



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU



---

SENKA BAJIĆ

**UNAPREĐENJE METODOLOGIJE PROCENE  
BEZBEDNOSTI I ZDRAVLJA NA RADU ZA  
SLUČAJ SNEŽNIH LAVINA IZAZVANIH  
ZEMLJOTRESOM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori  
Prof. dr BRANKO ŠKORIĆ  
Doc. dr BORKO BULAJIĆ

Novi Sad, 2018

*Zahvaljujem se profesoru Branku Škoriću i profesoru Borku Bulajiću za svesrdnu pomoć i podršku koju su mi pružili tokom izrade disertacije.*

*Posebnu zahvalnost dugujem svojoj porodici i najboljim prijateljima, odnosno familiji, na neiscrpnoj podršci.*



## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, <b>RBR:</b>		
Identifikacioni broj, <b>IBR:</b>		
Tip dokumentacije, <b>TD:</b>	Monografska dokumentacija	
Tip zapisa, <b>TZ:</b>	Tekstualni štampani materijal	
Vrsta rada, <b>VR:</b>	Doktorska disertacija	
Autor, <b>AU:</b>	Senka Bajić	
Mentor, <b>MN:</b>	Prof. Dr Branko Škorić, Docent Dr Borko Bulajić	
Naslov rada, <b>NR:</b>	Unapređenje metodologije procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom	
Jezik publikacije, <b>JP:</b>	Srpski	
Jezik izvoda, <b>JI:</b>	Srpski/Engleski	
Zemlja publikovanja, <b>ZP:</b>	Republika Srbija	
Uže geografsko područje, <b>UGP:</b>	Vojvodina	
Godina, <b>GO:</b>	2018.	
Izdavač, <b>IZ:</b>	Autorski reprint	
Mesto i adresa, <b>MA:</b>	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Fizički opis rada, <b>FO:</b> (poglavlja/strana/citata/tabela/slika/grafika/priloga)	8 / 155 / 93 / 33 / 33 / 0 / 0	
Naučna oblast, <b>NO:</b>	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu	
Naučna disciplina, <b>ND:</b>	Upravljanje rizikom od katastrofalnih događaja i požara	
Predmetna odrednica/Ključne reči, <b>PO:</b>	Procena bezbednosti i zdravlja na radu, Zemljotresi, Snežne lavine, Prirodni hazardi	
<b>UDK</b>		
Čuva se, <b>ČU:</b>	Biblioteka FTN	
Važna napomena, <b>VN:</b>		
Izvod, <b>IZ:</b>	Snežne lavine izazvane zemljotresima su fenomen koji se još uvek istražuje, iako je prisutan u skoro svim planinskim regionima širom sveta. U okviru ove doktorske disertacije razvijena je i unapređena metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Osnovni cilj unapređene metode je smanjenje rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanje najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo. Unapređena metoda uzima u obzir niz faktora (duboku geologiju, sastav stena, visinu snežnog pokrivača, rasprostranjenost kritičnih nagiba, itd.) koji mogu da utiču na pojavu snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom. Za verifikaciju metode uzet je skijaški centar Kopaonik, koji nije dovoljno istražen, iako je jedan od najvećih centara u jugoistočnom delu Evrope.	
Datum prihvatanja teme, <b>DP:</b>		
Datum odbrane, <b>DO:</b>		
Članovi komisije, <b>KO:</b>	Predsednik: Dr Miodrag Hadžistević, red. prof. Član: Dr Slobodan Krnjetić, red. prof. Član: Dr Milanka Negovanović, docent Član: Dr Vladimir Mučenski, docent Član, mentor: Dr Branko Škorić, red. prof. Član, mentor: Dr Borko Bulajić, docent	Potpis mentora



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO:</b>		
Identification number, <b>INO:</b>		
Document type, <b>DT:</b>	Monographic publication	
Type of record, <b>TR:</b>	Textual printed material	
Contents code, <b>CC:</b>	Doctoral dissertation	
Author, <b>AU:</b>	Senka Bajić	
Mentor, <b>MN:</b>	Branko Škorić, PhD, full professor; Borko Bulajić, PhD, assistant professor	
Title, <b>TI:</b>	Improving the methodology for assessing occupational safety and health in the case of earthquake-induced snow avalanches	
Language of text, <b>LT:</b>	Serbian	
Language of abstract, <b>LA:</b>	Serbian/English	
Country of publication, <b>CP:</b>	Republic of Serbia	
Locality of publication, <b>LP:</b>	Vojvodina	
Publication year, <b>PY:</b>	2018.	
Publisher, <b>PB:</b>	Author's reprint	
Publication place, <b>PP:</b>	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, <b>PD:</b> (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8 / 155 / 93 / 33 / 33 / 0 / 0	
Scientific field, <b>SF:</b>	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health	
Scientific discipline, <b>SD:</b>	Disaster Risk Management and Fire Safety	
Subject/Key words, <b>S/KW:</b>	Occupational Health and Safety Assessment, Earthquakes, Snow avalanches, Natural Hazards	
<b>UC</b>		
Holding data, <b>HD:</b>	Library of the Faculty of Technical Sciences	
Note, <b>N:</b>		
Abstract, <b>AB:</b>	Snow avalanches caused by earthquakes are a subject of many researches, even though this phenomenon is present in mountain regions around the world. In this doctoral dissertation, an improved method of assessing occupational health and safety in cases of earthquake-induced snow avalanches has also been developed. The main goal of the improved method is to reduce the risk to the smallest possible level, i.e. to accept the least possible residual risk, the further reduction or removal of which would not be profitable. This method takes into account a number of factors (deep geology, rock composition, snow cover height, critical inclination distribution, etc.) that can affect the occurrence of the earthquake-induced snow avalanches. For the verification of the method, the ski center Kopaonik was analyzed, which has not been sufficiently explored, although it is one of the largest ski centers in south-eastern part of Europe.	
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB:</b>		
Defended on, <b>DE:</b>		
Defended Board, <b>DB:</b>	President: Miodrag Hadžistević, PhD, Full Professor	
	Member: Slobodan Krnjetić, PhD, Full Professor	
	Member: Milanka Negovanović, PhD, Assistant Professor	Menthor's sign
	Member: Vladimir Mučenski, PhD, Assistant Professor	
Member, Mentor:	Branko Škorić, PhD, Full Professor	
Member, Mentor:	Borko Bulajić, PhD, Assistant Professor	

# **Unapređenje metodologije procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom**

Doktorska disertacija. Fakultet tehničkih nauka. Univerzitet u Novom Sadu

## **Rezime**

Prirodni hazardi predstavljaju sve češću pojavu koja može uzrokovati katastrofalne posledice i na različite načine promeniti današnju civilizaciju. Snežne lavine izazvane zemljotresima su fenomen koji se još uvek istražuje, iako je prisutan u skoro svim planinskim regionima širom sveta.

Opšte je poznato da najbolji odgovor na rizik jesu preventivne mere, pa samim tim procena bezbednosti i zdravlja na radu predstavlja prvi korak ka smanjenju posledica katastrofalnih događaja. Postoji veliki broj metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu koji ne uzimaju u obzir ključne faktore koji mogu da utiču na rezultate istraživanja. Na taj način se smanjuje bezbednost i veliki broj života može biti ugrožen.

U okviru ove doktorske disertacije unapređena je metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Osnovni cilj unapređene metode je smanjenje rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanje najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo. Unapređena metoda uzima u obzir niz faktora (duboku geologiju, sastav stena, visinu snežnog pokrivača, rasprostranjenost kritičnih nagiba, itd.) koji mogu da utiču na pojavu snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom. Za verifikaciju metode uzet je skijaški centar Kopaonik, koji nije dovoljno istražen, iako je jedan od najvećih centara u jugoistočnom delu Evrope. Korišćenjem empirijskog odnosa između maksimalnog ubrzanja tla (eng. Peak Ground Acceleration - PGA), nagiba terena i debljine snega, napravljene su probabilističke karte opasnosti od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za verovatnoće prekoračenja amplituda kretanja tla od 2%, 5% i 10% u 50 godina (povratni periodi od 2.475, 975 i 475 godina, respektivno), a za debljinu snega koja je prosečna za mart na Kopaoniku i koja iznosi 65,65cm. Za potrebe procene bezbednosti i zdravlja na radu računat je rizik, odnosno nivo povredljivosti za zaposlene koji borave na samom terenu, tj. u objektima žičara za vreme radnog vremena žičara u martu.

Rezultati istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji su pokazali da je rizik od nastanka snežnih lavina za vreme zemljotresa značajno potcenjen ako se koriste uobičajene karte hazarda. Razlog leži u tome što su najmanje 30%, a negde čak i do 70% veće realne maksimalne amplitude snažnog kretanja tla na duboko-geološkim stenskim lokalitetima (karakterističnim za više planinske predele), u poređenju sa amplitudama procenjenim pomoću običnih empirijskih prediktivnih jednačina koje uzimaju u obzir samo efekat uslova lokalnog tla (koji predstavlja geotehnički opis lokacije na dubini od maksimalno nekoliko desetina metara). U modifikovanoj ALARP analizi proračunate su granične vrednosti povredljivosti za određeni broj objekata u okviru skijaškog centra. Izračunate su tri zone povredljivosti, za verovatnoću hazarda od 10% u 50 godina, 5% u 50 godina i 2% u 50 godina. U slučaju da je povredljivost prevelika, sugeriše se šta bi moglo da se uradi povodom samog ojačanja konstrukcije, sistema barijera i drugih preventivnih mera u pogledu bezbednosti i zdravlja na radu. Rezultati istraživanja pružaju detaljan uvid u specifičnosti unapređenja metodologije za procenu bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom, koji su bitni sa aspekta kvalitetnijeg upravljanja bezbednošću i zdravljem na radu, kao i smanjenja posledica ovih prirodnih katastrofa.

**Ključne reči:** Procena bezbednosti i zdravlja na radu, Zemljotresi, Snežne lavine, Prirodni hazardi

# Improving the methodology for assessing occupational safety and health in the case of earthquake-induced snow avalanches

Doctoral dissertation. Faculty of Technical Sciences. University of Novi Sad

## Abstract

Natural hazards are an increasingly frequent phenomenon that can have catastrophic consequences and in different ways change today's civilization. Snow avalanches caused by earthquakes are a subject of many researches, even though this phenomenon is present in mountain regions around the world.

It is widely known that preventive measures are the best response to any risk. Therefore, the assessment of occupational safety and health is the first step towards reducing the consequences of catastrophic events. There are several methods for assessing safety and health at work that do not take into account the key factors that can influence the results of the research. That way, safety is reduced and a large number of lives can be compromised.

In this doctoral dissertation, a method of assessing occupational health and safety in the case of earthquake-induced snow avalanches has been improved. The main goal of the improved method is to reduce the risk to the smallest possible level, i.e. to accept the least possible residual risk, whose further reduction or removal would not be profitable. This method considers a number of factors (deep geology, rock composition, snow cover height, critical inclination distribution, etc.) that can affect the occurrence of earthquake-induced snow avalanches. For the verification of the method, ski center Kopaonik was analyzed. Even though Kopaonik is one of the largest ski centers in south-eastern part of Europe, it has not been sufficiently explored. By using the empirical relation between the PGA, the inclination of the terrain and the thickness of the snow, probabilistic hazard maps of earthquake-induced snow avalanches were produced, for probabilities of exceedance of ground motion amplitudes of 2%, 5% and 10% in 50 years (return periods of 2.475, 975 and 475 years, respectively), and for the snow thickness that is average for March on Kopaonik, which is 65,65cm. For the purpose of assessing safety and health at work, the risk is calculated, i.e. the level of vulnerability for employees residing in the buildings next to the lifts during the working hours in March.

The results of the research in this doctoral dissertation showed that the risk of occurrence of snow avalanches during earthquakes is significantly underestimated if standard hazard maps are used. This is because of at least 30%, and somewhere even up to 70% larger real maximum amplitudes of strong ground motion at deep-geology rock sites, which are common in higher mountain regions, compared to the amplitudes estimated by the empirical predictive equations which take into account only the effect of local soil (which represents a geotechnical description of the location on a scale of a few tens of meters). In the modified ALARP analysis, the limit values of the vulnerability for a certain number of objects within the ski center are calculated. Three vulnerability zones were calculated, for a hazard probability of 10% in 50 years, 5% in 50 years and 2% in 50 years. In the case when the vulnerability is too great, it is suggested what could be done about the reinforcement of the structure itself, the barrier system and other preventive measures with respect to occupational safety and health. The results of this study provide a detailed insight into the specificities of improving the methodology for assessing occupational safety and health in cases of earthquake-induced snow avalanches, which are important in terms of better quality management of safety at work, as well as the reduction of the consequences of these natural disasters.

Key words: Occupational Health and Safety Assessment, Earthquakes, Snow avalanches, Natural Hazards

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	17
1.1. Predmet i problem istraživanja .....	17
1.2. Cilj istraživanja i hipoteze .....	19
1.3. Primjenjivost rezultata istraživanja .....	19
1.4. Kritička analiza dosadašnjih istraživanja .....	20
1.5. Kratak sadržaj rada.....	23
2. OSNOVNI POJMOVI .....	25
2.1. Prirodni hazardi.....	25
2.2. Prirodne katastrofe – događaji sa katastrofalnim posledicama .....	26
2.3. Rizik .....	28
2.4. Sekundarni hazardi.....	30
2.5. Primena GIS-a u analizi prirodnih hazarda.....	32
3. SNEŽNE LAVINE KAO PRIRODNI HAZARD .....	37
3.1. Atmosferski elementi i elementi snežnog pokrivača.....	38
3.2. Podela i formiranje snežnih lavina .....	43
3.2.1. Lavine rastresitog snega.....	45
3.2.2. Pločaste lavine.....	45
3.2.3. Ledene snežne lavine .....	46
3.2.4. Slaš lavine (bljuzgave lavine) .....	46
3.2.5. Krovne lavine .....	46
3.3. Karakteristike lavinoznog terena.....	47
3.3.1. Karakteristike početne zone .....	47
3.3.2. Karakteristike trase .....	48
3.3.3. Karakteristike ranaut zone .....	48
3.3.4. Veličina snežne lavine i druge fizičke veličine .....	49
3.3.5. Određivanje učestalosti pojave snežne lavine na osnovu vegetacije.....	50
4. ZEMLJOTRESI KAO PRIRODNI HAZARD .....	53
4.1. Vrste i mehanika nastanka zemljotresa .....	54
4.2. Energetski parametri, površinski efekti i prognoziranje zemljotresa.....	56
4.3. Seizmička rejonizacija i mikrorejonizacija .....	60

---

5. UTICAJ SNEŽNIH LAVINA I ZEMLJOTRESA NA BEZBEDNOST I ZDRAVLJE NA RADU.....	63
5.1. Snežne lavine kao sekundarni hazard.....	63
5.2. Bezbednost i zdravlje na radu na lavinoznom terenu .....	69
5.2.1. Temperatura prostora i uticaj veta.....	70
5.2.2. Preventivne mere.....	74
6. UNAPREĐENJE METODE PROCENE BEZBEDNOSTI I ZDRAVLJA NA RADU ZA SLUČAJ SNEŽNIH LAVINA IZAZVANIH ZEMLJOTRESOM.....	85
6.1. Empirijska procena jačine kretanja tla .....	90
6.2. Probabilistička analiza hazarda .....	92
6.3. ALARP metoda procene rizika.....	96
6.4. Verifikacija metode na primeru nacionalnog parka Kopaonik za zaposlene u okviru skijališta.....	100
6.4.1. Geografske odlike nacionalnog parka Kopaonik .....	100
6.4.2. Duboka geologija .....	104
6.4.3. Probabilistička analiza seizmičkog hazarda za datu oblast.....	108
6.4.4. Mikrorejonizacija oblasti pogodnih za stvaranje snežnih lavina izazvanih zemljotresom .....	115
6.4.5. ALARP analiza – studija slučaja za Skijaški centar Kopaonik.....	124
7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA, ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA ....	141
7.1. Zaključna razmatranja .....	141
7.2. Zaključci .....	146
7.3. Pravci daljeg istraživanja .....	148
8. LITERATURA .....	149

## **Lista slika**

Slika 1. Prikaz lokacije uz pomoć GIS softvera (Ilwis) [21]

Slika 2. Prikaz poplavljeno područja uz pomoć GIS softvera (Ilwis) [21]

Slika 3. Pločasta snežna lavina [27]

Slika 4. Lavina rastresitog snega [27]

Slika 5. Karakteristike bezbednosti terena [22]

Slika 6. Velike tektonske ploče [30]

Slika 7. Primer seizmičke karte MIKRO-rejonizacije dobijene na osnovu analize seizmičkog hazarda [33]

Slika 8. Šematski prikaz procesa nastanka snežne lavine uzrokovane zemljotresom [6]

Slika 9. Prikaz lavinoznih oblasti koje čine 3,1% ukupne kopnene površine Zemlje [6]

Slika 10. Šematski prikaz metodologija procena bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom

Slika 11a. Unapređena metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom – prvi deo

Slika 11b. Unapređena metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom – drugi i treći deo

Slika 12. Šematski prikaz krive ponovljivosti

Slika 13. Primer ALARP dijagrama iz smernica za rizike vlade Hong Konga („Hong Kong Government Risk Guidelines“ (HKRG)) [74]

Slika 14. Stratifikacija rizika prema ALARP metodi procene rizika [73]

Slika 15. Mapa nacionalnog parka Kopaonik sa označenim delovima bitnim za studiju slučaja

Slika 16. Primer procesa definisanja nagiba u analiziranoj oblasti korišćenjem softvera Quantum GIS 1.8.0-Lisboa [53]. Na donjoj levoj mapi prikazana je bivša stanica za snimanje ubrzanja tla koja se nalazila u blizini centra Brzeća, dok je na obe donje slike prikazana snežna lavina koja je zabeležena 2012. godine.

Slika 17. Prikaz epicentara regionalnih zemljotresa

Slika 18. Atenuacione krive

Slika 19. Zone seizmičnosti sa prikazom analizirane oblasti

Slika 20. Osnovna geološka karta – Vrnjci [84]

Slika 21. Geološki parametri lokacije definisani za analiziranu oblast prema metodologiji klasifikacije koju su predložili Trifunac i Brejdi [52]. Takođe su date lokacije akcelerografske stanice u Brzeću i lavine iz 2012. godine.

Slika 22a. Karte seizmičkog hazarda za verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 10\%$  u 50 godina. Slika sa leve strane pokazuje kartu seizmičkog hazarda koja uzima u obzir samo lokalne uslove tla, a slika sa desne strane pokazuje kartu koja istovremeno uzima u obzir i lokalno tlo i duboku geologiju. Na levoj strani nalaze se i linije koje razdvajaju različite zone hazarda na zvaničnoj karti hazarda u propisima bivše SFRJ (Službeni list SFRJ, 1990 [86], kao i linije na karti koju je napravio Petrović [80], karti koja je predložena za Srbiju od strane Seizmološkog zavoda Srbije [87], i karte date u BSHAP projektu usklađivanja karata hazarda za zemlje Zapadnog Balkana (NATO SfP Project No. 984374, [88]).

Slika 22b. Alternativne mape seizmičkog hazarda dobijene za verovatnoću prekoračenja amplitude PGA od  $p = 5\%$  u 50 godina

Slika 22c. Alternativne mape seizmičkog hazarda dobijene za verovatnoću prekoračenja amplitude PGA od  $p = 2\%$  u 50 godina

Slika 23a. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom dobijene korišćenjem odnosa između vrednosti PGA i nagiba datih u tabeli 3, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p=10\%$  u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 50^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ) dok crvene oblasti označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 40^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni ( $s = 2$ ).

Slika 23b. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 5\%$  u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 45^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ), dok crvena područja označavaju kosine sa  $\alpha > 35^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni ( $s = 2$ ).

Slika 23c. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 2\%$

u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 40^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ), dok crvena područja označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 25^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni ( $s = 2$ ).

Slika 24. Gornja mapa predstavlja lokacije akcelerograma (iz EQINFOS i ISESD baza podataka) u regionu severozapadnog Balkana, gde krugovi pokazuju lokacije akcelerografskih stanica, a zvezde pokazuju epicentre zemljotresa koji su uzrokovali zabeleženo kretanje tla. Donja mapa prikazuje područje na kojem su analizirane snežne lavine izazvane zemljotresom u ovoj studiji i lokacije zemljotresa zabeležene na stanicu "Brzeće" na Kopaoniku.

Slika 25. Spektri pseudo-apsolutnog ubrzanja za odabrane zapise u Brzeću (crvene linije) naspram empirijskih procena dobijenih korišćenjem jedn. 3 i koeficijenata skaliranja datih u Tabeli 19 (crne krive prikazuju medijansku procenu dok osenčena površina pokriva vrednosti između 16% i 84% verovatnoće, tj.  $\pm 1$  standardna devijacija). Brojevi odgovaraju rednim brojevima u Tabeli 21.

Slika 26. Mapa skijaškog centra Kopaonik (preuzeto sa: [92])

Slika 27. ALARP metoda za Skijaški centar Kopaonik

Slika 28. ALARP dijagram za verovatnoću 10% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 12% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Slika 29. ALARP dijagram za verovatnoću 10% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 1% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Slika 30. ALARP dijagram za verovatnoću 5% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 17% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Slika 31. ALARP dijagram za verovatnoću 5% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 2% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Slika 32. ALARP dijagram za verovatnoću 2% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 27% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Slika 33. ALARP dijagram za verovatnoću 2% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 3% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

## **Lista tabela**

- Tabela 1. Broj poginulih, povređenih ili raseljenih zbog prirodnih katastrofa tokom dvadesetog veka [17]
- Tabela 2. Katastrofalni događaji prema Swiss Re [1]
- Tabela 3. Interakcije među prirodnim hazardima [16]
- Tabela 4. ICSI klasifikacija za vlažan sneg [24]
- Tabela 5. Karakterističan nagib za pojavu snežnih lavina [24]
- Tabela 6. Prosečan impaktni pritisak i potencijalna šteta [14]
- Tabela 7. Primeri vegetacije kao indikatora za prepoznavanje učestalosti snežnih lavina [22]
- Tabela 8. MCS skala [3]
- Tabela 9. Odnos Magnituda-Intezitet-Ubrzanje tla [26]
- Tabela 10. Inventar dokumentovanih, raportiranih ili statističkih podataka za snežne lavine uzrokovane zemljotresom za period od 1899-2010. godine [15]
- Tabela 11. Temperature radne okoline [16]
- Tabela 12. Boforova skala uticaja vetra [40]
- Tabela 13. Mere bezbednosti prema Ministarstvu rada Sjedinjenih Američkih Država [17]
- Tabela 14. Stopa preživljavanja osoba koje su se našle u snežnoj lavini [14]
- Tabela 15. Razlozi smrti žrtava u snežnim lavinama [14]
- Tabela 16. Preventivne mere [14]
- Tabela 17. Uslovi tla (lokalni i duboka geologija)
- Tabela 18. Raspoloživi podaci o debljini snega za područje skijališta Kopaonik [18]
- Tabela 19. Koeficijenti za skaliranje u jednačini 3.
- Tabela 20. Horizontalno ubrzanje tla (PGA), izračunato korišćenjem jedn. (11), za seriju vrednosti nagiba, a za debljinu snega  $h_{cr} = 65,65\text{cm}$ , čvrstoću na smicanje  $\tau_{st} = 1.200\text{Pa}$  i gustinu  $\rho = 210\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Tabela 21. Podaci o zapisima kretanja tla na stanicu "Brzeće" iz EQINFO baze podataka [19]

Tabela 22. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,12, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 23. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,12, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 24. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,01, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 25. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,01, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 26. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,17, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 27. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,17, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 28. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,02, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 29. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,02, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 30. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,27, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 31. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,27, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 32. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,03, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

Tabela 33. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,03, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu

## 1. UVOD

### 1.1. Predmet i problem istraživanja

Prema podacima EM-DAT (EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir), belgijskog centra za istraživanja epidemiologije katastrofa, do septembra 2017. godine dogodilo se 149 katastrofa u 73 zemlje širom sveta. Broj žrtava je prestigao broj od 3.162, broj pogodjenih je više od 80 miliona, dok se šteta procenjuje na 32.4 milijarde američkih dolara.

Da bi se katastrofalni događaj mogao kontrolisati u određenoj meri, neophodno je uvesti mere prevencije, jer se na taj način najjednostavnije utiče na smanjenje posledica katastrofalnog događaja. Neke od osnovnih aktivnosti prevencije štete uključuju restrikciju korišćenja zemljišta, građevinske propise kao i planiranje nesreće koje uključuje kako javni tako i privatni sektor [1].

Postoje prirodni i tehnološki hazardi. Snežne lavine i zemljotresi spadaju u prirodne hazarde, mogu da se dešavaju zasebno ali mogu da se dešavaju i simultano, odnosno zemljotresi mogu predstavljati okidač za nastanak snežnih lavina. Snežne lavine predstavljaju jedan od najčešćih hazarda u planinskim oblastima. Njihova razorna moć je izuzetno jaka, pa samim tim i posledice mogu da budu katastrofalne.

Osnovni cilj bezbednosti i zdravlja na radu predstavlja ostvarivanje uslova rada u kojima se preuzimaju određene mere i aktivnosti u cilju zaštite života i zdravlja zaposlenih i drugih lica [2]. Uspostavljanje sistema bezbednosti i zdravlja na radu, kao i njegova efikasnost i uspešnost u velikoj meri zavisi od društveno-ekonomskih uslova, stepena privrednog razvoja i tradicije svake države [2]. Ljudski, društveni i ekonomski troškovi izazvani nesrećama na radu, kao i povrede, bolesti i velike industrijske katastrofe predstavljaju razlog za zabrinutost na svim nivoima od samog radnog mesta do nacionalnih i međunarodnih nivoa [3].

Osnovni cilj upravljanja rizikom je smanjenje posledica katastrofalnog događaja, i to pre svega smanjenje broja žrtava i povređenih ljudi. Katastrofalni događaji predstavljaju ozbiljan problem u svetu, kako sa aspekta ugrožavanja života i zdravlja ljudi, tako i sa aspekta uništavanja imovine i životne sredine. Na ovaj

način se smanjuje kvalitet života, a samim tim utiče se i na ekonomiju čitave države [1].

U zakonodavstvu svake države članice EU postoji direktiva koja propisuje minimalne standarde u pogledu zaštite zdravlja i bezbednosti na radu. Osnovni cilj takve direktive jeste izvršenje procene rizika na radnom mestu i postavljanje preventivnih mera koje započinju sa eliminacijom opasnosti, a završavaju se sa ličnom zaštitnom opremom [1].

Postoji nekoliko načina da se okarakteriše seizmički hazard. Dva opšta pristupa, različita a opet suštinski kompatibilna, koja mogu da se primene u oceni vrednosti parametara kretanja tla (ubrzanja, brzine, pomeranja i dr.) od dejstva zemljotresa, su: deterministički i probabilistički pristup. Primenom probabilističke metode uniformnog hazarda (UHS metoda), moguće je formulisati seizmičku rejonizaciju i mikrorejonizaciju pristupom kojim se istovremeno uzimaju u obzir i verovatnoća pojave zemljotresa različite jačine, i prostorna distribucija seizmičkih žarišta, i frekventno-zavisna atenuacija amplituda jakog kretanja, kao i karakteristike lokalne geologije i lokalnog tla, čiji bi rezultat bili tzv. spektri uniformnog hazarda. Primenom ove metode se na jedan izbalansiran način razmatra doprinos svih faktora koji utiču na krajnji rezultat analize seizmičkog hazarda.

S obzirom na poznate zemljotrese u planinskim oblastima (kao što je npr. zemljotres iz 1980-te godine na Kopaoniku), kao i na procenjeni nivo seizmičkog hazarda u ovim oblastima u nekim ranijim istraživanjima, može se prepostaviti da pojava zemljotresa u planinskim oblastima može da izazove pojavu snežnih lavina. Predmet istraživanja predstavlja metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu s aspekta rizika od snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Metode za procenu rizika uzimaju u obzir čitav niz faktora koji utiču na krajnji rezultat. Daljom procenom rizika, moguće je smanjenje rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanje najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo. Neuzimanje u obzir ključnih faktora može da doprinese smanjenju bezbednosti sa aspekta zdravlja na radu. Iz tog razloga, procenu bezbednosti na radu i utvrđivanje svih uticajnih faktora, neophodno je realizovati za svaki skijaški centar kako bi se mogle utvrditi rizične zone i uvesti odgovarajuće mere prevencije.

## 1.2. Cilj istraživanja i hipoteze

Cilj istraživanja je unapređenje metode procene bezbedosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Primenom unapređene metode uniformnog hazarda i pravilnom analizom rizika, koja uzima u obzir veći broj parametara (duboku geologiju, sastav stena, visinu snežnog pokrivača, rasprostranjenost kritičnih nagiba, itd.), može se preciznije izračunati rizik, odnosno proceniti opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, i na osnovu procjenjenog rizika odrediti optimalne mere prevencije, a na taj način pozitivno uticati na bezbednost i zdravlje na radu. Za proces stvaranja sigurnih i bezbednih uslova na radnim mestima u planinskim oblastima potrebno je krenuti, pre svega, od uvođenja novih mera bezbednosti i mera prevencije baziranim na što pouzdanim mapiraju terena pogodnog za stvaranje snežnih lavina.

Opisana unapređena metoda će biti verifikovana na primeru najvećeg skijaškog centra u Srbiji i omogućiće veću efikasnost, preciznost i pouzdanost prilikom procene bezbednosti i zdravlja na radu u sličnim skijaškim centrima u regionu i šire u odnosu na postojeće metode određivanja veličine potencijalnih rizika.

Iz svih navedenih ciljeva istraživanja i rezultata koji se očekuju, proizilazi sledeća hipoteza:

*Moguće je unaprediti metodologiju procene nivoa bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom, korišćenjem metode uniformnog hazarda u kombinaciji sa jednačinama za procenu stabilnosti snežnih kosina i modifikovanom ALARP metodom za analizu rizika, odnosno za procenu bezbednosti i zdravlja na radu. Osnovna hipoteza je da bi ovakva unapređena metodologija, bazirana na jasnoj i preciznoj proceni rizika, u velikoj meri uticala na preciznu procenu bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom.*

## 1.3. Primjenjivost rezultata istraživanja

Rezultati istraživanja pružiće detaljan uvid u specifičnosti unapređenja metodologije za procenu rizika od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, bitne sa aspekta kvalitetnijeg upravljanja zdravljem na radu i bezbednošću. Rezultati mogu biti upotrebljeni kao podrška velikim institucijama u cilju planiranja procesa unapređenja bezbednosti i državnim organima sa aspekta planiranja strategije upravljanja zdravljem na radu u okviru planinarskih mesta i skijaških centara.

Predložena unapređena metoda procene rizika biće primenjiva za svaki skijaški centar sa posebnim naglaskom na proces unapređenja bezbednosti radnika i posetilaca. Kako će unapređena metoda u delu procene hazarda uzimati u obzir veći broj parametara vezanih za duboku geologiju, koji utiču na krajnje rezultate i veličinu rizika, ista će biti preciznija u odnosu na metode bazirane isključivo na podacima vezanim za lokalno tlo. Primenom unapređene metode omogući će se preciznije sagledavanje realnog nivoa rizika vezanog za zdravlje na radu i njegovog uticaja na bezbednost.

Očekivani rezultati istraživanja mogu biti od velikog značaja kao podrška investitorima u donošenju odluka o lokaciji novih zičara, staza, objekata i obezbeđivanju bezbednih uslova rada i boravka. Sadašnji uslovi rada i boravka će takođe moći da budu poboljšani uz poznavanje lokacija rizičnih zona. Korišćenjem geoinformacionih sistema, donosioci odluka mogu imati moćan i efikasan alat za izbor najpogodnije lokacije za nove zičare, staze i objekte i na taj način smanjiti potencijalne rizike koji se javljaju.

Ulaganje u bezbednost posetilaca povećalo bi konkurentnost srpskih skijaških centara u istočnom delu Evrope i na globalnom tržištu potencijalnih lokacija za investicije.

Analiza uticaja i pojave snežnih lavina prouzrokovanih zemljotresom i formiranje jedinstvene mape rizika uz pomoć geoinformacionog sistema za planinsku oblast Kopaonik može se kasnije koristiti kao osnova i u drugim istraživanjima za ovu oblast (prostorne analize, marketinške analize, analize rizika, analize iz oblasti zaštite životne sredine, itd.).

#### 1.4. Kritička analiza dosadašnjih istraživanja

Ponekad direktna šteta izazvana zemljotresom može biti manja od one uzrokovanе sekundarnim hazardom, odnosno cunamijem, klizištem i snežnom lavinom. Najpoznatiji primer lavine uzrokowane zemljotresom je Huaskaran (*Huascarán*) katastrofa u Peruu 1970. godine, koja je uništila dva grada i izazvala nekoliko sekundarnih hazarda [4].

Za period od 1899. do 2010. godine, ukupno 22 slučaja pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom su identifikovana u svetu, koji se odnose na prirodne ili veštačke seizmičke događaje sa magnitudama  $1,9 \leq Mw \leq 9,2$  [5]. Podolski i saradnici (*Podolskiy et al.*) [5] su razmatrali mnoštvo parametara i upoređivali

dobijene rezultate sa klizištima i drugim vrstama odrona indukovanih od strane zemljotresa. Zaključeno je da su rezultati analize ovih događaja slični, iako su svi podaci dobijeni iz statističkih analiza (tj. slučajevi bez svedoka) i ukazuju na značajno smanjenje magnituda zemljotresa potrebnih za pojavu klizišta [5]. Doktorska disertacija Evegenija Podolskog predstavlja respektabilan istorijski osvrт i inventar identifikovana 22 slučaja pojave snežnih lavina indukovanih zemljotresom [6].

Postoji veliki broj radova koji istražuje problematiku pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom. Grupa naučnika na čelu sa Ogura-om (Ogura) su proučavali efekte zemljotresa na pojavu malih snežnih lavina uz pomoć analize stabilnosti [7]. Posebnu pažnju su obratili na sile koje deluju na snežni pokrivač pre i posle pojave zemljotresa. Otkrili su da, kada dođe do pojave zemljotresa, spoljašnja sila koja predstavlja 46% gravitacione sile u pravcu paralelnom sa padinom, se dodaje, odnosno predstavlja novi teret koji snežni pokrivač treba da izdrži. Drugo saznanje je da se sila trenja smanjila oko 35 odsto zbog spoljne sile u pravcu upravnom u odnosu na padinu. Kao rezultat, zaključili su da je snežni pokrivač bio dosta stabilan, ali sa dodatnim opterećenjem, odnosno spoljašnjom silom od zemljotresa, pojavile su se dodatne nestabilnosti i samim tim pojavila se snežna lava [7].

Mačušita i saradnici (*Matsushita et al.*) [8] su analizirali karakteristike snežne lavine uzrokovane zemljotresom u severnoj oblasti Točigi u Japanu iz februara 2012. godine. Zemljotres je bio magnitude  $Mw = 6,3$  i indukovao je pojavu snežne lavine dugačke 8 kilometara i pojavu još nekoliko manjih površinskih lavina. Posebnu pažnju su obratili na karakteristike snežnog pokrivača i nestabilnog sloja koji se sastojao od fasetiranih snežnih kristala male čvrstoće, koji mogu da izazovu pojavu lavina [8].

Istraživanje koje je najviše uticalo na tok našeg istraživanja je rad Evegenija Podolskog i još nekoliko naučnika [9]. Podolski i saradnici [9] analizirali su stabilnost snega uz pomoć eksperimenata izvedenih na posebno dizajniranoj "vibro platformi" (eng. shaking table). Uz pomoć veštačkog snežnog pokrivača koji sadrži nestabilan sloj, pokušali su da otkriju tačan mehanizam nastanka snežne lavine indukovane zemljotresom. Ubrzanja u uzorcima snega su merena korišćenjem visokofrekventnih senzora, koji omogućavaju proračun napona od strane vibracije indukovanih unutar snega u trenutku frakcije. Posebna pažnja je posvećena na deo istraživanja koji se bavi vezom između horizontalnog ubrzanja (0-1g) i nagiba padine ( $17^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ) [9].

Černous i saradnici (*Chernouss et al.*) [4] su istraživali kako seizmičnost uzrokovana tehnološkim eksplozijama u rudnicima utiče na stabilnost snežnog pokrivača i pojavu snežnih lavina. Većinu eksperimenata su izvodili na "vibro platformi" i većina rezultata je pokazala jasnu vezu između seizmičnosti uzrokovane eksplozijama i pojave snežnih lavina. Najmanje dva faktora uzrokovana pomeranjem tla smanjuju stabilnosti snežnog pokrivača, a to su inercija (smanjuje trenje i povećava silu niz padinu) i čvrstoća na smicanje snega koja opada [4].

Jedna od novijih studija predstavlja istraživanje o različitim tipovima pojave snežne lavine od strane lokalnog zemljotresa u Val de la Sionu (*Vallee de la Sionne*) u Švajcarskoj, koji predstavlja lokaciju gde se izvode različita istraživanja od strane *WSL Instituta za sneg i ispitivanja vezana za snežne lavine (WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF)* [10]. Val de la Sion se nalazi u Valaisu, u zapadnom delu švajcarskih Alpa, gde je seizmički hazard umeren, ali viši nego u ostatku Švajcarske [11]. Studija se bavi analizom seizmičkih i infrazučnih signala generisanih od zemljotresa i njihovog uticaja na pojavu lavina. Analizama se došlo do zaključka da postoji velika verovatnoća da su snežne lavine prouzrokovane pojavom zemljotresa. Takođe, otkriveno je o kom tipu snežnih lavina se radi, kao i o njihovoj putanji. Izračunate su različite vrednosti kojima se meri jačina kretanja tla (maksimalno pomeranje, brzina, ubrzanje, vreme trajanja, itd.) na području oslobađanja lavine i upoređene su sa vrednostima koje su dobijene za dva zemljotresa koja nisu izazvala snežne lavine. Zaključeno je da kada je snežni pokrivač samo marginalno stabilan, pomeranje tla u vidu malog zemljotresa može pokrenuti snežnu lavinu. S druge strane, analiza druga dva, jača zemljotresa, pokazuje da u stabilnim uslovima snežna lavina neće biti aktivirana [10].

Sa ciljem razumevanja veze između seizmičkih signala i dinamike snežnih lavina, Perez-Gulijen (*Pérez-Guillén*) i saradnici su analizirali podatke o trideset lavina pokrenutih na eksperimentalnoj lokaciji Val de la Sionu [12]. Za svaki seizmički signal, trajanje, ubrzanje tla, intezitet i frekvencija, odnosno učestalost su upoređeni sa karakteristikama snežne lavine i debljinom snežnog pokrivača. Na taj način je prikazano da se poznavanjem učestalosti seizmičkih događaja, mogu odrediti vremenski režim i karakteristike toka snežnih lavina, kao i da se lako mogu razlikovati gusti od energetski turbulentnih tokova [12].

Prilikom ispitivanja bezbednosti, i mogućnosti smanjenja rizika, svaki od prethodno pomenutih radova uzima u obzir čitav niz faktora u svojim analizama procene rizika. U tim analizama, nijedna od korišćenih metoda za procenu

seizmičkog hazarda nije uzela u obzir uticaj duboke geologije na jačinu kretanja tla tokom zemljotresa koji mogu da dovedu do pojave snežnih lavina.

### **1.5. Kratak sadržaj rada**

Potreba za istraživanjem u sklopu ove disertacije proizilazi iz činjenice da, ukoliko se zanemare bitni faktori koji utiču na procenu verovatnoće pojave snežnih lavina izazvanih zemljotresom, to može u velikoj meri da utiče na bezbednost i zdravlje na radu u okviru skijaških centara.

U prvom poglavlju predstavljeni su postavka i opis problema, cilj istraživanja, hipoteze, primenjivost rezultata istraživanja, kritička analiza dosadašnjih istraživanja kao i kratak sadržaj rada.

U drugom poglavlju navedeni su i jasno definisani osnovni pojmovi vezani za (primarne) prirodne hazarde, prirodne katastrofe, rizik i sekundarne hazarde. Osim toga kratko je opisana i primena GIS-a u analizi prirodnih hazarda.

U trećem poglavlju analizirane su specifičnosti snežnih lavina kao prirodnog hazarda u cilju sagledavanja neophodnih parametara i faktora koje je neophodno analizirati pri unapređivanju metoda za procenu veličine rizika i procene bezbednosti i zdravlja na radu.

U četvrtom poglavlju predstavljena je analiza zemljotresa kao prirodnog hazarda u cilju definisanja uticaja primarnog hazarda na bezbednost i zdravlje na radu kao i za odabir povoljne metode za procenu rizika.

U petom poglavlju detaljno je analiziran uticaj snežnih lavina i zemljotresa na bezbednost i zdravlje na radu u cilju kvantifikacije rizika povređivanja. Opisana su dosadašnja saznanja o uticaju zemljotresa na pojavu snežnih lavina, kao i istorijski pregled najprepoznatljivih prirodnih katastrofa ovog tipa. Razumevanjem uticaja i nastanka opasnosti, stiču se preduslovi za unapređenje metode procene rizika koja će doprineti poboljšanju uslova i bezbednosti na radu u planinskim oblastima. U kontekstu uticaja na bezbednost i zdravlje na radu analizirane su: kritične infrastrukture, problem projektovanja i izgradnje, turistički centri kao mesta sa najvećom ranjivošću, preventivne mere i karakteristike resursa (radna snaga).

U šestom poglavlju prikazan je razvoj i unapređenje metode procene rizika. Takođe su analizirane osnove upravljanja rizicima, kao i identifikacija i kvantifikacija rizika. Prikazom metode obuhvaćena je i analiza prednosti i nedostataka metode sa glavnim ciljem prikaza uticaja duboke geologije na formiranje krajnjih mapa hazarda. Određena je struktura parametara, kao i način određivanja njihovih veličina. Dat je detaljan prikaz unapređene metode procene rizika tj. metodologija određivanja ranjivosti (povredljivosti) i uticaja novonastale metode na bezbednost ljudi. U okviru ovog poglavlja takođe je prikazana verifikacija metode na primeru procene veličine rizika, odnosno bezbednosti i zdravlja na radu, u okviru realnog sistema, na primeru skijaškog centra Kopaonik.

U sedmom poglavlju data su zaključna razmatranja, najvažniji rezultati, specifični i opšti zaključci doktorske disertacije. Pored sumiranja zaključaka, dati su pravci daljeg istraživanja i primene rezultata.

U osmom poglavlju navedena je korišćena literatura.

## 2. OSNOVNI POJMOVI

### 2.1. Prirodni hazardi

Hazard predstavlja mogući štetan fizički događaj, ljudsku aktivnost ili fenomen koji može da dovede do povreda i/ili ljudskih žrtava i/ili šteta na stvarima i/ili objektima koji su čoveku od vrednosti i/ili društvenih i ekonomskih poremećaja i/ili degradacije životne sredine i prirode [13].

Hazard se odnosi na potencijalni štetni događaj koji preti da ugrozi društveni, ekonomski i prirodni kapital na nivou zajednice, regiona ili države. Hazard se može odnositi na mnoge vrste prirodnog (poplava, uragana, zemljotresa, požara, itd), tehnološkog (nuklearne nesreće, nestanka struje, itd), ili ljudski indukovanih dešavanja (biohemijske opasnosti, bombardovanje, oružje, masovno uništenje, terorizam, itd). Takođe postoje i kombinacije hazarda, odnosno sekundarni hazardi o kojima će nešto kasnije biti više reči [14].

Prema podacima EM-DAT (EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir), belgijskog centra za istraživanja epidemiologije katastrofa, postoji nekoliko podela hazarda [15]. Osnovna podela hazarda je na prirodne i tehnološke. U prirodne hazarde spadaju:

- Geofizički hazardi
- Meteorološki hazardi
- Hidrološki hazardi
- Klimatološki hazardi
- Biološki hazardi
- Ekstraterestrialni hazardi

U najvažnije geofizičke hazarde spadaju zemljotresi i vulkanske aktivnosti. U meteorološke hazarde spadaju ekstremne temperature i oluje. U hidrološke hazarde spadaju poplave i klizišta. U klimatološke hazarde ubrajamo sušu i šumske požare. U biološke spadaju različite vrste epidemija i hazardi vezani za insekte i životinje.

U tehnološke hazarde ubrajamo:

- Industrijske akcidente
- Saobraćajne akcidente
- Razne vrste akcidenata

Hazard se može meriti njegovim fizičkim karakteristikama, verovatnoćom, ili posledicama. Na primer, mnoge priobalne zajednice imaju problem sa poplavama. Voda nastala od jakih kiša ili pucanja brane predstavlja izvor opasnosti, odnosno hazarda. Verovatnoća da dođe do pojave hazarda se može izraziti kroz nizak rizik ili malo verovatan; takođe bi mogao biti srednji rizik ili onaj koji ima veliku verovatnoću da se dogodi. Hazard ima potencijal da izazove smrtnе slučajeve, povrede, oštećenja imovine, infrastrukture ili poljoprivredni gubitak, štete po životnu sredinu, prekid poslovanja, ili druge vrste štete, ali bitna činjenica je da je hazard moguć a ne siguran događaj [14].

Agenicija za zaštitu životne sredine (*The Environmental Protection Agency*) je usvojila zajednički pristup za analizu nivoa hazarda. Analiza hazarda se sastoji od tri procesa, a to su identifikacija hazarda, analiza ranjivosti i analiza rizika [14]. U prvu grupu procesa spada identifikacija hazarda, lokacija, količina kao i priroda hazarda. U drugu grupu procesa vezanu za ranjivost spada analiza ranjivih zona, ljudska populacija, kritične ustanove i životna sredina. Na kraju, sama analiza rizika obuhvata verovatnoću nastanka događaja, ozbiljnost i posledice događaja [14].

## 2.2. Prirodne katastrofe – događaji sa katastrofalnim posledicama

Događaj sa katastrofalnim posledicama ili prirodna katastrofa predstavlja ostvareni štetan fizički događaj, ljudsku aktivnost ili fenomen koji je već doveo do povreda i/ili ljudskih žrtava i/ili šteta na stvarima i objektima koji su čoveku od vrednosti i/ili društvenih i ekonomskih poremećaja i/ili degradacije životne sredine i prirode [13].

Kada prirodan proces predstavlja opasnost za život ljudi ili imovinu, onda se radi o prirodnom hazardu. Mnogi geološki procesi predstavljaju potencijalnu opasnost. Na primer, poplave potoka koje se dešavaju kao deo njihovog prirodnog procesa, predstavljaju hazard za stanovništvo koje živi u blizini. Prirodni hazard prerasta u prirodnu nepogodu kada posledice događaja izazovu štetu po život ili imovinu. Kada prirodni događaj ubije ili rani veliki broj ljudi ili izazive obimnu materijalnu štetu, onda se takav prirodni događaj naziva prirodna katastrofa [16].

Ujedinjene nacije definišu katastrofu kao ozbiljan poremećaj funkcionisanja društva, koji izaziva velike ljudske, materijalne ili gubitke za zaštitu životne sredine koji premašuju sposobnost pogodjenog društva da se bori koristeći samo

svoje resurse (*United Nations* 1992). Sve katastrofe, bilo da su male ili velike, predstavljaju hazard koji je realizovan. Poenta ove definicije je u tome da ostvareni tip hazarda mora da premašuje sposobnost zajednice da odgovori na datu katastrofu (*Federal Emergency Management Agency*, FEMA 1997). Samim tim posledice katastrofe će zavisiti od lokacije i sposobnosti zajednice da se oporavi i odgovori na takvo dešavanje. Katastrofa može da se meri brojem izgubljenih života, zadobijenih povreda, ili oštećenom imovinom i mora se razlikovati od rutinskih hitnih događaja koji mogu napraviti štetu ili smrtnе slučajeve. Na primer, požar u kući zahteva pomoć vatrogasaca i može rezultovati gubitkom života ili imovine. Međutim, kako se ovakvi manji požari smatraju hitnim događajima, njima upravljaju različite lokalne vatrogasne službe i oni se obično ne smatraju katastrofom. Da bi se požar smatrao katastrofom, posledice i sam događaj moraju da nadvladaju lokalne kapacitete, dok posledice moraju ugroziti veću regiju [14].

U Tabeli 1 je, prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji (*WHO*) iz 2002. godine, dat prikaz broja poginulih, povređenih ili raseljenih zbog prirodnih katastrofa tokom dvadesetog veka [17].

*Tabela 1. Broj poginulih, povređenih ili raseljenih zbog prirodnih katastrofa tokom dvadesetog veka [17]*

<b><u>Tip hazarda</u></b>	<b><u>Broj žrtava</u></b>	<b><u>Broj povređenih</u></b>	<b><u>Broj raseljenih</u></b>
Poplave	6.851.740	1.033.572	123.009.662
Zemljotresi	1.816.119	1.147.676	8.953.296
Tropski cikloni	1.147.877	906.311	34.272.470
Vulkani	96.770	11.154	197.790
Klizišta, Lavine, Tokovi blata	60.501	8.071	3.759.329
Ekstra tropске oluje	36.681	117.925	12.606.891
Toplotni talasi	14.732	1.364	0
Cunami	10.754	789	-
Hladni talasi	6.807	1.307	17.340
Tornado	7.917	27.887	575.511
Požari	2.503	1.658	140.776
Ukupan broj:	10.052.401	3.257.714	183.533.065

Nasuprot naporima da se smanji ranjivost populacije na prirodne katastrofe, jasno se vidi da broj žrtva raste, dok se štete na imovini povećavaju. Veliki broj istraživanja se bavi ovom tematikom [14]. Razlog rastućeg broj žrtava i posledica po imovinu i ekonomski status je sledeći:

1. Porast broja stanovnika u oblastima koje su utvrđene kao hazardne.
2. Razvoj marginalizovanih zemljišta, što populaciju čini ranjivom.
3. Veće koncentracije populacije u urbanizovanim delovima, čime se povećava potencijal za gubitak života i imovine; ljudi nisu upoznati sa hazardnim delovima i ponašanjem u skladu sa tim; ekološki neprihvativljiv način života.
4. Ljudi nisu pogodjeni sa katastrofom podjednako - ekonomске razlike uzrokuju veliki broj siromašnih ljudi da budu pogodjeni katastrofom.
5. Veliki broj prirodnih katastrofa se sve češće javlja zbog porasta nivoa mora, a i kako se vremenski i klimatski obrasci menjaju.
6. Politički nemiri mogu direktno uzrokovati gubitak i/ili napraviti region više ranjivim zbog nedostatka spremnosti i siromaštva.
7. Više imovine je podložno šteti, ali pripremljenosti i mere ublažavanja minimiziraju gubitak ljudskog života.

### 2.3. Rizik

Rizik predstavlja verovatnoću nastanka očekivanih štetnih posledica (očekivanog broja ljudskih žrtava i povređenih ljudi, očekivanih šteta na stvarima i objektima, očekivanih poremećaja društvenih i ekonomskih aktivnosti, ili očekivanog nivoa degradacije životne sredine), koje nastaju usled interakcija između prirodnih hazarda ili hazarda izazvanih ljudskom delatnošću, i povredljivosti[13].

Analiza rizika se sastoji od tri osnovne komponente a to su upravljanje rizikom, procena rizika i komunikacija rizika. Sa druge strane, određeni autori drugačije opisuju rizik i smatraju da postoji pet faza upravljanja rizikom, a to su: identifikacija rizika, analiza rizika, procena rizika, izbor metode i instrumenata za upravljanje rizikom, kao i primena izabrane metode i njena procena i ponovno ispitivanje [1].

Evropska agencija za zaštitu životne sredine je opisala analizu rizika kao procenu verovatnoće nastanka hazardnog događaja i posledica do kojih može doći, a na osnovu procenjenih ugroženih zona. Bitno je napomenuti da se analiza rizika bavi procenom verovatnoće i težine posledice na osnovu istorijskih podataka o zabeleženim akcidentima, lokalnim iskustvima i trenutno najbolje dostupnim tehnološkim informacijama [14].

Analiza rizika daje procenu:

1. Verovatnoće nastanka katastrofe na osnovu istorijskih podataka i sadašnjeg uslova životne sredine, kao i razmatranje bilo kojih neuobičajenih stanja.
2. Ozbiljnost posledica i ljudske štete koje mogu nastati (akutni, zakasneli, i/ili hronični zdravstveni efekti), broj mogućih povreda i smrти, kao analiza i visoko rizičnih grupa.
3. Ozbiljnost posledica na kritičnim objektima (na primer, bolnice, vatrogasne stanice, policijska odeljenja, komunikacioni centri).
4. Ozbiljnost posledica oštećenja imovine (privremeno, neophodna popravka, stalno raseljavanje).
5. Ozbiljnost posledica štete po životnu sredinu (povratni, stalni).

Procena rizika polazi od interakcije između hazarda, odnosno verovatnoće pojave štetnog događaja, sa jedne strane, i povredljivosti, odnosno posledica štetnog događaja po ljude i materijalna dobra, sa druge strane, te se obično i numerički izražava kao proizvod ova dva faktora [13].

Analiza rizika uzima različite podatke iz identifikacije hazarda i ispituje ne samo verovatnoću događaja, već i istražuje društveno-kulturološke, ekonomski, ekološke i negativne uticaje od katastrofalnih događaja. Analiza rizika, takođe, upoređuje rizike od različitih hazarda i utvrđuje da li rizici mogu imati sličnu verovatnoću pojavljivanja i ishoda. Rezultati analize rizika mogu biti korišćeni u procesu rešavanja problema i donošenja odluka o usvajanju strategije da se smanji ranjivost zajednice.

Proces analize rizika obuhvata ispitivanja prirode nastanka hazarda, vremena i mesta potencijalnog događaja, potencijalnog intenziteta i potencijalnog uticaja na ljude i imovinu. Nivo rizika za katastrofu izražava se kao verovatnoća pojave ili učestalost puta njene posledice. Nivo rizika može da bude izuzetno očigledan, dok neki hazardi mogu imati veću verovatnoću nastanka i veći potencijal da izazovu obimnu štetu. Takođe, treba uzeti u obzir i činjenice da neke zajednice mogu biti spremne da žive sa određenim nivoom rizika ili ne žele da troše resurse neophodne za smanjenje štetnih posledica koje dolaze sa njim [18].

Jasno je da je jedan od bitnih delova procene i analize rizika sama procena štete, odnosno posledica katastrofalnog događaja. Na osnovu toga, postoji nekoliko klasifikacija katastrofalnog događaja. Swiss Re, osiguravajuće društvo uzima u obzir nekoliko komponenti a to su [1]:

- Osigurana šteta
- Ukupna šteta

- Ljudske žrtve

U Tabeli 2 je prikazana klasifikacija katastrofalnih događaja prema Swiss Re. Shodno tome, katastrofalnim događajem se smatra svaki događaj koji dostigne ili bude veći od vrednosti prikazanih u tabeli [1].

*Tabela 2. Katastrofalni događaji prema Swiss Re [1]*

		<b>IZNOS</b>
Osigurane štete	Transport Vazduhoplov Druge štete	15.6 miliona US dolara 31.2 miliona US dolara 38.7 miliona US dolara
Totalna šteta		77.5 miliona US dolara
Ljudske žrtve	Poginuli ili nestali Povređeni Ostali bez kuće	20 50 2.000

#### 2.4. Sekundarni hazardi

Iako je i dalje veoma nepouzdano prognoziranje nastanka nekog katastrofalnog događaja, određeni prirodni hazardi su izuzetno povezani. Tačnije, neki prirodni hazardi su direktno povezani, što znači da nastanak jednog događaja može da uslovi nastanak drugog. Takvi hazardi se nazivaju sekundarni. Takođe, neki prirodni procesi koji se svakodnevno dešavaju na planeti mogu usloviti nastanak katastrofalnih događaja. Na primer, sporo kretanje velikih ploča ispod površine Zemlje, kao i njihovo sudaranje ili klizanje jasno objašnjava nastanak vulkanskih erupcija i zemljotresa. Velike ili produžene padavine mogu da dovedu do nastanka poplava i klizišta. U Tabeli 3 prikazane su veze nastanka jednog hazarda sa nastankom drugog [16].

Prošli događaji mogu stvoriti nepredviđene uticaje na buduće događaje. Ova teza je potvrđena sa primerom kretanja raseda i nastankom zemljotresa. Zatim, taj rased menja i izaziva naprezanja na drugim delovima Zemljine kore, dok oni verovatno menjaju ponašanje drugih raseda u regionu, i iz tog razloga se svaki sledeći zemljotres razlikuje. Ova povezanost može da se prenese i na primere drugih prirodnih hazarda [16].

*Tabela 3. Interakcije među prirodnim hazardima [16]*

<b>PRIMARNI HAZARD</b>	<b>SEKUNDARNI HAZARD</b>
Zemljotresi	Klizišta Cunami Snežne lavine Požari Poplave
Vulkanske erupcije	Zemljotresi Cunami Poplave Klizišta Uragani (vremenske nestabilnosti)
Klizišta	Cunami
Uragani (vremenske nestabilnosti)	Poplave Klizišta
Poplave	Klizišta

Neki procesi dovode do još bržih promena (domino efekat). Na primer, globalno zagrevanje uzrokuje brže topljenje arktičkog morskog leda. Rezultirajuća tamnija morska voda apsorbuje više sunčeve energije od belog leda, a ova pojava izaziva topljenje veće količine morskog leda. Slično tome, globalno zagrevanje uzrokuje brže topljenje ledenih ploča na Grenlandu i Antarktiku. Velika količina vode izbjija kroz led, deluje kao mazivo za kretanje, i samim tim je ubrzan tok leda prema okeanu. Ovo na kraju dovodi do bržeg "mravljenja" glečera i formiranja ledenih bregova koji se tope u okeanu.

Ponekad postoji niz manjih "prekursornih" događaja koji prethode glavnom prirodnom događaju, i koji mogu da upozoravaju na predstojeću katastrofu. Najbolji primer su serije zemljotresa koji su se javili u periodu pre velike erupcije planine St. Helens (*Mount St. Helens*) u Americi 1980. godine. Ovi zemljotresi su bili prekursorni događaji za glavnu katastrofu, ali ipak, ovakve pojave nisu prisutne uvek [16].

Prirodni hazardi nekada mogu da se preklope i na taj način može doći do pojačanog efekta i kritičnijih posledica. Najviše prirodnih katastrofa se događa kada se veliki broj varijabli preklapa na takav način da jedna drugu ojačaju, a za posledicu imaju prirodnu katastrofu velikih razmara. Jedan primer jeste u slučaju visoke vode i uragana, i ako olujni talas stigne na obalu kada je plima, ova dva hazarda se međusobno pojačavaju i rezultat je mnogo veći olujni talas, koji preti da ugrozi mnogo veću količinu stanovnika. Primer ovakve velike prirodne

katastrofe je uragan koji je usmratio 8.000 ljudi u Galvestonu, u Teksasu, 1900. godine [16].

## 2.5. Primena GIS-a u analizi prirodnih hazarda

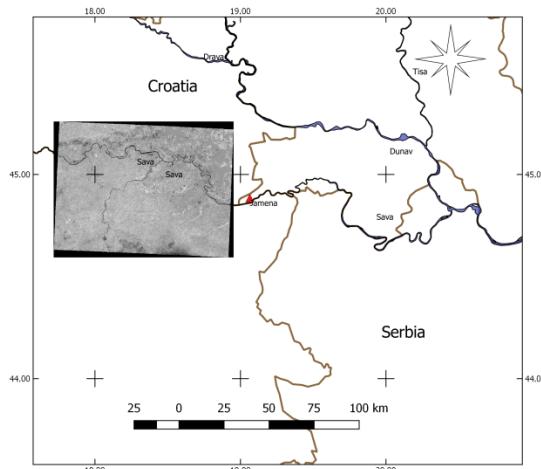
Geografski informacioni sistemi (GIS) predstavljaju neizostavan alat u analizi različitih prirodnih hazarda, s obzirom da većina informacija koje su potrebne za analize hazarda imaju i prostornu, odnosno geografsku karakteristiku. Geografski informacioni sistemi mogu biti opisani kao programi dizajnirani da upravljaju velikim količinama prostornih i drugih podataka. Fišer (*Fisher*) je 1992. godine dao definiciju koja se i danas koristi, a koja glasi: „Geografski informacioni sistem je kompjuterski informacioni sistem koji prikuplja, analizira, skladišti i prikazuje prostorne entitete i njihove atribute, za rešavanje kompleksnih istraživačkih, projektantskih i problema upravljanja [19].

Prostorne podatke koji se koriste u GIS-u moguće je preuzeti iz različitih izvora, kao na primer karata, satelitskih fotografija, pisanog teksta i statističkih podataka. GIS direktno koristi kartu ili fotografiju, uz pomoć operatera koji skenira traženi podatak, specijalizovanim softverom ili ih konvertuje i dalje aranžira kao GIS bazu podataka. Tri osnovne komponente GIS-a su kompjuterski hardver, niz aplikacionih softverskih modula, kao i odgovarajući organizacioni sadržaj [19]. Softverski sistemi koji se najčešće koriste u analizi prirodnih hazarda jesu Quantum GIS, Arc GIS, Ilwis kao i mnogi drugi. Osnovna uloga geoinformacionih sistema u analizi prirodnih hazarda je svakako praćenje promena u životnoj sredini i pravovremeno reagovanje kako bi se smanjile posledice katastrofalnog događaja.

Jedan od prirodnih hazarda koji se najčešće analizira uz pomoć geografskih informacionih sistema su poplave. Poplave predstavljaju prirodni hazard koji je prisutan širom sveta, a u okviru kojeg Srbija zauzima veoma bitno mesto. One predstavljaju prirodni deo ekosistema i smatraju se opasnim samo kada ugrožavaju ljudske živote i imovinu [20]. Jedno od poslednjih istraživanja koje se bavi analizom poplava predlaže metodu koja uključuje praćenje podataka o nivou vode u realnom vremenu i korišćenje tih informacija za detekciju promena nivoa vode pomoću podataka daljinske detekcije [21]. Glavni cilj ovog istraživanja bio je da se isprate nivoi vodostaja reke Save pre ulaska u Srbiju, koristeći kombinaciju multispektralnih Landsat slika za verifikaciju pojavljivanja poplava. Primarna lokacija studije slučaja je između Slavonskog Broda i Županje u Hrvatskoj, kako bi se ispitali nivoi vode koji su se dostigli pre prelaza hrvatske, odnosno srpske

granice. Prvo, nivoi vode su nadgledani na srpskoj hidrološkoj stanicici reke Save, pod nazivom "Jamena". Kao drugo, takođe je vršen monitoring na hrvatskim hidrološkim stanicama "Županja" i "Slavonski Brod", koje se nalaze u blizini stanice "Jamena" [21].

Kada se nivo vode podigne do nivoa izveštavanja ili upozorenja na hidrološkoj stanicici "Jamena", spektralne slike (Landsat) mogu se preuzeti na lokaciji studije kao potvrda poplave. Na ovaj način promene nivoa vode i spektralnih verifikacionih slika lokacija izvan granica Srbije mogu se koristiti kao sistem ranog upozoravanja i priprema pomoći za neizbežne poplave koje mogu da pogode Srbiju i ugrože bezbednost i živote. Analizirano i upoređivano je područje od interesa pre poplava 19. maja 2013. godine, kao i nakon poplava 22. maja 2014. godine (Slika 1).

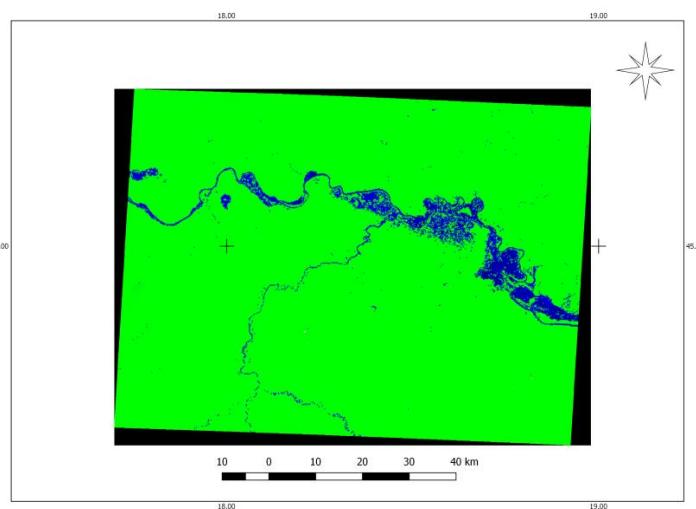


Slika 1. Prikaz lokacije uz pomoć GIS softvera (Iwisis) [21]

Zaključno, glavni cilj istraživanja je bio pravovremena detekcija povišenog nivoa vode na hidrološkim stanicama uz pomoć GIS alata. Primer upotrebe GIS-a za analizu prirodnih hazarda na primeru poplava prikazan je na Slici 2.

Primena GIS alata u analizi hazarda kao što su poplave i snežne lavine predstavlja jednu od osnovnih metoda prevencije kao i pravovremeno smanjenje posledica katastrofalnog događaja. Koliko je korišćenje GIS-a za procenu opasnosni od snežnih lavina uzelo maha poslednjih godina, govori i činjenica da danas postoji veliki broj aplikacija za android i iOS mobilne operativne sisteme, koji ukazuju na moguće lokacije pojave snežnih lavina. Na ovaj način se fizička

lica obaveštavaju o hazardnim zonama i stepenu opasnosti. Mapiranje snežnih lavina predstavlja jednu od najboljih preventivnih metoda pri čemu se različitim bojama obeležavaju nivoi rizika. GIS alatima se prikupljaju različiti topografski podaci čijom se daljom analizom mogu utvrditi zone opasnosti. Moguće je vizualizovati istorijske podatke i na taj način vršiti različite vrste modelovanja. Sve jasniji digitalni modeli terena kao i trodimenzionalne prostorne prezentacije, unapređuju preciznost i tačnost mapiranja snežnih lavina u svim planinskim oblastima.



Slika 2. Prikaz poplavljenog područja uz pomoć GIS softvera (Iwiss) [21]

Javnost postaje svesnija značaja mapiranja, i to ne samo u planinskim predelima austrijskih Alpa. Svakako da jedan od pionira razumevanja značaja mapiranja snežnih lavina, kao obavezne preventivne metode, predstavljaju upravo Austrijanci. Kako je veliki deo Austrije prekriven snežnim pokrivačem duže od šest meseci u godini, veoma je bitno izboriti se sa uticajem i uzrocima snežnih lavina [22]. Danas, pored Austrije i drugih planinskih zemalja, veliki broj država koje ne poseduju teritorijalno velika planinska područja je razumelo prednosti korišćenje GIS alata u mapiranju snežnih lavina. Bitno je naglasiti da mapiranje snežnih lavina dotiče i utiče na mnoge sfere privrede, a naročito na turizam, i bezbednost i zdravlje na radu svake zemlje.

Kako bi mapiranje snežnih lavina bilo što preciznije i efektivinije, neophodno je koristiti topografske podatke i digitalne modele terene (DTM) što većih razmara. S obzirom da veliki broj karata danas postoji u digitalnom formatu, one

predstavljaju osnovu za GIS analiziranje. Sa druge strane, GIS može da ponudi klasičnu funkcionalnost, kao što je prikaz pojedinačnih parametara (strmost padine, hronologija događaja, i dr.). GIS se takođe upotrebljava za kombinovanje višestruko složenih atributa, upotrebom raznih kompleksnih karakteristika za dobijanje veoma prefinjenih rezultata. Jedan od glavnih podataka za većinu analiza i modela su informacije o strnosti padine koje se dobijaju iz digitalnih modela terena, s obzirom da je strmost padine jedan od najbitnijih faktora uticaja pojave snežnih lavina [22].

Razumevanje kartografskih elemenata je takođe veoma bitan faktor pri analiziranju potencijalnih zona opasnosti. Mape sadrže informacije o terenu koje se uglavnom sastoje od izolinija, hidrografskih informacija, vrste tla (geologije), kao i od informacija o infrastrukturi. Preciznost ovih podataka najviše zavisi od razmere karte. Najrasprostranjenije razmere koje se upotrebljavaju za bazne mape se kreću od 1:1.000-1:5.000 (mape registra zemljišta), preko 1:25.000-1:50.000 (klasične topografske mape), pa sve do 1:100.000 ili manje (regionalni pregledi) [22]. Detaljniji opis zona i koristi mapiranja snežnih lavina, kao preventivne mere upotrebom GIS alata, biće prikazani u poglavljju pod nazivom Uticaj snežnih lavina i zemljotresa na bezbednost i zdravlje na radu.



### 3. SNEŽNE LAVINE KAO PRIRODNI HAZARD

Snežne lavine predstavljaju jedan od najčešćih prirodnih hazarda u planinskim oblastima. Postoji nekoliko definicija snežnih lavina. Opšte prihvaćena je da snežne lavine predstavljaju masu snega koja se kreće niz padinu koja može da sadrži pored snega i led, kamenje, delove stena i ruševina [23].

Iako snežne lavine ne spadaju u grupu najopasnijih prirodnih hazarda (u koje spadaju zemljotresi, poplave, tropске oluje, suša i vulkanske erupcije), one predstavljaju najopasniji hazard za ljude koji žive u planinskim oblastima. Prema podacima EM-DAT (EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir), od 1900. do 2017. godine snežnih lavina u Evropi je bilo 40, 1.425 osoba je poginulo dok je broj pogodjenih osoba oko 14.947, sa ukupnom štetom od 777.489 američkih dolara [15].

Zimski turizam predstavlja jako bitnu granu ekonomije alpskih zemalja Evrope kao što su Austrija, Francuska, Italija i Švajcarska, ali i zapadnog dela Kanade i Sjedinjenih Američkih Država. Iz tog razloga, bitno je da ove države održe reputaciju bezbednih mesta za zimovanje i skijanje. Kako bezbednost predstavlja prvi korak u održavanju skijaškog centra i privlačenju gostiju iz celog sveta, mere prevencije i standardi vezani za bezbednost od snežnih lavina su neophodni segment svake države koja promoviše zimski turizam.

Pored toga što direktno utiču na ljude tako što izazivaju povrede i smrt, snežne lavine izazivaju i veliku štetu na imovini i životnoj sredini. Tri grane industrije koje su najviše pogodjene snežnim lavinama su saobraćaj, građevinarstvo i turizam [24].

- Saobraćaj – Snežne lavine mogu izazvati prekide na putevima i železnicama u planskim koridorima.
- Građevinarstvo – Snežne lavine uništavaju objekte i mogu povrediti ili usmrstiti stanovništvo. Građevinski inženjeri moraju da preduzmu sve bezbednosne mere vezane za lokaciju, konstruisanje i zaštitu objekata koji se nalaze na lavinoznom terenu. Posebnu pažnju treba obratiti na izgradnju kuća, hotela, telefonskih i električnih provodnika, kao i žičara u skijaškim centrima.
- Turizam i bezbednost i zdravlje na radu – Turizam spada u grane industrije koje su svakako najviše pogodjene pojavom snežnih lavina i iz tog razloga bezbednosne mere u svim planinskim predelima moraju biti preduzete.

### 3.1. Atmosferski elementi i elementi snežnog pokrivača

Za nastanak snežnih lavina potrebna je posebna veza između vremenskih prilika posmatrane oblasti i snežnog pokrivača. Klima predstavlja prosečno vreme određenog područja. Postoji nekoliko klimatskih tipova na Zemlji. Za formiranje snežnih lavina, najveće razlike se mogu primetiti između maritimnog ili okeanskog tipa klime i kopnenog ili kontinentalnog tipa klima, ili u prelazu između prethodno pomenutih [24]. Evropa spada u dva klimatska pojasa, umereni i suptropski pojas, koji se dalje dele u nekoliko oblasti. Srbija spada u umereni pojas i evropsko-kontinentalnu klimatsku oblast, zajedno sa jugoistočnim delovima Evrope, južnim Karpatima, Panonskom nizijom i teritorijama Balkanskih zemalja severno od planine Balkan [25].

Karakteristike maritimnog tipa klime u snežnim područjima jesu relativno velika količina snežnih padavina i relativno blage temperature. Pojava kiše je vrlo česta, debljina snežnog pokrivača je oko 190cm, dok je temperatura vazduha najčešće oko -1,3°C. Snežne lavine u ovoj oblasti nastaju za vreme ili odmah posle oluja gde se nestabilnosti javljaju u snežnom pokrivaču blizu površine [24].

Karakteristike kontinentalnog tipa klime u snežnim područjima jesu relativno mala količina snežnih padavina i hladne temperature. Snežni pokrivač je uglavnom vrlo nizak i sastoji se od velike količine nestabilnosti koje mogu da izazovu pojavu snežnih lavina. Debljina snežnog pokrivača je oko 110cm, dok je temperatura vazduha najčešće oko -7,3°C [24].

Padavine predstavljaju sve oblike kondenzovane i sublimirane vodene pare u vazduhu koji se na Zemaljskoj oblasti pojave u tečnom ili čvrstom stanju. Sneg spada u vrstu padavina koje nastaju u oblacima i zatim padaju na zemlju. Sneg nastaje kada se vazduh zasiti vodenom parom kada je temperatura vazduha ispod 0°C. Vodena para tada sublimira, odnosno prelazi direktno u čvrsto stanje [26].

Jedan od bitnih segmenata razumevanja stanja snežnog pokrivača jeste poznavanje toplotne razmene između površine snežnog pokrivača i atmosfere. Razmena toplote može da uslovi nastanak nestabilnih slojeva koji posle mogu da obrazuju snežne lavine. Toplota može da napusti ili uđe u snežnih pokrivač, gde je jedan od bitnih faktora vetar, o kom će kasnije biti više reči. Ukoliko je vazduh topliji od pokrivača, onda se površinska toplota dodaje pokrivaču, odnosno ulazi u sistem. Suprotno, ukoliko je površina pokrivača toplija od vazduha, toplota snežnog pokrivača se gubi. Za nastanak snežnih lavina izuzetno je bitna pojava

inja. Inje nastaje kada relativno vlažan vazduh iznad hladne snežne površine postane prezasićen, i nakon nekoliko prirodnih procesa, vodena para se kondenuje na površini snežnog pokrivača. Rezultat su pernati snežni kristali deblijine od 1mm do nekoliko centimetara. Kada se sloj koji se sastoji od inja zatrpa, postoji velika verovatnoća nastanka snežnih lavina. Inje se najčešće stvara preko noći, kada se površina snežnog pokrivača hlađi, a okolni vazduh postane prezasićen. Kiša može da izazove dodatak toploće snežnom pokrivaču, ali je bitniji segment težina i efekat koji izaziva na mehaničkim svojstvima sloja ispod površine [24].

Postoji dva tipa radijacije, odnosno zračenja vezana za snežni pokrivač. Jedan je *short-wave* radijacija, odnosno kratkotalasna radijacija koja obuhvata vidljivu svetlost i ostale niskotalasne komponente od Sunca. Drugi je *long-wave* radijacija, odnosno dugotalasna ili infracrvena radijacija sa zemlje i izvora blizu, kao što su oblaci. Čak 99% solarne energije se sastoji od kratkotalasne radijacije, dok 99% kopnene radijacije je dugotalasno zračenje. Promena ravnoteže između ove dve vrste zračenja je odgovorna za promenu temperature blizu površine snežnog pokrivača. Kako sunčev zračenje predstavlja jedan od oblika kratkotalasnog zračenja, bitno je napomenuti da čak 90% zraka se reflektuje nazad u prostor, u slučaju da je sneg suv. Kada je sneg vlažan, taj procenat se smanjuje na 80%. Zračenje prodire kroz snežnih pokrivač, ali se smanjuje sa dubinom. Generalno, prođor solarnog zračenja je dublji za sneg sa većim kristalima i većom gustinom. Sa druge strane, poznato je da je 50% početnog dugotalasnog zračenja apsorbovano na površini i ne prodire više od 1cm. Ova karakteristika može da se pripiše manjoj energiji dugotalasnog zračenja. Pored oblaka i ugljen-dioksida kao bitnih izvora dugotalasnog zračenja, snežni pokrivač predstavlja drugi važan izvor ovog zračenja. Na ovaj način se snežni pokrivač hlađi. Za vreme vedrih noći, bez oblaka, skoro celokupno dugotalasno zračenje može da napusti snežni pokrivač. U ovim uslovima, snežni pokrivač može biti 5°C do 20°C hladniji od okolnog vazduha. Još jedan bitan segment razmene toploće jeste nastanak snežnih lavina vlažnog snega. One nastaju u uslovima tanke magle kroz koju Sunce može da prodre i zagreje snežni pokrivač, ali će dugotalasno zračenje, emitovano od snežnog pokrivača, biti apsorbovano od strane magle i potom vraćeno u snežni pokrivač. Tada nastaje velika količina toploće koja ulazi u snežni pokrivač i stvara odlične uslove za nastanak snežnih lavina vlažnog snega [24].

Temperaturne inverzije su prisutne kada atmosferska temperatura raste sa nadmorskom visinom. U normalnim uslovima, temperatura opada sa povećanjem nadmorske visine u planinskim oblastima. Kada se temperatura povećava sa

povećanjem nadmorske visine, uzrok je najčešće smanjenje topote snežnog pokrivača zbog dugotalasnog zračenja, odnosno hlađenja. Jasan primer za temperaturnu inverziju predstavlja situacija kada je dnevni topao vazduh još uvek prisutan na vrhovima planine, dok je hladan, gušći vazduh nastao od hlađenja snežne površine, potonuo u dubinu, odnosno kotlinu. Hladan vazduh je gušći od toplog vazduha. Ova pojava je najčešća kod lepog, odnosno vedrog vremena u planinskim delovima. Pojava temperaturnih inverzija može da navede na pogrešne zaključke ukoliko merimo temperature samo na vrhovima planina. Iz tog razloga za predviđanje pojave snežnih lavina moramo uzeti u obzir i druge faktore [24].

Čak 90% snežnih lavina nastaje kao posledica novog napadalog snega. Oblaci nastaju kada je vazduh prezasićen sa vodenom parom, a sastoji se od vodenih kapljica. Kapljice nastaju kondenzacijom oko tzv. kondenzacionih jezgara (so, zrno praštine, zemlja). Ove čestice su izuzetno male, oko  $10^{-6}$  mm u prečniku. Kada je temperatura na kojoj oblak postaje zasićen ispod  $0^{\circ}\text{C}$ , tada nastaju snežni kristali od malih ledenih kristala. Takođe, da bi došlo do formiranja snežnih kristala, potrebno je da postoje ledena jezgra, koja su ređa od kondenzacionih. Ova ledena jezgra moraju da imaju posebnu molekularnu strukturu. Svakako, broj ledenih jezgara raste kako temperatura vazduha opada. Na temperaturama od  $-10^{\circ}\text{C}$  postoji čak 10 aktivnih ledenih jezgara po kubičnom centimetru, dok se na temperaturama od  $-40^{\circ}\text{C}$  kapljice same zalede, pa nije neophodno postojanje jezgara [24].

Kada se ledeni kristal formira, njegov dalji rast zavisi od dva mehanizma. Poznato je da je pritisak vodene pare veći iznad vodene kapljice nego iznad ledenog kristala, na određenoj temperaturi. Kako je pritisak veći iznad vodene kapljice, ovi molekuli difunduju prema ledenim kristalima i kondenzuju se. Zaključno, u prvom mehanizmu, ledeni kristal raste na račun izuzetno hladne kapljice zbog razlike u pritisku između vodene kapljice i ledenog kristala. Drugi mehanizam se javlja kako se kristal kreće kroz atmosferu. Kada kristal dobije određenu težinu, on počinje da pada i dobija još veću masu kako se sudara sa drugim kristalima i kapljicama. Ovakvi kristali nastaju u procesu poznatijem kao riming. Samim tim, kada je kristal rimingovan, on mnogo brže pada na zemlju. Ponekad, kristalne grane postaju potpuno zaobljene i formiraju kristale pod nazivom graupel kristali. Graupel kristale je dosta teško prepoznati, ali se mogu čuti kada padnu na odeću. Forma koju kristal dobija na kraju procesa zavisi od uslova kroz koje prolazi pre nego što padne na zemlju, gde temperatura predstavlja najbitniju komponentu. Snežni kristali koji padaju kroz hladnu atmosferu su manjih dimenzija od onih koji prolaze kroz topliju atmosferu [24].

Postoji veliki broj klasifikacija snežnih kristala. Stelarni kristali su dvodimenzionalni kristali, mogu izgledati kao šestokrilne zvezde i najčešće nastaju na temperaturama između -10 i -20°C. Kada padnu na površinu, sjaje i lako formiraju sloj koji, kada je zakopan može da izazove pojavu snežnih lavina. Pored stelarnih kristala, postoje i graupel kristali (prethodno pomenuti), koji nastaju u procesu riminga i, u slučaju da nisu vezani dovoljno jako za druge kristale, mogu predstavljati veliku opasnost za snežne lavine. Smatra se da su zaobljeni graupel kristali stabilniji od stelarnih dendritskih vrsta. Još jedna vrsta snežnih kristala koja najčešće pravi nestabilan sloj je trodimenzionalno inje, koje nastaje u prethodno opisanom procesu [24]. Zaključno, dve najčešće forme snežnog metaformizma jesu obli oblici snežnih kristala i fasetirani oblici snežnih kristala. Obli oblici najčešće nastaju pri manjim temperaturnim gradijentima. Vremenske prilike za njihov nastanak su najčešće oblačno i toplije vreme. Veze koje grade između sebe su dosta jake, ali ne i nužno stabilne i lako mogu predstavljati preduslov za nastanak pločastih lavina. Sa druge strane, fasetirani oblici nastaju pri velikim temperaturnim gradijentima i pri hladnom i vedrom vremenu. Uglavnom se nalaze na površini snežnog pokrivača, blizu stena i drveća. Veze koje formiraju između sebe su dosta slabe i predstavljaju odličan preduslov za izgradnju nestabilnog sloja koji može da izazove pločaste snežne lavine [23].

Za snežne kristale koji nastaju u atmosferi, temperatura, a zatim prezasićenje predstavljaju najvažnije faktore, dok je za snežni pokrivač i ponašanje kristala najbitniji faktor temperaturni gradijent. Temperatura snežnog pokrivača zavisi od temperature vazduha i površine ispod pokrivača. Bazalni sloj snežnog pokrivača je najčešće 0°C zbog toplote zemlje zagrejane tokom letnjih meseci i geotermalne energije. Poslednji sloj snežnog pokrivača, odnosno površinski sloj, je najhladniji. Rast i ponašanje snežnog pokrivača najviše zavisi od tri varijable: temperaturnog gradijenta (promena temperature prema promeni rastrojanja – vektorska veličina), temperature i veličine pora, odnosno slobodnog prostora u snežnom pokrivaču. Kada je prisutan visok rast, odnosno veliki temperaturni gradijenti, visoke temperature i puno prostora između kristala, lako se formiraju fasetirani kristali koji brzo mogu prerasti u inje. S druge strane, nizak rast (manji temperaturni gradijent, manja temperatura, bliži kristali) je preduslov za formiranje zaobljenih formi snežnih kristala. Od svih varijabli koje kontorilišu rast snežnog pokrivača, temperaturni gradijent predstavlja najbitniji faktor. Kritična temperatura za formiranje fasetiranih kristala je 10°C/m, dok se ispod ove vrednosti pojavljuju zaobljene forme snežnih kristala [24].

Formiranje veze između kristala je krucijalni uslov za stvaranje stabilnih uslova snežnog pokrivača. Veze nastaju zbog difuzije vodene pare kroz prostor i pore između zrna, odnosno kristala. Kako su termodinamički procesi brži na većim temperaturama, formiranje veza između kristala raste sa povećanjem temperature snega. Kada su temperature snežnog pokrivača ispod -5°C, procesi formiranja veza opadaju i mogu se pojaviti nestabilnosti u snegu. Smatra se da su zaobljeni kristali stabilniji i generalno imaju veću jačinu, zato što mogu mnogo bolje da formiraju veze između kristala [24].

Za nastanak snežnih lavina, neophodno je da postoji nestabilan sloj u snežnom pokrivaču. Postoje perzistentne i neperzistentne forme snežnih kristala koji se nalaze u snežnom pokrivaču. Predstavnici perzistentnih formi su površinsko inje, fasetirani kristali, duboko inje i drugi. Predstavnik neperzistentnih formi snežnih kristala su stelarni kristali. Snežni pokrivač koji se sastoji od perzistentnih snežnih kristala može da izazove pojavu velikih snežnih lavina. Proces zamrzavanja i odmrzavanja snežnog pokrivača tokom noći može da izazove pojavu sloja krasti koji, ukoliko je zatrpan, može predstavljati nestabilan sloj za formiranje lavina [24].

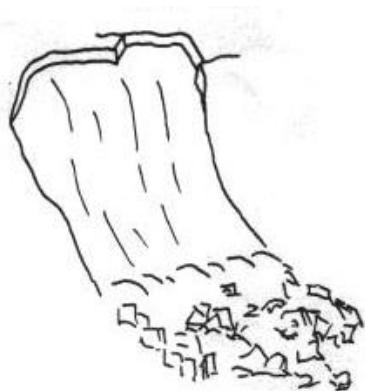
Snežni pokrivač sa velikom količinom vode u sebi je odgovoran za nastanak tzv. slaš (*slush*), odnosno, bljuzgavih snežnih lavina. U ovom tipu snežnih lavina, kristali su u potpunosti odvojeni zbog količine vode. Generalno, čvrstoća mokrog snega se smanjuje sa količinom vodenog sadržaja. ICSI (*International Commission on Snow and Ice*) klasifikacija za vlažan sneg prikazana je u Tabeli 4 [24].

*Tabela 4. ICSI klasifikacija za vlažan sneg [24]*

<b>Uslovi snega</b>	<b>Temperatura snega</b>	<b>Sadržaj vode</b>
Suvi	Ispod 0°C	0%
Vlažan	0°C	<3%
Mokar	0°C	3-8%
Veoma mokar	0°C	8-15%
Bljuzga	0°C	>15%

### 3.2. Podela i formiranje snežnih lavina

Iako postoji nekoliko podela snežnih lavina, najprihvaćenija je ona na lavine rastresitog snega (*loose avalanches*) i pločaste lavine (*slab avalanches*) (Slike 3 i 4). Rastresite lavine počinju iz jedne tačke i najčešće zahvataju samo gornju površinu snega. Ova vrsta lavina je manje opasna od pločastih lavina. Glavna odlika pločastih lavina je postojanje nestabilnog sloja u snežnom pokrivaču koji može da pokrene lavinu. Pločaste snežne lavine imaju jasnu liniju loma i lako formiraju blokove snega koji se kreću nizbrdo [24].



Slika 3. Pločasta snežna lava [27]



Slika 4. Lavina rastresitog snega [27]

Razumevanju formiranja snežnih lavina može se pristupiti na dva načina. Prvi predstavlja analizu interakcije između terena, snežnog pokrivača i meteoroloških uslova. Drugi predstavlja razmatranje fizičkih i mehaničkih procesa formiranja snežnih lavina, koji se mogu modelovati i ispitivati [28].

Postoji tri osnovne vrste deformacija na osnovu kojih će snežna lava kasnije nastati. Prvi oblik deformacije jeste tenzija, odnosno odvajanje čestica jedne od druge. Drugi oblik deformacije iziskuje kompresiju, sabijanje, odnosno spajanje čestica, dok treći predstavlja smicanje, odnosno prolazak čestica jedna pored druge pod uticajem sile [24].

Gustina snega varira od 30 do  $600\text{kg/m}^3$  i najviše zavisi od poroznosti. Sneg predstavlja jedan od najporoznijih materijala. Gustina leda je  $917\text{kg/m}^3$ , dok je najčešća gustina novopalog snega oko  $30\text{kg/m}^3$ . Mokar sneg ima mnogo veću gustinu, čak  $600\text{kg/m}^3$ , dok je gornja granica za suv sneg oko  $550\text{kg/m}^3$ . Za vreme zgrušnjavanja, tvrdoća snega se povećava. Tvrdoća predstavlja meru

snage snega za vreme kompresije, odnosno sabijanja. Izražava se u N/m<sup>2</sup>, odnosno Paskalima (Pa). Postoji nekoliko različitih testova merenja tvrdoće snega, pri čemu je najjednostavniji "hand test" (sneg se sabija rukom i prati se kolika je sila dovoljna da ga razbije) [24].

Jedna od najosnovnijih inženjerskih metoda za izračunavanje stabilnosti snežnog pokrivača jeste poznavanje indeksa stabilnosti. Indeks stabilnosti se izražava kao odnos čvrstoće na smicanje (*shear strength*) i smičućeg napona (*shear stress*) u nestabilnom sloju. Teorijski, nestabilni uslovi se javljaju kada indeks stabilnosti prilazi broju 1. Za određivanje kako čvrstoće, tako i napona potrebni su ozbiljni laboratorijski uslovi kao i rad na terenu [28].

Čvrstoća snežnog pokrivača, kao i sama čvrstoća na smicanje (čvrstoća u nestabilnom sloju) predstavlja jedan od najvažnijih faktora jer diktira da li će kasnije doći do pojave snežne lavine ili ne. Dve osnovne komponente čvrstoće jesu kohezija i trenje. Kako kohezija predstavlja svojstvo materijala uzrokovano međumolekulskim silama, ona određuje koji tip lavine će se javiti nakon trigera, odnosno loma materijala. Lavine rastresitog snega nastaju kao posledica manjka kohezije, dok je sneg u pločastim lavinama dovoljno kohezivan da formira blokove snega koji se kreću nizbrdo. Kohezija je direktno povezana sa jačinom veze između čestica unutar snežnog pokrivača. Osnovni uslovi nastanka niske kohezije u suvom snegu jesu hladne temperature, jaki vetrovi i mala gustina snega. Kada je sneg mokar, kohezija značajno opada zbog količine vode unutar snežnog pokrivača. Sa druge strane, kako trenje predstavlja otpor kretanju čestica u jednom sloju koji je povezan sa drugim, ova komponenta čvrstoće je više karakteristična za pločaste lavine (jer nema trenja u gornjem sloju gde nastaju rastresite lavine). Generalno, čvrstoća snega na određenoj dubini u snežnom pokrivaču je suma kohezije i trenja. Trenje najviše zavisi od teksture, odnosno tipa, veličine i oblika snežnih kristala/čestica, zatim od količine vode u snegu i težine snežnih slojeva iznad nestabilnog sloja. Komponenta trenja je jednak nuli na samoj površini snežnog pokrivača, ali se povećava sa dubinom. Zaključno, kohezija raste kada su veze između čestica jake, dok trenje najviše raste zbog težine slojeva snežnog pokrivača. Ono što je bitno istaći je da lavine rastresitog snega najčešće nastaju kada je kohezija u površinskom sloju izuzetno mala, dok pločaste lavine nastaju kada je čvrstoća (kohezija plus trenje) mala u sloju ispod površinskog sloja [24].

### 3.2.1. Lavine rastresitog snega

Lavine rastresitog snega imaju jako malu koheziju. Formiraju se uglavnom na površini snežnog pokrivača i mogu da budu i suve i mokre, u zavisnosti od količine vode unutar pokrivača. Poznato je da su mokre lavine rastresitog snega mnogo masivnije. Mehanizam nastanka je trenutak kada ugao nagiba prevaziđe kritičan ugao, dovoljan da dođe do pokretanja mase snega. Mokre lavine rastresitog snega najčešće nastaju kao posledica otapanja snega zbog velike količine Sunca ili kiše. Na taj način kohezija opada sa povećanjem vode u snežnom pokrivaču. Suve lavine rastresitog snega nastaju u hladnim uslovima, bez vetra. Hladni uslovi usporavaju formiranje veza između čestica i na taj način se takođe smanjuje kohezija. Lavine rastresitog snega se uglavnom sastoje od dendrita i stelarnih kristala, ali i od graupel kristala [24].

### 3.2.2. Pločaste lavine

Pločaste lavine predstavljaju deo snežnog pokrivača koji se sastoji od kohezivnog sloja i izuzetno nestabilnog sloja ispod njega. Pločaste lavine imaju nekoliko delova. Glavni delovi pločastih lavina će biti predstavljeni u tekstu koji sledi. Prvi deo pločaste lavine predstavlja kruna ili gornji zid ploče. Drugi deo jeste površina po kojoj se pločasta lava kreće (*bed surface*). Zatim, postoje levi i desni bočni delovi, odnosno flenks (*flanks*) i strauhvol (*stauchwall*), odnosno najniži deo odlomljene pločaste površine. Najosnovnije karakteristike pločastih lavina jesu da one nastaju na nagibu od 25-55° jer sve preko 55° predstavlja odličnu podlogu za nastanak lava rastresitog snega. Prosečna gustina pločastih lavina iznosi oko  $200\text{kg/m}^3$  ali je uvek u rangu od 50 do  $450\text{kg/m}^3$ . Temperatura površine po kojoj se pločasta lava kreće je najčešće -10°C. Veličina pločaste lavine je vrlo diskutabilna, ali prema različitim istraživanjima, odnos širine i dužine je uglavnom između 2 i 6. Uticaj temperature snega predstavlja takođe bitnu kategoriju u predviđanju pojave snežnih lavina, pa će tako visoke temperature u nestabilnom sloju ubrzati stvaranje veza i time povećati tvrdoću snega, dok će niske temperature usporiti stvaranje veza i time povećati nestabilnosti [24].

Suve pločaste lavine su odgovorne za najveće katastrofe od svih tipova snežnih lavina. One se sastoje od nestabilnog sloja koji se nalazi između dva tanja kohezivna sloja. Lom materijala (*failure*) se javlja kada se komponenta težine ploče približi vrednosti čvrstoće na smicanje u nestabilnom sloju. U tom trenutku, taj deo snega je apsorbovao maksimalnu količinu/težinu sa kojom može da se nosi. Kolaps materijala (*fracture*) predstavlja katastrofalni lom (*failure*) materijala i

ovo je neophodno da bi uopšte došlo do pojave pločaste snežne lavine. Takođe, neophodno je da smičući napon nadvlada čvrstoću na smicanje i da deformacija u nestabilnom sloju bude dovoljno velika i brza da dođe do propagacije kolapsa materijala. Samo u slučaju da su zadovoljena oba uslova, suva pločasta lavina će nastati. Osnovna podela pločastih lavina jeste na prirodne, koje nastaju prirodnim putem, i veštačke koje nastaju zbog čovekovog uticaja na snežni pokrivač [24].

Najčešći razlozi zbog kojih mokre pločaste lavine nastaju su nove padavine (kiša), promene u snazi zakapanog nestabilnog sloja zbog količine vode ili vodena lubrikacija površine po kojoj se lavina kreće [24].

### 3.2.3. *Ledene snežne lavine*

Ova vrsta snežnih lavina se najčešće javlja na veoma visokim vrhovima i može da izazove teške posledice jer je uglavnom izuzetno velike veličine. One najčešće nastaju kada se veliki komadi leda ili glečera odlome i padnu preko kosih strmina. Veoma je teško predvideti tačno vreme kada će se led odlomiti i izazvati lavinu [23]. Najčešće se javljaju u proleće ili leto. Primer ovakvih lavina jesu katastrofe na planini Huaskaran (*Huascarán*, 1962., 1970.) i pad velikog dela Alain glečera za vreme izgradnje Matmark brane 1965. godine [24].

### 3.2.4. *Slaš lavine (bljuzgave lavine)*

Ova vrsta lavina predstavlja podvrstu mokrih pločastih lavina, ali nastaje pod drugačijim uslovima. Najčešće se javljaju u Norveškoj i na Aljasci. Nastaju zbog brzog topljenja snega u proleće kada Sunce zrači direktno na snežni pokrivač koji je bio pod uticajem temperaturnog gradijenta. Nagib terena može biti između 5°C i 40°C, ali je najčešće oko 15°C, dok snežni pokrivač ima veliku količinu vode u sebi. Kako je sneg pun vodenog sadržaja, kohezija se smanjuje, a samim tim dolazi i do redukcije trenja zbog hidrostatičkog pritiska iz vode koja se nalazi u snežnom pokrivaču (zbog malog nagiba terena). Gustina ovog tipa snežnih lavina nekada može da bude i preko 1.000kg/m<sup>3</sup> [24].

### 3.2.5. *Krovne lavine*

Pločaste snežne lavine koje se spuštaju sa krova kuća i zgrada mogu da nanesu ozbiljne posledice po život i imovinu ljudi. Nagib krova potreban za pojavu ovih lavina je između 20° i 30°, ali po različitim propisima Sjedinjenih Američkih Država, krovne lavine mogu nastati i na glatkim krovovima od 15°. Ovaj tip lavina

može da nastane i kao suva pločasta lavina preko hladnog krova (temperatura ispod 0°C), ali i kao mokra pločasta lavina preko mokrog krova [24].

### 3.3. Karakteristike lavinoznog terena

Svaka lavina se sastoji od početne zone, trase po kojoj se kreće, i ranaut (*runout*) zone, odnosno zone gde se zaustavlja. Bitno je napomenuti da lavina ima najveću brzinu na trasi po kojoj se kreće, dok se brzina polako smanjuje i dostiže minimum u ranaut zoni [23].

#### 3.3.1. Karakteristike početne zone

Nagib terena predstavlja jedan od najbitnijih geomorfoloških faktora kada se opisuje lavinozan teren (Tabela 5). Najmanji ugao pod kojim mogu da nastanu suve lavine je oko 25°, dok mokre lavine mogu nastati i na nižim uglovima, a najčešći je 15° [24].

##### 3.3.1.1. Karakteristike vetra, orijentacija prema Suncu i uticaj vegetacije

Pravac, brzina i smer vetra predstavljaju izuzetno bitne faktore prilikom određivanja lavinoznog terena. Zavetrinske padine (*leeward, downwind*), odnosno padine kod kojih vетar duva niz, su mnogo nestabilnije i opasnije za nastanak snežnih lavina. Osnovni razlog jeste što vетar nagomilava sneg i time dodatno opterećuje snežni pokrivač. Sa druge strane, padine koje se nalaze u pravcu vetra (*windward, upwind*) predstavljaju mnogo sigurniji teren, jer su okrenute tako da vетar duva direktno u njih. Na taj način nestabilni delovi snežnog pokrivača lako mogu biti razduvani i prebačeni na zavetrinske padine [23].

Stabilnost snežnog pokrivača značajno zavisi od orijentacije prema Suncu. Naime zimi, padine koje se nalaze na Suncu imaju mnogo topliju temperaturu snega i bolju stabilnost od padina koje se nalaze u senci. Nasuprot tome, u kasnu zimu i proleće, sunčane padine mogu lako postati nestabilne zbog velikih temperturnih promena [24].

*Tabela 5. Karakterističan nagib za pojavu snežnih lavina [24]*

$60^\circ - 90^\circ$	Snežne lavine se vrlo retko javljaju
$30^\circ - 60^\circ$	Pojava suvih lavina rastresitog snega
$45^\circ - 55^\circ$	Česta pojava manjih pločastih lavina
$35^\circ - 45^\circ$	Pojava pločastih lavina svih veličina
$25^\circ - 35^\circ$	Pojava pločastih lavina, kao i mokrih lavina rastresitog snega
$10^\circ - 25^\circ$	Mokre snežne lavine i slaš lavine

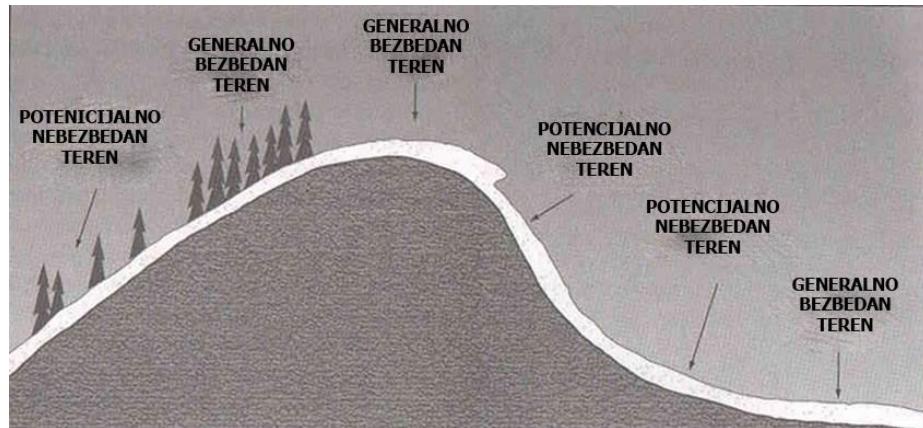
Vegetacija predstavlja jednu od prirodnih preventivnih mera kada se radi o hazardu kao što su snežne lavine. Šuma na veoma strmom terenu može da smanji mogućnost nastanka lavine jer utiče na karakteristike snežnog pokrivača. Vegetacija ublažava brzinu vetra i utiče na promenu i transfer radijacije od Sunca (Slika 5). Takođe, grane zadržavaju veliki procenat snega (50-90%) i na taj način sprečavaju veliku količinu snega da optereti snežni pokrivač. Veoma je bitno napomenuti da dodatno glatka površina, kao što su stene, predstavljaju uslov za pojavu snežnih lavina jer ne sadrže različite površinske odlike koje mogu da zadrže sneg [24].

### 3.3.2. Karakteristike trase

Trase po kojima se lavine kreću imaju više konfiguracija, dok su dve osnovne kategorije otvorene padine i kanali. Duže i veće padine imaju uglavnom kombinovan teren i samim tim mogu da predstavljaju veliku opasnost za nastanak snežnih lavina [24]. Smatra se da je sila koja je pokrenula lavinu jednakata sili otpora u ovom delu trase.

### 3.3.3. Karakteristike ranaut zone

Snežna lava se zaustavlja kada nagib terena postane jednak kritičnom uglu koji je pokrenuo lavinu. U ovom delu, otpor preovlađuje pokretačku силу i iz tog razloga se lava zaustavlja. lava se najčešće zaustavlja u dolinama, ili na bilo kojem terenu koji ima nagib od  $15^\circ$  ili manje [24].



Slika 5. Karakteristike bezbednosti terena [22]

### 3.3.4. Veličina snežne lavine i druge fizičke veličine

Veličina snežne lavine zavisi od količine snega na početnoj zoni, kao i od svih objekata koje ista pokupi na putu do ranaut zone. Poznato je da mokre lavine imaju mnogo veću frikciju, odnosno trenje sa površinom, nego suve lavine. Brzina snežne lavine zavisi od veličine. Iz tog razloga, maksimalna brzina koju dostiže lavina zavisi od početne mase i mase koju pokupi na trasi po kojoj se kreće, spoljašnjeg trenja na vrhu i dnu lavine, skale koja obuhvata dužinu i vertikalni pad i same strmine, odnosno nagiba padine. Smatra se da mokre snežne lavine imaju manju brzinu od suvih snežnih lavina. Takođe, lavina dobija mnogo veću brzinu kada prolazi kroz jaruge i kanale [24]. U knjizi "The Avalanche Handbook" od Davida MekKlunga (David McClung) i Pitera Šaerera (Peter Schaefer) [24], predstavljena je formula za brzinu sloja snežne lavine, i ona glasi:

$$V_m = 1.8\sqrt{H}, \quad (1)$$

gde  $V_m$  predstavlja brzinu, a  $H$  totalni vertikalni pad izražen u metrima.

Snežne lavine koje se sastoje od suvog snega koji se glatko kreće, a imaju veliku gustinu i brzinu, su najopasnije i imaju kobne posledice. Impaktni pritisak je izuzetno važna fizička veličina po objekte koji se nalaze na putu preko kojeg snežna lavina prelazi. On najviše zavisi od brzine i gustine materijala u snežnoj lavini. Na krajnju gustinu utiču gustina snežnih kuglica i zrna u lavini, gustina vazduha između kuglica, kao i procenat zapremine koji se sastoji od snega i ledenih zrna [24]. Formula za izračunavanje impaktnog pritiska snega na ravnu površinu objekta, prema dimenzionalnim analizama glasi:

$$I = \rho V^2, \quad (2)$$

gde  $\rho$  predstavlja impaktni pritisak,  $\rho$  predstavlja gustinu ( $\text{kg/m}^3$ ), a  $V$  brzinu lavine ( $\text{m/s}$ ). Jedinica za izražavanje impaktnog pritiska je Paskal (Pa).

Pregled aproksimativnog impaktnog pritiska i potencijalne štete je dat u sledećoj tabeli (Tabela 6.) [24].

*Tabela 6. Prosečan impaktni pritisak i potencijalna šteta [24]*

Impaktni pritisak (kPa)	Potencijalna šteta
1	Razbijanje prozora
5	Prolazak snega preko vrata
30	Uništavanje drvenih struktura
100	Čupanje zrelih drveća iz korena
1000	Pomeranje armirano betonskih objekata

U okviru inženjerskih procena, smatra se da maksimalni pritisak u oštrim impaktnim pikovima može da dostigne od dva do pet puta veći pritisak od prosečnog [24].

### 3.3.5. Određivanje učestalosti pojave snežne lavine na osnovu vegetacije

Postoji više faktora koje treba uzeti u obzir prilikom planiranja izgradnje objekata na planinskim terenima. Pored određivanja raut distance i pregleda istorijskih podataka o lavinama na određenom terenu, uništena vegetacija može biti važan faktor pri predviđanju pojave snežnih lavina, kao i njene veličine. Na lavinoznom terenu, lavine ne dozvoljavaju rast visokog drveća, pa su mala drveća različite starosti precizan indikator opasnog terena. Lavine su uglavnom odgovorne za lom glavne stabljike drveta. Na četinarima, lateralne grane počnu da rastu vertikalno i postaju novi lider, odnosno glavna stabljika. Na taj način godovi na novoj glavnoj stabljici mogu da pruže informaciju koliko je minimalno godina prošlo od uništavanja, odnosno od lavine. Pored ovih metoda, postoje različite metode procene rasta drveća koja su polomljena ali nisu u potpunosti uništena. Ove metode su zasnovane na stvaranju novih stabala, ali i prepoznavanju ožiljaka na stablu i računanja vremena prolaska lavine na osnovu stvaranja novih stabala. Tabela 7 daje prikaz rasta vegetacije kao indikatora za određivanje učestalosti snežnih lavina. Takođe, bitno je napomenuti da snežna lava ne mora uvek da svojim prolaskom uništi vegetaciju [24].

*Tabela 7. Primeri vegetacije kao indikatora za prepoznavanje učestalosti snežnih lavina [24]*

<b>Učestalost velikih snežnih lavina u intervalima:</b>	<b>Vegetacioni rast</b>
1-2 godine	Rast vrbe i jove; žbunje; nema drveća viših od 1 do 2 metra
3-10 godina	Nema većeg drveća kao ni mrtve kore; postojanje drveća viših od 1 do 2 metra
10-30 godina	Gust rast niskog drveća; rast mladog drveća četinara (klimaks vrsta drveća)
25-100 godina	Zrela drveća pionirske vrste (nečetinarskih vrsta), mlada drveća klimaks vrsta drveća
Više od 100 godina	Zrela drveća klimaks vrsta drveća



## 4. ZEMLJOTRESI KAO PRIRODNI HAZARD

Jedna od opštih definicija zemljotresa glasi: "Zemljotres predstavlja oscilovanje tla i svega što se nalazi na tom tlu" [29]. Zemljina kora se sastoji od nekoliko tektonskih ploča koje se kreću. U zavisnosti od njihovog kretanja i faza, određena količina energije se oslobađa i ova pojava je poznata kao zemljotres [20].

Poznato je da su se zemljotresi dešavali tokom čitave istorije razvijene Zemljine kore. Arheološki dokazi na građevinama i infrastrukturnim objektima mogu na najbolji način da pomognu u preciziranju vremenskih granica prošlih seizmičkih događaja. U mnogim predelima Sjedinjenih Američkih Država mapirane su promene u stilovima, tipovima artefakata, kultivaciji, pa i samoj izgradnji objekata, u poslednjih 12.000 godina. Grčka, hebrejska, asirska, rimska, vizantijska i islamska kultura dokumentovala je različite vrste izveštaja o pojavljivanju velikih zemljotresa širom Bliskog istoka u proteklih nekoliko hiljada godina. Posmatranje raseda, karakteristike deformacije blata, klizišta, anomalozni slojevi sedimenata u jezerima i uništavanje drevnih ljudskih građevina, pružaju nam detaljan uvid u dugotrajnu istoriju učestalosti ovih događaja u prošlosti. Na taj način, lakše možemo da predvidimo pojavu zemljotresa u budućnosti, iako ovaj tip predviđanja još uvek nije dovoljno razvijen. Sa druge strane, ovi zapisi nam mogu pružiti informaciju o prosečnom vremenu između pojave ova dva ekstremna događaja, iako krajnji rezultat može biti potpuno suprotan od inicijalne prepostavke. Primer za ovu pojavu je rased u Mrtvom moru za koji se smatralo da je neaktivno, dok se pre par godina nije utvrdilo da je aktivno i da može da izazove zemljotrese magnitudo 7 prema Rihterovoj skali [20].

Prema podacima EM-DAT (EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir), belgijskog centra za istraživanja epidemiologije katastrofa, od 1900. do 01.08.2018. godine dogodila su se 1.359 zemljotresa širom sveta [15]. Ukupan broj žrtava je 2.577.967, ukupan broj pogodenih je 194.327.222, dok se šteta procenjuje na 819.555.417 američkih dolara [15]. Ovakvi podaci čine zemljotrese prirodnim hazardom sa najvećim i najgorim posledicama po čoveka i okolinu.

U Evropi u periodu od 1990. do 2018. godine dogodilo se 78 zemljotresa, sa brojem žrtava od 3.252 i ukupnom štetom od 39.266.736 američkih dolara, prema podacima EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir). Neki od najdestruktivnijih zemljotresa na prostorima bivše Jugoslavije su zemljotres u Skoplju iz 1963. godine, sa 1.070 žrtava, zemljotres u Banja Luci iz 1969., zemljotres na

Crnogorskom primorju iz 1979. sa 135 žrtava (101 žrtva u Crnoj Gori i 34 u Albaniji), kao i zemljotres na Kopaoniku 1980. godine. Poslednji veći zemljotres koji se dogodio u Srbiji, u Kraljevu, odneo je dve žrtve, dok je broj pogodjenih 27.030, a direktna šteta se procenjuje na više stotina hiljada dolara.

#### 4.1. Vrste i mehanika nastanka zemljotresa

Osnovna podela zemljotresa je na prirodne i veštačke. U prirodne zemljotrese spadaju:

Tektonski – Ova vrsta zemljotresa nastaje usled pomeranja tektonskih ploča i blokova. Oni predstavljaju najdominantniju vrstu zemljotresa i veoma su izraženi na prostoru Srbije.

Urvinski – Ova vrsta zemljotresa nastaje usled urušavanja podzemnih pećina i prostorija. Oni predstavljaju oko 3% svih zemljotresa u toku godine.

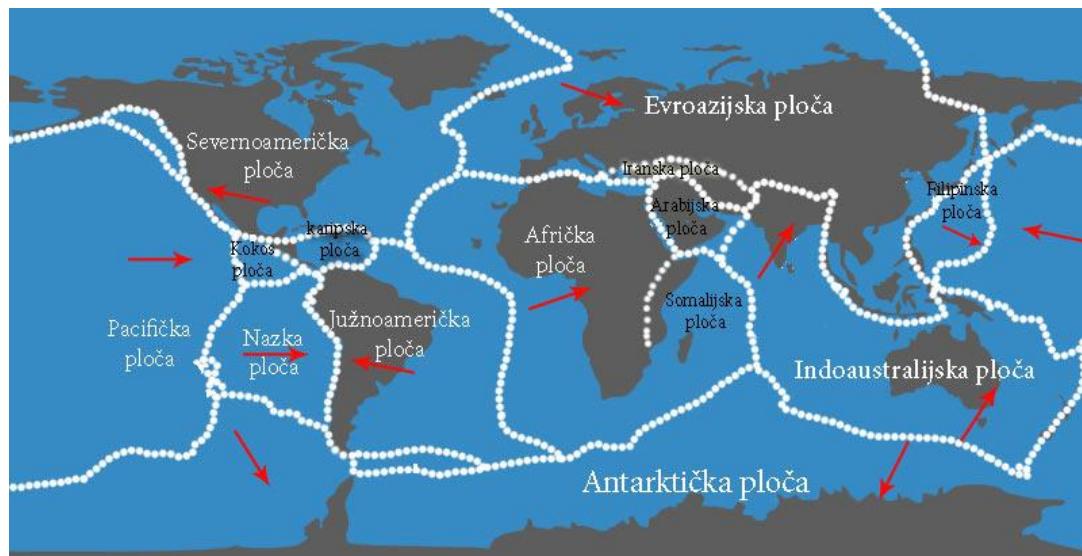
Vulkanski – Ova vrsta zemljotresa nastaje usled rada vulkana. Oni predstavljaju oko 7% svih zemljotresa u toku godine.

Veštački zemljotresi nastaju kao posledica čovekovog dejstva na prirodu. Ovakva vrsta zemljotresa može nastati kao posledica brzog punjenja akumulacionih jezera (tzv. indukovani zemljotresi), ekstrakcijom prirodnog gasa, posle jakih eksplozija, kao i upumpavanjem otpadnih voda u duboke bunare koji su izgrađeni radi skladištenja [29].

U ovoj disertaciji, bavimo se tektonskim zemljotresima kao primarnim hazardom koji može da indukuje snežne lavine.

Zemlja se sastoji od nekoliko slojeva. Osnovne delove predstavljaju unutrašnje jezgro, spoljašnje jezgro, donji omotač, gornji omotač i kora. Kora je debiljine od 5 do 70km i predstavlja najheterogeniji deo Zemlje. Granica između kore i omotača naziva se "Mohorovičić"-ev diskontinuitet koji u stranoj literaturi nosi naziv "Moho". "Gutenberg"-ov diskontinuitet predstavlja granicu između omotača i jezgra. Granica između spoljnog jezgra (koji se nalazi u tečnom stanju) i unutrašnjeg jezgra (koji se nalazi u čvrstom stanju) se naziva "Lehman"-in diskontinuitet. Spoljašnje jezgro se smatra najhomogenijim delom Zemlje, i sastoji se od legure gvožđa i nikla u tečnoj formi. Kao što je već napomenuto, Zemljina kora se sastoji od većeg broja tektonskih ploča koje se kreću određenim brzinama i u određenim pravcima (Slika 6). Kretanje ploča nastaje kao posledica termodinamičkih procesa u Zemljinom omotaču, koji se nalazi ispod Zemljine kore i zahvata zonu do dubine oko 2.900km. Ova konvekciona strujanja u omotaču Zemljinog jezgra omogućavaju tektonske procese, dok konvekciona

strujanja u spoljašnjem Zemljinom jezgru omogućavaju postojanje magnetnog polja Zemlje. Postoji nekoliko velikih i značajnih tektonskih ploča koje imaju veliki uticaj na pojavu zemljotresa, a to su: Evroazijska ploča, Australijska ploča, Pacifička ploča, Antartička ploča, Kokosova ploča, Naska ploča, Karibska ploča, Severnoamerička ploča, Južnoamerička ploča, Evropska ploča i Afrička ploča [29] [16].



Slika 6. Velike tektonske ploče [30]

Upravo na mestima razdvajanja ovih velikih tektonskih ploča, nalaze se epicentri velikih zemljotresa zabeleženih tokom istorije. Epicentar predstavlja tačku na Zemljinoj površini direktno iznad hipocentra, dok hipocentar predstavlja mesto početnog loma u aktivnom rasedu. Rasedi su slabe oblasti koje razdvajaju dva susedna tektonska bloka [29] [20].

Kako tektonske ploče predstavljaju velike mase stena koje se kreću od 1 do 12cm godišnje, u slučajevima kada se one sastave dolazi do transformacije njihove kinetičke energije u mehaničku energiju, koja se u obliku pritisaka koncentriše u stenama zone sastajanja ploča. Ovo akumuliranje pritisaka raste do tačke kada naponi dostignu granicu mehaničke čvrstoće stene. Tada dolazi do loma stene i transformacije mehaničkog rada u energiju seizmičkih talasa koji se šire u svim pravcima kroz Zemljinu koru [29].

Tektonske ploče se kreću na različite načine. U nekim zonama dolazi do podvlačenja jedne ploče ispod druge, što je primer za podvlačenje delova

okeanske kore pod kontinentalni deo Zemljine kore. Ovakvi slučajevi se nazivaju subdukcija. Najizraženiji regioni subdukcije su oko Novog Zelanda, Japanskih ostrva, Egejskog mora, Tirenskog mora, regionu Vrančea u Rumuniji i drugi. Drugi tip kretanja tektonskih ploča je razmicanje. Ovaj tip kretanja indukuje zemljotrese manje snage i karakterističan je za okeane gde duž pukotine dolazi do izbijanja magme. Zemljotresi velike snage nastaju i prilikom međusobnog primicanja dve ploče odnosno kolizije. U zoni kontakta nastaju bočni pritisci koji se akumuliraju do granice mehaničke čvrstoće stene i tada dolazi do pucanja i nastanka zemljotresa. Poznato je da na nekim mestima sučeljavanja ploča, odnosno kolizije, dolazi do nabiranja stenske mase i formiranja venačnih planina kao što su Dinaridi, Apenini, Karpati i drugi orogeni pojasevi [29][17].

Kao što je već napomenuto, energija oslobođena tokom nastanka zemljotresa putuje duž Zemljine kore u obliku zapreminskeih seizmičkih talasa. Postoje dve vrste zapreminskeih talasa, a to su primarni ili P-talasi i sekundarni, odnosno S-talasi. P-talasi prolaze i kroz tečna i kroz čvrsta tela, i smatraju se najbržim talasima, dok S-talasi predstavljaju smičuće talase koji prolaze samo kroz čvrste medijume. Interakcijom zapreminskeih talasa i njihovim "zarobljavanjem" u površinskim geološkim slojevima, energija zemljotresa se dalje prenosi takođe i u vidu površinskih talasa. Postoje dve vrste površinskih talasa, a to su *Rayleigh-evi* i *Love-ovi* talasi. Površinski talasi su sporiji od zapreminskeih talasa, dok njihova amplituda brzo opada sa dubinom. Izazivaju najjače i najopasnije kretanje tla na lokacijama koje se nalaze na naslagama geoloških sedimenata, kao na primer metropola koje su tradicionalno locirane pored reka, a na rastojanjima od žarišta zemljotresa većim od par dimenzija raseda.

#### **4.2. Energetski parametri, površinski efekti i prognoziranje zemljotresa**

Postoji nekoliko načina da se opiše zemljotres. Tri osnovna tipa instrumenata za registrovanje zemljotresa su seismografi, akcelerografi i seismoskopi. Osnovna razlika proizilazi iz vrste podataka koji se registruju. Seismografi registruju mehanički efekat seizmičkih talasa zemljotresa u tlu, akcelografii registruju ubrzanje oscilovanja tla, koje su izazvali seizmički talasi, dok seismoskopi beleže dinamički odgovor hipotetičkih građevinskih objekata, u uslovima dejstva jakih bliskih zemljotresa.

Jedna od najvažnijih fizičkih veličina koja opisuje zemljotres je magnituda. Magnituda predstavlja relativnu meru količine oslobođene energije u hipocentru. Ona je neimenovanii broj (1-9) i ne zavisi od dubine hipocentra (zarišta), niti od

rastojanja od hipocentra, niti od karakteristika lokalnog tla i duboke geologije. Izražena je kao funkcija maksimalne registrovane amplitudne seizmičkog talasa na seismogramu i epicentralnog rastojanja. Postoji nekoliko vrsta određivanja jačine, odnosno magnitudo zemljotresa. Najčešće korišćena je lokalna (Rihterova) magnituda ( $M_L$ ) koja se proračunava na osnovu merenja maksimalne amplitudne zabeleženih seizmičkih talasa. Zatim, postoji magnituda površinskih talasa (*surface-wave magnitude*) ( $M_S$ ) koja se proračunava na osnovu merenja maksimalne amplitudne površinskih seizmičkih talasa, kao i magnituda zapreminskih talasa (*body-wave magnitude*) ( $m_b$ ) koja se računa na osnovu merenja maksimalne amplitudne zapreminskih seizmičkih talasa. Takođe, računa se i Moment magnituda ( $M_W$ ) pomoću tzv. seizmičkog momenta, koji predstavlja proizvod čvrstoće stene, konačnog pomeranja raseda i površine raseda. Najveća magnituda zemljotresa zabeležena je na Aljasci 1964. godine i ona je iznosila 9,5-9,8 [29].

Energija zemljotresa predstavlja zapravo količinu oslobođene energije u žarištu zemljotresa, u apsolutnom iznosu umesto u relativnom, kao u slučaju magnitудe. Može se izraziti preko nekoliko relacija.

Stepen površinskih efekata zemljotresa na građevinskim objektima, tlu, ljudima predstavlja intenzitet (I) zemljotresa. Postoji nekoliko vrsta seizmičkih skala koje se koriste za numeričko kvantifikovanje površinskih efekata. Ove skale su opisne i tekstualno izražavaju efekte zemljotresa na Zemljinoj površini. Skala koja se najviše koristi u Evropi je Merkalijeva (*MCS – Mercalli-Cancani-Sieberg*) skala (I - XII stepeni). Druge, ekvivalentne ali detaljnije skale su MSK-64 (*Medvedev - Sponhauer - Karnik* skala) iz 1964. godine i EMS-98 (Evropska Makroseizmička Skala) iz 1998. godine. Intenzitet zemljotresa na Zemljinoj površini najviše zavisi od lokalnog tla, dubine hipocentra zemljotresa kao i od rastojanja tačke posmatranja do epicentra. Seizmički talasi se brže prostiru kroz čvrste stene, odnosno sporije se prostiru kroz mekše stene i sediment. Kada talas prelazi iz čvršćeg u mekše tlo, on mora da uspori. Tada dolazi do amplifikacije seizmičkih talasa, odnosno istovremenog povećanja amplitudne kretanja talasa prema zakonu održanja energije. Talasi na dužim periodama su dominantni kod daljih i jačih zemljotresa, kao i na mekšem tlu. Preciznije rečeno, što je zemljotres jači biće više talasa sa dužim periodima oscilovanja. Sa druge strane, jačina seizmičkih talasa sa nižim periodima oscilovanja brže opada sa povećanjem rastojanja od epicentra, što nije slučaj kod talasa sa dužim periodima. Zaključno, na stenskim lokacijama imamo oscilovanje na kratkim periodama i jače kretanje tla za vreme umereno jakih i bliskih zemljotresa, dok na lokacijama sa dubokim geološkim sedimentima, koji osciluju na dužim periodama, često imamo jače

kretanje tla za vreme jačih, a udaljenih zemljotresa. Kako intezitet zemljotresa takođe zavisi i od rezonancije lokalnog tla i rezonancije konstrukcije, na efekat zemljotresa će uticati i sopstveni period oscilovanja konstrukcije (za klasične armiranobetonske zgrade se može opisati kao  $0,1$  puta broj spratova) [29], [20].

U Tabeli 8 je prikazan skraćen oblik MCS skale sa korespondentnim maksimalnim horizontalnim ubrzanjanjem tla. Zone ili površi (a ne linije), koje su u nekom zemljotresu okarakterisane istim stepenom intenziteta nazivaju se izoseiste. Intezitet zemljotresa zavisi od magnitude, odnosno što je veća magnituda, veća je količina oslobođene energije u hipocentru, a samim tim je značajnija šteta na objektima (za slabe do umereno jake i ne previse duboke zemljotrese intenzitet u epicentru se može približno proceniti kao  $I_0=M+2$ ). Energija zemljotresa opada sa rastojanjem, dok se opadanje jačine kretanja tla sa rastojanjem opisuje tzv. atenuacionim jednačinama [31], [29].

Napomenuto je da se uz pomoć akcelograma registruje maksimalno ubrzanje tla. U inženjerskoj praksi, umesto makroseizmičkog intenziteta se za opis jačine kretanja tla, često koristi maksimalna vrednost ubrzanja tla za celokupno vreme trajanja zemljotresa. Inercijalne sile koje deluju na konstrukciju su proporcionalne ubrzanju tla. Za vreme zemljotresa, zapravo se tlo ispod konstrukcije pomera, dok inercijalne sile samo pokušavaju da delove konstrukcije zadrže na istom mestu. U Tabeli 9 je prikazan odnos magnitude, Merkalijevog inteziteta i maksimalnog ubrzanja tla.

Postoji nekoliko metoda prognoziranja zemljotresa, ali je bitno napomenuti da nijedna od do sada otkrivenih metoda nije dovoljno pouzdana. Poznato je da je većina jakih zemljotresa praćena prethodnim manifestovanjem specifičnih prirodnih fenomena koji se nazivaju prekursori. Prekursori najviše zavise od jačine zemljotresa, ali često izostaju, dok su ponekad vrlo naglašeni. Oni nastaju najčešće kao posledica procesa akumuliranja naponskog polja, odnosno zbog bočnih tektonskih pritisaka u Zemljinoj kori. Prekursori zemljotresa se dele u dve grupe: seizmički fenomeni i fenomeni promene fizičkih polja. Neki od najznačajnijih prekursora su promena brzine seizmičkih talasa zbog izmene gustine stenskih masa usled promene unutrašnje strukture stena, smanjenje električne otpornosti tla, fluktuacija gravitacionog i geomagnetskog polja u regionu, pojava "rojeva" manjih i većih zemljotresa u periodu od nekoliko dana pre glavnog zemljotresa, pojava elektrostatičkih nanelektrisanja i pražnjenja elektriciteta iz tla u obliku svetlosnog isijavanja (vidljivog u toku noći), povećano oslobođanje gasa radona iz tla i vode, nagle promene nivoa podzemne vode kao i promene u nagibu tla [29].

Tabela 8. MCS skala [29]

Stepen	Efekat zemljotresa	Maksimalno ubrzanje tla ( $m/s^2$ )
I	Ne osećaju ga ljudi, registruju ga samo seismografi.	< 0,0025
II	Reaguju samo vrlo osjetljive osobe u stanju mirovanja.	0,0025 – 0,0050
III	Oseti ga više ljudi u zatvorenom prostoru.	0,005 – 0,010
IV	U kućama ga oseti veći deo stanovnika, a na otvorenom samo pojedinci. Posuđe i prozori zveckaju. Pojedinci se bude iz sna.	0,010 – 0,025
V	Osete ga mnogi i na otvorenom prostoru. Predmeti koji slobodno vise, zanjušu se. Kod pojedinaca izaziva manju paniku.	0,025 – 0,050
VI	Osete ga sve osobe. Slike padaju sa zidova. Na slabije građenim zgradama nastaju prva oštećenja.	0,05 – 0,10
VII	Nastaju rušenja delova nameštaja u stanovima. Oštećenja se javljaju i na kvalitetnijim kućama: manje pukotine na zidovima. Ruše se delovi dimnjaka na kućama, padaju crepovi. Na slabijim objektima su moguća veća oštećenja.	0,10 – 0,25
VIII	Većina ljudi otežano ostaju na nogama. Javljuju se oštećenja na 25% kuća, neke slabije se ruše. U vlažnom tlu i na padinama javljaju se manje pukotine.	0,25 – 0,50
IX	Opšta panika. Oko 50% kuća znatno je oštećeno, mnoge se ruše, a većina je neupotrebljiva za dalje stanovanje.	0,50 – 1,00
X	Teška oštećenja javljaju se na oko 75% objekata, a većina njih se ruši. U tlu nastaju pukotine širine do nekoliko centimetara; Sa padina se odronjavaju stene, stvaraju se velika klizišta u tlu.	1,00 – 2,50
XI	Ruše se sve zidane zgrade. U tlu nastaju široke pukotine iz kojih prodire voda sa peskom i muljem. Javljuju se veliki odroni.	2,50 – 5,00
XII	Nijedan veštački objekat ne može opstati. Tlo i reljef menjaju izgled, zarušavaju se jezera, dok reke menjaju svoja korita.	5,0 – 10,0

Prognoziranje kojim se najviše bave inženjeri u praksi ili naučnici u istraživačkom radu su kratkoročna i dugoročna prognoza. Kratkoročna prognoza treba da otkrije vreme, mesto i magnitudu zemljotresa, sa tačnošću reda veličine jednog dana. Ova vrsta prognoziranja još uvek nije dovoljno razvijena. Sa druge strane, dugoročnom prognozom se definiše potencijalna oblast i povratni period katastrofalnih zemljotresa koji mogu da pogode region. Rezultati ovakvih analiza i prognoza se predstavljaju seizmološkim kartama koje prikazuju zone različitog stepena intenziteta zemljotresa koji će se u narednom periodu vremena dogoditi na tom prostoru, sa određenom dozom verovatnoće [29].

*Tabela 9. Odnos Magnituda-Intezitet-Ubrzanje tla [26]*

<b>Magnituda</b>	<b>Intezitet</b>	<b>Ubrzanje tla (%g)</b>
2 ili manja	I-II	Manje od 0,1-0,19
3	III	0,2-0,49
4	IV-V	0,5-1,9
5	VI-VII	2-9,9
6	VII-VIII	10-19,9
7	IX-X	20-99,9
8 ili veća	XI-XII	Preko 100 – preko 1g

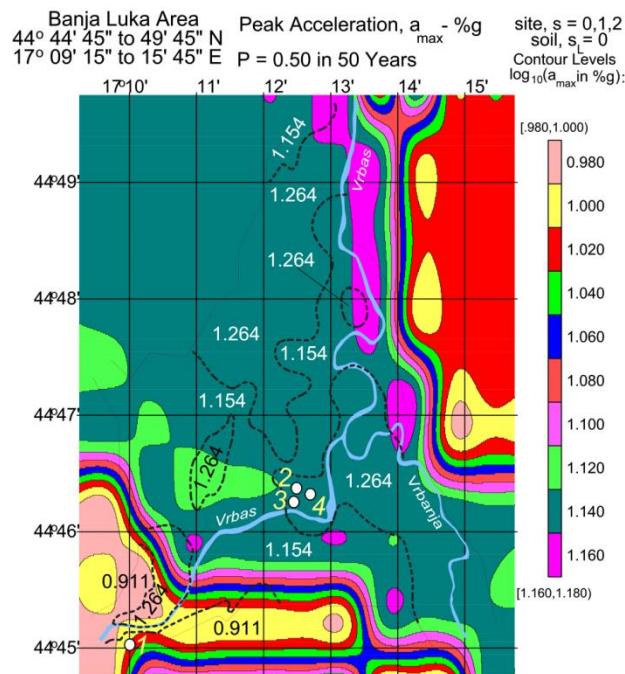
#### **4.3. Seizmička rejonizacija i mikrorejonizacija**

Sama primena seizmoloških i geoloških kriterijuma ocene seizmičke opasnosti na određenoj lokaciji, i niz postupaka rejonizacije te lokacije na zone koje se razlikuju po seizmičnosti, obuhvata seizmičku rejonizaciju. Razlikujemo seizmičku regionalizaciju i seizmičku mikrorejonizaciju. Seizmička regionalizacija se vrši za određeni region, odnosno republiku, i neophodno je da sadrži istorijske podatke o dogođenim zemljotresima u regionu i susednim zonama seizmičnosti, podatke o epicentrima, intezitetima zemljotresa, ubrzanju tla, izoseiste, opise hipocentara u regionu i šire i druge neophodne podatke za što precizniju analizu [29].

Prema grupi eksperata UNDRO-a (*United Nations Disaster Relief Organization*, 1979.) seizmički hazard, o kom će kasnije biti više reči, se definiše kao verovatnoća pojavljivanja zemljotresa odgovarajućih karakteristika, koji će se na određeni način manifestovati na proučavanoj lokaciji. Karte seizmičkog hazarda se obično prave na bazi probabilitičke (PSHA) analize, i postoje dve vrste: karte seizmičke makrorejonizacije i karte seizmičke mikrorejonizacije. Karte seizmičke makrorejonizacije se prave za cele države i druge veće oblasti. One uzimaju u obzir razlike u ponovljivosti zemljotresa različite jačine u različitim žarišnim zonama, kao i uticaje udaljenosti od različitih aktivnih žarišnih zona. Glavna karakteristika ove vrste karata je ta što se one izrađuju samo za prosečno tlo ili jedan tip tla, i to najčešće za stenske uslove tla. Karte seizmičke mikrorejonizacije se prave za manje oblasti (gradove, opštine) ili pojedinačne lokacije. Ova vrsta karte je detaljnija jer se za njenu izradu, pored istih podataka koji se koriste za izradu karata makrorejonizacija, dodatno uzima u obzir i uticaj lokalnog tla i/ili duboke geologije na jačinu kretanja tla. Poznato je da lokalno tlo utiče na prostiranje seizmičkih talasa i, ukoliko se zanemari njegov uticaj, može doći do ugrožavanja bezbednosti, odnosno stvaranja negativnih posledica po

građevinske objekte. Na osnovu geodinamičkog modela lokacije moguće je analizirati uticaj lokalne geotehničke sredine na amplitudni i frekventni sastav kretanja tla na posmatranoj lokaciji [29].

Evrokod 8 definiše i predlaže izrađivanje karata seizmičke mikrorejonizacije koje podrazumevaju definisanje zona lokalnog tla samo na osnovu brzine smičućih talasa u prvih 30m dubine tla, što je najčešće nedovoljno. Drugi način seizmičke mikrorejonizacije podrazumeva da se lokalno tlo definiše na osnovu predominantnog perioda oscilovanja tla, putem merenja tzv. mikrotremora (tj. slabog podrhtavanja tla usled saobraćaja i sl.). Poslednjih par decenija, kao najbolji način seizmičke mikrorejonizacije se pokazao onaj koji podrazumeva da se za određenu lokaciju prvo definišu zone duboke geologije, a zatim i zone lokalnog tla (Slika 7) [32], [33].



Slika 7. Primer seizmičke karte MIKRO-rejonizacije dobijene na osnovu analize seizmičkog hazarda [33]



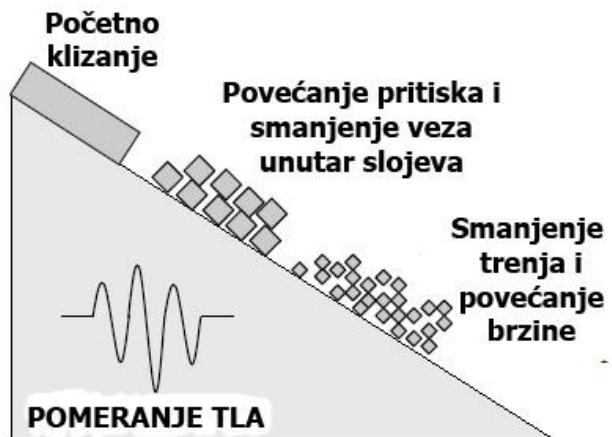
## 5. UTICAJ SNEŽNIH LAVINA I ZEMLJOTRESA NA BEZBEDNOST I ZDRAVLJE NA RADU

### 5.1. Snežne lavine kao sekundarni hazard

Postoji veliki broj prirodnih hazarda koji nastaju kao posledica pojave zemljotresa. Jedan od takvih hazarda su snežne lavine. Snežne lavine u ovom slučaju predstavljaju sekundarni hazard, dok su njihov okidač, odnosno zemljotresi, primarni hazard. Snažni pokreti unutar Zemljine kore, uzrokovani zemljotresom mogu izazvati katastrofalne snežne lavine. Primećeno je takođe da lavine mogu biti izazvane u blizinama kamenoloma i podzemnih rudnika gde su pokreti unutar Zemlje proizvedeni uz pomoć eksploziva. Poznato je da ubrzanja tla, uzrokovana zemljotresom, dovode do kratkotrajnih inercijalnih naprezanja koja mogu imati za posledicu privremenu nestabilnost na kosinama, odnosno padinama u planinskim regionima. Snažni pokreti unutar Zemlje mogu izazvati niz katastrofalnih geoloških procesa, uključujući fenomene kolapsa nagiba poput klizišta, padove velikih delova stena, padove sedimenata u okeane i druge vidove geoloških hazarda. Postoji veoma mali broj istorijskih podataka vezanih za pojavu snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom [6]. Najbolji inventar pojave ovog sekundarnog hazarda je, do sada, prikazao Evgeni Podolski u svojoj doktorskoj disertaciji 2010. godine [6].

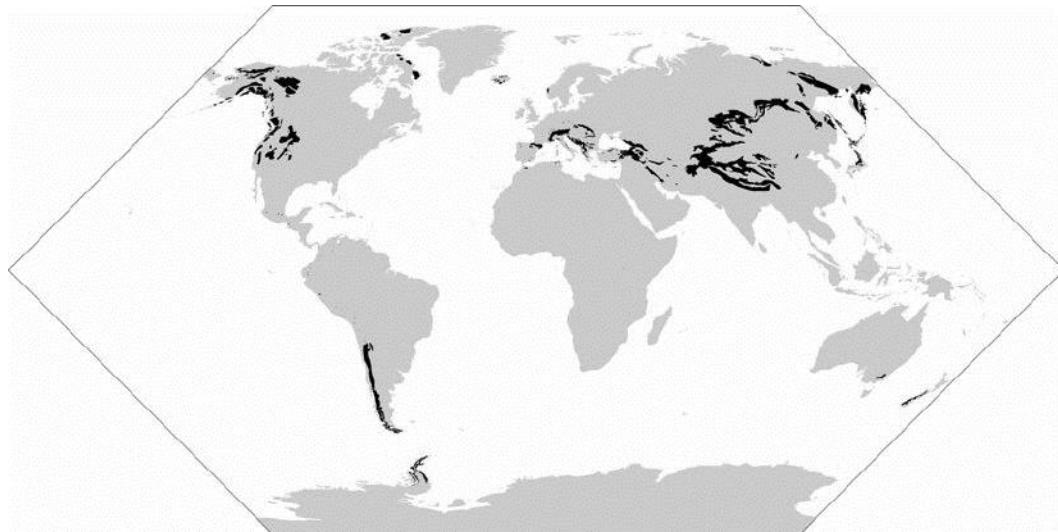
Glavni okidač za pojavu snežnih lavina je promena pritiska u snežnom pokrivaču. Snežne lavine, kao oblik sekundarnog hazarda, javljaju se kada su mehanička svojstva snežnog pokrivača sa uslovima naprezanja, odnosno pritiska, blizu loma materijala (*failure*) i samim tim veoma lako može doći do katastrofnog kolapsa odnosno tzv. frakture (*fracture*) snežnog pokrivača i pojave snežne lavine. Da li će doći do pojave snežne lavine zavisi od količine naprezanja, odnosno vrste pritiska u snežnom pokrivaču. Za vreme zemljotresa, količina naprezanja u snežnom pokrivaču može biti povećana zbog dodatnog ubrzanja tla, i na taj način ova kratkotrajna amplifikacija pritiska može poremetiti i uništiti kohezione veze unutar slojeva snežnog pokrivača (Slika 8). Ovaj porast pritiska, odnosno smičućeg napona je funkcija inercijalnog opterećenja, što znači da je više izraženo pri većim ubrzanjima. Poznato je da ubrzanje tla zavisi od magnitude, udaljenosti od epicentra zemljotresa i prirode podzemne geološke strukture, odnosno duboke geologije, uslova tla i drugih efekata na lokaciji. Postoje i drugi mehanizmi koji utiču na rast pritiska unutar slojeva snežnog pokrivača kao što su eksplozije ili samo rušenje velikog krovnog venca na padini. Zemljotresi i eksplozije najviše utiču na pojavu katastrofalnih snežnih lavina zbog velike stope

opterećenja koju snežni pokrivač ne može da izdrži. Pored toga, zemljotres je jedini proces koji izaziva velike oscilacije u normalnom pritisku i naprezanje u snežnom pokrivaču, orijentisane normalno na smičuću osnovu [6].



Slika 8. Šematski prikaz procesa nastanka snežne lavine uzrokovane zemljotresom [6]

Prema Glazovskoj sa saradnicima (*Glazovskaya et al.*) [34], lavinozni tereni čine 6,2% površine Zemlje, odnosno  $9.253.000 \text{ km}^2$ . Ova područja su definisana kao lokacije gde dubina snega prelazi 30-50cm a nagib padine je veći ili jednak  $17^\circ$ , dok je relativna visina nagiba od 20 do 30m. Oko 70% kontinentalne kopnene mase Zemlje čine područja niskog seizmičkog hazarda, 22% su područja umerenog seizmičkog hazarda, 6% visokog i 2% veoma visokog seizmičkog hazarda. Delovi svih kontinenata na Zemlji su izloženi riziku od seizmičke indukcije snežnih lavina. Prema Podoloskom i saradnicima, na osnovu istorijskih podataka, crnom bojom na slici su prikazane oblasti pogodne za pojavu snežnih lavina (Slika 9). One čine 3,1% ukupne kopnene površine Zemlje, odnosno  $4,7 \times 10^6 \text{ km}^2$ . Na osnovu svedočenih ili dokumentovanih podataka u proteklih 110 godina, smatra se da polovina ovih oblasti mogu biti pogodne za stvaranje snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom [6].



Slika 9. Prikaz lavinoznih oblasti koje čine 3,1% ukupne kopnene površine Zemlje [6]

Podolski je u svojoj doktorskoj disertaciji dao prikaz svih većih zemljotresa koji su izazvali snežne lavine [6]. Podaci su prikupljeni iz različitih izvora, kao što su *Composite Earthquake Catalog of the Advanced National Seismic System* (ANSS), novinski članci, komunikacija sa svedocima, putem javnih servisa i drugih izvora. Za opis jačine zemljotresa, odnosno količine energije koja se oslobađa za vreme zemljotresa, koristila se  $M_w$ , odnosno moment magnituda. Za period od 1899. do 2010. identifikovano je 23 slučaja pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom, prirodnim ili veštačkim putem (Tabela 10). Magnitude zemljotresa su iznosile 1,9 do 9,2, dok je rastojanje od žarišta do posmatrane lokacije od 0,2 do 640km. Na osnovu statističkih i prijavljenih, odnosno sakupljenih informacija, Podolski zaključuje da je donja granica magnitude za prijavljene slučajeve  $M=4,7$ , dok je statistička granica  $M=3,0$ . Prema Keferovom radu iz 1984. godine, donja granica magnitude za pojavu klizišta uzrokovanih zemljotresom je  $M=4,0$  [35]. Naučnici poput Černosa i drugih smatraju da minimalna magnituda zemljotresa koja može da uzrokuje snežnu lavinu jeste  $M=1,9$ . Razlog leži u tome što lavina najviše zavisi od PGA, odnosno ubrzanja tla [6], koje može biti primetno i za male magnitude ukoliko je rastojanje od žarišta jako malo, a uslovi tla nepovoljni.

*Tabela 10. Inventar dokumentovanih, raportiranih ili statističkih podataka za snežne lavine uzrokovane zemljotresom za period od 1899-2010. godine [6]*

Datum nastanka zemljotresa	Područje pogodjeno snežnom lavinom	Epicentar	Magnituda, <i>Mw</i>	PGA na mjestu, g	Maksimalna source to site distanca, km	Reference
<i>Detaljno zabeleženi u izveštajima ili svedočeni podaci</i>						
04.09.1899.	Yakutat zaliv, Yakutat/ Aljaska, US/Kanada	N 59.43, W 143.05; N 58.62, W 139.07; N 59.39, W 139.50;	7,9  7,4  8,0	Nema podataka	>90  >80  >30	Tarr and Martin, 1912, 1914
07.07.1912.	Planina Brooks, Planina McKinley, Aljaska, US	N 64.00 W 147.00	7,2	Nema podataka	~200	Browne, 1913
1917.	Făgăraş masiv, Rumunski Karpati, Rumunija	Nema podataka	Nema podataka	Nema podataka	Nema podataka	Voiculescu, 2009
26.12.1939.	Istočna Anatolija, Erzincan, Turska	N 39.77 E 39.53	7,7	Nema podataka	Nema podataka	Podolskiy, 2009
10.07.1958.	Planina Sveti Elias, Yakutat/AK US/Kanada	N 58.47 W 136.28	7,8	Nema podataka	~340	Field, 1968
17.06.1963.	Planina Sveti Elias, Planina Newton & Jeannette, US/Kanada	N 60.33 W 140.83	5,5		1.0-7.5	Everett, 1965
28.03.1964.	Chugach Planina., Aljaska, US	N 61.02 W 147.63	9,2	Nema podataka	>240-640? (Planina Spurr – Kodiak ostrva)	LaChapell, 1968; Hackman, 1968; Plafker and others, 1969
31.05.1970.	Huaskaran, Andi, Peru	S 09.25 W 78.84	7,8		~128-190?	Plafker and Erickson, 1978; Zemp and Haeberli, 2007; Bailey, 1982

08.1971.	Khan Tengri, Tian Shan, Kirgistan	Nema podataka	< 4,9?	Nema podataka	Nema podataka	Aizen, pers. com., 2010
23.07.1974.	Pamir planina, Krylenko Glacier, Crevasse Camp (5,3 km) N 39.3787 E 72.9326	N 39.47 E 72.29 (07:37)	4,7	Nema podataka	33	Lev, 1987
04.03.1977.	Făgăraș masiv, Rumunski Karpati, Rumunija	N 45.8, E 26.8	7,5	Nema podataka	~130?	Voiculesc u, 2009
20.02.1978.	Okura, Yamagata, Japan	N 38.75 E 142.2	6,7	~0.10	180	Higashiu ra and others, 1979
1979.	Zapadni Himalaji, India	Nema podataka	Nema podataka	Nema podataka	Nema podataka	Vaishnava , pers. com., 2009
13.07.1990.	Pamir planina, Lenina Vrh	N 36.41 E 70.78 (14:20UTC)	5,6	Nema podataka	~370	Web stranice: —Central Asia Travell —Risk.ru
13.03.1992.	Istočna Anatolia, Erzincan, Turkska	N 39.7 E 39.6	6,6	<0.48	19-29?	Erdik and others, 1992
19.08.1992.	Južni Inilchek Glacier, Tian Shan, Kirgistan	N 42.18 E 74.01	7,2?	Nema podataka	~510?	Aizen, 2003; Aizen, pers. com., 2009
04.01.2001.	Nakazato village, Niigata, Japan	N 36.95 E 138.76	5,1	~0.26	8	Ogura and others, 2001
23.10.2002.	Denali rased, Aljaska, US	N 63.51 W 147.91	6,7	~0.30	± 10 km raseda	Eberhart- Phillips and others, 2003; Haeussler (AEIC)
03.11.2002.	Denali rased, Aljaska, US	N 63.51 W 147.45	7,9	~0.34	Na rasedu 190-340?	Haeussler ,2004

01.10.2003.	Gorny Altay Siberia, Rusija	N 50.10 E 87.43	6,7	Nema podataka	~24	Emanov, pers. com., 2008
02.01.2010.	Kuhistoni Badakhshon,Pam ir planina. Tadžikistan	N 38.23 E 71.50	5,3	Nema podataka	Nema podataka	Sarkorova , 2010
<i>Statistički podaci (bez svedoka)</i>						
09.1951. -04.1993.	Planina Sakhalin ostrova, Rusija	Nije naznačeno	3,3-4,7*	Nema podataka	20-240	Kazakov, 1998
03.1995. – 03.2000.	Himachal Pradesh, Kashmir and Laddakh regioni, Zapadni Himalaji, India	Sektor: N 30.0-38.0 E 72.0-82.0,	1,9-6,8	Nema podataka	20-692	Singh and Ganju, 2002; Singh, pers. com., 2009
1959-1995	Khibiny planine. Rusija	N 67.63 E 33.87 (16x8 km <sup>2</sup> )	3,0-4,9† Eksplozija mine	<0.048	~0,25-3,0?	Chernous and others, 2006; Barashev, pers. com., 2009

Osnovni faktori koje treba razmotriti kao najznačajnije za pojavu snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom i na koje posebno treba обратити pažnju su [6]:

- Ponašanje različitih tipova snega pod vibracijama sa različitim ubrzanjem tla koje dovodi do kratkotrajnog pritiska među slojevima snežnog pokrivača;
- Dinamika inercijalnih naprezanja i frakture;
- Uticaj dodatnog opterećenja, promena u pritisku, efekti rezonancije, širenje nestabilnosti kao i poznavanje same osetljivosti snežnog pokrivača;
- Poznavanje terena odnosno duboke geologije i lokalnog tla koje utiče na topografsko povećanje ubrzanja tla u planinskim oblastima;
- Različite promene lavinoznog toka pod jakim ubrzanjem tla, odnosno pomeranjem usled zemljotresa, kao što su na primer mehanika fluida unutar slojeva i smanjenje bazalnog trenja tokom pojave pomeranja.

Poznavanjem karakteristika snega i osnovnih geoloških opisa lokacije, moguće je u velikoj meri prepoznati zone koje mogu biti pogodjene snežnim lavinama koje

su uzrokovane zemljotresom. Na taj način moguće je minimizirati žrtve i, u značajnoj meri, povećati bezbednost i zdravlje na radu na lokacijama pogodnim za stvaranje katastrofe.

## 5.2. Bezbednost i zdravlje na radu na lavinoznom terenu

Rad, stanovanje, odnosno boravak na planini i sama izgradnja objekata u planinskim oblastima i na lavinoznom terenu, nosi sa sobom određene rizike većeg ili manjeg intenziteta. Najprisutnija vrsta rizika u planinskim oblastima se odnosi na bezbednost i zdravlje radnika koji se nalaze u rizičnim zonama pogodnim za stvaranje snežnih lavina. Proces uspostavljanja kontrole nad rizikom možemo nazvati upravljanje rizikom [36].

Kako bi se povećao nivo bezbednosti i zdravlja na radu na lavinoznom terenu neophodno je biti upoznat sa opštim uslovima radnog mesta, kao i neophodnim merama prevencije. Sam termin radno okruženje ili radni prostor koristi se za sve uslove koji mogu da se dogode na radnom mestu, a koji mogu ugroziti efikasnost radnika na radnom mestu [3]. U radnom prostoru u planinskim oblastima čoveka okružuju različite opasnosti. Svaka opasnost može da izazove povrede i ugrozi radnu sposobnost radnika. Kako radnu okolinu čine prostor u kojem čovek radi, sredstva sa kojim radi kao i okolina prostora, sve neželjene posledice nastaju ako se poremeti odnos čoveka i njegove okoline. Radni prostor, radna okolina, odnosno građevinski objekti koji čine prostorije namenjene za rad i pomoćne prostorije moraju biti projektovane u skladu sa zahtevima pravila bezbednosti i zdravlja na radu. Dimenzije prostorija, zidovi, podovi, vrata, prozori, hodnici, zagrevanje i provetrvanje, kao i sve instalacije, moraju odgovarati nameni prostorije, kako bi osobe koje se nalaze u radnim prostorijama imale pogodne uslove za rad. Pored neophodnih uslova radne prostorije, bitan segment uspostavljanja bezbednih uslova na radu jeste uvođenje preventivnih mera u hazardnim zonama, odnosno zonama pogodnim za pojavu snežnih lavina. U skijaškim centrima širom sveta, veliki broj objekata se upravo nalazi na padinama koje mogu biti ugrožene pojavom snežnih lavina. Takvi objekti su najčešće žičare, pomoćni objekti, kontrolni objekti, meteorološke stanice, a u nekim slučajevima i hoteli i drugi turistički objekti.

### 5.2.1. Temperatura prostora i uticaj veta

Uslovi za rad uključuju kako fizičke, tako i socijalne uslove, pa samim tim standardi moraju biti zadovoljeni kako bi radnici bili zaštićeni. U najvažnije karakteristike radnog prostora spadaju:

- Čistoća radnog prostora;
- Boje koje preovladavaju u radnom prostoru;
- Prostor koji zauzima zaposlena osoba;
- Temperatura;
- Vlažnost;
- Osvetljenost;
- Ventilacija;
- Buka i vibracije.

U slučaju zatrpanjivanja objekta od strane lavine može doći do problema sa održavanjem optimalnih karakteristika radnog prostora, a naročito su opasni potencijalni problemi sa dovodom čistog vazduha – ventilacijom, odnosno sa održavanjem vlažnosti i temperature vazduha. Sa druge strane, u slučaju rušenja objekta ili prodora snežne lavine kroz otvore, potpuno se narušava bezbednost i zdravlje radnog prostora, stoga posledice tog tipa treba izbeći primenom preventivnih mera.

Uslovi radnog prostora koji se najviše razlikuju u planinskim oblastima jesu temperatura i vlažnost vazduha. Iz tog razloga, posebna pažnja treba da se pokloni upravo ovom segmentu radnog prostora. Svaka kompanija, odnosno vlasnici institucije, trebalo bi da obavljaju različite vrste ispitivanja u radnim prostorijama i u dатој radnoj okolini. Na taj način se može ustanoviti da li su uslovi radne okoline i prostora u skladu sa utvrđenim pravilima zdravlja i bezbednosti na radu. Ako se ispitivanjima utvrdi da radna okolina ne odgovara uslovima određenim pravilima zdravlja na radu, kompanija je dužna otkloniti spomenute opasnosti. Uz radne prostorije, radnicima se moraju osigurati pomoćne prostorije koje su navedene u pravilnicima kao neophodne za normalan rad [37].

Mikroklima neke prostorije najviše zavisi od temperature vazduha unutar prostorije, kao i vlažnosti vazduha. Razne kombinacije ovih karakteristika diktiraju osećaj udobnosti ili neudobnosti, stanje zdravlja radnika i njegovu radnu sposobnost. Poznato je da ekstremne temperature radnog prostora i okoline mogu da ugroze stanje i uslove bezbednosti i zdravlja na radu. Radnici koji rade u okviru skijaških centara moraju biti posebno obučeni i pripremljeni za uslove

veoma niskih temperatura. U proseku, najviše ljudi se oseća najugodnije pri temperaturi između 18 - 22°C, relativne vlažnosti vazduha oko 50%, dok brzina strujanja vazduha ne sme biti veća od 0.2 do 0.3m u sekundi. Termoregulacija omogućava čoveku da održava svoju telesnu temperaturu relativno konstantnom, i u slučajevima kada se znatno menja temperatura u prostoru oko njega. Kada je temperatura okoline visoka, ili ako se zbog teškog mišićnog rada proizvodi mnogo toplice, čovek se brani od pregrevanja pojačanim odavanjem toplice. Međutim, ako se rad obavlja pri visokoj temperaturi, pojačanoj mišićnoj aktivnosti s velikim stvaranjem toplice i još visokom relativnom vlažnošću, organizam će teško održavati toplostnu ravnotežu. Takvi uslovi mogu dovesti do toplostnog oštećenja, odnosno gubitka kontrole i termoregulacije, čime se može prouzrokovati fizičko opterećenje organizma, akutne toplostne bolesti, hronična oboljenja zbog toplice, kao i druge povrede [37].

Na lavinoznom terenu, odnosno u planinskim oblastima, prisutni su uslovi niske temperature. Negativan uticaj niske temperature se ogleda u povećanom gubitku energije u cilju održavanja normalne telesne temperature. Ukoliko je pored niske temperature prisutna i velika vlažnost vazduha ili padavine, negativan uticaj je veći zbog veće potrošnje telesne energije. Dugotrajan rad u uslovima niskih temperatura, naročito ako je istovremeno povišena i vlaga, može izazvati pojavu, odnosno pogoršanje već postojećih bolesti mišića, zglobova i perifernih živaca. Izlaganje ovakvim uticajima, pored ometanja koncentracije koja posredno može prouzrokovati povrede, može dovesti i do profesionalnih oboljenja kao što su bronhitis i artritis. Kako su sneg i led prisutni u radnoj okolini, neophodno je posvetiti posebnu pažnju čišćenju komunikacija kao što su stepeništa i merdevina koje se nalaze blizu žičara ili drugih prostorija. Takođe, ako je delovanje niske temperature ograničeno na pojedine delove tela (nos, uši, prsti), mogu se pojaviti ozbiljne povrede ili čak smrzotine. Kod nestabilnih temperatura dolazi do poremećaja funkcija organizma, odgovornih za održavanje stalne temperature (krvne žile, srce, bubrezi, probavni organi i mnogi drugi delovi tela). Temperatura radnog prostora treba da bude takva da ne izaziva ni znojenje niti drhtanje ljudi koji se nalaze u prostoru. Temperatura prostorije se obično može kontrolisati i treba da bude prilagođena vrsti rada i odeći koja se nosi u normalnim uslovima. U hladnim prostorima, kao što su skijališta, dodatna toplostna odeća mora biti obezbeđena od strane poslodavca. Posebnu pažnju treba obratiti na ljude koji veliki deo radnog vremena provode izvan prostorija, odnosno napolju, gde se temperatura ne može kontrolisati. Takav primer su svakako žičare i drugi objekti koji se nalaze na planini [38].

U radnom prostoru, bitno je da je temperatura u prizemlju približno slična temperaturi na ostalim spratovima objekta. Ovakvi uslovi se mogu postići ventilacijom koja će onemogućiti temperturnu stratifikaciju, kao i velike temperturne razlike od prizemlja ka višim spratovima. U Tabeli 11 prikazana je lista temperturnih opsega za različite radne okolnosti, iako je bitno napomenuti da su ove temperature indikativne, jer komforna temperatura individue zavisi od pola, navika, etničkih osobina itd. [38].

*Tabela 11. Temperature radne okoline [38]*

<b>Tip posla</b>	<b>Temperturni opseg (°C)</b>
Sedenteran, rad u kancelariji	20–24
Sedenteran koji uključuje pomeranje nekih delova tela	18–23
Sedenteran koji uključuje regularno pomeranje tela	17–21
Rad koji zahteva fizički napor	16–20
Rad koji zahteva težak fizički napor	15–18

Predugo izlaganje hladnoći može izazvati različita stanja tela koja posle mogu dovesti do ozbiljnih povreda. Ukoliko se radnik nalazi predugo na hladnom mestu, telo može da blokira dovod krvi u ekstremite kako bi zadržalo toplotu u jezgru tela. Ovo može rezultirati raznim povredama, poput Rajnaudove bolesti ili belih prstiju. Promrzline i trajna oštećenja na područjima zahvaćenim hladnoćom predstavljaju veliki rizik i dovode do umora, jer telo dodatno koristi energiju da se zagreje. Postoji povećan rizik od nesreća zbog utrnulih prstiju, opstrukcije od strane zaštitne odeće, i klizanja na ledu. Ekstremne hladnoće tokom dugih perioda mogu da dovedu do hipotermije, gubitka svesti, kome, pa i do zaustavljanja rada srca. Bitno je napomenuti da prostorije kao što su toaleti i svlačionice, takođe moraju imati sličnu temperaturu kao i ostale prostorije. Privremeno zagrevanje i hlađenje može da se obavlja u prostorijama koje nisu često posećivane, kao što su skladišta [39].

Uticaj vetra je nemoguće izbeći u planinskim predelima, pri čemu je u prethodnim poglavljima posebno objašnjen uticaj vetra na pojavu snežnih lavina. Kako se uglavnom svi objekti nalaze na većim nadmorskim visinama, prilikom njihove izgradnje do momenta zatvaranja objekta, odnosno postavke fasade, uticaj vetra se ne može zanemariti. Kombinacija vetra, niske temperature i vlage u zimskom

periodu povećava subjektivan osećaj hladnoće. U velikom broju slučajeva radnici tokom radnog vremena moraju da stoje napolju, odnosno ispred objekta, i na taj način su u direktnom kontaktu sa spoljašnjim vremenskim uslovima, koji su na planini, odnosno lavinoznom terenu, izuzetno zahtevni. U Tabeli 12 prikazana je Boforova skala uticaja vetra na okolinu na osnovu koje se može proceniti jačina vetra [40].

*Tabela 12. Boforova skala uticaja vetra [40]*

Stepen (Bf)	Jačina	Brzina			Opis uticaja vetra
		m/s	km/h	čvor/h	
0	tišina	0	0	0	Potpuno tiho, dim se diže uspravno
1	lahor	0,9	3	2	Dim se diže gotovo uspravno
2	povetarac	2,4	9	5	Povremeno se kreće lišće na drveću
3	slab vетар	4,4	16	5	Pokreće zastave na jarbolima i lišće drveća stavlja u neprekidno kretanje
4	umeren vетар	6,7	26	9	Leprša zastavom, povija grančice
5	jak vетар	9,3	34	14	Povija veće grane, postaje nelagodan za čula, baca talase na stajaćim vodama
6	žestok vетар	12,3	44	24	Čuje se kako huji iznad kuća i drugih čvrstih predmeta, pokreće tanje drveće, na stajaćim vodama baca talase od kojih se neki zapenuše
7	olujni vетар	15,5	55	30	Povija tanja stabla, na stajaćim vodama prebacuje talase koji se zapenuše
8	oluja	18,9	68	37	Povija cela jača stabla, lomi grane, osetno zadržava čoveka koji korača u pravcu vetra
9	jaka oluja	22,6	82	44	Lomi veće i jače grane, nanosi štetu krovovima
10	žestoka oluja	26,4	96	52	Obara i lomi drveće, obara slabe dimnjake, nanosi znatne štete zgradama
11	vihor	30,5	110	60	Teška razarajuća dejstva, rušenje krovova na zgradama
12	orkan	>34,8	>125	>68	Uništavajuće dejstvo

Osim hladnoće, postoje i druge opasnosti koje se odnose na zimske vremenske uslove, a kojima radnici mogu biti izloženi prilikom obavljanja zadataka. Neki od takvih poslova su vožnja po snegu, čišćenje snega sa krova i rad na visini,

sprečavanje klizanja po snegu i ledu (zaštita pešaka), popravka oštećenih ili oborenih dalekovoda, uklanjanje oborenih drveća i drugi. Poslodavci moraju proceniti opasnosti koje se mogu dogoditi pri rizičnim poslovima koji se obavljaju po snegu i trebaju ih što bezbednije organizovati. Radnici treba da budu svesni mogućnosti neočekivanih opasnosti zbog vremenskih uslova. Na primer, kako temperatura opada, mogu se formirati slojevi leda koji će učiniti površinu klizavom. Ukoliko je potrebno ukloniti sneg, površina koja je opterećena snegom mora biti pregledana od strane nadležnog lica kako bi se utvrdilo da li je strukturalno bezbedna za pristup radnika. Krovovi prekriveni snegom mogu prikriti opasnosti, kao što su krovni prozori, kroz koje radnici mogu pasti. Takođe, električne opasnosti mogu postojati zbog nadzemnih vodova ili opreme za uklanjanje snega. Poslodavci mogu da zaštite radnike od opasnih uslova za rad, na taj način što će koristiti metode za uklanjanje snega koji, na primer, ne uključuju penjanje radnika na krovove, kada i gde je to moguće. Poslodavci treba da odrede odgovarajuću vrstu opreme koja treba da se koristi (merdevine, avio liftove, itd) i opremu za ličnu zaštitu (ličnu zaštitu od pada sistema, non-slip zaštitna obuća, itd), kao i da obuče radnike kako da ih pravilno koriste [41].

U Tabeli 13 prikazane su neke od osnovih preventivnih bezbednosnih mera za rad na niskim temperaturama prema Ministarstvu rada Sjedinjenih Američkih Država [42].

### 5.2.2. Preventivne mere

Poznato je da je jedan od najboljih odgovora na rizik upravo prevencija. Pored hladnog vremena i drugih ekstremnih zimskih uslova na radnom mestu u planinskim regionima, pojava snežnih lavina, kao prirodnog hazarda, predstavlja realnu (svakodnevnu) mogućnost. Kako je snežne lavine kao i druge prirodne pojave veoma teško predvideti, upoznavanje sa preventivnim merama i oblicima tehnika i mera spašavanja je veoma bitan korak u minimiziranju rizika i povećanju bezbednosti i zdravlja na radu u planinskim oblastima [24].

Postoji nekoliko osnovnih koraka koji se tiču preživljavanja na lavinoznom terenu:

- Potrebno je uvek biti pripremljen na mogućnost pojave snežne lavine, pri čemu edukacija predstavlja jedan od najbitnijih koraka, uz posedovanje osnovnog plana spašavanja;
- Procena hazarda predstavlja drugi osnovni korak koji obuhvata analizu terena kako bi se sve nesigurnosti mogle pravovremeno identifikovati;
- Upoznavanje svih mera sigurnosti prilikom putovanja i prelaska preko lavinoznog terena je jedan od najbitnijih koraka;

- Defenzivna reakcija ukoliko se čovek nađe u snežnoj lavini predstavlja korak od kog može da zavisi stopa preživljavanja;
- Hitnost pretrage terena ukoliko se neko iz grupe našao u snežnoj lavini je bitan segment spasilačke misije.

Zemlje kao što su Sjedinjene Američke Države, Kanada, Švajcarska, Francuska i Austrija vode statistiku o stopi preživljavanja ukoliko se čovek nađe u snežnoj lavini. Tabele 14 i 15 prikazuju statistike stope preživljavanja i uzroka smrti [24].

*Tabela 13. Mere bezbednosti prema Ministarstvu rada Sjedinjenih Američkih Država [42]*

<b>Mere bezbednosti</b>	Poslodavac treba da bude siguran da su radnici upoznati sa rizičnim simptomima hladnoće i kako da ih uklone.
	Radnici treba da prate svoje fizičko stanje, kao i stanje saradnika.
	Radnici treba da se slojevito oblače kada rade napolju u zimskim uslovima.
	Radnici treba da ostanu u suvoj odeći na hladnoći jer vлага od znojenja može povećati stopu gubitka toplove iz tela.
	Radnici treba da nose dodatnu odeću, u slučaju da je neophodno da se presvuku.
	Radnici treba konstantno da se hidriraju.
	Koristiti odgovarajuće mere predostrožnosti, sigurne radne prakse, kao i opremu za ličnu zaštitu (PPE).

Jasno je da sama stopa preživljavanja mnogo zavisi od brzine reakcije spasilačke ekipe kao i od situacije u kojoj se žrtva nalazi. Jedini jasan razlog smrti jeste neadekvatan transfer kiseonika do ćelija. Alpski sneg se sastoji najviše od vazduha ali velika količina ugljen-dioksida koji se takođe nalazi u snegu i okolini može da obustavi dovod kiseonika na potrebna mesta. Tada lako mogu nastati oštećenja na mozgu i drugim organima. Naravno, postoje i slučajevi gde zakopavanje žrtve u snegu izaziva usporavanje metabolizma koji prolongira preživljavanje na nekoliko sati. Zaključno, verovatnoća pronalaženja osobe žive u snežnoj lavini se brzo smanjuje sa vremenom. 20% žrtava ostaje živo ukoliko se

nađe u roku od 30 minuta (žive duže od 30 minuta), 13% žrtava ostaje živo ukoliko se pronađe u roku od 1 sata (žive duže od jednog sata), 7% žrtava ostaje živo ukoliko se pronađe u roku od 2 sata (žive duže od 2 sata) i samo 4% žrtava ostaje živo ukoliko se pronađe u roku od 3 sata (žive duže od 3 sata) [24].

*Tabela 14. Stopa preživljavanja osoba koje su se našle u snežnoj lavini [24]*

Stopa preživljavanja	Situacija u kojoj se žrtva nalazi
80%	Preživljavanje ukoliko je žrtva ostala na površini snežne lavine
40% - 45%	Preživljavanje ukoliko je zakopana
55% - 60%	Preživljavanje ukoliko je žrtva zaštićena zgradom ili prevoznim sredstvom

*Tabela 15. Razlozi smrti žrtava u snežnim lavinama [24]*

Procenat od ukupnog broja žrtava	Razlog smrti žrtava u snežnim lavinama
65%	Gušenje
25%	Sudar žrtve sa drvećem, stenama i ostalim objektima
10%	Hipotermija i šok

Kako je snežni pokrivač manje gust na samoj površini, žrtva koja se nalazi u tom delu snežne lavine, ima mnogo veću verovatnoću preživljavanja. Žrtve koje se nalaze na dubinama većim od 2 metra, povezuju se sa značajno nižom stopom preživljavanja [24].

Prema podacima koje vodi WSL Institut za sneg i ispitivanja vezana za snežne lavine (*WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF*) sa sedištem u Švajcarkoj, u poslednjih 45 godina oko 100 ljudi izgubi život u snežnoj lavini svake godine [43]. WSL Institut za sneg i ispitivanja vezana za snežne lavine sakuplja statističke podatke o akcidentima vezanim za snežne lavine još od 1936. godine. Kao rezultat, na godišnjem nivou izrađuju različite izveštaje vezane za pojavu snežnih lavina. Pored sumiranih podataka o pojавama snežnih lavina, ovi izveštaji uključuju i detaljne opise događaja, primenjenih preventivnih mera, kao i informacije o vremenskim prilikama. Preko 100 akcidenata zabeleženo je godišnje od strane ovog instituta. Ovakvi izveštaji predstavljaju najbolji način za

vođenje statistike koja posle može poslužiti kao odlična osnova za kreiranje mapa hazarda na lavinoznom terenu [43].

Prevencija počinje ili sa kontrolisanjem snežne lavine, time što se reguliše prostor osobe koja se nalazi na lavinoznom terenu, ili postavljanjem različitih struktura koje mogu da preusmere ili zaustave snežnu lavinu [24]. Kontrola snežnih lavina u skijaškim centrima može biti svedena na nekoliko metoda. Metode obuhvataju ograničavanje javnosti od hazardnih delova, stabilizovanje nagiba i veštačko izazivanje lavine uz pomoć eksploziva i artiljerije [44]. Postoji nekoliko vrsta preventivnih mera, a najosnovnija podela je prikazana u Tabeli 16. Preventivne mere mogu biti podeljene na privremene i trajne, dok je druga podela na aktivne i pasivne mere [24].

*Tabela 16. Preventivne mere [24]*

	AKTIVNE	PASIVNE
PRIVREMENE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrola snežnih lavina uz pomoć eksploziva</li> <li>• Zatvaranje puteva</li> <li>• Evakuacija</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predviđanje snežnih lavina</li> <li>• Sezonsko iseljavanje</li> <li>• Sezonsko zatvaranje puteva</li> <li>• Organizacione mere</li> <li>• Znakovi za obaveštenje</li> </ul>
TRAJNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strukture za podupiranje snega</li> <li>• Snežne ograde</li> <li>• Brane i nasipi za smanjenje jačine snežne lavine</li> <li>• Druge strukture za ublažavanje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapiranje snežnih lavina i planiranje korišćenja zemljišta</li> </ul>

Privremene aktivne mere podrazumevaju, pored evakuacije i zatvaranja puteva, izazivanje i kontrolu snežnih lavina uz pomoć eksploziva, s tim da ova preventivna mera mora biti izvedena od strane stručnih lica.

Eksplozivi predstavljaju veoma efikasan instrument pri sprečavanju nekontrolisanih snežnih lavina. Oni se redovno koriste za kontrolu skijaških staza u ski centrima [44]. Detonacija eksploziva u startnim zonama ima tri cilja: da izazove snežnu lavinu u kontrolisanim uslovima, da smanji veličinu lavine i da testira nestabilnosti u snežnom pokrivaču. Osnovna prednost namernog izazivanja snežnih lavina uz pomoć eksploziva jeste sama vremenska neograničenost, u smislu da je moguće koristiti eksplozive onda kada su ti delovi planine nekorišćeni. Iz tog razloga, ova područja mogu biti otvorena ubrzano posle kontrole. Druga prednost upotrebe eksploziva je stvaranje manjih i stabilnijih snežnih lavina koje ne mogu naškoditi ljudima i imovini, umesto jedne velike, koja može da izazove ozbiljnu štetu. Takođe, često namerno izazivanje snežnih lavina može sprečiti pojavu nepredvidivih prirodnih snežnih lavina, koje mogu da se pojave kada sneg počne da se topi [24].

Određeni putevi se zatvaraju ukoliko postoji velika mogućnost da snežna lavina ugrozi živote i vozila, kao i u slučaju kontrolisanog izazivanja lavine pomoću eksploziva. Neke vrste snežnih lavina, kao što su lake poulder (*powder*) lavine, koje se uglavnom sastoje iz vazduha, ne mogu naškoditi vozilima, ali mogu smanjiti vidljivost i samim tim je neophodno zatvoriti puteve radi predostrožnosti [24].

Evakuacija predstavlja jednu od preventivnih mera koja se preduzima za privremene objekte, kao i različite kampove koji se nalaze na lavinoznom terenu. Evakuacija zahteva pouzdanu evaluaciju hazarda, kao i detaljan bezbednosni plan u slučaju da dođe do snežne lavine. Važno je istaći da je implementacija evakuacionog plana izuzetno kompleksna. Pored bezbednosnog plana, potrebno je proceniti učestalost i veličinu snežne lavine, kao i same operativne troškove [24][44].

U privremene pasivne mere pored sezonskog iseljavanja, sezonskog zatvaranja puteva, organizacionih mera i različitih znakova zabrane, spada i predviđanje pojave snežne lavine u određenoj oblasti. Ova metoda može biti dosta neprecizna, ali se može poboljšati sa redovnim i dodatnim podacima vezanim za stanje snežnog pokrivača.

Predviđanje snežnih lavina kombinuje znanje iz oblasti meteorologije i modele vezane za ponašanje snežnih lavina. Predviđanje snežnih lavina je metoda koja mora uzeti u obzir prošle, sadašnje i buduće događaje. Postoji sedam elemenata vezanih za predviđanje snežnih lavina, a to su [24]:

1. Definisanje. Da bi predviđanje snežnih lavina bilo realno, potrebno je pratiti sve nestabilnosti u snežnom pokrivaču koje mogu da doprinesu pojavi snežnih lavina.
2. Cilj. Cilj predviđanja snežnih lavina je minimiziranje neizvesnosti vezanih za nestabilnosti. U ove principe nestabilnosti i neizvesnosti spadaju pojave različitih promena u snežnom pokrivaču, zatim promene u meteorološkim uslovima i bilo koji ljudski faktori koji mogu da doprinesu promenama.
3. Ljudski faktor i percepcija. Pored toga što se ubraja u fundamentalni tip neizvesnosti opisan u delu vezanom za cilj, ljudski faktor predstavlja jedan od ključnih elemenata u predviđanju snežnih lavina. Posebna pažnja se poklanja ovom elementu jer je većina smrtnih slučajeva vezanih za snežne lavine upravo povezana sa ljudskim faktorom, odnosno pogrešnom percepcijom realnih uslova na terenu.
4. Proces rasuđivanja. Ovaj element se sastoji od induktivnih i deduktivnih procesa. Najvažniji deo u procesu rasuđivanja je svakako dinamični, induktivni proces koji se bazira na probabilističkom modelu. Pojava snežnih lavina nije događaj, već dinamički proces zasnovan na stanju nestabilnosti u snežnom pokrivaču. Sa druge strane, deduktivan način rasuđivanja obuhvata rezultate sakupljane preko deduktivnog modela, koji se sastoje od informacija o predviđanju snežnih lavina vezanih za fizičke zakone i teoreme, i uglavnom nemaju veze sa iskustvom i dinamikom procesa.
5. Tipovi informacija. U tipove informacija vezane za predviđanje spadaju jedinstvena informacija, odnosno informacija vezana za specifičan slučaj (sadašnja situacija i situacija u budućnosti), kao i distribucionalna informacija, odnosno ista informacija vezana za situaciju u prošlosti. Za obe vrste informacija potrebno je sakupiti sve podatke vezane za nestabilnosti, snežni pokrivač, teren, moguće vrste okidača i velike promene u vremenskim uslovima.
6. Skale u vremenu i prostoru. Dostupni podaci zavise od različitih skala, a da bi date skale bile efikasne, neophodno je da se dobijena informacija podudara sa skalom problema.
7. Odlučivanje. Ovaj element je ujedno i najbitniji jer zahteva akciju koja može da ima veoma bitne i, ponekad, skupe posledice koje mogu ugroziti živote i imovinu.

Sezonsko zatvaranje puteva podrazumeva evaluaciju hazarda i donošenje odluke da su vozila, koja se nalaze na određenim saobraćajnicama, ugrožena. Putevi koji se nalaze na ugroženim predelima, uglavnom nisu veoma frekventni, pa sezonsko zatvaranje ne može značajno ugroziti saobraćaj. Sa druge strane, sezonska zatvaranja se uglavnom vrše za vreme zime ili ranog proleća [24].

Sezonsko iseljavanje spada u neophodne mere ukoliko se proceni da se infrastruktura nalazi u zoni koja može biti pogođena snežnim lavinama. Ova mera je direktno povezana sa mapiranjem lavinoznog terena i preduzima se u najrizičnijim slučajevima.

Znakovi za ograničen pristup se uglavnom postavljaju na granicama planinarskih ili skijaških staza i predstavljaju oblik obaveštenja i prebacivanja odgovornosti u slučaju da pojedinac stupi u zabranjenu oblast [24].

Organizacione mere su različite za svaki skijaški centar i potrebno je posebno obratiti pažnju na mapiranje lavinoznog terena kako bi se smanjile posledice eventualne pojave snežne lavine [44]. Ove mere zaposleni u skijaškom centru preduzimaju kako bi se obezbedili bezbedni uslovi. Veliki uticaj imaju zakoni o zdravlju i bezbednosti na radu, za svaku državu posebno.

U trajne aktivne mere ubrajamo razne vrste struktura koje treba da ublaže ili spreče pojavu snežne lavine.

Tokom decenija, ove strukture su evoluirale sa istraživanjima vezanim za pogodnost i vrstu materijala koja se koristi u njihovoј izgradnji. Zemlja, kamen ili betonski zidovi koji ne zahtevaju poseban dizajn koristili su se više od jednog veka na prostoru centralne Evrope. Materijali manje težine, kao što su otvorene konstrukcije od drveta, aluminijuma, čelika, prednapregnutog betona ili neka kombinacija ovih materijala evoluirala je u poslednjih nekoliko godina, nakon što su urađena istraživanja vezana za pritisak snega kako bi se omogućio pravilan dizajn [44].

Postoji nekoliko vrsta struktura za zaštitu od snežnih lavina a to su:

- Strukture vezane za oslonac u startnoj zoni snežne lavine;

Ova vrsta struktura treba da bude izgrađena u gornjem delu, odnosno potencijalnom mestu nastanka snežne lavine. One sprečavaju pojavu snežnih lavina, odnosno umanjuju njihovu snagu ukoliko dođe do formiranja. Najranije nosive strukture su bile masivni zidovi i terase od kamena i zemlje. Moderne nosive strukture u početnoj zoni mogu biti napravljene od krutog, fleksibilnog ili kombinovanog materijala. Takođe mogu biti od drveta, čelika, aluminijuma, prednapregnutog betona, ili kao kombinacija ovih materijala. Danas, najčešće korišćeni materijal je čelik. Ove strukture se najčešće postavljaju u nizu kako bi zaštitile što veću površinu. Snežne mreže su fleksibilne vrste struktura vezane za oslonac i sve više se koriste.

- Strukture vezane za smanjenje jačine snežne lavine na trasi ili u rana ut zoni snežne lavine;

Ove strukture su obično znatno masivnije, napravljene su od zemlje, kamena ili betona i nalaze se na trasi po kojoj lavina može da se kreće ili u blizini lavinozne zone. Namjenjene su da uspore sneg koji se kreće i preusmere kretanje lavine što dalje od kritičnih infrastruktura.

- Strukture vezane za direktnu zaštitu koje se nalaze u krajnjoj zoni snežne lavine;

Ova vrsta struktura se gradi odmah pored objekta koji treba zaštititi, dok je, u nekim slučajevima, ona deo samog objekta. Osnovna uloga ovog tipa strukture jeste da pruži potpunu zaštitu, nezavisno od veličine lavine, vrste ili učestalosti pojavljivanja. Takozvani "plaštivi za snežne lavine" predstavljaju određenu vrstu krova koji se gradi preko puteva ili pruga koji dozvoljavaju snežnim lavinama da se kreću, a da pritom ne ometaju ili prekidaju saobraćaj. Betonski bedemi se najčešće grade ispred bitnih trafostanica, visokonaponskih kula ili žičara u skijaškim centrima, kako bi smanjili uticaj snežne lavine na strukturu. Ova vrsta struktura pruža najveću zaštitu i zato predstavlja najčešću trajnu aktivnu meru koja se primenjuje na lavinoznim terenima u Švajcarskoj i Austriji.

- Snežne ograde i vetrobrani;

Ove strukture se najčešće grade kako bi se smanjio broj i učestalost pojavljivanja snežnih lavina, kao i kako bi se zaustavilo formiranje "krovnog venca". Prilikom izgradnje ovih vrsta strukture bitno je imati neophodne informacije o pravcu vetra, količini padavina i nagibu terena.

Osnovna uloga struktura za zaštitu od snežnih lavina jeste smanjenje posledica uzrokovanih lavinama. Na taj način ove strukture utiču na bezbednost radnika i posetilaca skijaških centara. U praksi je uobičajeno da se koristi veći broj struktura kako bi se zaštitila infrastruktura, i smanjile žrtve [44].

Jednu od najboljih vrsta preventivnih mera predstavlja mapiranje snežnih lavina i planiranje korišćenja zemljišta. Ono se ubraja u *trajne pasivne preventivne mere*. Pre izgradnje određene infrastrukture neophodno je biti upoznat sa zonom na kojoj je planirana izgradnja. Planiranje i izgradnja objekata na lavinoznom terenu zahteva istraživanja vezana za teren, topografiju, vegetaciju, klimu i istorijske podatke vezane za oblast. Identifikacija hazardnih oblasti i uvođenje posebnih mera bezbednosti na takvim mestima naziva se zoniranje opasnosti od snežnih lavina. Glavni parametri, koji opisuju neku hazardnu zonu jesu učestalost lavine i njena destruktivna moć. Destruktivna moć se najčešće opisuje kao očekivani udarni pritisak na zid koji se nalazi perpendikularno na putanju snežne lavine.

Primena ograničenja vezanih za zdravlje i bezbednost ljudi na radnom mestu zavisi, najpre, od državnih propisa i institucionalne uprave. Vlada treba da doneše zakone koji važe u određenim hazardnim zonama, kao i nivo korišćenja zemljišta [44], [24].

Zoniranje snežnih lavina je počelo da se primenjuje kao osnovna mera za prevenciju u Švajcarskoj 1961. godine. Švajcarsko zoniranje oblasti opasnih po pojavu snežnih lavina, koje se kasnije prihvatiло i u ostalim oblastima Evrope, Amerike i Kanade, obuhvata četiri osnovne zone: crvenu, plavu, žutu i belu [24].

Crvena zona predstavlja najopasniju hazardnu zonu, odnosno zonu "Visokog hazarda". U ovoj zoni može da se očekuje (a) destruktivna moć, odnosno udarni pritisak od 30kPa ili veći, kao i povratni period od 300 godina, ili (b) povratni period od 30 godina ili kraći, nezavisno od udarnog pritiska. Objekti koji se već nalaze u ovoj zoni moraju biti zaštićeni različitim vrstama zaštitnih struktura ili evakuisani u manje opasne zone.

Plava zona predstavlja umerenu hazardnu zonu odnosno zonu "Umerenog hazarda". U ovoj zoni može da se očekuje (a) manja destruktivna moć snežne lavine, odnosno udarni pritisak manji od 30kPa, i povratni period između 30 i 300 godina, ili (b) pauder rastresite lavine povratnog perioda od 30 godina ili kraći, i udarnog pritiska manjeg od 3kPa. Gradnja je dozvoljena u ovoj zoni, pod uslovom da je zaštićena. Izgradnja infrastrukture kao što su žičare, škole ili objekti koji okupljaju veliki broj ljudi, u ovoj zoni nije dozvoljena.

Žuta zona predstavlja zonu "Niskog hazarda". U žutoj zoni su moguće (a) veoma retke snežne lavine sa povratnim periodom većim od 300 godina ili (b) pauder rastresite snežne lavine koje mogu da izazovu udarni pritisak manji od 3kPa, sa povratnim periodom dužim od 30 godina. Trajne aktivne preventivne mere su preporučene za objekte izgrađene u ovoj zoni hazarda.

Bela zona predstavlja zonu bez hazarda. Ova zona predstavlja najpogodniju zonu za izgradnju infrastrukture gde nije neophodno uvesti neku od preventivnih mera za bezbednost i zdravlje [24].

Lavinozne zone mogu biti prvo bitno iscrtane na standardnim topografskim mapama, dok je projekte vezane za gradilišta potrebno generisati u posebne mape sa razmerom ne grubljom od 1:5.000, i konturnim intervalima od 5m ili manje [44].

Jedan od mehanizama nestrukturnog preventivnog delovanja i ublažavanja jeste i institucija osiguranja. Osnovna funkcija, zbog koje je i nastala institucija osiguranja, je zaštita pojedinca, njegove ličnosti i imovine. Funkcija zaštite

imovine i lica se preko osiguranja ostvaruje neposredno i posredno. Za razliku od posrednog čuvanja imovine i lica koje nadoknađuje već nastalu štetu, neposredno čuvanje imovine i lica sprečava nastanak šteta, doprinosi umanjenju već nastale štete i stimuliše osiguranike da sami efikasnije štite svoju imovinu [45].

Preventivne mere predstavljaju najznačajniji vid neposredne zaštite imovine i lica. Interes, kako pojedinaca, tako i društva u celini, je da se već nastala šteta u kratkom roku nadoknadi, odnosno da se njene štetne posledice što više umanje. Ipak, prvenstveni interes je organizovanje takvog sistema zaštite koji će omogućiti da štete ili ne nastanu ili da nastanu, ali u što manjem obimu [45].

Razvijeni sistem prevencije koji se sprovodi preko društava za osiguranje ne treba da zameni, već samo da dopuni preventivne mere koje su osiguranici dužni sami da sprovode. Propisi za upravljanje bezbednošću i zdravlјem na radu iz 1999. godine zahtevaju od poslodavaca izradu procene rizika po zdravlјe i bezbednost svojih radnika, kao i preuzimanje svih potrebnih mera kako bi radnik mogao nesmetano da obavlja svoj posao. Poslodavac je dužan da obezbedi propisane uslove koji su neophodni kako za rad na nižim, tako i na višim temperaturama [46].

Adekvatna procedura procene rizika je od ključnog značaja. Evidencija svih postupaka i rezultata bi trebala biti sačuvana kao deo programa za upravljanje rizikom. U zavisnosti od ishoda procene rizika, odgovarajuća lična zaštitna oprema (PPE) mora biti obezbeđena (npr. topla odeća, rukavice, krema za sunčanje, pristup dodatnim tečnostima, itd.). Zdravstveni nadzor ili medicinski skrining moraju biti izvedeni za osoblje koje ima posebne zahteve (npr. trudnoće, određene bolesti ili invaliditet, lekovi). Medicinska stanja koja mogu biti pogođena ekstremnim temperaturama uključuju: dijabetes, hipertenziju, poremećena respiratorna stanja, bolesti srca ili bolest bubrega itd. Poslodavci su obavezni da ispitaju i podnesu izveštaje o bolestima koje mogu biti prouzrokovane radom u toplim ili hladnim temperaturama i, ako je potrebno, sprovedu odgovarajuće kontrole za upravljanje rizicima [46].



## 6. UNAPREĐENJE METODE PROCENE BEZBEDNOSTI I ZDRAVLJA NA RADU ZA SLUČAJ SNEŽNIH LAVINA IZAZVANIH ZEMLJOTRESOM

Unapređenje metodologije za procenu rizika, odnosno bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom, koji se predlaže u ovoj disertaciji, sastoji se u sledećem:

1. *UHS analiza seizmičkog hazarda (metoda uniformnog hazarda)*. Za analizu seizmičkog hazarda se koriste frekventno-zavisne atenuacione jednačine, tj. i za PGA i za niz spektralnih amplituda za periode oscilovanja u rasponu 0,04 do 2 sekunde. Za razliku od uobičajene prakse, za ocenu jačine kretanja tla ispod potencijalnih snežnih lavina će se uzimati u obzir i uticaj duboke geologije simultano sa uticajem plitkog tj. lokalnog tla. Takođe, probabilistička metoda uniformnog hazarda na izbalansiran način uzima u obzir sve potencijalne uticaje na jačinu kretanja tla, i kao krajnji rezultat daje verovatnoću u toku određenog broja godina.
2. *Procena mogućnosti nastanka snežnih lavina usled zemljotresa na bazi različitih spektralnih amplituda*. Za procenu verovatnoće nastanka lavine usled zemljotresa mogu da se koriste empirijsko-teoretske jednačine koje povezuju karakteristike snežnog pokrivača, kritične nagibe i vrednosti spektralnih amplituda za periode oscilovanja u rasponu 0,04 do 2 sekunde.
3. *Procena nivoa bezbednosti i zdravlja na radu*. Nivo bezbednosti zaposlenih u područjima na kojima su moguće snežne lavine biće procenjen putem inverzne ALARP analize, koja se računa na bazi procenjenog seizmičkog hazarda i ciljnih vrednosti rizika, usvojenih u skladu sa ciljevima bezbednosti na radu, i pomoću koje se određuju potrebne vrednosti povredljivosti objekata u kojima zaposleni rade.

U nastavku je data uporedna analiza, odnosno šematski prikaz procesa unapređenja metode procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Pored unapređene metodologije, prikazana je standardna metodologija koja ne uzima u obzir veliki broj faktora pri proceni rizika, odnosno bezbednosti i zdravlja na radu, pa samim tim ju je potrebno unaprediti (Slika 10 ).

**STANDARDNA METODOLOGIJA****UNAPREĐENA METODOLOGIJA**

1. Standardna analiza seizmičkog hazarda:
- Atenuacione jednačine samo za PGA
  - Samo lokalni uslovi tla, i to za prvih 30m dubine

1. UHS analiza seizmičkog hazarda:
- Frekventno-zavisne atenuacione jednačine, tj. i za PGA i za niz spektralnih amplituda za periode oscilovanja u rasponu 0,04 do 2 sekunde
  - Lokalni uslovi tla koji uzimaju u obzir dubine i do 100-ak m
  - Duboka geologija (geološko okruženje na dubinama i do par km) se takođe uzima u obzir

2. Procena mogućnosti nastanka snežnih lavina usled zemljotresa na bazi PGA:
- Empirijsko-teoretske jednačine koje povezuju karakteristike snežnog pokrivača, kritične nagibe i vrednosti PGA
  - Idenični uslovi geologije za celu teritoriju → Manje površina za koje se očekuju lavine uzrokovane zemljotresom

2. Procena mogućnosti nastanka snežnih lavina usled zemljotresa na bazi različitih spektralnih amplituda:
- Moguće je koristiti empirijsko-teoretske jednačine koje povezuju karakteristike snežnog pokrivača, kritične nagibe i vrednosti spektralnih amplituda za periode oscilovanja u rasponu 0,04 do 2 sekunde
  - Zone hazarda za lavine uzrokovane zemljotresom prate raspored duboke geologije → Više površina za koje se očekuju lavine uzrokovane zemljotresom

3. Kvalitativna procena nivoa bezbednosti i zdravlja na radu:
- Nivoi bezbednosti se definišu kvalitativno (visok, srednji i nizak), u zavisnosti od nivoa verovatnoće pojave lavina usled zemljotresa

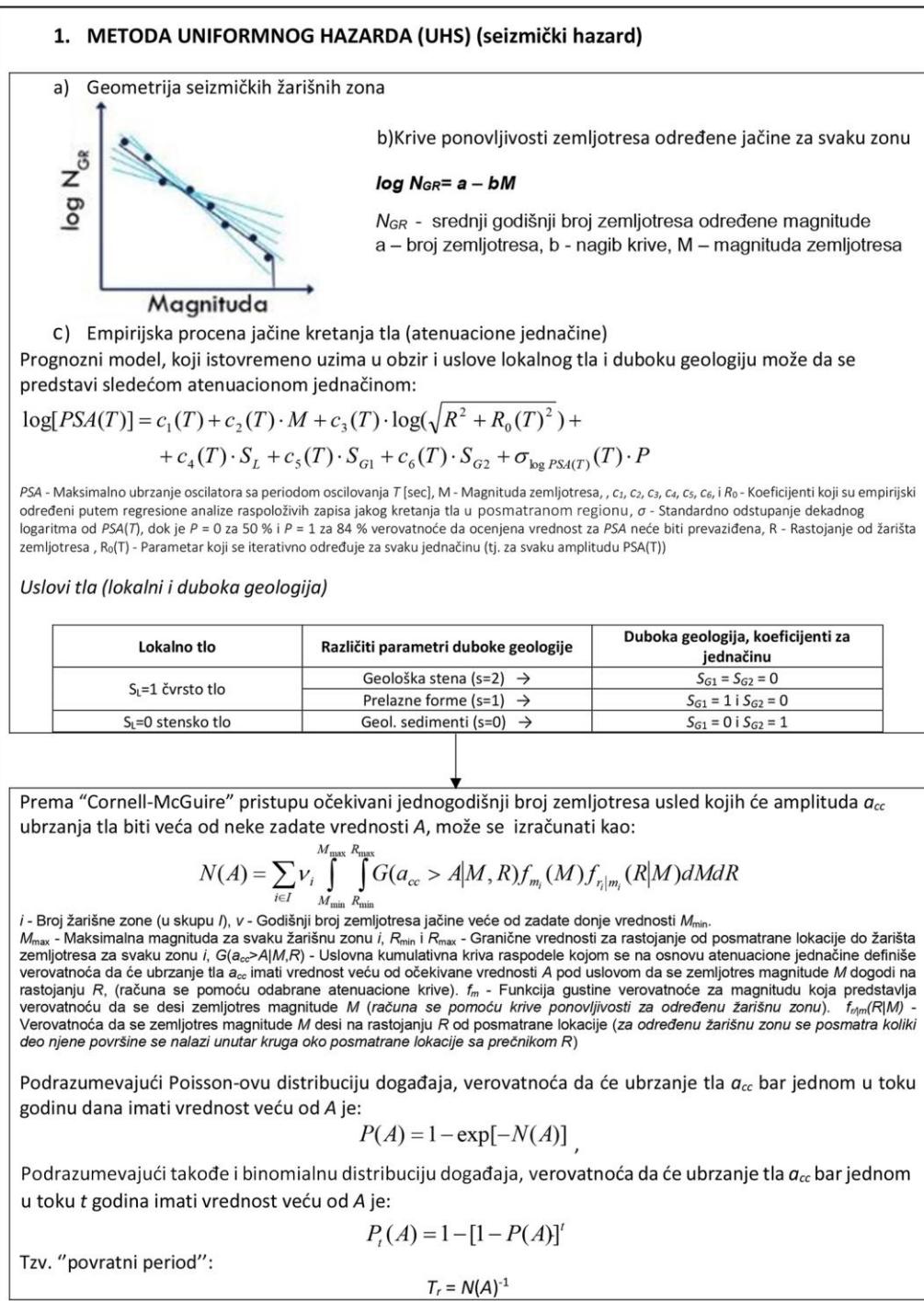
3. Kvalitativna procena nivoa bezbednosti i zdravlja na radu u dve varijante:
- ZATEČENO STANJE: Nivoi bezbednosti se definišu kvantitativno putem ALARP metode, kao verovatnoća i broj stradalih, na bazi verovatnoće pojave lavina tokom zemljotresa, broja zaposlenih, radnog vremena, i procenjene povredljivosti već postojećih objekata u kojima zaposleni borave
  - PLANIRANO STANJE: Nivoi bezbednosti se definišu kvantitativno putem inverzne ALARP metode, kao verovatnoća i broj stradalih, na bazi verovatnoće pojave lavina tokom zemljotresa, broja zaposlenih, radnog vremena, i zadate povredljivosti planiranih objekata u kojima će zaposleni da borave tako da nivo bezbednosti bude u ALARP granicama prihvatljivog rizika

Slika 10. Šematski prikaz metodologija procena bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom

Prvi deo (prvi desni pravougaonik na Slici 10) će biti detaljno opisan u potpoglavlјima 6.1 i 6.2, koja su inspirisana nedavnim istraživanjima o zemljotresima na severozapadnom Balkanu [31] i nizom nedavnih studija seizmičke mikrorejonizacije u regionu [33] [47] [48] [49] [50] [51], koje su pokazale da duboka geologija, koja opisuje geološko okruženje lokacije na skali od nekoliko stotina metara ili kilometara [52], snažno utiče na karakteristike kratkoperiodičnih i dugoperiodičnih talasa. Ove studije pokazale su najmanje 30%, a čak i do 70% veće amplitudu kratkotrajnog snažnog kretanja tla sa kratkim periodama oscilovanja na duboko-geološkim stenskim lokalitetima, u poređenju sa amplitudama dobijenim putem empirijskih prediktivnih jednačina koje uzimaju u obzir samo efekat uslova lokalnog tla (koji predstavljaju geotehnički opis lokacije na dubini od nekoliko desetina metara).

Drugi i treći deo (drugi i treći desni pravougaonik na Slici 10) istraživanja biće predstavljeni u potpoglavlјima 6.2 i 6.3. Motiv za ova istraživanja potiče delom od lavine koja nije bila izazvana zemljotresom [53] a koja je zabeležena 2012. godine na području skijališta Kopaonik i Nacionalnog parka (sa najvišim vrhom od 2.017m), koji se nalazi unutar najaktivnijeg seizmičkog regiona u Srbiji. Sama procena mogućnosti nastanka snežnih lavina usled zemljotresa na bazi različitih spektralnih amplituda, biće detaljnije analizirana u potpoglavlju 6.4.4.

U nastavku je prikazana detaljna šema modela, odnosno unapređene metode procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom (Slika 11a i Slika 11b). U nastavku ovog poglavlja, svaki segment metode će biti detaljno objašnjen.



Slika 11a. Unapređena metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom – prvi deo

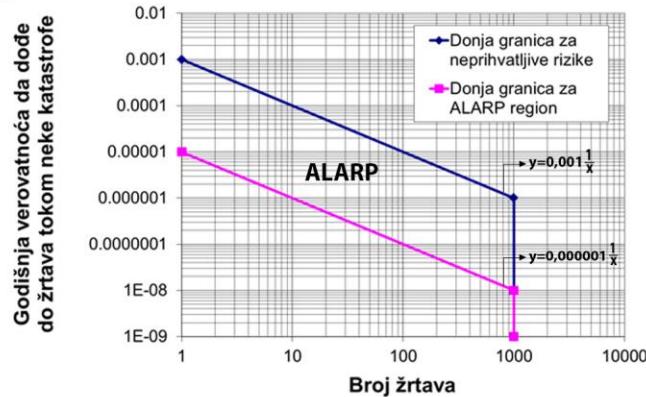
## 2. PROCENA MOGUĆNOSTI NASTANKA SNEŽNIH LAVINA USLED ZEMLJOTRESA NA BAZI RAZLIČITIH SPEKTRALNIH AMPLITUDA

Podolski i saradnici [9] razvili su vezu između gravitacionog ubrzanja zemlje, nagiba i debljine snega, gustine i čvrstoće na smicanje, zasnovane na rezultatima eksperimenata na "vibro platformi". Ovaj odnos se može izraziti sledećom jednačinom:

$$h_{cr} = \frac{\tau_{st}}{g \cdot \rho \cdot (\sin \alpha + PGA \cdot \cos \alpha)}$$

$h_{cr}$  - Kritična debljina snega koji pokriva slab sloj,  
 $\tau_{st}$  - Čvrstoća na smicanje slabog sloja,  
 $g$  - Ubrzanje gravitacije,  
 $\rho$  - Gustina snega koja pokriva slab sloj,  
 $\alpha$  - Nagib  
 PGA - gravitaciono ubrzanje tla

## 3. PROCENA BEZBEDNOSTI I ZDRAVLJA NA RADU ZA SLUČAJ SNEŽNIH LAVINA IZAZVANIH ZEMLJOTRESOM



Granica sa neprihvatljivim rizicima:

$$(VN_1N_2)^{-1}0.01 = V [1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7}$$

$$V_{neprih} = \sqrt{\frac{0.01}{[1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7} N_1 N_2}}$$

Granica sa prihvatljivim rizicima:

$$V_{prih} = \sqrt{\frac{0.000001}{[1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7} N_1 N_2}}$$

Povredljivost:  $V$

Verovatnoća:  $P_t$

Posmatrani period:  $t$

Broj objekata:  $N_1$

Broj ljudi:  $N_2$

Vreme – sati:  $t_1$

Slika 11b. Unapređena metoda procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom – drugi i treći deo

## 6.1. Empirijska procena jačine kretanja tla

Opadanje jačine kretanja tla sa rastojanjem opisuje se tzv. atenuacionim jednačinama. Atenuacionim jednačinama se ne opisuje isključivo promena maksimalnog ubrzanja tla (PGA) sa rastojanjem od žarišta zemljotresa, magnitudom, uslovima lokalnog tla i geologije i dr. Postoje i atenuacione jednačine kojim se opisuju neki drugi parametri, kao npr. promena dužine trajanja (vremena) jakog kretanja tla, ili npr. promena maksimalnog ubrzanja oscilatora sa jednim stepenom slobode. Svaki oscilator sa jednim stepenom slobode ima svoj sopstveni period oscilovanja  $T$ , samim tim kad spojimo maksimalna ubrzanja za nekoliko oscilatora, tj. za nekoliko perioda oscilovanja, dobijemo tzv. spektar odgovora.

Većina postojećih empirijskih modela za spektralne odzivne reakcije u građevinskom inženjerstvu uzima u obzir samo efekte plitkih geoloških uslova, i lokalnog tla, dok se efekti duboke geologije zanemaruju. Razlog zanemarivanja ovih efekata u empirijskim prognoznim jednačinama je ponekad taj što podaci o dubokoj geologiji jednostavno nisu bili dostupni. Evrokod 8 [32], na primer, definiše vrste terena uzimajući u obzir prvih 30m stratigrafskog profila, iako u članu 3.1.2 (1) ostavlja mogućnost da se geološka klasifikacija koja uzima u obzir duboku geologiju može uzeti u obzir, i definisati u Nacionalnom aneksu, u slučaju da postoje potrebni podaci za zemlju ili region. Odnosno, po Evrokodu 8 moguće je definisati drugačije spektre od predloženih ako će se duboka geologija uzeti u obzir, koji dalje kaže (u tački 3.1.1(4)) da bi, u zavisnosti od značaja objekta i od određenih uslova projekta, istraživanja tla i/ili geološke studije, trebalo sprovesti kako bi se odredilo seizmičko dejstvo.

Na sreću, severozapadni Balkan predstavlja jedan od retkih regiona gde su dostupni podaci i o lokalnim uslovima tla (plitkoj geologiji) i o dubokoj geologiji za stanice koje su snimile stotine jekih zapisa o kretanju tla [54]. Baza podataka jakog kretanja tla, koja je korišćena za razvijanje novih empirijskih jednačina za skaliranje, sastoji se od 203 akcelerograma jakog kretanja tla (svaki sa tri ortogonalne translatorne komponente), koji su zapisani u bivšoj SFR Jugoslaviji u periodu od 1976. do 1983. godine, od 108 pripadajućih zemljotresa. Dalje, serija empirijskih analiza za ovaj region [31] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] je pokazala da, čak i ako se uzmu u obzir uslovi lokalnog tla koji analiziraju tlo na više od 30m stratigrafskog profila (npr. korišćenjem klasifikacije koju su predložili Seed i saradnici [65] [66]), empirijska predviđanja o zemljotresu i kretanju tla i dalje će biti prilično neprecizna ako se ne uzme u obzir i duboka geologija.

Prognozni model, koji istovremeno uzima u obzir i uslove lokalnog tla i duboku geologiju može da se predstavi sledećom atenuacionom jednačinom:

$$\begin{aligned} \log[PSA(T)] = & c_1(T) + c_2(T) \cdot M + c_3(T) \cdot \log(\sqrt{R^2 + R_0(T)^2}) + \\ & + c_4(T) \cdot S_L + c_5(T) \cdot S_{G1} + c_6(T) \cdot S_{G2} + \sigma_{\log PSA(T)}(T) \cdot P \end{aligned} \quad (3)$$

gde  $PSA$  predstavlja maksimalno ubrzanje oscilatora sa periodom oscilovanja  $T$  [sec], odnosno amplitudu spektra pseudo-apsolutnog ubrzanja za viskozno prigušenje od 5% od kritičnog, i to za period oscilovanja  $T$ ;  $M$  predstavlja magnitudu zemljotresa, dok su  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ , i  $R_0$  koeficijenti koji su empirijski određeni putem regresione analize raspoloživih zapisa jakog kretanja tla u regionu severozapadnog Balkana. Lokalno tlo je klasifikovano prema Sidovoj klasifikaciji, i  $S_L = 0$  za stensko tlo i  $S_L = 1$  za čvrsto tlo. Što se tiče duboke geologije ona je klasifikovana na osnovu Trifunca i Brejdija (*Brady*) iz 1975. godine [52], i to odgovarajuće kategorisane promenljive su definisane tako da je  $S_{G1} = S_{G2} = 0$  za geološku stenu,  $S_{G1} = 0$  i  $S_{G2} = 1$  za geološke sedimente, a  $S_{G1} = 1$  i  $S_{G2} = 0$  za kompleksno geološko okruženje, odnosno za prelazne forme zadate lokacije (Tabela 17).  $\sigma$  predstavlja standardno odstupanje dekadnog logaritma od  $PSA(T)$ , dok je  $P = 0$  za 50% i  $P = 1$  za 84% verovatnoće da ocenjena vrednost za  $PSA$  neće biti prevaziđena. Regresione analize su izvedene uz prepostavku da je distribucija analiziranih podataka normalna, pa je  $P = 0$  za srednje statističke ocene (odnosno medijane, tj. centralne vrednosti), a  $P = 1$  za zbir srednje ocene i jednog standardnog odstupanja.  $R$  predstavlja rastojanje od žarišta zemljotresa dok je  $R_0(T)$  parametar koji se iterativno određuje za svaku jednačinu (tj. za svaku amplitudu  $PSA(T)$ ) tako da standardna devijacija za tu prognoznu jednačinu bude što manja, odnosno ima najmanju moguću vrednost.

*Tabela 17. Uslovi tla (lokalni i duboka geologija)*

Lokalno tlo	Različiti parametri duboke geologije	Duboka geologija, koeficijenti za jednačinu
$S_L=1$ čvrsto tlo	Geološka stena (s=2) →	$S_{G1} = S_{G2} = 0$
	Prelazne forme (s=1) →	$S_{G1} = 1$ i $S_{G2} = 0$
$S_L=0$ stensko tlo	Geol. sedimenti (s=0) →	$S_{G1} = 0$ i $S_{G2} = 1$

## 6.2. Probabilistička analiza hazarda

Postoji nekoliko načina da se okarakteriše seizmički hazard. Dva opšta pristupa, različita, a opet suštinski kompatibilna, koja mogu da se primene u oceni vrednosti parametara kretanja tla (ubrzanja, brzine, pomeranja i dr.) od dejstva zemljotresa, su: deterministički i probabilistički pristup. Primenom probabilističke metode uniformnog hazarda (UHS metoda), moguće je formulisati seizmičku rejonizaciju i mikrorejonizaciju pristupom kojim se istovremeno uzimaju u obzir:

- Verovatnoća pojave zemljotresa različite jačine,
- Prostorna distribucija seizmičkih žarišta,
- Frekvento-zavisna atenuacija amplituda jakog kretanja tla,
- Karakteristike lokalne geologije i lokalnog tla.

Rezultati ovakvog pristupa, jesu tzv. spektri uniformnog hazarda.

Dok probabilistička analiza uzima u obzir razne žarišne zone, sa druge strane, u determinističkoj analizi posmatra se samo jedan rased, odnosno jedan zemljotres, koji se najčešće naziva “*Scenario Earthquake*”, koji obično predstavlja najjači očekivani zemljotres u blizini posmatrane lokacije. Drugim rečima, determinističkom analizom proverava se konkretni scenario, odnosno, šta bi se desilo ako bi, na primer, došlo do zemljotresa najjače očekivane magnitude na nekoj određenoj lokaciji.

Rezultati probabilističke analize se u građevinarstvu koriste da bi se projektovale konstrukcije na ubrzanje tla za verovatnoću koja odgovara prihvatljivom nivou rizika od nastanka šteta u toku životnog veka konstrukcije. Na primer, prati se verovatnoća od 10% za vreme očekivanog životnog veka konstrukcije od 50 godina (ovoj verovatnoći odgovara tzv. povratni period od 475 godina). Projektno opterećenje, odnosno, spektri uniformnog hazarda, dobijaju se kada se za istu lokaciju uradi nekoliko analiza hazarda, za iste žarišne zone i ponovljivosti, ali za različite atenuacione jednačine sa različitim periodima oscilovanja. Sa druge strane, rezultati determinističke analize koriste se da bi se za neki najjači očekivani zemljotres projektivali važni objekti kao što su brane, nuklearne elektrane i slično.

Potrebni ulazni podaci za probabilističku analizu hazarda su:

1) Geometrija seizmičkih žarišnih zona: koja obuhvata površine (za više aktivnih raseda), linije (za pojedinačne rasede), tačke (za daleka žarišta), ili zapremine (3D modelovanje za jako bliska a vrlo aktivna žarišta). Kao primer, seizmične

zone Srbije, sa različitim parametrima, koje je opisao Glavatović [29] prikazane su na Slici 19.

2) Krive ponovljivosti zemljotresa određene jačine: Rekurentne krive se definišu zasebno za svaku žarišnu zonu na osnovu istorijskih seizmoloških podataka o dogođenim zemljotresima. Kao rezultat dobija se informaciju o tome koliko je neka zona seizmična. Tražena kriva ponovljivosti izvodi se na osnovu Gutenberg-Richter-ove krive:

$$\log N_{GR} = a - bM, \quad (4)$$

gde  $a$  zavisi od ukupne aktivnosti posmatrane žarišne zone, odnosno predstavlja broj zemljotresa, dok  $b$  definiše odnos između broja zemljotresa različite jačine (svetski prosek:  $b \sim 1$ ) – ima  $10^b$  puta više zemljotresa  $M=5$  nego  $M=6$ , primera radi (Slika 12).



Slika 12. Šematski prikaz krive ponovljivosti

Pored Gutenberg-Richter-ovih parametara  $a$  i  $b$ , za svaku žarišnu zonu se zasebno procenjuju i minimalne i maksimalne magnitude kako bi se ograničile krive ponovljivosti sa obe strane. Pomoću  $a$ ,  $b$ ,  $M_{\min}$  i  $M_{\max}$  se zatim definišu funkcija gustine verovatnoće kao i godišnji prirašt broja zemljotresa sa  $M > M_{\min}$ . Funkcija gustine verovatnoće za magnitudu se izračunava prema sledećoj formuli:

$$f_m(M) = \beta \frac{\exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, \quad M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (5)$$

gde gde je  $\beta$  jednako  $(\ln 10)b$ , dok je  $f_{\eta m}$  funkcija gustine verovatnoće za rastojanje od žarišta zemljotresa.  $v$  predstavlja godišnji broj zemljotresa jačine veće od zadate donje vrednosti  $M_{\min}$  i izračunava se po sledećoj formuli:

$$\nu = \exp[a \ln 10 - (b \ln 10) M_{\min}], \quad (6)$$

gde su  $a$  i  $b$  koeficijenti "Gutenberg-Richter" krive ( $\log N_{GR(M)} = a - bM$ ), kojom se za svaku žarišnu zonu  $i$  definiše ponovljivost zemljotresa određene jačine.

3) Atenuaciona jednačina kojom se procenjuje zavisnost jačine kretanja tla od magnitude, rastojanja i lokalnog tla ili duboke geologije – najoptimalnije kada se definiše pomoću analize raspoloživih regionalnih podataka o jakom kretanju tla. O atenuacionoj jednačini koja se koristila u ovoj disertaciji pogledati potpoglavlje 6.1.

U ovoj studiji koristiće se dobro poznati "deduktivni" pristup koji su razvili Kornel (Cornell) [67] i MekGvajer (McGuire) [68] [69] za probabilističku procenu seizmičkog hazarda (PSHA). Prema "Cornell-McGuire" pristupu očekivani jednogodišnji broj zemljotresa usled kojih će amplituda  $a_{cc}$  ubrzanja tla biti veća od neke zadate vrednosti  $A$ , može se izračunati kao:

$$N(A) = \sum_{i \in I} v_i \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} G(a_{cc} > A | M, R) f_{m_i}(M) f_{r_i|m_i}(R|M) dM dR, \quad (7)$$

gde  $i$  označava broj žarišne zone (u skupu  $I$ ), dok  $v$  predstavlja godišnji broj zemljotresa jačine veće od zadate donje vrednosti  $M_{\min}$  (jednačina 6). Odnosno, direktni rezultat probabilističke analize seizmičkog hazarda je očekivana godišnja učestalost  $N(A)$ . Dalje,  $M_{\max}$  predstavlja maksimalnu magnitudu za svaku žarišnu zonu  $i$ ,  $R_{\min}$  i  $R_{\max}$  su granične vrednosti za rastojanje od posmatrane lokacije do žarišta zemljotresa za svaku zonu  $i$ ,  $G(a_{cc} > A | M, R)$  je uslovna kumulativna kriva raspodele kojom se na osnovu atenuacione jednačine definiše verovatnoća da će ubrzanje tla  $a_{cc}$  imati vrednost veću od očekivane vrednosti  $A$ , pod uslovom da se zemljotres magnitude  $M$  dogodi na rastojanju  $R$ , (računa se pomoću odabrane atenuacione krive) (videti jednačinu 3, i obratiti pažnju na standardno odstupanje  $\sigma$ ).  $f_m$  je funkcija gustine verovatnoće za magnitudu (jednačina 5) koja predstavlja verovatnoću da se desi zemljotres magnitude  $M$  (računa se pomoću krive ponovljivosti za određenu žarišnu zonu).  $f_{r|m}(R|M)$  predstavlja verovatnoću da se zemljotres magnitude  $M$  desi na rastojanju  $R$  od posmatrane lokacije (za određenu žarišnu zonu se posmatra koliki deo njene površine se nalazi unutar kruga oko posmatrane lokacije sa prečnikom  $R$ ). Za svaku žarišnu zonu  $i$  (od 1 do  $I$ ) se sračuna integral proizvoda verovatnoća  $G$ ,  $f_m$  i  $f_{r|m}$  (za sve kombinacije  $M$  i  $R$  unutar granica od min do max), a onda se na kraju sumiraju dobijeni rezultati za ukupno  $I$  zona. Dakle, da bi se probabilistički ocenio seizmički hazard za određenu lokaciju, prvo se za svaku žarišnu zonu  $i$  vrši integracija po svim vrednostima magnituda i rastojanja unutar zadatih granica, a zatim se sabiraju doprinosi od različitih zona. Ukoliko se još

prepostavi i da se razmatrani potencijalni zemljotresi dešavaju kao događaji koji su nezavisni u prostoru i vremenu (tzv. *Poisson-ov proces* [70], verovatnoća da će ubrzanje tla  $a_{cc}$  bar jednom u toku godinu dana imati vrednost veću od  $A$  je:

$$P(A) = 1 - \exp[-N(A)] , \quad (8)$$

i ova (jednogodišnja) verovatnoća se onda ne menja u toku vremena.

Prepostavke za *Poisson-ov proces* su sledeće:

- 1) zemljotresi su prostorno nezavisni,
- 2) zemljotresi su vremenski nezavisni,
- 3) verovatnoća da se dva zemljotresa dese u isto vreme na istom mestu se približava nuli.

Prva navedena prepostavka ukazuje na to da dešavanje ili nedešavanje nekog zemljotresa na jednoj lokaciji neće uticati na to da li će se neki drugi zemljotres desiti na nekoj drugoj lokaciji. Druga prepostavka najviše važi za umereno jake i jake zemljotrese i ukazuje na to da kod seizmotektonskih procesa ne postoji pamčenje. Treća prepostavka ukazuje na to da se u nekom kratkom vremenskom intervalu na istom mestu ne mogu desiti dva glavna udara.

Ako se uzme u obzir tzv. binomialna distribucija događaja, verovatnoća da će ubrzanje tla  $a_{cc}$  bar jednom u toku  $t$  godina imati vrednost veću od  $A$  je:

$$P_t(A) = 1 - [1 - P(A)]^t , \quad (9)$$

Ova formula se može shvatiti tako da će  $P_t(A)$  predstavljati nivo rizika za očekivani ekonomski vek konstrukcije od  $t$  godina. Recipročna vrednost očekivanog godišnjeg broja zemljotresa, usled kojih će amplituda  $a_{cc}$  ubrzanja tla biti veća od neke zadate vrednosti  $A$ , odnosno recipročna vrednost godišnje učestalosti se izračunava prema:

$$T_r = N(A)^{-1} , \quad (10)$$

i obuhvata u sebi sve moguće zemljotrese koji doprinose seizmičkom hazardu na posmatranoj lokaciji. Dakle, iako se parametar  $T_r$  često koristi u inženjerskoj literaturi za opisivanje nivoa hazarda i obično se naziva "povratni period", on zapravo nema jasno fizičko značenje [71].

### 6.3. ALARP metoda procene rizika

Procena rizika predstavlja jednu od osnovnih komponenti analize rizika, pored upravljanja rizikom i komunikacije rizika. Aktivnosti koje se bave analizom, identifikacijom, kao i samom procenom veličine rizika zdravlja na radu su veoma povezane. Cilj identifikacije rizika jeste uočavanje prioritetnih rizika koji se dobijaju nakon određivanja svih potencijalnih rizika. Kako bi se ocenio prioritet rizika potrebno je vršiti određivanje veličine rizika. Na taj način dolazi se i do zaključaka koji vode do najboljeg odgovora na rizik.

Procena rizika predstavlja sistematski proces koji opisuje prirodu, verodostojnost i intenzitet rizika vezanog za situaciju, akciju ili zagađujuću substancu, ili događaj koji uključuje prisustvo neodređenosti [13]. Metode za procenu veličine rizika zdravlja na radu se mogu podeliti na:

- kvalitativne,
- semikvantitativne i
- kvantitativne.

Kvalitativna metoda procene rizika bazirana je na proceni eksperta, odnosno ličnog iskustva i rasuđivanja procenitelja rizika i/ili korišćenju raspoloživih kvalitativnih, nenumeričkih podataka po pitanju verovatnoće nastanka povrede, kao i veličine povrede. Ovakav pristup u opštem slučaju ne zahteva brojčane podatke o prethodnim štetnim događajima, uzrocima i posledicama, a uslovjava da krajnji rezultat procene rizika bude opisno, tj. kvalitativno iskazana veličina rizika (kao npr. visoki rizik, umereni rizik, i sl.). Za verovatnoću pojave neželjenog događaja kvalitativni kriterijumi koriste reči kao što su: retko, neverovatno, moguće, verovatno ili skoro sigurno. Ova metoda za procenu rizika je dosta subjektivnog karaktera jer se rizik procenjuje na osnovu subjektivnih kriterijuma. U praksi se optimalno koriste kvalitativne skale sa tri do sedam kvalitativnih opisa, što zahteva izražen stručni pristup analizi potencijalnih opasnosti/štetnosti [36].

Kvantitativna metoda procene rizika bazirana je na numeričkim vrednostima kako bi se opisala verovatnoća nastanka neželjenog događaja i veličine štete, odnosno posledica. Kako se verovatnoće definišu kao brojne vrednosti, potrebno je posedovati statističke podatke o štetnim događajima. Da bi se posledice definisale putem brojčanih vrednosti, neophodno je spovođenje različitih analiza povredljivosti preko stvarnih merenja ili matematičkog modelovanja. U oblasti bezbednosti i zdravlja na radu za procenu rizika se najčešće koriste kvalitativne procene za niske i srednje rizike, dok kvantitativna metoda za procenu rizika zahteva velika ulaganja, pa se iz tog razloga najčešće

koristi za visokorizične operacije. Takođe, kvantitativne metode se koriste kod procene rizika od buke i drugih fizičkih ili hemijskih štetnosti i slično, gde je jasno određen nivo dozvoljenog izlaganja, kao i povećanog izlaganja. Preporuke razvijenih zemlja EU ukazuju da je potrebno gde god je moguće uvesti kvantitativnu procenu rizika, iz razloga subjektivnosti kvalitativnih metoda. Postoji niz preporuka i tabela koje ukazuju na način na koji se može efikasnije i jednostavnije vršiti kvantitativna procena rizika u oblasti bezbednosti i zdravlja na radu [36].

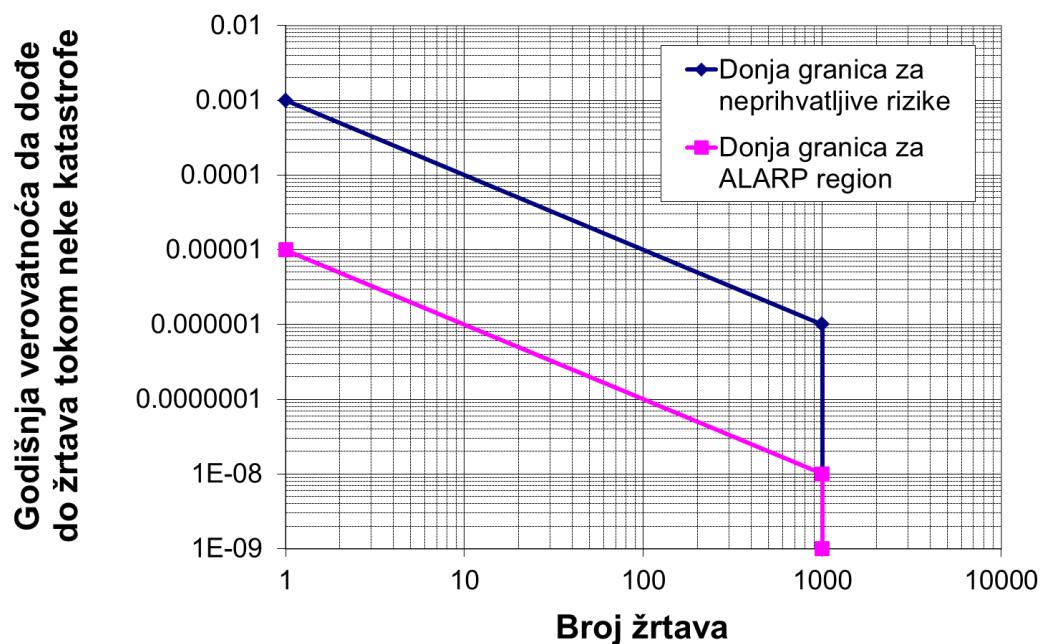
Semikvantitativna procena rizika je bazirana na kvalitativnoj proceni, pri čemu se na osnovu kvalitativne odrednice definišu nivoi (veličine) verovatnoće i povrede u vidu numeričkih vrednosti. Ova vrsta metode ima u praksi široku primenu, jer najčešće nije moguće precizno proceniti verovatnoću ili veličinu posledice. Kvantitativne skale sa određenim brojem kvalitativnih opisa za verovatnoću i posledicu su osnov za procenu mere rizika, koja se najčešće određuje kao proizvod nivoa rangiranja verovatnoće i potencijalnih štetnih efekata. Pored kvantitativne mere rizika postoji i kvalitativno tumačenje, odnosno postoji i opis i odgovarajuća brojčana vrednost. Zajedničko za sve polukvantitativne metode za procenu rizika je da za premeštanje kvalitativnih u kvantitativne ocene pojedinih faktora rizika koriste pristup rangiranja. Odnosno, svakom stepenu kvalitativne ocene pridodajemo rang - neku uslovnu numeričku vrednost. Jedna od osnovnih prednosti ove metode za procenu rizika je jednostavnost, dok je mana nemogućnost uočavanja neznatnih razlika ili nedostataka, pa se može zaključiti da metoda nije previše precizna. Postoji veliki broj metoda procene veličine rizika zdravlja na radu, najosnovniji pristupi procene rizika kod semikvantitativnih metoda su:

- matrična metoda procene rizika, koja je zasnovana na kombinaciji formiranja matrica i tabela,
- tabelarna metoda procene rizika, koja je zasnovana na formiranju tabela (obrazaca) od svih elemenata za procenu rizika, kao i samog rizika i
- grafička metoda procene rizika [36] [13].

Pored ovih metoda, postoje i druge semikvantitativne metode bazirane na broju povreda i određivanju kvaliteta procesa rada tj. kombinovanju brojčanih i kvalitativnih parametara [36].

**ALARP metoda za procenu rizika** (eng. "as low as reasonably practicable") bazirana je na smanjenju rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanju najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo (Slika 13) [13].

Kako je poznato da ne postoji industrija koja je potpuno nerizična, veliki broj kompanija i institucija se opredeljuje upravo za ovu metodu procene rizika za bezbednost i zdravlje na radu. ALARP region leži između neprihvatljivog visokog rizika i prihvatljivog rizika. U slučaju da se utvrdi da neki rizik "upada" u neprihvatljiv region, potrebno je dalje različitim metodama prevencije smanjiti rezidualni rizik. ALARP nivo se postiže kada vreme, problemi i troškovi dodatnih mera smanjenja postanu nerazumno nesrazmerni dodatnom smanjenju rizika. Kada se odredi nivo rizika, fokus se pomera na ispitivanje alternativnih opcija za poboljšanje sigurnosnih sistema, odnosno samo poboljšanje bezbednosti i zdravlja na radu. Tokom različitih operacija, pažnja je na prikupljanju povratnih informacija, poboljšanju procedura i upravljanju promenama radi održavanja rezidualnog rizika na nivou ALARP-a. Bitno je napomenuti da je neophodno periodično vršenje ALARP metode iz razloga što se nivo rizika može menjati [72] [73].

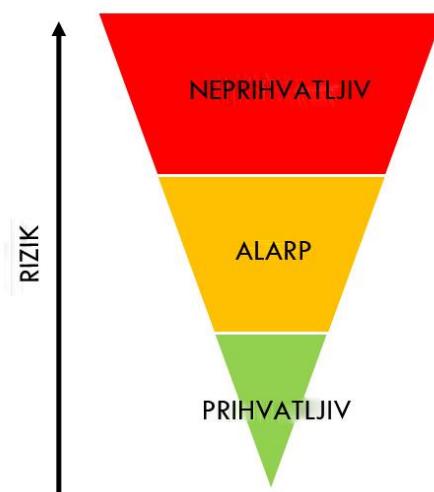


Slika 13. Primer ALARP dijagrama iz smernica za rizike vlade Hong Konga ("Hong Kong Government Risk Guidelines" (HKRG)) [74]

Nekada se koristi i skraćenica SFAIRP ("so far as is reasonably practicable") umesto ALARP ("as low as reasonably practicable"). SFAIRP je pojam koji se najčešće koristi u Zakonu o zdravlju i sigurnosti na radu, dok je ALARP termin koji koriste specijalisti za rizik. Prema mišljenju HSE-a (*Health and Safety Executive*) [75], SFAIRP je praktično jednako ALARP-u, ali je SFAIRP termin koji je uključen u Zakon o zdravlju i sigurnosti na radu.

*Executive)*, ova dva izraza su zamenljiva, osim u slučaju pravljenja formalnih pravnih dokumenata kada se mora koristiti tačna pravna fraza [72].

U suštini, kada je neki rizik procenjen kao ALARP nivo rizika, to automatski znači da se prihvata taj nivo rizika, koji dalje ne može u velikoj meri da ugrozi bezbednost i zdravlje. Odluka je ponderisana u korist zdravlja i sigurnosti, jer pretpostavka je da nosilac dužnosti, odnosno lice ili institucija odgovorna za predmet istraživanja, treba da sprovede mere smanjenja rizika. Nosilac dužnosti mora biti u stanju da pokaže da dalje smanjenje rizika preko preventivnih mera jeste preporučljivo ali nije neophodno. Dakle, proces se ne svodi na balansiranje troškova i koristi od mera, već prihvatanje i uvođenje novih mera, osim tamo gde su iste isključene jer uključuju grubo nesrazmerne žrtve i ne utiču na poboljšanje bezbednosti i zdravlja na radu (Slika 14) [72].



Slika 14. Stratifikacija rizika prema ALARP metodi procene rizika [73]

Cilj ALARP metode procene rizika leži u dokumentovanom razmatranju opcija poboljšanja, kako implementiranih tako i diskontovanih, na nivou rešenja koja odgovara fazi projekta. Određivanje nivoa rizika preko ALARP-a znači da se uzme balansiran stav i postigne obavezni konsenzus sa posebnim razmatranjem unapređenja bezbednosti i zdravlja na radu [73].

U pottoplavlju 6.4.5 će detaljno biti analizirana ALARP metoda na primeru nacionalnog parka Kopaonik za zaposlene u okviru skijališta, gde će se pomoći

različitih formula odrediti nivo povredljivosti objekata u kojima ljudi borave, da bi se procenio nivo rizika za nekoliko različitih scenarija.

#### **6.4. Verifikacija metode na primeru nacionalnog parka Kopaonik za zaposlene u okviru skijališta**

Verifikacija unapređene metode za procenu rizika od snežnih lavina izazvanih zemljotresom vršena je na primeru nacionalnog parka Kopaonik. U studiji predstavljenoj u sledećim odeljcima, prvo su definisane padine za analiziranu površinu pomoću QGIS softvera, a zatim, korišćenjem empirijskog odnosa između maksimalnog ubrzanja tla (PGA), nagiba terena i debljine snega, predstavljen je niz alternativnih probabilističkih mapa koje prikazuju opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom. Ove karte su izračunate za verovatnoće prekoračenja amplituda kretanja tla od 2%, 5% i 10% za 50 godina (povratni period od 2.475, 975 i 475 godina, respektivno), i sa ili bez uzimanja u obzir podataka o dubokoj geologiji područja, pored podataka o uslovima lokalnog tla, kao i za prosečnu debljinu snega za mart na Kopaoniku koja iznosi 65,65cm.

Rezultati pokazuju da varijacije geološkog okruženja za određene delove analizirane oblasti dovode do 30-70% veće vrednosti maksimalnog ubrzanja tla (PGA) nego vrednosti dobijene u standardnim kartama hazarda (koje se kreiraju pomoću jednačina za prognoziranje kretanja tla koje ne uzimaju u obzir duboku geologiju, već samo lokalne uslove tla). Sa ovakvim saznanjem, rizična oblast gde može doći do pojave snežnih lavina izazvanih zemljotresom je znatno proširena, u poređenju sa površinom koja se procenjuje na osnovu standardnih karata seizmičkog hazarda.

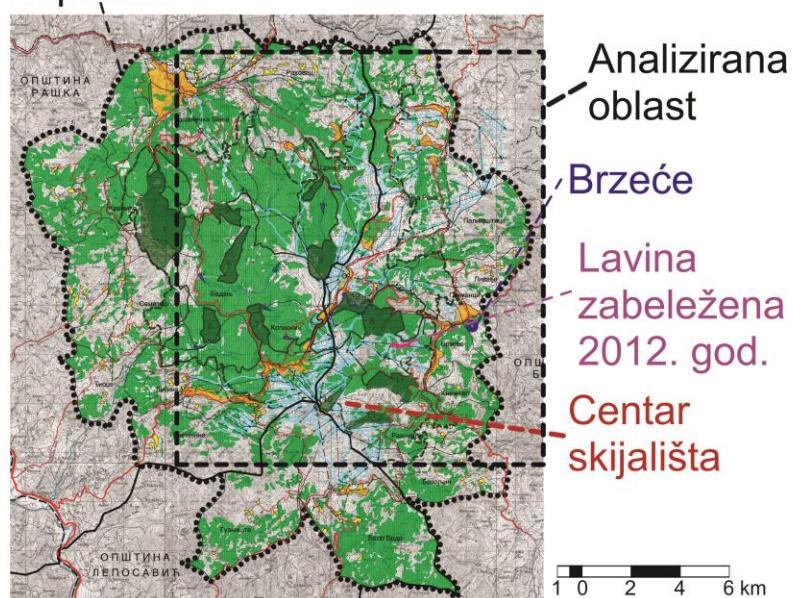
##### *6.4.1. Geografske odlike nacionalnog parka Kopaonik*

Kopaonik je najveći i najduži planinski masiv u centralnoj Srbiji. Na Kopaoniku se nalazi najveće skijalište u Srbiji, kao i drugo po redu najveće skijalište u jugoistočnoj Evropi (prvo je Bansko, koje se nalazi u Bugarskoj). Prostire se na oko ~80km u pravcu sever-jug, sa centralnim relativno ravnim regionom sa nadmorskom visinom od oko 1.700m, okružen nizom planinskih vrhova, a najviši su Gobelja (1.934 m), Karman Vučak (1.936m), Suvo rudiste (1.976m) i Pančićev vrh (2.017m).

Centralni deo Kopaoničkog regiona proglašen je nacionalnim parkom 1981. godine, a šire područje Kopaonika proglašeno je područjem posebne namene

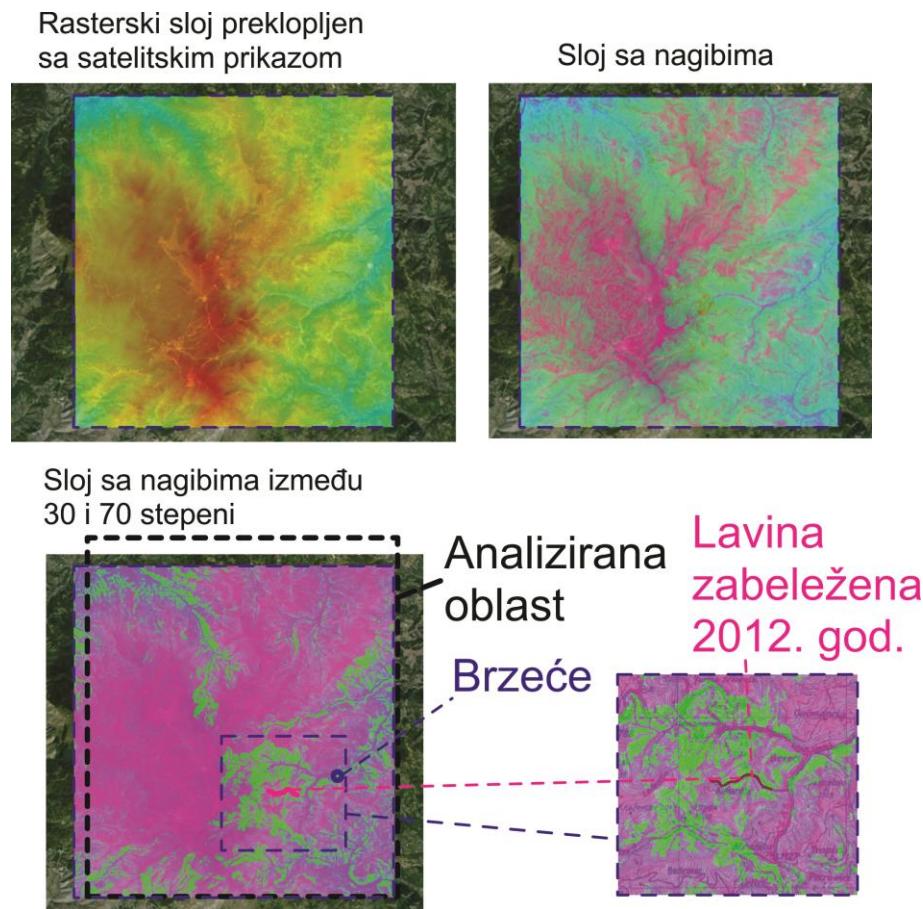
Nacionalnog parka Kopaonik 2009. godine [75] (Slika 15). Na Slici 15 prikazan je centar skijališta Kopaonik, kao i granica područja posebne namene Nacionalnog parka Kopaonik, granica područja u kojoj se analiziraju snežne lavine izazvane zemljotresom, lokacije nekadašnje akcelerografske stanice "Brzeće", gde je zabeleženo kretanje tla tokom niza zemljotresa, kao i lokacija snežne lavine koja je zabeležena 2012. godine.

Granica područja posebne  
namene Nacionalnog parka  
Kopaonik



Slika 15. Mapa nacionalnog parka Kopaonik sa označenim delovima bitnim za studiju slučaja

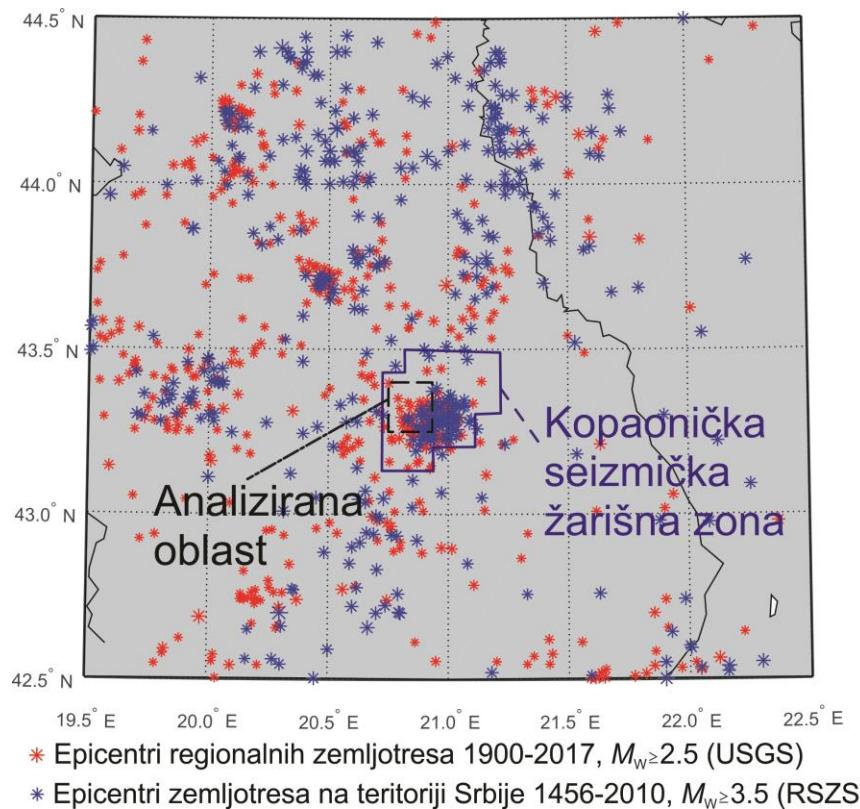
Za analizu nagiba područja Kopaonika korišćen je Quantum GIS 1.8.0-Lisboa softver. Prvi korak je bilo prikazivanje satelitske reprezentacije koja je preklopljena sa rasterskim slojem ispitivane površine (Slika 16, gore desno). Zatim je prikazan sloj koji prikazuje precizne vrednosti nagiba (Slika 16, gore desno), i koristeći raster kalkulator, svi nagibi izvan serije opsega: 25-30°, 30-35°, 35-40°, 40-45°, 45-50° i > 50°, su zanemareni (Slika 16, donji levi pokazuje primer za opseg od 30-70° označen zelenom bojom). Na donjem desnom uglu Slike 16 prikazana je i lokacija snežne lavine iz 2012. godine (koja nije bila izazvana zemljotresom) koja je primećena na jednoj ski stazi sa nagibom od 35°, jugozapadno od sela Brzeće.



Slika 16. Primer procesa definisanja nagiba u analiziranoj oblasti korišćenjem softvera Quantum GIS 1.8.0-Lisboa [53]. Na donjoj levoj mapi prikazana je bivša stanica za snimanje ubrzanja tla koja se nalazila u blizini centra Brzeća, dok je na obe donje slike prikazana snežna lavina koja je zabeležena 2012. godine.

Slika 17 prikazuje epicentre svih zemljotresa u regionu u periodu od 1900. do 2017. godine sa magnitudom  $Mw \geq 2,5$ , prema bazi podataka USGS-a (*The United States Geological Survey*) [76] i epicentre svih zemljotresa sa  $Mw \geq 3,5$ , koji su se dogodili u Republici Srbiji u periodu od 1456. do 2010. godine, prema bazi podataka Republičkog seizmološkog zavoda Srbije [77]. Na istoj Slici 17 prikazana je i oblast na kojoj su analizirane snežne lavine izazvane zemljotresom, kao i najvažnije seizmičke žarišne zone koje su korišćene u ovoj studiji za probabilističku procenu seizmičkog hazarda. Kao što se vidi sa Slici 17, analizirana oblast potпадa upravo u seizmički najaktivniju regiju u Srbiji. Takođe, na većini postojećih karata seizmičkog hazarda urađenih za Srbiju, ova

oblast ima najveću ili jednu od najvećih vrednosti maksimalnog ubrzanja tla, odnosno PGA (eng. *Peak Ground Acceleration*).



Slika 17. Prikaz epicentara regionalnih zemljotresa

Republički hidrometeorološki zavod Srbije vodi preciznu statistiku o dnevnim, mesečnim i godišnjim padavinama za celu Srbiju, pa tako i za analiziranu oblast Nacionalnog parka Kopaonik. Raspoloživi podaci o debljini snega za područje skijališta Kopaonik prikazani su u Tabeli 18. Iako sezona sa snežnim padavinama na Kopaoniku može trajati od novembra do maja, period između januara i marta se smatra periodom sa najvećim snežnim padavinama. Najveća zabeležena debljina snega iznosila je 169cm, i to u periodu od 14. do 18. marta 2006. godine. Prosečna (u periodu 2002-2017. godine) debljina snega za Kopaonik je 47,93cm, a najveći mesečni prosek debljine snega iznosi 65,65cm i zabeležen je u martu [78].

*Tabela 18. Raspoloživi podaci o debljini snega za područje skijališta Kopaonik [78]*

Posmatran period [godine]	Prosečna debljina snega [cm]	Prosečna debljina snega u januaru [cm]	Prosečna debljina snega u februaru [cm]	Prosečna debljina snega u martu [cm]	Maksimalna zabeležena debljina snega [cm]	Ukupna količina snežnih padavina [cm]
2002-2017	47,93	42,94	63,39	65,65	–	332,08
2002/2003	44,28	40,68	75,93	37,19	96	151
2003/2004	75,14	69,1	99,31	75,77	120	299
2004/2005	56,14	30,61	76,64	77,1	120	209
2005/2006	91,21	77,69	85	138,1	168	315
2006/2007	43,33	32,25	60,64	54,1	103	292
2007/2008	47,02	46,63	64,7	48,13	102	378
2008/2009	54,72	29,59	68,32	99,52	140	331
2009/2010	30,28	14,24	43,33	50,83	67	194
2010/2011	13,47	8,94	17,57	20,03	43	154
2011/2012	65,83	78,22	124,62	87,28	137	307
2012/2013	62,33	69,17	81,5	79,17	91	262
2013/2014	15,83	6,23	4,97	26,87	65	227
2014/2015	73,47	54,74	91,43	109,35	142	394
2015/2016	20,94	32,32	19,52	33,1	74	250
2016/2017	31,38	51,6	34,71	39,58	61	222

#### 6.4.2. Duboka geologija

Većina empirijskih modela za skaliranje spektara odgovora za potrebe građevinskih analiza uzima u obzir isključivo efekte lokalnih uslova tla. Efekti dubljeg geološkog okruženja lokacije najčešće se zanemaruju u izradi ovih modela i to iz razloga nedostupnosti podataka o dubokoj geologiji za akcelerografske lokacije u većini regiona. Tipovi tla koji su opisani u Evrokodu 8 su isključivo definisani u zavisnosti od karakteristika tla u prvih 30m stratigrafskog profila. Tlo tipa A, na primer, odgovara stenskim ili sličnim geološkim formacijama (uključujući najviše 5m slabijeg materijala na površini), čija je prosečna brzina smičućih talasa u prvih 30m (pri smičućim deformacijama reda veličine  $10^{-5}$  ili manjim), veća od 800m/s. Međutim, nekoliko empirijskih analiza pokazalo je da, čak i ako se lokalni uslovi tla uzmu u obzir sa više od 30m stratigrafskog profila (prateći npr. klasifikaciju Sid-a), empirijske procene jakog kretanja tla će i dalje biti znatno pogrešne ako se duboka geologija takođe ne uzme u obzir.

Iz tog razloga, prognozni model, koji istovremeno uzima u obzir i uslove lokalnog tla i duboku geologiju predstavljen je jednačinom 3 dатој у потпоглављу 6.1. Rezultati dobijeni regresionom analizom atenuacione jednačine dati su u Tabeli 19. Tabela 19 prikazuje dobijene koeficijente skaliranja i standardna odstupanja empirijskih prediktivnih jednačina za region severozapadnog Balkana, za skaliranje vrednosti PGA i 4 različite amplitude pseudo-apsolutnog spektra ubrzanja sa 5% viskoznim prigušenjem. Ove vrednosti su izračunate na osnovu 203 zapisa jakog kretanja tla u bivšoj Jugoslaviji u periodu od 1976. do 1983. godine [79].

U studiji Bulajića i saradnika [31], odvojeni skupovi jednačina razvijeni su i uzimajući u obzir samo podatke o lokalnim uslovima tla. Osim toga, osnovni skup jednačina za skaliranje zasnovan je na ukupno 203 zapisa jakih kretanja tla (svaki sa tri ortogonalne translacijske komponente), zabeleženih u bivšoj Jugoslaviji u periodu od 1976. do 1983. godine. Takođe, razvijen je još jedan alternativni skup jednačina na osnovu akcelerograma snimljenih na epicentralnim rastojanjima manjim od 30km, s obzirom na to da takvi podaci sadrže oko 73% korišćenog skupa podataka. Tabela 19 prikazuje koeficijente za četiri različita skupa jednačina za skaliranje - (1) jednačine koje uzimaju u obzir uslove lokalnog tla i duboku geologiju, a zasnivaju se na zapisima za sva rastojanja, (2) jednačine koje uzimaju u obzir i lokalne uslove tla i duboku geologiju i zasnovane su na zapisima na rastojanjima manjim od 30km, (3) jednačine koje uzimaju u obzir samo lokalne uslove tla i zasnivaju se na zapisima za sva rastojanja, (4) jednačine koje uzimaju u obzir samo uslove lokalnog tla, i zasnovane su na zapisima na rastojanjima manjim od 30km. Na Slici 18 prikazane su atenuacione krive koje su dobijene na osnovu ove četiri grupe jednačina.

U skladu sa nomenklaturom koju su koristili Li (Lee) i Manić [58], parametar  $S_L$  se koristi za definisanje lokalnog tla, dok parametar  $s$  definiše duboku geologiju, koeficijent  $C_4$  se koristi za modifikaciju jačine kretanja tla, kada su uslovi lokalnog tla definisani kao čvrsto tlo ( $S_L = 1$ ) i izostavljen je u slučaju stenskih uslova tla ( $S_L = 0$ ). To znači da, ako na primer koristimo prvi red koeficijenata u tabeli 19, vrednost PGA je  $10^{0,19752} = 1,58$  puta veća na čvrstom tlu nego na stenskom tlu. Analogno tome, ako postoji, koeficijent  $C_5$  se koristi za modifikovanje jačine kretanja tla kada je duboka geologija definisana kao prelazna forma ( $s = 1$ ), a izostavljen je u suprotnom, dok se koeficijent  $C_6$  koristi kada je duboka geologija definisana kao geološki sediment ( $s = 0$ ) i izostavljen je u obrnutom slučaju. Ako su prisutni i  $C_5$  i  $C_6$  koeficijenti, ali se ne koriste, tada imamo predviđanja za geološku stenu ( $s = 2$ ). Ovo dalje znači, ako ponovo upotrebimo prvi red koeficijenata u Tabeli 19, odnosno atenuacionu jednačinu (za PGA vrednosti) za

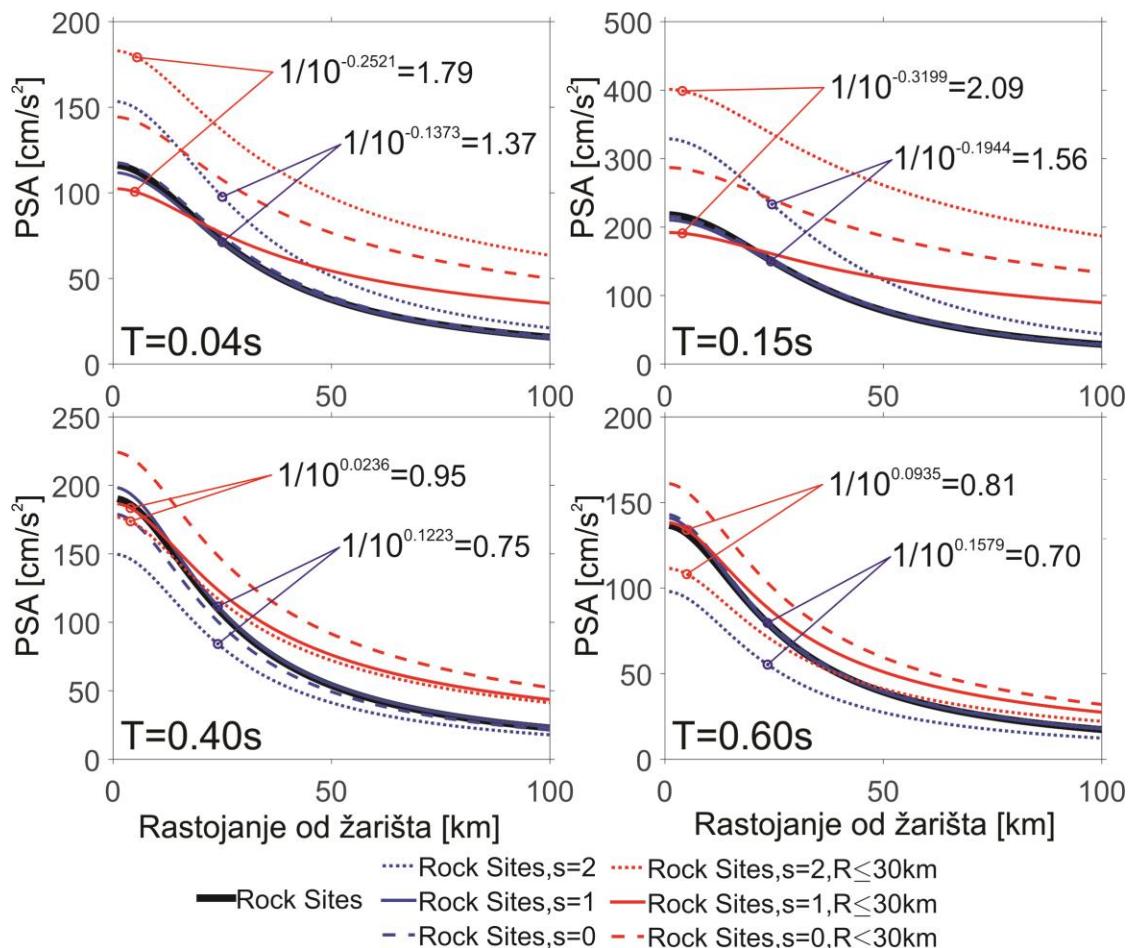
sva rastojanja, geološka stena će imati  $1 / 10^{-0,12580} = 1,34$  puta veće vrednosti PGA od prelaznih geoloških formi. Sa druge strane, ako se koriste koeficijenti u Tabeli 19 za udaljenosti (od žarišta do posmatrane lokacije) manje od 30km, geološka stena će imati  $1 / 10^{-0,23694} = 1,73$  puta veće vrednosti PGA od prelaznih geoloških formi.

*Tabela 19. Koeficijenti za skaliranje u jednačini 3.*

$T$ [s]	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$R_0$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$\sigma_{\log}$
Efekti plitke i duboke geologije, sva rastojanja								
0	-0,85404	0,37466	-1,53071	25,2	0,19752	-0,12580	-0,11081	0,27686
0,040	-0,72512	0,34976	-1,49254	25,5	0,16912	-0,13727	-0,11527	0,27445
0,150	0,31286	0,37469	-1,91183	35,8	0,20714	-0,19435	-0,18353	0,28841
0,400	-2,15260	0,51475	-1,31546	17,6	0,34202	0,12226	0,07728	0,32707
0,600	-2,76071	0,56176	-1,23358	16,1	0,26369	0,15788	0,16384	0,33537
Efekti plitke i duboke geologije, rastojanja od žarišta do lokacije manja od 30 km								
0	-1,96444	0,37454	-0,75721	19,4	0,13023	-0,23694	-0,09213	0,27516
0,040	-1,91578	0,35176	-0,67209	18,6	0,10124	-0,25212	-0,10314	0,27458
0,150	-1,86195	0,38044	-0,54985	23,7	0,12154	-0,31990	-0,14563	0,27975
0,400	-2,75932	0,52671	-0,86846	16,2	0,28784	0,02356	0,10329	0,31999
0,600	-3,22312	0,59035	-0,96225	16,1	0,27619	0,09347	0,15968	0,33865
Efekti samo plitke geologije, sva rastojanja								
0	-1,05245	0,36852	-1,47299	23,4	0,20813	–	–	0,27906
0,040	-0,94717	0,34347	-1,42773	23,4	0,18355	–	–	0,27713
0,150	-0,04573	0,36421	-1,79860	32,7	0,21784	–	–	0,29467
0,400	-1,98289	0,51895	-1,35851	19,0	0,31643	–	–	0,32840
0,600	-2,56735	0,57114	-1,28375	17,8	0,26304	–	–	0,33890
Efekti samo plitke geologije, rastojanja od žarišta do lokacije manja od 30 km								
0	-1,76196	0,36005	-1,00629	19,4	0,22640	–	–	0,28337
0,040	-1,71931	0,33607	-0,92480	18,6	0,20080	–	–	0,28384
0,150	-1,55641	0,35955	-0,89941	22,7	0,24042	–	–	0,29425
0,400	-2,69403	0,53349	-0,91683	16,7	0,32795	–	–	0,32120
0,600	-3,17738	0,60304	-0,96792	16,7	0,30341	–	–	0,34138

Slika 18 prikazuje PSA ordinate za  $M = 6$ , i  $H = 10$ km, za periode oscilovanja od  $T = 0,04$ s,  $0,15$ s,  $0,40$ s i  $0,60$ s, izračunate korišćenjem jednačine 3 i koeficijenata iz Tabele 19, za stenske uslove lokalnog tla ( $S_L = 0$ ) i za različite parametre duboke geologije ( $s = 2$  za stenske uslove,  $s = 1$  za prelazne geološke forme, i  $s = 0$  za geološke sedimente). Plave krive pokazuju mediane empirijske prognoze dobijene korišćenjem koeficijenata razvijenih za sva rastojanja od žarišta do posmatrane lokacije, dok crvene krive pokazuju predviđanja dobijena korišćenjem koeficijenata razvijenih za rastojanja manja od 30km. Svaka slika

takođe pokazuje koliko je puta PSA na geološkim stenama ( $s = 2$ ) veće (ili manje) od PSA kod prelaznih geoloških formi ( $s = 1$ ).



Slika 18. Atenuacione krive

Zatim, na Slici 18 debele crne krive prikazuju mediane empirijske prognoze sračunate korišćenjem koeficijenata dobijenih uzimajući u obzir samo lokalne uslove tla, dok plave i crvene krive pokazuju predviđanja dobijena korišćenjem koeficijenata dobijenih uzimajući u obzir i duboku geologiju.

Kao što se vidi sa gornje leve slike na Slici 18, procene PSA (0,04), koje se često smatraju gornjom granicom za PGA [49], su 1,79 puta veće na stenskim uslovima tla ( $s = 2$ ) nego na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ), ako se koriste empirijski koeficijenti na rastojanjima manjim od 30km, a 1,37 puta veći ako se koriste koeficijenti za sva rastojanja. Ovo se može objasniti boljim transferom

kratko-periodičnih talasa kroz geološke stene koji obično čine kompaktnije stenske formacije, kao što su graniti i bazalti. Na gornjoj desnoj slici na Slici 18 prikazani su još veći faktori amplifikacije, odnosno veće razlike za PSA (0,15), dok dve donje slike pokazuju obrnuto, odnosno, de-amplifikaciju amplituda kretanja tla za periode oscilovanja od 0,4 i 0,6 sekundi. Slika 18 takođe ukazuje da se atenuacione krive za prelazne forme ( $s = 1$ ) skoro preklapaju sa krivama koje uzimaju u obzir samo lokalno tlo. Razlog za ovo preklapanje leži u činjenici da u akcelerografskoj mreži koja je zabeležila podatke o jakim kretanjima tla sadržane u EQINFO (Earthquake information) bazi [79], većina akcelerografskih lokacija sa stenskim uslovima lokalnog tla ( $S_L = 0$ ) takođe pripada prelaznim formama duboke geologije ( $s = 1$ ) [31].

#### 6.4.3. Probabilistička analiza seizmičkog hazarda za datu oblast

Kao što je već objašnjeno u potpoglavlju 6.2, za analizu seizmičkog hazarda i ilustracije osnovnih principa probabilističke analize hazarda korišćena je jednačina 7 za računanje očekivanog jednogodišnjeg broja zemljotresa usled kojih će amplituda  $a_{cc}$  ubrzanja tla biti veća od neke zadate vrednosti  $A$ . Odlučeno je da se koriste iste zone seizmičkih izvora koje je opisao Glavatović [29], a koje su bile osnove za nekoliko analiza seizmičkih hazarda u Srbiji u protekle tri decenije (videti npr. karte Petrovića [80]), sa prvenstvenim ciljem fokusa na efekte duboke geologije. Granice i karakteristike seizmičnosti zona koje su razmatrane u ovoj studiji prikazane su na Slici 19.

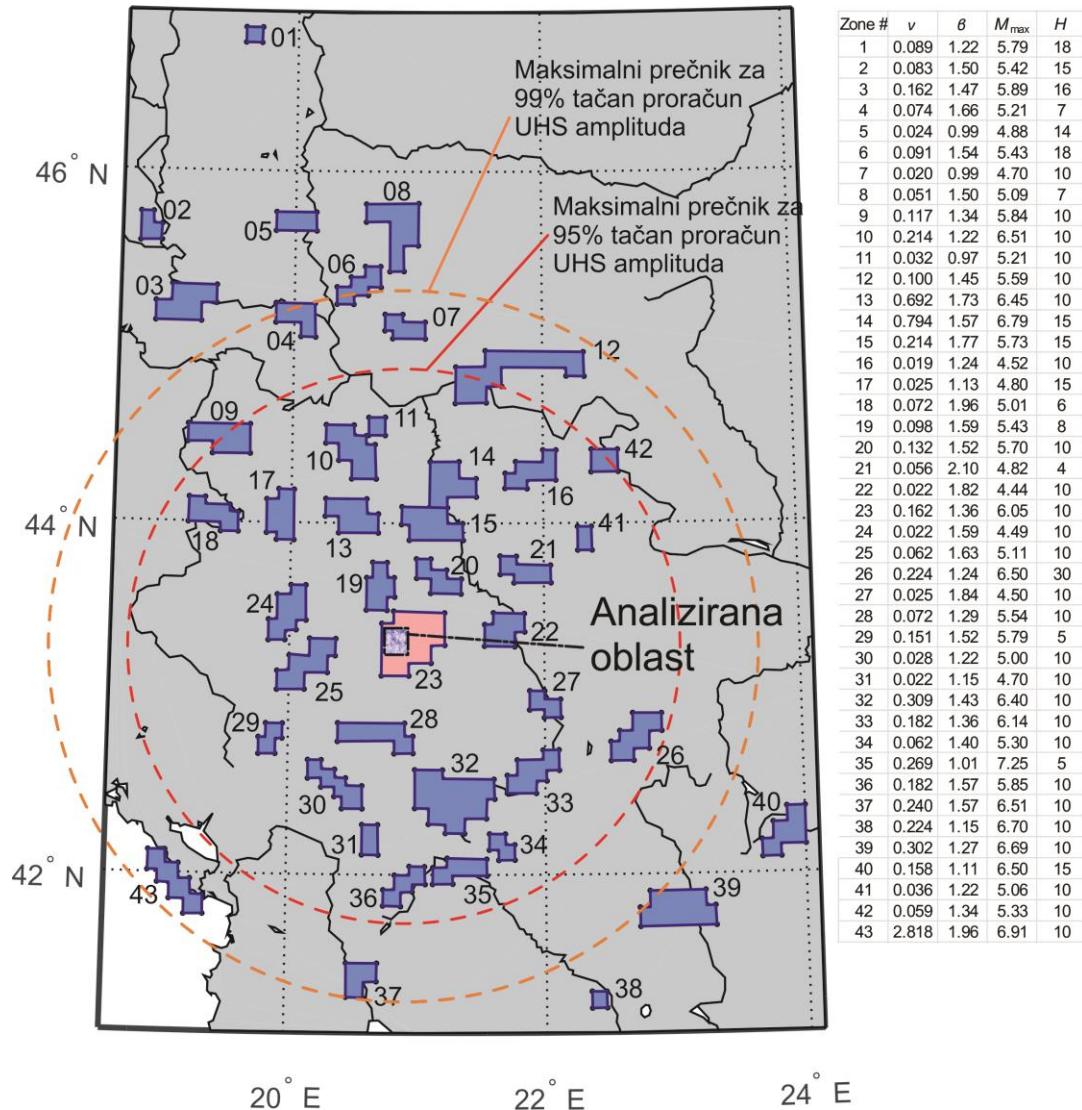
Na Slici 19 veliki krugovi označavaju potrebne radijuse oko analizirane oblasti unutar kojih sve zone moraju biti uključene u analizu da bi se postigla tačnost od najmanje 95% (manji krug), odnosno 99% (veći krug) prilikom procene hazarda na lokacijima unutar analiziranog područja [81]. Naime, u skorašnjim studijama regionalne seizmičnosti, Li i saradnici [81] su utvrdili da najveća razdaljina  $R$  uzeta u obzir u proračunima PSHA mora biti oko 225km da bi se postigla tačnost od 99% ili više, za izračunate amplitude kretanja tla sa verovatnoćama između 0,01 i 0,99 za 50 godina (povratni period  $Tr$  između 11 i 4.975 godina, respektivno), ili 175km za tačnost od 95% ili više. Ovde je važno napomenuti da prikazani radius odgovara spektralnim amplitudama kretanja tla za širok spektar perioda oscilovanja. Međutim, za visoko frekventno kretanje tla, to jest za PGA vrednosti i kratke periode oscilovanja, Li i saradnici [81] su otkrili da je maksimalni radius ponekad čak mnogo manji od 50km. Na Slici 19, dominantna žarišna seizmička zona koja pada unutar kruga od 50km oko analiziranog područja je Kopaonička zona (ova zona pokriva većinu kruga od 30km oko

analiziranog područja) i prikazana je rozom bojom. Zaključno, lokacija koja se istražuje spada upravo u Kopaoničku zonu.

Kopaonička zona (zona br. 23) se smatra seizmički najaktivnijom zonom u Srbiji, a takođe je prikazana na Slici 17, gde se može videti da upravo u ovoj zoni postoji veliki broj epicentara zemljotresa. Iako ne postoje detaljni podaci (nagibi, stope aktivnosti, podzemna geometrija itd.) o trenutno aktivnim rasedima unutar izvorišta Kopaonika, seismotektonska karta Srbije [82] ukazuje na najmanje dva glavna aktivna raseda unutar ove zone (jedan od njih je 33,2km dugačak, dok je drugi dužine od 53,2km, a epicentri zemljotresa koji su prikazani na Slici 17, koncentrisani su oko i između ova dva raseda). U zavisnosti od formule koja se koristi za procenu maksimalnih magnituda na bazi dužina raseda, duži od ova dva raseda bi možda mogao da izazove zemljotrese s magnitudama većim od  $M_{max} = 6,05$ . Dalja razmatranja na ovu temu izlaze izvan okvira ove disertacije, ali bi ih svakako trebalo obuhvatiti u nekim budućim istraživanjima vezanim za lavine uzrokovane zemljotresima u oblasti Kopaonika.

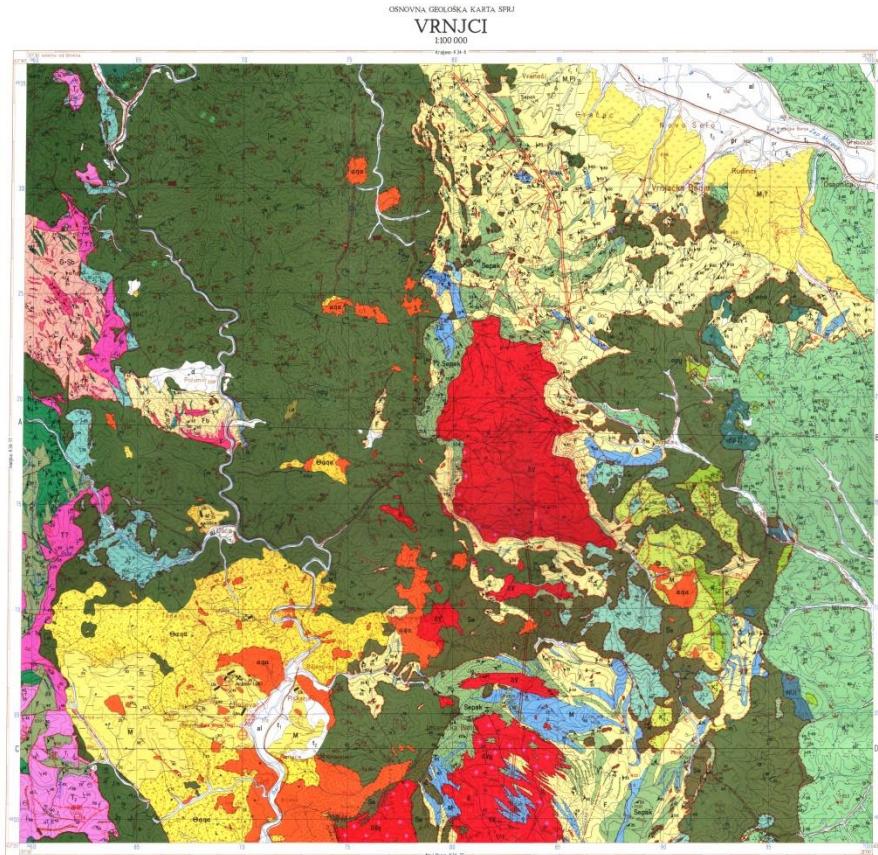
Kopaonik se struktorno sastoji od široke kupole izdužene u pravcu N-S sa jezgrom ranih oligocenskih granitoida koji upadaju u okolni prostor tektonskih jedinica [83]. U ovoj studiji, geološka klasifikacija lokacije za analizirano područje zasnovana je na tumačenju dve geološke mape koje pokrivaju čitavo područje definisano "Prostornim planom područja posebne namene Nacionalnog parka Kopaonik" [75] ("Službeni glasnik Republike" Srbije, 2009). Ove mape su: "Osnovna geološka karta - Vrnjci" [84] i "Osnovna geološka karta - Novi Pazar" [85]. Povezana geološka karta za područje analizirano u ovoj studiji prvo je podeljena na ćelije od  $15 \times 15$  sekundi u geografskim koordinatama između  $43^{\circ}15' N$  i  $43^{\circ}24' N$ , odnosno između  $20^{\circ}45' E$  i  $20^{\circ}56' E$  (Slika 20). Za svaku od 1.584 analizirane ćelije, opisana je geologija lokacije koja uključuje litostratigrafske formacije i njihove dubine.

Iz legende "Osnovne geološke karte – Novi Pazar", može se videti da na analiziranom području preovlađuju porfiroidni granodioriti sa prelazima ka kvarcmonconitima, zatim granodioritporfiriti kvarcdioritporfiriti i dioritporfiriti, lamprofiriti, kao i porfiroidni kvarcmonconiti i graniti, normalno zrnasti granodioriti i sitnozrni granodioriti i kvarcdioriti. Ove sve vrste spadaju u granitoidne stene Kopaonika iz Neogena. U seriju centralnog Kopaonika spadaju hlorit-epidot-aktinolitski škiljci, kristalasti krečnjaci, dolomiti, mermeri i kalkšisti, kao i serija sericit-hloritskih škriljaca iz Paleozoika.



Slika 19. Zone seizmičnosti sa prikazom analizirane oblasti

Da bi se dobio geološki parametar lokacije, međunarodni tim od 5 geologa i inženjera pažljivo je tumačio opis geologije lokacije koja je ranije bila procenjena za svaku ćeliju, prema metodologiji klasifikacije koju su predložili Trifunac i Brejdi [52]. Svaki član tima samostalno je klasifikovao geološku lokaciju ili kao "stena" ( $s = 2$ ) ili kao "prelazne forme" ( $s = 1$ ), a većina procena za parametar s data je za svaku ćeliju. Za analiziranu oblast nije bilo ćelija gde je geološka lokacija ocenjena kao "geološki sedimenti" ( $s = 0$ ). Rezultati su prikazani na Slici 21.



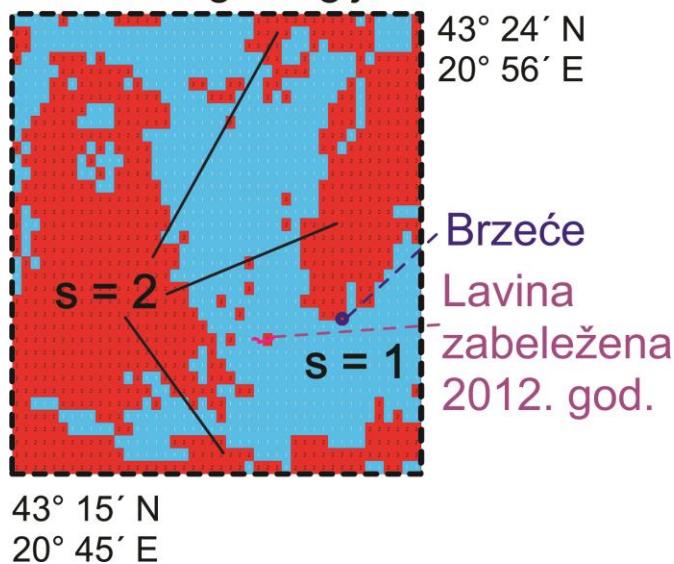
Slika 20. Osnovna geološka karta – Vrnjci [84]

Što se tiče empirijskih jednačina za skaliranje koje se koriste kao attenuacione jednačine, odlučeno je da se koristi jednačina 3 i da se izvrše dve odvojene analize. U prvoj analizi su korišćeni koeficijenti skaliranja koji uzimaju u obzir i plitku i duboku geologiju, dok su u drugoj analizi korišćeni koeficijenti skaliranja koji uzimaju u obzir samo lokalne uslove tla. U obe analize, za žarišnu Kopaoničku zonu korišćeni su koeficijenti iz Tabele 19 koji odgovaraju rastojanjima do 30km, dok su se za sve druge zone koristili koeficijenti za sva rastojanja.

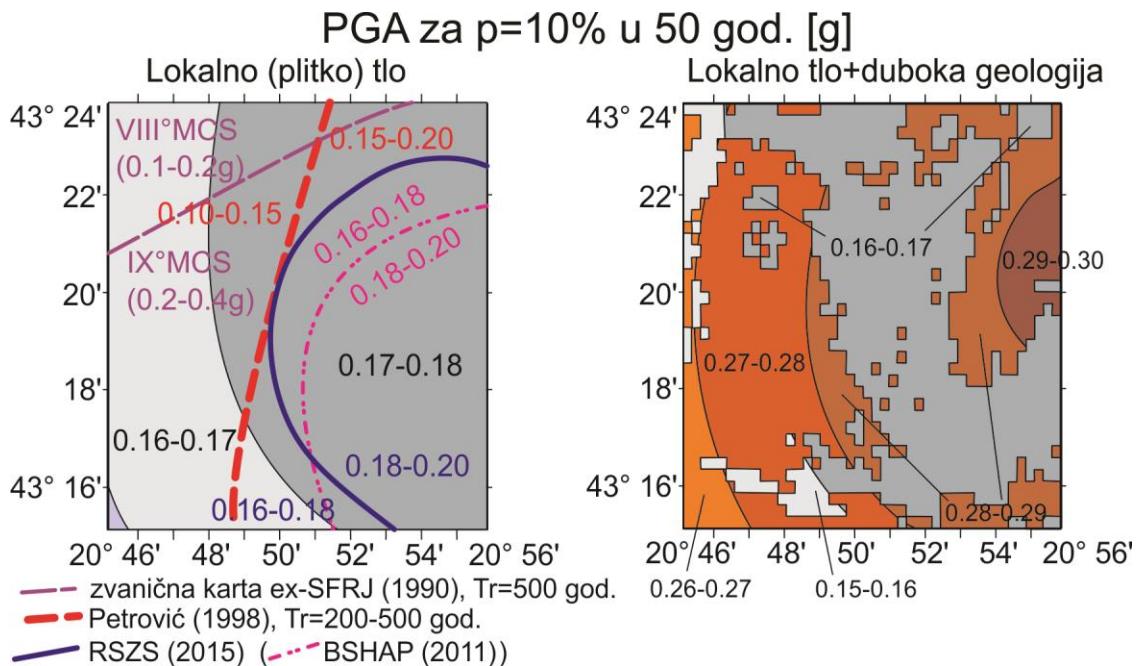
Rezultati PSHA analize u ovoj studiji prikazani su na Sl. 22a do 22c, sa dve alternativne karte na svakoj slici - "standardna" koja uzima u obzir samo lokalne uslove tla, i druga koja istovremeno uzima u obzir i lokalno tlo i duboku geologiju. Slika 22a pokazuje karte hazarda za verovatnoću prekoračenja amplituda PGA,  $p = 10\%$  u 50 godina ( $Tr = 475$  godina), Slika 22b pokazuje mape za  $p = 5\%$  u 50 godina ( $Tr = 975$  godina) i Slika 22c pokazuje mape za  $p = 2\%$  u 50 godina ( $Tr = 2.475$  godina). Mape seizmičkog hazarda koje su namenjene za upotrebu u građevinarstvu su obično date samo za stenovite lokacije. Iz tog razloga su u

ovoј studiji definisani uslovi lokalnog tla kao stenovite lokacije karakterisane u skladu sa Sid-om i saradnicima [66] [65], prosečnom brzinom smičućih talasa  $V_s > 800\text{m/s}$  i debljinom gornjeg mekšeg sloja tla manjom od 10m. Iako postoje neki delovi analiziranog područja koji pripadaju čvrstom zemljištu (kao što je akcelerografska stanica "Brzeće"), ovo se odnosi samo na ravne centralne delove dolina, dok su svi ostali delovi, koji su važni za proučavanje snežnih lavina, upravo deo stenovitog područja.

### Parametrizacija duboke geologije



Slika 21. Geološki parametri lokacije definisani za analiziranu oblast prema metodologiji klasifikacije koju su predložili Trifunac i Brejdi [52]. Takođe su date lokacije akcelerografske stanice u Brzeću i lavine iz 2012. godine.

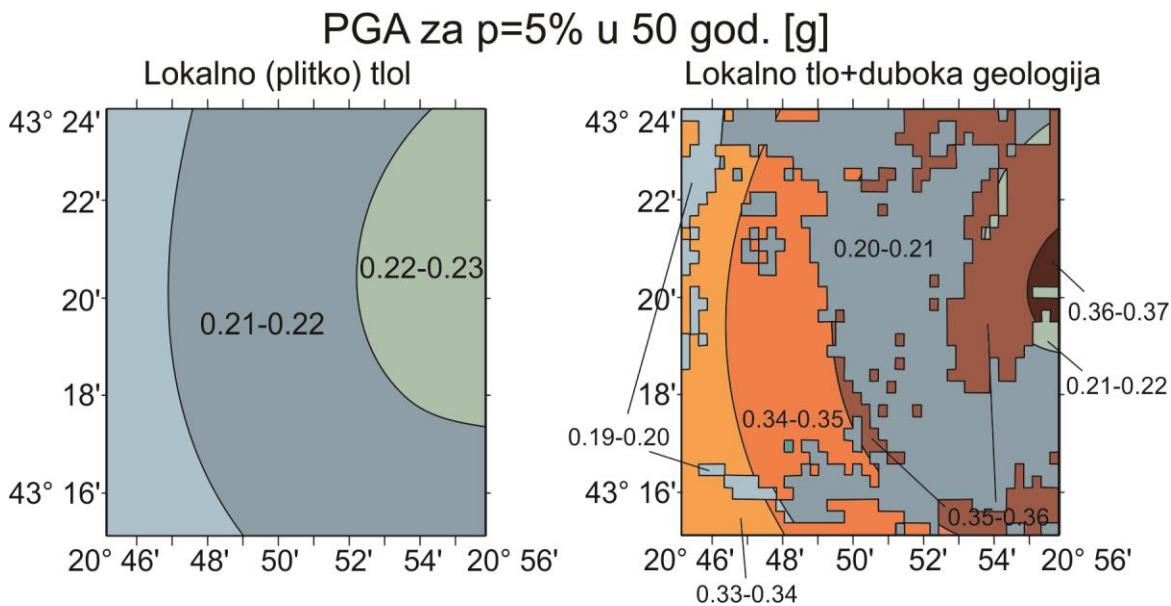


Slika 22a. Karte seizmičkog hazarda za verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 10\%$  u 50 godina. Slika sa leve strane pokazuje kartu seizmičkog hazarda koja uzima u obzir samo lokalne uslove tla, a slika sa desne strane pokazuje kartu koja istovremeno uzima u obzir i lokalno tlo i duboku geologiju.

Na levoj strani nalaze se i linije koje razdvajaju različite zone hazarda na zvaničnoj karti hazarda u propisima bivše SFRJ (Službeni list SFRJ, 1990 [86], kao i linije na karti koju je napravio Petrović [80], karti koja je predložena za Srbiju od strane Seizmološkog zavoda Srbije [87], i karte date u BSHAP projektu usklađivanja karata hazarda za zemlje Zapadnog Balkana (NATO SfP Project No. 984374, [88]).

Da bi se proverila pouzdanost rezultata naše PSHA analize, na levom delu slike 22a upoređena je naša karta rizika za  $Tr = 475$  godina, koja uzima u obzir samo lokalne uslove tla, sa nekoliko postojećih karata koje pokrivaju ovo područje. Karte koje su predložili Petrović [80], Seizmološki zavod Srbije [87], i grupa autora u projektu harmonizacije karata seizmičkog hazarda za zemlje Zapadnog Balkana [88] (NATO SfP Project No. 984374), su sve napravljene za tlo tipa A prema Evrokodu 8 [32]. Ovo tlo odgovara stenama ili sličnim geološkim formacijama (uključujući najviše 5m slabijeg materijala na površini) sa prosečnom brzinom smičućih talasa u gornjih 30m većom od 800m/s. Nijedna od ovih karata ne uzima u obzir duboku geologiju okruženja lokacije. Zvanična karta hazarda u propisima bivše SFRJ [86], koja je od 1990. godine korišćena za

potrebe projektovanja i koja se i dalje koristi u Republici Srbiji, data je za prosečne uslove lokalnog tla, dok se hazard izražava kroz stepen MCS skale makroseizmičkog intenziteta. Levi deo slike 22a prikazuje konture zvanične SFRJ karte za  $Tr = 500$  godina, konture sa karte koju je Petrović (1998) napravio za  $Tr$  u rasponu od 200-500 godina, kao i sve ostale konture za  $Tr = 475$  godina.

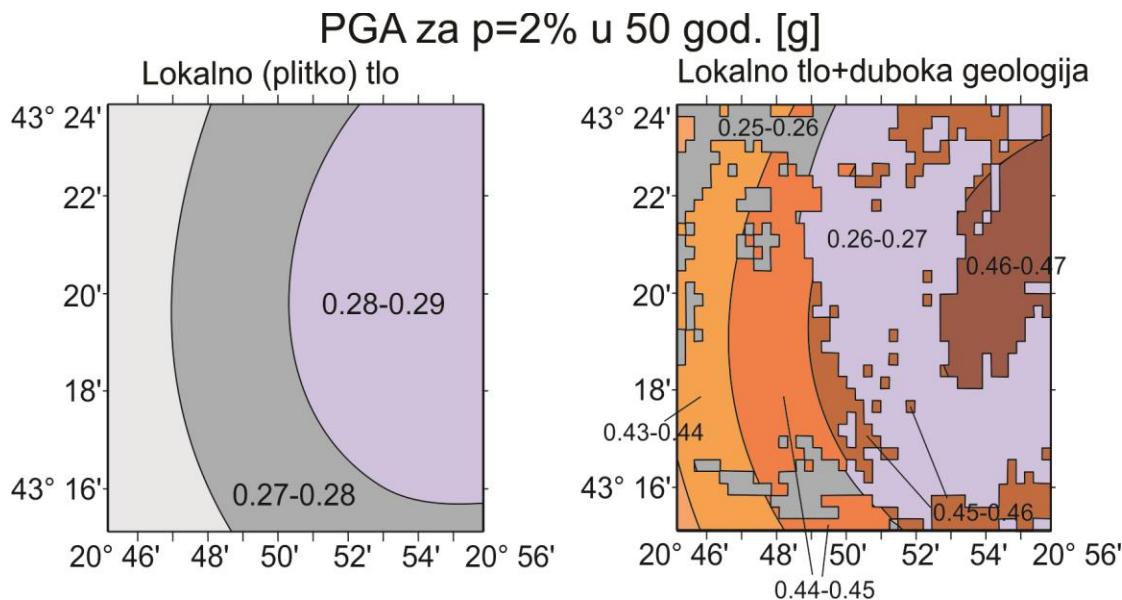


Slika 22b. Alternativne mape seizmičkog hazarda dobijene za verovatnoću prekoračenja amplitudе PGA od  $p = 5\%$  u 50 godina

Kao što se može videti sa leve strane na Slici 22a, rezultati istraživanja u ovoj disertaciji se slažu sa sve tri razmatrane karte gde je hazard izražen u PGA vrednostima i duboka geologija se ne uzima u obzir, odnosno sve vrednosti PGA padaju u relativno blizak opseg od 0,15-0,20g.

Desna strana na Slici 22a pokazuje i rezultate za  $Tr = 475$  godina, gde se sada pored uslova lokalnog tla, uzima u obzir duboka geologija definisana na Slici 21. Kao što se može videti sa ove slike, vrednosti PGA za prelazne geološke forme ( $s = 1$ ), koje su slične sa uslovima na levoj slici, su 1,73 puta manje od odgovarajućih vrednosti za geološku stenu ( $s = 2$ ). Ovde treba napomenuti da za isto područje koje se analizira u ovoj studiji, Li i Trifunac [89] dobijaju vrednost od 0,32g za PSA na  $T = 0,04$ s, za geološke stene ( $s = 2$ ) i lokalne stenovite uslove tla ( $S_L = 0$ ), što je takođe u saglasnosti sa našim rezultatima jer se PSA (0,04) može smatrati kao gornjom granicom za PGA. Takođe, treba istaći da stepen

intenziteta IX °MCS, koji je dat za ovu oblast na zvaničnoj karti hazarda bivše SFRJ [86], odgovara vrednostima PGA koje obuhvataju opseg koji uzima u obzir naše procene i na dubokim geološkim stenama i na prelaznim formama.



Slika 22c. Alternativne mape seizmičkog hazarda dobijene za verovatnoću prekoračenja amplitude PGA od  $p = 2\%$  u 50 godina

#### 6.4.4. Mikrorejonizacija oblasti pogodnih za stvaranje snežnih lavina izazvanih zemljotresom

Kao što je već opisano u poglavlju 3, snežne lavine se smatraju jednim od najopasnijih prirodnih hazarda u planinskim područjima. Formiranje lavina je obično posledica složene interakcije između terena, snega i meteoroloških uslova. Snežna lava može biti uzrokovana i zemljotresima ili eksplozijama u obližnjim kamenolomima i podzemnim rudnicima. Podolski i saradnici [5] su identifikovali ukupno 22 slučaja pojave snežnih lavina izazvanih zemljotresom širom sveta za period od 1899. do 2010. godine, koji se odnose na prirodne ili veštačke seizmičke događaje sa širokim rasponom magnitudo od  $1,9 \leq M_w \leq 9,2$ .

U većini studija o snežnim lavinama izazvanih zemljotresom, ova pojava se objašnjava uticajima ubrzanja tla na amplifikaciju pritiska na snežni pokrivač koji se nalazi na određenom nagibu. U svojoj nedavnoj studiji, Podolski i

saradnici [9] su razvili vezu između horizontalnog ubrzanja zemlje, nagiba i debljine snega, gustine i čvrstoće na smicanje, zasnovane na rezultatima eksperimenata na "vibro platformi". Ovaj odnos se može izraziti sledećom jednačinom:

$$h_{cr} = \frac{\tau_{st}}{g \cdot \rho \cdot (\sin \alpha + PGA \cdot \cos \alpha)}, \quad (11)$$

gde je  $h_{cr}$  kritična debljina snega koji pokriva slab sloj,  $\tau_{st}$  je čvrstoća na smicanje slabog sloja,  $g$  je gravitaciono ubrzanje,  $\rho$  je gustina snega koja pokriva slab sloj,  $\alpha$  je nagib i  $PGA$  je horizontalno ubrzanje tla.

Za potrebe ilustrativnog primera predstavljenog u ovoj studiji, korišćena je jednačina 11, i vrednosti od 1.200Pa za čvrstoću na smicanje  $\tau_{st}$  i  $210\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  za gustinu  $\rho$  (iste vrednosti koje su korišćene u primeru Podolskog i saradnika [9] zbog nedostatka pouzdane procene za Kopaonik) i 65,65cm za  $h_{cr}$  (ovo je prosečna debljina snega na Kopaoniku tokom meseca sa najvećom količinom padavina – vidi Tabelu 18). Ovi podaci su zatim korišćeni u proračunima vrednosti  $PGA$  za različite opsege nagiba, kao što je prikazano u Tabeli 20. Vrednosti prikazane u Tabeli 20 se potom koriste za mapiranje oblasti u kojima postoji opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, kao što je prikazano na Sl. 23a do 23c.

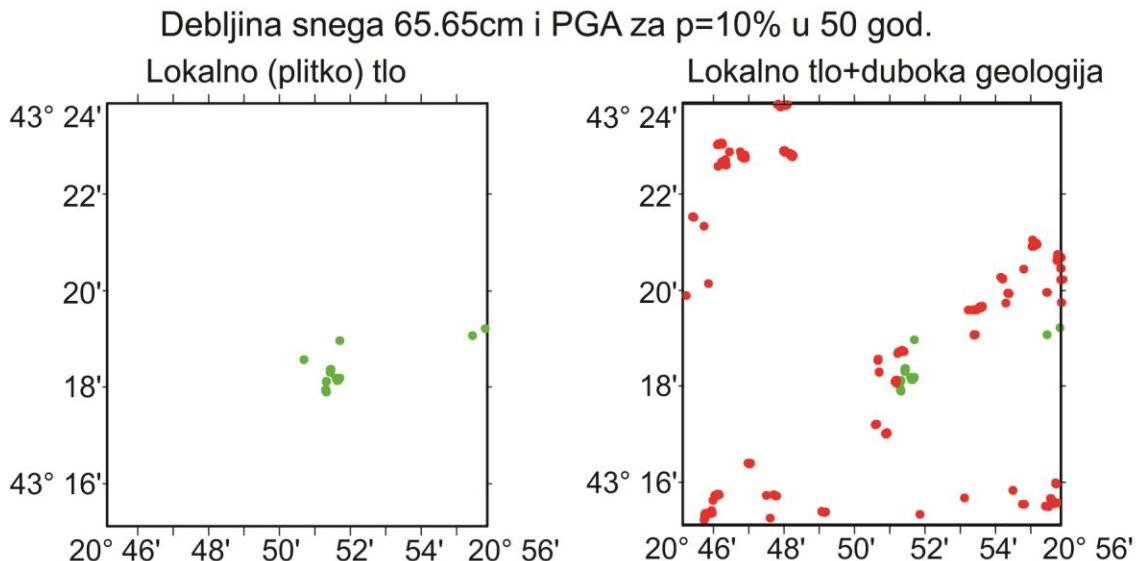
*Tabela 20. Horizontalno ubrzanje tla (PGA), izračunato korišćenjem jedn. (11), za seriju vrednosti nagiba, a za debljinu snega  $h_{cr} = 65,65\text{cm}$ , čvrstoću na smicanje  $\tau_{st} = 1.200\text{Pa}$  i gustinu  $\rho = 210\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$*

Nagib padine	25-30°	30-35°	35-40°	40-45°	45-50°	>50°
PGA opseg [g]	0,51-0,45	0,45-0,38	0,38-0,32	0,32-0,25	0,25-0,19	<0.19

Kombinovanjem podataka sa sl. 22a do 22c sa podacima o nagibima za analiziranu oblast (vidi Sliku 16), i korišćenjem odnosa PGA-nagib iz Tabele 20, dobijene su karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom za verovatnoće prekoračenja amplituda PGA od  $p = 10\%$  u 50 godina ( $Tr = 475$  godina),  $p = 5\%$  u 50 godina ( $Tr = 975$  godina), i  $p = 2\%$  u 50 godina ( $Tr = 2.475$  godina). Ove karte su prikazane na Slikama 23a do 23c, gde se na levoj strani prikazuju karte dobijene na osnovu standardnih karata seizmičkog hazarda koje uzimaju u obzir samo lokalne uslove tla, dok su na desnoj strani

prikazane karte zasnovane na kartama seizmičkog hazarda koje uzimaju u obzir i efekte duboke geologije.

## Potencijalne zone lavina uzrokovanih zemljotresom

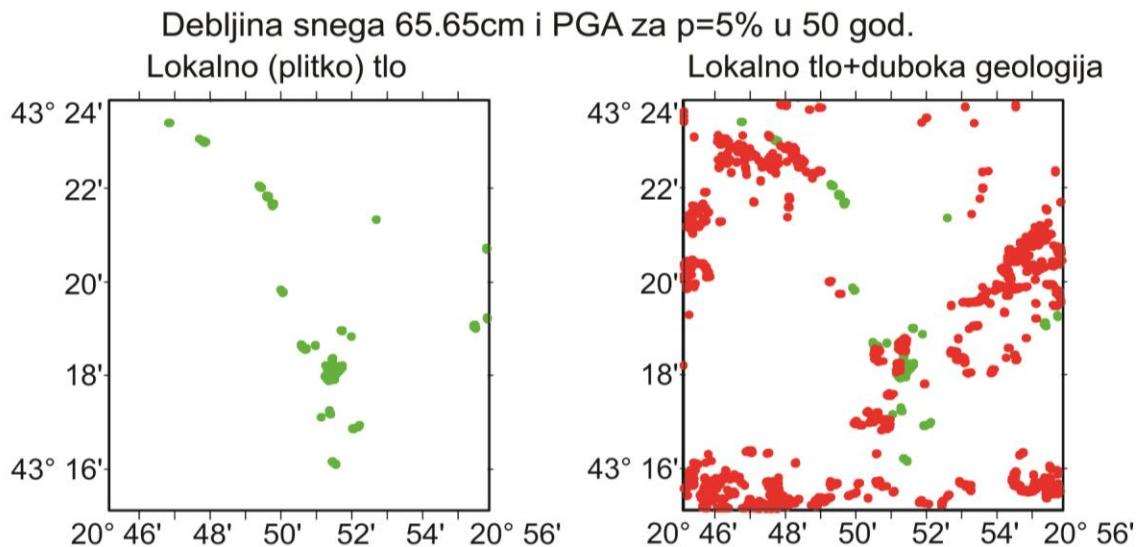


Slika 23a. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom dobijene korišćenjem odnosa između vrednosti PGA i nagiba datih u Tabeli 3, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od p=10% u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 50^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama (s = 1) dok crvene oblasti označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 40^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni (s = 2).

Kao što se može videti na Slici 23a – levo, standardna karta seizmičkog hazarda za  $Tr = 475$  godina će dovesti do toga da se područja pogodna za pojavu snežnih lavina nalaze samo na veoma strmim nagibima ( $\alpha > 50^\circ$ ), jer će ovi nagibi biti kritični za vrednosti PGA prikazanih na Slici 22a – levo. Sa druge strane, karta na Slici 22a – desno, koja uzima u obzir i duboku geologiju, imaće 1,73 puta veće vrednosti PGA za geološku stenu (s = 2), a za ove oblasti mogu se pojaviti i lavine na manje strmim padinama ( $\alpha > 40^\circ$ ). Stoga, kao što se može videti na Slici 23a – desno, ukupna površina na kojoj se može očekivati pojava snežnih lavina izazvanih zemljotresom, mnogo je veća. Ovo je još očiglednije na Sl. 23b i 23c – standardne karte seizmičkog hazarda će pokazati kao kritične, samo nagibe sa  $\alpha > 45^\circ$  za  $Tr = 975$  godina i nagibe sa  $\alpha > 40^\circ$  za  $Tr = 2.475$  godina, dok će karte koje uzimaju u obzir

duboku geologiju ukazati na nagibe sa  $\alpha > 35^\circ$  za  $Tr = 975$  godina i nagibe sa  $\alpha > 25^\circ$  za  $Tr = 2.475$  godina.

### Potencijalne zone lava u uzrokovanih zemljotresom



Slika 23b. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 5\%$  u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 45^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ), dok crvena područja označavaju kosine sa  $\alpha > 35^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni ( $s = 2$ ).

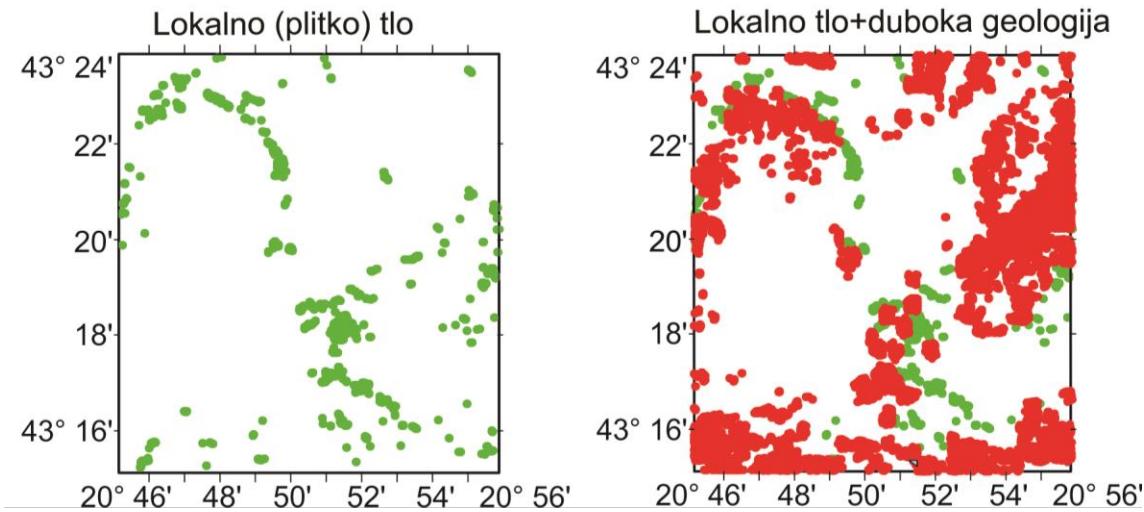
### Podaci o kretanju tla sa stanice u Brzeću

U ovom delu istraživanja, snažna kretanja tla usled zemljotresa koja su zabeležena u Brzeću, analizirana su u odnosu na opisane empirijske prediktivne jednačine koje su korištene u ovoj studiji za procenu seizmičkog hazarda. Stanica za snimanje jakog kretanja tla "Brzeće" bila je smeštena na  $43.300^\circ$  N,  $20.895^\circ$  E. Podaci o 43 akcelerograma zabeležena u Brzeću koji su sadržani u bazi podataka EQINFO [79], dati su u Tabeli 21. Na Slici 24, plavi krugovi predstavljaju stanice koje su snimile akcelerograme koji su sadržani u bazi podataka EQINFO, a crvene zvezde pokazuju pripadajuće zemljotrese, dok su zelenim isprekidanim linijama povezani zemljotresi sa stanicama koje su snimale kretanje tla usled istog tog zemljotresa. Crni krugovi, zvezdice i isprekidane linije pokazuju isto, samo za dodatne

regionalne akcelerograme koji se čuvaju samo u ISESD (*Internet Site for European Strong-Motion Data*) bazi podataka [90] [91]. Kao što se može videti na Slici 24, oblast analizirana u ovoj studiji nalazi se unutar jedne od seizmički najaktivnijih oblasti u regionu, odnosno u Kopaoničkom okrugu.

### Potencijalne zone lavina uzrokovanih zemljotresom

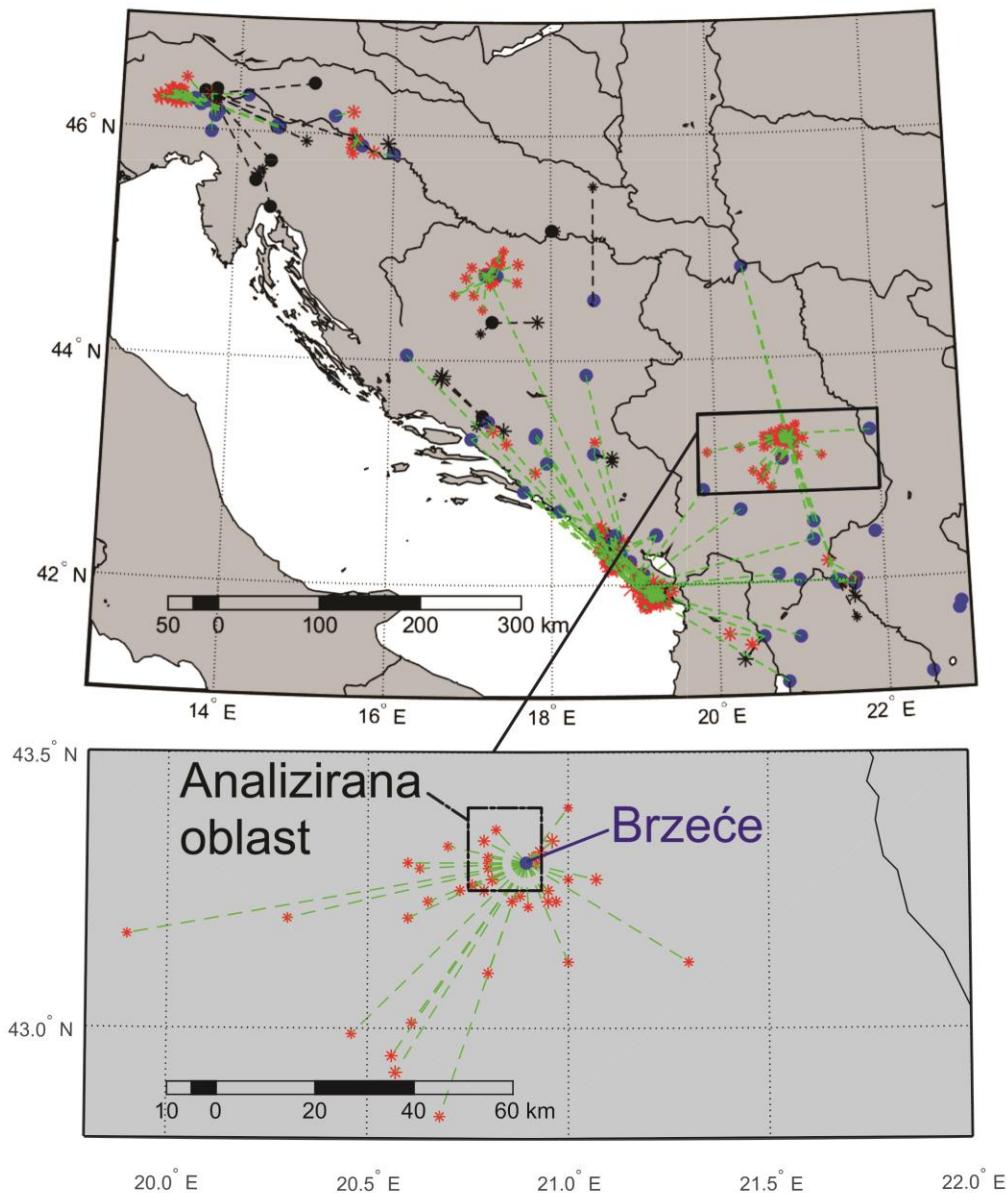
Debljina snega 65.65cm i PGA za p=2% u 50 god.



Slika 23c. Alternativne karte hazarda od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za debljinu snega 65,65cm i verovatnoću prekoračenja amplituda PGA od  $p = 2\%$  u 50 godina. Na desnoj strani zelene površine označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 40^\circ$ , koje se nalaze na prelaznim geološkim formama ( $s = 1$ ), dok crvena područja označavaju kosine sa nagibom  $\alpha > 25^\circ$ , koje se nalaze na geološkoj steni ( $s = 2$ ).

*Tabela 21. Podaci o zapisima kretanja tla na stanicu "Brzeće" iz EQINFO baze podataka [79]*

Redni broj zapisu	Geografska širina zemljotresa [ $^{\circ}$ N]	Geografska dužina zemljotresa [ $^{\circ}$ E]	Godina	Mesec	Dan	Sat / Minut [UTC]	$h$ [km]	M
1	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost
2	43.400	21.000	1980	5	21	9/23	?	?
3	43.340	20.960	1980	5	23	12/26	3	4.6
4	43.120	21.000	1980	5	23	12/37	10	3.2
5	43.120	21.300	1980	5	23	13/40	10	3
6	43.340	20.790	1980	5	25	6/03	10	3.8
7	43.250	20.790	1980	5	25	7/08	10	3.7
8	43.100	20.800	1980	5	26	0/25	10	3.5
9	43.300	20.800	1980	5	31	16/42	10	2.8
10	43.300	20.920	1980	6	1	21/24	10	3.6
11	43.230	20.970	1980	6	3	19/08	10	3.4
12	43.170	19.900	1980	6	4	3/21	10	2.7
13	43.310	20.800	1980	6	4	21/29	10	3.2
14	43.270	21.000	1980	6	5	6/03	10	3
15	43.330	20.700	1980	6	9	8/11	10	2.9
16	43.320	20.930	1980	6	10	21/25	10	4.5
17	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	1980	6	12	23/46	7	3.3
18	42.990	20.460	1980	6	14	2/20	10	3
19	43.010	20.610	1980	6	14	6/42	10	3.3
20	43.250	20.950	1980	6	17	9/52	10	3.3
21	43.230	20.950	1980	6	17	22/14	10	3.8
22	43.260	20.760	1980	6	19	1/47	3	3.5
23	43.310	20.910	1980	6	19	4/42	10	3.2
24	43.200	20.600	1980	6	28	6/10	10	3.1
25	43.250	20.730	1980	6	29	5/52	3	3.3
26	43.220	20.900	1980	7	1	6/43	10	2.9
27	43.400	21.000	1980	7	2	2/18	0	2.4
28	43.290	20.800	1980	7	2	14/24	9	2.9
29	43.290	20.630	1980	7	13	20/54	10	3.1
30	43.360	20.820	1980	7	31	21/52	10	2.9
31	43.240	20.880	1980	10	10	1/03	10	3.3
32	43.300	20.600	1980	9	3	11/59	10	3.1
33	43.230	20.650	1980	10	11	10/55	10	3.1
34	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost	Nepoznata vrednost
35	43.200	20.300	1980	10	11	23/39	0	2.9
36	43.270	20.810	1980	10	21	19/43	10	3.8
37	43.270	20.810	1980	11	3	19/11	10	3.5
38	?	?	1980	12	8	6/32	10	3.3
39	43.270	21.070	1980	12	14	2/54	10	3.9
40	43.230	20.860	1980	12	22	19/09	10	3.6
41	42.950	20.560	1981	2	28	22/53	0	3.9
42	42.920	20.570	1981	3	7	6/53	10	4.3
43	42.840	20.680	1981	3	8	13/10	10	3.4

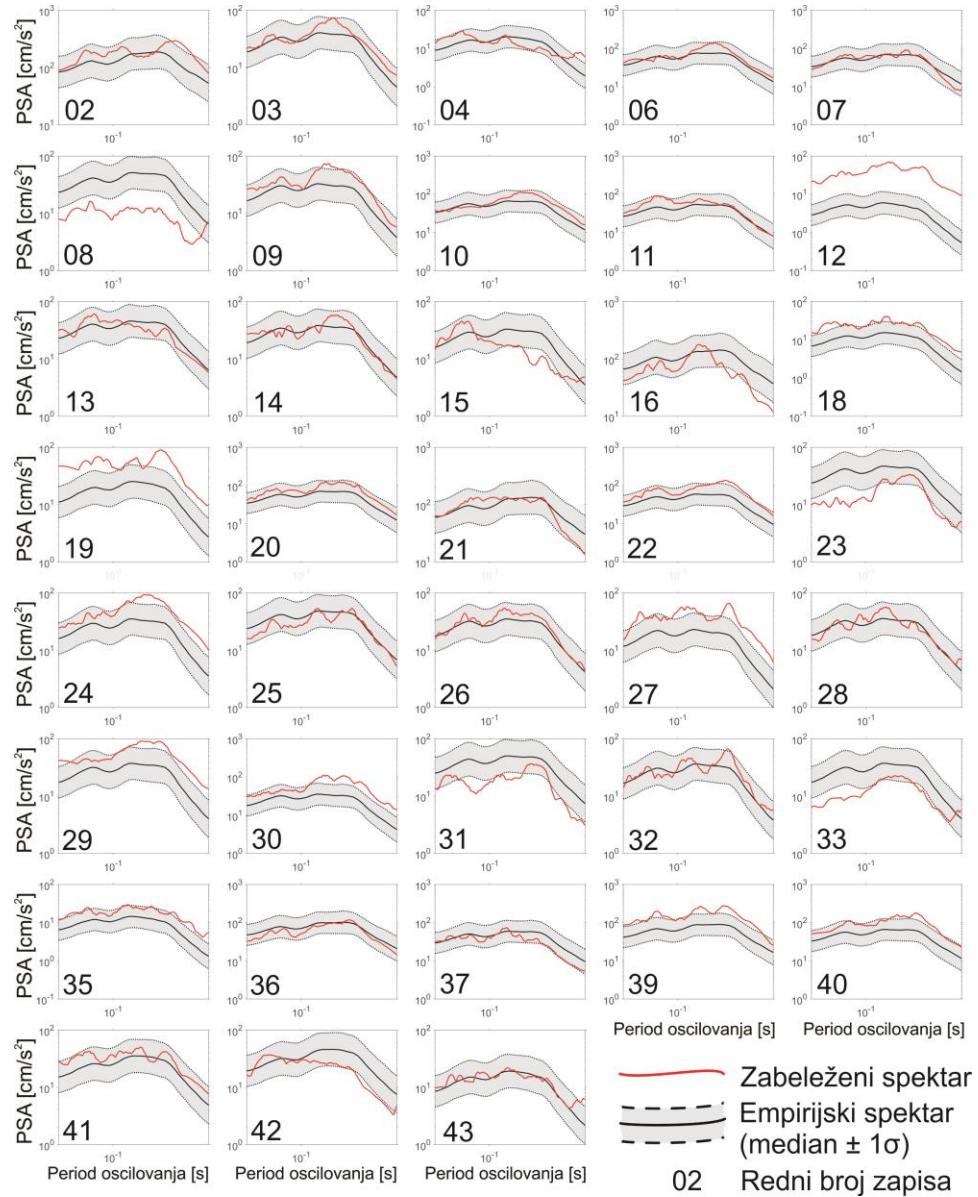


Slika 24. Gornja mapa predstavlja lokacije akcelerograma (iz EQINFO i ISESD baza podataka) u regionu severozapadnog Balkana, gde krugovi pokazuju lokacije akcelerografskih stanica, a zvezde pokazuju epicentre zemljotresa koji su uzrokovali zabeleženo kretanje tla. Donja mapa prikazuje područje na kojem su analizirane snežne lavine izazvane zemljotresom u ovoj studiji i lokacije zemljotresa zabeležene na stanicu "Brzeće" na Kopaoniku.

Na Slici 25 prikazani su spektri pseudo-apsolutnog ubrzanja (PSA) svih akcelerograma zabeleženih u Brzeću, a za koje postoje podaci o zemljotresima. Na istoj slici, ovi spektri su upoređeni sa empirijskim procenama izračunatim

korišćenjem jednačine 3, na bazi podataka o zemljotresima iz Tabele 21 i koeficijenata skaliranja datih u Tabeli 19 za uslove lokacije  $s = 2$  i  $S_L = 1$ . U svim slučajevima kada je epicentralno rastojanje kraće od 30km korišćeni su odgovarajući koeficijenti skaliranja u Tabeli 19.

Slika 25. pokazuje da za većinu zapisa PSA amplitude blisko odgovaraju empirijskim predviđanjima za model skaliranja u kojem se istovremeno razmatra i plitka i duboka geologija, a za neke zapise su zabeležene čak i nešto veće vrednosti. Treba napomenuti da je kod zapisa br. 12 i 19 epicentralno rastojanje duže od 30km, pa je iskorišćena empirijska jednačina koja daje manju amplifikaciju na geološkim stenama u poređenju sa geološkim prelaznim formama. Bez obzira na to što su zemljotresi za većinu ovih zapisa relativno male magnitude, iz slika na Slici 25 je evidentno da je spektralno ubrzanje na geološkim stenama zaista veće nego na geološkim prelaznim formama, ukoliko su svi drugi seizmički parametri isti.



Slika 25. Spektri pseudo-apsolutnog ubrzanja za odabrane zapise u Brzeću (crvene linije) naspram empirijskih procena dobijenih korišćenjem jedn. 3 i koeficijenata skaliranja datih u Tabeli 19 (crne krive prikazuju medijansku procenu dok osenčena površina pokriva vrednosti između 16% i 84% verovatnoće, tj.  $\pm 1$  standardna devijacija). Brojevi odgovaraju rednim brojevima u Tabeli 21.

#### 6.4.5. ALARP analiza – studija slučaja za Skijaški centar Kopaonik

Skijaški centar Kopaonik se smatra za jedan od najvećih skijaških centara u jugoistočnom delu Evrope. Prostire se na oko 62km staza i ski puteva koji su uređeni za alpsko i nordijsko skijanje. Skijaški centar se sastoji od 25 žičara i dve pokretnе trake. Ukupna horizontalna dužina žičara je 22.008m, ukupna kosa dužina 22.678m, ukupna visinska razlika 5.173m, a njihov ukupni kapacitet je 35.788 osoba/čas. Sistem žičara čine tri šestosedne žičare, sedam četvorosednih i dve dvosedne žičare, deset ski liftova, dva vezna ski lifta, kao i pokretna traka. Samo skijalište u okviru Nacionalnog parka Kopaonik se sastoji od 39 alpskih ski-staza, 26 ski-puteva i dva poligona za obuku početnika. Sve staze su podeljene u tri osnovne svetski prihvaćene kategorije (plavu, crvenu i crnu). Prosečna širina staza iznosi 40m, a ukupna površina 138,73ha. Ukupna visinska razlika staza je 7.119m, a nagibi staza su 5 - 40% (22 staze sa manje od 20%, 11 staza sa 20 - 30% i 6 staza sa više od 30%). Plavih staza je ukupno 23 i one se nalaze na nagibu terena od 5% do 23%. Crvene staze predstavljaju ukupno 10 staza, nagiba između 16% i 31%, dok je crnih staza ukupno 6 i one zahvataju nagibe između 27% i 40%. Sistemom za veštačko osnežavanje pokriveno je 97% skijališta. Skijalište poseduje 8 tabača snega koji rade preko noći kako bi omogućili optimalne uslove za skijanje za naredni dan. Mapa skijaškog centra Kopaonik prikazana je na Slici 26 (sve informacije o skijaškom centru preuzete su sa internet stranice: [www.infokop.net](http://www.infokop.net)) [92]. Radno vreme žičara zavisi od sezone, odnosno, od meseca, gužve i vremenskih prilika. U decembru žičare najčešće rade od 09:00 do 15:30, dok u mesecu martu u najdužem slučaju rade od 08:00 do 16:30.

Kako je ALARP analiza bazirana na smanjenju rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanju nekog manjeg rizika, potrebno je proračunati nivo rizika za individualan, kao i za društveni rizik. Individualan rizik predstavlja rizik za najugroženiju osobu, dok društveni rizik predstavlja rizik za sve osobe, odnosno u ovoj studiji slučaja, za ukupan broj ljudi koji se nalaze na posmatranom području. Računat je rizik za zaposlene koji borave na samom terenu, odnosno u objektima vezanim za rad žičara za vreme radnog vremena žičara u martu. Zbog nedostatka preciznih podataka, pretpostavljeno je da je ukupan broj ljudi koji se mogu nalaziti u objektu za vreme radnog vremena žičare, četiri. Prosečno vreme boravka najugroženije osobe u objektu iznosi 10 sati, dok druge tri osobe borave u objektu oko 9 sati, sedam dana nedeljno sa čestim boravkom izvan objekta, odnosno pored same žičare.



Slika 26. Mapa skijaškog centra Kopaonik (preuzeto sa: [93])

Prema podacima sa sajta InfoKop [92], ukupan broj žičara je 25, dok su u našem istraživanju uzete 22 žičare, odnosno 22 objekta (zbog uzimanja u obzir samo objekata koji se nalaze u podnožju planine i jedne instalacije Vučak i bez pokretnih traka) koji će kasnije biti izuzetno bitan pri računaju društvenog rizika. Prema Tabeli 18 mesec mart ima najveću prosečnu debljinu snega koja iznosi 65,65cm. Iz tog razloga, u ovom ilustrativnom primeru, uzet je mart kao mesec sa najvećim stepenom rizika za pojavu snežnih lavina. Prvi korak u proceni rizika, odnosno proceni bezbednosti i zdravlja na radu, bio je određivanje povredljivosti koja se nalazi na granici sa neprihvatljivim, odnosno prihvativljivim rizikom na ALARP dijagramu. Kako bi se što preciznije odredio rizik, kao i broj žrtava, odnosno sama bezbednost na radu, potrebno je znati koja povredljivost može da ugrozi zaštitu i zdravlje, i poveća rizik u skijaškom centru. Analizirana su tri nivoa hazarda, odnosno maksimalna ubrzanja tla za tri različite verovatnoće. Urađeni su proračuni za verovatnoće da vrednost maksimalnog ubrzanja bude prevaziđena od 2% u 50 godina, 5% u 50 godina i 10% u 50

godina, koje su iste kao verovatnoće koje su analizirane pri određivanju uticaja duboke geologije na sam nastanak snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom.

Na bazi regiona na ALARP dijagramu prikazanom na Slici 13, granica ALARP regiona sa neprihvatljivim rizicima može se matematički predstaviti sledećom jednačinom:

$$(V N_1 N_2)^{-1} 0.01 = V [1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7}, \quad (12)$$

gde je  $V$  povredljivost,  $N_1$  broj objekata,  $N_2$  broj ljudi,  $P_t$  verovatnoća,  $t$  posmatrani period (u koliko godina),  $t_1$  vreme izraženo u satima,  $t_2$  vreme izraženo u danima. Iz formule 12 proizilazi da se povredljivost za neprihvatljive rizike izračunava prema sledećoj formuli:

$$V_{neprih} = \sqrt{\frac{0.01}{[1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7} N_1 N_2}} \quad (13)$$

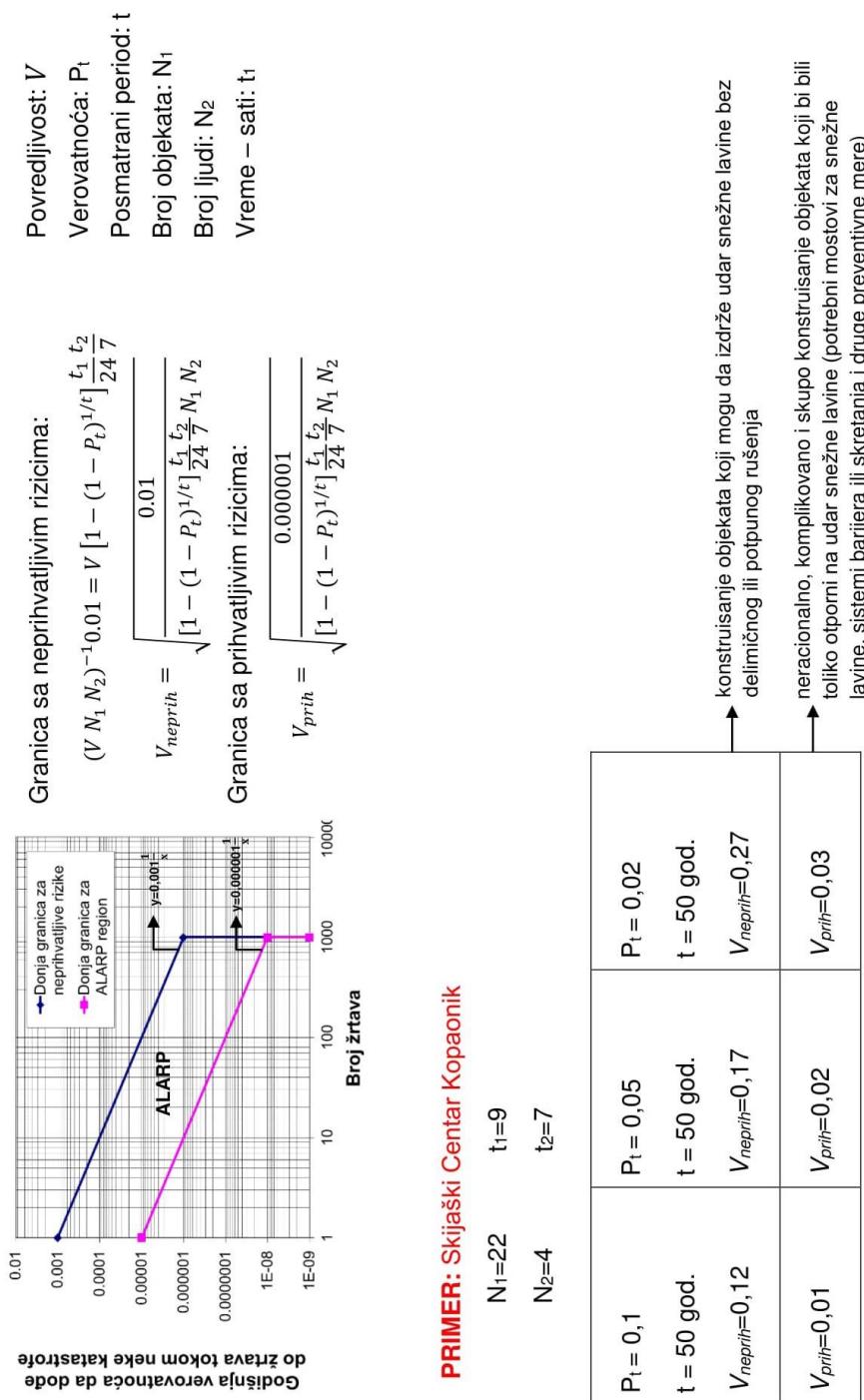
Na sličan način, granica ALARP regiona sa prihvatljivim rizicima može da se izračuna prema formuli:

$$(V N_1 N_2)^{-1} 0.000001 = V [1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7}, \quad (14)$$

gde je  $V$  povredljivost,  $N_1$  broj objekata,  $N_2$  broj ljudi,  $P_t$  verovatnoća,  $t$  posmatrani period (u koliko godina),  $t_1$  vreme izraženo u satima,  $t_2$  vreme izraženo u danima. Iz formule 14 proizilazi da se povredljivost za neprihvatljive rizike izračunava prema sledećoj formuli:

$$V_{prih} = \sqrt{\frac{0.000001}{[1 - (1 - P_t)^{1/t}] \frac{t_1 t_2}{24 7} N_1 N_2}} \quad (15)$$

Na Slici 27 prikazan je proces dobijanja graničnih vrednosti povredljivosti, kao i primer ALARP metode za Skijaški centar Kopaonik.



Slika 27. ALARP metoda za Skijaški centar Kopaonik

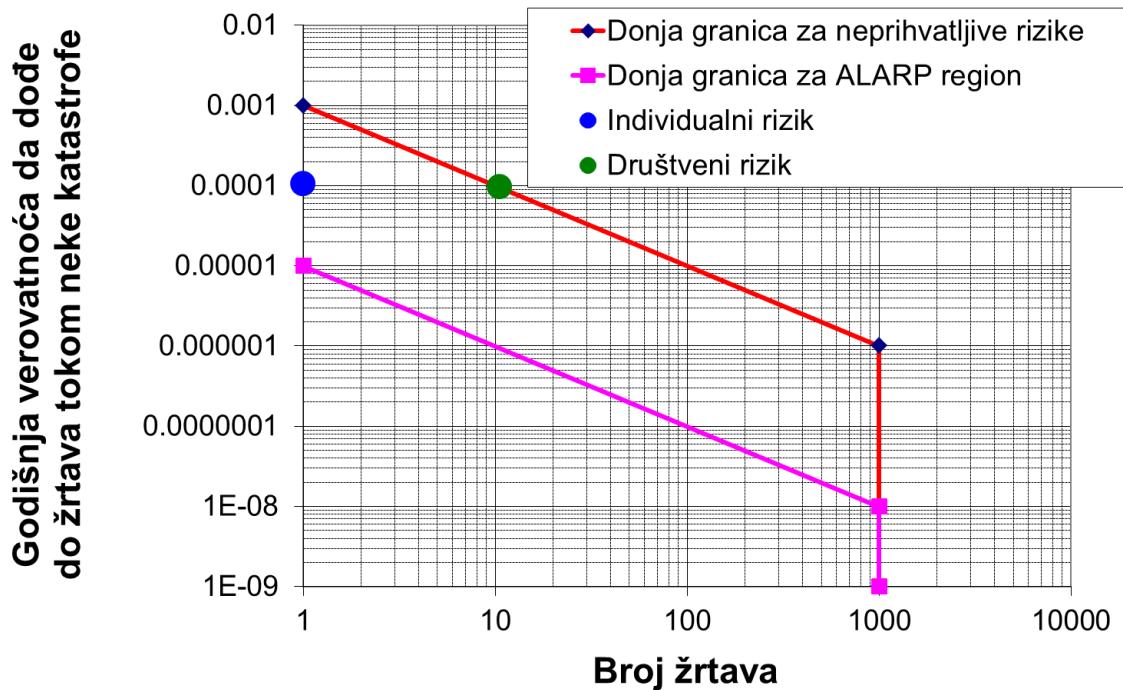
ALARP proračuni za verovatnoću hazarda 10% u 50 godina prikazani su u Tabelama 22 do 25, za 5% u 50 godina u Tabelama 26 do 29, a za verovatnoću hazarda 2% u 50 godina prikazani su u Tabelama 30 do 33. Uzimajući u obzir navedene pretpostavljene brojeve zaposlenih i vremena rada, iz prethodnih formula se dobija da je povredljivost koja može da dovede do neprihvatljivog rizika jednaka 0,12, dok je povredljivost koja može da dovede do prihvatljivog rizika jednaka 0,01, za verovatnoću od 10% u 50 godina. Ove povredljivosti dovode do graničnih vrednosti izračunatih rizika, odnosno, do granice sa neprihvatljivim i prihvatljivim rizikom.

*Tabela 22. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,12, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 10% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>12%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,417 * 0,12 * 0,002105
7 dana / 7 dana	0,12	$1 - (1 - 0,1)^{1/50}$	= 0,000105
10/24 * 7/7		= 0,002105	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 23. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,12, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 10% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>12%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,375 * 0,12 * 0,002105
7 dana / 7 dana	= 0,12	$1 - (1 - 0,1)^{1/50}$	= 0,000094725
9/24 * 7/7		= 0,002105	
= 0,375			Broj žrtava: 11



Slika 28. ALARP dijagram za verovatnoću 10% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 12% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Da bi bezbednost i zdravlje na radu bilo na najvišem nivou, neophodno je da izračunati rizici spadaju u prihvatljive ili ALARP nivo rizika. Kako povredljivost označava šansu da neko strada u objektu, u slučaju verovatnoće nastanka katastofalnog događaja sa maksimalnim ubrzanjem tla koje ima 12% šanse da dovede do smrti neke od osoba koje borave u objektu, i koji se javlja sa verovatnoćom od 10% u 50 godina, jednogodišnji individualni rizik spada u ALARP nivo rizika, dok se društveni rizik nalazi na granici sa neprihvatljivim nivoom rizika. Datu povredljivost od 12% bi bilo moguće ostvariti konstruisanjem objekata sa jačim zidovima i većom otpornošću na bočne udare. Građevinski inženjeri bi trebalo da obezbede ovaj nivo povredljivosti, pošto bi povredljivost veća od ovih vrednosti mogla da dovede do neprihvatljivih rizika. U slučaju da građevinski inženjeri ne bi mogli da obezbede ovaj nivo povredljivosti, neophodno je pored ojačavanja konstrukcije koristiti i neku od preventivnih mera za snežne lavine, koje su detaljno opisane u potpoglavlju 5.2.2.

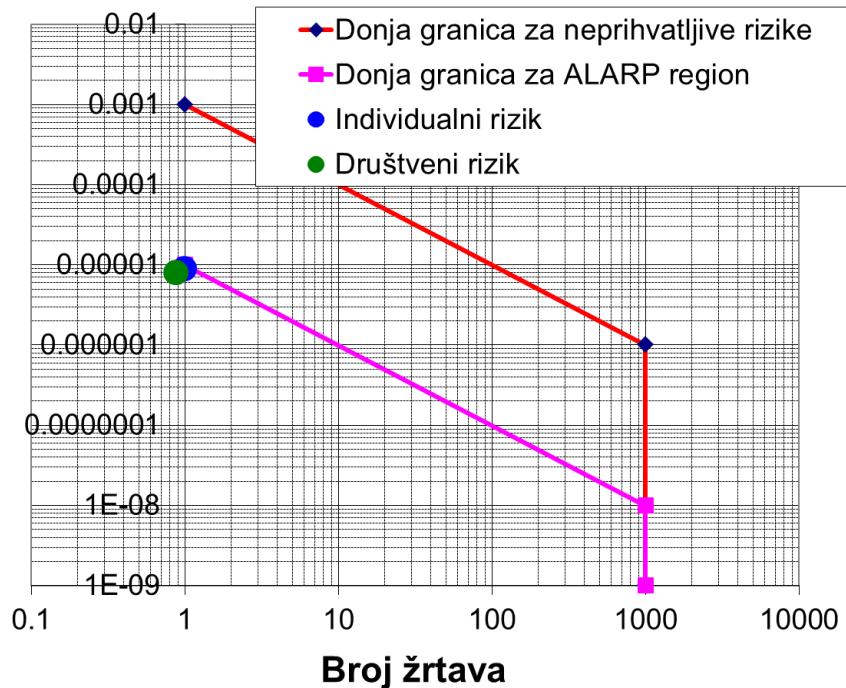
*Tabela 24. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,01, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 10% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>1%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,417 * 0,01 * 0,002105
7 dana / 7 dana	0,01	$1 - (1 - 0,1)^{1/50}$	= 8,77 * 10 <sup>-6</sup>
10/24 * 7/7		= 0,002105	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 25. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 10% u 50 godina, povredljivost 0,01, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 10% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>1%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,375 * 0,01 * 0,002105
7 dana / 7 dana	= 0,01	$1 - (1 - 0,1)^{1/50}$	= 7,89 * 10 <sup>-6</sup>
9/24 * 7/7		= 0,002105	
= 0,375			Broj žrtava: 1

**Godišnja verovatnoća da dođe  
do žrtava tokom neke katastrofe**



Slika 29. ALARP dijagram za verovatnoću 10% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 1% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Koristeći ALARP dijagram zaključuje se da i individualni kao i društveni rizik spadaju na granicu sa prihvatljivim rizikom, odnosno, da bezbednost i zdravlje na radu nisu ugroženi. Za granicu sa prihvatljivim rizikom, dobijena je jako mala vrednosti za povredljivost od 0,01, odnosno 1%. Tako savršeno otpornu konstrukciju je izuzetno teško napraviti, pa bi trebalo uvesti veliki broj preventivnih mera, ukoliko se želi smanjiti rizik na toliku meru, odnosno, na prihvatljiv nivo rizik prema ALARP dijagramu.

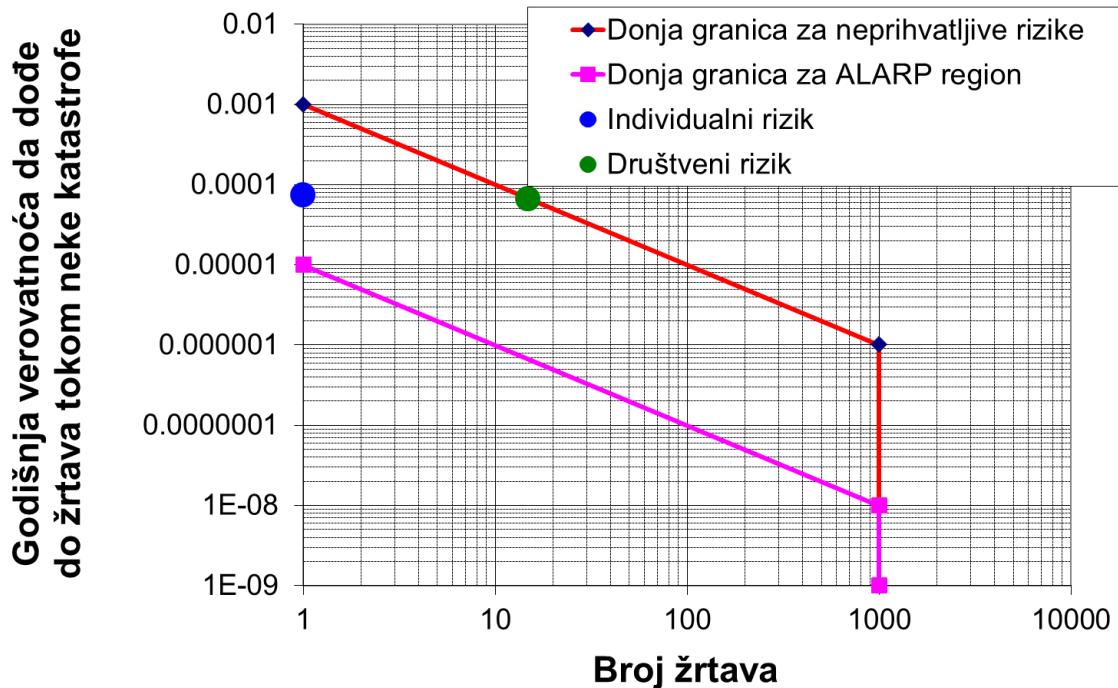
Uzimajući u obzir navedene pretpostavljene brojeve zaposlenih i vremena rada, iz formula 13 i 15 se dobija da je povredljivost koja može da dovede do neprihvatljivog rizika jednaka 0,17, dok je povredljivost koja može da dovede do prihvatljivog rizika jednaka 0,02, za verovatnoću od 5% u 50 godina.

*Tabela 26. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,17, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 5% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>17%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,417 * 0,17 * 0,00103
7 dana / 7 dana	0,17	1- (1-0,05) <sup>1/50</sup>	= 7,26 * 10 <sup>-5</sup>
10/24 * 7/7		= 0,00103	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 27. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,17, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 5% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>17%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,375 * 0,17 * 0,00103
7 dana / 7 dana	= 0,17	1- (1-0,05) <sup>1/50</sup>	= 6,54 * 10 <sup>-5</sup>
9/24 * 7/7		= 0,00103	
= 0,375			Broj žrtava: 15 (14,96)



Slika 30. ALARP dijagram za verovatnoću 5% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 17% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

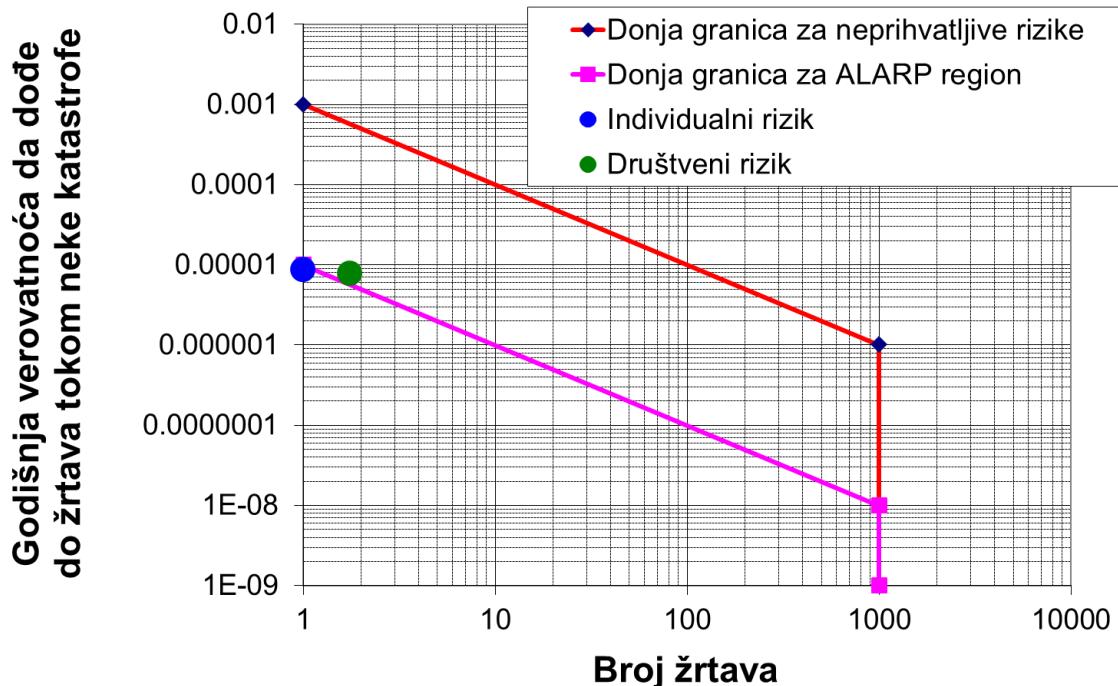
U slučaju verovatnoće nastanka katastofalnog događaja sa maksimalnim ubrzanjem tla koje ima 17% šanse da dovede do smrti neke od osoba koje borave u objektu i koji se javlja sa verovatnoćom od 5% u 50 godina, jednogodišnji individualni rizik spada u ALARP nivo rizika. Društveni rizik spada na granicu sa neprihvatljivim nivoom rizika dok se broj žrtava povećava na izrazito visok nivo. Koristeći ALARP dijagram zaključuje se da društveni rizik može da ugrozi bezbednost i zdravlje na radu, ukoliko bi se povredljivost još više povećavala. Neophodno je uvesti različite mere prevencije koje će dovesti nivo rizika na prihvatljiv ili ALARP nivo rizika.

*Tabela 28. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,02, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 5% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>2%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= $0,417 * 0,02 * 0,00103$
7 dana / 7 dana	0,02	$2 - (1-0,05)^{1/50}$	= $8,54 * 10^{-6}$
$10/24 * 7/7$		= 0,00103	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 29. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 5% u 50 godina, povredljivost 0,02, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 5% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>2%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= $0,375 * 0,02 * 0,00103$
7 dana / 7 dana	= 0,02	$2 - (1-0,05)^{1/50}$	= $7,69 * 10^{-6}$
$9/24 * 7/7$		= 0,00103	
= 0,375			Broj žrtava: 2 (1,76)



Slika 31. ALARP dijagram za verovatnoću 5% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 2% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Prema ALARP dijagramu, za granicu sa prihvatljivim rizikom, dobijena je jako mala vrednosti za povredljivost od 2%. Da bi se postigla tako mala povredljivost, odnosno prihvatljiv nivo rizika, neophodno je uvesti veliki broj preventivnih mera, kao i uraditi mnoge korekcije na objektima.

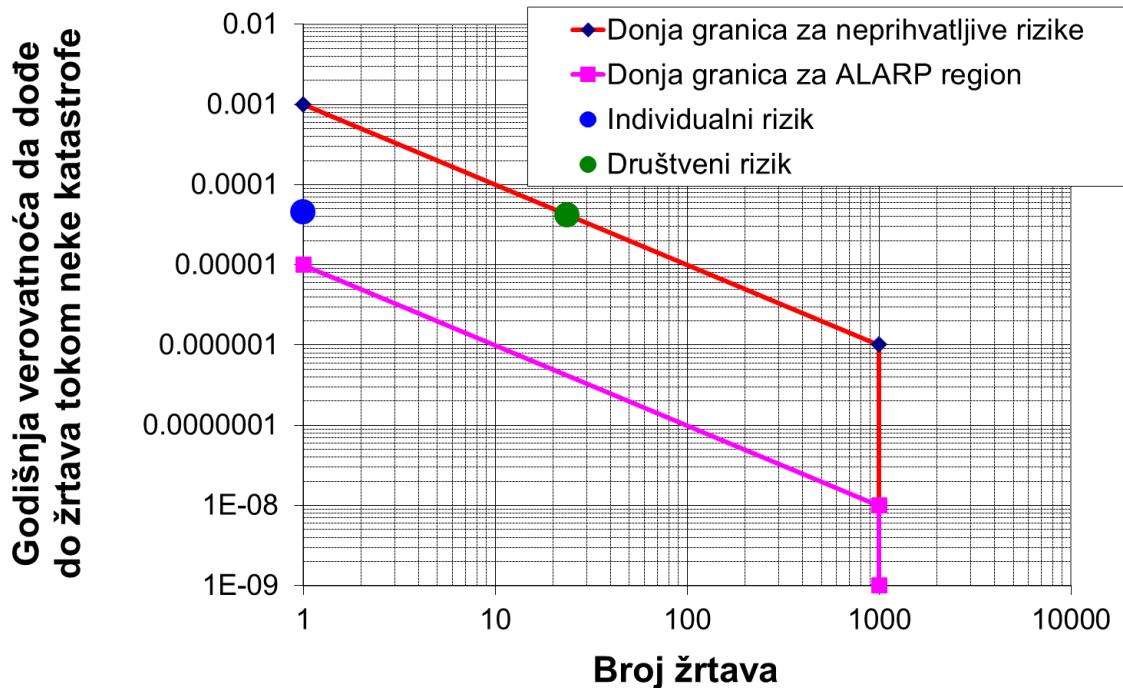
Uzimajući u obzir navedene pretpostavljene brojeve zaposlenih i vremena rada, iz formula 13 i 15 se dobija da je povredljivost koja može da dovede do neprihvatljivog rizika jednaka 0,27, dok je povredljivost koja može da dovede do prihvatljivog rizika jednaka 0,03, za verovatnoću od 2% u 50 godina.

*Tabela 30. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,27, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 2% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>27%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,417 * 0,27 * 0,000404
7 dana / 7 dana	= 0,27	1 - (1-0,02) <sup>1/50</sup>	= 4,54 * 10 <sup>-5</sup>
10/24 * 7/7		= 0,000404	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 31. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,27, rizik na granici sa zonom **neprihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 2% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>27%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,375 * 0,27 * 0,000404
7 dana / 7 dana	= 0,27	1 - (1-0,02) <sup>1/50</sup>	= 4,09 * 10 <sup>-5</sup>
9/24 * 7/7		= 0,000404	
= 0,375			Broj žrtava: 24 (23,76)



Slika 32. ALARP dijagram za verovatnoću 2% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 27% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

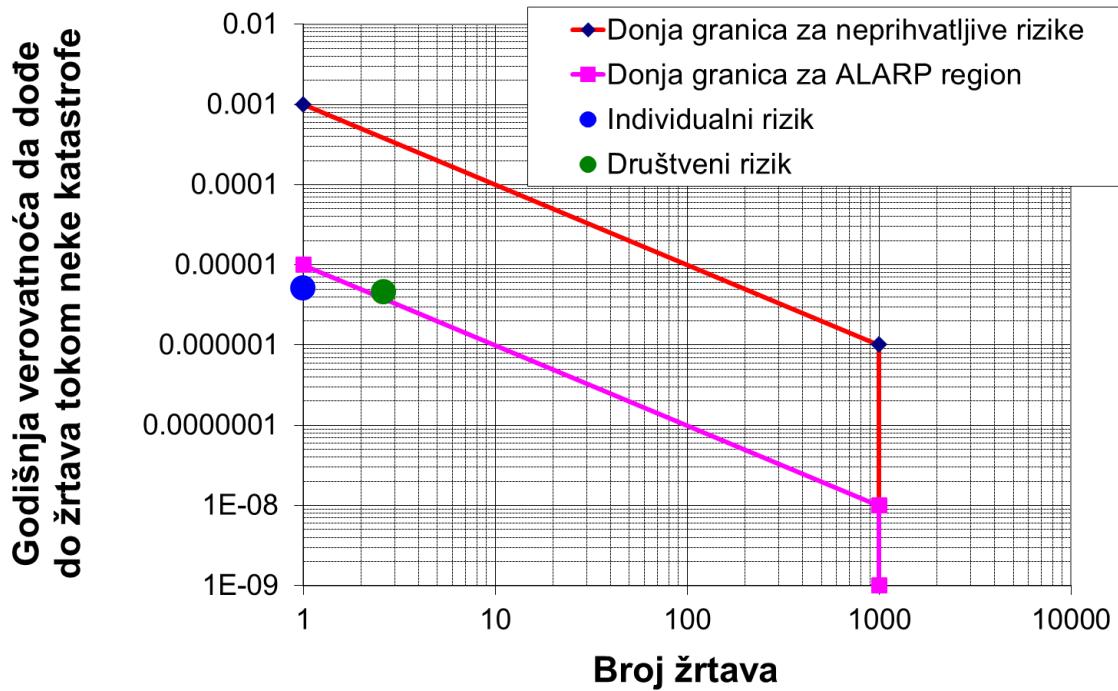
U slučaju verovatnoće nastanka katastrofalnog događaja sa maksimalnim ubrzanjem tla koje ima 27% šanse da dovede do smrti neke od osoba koje borave u objektu i koji se javlja sa verovatnoćom od 2% u 50 godina, na ALARP dijagramu jasno se vidi da jednogodišnji individualni rizik spada u ALARP nivo rizika, dok se društveni nivo rizika nalazi na granici ALARP nivoa rizika i neprihvatljivog rizika. Daljim povećanjem povredljivosti preko 27%, moguće je značajno ugroziti nivo bezbednosti i zdravlja na radu i povećati rizik. Kako bi se povećala bezbednost i zdravlje na radu neophodno je uvesti sigurnosne mere i metode koje će dovesti do smanjenja rizika na ALARP nivo ili prihvatljiv nivo. Na taj način se, pored smanjenja mogućih žrtava, stvaraju uslovi za rad koji ne mogu da ugroze radnike kao ni stanovnike planinskih naselja, čime se povećava bezbednost osoba koje borave na ugroženom području.

*Tabela 32. Proračun individualnog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,03, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da je najugroženija osoba u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 2% u 50 godina	Ukupan Individualni rizik
10 sati / 24 sata	<b>3%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,417 * 0,03 * 0,000404
7 dana / 7 dana	= 0,03	2- (1-0,02) <sup>1/50</sup>	= 5,05 * 10 <sup>-6</sup>
10/24 * 7/7		= 0,000404	
= 0,417			Broj žrtava: 1

*Tabela 33. Proračun društvenog rizika: verovatnoća hazarda 2% u 50 godina, povredljivost 0,03, rizik na granici sa zonom **prihvatljivih rizika** na ALARP dijagramu*

Verovatnoća da su sve osobe istovremeno u objektu	Povredljivost unutar objekta za zadato maksimalno ubrzanje tla	Godišnja verovatnoća ukoliko je verovatnoća 2% u 50 godina	Ukupan društveni rizik
9 sati / 24 sata	<b>3%</b>	$P(A) = 1 - (1 - P_t(A))^{1/t}$	= 0,375 * 0,03 * 0,000404
7 dana / 7 dana	= 0,03	2- (1-0,02) <sup>1/50</sup>	= 4,54 * 10 <sup>-6</sup>
9/24 * 7/7		= 0,000404	
= 0,375			Broj žrtava: 3 (2,64)



Slika 33. ALARP dijagram za verovatnoću 2% u 50 godina da bude prevaziđeno maksimalno ubrzanje tla koje ima 3% šanse da dovede do smrti nekog od ljudi koji borave u objektu

Prema ALARP dijagramu, može se videti da i individualni i društveni rizik spadaju u ALARP region, odnosno u prihvatljiv nivo rizika, ukoliko se povredljivost smanji na 3%. Na ovaj način se ne ugrožava nivo bezbednosti i zdravlja na radu, ali je dovođenje povredljivosti na ovako nizak nivo, veoma teško. Da bi bezbednost i zdravlje na radu bili na najvišem nivou, neophodno je sprovesti veliki broj preventivnih i sigurnosno-građevinskih mera.



## 7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA, ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

### 7.1. Zaključna razmatranja

Posle usvajanja Zakona za bezbednost i zdravlje na radu (OSHA) 1970. godine, veliki broj uslova rada kao i razvoja procesa dokumentovanja svih aspekata bezbednosti i zdravlja na radu, su unapređeni. Pored unapređenja opštih uslova i aspekata, nivo rizika koji je prisutan na radnim mestima koja se nalaze na temperaturno ekstremnim mestima, je i dalje na neprihvatljivom nivou.

Snežne lavine predstavljaju jedan od najčešćih prirodnih hazarda koji se javljaju u planinskim regionima. Iako mogu nastati i prirodnim i veštačkim putem, veoma čest uzrok nastanka snežnih lavina jesu zemljotresi. Zemljotresi svojim seizmičkim talasima uzrokuju nestabilnosti u snežnim pokrivaču i na taj način doprinose pojavi snežnih lavina. Poznato je da lavinozna područja čine čak 6,2% Zemljine površine, dok se veliki broj trusnih područja nalazi upravo ispod velikih planinskih venaca. Kombinacija ova dva prirodna hazarda odnela je u prošlosti veliki broj žrtava.

Jedan od osnovih faktora koje treba razmotriti pri analizi nastanka snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom jeste geološko okruženje lokacije, odnosno, karakteristike duboke geologije i lokalnog tla koji mogu da utiču na povećanje ubrzanja tla u planinskim područjima. Istraživanje ovog faktora je inspirisano nizom nedavnih studija seizmičke mikroregionizacije za region Balkana [33] [47] [48] [49] [50], koje pokazuju da varijacije u uslovima duboke geologije [52], mogu značajno povećati seizmički hazard za određene oblasti u poređenju sa standardnim kartama seizmičkog hazarda koji uzimaju u obzir samo plitku geologiju, odnosno samo lokalne uslove tla za gornji sloj od 30m dubine stratigrafskog profila. Dosadašnja istraživanja su u velikoj meri zapostavljala analizu duboke geologije pri analizi hazarda. Ova disertacija je pokazala 30%, pa čak i do 70% veće kratko-periodične amplitude (tj. amplitude talasa kratkih perioda oscilovanja) snažnog kretanja tla na duboko-geološkim stenskim lokalitetima, u poređenju sa amplitudama dobijenim uz pomoć empirijskih prediktivnih (atenuacionih) jednačina koje uzimaju u obzir samo efekat uslova lokalnog tla, koji su u ovoj analizi predstavljali geotehnički opis lokacije na skali (dubini) od par desetina metara. Atenuacionim jednačinama inače opisujemo promene u maksimalnom ubrzanju tla (PGA), ili nekom drugom parametru

kojim se opisuje kretanje tla, sa rastojanjem od žarišta zemljotresa, magnitudom, uslovima lokalnog tla i duboke geologije i drugim parametrima. Severozapadni Balkan je jedan od retkih regiona koji ima dostupne podatke o dubokoj geologiji i na bazi tih podataka, zajedno sa zapisima jakog kretanja tla za period od 1976. do 1983. godine, razvijene su jednačine za prognozni model koji istovremeno uzima u obzir i uslove lokalnog tla i duboku geologiju.

Za okarakterisanje seizmičkog hazarda koristili smo probabilističku metodu uniformnog hazarda (UHS metoda). UHS metodom je moguće sračunati seizmičku rejonizaciju i mikrorejonizaciju istovremenim uzimanjem u obzir verovatnoće pojave zemljotresa različite jačine, prostorne distribucije seizmičkih žarišta, frekventno-zavisne atenuacije amplituda jakog kretanja, kao i karakteristike lokalne geologije i lokalnog tla. Drugim rečima, ovakva analiza hazarda istovremeno uzima u obzir geometriju žarišnih zona, krive ponovljivosti zemljotresa određene jačine, procenjene maksimalne magnitude, kao i gore pomenute atenuacione jednačine. Direktan rezultat probabilističke analize seizmičkog hazarda je očekivana godišnja učestalost  $N(A)$ , čija se recipročna vrednost naziva "povratni period". Na bazi  $N(A)$  možemo zatim da izračunamo i  $P_t(A)$  koji predstavlja verovatnoću za očekivani ekonomski vek konstrukcije od  $t$  godina. Analizom ovih parametara hazarda možemo preciznije odrediti i opisati nivo rizika koji može da ugrozi bezbednost i zdravlje na radu na trusnom lavinoznom terenu.

Na kraju, na bazi procenjenih rizika potrebno je oceniti i bezbednost i zdravlje na radu. Postoji nekoliko kriterijuma za odabir najbolje metode za procenu rizika koja može olakšati proces povećanja bezbednosti i zdravlja na radu. Jedna od metoda koja ne zahteva velika finansijska ulaganja i dostupnost velikog broja podataka jeste ALARP metoda za procenu rizika. Ova metoda je bazirana na smanjenju rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanju najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo. U ovoj disertaciji je modifikovana originalna ALARP metoda, i to na taj način što se na bazi procenjenog seizmičkog hazarda i ciljnih vrednosti rizika, usvojenih u skladu sa ciljevima bezbednosti na radu, radi inverzna ALARP analiza i određuju potrebne vrednosti povredljivosti objekata u kojima zaposleni rade.

Prirodni hazardi su složeni procesi koji sa sobom nose veliki stepen rizika. Njihova interakcija sa okolinom generiše učestalu pojavu rizika vezanih za zdravlje na radu sa potencijalno velikim posledicama koje mogu da ugroze veliki broj činilaca. Da bi se na određeni rizik moglo odgovoriti na najbolji

mogući način, odnosno smanjiti ga, potrebno je odrediti veličinu rizika. Što se rizici koji utiču na bezbednost na radu okarakterišu i odrede sa većom preciznošću, to je proces upravljanja zdravljem na radu uspešniji, a time su posledice svedene na minimum. Sakupljanje podataka, kao i uzimanje u obzir svih faktora koji utiču na pojavu i posledice hazarda predstavljaju osnovu za upravljanje rizicima i savremen način identifikacije pojava koje mogu da doprinesu smanjenju bezbednosti.

Kombinovanjem probabilističke UHS metode za procenu hazarda, uzimanja u obzir uticaja duboke geologije, i inverzne ALARP metode, kreira se unapređena metodologija koja uzima u obzir veći broj parametara (duboka geologija, sastav stena, visina snežnog pokrivača, rasprostranjenost kritičnih nagiba itd.). Ovom metodologijom se može preciznije izračunati rizik, odnosno proceniti opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom i na taj način uticati na bezbednost i zdravlje na radu. Uključivanjem većine fakora koji utiču na nivo rizika, mogu se smanjiti posledice i time se zaštитiti životi i prirodna sredina. Jasno je da je za proces stvaranja sigurnih i bezbednih uslova na radnim mestima u planinskim oblastima potrebno krenuti, pre svega, od uvođenja novih mera bezbednosti i mera prevencije, pri čemu se mapiranje terena pogodnog za stvaranje snežnih lavina smatra za jedan od najneophodnijih.

U verifikaciji metode za potrebe istraživanja odabранo je područje skijališta Kopaonik. Kopaonik predstavlja jedno od najvećih skijališta u ovom delu Evrope. Kako se broj posetilaca iz sezone u sezoni povećava, infrastruktura skijališta se širi velikom brzinom. Sa aspekta bezbednosti i zdravlja na radu, bitno je odrediti da li se objekti skijališta, koji pre svega uključuju kućice od žičara, nalaze na lavinoznom području, kao i uvideti nivo rizika kojim su izloženi ljudi koji borave u datom objektu. U ilustrativnom primeru, razmatrajući odnos radne snage sa planinskim terenom i ekstremnim zimskim uslovima, može se zaključiti da svi generišu rizike vezane za bezbednost i zdravlje na radu. Pri tome se verovatnoća stvaranja opasnosti povećava ukoliko objekti nisu dovoljno zaštićeni, a ljudi koji borave u objektima koji se nalaze na lavinoznom području nisu dovoljno obučeni za reagovanje u slučaju snežne lavine.

Veliki procenat padina na Kopaoniku se nalazi na severnoj strani, koja predstavlja rizičnije područje za pojavu snežnih lavina. Najrasprostranjeniji nagibi su između  $35^{\circ}$  i  $45^{\circ}$  koji su definisani pomoću QGIS softvera, dok je ugao nagiba pod kojim se najčešće pojavljuju snežne lavine oko  $38^{\circ}$  prema različitim literaturama. Prema zapisima jakog kretanja tla od 1900. do 2017. godine može se zaključiti da je kopaonička oblast jedna od najtrusnijih zona sa

najvećom zabeleženom, odnosno jednom od najvećih vrednosti maksimalnog ubrzanja tla, odnosno PGA, u Srbiji. Potreba da se detaljnije istraži i analizira teren sa aspekta do sada neanaliziranih uticajnih faktora proizilazi iz činjenice da je zimski turizam i dalje u povoju i da povećanje bezbednosti i zdravlja kako radnika, tako i posetilaca svih skijaških centara, treba da bude na prvom mestu.

Da bi se okarakterisao seizmički hazard na području Kopaonika i na taj način uspostavila veza između pojave snežne lavine uzrokowane zemljotresom, korišćena je probabilistička UHS metoda. U istraživanju je urađen niz probabilističkih analiza seizmičkog hazarda, sa ili bez uzimanja u obzir duboke geologije (pored lokalnog tla). U centralnom delu Kopaoničkog okruga, koji se analizira u ovom radu, geologiju čine granitoidi, sa serijom izvora eruptivnih stena [83]. Stoga se veliki deo analiziranog područja može definisati kao duboke geološke stene, dok ostali delovi pripadaju srednjim geološkim uslovima, odnosno prelaznim geološkim formama, u skladu sa klasifikacijom Trifunca i Brejdija [52]. Rezultati analiza hazarda pokazuju 30-70% veće vrednosti horizontalnog kretanja tla (PGA) za geološke stene od vrednosti za prelazne forme, za koje su dobijene vrednosti slične vrednostima dobijenim u kartama hazarda koje uzimaju u obzir samo lokalne uslove tla. Ovi rezultati pokazuju da se veliki deo skijališta nalazi u zonama koje potencijalno mogu da budu pogodjene snežnom lavinom uzrokovanom zemljotresom. Velika većina karata hazarda koje se i danas koriste pri računanju seizmičkog hazarda ne uzima u obzir duboku geologiju, već samo prvi 30m lokalnog tla. Čak je i zvanična karta hazarda u propisima bivše SFRJ [86], koja se i danas koristi u Republici Srbiji za potrebe građevinarstva, data za prosečne uslove lokalnog tla.

Postoji veliki broj istorijskih slučajeva pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom. Ovaj vid sekundarnog hazarda nastaje zbog velikog pritiska ubrzanja tla na snežni pokrivač, odnosno, na nestabilan sloj snežnog pokrivača. U ilustrativnom primeru za oblast Kopaonika, za debljinu snega uzeta je prosečna debljina snega u martu za period od 2002-2017. godine. Korišćenjem empirijskog odnosa između PGA, nagiba terena i debljine snega, napravljene su probabilističke karte opasnosti od snežnih lavina izazvanih zemljotresom, za verovatnoće prekoračenja amplituda kretanja tla od 2%, 5% i 10% u 50 godina (povratni periodi od 2.475, 975 i 475 godina, respektivno), a za debljinu snega koja je prosečna za mart na Kopaoniku i koja iznosi 65,65cm. Kao što se i očekivalo, razmatrane varijacije u dubokoj geologiji takođe su dovele do znatno šireg područja potencijalnih snežnih lavina izazvanih zemljotresom u poređenju sa područjima procenjenim samo na bazi lokalnog

tla, odnosno pomoći standardnih karata seizmičkog hazarda. Karte koje uzimaju u obzir i duboku geologiju pokrivaju znatno veći deo skijališta što znači da bi se korišćenjem ovih karata poboljšala bezbednost kako radnika tako i posetilaca centra Kopaonik.

Procena veličine rizika, odnosno samog uticaja pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom na bezbednost i zdravlje na radu, može se realizovati na nekoliko načina, odnosno primenom kvalitativnih, kvantitativnih ili semikvantitativnih metoda procene rizika. Metoda za procenu rizika koja je korišćena u ovoj disertaciji je kvantitativna ALARP metoda. ALARP metoda za procenu rizika ima za cilj smanjenje rizika na najmanji mogući nivo, odnosno prihvatanje najmanjeg mogućeg rezidualnog rizika, čije dalje smanjenje ili uklanjanje ne bi bilo isplativo. Rezultat ALARP analize se sastoji u procenjivanju nivoa rizika na osnovu dijagrama koji se sastoji od tri dela: dela neprihvatljivog rizika, dela (potpuno) prihvatljivog rizika i ALARP dela, tj. dela rizika onoliko niskog koliko je to razumno moguće postići (ALARP je skraćenica od "As Low As Reasonably Possible"). ALARP region leži između neprihvatljivog rizika i prihvatljivog rizika. U slučajevima kada se procenom rizika dođe do zaključka da neki rizik "upada" u ALARP region, potrebno je različitim metodama prevencije dalje smanjiti rezidualni rizik. ALARP nivo se postiže kada vreme, problemi i troškovi dodatnih mera smanjenja postanu nerazumno nesrazmerni dodatnom smanjenju rizika. Daljom kontrolom rizika koja se najčešće rešava prevencijom, odnosno preventivnim merama, ALARP nivo rizika je potrebno dovesti do prihvatljivog nivoa i na tom nivou pokušati održavati rizik. Procenjivanje rizika preko ALARP metode rađeno je za skijaški centar Kopaonik koji se sastoji od 62km staza i 25 žičara. Računat je individualni i društveni rizik za objekte u okviru žičara, koje su procenjene na broj 22. Kako je probabilistička analiza hazarda računata za mesec mart zbog prosečne debljine snega, takođe je i za procenu rizika uzet mesec mart sa radnim vremenom žičara koje je najčešće od 08:00 do 16:30. Za potrebe ilustrativnog primera i zbog nedostatka preciznih podataka, pretpostavili smo da je ukupan broj ljudi koji mogu da se nalaze u objektu za vreme radnog vremena žičare, četiri. Takođe smo pretpostavili da prosečno vreme boravka najugroženije osobe u objektu iznosi 10 sati, dok druge tri osobe borave u objektu oko 9 sati, sedam dana nedeljno sa čestim boravljenjem izvan objekta, odnosno pored same žičare.

Potpoglavlje 6.4.5. predstavlja modifikaciju ALARP analize, jer se uz pomoć formule broj 15 proračunava granična vrednost povredljivosti, dok upravljačima skijaških centara ostaje da odrede stvarne povredljivosti za njihove objekte. U

slučaju da je povredljivost prevelika, sugeriše se šta bi se moglo uraditi da bi se rizik smanjio (npr. ojačanje konstrukcije, izgradnja sistema barijera itd.). Na primer, u našem konkretnom primeru (verifikaciji metode) uzete su tri zone povredljivosti, za verovatnoću hazarda od 10% u 50 godina:

1. povredljivost veća od 0,12 – neprihvatljiv rizik, mora se zabraniti rad,
2. povredljivost izmedju 0,01 i 0,12 – ALARP rizik; može da dođe do žrtava; potrebno je da postoji objekat koji može da izdrži udar lavine bez rušenja, ali uz određene štete,
3. povredljivost manja od 0,01 – potpuno prihvatljiv rizik; veoma mala mogućnost da bude žrtava; teško ostvarivo samo na bazi otpornih objekata; za ovaj nivo rizika neophodno je da postoje sistemi barijera ili mostovi za lavine.

Dalje, za verovatnoću hazarda od 5% u 50 godina, postoje sledeće zone povredljivosti:

1. povredljivost veća od 0,17 – neprihvatljiv rizik; mora se zabraniti rad,
2. povredljivost izmedju 0,02 i 0,17 – ALARP rizik; može da dođe do žrtava, potrebno je da postoji objekat koji može da izdrži udar lavine bez rušenja, ali uz određene štete,
3. povredljivost manja od 0,02 – potpuno prihvatljiv rizik; veoma mala mogućnost da bude žrtava; teško ostvarivo samo na bazi otpornih objekata; za ovaj nivo rizika, neophodno je da postoje sistemi barijera ili mostovi za lavine.

Na kraju, za verovatnoću hazarda od 2% u 50 godina, prema formulama, dobijamo sledeće zone povredljivosti:

1. povredljivost veća od 0,27 – neprihvatljiv rizik; mora se zabraniti rad,
2. povredljivost izmedju 0,03 i 0,27 – ALARP rizik; može da dođe do žrtava; potrebno je da postoji objekat koji može da izdrži udar lavine bez rušenja, ali uz određene štete,
3. povredljivost manja od 0,03 – potpuno prihvatljiv rizik; veoma mala mogućnost da bude žrtava; teško ostvarivo samo na bazi otpornih objekata; za ovaj nivo rizika, neophodno je da postoje sistemi barijera ili mostovi za lavine.

## 7.2. Zaključci

Na osnovu realizovanog istraživanja unapređene metodologije procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom izvedeni su zaključci čijom bi se primenom značajno unapredila bezbednost na radu u planinskim regionima i skijaškim centrima, smanjio nivo

rizika i poboljšao kvalitet upravljanja zdravljem na radu. Zaključci su prikazani u nastavku.

Pojedinačni zaključci:

- Zanemarivanjem bilo kojeg od ključnih faktora koji utiču na pojavu snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom (duboka geologija, sastav stena, visina snežnog pokrivača, rasprostranjenost kritičnih nagiba, itd.) smanjuje se preciznost pri računanju nivoa hazarda.
- Rezultati pokazuju da varijacije geološkog okruženja za određene delove analizirane oblasti dovode do 30-70% veće vrednosti maksimalnog ubrzanja tla (PGA) nego vrednosti dobijene u standardnim kartama hazarda (koje se kreiraju pomoću jednačina za prognoziranje jačine kretanja tla koja ne uzimaju u obzir duboku geologiju, već samo lokalne uslove tla).
- Snežne lavine uzrokovane zemljotresom predstavljaju složen sistem koji odlikuje veliki broj elemenata koji u interakciji sa okolinom generišu veliki broj rizika vezanih za bezbednost i zdravlje na radu.
- Da bi se mogli povećati bezbednost i zdravlje na radu, neizostavan deo procesa upravljanja rizicima bezbednosti i zdravlja na radu jeste procena rizika odnosno, određivanje veličine rizika. Veličinu rizika moguće je izračunati na osnovu ALARP metode za procenu rizika koja je bazirana na smanjenju rizika na najmanji mogući nivo. U slučaju snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom procena rizika može da se vrši za individualni rizik, kao i za društveni rizik na osnovu graničnih vrednosti povredljivosti za različite verovatnoće pojave tokom veka trajanja konstrukcije (kao npr. 2% u 50 godina, 5% u 50 godina i 10% u 50 godina).

Opšti zaključci:

- Dokazana je hipoteza da je moguće unaprediti metodu procene nivoa bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj rizika od snežnih lavina izazvanih zemljotresom kombinovanjem metode uniformnog hazarda za analizu seizmičkog hazarda, jednačina za procenu stabilnosti snežnih kosina, i inverzne ALARP metode.
- Dokazano je da bi ovakva unapređena metodologija u velikoj meri uticala na povećanje preciznosti procene veličine rizika kada je u pitanju bezbednost i zdravlje na radu u skijaškim centrima i generalno u planinskim regijama u kojima postoji opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom.

### 7.3. Pravci daljeg istraživanja

Pravci daljih istraživanja u cilju unapređenja metodologije procene bezbednosti i zdravlja na radu za slučaj snežnih lavina izazvanih zemljotresom odnose se najviše na unapređenje preciznosti pri računanju rizika, kao i dostupnosti podataka za detaljniju analizu. Iako je jasno dokazano da se duboka geologija treba uzeti u obzir prilikom izračunavanja opasnosti (ili će u suprotnom procenjena opasnost od snežnih lavina izazvanih zemljotresom biti značajno potcenjena), očigledno je da je analiza koja je prikazana u ilustrativnom primeru samo preliminarna. Neophodno je povećanje preciznosti i pouzdanosti pri odabiru veličine uzorka, odnosno dostupnosti podataka za analizu i procenu rizika. Ovde se pre svega misli na podatke o stvarno dogođenim lavinama koje su uzrokovane zemljotresom, podatke o snežnom pokrivaču (debljina, čvrstoća, gustina, itd.), regionalne seizmološke podatke, kao i podatke o zaposlenima u skijaškim centrima. Na taj način bi se metodologija, kao i veličina rizika menjala kroz vreme prateći promene ulaznih parametara, odnosno podataka korišćenih za analizu.

U budućim istraživanjima za oblast Kopaonika, na primer, neophodno je poboljšati, odnosno smanjiti ograničenu statistiku podataka o snežnim padavinama, kao i voditi istraživanje vezano za nepoznate karakteristike snega na Kopaoniku i drugim skijaškim centrima u Srbiji. Pored unapređenja podataka o karakteristikama snežnog pokrivača, za Kopaonik, a i generalno za planinske oblasti u Srbiji, potrebno je ponovo uraditi analize seizmičkog hazarda svaki put kada značajni dodatni seizmološki podaci budu dostupni. Kako bi karte seizmičkog hazarda bile detaljnije i preciznije sračunate, takođe je neophodno vršiti i dalje kalibracije atenuacionih jednačina (tj. jednačina za prognoziranje jačine kretanja tla) za ovaj region, bez obzira što su rezultati koji su prikazani u ovoj disertaciji u odličnoj saglasnosti sa drugim regionalnim kartama. Za pomenute kalibracije atenuacionih jednačina neophodni su novi dostupni zapisi jakog kretanja tla.

Rezultati budućih istraživanja na pomenutim poljima, u velikoj meri uticaće na bezbednost i zdravlje na radu u planinskim regionima i skijaškim centrima. Povećanjem preciznosti analiza i procena rizika, pospešuje se i povećava konkurentnost srpskih skijaških centara u istočnom delu Evrope i na globalnom tržištu potencijalnih lokacija za investicije. Kako bi se na najbolji način odgovorilo na potencijalne rizike, zaštitili posetioци i unapredili bezbednost i zdravlje na radu, od ključnog je značaja uvesti neophodne mere prevencije, gde na prvom mestu spada upravo detaljnija analiza rizičnih i ugroženih zona pojave snežnih lavina uzrokovanih zemljotresom.

## 8. LITERATURA

- [1] R. Vujović, *Upravljanje rizicima i osiguranje*. Beograd: Univerzitet Singidunum, 2009.
- [2] P. D. M. Ivanjac, S. Luković, and D. Mišljenović, *Bezbednost i zdravlje na radu Sindikalni priručnik*. UGS Nezavisnost" Beograd.
- [3] B. O. Alli, *Fundamental Principles Of Occupational Health And Safety*. International Labour Office – Geneva: ILO, 2008.
- [4] P. Chernouss, Y. Fedorenko, E. Mokrov, and N. Barashev, "Studies of seismic effects on snow stability on mountain slopes," *Polar Meteorol. Glaciol.*, vol. 20, pp. 62–73, 2006.
- [5] E. A. Podolskiy, K. Nishimura, O. Abe, and P. A. Chernous, "Earthquake-induced snow avalanches: I. Historical case studies," *J. Glaciol.*, vol. 56, no. 197, pp. 431–446, 2010.
- [6] E. A. Podolskiy, "Experimental studies on earthquake-induced snow avalanches (地震動が誘発する雪崩の実験的研究)," Nagoya University, 2010.
- [7] S. Ogura, Y., Izumi, K., Miyazaki, N. and Kobayashi, "An avalanche caused by an earthquake at Nakazato village, Niigata Prefecture, On January 4th 2001," 2001.
- [8] H. Matsushita, S. Ikeda, Y. Ito, M. Matsuzawa, and H. Nakamura, "Avalanches induced by earthquake in North Tochigi prefecture on 25 February 2013," no. February, pp. 1122–1129, 2013.
- [9] E. A. Podolskiy, K. Nishimura, O. Abe, and P. A. Chernous, "Earthquake-induced snow avalanches : II . Experimental study," vol. 56, no. 197, pp. 447–458, 2010.
- [10] C. Pérez-Guillén *et al.*, "Evaluation of a snow avalanche possibly triggered by a local earthquake at Vallee de la Sionne, Switzerland," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 108, no. October 2015, pp. 149–162, 2014.
- [11] D. Giardini, S. Wiemer, D. Fäh, and N. Deichmann, "Seismic Hazard Assessment of Switzerland , 2004," no. November, p. 82, 2004.
- [12] C. Pérez- Guillén, B. Sovilla, E. Suriñach, M. Tapia, and A. Köhler, "Deducing avalanche size and flow regimes from seismic measurements," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 121, no. OCTOBER, pp. 25–41, 2016.
- [13] B. Đ. Bulajić, *Metode za procenu rizika*. 2018, pp. 1–222.
- [14] J. C. Pine, *Natural Hazards Analysis*. Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [15] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), "EM-DAT The International Disaster Database," 2018. [Online]. Available:

<https://www.emdat.be/>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.

- [16] D. Hyndman and D. Hyndman, *Natural Hazards and Disasters: Third Edition*. Yolanda Cassio, Brooks-Cole, Cengage Learning, 2010.
- [17] E. Bryant, *Natural Hazards*. Cambridge University Press, 2005.
- [18] E. J. Vaughan and T. M. Vaughan, *Essentials of Insurance: A Risk Management Perspective*. John Wiley and Sons, 1995.
- [19] V. Jovanović, B. Đurđev, Z. Srđić, and U. Stankov, *Geografski informacioni sistemi*. Beograd: Univerzitet Singidunum, Univerzitet u Novom Sadu, 2012.
- [20] J. Nott, *Extreme Events - A Physical Reconstruction and Risk Assessment*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [21] S. Bajić and S. Popov, “Flood hazard analysis - GIS ASPECTS OF POSSIBLE SOLUTION,” *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 26, no. 2, pp. 5041–5048, 2017.
- [22] S. Bajić, “Mapiranje lavina,” Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Univezitet u Novom Sadu, 2013.
- [23] J. Fredston and D. Fesler, *Snow Sense: A Guide to Evaluating Snow Avalanche Hazard*. Alaska: Alaska Mountain Safety Center, Inc., 2011.
- [24] P. Schaefer and D. McClung, *The Avalanche Handbook*. Seattle, USA: The Mountaineers Books, 2006.
- [25] M. Milosavljević, *Klimatologija*. Beograd: IDP “Naucna knjiga,” 1990.
- [26] M. Milosavljević, *Meteorologija*. Beograd: IDP “Naucna knjiga,” 1990.
- [27] E. R. LaChapelle, “Snow Avalanches - their characteristics, forecasting and control,” *WestWide Avalanche Network, U.S. Department of Agriculture*, 2002. [Online]. Available: <https://people.uwec.edu/jolhm/EH3/Group4/references/snowavalanche.htm>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [28] M. Schweizer, Jürg. Jamieson, Bruce. Schneebeli, “Snow avalanche formation and dynamics,” *Rev. Geophys.*, vol. 41, no. 4, 2003.
- [29] B. Glavatović, *Seizmologija*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, 2002.
- [30] Shtreber, “Litosferne ploče,” 2018. [Online]. Available: <https://www.shtreber.com/Litosferne-ploce>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [31] B. Đ. Bulajić, M. I. Manić, and Đ. Lađinović, “Effects of shallow and deep geology on seismic hazard estimates: A case study of pseudo-acceleration response spectra for the northwestern Balkans,” *Nat. Hazards*, vol. 69, no. 1, pp. 573–588, 2013.
- [32] 2010 CEN, “CEN. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance –

Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings; 2005a," vol. 2004, pp. 1–229, 2010.

- [33] V. W. Lee, M. I. Manić, B. Đ. Bulajić, D. Herak, M. Herak, and M. D. Trifunac, "Microzonation of Banja Luka for performance-based earthquake-resistant design," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 78, pp. 71–88, 2015.
- [34] T. G. Glazovskaya, S. M. Myagkov, E. S. Troshkina, K. V. Akif'eva, N. L. Kondakova, and V. I. Kravtcova, *Rasprostranenie i rejim lavin [Avalanches spreading and regime]*, Eds. Geogr. Moscow: Moscow State Univ. Press, 1992.
- [35] D. K. Keefer, "Landslides caused by earthquakes.,," *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 95, no. 4, pp. 406–421, 1984.
- [36] V. Mučenski, "Model semikvantitativne procene rizika zaštite na radu za procese izgradnje," Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2013.
- [37] K. Vukorepa and A. Burger, *Sigurnost i osnove zaštite na radu*. Zagreb: Kontrol biro- Društvo za osiguranje kvalitete.
- [38] J. Ridley and J. Channing, *Safety at Work*, Sixth edit. Elsevier, 2003.
- [39] Unison, "Temperature at Work – Unison health and safety information sheet." [Online]. Available: <https://www.unison.org.uk/content/uploads/2014/08/TowebTemperature-at-Work-Information-Sheet-Aug14-update2.pdf>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [40] Wikipedia - Boforova Skala, "Boforova skala." [Online]. Available: [https://sr.wikipedia.org/sr-el/Бофорова\\_скала](https://sr.wikipedia.org/sr-el/Бофорова_скала), Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [41] United States Department of Labor, "Occupational Safety and Health Administration - Hazards/Precautions." [Online]. Available: [https://www.osha.gov/dts/weather/winter\\_weather/hazards\\_precautions.html](https://www.osha.gov/dts/weather/winter_weather/hazards_precautions.html), Poslednji put pristupljeno 01.08.2018. .
- [42] United States Department of Labor, "Occupational Safety and Health Administration - Preparedness," 1994. [Online]. Available: [https://www.osha.gov/dts/weather/winter\\_weather/beprepared.html](https://www.osha.gov/dts/weather/winter_weather/beprepared.html), Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [43] F. Techel *et al.*, "Avalanche fatalities in the European Alps (1969/1970 - 2014/2015)," *Geogr. Helv.*, 2016.
- [44] R. I. Perla and M. M. Jr, *Avalanche Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1976.
- [45] D. Mrkšić and Đ. Ćosić, *Upravljanje rizicima i osiguranje*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2015.

- [46] Trades Union Congress, "TUC - Working in extremes of temperature (hot or cold)," 2013. [Online]. Available: <https://www.tuc.org.uk/research-analysis/reports/working-extremes-temperature-hot-or-cold>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [47] V.W.Lee, M.D.Trifunac, B.Đ.Bulajić, M.I.Manić, D.Herak, and M.Herak, "Seismic microzoning of Belgrade," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 97, pp. 395–412, 2017.
- [48] V.W.Lee *et al.*, "Seismic microzoning of Štip in Macedonia," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 98, pp. 54–66, 2017.
- [49] V.W. Lee *et al.*, "Seismic microzoning in Skopje, Macedonia," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 98, pp. 166–182, 2017.
- [50] V. W. Lee, M.D. Trifunac, B.Đ. Bulajić, M.I. Manić, D. Herak, and M. Herak, "Seismic microzoning of Kraljevo in Serbia," *Izgradnja*, vol. 71, no. 5–6, pp. 159–178.
- [51] B. Đ. Bulajić and M. I. Manić, "Critical review of the 1975 seismic microzonation of the city of Kraljevo together with the spa town of Mataruška Banja (in Serbian with English abstract)," *Izgradnja*, vol. 70, no. 7–8, pp. 287–296, 2016.
- [52] M. D. Trifunac and A. G. Brady, "On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 65, pp. 139–162, 1975.
- [53] S. Bajić and S. Popov, "Using GIS techniques for avalanche mapping," in *XVI International Scientific Conference on Industrial Systems*, 2014.
- [54] M. D. Trifunac, V. W. Lee, M. Živčić, and M. I. Manić, "On the correlation of Mercalli- Cancani-Sieberg intensity scale in Yugoslavia with the peaks of recorded strong earthquake ground motion," *Eur. Earthq. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 27–33, 1991.
- [55] V. W. Lee, "Pseudo relative velocity spectra in former Yugoslavia," *Eur. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 12–22, 1995.
- [56] V.W.Lee and M.D.Trifunac, "Frequency dependent attenuation of strong earthquake ground motion in Yugoslavia," *Eur. Earthq. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 3–13, 1992.
- [57] V.W.Lee and M.D.Trifunac, "Empirical scaling of Fourier amplitude spectra in former Yugoslavia," *Eur. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 47–61, 1993.
- [58] V.W.Lee and M.I.Manić, "Empirical scaling of response spectra in former Yugoslavia," in *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, 1994, pp. 2567–2572.
- [59] V.W.Lee and M.I.Manić, "Empirical scaling of strong earthquake ground motion in the former Yugoslavia – a review," *Izgradnja*, vol. 63, no. 5–6, pp. 155–158, 2009.

- [60] V.W.Lee, M.D.Trifunac, B.Đ.Bulajić, and M.I.Manić, “A preliminary empirical model for frequency-dependent attenuation of Fourier amplitude spectra in Serbia from the Vrancea earthquakes,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 83, pp. 167–179, 2016.
- [61] V.W. Lee, M.D.Trifunac, B.Đ.Bulajić, and M.I.Manić, “Preliminary empirical scaling of pseudo relative velocity spectra in Serbia from the Vrancea earthquakes,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 86, pp. 41–54, 2016.
- [62] V.W.Lee, M.D.Trifunac, D. Herak, M. Herak, B.Đ.Bulajić, and M.I.Manić, “Problems with scaling design spectra by peak acceleration—the contribution of Vrancea earthquakes to seismic hazard in Serbia,” *Izgradnja*, vol. 70, pp. 265–276, 2016.
- [63] M. I. Manić, “Empirical equations for scaling horizontal i.e. vertical PSV spectra developed on the basis of solely the ex-Yugoslav EQINFO strong motion data (174 horizontal i.e. 77 vertical accelerograms),” in *In: Personal Archive of Prof. Manić.*, .
- [64] M. I. Manić, “Scaling laws for Fourier spectra based on strong motion data obtained in former Yugoslavia,” in *Proceedings of the International Conference in Earthquake Engineering to Mark 40 Years From Catastrophic 1963 Skopje Earthquake and Successful City Reconstruction – SE-40EEE*, 2003.
- [65] H. B. Seed, C. Ugas, and J. Lysmer, “Site-dependent spectra for earthquake-resistant design,” *Bull. Seism. Soc. Am*, vol. 66, no. 1, pp. 221–243, 1976.
- [66] H. B. Seed, R. Murarka, J. Lysmer, and I. I. M., “Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes,” *Bull. Seism. Soc. Am*, vol. 66, no. 4, pp. 1323–1342, 1976.
- [67] A.C. Cornell, “Engineering seismic risk analysis,” *Bull. Seism. Soc. Am*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [68] R.K.McGuire, “Fortran computer program for seismic risk analysis - Technical Report 76-77,” 1976.
- [69] R.K.McGuire, “Computations of seismic hazard,” *Ann. Geofis.*, vol. 36, pp. 181–200, 1993.
- [70] B. Đ. Bulajić, “Tumačenje dobijenih vrednosti pomoću determinističkog i probabilističkog pristupa ocenjivanju seizmičkog hazarda,” Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Univerzitet u Novom Sadu.
- [71] B. Bulajić and Đ. Lađinović, “Definisanje seizmičkog dejstva u Nacionalnom Aneksu za Evrokod 8,” in *Konferencija „Savremena građevinska praksa 2014”, u organizaciji Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu i Društva građevinskih inženjera Novog Sada*, 2014,

pp. 125–147.

- [72] HSE - Health and Safety Executive, “ALARP ‘at a glance.’” [Online]. Available: <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.. .
- [73] Risk Management and Assessment for Business, “Knowledge Bank- So what is ALARP?” [Online]. Available: <http://www.risktec.tuv.com/knowledge-bank/technical-articles/so-what-is-alarp---.aspx>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [74] The Environmental Protection Department (EPD) – The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, “Risk Measures and Hong Kong Government Risk Guidelines (HKRG).” [Online]. Available: [https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia\\_1252006/html/eiareport/Part3/Section13/Sec3\\_13.htm](https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1252006/html/eiareport/Part3/Section13/Sec3_13.htm), Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [75] Službeni Glasnik, “Službeni Glasnik RS, 2009,” 2009. [Online]. Available: <http://www.sglasnik.com/>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [76] USGS, “Earthquake catalogue for all earthquakes with  $M \geq 2.5$  in the period 1900–2017 for the geographic region between  $40.5^\circ$  N and  $47.5^\circ$  N, and  $12.5^\circ$  E and  $24.5^\circ$  E,” 2017. [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.. .
- [77] RSZS, “Catalogue of earthquakes  $M \geq 3.5$  of the Republic of Serbia,” 2017. [Online]. Available: <http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Katalog-zemljotresa.%0Apdf%0A>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [78] infoKOP, “Statistics of the ski resort Kopaonik,” 2017. [Online]. Available: <http://www.infokop.net/info/%0Aski-info-2.html%0A>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [79] L. R. Jordanovski *et al.*, “Strong Earthquake Ground Motion Data in EQINFO: Yugoslavia, Part I, Report No. 87-05,” 1987.
- [80] M. N. Petrović, *Atlas of Seismic Hazard Maps of the Republic of Serbia*. Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, 1998.
- [81] V. W. Lee, M. D. Trifunac, M. Herak, and D. Herak, “Minimum radius of seismic activity for earthquake hazard analyses,” *Izgradnja*, vol. 65, pp. 219–226, 2011.
- [82] M. Marović, I. Đoković, and M. Toljić, “Neotectonic Map of Serbia.” Ministry for the Protection of Natural Resources and Environment, Republic of Serbia., 2002.
- [83] M. Zelić, M. Marroni, L. Pandolfi, and B. Trivic, “Tectonic setting of the Vardar suture zone (Dinaric-Hellenic belt): the example of the Kopaonik area (southern Serbia),” *Ofoliti*, vol. 35, no. 1, pp. 49–69, 2010.

- [84] Institut za geološka i geofizička istraživanja, "Osnovna geološka karta SFRJ – Vrnjci, K34-18." Savezni geološki zavod, Beograd, 1970.
- [85] Institut za geološka i geofizička istraživanja, "Osnovna geološka karta SFRJ – Novi Pazar, K34-30." Savezni geološki zavod, Beograd, 1970.
- [86] Službeni list SFRJ, *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*. 1990.
- [87] RSZS, "Seismic Hazard Maps – Peak Horizontal Ground Acceleration," 2015. [Online]. Available: [http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte\\_hazarda.%0A.htm%0A](http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda.%0A.htm%0A), Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [88] BSHAP (Harmonization of Seismic Hazard Maps for the Western Balkan Countries), "NATO SfP Project No. 984374," 2011.
- [89] V.W. Lee and M. D. Trifunac, "Seismic hazard maps in Serbia," *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 2017.
- [90] N. Ambraseys, J. Douglas, B. Margaris, R. Sigbjörnsson, P. Smit, and P. Suhadolc, "Internet site for European strong motion data," in *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, 2002.
- [91] N. Ambraseys *et al.*, "Dissemination of European strong-motion data, volume 2," in *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- [92] infoKOP, "Žičare i staze u Ski centru Kopaonik," 2018. [Online]. Available: <http://www.infokop.net/staze-i-zicare/zicare-i-staze.html>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.
- [93] Skijališta Srbije, "Skijališta Srbije - Ski centar Kopaonik." [Online]. Available: <http://www.skijalistasrbije.rs/sr/mapa-skijalista-kopaonik>, Poslednji put pristupljeno 01.08.2018.