

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ГЕОГРАФСКИ ФАКУЛТЕТ

Урош С. Дурлевић

**ПРИРОДНИ УСЛОВИ КАО ДЕТЕРМИНАНТЕ
ГЕОПРОСТОРНЕ ДИСТРИБУЦИЈЕ СНЕЖНИХ
ЛАВИНА НА ПРИМЕРУ ШАР ПЛАНИНЕ (СРБИЈА)**

докторска дисертација

Београд, 2025.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF GEOGRAPHY

Uroš S. Durlević

**NATURAL CONDITIONS AS DETERMINANTS OF THE
GEOSPATIAL DISTRIBUTION OF SNOW AVALANCHES
ON THE EXAMPLE OF THE ŠAR MOUNTAINS (SERBIA)**

doctoral dissertation

Belgrade, 2025.

Ментор:

др Иван Новковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Географски факултет

Чланови комисије:

Датум одбране:

*Посвећено породици и целокупном српском народу подно
Шар планине који вековима остаје и опстаје на свом огњишту*

ПРИРОДНИ УСЛОВИ КАО ДЕТЕРМИНАНТЕ ГЕОПРОСТОРНЕ ДИСТРИБУЦИЈЕ СНЕЖНИХ ЛАВИНА НА ПРИМЕРУ ШАР ПЛАНИНЕ (СРБИЈА)

Сажетак: Предмет истраживања докторске дисертације је геопросторна дистрибуција снежних лавина на територији Шар планине (Србија), као и комплексна анализа природних услова који утичу на настанак, кретање и акумулацију снежних лавина. Услед пораста климатских екстрема и процеса урбанизације на Шар планини, предвиђање природних непогода један је од приоритета у заштити животне средине. Снежне лавине неретко изазивају велике људске, еколошке и материјалне губитке унутар насеља и туристичких центара. Геопросторном анализом природних услова и инвентара снежних лавина помоћу одговарајућих методологија и географских информационих система, добијене су синтезне карте угрожености Шар планине. Од научних метода, коришћена су четири приступа: вишекритеријумска анализа, интегрисани модел фази логике и вишекритеријумске анализе, нумеричко моделовање (пропагација) и модели машинског и дубоког учења. Добијени резултати указали су на локације које су најподложније настанку, кретању и акумулацији снежних лавина. Физичко-географски посматрано, највећи део шарпланинског гребена је током зимских и пролећних месеци изузетно предиспониран снежним лавинама. Поред гребена, угрожене су и падине на планинама Коритник, Ошљак, Острвица, Изгореница и Тронежа. Са аспекта животне средине, лавинским токовима угрожени су делови насеља: Рестелица, Брод (Гора), Мушниково и ски центри „Брезовица” и „Брод-Аркасена”. Добијене синтезне карте угрожености представљају полазну основу за управљање снежним лавинама у циљу спречавања и ублажавања негативних последица насталих активирањем снежних лавина. Приказани резултати могу бити од користи за планирање земљишта и адекватно управљање Националним парком из перспективе превенције снежних лавина на Шар планини.

Кључне речи: природни услови, антропогени фактор, геопросторно моделовање, географски информациони системи, Шар планина, снежне лавине, заштита животне средине

Научна област: Геонауке

Ужа научна област: Геопросторне основе животне средине

NATURAL CONDITIONS AS DETERMINANTS OF THE GEOSPATIAL DISTRIBUTION OF SNOW AVALANCHES ON THE EXAMPLE OF THE ŠAR MOUNTAINS (SERBIA)

Abstract: The subject of the doctoral dissertation research is the geospatial distribution of snow avalanches in the territory of the Šar Mountains (Serbia), as well as a complex analysis of the natural conditions that influence the formation, movement, and accumulation of snow avalanches. Due to the increase in climate extremes and the urbanization process in the Šar Mountains, predicting natural disasters is one of the priorities in environmental protection. Snow avalanches often cause significant human, environmental, and material losses within settlements and tourist centers. By geospatial analysis of natural conditions and snow avalanche inventory using appropriate methodologies and geographic information systems, synthesis maps of the susceptibility of the Šar Mountains were obtained. Four scientific approaches were used: multi-criteria analysis, integrated fuzzy logic and multi-criteria analysis model, numerical modeling (propagation), and machine and deep learning models. The results indicated the locations most vulnerable to the formation, movement, and accumulation of snow avalanches. From a physical-geographic point of view, the largest part of the Šar mountain ridge is highly prone to snow avalanches during the winter and spring months. In addition to the ridge, the slopes of the Koritnik, Osljak, Ostrivica, Izgorenica and Tromeda mountains are also vulnerable. From an environmental perspective, parts of the settlements are susceptible to avalanche flows: Restelica, Brod (Gora), Mušnikovo, and the Brezovica and Brod-Arxhena ski resorts. The obtained synthesis maps of susceptibility should represent the starting point for snow avalanche management to prevent and mitigate the negative consequences caused by the activation of snow avalanches. The presented results may be useful for land planning and adequate management of the national park from the perspective of preventing snow avalanches in the Šar Mountains.

Keywords: natural conditions, anthropogenic factor, geospatial modeling, geographic information systems, Šar Mountains, snow avalanches, environmental protection

Scientific field: Geosciences

Scientific subfield: Geospatial and Environmental Science

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
1.1. ПРЕДМЕТ, ЦИЉ, ЗАДАЦИ И ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	2
1.2. НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА.....	4
1.3. ПРОСТОР ИСТРАЖИВАЊА.....	5
2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	8
3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА	11
3.1. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ТЕРЕНСКА ИСТРАЖИВАЊА.....	11
3.1.1. Мапирање снежних лавина.....	11
3.1.2. Проширени тест колоне.....	12
3.1.3. Ручни тест смицања.....	13
3.1.4. Структура снежног зрна	14
3.2. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА КАБИНЕТСКИ РАД	15
3.2.1. Геопросторна база података.....	15
3.2.2. Вишекритеријумска анализа.....	17
3.2.2.1. Аналитичко-хијерархијски процес	17
3.2.2.2. Best-Worst метод.....	19
3.2.3. Фази аналитичко-хијерархијски процес.....	21
3.2.4. Нумеричко моделовање (пропагација).....	23
3.2.5. Машинско учење	26
3.2.5.1. Обрада података.....	26
3.2.5.2. Основни модели.....	27
3.2.5.3. Модели ансамбла	28
3.2.6. Дубоко учење	29
3.2.6.1. Multi-Layer Perceptron модел	29
3.2.7. Методологија за валидацију резултата.....	29
4. СНЕЖНЕ ЛАВИНЕ КАО ПРИРОДНИ ХАЗАРД.....	30
4.1. ИСТОРИЈАТ ИСТРАЖИВАЊА.....	30
4.2. ВЕЛИЧИНА ЛАВИНЕ	30
4.3. СКАЛА ОПАСНОСТИ ОД СНЕЖНИХ ЛАВИНА.....	32
4.4. ТИПИЧНИ ПРОБЛЕМИ СА ЛАВИНАМА.....	34
4.4.1. Нови снег.....	34
4.4.2. Ветром нанет снег	34
4.4.3. Перзистентни слаби слојеви.....	35
4.4.4. Мокар снег.....	35

4.4.5. Клизни снег.....	36
4.5. Тло и приземни слој	36
4.6. Врсте слабих слојева	37
4.7. ТИПОВИ СНЕЖНИХ ЛАВИНА.....	40
4.7.1. Суве плочасте лавине	40
4.7.2. Влажне плочасте лавине.....	44
4.7.3. Лавине растреситог снега	45
4.7.4. Прашинасте лавине	46
4.7.5. Ледене лавине	46
4.7.6. Веначне лавине	47
4.7.7. Бујичне лавине.....	48
4.7.8. Клизне лавине	48
4.8. ПРИМЕРИ РАЗОРНИХ СНЕЖНИХ ЛАВИНА У СВЕТУ	49
5. ПРИРОДНИ УСЛОВИ КАО ДЕТЕРМИНАНТЕ СНЕЖНИХ ЛАВИНА.....	52
5.1. ГЕОЛОШКА ГРАЂА	52
5.2. СЕИЗМИЧКИ ХАЗАРД	55
5.3. ГЕОМОРФОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ.....	57
5.3.1. Хипсометрија.....	57
5.3.2. Нагиб терена	60
5.3.3. Експозиција.....	62
5.3.4. Закривљеност терена	64
5.3.5. Вертикална рашчлањеност	68
5.4. ПЕДОЛОШКИ ПОКРИВАЧ.....	70
5.5. КЛИМАТСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ.....	70
5.5.1. Сунчево зрачење.....	71
5.5.2. Температура ваздуха.....	71
5.5.3. Облачност	74
5.5.4. Падавине	74
5.5.5. Снежни покривач.....	77
5.5.6. Ветар.....	78
5.6. ХИДРОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ.....	79
5.6.1. Реке.....	79
5.6.2. Језера	80
5.7. БИОГЕОГРАФСКИ УСЛОВИ И НАЧИН КОРИШЋЕЊА ЗЕМЉИШТА.....	81
5.7.1. Флора.....	81
5.7.2. Фауна.....	82

5.7.3. Намена земљишта	82
6. ЉУДСКИ ФАКТОР КАО ПОКРЕТАЧ СНЕЖНИХ ЛАВИНА	84
7. РЕЗУЛТАТИ УГРОЖЕНОСТИ ТЕРИТОРИЈЕ ШАР ПЛАНИНЕ СНЕЖНИМ ЛАВИНАМА.....	86
7.1. ТЕРЕНСКА ИСТРАЖИВАЊА	86
7.2. КАБИНЕТСКИ РАД	89
7.2.1. Вишекритеријумска анализа	89
7.2.1.1. Аналитичко-хијерархијски процес	89
7.2.1.2. Best-Worst метод	91
7.2.2. Фази аналитичко-хијерархијски процес.....	93
7.2.3. Нумеричко моделовање (пропагација)	94
7.2.4. Машинско учење	97
7.2.4.1. Основни модели.....	97
7.2.4.2. Модели ансамбла	101
7.2.5. Дубоко учење	106
7.2.5.1. Multi-Layer Perceptron модел	106
7.2.5.2. Истраживачка анализа података.....	107
7.3. ВАЛИДАЦИЈА РЕЗУЛТАТА	108
8. МЕРЕ ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ ОД ПОСЛЕДИЦА СНЕЖНИХ ЛАВИНА	111
8.1. СТРУКТУРНЕ МЕРЕ.....	111
8.2. ВЕШТАЧКО ПОКРЕТАЊЕ ЛАВИНЕ	112
8.3. ПРИВРЕМЕНЕ МЕРЕ	113
8.4. МЕРЕ ПЛАНИРАЊА	114
8.5. ПОШУМЉАВАЊЕ	114
9. ЗОНИРАЊЕ УГРОЖЕНИХ ПОДРУЧЈА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА.....	115
10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	120
ЛИТЕРАТУРА.....	124
СПИСАК СЛИКА И ТАБЕЛА.....	134
БИОГРАФИЈА.....	139

1. УВОД

Све природне непогоде на планети Земљи детерминисане су природним условима. Природни услови одређене територије представљају синергију природних (састав стена, рељеф, клима, вегетација) и антропогених утицаја на одређеном простору (Новковић, 2016). У зависности од карактеристика природних услова, територија може бити предиспонирана бројним типовима геохазарда различитог интензитета. Комбинацијом специфичних природних услова и човекових активности, на одређеној топографској површини појављује се могућност настанка природних непогода: снежних лавина, бујичних поплава, клизишта, шумских пожара, тецишта итд.

Учесталост природних непогода константно расте, изазивајући све већи број људских и материјалних губитака. Од последица природних непогода у свету је током 21. века страдало више од 1.7 милиона људи, док је процењена штета преко 135 милијарди долара (Boloorani и др., 2021; Statista, 2024).

Услед повећања броја становника у свету, пораста потребе за исхраном, експанзије туристичких активности интензивира процес трансформације земљишта. Најчешћи је случај претварања шумског земљишта у грађевинско или пољопривредно, чиме се потпуно или делимично мењају природни услови локалних терена. Такве се промене често реализују без комплексног сагледавања физичко-географских фактора, чиме се инфраструктура, стамбени и други објекти доводе у опасност од одређених природних непогода. Природне непогоде представљају појаве које доводе до нарушавања стабилности природних система под утицајем природних процеса и антропогеног фактора (Драгићевић и Филиповић, 2016). За потребе израде дисертације анализирани су сви природни и антропогени услови за које је научно доказано да детерминишу појаву снежних лавина.

Одређени делови високопланинских подручја на умереним географским ширинама због велике количине снежног покривача, специфичних морфометријских услова и одсуства високе вегетације врло су угрожени снежним лавинама. Иако не спадају у најучесталији тип природних непогода и јављају се на мање од 1% територије Србије, лавине током зимских и пролећних месеци могу изазвати исте последице као и остале непогоде. На територији Србије картиране су лавине на Копачици, Проклетијама и Шар планини (Динић, 1990; Вајић, 2018). Досадашња истраживања показују да су лавине имале најразорнији утицај на северним падинама Шар планине, где је током протеклих 225 година живот изгубило више од 100 људи. Лавине углавном настају природним путем, али се неретко дешава да људски фактор буде главни окидач. Скијаши, сноубордери, возачи моторних санки у условима велике количине снега на стрмим и оголићеним падинама активирају лавине које у зависности од дебљине плоче, имају различит деструктивни потенцијал.

Недостатак студија и инегрисаних инвентара о снежним лавинама, као и мањак података о њиховој геопросторној дистрибуцији често представља велики проблем у земљама у развоју. Географски информациони системи (ГИС), даљинска детекција и софтвери за нумеричко моделовање лавина представљају модерне алате који се интензивно користе у предвиђању настанка, кретања и акумулације лавина на одређеном простору. У комбинацији са базама података које садрже природне услове као основне улазне параметре, методама вишекритеријумске анализе, фази логике и машинског учења, формирају се финални прорачуни који дају адекватне резултате за геопросторну дистрибуцију лавина широм света (Швајцарска, Аустрија, Кина, Индија, Иран). Финални резултати добијени кабинетским радом подвргавају се валидацији и детаљним теренским истраживањима током зимских и летњих месеци, како би се

утврдиле механичке карактеристике снега и ток кретања еродованог материјала у рељефу насталог падинским и лавинским процесима.

У зависности од степена угрожености територије снежним лавинама, предлажу су мере заштите од деловања истих. Током истраживања обрађена је комплетна територија предвиђеног Националног парка Шар планина, са посебним освртом на ризичне падине које угрожавају локално становништво и пратећу инфраструктуру.

1.1. ПРЕДМЕТ, ЦИЉ, ЗАДАЦИ И ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

Снежне лавине су природна непогода која настаје ослобађањем, кретањем и акумулацијом великих снежних маса у планинским подручјима под утицајем гравитационе силе. Поред снега, у састав лавина често улазе и други материјали, као што су стене, земљиште и биљке, који се потом транспортују до нижих предела. У развијеним земљама током последњих 25 година, успостављени су системи и методе за картографско приказивање геопросторне дистрибуције снежних лавина. Ипак, предвиђање тачне локације и времена настанка лавина остаје изазов, због сложености физичких процеса унутар снежних слојева и лавина.

Глобално посматрано, лавине не спадају у најсмртоносније природне непогоде, али у неколико планинских земаља у умереним климатским зонама имају значајан деструктивни потенцијал. Лавине могу изазвати велике последице по животну средину и привредну активност угрожених подручја јер могу озбиљно да поремете железнички и друмски саобраћај.

С обзиром на временски интервал, геопросторну дистрибуцију и релевантне физичке процесе, у науци о лавинама могу се издвојити три главне теме (Nishimura и др., 2021):

- геопросторна дистрибуција снежних лавина, која обухвата везу између географских и климатских варијабли, вероватноће и озбиљности лавина, геоморфолошких ефеката лавина и социо-економских аспеката опасности од лавина;
- формирање лавине, укључујући редослед процеса који доводе до лома, њену вероватноћу у датим условима, као и обим и дубину ослобођене снежне плоче;
- динамика лавина, која подразумева проучавање режима струјања, густине, брзине, увлачења и таложења снега, као и интеракције лавина са препрекама.

Имајући у виду комплексност процеса настанка, кретања и акумулације снежних лавина, докторска дисертација обрађује тему геопросторне дистрибуције снежних лавина комбинујући кабинетски рад (ГИС, даљинска детекција, геопросторне базе података, научне методе) са теренским истраживањима (анализа природних услова, мапирање снежних лавина, тестови унутар снежног покривача).

Сходно томе, предмет истраживања докторске дисертације је геопросторни размештај снежних лавина на територији Шар планине, као и комплексна анализа природних услова који утичу на настанак, кретање и акумулацију снежних лавина. Као предмет истраживања може се навести и локална физичко-географска анализа досадашњих појава лавина са циљем дефинисања математичких и статистичких законитости под којима се активира лавински материјал.

Проблем настанка снежних лавина предмет је истраживања многих научника из различитих области природних, техничких и економских наука. Са аспекта геопросторног размештаја лавина, неопходно је сагледати физичко-географски приступ. Физичко-географски приступ укључује у разматрање велики број различитих варијабли и узрочника настанка, кретања и акумулације лавина.

За простор Шар планине до сада није постојало довољно геопросторних података високе резолуције који нуде приказ најугроженијих подручја. Овај проблем је нарочито изражен за територије ски-центра „Брезовица” и насеље Рестелица, две области унутар којих су забележени највећи људски и материјални губици настали деловањем снежних лавина. С обзиром на димензије и учесталост појављивања, снежне лавине имају утицај на обликовање рељефа и локалне топографије. Лавине већих димензија често изазивају оштећење стабала приликом кретања лавинског тока и доводе до убрзане ерозије и акумулације материјала. Како би се смањила и ублажила опасност од потенцијалних лавина, интензивирани су истраживања са циљем бољег разумевања природних услова средине у којима се појављују.

Сходно наведеном предмету истраживања, као и просторном и временском обухвату, дефинисани су циљеви истраживања докторске дисертације:

1. Анализа природних услова, интерпретација добијених резултата, као и израда синтезних карата угрожености Шар планине снежним лавинама. Пошто су синтезне карте резултат међусобног преклапања географских фактора у географским информационим системима, из овог циља произилазе и други циљеви;
2. Обједињавање постојећих и стварање нових знања о проблематици снежних лавина, као и разумевање утицаја специфичних природних услова на њихов геопросторни размештај;
3. Детерминација физичко-географских фактора геопросторног размештаја снежних лавина. Окосница овог циља истраживања заснована је на утврђивању природних услова и њиховог значаја на настанак, кретање и акумулацију лавина. За ову сврху анализирани су природни услови: геолошки, геоморфолошки, педолошки, климатски, хидролошки и биогеографски, који имају различит утицај на појаву снежних лавина;
4. Детерминација антропогеног фактора. Поред природних услова, на настанак лавина битан утицај има антропогени фактор, пошто су људи у одређеном броју случајева означени као „покретачи” лавина. За овај циљ је обрађена анализа савремених података о утицају људског фактора на настанак лавина. Потенцијал за појаву снежних лавина варира у зависности од броја људи на једној падини и њихових активности (возачи моторних санки, скијаши, сноубордери, крпљачи итд);
5. Утврђивање мера заштите животне средине од последица снежних лавина. Након израде синтезних карата угрожености, могу се предложити организационе, административне и биолошке мере за забрану кретања скијаша и сноубордера ван обележених и обезбеђених стаза и ограничавање изградње објеката и крчења шума, што би значајно унапредило стање животне средине. У насељима или њиховој непосредној близини где постоје шансе за формирање лавина, потребно је утврдити и спровести скуп мера у циљу спречавања и ублажавања последица по животну средину.

У складу са дефинисаним предметом истраживања и постављеним циљевима дисертације, издвојени су следећи задаци:

1. Анализа домаће и иностране литературе и савремених научних метода, које су у складу са предметом истраживања. То подразумева примену релевантних научних метода у свету и Србији, имајући у виду да методологија истраживања мора бити компатибилна са простором истраживања и расположивим подацима;

2. Формирање геопросторне базе података. Овај задатак се реализује кроз прикупљање, сређивање, класификацију, обраду и презентацију великог броја геопросторних података релевантних за истраживачки рад;
3. Примена метода даљинске детекције саставни је део савремених истраживања физичко-географских појава и процеса. Применом географских информационих система (ГИС) и мултиспектралних сателитских снимака (мисија Sentinel-2) добија се јасан приказ стања животне средине са различитих аспеката (вегетација, степен оголићености земљишта, покривеност терена снежним покривачем итд);
4. Мапирање снежних лавина је реализовано коришћењем историјских података, теренских истраживања и резултата добијених кабинетским радом. Мапирање је спровођено на теренима на којима је доказана постојаност снежних лавина;
5. Анализа снежног покривача на терену. На локацијама у оквиру којих су картиране лавине извршена су истраживања снежног покривача. Анализе подразумевају тест стабилности снега, квалитет смицања снежног слоја и микроскопску идентификацију снежних зрна;
6. Интерпретација и презентација резултата истраживања, уз помоћ картографских, табеларних и графичких приказа са циљем лакшег визуелног праћења текста.

На основу просторно-временског оквира истраживања, предмета и проблема истраживања, циљева и задатака, дефинисане су основне научне хипотезе:

I хипотеза: Природни услови истраживног простора током зимских и пролећних месеци одређују геопросторну дистрибуцију снежних лавина.

II хипотеза: На територији Шар планине, снежне лавине великих димензија изазивају људске губитке, оштећење вегетације и значајну материјалну штету по стамбене и инфраструктурне објекте.

III хипотеза: Присуство и активности људи на угроженим падинама значајно утичу на покретање снежних лавина.

IV хипотеза: На процес формирања, кретања и акумулације снежних лавина делују различити природни услови. Односно, скуп једних физичко-географских карактеристика утиче на процес формирања, других на процес кретања, а трећих на процес акумулације лавинског материјала.

V хипотеза: Измена стања природних услова непосредно утиче на формирање снежних лавина. Дефорестација шумских екосистема омогућава несметано кретање великих снежних маса, док процес пошумљавања утиче позитивно на стање животне средине и има заштитну улогу.

1.2. НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Научни допринос и значај истраживања за потребе израде докторске дисертације је вишеструк. Огледа се у прикупљању и анализи домаће и стране литературе, иновативном методолошком приступу, као и обради велике базе геопросторних података за истраживани простор.

На основу свега обрађеног, може се закључити да:

- докторска дисертација представља прво истраживање у Србији које се бави геопросторном дистрибуцијом снежних лавина;
- примена модела машинског и дубоког учења, као гране вештачке интелигенције представља иновативан приступ у предикцији снежних лавина;

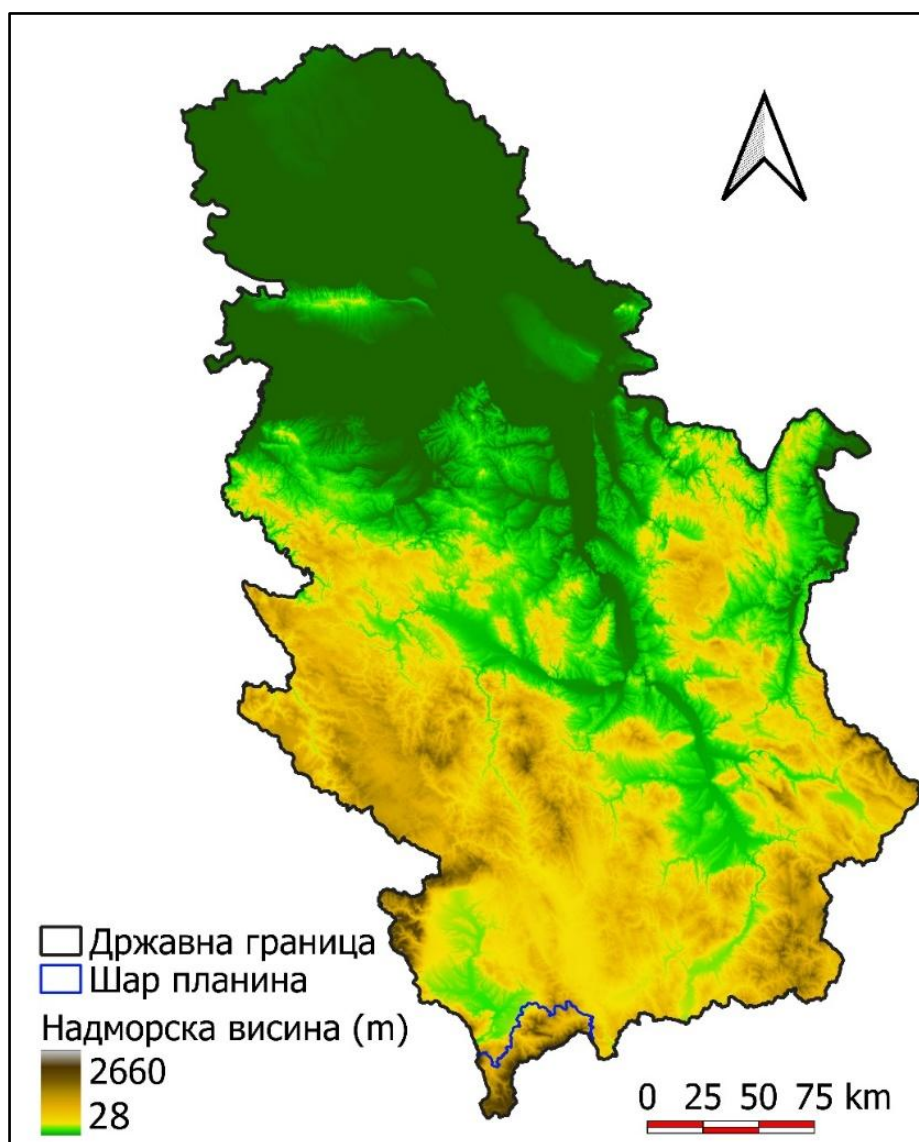
- интеграција метода вишекритеријумске анализе са моделом пропагације нуди релевантне резултате о настанку, кретању и акумулацији лавинског материјала;
- квантитативна анализа добијених резултата омогућава да се недвосмислено детерминише појединачни и интерактивни утицај свих релевантних фактора који утичу на угроженост терена лавинама;
- геопросторна база података и примењена методологија могу послужити за истраживање осталих природних хазарда (степен ерозије, бујичне поплаве, клизишта, шумски пожари) на територији Шар планине у циљу заштите животне средине од деловања истих;
- велики број анализираних физичко-географских фактора приказаних кроз географске информационе системе омогућавају адекватан приказ финалних резултата;
- комбинацијом кабинетског рада и теренског истраживања, могуће је прецизно издвајање зона са различитим степеном угрожености;
- анализом синтетских карата угрожености терена, могу се издвојити насеља која су високоризична за настанак лавина;
- на основу финалних резултата, на локалном нивоу се могу предложити измене и допуне везане за институционални и правни оквир заштите животне средине;
- мноштво савремених научних метода примењених у дисертацији омогућава компаративну анализу резултата снежних лавина на Шар планини са предикцијом лавина у другим истраженим подручјима света (Хималаји, Алпи, Пиринеји, Кавказ, Анди, Стеновите планине итд);
- концепт истраживања и примењене методе могу послужити као полазна основа за испитивање снежних лавина у другим деловима Србије и света у којима владају слични природни услови.

Очекивани резултати истраживања омогућили би доносиоцима одлука на локалном и регионалном нивоу успостављање адекватних мера заштите животне средине са циљем смањења и ублажавања људских губитака и материјалне штете узроковане снежним лавинама.

1.3. ПРОСТОР ИСТРАЖИВАЊА

Простор истраживања налази се у јужном делу Републике Србије, на територији Аутономне покрајине Косово и Метохија и представља предвиђену границу Националног парка Шар планина. Иако је тренутно заштићено 390 km² површине, предвиђено је да трајним границама обухвати површину од 973,7 km² (Завод за заштиту природе Србије, 2024).

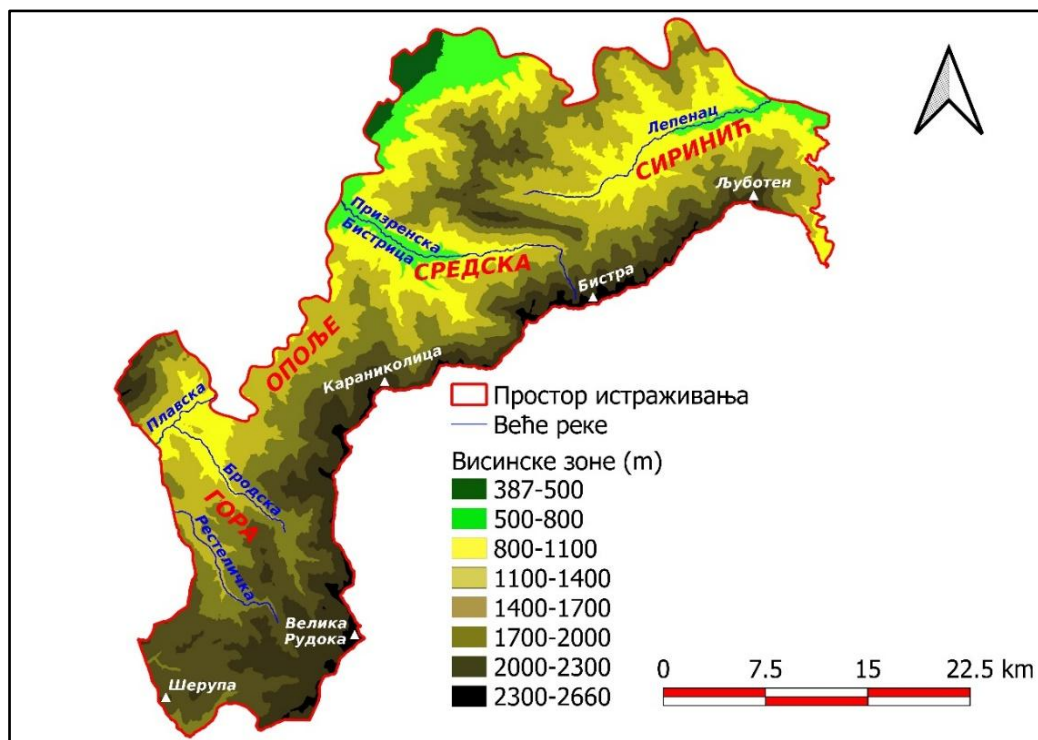
Геоморфолошки посматрано, простор је изузетно хетероген. Западна граница започиње од врха Шерупа (2092 m) и наставља се ка северу преко врха Калабак (2174 m), све до Коритника (2393 m). Иако је рељеф на овој територији углавном планински, граница није у потпуности копнена. Дуж западне границе полазећи од југа ка северу, три реке (Чајланска, Рестеличка, Плавска) настављају свој ток са територије Србије у Албанију. Дужина западне границе износи 30 km. Северна граница простора истраживања полази од Коритника. Затим прати долину Плавске и Радешке реке, наставља се преко планине Рудина, Кик, Шулан, Цвиљен, Грдоман, Кика и Тумба. Након тога, граница пролази претежно равничарским пределом долинама Беле и Црне реке. Затим се наставља узводно долином Мачилевске реке до Жар планине. Од Жар планине, граница прати Језерску планину, планину Куркулицу, затим долином Ижанске реке и Лепенца, пружа се до Догановића. Дужина северне границе износи 108,8 km.



Слика 1. Карта географског положаја Шар планине у Србији

Источна граница је јасно одређена, прати регионални пут Догановић-Глобочица и завршава се код граничног прелаза Глобочица, по дужини од 21 km. Од истока ка западу, јужна граница јасно је одређена планинским гребеном Шар планине и врховима изнад 2000 m који представљају природну и административну границу између Србије и Северне Македоније. Од врха Љуботена на истоку до врха Шерупе на западу, јужна граница омеђена је врховима: Куле (2324 m), Ливадица (2497 m), Пирибрег (2413 m), Кучинагледски врх (2524 m), Црни камен (2536 m), Језерска чука (2586 m), Бистра (2651 m), Велика планина (2609 m), Коњушка (2571 m), Црни врх (2585 m), Кобилица (2528 m), Царевно Гумно (2473 m), Вртоп (2555 m), Караниколица (2409 m), Скарпа (2474 m), Маја (2493 m), Залина (2493 m), Клеч (2414 m), Косович (2316 m), Трпезница (2610 m), Челепински врх (2554 m), Црнојезерски рид (2562 m), Велика Рудока (2660 m), Голема Враца (2629 m), Средња Враца (2582 m), Мала Враца (2536 m), планином Радика и притокама реке Радике. Дужина јужне границе истраживаног простора износи 92,3 km. Унутар истраживаног простора, између Шар планине и њених огранака смештене су четири котлине: Гора, Опоље, Средачка жупа и Сиринићка жупа.

Гора је планинска област смештена испод северозападних падина Шаре, дубоко усечена долинама Рестеличке и Бродске реке.



Слика 2. Физичко-географска карта Шар планине

Опоље је котлина засута флувио-гласијалним седиментима, богата рекама и потоцима који учествују у формирању Плавске реке (Лазаревић, 1994). Средска је жупа која обухвата горњи и средњи ток Призренске Бистрице. Заједно са Гором и Опољем, водотокови Средачке жупе припадају Јадранском речном сливу. Сирињска жупа захвата североисточни део истраживаног простора, смештена је у долини реке Лепенац. За разлику од Горе, Опоља и Средске које су геоморфолошки и хидролошки повезане са Метохијском котлином, Сирињска жупа је преко Бродске клисуре повезана са Косовском котлином, тако да се климатолошки битно разликује од осталих жупа.



Слика 3. Административна карта Шар планине

Административно-управно посматрано, предвиђена граница Шар планине покрива целу територију општине Гора, источни део општине Призрен (Опоље и Средска), јужни део општине Сува Река, комплетну територију општине Штрпце, југозападни део општине Урошевац и западни део општине Качаник.

Табела 1. Екстремне тачке математичко-географског положаја Шар планине

Екстремне тачке	Географска ширина	Географска дужина	Општина
Најзападнија	42°04'57"	20°33'16"	Гора
Најсевернија	42°19'39"	21°03'07"	Урошевац
Најисточнија	42°13'18"	21°11'32"	Качаник
Најјужнија	41°51'08"	20°37'20"	Гора

Друга страна Шар планине (јужне падине) припадају Републици Северној Македонији, где је овај простор заштићен као национални парк на површини од 627 km². Према степену и површини заштите, може се констатовати да укупна површина Шар планине и њених огранака износи око 1600 km².

2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

Шар планина била је предмет истраживања српских и иностраних научника вековима уназад. Прва научна истраживања Шаре током XIX века врши Ами Буге, аустроугарски путописац и географ. На свом путовању кроз жупе у подножју Шаре, он указује на геолошки састав, пространство гребена и висину појединих врхова (Динић, 1990). Ова истраживања представљала су основу, коју је касније допунио и кориговао најпознатији српски географ – Јован Цвијић. Прву детаљну геоморфолошку и литолошку анализу Шар планине објашњава Цвијић током 1890. године. Он утврђује висину Љуботена (тада измерених 2510 m) и објашњава да дуж гребена Шаре постоје врхови који су виши од Љуботена и да се погрешно сматрало да је он највиши врх Балканског полуострва са 3050 m. Наводи да у саставу шарске групе планина литолошки преовладавају шкриљци и филити. Исте године, Цвијић истражује цркве и глацијална језера, на основу којих долази до закључка да је Шар планина била захваћена глацијацијом (Цвијић, 1924).

Током 1900. године у Сиринићкој жупи у долини речних токова препознаје моренски материјал наталожен изнад Лепенца. На основу истраживања које је вршио у овом, североисточном делу Шаре, Цвијић констатује да је глацијација засигурно постојала на северној и североисточној страни Шар планине (Цвијић, 1903). Интензивна истраживања природних одлика Шар планине започињу у другој половини XX века. Ђукић Д. (1978) препознаје туристички потенцијал овог постора из којег произилази докторска дисертација под називом „*Туристичка валоризација природних, етнографских и других културних потенцијала Шар планине*”.

Десет година касније, Менковић Љ. (1988) након детаљне геоморфолошке анализе читаве територије Шаре, објављује докторску дисертацију „*Рељеф Шар планине – геоморфолошка студија*”. Поред дисертација, у овом периоду објављивани су радови различитих аутора везани за природне карактеристике одређених делова Шаре. Значај природних, као и антропогеографских вредности истраживаног простора препознао је Географски институт „Јован Цвијић” САНУ. Тим сачињен од 46 научних радника са бројних института и факултета је током 1989/90. године на територији општине Штрпце темељно истраживао природне услове, друштвени и демографски развој, као и антропогеографско-етнолошке карактеристике Сиринићке жупе.

Као крајњи продукт истраживања објављене су четири публикације означене као „Посебна издања” Географског института, књига 37 (I-IV) (Динић, 1990). Са аспекта угрожености терена снежним лавинама, прва истраживања помињу се 1957. године у раду Д. Кривокапића под називом „Усови на Шар планини”. Аутор пописује места обрушавања и сручивања лавина у северозападном и јужном делу Шаре. Наводи да лавине годинама уназад оштећују вегетацију у овим пределима и смањују фонд дивокоза.



Слика 4. Снежне лавине на Шар планини

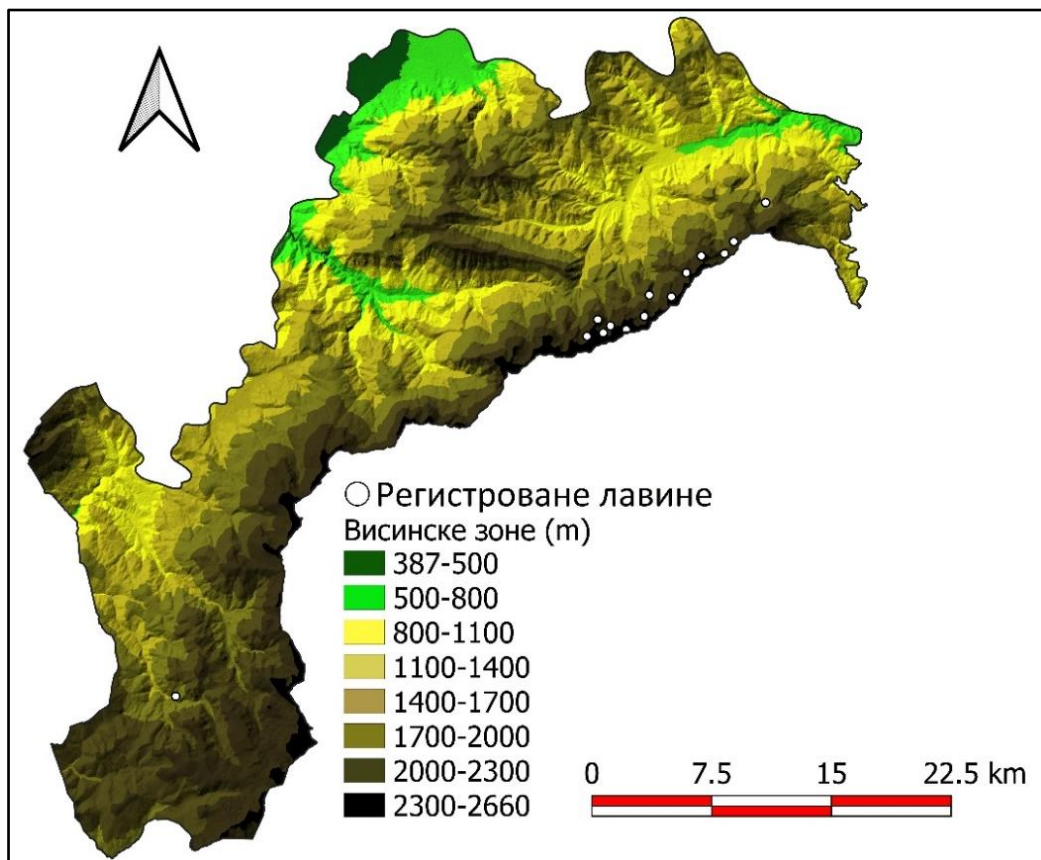
Извор: Durlević и др., 2024

Током 1989/90. године Белиј С. са сарадницима врши детаљна истраживања терена на територији општине Штрпце, наводи предуслове за појаву снежних лавина и картира постојеће (Динић, 1990). Током зимске сезоне 1990. године врше се теренска истраживања на потезу Пирибрег-Љуботен и Пирибрег-Бистра, где се уочавају и картирају 227 лавина насталих углавном природним путем. Полазећи од истока, у изворишном краку Ропота у подножју Љуботена регистровано је 11 лавина, од којих је једна имала дужину пада 1500 m уз висинску разлику од 800 m. У горњем току Калуђерске реке идентификоване су 32 лавинске појаве од којих су најдуже лавине оне које се спуштају са врха Куле (2324 m). У сливу Болованске реке уочео је 18 лавина са посебним освртом на лавински ток који се формира на западним падинама врха Тумба (2346 m), а акумулира се у долини десног изворишног крака Болованске реке.

У сливу Муржице регистровано је 50 лавина: на левој притоци - Дурловом потоку забележене су 24 лавине, исто колико и на простору између Пирибрега и врха Меанче, у изворишном делу Беревачког потока. Две лавине су уцртане директно на Муржици.

У долини Беревачког потока испод Црвене карпе, пролазећи преко скијашке стазе до доње станице ски лифта „Бачило“, лавина је 7. фебруара 1961. затрпала 20 скијаша од којих је троје страдало. Дана 22. фебруара 1981. године на путу Брезовица - хотел „Молика“, лавина је усмртила шест скијаша (Динић, 1990). У фебруару 2024. године позната америчка скијашица Кетрин Ригби настрадала је скијајући ван стазе, када се изнад ње активирала лавина на локацији познатијој као „Орлово гнездо“.

У условима изузетно велике рашчлањености терена у изворишним деловима Блатештице, евидентирано је 37 лавина. У горњем току Суве реке непосредно испод Јажиначког језера регистровано је 25 лавина. У овом цирку, највеће лавине настају на Девденици и акумулирају се на дно долине Суве реке. Извориште десне притоке Суве реке (цирк Гини Воде) такође је подложно лавинама. На ободним странама овог цирку забележено их је 15. У изворишном делу леве притоке Суве реке (цирк Јаловарник) констатовано је постојање 33 лавине, од којих су најопасније оне које се крећу низ западну падину Девденице до дна цирку. Овим истраживањем мапиране су лавине на територији општине Штрпце, на потезу од Бистре на западу до Љуботена на истоку (Динић, 1990). Током 2020. године У. Дурлевић у мастер раду „Анализа угрожености територије општине Штрпце природним непогодама“ поред Шар планине, издваја и њене огранке – Ошљак и Острвицу као планине које имају лавински потенцијал (Дурлевић, 2020).



Слика 5. Забележене лавине на Шар планини до 2012. године

У периоду од 1994-1997. године Географски институт објављује Посебно издање публикација под називом „Шарпланинске жупе: Гора, Опоље и Средска“, књига 41 (I-III), чиме се интегришу истраживања за читав простор српске стране Шар планине (Лазаревић, 1994). У овом издању не постоје истраживања о снежним лавинама, иако је простор Горе због вегетацијских услова подложен настанку лавина.

О овоме сведочи и несрећа која се догодила 11. фебруара 2012. године у Рестелици, када је лавина усмртила 10 особа и оштетила више од 10 кућа. Посебну пажњу треба обратити на планине и врхове непосредно изнад насељених места на Шар планини, нарочито у Гори и Средачкој жупи.



Слика 6. Последице снежне лавине у Рестелици 2012. године

Извор: Politika, 2012; Flickr, 2012

Чињеница је да лавине нису истраживане од Бистре на истоку до Радике на југу, углавном због одсуства насеља и инфраструктуре у близини гребена.

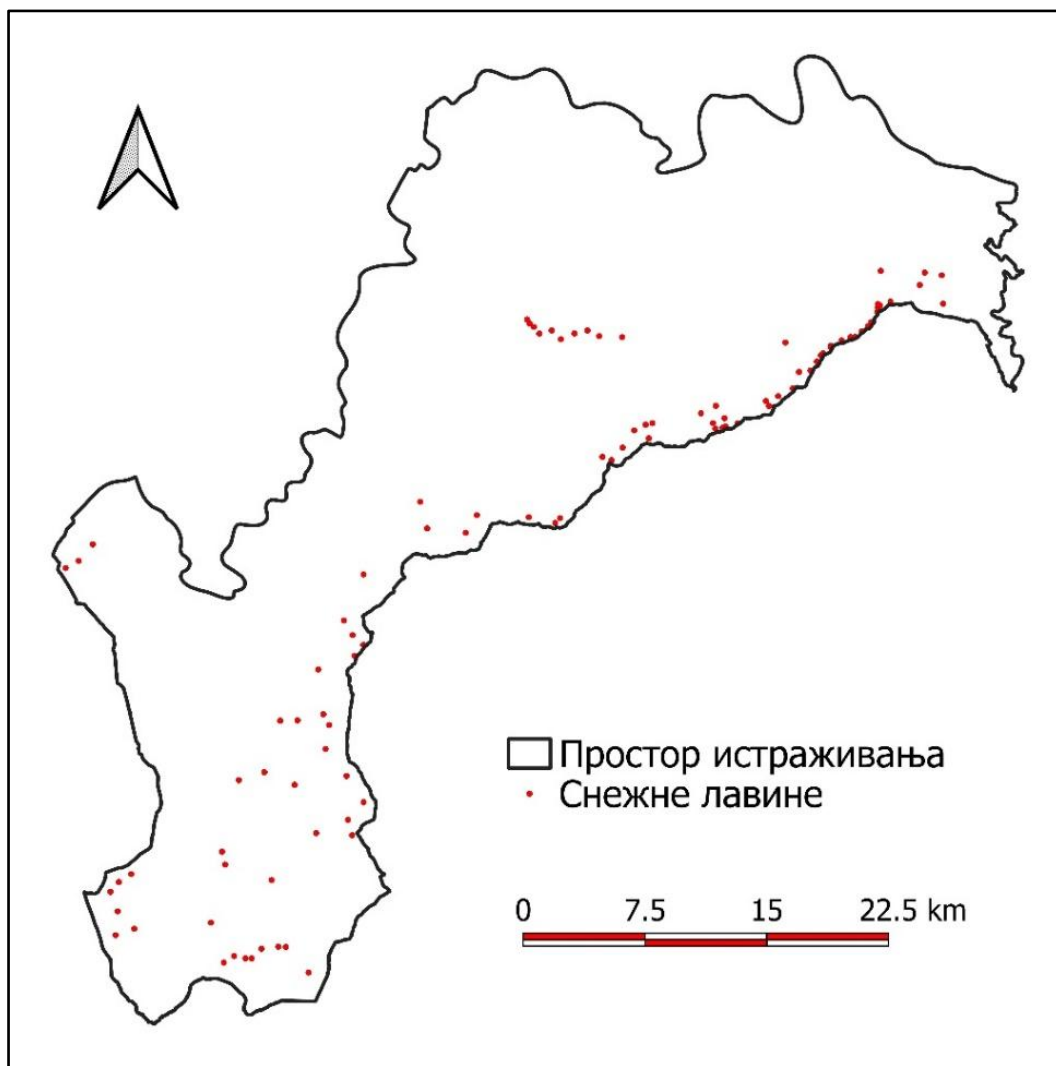
3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

3.1. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ТЕРЕНСКА ИСТРАЖИВАЊА

За адекватно геопросторно моделовање снежних лавина и других природних хазарда, поред кабинетског рада, од великог значаја су теренска истраживања и мапирања локација на којима су се дешавале природне непогоде. У овом случају, на Шар планини су упоредо са кабинетским радом, вршена теренска истраживања током летњих и зимских месеци у периоду од 2022. до 2025. године. Током лета, мапиране су падине на којима је висока подложност за настанак лавина, док су током зиме рађени тестови унутар снежног покривача. На основу постојеће литературе и праксе у свету, обрађени су: проширени тест колоне, ручни тест смицања и идентификација структуре снежног зрна.

3.1.1. Мапирање снежних лавина

Велики број планинских региона у земљама у развоју на којима постоји угроженост лавинама, не поседују инвентар снежних лавина. Мапирање локација на којима су се формирале, кретале и акумулирале снежне лавине је веома сложено због различитих величина лавина током вишегодишњег осматрања угрожених падина. Инвентар лавина представља почетни корак и врло важан сегмент у моделовању лавина који омогућава примену иновативних метода, попут вештачке интелигенције (машинског учења).



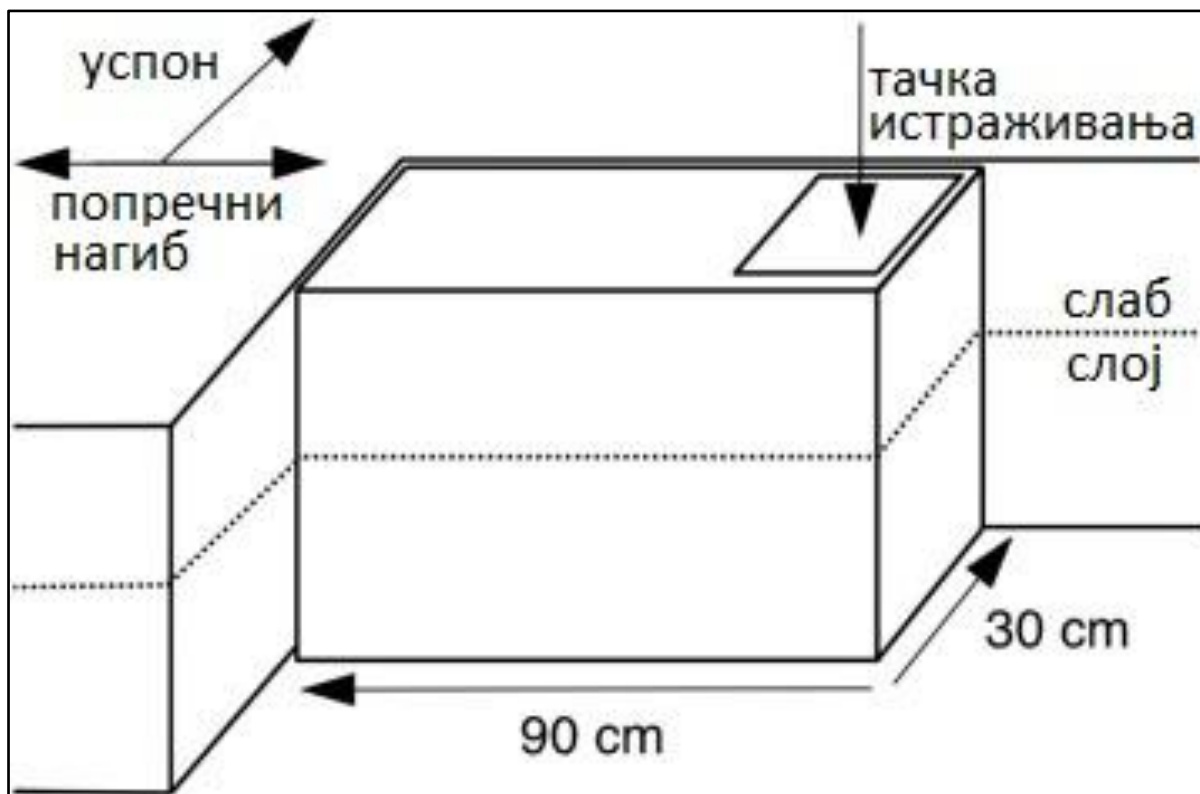
Слика 7. Инвентар снежних лавина на Шар планини

Такође, бројне методе валидације финалних резултата базирају се на историјским подацима и инвентару. На Шар планини су током зимских месеци вршена теренска истраживања у околини ски-центра Брезовица, где су, помоћу ГИС софтвера QField Ecosystem Documentation мапиране лавине различите типологије.

Током летњих месеци, такође су вршена теренска истраживања и мапирања локација које су, по историјским подацима, биле захваћене великим лавинама (Рестелица). Сви подаци са терена су касније увезени у софтвер QGIS и послужили су као полазна основа за моделовање угрожености приликом примене машинског учења. На основу мапираних лавина на терену, картирања лавина на бази историјских података и визуелне процене предиспонираних терена за покретање лавина, укупно је забележено 100 локација на којима су се јављале лавине или би се потенцијално могле формирати. Такође, инвентар лавина коришћен је за валидацију финалних резултата методом ROC-AUC.

3.1.2. Проширени тест колоне

Проширени тест колоне (Extended column test – ECT) се више од 15 година примењује за одређивање нестабилности снежног покривача. На чистој падини (без високе вегетације) под нагибом се потпуно изољује снежни стуб димензија 90x30 cm. Лопатом за лавине врше се тестирања са 30 удараца: 10 из ручног зглоба, 10 из лакта и 10 из рамена (Simenhois и Birkeland, 2006; Simenhois и Birkeland, 2009).



Слика 8. Проширени тест колоне
Извор: Simenhois and Birkeland, 2006

Бележи се и анализира број удараца који су потребни да се започне прелом (ознака I), број удараца који је потребан да прелом пређе цео стуб (ознака P) и дубина прелома са површине (ознака D) у формату: ECT I/P@↓D. На пример, ако прелом почиње на 25 cm од површине на 13. ударцу и прелази цео стуб на 14. ударцу, то се бележи као: ECT 13/14@↓25. Преломи који су започели, али се никада нису проширили преко границе лопате, евидентирају се као NP (без ширења). Преломи који су се ширили, али никада нису прешли целу колону, бележе се као PP (делимично ширење) (Herwijnen и Birkeland, 2014; Techel и др., 2020).

3.1.3. Ручни тест смицања

Како би се одредио степен клизања снега, односно плоче, на терену је ручни тест смицања незаобилазан метод. Ручни тест смицања је једноставан тест у коме се стуб, попречног пресека око 30 cm/30 cm, ручно изолује на 40 cm дубине. Паралелна сила нагиба се ручно примењује за стварање паралелних прелома нагиба („маказе”) у познатим или непознатим слабим слојевима.



Слика 9. Ручни тест смицања

Извор: American Avalanche Association, 2016

Сила која изазива прелом субјективно се оцењује као лака, умерена или тешка (Q1, Q2, Q3).

Табела 2. Опис и класификација ручног теста смицања

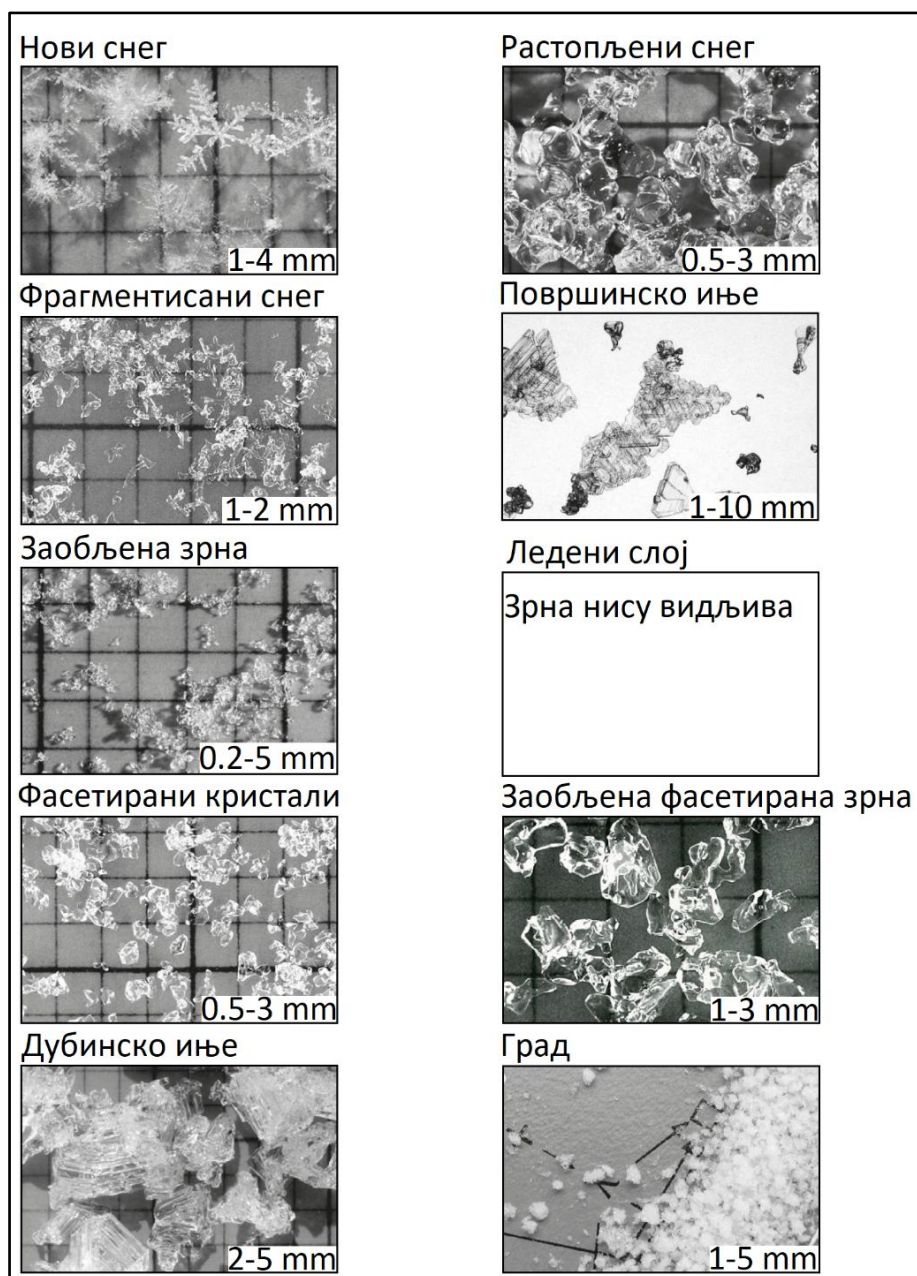
Q1 – Необично чиста, равна, глатка и брза површина. Слаб слој се може срушити током теста. Плоча обично лако клизи у снежну јаму након лома слабог слоја.
Q2 – „Просечно” смицање; површина смицања изгледа углавном глатка, али плоча не клизи тако лако као Q1. Површина смицања може имати неке мале неправилности, али не тако неправилне као Q3. Лом на смицање се јавља у целом интерфејсу плоче/слабом слоју који се испитује. Цела плоча обично не клизи у јаму за снег.
Q3 – Површина смицања је неравна, неправилна и храпава. Лом на смицање се обично не дешава кроз цео интерфејс плоче/слаб слој који се испитује. Након лома слабог слоја плоча се мало помера, или се уопште не може померати.

Извор: Johnson и Birkeland, 2002

За ову студију развијен и је карактер прелома, односно да ли су преломи били равни или не (Johnson и Birkeland, 2002).

3.1.4. Структура снежног зрна

Микроскопом је испитивана структура снежних слојева са циљем препознавања слабог слоја и евидентирања на основу већ постојеће класификације. Идентификација се може извршити и великом лупом, али се због великог броја снежних зрна препоручује микроскоп ради прецизнијег одређивања снежног зрна.



Слика 10. Типови снежних зрна

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023

Посебну пажњу је потребно обратити на перзистентне слабе слојеве: фасетирани снег, површинско и дубинско иње.

3.2. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА КАБИНЕТСКИ РАД

3.2.1. Геопросторна база података

Предвиђена граница националног парка преузета је са сајта Завода за заштиту природе Србије, док је државна граница преузета са геопортала „Geosrbija”. За потребе добијања геолошке карте Шар планине, дигитализовани су садржаји са геолошких листова: Качаник, Урошевац, Призрен и Гостивар (Osnovna geološka karta, 1981).

Подаци везани за сеизмички хазард преузети су са портала Републичког сеизмолошког завода (2024). Векторски садржаји о макросеизмичком интензитету и гравитационом убрзању увезени су и анализирани у ГИС софтверу.

Картографски приказ геоморфолошких карактеристика Шар планине базиран је на подацима просторне резолуције од 12,5 m. Дигитални модел висина преузет је са америчког геопортала Alaska Satellite Facility и коришћен је за анализу надморске висине, нагиба терена, експозиције, закривљености (профилне и планарне) и вертикалне рашчлањености рељефа (Alaska Satellite Facility, 2024).

Информације о педолошком покривачу добијене су анализом студија везаних за природне одлике Шарпланинских жупа: Сиринић, Средска, Опоље и Гора (Динић, 1990, Лазаревић, 1994).

Подаци о климатолошким карактеристикама Шаре добијени су из различитих извора. Основу за развој базе података о клими пружиле су метеоролошке станице: Брезовица, Призрен и Драгаш. Обрадом података са поменутих станица добијене су вредности за сунчево зрачење, температуру ваздуха и облачност. За анализу количине падавина и снежног покривача коришћени су подаци са кишомерних станица у Штрпцу, Јажинцу, Речану, Заплужју и Рестелици. Део података је доступан у метеоролошким годишњацима Републичког хидрометеоролошког завода Србије, док је други део података преузет из постојећих студија о простору истраживања (Динић, 1990, Лазаревић, 1994).

Средња годишња температура ваздуха добијена је линераном регресијом постојећих података, на основу формуле:

$$-0,0053 \cdot H + 13,929, \text{ при чему је}$$

H – надморска висина добијена из дигиталног модела висина.

Такође, линеарном регресијом постојећих вредности добијена је просечна зимска температура ваздуха, на основу прорачуна:

$$-0,0034 \cdot H + 3,1576, \text{ при чему је}$$

H – надморска висина генерисана из дигиталног модела висина.

Истом методом израчуната је укупна годишња количина падавина:

$$0,2833 \cdot H + 690,35, \text{ где је}$$

H – надморска висина добијена из дигиталног модела висина.

За потребе процене зимске количине падавина, линеарном регресијом обрађени су подаци на основу формуле:

$$0,0858 \cdot H + 169,29, \text{ где је}$$

H – надморска висина добијена из дигиталног модела висина.

Када је ветар у питању, приветринске и заветринске стране на Шар планини одређене су обрадом дигиталног модела висина у ГИС софтверу.

Хидролошки услови су приказани у виду река и језера на Шар планини. Хидролошка карта добијена је дигитализацијом садржаја са платформе Open Street Map (2024).

Информације о флори и фауни Шаре добијене су анализом доступне литературе везане за шарпланинске жупе, као и података са сајта Завода за заштиту природе Србије. Подаци за анализу намене земљишта преузети су са ESRI платформе – Sentinel-2 Land Cover Explorer за 2022. годину (Environmental Systems Research Institute, 2024).

3.2.2. Вишекритеријумска анализа

3.2.2.1. Аналитичко-хијерархијски процес

Аналитичко-хијерархијски процес (АНР) представља једну од најпримењенијих метода вишекритеријумске анализе за потребе моделовања природних хазарда (Varol, 2022). Метод је развио Томас Сати (Saaty, 1980). Циљ модела је квантификација критеријума, односно формирање хијерархије критеријума по приоритету (Ghosh, 2021). За приступ АНР методи и додељивање тежинских коефицијената неопходно је познавање истраживаног простора, разумевање процеса и физичких закона како би хијерархија критеријума по приоритету била релевантнија (Durlević и др., 2022).

Основна карактеристика АНР методе је утицај субјективног става у одређивању тежине критеријума (Liang и Yang, 2022). Субјективни став у погледу приписивања значаја различитим критеријумима заснива се на резултатима претходних истраживања из исте области. У том случају, субјективност истраживача у погледу хијерархије природних услова по важности може донети објективнији приказ резултата. АНР метод сматра се једним од најбољих метода експертске анализе сценарија и доношења одлука доследним вредновањем хијерархије циљева, критеријума, подкритеријума и алтернатива. У процесу истраживања лавина, сви критеријуми нису подједнако важни. Основни разлог за примену АНР методе је додавање различитог коефицијента сваком параметру, чиме би најзначајнији параметар био на првом месту, док би мање важни фактори имали нижи коефицијент.

За потребе оцењивања парних поређења користи се нумеричка скала од 9 степени, према вредностима од 1 (једнака важност) до 9 (изузетна важност). АНР скала започиње од вредности 1 која означава једнаку важност. Вредност 3 приказује средњи значај, вредност 5 указује на јаку важност. Вредност 7 означава веома јаку важност, док вредност 9 приказује изузетну важност. Вредности 2, 4, 6, 8 представљају средње вредности (Saaty, 1980).

У овој студији коришћене су нумеричке вредности од 1 до максимално 9. Критеријум са вредношћу 1 означен је као најзначајнији у својој матрици, док је критеријум са највећом вредношћу (9) најмање значајан. За потребе истраживања и обраде података коришћен је софтвер отвореног приступа QGIS 3.8.

Табела 3. Матрица за АНР метод

	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
СП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
НТ	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8
НЗ	0,33	0,5	1	2	3	4	5	6	7
ЗКП	0,25	0,33	0,5	1	2	3	4	5	6
ЗТВ	0,2	0,25	0,33	0,5	1	2	3	4	5
ПЗ	0,17	0,2	0,25	0,33	0,5	1	2	3	4
Е	0,14	0,17	0,2	0,25	0,33	0,5	1	2	3
ПРЗ	0,13	0,14	0,17	0,2	0,25	0,33	0,5	1	2
НВ	0,11	0,13	0,14	0,17	0,2	0,25	0,33	0,5	1

Легенда: СП – снежни покривач, НТ – нагиб терена, НЗ – намена земљишта, ЗКП – зимска количина падавина, ЗТВ – зимска температура ваздуха, ПЗ – планарна закривљеност, Е – експозиција, ПРЗ – профилна закривљеност, НВ – надморска висина.

Највећи значај додељен је снежном покривачу (у овом случају NDSI индекс), док је фактор који има најмањи значај надморска висина.

Провера конзистентности између критеријума који произилазе из матрице поређења у пару вршена је проценом коефицијента конзистентности (CR) и индекса конзистентности (CI). Индекс конзистентности (Consistency index – CI) добија се на основу формуле (Saaty, 1980):

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

где је: $\lambda_{\max}$ – максимална својствена вредност матрице; n – број критеријума. Однос конзистентности (Consistency ratio – CR) добија се по формули (Saaty, 1980):

$$CR = \frac{CI}{RI},$$

где је: CI - индекс конзистентности; RI - насумични индекс конзистентности. У овом случају индекс конзистентности износи 0,003, што је прихватљива граница.

Вредност насумичног индекса конзистентности (RI) зависи од броја критеријума који се обрађују.

Табела 4. Вредности насумичног индекса

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,41	1,45	1,49

Извор: Saaty, 1980

У овој студији, вредност насумичног индекса износи 1,49, пошто је број анализираних критеријума у матрици девет.

Табела 5. Тежински коефицијенти добијени АНР методом

Критеријум	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
Тежински коефицијент	0,312	0,222	0,155	0,108	0,074	0,051	0,035	0,025	0,018

Највећи значај, односно приоритет додељен је снежном покривачу (0,312). Други по значају је морфометријски услов, нагиб терена (0,222). Трећи фактор по приоритету јесте намена земљишта (0,155). Након тога следе: зимска количина падавина (0,108), зимска температура ваздуха (0,074), планарна закривљеност (0,051), експозиција (0,035), профилна закривљеност (0,025), док је најмањи значај додељен надморској висини (0,018).

Сви анализирани критеријуми се касније појединачно увозе у ГИС и рекласификују се параметри сваког критеријума, најчешће у опсегу од 1 (врло ниска угроженост) до 5 (врло висока угроженост).

Табела 6. Рекласификација вредности за анализирани критеријуме

Критеријум	Коефицијент	Параметар	Угроженост	Оцена
Снежни покривач (NDSI)	0,312	0 – 0,4	Врло ниска	1
		0,4 – 0,6	Ниска	2
		0,6 – 1	Врло висока	5
Нагиб терена (°)	0,222	0 – 20	Ниска	1
		20 – 60	Врло висока	5
		> 60	Ниска	2

Критеријум	Коефицијент	Параметар	Угроженост	Оцена
Намена земљишта	0,155	Шуме, водене површине	Врло ниска	1
		Насеља	Средња	3
		Ливаде, пашњаци,	Врло висока	5
		пољопривредне површине, оголићено земљиште		
Зимска количина падавина (mm)	0,108	205 – 242	Врло ниска	1
		242 – 279	Ниска	2
		279 – 316	Средња	3
		316 – 353	Висока	4
		353 – 394	Врло висока	5
Зимска температура ваздуха (°C)	0,074	-5,75 – -4,22	Врло висока	5
		-4,22 – -2,72	Висока	4
		-2,72 – -1,22	Средња	3
		-1,22 – 0,28	Ниска	3
		0,28 – 1,73	Врло ниска	2
Планарна закривљеност	0,051	-0,32 – -0,02 (конкавна)	Врло висока	5
		-0,02 – 0,02 (равна)	Средња	3
		0,02 – 0,32 (конвексна)	Висока	4
Експозиција	0,035	Неекспонирано	Врло ниска	1
		С, СИ, СЗ	Врло висока	5
		И	Висока	4
		ЈИ, Ј, ЈЗ	Ниска	2
Профилна закривљеност	0,025	З	Средња	3
		-0,32 – -0,003 (конвексна)	Средња	3
		-0,003 – 0,003 (равна)	Висока	4
Надморска висина (m)	0,018	0,02 – 0,32 (конкавна)	Врло висока	5
		387 – 842	Врло ниска	1
		842 – 1297	Ниска	2
		1297 – 1752	Средња	3
		1752 – 2207	Висока	4
		2207 – 2660	Врло висока	5

3.2.2.2. Best-Worst метод

Best-Worst метод (BWM) је релативно нова метода, коју је 2015. године развио и објавио Џафар Резаеи (Rezaei, 2015). У односу на друге моделе вишекритеријумске анализе, Резаеи елаборира три кључне предности BWM:

- BWM омогућава поузданија и конзистентнија поређења у паровима јер стручњак има јасно разумевање опсега евалуације од самог почетка бирајући најбоље и најгоре критеријуме;
- BWM смањује могућу пристрасност користећи два поређења у пару на основу најбољег и најгорег критеријума;
- BWM користи податке и временски ефикасна парна поређења са могућношћу провере конзистентности парних поређења.

У дисертацији је коришћен линеарни BWM модел за одређивање геопросторне дистрибуције снежних лавина. Кораци методологије су следећи (Rezaei, 2015; Rezaei, 2016):

- Корак 1: На почетку се врши идентификација критеријума за одлучивање проблема доношења одлука $\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$.

- Корак 2: Идентификује се најбољи критеријум (најважнији) и најгори критеријум (најмање важан) међу критеријумима одлуке.

- Корак 3: Упореди се најбољи критеријум са свим осталим критеријумима користећи скалу од 9 степени (број 1 представља једнаку важност, док број 9 значи да је најбољи критеријум оцењен као „изузетно важнији“ од других критеријума). Резултат је матрица и прорачун најбољег критеријума у односу на остале:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}),$$

где: a_{Bj} означава у којој мери је најбољи критеријум B пожељнији од критеријума j . Закључак је да је $a_{BB} = 1$.

- Корак 4. Експерти додељују вредности између 1 и 9 како би се упоредили сви други критеријуми са најгорим критеријумом. У овом случају се матрица и прорачун раде од најгорег критеријума у односу на остале:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T,$$

где је предност критеријума j над најгорим критеријумом изражена као a_{jW} , док је $a_{WW} = 1$.

- Корак 5. Приступа се прорачуну оптималних тежина различитих критеријума. Минимизирањем максималне вредности скупа $\{|w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_W|\}$ за све j , проблем се може приказати на следећи начин (Rezaei, 2016):

$$\min_w \max_j \{|w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_W|\}$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \text{ за све } j.$$

Овај проблем се може написати као модел линеарног програмирања:

$\min \xi$, тако да је

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi, \text{ за све } j$$

$$|w_j - a_{jW}w_W| \leq \xi, \text{ за све } j$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \text{ за све } j.$$

Коефицијент конзистентности (CR) и повезани праг се израчунавају коришћењем следећих формула (Liang и др., 2020):

$$CR = \max CR_j, \text{ где је}$$

$$CR_j = \begin{cases} \frac{|a_{Bj} \times a_{jW} - a_{BW}|}{a_{BW} \times a_{BW} - a_{BW}}, & a_{BW} > 1, \\ 0, & a_{BW} = 1. \end{cases}$$

У досадашњој литератури, BWM је коришћен у неколико студија из различитих области: пословни модели и одрживост, избор технологије, као и моделовање природних хазарда (Salimi и Rezaei, 2018; Konurhan и др., 2023; Deđanski и др., 2024). У матрици је као најважнији (најбољи) критеријум издвојен снежни покривач, док је надморска висина означена као најмање важан (најгори) фактор.

Табела 7. Матрица са вредностима за BWM метод

Најбољи ка најгорим	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
СП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Најгори ка најбољим	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
НВ	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Након обраде нумеричких вредности у матрици, добијени су тежински коефицијенти. Највећи коефицијент додељен је снежном покривачу (0,315), док надморска висина има најмањи значај (0,027). Други по приоритету је нагиб терена (0,192). Трећи фактор по значају је намена земљишта (0,128). Након тога следе: зимска количина падавина (0,096), зимска температура ваздуха (0,077), планарна закривљеност (0,064), експозиција (0,055) и профилна закривљеност (0,027),

Табела 8. Тежински коефицијенти добијени BWM методом

Критеријум	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
Тежински коефицијент	0,315	0,192	0,128	0,096	0,077	0,064	0,055	0,048	0,027

Рекласификација параметара свих критеријума је идентична као код АНР методе. Са оценама од 1 (врло ниска угроженост) до 5 (врло висока угроженост) додељене су класе сваком интервалу унутар анализираних фактора.

3.2.3. Фази аналитичко-хијерархијски процес

Теорија расплнутих скупова (Fuzzy set theory) има значајну улогу у решавању практичних проблема животне средине. Фази логику предложио је 1965. године Лофти Задех (Zadeh, 1965). Метод нуди једноставан начин да се извуку прецизни закључци из неизвесности, нејасноћа и нетачности. На пример, када се доноси одлука да се просторни објекат категорише на мапи као члан, за просторно планирање се укључује фази логика. У класичној теорији скупова, ентитет је или део скупа или није. Пошто се објекат карактеристика може користити са вредностима припадности између 0 и 1, по теорији расплнутих скупова, ово представља степен функције припадности (Eskandari, 2017).

Интегрисани фази аналитичко-хијерархијски процес (FАНР) је развијен синтезом фази логике са аналитичко-хијерархијским процесом (Zadeh, 1965; Saaty, 1980). FАНР је веома применљива метода за моделовање природних хазарда где су доступне информације о природним и антропогеним условима (Eskandari, 2017; Nikolić и др., 2023). Функција чланства је одређена мишљењем експерата из одговарајућих области и укључена је у модел (Varol, 2022). У FАНР се за све анализиране варијабле постављају упоредиви троуглови расплнутих вредности, чиме се формулише матрица поређења. Овај приступ се заснива на парном поређењу троугластих расплнутих елемената. Таква матрица ($\tilde{A}$) има следећи облик (Chuviesco и Congalton, 1989):

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (a_{11}^L, a_{11}^M, a_{11}^U) & \dots & (a_{1n}^L, a_{1n}^M, a_{1n}^U) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n1}^L, a_{n1}^M, a_{n1}^U) & \dots & (a_{nn}^L, a_{nn}^M, a_{nn}^U) \end{bmatrix},$$

где је за све $i, j = 1$.

$a_{ij}^L, a_{ij}^M, a_{ij}^U$ представљају реалне бројеве, такве да је $1/\sigma \leq a_{ij}^L \leq a_{ij}^M \leq a_{ij}^U \leq \sigma$ за изабрани фиксни $\sigma > 1$.

$$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}^L, a_{ij}^M, a_{ij}^U) \text{ имплицира да је } \tilde{a}_{ji} = \left(\frac{1}{a_{ij}^U}, \frac{1}{a_{ij}^M}, \frac{1}{a_{ij}^L}\right).$$

Поред увођења расплнутих троугластих елемената, још једна разлика у поређењу са класичним АНР -ом је у томе што преференцијални интензитети које даје стручњак нису ограничени на интервал $\left[\frac{1}{9}, 9\right]$, већ се могу узети у општем облику $\left[\frac{1}{\sigma}, \sigma\right]$ за изабрану вредност $\sigma > 1$.

Фазне тежине се изводе према следећој процедури (Nikolić и др., 2023):

$$w_k^L = C_{\min} \cdot \frac{(\prod_{j=1}^n a_{kj}^L)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij}^M)^{1/n}}, \text{ где је } C_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij}^M)^{1/n}}{(\prod_{j=1}^n a_{ij}^L)^{1/n}} \right\}$$

$$w_k^M = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{kj}^M)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij}^M)^{1/n}},$$

$$w_k^U = C_{\max} \cdot \frac{\prod_{j=1}^n a_{kj}^U}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij}^M)^{\frac{1}{n}}}, \text{ где је } C_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij}^M)^{\frac{1}{n}}}{(\prod_{j=1}^n a_{ij}^U)^{\frac{1}{n}}} \right\}.$$

За процену конзистентности матрице коришћен је следећи прорачун (Ramík и Korviny, 2010):

$$NI_n^\sigma(\tilde{A}) = \gamma_n^\sigma \cdot \max_{i,j} \left\{ \max \left\{ \left| \frac{w_i^L}{w_j^U} - a_{ij}^L \right|, \left| \frac{w_i^M}{w_j^M} - a_{ij}^M \right|, \left| \frac{w_i^U}{w_j^L} - a_{ij}^U \right| \right\} \right\}, \text{ где је}$$

$$\gamma_n^\sigma = \begin{cases} \frac{1}{\max \left\{ \sigma - \sigma^{(2-2n/n)}, \sigma^2 \left(\left(\frac{2}{n} \right)^{2/(n-2)} - \left(\frac{2}{n} \right)^{n/(n-2)} \right) \right\}} & \text{if } \sigma < \left(\frac{n}{2} \right)^{n/(n-2)} \\ \frac{1}{\max \{ \sigma - \sigma^{(2-2n/n)}, \sigma^{(2n-2/n)} - \sigma \}} & \end{cases}$$

Нумеричке вредности за индекс крећу се од 0 до 1, при чему вредност 0 означава да је матрица потпуно конзистентна.

Табела 9. Матрица са вредностима за ФАНР метод

СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ	
1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	1, 1,5, 2	1,5, 2, 2,5	1,5, 2, 2,5	1,5, 2, 2,5	СП
1, 1, 1,	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	1, 1,5, 2	1,5, 2, 2,5	1,5, 2, 2,5	НТ
0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	1, 1,5, 2	1,5, 2, 2,5	НЗ
0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	1, 1,5, 2	ЗКП
0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	ЗТВ
0,5, 0,667, 1	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	0,5, 1, 1,5	ПЗ
0,4, 0,5, 0,667	0,5, 0,667, 1	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	0,5, 1, 1,5	Е
0,4, 0,5, 0,667	0,4, 0,5, 0,667	0,5, 0,667, 1	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	ПРЗ
0,4, 0,5, 0,667	0,4, 0,5, 0,667	0,4, 0,5, 0,667	0,5, 0,667, 1	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	0,667, 1, 2	1, 1, 1	1, 1, 1	НВ

У овом случају индекс конзистентности је прихватљив и износи 0.012. Вредности у матрици и критеријуми су постављени тако да се не разликују пуно од модела вишекритеријумске анализе како би били погодни за упоредну анализу.

Табела 10. Тежински коефицијенти добијени ФАНР методом

Критеријум	СП	НТ	НЗ	ЗКП	ЗТВ	ПЗ	Е	ПРЗ	НВ
Тежински коефицијент	0,142	0,132	0,122	0,113	0,109	0,105	0,099	0,091	0,086

Услед укључивања фази логике у прорачун, вредност тежинских коефицијената код ФАНР је значајно изједначенија у односу на АНР метод. Снежни покривач је најзначајнији са коефицијентом од 0,142, за нагиб терена добијена је вредност од 0,132. Након тога следе: намена земљишта (0,122), зимска количина падавина (0,113), зимска температура ваздуха (0,109), планарна закривљеност (0,105), експозиција (0,099), профилна закривљеност (0,091) и најмање значајан коефицијент – надморска висина (0,086). Рекласификација интервала унутар критеријума је идентична као код АНР и BWM модела.

3.2.4. Нумеричко моделовање (пропагација)

Да би се одредила комплетна геопросторна дистрибуција снежних лавина (од стартне зоне до зоне депозиције), неопходно је применити моделе нумеричког моделовања, односно пропагације. У дисертацији је коришћен SAFI-Flow-R метод развијен 2024. године (Durlević и др., 2024). Метод представља комбинацију вишекритеријумске анализе (SAFI) и пропагације лавинског тока (Flow-R).

SAFI (Snow Avalanche Formation Index) индекс примењује се искључиво за идентификацију стартних зона снежних лавина. Из тог разлога, у анализи су коришћена три најзначајнија критеријума: снежни покривач, нагиб терена и намена земљишта.

Снежни покривач – у већини планинских региона широм света не постоје стална мерења или подаци о дубини снежног покривача. За процену присуства снежног покривача коришћен је индекс нормализоване разлике снега (Normalized Difference Snow Index - NDSI), изведен из сателитских снимака мисије Sentinel-2. Анализирани су подаци за пет узастопних година (јануар 2020–фебруар 2024), у оквиру којих је обрађено десет различитих сцена са просторном резолуцијом пиксела од 10 m (Copernicus Open Access Hub, 2024). Облачност на анализираним сателитским снимцима је мања од 1%. NDSI се израчунава по формули (Hall и др., 1995):

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR},$$

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

Вредности NDSI крећу се у распону од -1 до +1. Вредности веће од 0.4 указују на присуство снежног покривача (Hall и др., 1995; Stojković и др., 2023). Максимална вредност NDSI може бити 1, што указује на потпуну доминацију снега и значајну дубину снежног покривача. Током теренских истраживања Шар планине у фебруару 2024. године, на локацији која има вредност NDSI индекса 0,64, измерена је дебљина снега од 103 cm. Са друге стране, на подручју где је забележена дебљина снега од 30 cm, његова вредност NDSI пиксела била је 0,56. Ове вредности указују на значајне разлике на локалном нивоу по питању дистрибуције и дубине снега. Прагови вредности NDSI за територију Шар планине на којој су мапирани лавине су изнад 0,6. Анализом лавинских токова у Стеновитим планинама (Јута, САД), такође је уочено да су NDSI прагови за формирање лавина изнад 0.6 (Utah Geospatial Resource Center, 2024).

Нагиб терена је најважнији геоморфолошки услов за појаву снежних лавина (Bhat и др., 2024). У већини случајева, нагиб терена је највећи при формирању лавине и опада са процесом успоравања лавине и депозиције снега. Према подацима и стандардима Центра за лавине у Јути, снежне лавине се формирају на нагибима терена од 20–60° (Utah Avalanche Center, 2024). Подаци о нагибу терена добијени су путем дигиталног модела висина (DEM) са просторном резолуцијом од 12,5 m (Alaska Satellite Facility, 2024).

Намена земљишта је биогеографски фактор који утиче на путању лавинског материјала. Оголићене површине (камењари) и територије са ниском вегетацијом (ливаде, пашњаци) представљају идеалне локације за формирање лавине. Са друге стране, густе шуме спречавају формирање плочастих лавина и представљају значајну природну баријеру током кретања лавина (Sykes и др., 2024). Подаци о коришћењу земљишта преузети су из геопросторне базе података ESRI (Environmental Systems Research Institute, 2024) формиране обрадом сателитским снимцима Sentinel-2 са просторном резолуцијом од 10 m.

SAFI се рачуна на основу формуле:

$$SAFI = SC \cdot S \cdot LU,$$

при чему је: SC – снежни покривач, S – нагиб терена, LU – намена земљишта.

Након добијања SAFI индекса, територије означене вредношћу 1 представљају идеалне локације за формирање лавина. Методолошки посматрано, SAFI је производ теренских истраживања (мапирање лавина), ГИС анализе и даљинске детекције (Sentinel-2 подаци).

Други корак у овој методи јесте обрада добијених SAFI резултата кроз софтверски пакет Flow-R 2.0.

Софтвер Flow-R развијен је за обраду регионалних процена угрожености гравитационим хазардима заснован на ГИС-у (Horton и др., 2013). Софтвер препознаје изворне области нестабилности користећи доступне улазне факторе (SAFI) и дефинише растојање процеса на основу закона трења и принципа вероватноће пропагације (Nie и др., 2021).

Модел се састоји од две примарне компоненте: аутоматска идентификација подручја извора и процена ширења. На почетку узима у обзир условне факторе који утичу на формирање и напредовање процеса, у овом случају просторне податке добијене SAFI методом. Затим се израчунава вероватноћа опасности од струјања лавине коришћењем алгоритма правца тока и функција перзистентности:

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{i=1}^8 (\tan \beta_i)^x}, \begin{cases} \tan \beta > 0 \\ x \in [1; +\infty] \end{cases},$$

$$p_i^p = w_{\alpha(i)},$$

$$p_i = \frac{p_i^{fd} p_i^p}{\sum_{j=1}^8 p_j^{fd} p_j^p} p_0.$$

Пошто је маса извора непозната, енергетски биланс је уједињен, као што је наведено у формули (Holmgren, 1994):

$$E_{kin}^i = E_{kin}^0 + \Delta E_{pot}^i - E_f^i.$$

У контексту израчунавања пропорција опасности потребно је рашчланити компоненте формуле: i и j представљају различите правце струјања; p_i^{fd} је пропорција хазарда у правцу i ; $\tan \beta_i$ је градијент нагиба између централне ћелије и ћелије у правцу i , док је x променљиви експонент. Са повећањем x , дивергенција се смањује, што на крају резултира једним смером тока када се x приближи бесконачности; p_i је пропорција протока у правцу i према функцији постојаности; $\alpha(i)$ је угао између претходног правца и правца од централне ћелије до ћелије i ; p_i је вредност хазарда у правцу i , и p_0 је претходно одређена вредност опасности централне ћелије. E_{kin}^i је кинетичка енергија ћелије у правцу i , E_{kin}^0 је кинетичка енергија централне ћелије. ΔE_{pot}^i је промена потенцијалне енергије за ћелију у правцу i , E_f^i је енергија изгубљена услед трења у ћелији у правцу i . Ова једначина интегрише различите факторе као што су градијент нагиба, правац протока, функција перзистенције, кинетичка енергија, промена потенцијалне енергије и енергија изгубљена услед трења да би се одредиле пропорције угрожености снежним лавинама у различитим правцима из централне ћелије.

Модел трења који су описали Perla и др. (1980) је дизајниран за анализу снежних лавина. Овај модел се ослања на нелинеарни закон трења, који је изведен као решење једначине кретања која управља динамиком струјања. Закон обезбеђује брзину тока (V_i) на крају сегмента i (Perla и др., 1980):

$$V_i = (a_i \omega (1 - \exp b_i) + V_0^2 \exp b_i)^{\frac{1}{2}},$$

$$a_i = g(\sin \beta_i - \mu \cos \beta_i),$$

$$b_i = \frac{-2L_i}{\omega},$$

где је: μ параметар трења, ω представља однос масе и отпора, β_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 рачунски процеси обрађени су у софтверу Flow-R. За моделовање и пропагацију снежних лавина параметри се постављају на следећи начин: модел са параметром трења $\mu = 0,3$ и односом масе и отпора $m/d = 2500$; Холмгренов модификовани алгоритам правца са експонентом $\alpha = 4$ и модификацијом висине $dh = 0,5, 1, 3$ и 5 m. Коришћен је алгоритам постојаности са подразумеваним тежинама (Horton и др., 2013; Perla и др., 1980).

3.2.5. Машинско учење

3.2.5.1. Обрада података

Циљна променљива коју ће предвидети модели машинског учења је бинарна: да ли ће бити лавине на датој локацији ($y = 1$), или не ($y = 0$). Локације на којима је вредност $y = 1$ називају се позитивним, а оне са $y = 0$ негативним.

Варијабле које се користе као улазни подаци за modele називају се карактеристике или предиктори. Међу њима, неки су континуирани (NDSI, нагиб, планарна и профилна закривљеност, надморска висина, зимска температура ваздуха и зимска количина падавина), а други су категоријски (намена земљишта, експозиција).

Први корак у раду са континуираним карактеристикама је њихово стандардизовање, тако да имају средњу вредност од 0 и стандардну девијацију од 1. Ово осигурава да су карактеристике упоредиве, чиме се побољшава конвергенција и нумеричка стабилност током тренинга. У овом случају $\tilde{x}_n[i]$ означава сирову вредност n карактеристике у i примеру обуке. Стандардизација је описана следећом операцијом:

$$x_n[i] = \frac{(\tilde{x}_n[i] - \bar{x}_n)}{\hat{\sigma}_n}, \quad \bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{x}_n[i], \quad \hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_n[i] - \bar{x}_n)^2, \text{ при чему}$$

N представља број коришћених узорака за обуку (тренинг).

Већина алгоритама машинског учења не може директно руковати категоријалним карактеристикама, већ захтевају нумеричко кодирање. За ту сврху примењује се једнократно кодирање. Једна категоријска карактеристика са K могућих вредности $k \in \{1, \dots, K\}$ је представљена вектором $K - 1$ и „1” на k локацији. Кодира се кардинални и редни правац коришћењем синус-косинусног кодирања. Произвољни правац представљен је дводимензионалним вектором $[\cos \theta, \sin \theta]$ где је θ угао између кодираног правца и истока (нпр. за кодирање правца севера, угао θ је 90 степени, а векторска репрезентација је $[1, 0]$).

Пре обуке модела машинског учења, уклањају се карактеристике које су међусобно потпуно линеарно зависне. Такве карактеристике непотребно компликују модел без увођења нових информација и могу изазвати проблеме са стабилношћу поступка учења. Израчунавају се коефицијенти корелације између сваке од преосталих карактеристика и циљне варијабле. Поред тога, конструишу се процене условне густине језгра

$\hat{p}(x | y)$ за сваку од карактеристика x , условљене са $y = 0$ и $y = 1$. Две дистрибуције не би требало да имају значајно преклапање за карактеристике са високом информативношћу. Ови резултати се не користе у накнадном дизајну примењених модела, али дају дубљи увид у факторе који су повезани са угроженошћу снежним лавинама. У неким случајевима такође се користе алтернативне, специфичне евалуације значаја карактеристика.

Подаци су насумично подељени у скуп за обуку, односно тренинг (109 негативних и 80 позитивних примера) и тест скуп (27 негативних и 20 позитивних примера). Хиперпараметри за већину модела су подешени путем троструке унакрсне валидације на сету за обуку, док је тест скуп коришћен само за процену перформанси коначних, подешених модела.

Средња вредност и стандардна девијација коришћени за стандардизацију карактеристика израчунати су на основу података о обуци и примењени на трениране и тестиране податке.

3.2.5.2. Основни модели

Припрема података и обука модела машинског учења рађена је у програмском језику Python, користећи следеће библиотеке: `geopandas`, `pandas`, и `rasterio` за руковање геопросторним подацима; `matplotlib` и `seaborn` за цртање; `numpy` и `scipy` за обраду података; `scikit-learn`, `xgboost`, и `lightgbm` за машинско учење.

Коришћена су три модела како би се успоставиле основне перформансе: Logistic Regression (логистична регресија-LR), Support Vector Machine са линеарним језгром (L-SVM) и Support Vector Machine са Гаусовом радијалном базном функцијом језгра (G-SVM). LR примењује логистичку функцију на линеарну комбинацију карактеристика, производећи излазну вредност између 0 и 1 која се тумачи као вероватноћа да је циљна вредност позитивна:

$$\hat{p}(y = 1 | x) = [1 + \exp(-b - \sum_{n=1}^N w_n x_n)]^{-1}, \text{ при чему}$$

вредност x означава вектор вредности обележја $x_1, \dots, x_m$, $y \in \{0, 1\}$ означава циљну вредност; b представља пристрасност, док су тежине означене са $w_1, \dots, w_m$. Тежине и пристрасност се уче минимизирањем губитка унакрсне ентропије на сету за обуку (Bishop, 2006).

Support Vector Machine је алгоритам обучен да максимизира растојање између границе која раздваја позитивне од негативних примера и тачака података за обуку које су најближе овој граници (Cortes и Vapnik, 1995). Коришћењем трика језгра (Кернела), ова граница може постати нелинеарна, што доводи до веома моћних класификатора. У овом случају обрађене су линеарне (L-SVM) и Гаусова радијална базна функција кернела (језгра) (G-SVM).

За линеарне моделе као што су LR и L-SVM, одлука о класификацији се доноси на основу пондерисане линеарне комбинације, односно стандардизованих вредности карактеристика. Величине ових тежина користе се као једна од мера информативности обележја.

3.2.5.3. Модели ансамбла

За потребе предикције снежних лавина, примењено је три модела ансамбла: Random Forest, Light Gradient-Boosting Machine и Extreme Gradient Boosting.

Random Forest (RF) је метода учења ансамбла која функционише тако што конструише мноштво стабала одлучивања током обуке и даје ознаку класе засновану на агрегацији појединачних излаза дрвета (Breiman, 2001). Свако дрво је креирано коришћењем насумичних подскупова података, изабраних заменом (bootstrap узорковање), што промовише разноликост међу стаблима и смањује претерано уклапање. Штавише, у сваком чвору стабла, алгоритам бира насумични подскуп карактеристика уместо да узима у обзир све карактеристике, чиме се повећава робусност модела и смањује вероватноћа претераног прилагођавања одређеним карактеристикама.

Ова случајност осигурава да поједина стабла у шуми буду украшена, побољшавајући општу генерализацију модела. Коначна прогноза се добија већином гласова. Ефикасност RF алгоритма је доказана у различитим областима (Fernández-Delgado и др., 2014).

Light Gradient-Boosting Machine (LGBM) је модел за повећање градијента дизајниран за брзину и ефикасност, посебно са скуповима података великих размера (Ke и др., 2017). LGBM користи алгоритам учења заснован на хистограму који дискретизује континуиране вредности карактеристика у дискретне корпе, значајно смањујући употребу меморије и трошкове рачунара. Овај приступ омогућава брже израчунавање током фазе обуке и предвиђања оптимизовањем претраге за оптималним поделама у стаблу одлучивања. LGBM такође подржава стратегију раста стабла по листовима, где се дрвеће узгаја одабиром листа са највећим потенцијалом за побољшање функције циља. Поред других техника, као што су једнострано узорковање засновано на градијенту и груписање ексклузивних карактеристика, ове иновације чине LGBM високо ефикасним алгоритмом за велике скупове података.

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) је још један модел за повећање градијента. Такође се ослања на моделе засноване на стаблу одлучивања користећи адитивни приступ за секвенцијално минимизирање грешака кроз оптимизацију градијента, али уводи иновације као што је Тејлорова експанзија другог реда за оптимизацију функције циља, регуларизација ради спречавања прекомерног прилагођавања и алгоритам који је свестан оскудности за руковање подацима који недостају (Chen и Guestrin, 2016). Његова употреба паралелне обраде, обрезивања стабала и ефикасних техника компресије података додатно побољшава перформансе рачунара. XGBoost је постао истакнут у конкурентском машинском учењу због своје способности да испоручи најсавременије резултате брзином и прецизношћу. У методама ансамбла заснованих на стаблу, просечно смањење нечистоће добијено поделом на одређеном обележју је мера информативности те карактеристике (Hastie и др., 2009). Ово се користи како би се анализирао процес доношења одлука о моделима ансамбла и добио увид у важност сваке карактеристике за задатак класификације.

3.2.6. Дубоко учење

3.2.6.1. Multi-Layer Perceptron модел

Multi-Layer Perceptron (MLP) модел је вештачка неуронска мрежа која се састоји од улазног слоја, једног или више скривених слојева и излазног слоја, при чему сваки слој садржи међусобно повезане неуроне (чворове) (Goodfellow и др., 2016). Сваки неурон примењује функцију нелинеарне активације на пондерисани збир својих улаза, омогућавајући мрежи да моделује сложене, нелинеарне односе. MLP подаци се обучавају коришћењем пропагације уназад, алгоритма за оптимизацију који минимизира грешку између предвиђених и циљних излаза итеративним подешавањем тежина путем градијента спуштања. Могућност универзалног апроксиматора ове архитектуре чини је погодном за широк спектар апликација, укључујући препознавање слика и обраду природног језика.

3.2.7. Методологија за валидацију резултата

Тестирање перформанси модела је од суштинског значаја у анализи и интерпретацији података, примени модела машинског учења и њиховој евалуацији. Приступ радне карактеристике пријемника (Receiver Operating Characteristic-ROC) и области испод криве (area under the curve-AUC) нашао је широку примену за тестирање тачности модела у различитим областима истраживања (Крушић и др., 2017). ROC крива представља график генерисан из праве позитивне вредности (осетљивости) X-осе и лажно позитивне вредности Y-осе на различитим праговима (или граничним тачкама). Са повећањем осетљивости, долази и до повећања лажно позитивних резултата. Било где на кривој, ROC крива упоређује праве позитивне и лажно позитивне вредности, док AUC показује укупну тачност перформанси модела (Phong и др., 2019). Модел са еквивалентним AUC имају исте укупне перформансе, али не морају нужно имати исту осетљивост и специфичности (Shahabi и др., 2019). AUC се добија на основу формуле (Yariyan и др., 2020):

$$AUC = \frac{(\sum EC + \sum IC)}{(a+b)},$$

где је EC број тачно класификованих лавина, IC представља број нетачно класификованих лавина, a је појединачни догађај лавине, док је b је укупан број лавина.

Опсег AUC вредности је од 0 до 1. $AUC < 0,5$ указује да модел нема предиктивну вредност. Уколико је AUC 0,5-0,7, то указује да је тачност модела ниска, док вредности AUC 0,7-0,9 указују на високу тачност. Класификатори са AUC вредностима изнад 0,9 имају највећу предиктивну моћ.

Као главни критеријум за подешавање хиперпараметара користи се тачност (accuracy) модела машинског учења на валидационом скупу. За процену модела на тестираном скупу, поред тачности, такође су важни параметри прецизности (precision), одзива (recall), и F1-скор (F1-score), који су дефинисани као (Peretz и др., 2024):

$$Тачност = \frac{(TP+TN)}{(TP+FP+TN+FN)},$$

$$Прецизност = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Одзив = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$F1 = \frac{2}{Прецизност^{-1} + Одзив^{-1}},$$

где: TP, TN означавају број стварно позитивних (TP) и стварно негативних (TN) резултата, док FP и FN приказују број лажно позитивних (FP) и лажно негативних (FN) резултата.

Већина модела који су примењени даје резултат између 0 и 1. Ови резултати се могу тумачити као вероватноћа да улазни пример припада позитивној класи. Коначна одлука (0 или 1) се доноси тестирањем овог резултата у односу на праг. Смањењем овог прага, повећава се стопа стварно позитивних резултата. Међутим, ово такође повећава стопу лажно позитивних резултата. Тачност, прецизност, одзив и F1-скор се израчунавају за један, фиксирани праг од 0,5.

4. СНЕЖНЕ ЛАВИНЕ КАО ПРИРОДНИ ХАЗАРД

4.1. ИСТОРИЈАТ ИСТРАЖИВАЊА

Прва истраживања на тему снежних лавина рађена су на територији Швајцарске почетком XVIII века. Начелник швајцарског шумарског инспектората Јохан Коаз (1822-1918) дао је велики допринос у успостављању свести о опасности од снежних лавина у Швајцарској и другим земљама. Прва истраживања механичких карактеристика снега обављена су током зимске сезоне 1934/35, док је први извештај „Снег и његов метаморфизам” објављен 1939. године од стране Роберта Хефелија, Едвина Бухера и Хенрија Бадера. Пионирска истраживања у Швајцарској била су фундаментална подлога за касније студије и испитивања снежних лавина у Аустрији, Русији, САД, Канади, Норвешкој, Исланду, Јапану итд (Ансеу и др., 2005).

4.2. ВЕЛИЧИНА ЛАВИНЕ

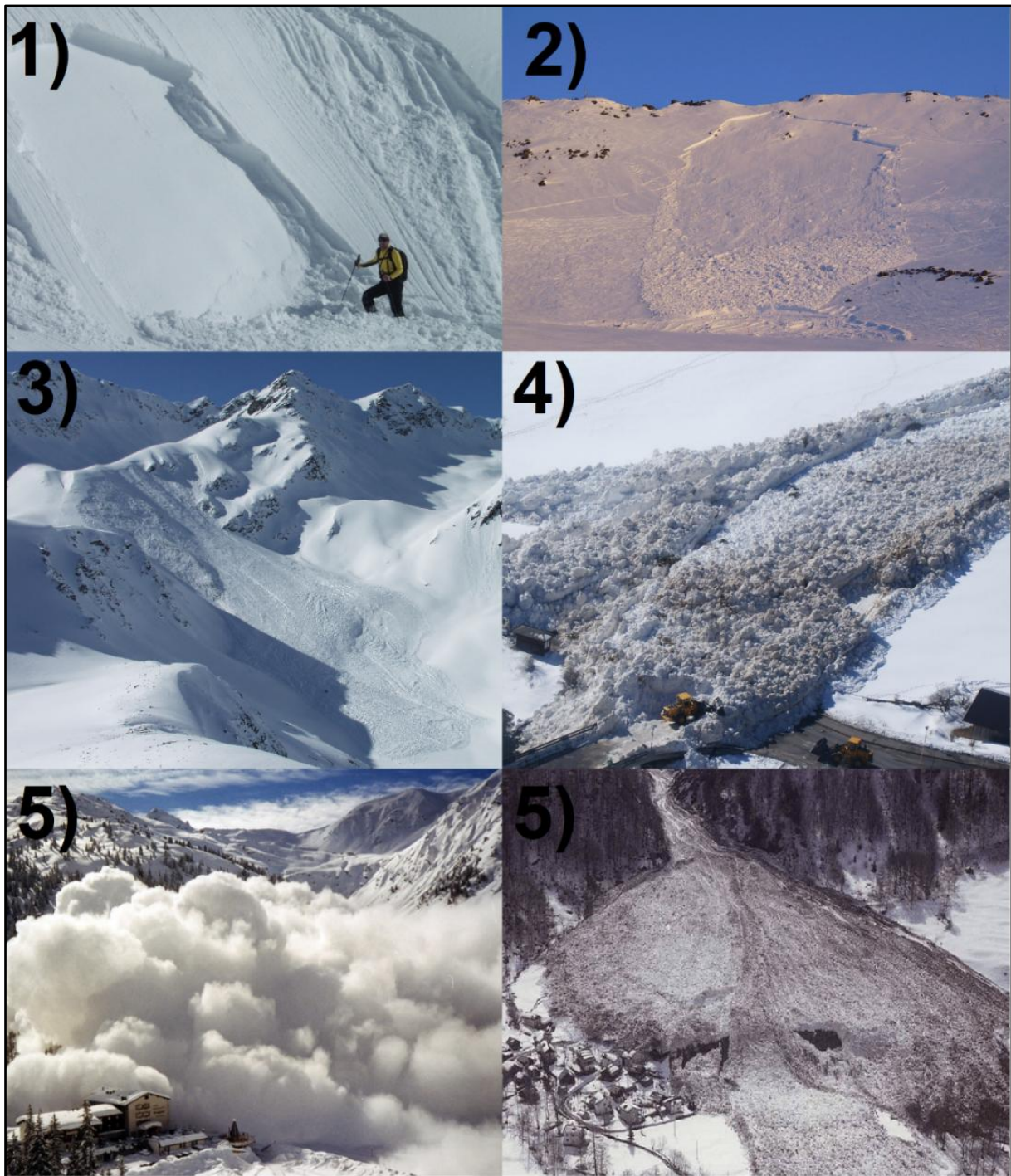
У односу на величину, Европска служба за упозорење на снежне лавине (European Avalanche Warning Services – EAWS) категорисала је лавине у пет класа. Према овој дефиницији „фаталне” лавине изазване активностима скијаша се често класификују као средње или као велике упркос њиховој значајној релативној површини. Оне су типично дужине 150 m са просечном дебљином плоче од око 50 cm. Ово је еквивалентно запремини плоче од приближно 2000 m³ или око 400 тона. На основу димензија, разликују се: мале лавине, средње лавине, велике лавине, врло велике и екстремно велике лавине (European Avalanche Warning Services, 2024).

Табела 11. Класификација лавина по величини

Категорија	Место заустављања (акумулација)	Дужина (m)	Запремина (m ³)	Ударни притисак (kPa)
Мале лавине	На стрмим падинама	10-30	100	1
Средње лавине	Може доћи до краја стрме падине	50-100	1000	10
Велике лавине	Могућа акумулација материјала на теренима са нагибом испод 30°	100-1000	10,000	100
Врло велике лавине	На релативно равнијем терену (знатно испод 30°)	1000-2000	100,000	500
Екстремно велике лавине	Дно долине. Највећа позната лавина.	>2000	> 100,000	1000

Извор: European Avalanche Warning Services, 2024

- 1) *Мале лавине* – мала је вероватноћа затрпавања особе, осим у зонама са изразито неповољним карактеристикама терена (тзв. теренске замке). На екстремно стрмим теренима постоји опасност од покретања.
- 2) *Средње лавине* – могу затрпати, повредити или убити особу. Највећи број оваквих лавина покрећу скијаши.
- 3) *Велике лавине* – могу затрпати и уништити аутомобиле, оштетити камионе, уништити мале зграде и оштетити стабла. Уколико скијаше захвате лавине ове величине, вероватноћа за леталан исход је веома велика.
- 4) *Врло велике лавине* – затрпавају и уништавају камионе и возове. Могу уништити прилично велике зграде и мале површине шуме.
- 5) *Екстремно велике лавине* – могу да девастирају пејзаж и имају катастрофалан деструктивни потенцијал по животну средину.



Слика 11. Величина снежних лавина

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023; European Avalanche Warning Services, 2024

4.3. СКАЛА ОПАСНОСТИ ОД СНЕЖНИХ ЛАВИНА

На ризик од настанка лавина утиче више фактора: стабилност снежног покривача, његова геопросторна дистрибуција и величина лавине. Европска скала опасности од лавина има пет нивоа: низак, умерен, знатан, висок и веома висок ниво опасности.

Табела 12. Европска скала опасности од лавина

	Ниво опасности	Симбол	Стабилност снежног покривача	Вероватноћа покретања
5	Веома висок		Слабо везан и нестабилан.	Могу се очекивати бројне веома велике и често екстремно велике природне лавине, чак и на умерено стрмом терену.
4	Висок		Слабо везан на већини стрмих падина.	Покретање је вероватно, чак и од малих додатних оптерећења, на многим стрмим падинама. У неким случајевима се могу очекивати бројне велике и често врло велике природне лавине.
3	Знатан		Умерено до слабо везан на многим стрмим падинама.	Активирање је могуће, чак и од малих додатних оптерећења, посебно на назначеним стрмим падинама. У одређеним ситуацијама могуће су велике, а у изолованим случајевима и врло велике природне лавине.
2	Умерен		Умерено добро везан на неким стрмим падинама.	Покретање је могуће, првенствено од великих додатних оптерећења, посебно на назначеним стрмим падинама. Веома велике природне лавине су мало вероватне.
1	Низак		Добро везан и генерално стабилан.	Активирање је углавном могуће само од великих додатних оптерећења у изолованим областима веома стрмог, екстремног терена. Могуће су само мале и средње природне лавине.

Извор: European Avalanche Warning Services, 2024

Напомене:

Умерено стрм терен – нагиби мањи од 30° .Стрме падине – терени са нагибом већим од 30° .Веома стрм терен – посебно неповољан са нагибом већим од 40° , непосредно близу гребена и присуство глатке површине.

Мала додатна оптерећења – индивидуални скијаш/сноубордер, група са адекватним размаком (10 m).

Велика додатна оптерећења – два или више скијаша/сноубордера без размака, моторне санке, експлозиви.

Природне лавине – лавине настале без антропогеног деловања.

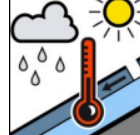
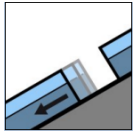
У протехлих 100 година забележено је на хиљаде смртних исхода од последица активирања, кретања и акумулације великих снежних маса.

Према подацима EAWS (2024) током последњих 20 година више од 2200 људи је у Европи страдало од деловања лавина. Број погинулих је свакако већи зато што EAWS не располаже подацима за већину држава југоисточне и источне Европе.

4.4. ТИПИЧНИ ПРОБЛЕМИ СА ЛАВИНАМА

Европска служба за упозоравање на лавине (EAWS) дефинисала је пет типичних проблема са лавинама са циљем да се опишу ситуације које се дешавају на терену и да подрже професионалце и рекреативце у њиховој процени опасности од лавина. Типични проблеми дефинишу општу карактеризацију проблема укључујући очекиване типове лавина, опис геопросторне дистрибуције и положаја слабог слоја у снежном омотачу, карактеризацију механизма ослобађања, опис типичних трајања и временских периода.

Табела 13. Типични проблеми са лавинама

Проблеми	Нови снег	Ветром нанет снег	Перзистентни слаби слојеви	Влажан снег	Клизни снег
Симболи					

Извор: European Avalanche Warning Services, 2024

На крају, дају се савети за путовања за рекреативце. При томе је главни фокус на рекреативцима који путују по лавинском терену. Међутим, типични проблеми са лавином могу такође бити корисни за службе безбедности од лавина.

4.4.1. Нови снег

Проблем формирања може бити повезан са тренутним или најновијим снежним падавинама. Количина додатног оптерећења новог снега на већ постојећи снежни покривач је кључни фактор новог снежног проблема. Колико је оптерећење критично зависи од различитих фактора као што су температура снега или карактеристике старе снежне површине.

Приликом нових снежних падавина, типови лавина који могу настати су суве плочасте лавине и лавине сувог растреситог снега. Суве плочасте лавине настају услед додатног оптерећења приликом снежних падавина на постојећим или новонасталим slabим слојевима. Лавине сувог растреситог снега настају услед недостатка кохезије између нових честица снега (European Avalanche Warning Services, 2024).

Геопросторна дистрибуција је велика и може захватити све експозиције. Слаб слој се обично јавља између старе и нове снежне површине. Понекад може настати у новим снежним слојевима, а понекад и дубље у старом снежном покривачу. Ризик од настанка лавина траје током снежних падавина и неколико дана после.

4.4.2. Ветром нанет снег

Снег који наноси ветар често може изазвати кретање лавине. Снег се може преносити ветром са или без истовремених снежних падавина. У оваквом процесу може се очекивати настанак сувих плочастих лавина.

Геопросторна дистрибуција је веома варијабилна, али типично се јављају на заветринским странама у јаругама, близу изразитих промена угла нагиба, иза гребена или на другим локацијама заштићеним од ветра. Чешће изнад линије распрострањености шума.

Слаб слој јавља се на прелазу између нанетог снега и старе снежне површине или унутар слоја ветром настале плоче, због варијације брзине ветра и варијације током олујног циклуса. Повремено се слаб слој може појавити и дубље у старом снежном покривачу. Ветром нанет снег представља додатно оптерећење за слаб слој и ствара плочу која показује склоност ка настанку и ширењу пукотина.

Ветром нанет снег еволуира веома брзо. Проблем обично траје током снежног наноса, највише до неколико дана, у зависности од развоја снежног покривача. У овом временском периоду не препоручује се излагање рекреативаца на стрмим теренима где постоји неуједначена дебљина снежних наслага (European Avalanche Warning Services, 2024).

4.4.3. Перзистентни слаби слојеви

Перзистентни слаби слојеви обично укључују присуство површинског иња, дубинског иња или фасетираних кристала. Услед појаве оваквих слојева, веома су честе суве плочасте лавине настале антропогеним деловањем.

Проблем са перзистентним слабим слојевима може бити широко распрострањен или прилично изолован. Може се формирати на свим експозицијама, али је чешћи на осојним странама заштићеним од ветра. Слаб слој се може идентификовати у старом снежном покривачу, често дубоко у снегу. Међутим, када се налази у дубљим слојевима, покретање постаје све теже.

Време настанка и присутности перзистентних слабих слојева је веома дуго: од неколико недеља до неколико месеци. Да би се открили слаби слојеви, потребна су теренска истраживања снежних профила. Ширење пукотина на велике удаљености је уобичајено и могуће је даљинско активирање лавине. Након препознавања слабих слојева, потребно је избегавати терене на којима су присутни, јер су перзистентни слаби слојеви један од главних узрока смрти рекреативаца од лавина (European Avalanche Warning Services, 2024).

4.4.4. Мокар снег

Проблем настанка лавина може бити везан за слабљење снежног покривача услед присуства течне воде. Вода се инфилтрира у снежни омотач услед топљења или кише. Када је сунце главни узрок, дистрибуција лавина углавном зависи од експозиције и надморске висине. У случају појаве кише на снегу, све експозиције су подједнако погођене. Овакви специфични услови могу изазвати влажне плочасте лавине и лавине влажног растреситог снега. Код влажних плочастих лавина, приликом кишних падавина долази до додатног оптерећења слабих слојева. Губитак кохезије између снежних кристала представља узрок настанка лавина влажног растреситог снега.

Период нестабилности снежног покривача може потрајати од неколико сати до неколико дана. Када се површина снежног омотача загреје на 0°C, вода се први пут инфилтрира у дубље слојеве и смањује стабилност и кохезију слојева. На терену је дубоко продирање стопала у снег један од главних индикторе повећане влажности (European Avalanche Warning Services, 2024).

4.4.5. Клизни снег

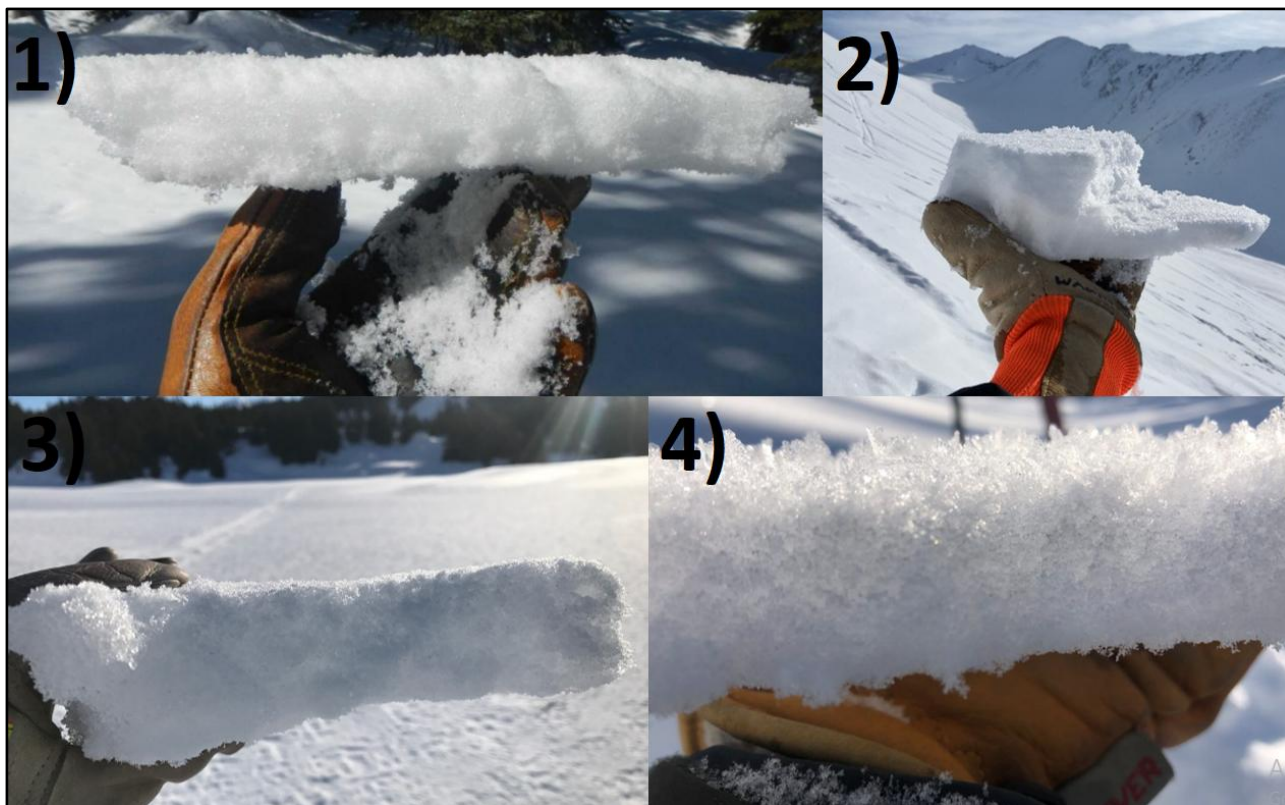
Клизни снег је појава када читав снежни омотач клизи по земљи, обично по глатком терену као што су травнате површине или глатке стенске формације. Велика активност клизећих снежних лавина је типично повезана са дебелим снежним покривачем са или без неколико слојева. Ослобађање снежне лавине је тешко предвидети, иако се пукотине отварају обично пре ослобађања. Приликом присуства клизног снега формирају се клизне снежне лавине које су у највећем броју случајева настале природним путем.

Клизни снег преовлађује на глатком терену и на свакој експозицији, али се чешће јавља на јужним падинама. Слаб слој се формира на контакту између земљишта и снежног покривача. Приликом губитка трења на поменутом интерфејсу, долази то клизања снега. Појава клизних лавина може потрајати од неколико дана до неколико месеци. Карактеристична је појава за зимске и пролећне месеце. На терену је клизни снег лако идентификовати услед присуства клизних пукотина (European Avalanche Warning Services, 2024).

4.5. Тло и приземни слој

Подлога представља слој велике чврстоће снега или земље (топографске површине) на којој се плоче формирају и клизе. У већини случајева, подлога на којој настају лавине је глатка и тврда снежна површина која значајно смањује силу трења и поспешује утицај гравитационе силе. Постоје бројни типови снежних слојева који могу послужити као адекватна подлога за кретање плоча: кишне коре, сунчеве коре, тврда и стара снежна површина, растопљено-замрзнута кора итд.

Кишне коре формирају се подједнако на свим експозицијама. Настају на нижим надморским висинама, на подручјима у којем се кишне падавине смењују са снежним. Одликују се глатком и клизавом површином која није увек опасна по настанак лавина. Уколико је пре снежне олује кишна кора изузетно влажна, нови снег ће се стабилно везати са овај слој. Уколико је површина кишне коре замрзла, због слабе кохезије нови слој снега биће знатно нестабилнији и погоднији за стварање меких плоча на тврдој кишној кори. Приликом дуготрајних и интензивних кишних падавина, може доћи до формирања одводних канала на површинском снегу. Такви „дренажни” канали знак су стабилности снежног покривача.



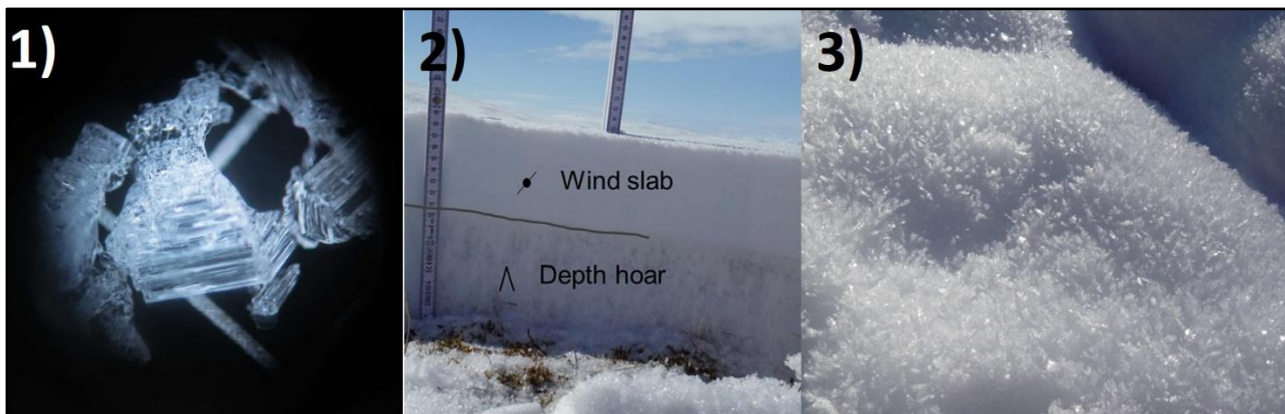
Слика 12. Кишна кора (1), сунчева кора са новим снегом (2) и растопљено-замрзнуте коре (3,4)
Извор: Flathead avalanche, 2024; Chugach avalanche center, 2024; Missoula avalanche, 2024

Сунчева кора настаје када топлота од Сунца топи површину снега, која се затим поново замрзава. Карактеристична је за присојне стране, терене који примају више сунчевог зрачења. За разлику од кишних кора, структура површине сунчеве коре знатно је грубља, тако да снег који се таложи има тенденцију за бољим везивањем. Са друге стране, услед дуготрајног утицаја Сунца, испод површине коре долази до снажних механичких дисконтинуитета и стварања температурног градијента. У таквим условима постоје велике шансе за настанак перзистентних слабих слојева како испод, тако и изнад сунчеве коре. Тврда и стара снежна површина по својим особинама (велика чврстоћа, глатка површина) има скоро идентичну улогу као земљана подлога.

Растопљено-замрзнута кора разликује се од других по томе што снег пролази кроз поновљене циклусе топљења и смрзавања. Услед овог процеса долази до стварања крупнозрнастог „кукурузног” снега. Уколико вода приликом топљења продре у дубље слојеве снега, долази до значајних промена и нестабилности истих. Овакав тип коре углавном настаје током пролећних месеци на осунчаним странама терена где током дана Сунце отапа снежну површину, а услед ведрих и хладних ноћи снежна површина одаје топлоту и постепено прелази у лед.

4.6. Врсте слабих слојева

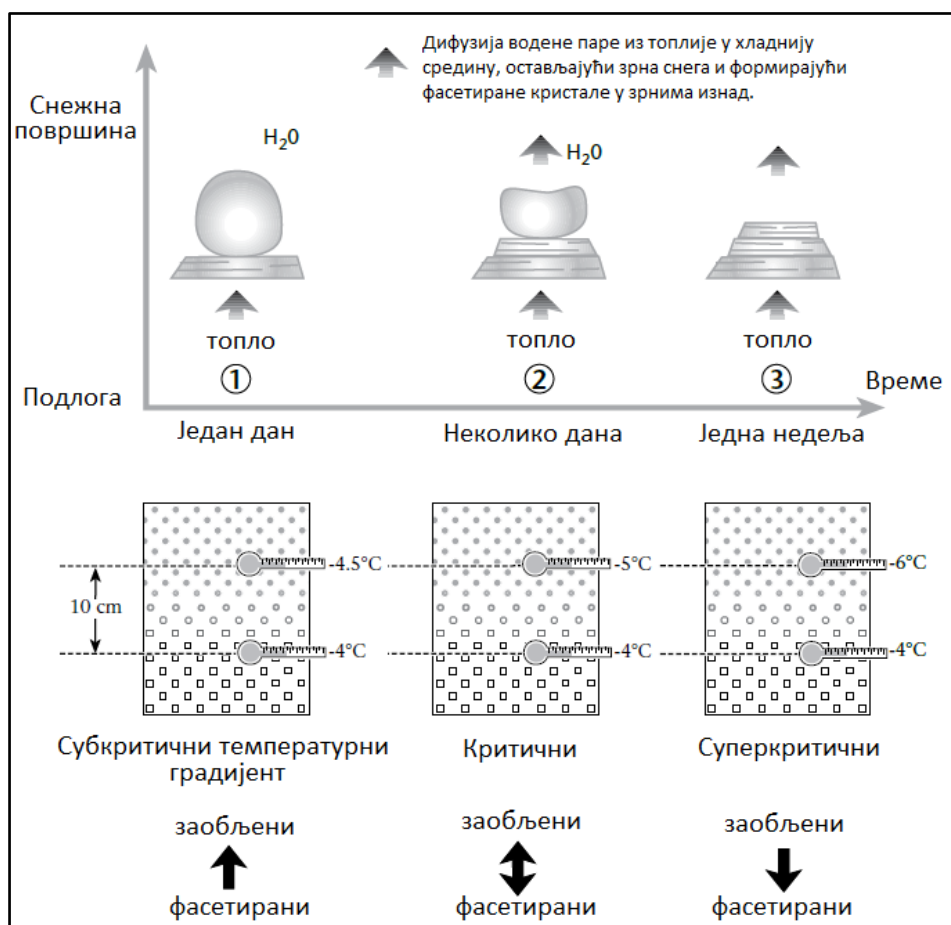
Слабим слојевима у снежном покривачу називају се интерфејси чија је чврстоћа слабија од суседних слојева. Одређени слаби слојеви имају тенденцију да се брзо стабилизују након олује, док је другим врстама слабих слојева потребно много дуже да се стабилизују. Такви слојеви означавају се као перзистентни. У савременим истраживањима, за настанак лавина посебно се издвајају три перзистентна слоја: фасетирани снег, дубинско иње и површинско иње.



Слика 13. Фасетирани снег (1), дубинско (2) и површинско (3) иње

Извор: Snow brains, 2024; Cambridge, 2024; PisteHors, 2024

Фасетирани снег настаје услед постојања великог температурног градијента у снежном покривачу. Температурни градијент представља температурну разлику унутар слојева снега. У условима нових снежних падавина или брзог загревања површине снежног покривача, долази до стварања „градијента притиска паре”. У овом процесу водена пара из области високе концентрације (дубљи и топлији снежни слојеви) тежи да пређе у области ниске концентрације (плићи и хладнији слојеви). Том приликом мења се структура и стабилност снежног зрна, заобљена снежна зрна трансформишу се у фасете (угаона зрна). Овај процес је реверзибилан, с тим да је за настанак фасета потребно неколико дана до недеља, док процес трансформације фасете у заобљена зрна захтева изузетно дуг период.

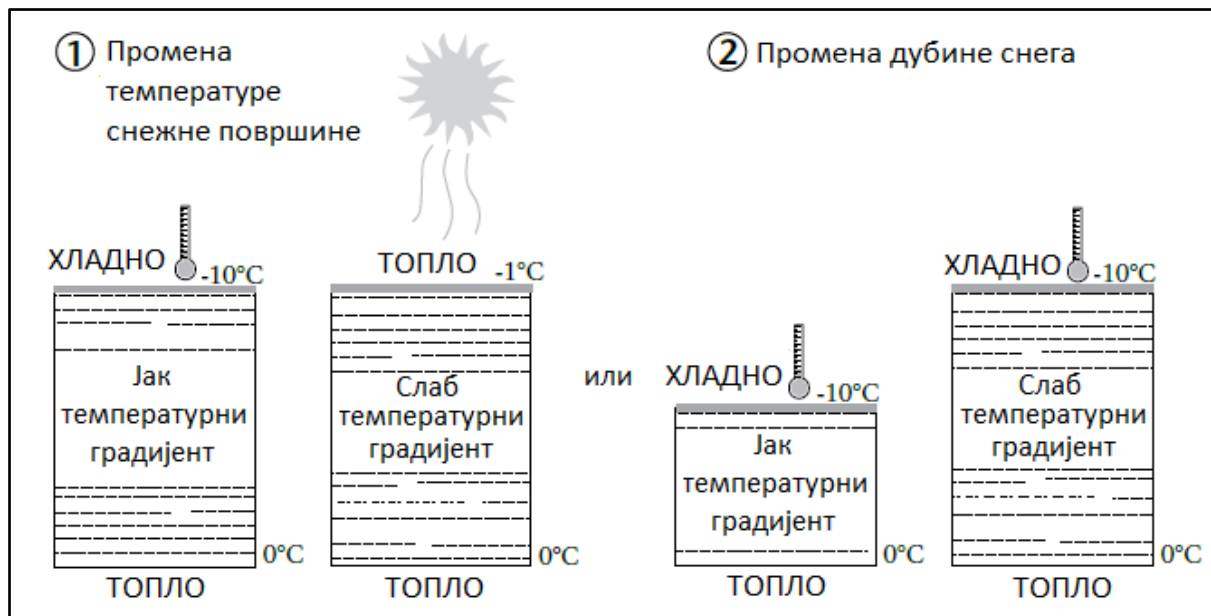


Слика 14. Процес стварања фасетираног снега

Извор: Tremper, 2008

За снег просечне температуре снежног покривача (-5°C), критични температурни градијенти износи 1°C на 10 cm. Уколико је градијент мањи, долази до стабилности снежних слојева. Ако је температурни градијент 2 или више степена Целзијуса на 10 cm, то означава почетак формирања фасетираног снега (Tremper, 2008).

Дубинско иње такође настаје као резултат великог температурног градијента у снежном покривачу. Настаје у близини топографске површине, у условима где је снег знатно топлији и влажнији од снега на површини покривача. Најбоље се фомира на температурама снега од -2 до -15°C .



Слика 15. Два начина промене температурног градијента

Извор: Tremper, 2008

У умереним географским ширинама, дубинско иње се чешће фомира на осојним странама терена. Приликом настанка снежне лавине, дубинско иње представља изузетно повољан слаб слој због својих механичких особина. То су крупна зрна величине 4-10 mm која могу бити нестабилна од неколико дана до неколико недеља, у зависности од температуре.

Површинско иње (мраз) представља најопаснији перзистентни слаб слој, који, према канадској и швајцарској статистици изазива највећи број снежних лавина и људских губитака. За формирање површинског иња потребни су специфични временски и рељефни услови: ведро, топло и влажно време без јаког ветра, као и отворена падина без дрвећа.



Слика 16. Процес формирања површинског иња

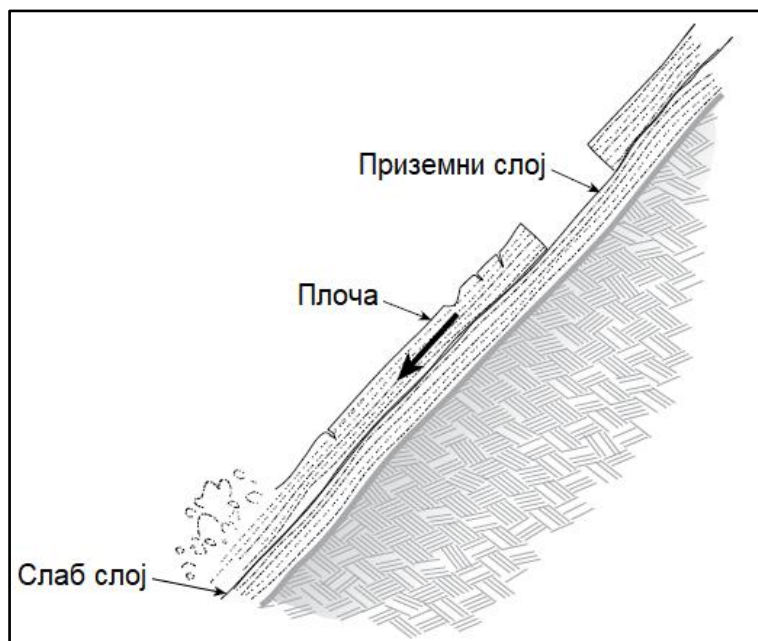
Извор: Tremper, 2008

Пошто топли ваздух задржава већу концентрацију водене паре од хладног ваздуха, пара из топлијег ваздуха изнад снега ће се кондезовати на површини снега, стварајући површинско иње. Просторно посматрано, површинско иње чешће настаје на нижим надморским висинама, при дну долина због већег присуства влажнијег ваздуха. У случају температурне инверзије у котлинама, стварају се идеални услови за настанак овог слабог слоја. Са хидролошког аспекта, површинско иње веома често настаје у близини извора и водотокова, јер они обезбеђују константан извор паре. Нестабилност кристала површинског иња обично траје недељу или две, па чак и месецима у хладном снегу.

4.7. ТИПОВИ СНЕЖНИХ ЛАВИНА

4.7.1. Суве плочасте лавине

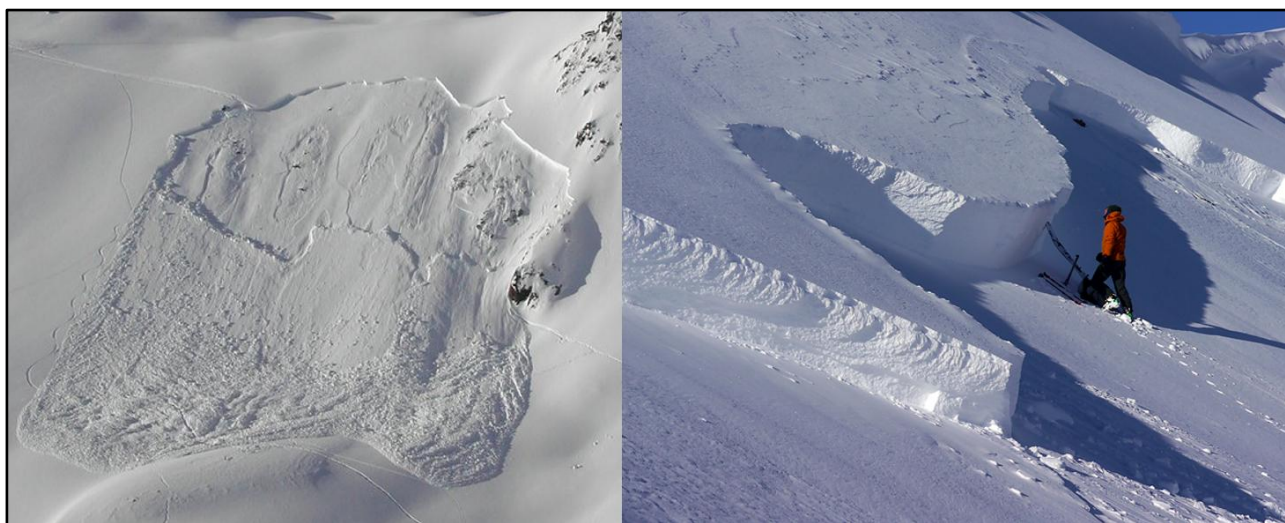
Тип снежних лавина који изазива највећи број смртних случајева јесу суве плочасте лавине. Плоча представља површински слој снега различитог степена чврстоће која се услед специфичних географских, механичких и антропогених услова активира и покреће лавину. Услов за покретање лавине јесте и присуство перзистентног слабог слоја испод површине плоче који се по физичким својствима знатно разликује од приземног слоја снега и плоче (McClung, 2009). Када сила притиска плоче надвлада силу трења слабог слоја, плоча се покреће и клизи низ падину (Schweizer и Kronholm, 2006).



Слика 17. Делови плочасте лавине

Извор: Tremper, 2008

Типична величина плочасте лавине коју ослобађају учесници зимских спортова је 50 m ширине и 150-200 m дужине, дебљина плоче варира 30-60 cm. Суве плочасте лавине током прве три секунде свог кретања достижу брзину од 32 km/h, након шест секунди 128 km/h, а везе које држе плочу пуцају при брзини од 352 km/h. Након лома, брзина лавине се смањује и креће процес акумулације снежног материјала (Tremper, 2008).



Слика 18. Суве плочасте лавине

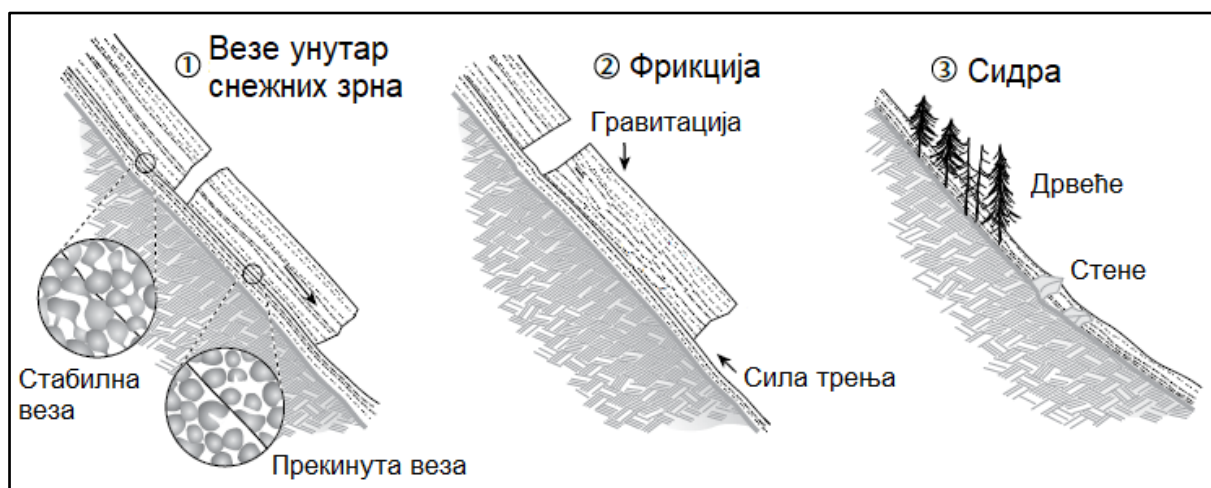
Извор: Safeback, 2024; Powder Canada, 2024

Суве плочасте лавине могу настати природним и антропогеним деловањем. Издвајају се неколико главних узрочника: нагиб терена, структура снежног покривача, равнотежа између притиска и снаге, и антропогени утицај.

Нагиб терена представља главни геоморфолошки услов за настанак и кретање снежних лавина. Сматра се да је степен инклинације терена 30-50° идеалан за формирање лавина. Међутим, под специфичним природним и антропогеним условима, лавине могу настати и на равнијим, али и стрмијим теренима.

Препознавање и одређивање структуре снежних слојева умногоме доприноси адекватној идентификацији и анализи лавинског терена. Уколико се између плоче и приземног снежног покривача (или земљишта) формира слаб слој, постоје реалне шансе за активирање снежне лавине.

Равнотежа између притиска плоче и снаге слабог слоја игра велику улогу у окидању и кретању плочастих лавина. Све док је снага слабог слоја већа од притиска плоче, одржаваће се стабилност снежног покривача. Притисак и дебљина плоче се повећавају услед нових снежних падавина или снега нанетог ветром. Према новијим истраживањима, око 50 cm новог снега у року до 24 сата представља критичну тачку за покретање лавине (Schweizer и др., 2021). Оног тренутка када се притисак површинског слоја (плоче) изједначи или надвлада снагу слабог слоја, долази до нестабилности снежног покривача. Нестабилност подразумева раскидање веза унутар снежних зрна чиме се фрикција између плоче и приземног слоја значајно смањује. У оваквим околностима, гравитациона сила надвладава силу трења и стварају се повољни услови за настанак суве плочасте лавине. Поред веза између снежних зрна и фрикције, тзв. сидра (anchors) представљају трећу силу која утиче на стабилност, односно држање плоче на свом месту. Сидра су представљена у виду камења и дрвећа и имају двоструку улогу: стабилност и задржавање плоче, као и успоравање снежне лавине приликом њеног кретања.



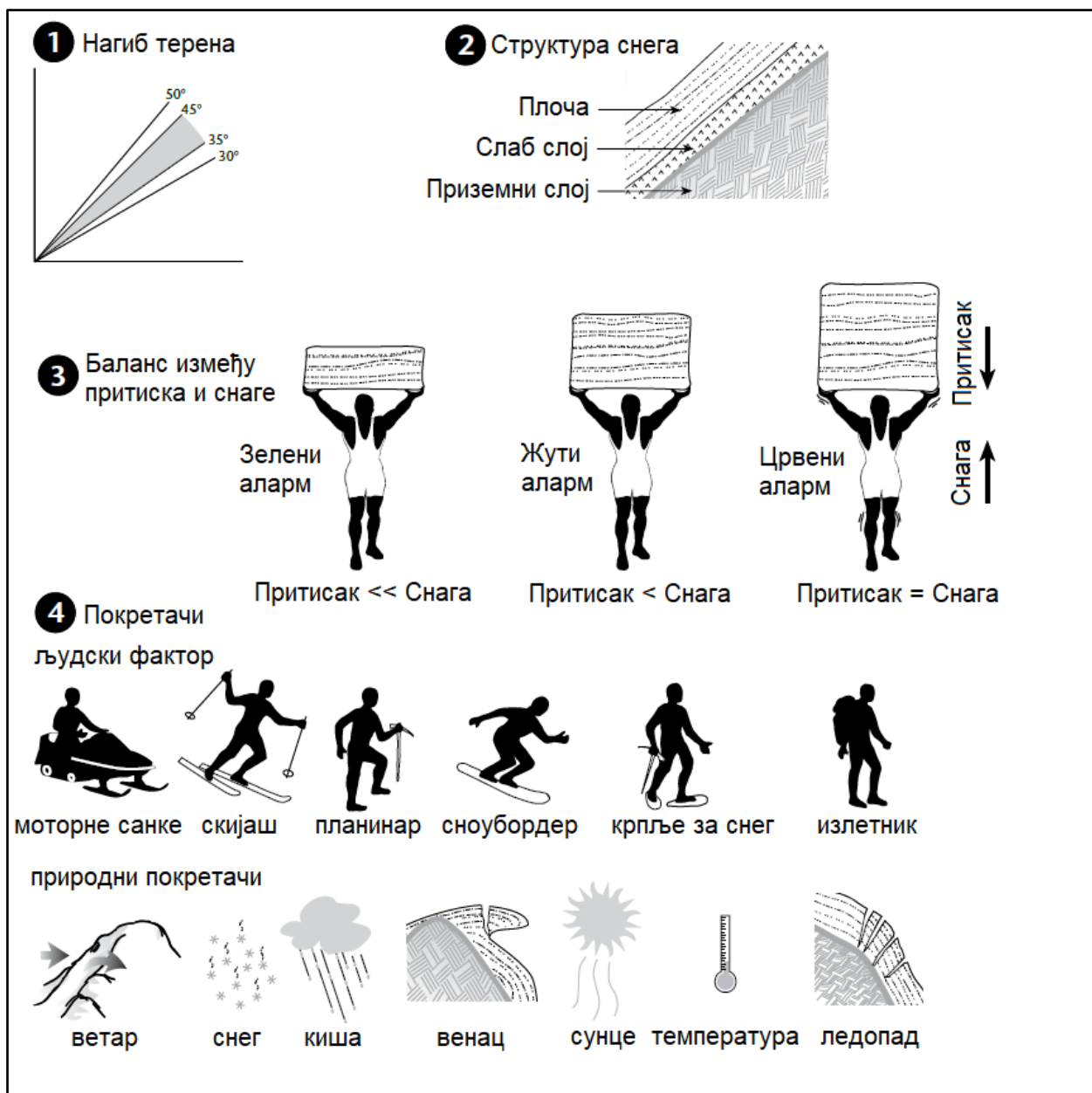
Слика 19. Силе које одржавају плочу на свом месту

Извор: Tremper, 2008

Људски фактор представља чест окидач снежних лавина. Недовољно познавање карактеристика терена и стабилности снежних слојева узрокује велики број смртних случајева широм света. Што је већи притисак антропогеног деловања на снежни покривач, шансе за настанак лавине су знатно веће. Моторне санке због своје тежине представљају изузетно чест окидач лавина, нарочито на терену који је удаљен од ски-центра и није довољно истражен. Поред моторних санки, скијаши и сноубордери су такође чести покретачи снежних лавина због пресецања падина приликом зимских активности. Излетници и планинари су група која је најмање ризична да покрене лавине (због мање тежине), међутим уколико се изнад њих активира лавина, због недостатка ски опреме, шансе за избегавање лавине су веома мале. Са повећањем броја људи на једној падини, шансе за активирање лавине рапидно расту.

Поред антропогеног фактора, деловањем искључиво природних услова може доћи до формирања лавине. Велика брзина ветра еродује површински слој снега са једног места и акумулира га на друго, заветринско подручје. У оваквим околностима, ветром нанет снег значајно повећава притисак плоче на слаб слој.

Нови снег који падне на повшински слој утиче на промену структуре већ постојећег снежног покривача чиме се ствара велики број слојева унутар снега и смањује њихова стабилност.



Слика 20. Покретачи плочастих лавина

Извор: Tremper, 2008

Сунчево зрачење битно мења физичка својства површинског снежног слоја. Када се говори о температури и снежним лавинама, потребно је направити јасну разлику између температуре ваздуха и температуре снега. Температура ваздуха и температурне инверзије утичу на својства плоче, док температурни градијент снежних слојева представља битан индикатор у препознавању слабих слојева.

У зависности од чврстине, плоче могу бити тврде и меке. Тврде плоче се одликују већом стабилношћу, теже их је покренути, али приликом њиховог активирања, лавине имају тенденцију да се даље шире и праве знатно већу и смртоноснију лавину (Tremper, 2008). Тврде плоче се ломе и покрећу изнад особе и самим тим дају мало простора за маневрисање, односно избегавање лавине. Меке плоче су нестабилније, али се углавном ломе код ногу особе, тако да постоје знатно веће шансе за спасавање људи.

4.7.2. Влажне плочасте лавине

Влажне плочасте лавине јављају се знатно ређе од сувих и изазивају много мање смртних случајева. Начин формирања влажне плочасте лавине је супротан процесу формирања суве. У овом случају, влажне лавине узроковане су смањењем снаге слабог слоја. Формирају се при специфичним временским условима (топљење снега због високих температура, кишне падавине, дуже Сунчево зрачење) инфилтрацијом течне воде кроз слојеве снежног омотача након чега долази до растварања веза између снежних кристала (Trautman и др., 2006; Bellaire и др., 2017). При овом процесу, велики део снежног покривача је изотерман (0°C) тако да слаб слој постаје знатно влажнији и нестабилнији.

Baggi и Schweizer (2009) наводе три могућа покретачка механизма:

- 1) губитак чврстоће услед инфилтрације воде и њеног задржавања на интерфејсу;
- 2) преоптерећење влажног снежног покривача услед падавина;
- 3) постепено слабљење снежног покривача услед загревања на 0°C .

Величина влажне плочасте лавине може се проценити анализом слоја снежног покривача где је био највећи садржај течне воде. Иако се влажне плочасте лавине крећу спорије (15-30 km/h) од сувих, понекад имају ударне притиске два пута веће од сувих лавина и могу бити изузетно деструктивне по шумске екосистеме и постојећу инфраструктуру. Појава оваквог типа лавина на умереним географским ширинама везује се за пролећне месеце због повећања температуре ваздуха и отапања снега. Анализа температуре ваздуха, сунчевог зрачења и температуре површине снега може побољшати предикцију дана са повећаном активношћу влажних лавина (Helbig и др., 2015).



Слика 21. Влажне плочасте лавине

Извор: Safeback, 2024; Colorado Avalanche Information Center, 2024

Влажне лавине се најпре јављају на нижим надморским висинама и јужним експозицијама, у подручјима са пливим снежним покривачем. Уколико дође до кишних падавина, експозиција не игра важну улогу. Приликом кретања лавина, велика количина камења и земљишта може бити еродована са врха падина и акумулирана на равнијем терену. Америчко удружење за лавине и Национални центар за лавине издвојили су основне разлике у формирању сувих и влажних плочастих лавина.

Табела 14. Основне разлике између сувих и влажних плочастих лавина

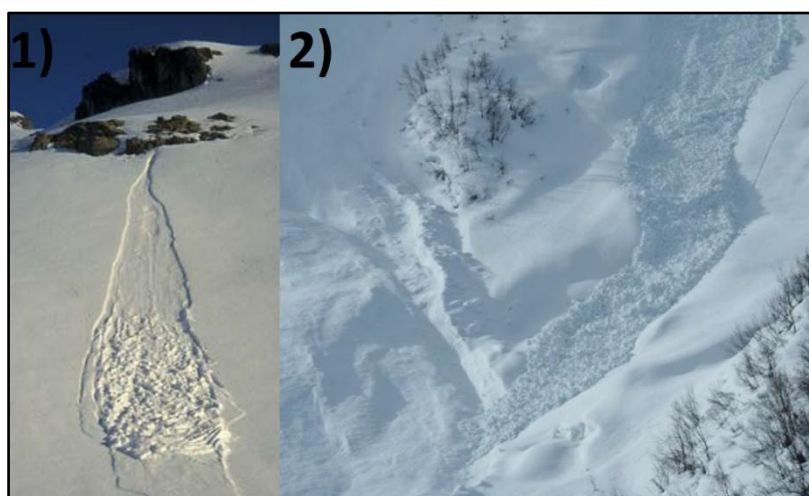
Фактори	Суве плочасте лавине	Влажне плочасте лавине
Узрочник	Превелики додатни притисак површинског слоја снежног покривача (плоче).	Смањење снаге слабог слоја.
Покретачи	У 90% случајева људски фактор.	Већина несрећа је последица природних лавина.
Атмосферски фактор	Нови снег и ветром нанет снег.	Киша, процес топљења и високе температуре.
Брзина кретања	Велика брзина (60-130 km/h) са облаком прашине.	Спорије лавине (15-30 km/h) обично без облака прашине.

Извор: American Avalanche Association, 2016

Иако нису толико учестале као суве, влажне плочасте лавине је изузетно тешко предвидети. Док суви снег има тенденцију да се понаша еластичније, влажан снег се одликује вискозношћу, тако да су тестови намерног изазивања лавине експлозивом мање ефикасни на примеру влажних лавина. Поред тога, нестабилност влажног снега је веома пролазна и просторно променљива појава која је повезана са транспортом воде у снегу (Schneebeli, 2004). Сматра се да је садржај 5-6% течне воде унутар снега добар индикатор за активност влажних лавина (Lehning и др., 1999). Олакшавајућа околност је да у већини случајева влажне плочасте лавине настају природним путем.

4.7.3. Лавине растреситог снега

Лавине растреситог снега имају лепезаст облик и ослобађају се из једне тачке. Формирају се на површини снежног покривача и разликују се од плочастих лавина по томе што немају јасну линију лома, већ се одликују „тачкастим” осипањем снежног материјала (Furdada и др., 2020). Јављају се углавном на веома стрмим теренима (угао нагиба већи од 35°). У највећем броју случајева, лавине растреситог снега настају природним путем, и изазивају 10% укупних смртних случајева од последица снежних лавина. Учесници зимских активности који покрену овакав тип лавине ретко подлежу повредама јер лавине у растреситом стању имају тенденцију да се активирају испод особе. За разлику од плочастих лавина, немају велику брзину кретања и запремину снежне масе. У зависности од садржаја воде, разликују се лавине сувог растреситог снега и лавине влажног растреситог снега.



Слика 22. Лавине сувог (1) и влажног (2) растреситог снега

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023; Varsom, 2024

Лавине сувог растреситог снега активирају се услед ослобађања сувог, нестабилног снега. Нестабилност снега настаје са новим снежним падавинама или фасетирањем постојећег, површинског снега.

Лавине влажног растреситог снега настају услед повећања сунчевог зрачења, губитка снаге и топљења површинског снежног слоја. Јављају се током касне зиме и раног пролећа, приликом повећања температуре, сунчевог зрачења или кишних падавина. Због своје велике тежине, лавине влажног растреситог снега имају знатно деструктивнију моћ од сувих и могу изазвати велике последице по животну средину.

4.7.4. Прашинасте лавине

Прашинасте лавине представљају комбинацију растреситих и плочастих лавина. Облак праха се формира у условима велике висинске разлике када количина снега постане суспендована у ваздуху (Sovilla и др., 2015). Прашинасте лавине могу достићи брзину од 300 km/h и изазвати велику штету.



Слика 23. Прашинасте лавине

Извор: Simon Fraser University, 2024, National avalanche center, 2024

Најчешће се јављају када је опасност од лавина веома висока. Доњу половину лавине чини плоча или густа концентрација снега или леда (Sovilla и др., 2018). У горњем делу присутан је растресити снег. Обично су узрочници прашинастих лавина природне творевине (комади леда или камена).

4.7.5. Ледене лавине

Приликом кретања ледника преко литице, долази до настанка ледопада. Падајући блокови често изазивају ледене лавине које крећу самостално или покрећу плочу на месту где лед пада са литице. Под утицајем гравитације лед се спушта низ падину, прогресивно се разбија на све мање и мање комаде и зауставља се када сила трења потпуно уништи његову кинетичку енергију (Tremper, 2008). Овакав тип лавина углавном настаје природним путем и карактеристичан је за високопланинске пределе на којима постоје глечери.



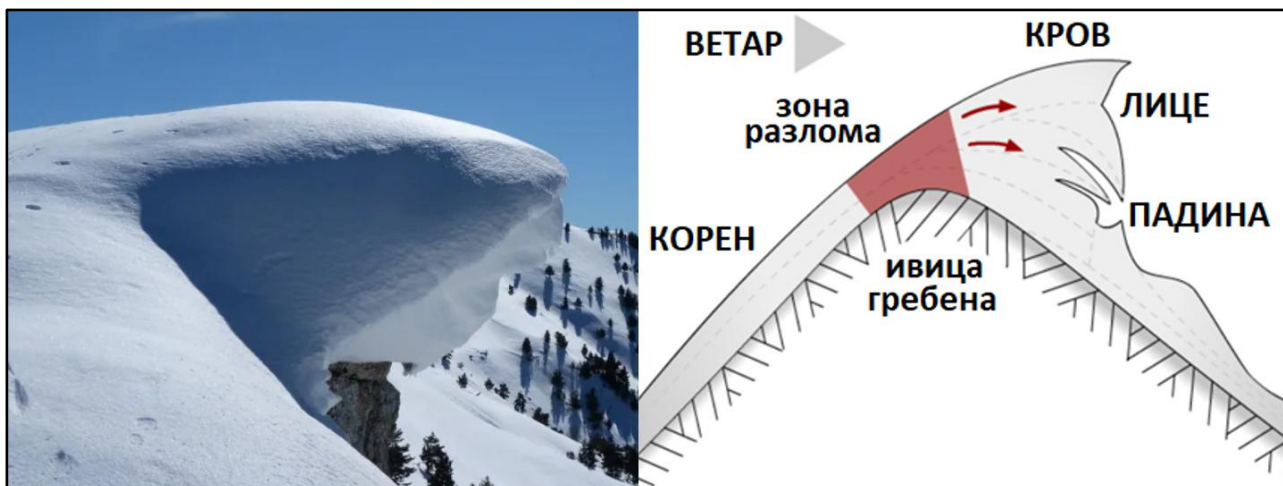
Слика 24. Ледене лавине

Извор: Adventure Medic, 2024; Alpenglowl, 2024

Због кретања и топљења ледника, јужна експозиција највише погодује ледопадима. Ледене лавине могу бити великих димензија са изузетно дугом зоном кретања. Упркос томе, оне изазивају знатно мање људских губитака у поређењу са сувим плочастим лавинама.

4.7.6. Веначне лавине

Венци представљају једну од главних атракција зимских рекреативаца. То су снежне структуре које се формирају на заветринским стрнама, по ивицама гребена. Настају навејавањем снега еродованог са приветринских страна. Лавина се формира када се природним или људским деловањем разломи венац и снежна маса обруши низ падину. Величина венца варира од неколико метара до више од 10 m, док је идеална брзина ветра за његово стварање 25-40 km/h.



Слика 25. Венац и структура венца

Извор: Tremper, 2008

Уколико настаје антропогеним деловањем, приликом обрушавања венца, линија лома снежне масе је знатно изнад особе. Због тога је од велике важности избегавати ивице гребена које представљају главни окидач веначних лавина. Иако се чини да је венац веома стабилан, испод ивице венца је присутан празан простор – ваздух.

Венци имају тенденцију да постану нестабилни током олуја. Сваки пут приликом јачег струјања ветра, он продужава венац ка споља, тако да свеж, нежан и лако покретан део венца обично лежи нестабилно близу ивице, док тврђи, стабилнији део обично формира корен (Tremper, 2008).

4.7.7. Бујичне лавине

Бујичне (slush) лавине представљају снежни еквивалент бујичним поплавама. Веома се ретко јављају у подручјима са умереном климом, док су широко распрострањене на северним географским ширинама (Аљаска, Гренланд, Норвешка, северни део Руске Федерације). За настанак већине бујичних лавина потребни су специфички едафски и орографски услови: стално замрзнуто земљиште (пермафрост) и нагиб терена $5-25^{\circ}$.



Слика 26. Бујичне лавине

Извор: University centre in Svalbard, 2025; Imaggeo, 2024

Лавина настаје услед накупљања воде изнад пермафроста, што доводи до велике нестабилности снежног покривача. Брзина кретања лавине износи $40-60 \text{ km/h}$ и због ограничене геопросторне дистрибуције, веома мали број људи страда од оваквог типа лавине.

4.7.8. Клизне лавине

Клизне лавине настају током пролећних месеци са повећањем температуре ваздуха и отопљавањем снега. Слободна вода накупља се дуж површине земље смањујући трење између снежног покривача и топографске површине.

За присуство течне воде на интерфејсу могу бити одговорна четири фактора (McClung и Clarke, 1987):

- 1) вода која са површине цури кроз снежни покривач;
- 2) топлота ослобођена из унутрашњости земље која топи снег на дну снежног покривача;
- 3) вода настала услед интензивног загревања околног (стеновитог) терена;
- 4) изливање подземних вода.

За настанак и кретање клизних лавина потребна је релативно глатка земљишна (травната) или стеновита подлога, као и већи нагиб терена ($30-40^{\circ}$). Напуштени пашњаци представљају посебно ризичне терене за покретање оваквог типа лавине (Newesely и др., 2000). Ослобађање целокупног снежног покривача јавља се као резултат одсуства шумске вегетације и клизања снега по земљи.



Слика 27. Клизне лавине

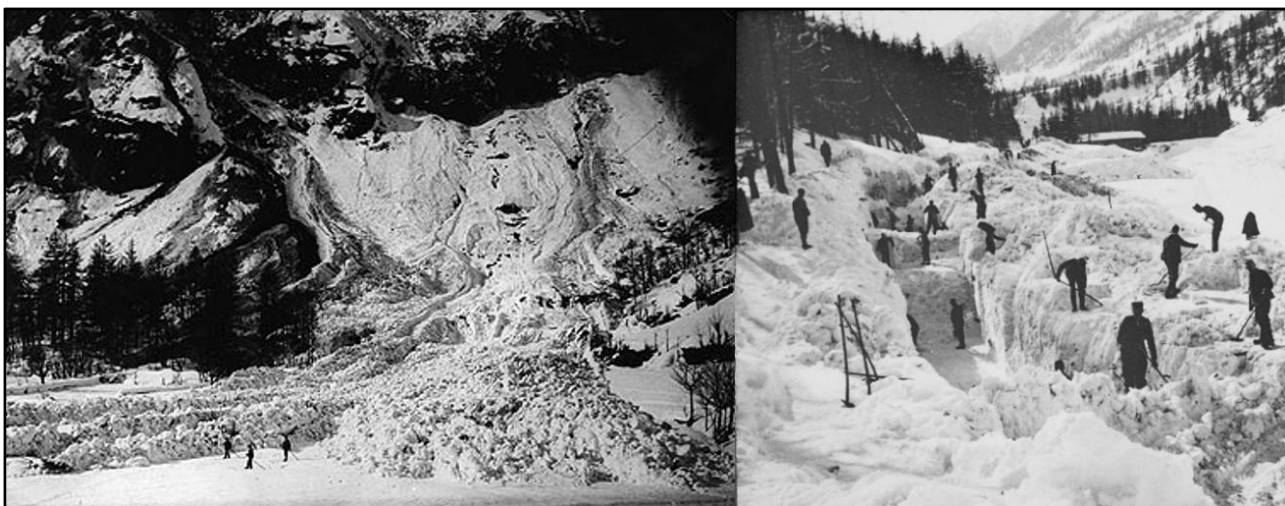
Извор: Höller, 2014; Utah Avalanche Center, 2024

Предиспонираност терена клизним лавинама се повећава уколико је растојање од шумских састојина веће од 20 m. Поред нагиба, важан морфометријски услов јесте и закривљеност терена. Већина клизних лавина активира се на конвексно окренутим падинама (In Der Gand и Zupančić, 1966). Овакав тип лавине најчешће настаје природним путем и може имати веома деструктивно дејство јер се велике количине густог снега покрећу одједном (Höller, 2014). Због већег вискозитета, влажан снег ће се лакше деформисати и тећи, за разлику од сувог. Често се могу јавити клизне пукотине које не значе нужно стварање лавине. Време од настанка пукотине до кретања лавине може бити од неколико секунди до неколико месеци, и због тога је процес предвиђања клизних лавина веома сложен.

За индентификацију клизних лавина, мерење брзине клизања и ширења пукотина, примењује се метод тамних пиксела. Ризична падина подложна је вишечасовном фотографисању, тако да се код сваког кретања клизне лавине повећава број тамних пиксела који указују на земљишну подлогу, у односу на број белих писела, који приказују снежни покривач (Van Herwijnen и др., 2013). Анализом фотографија у различитим временским серијама могуће је идентификовати брзину клизања. Кретање клизних лавина може се пратити и методом радарске интерферометрије, савременом техником која се заснива на примени активних сензора независно од временских услова и дневног осунчавања (Caduff и др., 2015).

4.8. ПРИМЕРИ РАЗОРНИХ СНЕЖНИХ ЛАВИНА У СВЕТУ

За три месеца у зимском периоду 1950/51. године забележена је појава 649 снежних лавина у аустријском и швајцарском делу Алпа. Услед специфичних временских прилика и сусрета атланског топлог фронта са поларним хладним фронтом, дошло је до стварања изузетних услова за појаву снежних лавина. Под утицајем јаког ветра и велике количине снега (више од 4,5 m) лавине су усмртиле 265 људи, оштећено је више од 900 објеката и хиљаде хектара шумског покривача (Latarnser и Ammann, 2001).



Слика 28. „Зима ужаса” у аустријско-швајцарским Алпима

Извор: Snow brains, 2024; Wikimedia Commons, 2024

У фебруару 2015. године у провинцији Панџшир (Авганистан), дошло је до велике природне катастрофе услед активирања лавина (Sediqmal и др., 2020). Допринос у стварању услова за настанак лавина дале су прве снежне падавине у новембру и децембру претходне године. Услед хладних временских услова, стабилан снег се метаморфисао у изузетно нестабилан слаб слој – дубинско иње. Током четири дана, због интензивних снежних падавина, лавине које су формиране на планинском и стеновитом терену, до своје зоне акумулације усмртиле су 310 људи, уништиле око 100 кућа и значајно оштетиле путну мрежу.



Слика 29. Последице лавина у Авганистану 2015. године

Извор: CNN, 2015; The Columbus Dispatch, 2015

Дана 10. јануара 1962. године у Перуу, на планини Уаскаран (6768 m, северни део Анда), масивни комад глечера се одвојио се и сручио у долину. Том приликом формирана је велика ледена лавина која је брзином од 130 km/h затрпала градове Ранрахирк и Хуараскучо стигавши до реке Рио Санта. Лавински материјал (лед, снег, блато, дрвеће) блокирао је ток реке што је довело до велике поплаве у оближњим насељима. У целокупној катастрофи страдало је више од 4000 људи, а биодиверзитет је претрпео значајне губитке (Plafker и Ericksen, 1978).

Током 1916. године, лавине настале у италијанским Алпима усмртиле су око 10.000 људи. Услед интензивних снежних падавина и повећане температуре ваздуха, стабилност снежног покривача у италијанским Доломитима се рапидно смањивала.

На планини Мармолада је 13. децембра 1916. године лавина запремине 200.000 тона усмртила неколико стотина аустријских војника. У наредних неколико дана, активирао се велики број снежних лавина у овом делу Алпа. Сматра се да су лавине иницирали војници (аустријски и италијански) у настојању да униште касарне једни другима за време I светског рата (Brugnara и др., 2016).



Слика 30. Изглед и геопросторна дистрибуција лавине у Перуу 1970. године

Извор: The American alpine club, 2024; Grid Adrenal, 2024

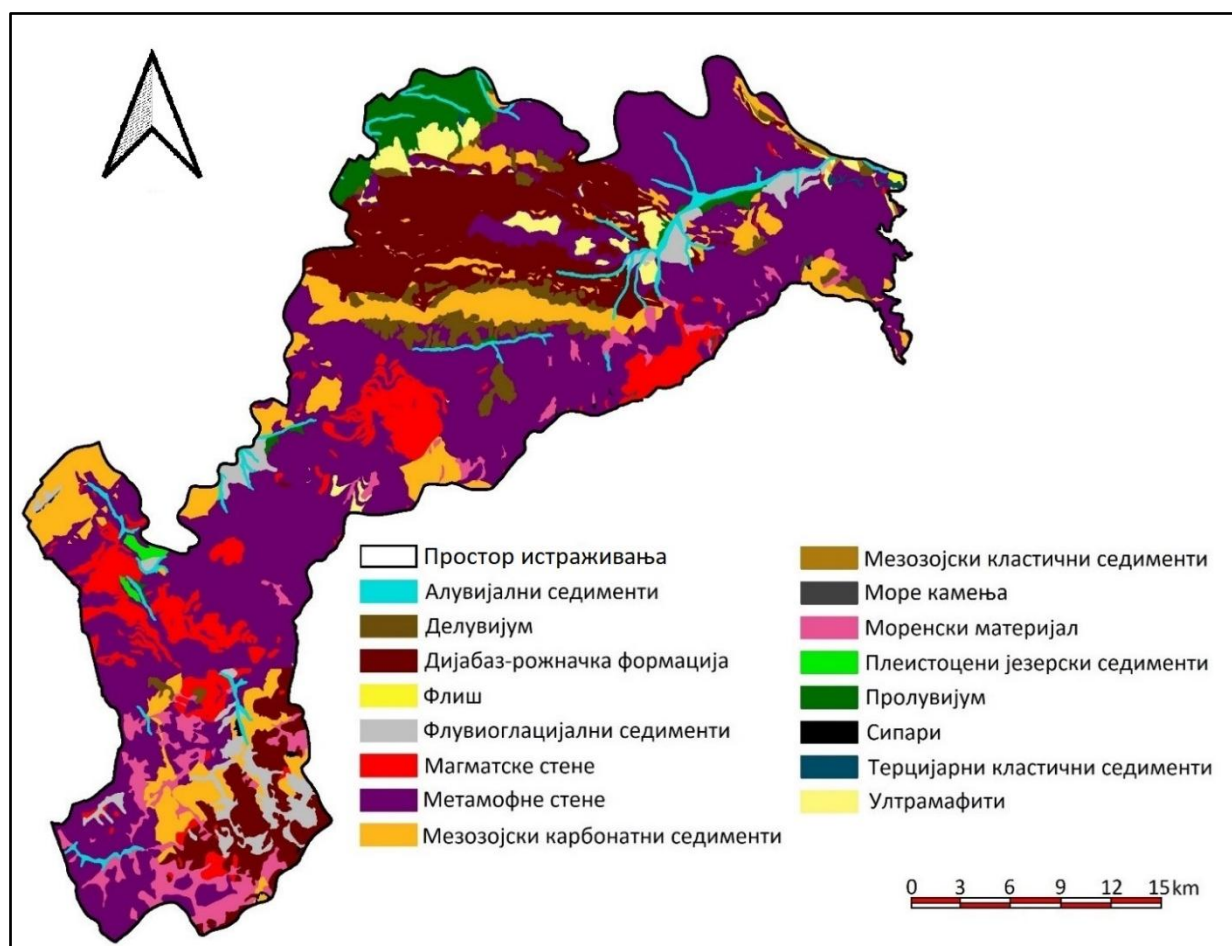
Највећа катастрофа изазвана снежним лавинама на свету догодила се у Перуу 31. маја 1970. године. Након подводног земљотреса, са планине Уаскаран ослободио се велики комад снега и глечера (дужине 1,6 km и ширине 910 m) који је на свом путу покупио друге материјале (растресита земља, камење, површинске воде) и великом брзином (у једном делу 280 km/h) погодио насеља Јунгај и Ранрахирк (Evans и др., 2009). Процене су да је ледена лавина усмртила више од 20.000 људи (Plafker и Ericksen, 1978; Haller, 2010).

5. ПРИРОДНИ УСЛОВИ КАО ДЕТЕРМИНАНТЕ СНЕЖНИХ ЛАВИНА

5.1. ГЕОЛОШКА ГРАЂА

Основни природни услов од којег зависе карактеристике осталих природних услова, јесте геолошка грађа. Стенски састав детерминише већину природних појава и процеса који се одвијају на површини Земљине коре. Литологија на природне хазарде утиче директно и индиректно (Новковић, 2016). Директно, у зависности од групе, састава и склопа стена, њихове генезе, структуре и текстуре или индиректно, одређујући педолошки састав, типове вегетације на одређеном терену, као и степен задржавања количине воде на топографској површини (водопропусност и вододрживост подлоге).

На територији Шар планине заступљене су три основне групе стена: магматске, седиментне и метаморфне, као и бројни подтипови у оквиру њих. Магматске стене настале су процесом хлађења магме и лаве, као и кристализацијом минерала који су у њима растопљени. Седиментне стене настају углавном у воденој површини процесом акумулације минерала. Метаморфним стенама називају се магматске или седиментне стене које су под одређеним притиском или температурама, делимично или потпуно измењене (Gerzina и Carević, 2019).



Слика 31. Геолошка карта Шар планине

Палеозоик. Најстарије и најраспрострањеније творевине на Шари јесу регионално метаморфисане стене палеозоика. Ову групу стена чине: албит-хлорит-серицитски шкриљци, кварцити, мермери и калкшисти, гнајс-гранити итд. Велики део гребена Шар планине (од Љуботена до Превалца, предео Велика коњушка-Кобилица), као и терен северно од Лепенца изграђују албит-хлорит-серицитски шкриљци.

Кварцити се јављају у облику сочива и прослојака у шкриљцима, северозападно од Љуботена и на падинама окренутим ка Сиринићкој жупи. Мермери и калкшисти су такође стратификовани у шкриљцима, у рељефу се углавном запажају као остенаци или стрми одсеци. Гнајс-гранити јављају се у облику веће магматске масе утиснуте у метаморфите на потезу Језерска чука – Бистра. Метаконгломерати изграђују територију од Бродосавца до Караниколице. Црни кристаласти кречњаци идентификовани су северозападно од Караниколице, у околини Ђаф Кадиса. Метагаброви и метадијабази констатовани су на терену северно и западно од Караниколице (Динић, 1990).

Табела 15. Типови стена и удео у укупној површини

Тип стене	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Метаморфне стене	470,62	48,33
Магматске стене	61,02	6,27
Мезозојски карбонатни седименти	118,32	12,15
Делувијум	26,04	2,67
Моренски материјал	50,36	5,17
Флувиоглацијални седименти	30,12	3,09
Сипари	1,76	0,18
Алувијални седименти	16,05	1,65
Дијабаз-ројначка формација	135,56	13,92
Мезозојски кластични седименти	1,79	0,18
Пролувијум	30,45	3,13
Море камења	0,86	0,09
Терцијарни кластични седименти	1,79	0,18
Флиш	0,54	0,06
Ултрамафити	25,41	2,61
Плеистоцени језерски седименти	3,01	0,31
Укупно	973,70	100,00

Пермотријас. Северозападне и северне падине Шар планине изграђене су од творевина пермотријаса, у чији састав улазе: габрови, кварцити, пелитско-псамитски слабо метаморфисани седименти, кристаласти кречњаци са ројначима, конгломерати, кварц-порфири и дијабази. Од истих стена изграђен је простор између Шаре и Ошљака и Шаре и Коритника.

Тријас. За прву периоду мезозојске ере на истраживаном простору карактеристично је присуство кречњака. Кречњаци са ројначима јављају се на Кобилици и код Рестелице. Мермераста кречњаци изграђују Љуботен, Ошљак, Коритник, насеља Злипоток и Крушево, у траговима се појављују у околини Готовуше и Ижанца.



Слика 32. Ултрамафитски масив (1) и тракасти амфиболити (2) на Шар планини

Јура. За јурске творевине карактеристично је присуство метаморфних стена у подини ултрамафита и олистостромског меланжа. Ултрамафити изграђују Острвицу и Мало Борче, као и неколико узвишења изнад Брезовице и Штрпца (Дурлевић, 2019). Олистромски мелаж (дијабаз-ројначка формација) јавља се у појасу између Ошљака и Језерске планине. Учествује у изградњи Коца Балкана. У састав метаморфних стена у подножју ултрамафита улазе: амфиболити, амфиболитски шкриљци, кварц-микашисти и хлорит-мусковитски шкриљци.

Креда. Седименти креде представљени су пешчарима, конгломератима, банковитим и слојевитим кречњацима. Од врха Куркулице до Брода констатовани су спрудни кречњаци и бројна очувана фауна од хипурита, радиоларита и корала.

Неоген. У другој периоди терцијара, на истраживаном простору настају шљунковито-песковите глине, издвојене код Доње Битиње и југоисточно од Брода.

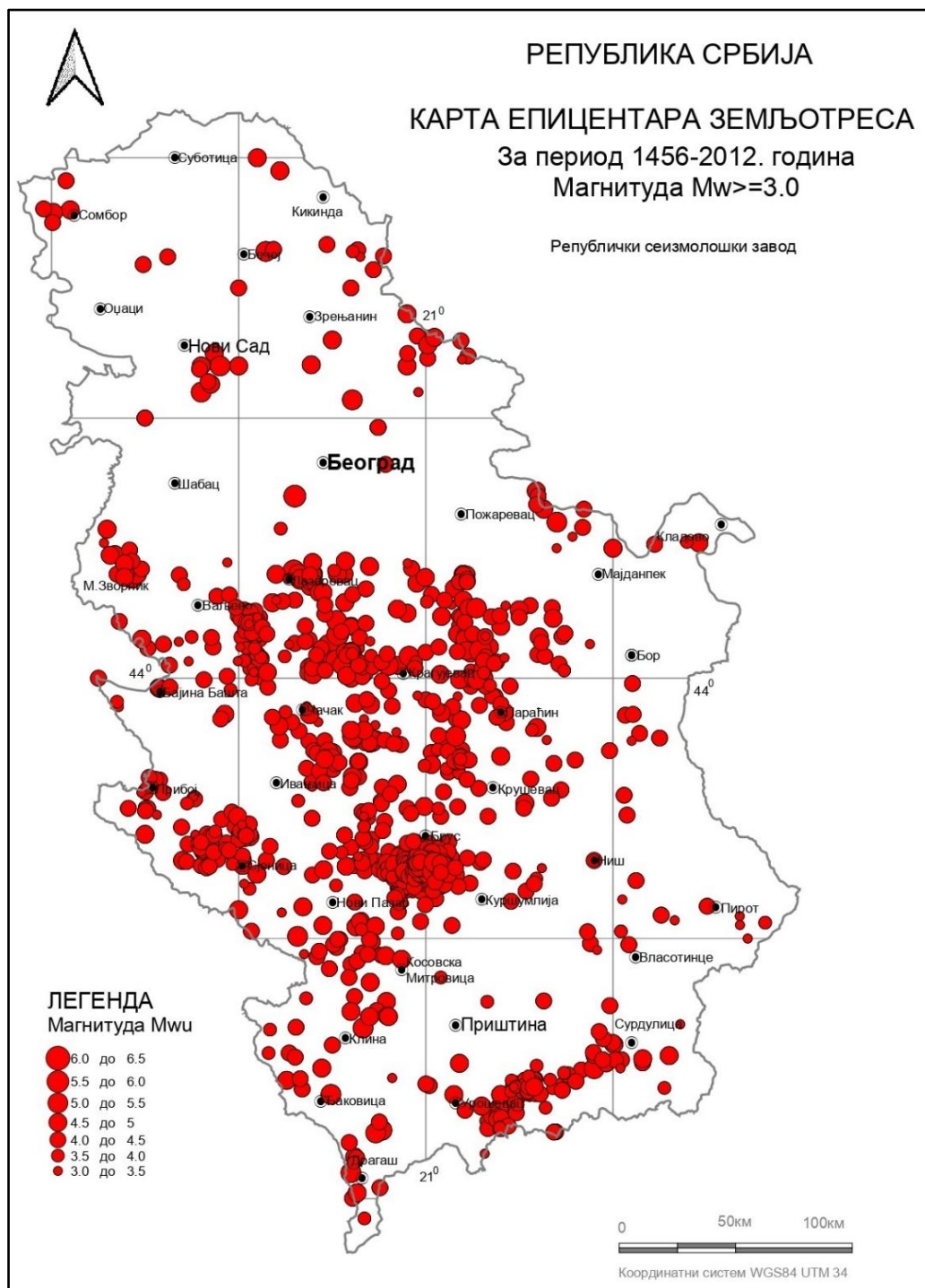
Квартар. Постојаност глацијације и снежне границе на Шари током плеистоцена условила је велику хетерогеност квартарних творевина. У оквиру квартара, издвајају се: сипари, флувиоглацијални седименти, делувијум, моренски материјал, мора камења, речне терасе, пролувијум и алувијум (Динић, 1990).

Геолошка грађа на процес снежних лавина утиче директно и индиректно. Директно, стенске формације могу имати заштитну и деструктивну улогу. У зависности од врсте стена: поједини квартарни седименти (сипари, море камења, струје камења) могу представљати „сидро“, односно препреку за стварање плоче и лавине. У другом случају, уколико лавина настане изнад поменутих седимената, камени блокови улазе у састав лавинског материјала и интензивирају деструктивну моћ лавине. Индиректан утицај зависи од вододрживости стенске подлоге: вода се услед топљења снега у већој мери задржава изнад водонепропусних стена и може представљати интерфејс између топографске површине и снежног слоја. Овакав интерфејс смањује силу трења чиме се стварају погодни услови за настанак клизних лавина у пролећним месецима. Посебна геолошка карактеристика која утиче на стварање и кретање лавина јесу раседи (Wen и др., 2022).

Раседи представљају трајне деформације стенских маса по којима је кретање јасно видљиво у величинском подручју (Gerzina и Carević, 2019; Yariyan и др., 2020). Читав простор истраживања испресецан је бројним раседима различите величине. Уколико је коса раседна површ која дели стену на два дела веће површине, врло је вероватно да ће током велике количине снега у високопланинском подручју Шаре доћи до формирања лавине.

5.2. СЕИЗМИЧКИ ХАЗАРД

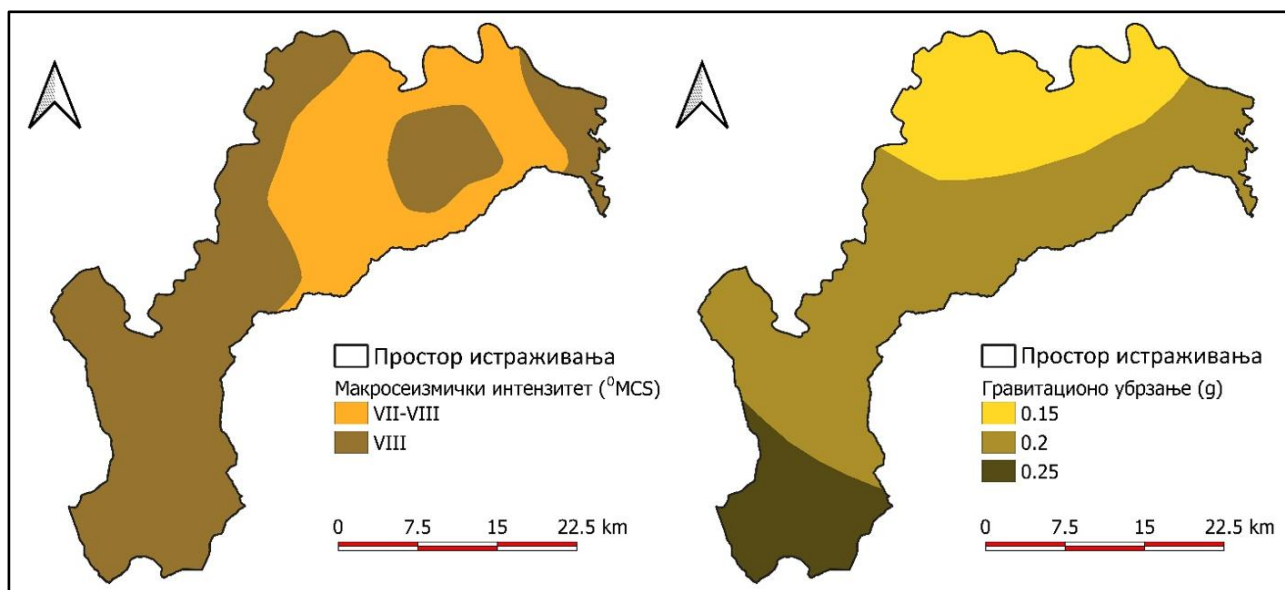
Сеизмички hazard дефинише се као вероватноћа подрхтавања тла одговарајућих карактеристика која ће се манифестовати на проучаваној локацији на одређени начин (Вајић, 2018; Zhu и др., 2023). Процена сеизмичког hazardа је важна мера за ублажавање утицаја земљотреса и стога је добила велику пажњу многих научника широм света. За потребе прорачуна сеизмичког hazardа, потребно је саставити каталог, односно изградити инвентар земљотреса који су се догодили на простору истраживања или у непосредном окружењу.



Слика 33. Карта епицентара земљотреса у Србији

Извор: Републички сеизмолошки завод, 2024

Шар планина представља једну од сеизмички најактивнијих зона у Србији. Само подручје није угрожено појавом аутохтоних, јачих потреса, али је изложено врло јаким сеизмичким дејствима земљотреса чији се епицентри налазе на мањој удаљености. Први записи о земљотресима у овом делу Србије датирају из 1457. године, када се у околини Призрена десио земљотрес интензитета IX⁰ MCS. После 1900. године, евидентиран је земљотрес у подручју Драгаша интензитета VIII⁰ MCS. Августа 1921. године између Урошевца и Витине евидентиран је земљотрес који је у Штрпцу регистрован интензитетом од VIII⁰ MCS (Динић, 1990). Дана 25. децембра 2023. године забележен је земљотрес у Штрпцу магнитуде 2,5⁰ по Рихтеровој скали. Методама вероватноће врши се прорачун хазарда. Сеизмички хазард се представља преко максималног хоризонталног убрзања (PGA), а сеизмичко дејство преко референтног максималног хоризонталног убрзања основног тла које одговара повратном периоду сеизмичког дејства од 475 година (Републички сеизмолошки завод, 2024).



Слика 34. Карте макросеизмичког интензитета и гравитационог убрзања за повратни период од 475 година

Извор: Републички сеизмолошки завод, 2024

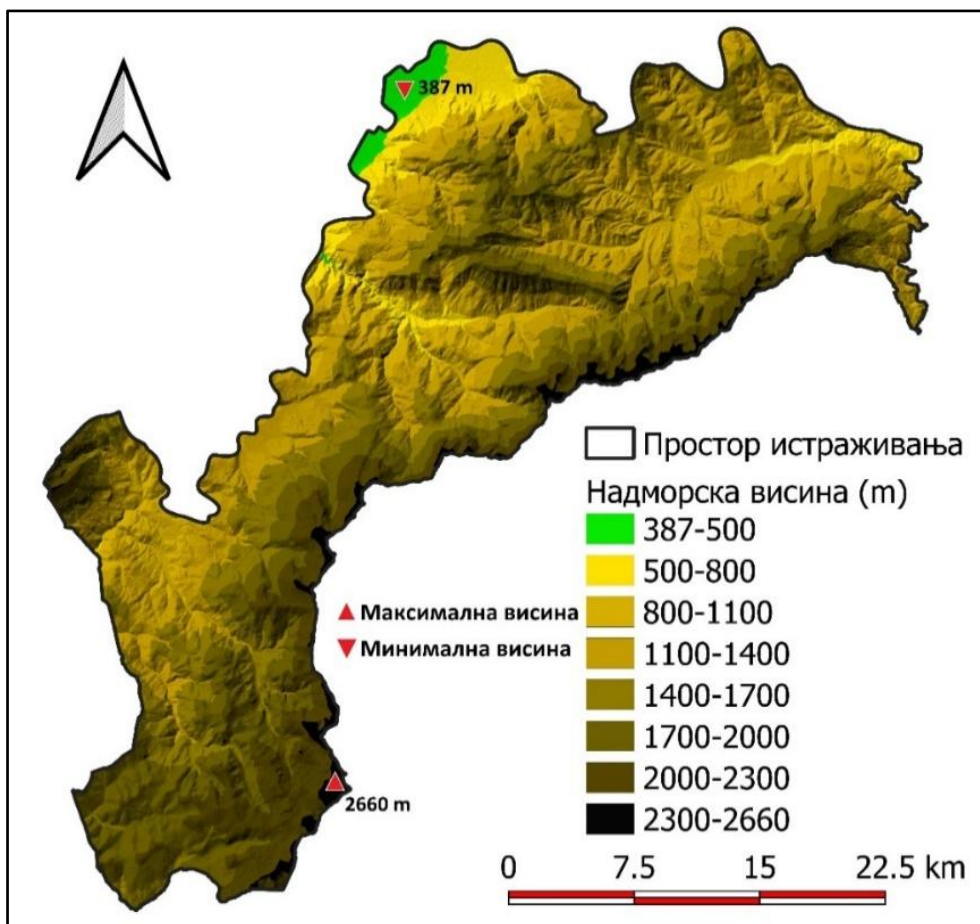
Према доступним подацима и прорачунима, 639,2 km² територије Шар планине (65,6%) одликује се микросеизмичким интензитетом од VIII⁰ MCS, док је остатак територије површине 334,5 km² (34,4%) подложен интензитету VII-VIII⁰ MCS. Са аспекта гравитационог убрзања, односно максималног хоризонталног убрзања, јужни део простора истраживања (Гора) одликује се највећом вредношћу (0,25) која покрива 138,6 km² (14,2%) територије. У највећем делу простора истраживања (575,6 km²) предвиђено убрзање износи 0,2 што чини 59,1% укупне површине. Северни део Шаре на површини од 259,5 km² (26,7%) одликује се вредношћу од 0,15. Приказани резултати и вредности потврђују да је простор Шаре сеизмички веома предиспониран. Потенцијални земљотреси на овом подручју у зимским месецима представљали би један од главних покретача снежних лавина. Оваква појава означава земљотресе као примарни хазард, док би лавине представљале секундарни хазард. У случају подрхтавања тла већег или мањег интензитета, могло би доћи до активирања лавина на угроженим падинама.

5.3. ГЕОМОРФОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Основни природни услов и модификатор интензитета осталих природних услова и процеса јесте иницијални рељеф (Драгићевић и Филиповић, 2016). Геоморфолошке карактеристике представљене надморском висином, набигом, рашчлањеношћу, експозицијом и закривљеношћу терена полазна су основа за анализу природних услова који утичу на формирање снежних лавина. Квантитативном геоморфолошком анализом могуће је нумерички приказати морфолошке карактеристике и издвојити различите облике и процесе у рељефу.

5.3.1. Хипсометрија

Анализом хипсометријских карактеристика одређеног простора формира се полазна основа свих даљих геоморфолошких истраживања. На интензитет природних процеса, надморска висина има директан и индиректан утицај. Директан утицај приказује везу између висинског зонирања рељефа и природних услова које карактеришу одређене надморске висине (Драгићевић и Филиповић, 2016). За проучавање снежних лавина, потребна су опсежна геоморфолошка истраживања високопланинских области (изнад 2000 m) због настанка и кретања лавинског материјала. Зона акумулације лавина зависи од микрорељефних карактеристика. Услед настанка великих снежних лавина, зона акумулације снега на Шар планини може бити и на висинама мањим од 1500 m. Индиректно, надморска висина утиче на промену вредности климатских елемената и биогеографских услова на одређеној територији. Са порастом надморске висине долази до повећања количине падавина, повећања облачности и смањења температуре ваздуха. У зависности од надморске висине и положаја планинског венца, ваздушна струјања иницирају потпуно различите микроклиматске карактеристике на приветринској и заветринској страни. На приветринским странама услед повећане количине падавина и веће брзине ветра, велики снежни наноси могу бити еродовани са једне територије и акумулирани на другу, при чему је ветром нанет снег често окидач лавина. Висинске зоне утичу и на педолошке карактеристике.



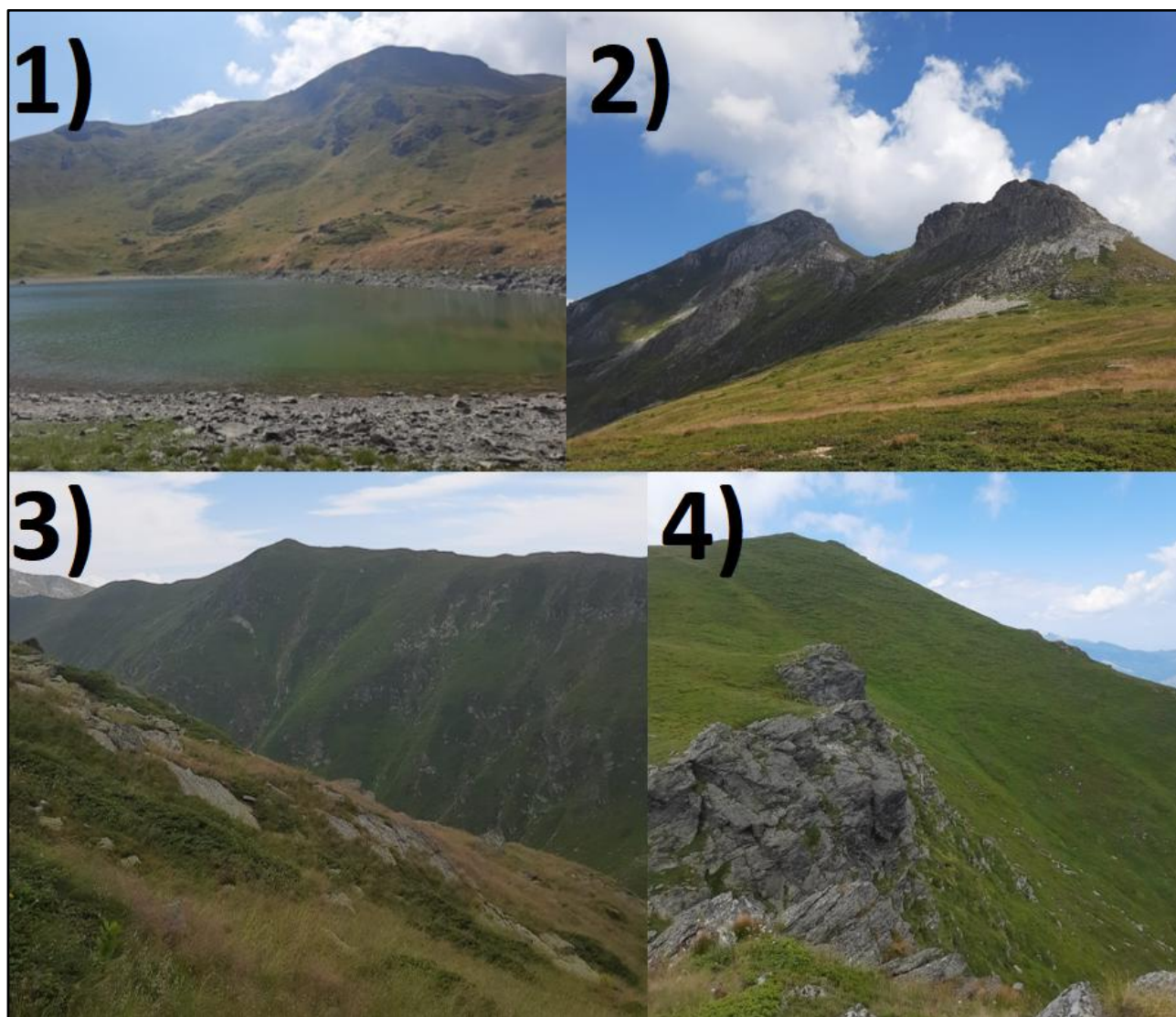
Слика 35. Хипсометријска карта Шар планине

Средња надморска висина истраживаног простора износи 1441 m. Једина зона испод 500 m налази се у северном делу предвиђене границе Националног парка, обухвата насеља у долини Грејковачке и Коришке реке. То је област која геоморфолошки припада Призренској котлини. Друга зона (500-800 m) обухвата насеља при дну Сиринићке и Средачке жупе, као и насељена места (Грејковце, Муштуиште) на контакту Призренске котлине и Шарске групе планина. Зона 800-1100 m преовладава у највећем делу Сиринићке и Средачке жупе, као и у долини Плавске реке. Висинска зона 1100-1400 m процентуално је најзаступљенија у истраживаном простору (24.69%), карактеристична је за Опоље и Гору. Ризик од лавина јавља се од зоне 1400-1700 m, јер су на овој висини смештена велика стамбена и туристичка насеља (Рестелица, Злипоток, Брод, ски центри „Брезовица" и „Брод-Арсена"). Зона акумулације снега након последње велике лавине у Рестелици била је на око 1500 m. Узимајући у обзир остале хипсометријске зоне изнад 1700 m, може се рећи да је на основу надморске висине половина истраживаног простора (50,92%) погодна за анализу георпосторне дистрибуције снежних лавина.

Табела 16. Висинске зоне на Шар планини

Висинска зона	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
387-500	13,06	1,34
500-800	57,39	5,89
800-1100	166,83	17,13
1100-1400	240,44	24,69
1400-1700	197,20	20,25
1700-2000	169,55	17,41
2000-2300	108,02	11,09
2300-2660	21,16	2,17
Укупно	973,65	100,00

На истраживаном простору забележено је више од 85 врхова чија надморска висина прелази 2000 m. Од тога, 21 врх прелази коту од 2500 m. Највиши планински врх Србије – Велика Рудока (2660 m), налази се у јужном делу простора истраживања. Најнижа тачка (387 m) налази се у северном делу истраживане територије, у долини Грејковачке реке, тако да висинска разлика највише и најниже коте износи 2273 m.



Слика 36. Врхови Скарпа (1), Вртоп (2), Куле (3) и Тумба (4)

Због одсуства шумске вегетације и велике количине снега током зимског и јесењег периода, скоро сви врхови на Шар планини подложни су настанку одређених типова лавина. Идентификација лавинозних терена је знатно сложенија на већим надморским висинама, у условима алпске климе (изнад 2000 m) и одсуства трагова оштећења вегетације. Теренска истраживања у овом случају захтевају познавање морфометријских услова под којима се лавине активирају, али и познавање кретања других геоморфолошких или геолошких појава, попут тецишта. Често је зона кретања лавине и тецишта идентична, па се зато у нумеричком моделовању кретања користе идентични критеријуми за прорачун угрожености. Висинска граница изнад које настају лавине се не може прецизно утврдити услед постојања различитих геоморфолошких, климатолошких и биогеографских карактеристика на микролокацијама. На примеру Шар планине, већина лавина се активира на висинама изнад 2000 m. Међутим, њихово кретање и зона акумулације снега некада може бити на висинској зони испод 1500 m, тако да је потребно сагледати комплетну анатомију лавинских токова.

5.3.2. Нагиб терена

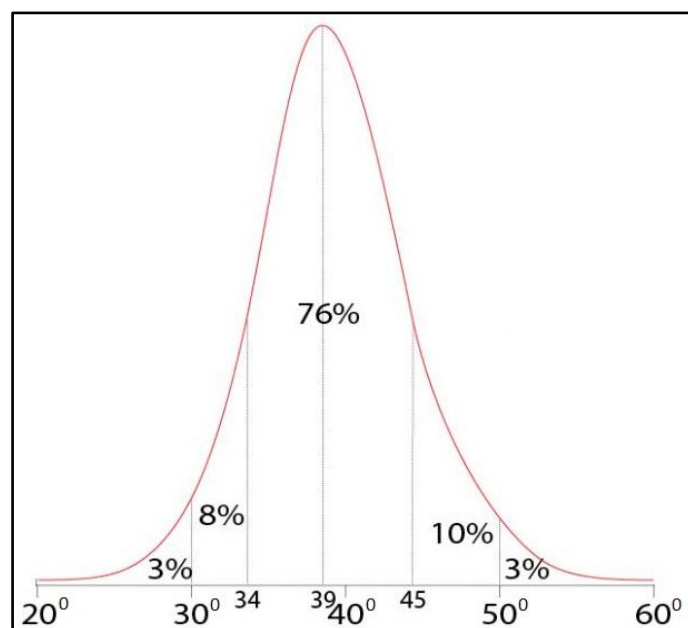
Угао који површина терена заклапа са хоризонталном равни представља нагиб терена (Новковић, 2016). Нагиб рељефа представља најзначајнији морфометријски услов који дефинише формирање снежне лавине, али и других геохазарда. На нагиб терена константно утичу силе гравитације и трења. Од степена инклинације зависи која ће сила имати већи интензитет. Са повећањем нагиба терена, смањује се сила трења и пропада сила гравитације. Услед овог процеса, сила трења слаби између земљишта и снега или између једног и другог снежног слоја, при чему се стварају услови за покретање лавине. Терени са степеном инклинације 35-45° сматрају се најподложнијим настанку снежних лавина (Schaerer и McClung, 2006; Tremper, 2008).

Табела 17. Формирање лавина на основу нагиба терена

Нагиб терена (°)	Тип лавина и учесталост
10-25	Бујичне лавине
25-35	Појава плочастих лавина и растреситих лавина влажног снега
35-45	Појава лавина свих типова
45-55	Честа појава плочастих лавина мање величине
30-60	Појава растреситих лавина сувог снега
60-90	Врло ретка појава снежних лавина

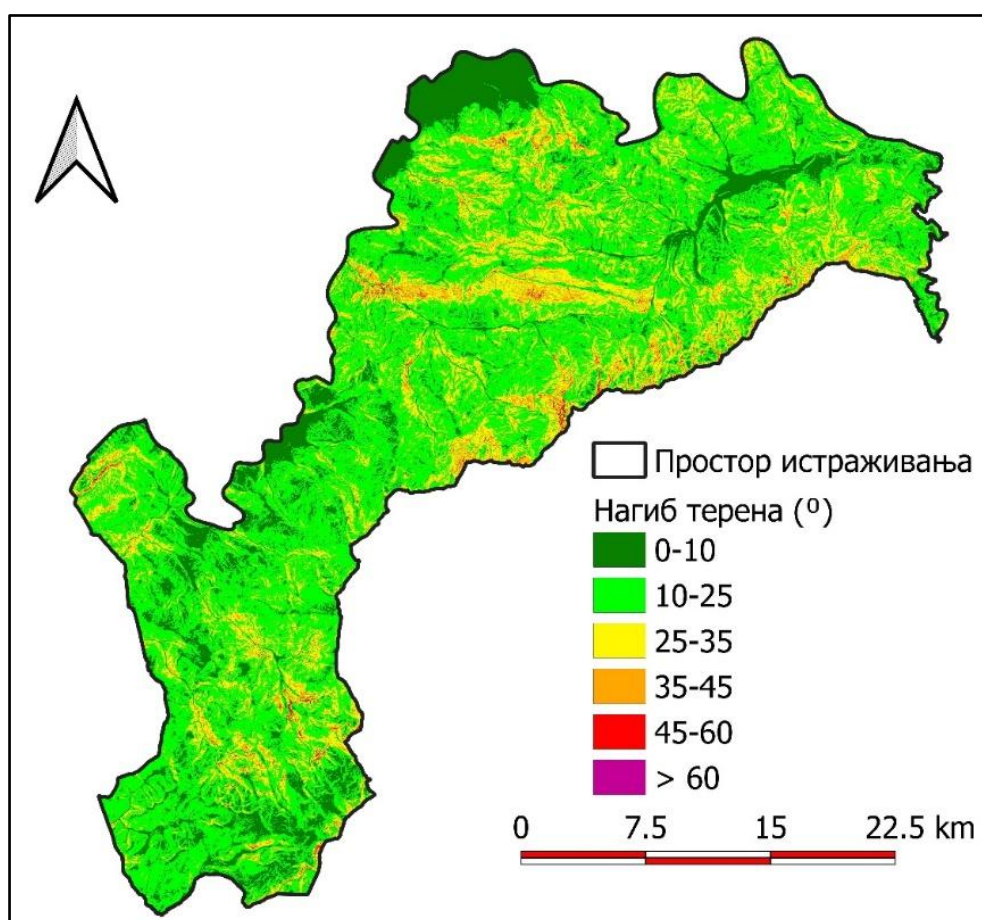
Извор: Schaerer и McClung, 2006

На мање стримијим теренима (10-25°) услед специфичних природних услова може доћи до стварања бујичних лавина. Међутим, оне нису карактеристичне за Шар планину, јер је за њихов настанак као подлога потребан пермафрост, тако да се оне јављају у областима поларне и субполарне климе. Од типова лавина, на Шари се могу идентификовати: плочасте лавине, лавине растреситог снега и клизне лавине. У зависности од временског периода, могу се јавити лавине сувог снега (јануар, фебруар) или лавине влажног снега (март, април, мај).



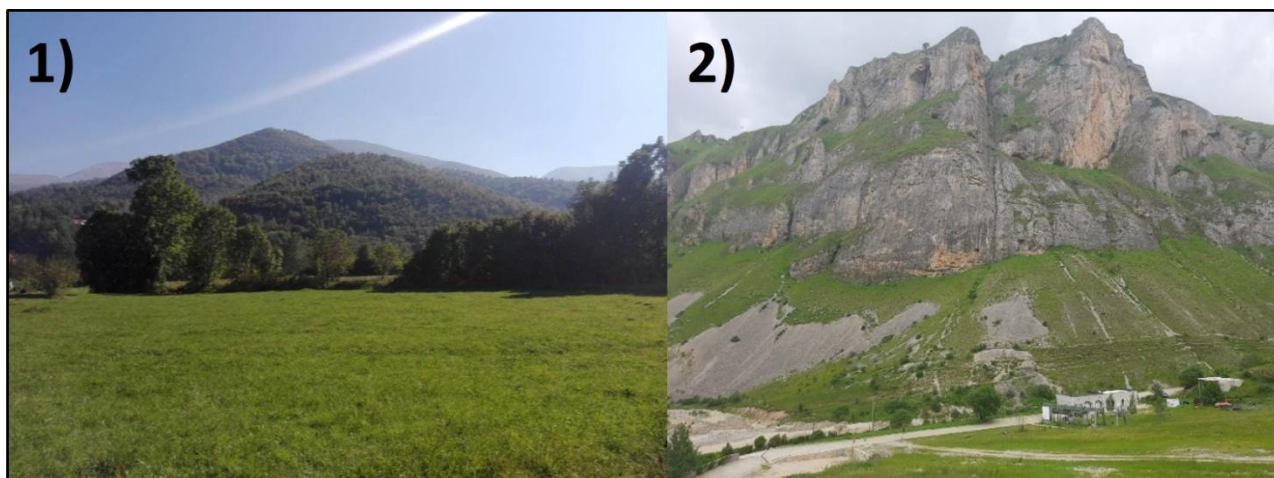
Слика 37. Учесталост лавина на основу нагиба терена
Извор: Utah Avalanche Center, 2024

Са повећањем нагиба рељефа, повећава се сила гравитације до зоне 38-40° која је означена као најкритичнија за покретање лавина (Tremper, 2008). Након 40°, опасност од лавина се континуирано смањује. За потребе ГИС анализе и нумеричког моделовања, неопходно је издвојити терене са зоном нагиба 20-60° и означити овај интервал као погодан за формирање лавина свих типова на просторима умерене географске ширине.



Слика 38. Карта нагиба терена Шар планине

На територији Шар планине средњи нагиб терена износи 19° . Равни терени карактеристични су за ниже делове Сиринићке и Средачке жупе, Опоља, Горе, ободног дела Призренске котлине, као и за јужне делове Шаре на којима су заступљена тресетишта.



Слика 39. Равничарски део (1) и најстрмија литица (2) – Градски камен

Зона нагиба $10-25^{\circ}$ покрива скоро 60% истраживаног подручја. Ово су углавном територије између котлина и планинских врхова. Веома често овај простор представља зону акумулације снежних лавина. У интервалу $25-35^{\circ}$ налази се 1/5 површине Шар планине. Након настанка лавина, ова зона се може дефинисати као „зона кретања” лавина.

Табела 18. Нагиб терена на Шар планини

Нагиб терена	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
0-10	157,48	16,17
10-25	579,77	59,55
25-35	194,03	19,93
35-45	38,07	3,91
45-60	4,09	0,42
>60	0,21	0,02
Укупно	973,65	100,00

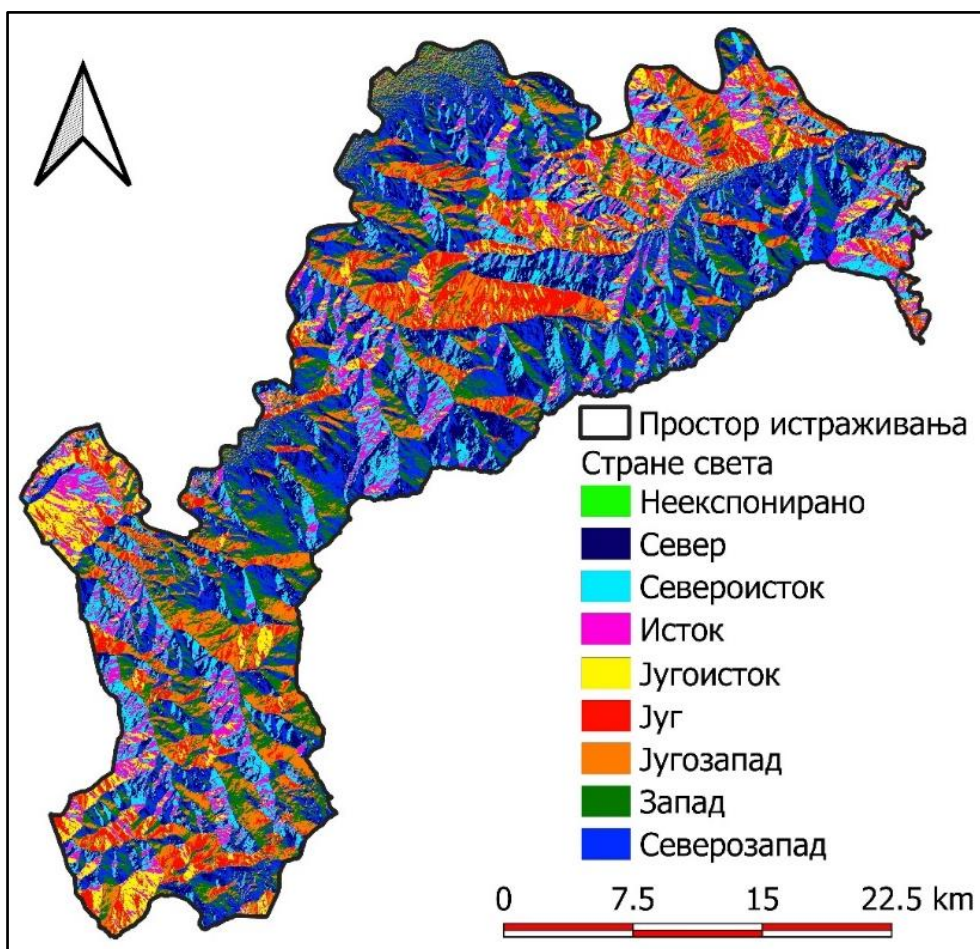
Најризичнија зона ($35-45^{\circ}$) заступљена је на 38 km² површине. Карактеристична је за подножје планинских врхова, простор између литица и дна циркова и простор испод гребена Шаре. Терени са нагибом $45-60^{\circ}$ и изнад 60° су веома мало заступљени на Шари (< 1%). Представљени су углавном кречњачким литицама, попут Градског камена, најстрмије тачке у истраживаном простору.

5.3.3. Експозиција

Експозиција топографске површине (осунчаност рељефа) има важну улогу у модификацији микроклиматских елемената. Експозиција представља морфометријски услов који утиче на интензитет природних појава и процеса, али и на појаву и размештај антропогених активности.

Снежне лавине се формирају на свим експозицијама, али не подједнако. Највећи број свих типова лавина на Шари активира се на „хладним“ експозицијама (север, североисток, северозапад) због знатно екстремнијих микроклиматских карактеристика (ниска температура ваздуха и одсуство директног сунчевог зрачења) у односу на остале стране света.

На овај начин, снег се дуже задржава на северним падинама и његова дебљина је много већа. Осунчаност терена утиче и на физичке карактеристике снежног покривача (смицање, чврстоћа, динамика топљења, температурни градијент) (Bakermans и Jamieson, 2006; Нао и др., 2021).



Слика 40. Карта експозиције рељефа Шар планине

На примеру Шар планине, током теренских истраживања 1989/1990, више од 81% евидентираних снежних лавина формирано је на хладним експозицијама (Динић, 1990). У Рестелици, територија која је била изложена великој лавини 2012. године окренута је ка северу и северозападу. Унутар простора истраживања, око 47% територије изложено је северу, североистоку и северозападу. Највећим делом „хладна“ експозиција присутна је на гребену и непосредном подножју Шаре - терену који је највише предиспониран снежним лавинама.

Табела 19. Експозиција рељефа на Шар планини

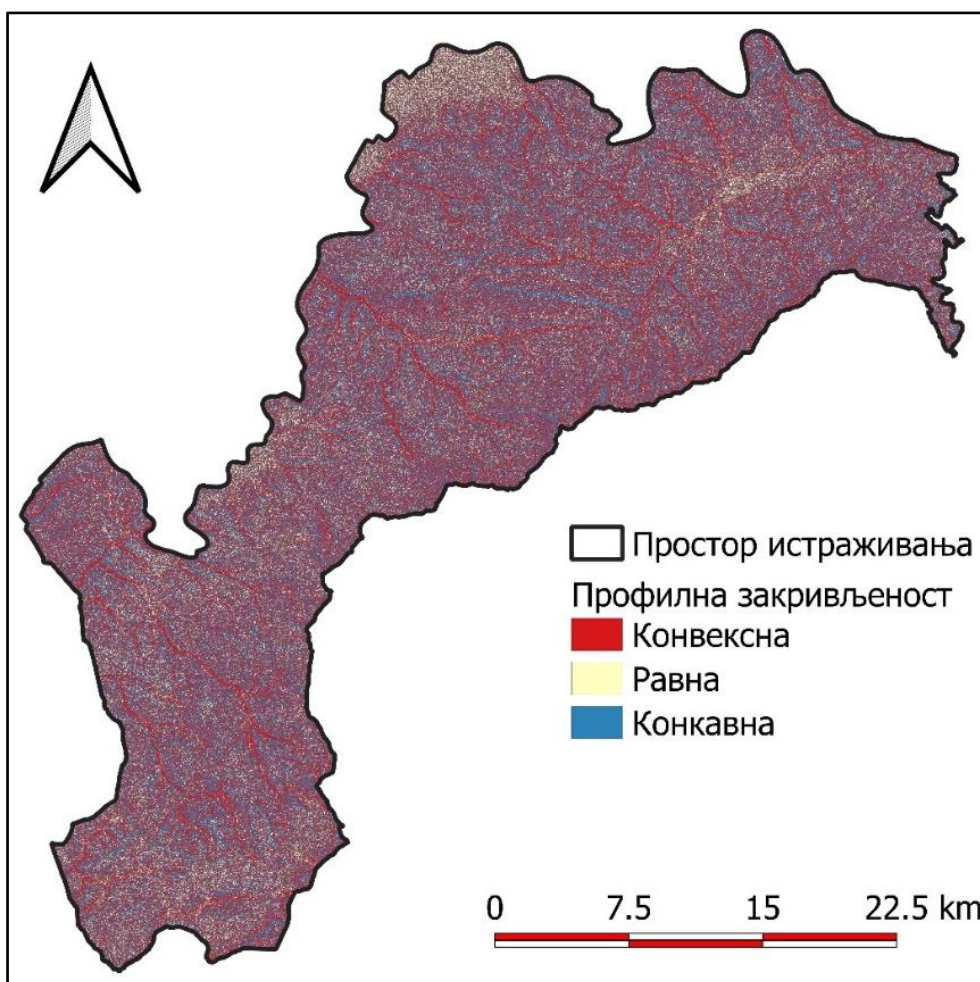
Страна света	Површина (km ²)	Удео у површини (%)
Неекспонирано	3,28	0,34
Север	163,47	16,79
Североисток	133,98	13,76
Исток	90,27	9,27
Југоисток	74,59	7,66
Југ	90,21	9,26
Југозапад	113,26	11,63
Запад	140,31	14,41
Северозапад	164,36	16,88
Укупно	973,73	100,00

Присојне стране покривају око 28% Шар планине, ка истоку је изложено 9,27% терена, док је ка западу експонирано 14,41% укупне површине. Веома мали проценат (0,34%) представља неекспониране (равне) територије, које су заступљене на малим надморским висинама, у приобалним деловима већих река. Глобално посматрано, експозиција представља споредни фактор приликом анализе угрожености снежним лавинама, зато што северна експозиција није доминантна за формирање лавина у свим деловима света, већ умногоме зависи од локалних рељефних и микроклиматских услова. Високопланински предели попут Хималаја и Анда одликују се јасном снежном границом, изнад које се углавном на северним експозицијама формирају ледници, док су падине окренуте ка југу погодније за настанак снежних лавина (Singh и др., 2020). Приликом анализе угрожених подручја и евалуације експозиције, потребно је познавати локалне орографске и климатске услове како би прорачун на крају био релевантан. Са порастом надморске висине (> 3000 m), смањује се доминација северне експозиције за настанак снежних лавина.

5.3.4. Закривљеност терена

Закривљеност терена је морфометријска карактеристика која представља однос између реалне површине терена и идеалне равни у одређеној тачки. Посматрано у одређеном правцу, закривљеност је најчешће изведена из нагиба и експозиције (Новковић, 2016). За анализу угрожених територија снежним лавинама, од важности су два типа закривљености терена: профилна и планарна.

Профилна (вертикална) закривљеност је паралелна са смером максималног нагиба. У ГИС-у, негативна вредност указује да је површина у ћелији конвексна. Позитивна вредност приказује конкавну површину. Вредност нула указује да је површина линеарна, односно равна. Профилна закривљеност утиче на убрзање или успоравање кретања воде на топографској површини (Buckley, 2010).



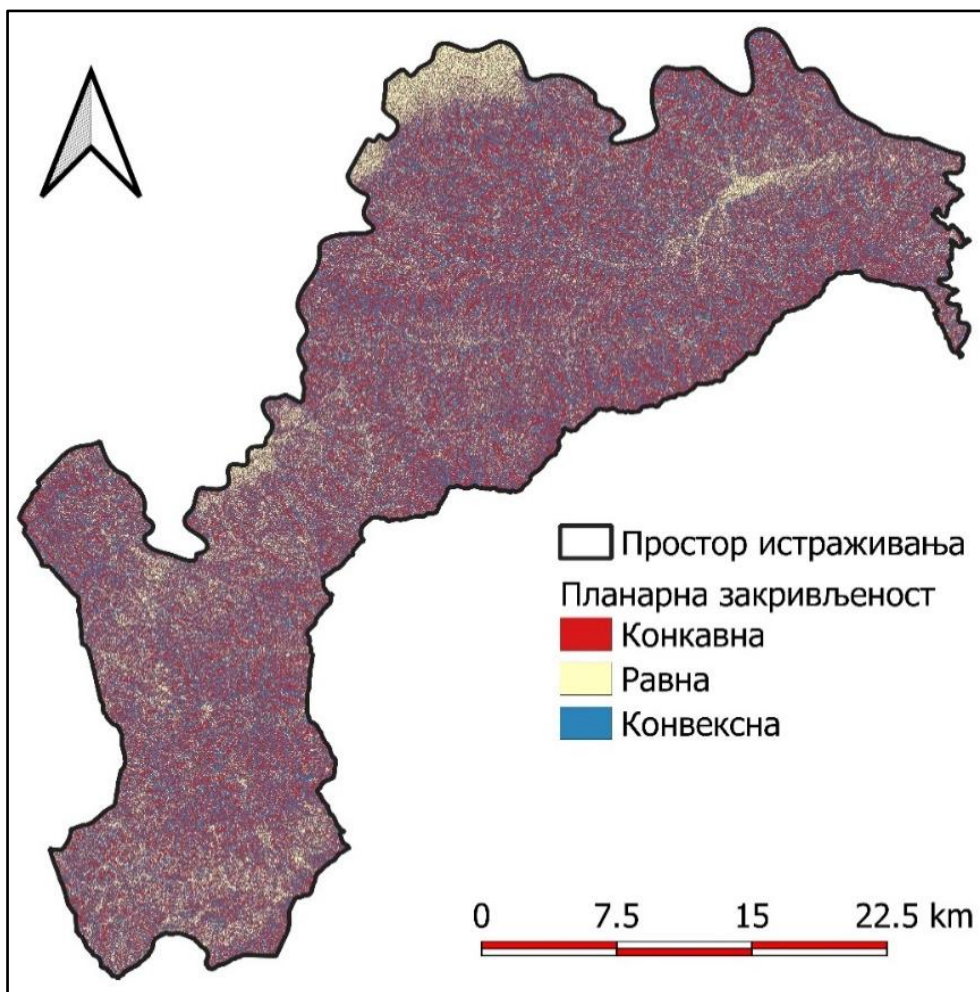
Слика 41. Карта профилне закривљености Шар планине

На Шари, конвексна (44,85%) и конкавна профилна закривљеност (44,32%) су скоро подједнако заступљене. Равне површине заузимају 10,84% површине.

Табела 20. Класификација профилне закривљености Шар планине

Закривљеност	Површина (km ²)	Удео у површини (%)
Конвексна	436,66	44,85
Равна	105,51	10,84
Конкавна	431,48	44,32
Укупно	973,65	100,00

Планарна (хоризонтална) закривљеност је управна на правац максималног нагиба. У ГИС анализи, позитивна вредност писела указује да је површина конвексна. Негативна вредност приказује планарно конкаван терен, док вредност нула указује на линеарну (равну) површину (Arabameri и Pourghasemi, 2019). Планарна закривљеност односи се на меру топографске конвергенције и дивергенције (Buckley, 2010).



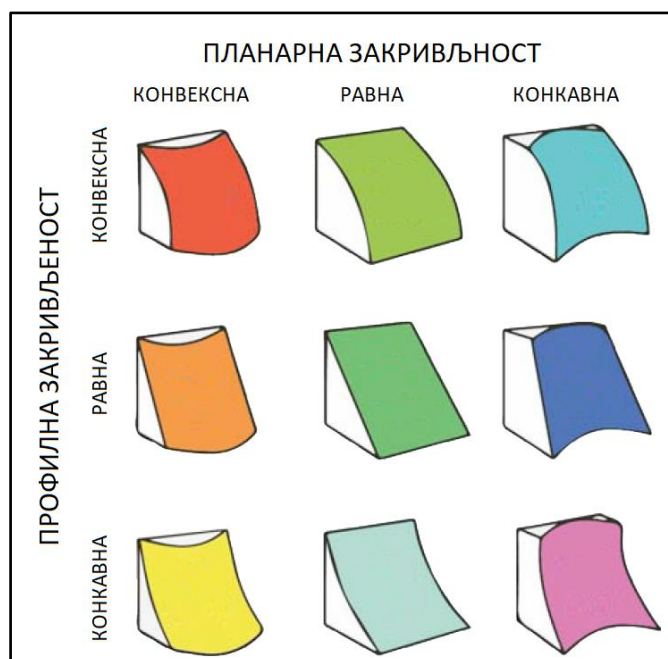
Слика 42. Карта планарне закривљености Шар планине

Највећи удео на Шари заузима конвексна планарна закривљеност (43,34%), незнатно мање су заступљене падине са конкавном закривљеношћу (41,92%), док су равне површине изражене на 14,74% територије.

Табела 21. Класификација планарне закривљености Шар планине

Закривљеност	Површина (km ²)	Удео у површини (%)
Конкавна	408,14	41,92
Равна	143,54	14,74
Конвексна	421,97	43,34
Укупно	973,65	100,00

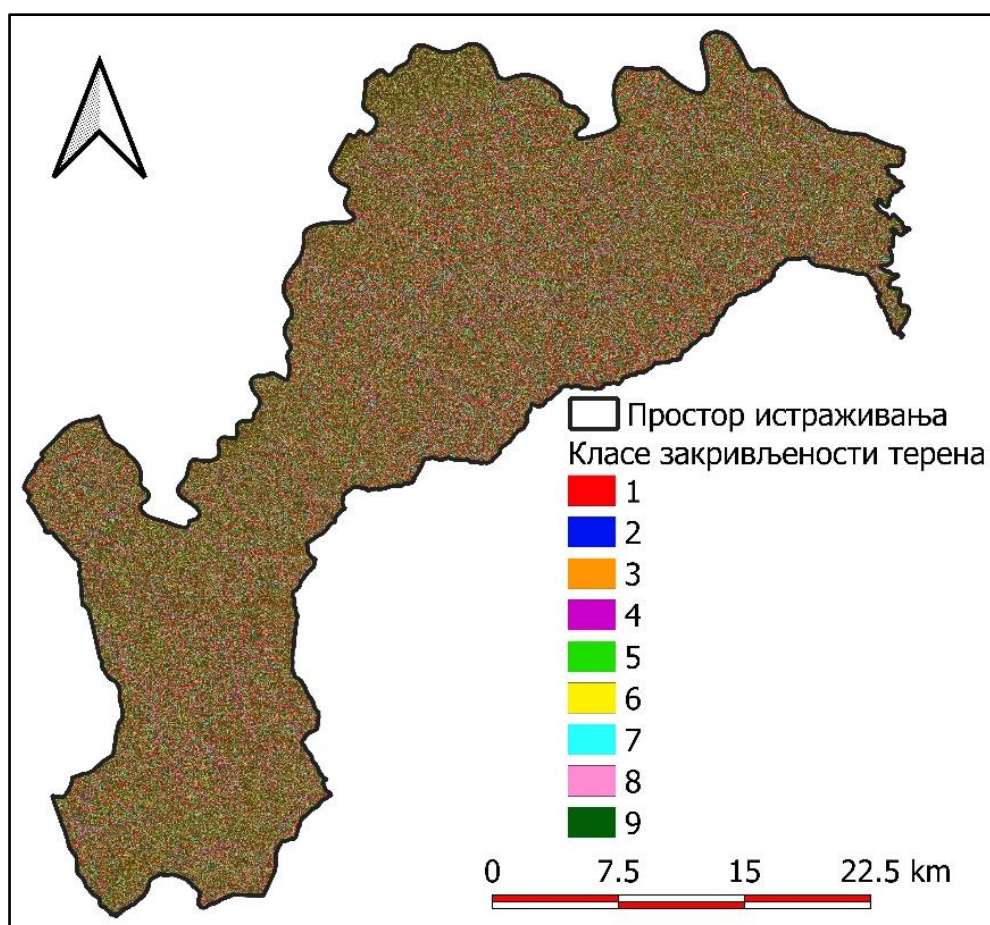
Као и код експозиције падина, снежне лавине се могу формирати на свим странама профилне и планарне закривљености, али не истим интензитетом и учесталошћу.



Слика 43. Класификација површина на основу профилне и планарне закривљености

Извор: Vontobel и др., 2013

На примеру Швајцарске, Voontobel и др. (2013) наводе да се лавине активирају на конкавним странама профилне и планарне закривљености, док је најмањи број лавина забележен на вертикално конвексним и хоризонтално равним површинама. Конкавне падине задржавају више снега током дужег временског периода (Мапар и др., 2014).



Слика 44. Карта класа закривљености терена на Шар планини

На територији Шаре са уделом у површини издвајају се две класе закривљености: вертикално и хоризонтално конкавне површине (26,95%) које су најподложније настанку лавина, и вертикално и хоризонтално конвексне површине, које обухватају 28% простора истраживања.

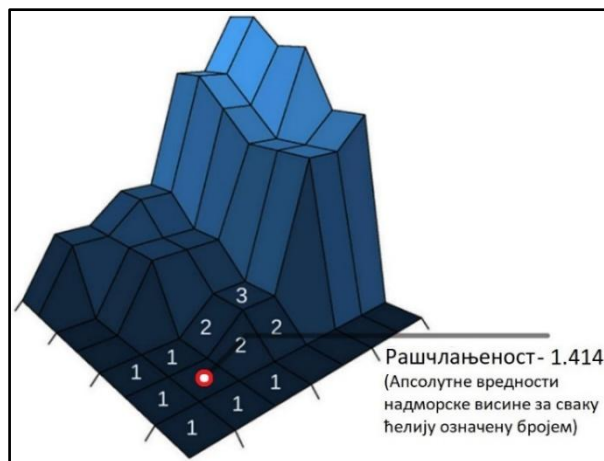
Табела 22. Распоред класа закривљености на Шар планини

Класа	Закривљеност терена	Површина (km ²)	Удео у површини (%)
1	Вертикално конкавна, хоризонтално конкавна	262,44	26,95
2	Вертикално конкавна, хоризонтално равна	37,71	3,87
3	Вертикално конкавна, хоризонтално конвексна	90,68	9,31
4	Вертикално равна, хоризонтално конкавна	45,09	4,63
5	Вертикално равна, хоризонтално равна	86,75	8,91
6	Вертикално равна, хоризонтално конвексна	42,82	4,40
7	Вертикално конвексна, хоризонтално конкавна	95,81	9,84
8	Вертикално конвексна, хоризонтално равна	39,54	4,06
9	Вертикално конвексна, хоризонтално конвексна	272,81	28,02
Укупно		973,65	100,00

Најдоминантније класе обухватају подножје и гребен Шар планине, док су потпуно равне површине (86,75 km²) карактеристичне за насеља и дна долина великих река, на којима се обрађују пољопривредне парцеле.

5.3.5. Вертикална рашчлањеност

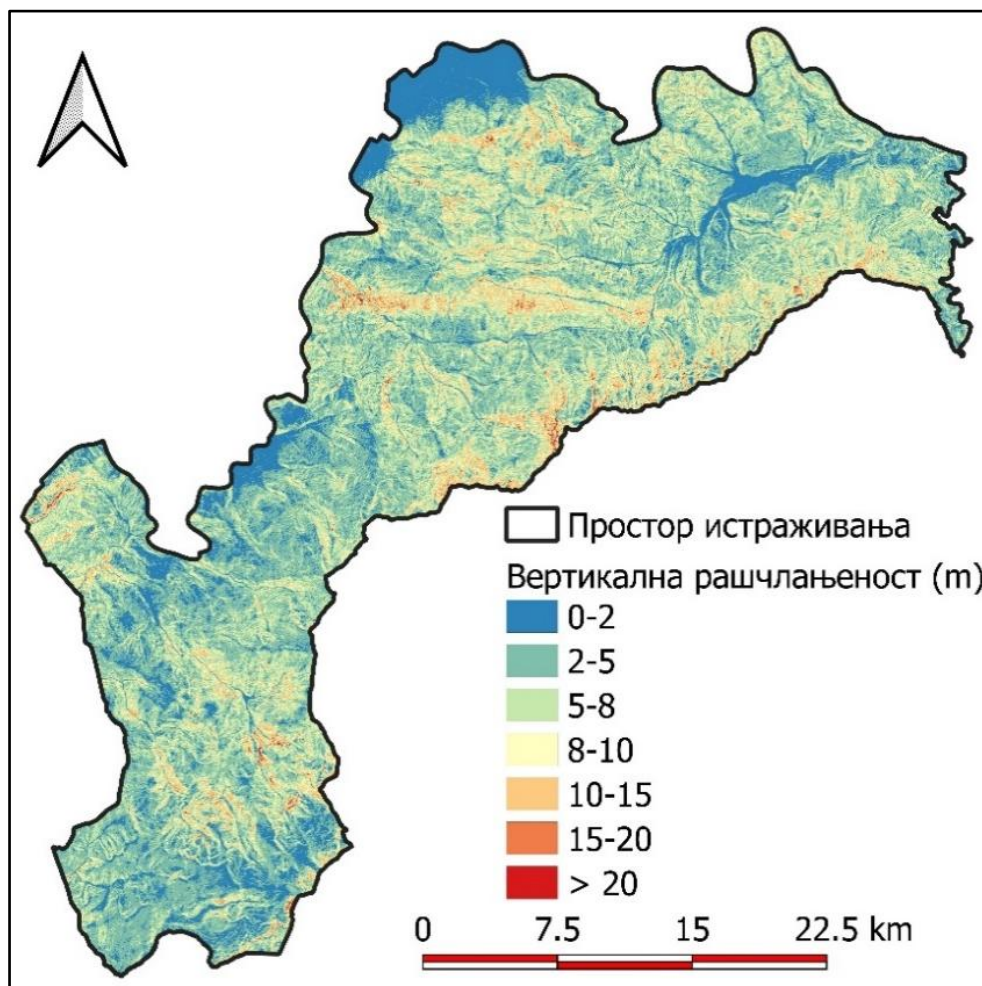
Вертикална рашчлањеност терена је морфометријски услов представљен висинском разликом највише и најниже тачке на одређеној површини. Иако рашчлањеност не представља показатељ геоморфолошких процеса, може имати оријентациони значај са аспекта „енергије” рељефа (Драгићевић и Филиповић, 2016).



Слика 45. Рачунање вертикалне рашчлањености у ГИС софтверу

Извор: Shaver и др., 2016

Путем географских информационних система и дигиталног модела терена могуће је израчунати вертикалну рашчлањеност терена. Рекласификацијом добијених вредности, јасно се могу разликовати равнице, речни системи (вредности мање од 2 m) и литице (вредности веће од 40 m). Међутим, врхови гребена приказани су истим вредностима као и речни токови, тако да је потребно водити рачуна приликом анализе и интерпретације резултата.



Слика 46. Карта вертикалне рашчлањености Шар планине

Вертикална рашчлањеност Шар планине веома је хетерогена, у распону од 0 до 121 m. Најнижим вредностима (0-2 m) приказују се равни терени, речни токови и врхови гребена, док највише вредности приказују најстрију литицу (Градски камен). Са аспекта снежних лавина, рашчлањеност (као експозиција и закривљеност) може се применити као споредни фактор, за издвајање терена са већом „енергијом” рељефа.

Табела 23. Интервали вертикалне рашчлањености на Шар планини

Вертикална рашчлањеност (m)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
0-2	129,79	13,33
2-5	363,10	37,29
5-8	311,89	32,03
8-10	97,06	9,97
10-15	64,26	6,60
15-20	6,26	0,64
>20	1,38	0,14
Укупно	973,73	100,00

Половина истраживане територије одликује се висинском разликом до пет метара. У овој зони може доћи до акумулације снежног материјала на великим надморским висинама. Терени висинских разлика 5-8 m заузимају 32% територије, док се око 10% Шар одликује висинском разликом 8-10 m. Овакви терени погодни су за формирање и кретање снежних лавина. Интервал 10-20 m јавља се на 7,24% површине, и на овим теренима може доћи до формирања снежних лавина. Вертикална рашчлањеност локације у Рестелици где се активирала лавина 2012. године, износила је 14 m. Простори изнад 20 m висинске разлике представљају веома стрме терене на којима се снег не задржава у великој количини, већ се континуирано транспортује у ниже и мање стрмије терене. Због сложености формирања, кретања и акумулације снежних лавина, вертикална рашчлањеност нема јасно дефинисан значај за предикцију овог природног хазарда, али може послужити за идентификацију одређених физичко-географских појава на топографској површини.

5.4. ПЕДОЛОШКИ ПОКРИВАЧ

Под утицајем геолошких, геоморфолошких и климатских карактеристика, на Шар планини формирани су бројни типови земљишта. Сва земљишта представљају погодно тло за формирање лавина. У условима високих температура и значајне количине влажног снега, долази до настанка клизних лавина где површински растресити слој може бити у одређеној количини еродован.

Хипсометријски посматрано, у највишим деловима Шаре доминирају литосоли, односно камењари. Углавном се јављају изнад горње шумске границе и нису обрасли шумском вегетацијом. Због свог пространства на висинама, у највећем проценту се лавине јављају на литосолу. На већим висинама од осталих типова земљишта, присутни су ранкери, кречњачка црница (калкомеланисол) и рендзина. Унутар жупа доминира дистрични камбисол, односно кисело смеђе земљиште. У долинама већих река распрострањено је алувијално земљиште (флувисол) које локално становништво интензивно користи у пољопривредне сврхе. Од осталих педолошких типова, на мањој површини истраживаног простора јављају се: колувијум, еутрични камбисол, калкокамбисол, лувисол, бруниподзол, псеудоглеј, регосол, тресет итд (Динић, 1990, Лазаревић, 1994).

5.5. КЛИМАТСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Климатски услови у комбинацији са морфометријским карактеристика представљају најзначајније факторе у проучавању снежних лавина. Прогноза опасности од настанка снежних лавина директно је повезана на временским условима на истраживаном простору. На територији Шар планине могу се издвојити неколико типова климе: жупна клима, медитеранска клима, умерено-континентална и алпска. Жупна клима карактеристична је за котлине, односно жупе: Сиринић, Средачку, Опоље и Гору. Због присуства планинске климе и једним делом медитеранске, не може се у потпуности рећи да у свим котлинама влада типично жупна клима. Највеће варијације јављају се у Средачкој жупи, која је долином Призренске Бистрице повезана са Призренском котлином у којој влада медитеранска клима. Због одсуства медитеранског утицаја, али и веће надморске висине, у Опољу, Гори и Сиринићу долази до контакта планинске и умерено-континенталне климе, који лети доноси топло и ведро време са свежим ноћима, док су зиме хладне, дуге и са великом количином падавина.

5.5.1. Сунчево зрачење

Инсолација (сунчево зрачење) представља важан климатски елемент који индиректно утиче на температуру и влажност ваздуха. Соларна радијација утиче на површину снега, мењајући његова физичка својства. Иако снег веома добро рефлектује светлосно зрачење које долази са Сунца, топлота која долази апсорбује се на површини снега током дана. За време хладних и ведрих ноћи, исту ту топлоту снег зрачи у ваздух. У временским условима када је сунчево зрачење директно и константно неколико дана, приликом ведрих дана и ноћи долази до великих температурних осцилација унутар снежних слојева. Оваквом појавом ствара се јак температурни градијент између снежних слојева, што доводи до велике нестабилности на интерфејсу слојева.

На територији Сиринићке жупе, током мерења 1984-1988. године на метеоролошкој станици „Брезовица”, констатована је просечна годишња инсолација од 1938 сати, што је више од измерених вредности на Копаонику, Тари и Златибору (Динић, 1990). У Призрену годишња инсолација (1959-1984) износи 2068 сати, док је у Драгашу просечан број сунчаних сати током године 1950. Током зимских месеци, услед формирања ниских облака, високопланински делови Шаре примају више сунчевог зрачења од суподинских области (Лазаревић, 1994).

5.5.2. Температура ваздуха

Снежне лавине настају у условима велике количине снега. Како би снег у што већој дебљини опстао на топографској површини, потребне су изузетно ниске, негативне температуре ваздуха. На планинама на којима су негативне температурне вредности током зимских месеци, велика количина снега се задржава од првих већих падавина у децембру, тако да се након серије више снежних падавина и под утицајем ниске температуре ваздуха стварају снежни слојеви који могу бити различитог степена стабилности.

На Брезовици (915 m) је током осматрања у периоду 1995-2008. забележена просечна годишња температура од 9.2°C. Током децембра (0°C) и јануара (-0,7°C), просечне месечне температуре биле су 0°C или испод нуле. Када ка Сиринићкој жупи продиру ваздушни фронтови са запада, температура током зиме знатно је већа у односу на присуство континенталних ваздушних маса са истока, које доносе веома ниске температуре. Просечна вредност термичког градијента износи 0,36°C/100 m (Динић, 1990). Анализирајући температурни градијент и постојеће природне услове, долази се до закључка да су територије изнад 2000 m подложне негативним температурним вредностима четири месеца, од децембра до марта.

Табела 24. Температура ваздуха на Брезовици (1995-2008), Призрену и Драгашу (1961-2010)

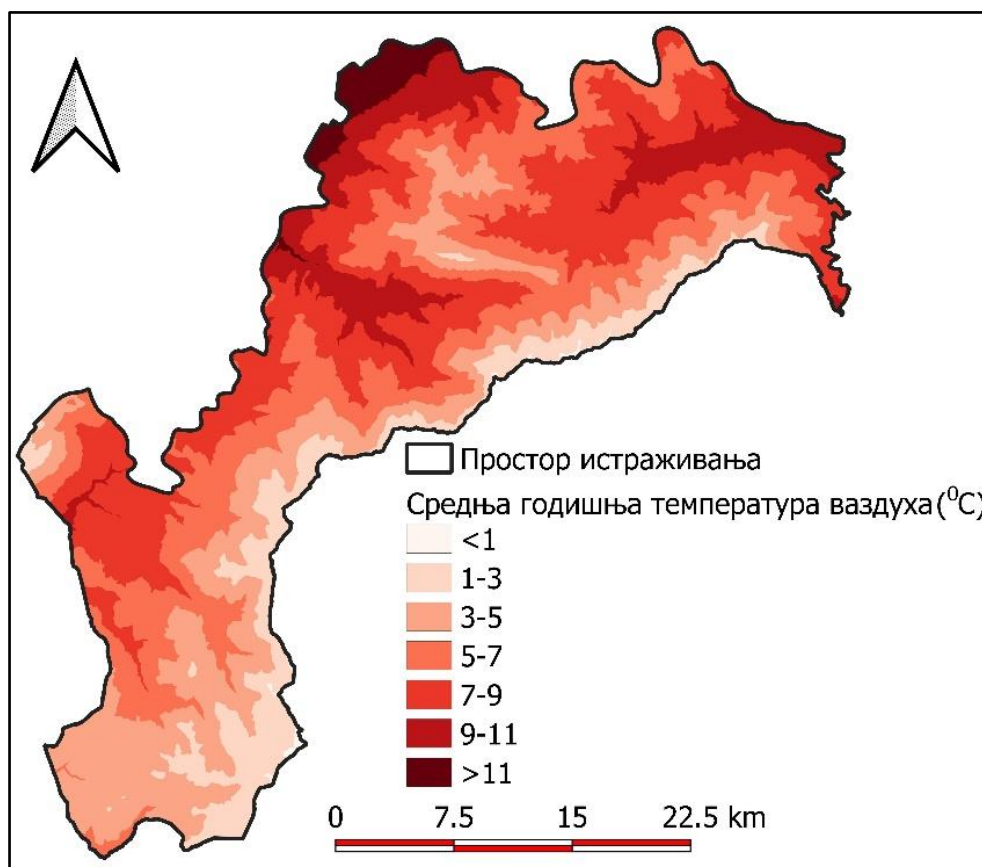
Место	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср.
Брезовица (915 m)	-0,7	0,3	3,9	8,7	14,9	17,8	19,5	18,5	13,5	9,5	4,4	0	9,2
Драгаш (1060 m)	-1,4	-0,3	2,9	7,3	12	15,5	17,8	18,2	14,1	9	4,4	0,6	8,3
Призрен (402 m)	0,5	2,8	7,8	11,7	16,7	20,2	21,8	21,6	17,7	12	7,1	2,5	11,8

Извор: Лазаревић, 1994; Републички хидрометеоролошки завод, 2024

Призрен је један од најтоплијих градова у Србији. Према последњим релевантним мерењима, просечна годишња температура износила је 11,8°C.

Топле ваздушне масе које долазе са Медитерана до Призрена, настављају се једним делом до Средачке жупе коју одликује „блажа“ клима у односу на остале котлине. У Драгашу (1060 m) је средња годишња температура нешто нижа (8,3⁰C) у односу на Брезовицу, пошто се Драгаш налази на већој висини. Вертикални температурни градијент на профилу Драгаш-Голема Враца (2582 m) износи 0,55⁰C/100 m. Овај податак је важан за процену температурних услова Рестелице на којима су се раније дешавале снежне лавине. С обзиром да Рестелица лежи на 1500 m, закључује се да су негативне температуре доминантне од децембра до фебруара, што ствара повољне услове за настанак и кретање лавина током фебруарских дана.

Највише годишње температуре забележене су у нижим крајевима (< 550 m): Селогражде, Грејковце, где је просечна температура изнад 11⁰C.



Слика 47. Карта средње годишње температуре ваздуха на Шар планини

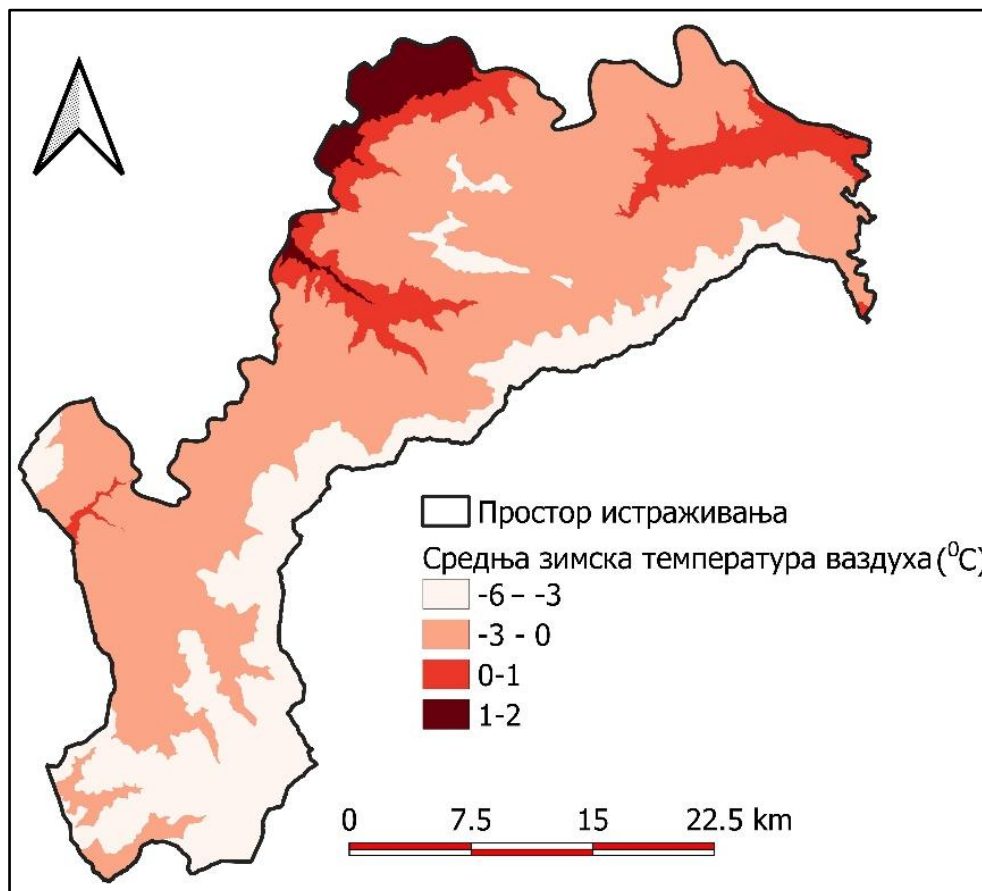
Најнижа температура карактеристична је за највише пределе Шар планине (> 2450 m) на којима је просечна годишња температура око 0⁰C.

Табела 25. Просторни распоред температуре ваздуха на Шар планини

Температура (°C)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
< 1	4,21	0,43
1-3	96,14	9,87
3-5	206,51	21,21
5-7	261,37	26,84
7-9	280,32	28,79
9-11	102,53	10,53
>11	22,57	2,32
Укупно	973,65	100,00

Просторно посматрано, најзаступљенији је температурни интервал 7-9⁰С који покривају ободни делови котлина.

За потребе истраживања снежних лавина, од значаја су подаци за зимске месеце. На слици 48. се може приметити да је температура од децембра до фебруара на 87% територије Шар планине 0⁰С или испод 0⁰С. Хипсометријски гледано, то су зоне изнад 930 m надморске висине.



Слика 48. Карта средње зимске температуре ваздуха на Шар планини

Температурне вредности током зиме се значајно разликују у жупама. На територији Горе и Опоља средње вредности су негативне, док је у Средачкој жупи, при дну котлине температура од 1 до 2⁰С. У Сиринићкој жупи се температура креће од 0 до 1⁰С, што је више од просечних вредности за Гору и Опоље, а мање од температурних услова у Средачкој жупи.

Табела 26. Просторни распоред средње зимске температуре ваздуха на Шар планини

Температура (°C)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
-6 – -3	234,45	24,08
-3 – 0	614,60	63,12
0 – 1	90,16	9,26
1 – 2	34,44	3,54
Укупно	973,65	100,00

Продор медитеранске климе условљава да температура у Призренској котлини и њеним ободним деловима буде највиша. Скоро ¼ истраживане територије (24%) је током зиме у минусу већем од -3⁰С. У таквим условима, стварају се повољне прилике за нове снежне падавине и потпуно задржавање већ постојећег снега.

5.5.3. Облачност

Облачност се дефинише као покривеност неба облацима. На степен облачности највећи утицај има циркулација ваздуха зависна од орографских услова. Облачност, као и сунчево зрачење, има посредан утицај на формирање снежних лавина. Када је облачност мања, односно када је више ведрих дана и ноћи, долази до великих промена у структури површинског снежног слоја. Са друге стране, повећана облачност спречава директно сунчево зрачење, али и озрачавање топлоте коју је снег током дана апсорбовао.

Табела 27. Средња годишња облачност на Брезовици (1984-1988), Драгашу и Призрену (1960-1984)

Место	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср.
Призрен	7,3	6,7	6,5	6	5,6	4,8	3,7	3,3	3,9	5	6,6	7,5	5,6
Брезовица	6,4	6,3	6,8	5,8	6	5,4	3,3	3,3	3,2	4,8	5,4	5,6	5,2
Драгаш	6,6	6,6	6,2	5,9	5,3	4,8	3,8	3,7	3,9	5,1	5,9	6,5	5,4

Извор: Динић, 1990; Лазаревић, 1994

Средња годишња облачност није искључиво зависна од надморске висине и не разликује се значајно на истраживаним локацијама. У Призрену је средња годишња облачност 5,6, на Брезовици 5,2, у Драгашу 5,4. На свим мерним станицама највећа облачност заступљена је током зимских месеци. То се објашњава појавом ниских облака, тако да је у овом периоду облачност у местима која се налазе на нижој надморској висини већа у односу на планинске пределе. Мања облачност на високопланинским падинама узрокује већу инсолацију и повећану нестабилност снежног покривача услед структурних промена на површини снега (замрзавање и крвљење).

5.5.4. Падавине

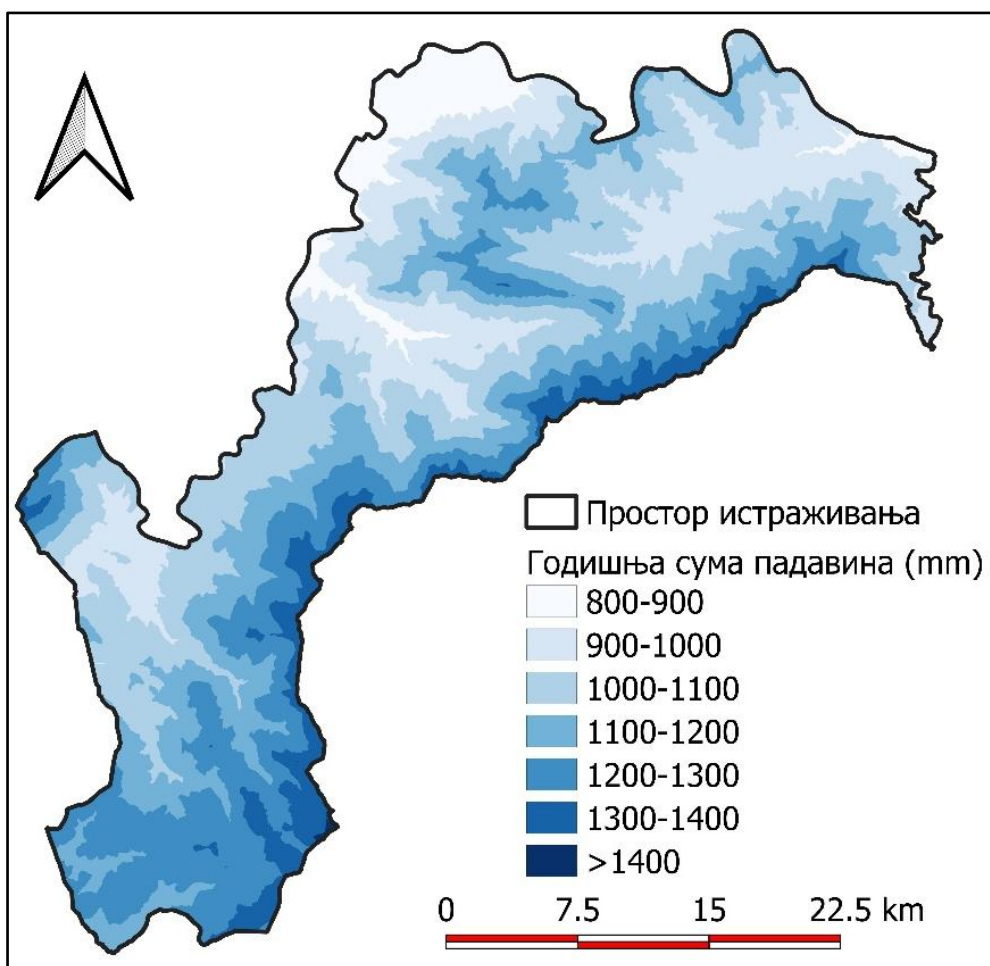
Количина и распоред падавина у високопланинским пределима има директан утицај на стварање услова за појаву снежних лавина. Шар планина и највећи део њене подгорине прима већу количину падавина од просека за Србију (896 mm).

Табела 28. Распоред количине падавина на Шар планини (1960-1985)

Место	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сума (mm)
Речане (580 m)	74	58,8	63	67,3	83,7	82,3	59,7	52,6	60,9	57,5	93,7	84,9	838,3
Штрпце (860 m)	71	63	75	75	96	92	92	58	71	68	91	90	922
Јажинце (950 m)	87	73	80	81	111	91	81	65	72	82	97	94	1014
Заплужје (1160 m)	102,4	71,9	83,8	86,3	91,2	82,3	66,7	76,7	86,1	79,3	104,7	102,8	1034,3
Рестелица (1550 m)	98,2	77,1	94,3	91,5	106,2	69,4	59	64,3	76,7	97,4	139,7	127,8	1101

Извор: Динић, 1990; Лазаревић, 1994

Подаци добијени путем мерења на метеоролошким и кишомерним станицама указују да најнижи делови простора истраживања примају око 800 mm падавина, док насеља на великим надморским висинама (Рестелица, ски-центар „Брезовица”) примају више од 1100 mm атмосферског талога.



Слика 49. Карта годишње суме падавина на Шар планини

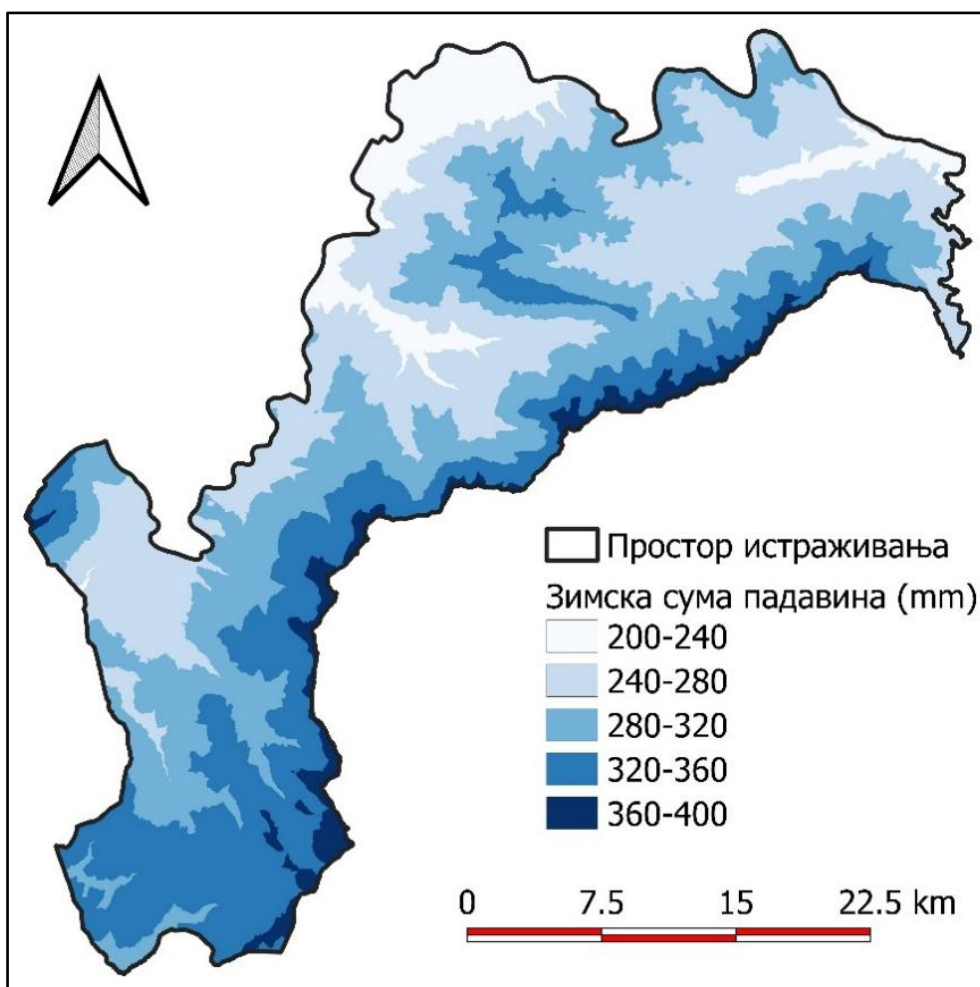
Анализом доступних података и применом линеарне регресије, добијене су вредности суме падавина за целокупну територију Шаре.

Просторно посматрано, најмању количину падавина (800-900 mm) прима источни део Сирињке жупе (Бродска клисура), насеља на ободу Призренске котлине и долина Призренске Бистрице.

Табела 29. Просторни распоред годишње суме падавина на Шар планини

Количина падавина (mm)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
800-900	52,97	5,44
900-1000	179,00	18,38
1000-1100	281,62	28,92
1100-1200	218,16	22,41
1200-1300	178,84	18,37
1300-1400	61,75	6,34
>1400	1,31	0,13
Укупно	973,65	100,00

Зона од 1000-1100 mm је највише заступљена унутар простора истраживања (28,92%) и она обухвата насеља која се налазе на ободним деловима жупа. Највиши делови Шар планине примају количину падавина већу од 1400 mm. То се односи на врхове изнад 2500 m надморске висине који обухватају око 0,13% површине Шаре.



Слика 50. Карта зимске количине падавина на Шар планини

Када се падавине посматрају током целе године, најдоминантнији тип падавина јесу кише. Уколико се издвоје месеци који обиљују снежним падавинама, може се створити приказ о потенцијалној висини снежног покривача. Количина падавина од децембра до фебруара на Шари варира од 200 до 400 mm. У условима снежних падавина при температури ваздуха од -3 до $+1^{\circ}\text{C}$, 200 mm снежних падавина значило би 2 m снежног покривача. На већим надморским висинама, при температурама од -3 до -6 степени, 200 mm снежних падавина значило би 3 m снега. Повећање количине снега узрочно-последично је повезано са смањењем температуре ваздуха.

Табела 30. Просторни распоред зимске количине падавина на Шар планини

Зимска сума падавина (mm)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
200-240	79,41	8,16
240-280	312,03	32,05
280-320	315,93	32,45
320-360	226,79	23,29
360-400	39,49	4,06
Укупно	973,65	100,00

Интервал зимских падавина 200-240 mm карактеристичан је за дно Сиринићке и Средачке жупе, као и за насеља која припадају Призренској котлини. На овим висинама због позитивне температуре ваздуха, током зиме долази до честих појава кишних падавина, док су снежне заступљене у малој количини. Друга зона (240-280 mm) захвата највеће делове котлина у којима се смењују кишне и снежне падавине.

Дебљина снега у овим подручјима није довољно велика да би изазвала снежне лавине. Све остале зоне покривају 59,8% територије Шаре, налазе се на великим надморским висинама на којима током зиме доминирају снежне падавине које су основни услов за значајно формирање снежног покривача и активирање лавина.

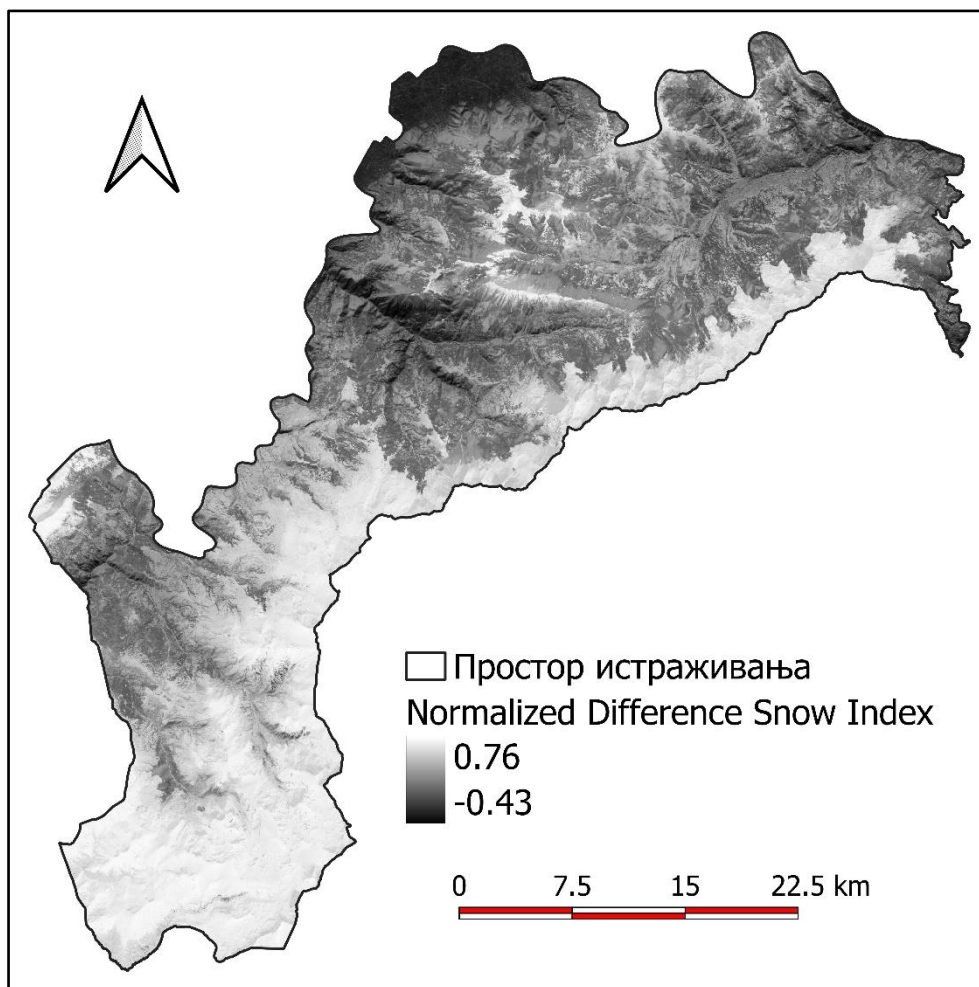
5.5.5. Снежни покривач

Да би дошло до формирања и кретања снежних лавина, потребна је велика количина снежног покривача. У савременој литератури не постоји јасан податак колика је дебљина снега потребна за формирање лавина зато што читав процес лавинског кретања зависи и од морфометријских и биогеографских услова, као и антропогених активности. Снег се на територији Шар планине образује у великим количинама и његова дужина трајања у највишим деловима је 6-7 месеци. Дно Сиринићке жупе је знатно блаже погођено снежним падавинама због мање надморске висине и углавном позитивних температурних вредности током зиме. У Сиринићкој жупи средња максимална дебљина снега износи око 70 cm, док је у зони око 1700 m дебљина снега 1,5-2 m (Динић, 1990). Што се тиче броја дана са снегом, у Штрпцу средњи број дана (период 1960-1984) са снегом износи 39, у Јажницу 42 дана. Највећи број дана са снежним покривачем имају Заплужје (98 дана) и Рестелица (91 дан). Брезна је у просеку 84 дана прекривена снегом, док се снег у Драгашу задржава 41 дан. Иако су Брезна и Драгаш на идентичним надморским висинама, Драгаш се налази у „кишној сенци” Коритника, и због тога прима много мање падавина од осталих насеља. Максимална дебљина снега у Брезни измерена је 17. новембра 1981. године и износила је 125 cm. Тих дана је у Речану, које је 15 km удаљено ваздушном линијом од Брезне, пало мање од 30 cm снега, што говори да је микроклиматски утицај на Шар планини доминантан.



Слика 51. Варијације у дебљини снежног покривача на Шар планини

Испод планинских врхова, снег је дебљине од неколико метара. У јаругама и увалама дебљина снега често је већа од 5 m. На висину снежног покривача значајан утицај имају ветар, експозиција и закривљеност рељефа. Ветар премешта снежне наносе са једног места на друго. Због снега нанетог ветром, дебљина снега на истој падини може да варира неколико метара. Осунчаност рељефа утиче да је снег на присојним странама подложнији интензивном отопљавању и губи своју снагу, за разлику од снега на „хладним” експозицијама који је сувљи и знатно се дуже задржава на топографској површини. Падине које су хоризонтално и вертикално конкавне задржаће највећу количину снега уколико су окренуте ка северу. У оваквим условима, утицај ветра је много мањи, тако да се снег читаве зиме таложи на истом месту.

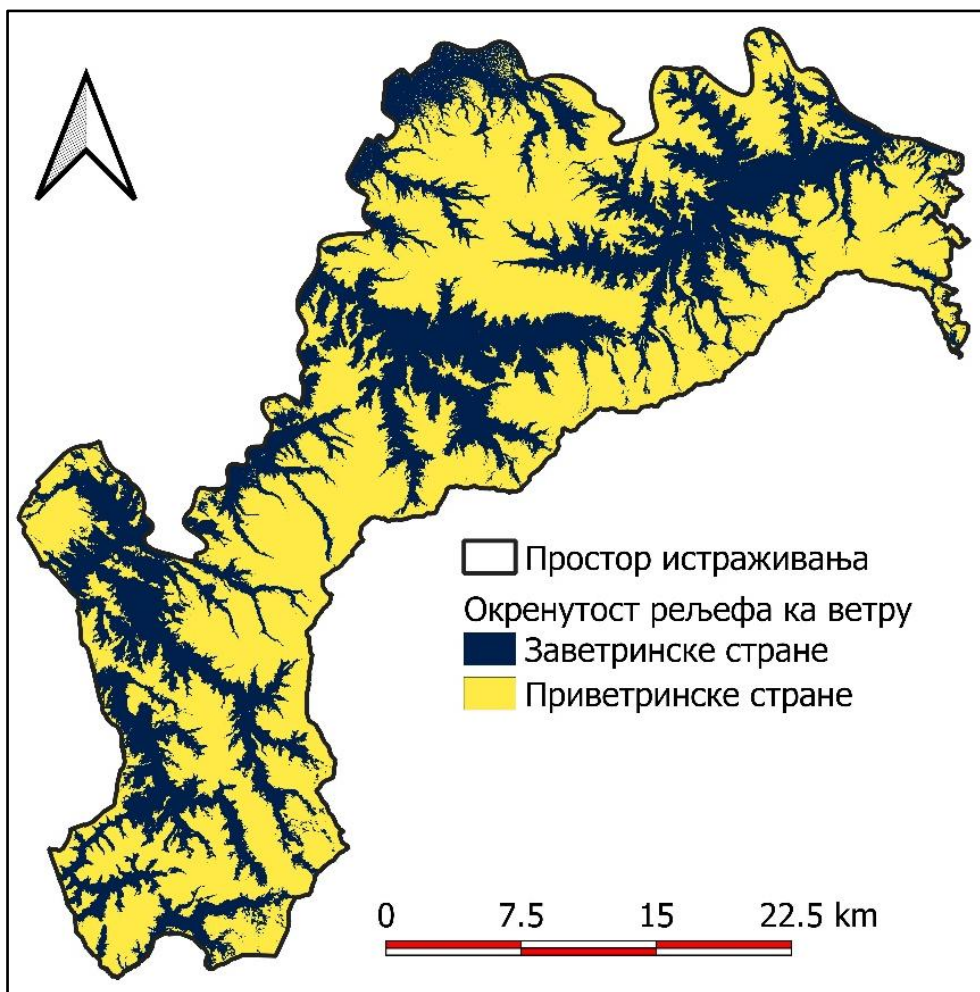


Слика 52. Карта покривености Шар планине снежним покривачем за период 2020-2024. године

На основу сателитских снимака из зимских периода 2020-2024. године, креирана је карта покривености Шар планине снежним покривачем. За ову прилику коришћен је Normalized Difference Snow Index (NDSI). Негативне вредности означавају локације без присуства снега, док позитивне вредности изнад 0,4 означавају присуство снежног покривача. Највеће вредности приказују терене са највећом количином снега.

5.5.6. Ветар

Транспорт снежних наноса и нагомилавање велике количине снега у кратком временском периоду дешава се под утицајем ваздушних струјања ваздуха. На простору Сиринићке жупе најучесталији су западни ветрови (из правца Превалца) и источни ветрови (из правца Качаничке клисуре). Западни ветрови током зиме доносе обилне снежне падавине. Неретко се дешава да ветар који се јавља из северног правца (из правца Језерске планине) донесе пљускове и ситан снег (Динић, 1990). У Драгашу највећу частину појављивања има ветар из северног правца. Током зимских месеци, на територијама изнад 1500 m често се јављају олујни ветрови. Недалеко од насеља Брод (општина Гора) је 10. фебруара 1992. године измерена брзина ветра од преко 30 m/s (Лазаревић, 1994).



Слика 53. Карта заветринских и приветринских страна на Шар планини

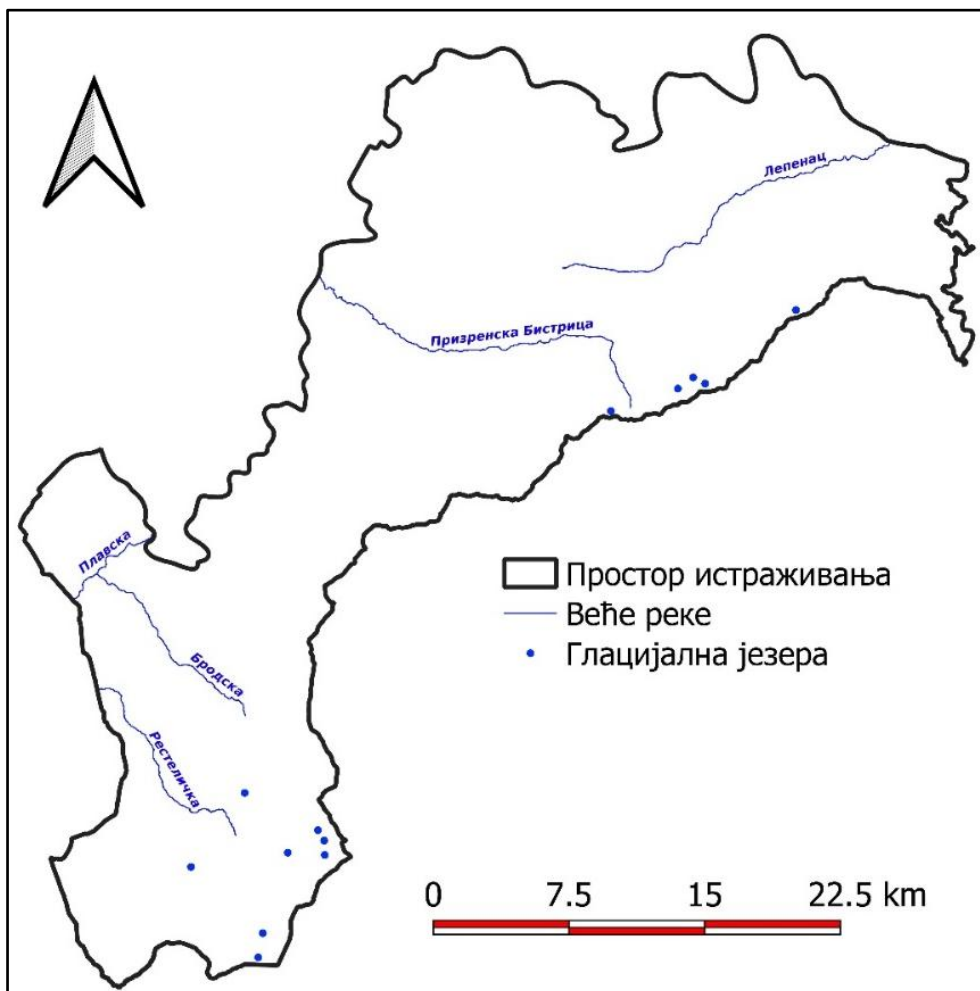
У високопланинским пределима Шаре, брзина, честина појављивања и правац ветрова највише зависе од облика у рељефу. Постоје падине које су директно подложне јаком ветру, ерозији и акумулацији снега и овакве стране називају се приветринским. На Шар планини приветринске стране покривају 390,62 km² (40,12%) територије. Заветринске стране су „поштеђене” интензивног утицаја ветра, тако да је акумулација снега доминантнија на заветринским странама. Око 583 km² (59,88%) површине припада заветринским странама.

5.6. ХИДРОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

5.6.1. Реке

Сви водотоци са Шар планине теку у два правца, ка Јадранском и Егејском мору. У Сиринићкој жупи спајањем Тисове и Череначке реке настаје Лепенац, који се након 72 km тока улива у Вардар, тако да све реке у Сиринићкој жупи припадају Егејском сливу. Површина слива износи 770 km², а у највеће притоке Лепенца убрајају се: Сува река, Блатештица, Врбештичка река, Муржица и Миљоштица. Са друге стране Шаре, сви водотоци из Средске, Опоља и Горе припадају Јадранском сливу, јер се реке уливају у Бели Дрим. Кроз Опоље протиче Плавска река, која извире недалеко од Заплужја на око 1500 m н.в. и улива се у Бели Дрим на територији Албаније (Лазаревић, 1994). Дужина тока је 42,7 km, док површина слива износи 528 km². Њене најзначајније притоке су Бродска и Рестеличка река, водотоци који протичу кроз Гору.

Бродска река почиње од насеља Брод, а њени изворишни делови јављају се на Шутман планини. Дужина реке је 13,7 km, површина слива 89,3 km². Слив Бродске реке је веома мало пошумљен, и због великих нагиба терена често долази до појаве бујичних поплава. Рестеличка река извире испод Големог Камена (2298 m), недалеко од Рестелице. Дужине је 24,3 km, док површина слива износи 88,8 km². Најдужа и најпознатија река Средачке жупе је Призренска Бистрица, са дужином од 34,7 km, и површином слива од 264 km². Призренска Бистрица извире из Горњег језера (2410 m), а улива се у Бели Дрим недалеко од села Влашња.



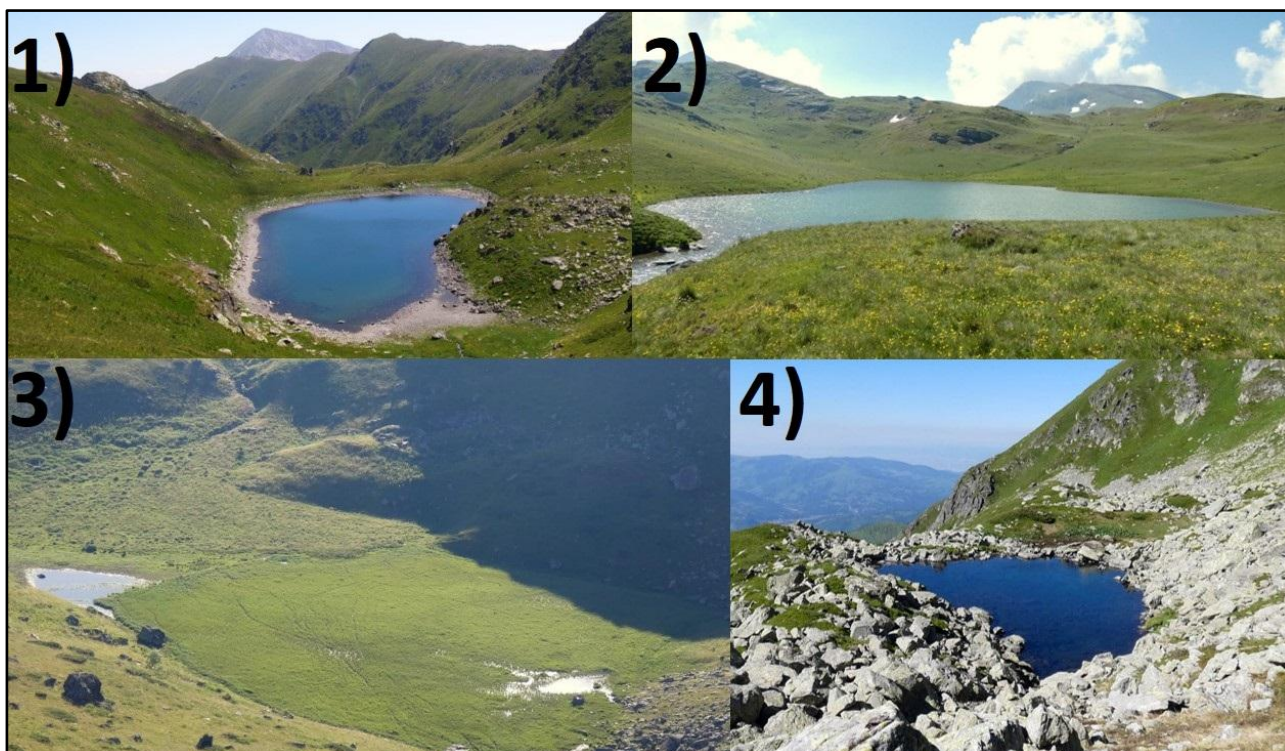
Слика 54. Хидролошка карта Шар планине

Њене највеће притоке су Манастирска, Љубинска, Петрошница и Шартичка река (Лазаревић, 1994). За формирање снежних лавина реке немају директан утицај, али посредно утичу на промену структуре снега који се налази у близини река и потока. Због повећане влажности ваздуха поред река, проценат воде се повећава унутар снега чинећи слојеве нестабилнијим. Ова појава везана је за терене који се налазе изузетно близу водотокова. Густина речне мреже на Шар планини износи 1,58 km/km².

5.6.2. Језера

Високопланински терени Шаре су током плеистоцена били захваћени глацијацијом. Иако данас нема снежне границе и ледника, на планини су унутар појединих циркова формирана језера, у народу познатија као „горске очи“. Сва језера су глацијално-ерозивног порекла, и на српској страни Шар планине евидентирано је 13 сталних језера.

На територији Сиринићке жупе, то су: Ливадичко (Штрбачко) језеро, Јажиначко, Врбештичко (Црни Вир) и Мало Јажиначко језеро. Изнад Средачке жупе најпознатије је Горње језеро. У Гори је формирано највише језера, од којих се издвајају: Велико Шутманско, Злипоточко и Куатово.



Слика 55. Ливадичко (1), Велико Шутманско (2), Куатово (3) и Мало Јажиначко језеро (4)

Извор: Јосимовић, 2024

Језера, као и реке, немају суштински значај на процес лавина. Повећавају влажност снега који се налази у близини акумулација. Геоморфолошки посматрано, терени од врха циркова до дна језера одликују се великим нагибом, травнатом вегетацијом и они могу бити предмет истраживања лавина. Веома велики број лавина се јавља унутар циркова, али немају значајан утицај на животну средину јер су овакви терени зими врло неприступачни. Услед глобалног загревања и повећања температуре, велики број периодичних језера на Шари трајно пресушује или су потпуно обрасла вегетацијом тако да постепено прелазе у тресаве (Лазаревић, 1994).

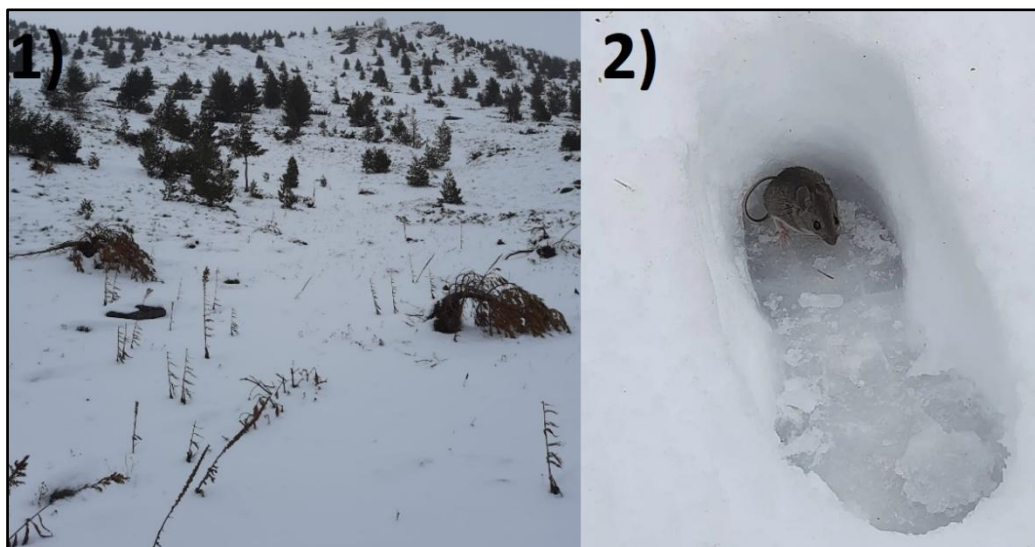
5.7. БИОГЕОГРАФСКИ УСЛОВИ И НАЧИН КОРИШЋЕЊА ЗЕМЉИШТА

5.7.1. Флора

Шар планина и њено подножје представљају један од најзначајнијих и најбогатијих флористичких и фаунистичких комплекса на Балканском полуострву. Под утицајем медитераске климе (са простора Северне Македоније и долином Белог Дрима) и континенталног климата, на Шари су створени услови за присуство бројних реликата и ендемита. На масиву Шар планине до сада је евидентирано око 1800 биљних врста, 247 ендемичних балканских врста и у односу на територију целе Србије, ендемична флора Шаре обухвата 45,16% свих ендемита који су регистровани у Србији (Завод за заштиту природе Србије, 2024). Поред 18 локалних ендемита, око 250 врста биљака је означено као лековито и јестиво (Динић, 1990).

Што се тиче шумских заједница, у подножју Шаре, на најнижим висинама присутне су различите врсте храстова (сладун, цер, китњак) и врбе. Изнад ове зоне, јављају се букове шуме. Са порастом висине, преовлађују четинарске шуме смрче и јеле. У зони 1400-1800 m, преовладавају шуме молике, црног и белог бора. Изнад горње шумске границе, присутна је прелазна жбунаста вегетација бора кривуља. Планински пашњаци су највише заступљени у високопланинском простору Шаре (Динић, 1990).

Са аспекта снежних лавина, сва високопланинска жбунаста вегетација и четинарске шуме угрожене су од последица деловања снежних лавина. Док жбунаста вегетација због мале висине не може да заустави процес формирања лавина, четинарске шуме значајно утичу на промену структуре снежног покривача спречавајући формирање плочастих лавина. Истовремено, шуме у великој мери задржавају снежни материјал уколико се нађу на путањи кретања лавине. У случају да се лавине формирају изнад шумске вегетације, стабла могу имати одређена оштећења у зависности од величине лавине.



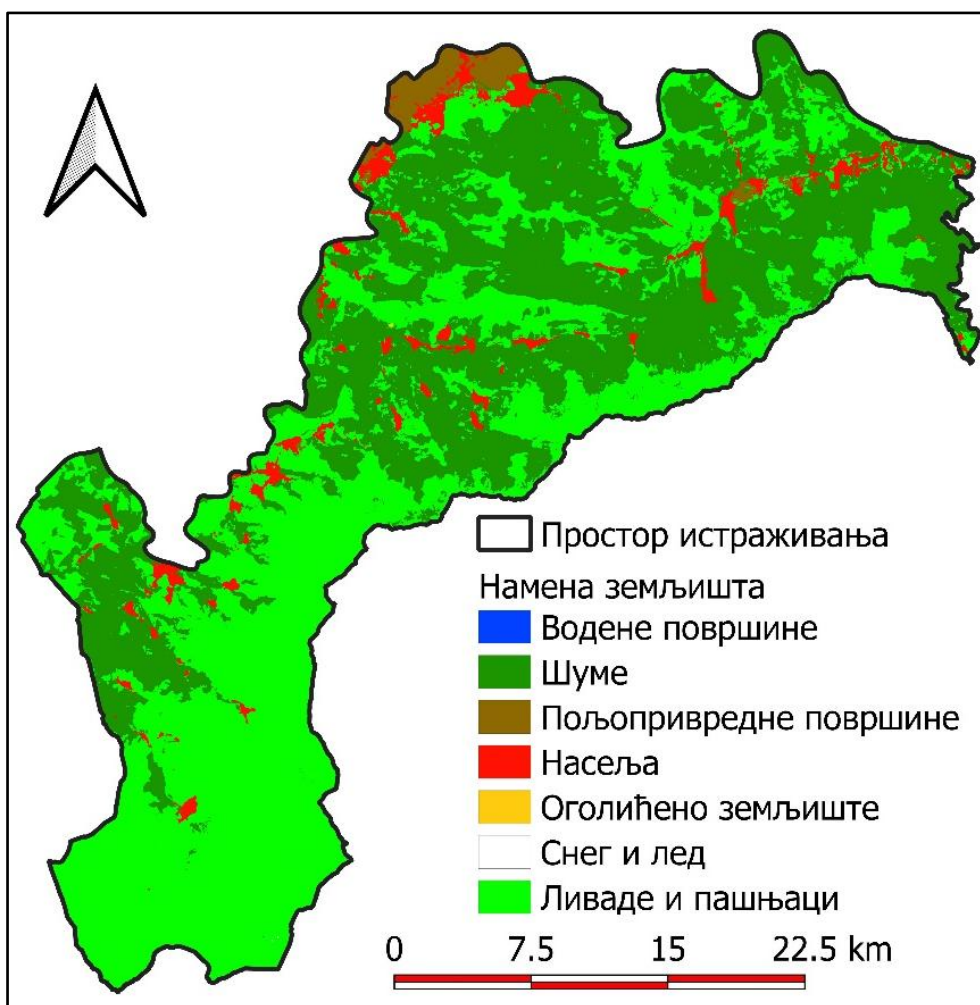
Слика 56. Оштећена вегетација (1) и динарска волухарица (2) у сливу Дурловог потока

5.7.2. Фауна

Поред флоре, унутар простора истраживања постоји богат диверзитет животињских врста. На територији Националног парка евидентирано је 37 врста сисара, 147 врста лептира, 200 врста птица и 45 врста гмизаваца и водоземаца (Завод за заштиту природе Србије, 2024). Од животиња које насељавају високопланинске области издвајају се: динарска волухарица, вук, мрки медвед, балкански рис и дивокозе. Све ове врсте могу бити угрожене услед формирања велике количине снега и активирања снежних лавина.

5.7.3. Намена земљишта

По питању начина коришћења земљишта, издваја се осам класа, од којих су две доминантне. Велики проценат Шар планине заузимају шуме, које покривају скоро 432 km² површине, што је око 44,34% територије. У жупама, на мањој надморској висини доминирају заједнице листопадног дрвећа (храстове и букове шуме). На ободима котлина јављају се мешовите шуме, док су на висинама изнад 1400 метара заступљене четинарске шуме. Висина горње шумске границе варира у зависности од других природних услова, па је тако у Гори најнижа – 1780 m, а на Ошљаку највиша – 2050 m. Пољопривредне површине карактеристичне су за северни део простора истраживања (обод Призренске котлине) и алувијалне равни око већих река.



Слика 57. Карта намене земљишта на Шар планини

Оголићене површине настају услед експлоатације минералних сировина, земљишта на површини и непосредно испод површине земље. Снег и лед су у облику снежаника заступљени током целе године на мањим површинама, унутар циркова оријентисаних ка северу.

Табела 31. Просторни обухват намене земљишта на Шар планини

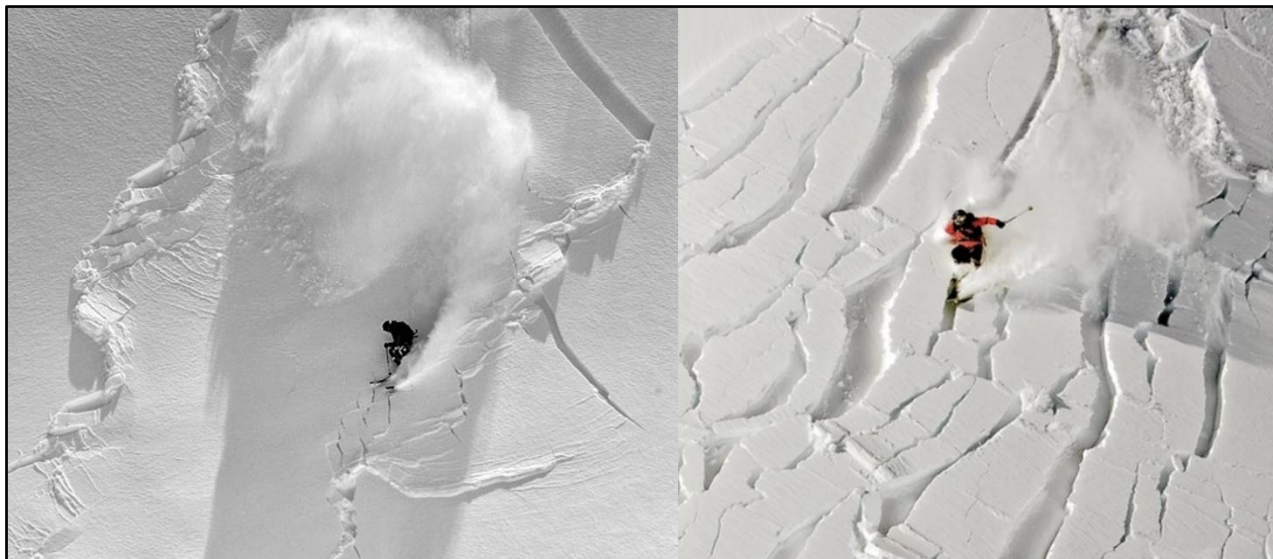
Намена земљишта	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Водене површине	0,03	0,003
Шуме	431,78	44,34
Пољопривредне површине	18,09	1,86
Насеља	36,23	3,72
Оголићено земљиште	0,06	0,006
Снег и лед	0,02	0,002
Ливаде и пашњаци	487,51	50,07
Укупно	973,71	100,00

Половина истраживане територије (487,5 km²) прекривена је ливадама и пашњацима. Ливаде су углавном заступљене у подножју Шаре, унутар жупа. Високопланински пашњаци (> 1800 m) представљају најпогодније тло за формирање и кретање снежних лавина.

6. ЉУДСКИ ФАКТОР КАО ПОКРЕТАЧ СНЕЖНИХ ЛАВИНА

По начину постанка, снежне лавине могу настати природним и антропогеним путем. Лавине изазване човековим деловањем подразумевају све облике антропогених активности по снегу, укључујући скијаше, сноубордере, планинаре, крпљаче, возаче моторних санки итд (Schweizer и Lütshg, 2001). У 90% несрећа, лавину покреће појединац или неко унутар групе. Другим речима, у већини несрећа, снежни покривач се налази у стању природне равнотеже све док тежина човека не изврши превелики притисак, изазивајући лавину. Свако од рекреативаца врши одређени притисак на снежни покривач и слојеве унутар снега (Liu и др., 2023). Да би се опасност од настанка и последица лавине свела на минимум, потребно је придржавати се одређених препорука (Tremper, 2008):

1. Кретање рекреативаца један по један. Приликом кретања на ризичним падинама, потребна је довољна удаљеност појединаца како би у случају формирања лавине, остатак групе био у могућности да помогне жртви;
2. Адекватан и испланиран маневар у случају активирања лавине. Уколико се скијаш или снобоудери нађу на средини покренуте плоче, неопходно је прећи падину под углом од 45° и пронаћи безбедну локацију, попут дрвећа или стена;
3. Строго избегавати ивице гребена. Приликом кретања гребеном планине, потребно је држати довољну удаљеност од ивице гребена због могућности настанка веначних лавина;



Слика 58. Скијаши као покретачи снежних лавина

Извор: American Avalanche Association, 2016

4. За зимске активности преферирати блаже и мање падине. Због велике количине снега која се може разликовати од падине до падине, безбедније је кретати се на мањим падинама и блажим нагибима терена, како би шансе за покретање лавине биле знатно мање;
5. Стална комуникација са осталим члановима групе. Приликом преласка ризичних падина, врло важан сегмент јесте комуникација између рекреативаца. Константна веза са горском службом спасавања омогућава спасиоцима да благовремено реагују у случају несреће са лавином;

6. Коришћење адекватне опреме. Услед активирања лавина средњих или већих размера, од суштинског је значаја квалитет и постојање адекватне опреме код појединаца. Жртве које се нађу у лавини у опасности су од удара у дрвеће, стене или затрпавања у снегу. У оваквим ситуацијама препоручује се поседовање опреме Avalung и RECCO детектора.

Процес активирања, кретања и акумулације снежне лавине се одвија веома брзо. Због тога је неопходно познавати основне технике избегавања тешких последица у случају активирања лавине:

- Приликом кретања ван обележених стаза, носити са собом ваздушни јастук (Avalung) и уређај за праћење локације (RECCO детектор);
- Учинити све напоре да се изађе из зоне лавине, приликом њеног активирања;
- Урадити све активности како би рекреативац остао на површини лавине;
- Формирање ваздушног џепа поред лица.

Организацију и реализацију претраге врше горске службе спасавања. Горска служба спасавања долази на место формирања и акумулације лавинског материјала, са циљем спасавања живота људи. Стандардне мере које се примењују у овом случају су (Tremper, 2008):

- Претрага помоћу примопредајника за лавину;
- Коришћење сонде за лавину како би се одредила локација жртве;
- Ефикасна примена лопата са циљем што раније идентификације локације на којој се жртва налази.

Поред наведеног, пружање хитне прве помоћи и транспорт жртве су такође кључни кораци.

7. РЕЗУЛТАТИ УГРОЖЕНОСТИ ТЕРИТОРИЈЕ ШАР ПЛАНИНЕ СНЕЖНИМ ЛАВИНАМА

7.1. ТЕРЕНСКА ИСТРАЖИВАЊА

У периоду од 2023. до 2025. године извршена су теренска истраживања на Шар планини. Током зимских месеци (јануар, фебруар), мапирале су снежне лавине које су се дешавале на територији ски-центра „Брезовица” и његовој непосредној близини. У јануару 2023. године испитивана је структура снежних зрна у сливу Дурловог потока (1800-1900 m). Ова локација је позната по настанку лавина током зимских месеци чији су узрочници углавном природни фактори.



Слика 59. Испитивање структуре снежних зрна

Употребом микроскопа на терену, констатовано је да је током 17. јануара 2023. године идентификовано површинско иње на површинском слоју снега. Овај слој је веома перзистентан и нестабилан. Приликом нових падавина, површинско иње представља идеалан слаб слој, који због своје нестабилности може изазвати активирање плоче, односно лавине. Дана 14. фебруара 2023. године извршена су испитивања снежних профила, односно њихове компактности и квалитета смицања у сливу Дурловог потока.



Слика 60. Анализа снежних профила

Анализе снежних профила одрађене су на три падине у сливу Дурловог потока са различитом експозицијом, као и на јужној падини Штрбачке чуке. Резултати су показали да је дебљина коре (плоче) била највећа на источној експозицији, и износила је 34 cm. Ручни тест смицања (HST) показао је да је кора неравна, неправилна и храпава, тако да је квалитет смицања веома лош. Проширени тест колоне (ЕСТ) показао је изузетну компактност овог слоја с обзиром да није дошло до прелома, што значи да је слој био стабилно везан за суседни снежни слој. У површинском слоју су идентификована заобљена фасетирана зрна.

Табела 32. Испитивање компактности снежних слојева на различитим експозицијама

Локација	Експозиција	Кора	ЕСТ	HST	Структура снежних зрна
Дурлов поток 1	Запад	10 cm	30	Q1	Заобљена фасетирана зрна
Дурлов поток 2	Север	7 cm	11	Q2	Фрагментисани снег
Дурлов поток 3	Исток	34 cm	Нема прелома	Q3	Заобљена фасетирана зрна
Штрбачка чука	Југ	Нема	Нема прелома	Q3	Растопљени снег

На западној падини Дурловог потока измерена је дебљина коре од 10 cm. ЕСТ тест је показао да је површински слој веома стабилан, јер прелом почиње тек на последњем, 30. ударцу приликом испитивања. На површинском слоју присутна су заобљена фасетирана зрна. Квалитет смицања је показао да је кора веома равна и глатка. У оваквим условима плоча веома лако клизи у снежни профил. Дебљина коре на северној падини износила је 7 cm. ЕСТ тестом идентификована је нестабилност коре, јер се на интерфејсу слојева појавио прелом приликом 11. удараца. Површина коре је углавном глатка, али она не клизи тако интензивно као на западној падини. Од снежних зрна, у овом случају доминантан је фрагментисани снег на површини. Како би истраживања на основу експозиција била комплетна, истог дана је ископан снежни профил у подножју Штрбачке чуке, на јужној страни. Због интензивног утицаја Сунчевог зрачења и знатно веће температура у односу на остале профиле, снежна зрна су на овој локацији у виду растопљеног снега, без изражене коре и веома велике стабилности слојева. Површина смицања је неравна, храпава и неправилна.

Истраживања снежних слојева настављена су током фебруара 2024. године. Дана 5.2.2024. испод Пирибрега, између жичаре и Дурловог потока измерена је количина снега од 28 cm и забележене су три коре. На надморској висини од 2200 m, температура при дну снега износила $-10,2^{\circ}\text{C}$, док је на површини снега $-10,6^{\circ}\text{C}$. На истој локацији је 12. фебруара 2025. године измерена дубина снега већа од 1 m. Дебљина површинског слоја била је 8 cm, док је забележена температура од $-11,3^{\circ}\text{C}$. У дубљим слојевима снега измерена је температура од $-7,3^{\circ}\text{C}$. Током 8.2.2024. године, у сливу Дурловог потока измерена је дебљина снега од 103 cm. Температура приземног снежног слоја износила је $-4,6^{\circ}\text{C}$, температура замрзнуте коре $-5,5^{\circ}\text{C}$ (дебљина 5 cm). Дебљина снежног слоја изнад ледене коре била је 25 cm. Температура снежног слоја на површини износила је $-4,5^{\circ}\text{C}$. Сви поменути резултати указују на значајне разлике између снежних слојева у зависности од надморске висине и осунчаности терена.

Током летњих месеци извршена су теренска истраживања са циљем идентификовања угроженог терена на основу морфометријских услова. Дана 3. јула 2023. године извршено је теренско истраживање на територији општине Гора. У циљу анализе угрожених падина, посећена су насеља Брод и Рестелица.

Јужно од насеља Брод, на релацији Брод – хотел „Арксена” примећене су падине на којима се неретко дешавају снежне лавине. У непосредној близини хотела изграђен је мањи ски-центар, тако да је број посетилаца током зиме велики.



Слика 61. Угрожене падине јужно од насеља Брод (Гора)

Најугроженије насеље снежним лавинама на Шар планини је Рестелица. Током теренског истраживања усликана је и мапирана падина са које се 2012. године лавина активирала и изазвала велике људске и материјалне губитке. Након ове несреће, на угроженом простору примењене су конструктивне мере заштите.



Слика 62. Угрожена падина (1, 2) и оштећена вегетација (3) у Рестелици

Један од доказа кретања и разорног деловања лавине јесте и оштећена вегетација. Иако нема пуно стабала, постоје трагови оштећења коре који су настали услед кретања лавине. Осим поменуте падине, велики део територије Рестелице угрожен је лавинама, јер је насеље смештено при дну долине Рестеличке реке, док су околни терени стрми са доминантном ниском вегетацијом (пашњаци). Током летњих дана извршена су и теренска истраживања у подножју шарпланинског гребена, где су мапиране локације које су означене као потенцијално погодне за настанак, кретање и акумулацију лавинског материјала.

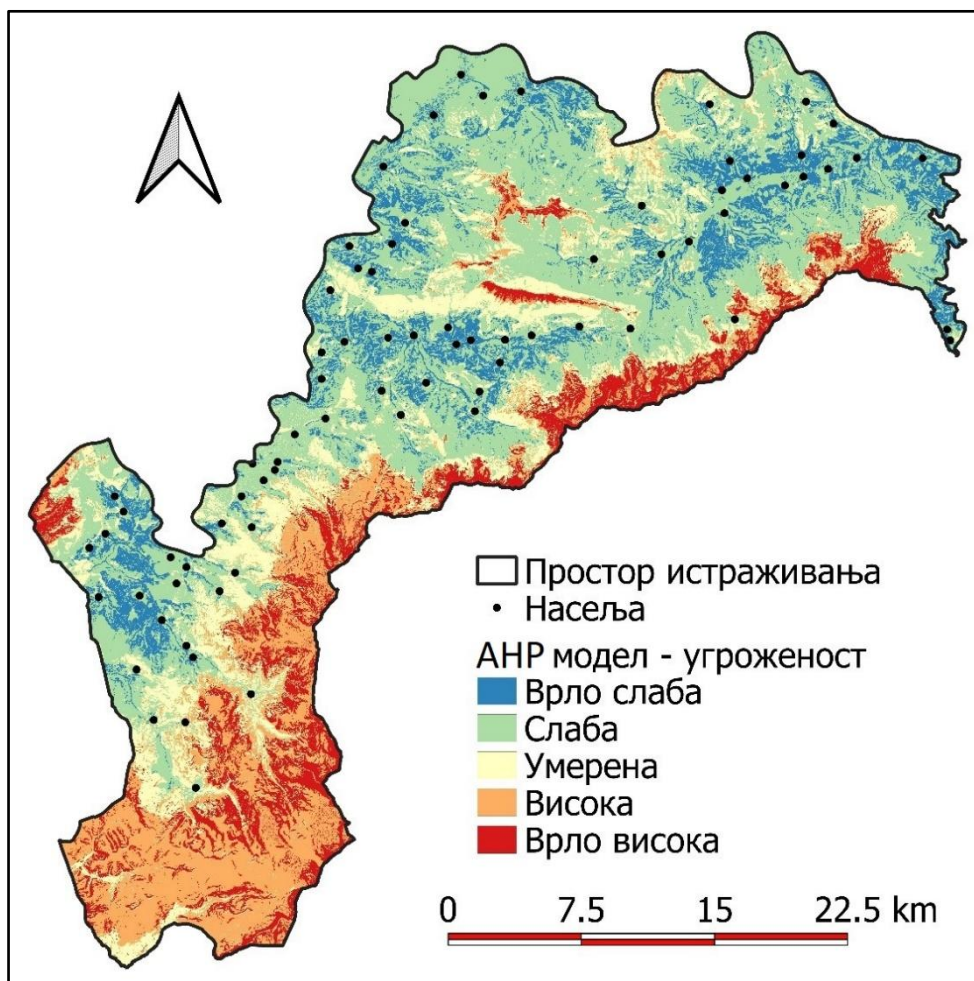
7.2. КАБИНЕТСКИ РАД

7.2.1. Вишекритеријумска анализа

Обрадом природних услова, као и њиховом евалуацијом у географским информационим системима, добијене су синтезне карте угрожености Шар планине снежним лавинама. Степен угрожености је класификован у пет класа: врло слаба, слаба, умерена, висока и врло висока угроженост.

7.2.1.1. Аналитичко-хијерархијски процес

У случају АНР модела, 13,16% површине је означено као врло слабо угрожено. То су територије (128,01 km²) које се одликују равним тереном, налазе се на дну котлина и примају најмању количину снежних падавина. Температура ваздуха у овим подручјима је знатно виша у односу околни терен, док са аспекта намене земљишта доминирају насеља и пољопривредне површине. С обзиром да се ради о локацијама које су на мањим надморским висинама и при дну котлина, овакав терен је заштићен од интензивнијег утицаја ветра и углавном окренут ка јужној страни света.



Слика 63. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом АНР методе

Класи слабе угрожености припада највећи део територије (42,05%), односно 409,02 km² површине. Ова класа обухвата релативно равне терене који се налазе између дна котлина и планинских врхова.

Оно што је карактеристично за ову класу јесте да код намене земљишта доминирају шуме, тако да се лавине не могу формирати и у случају велике дебљине снега. Врло слабој и слабој класи угрожености припада највећи број насеља унутар простора истраживања.

Табела 33. Класификација угрожености на основу АНР модела и просторни распоред

Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	128,01	13,16
Слаба	409,02	42,05
Умерена	168,09	17,28
Висока	164,55	16,92
Врло висока	103,06	10,59
Укупно	972,71	100,00

Умерена угроженост терена заступљена је на 17,28% површине, односно 168,09 km². То су локације које би у пракси представљале трасу кретања снежних лавина. Нагиб терена је идеалан за кретање лавинског материјала, док од намене земљишта доминирају пашњаци и ливаде. Висока класа угрожености покрива 16,92% простора истраживања, односно 164,55 km² укупне територије. Локације које припадају високој класи погодне су за формирање снежних лавина због велике количине падавина, ниске вегетације и стрмијег терена. Врло висока класа угрожености заступљена је на 10,59% Шар планине, односно 103,06 km² површине. Физичке детерминантне које владају у овим подручјима у потпуности су погодне за стварање снежних лавина и представљају идеалне стартне зоне. То су терени на великим надморским висинама, где је количина снега дебљине неколико метара. Поред негативних температура ваздуха, осунчаност терена је северна, тако да се снег дуго задржава. Заједно са нагибом терена, на процес формирања лавина у високопланинским подручјима важну улогу има закривљеност терена. Конкавне стране планарне и профилне закривљености обликују терен тако да је веома добро заштићен од ветра (заветринске стране) при чему се снег значајно нагомилава. Што се тиче намене земљишта, доминирају пашњаци и камењари тако да су овакви терени највише угрожени и неретко односе жртве на територији ски-центра „Брезовица”. Поред Брезовице, угрожено насеље на основу АНР карте је и Рестелица.

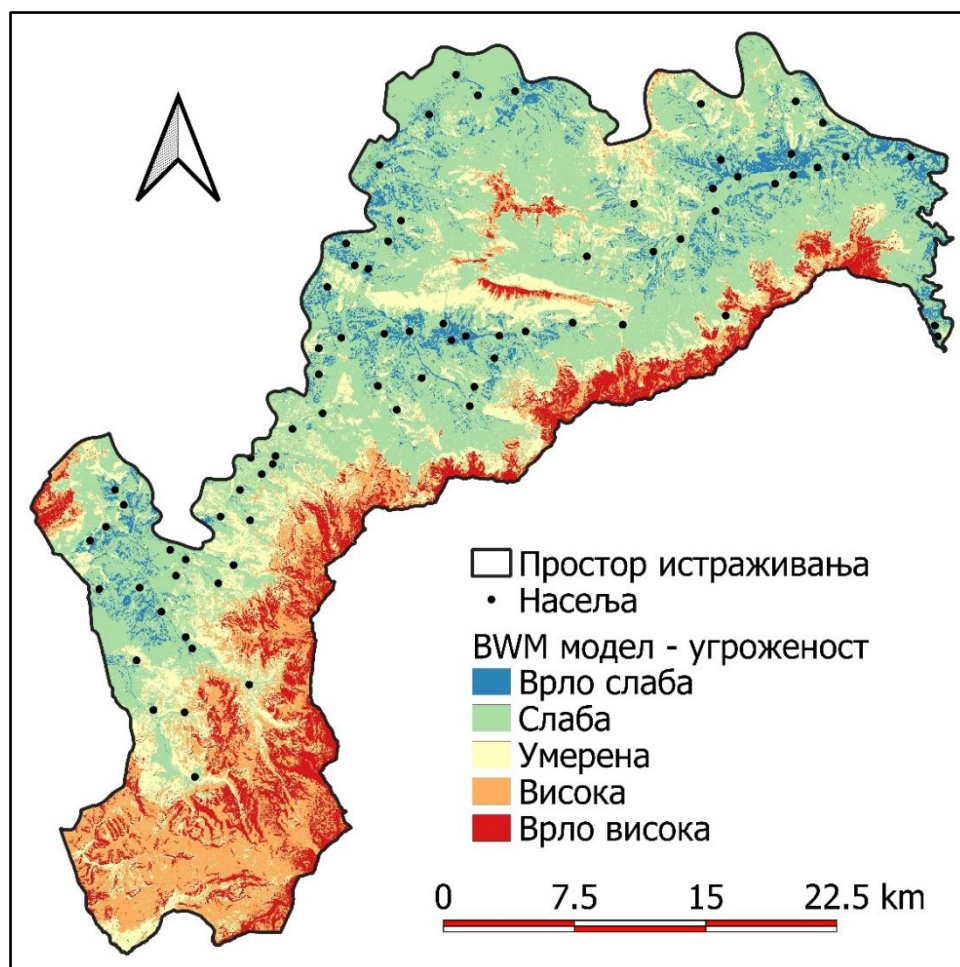
Током последњих 10 година, АНР метода је нашла примену за предикцију снежних лавина у планинским областима Индије, Турске, Пакистана и Кине. Kumar и др. (2018) истраживали су потенцијално угрожене зоне лавинама у западноиндијским Хималајима. Користећи ASTER и Landsat-8 сателитске податке, анализирали су угроженост на бази пет критеријума: надморске висине, експозиције, закривљености рељефа, нагиба и намене земљишта. У овом истраживању највећи приоритет је дат нагибу терена, док је најмањи значај додељен намени земљишта. Резултати су показали да је 34% простора истраживања високо угрожено, док је 12,32% врло високо подложно снежним лавинама. Валидација резултата путем ROC-AUC приступа показала је високу предиктивну моћ од 0,91.

Nasery и Kalkan (2021) су путем ГИС-а и АНР методе истраживали подложност провинције Ван (Турска) снежним лавинама. За геопросторну анализу је такође коришћено пет детерминанти: нагиб терена, надморска висина, експозиција, закривљеност терена и намена земљишта. Резултати су показали да је 5% високо угрожено, док је 2% врло високо угрожено лавинама.

Rafique и др. (2023) су идентификовали угрожена подручја у региону Каракорум (Пакистан) применом ГИС-а, АНР методе и Landsat 8 сателитских снимака. За анализу су коришћени надморска висина, нагиб, експозиција, храпавост терена и закривљеност подручја истраживања. Простор истраживања фокусиран је на Хиспар, Батура и Гајари леднике. Резултати су показали да је врло висока угроженост више заступљенија током 2022. године на Хиспару за разлику од 2012. године. Ситуација је обрнута код Батура и Гајари ледника, где је све мања површина која је врло високо подложна настанку лавина. Xi и Mei (2023) су се бавили просторно-временским карактеристикама снежног покривача дуж аутопута Пемо (Медог, Кина) користећи ГИС и АНР. Како би се проценила подложност лавинама, интегрисани су фактори: NDSI индекс, нагиб терена, надморска висина, просечна месечна количина падавина и намена земљишта. Резултати су показали да је излаз из тунела „Дуошунгла” предиспониран лавинама током зимских месеци, посебно од јануара до марта.

7.2.1.2. Best-Worst метод

За потребе добијања синтезне карте угрожености BWM методом, коришћени су идентични подаци и детерминанте са истим вредностима евалуације. Највећи тежински коефицијент додељен је снежном покривачу, док је најмањи тежински значај имала надморска висина. Финални резултати су, као и код АНР методе показали највећи степен доминације слабе угрожености терена (473,03 km²), која покрива 48,63% простора истраживања.



Слика 64. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом BWM методе

Врло слаба угроженост терена има најмању просторну дистрибуцију и обухвата 66,93 km², односно 6,88% истраживаног простора. Умерена класа угрожености јавља се на 18,38% територије, односно 178,77 km² површине.

Табела 34. Класификација угрожености на основу BWM модела и просторни распоред

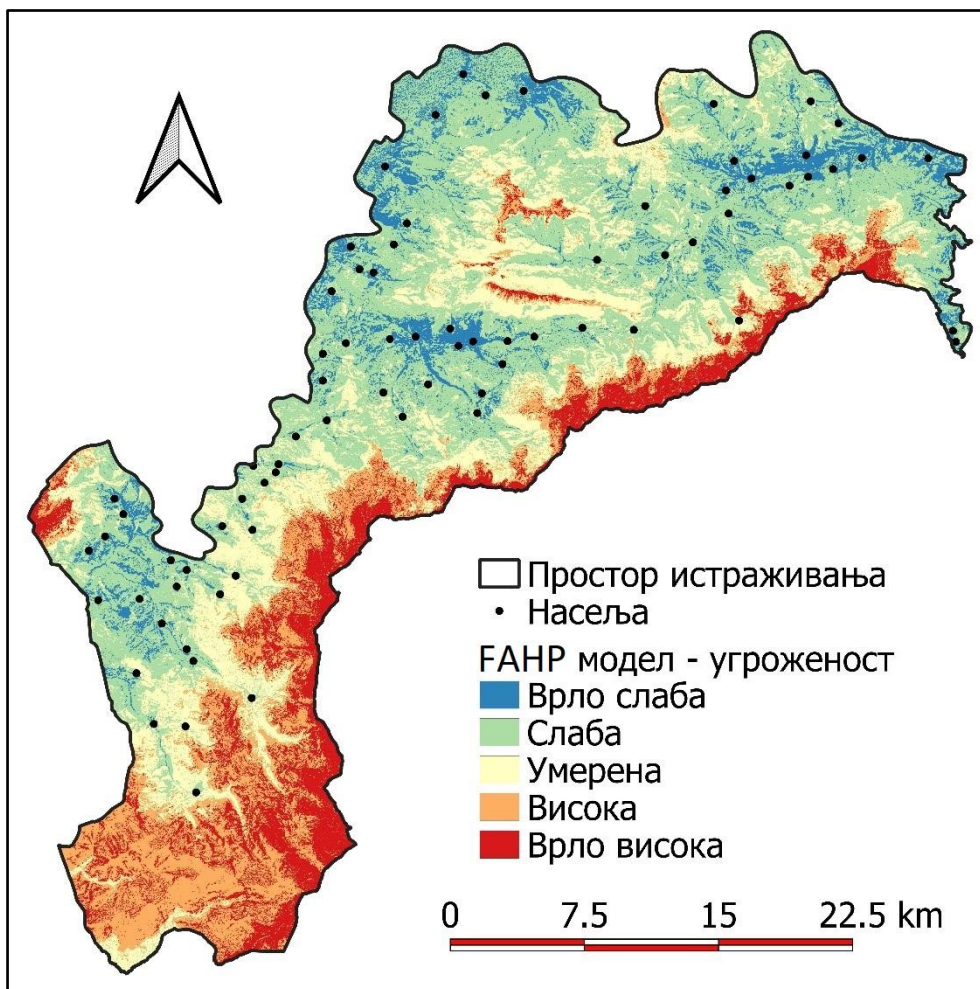
Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	66,93	6,88
Слаба	473,03	48,63
Умерена	178,77	18,38
Висока	151,86	15,61
Врло висока	102,12	10,50
Укупно	972,71	100,00

Висока класа угрожености је заступљена на 151,86 km² површине, односно 15,61% територије. Физичко-географски посматрано, класи високе и врло високе угрожености (10,5%, односно 102,12 km²), припадају шарпланински гребен, планине Коритник (2393 m, југозападна падина), Ошљак (2212 m, јужна падина), Острвица (2092, јужна падина) и Тронежа (1934 m). Као и код АНР методе, BWM је идентификовао делове насеља Рестелица и ски-центра „Брезовица“ као угрожене.

BWM модел је за предикцију снежних лавина примењиван у Турској. Kопurhan и др. (2023) су користили ГИС и BWM за анализу угрожености провинције Тунчели снежним лавинама. Процесуирано је и обрађено 16 критеријума попут нагиба терена, надморске висине, броја снежних дана итд. Финални резултати су показали да је северни део истраживаног подручја највише подложен формирању снежних лавина.

7.2.2. Фази аналитичко-хијерархијски процес

Методом фази аналитичко-хијерархијског процеса (FАНР) извршена је евалуација критеријума идентично као код класичне АНР методе. Међутим, у FАНР матрици коришћени су фази бројеви, који доносиоцима одлука омогућавају флексибилнији приступ, односно мање субјективне резултате. Врло слаба угроженост забележена је на 9,65% површине, односно 93,92 km².



Слика 65. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом FАНР методе

Као код класичних модела вишекритеријумске анализе, и FАНР приступ издваја слабу угроженост као доминантну на Шар планини. Овом класом обухваћено је 400,02 km² површине, односно 41,12%. Умерена класа је заступљена на 21,31% Шаре, што просторно обухвата површину од 207,31 km². Као што је раније наведено, класу умерене угрожености треба сагледати као потенцијалне трасе кретања снежних лавина.

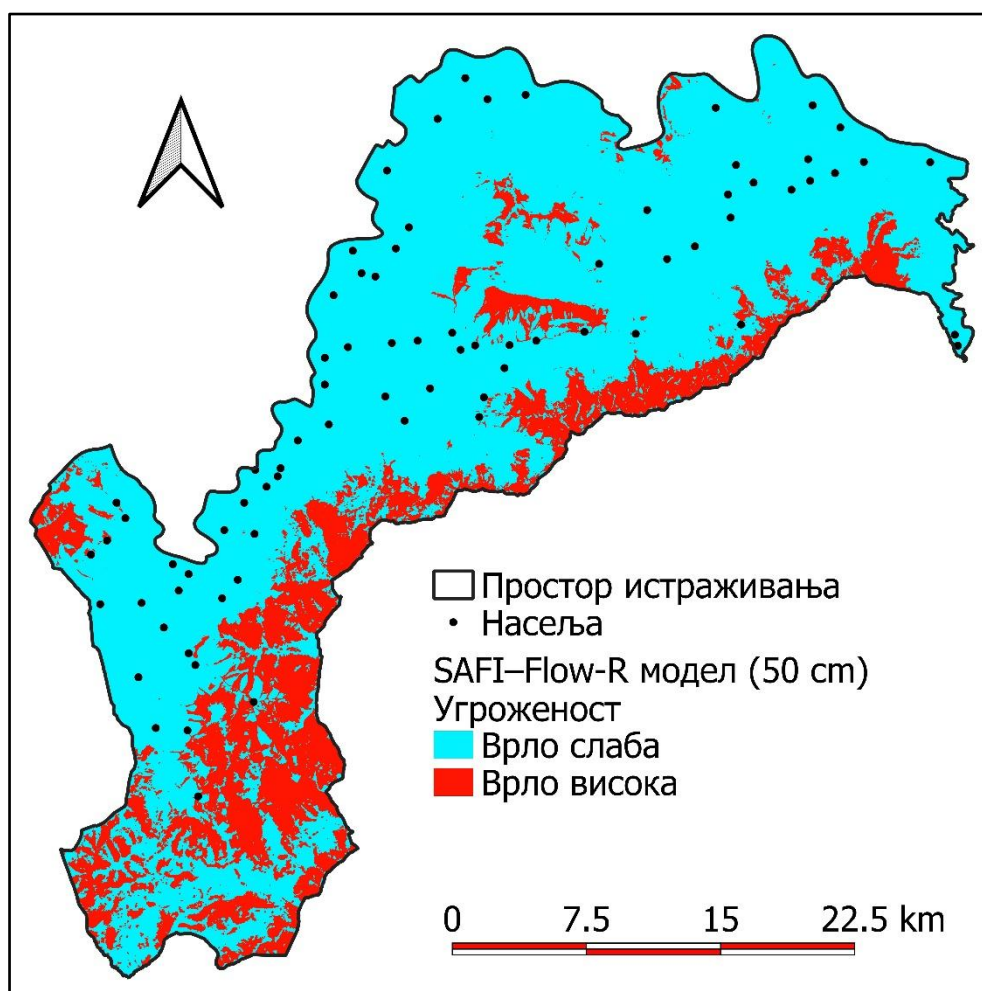
Табела 35. Класификација угрожености на основу FАНР модела и просторни распоред

Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	93,92	9,65
Слаба	400,02	41,12
Умерена	207,31	21,31
Висока	153,09	15,74
Врло висока	118,46	12,18
Укупно	972,81	100,00

Висока угроженост констатована је на 153,09 km², односно 15,74% истраживаног простора. Ова класа је карактеристична за високопланинске пределе шарпланинског гребена, као и околне планине (Коритник, Ошљак, Острвица). Врло висока класа угрожености је заступљена на 12,18% територије, што чини 118,46 km² површине. Најугроженији терени везују се за подножја планинских врхова на којима доминира значајна количина снежних падавина, већи нагиби терена и ниска вегетација. Са аспекта животне средине, ФАНР такође издваја насеља Рестелицу и ски-центар „Брезовица“ као веома предиспониране лавинама. ФАНР је за потребе дистрибуције снежних лавина примењен у туристичком региону Узунгол (Трабзон, Турска). Varol (2022) је од просторних података анализирао надморску висину, нагиб, експозицију, закривљеност и типове вегетације. Резултати су указали да је у овој студији ФАНР имао бољу успешност (73,24%) за разлику од класичног АНР модела (71,15%).

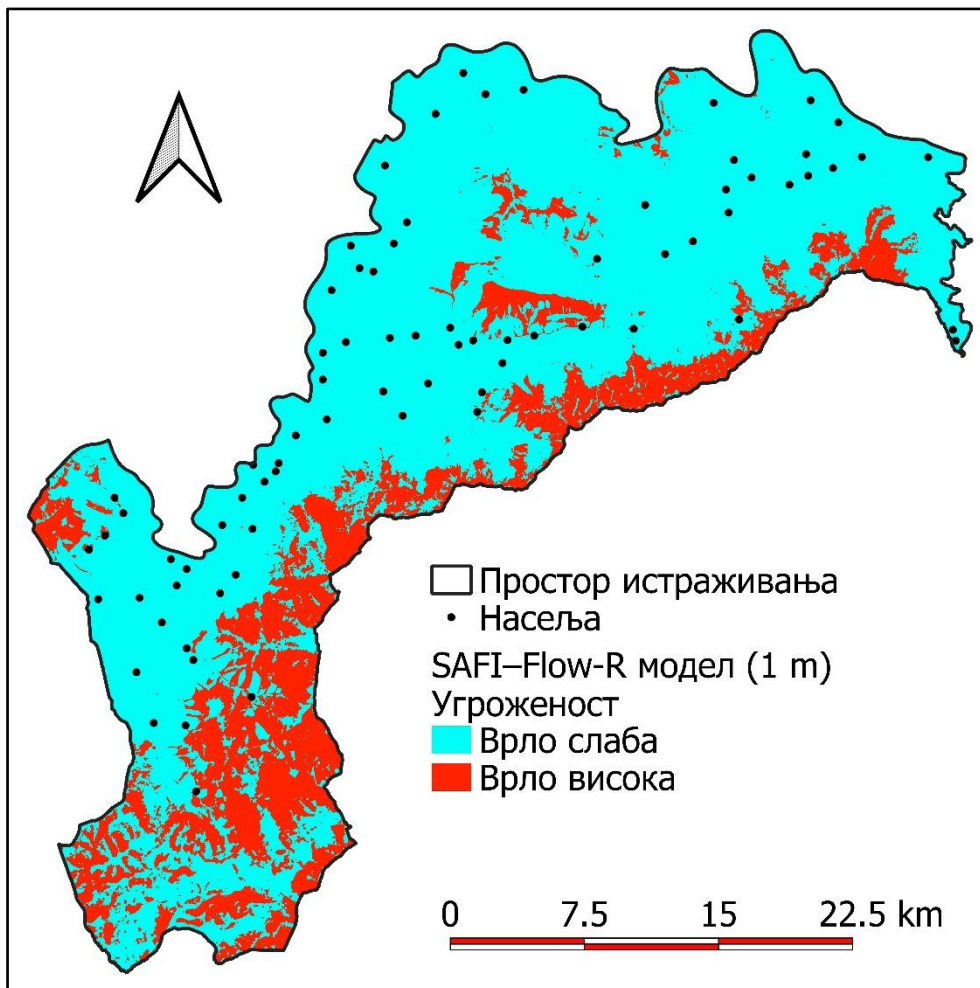
7.2.3. Нумеричко моделовање (пропагација)

Пропагација снежних лавина базира се на SAFI-Flow-R приступу. Најпре су на основу SAFI методе издвојена изворна подручја, односно потенцијалне стартне зоне, које покривају површину од 67,6 km². Након тога извршено је моделовање снежних лавина у Flow-R 2.0. софтверском пакету.



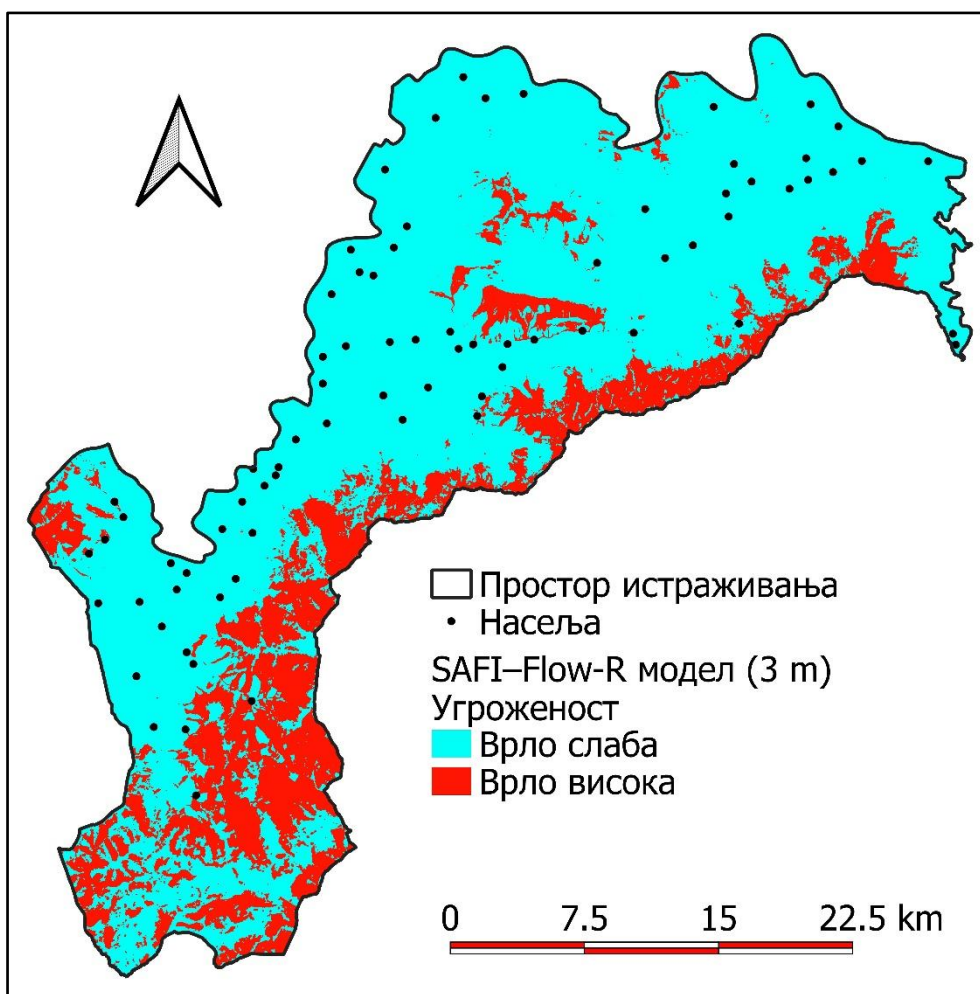
Слика 66. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 50 cm

Идентификовано је да је 282,9 km² површине, односно 29,2% територије Шаре подложно формирању, кретању и акумулацији лавинског материјала при потенцијалној дебљини покренутог снега са изворних подручја од 50 cm. Од планинских области, угрожене су падине на шарпланинском гребену, Коритнику, Ошљаку, Изгореници, Острвици и Тронеђи. Посматрано са аспекта животне средине, снежним лавинама подложна су насеља: Рестелица, Брод, Мушниково и ски-центар „Брезовица”.



Слика 67. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 1 m

У другом сценарију нумеричког моделовања, уколико би потенцијално покренути слојеви са стартних зона имали дебљину од 1 m, угрожено би било 285,5 km² површине, односно 29,4% простора истраживања. Идентична насеља су подложна лавинама као и у првом сценарију, међутим у овом случају би зона акумулације била нешто већа. Трећи сценарио пропагације подразумевао је анализу угрожене територије при дебљини покренутог слоја од 3 m.



Слика 68. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 3 m

У овом случају 294,3 km² површине било би предиспонирано снежним лавинама, што чини 30,3% укупне територије. Зона акумулације лавина била би знатно већа, чиме би се повећао ризик од значајних последица лавинских токова по стамбене објекте унутар Рестелице, Брода, Мушникове и ски-центра „Брезовица“. Софтвери нумеричког моделовања представљају методе које се годинама уназад користе у предикцији различитих типова природних хазарда. Предност оваквих модела за разлику од других метода јесте да се применом релевантних података прецизно идентификује комплетна анатомија снежних лавина од стартних зона до зона депозиције снега.

Главне предности SAFI-Flow-R приступа подразумевају (Durlević и др., 2024):

- Универзалност модела. Због примене најважнијих физичких детерминанти, моделовање лавина SAFI-Flow-R приступом омогућава приказ потенцијалне геопросторне дистрибуције лавина у различитим планинским регионима широм света (Шар планина, Алпи, Анди, Хималаји, Стеновите планине, Кавказ итд.);
- Компактно моделовање снежних лавина од стартне зоне до зоне акумулације;
- Геопросторно моделовање снежних лавина са или без инвентара снежних лавина. За разлику од многих статистичких метода и модела машинског учења, SAFI-Flow-R може понудити релевантне резултате без историјских података, што значајно олакшава рад истраживача у деловима планинских региона где не постоје инвентари лавина;

- Идентификацију угрожених подручја на регионалном нивоу. У релативно кратком периоду могу се добити резултати о пропагацији лавина за територије веће од 1000 km²;
- Једноставна апликација и обрада података. Сви подаци (снежни покривач, нагиб терена и намена земљишта) су отворени подаци који се могу обрадити коришћењем ГИС алата и даљинске детекције.

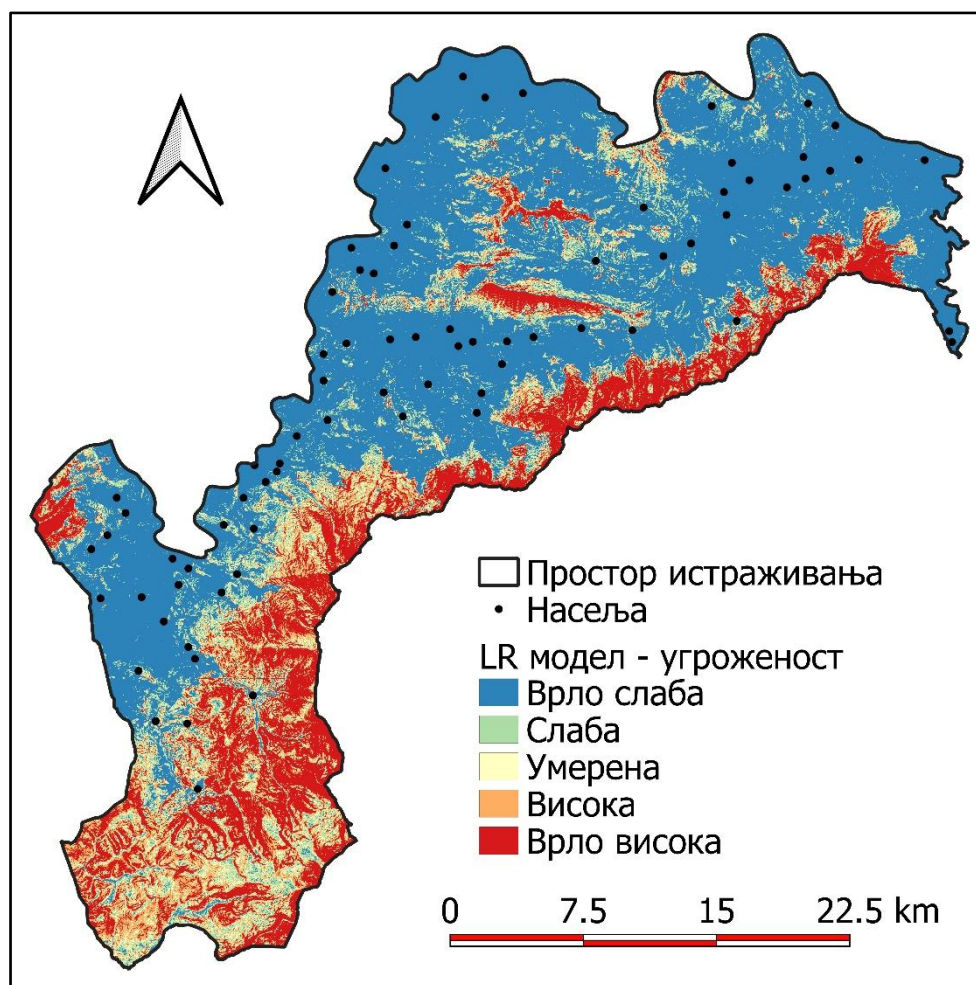
Пионирска истраживања апликације Flow-R приступа на предикцију снежних лавина извршена су током 2012. године. Jaboyedoff и др. (2012) применили су Flow-R прорачуне за моделовање лавина у долини Багнес на швајцарским Алпима. За геопростору анализу коришћен је дигитални модел висина просторне резолуције 2 m и топографске карте. За изворна подручја издвојили су терене са нагибом 30-50⁰ са висинском зоном изнад 1000 m без присуства шума. Означено је да је минимална површина покретања лавина > 900 m². SAFI индексом је коригован нагиб терена на 20-60⁰ у складу са подацима центра за истраживање лавина у Јути (Utah Avalanche Center, 2024). Поред Flow-R модела, за нумеричко моделовање лавина се могу користити и методе попут RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) и FLO-2D (Martini и др., 2023).

7.2.4. Машинско учење

Машинско учење представља грану вештачке интелигенције која је дизајнирана тако да омогући рачунарима извршавање задатака без експлицитног програмирања. Уз подршку ГИС и инвентара снежних лавина, применом шест метода машинског учења добијено је шест синтезних карата угрожености. Све синтезне карте су идентично класификоване: вредности 0-0,2 (врло слаба угроженост), вредности 0,2-0,4 (слаба угроженост), вредности 0,4-0,6 (умерена угроженост), вредности 0,6-0,8 (висока угроженост) и вредности 0,8-1 (врло висока угроженост). За предикцију лавина коришћени су основни (LR, L-SVM, G-SVM) и модели ансамбла (RF, LGBM, XGBoost).

7.2.4.1. Основни модели

Логистичка регресија (LR) је нелинеарни мултиваријантни статистички метод предвиђања, који је погодан за решавање проблема бинарне класификације мултиваријабилне контроле. Тренутно је геопросторно моделовање методама машинског учења у области геонаука широко примењено са високим процентом тачности (Bian и др., 2022).



Слика 69. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом логистичке регресије (LR)

Модел логистичке регресије (LR) један је од шест примењених метода машинског учења у предикцији снежних лавина. LR је показао да су доминантне врло слабо угрожене површине са 57,16% површине, што је 556,59 km². Овој класи припадају скоро сва насеља и подручја на којима није могуће формирање лавина. Класа слабе угрожености присутна је на 87,14 km² површине, што покрива 8,95% простора истраживања. Умерена угроженост покрива 7,71% територије, односно 75,1 km² површине.

Табела 36. Класификација угрожености на основу LR модела и просторни распоред

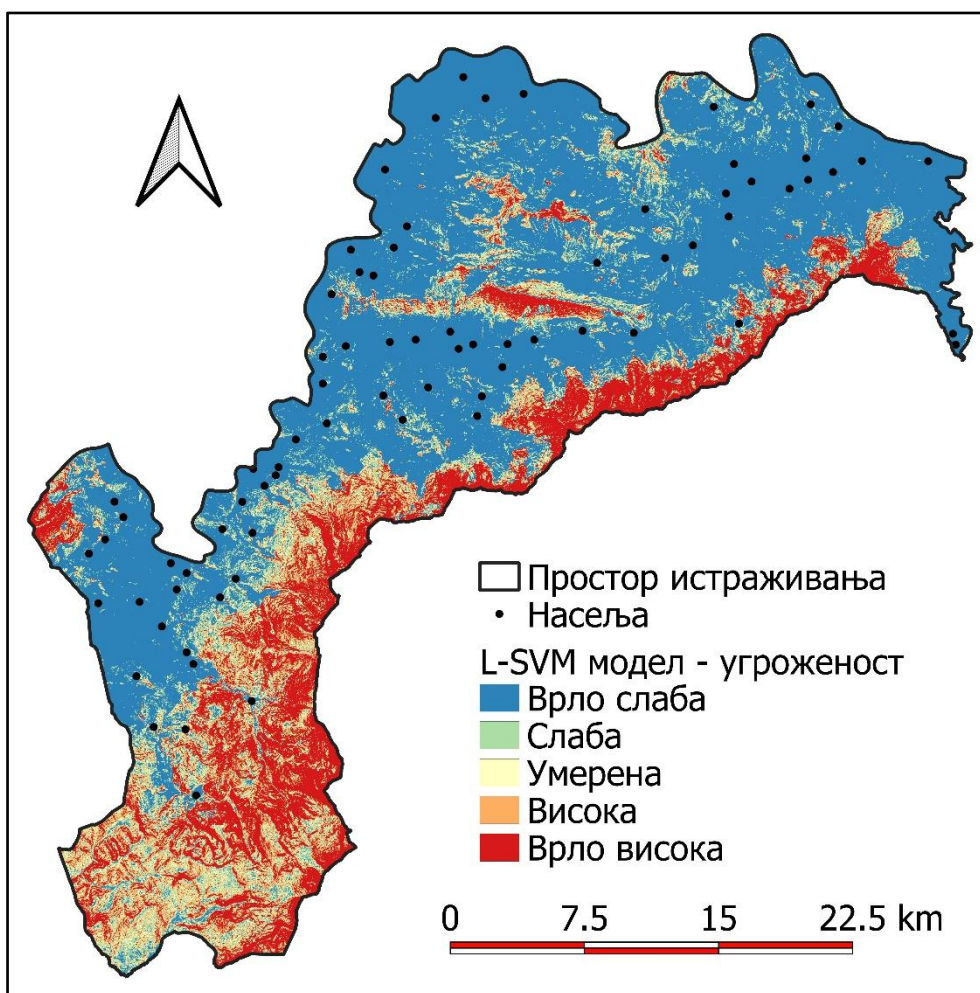
Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	556,59	57,16
Слаба	87,14	8,95
Умерена	75,10	7,71
Висока	86,44	8,88
Врло висока	168,44	17,30
Укупно	973,71	100,00

Нешто већа површина (86,44 km²) припада високој класи угрожености, што чини 8,88% Шар планине. Врло висока подложност карактеристична је за шарпланински гробен, јужну падину Ошљака, Коритник и Острвицу. Падине изнад насеља Злипоток су означене као врло подложне лавинама.

Поред Злипотока, као угрожена насеља издвајају се Брод (општина Гора), Рестелица и ски-центар „Брезовица”. Врло висока угроженост обухвата 168,44 km² површине, што чини 17,3% територије Шар планине.

Bian и др. (2022) користили су интегрисане моделе статистичких метода (evidence confidence function [EBF] и certainty coefficient [CF]) и машинског учења (LR и multilayer perceptron [MLP]) за предикцију лавина на планини Шалули (Кина). Креирали су инвентар лавина базиран на 161 узорку мапираних лавина и 14 критеријума, односно природних и антропогених услова. Резултати су показали да EBF-LR има предиктивну моћ од 0,858 (85,8%), док је CF-LR прецизнији од предхотног, са AUC вредношћу од 0,872.

Support Vector Machine (SVM) је надгледани алгоритам машинског учења који се користи за решавање задатака класификације и регресије. Приликом анализе геопросторног моделовања применом Support Vector Machine (SVM) алгоритма, примењена су два различита приступа: линеарни Support Vector Machine модел (L-SVM) и Гаусова радијална базна функција језгра (G-SVM).



Слика 70. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом линеарног Support Vector Machine модела (L-SVM)

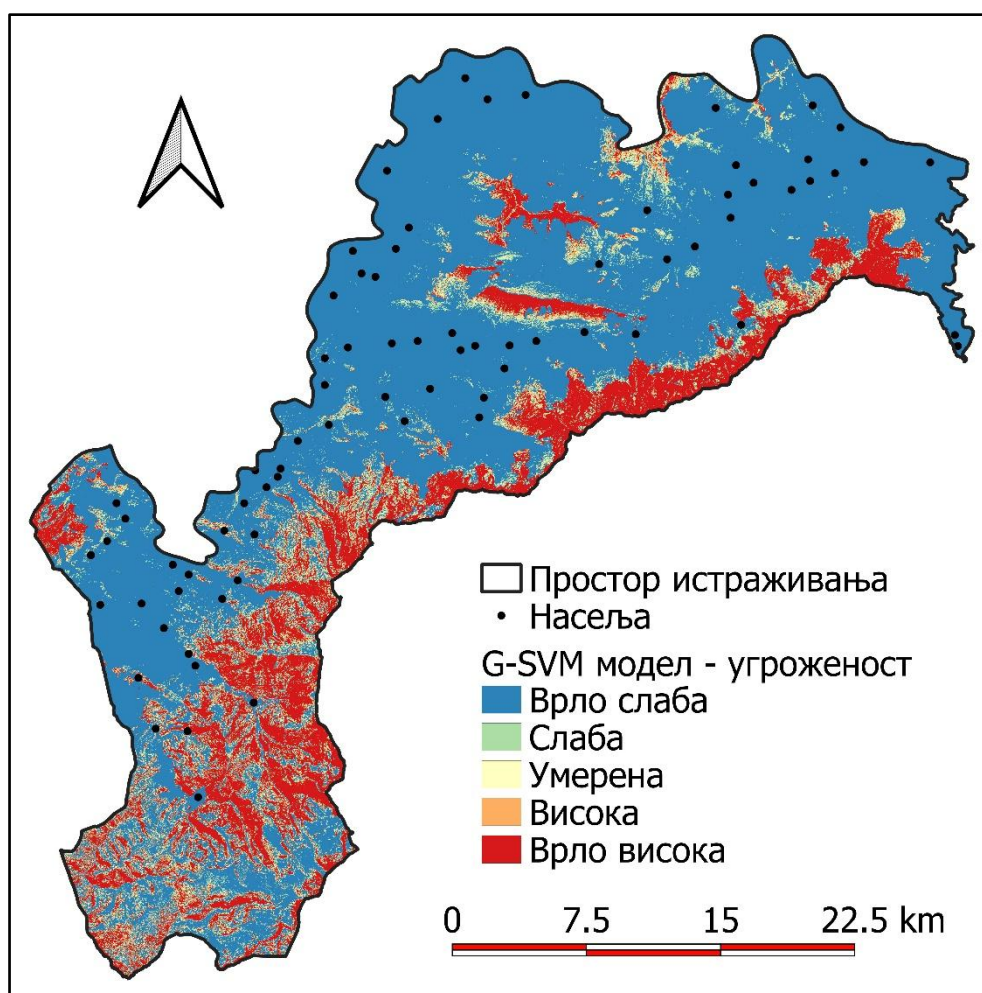
Као у случају LR алгоритма, и L-SVM издваја врло слабо угрожене површине као доминантне, са уделом од 58,8%, односно 572,55 km² простора истраживања. Слаба (83,79 km², 8,6%), умерена (72,5 km², 7,45%) и висока (82,16km², 8,44%) угроженост имају релативно сличну геопросторну дистрибуцију, док је врло висока подложност лавинама приказана на 16,71% површине, што просторно износи 162,71 km².

Табела 37. Класификација угрожености на основу L-SVM модела и просторни распоред

Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	572,55	58,80
Слаба	83,79	8,60
Умерена	72,50	7,45
Висока	82,16	8,44
Врло висока	162,71	16,71
Укупно	973,71	100,00

Физичко-географски посматрано, L-SVM идентификује исте планинске регионе као и LR модел као угрожене, док се од насеља издвајају: Радеша, Брод, Рестелица, Злипоток и ски-центар „Брезовица”.

G-SVM алгоритам је врло слабо угрожене површине означио на 69,43% територије, што је највећи проценат ове класе када се ради о моделима машинског учења. Овој класи која заузима површину од 676,03 km² припада највећи број насеља.



Слика 71. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Гаусове радијалне базне функције језгра Support Vector Machine модела (G-SVM)

Класа слабе угрожености обухвата 50,91 km² површине, што чини 5,23% Шаре. Најмање је присутна умерена класа угрожености која просторно обухвата 38,52 km², односно 3,96% истраживане области. Висока класа угрожености присутна је на 4,36% територије, што је 42,42 km² укупне површине.

Табела 38. Класификација угрожености на основу G-SVM модела и просторни распоред

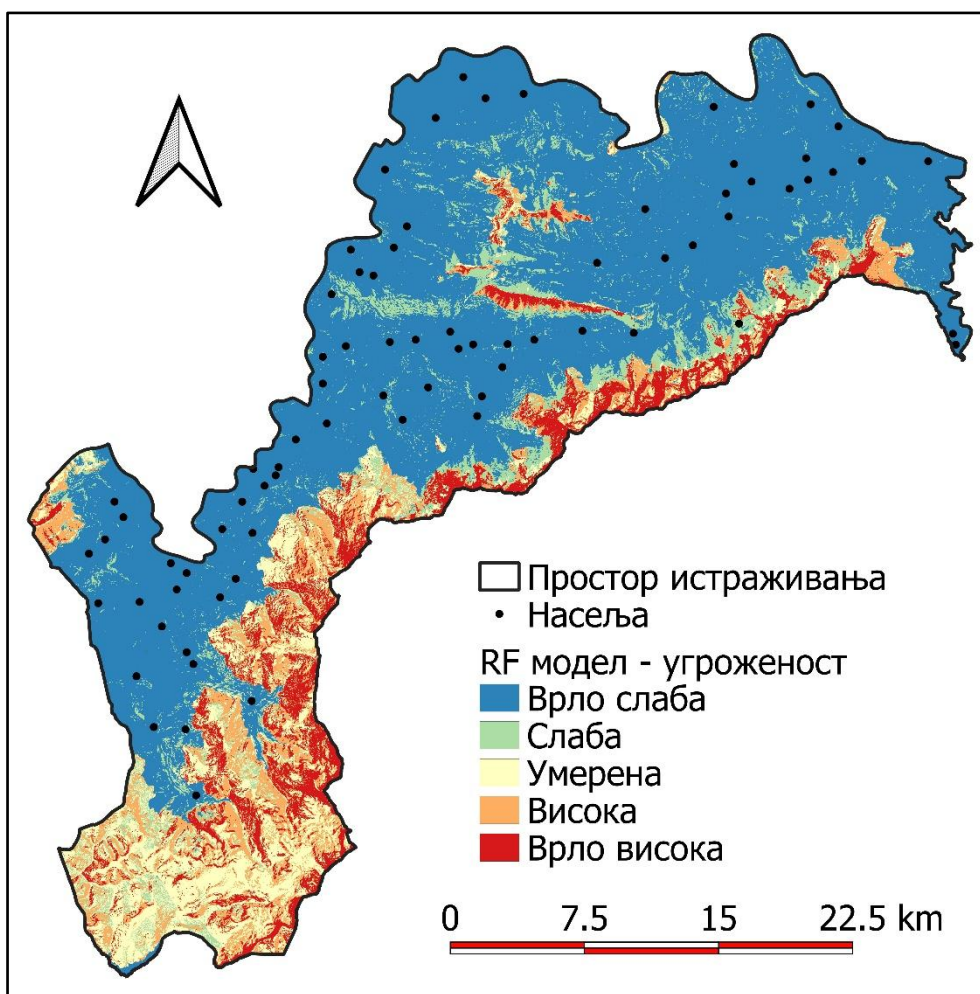
Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	676,03	69,43
Слаба	50,91	5,23
Умерена	38,52	3,96
Висока	42,42	4,36
Врло висока	165,83	17,03
Укупно	973,71	100,00

Класа врло високе угрожености покрива 17,03% територије, односно 165,83 km² површине. Овој класи припадају сви планински региони који су у LR поглављу означени као угрожени, док су за ризична насеља издвојена: Рестелица, Злипоток и ски-центар „Брезовица“. Интересантан је резултат да G-SVM за разлику од L-SVM модела није препознао Брод и Радешу као угрожена насеља.

SVM је примењиван за геопросторно моделовање снежних лавина у Ирану и Кини. Rahmati и др. (2019) су истраживали подложност два планинска региона (Заринехруд и Дарван) у Ирану снежним лавинама применом већег броја модела машинског учења. На основу 14 обрађених критеријума и 177 узорака, утврђено је да SVM класификатор има високу предиктивну моћ од 0,96 (тачност од 96%). У Кини су Yang и др. (2022) извршили геопросторно моделовање снежних лавина током зиме и пролећа на Тјен Шан планини. Анализом 24 критеријума и инвентаром лавина који броји 735 узорака, применом SVM алгоритма добијени су резултати који указују на предиктивну моћ SVM класификатора од 0,86.

7.2.4.2. Модели ансамбла

Random Forest (RF) алгоритам један је од првих модела машинског учења који се због своје једноставности и разноликости широко примењује за предикцију природних хазарда. RF примењује ансамбл технику у циљу побољшања тачности предвиђања. Врло слаба угроженост присутна је на 615,71 km², односно 63,23% укупне територије. Најмање просторно заступљена класа је слаба угроженост, која обухвата 8,35% Шаре, што просторно износи 81,29 km². Умерена угроженост покрива 98,19 km² површине, што је 10,08% простора истраживања.



Слика 72. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Random Forest (RF) модела

Терени који су високо подложни лавинама обухватају 9,91% територије, односно 96,47 km² површине. Врло високо угрожене територије карактеристичне су за идентичне планинске области као код SVM клафикатора, површине 82,08 km², односно 8,43% истраживане територије.

Табела 39. Класификација угрожености на основу RF модела и просторни распоред

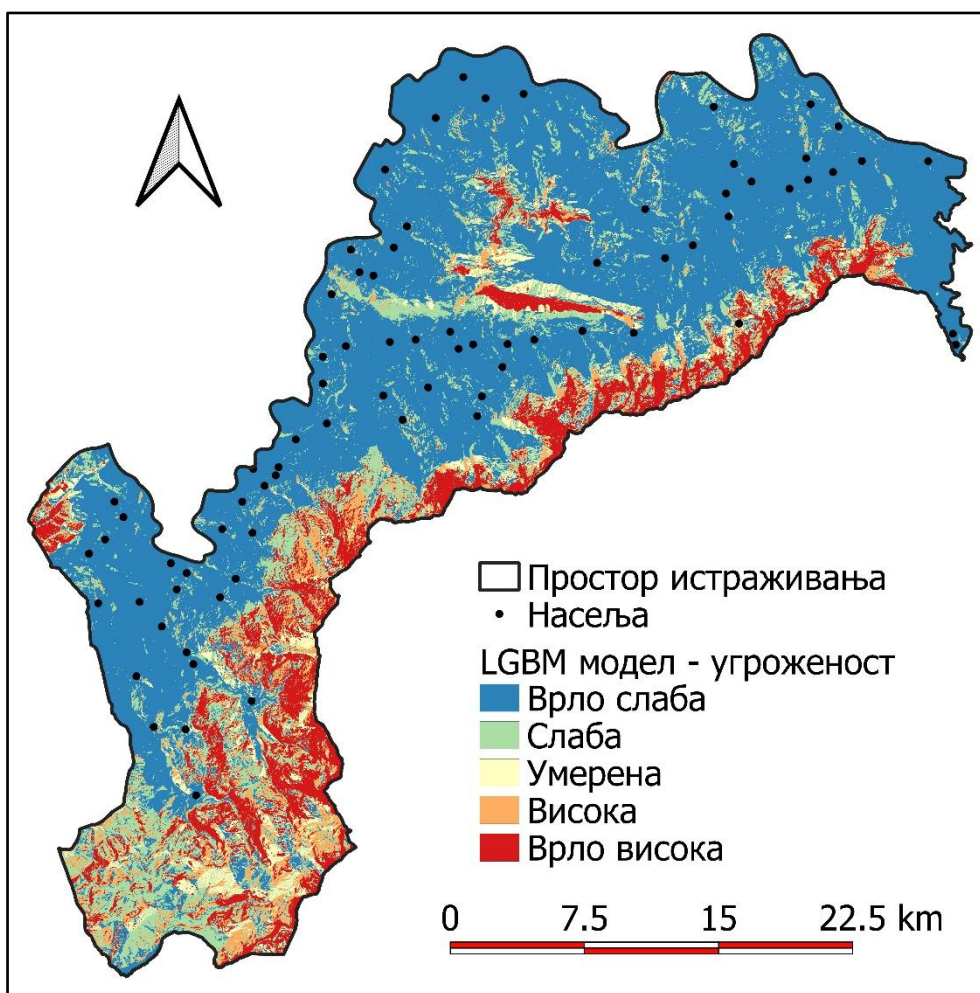
Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	615,71	63,23
Слаба	81,29	8,35
Умерена	98,19	10,08
Висока	96,47	9,91
Врло висока	82,08	8,43
Укупно	973,73	100,00

Са аспекта животне средине постоје одређене разлике у односу на друге моделе машинског учења. RF алгоритам издваја само део Рестелице и ски-центар „Брезовица” као насеља подложна деловању лавина.

Rahmati и др. (2019) су приликом истраживања два планинска региона у Ирану, утврдили високу предиктивну моћ RF модела која у овој студији износи 0,97. Акау (2021) је применом модела машинског учења моделовао геопросторну дистрибуцију лавина на територији Узунгол басена у Турској.

На основу обрађених 24 критеријума и 150 лавинских узорака, за тестирано подручје добијена је AUC вредност од 0,99. На Тјен Шан планини (Кина) су Yang и др. (2022) добили резултати да RF класификатор током зимских месеци приказује перформансе прецизности 0,88. Приликом истраживања провинције Сондрио (Италија) подложности снежним лавинама, један од коришћених модела био је RF. За ову студију су Iban и Bilgilioglu (2023) користили инвентар од 1880 узорака, да би на крају резултати показали предиктивну моћ RF алгоритма у вредности од 0,971.

Light Gradient-Boosting Machine (LGBM) представља ефикасан модел машинског учења који се базира на техникама градијентног појачавања. Развијен је са циљем брзог процесуирања велике количине података користећи хистограмску методу која смањује меморијске захтеве и време обуке. На Шар планини је на основу LGBM модела идентификована врло слаба класа угрожености на 602,34 km² површине, односно 61,86% територије. Класа слабе угрожености јавља се на 14,29% простора истраживања, односно 139,11 km² површине.



Слика 73. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Light Gradient-Boosting Machine (LGBM) модела

Умерена класа је најмање затупљена на Шари, обухвата 4,8% територије, што просторно покрива 46,78 km².

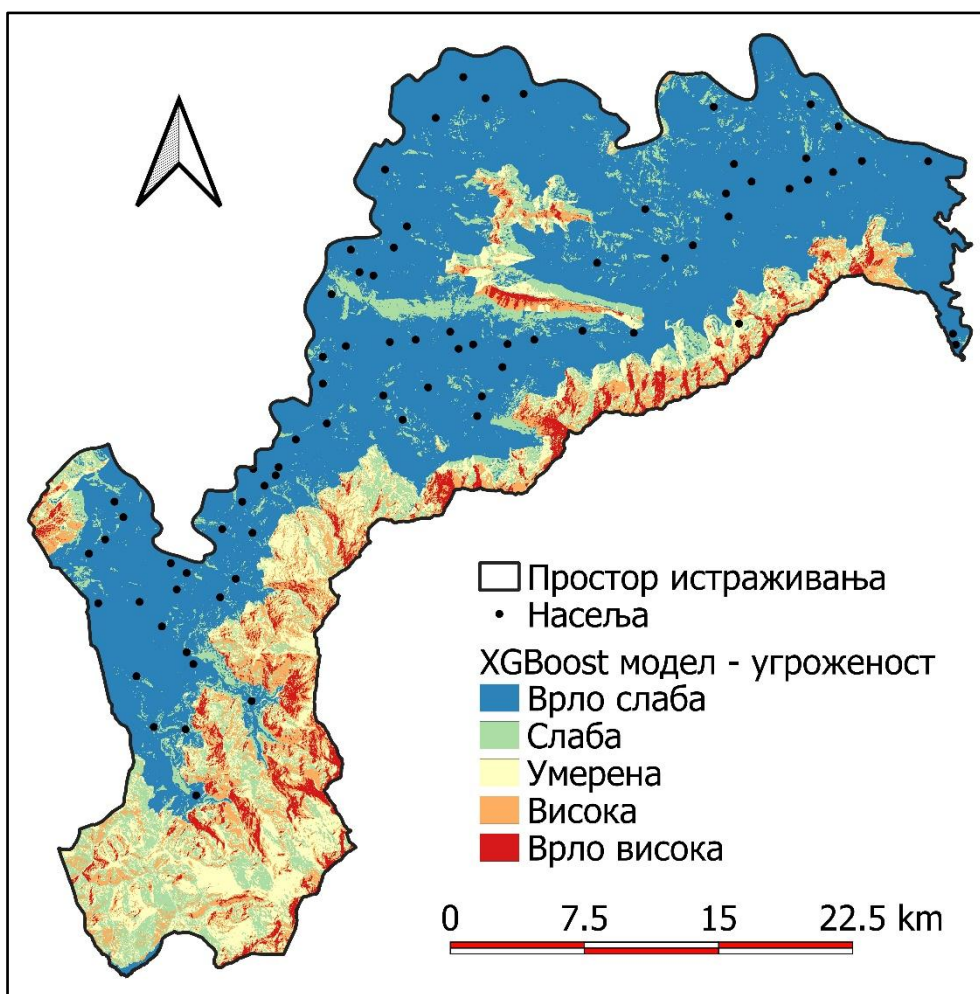
Табела 40. Класификација угрожености на основу LGBM модела и просторни распоред

Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	602,34	61,86
Слаба	139,11	14,29
Умерена	46,78	4,80
Висока	70,64	7,25
Врло висока	114,86	11,80
Укупно	973,73	100,00

Класа високе угрожености присутна је на 70,64 km² површине, односно 7,25% Шаре. Врло висока угроженост покрива 11,8% истраживане области, што просторно обухвата површину од 114,86 km². Физичко-географски и административно посматрано, резултати LGBM модела врло су слични резултатима RF методе, јер су идентична подручја и планински региони угрожени формирањем снежних лавина.

Iban и Bilgilioglu (2023) су приликом истраживања провинције Сондрио (Италија) предиспонираности лавинама, добили финалне резултате где је LGBM класификатор показао високу предиктивну моћ од 0,974.

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) је модел машинског учења који се као и LGBM темељи на техници градијентног појачавања. Омогућава корисницима да брзо и ефикасно истраже важност карактеристика, односно коришћених података. Скоро сва насеља припадају класи врло слабе угрожености, која покрива 588,78 km² површине, односно 60,47% укупног удела у површини. Класа слабе угрожености јавља се на 129,12 km² површине, односно 13,26% простора истраживања. Умерена угроженост присутна је на 122,72 km² површине, што процентуално износи 12,6%.



Слика 74. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Extreme Gradient Boosting (XGBoost) модела

Класа високе угрожености обухвата 9,43% територије Шаре, односно 91,86 km² површине.

Табела 41. Класификација угрожености на основу XGBoost модела и просторни распоред

Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	588,78	60,47
Слаба	129,12	13,26
Умерена	122,72	12,60
Висока	91,86	9,43
Врло висока	41,25	4,24
Укупно	973,73	100,00

Код XGBoost алгоритма је од свих модела машинског учења издваја класа врло високе угрожености са најмањом површином (41,25 km²), што просторно покрива 4,24% укупне територије. Попут других коришћених модела, XGBoost такође издваја планинске регионе шарпланинског гребена, Коритника, Ошљака, Острвице и Тронеђе као рањива подручја. Од насељених места, Рестелица и ски-центар „Брезовица” су предиспонирани снежним лавинама.

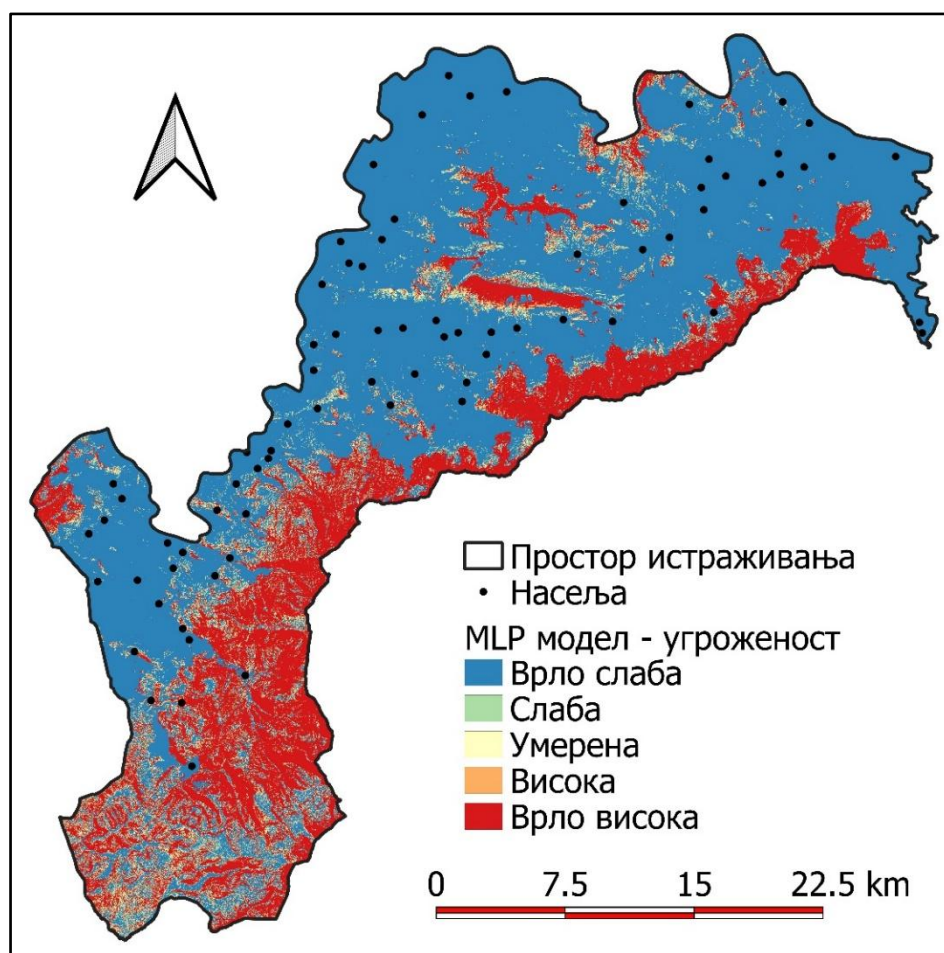
У студији угрожености провинције Сондрио (Италија) снежним лавинама, Іban и Bilgilioglu (2023) су користили XGBoost класификатор који се показао као бољи, односно прецизнији од RF и LGBM модела јер је финални AUC резултат износио 0,977.

7.2.5. Дубоко учење

Дубоко учење је грана машинског учења заснована на вештачким неуронским мрежама. Ослања се на алгоритме који анализирају податке са логичном структуром, слично као што би човек доносио закључке. За ову сврху дубоко учење структурира алгоритме у више слојева са циљем стварања вештачке неуронске мреже која учи из великих количина података и сама доноси интелигентне одлуке. Од модела машинског учења, за предикцију снежних лавина коришћен је Multi-Layer Perceptron (MLP) модел.

7.2.5.1. Multi-Layer Perceptron модел

Multi-Layer Perceptron (MLP) модел представља вештачку неуронску мрежу која се широко примењује за решавање задатака класификације и регресије. MLP се састоји од повезаних густих слојева који трансформишу улазне податке из једне димензије у другу. Сврха MLP је моделовање сложених односа између улаза и излаза, чинећи га моћним алатом за различите задатке машинског учења. Иако је класификација финалних вредности у ГИС-у одрађена као и за методе машинског учења, постоје значајне разлике у геопросторној дистрибуцији и добијеним резултатима.



Слика 75. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Multi-Layer Perceptron (MLP) модела

Класа врло слабе угрожености покрива 65,48% територије, односно 637,56 km² површине. Убедљиво најмање заступљене су класе слабе (36,33 km², 3,73%), умерене (30,03 km², 3,09%) и високе (35,91 km², 3,69%) угрожености.

Врло висока угроженост је највише заступљена у MLP алгоритму у односу на остале моделе машинског учења, са просторним обухватом од 233,84 km² површине, што је 24,02% укупне територије. Резултати показују да вештачка неуронска мрежа углавном издваја резултате на „неповољне” и „повољне”, што је веома слично људском размишљању и логици.

Табела 42. Класификација угрожености на основу MLP модела и просторни распоред

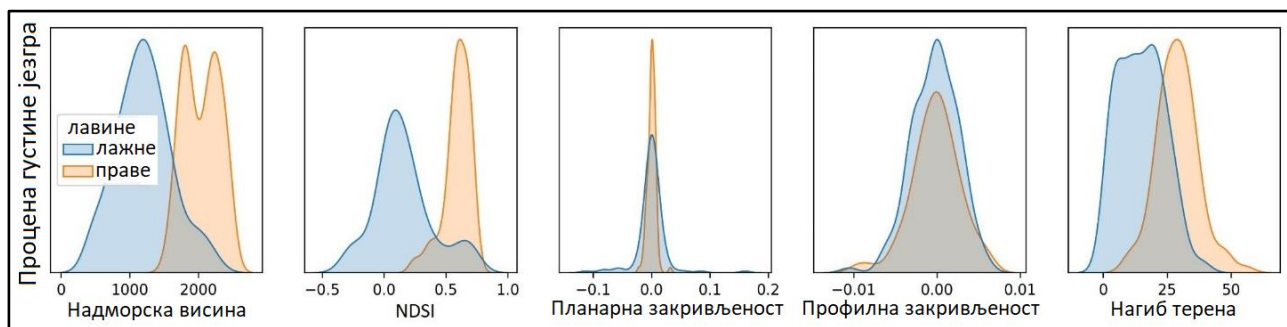
Угроженост	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Врло слаба	637,56	65,48
Слаба	36,33	3,73
Умерена	30,07	3,09
Висока	35,91	3,69
Врло висока	233,84	24,02
Укупно	973,71	100,00

Физичко-географски посматрано, поред већ издвојених планина у моделима машинског учења, MLP означава као подложне лавинама Жар планину и источни обод Језерске планине. Од насеља, угрожени су делови: Рестелице, Брода, Злиптока, Зрзе и ски-центар „Брезовица”.

Интеграцијом статистичких метода (evidence confidence function [EBF] и certainty coefficient [CF]) и MLP, Bian и др. (2022) су добили финалне резултате предикције снежних лавина за простор планине Шалули (Кина). На основу 161 узорка лавина и 14 обрађених фактора, утврђено је да модел CF-MLP има знатно већу предиктивну моћ (0,872) од EBF-MLP интегрисаног модела (0,781).

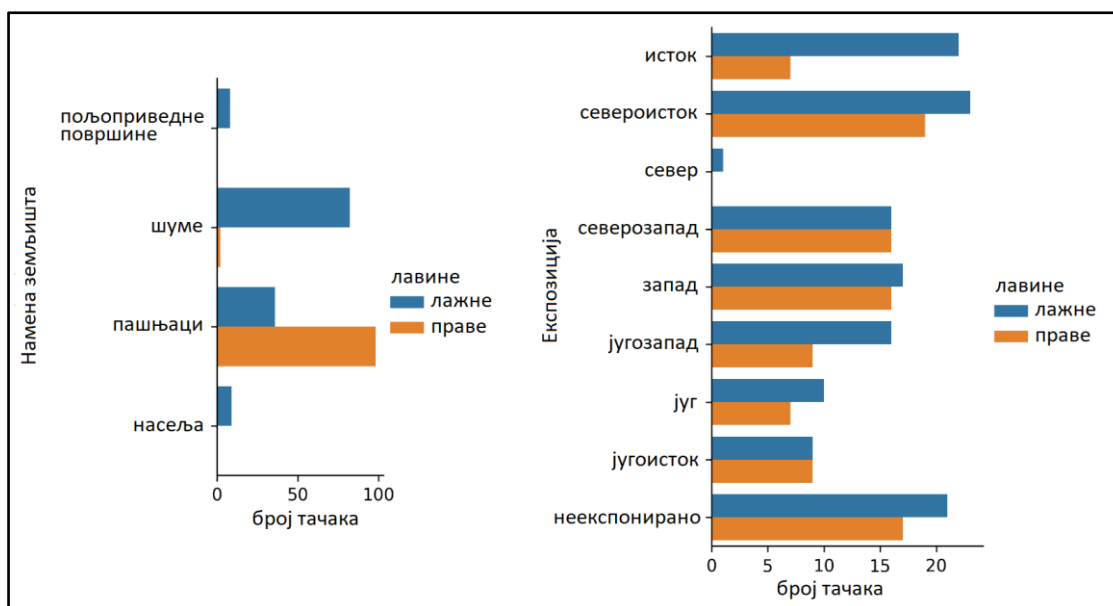
7.2.5.2. Истраживачка анализа података

Приликом анализе, уклоњени су критеријуми зимских падавина и температуре ваздуха из скупа карактеристика, пошто су они линеарне функције надморске висине. Међу преосталим континуираним карактеристикама, неке показују значајну корелацију са циљном променљивом, са коефицијентима корелације од 0,75 за NDSI, затим 0,63 за нагиб и 0,77 за надморску висину. Планарна и профилна закривљеност имају коефицијент корелације од 0,01 са циљном променљивом, што сугерише да имају слабу предиктивну моћ за задатак класификације. Исти закључак се може извести из слике 75, која приказује процене условне густине језгра за континуалне карактеристике. Дистрибуција вредности закривљености за лавине је прилично слична, посебно за профилну закривљеност.



Слика 76. Процене условне густине језгра за континуалне карактеристике

Теоретски, варијабла намене земљишта узима своје вредности из скупа од седам категорија. На слици 76. приказана је дистрибуција вредности намене земљишта и карактеристике експозиције.



Слика 77. Дистрибуција вредности за категоријалне карактеристике

Први график показује да се само четири од седам категорија намене земљишта налазе у скупу података. Модел машинског учења може детектовати да су пашњаци главни индикатори стварних лавина, док су шуме више повезане са лажно позитивним класама. Други график приказује експозицију са акцентом на североисток и исток, стране које су чешће повезане са лавинама.

7.3. ВАЛИДАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

Након добијања синтезних карата угрожености Шар планине снежним лавинама, приступило се валидацији финалних резултата. За сваки од 11 методолошких приступа примењена је ROC-AUC валидација која је нашла широку примену у бројним студијама о природним хазардима широм света. Валидација је извршена на основу финалних резултата (класа) и инвентара лавина.

Табела 43. Валидација финалних резултата угрожености Шар планине снежним лавинама

Метод	Укључивање инвентара лавина у методолошки прорачун	AUC вредности
AHP	Без инвентара	0,938 (93,8%)
BWM		0,919 (91,9%)
FAHP		0,906 (90,6%)
SAFI-Flow-R		0,940 (94%)
LR	Са инвентаром	0,992 (99,2%)
L-SVM		0,999 (99,9%)
G-SVM		0,999 (99,9%)
RF		0,999 (99,9%)
LGBM		0,993 (99,3%)
XGBoost		0,990 (99%)
MLP		0,990 (99%)

Пошто је инвентар лавина израђен на основу тачака (локација) које приказују стартне зоне снежних лавина, највећи број метода (10 од 11) своје врло високе класе угрожености повезује са местима на којима се формирају снежне лавине. Једино је SAFI-Flow-R као метод нумеричког моделовања обухватио комплетну анатомију снежне лавине. AUC вредности показују врло високу предиктивну моћ свих коришћених методологија. Вредности су у опсегу од 0,906 (FANP) до 0,999 (L-SVM, G-SVM, RF).

Иако садржи одређене елементе стохастичког приступа (фази логика), FANP се одликује најмањом предиктивном моћи (90,6%). Модели класичне вишекритеријумске анализе показали су бољу прецизност. AUC вредност за BWM метод износи 91,9%, док за класичан ANP метод износи 93,8%. SAFI-Flow-R због свог сложеног алгоритмима који се базира на моделовању правца тока и функција перзистентности, као и динамиком струјања лавинског тока може да предвиди геопросторну дистрибуцију комплетне снежне лавине: од стартне зоне, преко зоне кретања до зоне депозиције. Иако за улазне податке не користи инвентар лавина, SAFI-Flow-R има врло високу моћ предикције (94%). Теренским истраживањима потврђено је да овај модел даје врло прецизне резултате.

Модели машинског и дубоког учења користили су инвентар лавина као један од улазних података. Сви класификатори су показали скоро савршену предиктивну моћ. XGBoost и MLP модели означени су са 99% тачности. Иако имају исту предиктивну моћ, постоје разлике у дефинисању угрожених зона ова два модела. MLP резултати су знатно екстремнији и издвајају Језерску планину и Жар планину као угрожене зоне, док у осталим моделима то није био случај.

LGBM класификатор има AUC вредност од 99,3%, док преостали модели (L-SVM, G-SVM, RF) приказују AUC тачност од 99,9%. Са аспекта животне средине, теренском и визуелном анализом, постоје разлике у издвајању угрожених зона и код ових модела. L-SVM идентификује Радешу као угрожено насеље, иако не постоји велики потенцијал за настанак лавина у Радеши. Са друге стране, G-SVM алгоритам није препознао Брод као угрожено насеље, иако је он у другим методолошким приступима и резултатима издвојен као веома подложен. RF приказује резултате који су у складу са историјским подацима и издваја само Рестелицу и ски-центар „Брезовица“ за угрожена насеља. Ова ограничења у резултатима последица су недостатка детаљнијег инвентара о локацијама на којима се лавине крећу и акумулирају. Због тога је неопходно користити велики број различитих методолошких приступа и вршити теренска истраживања која ће потврдити или негирати добијене резултате.

Табела 44. Перформансе модела на тестираним скуповима. Приказане вредности су средње вредности и стандардне девијације (у заградама). FAHP не зависи од тестирања/тренирања и нема повезану стандардну девијацију.

Модел	Тачност [%]	Прецизност [%]	Одзив [%]	F1-скор [%]
LR	95,7 (3,8)	95,1 (5,2)	95,0 (4.5)	95,0 (4,4)
L-SVM	93,6 (2,7)	90,5 (3,0)	95,0 (4.5)	92,7 (3,1)
G-SVM	93,6 (2,7)	90,5 (3,0)	95,0 (4.5)	92,7 (3,1)
RF	97,4 (3,1)	97,0 (4,0)	97,0 (4.0)	97,0 (3,7)
MLP	93,6 (2,7)	90,5 (3,0)	95,0 (4.5)	92,7 (3,1)
LGBM	94,9 (3,5)	95,3 (5,8)	93,0 (6.0)	93,9 (4,1)
XGBoost	95,3 (3,4)	92,4 (3,8)	97,0 (6.0)	94,6 (4,1)
FAHP	93,6	87,0	100,0	93,0

У табели 44. приказане су перформансе осам модела у класификацији осетљивости на снежне лавине, анализом четири кључне метрике: тачност, прецизност, одзив и F1-скор. Све вредности представљају просеке добијене кроз пет различитих подела података, осим за FAHP који не зависи од поделе.

Најбоље резултате у скоро свим метрикама постиже Random Forest (RF), са 97.4% тачности, 97.0% прецизности и идентичним одзивом, као и F1 скором од 97.0%, што указује на одличан баланс у откривању позитивних случајева и избегавању лажних пиксела. XGBoost такође постиже високе резултате (95.3% тачност, 92.4% прецизност, 97.0% одзив), али је F1 скор нешто нижи (94.6%), што сугерише да је слабије избалансиран: добро проналази праве позитивне, али и има више лажних позитивних у односу на RF.

Логистичка регресија (LR) показује добре перформансе: 95.7% тачност, 95.1% прецизност и 95.0% одзив, што резултира F1 скором од 95.0%. Са друге стране, SVM модели (L-SVM и G-SVM) имају нешто слабије резултате — око 93.6% тачности и 90.5% прецизности, уз F1 скор од 92.7%. Ови модели су стабилни, али мање ефикасни у детекцији позитивних случајева у односу на напредније методе.

MLP и LGBM се налазе у средини по перформансама: са тачношћу од око 94–95%, прецизношћу око 90–93%, и F1 скором између 93.0% и 94.9%. LGBM има незнатно боље резултате, што га чини добрим избором у ситуацијама где је потребна умерена комплексност модела уз високу поузданост.

На крају, FAHP постиже 100.0% одзив, што значи да открива све позитивне случајеве, али уз прецизност од 87.0% и F1 скор од 93.0%, што указује на већи број лажно позитивних резултата. Иако не показује статистичку варијабилност (јер се не заснива на подели података), његов приступ може бити веома користан у контексту комплетне процене свих угрожених подручја.

Генерално RF и XGBoost показују најбољи баланс прецизности и одзива, док је FAHP најосетљивији, али мање прецизан. SVM модели имају стабилне, али нешто ниже перформансе, док LR нуди добре резултате упркос једноставности класификатора.

8. МЕРЕ ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ ОД ПОСЛЕДИЦА СНЕЖНИХ ЛАВИНА

Уколико се снежне лавине активирају на падинама изнад насеља или саобраћајне инфраструктуре, неопходно је дефинисати мере заштите. За заштиту од деловања снежних лавина установљен је велики број различитих мера: структурне, биолошке (шумоузгојне), планске и привремене (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023). У великом броју случајева потребно је комбиновати неколико мера како би се успоставила сигурност за угрожена подручја.

8.1. СТРУКТУРНЕ МЕРЕ

Одбрамбене структуре утичу на спречавање стварања лавина. На место активирања лавина, најважнија и најчешће коришћена мера јесу потпорне конструкције – ограде (систем стубова и мрежа). Оне делују тако што стабилизују снежни покривач. Снежни слојеви испољавају силу коју мреже апсорбују и преносе на тло помоћу стубова и сидра. Овакав тип мера се често комбинује са шумљавањем (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023).



Слика 78. Потпорне конструкције за спречавање активирања лавина

Извор: Trumper Schutzbauten, 2024; Maccaferri, 2024

У другим околностима, уколико се врши заштита територија на којима се лавине крећу или акумулирају, постоје друге врсте физичких конструкција: бране (зидови) и снежне шупе. Лавине се могу успорити и зауставити помоћу брана и кочионих неравнина. У зависности од брзине лавине, потребна је изградња бране висине 15 или више метара да би се лавина потпуно зауставила. У поређењу са потпорним конструкцијама, бране су често исплативија мера и у појединим областима имају комбиновану функцију: да током зиме штите од лавине, а током лета од поплава, одрона и тецишта (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023).



Слика 79. Бране за заштиту од лавина (1,2) на Исланду и снежне шупе (3,4) у Канади и САД

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023; Amusing Planet, 2024; TranBC, 2024; BNSF Railway, 2024

Снежне шупе представљају тунеле који омогућавају безбедан друмски саобраћај. Оне функционишу тако да кров шупа има глатку површину која по нагибу одговара околном рељефу и омогућава несметано кретање лавина без негативног ефекта на саобраћај.

8.2. ВЕШТАЧКО ПОКРЕТАЊЕ ЛАВИНЕ

Једна од често коришћених мера у развијеним земљама је вештачко активирање лавине. Циљ овакве активности јесте чешће активирање лавина мање величине како не би дошло до покретања великих лавина које имају знатно деструктивније дејство по животну средину. Постоје различите методе вештачког активирања: ручно бацање експлозива, минирање из хеликоптера или трајно инсталирани уређаји за окидање. Експлозив се увек детонира у локацији за коју је утврђена да представља зону кретања лавине, тако да експлозив својом детонацијом оптерећује снежни покривач, односно слаб слој који се касније ломи а снежна плоча се активира. Примера ради, у Швајцарској постоји преко 600 стално инсталираних система за минирање. Ови системи се све више комбинују са новим технологијама, попут уређаја за детекцију лавина или система упозорења и аларма (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023).



Слика 80. Вештачко активирање снежних лавина

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023; Inauen-Schätti, 2024; Mears and Wilbur, 2024

Да би се метода вештачког активирања реализовала успешно, потребно је детаљно анализирати топографске услове, метеоролошке факторе, ефекте детонације и укупне трошкове. Ова метода се углавном користи за заштиту путева и железница. Не препоручује се за падине испод којих се налазе стамбени објекти због потенцијално нежељених последица.

8.3. ПРИВРЕМЕНЕ МЕРЕ

Најважније организационе или привремене мере заштите од лавина су упозорење за настанак лавине, затварање угрожених саобраћајница и евакуација становништва. Мере се доносе у кратком року ако тренутна ситуација са лавинама то захтева. На основу тренутних временских услова процењује се могућа величина и вероватноћа лавина. Након тога, доносе се одлуке о мерама које треба предузети.



Слика 81. Привремене мере за заштиту од лавина

Извор: WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023

Због знатно мањих трошкова од других мера, привремене мере се често користе у земљама у развоју. Сензори за аутоматску детекцију лавина такође постају све важнији. Алармни систем може открити лавину директно помоћу радара или геофона. Систем упозорења који повезује алармни систем са светлосним сигнаlima може аутоматски покренути затварање саобраћајне руте (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023).

8.4. МЕРЕ ПЛАНИРАЊА

Мапе геопросторне дистрибуције снежних лавина су важан инструмент у просторном планирању. Оне указују на насеља угрожена лавинама и чине основу за зонирање приликом планирања коришћења земљишта (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023). Да би се добили квалитетни и поуздани подаци у угроженим територијама, неопходно је применити снимање терена дроном или користити сателитске снимке високе резолуције.

Током последњих 15 година, симулације лавина постале су све важније за зонирање угрожености. Циљ симулација лавина је да се утврди геопросторни размештај лавине који је потребан за планирање заштитних мера. За ову сврху развијени су софтвери за симулацију лавине Flow-R и RAMMS. Због све учесталијих климатских екстрема, сезоне се одликују великим варијацијама када је дубина снега у питању. Из овог разлога потребно је вршити већи број симулација, односно укључити различите дубине снега приликом моделовања и узети у обзир максималну измерену дубину на истраживаној локацији.

8.5. ПОШУМЉАВАЊЕ

Очување и заштита шума у зонама покретања лавина једна је од најстаријих и најчешће коришћених мера за ублажавање лавина. Густе шуме имају ефикасну заштитну улогу од последица лавина и других гравитационих хазарда. Снежни покривач у шуми је стабилнији него на оголићеним падинама из више разлога: крошње дрвећа захватају површински део снега; температура и карактеристике ветра су боље изједначени у унутрашњости шуме; стабла дрвећа повећавају стабилност снежног слоја. Што је шума отворенија, то је заштита од лавина слабија. Степен заштите зависи од густине стабала и састава дрвећа (WSL Institute for Snow and Avalanche Research, 2023).

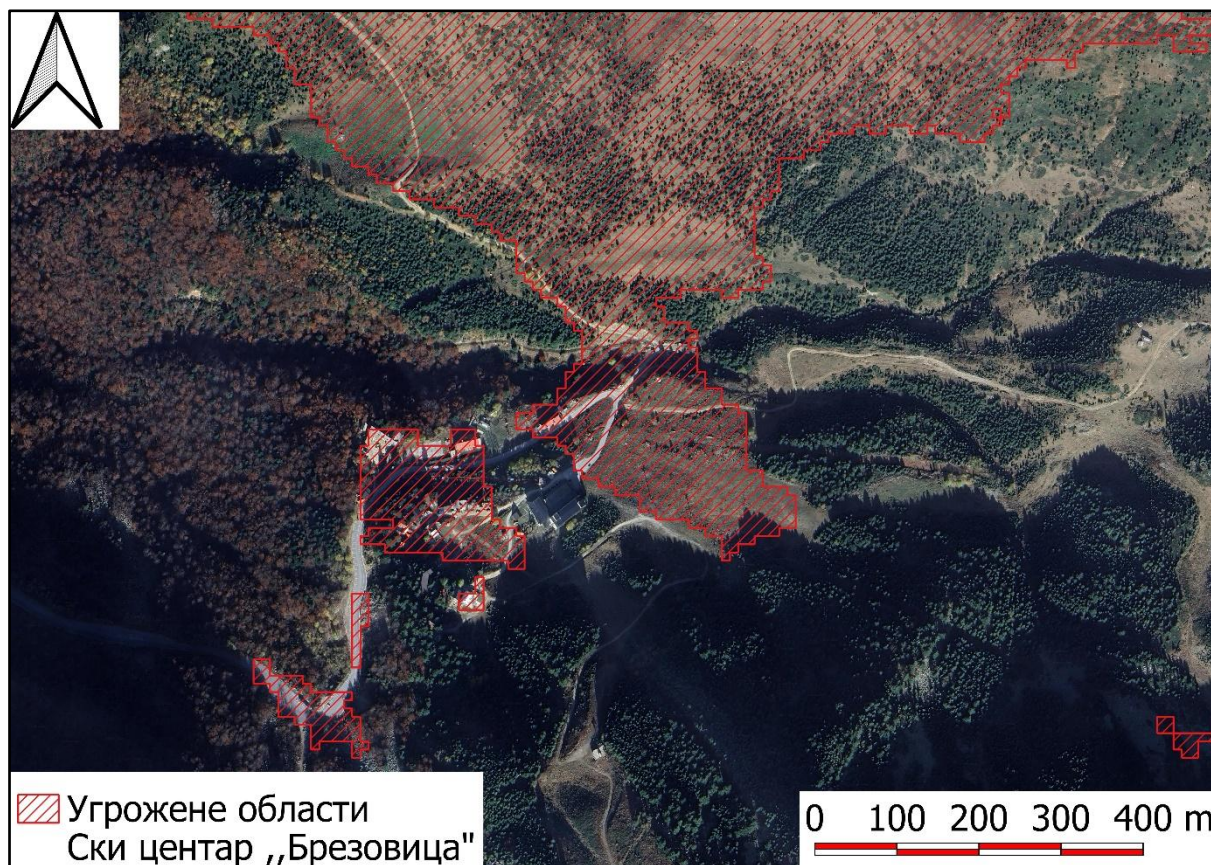


Слика 82. Падина у Рестелици (1) на којој се активирала лавина 2012. и заштитни зид (2) у њеном подножју

Када су у питању мере заштите од лавине на истраживаној територији, након несреће 2012. године, на локацији где се лавина активирала изграђена је ограда за спречавање настанка лавина. Власник једне од кућа које се налазе испод ризичне падине подигао је заштитни зид.

9. ЗОНИРАЊЕ УГРОЖЕНИХ ПОДРУЧЈА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

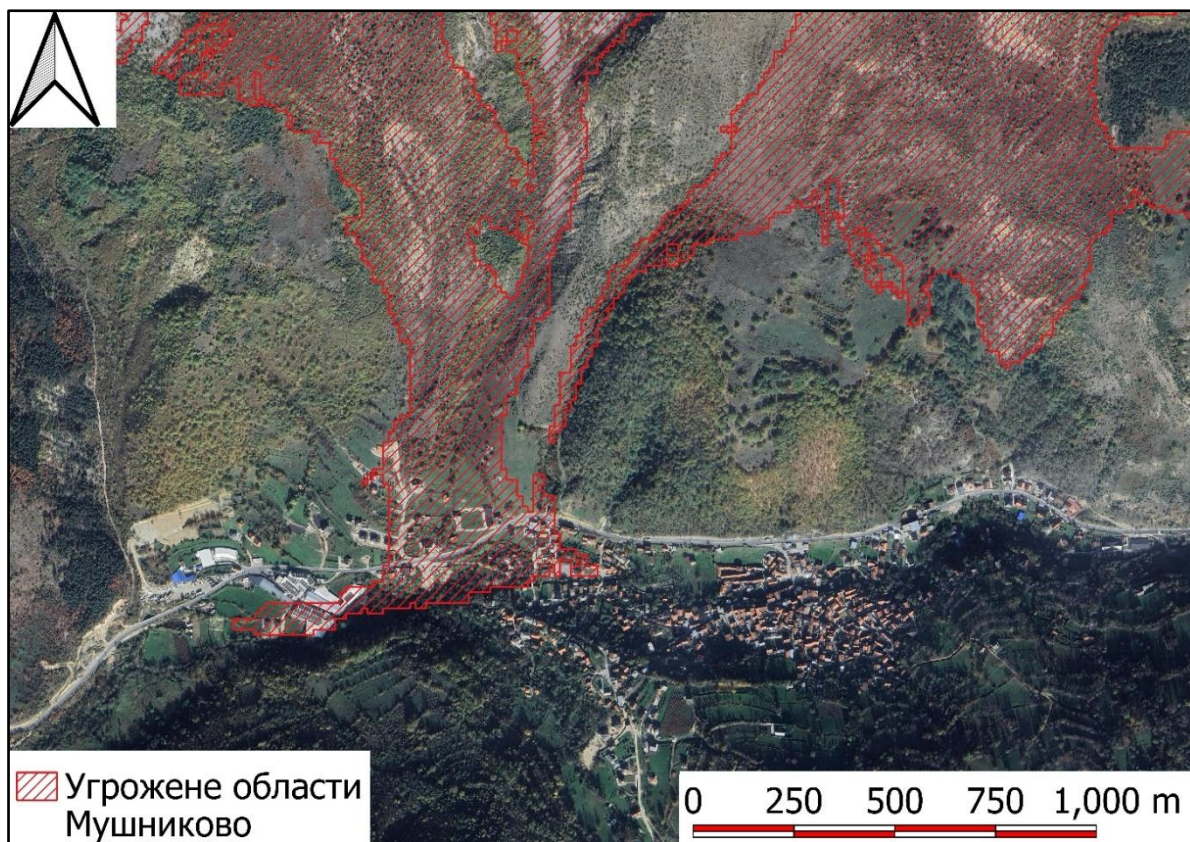
Преклапањем свих синтезних карата у географским информационим системима, издвојене су стартне зоне снежних лавина које могу имати утицај на животну средину. SAFI-Flow-R приступом моделоване су површине које би представљале зоне кретања и акумулације снежних лавина. Издвојене су угрожене области: ски-центар „Брезовица”, Мушниково, Брод, падине око хотела „Арксена” и Рестелица.



Слика 83. Карта угрожених области на територији ски-центра „Брезовица”

Велики број падина је угрожено у непосредној околини ски-центра, на којима често рекреативци скијају ван стаза и активирају лавине. На територији ски-центра „Брезовица”, због дефорестације дела шуме лавинама је подложен хотел „Молика”. Међутим, због стабилизације снега услед рада машина за табање снега, хотел и постојеће стазе су безбедне за рекреативце и онемогућавају активирање плоче услед промене притиска унутар снежних слојева. На граници између угрожених падина и ски стаза неопходно је применити већи број привремених мера у смислу постављања већег броја табли које би забрањивале скијање ван стаза и упозоравале на настанак снежних лавина. За адекватан мониторинг снежног покривача и других климатских елемената, потребно је формирати три метеоролошке станице: обновити станицу поред хотела Нарцис (911 m), и изградити нове испод хотела „Молика” (1730 m) и у близини станице жичаре, на падини (2200 m) испод Пирибрега. То би омогућило детаљну анализу снежних слојева, температуре ваздуха, падавина и утицаја ветра, чиме би временско предвиђање лавина на теренима око ски-центра било на знатно вишем нивоу.

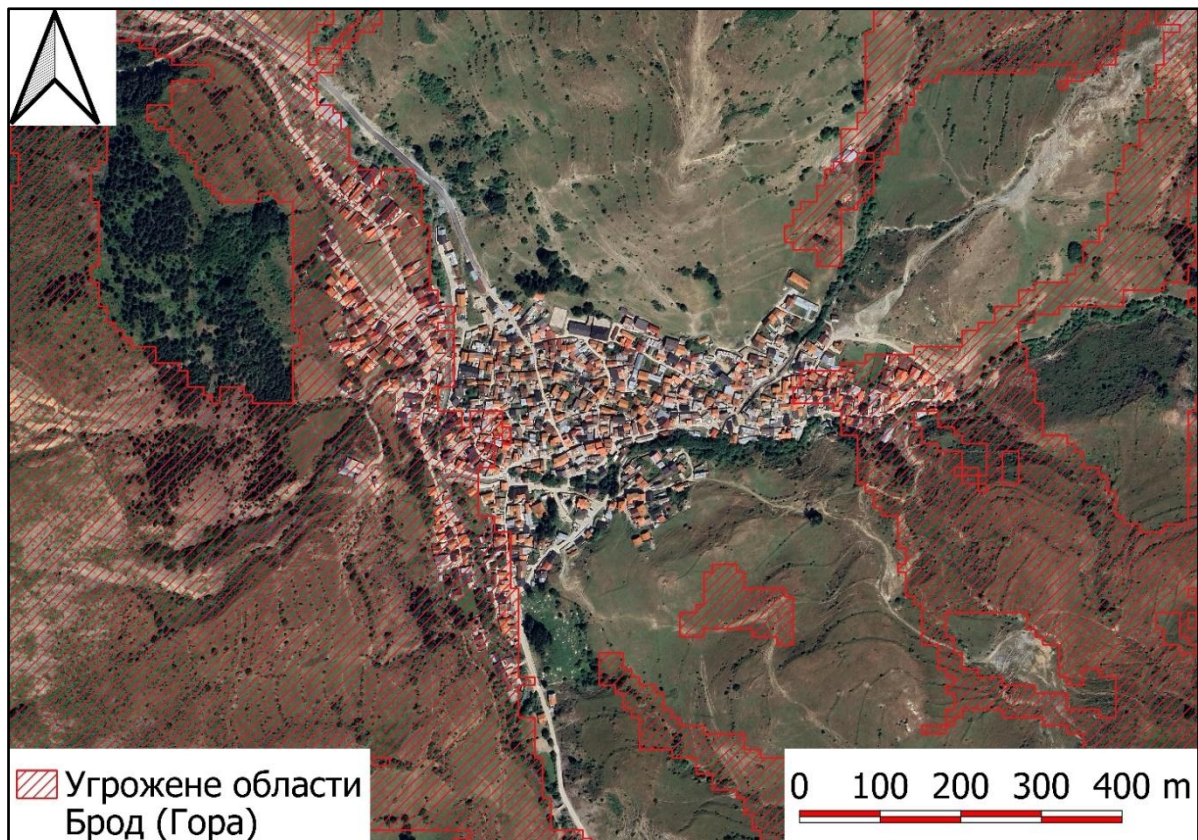
Друга угрожена област јесте Мушниково, односно западни део насеља. Овај простор смештен је у подножју јужне падине Ошљака која је највећим делом оголићена и по свим моделима погодна за формирање лавина.



Слика 84. Карта угрожених области на територији насеља Мушниково

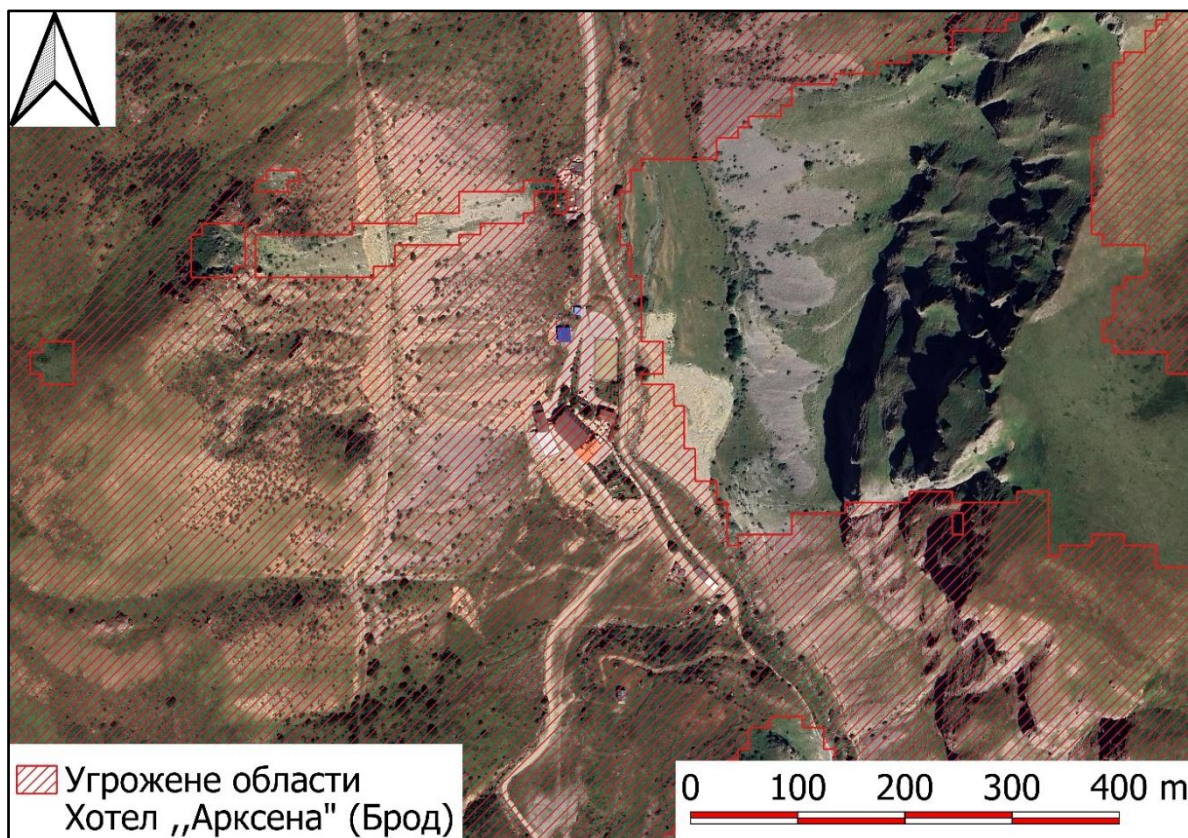
С обзиром да се ради о падини која је јужно експонирана, овде се снег знатно брже топи у односу на друга угрожена подручја, тако да би за настанак лавине средњих или већих размера била неопходна велика количина снежних падавина у различитим периодима током зиме и пролећа. Од мера заштите за ову територију идеална је комбинација пошумљавања и изградња потпорне конструкције. Пошумљавање би требало спровести изнад стамбених објеката, на контакту зона кретања и зоне акумулације потенцијалних лавина. Потпорну конструкцију треба изградити унутар угрожених стартних зона, то су у овом случају јаруге, чиме би се у потпуности спречило стварање лавина које би могле утицати на животну средину.

Трећа угрожена област је насеље Брод (1400 m) у Гори. Источни и западни део насеља су угрожени због велике вертикалне рашчлањености терена између насеља и околних планина, као и присуства ниске вегетације.



Слика 85. Карта угрожених области на територији насеља Брод

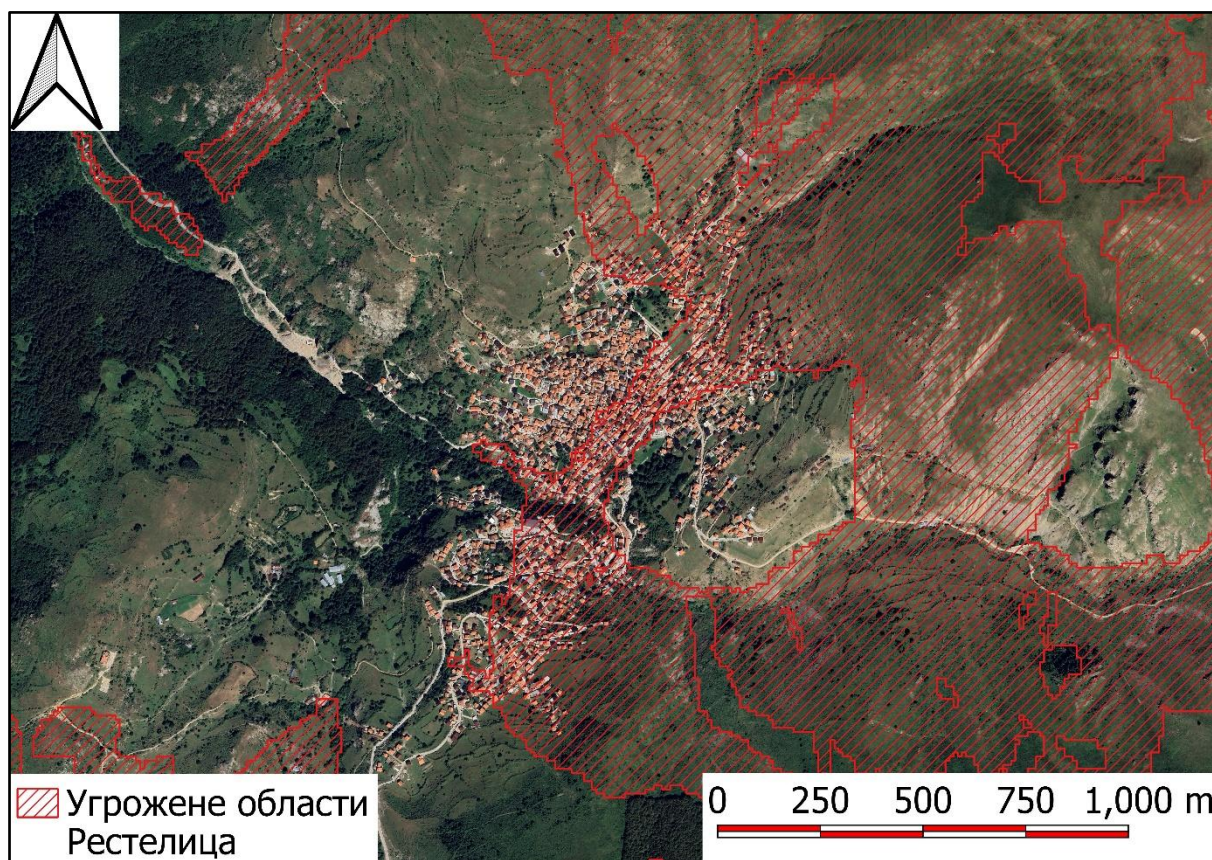
На овом терену неопходно је пошумљавање јаруга које су присутне западно од насеља и изградити потпорну контрукцију на падини источно од насеља. Такође, формирање метеоролошке станице у Броду и праћење стања климатских елемената омогућило би боље разумевање потенцијала снежних лавина у овом делу Шар планине.



Слика 86. Карта угрожених области у близини хотела „Арксена“

На 3 km јужно од Брода изграђен је мањи туристички комплекс: хотел „Арксена“ (1500 m) и жичара која се завршава на 1900 m надморске висине. Морфометријски је ово подручје потпуно подређено снежним лавинама. Активирање лавина у околини хотела током зимских месеци потврђено је од стране запослених у овом комплексу. Од предложених мера заштите, прва би мера била изградња потпорне конструкције на падини изнад хотела, која није велике површине. За разлику од ски-центра „Брезовица“, падине унутар ски-центра „Брод-Арксена“ се не одликују изразито стрмим нагибом. Међутим, пожељно би било да се на станици жичаре постави сензор за аутоматску детекцију лавина којим би се даље спроводиле друге мере заштите. Као и на Брезовици, и у овом случају је обавезно постављање табли упозорења и забране скијања ван јасно обележених стаза.

Област која је највише угрожена снежним лавинама је најјужније насеље у Србији, Рестелица (1500 m). До 2012. године било је врло мало података о карактеристикама снега и снежним лавинама на овом простору. Несрећа која се догодила 11. фебруара 2012. године активирањем лавине у југоисточном делу насеља изазвала је велике људске (10 погинулих) и материјалне (оштећено више од 10 кућа) губитке.



Слика 87. Карта угрожених области на територији насеља Рестелица

На падини са које се активирала лавина је након несреће постављена потпорна конструкција. Међутим, на другим угроженим падинама и даље не постоје мере заштите иако је рељеф претежно стрм са великом количином падавина и доминантном ниском вегетацијом. Комбинацијом изградње потпорних конструкција на другим угроженим стартним зонама и пошумљавањем у зони кретања лавине, спречили би се негативни ефекти лавина у Рестелици. Такође, на безбедној локацији требало би поставити метеоролошку станицу која би прикупљала податке о климатским елементима, нарочито снежном покривачу, честини и висини снежних падавина. Лавинама је угрожена и саобраћајница Рестелица-Маврово која није проходна током зимских месеци. У овом случају неопходна је мера забране саобраћаја на овој рути у периоду од децембра до марта, јер је више деоница ове саобраћајнице подложно акумулацији лавина. Изградња снежних шупа била би економски неисплатива, јер је фреквентност саобраћаја ниска. Пре реализације мера заштите, обавезно је снимање угрожених области беспилотним летилицама (дроновима), са циљем добијања просторних података врло високе резолуције ($< 1\text{ m}$) који би били значајни за прецизно зонирање угрожених стамбених објеката и саобраћајница.

10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Истраживање геопросторне дистрибуције снежних лавина у високопланинским регионима све више постаје фокус истраживача због деструктивног утицаја по животну средину. Снежне лавине као природни феномен настају у сложеној интеракцији више физичко-географских фактора, а њихова појава условљена је комбинацијом климатских, геоморфолошких, хидролошких и биогеографских услова, као и антропогеног утицаја. Због своје снаге и деструктивног потенцијала, лавине представљају један од најопаснијих процеса у високопланинским пределима, а њихове последице могу бити трагичне како за становништво, тако и за привреду, инфраструктуру и природну средину. Посебно су значајна места чија се привреда заснива на зимском туризму, попут ски-центра на Шар планини.

Први корак ка ефикасном управљању снежним лавинама је идентификација угрожених подручја како би се спречиле и ублажиле последице од лавина. За потребе израде докторске дисертације детаљно су анализирани природни услови Шар планине, како би на основу њих, применом бројних различитих метода, била утврђена подложност терена за настанак снежних лавина. Како би се приступило теренском истраживању и кабинетском раду, прво су анализирани историјски подаци који говоре о учесталости појављивања снежних лавина на Шар планини. Посебан значај придаје се несрећи која се догодила 2012. године у Рестелици, када је лавина изазвала велике људске и материјалне губитке.

Научне методе су најпре подељене у две групе: методологија за теренска истраживања и методологија за кабинетски рад. Методологија за теренска истраживања подразумевала је анализу снежног покривача и мапирање лавина. Анализа снежног покривача је реализована применом методе проширеног теста колоне, ручног теста смицања и идентификације снежних зрна. Мапирање снежних лавина извршено је путем географских информационих система инсталираних на мобилном уређају. Методологија за кабинетски рад заснована је на великој геопросторној бази података која је коришћена за добијање тематских и синтезних карата уз подршку географских информационих система. Од природних услова у методологији за кабинетски рад анализирани су: снежни покривач, нагиб терена, намена земљишта, зимска количина падавина, зимска температура ваздуха, планарна закривљеност, експозиција, профилна закривљеност и надморска висина. Сви подаци су просторне резолуције од 10 до 12,5 m.

На основу досадашњих истраживачких студија, просторни подаци су рекласификовани код модела вишекритеријумске анализе, фази аналитичко-хијерархијског процеса и SAFI–Flow-R методе. У бројним досадашњим истраживањима за различите планинске регионе у свету, примењиване су идентичне научне методе. За потребе дисертације и прорачуна комплетне геопросторне дистрибуције снежних лавина, развијен је SAFI–Flow-R индекс. Циљ индекса била је идентификација комплетне „анатомије” лавине на бази постојећег модела пропагације и вишекритеријумске анализе која је издвајала стартне зоне као изворна подручја снежних лавина. За адекватно моделовање угрожених подручја на основу метода машинског и дубоког учења, било је неопходно да се поред природних услова у анализу укључи и инвентар снежних лавина, који броји 100 локација на којима су се лавине активирале или би се потенцијално у будућности могле активирати.

Резултати теренских истраживања потврдили су велику хетерогеност унутар снежних слојева у зависности од надморске висине и експозиције терена. Јужне падине су због већег садржаја воде и стабилнијих слојева врло слабо подложне формирању лавина. На источним, западним и северним падинама идентификована је кора на површинском слоју снега, која би под одређеним метеоролошким условима могла представљати потенцијалну плочу. Што се тиче структуре снежних зрна, на површини углавном преовлађују фрагментисани снег, заобљена фасетирана зрна и површинско иње. Услед великих температурних осцилација како у ваздуху, тако и у снежним слојевима, са повећањем дубине снега, долази до појаве и формирања слојева различите структуре. Неједнака количина садржаја воде, различита густина унутар слојева и температура доводе до појаве нестабилности између слојева.

Што се тиче резултата добијених кабинетским радом, креиране су синтезне карте угрожености чије су вредности подељене у пет класа: врло слаба, слаба, умерена, висока и врло висока подложност. Оваква подела омогућила је детаљнији увид у просторну расподелу рањивости и идентификацију најосетљивијих локација. Класични модели као што су аналитичко-хијерархијски процес, Best-Worst метод и фази АНР показали су да највећи део територије Шаре припада категоријама слабе и умерене угрожености. Код АНР модела, преко половине територије има врло слабу или слабу подложност, док око једне четвртине чине зоне високе и врло високе угрожености. Посебно су издвојене планинске падине на великим надморским висинама са северном експозицијом, где снег дуго остаје и акумулира се. BWM метод даје сличне резултате, али показује нешто већи простор под слабом угроженошћу. Уочено је да су јужне падине Ошљака, јужна падина Изгоренице, западне и јужне падине врха Тронежа, јужне падине Острвице и југоисточна падина Коритника подложне формирању лавина. Применом фази АНР методе добијени су резултати који потврђују закључке претходних метода, али са већом флексибилношћу и мање субјективности. Као најугроженији, поново су издвојени планински гребени и насеља у њиховом подножју.

За детаљнију анализу геопросторне дистрибуције коришћен је SAFI-Flow-R модел, који омогућава симулацију кретања лавина од почетних зона до акумулације. Испитана су три сценарија – при дебљини покренутог снежног слоја од 50 центиметара, један метар и три метра. У свим сценаријима, око трећина територије Шаре је показала подложност лавинама. Као најугроженија насеља издвојена су: Рестелица, Брод, Мушниково и ски-центар „Брезовица”. Модел је показао да повећање дебљине снега проширује зоне акумулације и самим тим повећава ризик по становништво и инфраструктуру. Предност овог приступа је универзалност, јер може да се примењује у различитим планинским регионима без инвентара лавина како би се добили релевантни резултати.

У оквиру метода машинског учења, примењени су класични и ансамбл модели: логистичка регресија, Support Vector Machine, Random Forest, LightGBM и XGBoost. Сви модели су показали високу тачност и сличне трендове. Класични модели углавном су означили већину насеља као врло слабо угрожене, али су издвојили планинске гребене и поједина рурална насеља као рањива. Ансамбл модели показали су боље перформансе и већу стабилност. Random Forest и LightGBM означили су сличне зоне подложности, док је XGBoost дао најпрецизније резултате и најмању површину у категорији врло високе угрожености. Применом дубоког учења, односно Multi-Layer Perceptron неуронске мреже, добијени су нешто другачији резултати у односу на класичне моделе.

Највећи део терена је класификован у категорије врло ниске или врло високе угрожености, што указује да модел прави јасну поделу између повољних и неповољних зона. Истраживање показује да је највећи део Шар планине у зонама слабог до умереног ризика, али да постоји значајан простор у високопланинским пределима који је изразито подложен лавинама. Поређењем различитих метода уочено је да, иако се просторна расподела делимично разликује, резултати се у великој мери подударају. Комбинација класичних метода, нумеричког моделовања и машинског учења омогућава свеобухватнију процену геопросторне дистрибуције и значајно доприноси планирању превентивних мера и заштите људи.

Резултати валидације указују на високу поузданост свих примењених методолошких приступа у процени угрожености Шар планине од снежних лавина. Вредности ROC-AUC кретале су се у распону од 0,906 до 0,999, што потврђује изразиту предиктивну моћ. Класични вишекритеријумски модели (АНР, BWM) показали су већу прецизност у односу на фази приступ (FАНР), док је SAFI-Flow-R, као јединствени модел који обухвата целокупну анатомију лавине, постигао врло високу тачност и без употребе инвентара лавина као улазног параметра. Модели машинског и дубоког учења показали су изузетно прецизне резултате, при чему су Random Forest (RF) и XGBoost издвојени као најпоузданији, са оптималним балансом прецизности и осетљивости. Random Forest је, поред тога, дао резултате у највећој мери усклађене са историјским подацима, што потврђује његову стабилност и применљивост у просторним анализама. Супротно томе, SVM модели и FАНР, иако корисни у специфичним контекстима, показали су ограничења у погледу прецизности. Разлике у просторној идентификацији угрожених зона између појединих модела указују на потребу за интегративним приступом, односно комбиновањем више методолошких решења и њиховом верификацијом путем теренских истраживања. На тај начин, могуће је добити свеобухватнију и поузданију процену геопросторне дистрибуције снежних лавина.

Приликом детаљне анализе резултата и моделовања на локалном нивоу, идентификовани су угрожени ски центри „Брезовица“ и „Брод-Арксена“, као и насеља: Мушниково, Брод и Рестелица. У оквиру ски-центра „Брезовица“ највећа опасност потиче од неконтролисаног скијања ван стаза и дефорестације, при чему је хотел „Молика“ издвојен као потенцијално угрожен. Иако рад машина за табање снега у значајној мери смањује ризик, неопходно је увести додатне мере превенције, пре свега кроз упозоравајућу сигнализацију и забране скијања ван стаза. Предложена је и изградња мреже метеоролошких станица ради прецизнијег мониторинга снежног покривача и других климатских услова. У околини туристичког комплекса „Брод-Арксена“ потврђено је постојање активних лавина, што указује на потребу изградње потпорних конструкција и постављања аутоматских сензора за детекцију лавина. Западни део насеља Мушниково угрожен је због оголелих падина Ошљака, што ствара повољне услове за формирање лавина, нарочито при обилним снежним падавинама. Од мера заштите, предложена је комбинација пошумљавања и изградње потпорних конструкција унутар стартних зона. Насеље Брод је угрожено лавинама због специфичних морфолошких карактеристика рељефа и присуства ниске вегетације. Мере заштите на овом простору подразумевају пошумљавање јаруга и изградњу потпорних конструкција, као и постављање метеоролошке станице ради праћења климатских елемената.

Највећа опасност идентификована је у насељу Рестелица, где је 2012. године лавина нанела велике губитке локалном становништву. Иако је након несреће делимично изграђена потпорна конструкција, друге критичне падине остају незаштићене. Предложене мере у Рестелици укључују пошумљавање, изградњу додатних потпорних конструкција, постављање метеоролошке станице и примену забране саобраћаја на деоници Рестелица–Маврово током зимских месеци. Поред тога, неопходно је снимање угрожених области беспилотним летилицама ради прикупљања просторних података врло високе резолуције, који су од кључног значаја за прецизно моделовање снежних лавина.

Посматрано у целини, предложене мере представљају комбинацију техничких, биотехничких и организационих решења чија интеграција може значајно унапредити систем управљања ризиком од снежних лавина и допринети повећању безбедности становништва, туристичких капацитета и инфраструктуре на територији Шар планине. За реализацију мера заштите потребно је формирати тим експерата из различитих области природно-математичких и техничко-технолошких наука.

Резултати дисертације представљају полазну основу за развој стратегије за смањење ризика од снежних лавина. Доносиоци одлука у локалним самоуправама, цивилна заштита, горска служба спасавања и управљачи Националног парка „Шар планина” треба да координирају своје активности везане за геопросторну прогнозу лавина и мере заштите на бази добијених резултата. Снежне лавине су комплексан природни феномен који захтева мултидисциплинарност на научном, техничком и административном нивоу.

На крају се може закључити да су све постављене хипотезе доказане: снежне лавине се на Шар планини активирају током зимских и пролећних месеци, а њихов настанак углавном је детерминисан природним условима. Унутар простора истраживања, снежне лавине су деценијама уназад изазивале негативне последице по животну средину. Присуство и активност рекреативаца на угроженим падинама поспешује активирање снежних лавина, нарочито сувих плочастих лавина. На процес формирања, кретања и акумулације лавине делују различити физичко-географски услови (геоморфолошки, климатолошки, биогеографски). Измена стања природних услова, попут дефорестације, директно утиче на формирање и кретање лавина, док је пошумљавање мера којом се снег стабилизује унутар слојева, чиме се спречава настанак снежних лавина.

ЛИТЕРАТУРА

- Adventure Medic. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.theadventuremedic.com/>.
- Akay, H. (2021). Spatial modeling of snow avalanche susceptibility using hybrid and ensemble machine learning techniques. *Catena*, 206, 105524.
- Alaska Satellite Facility. (2024). *ALOS PALSAR*. Преузето са: <https://search.asf.alaska.edu>.
- Alpenglow. (2024). *Expeditions*. Преузето са: <https://alpenglowexpeditions.com/>.
- American Avalanche Association. (2016). *Snow, Weather and Avalanches: Observation Guidelines for Avalanche Programs in the United States (3rd ed)*. Victor, ID.
- Amusing Planet. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.amusingplanet.com/>.
- Ancey, C., Jóhannesson, T., Bakkehøi, S., Lied, K., Birkeland, K., Nishimura, K., Decker, R., Pudasaini, S.P., Hutter, K., Schaerer, P., Issler, D. & Sokratov, S. (2005). Some notes on the history of snow and avalanche research in Europe, Asia and America. *ICE*, 3-11.
- Arabameri, A. & Pourghasemi, R.H. (2019). Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 299-321.
- Baggi, S. & Schweizer, J. (2009). Characteristics of wet snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland). *Natural Hazards*, 50 (1), 97-108.
- Bajić, S. (2018). *Unapređenje metodologije procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom*. Doktorska disertacija. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.
- Bakermans, L. & Jamieson, B. (2006). Measuring near-surface snow temperature changes over terrain. *Proceedings ISSW*, 377-386.
- Bellaire, S., Herwijnen, A., Mitterer, C. & Schweizer, J. (2017). On forecasting wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 28-38.
- 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, 880711.
- Bishop, M.C. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer: New York.
- BNSF Railway. (2024). *Home*. Преузето са: <http://www.bnsf.com/>.
- Bolloorani, A.D., Shorabeh, S.N., Samany, N.N., Mousivand, A., Kazemi, Y., Jaafarzadeh, N., Zahedi, A. & Rabiei, J. (2021). Vulnerability mapping and risk analysis of sand and dust storms in Ahvaz, Iran. *Environmental Pollution*, 279, 116859.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Brugnara, Y., Brönnimann, S., Zamuriano, M., Schild, J., Rohr, C. & Segesser, D.M. (2016). December 1916: Deadly Wartime Weather. *Geographica Bernensia*, G91, 1-8.

Buckley, A. (2010). *Understanding curvature rasters. Imagery & Remote Sensing*. Esri. Преузето са: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters>.

Bhat, I.A., Bhat, W.A., Ashan, S., Shafiq, M.U. & Ahmed, P. (2024). Snow avalanche susceptibility along Mughal Road, North-western Himalaya using geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 17, 41.

Van Herwijnen, A., Berthod, N., Simenhois, R. & Mitterer, C. (2013). *Using time-lapse photography in avalanche research*. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop. (pp. 950-954). Grenoble: ANENA, IRSTEA.

Varol, N. (2022). Avalanche susceptibility mapping with the use of frequency ratio, fuzzy and classical analytical hierarchy process for Uzungol area, Turkey. *Cold Regions Science and Technology*, 194, 103439.

Varsom. (2024). *Wet snow (loose snow avalanches)*. Преузето са: <https://www.varsom.no/en/avalanches/about-avalanches/avalanche-problems/wet-snow-loose-snow-avalanches/>.

Vontobel, I., Harvey, S. & Purves, S.R. (2013). *Terrain analysis of skier-triggered avalanche starting zones*. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop. (pp. 371-375). Grenoble: ANENA, IRSTEA.

Geosrbija. (2024). *Просторне јединице, Република Србија*. Преузето са: <https://a3.geosrbija.rs/>.

Gerzina, N. & Carević, I. (2019). *Opšta geologija*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A. (2016). *Deep Learning. Adaptive Computation and Machine Learning series*. Massachusetts: The MIT Press.

Grid Adrenal. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.grida.no/>.

Ghosh, B. (2021). Spatial mapping of groundwater potential using data-driven evidential belief function, knowledge-based analytic hierarchy process and an ensemble approach. *Environmental Earth Sciences*, 80, 625.

Dedanski, V., Durlević, U., Kovjanić, A. & Lukić, T. (2024). GIS-based spatial modeling of landslide susceptibility using BWM-LSI: A case study – city of Smederevo (Serbia). *Open Geosciences*, 16 (1), 20220688.

Динић, Ј. (уред.) (1990). *Општина Штрпце, Сиринићка жупа – Одлике природне средине*. Посебна издања, књига 37/І. Београд: Географски институт „Јован Цвијић” САНУ.

Драгићевић, С. & Филиповић, Д. (2016). *Природни услови и непогоде у планирању и заштити простора*. Друго допуњено издање. Београд: Универзитет у Београду, Географски факултет.

Дурлевић, У. (2019). *Анализа природних услова, нивоа буке, јонизујућег и електромагнетног зрачења на територији општине Штрпце*. Завршни рад. Београд: Географски факултет, Универзитет у Београду.

Дурлевић, У. (2020). *Анализа угрожености територије општине Штрпце природним непогодама*. Мастер рад. Београд: Географски факултет, Универзитет у Београду.

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), 315.

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), 1229.

Evans, S.G., Bishop, F.N., Smoll, F.L., Murillo, V.P., Dalaney, B.K. & Smith, O. E. (2009). A Re-Examination of the Mechanism and Human Impact of Catastrophic Mass Flows Originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108 (1-2), 96-118.

Environmental Systems Research Institute [ESRI] (2024). *Sentinel-2 Land Cover Explorer*. Преузето са: <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer>.

Eskandari, S. (2017). A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 190.

European Avalanche Warning Services [EAWS]. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.avalanches.org>.

Завод за заштиту природе Србије. (2024). *Национални парк „Шар планина“*. Преузето са: <https://zzps.rs/%D0%BD%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%B%D0%BD%D0%B8-%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%BA-%D1%88%D0%B0%D1%80-%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BD%D0%B0/>.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Content*, 8, 338-356.

Zhu, J., Zhang, Y., Zhang, J., Chen, Y., Liu, Y. & Liu, H. (2023). Multi-Criteria Seismic Risk Assessment Based on Combined Weight-TOPSIS Model and CF-Logistic Regression Model—A Case Study of Songyuan City, China. *Sustainability*, 15 (14), 11216.

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.

Imaggeo. (2024). *Home*. Преузето са: <https://imaggeo.egu.eu>.

Inauen-Schätti. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.seilbahnen.ch/de/index.php>.

In Der Gand, H.R. & Zupančić, M. (1966). *Snow gliding and avalanches*. In: *Symposium at Davos 1965-Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches*. (pp. 230-242). Wallingford: International Association of Hydrological Sciences.

Jaboyedoff, M., Choffet, M., Derron, M. H., Horton, P., Loye, A., Longchamp, C., Mazotti, B., Michoud, C. & Pedrazzini, A. (2012). *Preliminary slope mass movement susceptibility mapping*

using DEM and LiDAR DEM. In B. Pradhan & M. Buchroithner (Eds.), *Terrigenous mass movements* (pp. 109-170). Springer.

Јосимовић, С. (2024). *Шарпланинска ледничка језера*. Преузето са: <https://www.facebook.com/media/set?set=a.10223399200199797&type=3>.

Johnson, F.R. & Birkeland, W.K. (2002). *Integrating shear quality into stability test results*. Paper presented at the 2002 International Snow Science Workshop, Penticton, British Columbia.

Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. & Liu, T. (2017). LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *Neural Information Processing Systems*, 1-9.

Konurhan, Z., Yücesan, M. & Gul, M. (2023). *Avalanche Risk Analysis by a Combined Geographic Information System and Bayesian Best-Worst Method*. In: Rezaei, J., Brunelli, M., Mohammadi, M. (eds) *Advances in Best-Worst Method. BWM 2023. Lecture Notes in Operations Research*. Springer, Cham.

Кривокапић, С. Д. (1957). Услови на Шар планини. *Гласник Српског географског друштва*, 37, 137-140.

Krušić, J., Marjanović, M., Samardžić-Petrović, M., Abolmasov, B., Andrejev, K. & Miladinović, A. (2017). Comparison of expert, deterministic and Machine Learning approach for landslide susceptibility assessment in Ljubovija Municipality, Serbia. *Geofizika*, 34, 251-273.

Kumar, S., Srivastava, P.K. & Snehmani (2018). Geospatial Modelling and Mapping of Snow Avalanche Susceptibility. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 109-119.

Лазаревић, Р. (1994). *Шарпланинске жупе Гора, Опље и Средска. Одлике природне средине*. Посебна издања, књига 40/I. Београд: Географски институт „Јован Цвијић” САНУ.

Laternser, M. & Ammann, J.W. (2001). Der Lawinenwinter 1951. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152 (1), 25-35.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L., Russi, T., Stöckli, U. & Zimmerli, M. (1999). Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1-3), 145-157.

Liang, J. & Yang, J. (2022). Application of the AHP method on the optimization with undesirable priorities. *Engineering with Computers*, 38 (3), 2137-2153.

Liang, F., Brunelli, M. & Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. *Omega*, 96, 102175.

Liu, J., Zhang, T., Hu, C., Wang, B., Yang, Z., Sun, X. & Yao, S. (2023). A Study on Avalanche-Triggering Factors and Activity Characteristics in Aerxiangou, West Tianshan Mountains, China. *Atmosphere*, 14, 1439.

Manap, M.A., Nampak, H. & Pradhan, B. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 711-724.

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, 165221.

- Maccaferri. (2024). *Engineering a Better solution*. Преузето са: <https://www.maccaferri.com/>.
- Mears and Wilbur. (2024). *Home*. Преузето са: <https://mearsandwilbur.com/>.
- Менковић, Љ. (1988). *Рељеф Шар планине – геоморфолошка студија*. Докторска дисертација. Београд: Одсек за Географију, Природно-математички факултет, Универзитет у Београду.
- Missoula avalanche. (2024). *Observations*. Преузето са: <https://missoulaavalanche.org/>.
- McClung, D.M. (2009). Dimensions of dry snow slab avalanches from field measurements. *Journal of Geophysical Research*, 114, F01006.
- McClung, D.M. & Clarke, G.K.C. (1987). The effects of free water on snow gliding. *Journal of Geophysical Research*, 92 (B7), 6301-6309.
- 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, 782.
- National avalanche center. (2024). *Powder cloud*. Преузето са: <https://avalanche.org/avalanche-encyclopedia/avalanche/anatomy-of-an-avalanche/powder-cloud/>.
- Newesely, C., Tasser, E., Spadinger, P. & Cernusca, A. (2000). Effects of land-use changes on snow gliding processes in alpine ecosystems. *Basic and Applied Ecology*, 1 (1), 61-67.
- Nie, Y., Li, X., Zhou, W. & Xu, R. (2021). Dynamic hazard assessment of group-occurring debris flows based on a coupled model. *Natural Hazards*, 106, 2635-2661.
- Nikolić, G., Vujović, F., Golijanin, J., Šiljeg, A. & Valjarević, A. (2023). Modelling of Wildfire Susceptibility in Different Climate Zones in Montenegro Using GIS-MCDA. *Atmosphere*, 14, 929.
- Nishimura, K., Barpi, F. & Issler, D. (2021). Perspectives on Snow Avalanche Dynamics Research. *Geosciences*, 11, 57.
- Новковић, Д. И. (2016). *Природни услови као детерминанте геохазарда на примеру сливова Љига, Јошаничке и Врањскобањске реке*. Докторска дисертација. Београд: Географски факултет, Универзитет у Београду.
- Osnovna geološka karta. (1981). *Geološki listovi: Kačanik, Uroševac, Prizren, Gostivar*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Peretz, O., Koren, M. & Koren, O. (2024). Naive Bayes classifier – An ensemble procedure for recall and precision enrichment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 136 (Part B), 108972.
- Perla, R., Cheng, T.T. & McClung, D.M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26, 197-207.
- PisteHors. (2024). *Home*. Преузето са: <https://pistehors.com>.
- Plafker, G. & Ericksen, E.G. (1978). Nevados Huascarán Avalanches, Peru. *Developments in Geotechnical Engineering*, 14 (Part A), 277-314.

- Politika. (2012). *Lavina odnela devet života*. Преузето са: <https://www.politika.rs/sr/clanak/208127/lavina-odnela-devet-zivota>.
- Powder Canada. (2024). *Avalanche*. Преузето са: <https://powdercanada.com>.
- Phong, V.T., Phan, T.T., Prakash, I., Singh, S.K., Shirzadi, A., Chapi, K., Ly, H.-B., Ho, L.S., Quoc, N.K. & Pham, B.T. (2019). Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: A case study at Muong Lay district, Vietnam. *Geocarto International*, 36, 1685-1708.
- Ramík, J. & Korviny, P. (2010). Inconsistency of pair-wise comparison matrix with fuzzy elements based on geometric mean. *Fuzzy Sets and Systems*, 161 (11), 1604-1613.
- 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), 5375.
- 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), 2995.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
- Републички сеизмолошки завод. (2024). *Сеизмичност – сеизмички hazard*. Преузето са: https://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda.htm.
- Републички хидрометеоролошки завод. (2024). *Метеоролошки годишњак – климатолошки подаци*. Преузето са: https://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php.
- Saaty, T.L. (1980). *Analytic Hierarchy Process*. New York: McGrawHill.
- Salimi, N. & Rezaei, J. (2018). Evaluating firms' R&D performance using best worst method. *Evaluation and Program Planning*, 66, 147-155.
- Safeback. (2024). *Slab avalanches*. Преузето са: <https://www.safeback.no/articles/avalanche-safety/slab-avalanche>.
- Sediqmal, M., Sultan, H.S. & Patyal, S. (2020). Flood frequency analysis & modeling and finding flood hazard areas of Panjshir watershed. *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, 6 (2), 8-13.
- Simenhois, R. & Birkeland, K. (2006). *The extended column test: a field test for fracture initiation and propagation*. Proceedings of the 2006 International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado.
- Simenhois, R. & Birkeland, K. (2009). The Extended Column Test: Test effectiveness, spatial variability, and comparison with the Propagation Saw Test. *Cold Regions Science and Technology*, 59, 210-216.

Simon Fraser University. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.sfu.ca/>.

Singh, D.K., Mishra, V.D. & Gusain, H.S. (2020). Simulation and Analysis of a Snow Avalanche Accident in Lower Western Himalaya, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 1555-1565.

Snow brains. (2024). *Avalanche forecast*. Преузето са: <https://snowbrains.com/>.

Sovilla, B., McElwaine, J.N. & Louge, M.Y. (2015). The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique*, 16 (1), 97-104.

Sovilla, B., McElwaine, J.N. & Köhler, A. (2018). The intermittency Regions of Powder Snow Avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 2525-2545.

Statista. (2024). *Energy & Environment, Climate and Weather*. Number of deaths from natural disaster events worldwide from 2000 to 2023. Преузето са: <https://www.statista.com/statistics/510952/number-of-deaths-from-natural-disasters-globally/#statisticContainer>.

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 Advanced Technologies, Systems, and Applications VII; Ademović, N., Mujčić, E., Mulić, M., Kevrić, J., Akšamija, Z., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2023; pp. 507-519.

Shaver, A., Carter, D.B. & Shawa, T.W. (2019). Terrain ruggedness and land cover: Improved data for most research designs. *Conflict Management and Peace Science*, 36 (2), 191-218.

Shahabi, H., Jarihani, B., Tavakkoli Piralilou, S., Chittleborough, D., Avand, M. & Ghorbanzadeh, O. (2019). A Semi-Automated Object-Based Gully Networks Detection Using Different Machine Learning Models: A Case Study of Bowen Catchment, Queensland, Australia. *Sensors*, 19 (22), 4893.

Schaerer, P. & McClung, D. (2006). *The Avalanche Handbook*. Seattle: The Mountaineers Books.

Schneebeli, M. (2004). *Mechanisms in wet snow avalanche release*. In: Proceedings of the International Symposium on Snow Monitoring and Avalanches. (pp.75-77). Manali: Snow and Avalanche Study Establishment.

Schweizer, J. & Lütschg, M. (2001). Characteristics of human-triggered avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 33 (2-3), 147-162.

Schweizer, J. & Kronholm, K. (2006). Dry-snow slab avalanche release: recent measurements and observations. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 10585.

Schweizer, J., Bartelt, P. & Herwijnen, V.A. (2021). *Chapter 12 – Snow avalanches*. In: Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition). (pp. 377-416). Amsterdam: Elsevier.

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 and Earth System Sciences*, 24, 947-971.

Techel, F., Winkler, K., Walcher, M., van Herwijnen, A. & Schweizer, J. (2020). On snow stability interpretation of extended column test results. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1941-1953.

TranBC. (2024). *Home*. Преузето са: <https://www.tranbc.ca/>.

Trautman, S., Lutz, E.R., Birkeland, K.W. & Custer, S. (2006). *Relating wet loose snow avalanching to surficial shear strength*. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop. (pp.71-78). Telluride, USA.

Tremper, B. (2008). *Staying alive in avalanche terrain (Second edition)*. Seattle: The Mountaineers Books.

Trumper Schutzbauten. (2024). *Home*. Преузето са: <https://trumerschutzbauten.com>.

The American alpine club. (2024). *Home*. Преузето са: <https://publications.americanalpineclub.org>.

The Columbus Dispatch. (2015). *Killer avalanche leaves despair behind in Afghanistan*. Преузето са: <https://www.dispatch.com/story/news/technology/2015/02/28/killer-avalanche-leaves-despair-behind/23610848007>.

Ђукић, Д. (1978). *Туристичка валоризација природних, етнографских и других културних потенцијала Шар планине*. Докторска дисертација. Београд: Одсек за Географију, Природно-математички факултет, Универзитет у Београду.

University centre in Svalbard. (2025). *Snow and Avalanche Dynamics*. Преузето са: <https://www.unis.no/courses/ag-346-snow-and-avalanche-dynamics>.

Utah Avalanche Center. (2024). *Blog: Steepness*. Преузето са: <https://utahavalanchecenter.org/blog/16386>.

Utah Geospatial Resource Center. (2024). *Utah Avalanche Paths*. Преузето са: <https://gis.utah.gov/products/sgid/geoscience/avalanche-paths>.

Fernández-Delgado, M., Cernadas, E. & Barro, S. (2014). Do we Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems? *Journal of Machine Learning Research*, 15, 3133-3181.

Flathead avalanche. (2024). *Forecasts*. Преузето са: <https://www.flatheadavalanche.org>.

Flickr. (2012). *Restelica avalanche*. Преузео са: <https://www.flickr.com/photos/aljabak85/16981660632>.

Furdada, G., Margalef, A., Trapero, L., Pons, M., Areny, F., Baró, M. & Reyes, A. (2020). Guinau, M. The Avalanche of Les Fonts d'Arinsal (Andorra): An Example of a Pure Powder, Dry Snow Avalanche. *Geosciences*, 10, 126.

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.

- Haller, A. (2010). Yungay: recent tendencies and spatial perceptions in an Andean risk zone. *Espacio y Desarrollo*, 22, 65-75.
- Hao, J., Mind'je, R., Liu, Y., Huang, F., Zhou, H. & Li, L. (2021). Characteristics and hazards of different snow avalanche types in a continental snow climate region in the Central Tianshan Mountains. *Journal of Arid Land*, 13, 317-331.
- Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition. Springer: New York.
- Helbig, N., Herwijnen, V.A. & Jonas, T. (2015). Forecasting wet-snow avalanche probability in mountainous terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 219-226.
- Herwijnen, V.A. & Birkeland, W.K. (2014). Measurements of snow slab displacement in Extended Column Tests and comparison with Propagation Saw Tests. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 97-103.
- Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8, 327-334.
- 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.
- Höller, P. (2014). Snow gliding and glide avalanches: a review. *Natural Hazards*, 71 (3), 1259-1288.
- Caduff, R., Wiesmann, A., Bühler, Y. & Pielmeier, C. (2015). High spatial and temporal resolution continuous monitoring of snowpack displacement with terrestrial radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 42 (3), 813-820.
- Cambridge. (2024). *Homepage*. Преузето са: <https://www.cambridge.org>.
- Цвијић, Ј. (1924). *Геоморфологија*. Књига прва. Београд: Државна штампарија Краљевине Срба, Хрвата и Словенаца.
- Цвијић, Ј. (1903). Нови резултати о глацијалној епохи Балканског полуострва. *Глас Српске краљевске академије*, 65, 185-333.
- CNN. (2015). *Death toll at 168 from Afghanistan avalanches*. Преузето са: <https://edition.cnn.com/2015/02/26/asia/afghanistan-avalanche/index.html>.
- Colorado Avalanche Information Center. (2024). *Wet Slab*. Преузето са: <https://avalanche.state.co.us/wet-slab>.
- Copernicus Open Access Hub. (2024). *Copernicus Data Space Ecosystem*. Преузето са: <https://dataspace.copernicus.eu>.
- Cortes, C. & Vapnik, V.N. (1995). Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20, 273-297.
- Chen, T. & Guestrin, C. (2016). *XGBoost: A Scalable Tree Boosting System*. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16). Association for Computing Machinery, New York, USA, 785-794.

Chugach avalanche center. (2024). *Information center*. Пpeызepo ca: <https://www.cnfaic.org>.

Chuvieco, E. & Congalton, R.G. (1989). Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 29, 147-159.

QField Ecosystem Documentation (2024). Пpeызepo ca: <https://docs.qfield.org/get-started>.

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, 103535.

Wikimedia Commons. (2024). *Images*. Пpeызepo ca: https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page.

WSL Institute for Snow and Avalanche Research [SLF] (2023). *Snow maps, Information about snow profiles*. Пpeызepo ca: <https://www.slf.ch/en/avalanche-bulletin-and-snow-situation/snow-maps/information-about-snow-profiles>.

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), 2743.

Yang, J., He, Q. & Liu, Y. (2022). Winter–Spring Prediction of Snow Avalanche Susceptibility Using Optimisation Multi-Source Heterogeneous Factors in the Western Tianshan Mountains, China. *Remote Sensing*, 14 (6), 1340.

Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, A.R., Karami, M. & Tiefenbacher P.J. (2020). GIS-based spatial modeling of snow avalanches using four novel ensemble models. *Science of the Total Environment*, 745, 141008.

СПИСАК СЛИКА И ТАБЕЛА

Слика 1. Карта географског положаја Шар планине у Србији

Слика 2. Физичко-географска карта Шар планине

Слика 3. Административна карта Шар планине

Слика 4. Снежне лавине на Шар планини

Слика 5. Забележене лавине на Шар планини до 2012. године

Слика 6. Последице снежне лавине у Рестелици 2012. године

Слика 7. Инвентар снежних лавина на Шар планини

Слика 8. Проширени тест колоне

Слика 9. Ручни тест смицања

Слика 10. Типови снежних зрна

Слика 11. Величина снежних лавина

Слика 12. Кишна кора (1), сунчева кора са новим снегом (2) и растопљено-замрзнуте коре (3,4)

Слика 13. Фасетирани снег (1), дубинско (2) и површинско (3) иње

Слика 14. Процес стварања фасетираног снега

Слика 15. Два начина промене температурног градијента

Слика 16. Процес формирања површинског иња

Слика 17. Делови плочасте лавине

Слика 18. Суве плочасте лавине

Слика 19. Силе које одржавају плочу на свом месту

Слика 20. Покретачи плочастих лавина

Слика 21. Влажне плочасте лавине

Слика 22. Лавине сувог (1) и влажног (2) растреситог снега

Слика 23. Прашинасте лавине

Слика 24. Ледене лавине

Слика 25. Венац и структура венца

Слика 26. Бујичне лавине

Слика 27. Клизне лавине

Слика 28. „Зима ужаса” у аустријско-швајцарским Алпима

Слика 29. Последице лавина у Авганистану 2015. године

Слика 30. Изглед и геопросторна дистрибуција лавине у Перуу 1970. године

Слика 31. Геолошка карта Шар планине

Слика 32. Ултрамафитски масив (1) и тракасти амфиболити (2) на Шар планини

Слика 33. Карта епицентара земљотреса у Србији

Слика 34. Карте макросеизмичког интензитета и гравитационог убрзања за повратни период од 475 година

Слика 35. Хипсометријска карта Шар планине

Слика 36. Врхови Скарпа (1), Вртоп (2), Куле (3) и Тумба (4)

Слика 37. Учесталост лавина на основу нагиба терена

Слика 38. Карта нагиба терена Шар планине

Слика 39. Равничарски део (1) и најстрмија литица (2) – Градски камен

Слика 40. Карта експозиције рељефа Шар планине

Слика 41. Карта профилне закривљености Шар планине

Слика 42. Карта планарне закривљености Шар планине

Слика 43. Класификација површина на основу профилне и планарне закривљености

Слика 44. Карта класа закривљености терена на Шар планини

Слика 45. Рачунање вертикалне рашчлањености у ГИС софтверу

Слика 46. Карта вертикалне рашчлањености Шар планине

Слика 47. Карта средње годишње температуре ваздуха на Шар планини

Слика 48. Карта средње зимске температуре ваздуха на Шар планини

Слика 49. Карта годишње суме падавина на Шар планини

Слика 50. Карта зимске количине падавина на Шар планини

Слика 51. Варијације у дебљини снежног покривача на Шар планини

Слика 52. Карта покривености Шар планине снежним покривачем за период 2020-2024. године

Слика 53. Карта заветринских и приветринских страна на Шар планини

Слика 54. Хидролошка карта Шар планине

Слика 55. Ливадичко (1), Велико Шутманско (2), Куатово (3) и Мало Јажиначко језеро (4)

Слика 56. Оштећена вегетација (1) и динарска волухарица (2) у сливу Дурловог потока

Слика 57. Карта намене земљишта на Шар планини

Слика 58. Скијаши као покретачи снежних лавина

Слика 59. Испитивање структуре снежних зрна

Слика 60. Анализа снежних профила

Слика 61. Угрожене падине јужно од насеља Брод (Гора)

Слика 62. Угрожена падина (1, 2) и оштећена вегетација (3) у Рестелици

Слика 63. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом АНР методе

Слика 64. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом BWM методе

Слика 65. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом FАНР методе

Слика 66. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 50 cm

Слика 67. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 1 m

Слика 68. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина при дебљини покренутог слоја од 3 m

Слика 69. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом логистичке регресије (LR)

Слика 70. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом линеарног Support Vector Machine модела (L-SVM)

Слика 71. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Гаусове радијалне базне функције језгра Support Vector Machine модела (G-SVM)

Слика 72. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Random Forest (RF) модела

Слика 73. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Light Gradient-Boosting Machine (LGBM) модела

Слика 74. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Extreme Gradient Boosting (XGBoost) модела

Слика 75. Карта геопросторне дистрибуције снежних лавина применом Multi-Layer Perceptron (MLP) модела

Слика 76. Процене условне густине језгра за континуалне карактеристике

Слика 77. Дистрибуција вредности за категоријалне карактеристике

Слика 78. Потпорне конструкције за спречавање активирања лавина

Слика 79. Бране за заштиту од лавина (1,2) на Исланду и снежне шупе (3,4) у Канади и САД

Слика 80. Вештачко активирање снежних лавина

Слика 81. Привремене мере за заштиту од лавина

Слика 82. Падина у Рестелици (1) на којој се активирала лавина 2012. и заштитни зид (2) у њеном подножју

Слика 83. Карта угрожених области на територији ски-центра „Брезовица”

Слика 84. Карта угрожених области на територији насеља Мушниково

Слика 85. Карта угрожених области на територији насеља Брод

Слика 86. Карта угрожених области у близини хотела „Арксена”

Слика 87. Карта угрожених области на територији насеља Рестелица

Табела 1. Екстремне тачке математичко-географског положаја Шар планине

Табела 2. Опис и класификација ручног теста смицања

Табела 3. Матрица за АНР метод

Табела 4. Вредности насумичног индекса

Табела 5. Тежински коефицијенти добијени АНР методом

Табела 6. Рекласификација вредности за анализиране критеријуме

Табела 7. Матрица са вредностима за BWM метод

Табела 8. Тежински коефицијенти добијени BWM методом

Табела 9. Матрица са вредностима за FАНР метод

Табела 10. Тежински коефицијенти добијени FАНР методом

Табела 11. Класификација лавина по величини

Табела 12. Европска скала опасности од лавина

Табела 13. Типични проблеми са лавинама

Табела 14. Основне разлике између сувих и влажних плочастих лавина

Табела 15. Типови стена и удео у укупној површини

Табела 16. Висинске зоне на Шар планини

Табела 17. Формирање лавина на основу нагиба терена

Табела 18. Нагиб терена на Шар планини

Табела 19. Експозиција рељефа на Шар планини

Табела 20. Класификација профилне закривљености Шар планине

Табела 21. Класификација планарне закривљености Шар планине

Табела 22. Распоред класа закривљености на Шар планини

Табела 23. Интервали вертикалне рашчлањености на Шар планини

Табела 24. Температура ваздуха на Брезовици (1995-2008), Призрену и Драгашу (1961-2010)

Табела 25. Просторни распоред температуре ваздуха на Шар планини

Табела 26. Просторни распоред средње зимске температуре ваздуха на Шар планини

Табела 27. Средња годишња облачност на Брезовици (1984-1988), Драгашу и Призрену (1960-1984)

Табела 28. Распоред количине падавина на Шар планини (1960-1985)

Табела 29. Просторни распоред годишње суме падавина на Шар планини

Табела 30. Просторни распоред зимске количине падавина на Шар планини

Табела 31. Просторни обухват намене земљишта на Шар планини

Табела 32. Испитивање компактности снежних слојева на различитим експозицијама

Табела 33. Класификација угрожености на основу АНР модела и просторни распоред

Табела 34. Класификација угрожености на основу BWM модела и просторни распоред

Табела 35. Класификација угрожености на основу FАНР модела и просторни распоред

Табела 36. Класификација угрожености на основу LR модела и просторни распоред

Табела 37. Класификација угрожености на основу L-SVM модела и просторни распоред

Табела 38. Класификација угрожености на основу G-SVM модела и просторни распоред

Табела 39. Класификација угрожености на основу RF модела и просторни распоред

Табела 40. Класификација угрожености на основу LGBM модела и просторни распоред

Табела 41. Класификација угрожености на основу XGBoost модела и просторни распоред

Табела 42. Класификација угрожености на основу MLP модела и просторни распоред

Табела 43. Валидација финалних резултата угрожености Шар планине снежним лавинама

Табела 44. Перформансе модела на тестиралим скуповима. Приказане вредности су средње вредности и стандардне девијације (у заградама). FАНР не зависи од тестирања/тренирања и нема повезану стандардну девијацију.

БИОГРАФИЈА

Урош Дурлевић рођен је 26.12.1996. године у Приштини. Одрастао у Драјковцу, средњу школу „Јован Цвијић” завршио у Штрпцу. Основне академске студије на смеру Геопросторне основе животне средине уписао је 2015. године. Завршни рад на тему „Анализа природних услова, нивоа буке, јонизујућег и електромагнетног зрачења на територији општине Штрпце” одбранио је 2019. године, чиме је стекао звање дипломирани географ, са просечном оценом 9,40. Исте године уписује мастер академске студије на смеру Геопросторне основе животне средине, које завршава са просечном оценом 10. Мастер рад под називом „Анализа угрожености територије општине Штрпце природним непогодама” одбранио је 2020. године, чиме је стекао звање мастер географ. Школске 2020/21. године уписује докторске академске студије на студијском програму Геонауке.

На Географском факултету од школске 2019/20. године ангажован је као демонстратор у настави на Катедри за геопросторне основе животне средине. У звање истраживач-приправник изабран је марта 2021. године. Током основних и мастер студија, Урош Дурлевић је био стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Од 2019. године главни је уредник студентског часописа „Екогеа”. Учествовао је на више домаћих и међународних пројеката и конференција. До сада је објавио 50 научних и стручних радова у домаћим и иностраним часописима и публикацијама. Током 2023. године пријавио је тему докторске дисертације под називом „Природни услови као детерминанте геопросторне дистрибуције снежних лавина на примеру Шар планине (Србија)”. У звање истраживач-сарадник изабран је децембра 2023. године. Члан је Српског географског друштва и Центра руског географског друштва у Србији. Поседује знање енглеског и руског језика.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Урош Дурлевић

Број индекса 2/2020

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Природни услови као детерминанте геопросторне дистрибуције
снежних лавина на примеру Шар планине (Србија)

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Урош Дурлевић

Број индекса 2/2020

Студијски програм Геонауке

Природни услови као детерминанте геопросторне дистрибуције

Наслов рада снежних лавина на примеру Шар планине (Србија)

Ментор Проф. др Иван Новковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Природни услови као детерминанте геопросторне дистрибуције снежних лавина на примеру Шар планине (Србија)

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.