе, Шара се одликује изузетно ниским температурама и великим количинама снега током зимског периода што даје велики потенцијал развоју планинског туризма. У овом делу године просечна максимална дубина снежног покривача на висинама изнад 1700 метара износи 150-200 cm. У јаругама које се налазе у заветрини, дебљина снега може бити до пет метара (Durlević et al., 2024). Велика количина снега и појава температурних инверзија током зимског периода изазивају формирање различитих врста снежних слојева. Посебно су угрожени рекреативци који скијају ван обележених ски стаза у туристичким центрима "Брезовица" и "Попова Шапка". Услед настанка слабог слоја, притисак изазван од стране учесника зимских спортова може бити довољан да покрене снежну лавину.

*Сл. 2. Снежне лавине на Шар планини (погледати у енглеској верзији текста, стр. 148)*

Снежне лавине на Шар планини угрожавају људске животе, стамбене објекте, саобраћајнице и биодиверзитет (Сл. 2). Према постојећим проценама, више од 100 људи је страдало од 1800. године од последица лавина на Шар планини. Несреће су забележене и на северним и на јужним падинама. У насељу Рестелица (општина Гора, Србија) је 11. фебруара 2012. године лавина усмртила десеторо људи и затрпала 11 кућа (Durlević et al., 2023). Ван обележених стаза на територији ски

центра "Брезовица" (Србија), лавина скоро сваке године усмрти неколико скијаша. Дана 13. фебруара 2024. године позната америчка скијаша Кетрин Ригби преминула је од последица снежне лавине, која се активирала на локацији "Орлово гнездо", на Шар планини. У насељу Бозовце (Северна Македонија) је 13. фебруара 1956. године лавина изазивала смрт троје људи, док је седморо повређено (Krivokarić, 1969). Због великог броја лавина на целокупној територији националног парка, од великог је значаја креирање карата просторне дистрибуције снежних лавина. Унутар простора истраживања налази се 112 насеља, од тога 80 у Србији и 32 насеља у Северној Македонији, укључујући туристичке центре.

## Методологија

### *SAFI–Flow-R приступ*

Анатомија снежне лавине састоји се од: стартне зоне, зоне кретања и зоне депозиције. Да би се одредиле локације на којима се активира снежна лавина, током 2024. године развијен је Snow avalanche formation index (SAFI), који у свом прорачуну укључује три фактора: Normalized Difference Snow Index (NDSI), нагиб терена и намену земљишта.

NDSI се добија методом даљинске детекције, односно анализом сателитских снимака током зимским месеци. Индекс се рачуна на основу формуле (Hall et al., 1995):

$$NDSI = \frac{Green-SWIR}{Green+SWIR}, \quad (1)$$

где је: Green – зелени спектрални канал; SWIR – краткоталасни инфрацрвени спектрални канал.

За тетирорију Шар планине процесуирани су сателитски снимци за јануар и фебруар од 2020. до 2024. године. Мисија снимака је Sentinel-2, док је облачност садржаја сваког снимка мања од 1% (Copernicus Open Access Hub, 2024). NDSI вредности се могу кретати од -1 до +1. Вредности писела веће од 0.4 приказују присуство снежног покривача на топографској површини (Stojković et al., 2023). Максимална вредност NDSI (+1) указује на потпуну доминацију снега и значајну дубину снежног покривача. Према проценама са теренских истраживања на Шари, вредност пиксела изнад 0.6 указује на већу дебљину снега која се може покренути и изазвати лавину. Просторна резолуција пиксела је 12.5 m.

Нагиб терена представља најважнији геоморфолошки услов за појаву снежних лавина. У већини случајева, степен инклинације терена је највећи при формирању лавине и опада са процесом успоравања лавине и акумулације снега. Према истраживањима и стандардима Центра за лавине у Јути (САД), снежне лавине се формирају на нагибима терена од 20 до 60° (Utah Avalanche Center, 2024). Подаци о нагибу терена добијени су путем дигиталног модела висине (DEM) са просторном резолуцијом од 12.5 метара (Alaska Satellite Facility, 2024).

Намена земљишта је биогеографски фактор који утиче на формирање и трасу лавинског материјала. Оголићене површине (камењари) и територије са ниском вегетацијом (ливаде, пашњаци) представљају идеалну подлогу за формирање лавине. Густе шумске састојине спречавају формирање плочастих лавина и важна су

природна баријера током кретања и акумулације лавина (Sykes et al., 2024). Подаци о намени земљишта преузети су са геопросторне базе података Environmental Systems Research Institute (2024) формиране на основу сателитских снимака мисије Sentinel-2 са просторном резолуцијом од 10 m.

У ГИС-у су додељене вредности за сва три критеријума у опсегу од 0 до 1, при чему 0 означава непогодне површине за формирање лавина, док вредност 1 приказује погодне површине за активирање снежних лавина.

*Таб. 1. Параметри за израчунавање SAFI индекса (погледати у енглеској верзији текста, стр. 149)*

Резултати SAFI индекса добијају се на основу формуле (Durlević et al., 2024):

$$SAFI = SC \cdot S \cdot LU, \quad (2)$$

где је: SC – снежни покривач; S – нагиб терена; LU – намена земљишта.

*Сл. 3. Карте природних фактора и индекс формирања снежних лавина (SAFI) (погледати у енглеској верзији текста, стр. 150)*

Погодне површине за активирање лавина на SAFI карти имају вредност 1 (Сл. 3). Након овог прорачуна, приступа се анализи потенцијалних зона кретања и акумулације лавина у софтверском програму Flow-R.

Софтвер Flow-R развијен је за потребе обраде регионалних процена угрожености гравитационим хазардима (снежне лавине, тецишта, одрони, плитка клизишта) заснованих на ГИС-у (Horton et al., 2013). Софтвер идентификује изворну област нестабилности користећи резултате добијене SAFI индексом и дефинише растојање процеса на основу принципа вероватноће ширења и закона трења (Holmgren, 1994).

Модел се састоји од две примарне компоненте: аутоматску идентификацију подручја извора и процену ширења (Fischer et al., 2016; Noël et al., 2023). Вероватноћа опасности од струјања лавине се израчунава коришћењем алгоритама правца тока и функција перзистентности. Модел трења који су описали Perla et al. (1980) је дизајниран за анализу пропагације лавина. Овај модел се ослања на нелинеарни закон трења, који је изведен као решење једначине кретања за процену динамике струјања. Закон одређује брзину тока ( $V_i$ ) на крају сегмента (Perla et al., 1980):

$$\begin{aligned} V_i &= (a_i \omega (1 - \exp b_i) + V_0^2 \exp b_i)^{\frac{1}{2}} \\ a_i &= g(\sin \beta_i - \mu \cos \beta_i) \\ b_i &= \frac{-2L_i}{\omega}, \end{aligned} \quad (3)$$

где је:  $\mu$  параметар трења,  $\omega$  представља однос масе и отпора,  $\beta_i$  је угао нагиба сегмента,  $V_0$  означава брзину на почетку сегмента,  $L_i$  је дужина сегмента, док  $g$  представља убрзање услед гравитације. Сегменти представљају делове лавинског тока. Сви поменути рачунски процеси уграђени су у софтвер Flow-R.

## Резултати и дискусија

Географски информациони системи представљају савремени алат који има веома важну улогу у приказу просторне дистрибуције природних хазарда и других појава и

процеса у животној средини (Durlević, 2021; Gulan et al., 2023; Vujović et al., 2024). Након анализе снежног покривача, нагиба терена и намене земљишта, у Flow-R софтверу добијене су карте просторне дистрибуције снежних лавина на Шар планини. Одрађене су две карте моделовања. Прва, са потенцијалном дебљином активiranог снежног слоја од 50 cm, и друга, са потенцијалном дебљином покренутог слоја од 3 m. Модел пропагације при потенцијално покренутом слоју од 50 cm приказује да је 425.99 km<sup>2</sup> површине Шар планине угрожено снежним лавинама (Сл. 4). Физичко-географски посматрано, подложни терени су оголићене површине испод шарпланинског гребена (од врха Морава на југозападу до Љуботена на североистоку), југозападне падине Коритника (2393 m), јужне падине Ошљака (2212 m), јужне падине Острвице (2092 m) и оголићене падине у подножју врха Тронежа (1934 m). Са аспекта животне средине, лавинама су угрожена насеља: Рестелица, Брод, Мушниково и ски центар "Брезовица" у Србији, као и Бзовце, Вешала, и ски центар "Попова Шапка" у Северној Македонији. Рестелица и Брод су насеља у општини Гора, Мушниково се налази на територији града Призрена, док ски центар "Брезовица" припада општини Штрпце. На територији Северне Македоније, Бзовце, Вешала и ски центар "Попова Шапка" су насеља у општини Тетово.

Поменути врхови одликују се алпским климатом, док се насеља налазе на контакту умерено-континенталне и алпске климе.

*Сл. 4. Геопросторна дистрибуција снежних лавина при дебљини покренутог снега од 50 cm (погледати у енглеској верзији текста, стр. 152)*

Сва поменута насеља представљају подручја на којима би се покренути слој снега потенцијално акумулирао и тиме угрозио локално становништво. Друга карта означава угрожене површине при дебљини потенцијално покренутог слоја од 3 m. У оваквом сценарију, 433.9 km<sup>2</sup> Шар планине било би угрожено снежним лавинама, што чини 27% површине истраживаног простора (Сл. 5). У питању су исти врхови и насеља, с тим да би зона акумулираног снега била знатно већа.

*Сл. 5. Геопросторна дистрибуција снежних лавина при дебљини покренутог снега од 3 m (погледати у енглеској верзији текста, стр. 153)*

Резултати се могу потврдити теренским истраживањима, а у случају детаљнијег моделовања неопходна је анализа сателитских снимака терена и снежног покривача високе резолуције (1 m) како би се прецизно зонирали стамбени објекти унутар насеља који су угрожени од потенцијалног деловања снежних лавина (Denissova et al., 2024). Како би се ублажио њихов утицај, неопходно је применити комбиноване мере заштите: структурне мере (потпорне конструкције), привремене мере, мере планирања и пошумљавања.

За простор Шар планине прва модерна истраживања, односно картирања лавина започета су крајем 80-их година прошлог века (Динић, 1990). Анализа угрожености територије снежним лавинама у ГИС пакетима је први пут одрађена током 2021. године, за територију општине Штрпце, када је развијен AVAPI (Avalanche Potential Index) који је анализирао четири природна фактора: експозицију, храпавост терена, дубину снега и намену земљишта. Резултати су указивали да је 9.1 km<sup>2</sup> општине Штрпце подложно лавинама (Durlević et al., 2021). Годину дана касније анализирана је угроженост Шар планине снежним лавинама применом АНР методе, где је у анализи укључено 14 критеријума, а финални резултати су класификовани у четири

класе. Висок степен угрожености констатован је за 20% територије Шар планине (Србија) и 15 насеља која су делимично или потпуно угрожена (Durlević et al., 2022). За исти простор је током 2023. године примењен други метод вишекритеријумске анализе – Best-Worst Method (BWM) када је обрађено девет природних и антропогених критеријума. Резултати су издвојили четири насеља (Рестелица, Крушево, Превалац, ски центар "Брезовица") као потенцијално угрожена (Durlević et al., 2023). SAFI–Flow-R је током 2024. коришћен за просторну дистрибуцију лавина на северним падинама Шар планине, где је показао врло високу предиктивну моћ (AUC=94%). Овај приступ представља универзални индекс моделовања снежних лавина који има одређене предности у односу на моделе машинског учења и класичних метода вишекритеријумске анализе:

1. Једноставна примена модела и обрада отворених података;
2. Регионално моделовање снежних лавина. За релативно кратак временски период се могу моделовати површине веће од 1000 km<sup>2</sup>;
3. Комплетно моделовање снежних лавина, од стартне зоне до зоне депозиције снега;
4. Могућност геопросторног моделовања без претходног инвентара о снежним лавинама;
5. Због анализе најзначајнијих природних услова (снег, нагиб терена и намена земљишта), ова метода се може користити и у другим високопланинским областима широм света.

Поред Flow-R, за нумеричко моделовање снежних лавина се могу искористити модели RAMMS и FLO-2 који су већ коришћени за предикцију лавина у планинским областима Словачке и Италије (Kořová et al., 2022; Martini et al., 2023).

За будућа истраживања снежних лавина на територији Шар планине и другим планинским регионима у Србији неопходно је прикупити податке са терена и формирати дигитални модел висина високе резолуције (мање од 1 метар) како би се добио прецизнији увид у угрожене стамбене објекте и саобраћајнице. У Словенији су истраживачи користили ДЕМ резолуције 0.5 m како би утврдили просторни обухват снежних лавина (Komac et al., 2023).

## **Закључак**

Током зимских месеци долази до појаве великог броја снежних лавина на Шар планини. Уколико је лавински ток већих размера, повећава се вероватноћа негативног утицаја на животну средину. Користећи отворене податке, ГИС и даљинску детекцију, извршено је моделовање снежних лавина методом SAFI–Flow-R. Карте геопросторне дистрибуције лавина представљају полазну основу за доношење мера заштите животне средине. Одрађена су два сценарија, лавине у случају покренутог снега дебљине 50 cm и 3 m. Кабинетским радом, теренским истраживањима и визуелном анализом идентификовани су угрожени планински терени, као и насеља на територији Србије (Рестелица, Брод, Мушничково и ски центар "Брезовица") и Северне Македоније (Бозовце, Вешала, и ски центар "Попова Шапка"). Угрожена подручја са дебљином покренутог снега од 0.5 m су површине 425.99 km<sup>2</sup>, док је 433,9 km<sup>2</sup> потенцијално угрожено од лавина са дебљином снежног слоја од 3 m. Истраживање је важно зато што су, поред већ раније евидентираних лавина у Рестелици и Бозовцу, идентификована и друга насеља која су

предиспонирана овој природној непогоди. За даља истраживања неопходно је поставити метеоролошке станице у угроженим насељима како би се пратило стање свих климатских елемената, нарочито снежних падавина и ветра. Такође је потребно спровести друге мере заштите од лавина, попут пошумљавања, изградње потпорних брана, забране скијања ван јасно обележених стаза у ски центрима. Резултати студије чине полазну основу за развој стратегије за смањење ризика од лавина. Доносиоци одлука, цивилна заштита, горске службе спасавања и управљачи националних паркова треба да координирају све активности везане за прогнозу лавина и мере заштите. Подаци из ове студије се могу користити у изради базе података о снежним лавинама као интегралног дела катастра природних непогода. Ова база података би могла да буде корисна за боље планирање активности у вези са ублажавањем последица од лавина и других природних непогода на подручју Националног парка Шар планина.

Захвалница: Истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Уговор број 451-03-136/2025-03/200091).

Сукоб интереса: Аутори изјављују да нема сукоба интереса.

Напомена издавача: Српско географско друштво остаје неутрално по питању јурисдикције у објављеним мапама и институционалним везама.

© 2025 Српско географско друштво, Београд, Србија.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Serbia.

**Литература** (погледати у енглеској верзији текста)