

# Kvantitativna procjena podložnosti stijenskih kosina odronima integracijom kinematičkih i statističkih analiza

---

Sećanj, Marin

Doctoral thesis / Disertacija

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:461659>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-04**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Marin Sečanj

**KVANTITATIVNA PROCJENA  
PODLOŽNOSTI STIJENSKIH KOSINA  
ODRONIMA INTEGRACIJOM  
KINEMATIČKIH I STATISTIČKIH  
ANALIZA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Marin Sečanj

**KVANTITATIVNA PROCJENA  
PODLOŽNOSTI STIJENSKIH KOSINA  
ODRONIMA INTEGRACIJOM  
KINEMATIČKIH I STATISTIČKIH  
ANALIZA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Snježana Mihalić Arbanas

Zagreb, 2020.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Marin Sečanj

**QUANTITATIVE ROCKFALL  
SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT BY  
INTEGRATING KINEMATIC AND  
STATISTICAL ANALYSES**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Prof. Snježana Mihalić Arbanas, PhD

Zagreb, 2020.

## SAŽETAK

U doktorskom radu prikazani su rezultati istraživanja čija je svrha bila razvoj nove metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu primjenom daljinskih istraživanja. Metoda je razvijana na četiri pilot područja izgrađenim od karbonatnih i klastičnih naslaga: stijenske kosine iznad grada Omiša, stijenske kosine Brljan u nacionalnom parku Krka te stijenski zasjeci Špičunak i Lokve u Groskom kotaru. 3D digitalni modeli stijenskih kosina pilot područja, visoke preciznosti i razlučivosti, izrađeni su na osnovi terestričkog laserskog skeniranja i snimanjem iz zraka pomoću bespilotne letjelice. Analizom digitalnih modela pilot područja identificirane su i određene značajke stijenske mase (stupanj trošnosti i vrsta stijene) i geometrijske značajke diskontinuiteta (orijentacija i setovi diskontinuiteta, razmak i postojanost diskontinuiteta) ručnim, polu-automatiziranim i automatiziranim metodama i tehnikama. Na osnovi rezultata analiziranih podataka izdvojene su kvazi-homogene inženjerskogeološke zone koje su zajedno s pripadajućim podacima o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta predstavljale ulazne podatke za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Podložnost stijenskih kosina odronima kvantificirana je s obzirom na indeksne pokazatelje podložnosti planarnom, klinastom i slomu prevrtanjem te indeksom podložnosti stijenskih kosina odronima. Navedeni indeksni pokazatelji računati su za svaku ćeliju digitalnih modela istraživanih stijenskih kosina na temelju analiza vjerojatnosti pojave diskontinuiteta ili presječnica diskontinuiteta na određenom dijelu stijenske kosine, prostornih kinematičkih analiza i vrijednosti modificiranog kinematičkog indeksa hazarda. Cijeli proračun u potpunosti je automatiziran pomoću razvijenog algoritma *ROCKS*. Modeli podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područja izrađeni su interpolacijom vrijednosti indeksnih pokazatelja na digitalnim modelima površina stijenskih kosina. Verifikacijom modela podložnosti utvrđeno je da visoke vrijednosti podložnosti ukazuju na potencijalno nestabilne stijenske blokove, nepovoljno orijentirane diskontinuitete, a zone veće gustoće visokih vrijednosti indeksnih pokazatelja ukazuju na prioriteta područja prilikom ublažavanja hazarda i rizika od odrona. Metoda za kvantitativnu procjenu stijenskih kosina odronima može se primjenjivati u inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima stijenskih kosina, u inženjerskim projektima sanacije i zaštite stijenskih kosina te za mjere ublažavanja hazarda i rizika od odrona.

**Ključne riječi:** odroni, automatizirana procjena podložnosti, modeli podložnosti odronima TLS, UAV, digitalni modeli, stijenska masa, Omiš, Brljan, Lokve, Špičunak,

## ABSTRACT

The aim of this doctoral dissertation was to develop a method for quantitative rockfall susceptibility assessment at slope scale using techniques of remote sensing. For the development of this method 4 pilot areas were chosen, each with different structural-geological setting. These pilot areas are rock slopes above the town of Omiš, rock slopes and rock cuts Brljan in the Krka National Park, rock cuts Špičunak and Lokve in the Gorski kotar area. High-resolution and precision digital models of the investigated rock slopes were created based on terrestrial laser scanning and UAV based photogrammetry. Identification and mapping of the rock mass properties (degree of weathering and rock type) and the geometrical properties of the discontinuities (orientation and sets, spacing and trace length) was carried out by remote sensing on the digital models using manual, semi-automated and automated techniques and methods. Also, for the Lokve rock cut pilot area two different rock types were determined by semi-automated analysis of intensity data, derived from terrestrial laser scanner. Based on analysed rock mass and discontinuity data, pilot areas were divided into 65 quasi-homogenic engineering geological zones and each zone was associated with certain rock mass and discontinuity data that can be found in that zone. Engineering geological zones, along with rock mass and discontinuity properties, were used as input data for quantitative rockfall susceptibility assessment. In order to quantify susceptibility, 4 susceptibility indices were developed: Plane Failure, Wedge Failure and Toppling Susceptibility Indices, from which Rockfall Susceptibility Index is derived based on the probability of union. Susceptibility indices were calculated for each 3D rock slope model cell based on the probability analysis, spatial kinematic analysis and modified Kinematic Hazard Index. This calculation processes were entirely automated by developed algorithm ROCKS in MATLAB programming platform. Rockfall susceptibility models were created by interpolation of the susceptibility indices on the digital rock slope models for each pilot area. In total 16 rockfall susceptibility models were created. Verification of the resulting rockfall susceptibility models has indicated that high values of Rockfall Susceptibility Index highlight potentially unstable rock blocks and unfavourably orientated discontinuities. Also, zones with higher density of high Rockfall Susceptibility Index values point out to certain quasi-homogenic engineering geological zones which should be priority in rockfall hazard and risk reduction by efficient design of rock slope protection measures. Developed method for quantitative rockfall susceptibility assessment has shown that it can be used in detailed engineering geological and geotechnical investigation of rock slopes, and

rock slope remediation and protection assessments. Also, it represents a precise and valuable input data for rockfall hazard and risk assessment at the slope scale.

**Key words:** rockfall, automated rockfall susceptibility assessment, rock mass, discontinuities, TLS, UAV, rock slope digital models, Omiš, Brljan, Lokve, Špičunak

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Svrha i ciljevi istraživanja.....	3
1.2. Struktura doktorskog rada.....	6
2. TEORIJSKE OSNOVE .....	9
2.1. Odroni u stijenskoj masi .....	9
2.1.1 Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta.....	10
2.1.2 Procesi na stijenskim kosinama .....	25
2.1.3 Vrste slomova na stijenskim kosinama .....	27
2.2. Daljinska istraživanja stijenske mase.....	30
2.2.1 Snimanje stijenskih kosina terestričkim laserskim skenerom i bespilotnom letjelicom .....	30
2.2.2 Modeliranje površina stijenskih kosina iz oblaka točaka .....	33
2.2.3 Određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase iz digitalnih modela kosina.....	35
2.3. Podložnost stijenskih kosina odronima.....	42
3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA .....	49
3.1. Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša.....	49
3.1.1 Prirodne značajke istraživanog područja.....	50
3.1.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja.....	55
3.2. Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan.....	59
3.2.1 Prirodne značajke istraživanog područja.....	60
3.2.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja.....	63
3.3. Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak .....	67
3.3.1 Prirodne značajke istraživanog područja.....	68
3.3.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja.....	72
3.4. Pilot područje 4 – stijenski zasjek u naselju Lokve .....	73
3.4.1 Prirodne značajke istraživanog područja.....	74
4. METODE ISTRAŽIVANJA .....	79
4.1. Fotogrametrijsko snimanje bespilotnom letjelicom i terestričko lasersko skeniranje stijenskih kosina .....	80
4.2. Izrada 3D digitalnih modela površine stijenskih kosina .....	86
4.2.1 Određivanje geometrijskih značajki stijenskih kosina i utvrđivanje prevjesa .....	92
4.3. Određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase iz digitalnih modela .....	94

4.3.1	Orijentacija diskontinuiteta .....	95
4.3.2	Automatizirano grupiranje diskontinuiteta u setove .....	103
4.3.3	Razmak diskontinuiteta .....	109
4.3.4	Postojanost diskontinuiteta.....	112
4.3.5	Značajke stijenske mase .....	113
4.4.	Određivanje inženjerskogeoloških zona.....	120
4.5.	Vjerojatnost pojave diskontinuiteta i presječnica .....	124
4.6.	Kvantifikacija podložnosti stijenskih kosina odronima.....	129
4.6.1	Prostorne kinematičke analize.....	129
4.6.2	Indeks podložnosti odronima .....	132
4.7.	Automatizacija kvantitativne procjene podložnosti .....	139
5.	GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE DISKONTINUITETA I STIJENSKE MASE UTVRĐENE ANALIZAMA DIGITALNIH MODELA.....	145
5.1.	Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša .....	145
5.1.1	Inženjerskogeološka zona Z1 .....	147
5.1.2	Inženjerskogeološka zona Z2 .....	150
5.1.3	Inženjerskogeološka zona Z3 .....	152
5.1.4	Inženjerskogeološka zona Z4 .....	154
5.1.5	Inženjerskogeološka zona Z5 .....	156
5.1.6	Inženjerskogeološka zona Z6 .....	158
5.1.7	Inženjerskogeološka zona Z7 .....	160
5.1.8	Inženjerskogeološka zona Z8 .....	162
5.1.9	Inženjerskogeološka zona Z9 .....	165
5.1.10	Inženjerskogeološka zona Z10 .....	167
5.1.11	Inženjerskogeološka zona Z11 .....	168
5.1.12	Inženjerskogeološka zona Z12 .....	171
5.2.	Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan .....	175
5.2.1	Inženjerskogeološke zone Z1 i Z2 .....	178
5.2.2	Inženjerskogeološka zona Z3 .....	180
5.2.3	Inženjerskogeološka zona Z4 .....	182
5.2.4	Inženjerskogeološka zona Z5 .....	184
5.2.5	Inženjerskogeološka zona Z6 .....	186
5.2.6	Inženjerskogeološka zona Z7 .....	188
5.2.7	Inženjerskogeološka zona Z8 .....	191
5.2.8	Inženjerskogeološka zona Z9 .....	193
5.2.9	Inženjerskogeološka zona Z10 .....	196
5.2.10	Inženjerskogeološka zona Z11 .....	199
5.2.11	Inženjerskogeološka zona Z12 .....	202
5.2.12	Inženjerskogeološke zone Z13, Z14 i Z15 .....	205
5.3.	Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak.....	210
5.4.	Pilot područje 4 – stijenski zasjek Lokve .....	217

6. REZULTATI AUTOMATIZIRANIH ANALIZA I MODELI PODLOŽNOSTI STIJENSKIH KOSINA ODRONIMA.....	225
6.1. Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša.....	226
6.2. Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan.....	236
6.3. Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak.....	243
6.4. Pilot područje 4 – stijenski zasjek Lokve .....	248
7. VERIFIKACIJA MODELA PODLOŽNOSTI .....	253
8. DISKUSIJA .....	263
8.1. Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta određene iz digitalnih modela stijenskih kosina .....	267
8.2. Vjerojatnost pojave diskontinuiteta i presječnica diskontinuiteta .....	274
8.3. Automatizacija kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima i izrada modela podložnosti .....	276
9. ZAKLJUČAK.....	283
10. LITERATURA .....	289



## POPIS SLIKA

<b>Slika 2.1.</b> Shematski prikaz glavnih geometrijskih značajki diskontinuiteta (modificirano prema Hudson, 1989; Vallejo i Ferrer, 2011). .....	12
<b>Slika 2.2.</b> Shematski prikaz sistematičnog mjerenja orijentacije diskontinuiteta metodom: (a) linijskog i (b) prozorskog snimanja.....	13
<b>Slika 2.3.</b> Prikaz odnosa između sferičnog i Kartezijevog koordinatnog sustava na donjoj polutci (a) i prikaz odnosa između smjera i kuta nagiba pola ravnine i kosinusa smjera vektora u Kartezijevom koordinatnom sustavu (b) (preuzeto iz Allmendinger et al., 2012).....	15
<b>Slika 2.4.</b> (a) Shematski prikaz grupiranja jediničnih svojstvenih vektora matrice $U$ , prikazanim kao točke, u $K$ -dimenzionalnom prostoru i (b) prikaz polova normala diskontinuiteta na stereografskoj projekciji, simboliziranih s obzirom na rezultat spektralnog grupiranja, odnosno s obzirom na pripadajući set diskontinuiteta (preuzeto iz Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006).....	17
<b>Slika 2.5.</b> Shematski prikaz različitih načina definiranja razmaka diskontinuiteta: (a) ukupan razmak, (b) razmak seta diskontinuiteta i (c) normalni razmak seta diskontinuiteta. ....	18
<b>Slika 2.6.</b> Shematski prikaz određivanja postojanosti diskontinuiteta na stijenskoj kosini: (a) metodom kvadratnog prozora gdje $t$ i $c$ predstavljaju diskontinuiteta koji sijeku, odnosno nalaze se unutar prozora i (b) metodom kružnog prozora, gdje bijeli kružići predstavljaju sjecište tragova s prozorom, a crni završetke tragova unutar prozora, tj. vrijednosti $n$ i $m$ (modificirano prema Mauldon i dr., 2001; Wyllie i Mah, 2004). ....	21
<b>Slika 2.7.</b> Shematski prikaz određivanja hrapavosti diskontinuiteta pomoću valovitosti i neravnina (modificirano prema Vallejo i Ferrer, 2011). ....	23
<b>Slika 2.8.</b> Standardni profili hrapavosti i odgovarajuće vrijednosti JRC-a (preuzeto iz Barton i Choubey, 1977). ....	24
<b>Slika 2.9.</b> Podjela klizišta s obzirom na mehanizam gibanja (preuzeto iz Cruden i Varnes, 1996). ....	25
<b>Slika 2.10.</b> Tipovi kretanja stijenskog bloka niz kosinu s obzirom na njen prosječni kut nagiba (modificirano prema Ritchie, 1963).....	26
<b>Slika 2.11.</b> Shematski prikaz osnovnih vrsta slomova na stijenskim kosinama i odgovarajućih geometrijskih uvjeta na stereografskoj projekciji: (a) planarni slom (b) klinasti slom i (c) prevrtanje (preuzeto iz Wyllie i Mah, 2005). ....	27
<b>Slika 2.12.</b> Shematski prikaz tipova prevrtanja s obzirom na strukturne značajke: (a) direktno prevrtanje (b) prevrtanje savijanjem (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005). ....	28
<b>Slika 2.13.</b> Shematski prikaz kombiniranih kinematičkih i jednostavnih analiza stabilnosti primjenjujući kut trenja: (a) konus kuta trenja bloka koji miruje na nagnutom diskontinuitetu i (b) prikaz kinematičkih analiza na stereografskoj projekciji (preuzeto iz Wyllie i Mah, 2005).....	29
<b>Slika 2.14.</b> Shematski prikaz snimanja terestričkim laserskim skenerom (preuzeto iz Jaboyedoff i dr., 2012). ....	31
<b>Slika 2.15.</b> Prikaz 3D modela oblaka točaka stijenske kosine dobiven terestričkim laserskim skenerom, gdje svaka točka osim informacija o prostornom položaju sadrži i podatke o intenzitetu i boji tj. RGB vrijednosti. ....	31
<b>Slika 2.16.</b> Prikaz putanje leta i pozicija snimanja (označeno plavim pravokutnicima) iznad 3D modela dobivenog fotogrametrijskom metodom snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice (preuzeto iz Barreiro i dr., 2014). ....	32
<b>Slika 2.17.</b> Usporedba modela površine stijenske mase izrađenim: (a) 3D Delaunay triangulacijom i (b) RBF tehnikom (preuzeto iz Slob i dr., 2005).....	34
<b>Slika 2.18.</b> Prikaz podjele oblaka točaka na kubne slagaline gdje dubina <i>Octree</i> -a iznosi: (a) jedan, (b) tri i (c) osam. ....	34

<b>Slika 2.19.</b> Prikaz (a) modela oblaka točaka iz kojeg je algoritmom Poissonove rekonstrukcije površine dobiven (b) 3D model površine stijenske mase. ....	35
<b>Slika 2.20.</b> Shematski prikaz modela površine definiranog poligonima. Orijehtacija svakog poligona definirana je s četiri najbliže susjedne točke (hvatišta) poligona (modificirano prema Jaboyedoff i dr., 2007). ....	37
<b>Slika 2.21.</b> Polu-automatizirano generirane plohe (prikazane različitim bojama) u Split-FX-u koje predstavljaju plohe diskontinuiteta na modelu površine stijenske mase. ....	38
<b>Slika 2.22.</b> Prikaz mjerenja razmaka diskontinuiteta na digitalnom modelu površine stijenske mase duž tri linije snimanja s obzirom da vrijednost razmaka diskontinuiteta varira (preuzeto iz Lato i dr., 2012).....	39
<b>Slika 2.23.</b> Prikaz mjerenja amplituda neravnina diskontinuiteta iz digitalnog modelu površine stijenske mase. Tople boje prikazuju veće amplitude (preuzeto iz Cantarella i dr., 2016). ....	39
<b>Slika 2.24.</b> Prikaz polu-automatiziranog određivanja (a) diskontinuiteta (točke koje definiraju diskontinuitet su prikazane različitim bojama) i (b) postojanosti pomoću poligona koji omeđuju točke koje pripadaju istom diskontinuitetu pomoću alata DiANA (preuzeto iz Gigli i Casagli, 2011). ....	40
<b>Slika 2.25.</b> Prikaz provedene analize u DSE-u za sintetički oblak točaka u obliku pravokutnika gdje (a) prikazuje točke simbolizirane s obzirom na set kojem pripadaju, b) histograme razmaka za tri utvrđena seta diskontinuiteta i c) histograme postojanosti s obzirom na smjer i kut nagiba te maksimalnu postojanost (Riquelme i dr., 2014, 2015, 2018).....	41
<b>Slika 2.26.</b> Prikaz distribucije kuta nagiba (SAD) i raščlambe na Gaussove distribucije kuta nagiba karakteristične za specifične morfološke jedinice. Oznaka A predstavlja donju graničnu vrijednost kuta nagiba iznad koje se sva područja smatraju kao potencijalno izvorišna područja odrona. Oznaka B predstavlja srednju vrijednost kuta nagiba strmo nagnutih padina (modificirano prema Loye i dr., 2009).....	42
<b>Slika 2.27.</b> Prikaz karte podložnosti na odrone doline Bagnes u Švicarskoj dobivene pomoću analize distribucije nagiba (preuzeto iz Michoud i dr., 2012). ....	43
<b>Slika 2.28.</b> Rezultati prostornih kinematičkih analiza provedenih na digitalnom modelu terena za područje kanjona rijeke Nere u Italiji. Tamnija boja označava veću vrijednost kinematičkog indeksa hazarda koji ukazuje na veću podložnost odronima (preuzeto iz Gigli i dr., 2014). ....	46
<b>Slika 2.29.</b> Prikaz modela podložnosti stijenskih kosina odronima za područje Drus na Mont-Blancu, gdje je podložnost iskazana vrijednostima indeksa podložnosti odronima. Toplije boje označavaju veću podložnost odronima (preuzeto iz Matasci i dr., 2017). ....	47
<b>Slika 3.1.</b> Geografski položaj područja istraživanja prikazan na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine. ....	50
<b>Slika 3.2.</b> Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih kosina dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.....	51
<b>Slika 3.3.</b> Prikaz raspodjele kuta nagiba (SAD) za istraživane stijenske kosine i raščlambe na Gaussove distribucije kuta nagiba karakteristične za specifične morfološke jedinice. Oznaka A predstavlja donju graničnu vrijednost kuta nagiba (58°) iznad koje se sva područja smatraju kao potencijalna izvorišna područja odrona. Oznaka B predstavlja srednju vrijednost kuta nagiba (46°) strmo nagnutih padina. ....	51
<b>Slika 3.4.</b> Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih kosina dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.....	52
<b>Slika 3.5.</b> Prikaz lokacije istraživanja (ljubičasti poligon) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Omiš (Marinčić i dr., 1976).....	53
<b>Slika 3.6.</b> Fotografije potencijalno nestabilnih blokova iznad stare gradske jezgre. ....	55
<b>Slika 3.7.</b> Prikaz obuhvata mikrolokacija i utvrđenih lokacija potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase obuhvaćenih Izvedbenim projektom Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata	

stijenske mase iznad grada Omiša na Hrvatskoj osnovnoj karti M 1:5000 (modificirano prema Arbanas i dr., 2016).....	56
<b>Slika 3.8.</b> Prikaz inženjerskogeološke karte za jednu od mikrolokacija iz Izvedbenog projekta Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiš (preuzeto iz Arbanas i dr., 2016).....	57
<b>Slika 3.9.</b> Prikaz inženjerskogeološkog profila za jednu od mikrolokacija iz Izvedbenog projekta Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša (preuzeto iz Arbanas i dr., 2016).....	58
<b>Slika 3.10.</b> Geografski položaj područja istraživanja prikazan na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine. ....	59
<b>Slika 3.11.</b> Pogled prema jugozapadu na jezero Brljan te na istraživane stijenske kosine koje zasijeca ŽC-6055. ....	60
<b>Slika 3.12.</b> Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih stijenskih kosina iznad ŽC – 6055, dionica Brljan, dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m. ....	61
<b>Slika 3.13.</b> Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina iznad ŽC – 6055, dionica Brljan, dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m. ....	61
<b>Slika 3.14.</b> Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (ljubičasta linija) na uvećanim isječcima Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Knin (Grimani i dr., 1972), list Drniš (Ivanović i dr., 1977), list Obrovac (Ivanović i dr., 1973) i list Šibenik (Mamužić i dr., 1971) .....	62
<b>Slika 3.15.</b> Prikaz karte podložnosti stijenskih kosina odronima (stacionaže 0+500 – 0+900) iz Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015). ....	65
<b>Slika 3.16.</b> Prikaz karte geotehničkog hazarda (stacionaže 0+500 – 0+900) iz Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015). ....	66
<b>Slika 3.17.</b> Geografski položaj stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak prikazanog na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine. ....	67
<b>Slika 3.18.</b> Pogled prema JZ na središnji dio stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak uz Državnu cestu DC-3 u blizini Lokvarskog jezera. ....	68
<b>Slika 3.19.</b> Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanog stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak uz DC-3, dionica Delnice-Rogozno, dobivenih iz modela oblaka točaka visoke rezolucije.....	69
<b>Slika 3.20.</b> Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanog stijenskog zasjeka Špičunak uz DC-3, dionica Delnice-Rogozno, dobivenih modela oblaka točaka visoke rezolucije. ....	70
<b>Slika 3.21.</b> Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (crna linija) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet., 1984). ....	71
<b>Slika 3.22.</b> Geografski položaj stijenskog zasjeka u Lokvama prikazanog na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine. ....	73
<b>Slika 3.23.</b> Pogled prema SI na zapadni dio istraživanih stijenskih kosina u Lokvama. ....	74
<b>Slika 3.24.</b> Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina u naselju Lokve dobivenih iz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka. ....	75
<b>Slika 3.25.</b> Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih stijenskih kosina u naselju Lokve dobivenih iz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka. ....	75
<b>Slika 3.26.</b> Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (crna linija) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet., 1984). ....	76
<b>Slika 4.1.</b> Fotografije: (a) terestričkog laserskog skeniranja Omiške Dinare i (b) dijela Omiške Dinare snimljenog bespilotnom letjelicom. ....	81
<b>Slika 4.2.</b> Izrađeni model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina Omiške Dinare vizualiziran u <i>AutoCAD</i> -u. ....	81

<b>Slika 4.3.</b> Model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina Brljan vizualiziran u računalnom programu <i>CloudCompare</i> .....	82
<b>Slika 4.4.</b> Model oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak vizualiziran u računalnom programu <i>CloudCompare</i> .....	83
<b>Slika 4.5.</b> Fotografija terestričkog laserskog skeniranja stijenskog zasjeka u Lokvama s <i>Trimble TX5</i> TLS-om. ....	84
<b>Slika 4.6.</b> Prikaz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjeka u Lokvama dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem s položajem svih 14 stajališta, označenih žutim kvadratima. ....	84
<b>Slika 4.7.</b> Prikaz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjeka u Lokvama dobivenog snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom <i>DJI Phantom 4 Pro</i> .....	85
<b>Slika 4.8.</b> Vizualna usporedba visoko-rezolucijskih modela oblaka točaka dijela stijenskog zasjeka u Lokvama dobivenih: a) snimanjem iz zraka, tj. UAV fotogrametrijom i b) terestričkim laserskim skeniranjem. ....	85
<b>Slika 4.9.</b> Usporedba dijela modela oblaka točaka stijenskih kosina na lokaciji Brljan: a) u izvornom obliku i b) nakon primjene qCanupo klasifikatora i uklanjanja točaka koje predstavljaju vegetaciju. ....	87
<b>Slika 4.10.</b> Prikaz: a) modela oblaka točaka dijela stijenskih kosina iznad grada Omiša i b) pripadajućeg modela površine stijenske mase predstavljenog mrežom nepravilnih trokuta konstruiranog u <i>Split FX</i> -u. ....	88
<b>Slika 4.11.</b> Prikaz: a) modela oblaka točaka dijela stijenskog zasjeka Špičunak i b) 3D modela površine stijenske mase izrađenog metodom Delaunay-eve triangulacije u <i>CloudCompare</i> -u. ....	89
<b>Slika 4.12.</b> Usporedba izrađenih modela površine stijenske mase algoritmom Poissonove rekonstrukcije površine s a) ulaznim modelom oblakom točaka za pilot područje stijenskog zasjeka Špičunak, gdje je: b) model površine stijenske mase s dubinom Octree-a 8, c) model površine stijenske mase s dubinom Octree-a 10 i d) model površine stijenske mase s dubinom Octree-a 12. ....	90
<b>Slika 4.13.</b> Prikaz određene orijentacije plohi digitalnog modela sintetičke polusfere na temelju vektora normala gdje a) prikazuje smjer nagiba svake plohe; b) kuta nagiba i c) vrijednosti $N_z$ svake plohe digitalnog modela pri čemu njegove negativne vrijednosti označavaju dijelove sintetičke polusfere koje se nalaze u prevjesu ..... 92	92
<b>Slika 4.14.</b> Prikaz: a) dijela modela površine stijenske mase na području istraživanja Brljan te za svaku plohu digitalnog modela određene orijentacije, tj. b) smjera nagiba i c) kuta nagiba..... 93	93
<b>Slika 4.15.</b> Prikaz modela površine stijenske mase s označenim dijelovima stijenskih kosina u prevjesu dobivenih na temelju negativnih vrijednosti $N_z$ . .... 94	94
<b>Slika 4.16.</b> Prikaz a) modela površine stijenske mase iz kojeg su b) polu-automatizirano generirane plohe diskontinuiteta u <i>Split FX</i> -u. .... 95	95
<b>Slika 4.17.</b> Prikaz primjera ručno postavljenih najbolje odgovarajućih ploha koje predstavljaju diskontinuitete (označeno ljubičastom bojom) na temelju iscrtanih tragova ravnina u <i>Split FX</i> -u. 96	96
<b>Slika 4.18.</b> Prikaz: a) odabira različitih radijusa (crvene kružnice) na modelu oblaka točaka za procjenu orijentacije diskontinuiteta metodom najmanjih kvadrata pomoću dodatka <i>Compass</i> i b) generirane plohe koje predstavljaju orijentaciju diskontinuiteta ..... 97	97
<b>Slika 4.19.</b> Prikaz primjera određivanja vrijednosti maksimalne udaljenosti točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta pri 68% vjerojatnosti ( $1\sigma$ )..... 98	98
<b>Slika 4.20.</b> Prikaz: a) dijela modela oblaka točaka za kojeg su b) polu-automatizirano generirane sve potencijalne plohe diskontinuiteta pri čemu različite boje označavaju različite smjerove nagiba plohi..... 99	99

<b>Slika 4.21.</b> Prikaz usporedbe rezultata određivanja orijentacije diskontinuiteta za testno područje a) ručnom i b) polu-automatiziranom metodom u <i>CloudCompare</i> -u te c) polu-automatiziranom metodom u <i>DSE</i> -u. ....	100
<b>Slika 4.22.</b> Prikaz usporedbe tragova ravnina prosječne orijentacije setova diskontinuiteta određenih a) ručnom i polu-automatiziranom metodom u <i>CloudCompare</i> -u i b) ručnom metodom u <i>CloudCompare</i> -u i polu-automatiziranom metodom u <i>DSE</i> -u.....	101
<b>Slika 4.23.</b> Prikaz pojednostavljenog dijagrama toka algoritma za automatizirano određivanje setova diskontinuiteta, prikaz podataka na stereografskoj projekciji te izračuna <i>Fisherove</i> statistike. ....	104
<b>Slika 4.24.</b> Prikaz usporedbe utvrđenih setova diskontinuiteta: a) metodom konturnih dijagrama i b) automatiziranom metodom pomoću spektralnog grupiranja. Broj setova diskontinuiteta je pretpostavljen na temelju vrijednosti: c) <i>Xie-Beny</i> , d) <i>Fukuyama-Sugeno</i> i e) <i>Sillhouette</i> indeksa za provjeru grupa. Polovi diskontinuiteta prikazani na slici b obojani su različitim bojama ovisno o setu diskontinuiteta kojem pripadaju, dok oni prikazani crnim točkicama ne pripadaju niti jednom setu i predstavljaju <i>outlinere</i> . ....	108
<b>Slika 4.25.</b> Prikaz primjera prvog koraka prilikom određivanja razmaka diskontinuiteta na jednom dijelu istraživanog stijenskog zasljeska u Lokvama tj. a) postavljanje plohe koja je okomita prosječnom pružanju seta diskontinuiteta (slojevitost) i b) trag presjecišta virtualne plohe s površinom stijenskog zasljeska (topografski profil). ....	109
<b>Slika 4.26.</b> Prikaz: a) primjera postavljenih plohi s prosječnom orijentacijom seta diskontinuiteta na mjestima gdje slojevitost presijeca topografski profil za slučaj sa slike 4.25 i b) izmjerene vrijednosti normalnog razmaka.....	110
<b>Slika 4.27.</b> Histogram gustoće razmaka (vezano za slike 4.26 i 4.27) i odgovarajuće funkcije gustoće vjerojatnosti log-normalne raspodjele s prikazom izračunatih parametara razmaka (minimalni i maksimalni razmak – $r_{min}$ i $r_{max}$ ; srednja vrijednost i varijanca - $r$ i $r'^2$ ), parametara funkcije (srednja vrijednost logaritama razmaka – $\mu$ i standardna devijacija logaritama razmaka - $\sigma$ ) i rezultatima testne statistika kojom je potvrđena nulta hipoteza da skup podataka pripada log-normalnoj raspodjeli.....	111
<b>Slika 4.28.</b> Primjer izdvajanja topografskog kružnog prozora s radijusom od 15 m na stijenskim kosinama iznad grada Omiš .....	112
<b>Slika 4.29.</b> Primjer primjene metode kružnog topografskog prozora s označenim krajevima tragova diskontinuiteta sadržanih unutar prozora (crveni kružići) i mjesta gdje tragovi diskontinuiteta sijeku granice kružnog topografskog prozora (bijeli kružići), na jednom dijelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša, u svrhu određivanja parametara postojanosti diskontinuiteta.....	113
<b>Slika 4.30.</b> Primjer vizualnog izdvajanja različitih stupnjeva trošnosti stijenske mase na modelu oblaka točaka stijenskih kosina iznad grada Omiša .....	114
<b>Slika 4.31.</b> Prikaz a) dijela modela oblaka točaka stijenskog zasljeska u Lokvama i b) korigiranih vrijednosti intenziteta za te točke. ....	115
<b>Slika 4.32.</b> Prikaz linearnog odnosa između a) korigiranog intenziteta i udaljenosti točke od uređaja te b) korigiranog intenziteta i kut raspršenja laserske zrake.....	115
<b>Slika 4.33.</b> Prikaz histograma gustoće vjerojatnosti intenziteta i pripadajuće normalne raspodjele za: a) crvene, b) zelene klastite, c) klastite objedinjeno, d) dolomite u izmjeni s klastitima, e) dolomite koji su kontinuirano taloženi i f) dolomite objedinjeno, s definiranim srednjim vrijednostima ( $I$ ) i standardnim devijacijama ( $\sigma$ ). ....	116
<b>Slika 4.34.</b> Usporedba gustoći vjerojatnosti intenziteta za klastite i dolomite te određenih intervala intenziteta na temelju kojih su klasificirane točke oblaka točaka stijenskog zasljeska u Lokvama. ....	117
<b>Slika 4.35.</b> Prikaz klasificiranih točaka modela oblaka točaka koje pripadaju a) klastitima i b) dolomitima s obzirom na utvrđen raspon vrijednosti intenziteta. ....	117

<b>Slika 4.36.</b> Prikaz vrijednosti gustoća točaka s približno istim vrijednostima intenziteta za a) klastite, b) dolomite. ....	118
<b>Slika 4.37.</b> Prikaz klasifikacije točaka iz oblaka točaka koje predstavljaju: a) klastične naslage i b) dolomite te c) objedinjeni prikaz klasificiranih točaka koje pripadaju klastičnim naslagama i dolomitima s uklonjenim šumovima za dio modela oblaka točaka stijenskog zasjeaka u Lokvama. ....	119
<b>Slika 4.38.</b> Shematski dijagram određivanja inženjerskogeoloških zona na temelju utvrđenih podataka o prosječnoj orijentaciji stijenskih kosina, vrsti stijene, stupnju trošnosti stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta. ....	120
<b>Slika 4.39.</b> Podjela istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša na osnovne inženjerskogeološke jedinice s obzirom na orijentaciju stijenskih kosina. ....	121
<b>Slika 4.40.</b> Podjela inženjerskogeološke zone Z2 na dvije podzone A i B s obzirom na različitu vrstu stijena na stijenskom zasjeku u Lokvama. U podzoni A stijensku masu izgrađuje kontinuirano taloženi dolomiti, dok ju u zoni B izgrađuje izmjena klastita i dolomita. ....	122
<b>Slika 4.41.</b> Podjela dijela stijenskog zasjeaka na lokaciji Špičunak na dvije zone gdje granicu između zona predstavlja normalni rasjed pri čemu je vidljiva razlika u stupnju trošnosti stijenske mase i u geometrijskim značajkama diskontinuiteta u svakoj pojedinoj zoni. ....	123
<b>Slika 4.42.</b> Primjer podjele dijela stijenskih kosina na lokaciji Brljan u tri podzone s obzirom na različitu prisutnost setova diskontinuiteta i distribuciju razmaka diskontinuiteta. Granica između zone A i B čini diskontinuitet velike postojanosti, a granicu zone B i C vrh stijenskog pokosa pri čemu zonu C čine prirodne stijenske kosine. ....	123
<b>Slika 4.43.</b> Shematski prikaz određivanja lateralne površine u obliku pravokutnika, koju tvore dva diskontinuiteta iz istog seta na licu stijenske mase tj. na ćeliji digitalnog modela (T). ....	125
<b>Slika 4.44.</b> Shematski prikaz određivanja prosječne lateralne površine presječnica ( $P_{ij}$ ) koju tvore dva seta diskontinuiteta ( $S_i$ i $S_j$ ) na licu stijenske mase tj. na ćeliji digitalnog modela (T). ....	127
<b>Slika 4.45.</b> Prikaz sintetičke stijenske kosine u obliku konkavne polu-sfere i setova diskontinuiteta pomoću kojih je provedena verifikacija izračuna indeksa podložnosti stijenskih kosina odronima, pri čemu je: a) smjer nagiba, b) kut nagiba kosine, c) prikaz dijelova sintetičke kosine koji su u prevjesu (crveno obojane plohe), d) površina plohi sintetičke kosine, e) pogled na polu-sferu sa zapada i prikaz jednog diskontinuiteta iz svakog seta i f) prikaz prosječne orijentacije setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji. ....	135
<b>Slika 4.46.</b> Prikaz vrijednosti indeksa podložnosti dobivenih na temelju jednadžbi 63-69 i ulaznih podataka prikazanih na slici 4.45 te u tablici 4.7 za a) planarni slom (IPpl), b) klinasti slom (IPkl), c) slom prevrtanjem (IPpr) i d) ukupnu podložnost (IPO). Plavo obojane plohe označavaju dijelove kosine gdje određene vrste slomova nisu mogući. ....	137
<b>Slika 4.47.</b> Shema pojednostavljenog dijagrama toka algoritma <i>ROCKS</i> , izrađenog u programskom jeziku <i>MATLAB</i> u svrhu automatizacije kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima. ....	140
<b>Slika 5.1.</b> Prikaz granica 12 inženjerskogeoloških zona (označeno sa Z1-Z12) i podzona (označeno sa A, B, C i D) na ortofoto snimci za pilot područje stijenskih kosina iznad grada Omiša. ....	146
<b>Slika 5.2.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z1 s ucertanim granicama podzona Z1A, Z1B, Z1C na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	147
<b>Slika 5.3.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu. ....	148
<b>Slika 5.4.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1A, b) inženjerskogeološku zonu Z1B i c) inženjerskogeološku zonu Z1C dobiven automatiziranim analizom spektralnog grupiranja. ....	148

<b>Slika 5.5.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z2 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	150
<b>Slika 5.6.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	151
<b>Slika 5.7.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z2 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	151
<b>Slika 5.8.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z3 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3, Z4 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.	152
<b>Slika 5.9.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	153
<b>Slika 5.10.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z3 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	153
<b>Slika 5.11.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z4 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z3, Z4 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	155
<b>Slika 5.12.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z4 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	155
<b>Slika 5.13.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	156
<b>Slika 5.14.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z5 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z5, Z6 i Z9 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	157
<b>Slika 5.15.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	157
<b>Slika 5.16.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	158
<b>Slika 5.17.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z6 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z5, Z6 i Z9 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	159
<b>Slika 5.18.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z6 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	159
<b>Slika 5.19.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z6 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	160
<b>Slika 5.20.</b> Pogled na inženjerskogeološku zonu Z7 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z7 i Z8 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	161
<b>Slika 5.21.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z7 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	161
<b>Slika 5.22.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z7 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	162

<b>Slika 5.23.</b> Pogled sa zapada na inženjerskogeološke zone Z7, Z8, Z9 i Z10 s ucrtanim granicama podzona Z8A i Z8B na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.	163
<b>Slika 5.24.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z8 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	164
<b>Slika 5.25.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z8A i b) inženjerskogeološku zonu Z8B dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.	164
<b>Slika 5.26.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z9 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	166
<b>Slika 5.27.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z9 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.	166
<b>Slika 5.28.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z10 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	167
<b>Slika 5.29.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z10 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.	168
<b>Slika 5.30.</b> Pogled prema S, SZ na inženjerskogeološku zonu Z10, Z11 i Z12 s ucrtanim granicama podzona Z11A i Z11B na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.	169
<b>Slika 5.31.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z11 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	169
<b>Slika 5.32.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z11A i b) inženjerskogeološku zonu Z11B dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.	170
<b>Slika 5.33.</b> Pogled prema sjeveru na inženjerskogeološku zonu Z12 s ucrtanim granicama podzona Z12A, Z12B, Z12C i Z12D te na dijelove susjednih inženjerskogeoloških zona Z3, Z4 i Z11 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.	172
<b>Slika 5.34.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z12 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	172
<b>Slika 5.35.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z12A, b) Z12B, c) Z12C i d) Z12D dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.	173
<b>Slika 5.36.</b> Prikaz granica 15 inženjerskogeoloških zona (označeno sa Z1-Z15) na ortofoto snimci pilot područja stijenskih kosina na lokaciji Brljan, određenih na temelju različite orijentacije stijenskih kosina, značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta.	176
<b>Slika 5.37.</b> Pogled prema sjeveru na inženjerskogeološke zone Z1 i Z2 s ucrtanim granicama na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.	178
<b>Slika 5.38.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 te c) smjera i d) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.	179



<b>Slika 5.39.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1 i b) inženjerskogeološku zonu Z2 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	180
<b>Slika 5.40.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološku zone Z3 s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	181
<b>Slika 5.41.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	181
<b>Slika 5.42.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta u zoni Z3 na stereografskoj projekciji dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	181
<b>Slika 5.43.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološku zonu Z4 i djelove susjednih zona Z3 i Z5 s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	183
<b>Slika 5.44.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	183
<b>Slika 5.45.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z4, dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	183
<b>Slika 5.46.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z5A i Z5B i susjedne zone Z4 i Z6 s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	185
<b>Slika 5.47.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	185
<b>Slika 5.48.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	185
<b>Slika 5.49.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z6A i Z6B s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	187
<b>Slika 5.50.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z6 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	187
<b>Slika 5.51.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta u zoni Z6 na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.....	187
<b>Slika 5.52.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z7A, Z7B i Z7C s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	188
<b>Slika 5.53.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z7 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	189
<b>Slika 5.54.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z7 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	190
<b>Slika 5.55.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z8A, Z8B, Z8C i Z8D s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	192

<b>Slika 5.56.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z8 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	192
<b>Slika 5.57.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z8 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	192
<b>Slika 5.58.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z9A, Z9B, Z9C i Z9D s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	194
<b>Slika 5.59.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z9 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	195
<b>Slika 5.60.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z9 .....	195
<b>Slika 5.61.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z10A i Z10B s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	197
<b>Slika 5.62.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z10 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	197
<b>Slika 5.63.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z10 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	198
<b>Slika 5.64.</b> Pogled prema S na inženjerskogeološke zone Z11A, Z11B i Z11C s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.....	199
<b>Slika 5.65.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z11 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	200
<b>Slika 5.66.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: inženjerskogeološku zonu Z11.....	201
<b>Slika 5.67.</b> Pogled prema I na inženjerskogeološke zone Z12A, Z12B, Z12C i Z12D s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	202
<b>Slika 5.68.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z12 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	203
<b>Slika 5.69.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: inženjerskogeološku zonu Z12 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. ....	204
<b>Slika 5.70.</b> Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z13A, Z13B, Z14A, Z14B i Z15 s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina. ....	205
<b>Slika 5.71.</b> Prikaz raspodjele: a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z13; c) smjera i d) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z14 i e) smjera i f) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z15 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu. ....	206
<b>Slika 5.72.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z13; b) inženjerskogeološku zonu Z14 i c) inženjerskogeološku zonu Z15 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja. .	208

<b>Slika 5.73.</b> Pogled na stijenski zasjek Špičunak s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3, Z4A i Z4B .....	211
<b>Slika 5.74.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	212
<b>Slika 5.75.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	213
<b>Slika 5.76.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	214
<b>Slika 5.77.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	215
<b>Slika 5.78.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1; b) inženjerskogeološku zonu Z2; c) inženjerskogeološku zonu Z3 i d) inženjerskogeološku zonu Z4 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.....	216
<b>Slika 5.79.</b> Pogled na stijenski zasjek Lokve s prikazom različitih vrsta stijena na digitalnom modelu stijenskog zasjeka.....	218
<b>Slika 5.80.</b> Pogled na stijenski zasjek Lokve s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2A, Z2B, Z3A, Z3B, Z4A, Z4B i Z5.....	218
<b>Slika 5.81.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	219
<b>Slika 5.82.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	220
<b>Slika 5.83.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	221
<b>Slika 5.84.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	222
<b>Slika 5.85.</b> Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.....	222
<b>Slika 5.86.</b> Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1, b) inženjerskogeološku zonu Z2, c) inženjerskogeološku zonu Z3, d) inženjerskogeološku zonu Z4 i e) inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.....	223
<b>Slika 6.1.</b> Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području iznad grada Omiša.	228
<b>Slika 6.2.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te stupnja trošnosti stijenske mase po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području iznad grada Omiša.....	229

<b>Slika 6.3.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te identificiranih setova diskontinuiteta po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području iznad grada Omiša. ....	229
<b>Slika 6.4.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te postotka stijenskih kosina u prevjesu po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području iznad grada Omiša. ....	229
<b>Slika 6.5.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4 , Z7, Z8 i Z10-Z12. ....	230
<b>Slika 6.6.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za klinasti slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4 , Z7, Z8 i Z10-Z12. ....	231
<b>Slika 6.7.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za slom prevrtanjem na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4 , Z7, Z8 i Z10-Z12. ....	231
<b>Slika 6.8.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12. ....	233
<b>Slika 6.9.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za klinasti slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12. ....	234
<b>Slika 6.10.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za slom prevrtanjem na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12. ....	235
<b>Slika 6.11.</b> Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području Brljan .....	238
<b>Slika 6.12.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te stupnja trošnosti stijenske mase po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području Brljan.....	239
<b>Slika 6.13.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te identificiranih setova diskontinuiteta po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području Brljan .....	239
<b>Slika 6.14.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te postotka stijenskih kosina u prevjesu po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području Brljan .....	239
<b>Slika 6.15.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti na visoko-rezolucijskom 3D modelu za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem za inženjerskogeološke zone Z1-Z6 .....	240
<b>Slika 6.16.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti na visoko-rezolucijskom 3D modelu za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem za inženjerskogeološke zone Z7-Z10 .....	241
<b>Slika 6.17.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti na visoko-rezolucijskom 3D modelu za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem za inženjerskogeološke zone Z10-Z15 .....	242
<b>Slika 6.18.</b> Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području na lokaciji Špičunak .....	244
<b>Slika 6.19.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te stupnja trošnosti stijenske mase po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području na lokaciji Špičunak.....	244

<b>Slika 6.20.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te identificiranih setova diskontinuiteta po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području na lokaciji Špičunak.....	245
<b>Slika 6.21.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te postotka stijenskih kosina u prevjesu po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području na lokaciji Špičunak.....	245
<b>Slika 6.22.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti na visoko-rezolucijskom 3D modelu za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem za inženjerskogeološke zone Z1-Z6.....	246
<b>Slika 6.23.</b> Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području u Lokvama. ....	249
<b>Slika 6.24.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te stupnja trošnosti stijenske mase po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području u Lokvama.....	249
<b>Slika 6.25.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te identificiranih setova diskontinuiteta po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području u Lokvama.....	250
<b>Slika 6.26.</b> Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima te postotka stijenskih kosina u prevjesu po utvrđenim inženjerskogeološkim zonama na pilot području u Lokvama. ....	250
<b>Slika 6.27.</b> Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti na visoko-rezolucijskom 3D modelu za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem za inženjerskogeološke zone Z1-Z5.....	251
<b>Slika 7.1.</b> Prikaz kinematičkih analiza za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem na stereografskim projekcijama za inženjerskogeološke zone: a) Z1A, b) Z1B c) Z1C.....	254
<b>Slika 7.2.</b> Usporedba: a) prethodno utvrđenih potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase iz Izvedbenog projekta (Arbanas i dr., 2016) te istovjetnih lokacija na b) visoko-rezolucijskom modelu stijenskih kosina iznad grada Omiša te c) na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima iskazanim s vrijednostima <i>IPO</i> -a, pri čemu toplije bolje označavaju veću podložnost stijenskih kosina odronima. Uz prikaz prethodno utvrđenih potencijalno nestabilnih stijenskih blokova, na temelju visokih vrijednosti podložnosti izdvojeno je par dodatnih primjera potencijalno nestabilnih blokova. ....	256
<b>Slika 7.2.</b> Prikaz usporedbe prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području Brljan te vrijednosti podložnosti stijenskih kosina utvrđenih u Izvedbenom projektu sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015) .....	258
<b>Slika 7.3.</b> Prikaz usporedbe prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području Brljan te vrijednosti geotehničkog hazarda na stijenskih kosina utvrđenih u Izvedbenom projektu sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015) .....	258
<b>Slika 7.4.</b> Usporedba: a) ishodišnih područja odronjavanja stijenskih blokova u 2019. godini te istovjetnih lokacija na b) visoko-rezolucijskom modelu stijenskog zasjeke u Lokvama, izrađenom 2016. godine gdje se bokovi stijenske mase nalaze na svom izvornom položaju na stijenskom zasjeku te c) istovjetnih lokacija na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima iskazanim s vrijednostima <i>IPO</i> -a, pri čemu toplije bolje označavaju veću podložnost stijenskih kosina odronima. ....	261

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2.1.</b> Pregled relevantne literature o određivanju značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta pomoću daljinskih istraživanja.....	36
<b>Tablica 2.2.</b> Pregled postojeće literature o procjeni podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu s navedenom lokacijom i vrstom područja istraživanja, vrstom ulaznih podataka i metodom istraživanja, provedenim analizama te načinom prikaza rezultata .....	45
<b>Tablica 4.1.</b> Pregled korištenih računalnih programa, metoda interpolacije i korištenih algoritama prilikom izrade modela površine stijenskih kosina na svim pilot područjima. ....	91
<b>Tablica 4.2.</b> Prikaz srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih ručnom i polu-automatiziranom metodom u <i>CloudCompare</i> -u, udjela diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu u odnosu na ukupan broj diskontinuiteta te odstupanja između prosječnih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta.....	101
<b>Tablica 4.3.</b> Prikaz srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih ručnom metodom u <i>CloudCompare</i> -u i polu-automatiziranom metodom u <i>DSE</i> -u, udjela diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu u odnosu na ukupan broj diskontinuiteta te odstupanja između prosječnih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta .....	102
<b>Tablica 4.4.</b> Prikaz optimalnih parametara korištenih prilikom polu-automatiziranih analiza u <i>CloudCompare</i> -u te raspona parametara u <i>DSE</i> pomoću kojih su dobiveni rezultati najbliži onima dobivenim ručnom metodom i korišteni kao pomoć prilikom ručnog kartiranja diskontinuiteta na svim istraživanim stijenskim kosinama.....	103
<b>Tablica 4.5.</b> Prikaz usporedbe srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih metodom konturnih dijagrama u računalnom programu <i>DIPS</i> i automatiziranom metodom uz prikaz ukupnog broja diskontinuiteta (N) koji pripadaju određenom setu te parametrima <i>Fisherove</i> statistike.....	108
<b>Tablica 4.6.</b> Prikaz kategorija trošnosti stijenske mase i njihovog opisa prilikom terenskog određivanja stupnja trošnosti (modificirano prema USBR, 2001). ....	114
<b>Tablica 4.7.</b> Podaci o setovima diskontinuiteta, odnosno orijentaciji, prosječnom i maksimalnom razmaku te prosječnoj postojanosti na temelju kojih je određivana podložnost na sintetičkoj kosini .....	135
<b>Tablica 4.8.</b> Popis napisanih skripti i funkcija u <i>MATLAB</i> -u za potrebe automatizacije kvantitativne procjene podložnosti s prikazom zadatka svake skripte ili funkcije. ....	141
<b>Tablica 4.9.</b> Osnovni podaci o računalnom kodu na temelju kojeg je nastao algoritam <i>ROCKS</i> ..	142
<b>Tablica 5.1.</b> Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot područja iznad grada Omiša.....	146
<b>Tablica 5.2.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z1 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti .....	149
<b>Tablica 5.3.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z2 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti. ....	151
<b>Tablica 5.4.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z3 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti. ....	154

<b>Tablica 5.5.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z4 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	156
<b>Tablica 5.6.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z5 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	157
<b>Tablica 5.7.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z6 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	159
<b>Tablica 5.8.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z7 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	162
<b>Tablica 5.9.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z8A koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	165
<b>Tablica 5.10.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z9 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	166
<b>Tablica 5.11.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z10 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	167
<b>Tablica 5.12.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z11 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	170
<b>Tablica 5.13.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z12 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.....	174
<b>Tablica 5.14.</b> Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na pilot području stijenske kosine na lokaciji Brljan.....	177
<b>Tablica 5.15.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zonama Z1 i Z2 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	179
<b>Tablica 5.16.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z3 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	182
<b>Tablica 5.17.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta,	

normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	184
<b>Tablica 5.18.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z5 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	186
<b>Tablica 5.19.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z6 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti. ....	188
<b>Tablica 5.20.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z7 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	190
<b>Tablica 5.21.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z8 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	193
<b>Tablica 5.22.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z9 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	196
<b>Tablica 5.23.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z10 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	198
<b>Tablica 5.24.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z11 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	201
<b>Tablica 5.25.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z12 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	204
<b>Tablica 5.26.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zone Z13, Z14 i Z15 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta, i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti. ....	209
<b>Tablica 5.27.</b> Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.....	210
<b>Tablica 5.28.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za sve inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka Špičunak koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.....	215
<b>Tablica 5.29.</b> Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot stijenskog zasjeka Lokve .....	217



<b>Tablica 5.30.</b> Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za sve inženjerskogeološke zone na stijenskom zasjeku Lokve koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre <i>Fisherove</i> statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti. ....	224
<b>Tablica 6.1.</b> Prikaz srednjih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( <i>IPPL</i> , <i>IPKL</i> , <i>IPPR</i> ), indeksa podložnosti odronima ( <i>IPO</i> ) te raspona stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te postotka stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu. ....	227
<b>Tablica 6.2.</b> Prikaz srednjih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( <i>IPPL</i> , <i>IPKL</i> , <i>IPPR</i> ), indeksa podložnosti odronima ( <i>IPO</i> ) te raspona stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te postotka stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu. ....	237
<b>Tablica 6.3.</b> Prikaz srednjih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( <i>IPPL</i> , <i>IPKL</i> , <i>IPPR</i> ), indeksa podložnosti odronima ( <i>IPO</i> ) te raspona stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te postotka stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu. ....	243
<b>Tablica 6.4.</b> Prikaz srednjih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( <i>IPPL</i> , <i>IPKL</i> , <i>IPPR</i> ), indeksa podložnosti odronima ( <i>IPO</i> ) te raspona stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te postotka stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu. ....	248
<b>Tablica 7.1.</b> Usporedba prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti ( <i>IPPL</i> , <i>IPKL</i> , <i>IPPR</i> , <i>IPO</i> ) s rezultatima grafičkih analiza na stereografskoj projekciji, odnosno brojem setova i njihovih presječnica ( <i>SPL</i> , <i>PKL</i> , <i>SPR</i> ) te postotkom svih određenih diskontinuiteta i presječnica ( <i>NPL (%)</i> , <i>NKL (%)</i> , <i>NPR (%)</i> ) koji zadovoljavaju uvjete za slom. ....	253
<b>Tablica 7.2.</b> Usporedba inženjerskogeoloških zona utvrđenih u ovom radu te inženjerskogeoloških /geotehničkih zona utvrđenih u Izvedbenom projektu sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015) s prikazom prosječnih vrijednosti <i>IPO</i> -a te zonama podložnosti nestabilnosti kosina i kategorijama geotehničkog hazarda. ....	259
<b>Tablica 7.3.</b> Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti klinastom slomu ( <i>IPKL</i> ), indeksa podložnosti odronima ( <i>IPO</i> ) te vrijednosti korištenih parametara i izračunatog faktora sigurnosti za stijenske blokove B1-B4. ....	262

## **POPIS PRILOGA**

**Prilog 1/1.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine iznad grada Omiša; LIST 1/2 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z4 i Z7-Z12

**Prilog 1/2.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine iznad grada Omiša; LIST 2/2 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z12

**Prilog 2/1.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan; LIST 1/3 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z6

**Prilog 2/2.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan; LIST 2/3 - Inženjerskogeološke zone Z6-Z10

**Prilog 2/3.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan; LIST 2/2 - Inženjerskogeološke zone Z10-Z15

**Prilog 3.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenski zasjek na lokaciji Špičunak; LIST 1/1 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z4

**Prilog 4.** 3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenski zasjek u naselju Lokve; LIST 1/1 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z5

## 1. UVOD

Prema Varnes (1978) odroni stijenske mase su tip klizišta koji uključuje odvajanje pojedinačnog ili nekoliko blokova stijena sa strmo nagnutih stijenskih kosina nakon čega slijedi brzi pokret niz kosinu slobodnim padom, odskakivanjem, kotrljanjem i klizanjem, pri čemu se mjesto odvajanja stijenskog bloka od stijenske mase naziva ishodišno područje odrona. Strme stijenske kosine osnovni su preduvjet za nastanak odrona, a njihovo ustrmljavanje posljedica je prirodnih procesa i ljudskih aktivnosti, najčešće uslijed inženjerskih radova kao što su izvođenje stijenskih zasjeka i usjeka ili eksploatacija mineralnih sirovina itd. S obzirom na navedeno, odroni, kao jedan od prirodnih hazarda, ugrožavaju površinski relativno mala područja, ali predstavljaju veliki rizik jer mogu uzrokovati značajne materijalne štete na infrastrukturi, a ugrožavaju i ljudske živote, kao i njihovu imovinu.

Hazard od odrona definiran je kao vjerojatnost da odron određenog intenziteta dosegne određenu lokaciju na kosini ili njenom podnožju u određenom vremenskom periodu (Jaboyedoff i dr., 2004), pri čemu je od iznimne važnosti identificirati potencijalna izvorišna područja odrona te odrediti podložnost stijenskih kosina odronima kako bi procjena hazarda bila pouzdana (Jaboyedoff i dr., 2007). Brabb (1984) definira podložnost odronima kao mogućnost pojave odrona na određenom dijelu stijenske kosine s obzirom na lokalne uvjete, pri čemu podložnost može biti kvantitativna ili kvalitativna procjena volumena i prostorne distribucije odrona te njihova klasifikacija, koji može nastati ili je nastao u prošlosti na nekom području (Fell i dr., 2008).

Prilikom procjene podložnosti stijenskih kosina odronima koriste se različite metode ovisno o veličini područja istraživanja, a uglavnom se razlikuju metode procjene za regionalnu i lokalnu razinu. Regionalna istraživanja obuhvaćaju područja od nekoliko kvadratnih kilometara do nekoliko desetaka kvadratnih kilometara, a analize podložnosti stijenskih kosina odronima zasnivaju se na osnovnim morfometrijskim parametrima reljefa dobivenim iz digitalnih modela visina ili terena (Michoud i dr., 2012). Za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima uz prometnu infrastrukturu ili na drugim stijenskim kosinama, metode regionalnih istraživanja nisu primjenjive, već su razvijene posebne metode za procjenu podložnosti odronima za područja stijenskih kosina manjih površina koje daju preciznije rezultate. Ove metode dosegle su najveći razvoj u posljednjem desetljeću, jer se zasnivaju na daljinskim istraživanjima koja omogućavaju određivanje i korištenje detaljnijih ulaznih podataka (npr. Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013).

Podložnost stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu izravno je ovisna o morfologiji kosine, značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Tradicionalan pristup određivanju svih navedenih značajki uključuje iterativno terensko kartiranje što je vremenski zahtjevno, a pritom najčešće nije moguće provesti kartiranje na cijelom području istraživanja zbog otežanog pristupa višim dijelovima stijenskih kosina. Iz tog razloga, prilikom procjene podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu, primjenjuju se različite metode daljinskih istraživanja stijenske mase pri čemu se najčešće koriste 3D digitalni modeli oblaka točaka i površina stijenskih kosina visoke rezolucije, dobiveni metodom terestričkog laserskog skeniranja i fotogrametrijskom metodom snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice (Jaboyedoff i dr., 2012; Abellan i dr., 2014). Orijentacija, razmak, hrapavost i postojanost diskontinuiteta imaju vrlo važnu ulogu u karakterizaciji stijenske mase, a pri tome orijentacija predstavlja najvažnije geometrijsko svojstvo diskontinuiteta s obzirom da uvjetuje mehanizme nestabilnosti (Hoek i Bray, 1981). Pod pretpostavkom da većina vidljivih ploha na stijenskoj kosini predstavlja diskontinuitete, svaka ploha digitalnog modela površine stijenske mase predstavlja jedinstvenu orijentaciju diskontinuiteta koja se može usporediti s orijentacijom diskontinuiteta izmjerenom geološkim kompasom (Slob i dr., 2005). U tu svrhu se koriste razne metode za ručno, polu-automatizirano i automatizirano određivanje orijentacije diskontinuiteta iz modela oblaka točaka i modela površine stijenske mase (Jaboyedoff i dr., 2007; Riquelme i dr., 2014). Na osnovi poznate orijentacije svih diskontinuiteta moguće je definirati setove diskontinuiteta te za njih odrediti vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta (Sturzenegger i dr., 2011). Veličinu blokova moguće je izračunati korelacijom volumetrijskog broja pukotina i faktora oblika bloka (Palmström, 2005).

Kako bi se utvrdilo postoje li na stijenskim kosinama zadovoljeni geometrijski uvjeti za pojavu planarnog i klinastog sloma te sloma prevrtanjem, uslijed kojih će doći do odronjavanja stijenskih blokova, koriste se kinematičke analize koje su utemeljene na Marklandovom testu (Markland, 1972; Hoek i Bray, 1981). Prema Goodman i Shi (1985) geometrijski uvjeti se mogu odrediti grafičkom metodom tj. analizom odnosa orijentacije diskontinuiteta i kosine na stereografskoj projekciji ili analitički, analizom odnosa vektora normale diskontinuiteta i kosine na digitalnim modelima kosine (Jaboyedoff i dr., 2004; Gigli i dr., 2012; Matasci i dr., 2017). Većina autora, u svrhu procjene podložnosti stijenskih kosina odronima, primjenjuje prostorne kinematičke analize na digitalnim modelima, pritom testirajući svaku plohu ili točku digitalnog modela na planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem po identificiranim diskontinuitetima ili setovima diskontinuiteta (Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013; Sdao i dr., 2013; Gigli i dr., 2014;

Gupta i dr., 2015; Sorrentino i dr., 2016; Matasci i dr., 2017). Za prikaz rezultata prostornih kinematičkih analiza u obliku podložnosti odronima, koriste se indeksni pokazatelji poput kinematičkog indeksa hazarda (engl. *Kinematic Hazard Index*) (Casagli i Pini, 1993; Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013; Gigli i dr., 2014) ili indeksa podložnosti slomu (engl. *Failure Susceptibility Index*) (Matasci i dr., 2017). Druga grupa autora, osim rezultata prostornih kinematičkih analiza, prilikom izračuna indeksnog pokazatelja koristi i geometrijske značajke setova diskontinuiteta. Karte i modele podložnosti stijenskih kosina odronima iskazuju interpoliranim vrijednostima indeksnih pokazatelja na 2,5 ili 3D digitalnim modelima. Ovakve karte i modeli koriste se za ublažavanje hazarda i rizika od odrona u prostornom planiranju ili u inženjerskim projektima u geotehnici i rudarstvu.

U Republici Hrvatskoj se jako mali broj istraživača bavi odronima blokova stijenske mase sa kosina (npr. Arbanas i dr., 2012; Kovačević i dr., 2012; Vlastelica i dr., 2014; Arbanas i dr., 2018). Trenutno ne postoji objavljena metodologija za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima koja bi se koristila za procjenu hazarda i rizika od odrona ili kao preliminarna informacija u inženjerskim projektima u geotehnici i rudarstvu te prostornom planiranju. Razvoj i primjena metode za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu u Republici Hrvatskoj je nužna s obzirom na to da oko 51% njene površine pripada Dinaridima gdje odroni stijenske mase predstavljaju značajnu opasnost (Mihalić Arbanas i dr., 2017).

### **1.1. Svrha i ciljevi istraživanja**

Svrha istraživanja provedenog u okviru ovog doktorskog rada je razvoj nove metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima iz digitalnih modela visoke preciznosti i razlučivosti na osnovi automatiziranih prostornih kinematičkih analiza, geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase. Metoda je razvijana na digitalnim modelima za četiri pilot područja u različitim dijelovima Republike Hrvatske na području Dinarida. Pilot područja su: 1) stijenske kosine Omiške Dinare iznad grada Omiša, 2) stijenske kosine i pokosi uz Županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Okalj, lokacija Brljan, u Nacionalnom parku Krka, 3) stijenski zasjek uz Državnu cestu DC-3 Zagreb-Rijeka na lokaciji Špičunak te 4) stijenski zasjek u naselju Lokve u Gorskom kotaru. Izbor pilot područja je napravljen na način da su obuhvaćene prirodno i antropogeno nastale stijenske kosine različitih dimenzija te područja različitih strukturno-geoloških značajki i značajki stijenske mase. Predmet istraživanja ovog rada bio je identificirati i odrediti značajke stijenske mase i

geometrijske značajke diskontinuiteta iz digitalnih modela visoke rezolucije, na osnovu kojih je moguće provesti podjelu istraživanih stijenskih kosina u kvazi-homogene inženjerskogeološke zone te za svaku zonu na sva četiri pilot područja procijeniti podložnost stijenskih kosina odronima na temelju rezultata automatiziranih prostornih kinematičkih analiza i izračuna indeksnog pokazatelja za procjenu podložnosti odronima.

Istraživanje definirano na ovaj način zasniva se na sljedećim hipotezama:

1. Digitalni modeli oblaka točaka i modeli površine stijenske mase omogućavaju određivanje vrste stijene, stupnja trošnosti stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta nužnih za određivanje kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona i provedbu automatiziranih prostornih kinematičkih analiza
2. Automatiziranim prostornim kinematičkim analizama moguće je učinkovito utvrditi dijelove stijenskih kosina na kojima postoje geometrijski uvjeti za pojavu određenog mehanizma sloma, odnosno sve strukturne elemente koji utječu na pojavu sloma.
3. Pouzdanost kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima moguće je povećati analiziranjem podataka o razmaku i postojanosti diskontinuiteta.

Na osnovi postavljenih hipoteza proizašli su sljedeći ciljevi istraživanja:

1. Identificirati i odrediti geometrijske značajke diskontinuiteta, vrste stijena i stupnjeve trošnosti površine stijenske mase iz digitalnih modela oblaka točaka i digitalnih modela površine stijenske mase, a koji imaju utjecaj na podložnost stijenskih kosina odronima.
2. Definirati ulazne podatke i kriterije za određivanje inženjerskogeoloških zona na stijenskim kosinama korištenjem digitalnih modela oblaka točaka i površine stijenske mase, za koje će biti definirani geološki i morfološki granični uvjeti za automatizirane prostorne kinematičke analize.
3. Automatizirati prostorne kinematičke analize i kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u obliku indeksnog pokazatelja za svaku inženjerskogeološku zonu na stijenskim kosina.
4. Izraditi model podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju rezultata automatiziranih prostornih kinematičkih analiza i indeksa za kvantitativnu procjenu podložnosti.

Prilikom određivanja značajki stijenske mase korištena je vizualna metoda određivanja stupnja trošnosti na svim pilot područjima čime su izdvojene zone različitog stupnja trošnosti

stijenske mase koje su korištene kao jedan od kriterija za definiranje granica kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona. Na pilot području u Lokvama korištena je polu-automatizirana metoda identificiranja vrste stijene na temelju intenziteta povratnog signala lasera. Analizom intenziteta lasera izdvojene su dvije vrste stijena (klastične naslage i dolomiti), koje se pojavljuju u ritmičkoj izmjeni ili zasebno, korištena je prilikom određivanja granica inženjerskogeoloških zona te prilikom prostornih kinematičkih analiza i procjene podložnosti stijenskih kosina odronima. Za određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta, koje se sastoje od identifikacije i određivanja orijentacije diskontinuiteta iz digitalnih modela stijenskih kosina, provedene su polu-automatizirane i ručne metode, sa svrhom njihove usporedbe i odabira kvalitetnije metode. U skladu sa zaključcima ove usporedbe, značajke diskontinuiteta određivane su ručnom metodom. Identificirani diskontinuiteti grupirani su u setove pomoću algoritma spektralnog grupiranja (Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006) koji je u okviru doktorskog istraživanja u potpunosti automatiziran u programskom jeziku *MATLAB*. Vrijednosti razmaka diskontinuiteta za svaki set diskontinuiteta utvrđivane su statističkim analizama mjerenih podataka, dok je postojanost diskontinuiteta određivana metodom kružnog topografskog prozora. Navedene geometrijske značajke diskontinuiteta korištene su zajedno s drugim značajkama stijenske mase za određivanja granica kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona. Za svaku od ovih zonu, na temelju vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, razmaka i postojanosti, napravljena je analiza vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnosti na određenom dijelu stijenske kosine kao i vjerojatnost njihove pojave unutar kvazi-homogene inženjerskogeološke zone koje su korištene za prostorne kinematičke analize. Ovime je dokazana prva hipoteza: digitalni modeli oblaka točaka i modeli površine stijenske mase omogućavaju određivanje vrste stijene, stupnja trošnosti stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta nužnih za određivanje kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona i provedbu automatiziranih prostornih kinematičkih analiza.

U svrhu kvantifikacije podložnosti stijenskih kosina odronima osmišljeni su indeksni pokazatelji za različite mehanizme slomova stijenske mase koji se temelje na: 1) vrijednostima vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnosti na određenom dijelu stijenske kosine, dobivenim statističkim analizama vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta; te 2) prostornim kinematičkim analizama i modificiranom kinematičkom indeksu hazarda na temelju utvrđenih parametara setova diskontinuiteta unutar određene kvazi-homogene inženjerskogeološke zone. Za svaku pojedinu kvazi-homogenu inženjerskogeološku zonu uzeti su u obzir svi diskontinuiteti koji pripadaju određenom setu, sve kombinacije presječnosti setova

diskontinuiteta te svi diskontinuiteti koji pripadaju određenim kombinacijama setova diskontinuiteta. Analizom vjerojatnosti unija modificiranog kinematičkog indeksa i vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnice diskontinuiteta definirani su indeksni pokazatelji za različite mehanizme slomova stijenske mase. Analizama vjerojatnosti unija navedenih indeksnih pokazatelja dobiven je indeksni pokazatelj za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Analize vjerojatnosti, prostorne kinematičke analize i izračuni indeksnih pokazatelja u potpunosti su automatizirane pomoću osmišljenog algoritma *ROCKS* u programskom jeziku *MATLAB*. Rezultati automatiziranog algoritma, odnosno indeksi podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanje te indeks za kvantitativnu procjenu podložnosti odronima prikazani su na modelima podložnosti stijenskih kosina odronima za svako pilot područje. Verifikacija razvijene metode kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima provedena je na sintetičkom stijenskom zasjeku. Verifikacija modela podložnosti provedena je usporedbom dobivenih modela podložnosti s prethodnim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima. Osim toga, uspoređeni su odroni stijenskih blokova koji su se dogodili 2019. godine s vrijednostima podložnosti prikazanim za digitalnim model stijenskih kosina izrađenom 2016. godine. Ovom verifikacijom potvrđeno je da su se odronjavanja stijenskih blokova dogodila u zonama visoke podložnosti. Na temelju provedenih analiza i verifikacije rezultata potvrđene su druga i treća hipoteza: (2) automatiziranim prostornim kinematičkim analizama moguće je učinkovito utvrditi dijelove stijenskih kosina na kojima postoje geometrijski uvjeti za pojavu određenog mehanizma sloma, odnosno sve strukturne elemente koji utječu na pojavu sloma i (3) pouzdanost kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima moguće je povećati analiziranjem podataka o razmaku i postojanosti diskontinuiteta u analize.

## **1.2. Struktura doktorskog rada**

U uvodnom poglavlju opisan je značaj i potreba za provedenim istraživanjem s obzirom na znanstvene spoznaje i na praktičnu primjenu procjene podložnosti stijenskih kosina odronima prilikom ublažavanja hazarda i rizika od odrona. Također, u ovom poglavlju definirani su svrha, hipoteze i ciljevi istraživanja te je opisana struktura doktorskog rada.

U drugom poglavlju, Teorijske osnove, prikazan je pregled teorijskih osnova na kojima se temelji istraživanje provedeno u svrhu izrade doktorskog rada. U ovom poglavlju definirani su osnovni pojmovi vezani za pojavu odrona na stijenskim kosinama te su opisane značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta te metode njihove identifikacije važne



za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. U središnjem dijelu ovog poglavlja opisane su metode daljinskih istraživanja relevantne za istraživanja stijenske mase. U posljednjem dijelu poglavlja navedene su i opisane metode procjene podložnosti stijenskih kosina odronima s posebnim osvrtom na procjenu podložnosti u detaljnom mjerilu.

U trećem poglavlju, Područje istraživanja, prikazane su geološke i geomorfološke značajke za sva četiri pilot područja te su opisane istraživane stijenske kosine s obzirom na njihov položaj u prostoru. Također, prikazana su dosadašnja inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja provedena na pilot područjima.

U četvrtom poglavlju, Metode istraživanja, opisane su metode snimanja istraživanih stijenskih kosina bespilotnom letjelicom i terestričkim laserskim skenerom te izrada 3D digitalnih modela površina stijenskih kosina i oblaka točaka. U nastavku su uspoređivane polu-automatizirane i ručne metode identifikacije orijentacije diskontinuiteta iz digitalnih modela te je prikazan izrađeni algoritam za automatizirano određivanje setova diskontinuiteta na temelju spektralnog grupiranja. Također, prikazane su metode i analize određivanja vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta za utvrđene setove. Opširno je opisana metoda izdvajanja različitih vrsta stijena na temelju intenziteta povratnog signala lasera na području stijenskog zasjeka u Lokvama te je ukratko prikazana vizualna metoda određivanja zona različitog stupnja trošnosti stijenske mase na digitalnim modelima. U središnjem dijelu poglavlja opisana je metoda za određivanje kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona. U završnom dijelu poglavlja detaljno je opisana metoda analize vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnosti kao i metoda za kvantitativnu procjenu podložnosti razvijena u okviru ove disertacije. Na samom kraju opisan je osmišljeni algoritam *ROCKS* u programskom jeziku *MATLAB* za automatiziranu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

U petom poglavlju, Geometrijske značajke diskontinuiteta i značajke stijenske mase utvrđene analizama na digitalnim modelima, su za svako pilot područje i za sve utvrđene inženjerskogeološke zone pojedinačno prikazani rezultati analiza na digitalnim modelima. Ovi rezultati odnose se na utvrđene relevantne značajke stijenske mase i na geometrijske značajke diskontinuiteta koje predstavljaju ulazne podatke za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

U šestom poglavlju, Rezultati analiza i modeli podložnosti, prikazani su rezultati automatiziranih analiza pomoću algoritma *ROCKS* te modeli podložnosti stijenskih kosina odronima za sva četiri pilot područja. Također, u ovom poglavlju prikazana je usporedba vrijednosti indeksnih pokazatelja u odnosu na utvrđeni stupanj trošnosti stijenske mase, na udio kosina koje se nalaze u prevjesu te na broj utvrđenih diskontinuiteta.

U sedmom poglavlju, Verifikacija rezultata, prikazana je usporedba dobivenih modela podložnosti s prethodnim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima. Također, prikazana je i usporedba rezultata procjene podložnosti s lokacijama odrona stijenskih blokova koji su se dogodili 2019. godine.

U osmom poglavlju, Diskusija, iznesen je kritički osvrt na dobivene rezultate istraživanja, prvenstveno na one koji se odnose na hipoteze doktorskog rada. Raspravlja se o ograničenjima i učinkovitosti određivanja značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta polu-automatiziranim i ručnim te vizualnim metodama. Osim toga, raspravlja se o statističkoj analizi vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta i/ili presječne na određenom dijelu istraživane stijenske kosine te ograničenjima i točnosti razvijene automatizirane metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima pomoću algoritma *ROCKS* te mogućnosti njezine praktične primjene.

U devetom poglavlju, Zaključak, navedeni su svi zaključci koji su proizašli iz rezultata provedenog istraživanja te su istaknuti znanstveni i metodološki doprinosi u okviru procjene podložnosti odronima u detaljnom mjerilu.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

U ovom poglavlju prikazane su teorijske osnove i literatura koja se odnosi na procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Osobita pažnja posvećena je opisu geometrijskih značajki diskontinuiteta koje predstavljaju jedan od najvažnijih ulaznih podataka u analizama za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima prilikom detaljnih inženjerskogeoloških istraživanja. S obzirom na sve češću primjenu daljinskih istraživanja prilikom istraživanja stijenske mase te njihove prednosti, kao što su dostupnost svih dijelova istraživanih kosina te mogućnosti za automatizirano određivanje pojedinih geometrijskih značajki diskontinuiteta kao i njihovih analiza, prikazani su i opisani najvažniji znanstveni radovi iz područja daljinskih istraživanja stijenske mase i procjene podložnosti stijenskih kosina odronima.

### 2.1. Odroni u stijenskoj masi

Na razvoj strmih stijenskih krajolika značajno utječe pojava odrona (Varnes, 1978; Hungr i dr. 1999; Barlow i dr. 2012) pri čemu su odroni stijenske mase po definiciji tip klizišta koji uključuje odvajanje pojedinačnog ili nekoliko blokova stijene sa strmo nagnutih stijenskih kosina nakon čega slijedi gibanje niz kosinu slobodnim padom, odskakivanjem, kotrljanjem i klizanjem (Varnes, 1978). Odroni su prirodni hazard koji ugrožavaju mala područja, ali predstavljaju veliki rizik zbog toga što mogu uzrokovati značajne materijalne štete (npr. na infrastrukturi), a opasni su i za ljude. Hazard od odrona definiran je kao vjerojatnost da odron određenog intenziteta (funkcija mase, brzine kretanja, rotacije i visine poskakivanja stijenskog bloka) dosegne određenu lokaciju na padini u određenom vremenskom razdoblju (Jaboyedoff i dr., 2004). Procjena hazarda od odrona iziskuje poznavanje područja koja su izložena padu stijenskog bloka, a nalaze se ispod stijenskih kosina na višim predjelima (Evans i Hungr 1993; Crosta i Agliardi 2003; Guzzetti i dr., 2003; Baillifard i dr. 2003). Prema tome, od iznimne je važnosti identificirati potencijalna izvorišna područja odrona te odrediti podložnost stijenskih kosina odronima, kako bi procjena hazarda bila pouzdana (Jaboyedoff i dr., 2007). Brabb (1984) definira podložnost odronima kao mogućnost pojave odrona na određenom dijelu stijenske kosine s obzirom na lokalne uvjete, dok prema Fell i dr. (2008) podložnost odronima može biti definirana kao kvantitativna ili kvalitativna procjena značajki, volumena i prostorne distribucije odrona koji može nastati ili je nastao u prošlosti na nekom području pri čemu može, ali i ne mora uključivati opis duljine kretanja, brzine i intenziteta. Za procjenu podložnosti i analize nestabilnosti koriste se različite metode ovisno o veličini područja istraživanja, a

primjenjuju se u okviru regionalnih i detaljnih istraživanja te istraživanja određenog bloka. Regionalna istraživanja obuhvaćaju područja veće površine (nekoliko km<sup>2</sup> do nekoliko desetaka km<sup>2</sup>), a analize za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima zasnivaju se na osnovnim morfometrijskim parametrima reljefa dobivenim iz digitalnih modela visina (DMV) ili digitalnih modela terena (DMT) (Michoud i dr., 2012). Suprotno tome, istraživanja određenog bloka provode se na jednom izdvojenom području površine nekoliko m<sup>2</sup>, a analize se zasnivaju na geomehaničkim proračunima, za koje se parametri određuju laboratorijskim ispitivanjem i terenskim kartiranjem (npr. Eberhardt, 2003). Za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima uz prometnice ili iznad naseljenih područja, metode koje se primjenjuju u okviru regionalnih istraživanja nisu dovoljno detaljne, a istraživanja određenih blokova su preusko usmjerena i previše specifična da bi se mogla primijeniti za procjene podložnosti na većem području. Zbog toga što niti jedna od navedenih metoda nije odgovarajuća, u posljednjem desetljeću se razvijaju metode daljinskih istraživanja za procjenu podložnosti odronima za područja stijenskih kosina površine <1 km<sup>2</sup> (npr. Gigli i dr., 2012), odnosno primjenjive za procjenu podložnosti u detaljnom mjerilu. One su izravno vezane za morfologiju kosine, značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koji predstavljaju nužne ulazne parametre za analize.

#### 2.1.1 Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta

Stijensku masu, kao cjelinu, čine blokovi intaktne stijene i diskontinuiteti koji ih omeđuju (Vallejo i Ferrer, 2011). Prema Hoek i Bray (1981) intaktna stijena predstavlja konsolidiranu i cementiranu nakupinu minerala koja tvori stijenske blokove bez vidljivih pukotina, dok diskontinuiteti predstavljaju sve mehaničke prekide u stijenama, bez obzira na genezu, pri čemu je njihova vlačna čvrstoća vrlo mala ili jednaka nuli (Priest, 1993). Prisutnost diskontinuiteta u stijenskoj masi smanjuje njenu čvrstoću, povećava joj deformabilnost i čini je anizotropnom, što ima veliku ulogu u stabilnosti stijenskih kosina (Goodman, 1989). S obzirom na navedeno, u ranim fazama inženjerskogeoloških istraživanja određene lokacije nužno je opisati i okarakterizirati stijensku masu kako bi se moglo procijeniti njezino ponašanje u budućnosti, što omogućuje planiranje i provedbu detaljnih geotehničkih istraživanja.

Uobičajen postupak karakterizacije stijenske mase prilikom terenskog kartiranja započinje utvrđivanjem kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona izdvojenih s obzirom na litološke i strukturno-geološke značajke koje su utvrđene vizualnim pregledom stijenske kosine (Wyllie i Mah, 2004). Broj i ukupna površina inženjerskogeoloških zona ovisi o stupnju heterogenosti stijenskog materijala i strukturnih značajki u stijenskoj masi, površinskom

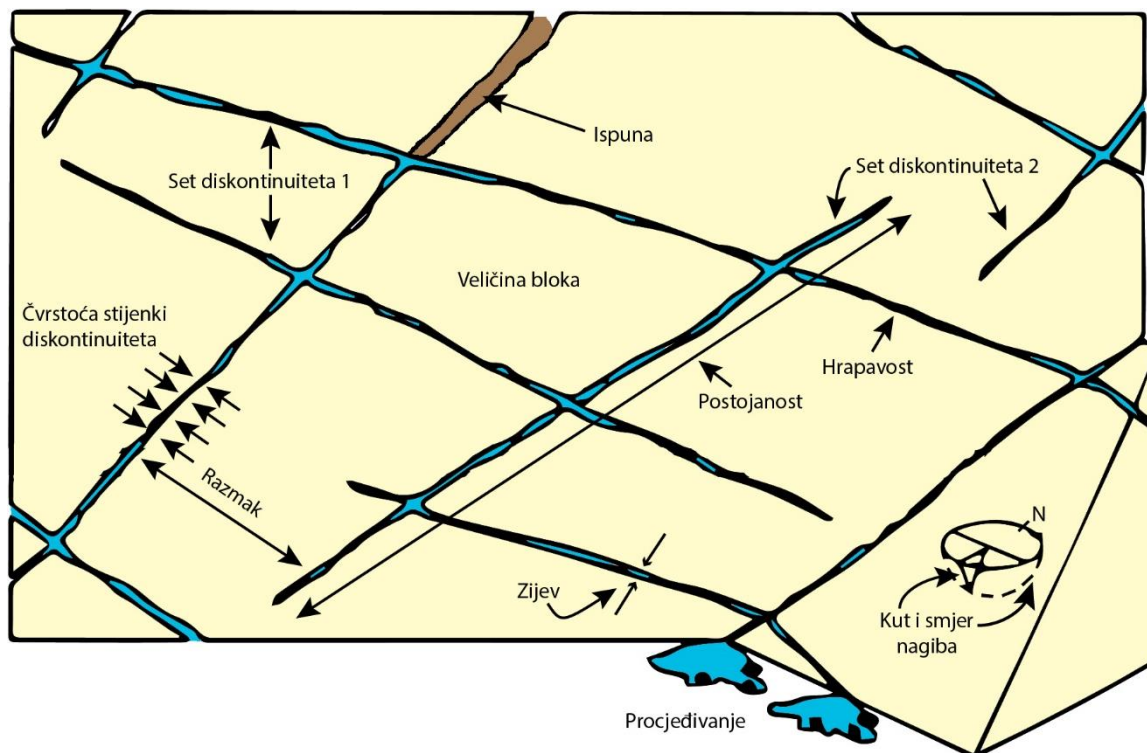
rasprostiranju stijenske kosine te same svrhe istraživanja (Vallejo i Ferrer, 2011). Svaka zona se opisuje odvojeno, a uključuje opis fizičkih i mehaničkih svojstava intaktne stijene i diskontinuiteta te njihovih značajki, ali i stijenske mase kao cjeline.

Opis intaktne stijene uključuje određivanje vrste stijene te njezina fizička svojstva, stupanj trošnosti i čvrstoću. Stupanj trošnosti predstavlja iznimno važno svojstvo s obzirom da je u izravnoj vezi sa čvrstoćom stijene, odnosno njenim mehaničkim svojstvima. Trošnost stijenskog materijala opisuje se kvalitativno, pri čemu se najčešće koristi klasifikacija trošnosti prema ISRM (1981) s podjelom u šest kategorija, od svježe stijene do rezidualnog tla. Prema ISRM (1981) čvrstoću stijene moguće je procijeniti *in-situ* pomoću Schmidtovog čekića ili pomoću testa opterećenja u točki (engl. *Point load test* – PLT), a svrstava se u jednu od sedam kategorija, od vrlo meke (1-5 MPa) do ekstremno čvrste stijene (>250 MPa).

Diskontinuitete najčešće čine strukturni elementi (slojevitost, rasjedi, pukotine, škrljavost, folijacija i laminacija) koji odvajaju blokove intaktne stijene te omogućuju njihovu međusobnu interakciju. Na interakciju blokova i njihovo mehaničko ponašanje izravno utječu geometrijske značajke diskontinuiteta (slika 2.1) i prema Hudson, (1989) čine ih:

- 1) orijentacija, definirana smjerom nagiba (otklon smjera pada diskontinuiteta od sjevera) i kutom nagiba (kut što ga zatvaraju ploha diskontinuiteta i horizontalna ravnina) diskontinuiteta;
- 2) razmak, udaljenost između dva susjedna diskontinuiteta;
- 3) postojanost, vidljiva duljina pružanja plohe ili traga diskontinuiteta;
- 4) hrapavost, opisuje se pomoću valovitosti i neravnina površine diskontinuiteta;
- 5) zijev, udaljenost između stijenki otvorenog diskontinuiteta, okomita na pružanje;
- 6) setovi diskontinuiteta, predstavljaju grupu sub-paralelnih i paralelnih diskontinuiteta istog porijekla;
- 7) veličina bloka, predodređena je svim prethodnim značajkama, a definirana je diskontinuitetima koji omeđuju blok i njihovim presječnicama.

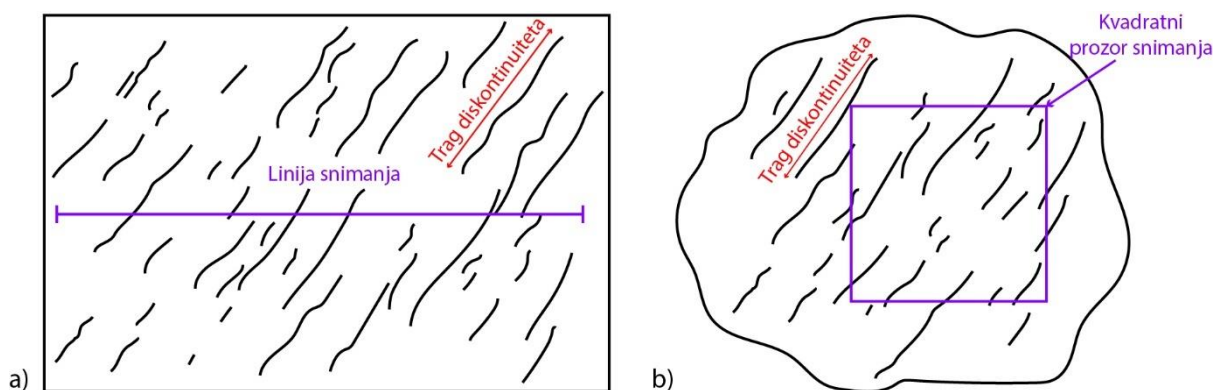
Orijentacija, razmak, hrapavost i postojanost diskontinuiteta imaju vrlo važnu ulogu u karakterizaciji stijenske mase pri čemu orijentacija predstavlja najvažniji element koji kontrolira mehanizme nestabilnosti u stijenskoj masi.



**Slika 2.1.** Shematski prikaz glavnih geometrijskih značajki diskontinuiteta (modificirano prema Hudson, 1989; Vallejo i Ferrer, 2011).

### 2.1.1.1 Orijentacija diskontinuiteta i grupiranje u setove

Tradicionalan pristup određivanja orijentacije diskontinuiteta zasniva se na mjerenju smjera i kuta nagiba plohe ili traga diskontinuiteta pomoću geološkog kompasa. Kako bi mjerenja bila obavljena sustavno koriste se tehnike linijskog ili prozorskog snimanja (Priest i Hudson, 1981; Priest, 1993). Tehnikom linijskog snimanja određuje se orijentacija svih diskontinuiteta čiji trag presijeca postavljenu liniju (vrpca, mjerni metar i sl.) duž lica stijenske mase (slika 2.2a). Na ovaj način prikupljaju se detaljni podaci o svakom pojedinom diskontinuitetu koji se kasnije mogu statistički analizirati. Tehnika prozorskog snimanja iziskuje odabir određene površine na licu stijenske mase u obliku kvadrata ili kružnice i određivanje značajki svih diskontinuiteta koji upadaju u to područje (slika 2.2b). Prema Priest (1993) površina bi trebala biti što veća kako bi se umanjila subjektivnost prilikom mjerenja. Također, prilikom odabira površine za prozorsko mjerenje treba uzeti u obzir bar dva lica stijenske mase koja su međusobno okomita kako bi svi diskontinuiteti bili uzeti u obzir, osobito oni čije je pružanje približno paralelno pružanju lica stijenske mase. Ukoliko linija ili prozor snimanja nisu okomiti na pružanje diskontinuiteta često dolazi do pristranosti u mjerenim orijentacijama diskontinuiteta pri čemu vrijednosti orijentacija diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu diskontinuiteta mogu biti precijenjene ili podcijenjene. Stoga je potrebno postaviti više linija i prozora snimanja ili primijeniti korekcijski faktor za sve one diskontinuitete čija normala zatvara oštar kut s normalom stijenske kosine (Terzaghi, 1965; Priest, 1993). Provođenje linijskog i prozorskog mjerenja iziskuje jako puno vremena i zbog toga je ponekad nemoguće prikupiti dovoljno podataka za valjanu statističku analizu. Prema ISRM (1978) potrebno je najmanje 150 mjerenja, odnosno prema Priest (1993) najmanje 200 mjerenja. Osim orijentacije diskontinuiteta, u okviru linijskog ili prozorskog snimanja određuju se i ostale geometrijske značajke diskontinuiteta.



**Slika 2.2.** Shematski prikaz sustavnog mjerenja orijentacije diskontinuiteta metodom: (a) linijskog i (b) prozorskog snimanja

Na temelju mjerenih vrijednosti orijentacija, diskontinuiteti se svrstavaju u setove što omogućava daljnju obradu i statističke analize mjerenih podataka. Diskontinuitete je moguće grupirati u setove vizualno, koristeći konturne dijagrame na stereografskoj projekciji te automatizirano, koristeći algoritme za analizu klastera. Vizualna metoda konturnih dijagrama je najčešće korištena metoda za određivanje setova diskontinuiteta prilikom inženjerskih radova u stijenama te je razvijen niz komercijalnih i besplatnih računalnih programa u kojima je moguće koristiti ovu metodu, pri čemu je najpoznatiji *DIPS* (Rocscience Inc., 2012). Postupak grupiranja diskontinuiteta pomoću konturnih dijagrama detaljno je objašnjen u Billings (1972) i Priest (1993), a bazira se na prikazu svih polova normala diskontinuiteta na stereografskoj projekciji, brojanju polova koji upadaju u referentnu kružnicu, odnosno određivanju područja na sferi s velikom koncentracijom polova te osjenčavanju tih područja kako bi se odredila njihova gustoća. Područja s najvećom gustoćom polova najčešće predstavljaju centre setova diskontinuiteta. S obzirom na nedostatke ove metode kao što su subjektivnost istraživača, njegovo iskustvo i poznavanje strukturno-geološke građe, razvijeni su razni algoritmi za automatizirano grupiranje orijentacije diskontinuiteta u setove.

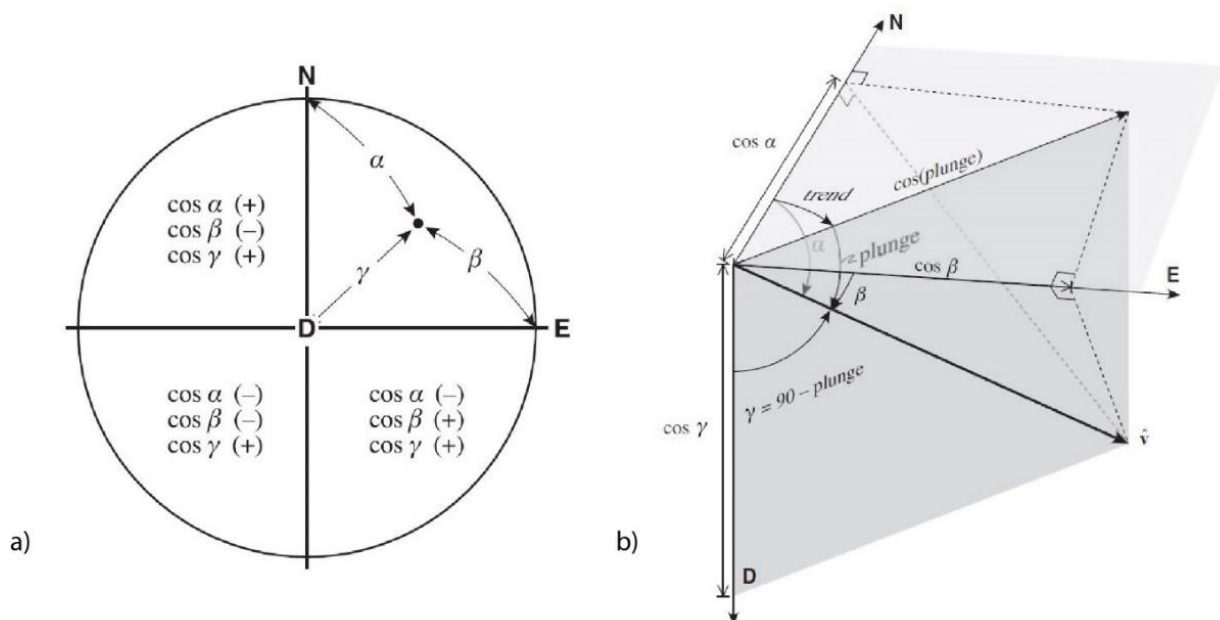
Metode automatiziranog grupiranja orijentacije diskontinuiteta u setove dijele se na metode koje pretpostavljaju početni probabilistički model podataka o orijentaciji diskontinuiteta, odnosno, unaprijed se pretpostavlja distribucija i oblik klastera (npr. Stanley i Mahtab, 1976; Mahtab i Yegulalp, 1982; Dershowitz i dr., 1996) te na metode grupiranja koje ne pretpostavljaju probabilistički model (npr. Hammah i Curran, 1998; Zhou i Maerz, 2002; Kloze i dr., 2005.). Obje metode omogućavaju definiranje intervala pouzdanosti i testiranje statističkih hipoteza te grupiranje diskontinuiteta s obzirom na vjerojatnost pripadnosti svakog diskontinuiteta nekom od setova. Najpoznatije i najčešće korištene metode automatiziranog grupiranja orijentacije diskontinuiteta u setove su metode neizrazitog grupiranja (engl. *fuzzy k-means clustering* - FKM) koju su razvili Hammah i Curran (1998) te metoda spektralnog grupiranja (engl. *spectral clustering*) koju su razvili Jimenez-Rodriguez i Sitar (2006), a temelje se na podijeli podataka u grupe s obzirom na funkciju udaljenosti ili sličnosti između pojedinih podataka. Obje metode su ranije korištene u strojnom učenju, medicinskoj dijagnostici, digitalnoj grafici i sl. te su ih autori modificirali u svrhu grupiranja diskontinuiteta u setove. Osim spomenutih postoji i niz drugih metoda, no zbog jednostavnosti primjene u *MATLAB* okruženju (MathWorks, 2016), u svrhu automatiziranog grupiranja u ovom radu korištena je modificirana metoda spektralnog grupiranja, koja jednim svojim dijelom uključuje i FKM metodu te će radi toga biti detaljnije opisana.



Algoritam za spektralno grupiranje grupira točke u prostoru na temelju kvantificiranja sličnosti između ulaznih podataka (Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006). Ulazne podatke predstavljaju orijentacije diskontinuiteta, odnosno njihovi jedinični vektori normale. Zapis orijentacije diskontinuiteta i pola normale u obliku smjera i kuta nagiba (engl. *azimuth*, *dip*, *trend* i *plunge*), tj. orijentacijski skup podataka u sferičnom zapisu, nije pogodan kao ulazni podatak u algoritmima s obzirom da na takvim podacima nije moguće izvršiti većinu matematičkih i statističkih operacija u većini programskih jezika jer su oni optimizirani za rad s podacima zapisanim u vektorskom obliku. Stoga, prema Allmendinger i dr. (2012) podatke o orijentaciji potrebno je pretvoriti iz sferičnog u Kartezijev koordinatni sustav. Odnos između ova dva sustava prikazan je na slici 2.3, a sama pretvorba vrši se na sljedeći način za polove normala (modificirano prema Allmendinger i dr., 2012):

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \cos(\theta) \cos(\phi) \\ \cos \beta &= \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \cos \gamma &= \sin(\phi)\end{aligned}\quad (1)$$

pri čemu  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$  i  $\cos \gamma$  predstavljaju odsječke na x (N), y (E) i z (D) osi Kartezijevog koordinatnog sustava,  $\theta$  smjer nagiba pola normale, a  $\phi$  kut nagiba pola normale. Jedinični vektor zapisuje se u obliku  $x \equiv (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ .

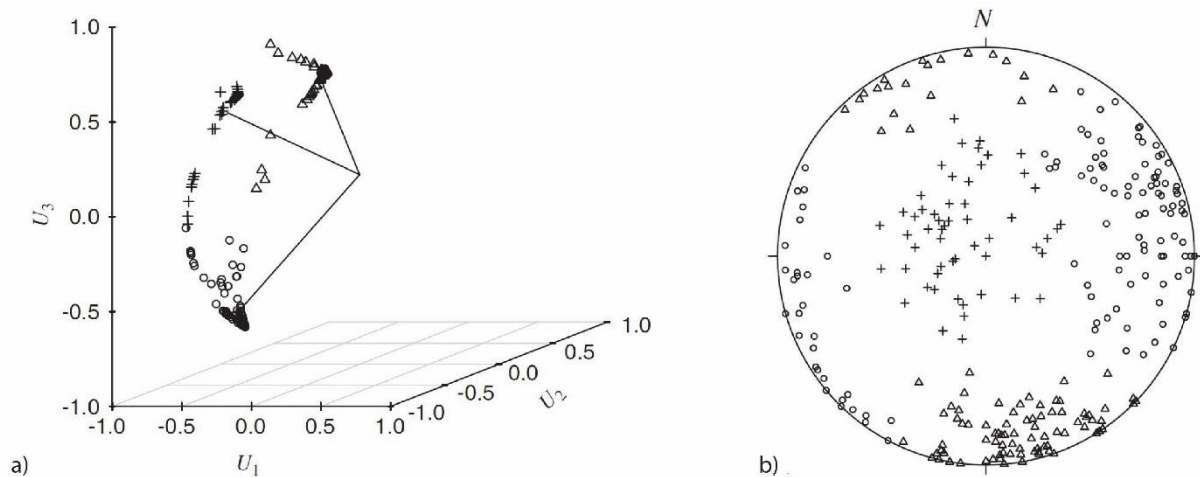


**Slika 2.3.** (a) Prikaz odnosa između sferičnog i Kartezijevog koordinatnog sustava na donjoj polutki i (b) prikaz odnosa između smjera i kuta nagiba pola ravnine i kosinusa smjera vektora u Kartezijevom koordinatnom sustavu (preuzeto iz Allmendinger i dr., 2012).

Dobiveni jedinični vektori, koji predstavljaju  $N$  mjerenih diskontinuiteta, svrstavaju se u  $K$  grupa (setova) algoritmom za spektralno grupiranje, odnosno pretvorbom skupa  $N$  podataka iz originalnog 3D prostora u kartezijevom koordinatnom sustavu u  $K$ -dimenzionalni prostor (slika 2.4a) pri čemu koordinate točaka čine svojstveni vektori. Broj dimenzija  $K$  jednak je broju setova diskontinuiteta. Prema Jimenez-Rodriguez i Sitar (2006) algoritam se izvodi na sljedeći način:

- 1) izrada matrice afiniteta  $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , pri čemu je  $A_{i,j} = \exp(-d^2(x_i, y_i)/2\sigma^2)$  ako je  $i \neq j$  i  $A_{ii} = 0$ . Kvadrirana udaljenost između dvaju jediničnih vektora ( $d^2$ ) predstavlja mjeru sličnosti baziranu na sinus oštrog kuta između dvaju vektora i računa se kao  $d^2(x_1, x_2) = 1 - (x_1^T \cdot x_2)^2$ . Afinitet opisuje mjera sličnosti između orijentacija dvaju diskontinuiteta pri čemu vrijednost afiniteta opada s povećanjem udaljenosti između dva vektora. Parametar  $\sigma^2$  kontrolira s kolikom mjerom će afinitet opadati, gdje njegove veće vrijednosti znače sporije opadanje afiniteta s povećanjem udaljenosti.
- 2) Izrada dijagonalne matrice  $D$  čiji su  $(i, i)$ -ti elementi dobiveni zbrajanjem  $i$ -tog reda matrice  $A$ .  $D_{ii}$  je zbroj afiniteta podatka  $i$  prema svim ostalim podacima u skupu.
- 3) Izrada normalizirane matrice afiniteta  $L = D^{-1/2}AD^{-1/2}$
- 4) Izračun najvećih svojstvenih vrijednosti skupa  $K$  od  $L$  i njihovih odgovarajućih svojstvenih vektora  $v_1, v_2, \dots, v_k$ . Odgovarajući svojstveni vektori slažu se u stupce kako bi tvorili matricu  $V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k]$ .
- 5) Izraditi matricu  $U$  iz  $V$  tako da ima jediničnu duljinu, odnosno  $U_{ij} = V_{ij}/(\sum_j V_{ij}^2)^{1/2}$ .
- 6) Razmatrajući da je svaki red matrice  $U$  točka u  $\mathbb{R}^K$ , točke je potrebno grupirati (redove matrice) u  $K$  podskupe koristeći  $K$ -means algoritam (slika 2.4a)
- 7) Dodijeliti originalni vektor  $x_i$  u grupu  $j$  (vektor normale diskontinuiteta u određeni set) samo ako je red  $i$  matrice  $U$  dodijeljen grupi  $j$  u koraku 6.

Nakon provedbe algoritma potrebno je pretvoriti vektore normale iz Kartezijevog u sferični koordinatni sustav kako bi se podaci o orijentaciji diskontinuiteta, svrstani u setove, mogli prikazati na stereografskoj projekciji radi provjere i usporedbe rezultata (slika 2.4b). Nakon definiranja setova diskontinuiteta, grupirani polovi na stereografskoj projekciji zaprimaju specifičan oblik, odnosno raspodjelu. Najčešće korištena raspodjele u statističkim analizama orijentacije diskontinuiteta, tj. za modeliranje trodimenzionalnih orijentacijskih vektora je *Fisherova* raspodjela (Fisher, 1953), koja je trodimenzionalni ekvivalent normalne raspodjele.



**Slika 2.4.** (a) Shematski prikaz grupiranja jediničnih svojstvenih vektora matrice  $U$ , prikazanim kao točke, u  $K$ -dimenzionalnom prostoru i (b) prikaz polova normala diskontinuiteta na stereografskoj projekciji, simboliziranih s obzirom na rezultat spektralnog grupiranja, odnosno s obzirom na pripadajući set diskontinuiteta (preuzeto iz Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006)

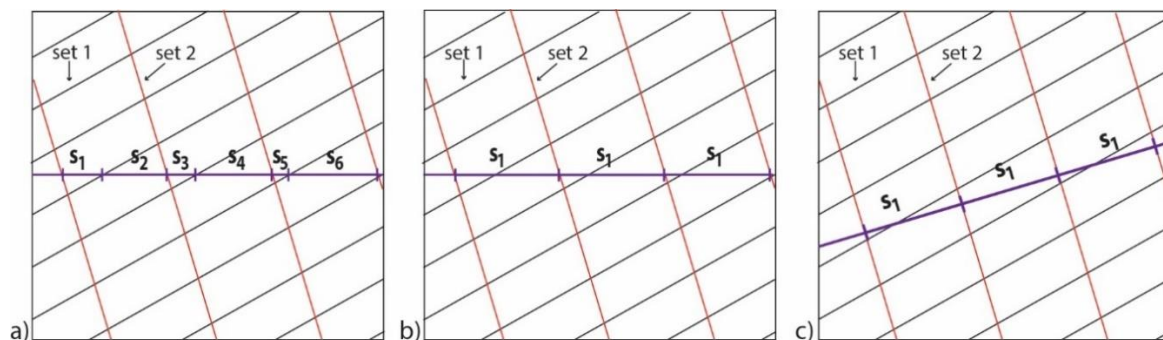
*Fisherova* raspodjela opisuje kutnu distribuciju vrijednosti orijentacija s dva parametra, srednjom vrijednosti vektora smjera i disperzijom. Uzima u obzir pretpostavku da će disperzija biti simetrična oko srednje vrijednosti, a definirana je funkcijom gustoće:

$$f(\theta) = \frac{\kappa \sin(\theta)}{2\pi(e^\kappa - 1)} e^{\kappa \cos(\theta)} \quad (2)$$

gdje  $\theta$  predstavlja kutnu devijaciju od vektora srednje vrijednosti, a  $\kappa$  Fisherovu konstantu, tj. faktor disperzije. S obzirom na navedeno, grupe polova koje imaju Fisherovu raspodjelu imat će kružni uzorak na stereografskoj projekciji. Budući da polovi diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu ne poprimaju uvijek ovakav oblik na stereografskoj projekciji (npr. ako se radi o valovitim diskontinuitetima ili diskontinuitetima koji su dio borane strukture), raspodjela polova može se opisati i *Binghamovom* (Bingham, 1964), *Kentovom* (Kent, 1982) ili *Watsonovom* (Fisher i dr., 1987) raspodjelom. Navedene razdiobe koriste više dodatnih parametara koje je ponekad vrlo teško ili nemoguće odrediti, a neki od njih su i proizvoljni te se radi pojednostavljenja ponekad i neprikladan set podataka opisuje Fisherovom raspodjelom. Također, jedino primjenom *Fisherove* raspodjele može se utvrditi da li svi diskontinuiteti svrstani u određeni set pripadaju tom setu ili su šumovi (engl. *outliners*). S obzirom da *Fisherova* raspodjela nije zavisna o smjeru, već samo o razlici u kutovima može se pretpostaviti da su vrijednosti orijentacije diskontinuiteta bliže srednjoj vrijednosti seta važnije za sami set nego one koje se nalaze na njezinim rubovima i/ili graniče s drugim setovima te se na taj način može odrediti šumove, što je od velikog značaja u kinematičkim analizama.

### 2.1.1.2 Razmak i postojanost diskontinuiteta

Razmak diskontinuiteta predstavlja udaljenost između dva susjedna diskontinuiteta. Razmak diskontinuiteta definira distribuciju veličine blokova u stijenskoj masi i zbog toga ima značajan utjecaj na njezina mehanička svojstva. Izrazito raspucana stijenska masa, tj. stijenska masa s blokovima centimetarskih dimenzija potpuno će se drugačije ponašati od masivne stijenske mase s blokovima metarskih dimenzija, bez obzira što se radi o istom stijenskom materijalu. Poznajući prosječne razmake dominantnih setova diskontinuiteta moguće je odrediti veličinu blokova *in-situ*. S obzirom da diskontinuiteti nisu uvijek međusobno paralelni, prema Priest (1993) postoje različiti načini definiranja razmaka, tj. možemo ga definirati kao ukupan razmak, razmak seta diskontinuiteta i normalni razmak seta diskontinuiteta. Ukupan razmak predstavlja udaljenost između dva susjedna diskontinuiteta, mjereno tijekom linijskog snimanja (slika 2.5a). Razmak diskontinuiteta dobiven na ovaj način daje informaciju o razlomljenosti stijenske mase i nema poveznicu s razmakom seta diskontinuiteta. Također, mjerenje razmaka na ovaj način značajno povećava pristranost s obzirom da se mjeri duž jedne linije snimanja. Razmak seta diskontinuiteta predstavlja udaljenost između susjednih diskontinuiteta koji pripadaju istom setu, mjereno duž linije snimanja (slika 2.5b). Prosjek svih razmaka mjerenih na ovaj način predstavlja srednju vrijednost razmaka seta diskontinuiteta. Ukoliko se na ovaj način određuje razmak može doći do precijenjenosti razmaka seta diskontinuiteta čije je pružanje približno paralelno liniji snimanja. Normalni razmak seta diskontinuiteta: predstavlja udaljenost između dva susjedna diskontinuiteta koji pripadaju istom setu, mjereno okomito na prosječno pružanje seta (slika 2.5c). Prosjek svih razmaka mjerenih na ovaj način predstavlja srednju vrijednost normalnog razmaka seta diskontinuiteta. Normalni razmak seta diskontinuiteta i njegova srednja vrijednost su odlični pokazatelji oblika bloka i distribucije veličine u stijenskoj masi te kao takvi mogu poslužiti kao ulazni podatak za klasifikaciju stijenske mase i numeričko modeliranje.



**Slika 2.5.** Shematski prikaz različitih načina definiranja razmaka diskontinuiteta: (a) ukupan razmak, (b) razmak seta diskontinuiteta i (c) normalni razmak seta diskontinuiteta.

Podaci o razmaku diskontinuiteta analiziraju se na histogramima koji prikazuju distribuciju razmaka određenog seta diskontinuiteta ili svih diskontinuiteta. Histogram je definiran učestalosti (frekvencijom) razmaka diskontinuiteta i vrijednostima razmaka u određenim klasama. Učestalost ( $\lambda$ ) razmak diskontinuiteta jednak je:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{s}} \quad (3)$$

gdje  $\bar{s}$  predstavlja srednju vrijednost razmaka seta diskontinuiteta. Na temelju učestalosti razmaka moguće je kvantificirati učestalost diskontinuiteta pomoću volumetrijskog broja pukotina  $J_V$  koji je jednak (Palmström, 1982):

$$J_V = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} + \frac{N_r}{5} \quad (4)$$

gdje  $1/S_n$  predstavlja učestalost seta  $n$ , a  $N_r/5$  parametar koji opisuje diskontinuitete koji ne pripadaju niti jednom setu. Učestalosti diskontinuiteta i razmaka daju početni uvid u prostorno rasprostiranje diskontinuiteta, no kako bi se mogli utvrditi važni parametri kao što su veličina i oblik bloka te vjerojatnost pojave diskontinuiteta na nekom određenom dijelu stijenske kosine, potrebno je provesti statističku analizu razmaka diskontinuiteta te odrediti postojanost.

Prema Priest i Hudson (1981) razmaci seta diskontinuiteta bi trebali imati negativnu eksponencijalnu razdiobu ako se pretpostavi da se nasumično pojavljuju. Ona je definirana funkcijom gustoće vjerojatnosti:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (5)$$

pri čemu  $x$  predstavlja mjereni razmak, a  $\lambda$  učestalost razmaka diskontinuiteta. Drugačiji pristup zagovara Hobbs (1993) koji pretpostavlja da bi većina razmaka setova diskontinuiteta trebala imati log-normalnu raspodjelu čija je funkcija gustoće vjerojatnosti definirana kao (Harr, 1977):

$$f(s) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln s - \bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (6)$$

gdje  $x=\ln s$ ,  $\bar{x}$  srednja vrijednost logaritama razmaka, a  $\sigma_x$  standardna devijacija logaritama razmaka. Pouzdano utvrđivanje modela raspodjele razmaka ovisi o lokalnim uvjetima, odnosno o genezi diskontinuiteta te je važno ispitati podudarnost mjerenih podataka s ranije navedenim raspodjelama s nekim od klasičnih statističkih testova (npr. *Hi-kvadrat* test).

Postojanost predstavlja kontinuiranost plohe diskontinuiteta, a najčešće se definira kao jednodimenzionalna duljina traga diskontinuiteta vidljivog na licu stijenske kosine (slika 2.1). Ukoliko je moguće, duljina traga diskontinuiteta trebala bi se mjeriti u smjeru nagiba diskontinuiteta i u smjeru pružanja. Za sustavna mjerenja također se koriste metode linijskog i prozorskog snimanja (slika 2.2). Prema Priest (1993), ukoliko se provodi linijsko snimanje preporuča se mjerenje „polu-tragova“ tj. mjerenje dijelova tragova diskontinuiteta koji se nalaze s jedne strane linije snimanja, a dobivene vrijednosti statistički se analiziraju za procjenu raspodjele postojanosti. S obzirom da „polu-tragovi“ i cijeli tragovi mogu imati različitu raspodjelu, prilikom analiza postojanosti ipak se preferira korištenje metode prozorskog snimanja. Prilikom prozorskog mjerenje može se koristiti metoda pravokutnog (Pahl, 1981) i kružnog prozora određene veličine (Mauldon, 1998; Zhang i Einstein, 1998; Mauldon i dr., 2001) (slika 2.6). Metoda pravokutnog prozora je brža, ali podložnija pogreškama i primjenjiva samo za jedan set diskontinuiteta koji mora imati probabilističku raspodjelu. Prema Pahl (1981) postupak određivanja srednje vrijednosti postojanosti seta diskontinuiteta započinje definiranjem pravokutnog prozora na stijenskoj kosini dimenzija  $L_1$  i  $L_2$  te prebrojavanjem ukupnog broja diskontinuiteta ( $N''$ ) određenog seta, odnosno svi tragovi diskontinuiteta koji se u potpunosti nalaze unutar prozora ( $N_c$ ) te koji ga presijecaju ( $N_t$ ) (slika 2.6a). Procjena prosječne postojanosti seta diskontinuiteta definirana je izrazom (Pahl, 1981):

$$\bar{l} = H' \frac{(1 + m)}{(1 - m)} \quad (7)$$

pri čemu je,

$$H' = \frac{L_1 \cdot L_2}{(L_1 \cdot \cos \psi + L_2 \cdot \sin \psi)} \quad (8)$$

gdje  $\psi$  predstavlja kut što ga stranica pravokutnog prozora zatvara sa stijenskom kosinom te

$$m = \frac{(N_t - N_c)}{(N'' + 1)} \quad (9)$$

Kao što je vidljivo iz opisa i jednadžbi, u okviru ove metode samo se prebrojavaju tragovi, ne mjeri se njihova duljina, a prosječna postojanost je samo procijenjena. S obzirom na to, ovako određena postojanost neovisna je o pretpostavljenoj raspodjeli postojanosti. Metodom kružnog prozora moguće je definirati i kvantificirati stvarnu srednju vrijednost postojanosti diskontinuiteta i njezinu standardnu devijaciju te procijeniti parametre gustoće i intenziteta tragova ravnina. Kako bi se odredili navedeni parametri, prema Mauldon, (1998), Zhang i

Einstein (1998) i Mauldon i dr. (2001) potrebno je utvrditi broj krajeva diskontinuiteta unutar kružnog prozora te broj sjecišta diskontinuiteta s kružnim prozorom (slika 2.6b). S obzirom na navedeno, srednja vrijednost postojanosti seta diskontinuiteta definirana je izrazom Mauldon, (1998):

$$\mu = \frac{\pi \cdot r}{2} \left( \frac{n}{m} \right) \quad (10)$$

gdje  $r$  predstavlja radijus kružnog prozora,  $n$  broj sjecišta traga diskontinuiteta s prozorom, a  $m$  broj krajeva tragova diskontinuiteta unutar prozora, pri čemu je standardna devijacija jednaka (Zhang i Einstein, 1998):

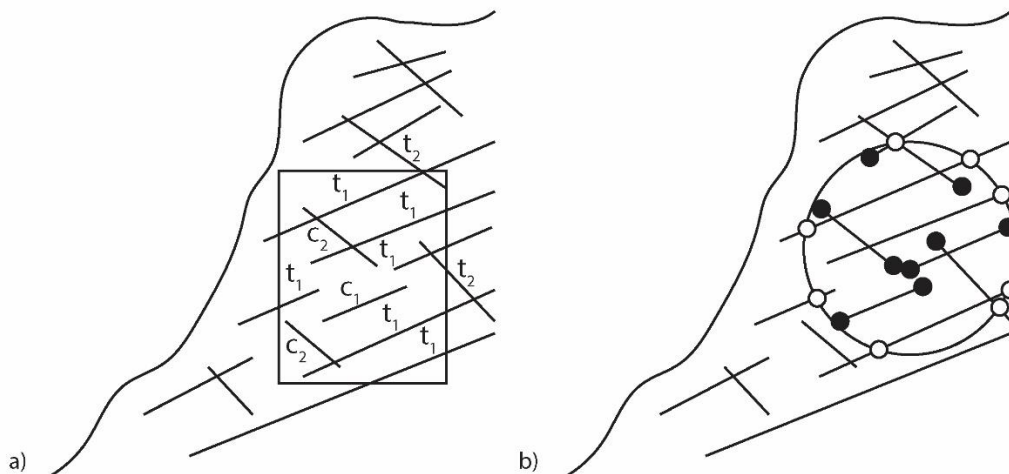
$$\sigma = \mu(COV)_m \quad (11)$$

gdje  $(COV)_m$  predstavlja koeficijent varijacije mjerene postojanosti, tj. omjer mjerene srednje vrijednosti i standardne devijacije. Mauldon i dr. (2001) su nadogradili metodu te predstavili jednadžbe za procjenu gustoće tragova i njihovog intenziteta, koji čine ulazne parametre u analizama učestalosti diskontinuiteta. Gustoća tragova ( $\rho$ ) definirana je izrazom:

$$\rho = \frac{m}{2\pi r^2} \quad (12)$$

dok je intenzitet ( $I$ ) definiran izrazom:

$$I = \frac{n}{4r} \quad (13)$$



**Slika 2.6.** Shematski prikaz određivanja postojanosti diskontinuiteta na stijenskoj kosini: (a) metodom kvadratnog prozora gdje  $t$  i  $c$  predstavljaju diskontinuiteta koji sijeku prozor, odnosno nalaze se unutar prozora i (b) metodom kružnog prozora, gdje bijeli kružići predstavljaju sjecište tragova s prozorom, a crni završetke tragova unutar prozora, tj. vrijednosti  $n$  i  $m$  (modificirano prema Mauldon i dr., 2001; Wyllie i Mah, 2004).

Precizno utvrđivanje setova diskontinuiteta i njihove orijentacije, kvantificiranje razmaka i postojanosti diskontinuiteta te njihovih statističkih parametara važno je klasifikaciju stijenske mase, numeričko modeliranje i analize stabilnosti s obzirom da omogućuje utvrđivanje veličine i oblika stijenskih blokova te njihovu distribuciju.

### 2.1.1.3 Veličina i oblik bloka

Dimenzije stijenskog bloka definirane su orijentacijom, razmakom, i postojanosti diskontinuiteta te brojem setova diskontinuiteta. Prema Palmström (1996) srednja vrijednost volumena bloka kojeg tvore tri seta diskontinuiteta može se izračunati na sljedeći način:

$$V_0 = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sin\gamma_1 \sin\gamma_2 \sin\gamma_3} \quad (14)$$

gdje su  $S_1, S_2, S_3$  razmaci setova diskontinuiteta, a  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  kutovi koje diskontinuiteti međusobno zatvaraju. Prikazana jednadžba vrijedi samo ako blok tvore tri postojana diskontinuiteta, što je u jako raspucanoj stijenskoj masi rijedak slučaj. U ostalim slučajevima primjenjuju se neizravne metode određivanja veličine bloka pomoću indeksa kvalitete jezgre (RQD), volumetrijskog broja pukotina ili gustoće diskontinuiteta, a detaljno su objašnjene u Palmström (2005). Od navedenih metoda, za određivanje volumena bloka ( $V_b$ ) najčešće se koristi korelacija između volumetrijskog broja pukotina i oblika bloka, a prema Palmström (2005) definirana je izrazima:

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \quad (15)$$

gdje  $J_v$  predstavlja volumetrijski broj pukotina, a  $\beta$  faktor oblika bloka koji je jednak:

$$\beta = 20 + 7a_3 / a_1 \quad (16)$$

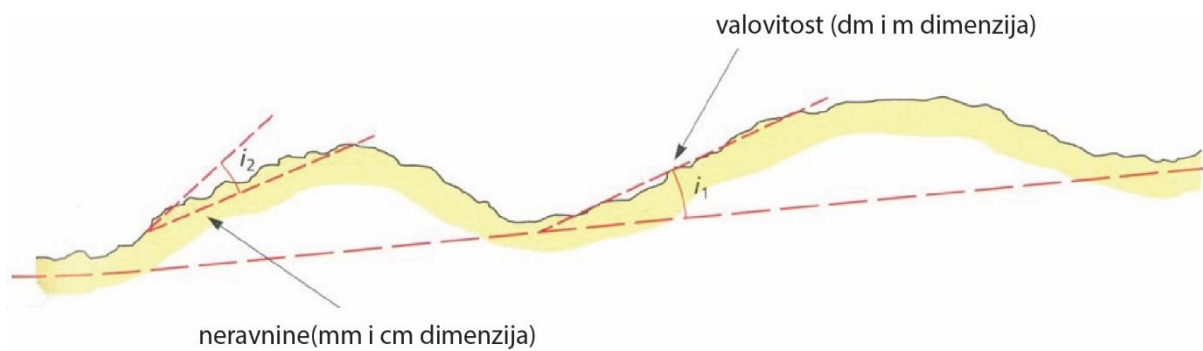
pri čemu su  $a_1$  i  $a_3$  najdulja i najkraća duljina stranice bloka, dobivene iz postojanosti.

Članovi jednadžbi 4 i 14 koji se koriste za izračun veličine bloka odnose se na srednje vrijednosti razmaka i orijentacije. Međutim, vrijednosti razmaka i orijentacije su promjenjive te bi ih bilo bolje opisivati raspodjelama. Određivanje raspodjele veličine i oblika blokova na temelju raspodjele orijentacije, razmaka, postojanosti i učestalosti diskontinuiteta utvrđuje se modeliranjem diskretnih mreža pukotina (engl. *Discrete fracture network* – DFN), koje nije obuhvaćeno ovim istraživanjem.



#### 2.1.1.4 Hrapavost i zijev

Hrapavost predstavlja odstupanje površine diskontinuiteta od savršeno ravne površine. Prema Priest (1993) opisuje se s obzirom na mjerilo promatranja, odnosno, pomoću valovitosti koja opisuje odstupanja u decimetarskim i metarskim dimenzijama te pomoću neravnina koje opisuju odstupanja u milimetarskim i centimetarskim dimenzijama (slika 2.7). Pomoću hrapavosti moguće je procijeniti posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. S obzirom da je hrapavost vrlo teško izraziti kao parametar, razvijen je niz metoda za određivanje hrapavosti i profila hrapavosti tijekom terenskih istraživanja, a detaljno su opisane u Fecker i Rengers (1971), Barton i Choubey (1977), ISRM (1978), Stimpson (1982), Laubscher (1990), Maerz et al. (1990) i Hack i Price (1995).

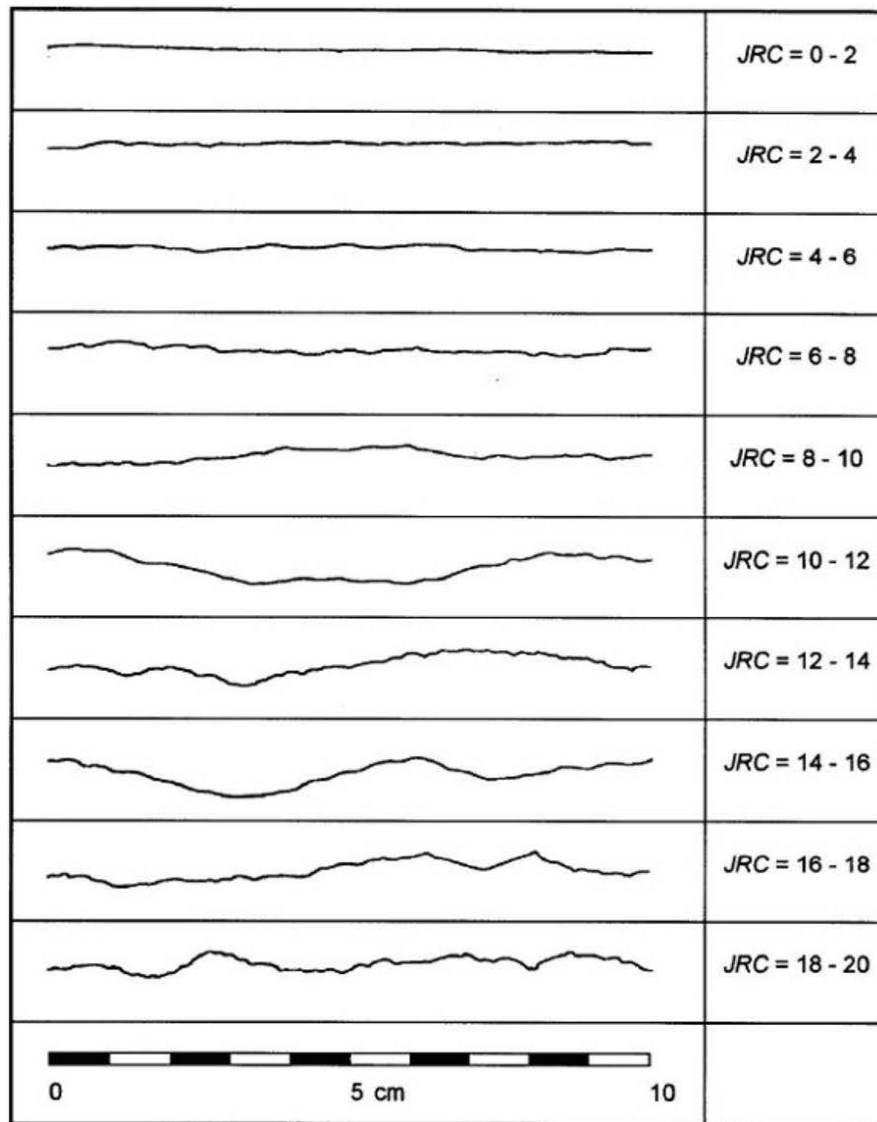


**Slika 2.7.** Shematski prikaz određivanja hrapavosti diskontinuiteta pomoću valovitosti i neravnina (modificirano prema Vallejo i Ferrer, 2011).

Odabir metode određivanja hrapavosti ovisi o mjerilu promatranja i o mogućnosti pristupa diskontinuitetima, a razlikuju se kvalitativne ili numeričke metode. Najjednostavniji i najbrži način za određivanje hrapavosti je vizualno uspoređivanje sa standardnim profilima hrapavosti i izražavanjem pomoću koeficijenta hrapavosti pukotina (engl. *joint roughness coefficient* – JRC) (slika 2.8), koji se koristi u izračunu posmične čvrstoće diskontinuiteta. Prema Barton i Choubey (1977) posmična čvrstoća definirana je izrazom:

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (17)$$

gdje je  $\sigma'_n$  efektivno normalno naprezanje,  $JCS$  tlačna čvrstoća stijenki pukotina, a  $\phi_b$  bazični kut trenja. Osim za procjenu posmične čvrstoće, hrapavost se koristi tj. boduje prilikom klasifikacije stijenske mase, primjerice u klasifikacijskim sustavima RMR (engl. *Rock Mass Rating*) (Bienawski, 1976), odnosno RMi (engl. *Rock Mass index*) (Palmström, 1995), gdje se boduju valovitost i neravnine.



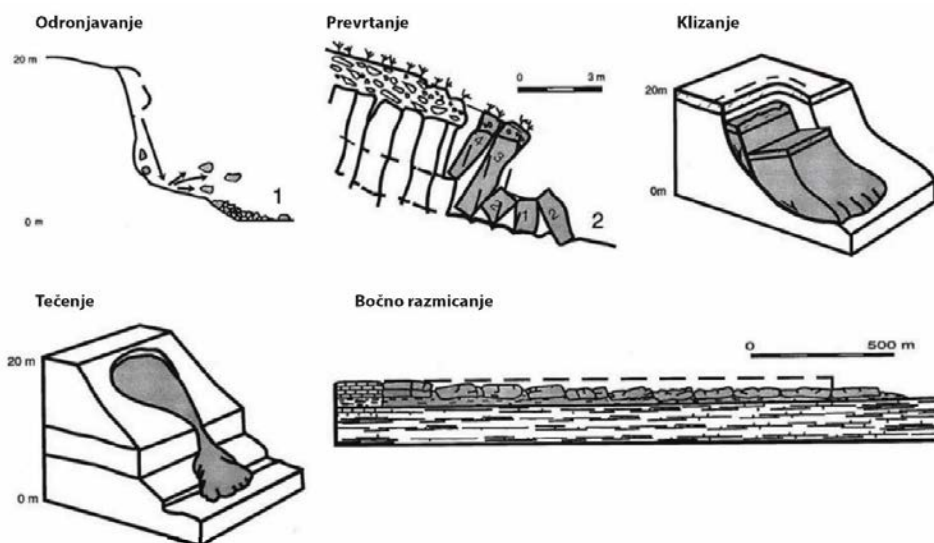
Slika 2.8. Standardni profili hrapavosti i odgovarajuće vrijednosti JRC-a (preuzeto iz Barton i Choubey, 1977).

Zijev diskontinuiteta definiran je kao udaljenost između stijenki diskontinuiteta, pri čemu je prostor između njih ispunjen zrakom, vodom ili ispunom. Posmična čvrstoća diskontinuiteta uvjetovana je tipom i debljinom ispune. Ukoliko ispunu predstavlja sitnozrnasti materijal veće debljine, čvrstoća diskontinuiteta bit će jednaka čvrstoći ispune, a slom u stijenskoj masi će se odviti kroz ispunu. Ukoliko ispunu predstavlja čvrst i konsolidiran materijal do sloma u stijenskoj masi će doći duž kontakta ispune i stijenske diskontinuiteta (Vallejo i Ferrer, 2011). Zijev utječe na propusnost odnosno i samim time na efektivna naprezanja koja djeluju na stijenske diskontinuiteta, što značajno utječe na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. Zijev se mjeri pomoću ravnala s milimetarskim prikazom, okomito na stijenske diskontinuiteta, pri čemu bi se mjerenja trebala izvoditi zasebno za svaki set diskontinuiteta, a kao rezultat prikazati uprosječenu vrijednost. Određivanje hrapavosti, zijeva i ispune diskontinuiteta nije bio predmet doktorskog istraživanja.

### 2.1.2 Procesi na stijenskim kosinama

Procesi na kosinama dijele se u dvije skupine s obzirom na uzročnike pokreta i to na pokrete mase tla ili stijena, kod kojih je gravitacija glavni uzročnik pokreta i na eroziju uzrokovanu vjetrom, vodom i sl., pri čemu antropogeni utjecaji mogu značajno ubrzati određene procese (Brunsdan, 1984; van Beek i dr., 2008). Procesima gibanja mase tla ili stijena niz padinu nastaju pojave koje Varnes (1978) definira kao klizišta. Prema mehanizmu gibanja razlikuju se procesi klizanja, tečenja, odronjavanja, prevrtanja i razmicanja (slika 2.9) (Varnes, 1978; Cruden i Varnes, 1996; Hungr i dr., 2014). Prema van Beek i dr. (2008) stabilnost padina ovisi o raznim uvjetima koji mogu biti kvazi-statički (geološka građa, orijentacija padine, strukturne značajke, fizička svojstva materijala, itd.) ili dinamički (oborine, seizmičnost, itd.), pri čemu prostorna raspodjela kvazi-statičkih uvjeta definira podložnost padine na slom, dok dinamički uvjeti dovode do sloma. Navedeni uvjeti nazivaju se još i preduvjetima i pokretačima (Crozier, 1986; Popescu, 1994).

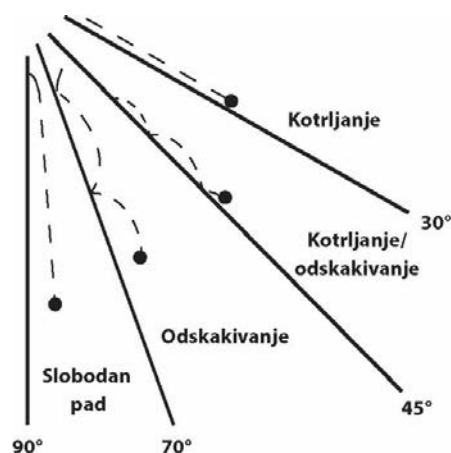
Na strmo nagnutim stijenskim kosinama koje izgrađuje kompetentna stijenska masa mogući su mehanizmi odronjavanja i prevrtanja, pri čemu je stabilnost uvjetovana značajkama diskontinuiteta. Strme stijenske kosine ( $>30^\circ$ ) osnovni su preduvjet za nastanak odrona, a formiraju se tektonskom aktivnošću, fluvijalnom i glacijalnom erozijom te izdizanjem uslijed vulkanske aktivnosti (Flageollet i Weber, 1996). Također, ustrmljavanje kosina posljedica je i ljudskih aktivnosti, različitih inženjerskih radova, primjerice izvođenjem zasjeka i usjeka u stijenskoj masi te eksploatacijom mineralnih sirovina. Na vrhu stijenskih kosina nastaju vlačne pukotine uslijed bočnog rasterećenja, koje su paralelne pružanju kosine, a zajedno s ostalim diskontinuitetima mogu tvoriti potencijalno nestabilne blokove.



**Slika 2.9.** Podjela klizišta s obzirom na mehanizam gibanja (preuzeto iz Cruden i Varnes, 1996)

Fizičko i kemijsko trošenje značajno utječe na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta u stijenskoj masi, pri čemu su stijenske diskontinuiteta često izrazito trošne, a sitnozrnasta ispunjena sprječava drenažu (Day, 1997; van Beek i dr., 2008). Prema Whalley (1984) pokretači odrona mogu biti učestali ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, bubrenje glinovite ispune, kemijsko trošenje minerala koji izgrađuju stijenu, korijenje vegetacije itd., dok Dorren (2003) pokretačima pridodaje i iznenadne, kratkotrajne procese kao što su potresi, vibracije uslijed miniranja ili prometa, hidrostatsko naprezanje nakon brzog topljenja snijega, intenzivne oborine te smrzavanje vode u pukotinama i porama.

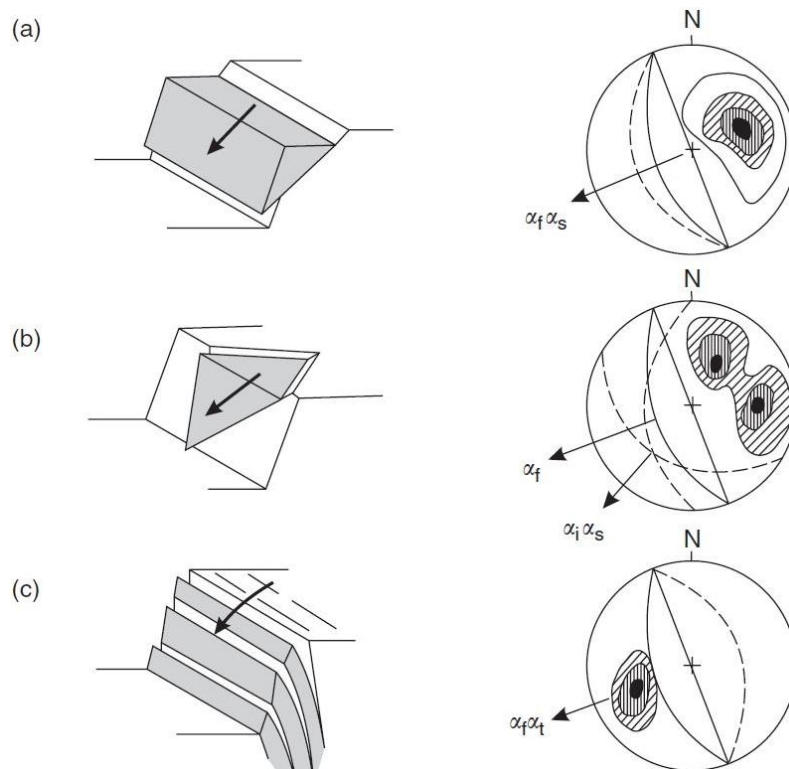
U slučaju odronjavanja, stijenski blok odvojen od stijenske mase kreće se slobodnim padom, odskakivanjem i kotrljanjem niz kosinu, a tijekom prevrtanja dolazi do rotacije bloka stijene oko stabilne točke u bazi (Goodman i Bray, 1976, Hudson i Harrison 1997). Mjesto odvajanja stijenskog bloka od stijenske mase naziva se ishodišno područje odrona (engl. *rockfall source area*). Tip kretanja stijenskog bloka niz padinu ovisi o prosječnom nagibu kosine (slika 2.10). Prema Ritchie (1963) slobodni pad stijenskog bloka moguć je na kosinama s prosječnim kutom nagiba većim od  $70^\circ$ . Do odskakivanja bloka dolazi kada je prosječni nagib kosine manji od  $70^\circ$ , pri čemu kod prvog odskakivanja nakon slobodnog pada dolazi do značajnog gubitka energije (Evans i Hungr, 1993). Pri prosječnom kutu od oko  $45^\circ$  odskakivanje postupno prelazi u kotrljanje, dok se na kosinama s prosječnim kutom manjim od  $30^\circ$  u potpunosti odvija kotrljanje sve dok se blok ne zaustavi. Pri dnu kosine na kojoj dolazi do učestalog odronjavanja i/ili prevrtanja može se formirati sipar, gdje se materijal taloži pod kutom koji je približan kutu unutarnjeg trenja (Evans i Hungr, 1993). Veći blokovi najčešće će biti blizu stope sipara, dok će se manji blokovi nalaziti pri njegovom vrhu, što je posljedica veće kinetičke energije koju posjeduju veći blokovi.



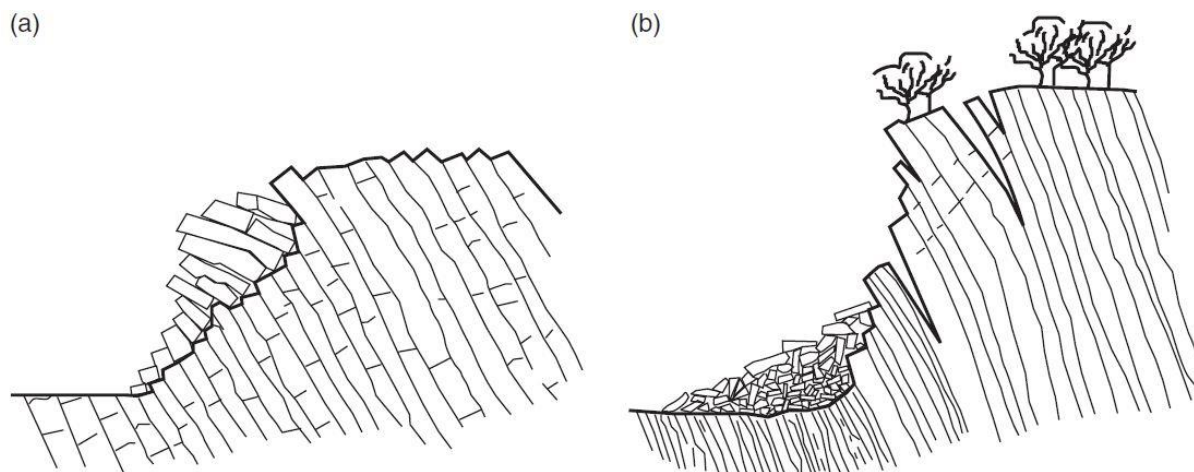
**Slika 2.10.** Tipovi kretanja stijenskog bloka niz kosinu s obzirom na njezin prosječni kut nagiba (modificirano prema Ritchie, 1963)

### 2.1.3 Vrste slomova na stijenskim kosinama

Prema Wyllie i Mah (2005) tri su osnovne vrste sloma na stijenskim kosinama koji uzrokuju odron: (1) planarni slom, (2) klinasti slom i (3) prevrtanje (slika 2.11). Planarni slom predstavlja vrstu sloma kod koje blok stijene klizi po jednom, nepovoljno orijentiranom diskontinuitetu (slika 2.11a). Za razliku od planarnog sloma, klinasti slom odvija se duž dva diskontinuiteta koji se međusobno sijeku (slika 2.11b), a blok klizi u smjeru nagiba presječne tih diskontinuiteta (Hoek i Bray, 1981). Prevrtanje predstavlja vrstu sloma u stijenskoj masi prilikom koje dolazi do rotacije bloka stijene oko stabilne točke u bazi (slika 2.11c) (Goodman i Bray, 1976, Hudson i Harrison 1997). S obzirom na strukturne značajke koji kontroliraju nastanak prevrtanja razlikuju se izravno prevrtanje i prevrtanje savijanjem. Izravno prevrtanje nastaje kada težište bloka leži izvan baze bloka (Hudson i Harrison, 1997). Kontrolira ga jedan set diskontinuiteta strmog kuta nagiba i smjera nagiba suprotnog od lica kosine te set diskontinuiteta približno okomit na njega koji čini bazu bloka (slika 2.12a). Kod prevrtanja savijanjem blokovi stijene razdvojeni su strmo nagnutim diskontinuitetima (najčešće plohama slojevitosti), a do samog prevrtanja dolazi uslijed „naginjanja“ blokova prema naprijed (slika 2.12b) (Goodman i Bray, 1976). Za razliku od izravnog prevrtanja, kod prevrtanja savijanjem ne postoji ili nije dovoljno razvijen set diskontinuiteta koji čini bazu bloka.



**Slika 2.11.** Shematski prikaz osnovnih vrsta slomova na stijenskim kosinama i odgovarajućih geometrijskih uvjeta na stereografskoj projekciji: (a) planarni slom (b) klinasti slom i (c) prevrtanje (preuzeto iz Wyllie i Mah, 2005).



**Slika 2.12.** Shematski prikaz tipova prevrtanja s obzirom na strukturne značajke: (a) izravno prevrtanje (b) prevrtanje savijanjem (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005).

Kako bi se utvrdilo da li na kosini postoji mogućnost za određeni tip sloma koriste se kinematičke analize. Utemeljene su na Marklandovom testu, koji definira geometrijske uvjete za nastanak određenog tipa sloma proučavajući odnose između geometrije kosine i diskontinuiteta (Markland, 1972; Hoek i Bray, 1981). Prema Goodman i Shi (1985) kinematičke analize mogu se provesti na stereografskoj projekciji (grafička metoda) ili analizom vektora diskontinuiteta (analitička metoda). Prema Marklandovom testu (Markland, 1972; Wyllie i Mah, 2005) za nastanak planarnog sloma moraju biti zadovoljeni sljedeći geometrijski uvjeti:

$$\alpha_i - t < \alpha_k < \alpha_i + t \quad (18)$$

$$\beta_i < \beta_k \quad (19)$$

gdje je  $\alpha_i$  smjer nagiba seta diskontinuiteta  $i$ ,  $\alpha_k$  smjer nagiba kosine  $k$ ,  $t$  dozvoljeno odstupanje smjera nagiba (najčešće  $20^\circ$ ),  $\beta_i$  kut nagiba seta diskontinuiteta, a  $\beta_k$  kut nagiba kosine. Geometrijski uvjeti za nastanak klinastog sloma od planarnog razlikuju se po tome što uzimaju u obzir odnos presječnosti diskontinuiteta i kosine, a prema (Markland, 1972; Wyllie i Mah, 2005) definirani su na sljedeći način:

$$\alpha_{ij} - t < \alpha_k < \alpha_{ij} + t \quad (20)$$

$$\beta_{ij} < \beta_k \quad (21)$$

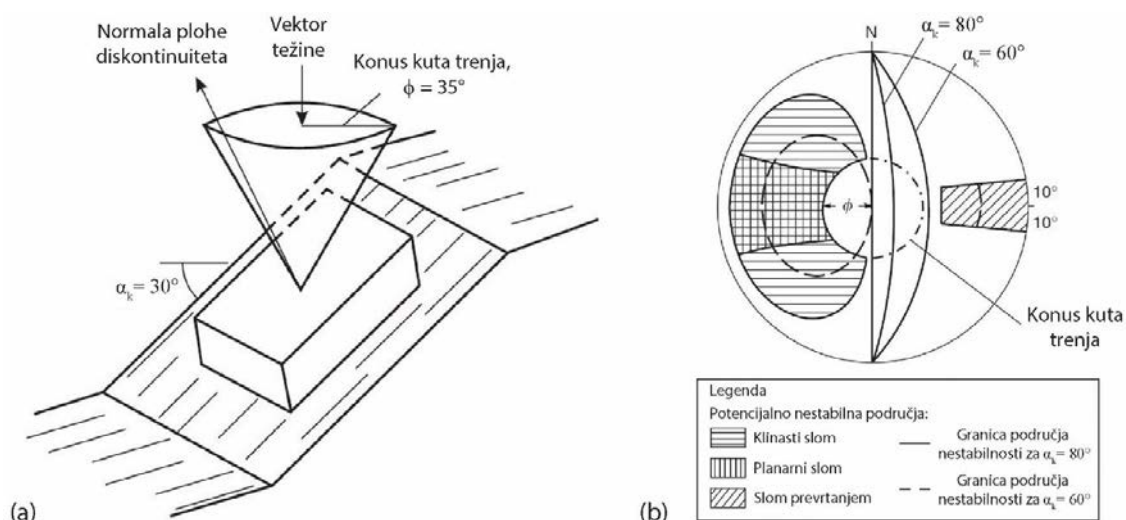
gdje je  $\alpha_{ij}$  smjer nagiba presječnosti setova diskontinuiteta  $i$  i  $j$ ,  $\alpha_k$  smjer nagiba kosine  $k$ ,  $t$  dozvoljeno odstupanje smjera nagiba,  $\beta_{ij}$  kut nagiba presječnosti setova diskontinuiteta, a  $\beta_k$  kut nagiba kosine. Za razliku od planarnog i klinastog sloma kod kojih je jedan od uvjeta da

diskontinuiteti, odnosno presječnice imaju približan smjer nagiba kao i kosina, u slučaju sloma prevrtanjem diskontinuitet mora imati suprotan smjer nagiba od kosine. Goodman i Bray (1976) definirali su sljedeće geometrijske uvjete za nastanak sloma prevrtanjem:

$$(\alpha_i + 180) - t < \alpha_k < (\alpha_i + 180) + t \quad (22)$$

$$90 - \beta_i \leq \beta_k \quad (23)$$

gdje je  $(\alpha_i + 180)$  odražava uvjet suprotnog smjera nagiba seta diskontinuiteta  $i$ , odnosno prikazuje smjer nagiba njegovog pola normale, a  $(90 - \beta_i)$  definira kut nagiba pola normale seta diskontinuiteta. Prema Hoek i Bray (1981) kinematičke analize moguće je nadograditi kombiniranjem s vrlo jednostavnim analizama stabilnosti, tj. dodavanjem uvjeta koji uspoređuju kut nagiba kosine, diskontinuiteta i presječnica s kutom unutarnjeg trenja. Ovako nadograđena analiza bazirana je na pretpostavci da posmična čvrstoća diskontinuiteta uključuje samo komponentu trenja, pri čemu je kohezija jednaka nuli. U uvjetima u kojima jedino gravitacija djeluje na blok koji miruje na nagnutom diskontinuitetu, s kutom unutarnjeg trenja  $\phi$ , pol normale diskontinuiteta istog je smjera kao i normalno naprezanje (slika 2.13a). Blok će biti stabilan sve dok se pol normale diskontinuiteta nalazi unutar konusa kuta unutarnjeg trenja. Na slici 2.13b prikazan je primjer ovako nadograđenih kinematičkih analiza na stereografskoj projekciji za kosine s kutovima nagiba od 60 i 80° s prikazom povećanja „nestabilnih“ područja s povećanjem kuta nagiba kosine za sve vrste slomova. Do potencijalnog sloma dolazi ukoliko polovi normala diskontinuitetima ili presječnice upadaju unutar ovih područja.



**Slika 2.13.** Shematski prikaz kombiniranih kinematičkih i jednostavnih analiza stabilnosti primjenjujući kut trenja: (a) konus kuta trenja bloka koji miruje na nagnutom diskontinuitetu i (b) prikaz kinematičkih analiza na stereografskoj projekciji (preuzeto iz Wyllie i Mah, 2005).



## 2.2. Daljinska istraživanja stijenske mase

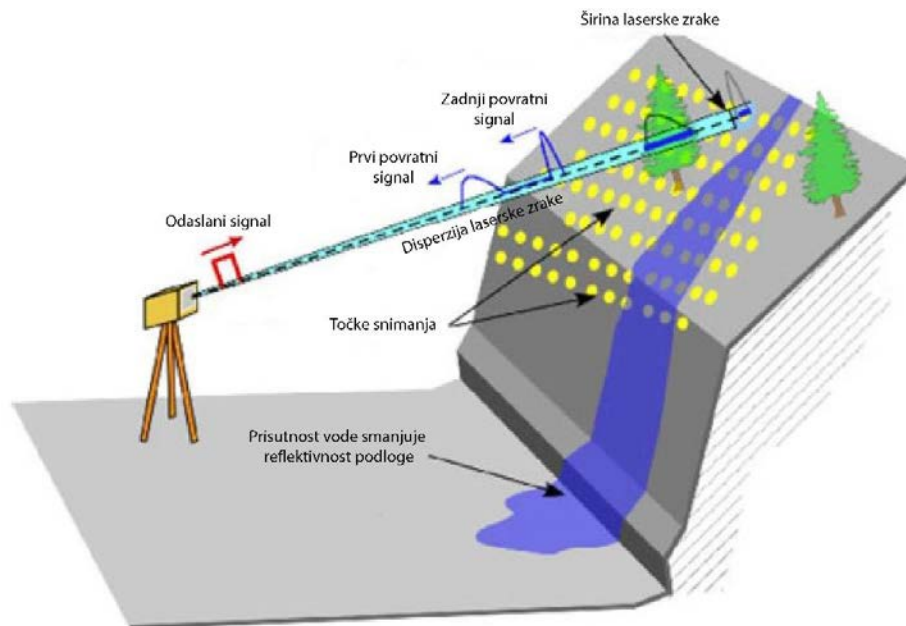
Prema Gupta (2003) daljinska istraživanja predstavljaju sva istraživanja kojima se prikupljaju podaci o predmetu istraživanja bez izravnog kontakta istraživača s površinom predmeta istraživanja. Primjena metoda daljinskih istraživanja stijenske mase ubrzava istraživanje, omogućava provođenje istraživanja na većem području i smanjuje cijenu istraživanja, dok je točnost samih analiza ista ili veća u odnosu na klasična inženjerskogeološka istraživanja. Raznim metodama daljinskih istraživanja, kao što je lasersko skeniranje ili fotogrametrijsko snimanje, izrađuju se reprezentativni modeli površina stijenske mase s velikim brojem podataka koji opisuju njezinu geometriju, a njihovom obradom i analizom moguće je odrediti niz važnih parametara potrebnih za projektiranje u stijenskoj masi. Glavne prednosti daljinskih istraživanja u odnosu na klasična inženjerskogeološka istraživanja su:

- mogućnost određivanja značajki stijenske mase koje nisu dostupne klasičnim inženjerskogeološkim kartiranjem jer se nalaze na nepristupačnom području,
- više podataka je uključeno u statističku analizu pa je samim time i statistički model istraživanog područja točniji,
- povećana točnost određivanja orijentacije diskontinuiteta u stijenama koje sadrže magnetične minerale,
- trajan zapis uvjeta na kosini u određeno vrijeme,
- smanjen je rizik od ozljeđivanja prilikom rada na opasnim terenima.

### 2.2.1 Snimanje stijenskih kosina terestričkim laserskim skenerom i bespilotnom letjelicom

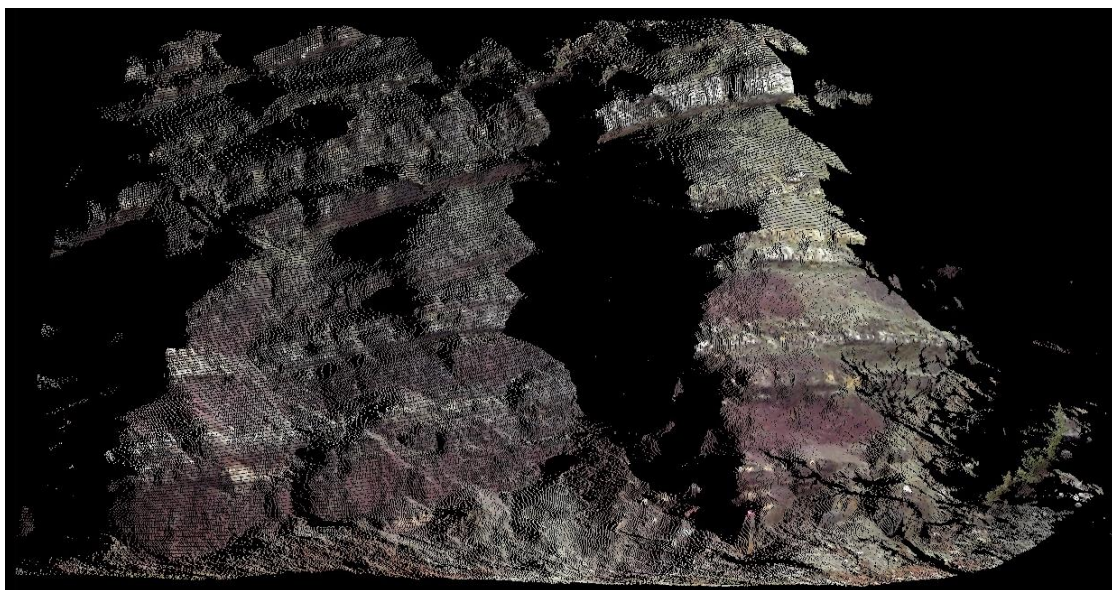
Veliki broj autora primjenjuje tehniku terestričkog laserskog skeniranja stijenskih kosina prilikom određivanja značajki stijenske mase i monitoringa (npr. Slob i dr., 2004; Sturzenegger i dr., 2007; Jaboyedoff i dr., 2012; Abellan i dr., 2014). Prema Golek i dr. (2012) terestričko lasersko skeniranje predstavlja tehnologiju 3D izmjere određenog objekta, a omogućava prikupljanje velikog broja točaka snimanja u kratkom vremenu. Terestrički laserski skener (TLS) radi na principu odašiljanja kratkotrajnog, intenzivnog pulsa laserskih zraka prema objektu s određenog stajališta i mjerenja vremena potrebnog zraku da se reflektira i vrati do prijemnika instrumenta (slika 2.14) (Jaboyedoff i dr., 2012). Također, TLS mjeri i amplitudu povratnog signala pomoću koje se može odrediti intenzitet, čije vrijednosti ovise o vrsti materijala podloge od koje se laserska zraka odbija, orijentaciji kosine, udaljenosti od objekta snimanja i amplitudi laserske zrake. Dodavanjem kamere u boji TLS-u, moguće je svakoj izmjerenoj točki pridodati RGB (engl. *Red Green Blue*) vrijednost, odnosno boju.





**Slika 2.14.** Shematski prikaz snimanja terestričkim laserskim skenerom (preuzeto iz Jaboyedoff i dr., 2012).

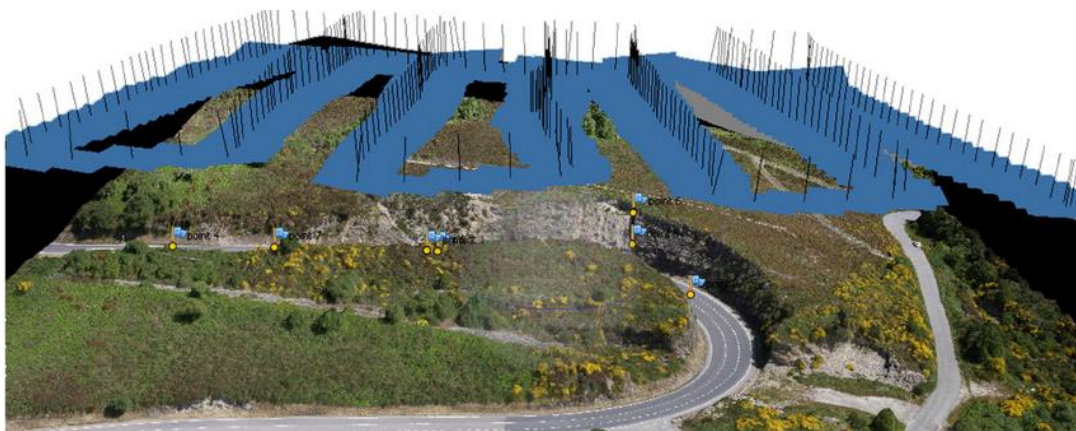
Snimanje stijenske mase provodi se usmjeravanjem laserske zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini te rotacijom instrumenta oko svoje osi. Pomoću izmjerene udaljenosti i kuta s određenog stajališta moguće je dobiti koordinate tražene točke u 3D prostoru. Ponovljenim skeniranjem dobiva se 3D model stijenske mase u obliku oblaka točaka (slika 2.15) u kojemu je položaj svake točke određen visokom preciznošću i prikazan je u apsolutnom ili relativnom koordinatnom sustavu. Prema Alba i dr. (2011) glavna primjena intenziteta i RGB vrijednosti u istraživanju klizišta je prilikom uklanjanja vegetacije iz digitalnih modela i određivanja vrste stijene te za interaktivnu vizualizaciju oblaka točaka.



**Slika 2.15.** Prikaz 3D modela oblaka točaka stijenske kosine dobiven terestričkim laserskim skenerom u kojem svaka točka, osim informacija o prostornom položaju sadrži i podatke o intenzitetu i boji u obliku RGB vrijednosti.

Prostorna udaljenost između susjednih točaka unutar oblaka točaka naziva se rezolucija snimanja, a s današnjim laserskim skenerima moguće je dobiti jako visoku rezoluciju, odnosno točke koje su međusobno udaljene smo jedan milimetar (Shan i Toth., 2008). Prikupljanje i obrada podataka provodi se računalnim programima kao što su *3D Survey*, *Trimble RealWorks* i sl., a omogućuju filtriranje podatka (npr. uklanjanje vegetacije), dodjeljivanje RGB komponente oblaku točaka, georeferenciranje i dr.

Osim TLS-a, za potrebe snimanja kosina u stijenskoj masi često se primjenjuje fotogrametrijska metoda snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice (engl. *Unmanned Aircraft System (UAS) based photogrammetry method*) (Haala i dr., 2011). Prednosti ove metode su brzina snimanja i niska cijena prikupljanja podataka s obzirom da je snimanje moguće obaviti i s bilo kojim komercijalno dostupnim dronom na koji je pričvršćena kamera i GPS prijemnik. Metoda se zasniva na snimanju iz zraka niza preklapajućih slika iz više različitih kutova (slika 2.16). Obrada preklapajućih slika, s obzirom na putanju leta, provodi se klasičnim fotogrametrijskim metodama, pri čemu se koriste kontrolne točke (engl. *ground control points*, GCP) postavljene na istraživanom području ili pomoću algoritma fotogrametrije iz pokreta (engl. *structure from motion* – SfM) što je detaljnije objašnjeno u Micheletti i dr. (2015) i Lato i dr. (2015). Na temelju obrađenih snimaka moguće je izraditi 3D model oblaka točaka te ga spojiti s modelom oblaka točaka generiranim pomoću TLS-a. Prema Sturzenegger i dr. (2007) ovime se postiže veća točnost i veća rezolucija konačnog modela oblaka točaka, što u konačnici pridonosi većoj točnosti samog modela površine stijenske kosine. Uz navedene metode koje su korištene prilikom izrade ovog rada, za istraživanja stijenskih kosina koristi se i tehnika laserskog skeniranja iz zraka (eng. *airborne laser scanning* – ALS) koja nije obuhvaćena u ovom radu, a više informacija o njoj nalazi se u Jaboyedoff i dr. (2012).



**Slika 2.16.** Prikaz putanje leta i pozicija snimanja (označeno plavim pravokutnicima) iznad 3D modela dobivenog fotogrametrijskom metodom snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice (preuzeto iz Barreiro i dr., 2014).

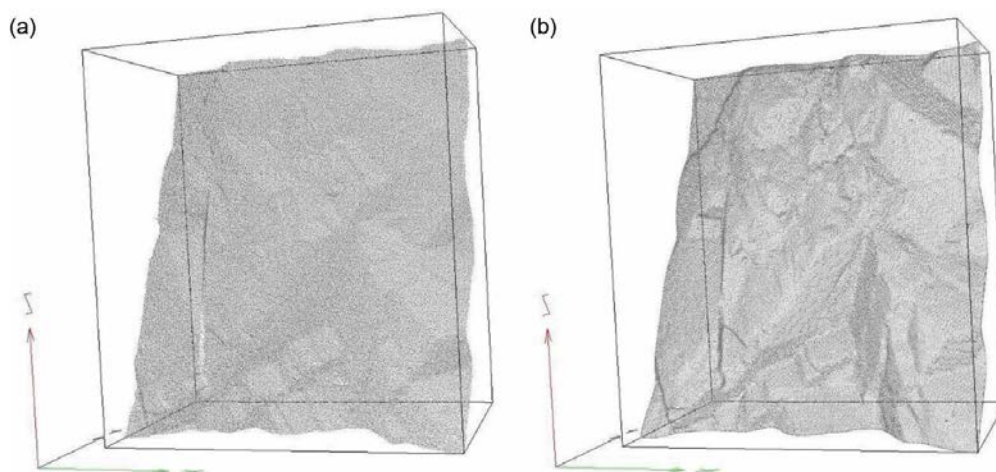
## 2.2.2 Modeliranje površina stijenskih kosina iz oblaka točaka

Oblak točaka izrađen terestričkim laserskim skeniranjem ili snimanjem iz zraka sam po sebi koristiti se isključivo za vizualizaciju terena. Ukoliko se želi odrediti geometrijske značajke stijenskog pokosa i stijenske mase potrebno je interpolirati oblak točaka i izraditi 3D model površine stijenske mase. Digitalni modeli terena visoke rezolucije mogu se prikazati u obliku rastera i nepravilne mreže trokuta (eng. *Triangulated Irregular Networks*, TIN) koji predstavljaju 2,5D prikaz terena, u kojemu za svaku X i Y vrijednost točke postoji jedna Z vrijednost koja predstavlja visinu te točke. Budući da su stijenski pokosi vrlo često gotovo vertikalni i nepravilni, navedeni 2,5D prikazi terena neće dati dobre rezultate, a razlog za to je što iste X i Y vrijednosti točke mogu imati različite Z vrijednosti, odnosno različite vrijednosti visina. Algoritmi za izradu 3D modela terena mogu se podijeliti na poligonalne, parametarske i subdivizijske tehnike (Bernik, 2010).

Poligonalna tehnika interpolacije pokazala se vrlo dobrom za modeliranje oblaka točaka dobivenog laserskim skeniranjem kad je prostorna rezolucija oblaka točaka relativno mala u odnosu na točnost laserskih podataka (Slob i dr., 2005). Trodimenzionalna *Delaunay* triangulacija predstavlja primjer poligonalne tehnike interpolacije koja rezultira nepravilnom mrežom trokuta koristeći jednostavnu linearnu interpolaciju između točaka u prostoru (slika 2.17a). U tom slučaju, dvije povezane točke čine rub, dok tri točke generiraju trokut koji je ujedno i najjednostavniji ravninski poligon. Trostrani i četverostrani poligoni najčešći su elementi poligonalnog modeliranja, a grupa poligona povezanih zajedničkim rubnim točkama naziva se *mesh*. Postoji više programskih paketa koji koriste 3D *Delaunay* triangulaciju i daju slične rezultate. Ukoliko je oblak točaka na nekom mjestu manje ili veće gustoće (što je često posljedica vegetacije na kosini) na takvim mjestima stvaraju se „rupe“ u modelu pa dijelovi kosine prekriveni vegetacijom nisu interpolirani i uzrokuju nepravilnosti i odstupanja u modelu (Slob i dr., 2002).

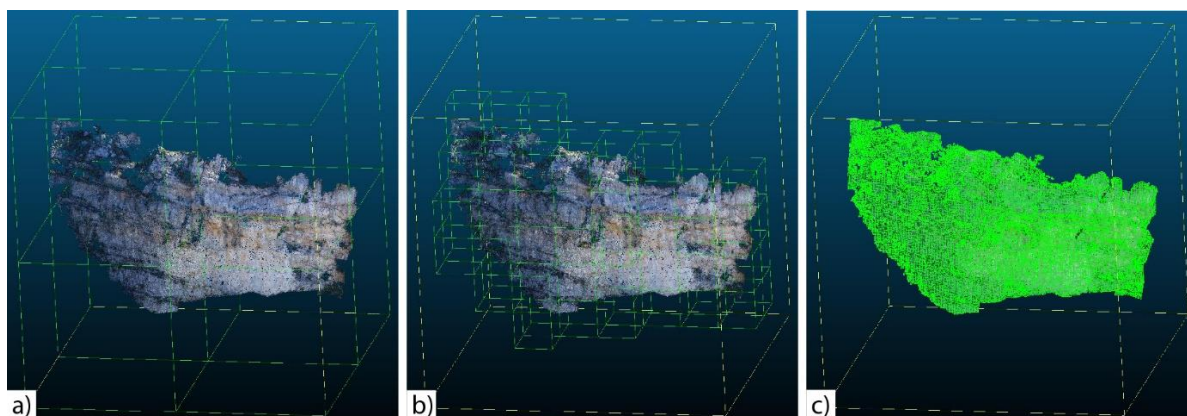
Osim poligonalne tehnike interpolacije za potrebe modeliranja stijenskih kosina koriste se i parametarske tehnike interpolacije (engl. *Radial Basis Functions*, RBF), koje koriste različite parametre i kontrolne točke prilikom modeliranja objekata (slika 2.17b). RBF interpolacija ovisi o mjerilu te je prikladna za modeliranje nejednoliko raspoređenih točaka u oblaku. Prednost tehnike je u tome što se točke koje su posljedica „šumova“ na površini stijenske mase zaglade prilikom interpolacije, što ujedno predstavlja i neželjenu posljedicu u slučaju vegetacije na kosini (Slob i dr., 2005). Naime, ukoliko se takve točke ne uklone iz oblaka, model će imati veće nepravilnosti na mjestima gdje je prisutna vegetacija.



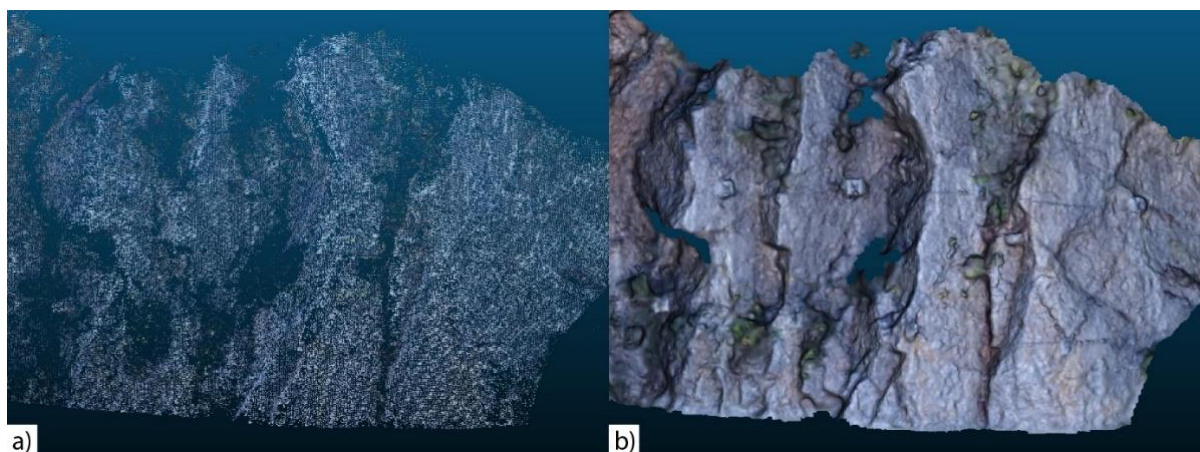


**Slika 2.17.** Usporedba modela površine stijenske mase izrađenim: (a) 3D Delaunay triangulacijom i (b) RBF tehnikom (preuzeto iz Slob i dr., 2005).

Osim navedenih tehnika izrade modela površine stijenske kosine vrlo je korisna i tehnika Poissonove rekonstrukcije površine (engl. *Poisson Surface Reconstruction*) koja omogućava naknadno uklanjanje svih šumova u modelu na temelju promjena raspona gustoća točaka iz kojih su izrađene ćelije modela (Kazhdan i dr., 2006). Orijentacija vektora normala prilikom triangulacije točaka izvodi se pomoću algoritma minimalnih razapinjućih stabla (engl. *Minimum Spanning Tree*) (König i Gumhold, 2009), dok kvaliteta i rezolucija modela ovise o dubini *Octree*-a (engl. *Octree depth*), broju uzorkovanja po čvorištu *Octree*-a i važnosti točaka iz oblaka prilikom interpolacije. *Octree* predstavlja podjelu oblaka točaka na kubne slagaline (engl. *cubic structure*) određenog volumena koji se s obzirom na odabranu dubinu mogu podijeliti na manje jednake dijelove (slika 2.18). Što je odabrana dubina *Octree*-a veća, model površine će bolje odražavati realno stanje, ali i iziskivati više vremena za obradu. Prikaz modela površine stijenske mase koji je konstruiran iz modela oblaka točaka algoritmom Poissonove rekonstrukcije površine prikazan je na slici 2.19.



**Slika 2.18.** Prikaz podjele oblaka točaka na kubne slagaline gdje dubina *Octree*-a iznosi: (a) jedan, (b) tri i (c) osam.



**Slika 2.19.** Prikaz (a) modela oblaka točkica iz kojeg je algoritmom Poissonove rekonstrukcije površine dobiven (b) 3D model površine stijenske mase.

### 2.2.3 Određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase iz digitalnih modela kosina

Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koje se najčešće određuju iz digitalnih visoko-rezolucijskih modela oblaka točkica i modela površine stijenskih kosina su orijentacija kosine, vrsta stijene, orijentacija, razmak, postojanost i hrapavost diskontinuiteta te veličina bloka (Slob i dr., 2002; Kemeny i Post, 2003; Jaboyedoff i dr., 2009; Gigli i Casagli, 2011; Lato i dr., 2012; Matasci i dr., 2015). Pregledom literature (tablica 2.1), određivanje značajki stijenske mase i diskontinuiteta iz digitalnih modela može se podijeliti u nekoliko grupa ovisno o: (1) vrsti daljinskih istraživanja (klasična fotogrametrija, ALS, TLS i UAV fotogrametrija), (2) vrsti korištenog digitalnog modela (2D, 2,5D i 3D modeli površina stijenskih kosina i/ili oblaka točkica) te (3) metodologiji i tehnici određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase (ručno, polu-automatizirano, automatizirano).

Većina autora koristi isključivo TLS prilikom snimanja stijenskih kosina (npr. Slob i dr., 2005; Gigli i Casagli, 2011; Sturzenegger i dr., 2011; Lato i dr., 2012; Riquelme i dr., 2014; Matasci i dr., 2015) dok mali broj autora koristi kombinaciju TLS-a i UAV fotogrametrije koja se pokazala jako korisnom s obzirom da se međusobno isključuju nedostaci pojedine metode (Sturzenegger i dr., 2007; Sturzenegger i Stead, 2009). S obzirom na komercijalizaciju dronova, napredak tehnologije i kvalitete optičkih senzora sve više autora koristi znatno bržu i jeftiniju metodu UAV fotogrametrije za snimanje stijenskih kosina (npr. Liu i dr., 2018; Tung i dr., 2018; Beretta i dr., 2019). ALS se vrlo rijetko koristi, osim u iznimnim slučajevima kada se radi o većem području istraživanja, uglavnom bez vegetacije, bez vertikalnih i subvertikalnih kosina (Jaboyedoff i dr., 2004; Sturzenegger i Stead, 2009).

**Tablica 2.1.** Pregled relevantne literature o određivanju značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta pomoću daljinskih istraživanja.

Autori	Vrsta daljinskih istraživanja	Vrsta digitalnog modela	Određivane značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta	Metoda određivanja (ručno, polu-automatizirano, automatizirano)
Feng i dr. (2001)	fotogrametrija	2D model površine stijenske kosine	orijentacija diskontinuiteta	ručno
Slob i dr. (2002)	TLS	3D modeli površine stijenske kosine	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta	ručno, polu-automatizirano
Kemeny i Post (2003)	fotogrametrija	2D model površine stijenske kosine	orijentacija diskontinuiteta	ručno
Fardin i dr. (2004)	TLS	3D model površine diskontinuiteta	hrapavost	ručno
Jaboyedoff i dr. (2004)	ALS	2,5D model površine stijenske kosine	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta razmak postojanost	ručno
Slob i dr. (2005)	TLS	3D model površine stijenske kosine	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta	polu-automatizirano
Abellan i dr. (2006)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta veličina blokova	ručno
Ferrero i dr. (2009)	fotogrametrija TLS	2,5D model površine stijenske kosine, 3D model oblaka točaka	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta	ručno polu-automatizirano
Franceschi i dr. (2009)	TLS	3D model oblaka točaka	vrsta stijene	polu-automatizirano
Sturzenegger i Stead (2009)	UAV fotogrametrija ALS TLS	2,5D model površine stijenske kosine, 3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta postojanost	ručno
Gigli i Casagli (2011)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta razmak postojanost veličina bloka hrapavost	ručno polu-automatizirano
Sturzenegger i dr. (2011)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta postojanost veličina bloka	ručno polu-automatizirano
Lato i dr. (2012)	TLS	3D model površine stijenske kosine	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta razmak veličina bloka	ručno polu-automatizirano
Riquelme i dr. (2014)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta	automatizirano
Matasci i dr. (2015)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta vrsta stijene	ručno polu-automatizirano
Riquelme i dr. (2015)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta razmak	polu-automatizirano automatizirano
Cantarella i dr. (2016)	TLS	3D model površine stijenske kosine	orijentacija diskontinuiteta hrapavost	ručno
Dewez i dr. (2016)	SfM-UAV fotogrametrija	3D model oblaka točaka	orijentacija diskontinuiteta	automatizirano
Liu i dr. (2018)	UAV fotogrametrija	3D model površine stijenske kosine	orijentacija diskontinuiteta veličina bloka	polu-automatizirano automatizirano
Tung i dr. (2018)	UAV fotogrametrija	3D model površine stijenske kosine	orijentacija diskontinuiteta	polu-automatizirano automatizirano
Riquelme i dr. (2018)	TLS	3D model oblaka točaka	orijentacija kosine orijentacija diskontinuiteta razmak postojanost	polu-automatizirano automatizirano
Beretta i dr. (2019)	UAV fotogrametrija	3D model oblaka točaka	vrsta stijene	polu-automatizirano

Vrsta digitalnog modela ovisi o metodologiji i tehnici određivanja značajki stijenske mase i diskontinuiteta. U slučaju 2,5 ili 3D modela površine stijenske mase geometrija kosine prezentirana je s velikim brojem poligona. Svaki poligon definiran je s najmanje tri točke koje su u prostor definirane apsolutnim ili relativnim koordinatama (x, y, z). Ukoliko su poznate koordinate hvatišta poligona, pomoću osnovnih geometrijskih zakonitosti moguće je definirati orijentaciju pojedine plohe u prostoru ili njezinu normalu (slika 2.20). Orijehtacija svakog poligona definirana je s dva vektora (Jaboyedoff i dr., 2007):

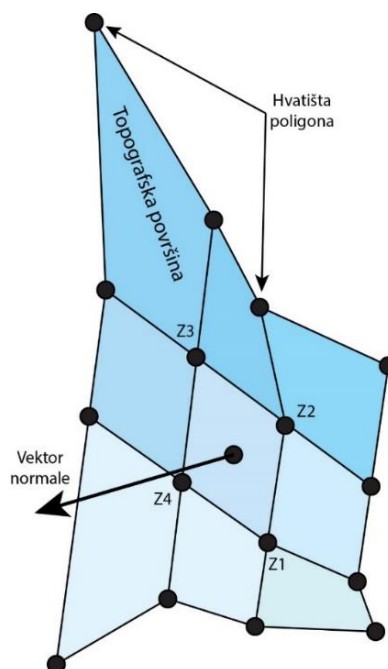
$$\vec{v}_1 = \left[ d; 0; \frac{1}{2}(z_1 + z_3 - z_2 - z_4) \right] \quad (24)$$

$$\vec{v}_2 = \left[ 0; d; \frac{1}{2}(z_1 + z_2 - z_3 - z_4) \right] \quad (25)$$

gdje  $d$  predstavlja veličinu ćelije, a  $z_1, z_2, z_3$  i  $z_4$  visine hvatišta. Vektorski produkt ovih vektora jednak je vektoru normale ( $\vec{p}$ ):

$$\vec{p} = \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \quad (26)$$

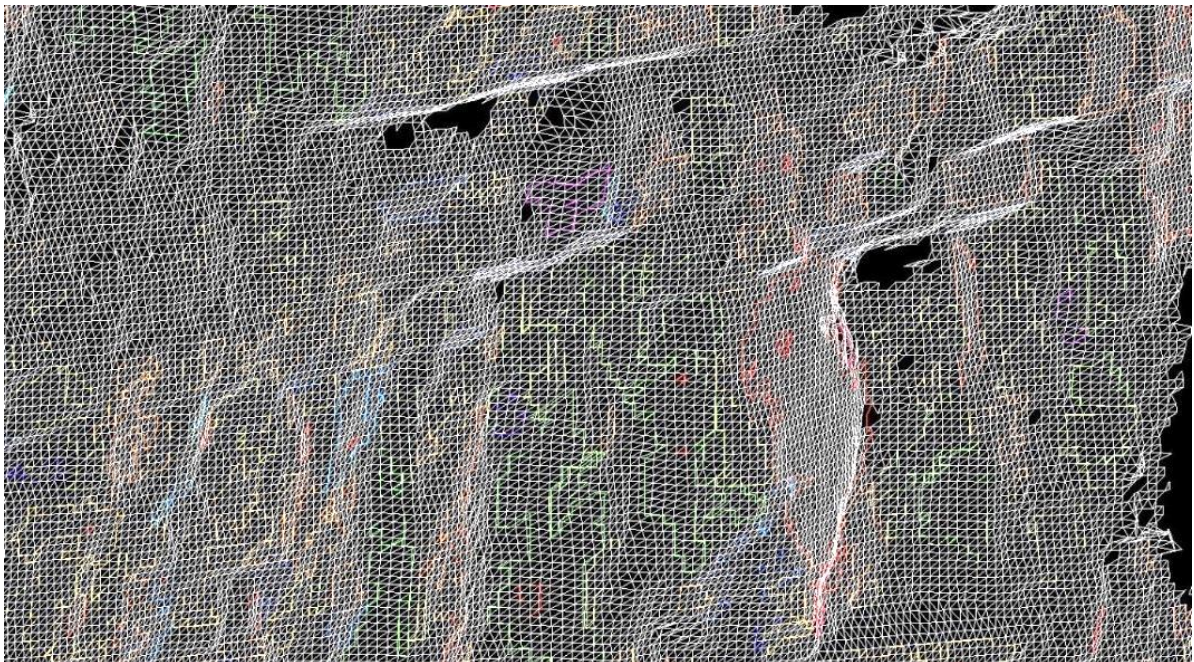
Pod pretpostavkom da većina vidljivih ploha na stijenskoj kosini predstavlja diskontinuitete, svaka ploha digitalnog modela stijenske mase predstavlja jedinstvenu orijentaciju diskontinuiteta (iskazanu vektorom normale) koja se može usporediti s ručno izmjerenom orijentacijom diskontinuiteta pomoću geološkog kompasa (Slob i dr., 2005; Lato i dr., 2009).



**Slika 2.20.** Shematski prikaz modela površine definiranog poligonima. Orijehtacija svakog poligona definirana je s četiri najbliže susjedne točke (hvatista) poligona (modificirano prema Jaboyedoff i dr., 2007).

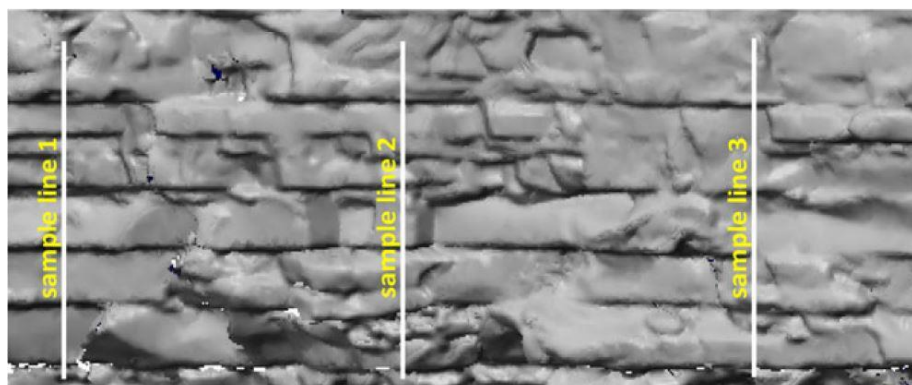


Postoji nekoliko komercijalnih i besplatnih računalnih programa za određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta iz modela površine stijenske kosine kao što su npr. *CloudCompare* (CloudCompare, 2017) i *Split-FX* (Split Engineering LCC, 2017). Diskontinuitete je moguće odrediti ručno, postavljajući najbolje odgovarajuću plohu kroz niz točaka koje čine vrhove ili normale poligona modela površine. Također, računalni programi sadrže i algoritme za polu-automatizirano i automatizirano određivanje orijentacije diskontinuiteta metodom grupiranja susjednih poligona modela koje predstavljaju planarne plohe (engl. *patches*). Prema Slob i dr. (2005) i Dewez i dr. (2016) ukoliko susjedni poligoni zadovoljavaju kriterij zaravnjenosti spajaju se u višestruke planarne plohe (engl. *facets*) koje predstavljaju diskontinuitete (slika 2.21), pri čemu se orijentacija svih određenih diskontinuiteta prikazuje s njihovim polovima normala na stereografskoj projekciji ili u obliku vrijednosti smjera i kuta nagiba u tablici. Također, računalni programi često omogućuju ručno i polu-automatizirano određivanje setova diskontinuiteta na temelju mjerenih vrijednosti orijentacija primjenom analize konturnih dijagrama na stereografskoj projekciji ili nekog od algoritama za grupiranje. Nakon što su poznate ravnine koje predstavljaju diskontinuitete, a diskontinuiteti grupirani u setove, moguće je odrediti razmak između diskontinuiteta unutar jednog seta postavljajući ravninu koja je okomita na prosječno pružanje određenog seta diskontinuiteta i mjereći udaljenosti između sjecišta diskontinuiteta s linijom mjerenja (slika 2.22).



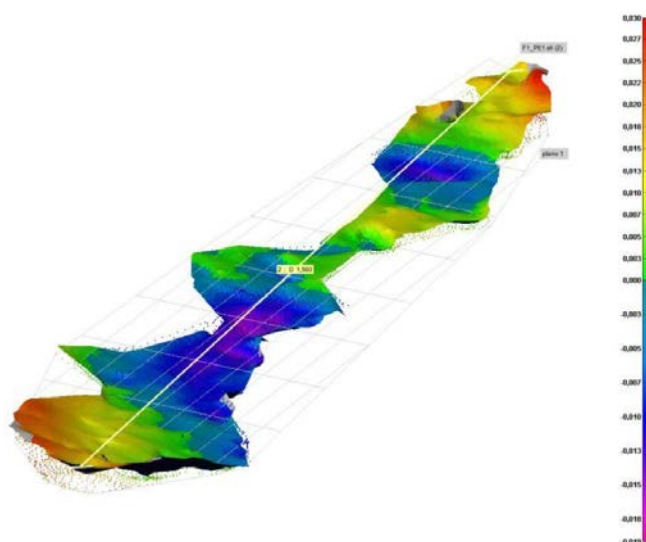
**Slika 2.21.** Polu-automatizirano generirane plohe (prikazane različitim bojama) u *Split-FX*-u koje predstavljaju plohe diskontinuiteta na modelu površine stijenske mase.





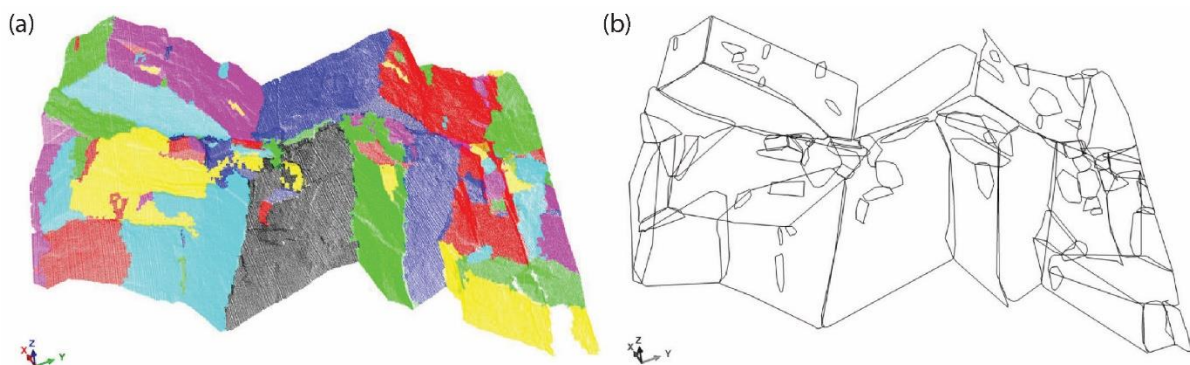
**Slika 2.22.** Prikaz mjerenja razmaka diskontinuiteta na digitalnom modelu površine stijenske mase duž tri linije snimanja s obzirom da vrijednost razmaka diskontinuiteta varira (preuzeto iz Lato i dr., 2012).

Mogućnost određivanja hrapavosti diskontinuiteta iz digitalnog modela površine stijenske mase ovisi o rezoluciji modela oblaka točaka (prosječnom razmaku između točaka) i preciznosti digitalnog modela površine stijenske mase (Gigli i Casagli, 2011). Najjednostavniju metodu određivanja hrapavosti opisali su Lato i Vöge (2012). Grupirane plohe koje predstavljaju jedan diskontinuitet potrebno je zarotirati tako da budu paralelne s postavljenom horizontalnom ravninom te konstruirati presjek s istom. Na ovaj način dobivena krivulja uspoređuje se s karakterističnim profilima koeficijenta hrapavosti diskontinuiteta prikazanim na slici 2.8. Također, prema Cantarella i dr. (2016) koeficijent hrapavosti diskontinuiteta može se odrediti i ucrtavajući amplitude neravnina diskontinuiteta, određene iz ploha digitalnog modela (slika 2.23), na dijagram za određivanje koeficijenta hrapavosti površinskim profiliranjem (Barton, 1982). Nakon što su ucrtane sve vrijednosti amplitude, određuje se njihova srednja vrijednost i odgovarajuća vrijednost koeficijenta hrapavosti.



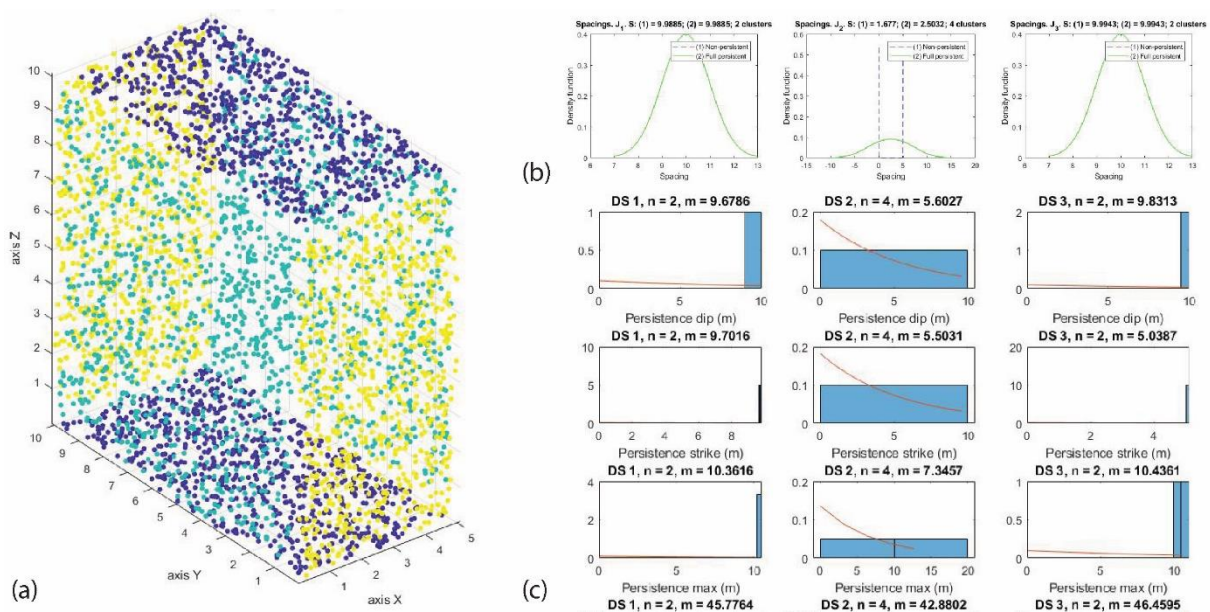
**Slika 2.23.** Prikaz mjerenja amplitude neravnina diskontinuiteta iz digitalnog modelu površine stijenske mase. Tople boje prikazuju veće amplitude (preuzeto iz Cantarella i dr., 2016).

Uz navedene primjere određivanja geometrijskih značajki stijenskih kosina i diskontinuiteta iz modela površine stijenske mase, grupe autora razvijale su metode određivanja navedenih značajki izravno iz modela oblaka točaka (npr. Abellan i dr., 2006; Franceschi i dr., 2009; Gigli i Casagli, 2011; Riquelme i dr., 2014, 2015, 2018). Gigli i Casagli (2011) razvili su polu-automatizirani algoritam DiANA (*Discontinuity Analysis*) za određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta iz 3D modela oblaka točaka u *MATLAB* (MathWorks, 2016) okruženju. Orijehtacija diskontinuiteta određuje se pomicanjem kocke određene dimenziju po oblaku točaka pri čemu se metodom najmanjih kvadrata (engl. *least squares*) postavlja najbolja odgovarajuća ploha kroz točke sadržane unutar kocke, a točke se svrstava u grupe (klustere). Setovi se definiraju tako da se svi klasteri s istim vrijednostima objedine te se određuje srednja vrijednost orijentacije seta diskontinuiteta koja je definirana smjerom kosinusa vektora seta diskontinuiteta (engl. *direction cosines*). Svim grupiranim točkama koje pripadaju određenom setu se dodjeljuje boja i prikazuje ih se obojane na modelu oblaka točaka (slika 2.24a). Grupirane točke koje predstavljaju plohu diskontinuiteta omeđuju se poligonom čije stranice predstavljaju postojanost diskontinuiteta (slika 2.24b). Prosječni razmak diskontinuiteta autori određuju ručno postavljanjem cilindra određene visine okomito na pružanje seta te brojanjem svih pripadajućih diskontinuiteta koji presijecaju cilindar. Na temelju dobivenih vrijednosti o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta računa se veličina blokova koristeći Palmströmovu korelaciju (Palmström, 2005). Za razliku od alata DiANA, u kojem se orijentacija i postojanost diskontinuiteta određuju polu-automatizirano, a razmak ručno, računalni program *DSE (Discontinuity Set Extractor)* (Riquelme i dr., 2014, 2015, 2018) omogućava automatizirano određivanje orijentacije, razmaka i postojanosti diskontinuiteta. Na rezultat analize se može utjecati mijenjajući ulazne parametre kao što su minimalni broj točaka koji čini diskontinuitet, očekivani broj setova diskontinuiteta i dr.



**Slika 2.24.** Prikaz polu-automatiziranog određivanja: (a) diskontinuiteta (točke koje definiraju diskontinuitet su prikazane različitim bojama) i (b) postojanosti pomoću poligona koji omeđuju točke koje pripadaju istom diskontinuitetu pomoću alata DiANA (preuzeto iz Gigli i Casagli, 2011).

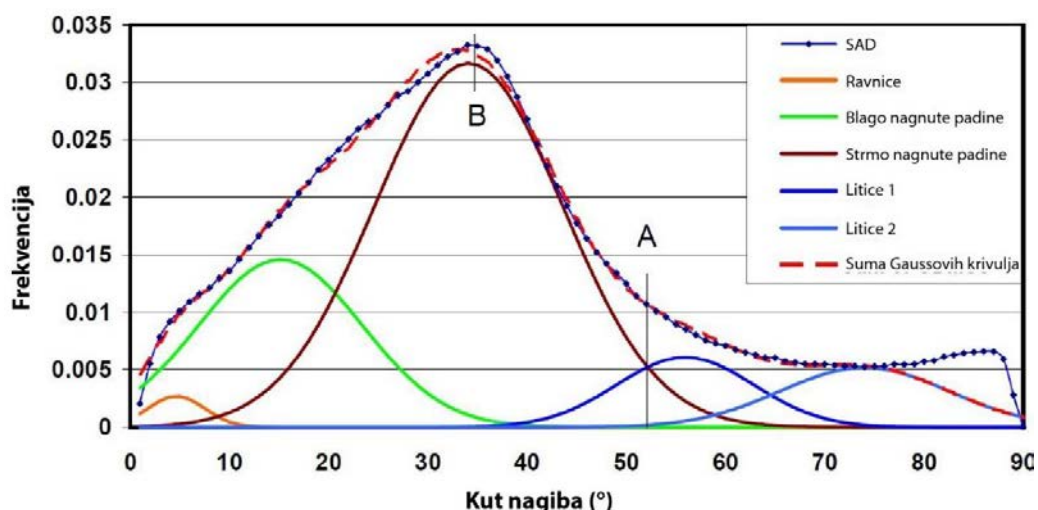
Prema Riquelme i dr. (2014) iz modela oblaka točkica moguće je automatizirano odrediti plohe diskontinuiteta grupiranjem točkica iste orijentacije provodeći test komplanarnosti na susjednim točkama pri čemu se orijentacija definira na temelju procjene kernel gustoće (engl. *Kernel density estimation - KDE*) koja predstavlja ne-parametarsku funkciju gustoće vjerojatnosti varijable koja se nasumično pojavljuje. Setovi diskontinuiteta određuju se polu-automatizirano na temelju grupiranja točkica iste orijentacije pomoću DBSCAN (*Density-Based Scan Algorithm with Noise*) algoritma. Nakon što su definirani setovi diskontinuiteta i svaka točka u modelu dodijeljena nekom od setova (slika 2.25a) moguće je odrediti normalni razmak diskontinuiteta na temelju 3D prostornog odnosa između ploha koje pripadaju istom setu, odnosno određujući ortogonalnu udaljenost između susjednih grupa točkica koje pripadaju istom setu (Riquelme i dr., 2015). Rezultat analize je srednja vrijednost razmaka te histogram vrijednosti razmaka kao funkcija gustoće učestalosti (slika 2.25b). Riquelme i dr. (2018) su implementirali i metodologiju za mjerenje postojanosti u DSE koja se temelji na mjerenju maksimalne duljine tetive i površine konveksne ljuske koju čine grupirane točke određenog diskontinuiteta, pri čemu se dobivaju vrijednosti postojanosti u smjeru smjera i kuta nagiba diskontinuiteta i ukupna maksimalna vrijednost. Rezultati analize postojanosti prikazuju se i na histogramima kao funkcija gustoće učestalosti (slika 2.25c).



**Slika 2.25.** Prikaz provedene analize u DSE-u za sintetički oblak točkica u obliku pravokutnika gdje: (a) prikazuje točke simbolizirane s obzirom na set kojem pripadaju, b) histograme razmaka za tri utvrđena seta diskontinuiteta i c) histograme postojanosti s obzirom na smjer i kut nagiba te maksimalnu postojanost (Riquelme i dr., 2014, 2015, 2018).

### 2.3. Podložnost stijenskih kosina odronima

Za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u stijenskoj masi primjenom daljinskih istraživanja koriste se različite metode ovisno o veličini područja istraživanja, a razlikuju se regionalna i detaljna istraživanja (Matasci i dr., 2017). Regionalna istraživanja obuhvaćaju područja veće površine ( $>km^2$ ), a analize za procjenu podložnosti bazirane su na osnovnim morfometrijskim parametrima (npr. kut nagiba kosine) dobivenim iz digitalnih modela visina (DMV) te na regionalnim strukturo-geološkim značajkama. Najvažniji korak u procjeni podložnosti odronima u regionalnom mjerilu je identifikacija izvorišnih zona odrona (Jaboyedoff i dr., 2007), pri čemu ih je najjednostavnije odrediti definirajući kritični kut nagiba padina koji označava veću podložnost odronima (Guzzetti i dr., 2003). Loye i dr. (2009) i Michoud i dr. (2012) izvorišna područja odrona određuju pomoću analize distribucije kuta nagiba površine terena (engl. *slope angle distribution, SAD*). Kako bi se provela ova analiza područje istraživanja je potrebno podijeliti u homogene zone s obzirom na litološke i strukturo-geološke značajke. Zatim se distribucija kuta nagiba raščlanjuje na više Gaussovih distribucija kuta nagiba koje su karakteristične za specifične morfološke jedinice, tj. litice, strme i blago nagnute padine te ravnice (slika 2.26). Za odredbu vrijednosti kuta nagiba iznad koje se može očekivati pojava izvorišnih područja odrona, potrebno je definirati donju graničnu vrijednost kuta nagiba padina. Ona je definirana presjecištem dvije Gaussove distribucije koje predstavljaju najstrmije morfološke jedinice, odnosno gdje utjecaj litica počinje prevladavati nad strmim padinama (oznaka A na slici 2.26).



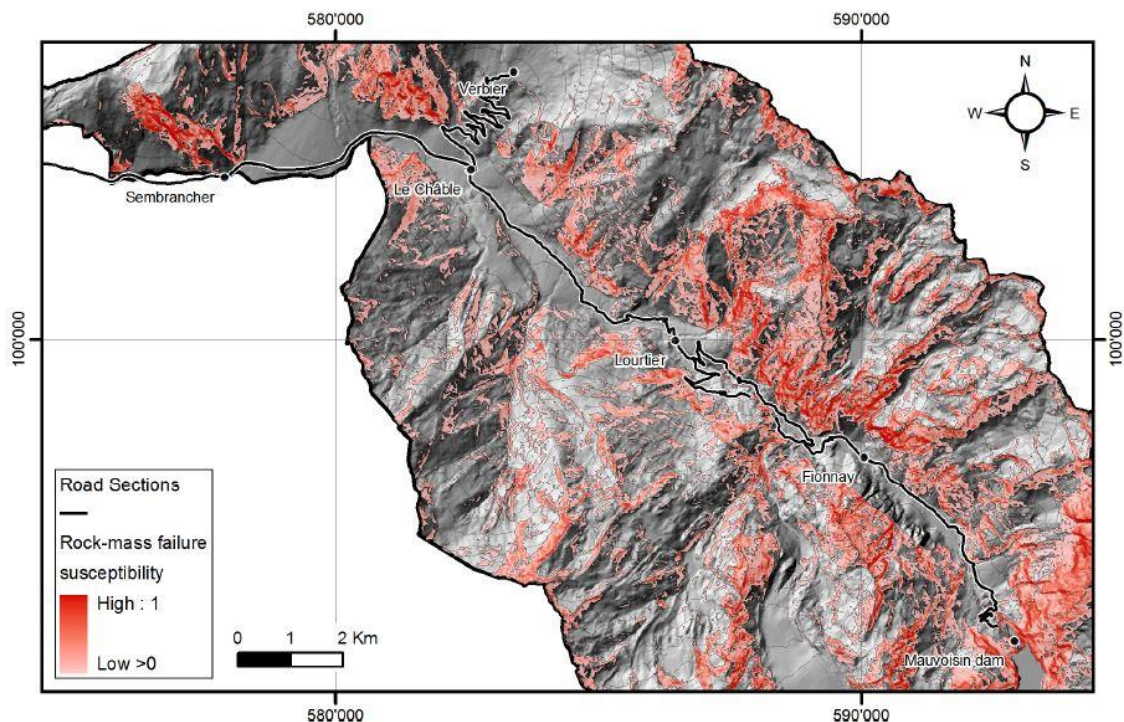
**Slika 2.26.** Prikaz distribucije kuta nagiba (SAD) i raščlambе na Gaussove distribucije kuta nagiba karakteristične za specifične morfološke jedinice. Oznaka A predstavlja donju graničnu vrijednost kuta nagiba iznad koje se sva područja smatraju potencijalnim izvorišnim područjima odrona. Oznaka B predstavlja srednju vrijednost kuta nagiba strmo nagnutih padina (modificirano prema Loye i dr., 2009).



Smatra se da svi kutovi nagiba iznad ove vrijednosti predstavljaju potencijalna izvorišna područja odrona (Loye i dr., 2009). Prema autorima, sva područja koja imaju nagib iznad srednje vrijednosti kuta nagiba strmo nagnutih padina (oznaka B na slici 2.26), a predstavljaju „ogoljene“ površine gdje su vidljivi stijenski izdanci, također predstavljaju potencijalna izvorišna područja odrona. Michoud i dr. (2012) na temelju SAD-a određuje podložnost odronima pomoću normalizirane kumulativne funkcije distribucije  $F_n$ :

$$\begin{cases} \forall \beta \in [0; B] \rightarrow F_n(\beta) = 0 \\ \forall \beta \in [B; 90] \rightarrow F_n(\beta) = \frac{F(\beta) - F(B)}{F(90) - F(B)} \end{cases} \quad (27)$$

gdje  $\beta$  predstavlja određeni kut nagiba koji je veći ili jednak srednjoj vrijednosti kuta nagiba za strmo nagnute padine ( $B$ ), a  $F(\beta)$  predstavlja normaliziranu kumulativnu distribuciju za litice (detaljnije opisano u Michoud i dr., 2012). Dobivene vrijednosti za svaki kut nagiba se pridodaju svakoj ćeliji rastera, što rezultira kartom podložnosti na odrone (slika 2.27). Iako je ova metoda osmišljena prvenstveno za regionalna istraživanja, može se koristiti i za detaljna istraživanja ukoliko se su sve morfološke jedinice zastupljene, a prevladavaju strme padine ili litice. Vrlo slične metode za procjenu podložnosti odronima u regionalnom mjerilu na temelju analize DMV-a i morfometrijskih parametara prikazane su i u Baillifard i dr. (2003), Guzzetti i dr. (2003), Frattini i dr. (2008), Messenzehl i dr. (2016).



**Slika 2.27.** Prikaz karte podložnosti na odrone doline Bagnes u Švicarskoj dobivene pomoću analize distribucije nagiba (preuzeto iz Michoud i dr., 2012).

Za razliku od regionalnih istraživanja podložnosti odronima, kod kojih je težište na morfometrijskim parametrima reljefa, analize procjena podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnim istraživanjima ( $<1 \text{ km}^2$ ) zasnivaju se na međusobnom odnosu orijentacije stijenske kosine i diskontinuiteta, tj. na analizi prostorne distribucije mehanizama slomova (Jaboyedoff i dr., 2004; Abellan i dr., 2006; Guenther i dr., 2012; Gigli i dr., 2012; Matasci i dr., 2017). Važno je istaknuti da u literaturi postoje dva pristupa procjeni podložnosti odronima u detaljnom mjerilu (tablica 2.2). Prvi pristup obuhvaća procjenu podložnosti odronima za cijelu padinu bez obzira da li je padina izgrađena od stijenske mase ili padinskih naslaga (deluvij, koluvij itd.), pri čemu stijenske kosine predstavljaju isključivo izvorišna područja odronima. Kod ovog pristupa procjena podložnosti zasniva se na gibanju stijenskog bloka niz padinu nakon sloma i udaljenosti koje će prijeći (Fratini i dr., 2008; Ruff i Czurda, 2008; Alejano i dr., 2013; Wang i dr., 2014), a rezultat su različite kategorije ili zone podložnosti. Drugi pristup se odnosi na procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima na osnovi analize geometrijskih značajki diskontinuiteta i kinematičkih analiza pri čemu je rezultat analize zoniranje ili kvantificiranje podložnosti. Procjena podložnosti odronima prvim pristupom više odgovara procjeni hazarda od odrona s obzirom na njezinu definiciju (Jaboyedoff i dr., 2004). Također, navedeni autori ishodišna područja odrona pojednostavljaju ili koriste povijesne evidencije o lokacijama odrona. Međutim, procjena podložnosti odronima trebala bi primarno definirati gdje su potencijalna ishodišna područja da bi sve naknadne analize kretanja bloka, procjene hazarda i rizika bile točnije (Brabb, 1984; Guzzetti i dr., 2003; Jaboyedoff i dr., 2007; Fell i dr., 2008). S obzirom na navedeno, prilikom izrade ovog rada kao podloga za razvoj procjene podložnosti stijenskih kosina odronima korišten je drugi pristup, a najvažniji znanstveni radovi prikazani su u tablici 2.2.

Procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na osnovi analize geometrijskih značajki diskontinuiteta i kinematičkih analiza uključuje određivanje: (1) orijentacije stijenske kosine iz DMV-a visoke rezolucije (Gokceoglu i dr., 2000; Pannatier i dr., 2009; Sdao i dr., 2013) ili iz modela površine stijenske mase i oblaka točaka, dobivenih snimanje TLS-om i/ili UAV fotogrametrijom (Gigli i dr., 2012, 2014; Fanti i dr., 2013; Sorrentino i dr., 2016; Matasci i dr., 2017); (2) određivanje orijentacije i setova diskontinuiteta terenskim kartiranjem (Gokceoglu i dr., 2000; Gupta i dr., 2015) ili daljinskim istraživanjima, tj. iz modela površine stijenske mase i/ili oblaka točaka (Pannatier i dr., 2009; Gigli i dr., 2012, 2014; Fanti i dr., 2013; Sorrentino i dr., 2016; Matasci i dr., 2017); (3) određivanje razmaka i postojanosti diskontinuiteta terenskim kartiranjem (Gokceoglu i dr., 2000; Gupta i dr., 2015) ili daljinskim istraživanjima (Sorrentino i dr., 2016; Matasci i dr., 2017).

**Tablica 2.2.** Pregled postojeće literature o procjeni podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu s navedenom lokacijom i vrstom područja istraživanja, vrstom ulaznih podataka i metodom istraživanja, provedenim analizama te načinom prikaza rezultata.

Autori	Lokacija istraživanog područja	Ulazni podaci i metoda istraživanja	Provedene analize	Rezultat
Gokceoglu i dr. (2000)	stijenske kosine u naselju Altindag Ankara (Turska)	orijentacija kosine određena iz DMV-a, orijentacija diskontinuiteta određena terenskim kartiranjem	statistička analiza orijentacije diskontinuiteta, automatizirane kinematičke analize	karta rizika odrona s obzirom na vjerojatnost određenog sloma
Pannatier i dr. (2009)	Nacionalni park Yosemite (SAD)	područja koja predstavljaju stijenske kosine određena iz DMV-a, orijentacija kosina, orijentacija setova diskontinuiteta	analiza Gaussovih raspodjela, prostorne kinematičke analize	karta podložnosti odronima podijeljena na zone različite podložnosti
Gigli i dr. (2012)	stijenske kosine ispod utvrda Mdina i Citadel (Malta),	orijentacija kosine i orijentacija diskontinuiteta određene daljinskim istraživanjima	automatizirane 3D kinematičke analize	model podložnosti odronima s vrijednostima kinematičkog indeksa hazarda
Fanti i dr. (2013)	stijenske kosine ispod povijesnog mjesta Pitigliano (Italija)	orijentacija kosine i orijentacija diskontinuiteta određene daljinskim istraživanjima	automatizirane 3D kinematičke analize	model podložnosti odronima s vrijednostima kinematičkog indeksa hazarda
Sdao i dr. (2013)	stijenske kosine uz arheološka nalazišta u Materi (Italija)	povijesni inventar klizišta, morfometrijski parametri, litologija, orijentacija kosine određena iz DMV-a, orijentacija diskontinuiteta	prostorne kinematičke analize, neuronsko <i>fuzzy</i> modeliranje	karta podložnosti odronima podijeljena na zone različite podložnosti
Gigli i dr. (2014)	stijenske kosine u dolini rijeke Nere (Italija)	orijentacija kosine i orijentacija diskontinuiteta određene daljinskim istraživanjima	automatizirane 2,5D kinematičke analize	karta podložnosti odronima s vrijednostima kinematičkog indeksa hazarda
Gupta i dr. (2015)	stijenske kosine uz autocestu u pokrajini Chamoli (Indija)	značajke stijenske mase određene terenskim kartiranjem	SMR klasifikacija stijenske mase, kinematičke analize na stereografskoj projekciji	karta podložnosti odronima podijeljena na zone različite podložnosti
Sorrentino i dr. (2016)	stijenske kosine uz obalu kod Plainura (Italija)	geometrijske značajke kosine i diskontinuiteta (orijentacija, setovi, razmak i postojanost) određene daljinskim istraživanjima	automatizirane kinematičke analize za setove diskontinuiteta	model podložnosti s vrijednostima indeksa podložnosti odronima
Matasci i dr.(2017)	1) klif Glacier Point, Yosemite (SAD), 2) zapadni obronci ispod vrha Les Dru, Mont-Blanc, (Švicarska)	geometrijske značajke kosine i diskontinuiteta (orijentacija, setovi, razmak i postojanost) određene daljinskim istraživanjima	automatizirane kinematičke analize za setove diskontinuiteta	model podložnosti s vrijednostima indeksa podložnosti odronima

Svi autori provode kinematičke analize, dok jedna grupa autora dijeli istraživano područje u zone različite podložnosti odronima s obzirom na učestalost diskontinuiteta i vjerojatnost slomova stijenske mase (Gokceoglu i dr., 2000; Pannatier i dr., 2009; Gupta i dr., 2015). Dio autora kvantificira podložnost kinematičkim indeksom hazarda (engl. *Kinematic Hazard Index*) (Gigli i dr., 2012, 2014; Fanti i dr., 2013; Sdao i dr., 2013) ili indeksom podložnosti odronima (engl. *Rockfall Susceptibility Index*) (Sorrentino i dr., 2016; Matasci i dr., 2017). Kinematički indeks hazarda (KIH) definirali su Casagli i Pini (1993) i računa se odvojeno za četiri mehanizma sloma na sljedeći način:

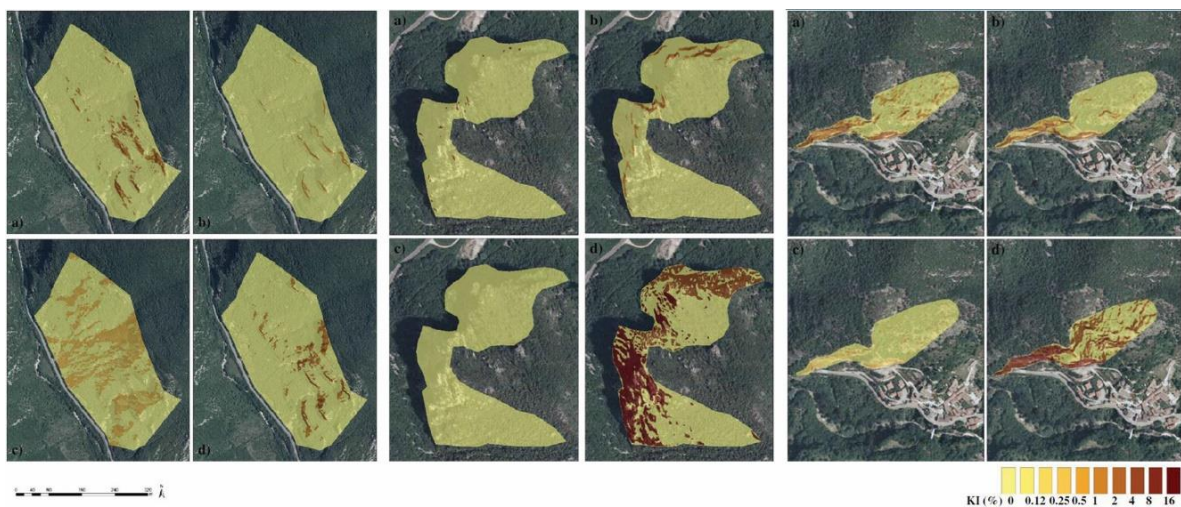
$$C_{pf} = 100 \cdot (N_{pf} / N) \text{ za planarni slom,} \quad (28)$$

$$C_{wf} = 100 \cdot (I_{wf} / I) \text{ za klinasti slom,} \quad (29)$$

$$C_{bt} = 100 \cdot (N_{bt} / N) \cdot (I_{bt} / I) \text{ za izravno prevrtanje,} \quad (30)$$

$$C_{ft} = 100 \cdot (N_{ft} / N) \text{ za prevrtanje savijanjem,} \quad (31)$$

gdje  $N_{pf}$ ,  $N_{bt}$  i  $N_{ft}$  predstavljaju broj polova diskontinuiteta koji zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak planarnog sloma, sloma izravnim prevrtanjem i prevrtanjem savijanjem,  $I_{wf}$  i  $I_{bt}$  predstavljaju broj presječnica diskontinuiteta koji zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak klinastog sloma i sloma izravnim prevrtanjem, dok su  $N$  i  $I$  ukupan broj polova diskontinuiteta, tj. njihovih presječnica. Rezultat izračuna KIH-a za svaki mehanizam sloma dodjeljuje se svakoj točki ili ćeliji digitalnog modela nakon čega se interpolira. Dobivene karte predstavljaju karte podložnosti stijenskih kosina odronima ovisno o vrsti sloma (slika 2.28).



**Slika 2.28.** Rezultati prostornih kinematičkih analiza provedenih za područje kanjona rijeke Nere u Italiji. Tamnija boja označava veću vrijednost kinematičkog indeksa hazarda tj. veću podložnost odronima (preuzeto iz Gigli i dr., 2014).



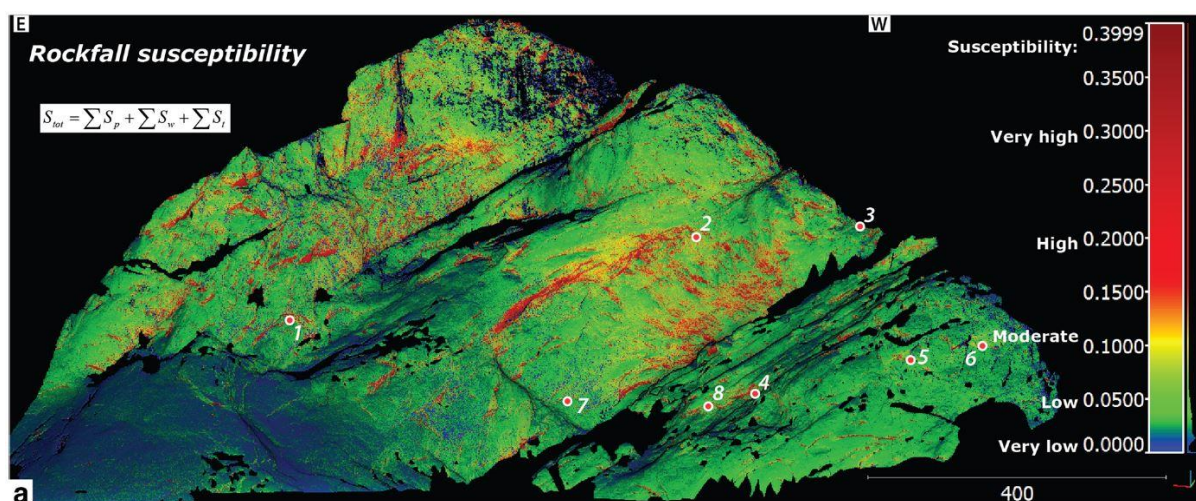
Indeks podložnosti slomu (IPS) definirao je Matasci (2015), a osim orijentacije diskontinuiteta i njihovih presječnica u analizi se uzima u obzir srednje vrijednosti razmaka i postojanosti za svaki set diskontinuiteta. Prema Matasci i dr. (2017) IPS za svaki mehanizam sloma za svaku točku modela oblaka točaka može se izračunati na sljedeći način:

$$S_p = A \frac{\sin(\theta)}{LT} \tan\beta_i \text{ za planarni slom,} \quad (32)$$

$$S_w = N_w P \frac{\tan\beta_{ij}}{K} \text{ za klinasti slom,} \quad (33)$$

$$S_t = A \frac{\sin(\theta)}{LT} \tan\delta \text{ za prevrtanje,} \quad (34)$$

gdje  $A$  predstavlja površinu,  $\theta$  kut između vektora normale točke  $P$  i vektora normale seta diskontinuiteta  $i$ ,  $L$  i  $T$  predstavljaju prosječan razmak i postojanost seta diskontinuiteta  $i$ , a  $\beta$  prosječni kut nagiba seta diskontinuiteta  $i$ .  $N_w$  predstavlja broj mogućih klinastih slomova s obzirom na presječnice setova diskontinuiteta  $i$  i  $j$ , a  $\beta_{ij}$  kut nagiba presječnice setova diskontinuiteta, dok  $\tan\delta$  predstavlja kut nagiba normale seta diskontinuiteta  $i$ . Suma indeksa za planarni i klinasti slom te slom prevrtanje daje vrijednost IPO za točku na modelu oblaka točaka. Interpolacijom točaka s vrijednostima IPO dobiva se model podložnosti stijenskih kosina odronima (slika 2.29).



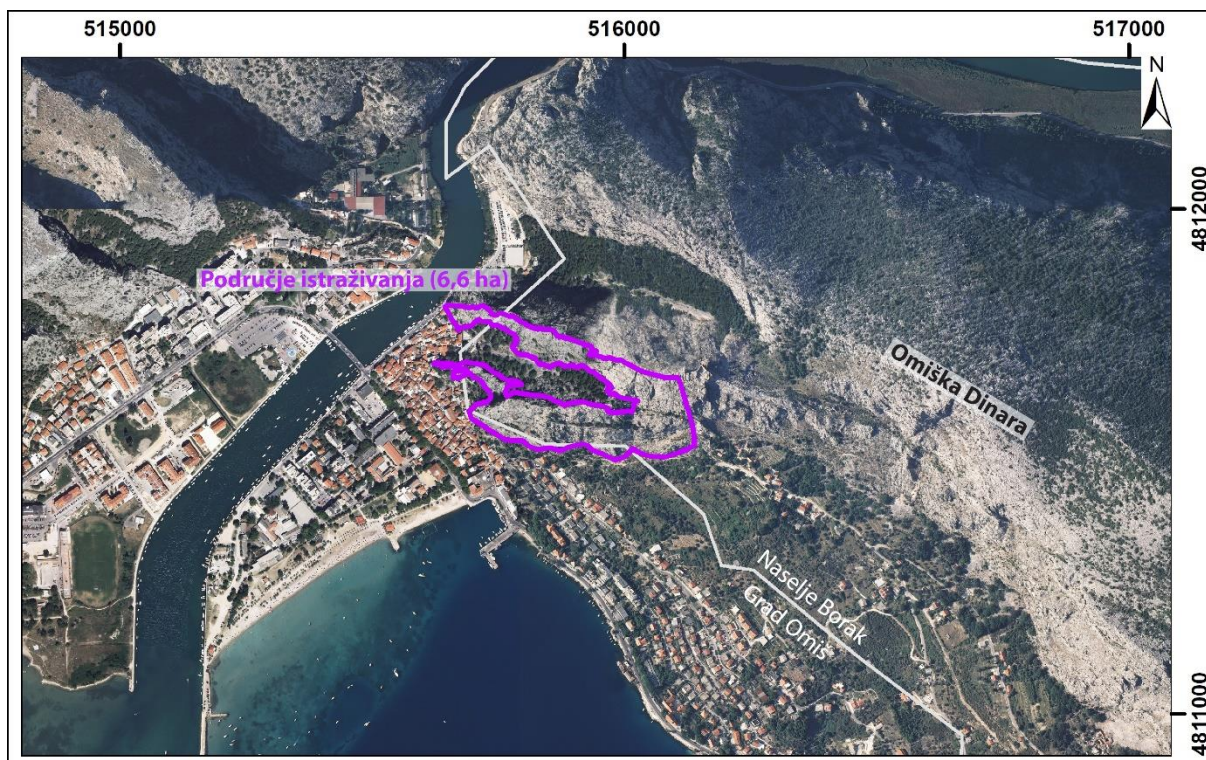
**Slika 2.29.** Prikaz modela podložnosti stijenskih kosina odronima za područje Drus na Mont-Blancu, gdje je podložnost iskazana vrijednostima indeksa podložnosti odronima. Toplije boje označavaju veću podložnost odronima (preuzeto iz Matasci i dr., 2017).

### **3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA**

Odroni predstavljaju čestu pojavu na strmim stijenskim kosinama u Dinaridima koji obuhvaćaju oko 24.450 km<sup>2</sup> teritorija Republike Hrvatske (Mihalić Arbanas i dr., 2017). Najčešće su uzrokovani nepovoljnim značajkama stijenske mase, trošenjem, intenzivnim oborinama i antropogenim utjecajem (Arbanas i dr., 2012). U svrhu razvoja metodologije za identifikaciju dijelova kosina koja su potencijalna izvorišna područja odrona i procjene podložnosti stijenskih kosina odronima odabrana su četiri pilot područja različitih strukturno-geoloških značajki i stupnja trošnosti stijenske mase: (1) stijenske kosine Omiške Dinare iznad grada Omiša; (2) stijenske kosine i pokosi uz Županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Okljaj, lokacija Brljan u Nacionalnom parku Krka; (3) stijenski zasjek uz Državnu cestu DC-3 Zagreb-Rijeka na lokaciji Špičunak u blizini naselja Lokve te (4) stijenski zasjek u naselju Lokve.

#### **3.1. Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša**

Grad Omiš je jedinica lokalne samouprave u Splitsko-dalmatinskoj županiji ukupne površine 266,2 km<sup>2</sup>. U sastavu Grada Omiša nalazi se 31 naselje, pri čemu je najveće grad Omiš smješten na ušću rijeke Cetine. Grad Omiš proteže se na površini od oko 3,36 km<sup>2</sup> i prema popisu stanovništva iz 2011. godine u njemu živi oko 6500 stanovnika (DZS, 2011). Grad Omiš i njegova povijesna jezgra često su ugroženi odronima zbog svoje specifične lokacije u podnožju strmih stijenskih kosina Omiške Dinare (Sečanji i dr., 2017, 2019; Arbanas i dr., 2019). Prema Procjeni ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša – Grad Omiš (2015) najveću opasnost za ljude, materijalna dobra i infrastrukturu predstavljaju odroni sa sjeverozapadnog dijela Omiške Dinare i njezinih južnih padina u čijem podnožju se nalazi stara gradska jezgra. Radi svega navedenog, kao pilot područje za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima izabrane su stijenske kosine koje su dijelom smještene u gradu Omišu, a dijelom u naselju Borak, ukupne površine od oko 66 000 m<sup>2</sup> (6,6 ha), pri čemu se najveći dio istraživanog područja nalazi iznad stare gradske jezgre (slika 3.1).



**Slika 3.1.** Geografski položaj područja istraživanja prikazan na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine.

### 3.1.1 Prirodne značajke istraživanih područja

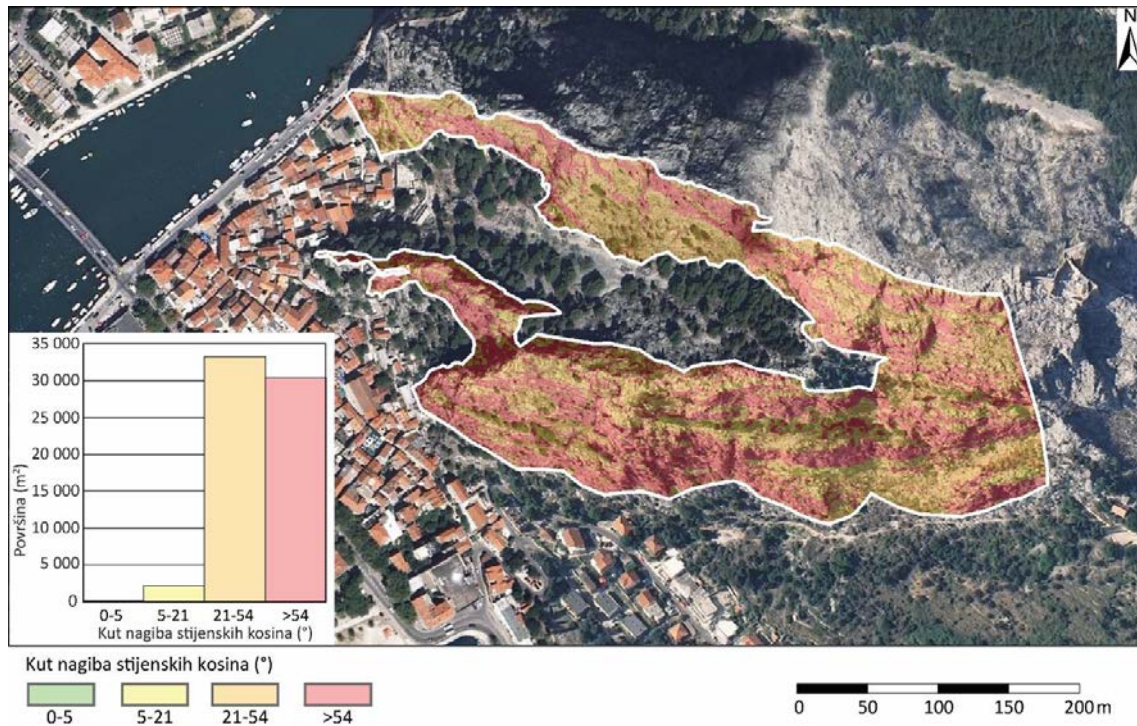
#### 3.1.1.1 Geomorfološke značajke

Prema Bognar (2001) Grad Omiš nalazi se u sastavu mikrogeomorfološke regije Gorski hrbat Mosora s podgorjem i gorskom gredom Omiške Dinare koja predstavlja krški priobalni hrbat. Gora Omiška Dinara dugačka je oko 15 km, spaja planine Mosor na SZ i Biokovo na JI, a najviši vrh joj je Kula (Imber) na 865 m n.m. Na području Grada Omiša mogu se izdvojiti tri morfogeneretska tipa reljefa, krški, fluviokrški i padinski, u kojima su utvrđeni erozija, klizanje tla i/ili stijena i odronjavanje stijena kao glavni aktivni geomorfološki procesi (Bognar, 1995).

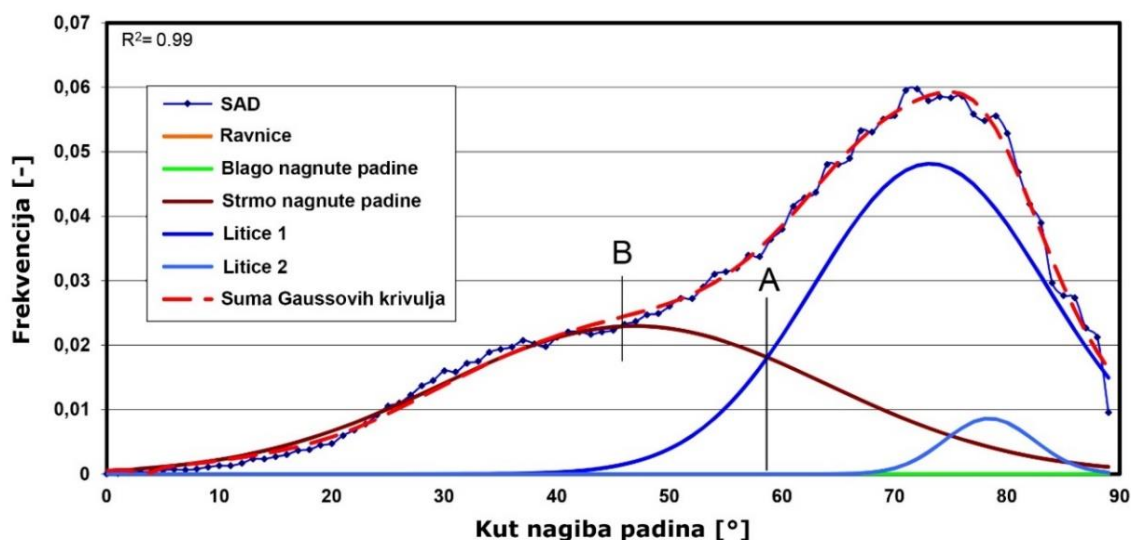
Područje istraživanja nalazi se na krajnjem SZ dijelu Omiške Dinare (slika 3.1) s najvišim vrhom na oko 310 m n.m smještenim na sjeverozapadnom dijelu istraživanih kosina. Visina istraživanih kosina iznad starog grada je u rasponu od 10-180 m pri čemu su kosine iznad starog grada najniže na zapadnim rubovima istraživanih područja, a najviše su u srednjem južnom dijelu. Analizom kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina (slika 3.2) te klasifikacijom padina u specifične morfološke jedinice prema Strahler (1950), utvrđeno je da najveću površinu područja istraživanja (50,6%, 33 295 m<sup>2</sup>) zauzimaju strmo nagnute padine nagiba 21-54°. Litice, nagiba većeg od 54°, zauzimaju 46,2% istraživanih područja (30 405 m<sup>2</sup>), dok blago



nagnute padine nagiba  $5-21^\circ$  obuhvaćaju 3,1% (2087 m<sup>2</sup>) istraživanog područja. Najmanji dio područja istraživanja obuhvaćaju ravnice nagiba  $0-5^\circ$  (0,1%, 58,5 m<sup>2</sup>). Analizom SAD-a (Loye i dr., 2009) i raščlambom na Gaussove raspodjele kuta nagiba, donja granična vrijednost kuta nagiba, iznad koje se sva područja smatraju potencijalnim izvorištima odrona, iznosi  $58^\circ$  (slika 3.3). Ova opasna područja zauzimaju oko 40% površine istraživanih kosina.

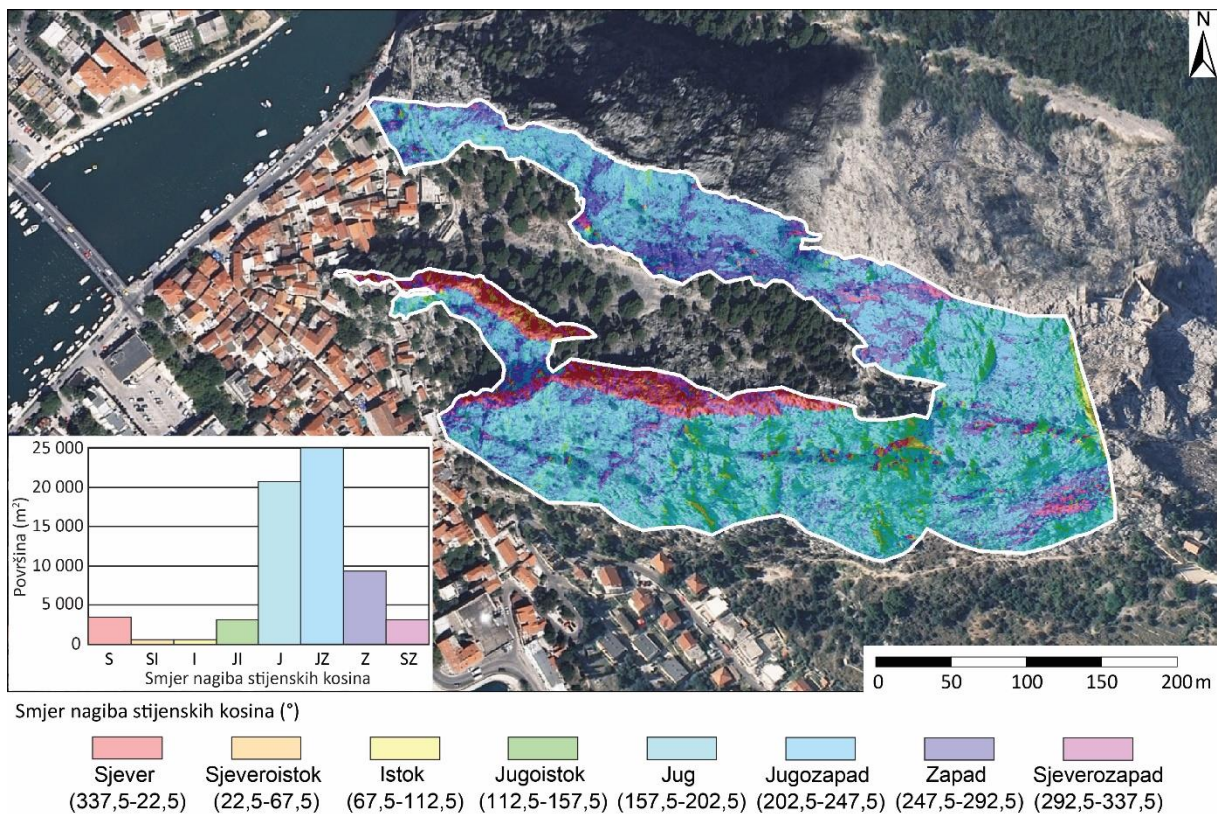


Slika 3.2. Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih kosina dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.



Slika 3.3. Prikaz raspodjele kuta nagiba (SAD) za istraživane stijenske kosine i raščlambe na Gaussove distribucije kuta nagiba karakteristične za specifične morfološke jedinice. Oznaka A predstavlja donju graničnu vrijednost kuta nagiba ( $58^\circ$ ) iznad koje se sva područja smatraju potencijalnim izvorištima odrona. Oznaka B predstavlja srednju vrijednost kuta nagiba ( $46^\circ$ ) strmo nagnutih padina.

Analizom smjera nagiba istraživanih kosina (slika 3.4) utvrđeno je da najveću površinu istraživanih kosina čine padine nagnute u smjeru JZ (25 000 m<sup>2</sup>, tj. 38,1%), J (20 634 m<sup>2</sup>, tj. 31,4%) i Z (9306 m<sup>2</sup>, tj. 13,8%), odnosno u smjeru građevina koje se nalaze u podnožju padina, pri čemu im je srednja vrijednost kuta nagiba >54°. Padine nagnute u smjeru S (3361 m<sup>2</sup>), SZ (3155 m<sup>2</sup>) i JI (3195 m<sup>2</sup>) su podjednako zastupljene, svaka oko 5% površine istraživanja i imaju najmanju srednju vrijednost kuta nagiba, koja iznosi oko 46°. Najmanju površinu zauzimaju kosine sa smjerom nagiba prema I (580,5 m<sup>2</sup>, tj. 0,8%) i SI (613,5 m<sup>2</sup>, tj. 0,9%), a prosječna vrijednost kuta nagiba im je oko 51°. S obzirom da najveću površinu zauzimaju kosine koje su nagnute u smjeru građevina u nožici padine te da im je i prosječni kut nagiba najveći (veći broj potencijalnih izvorišta odrona), ove kosine predstavljaju najveću opasnost za stanovništvo, građevine i infrastrukturu.



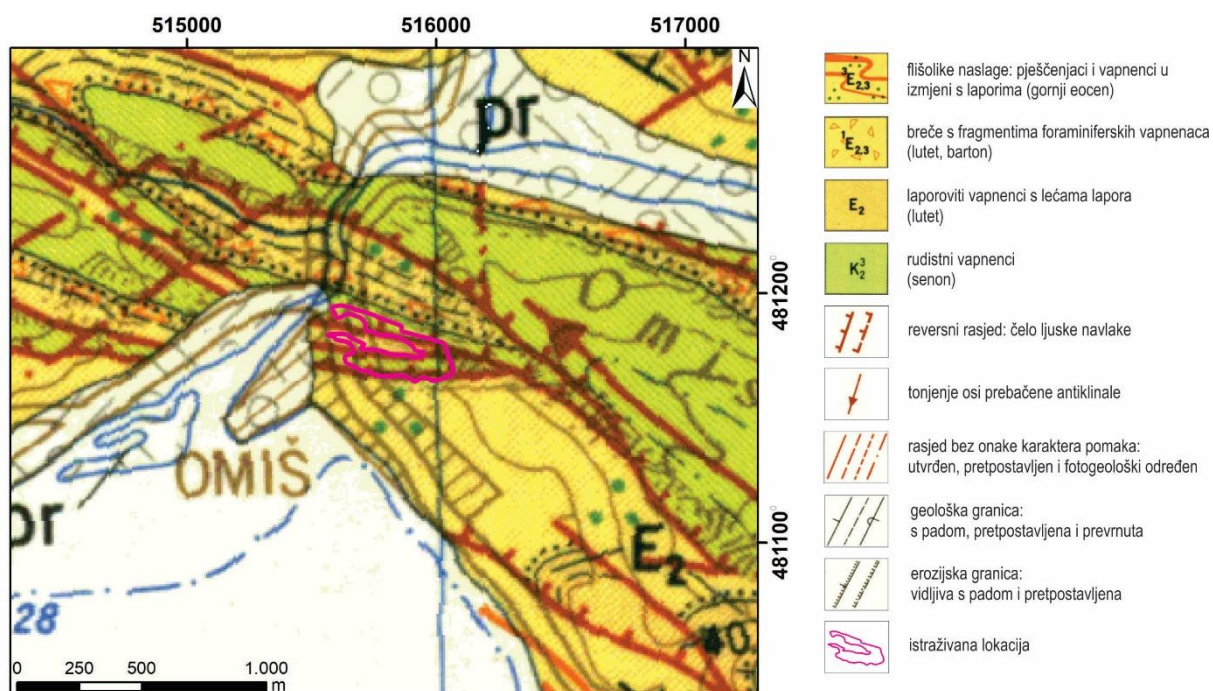
**Slika 3.4.** Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih kosina dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.



### 3.1.1.2 Geološke značajke

Omiška Dinara pruža se u duljini od oko 15 km s najvišim vrhom na 865 m n.m. Dio je većeg navlačnog sustava i predstavlja prebačenu antiklinalu (Marinčić i dr., 1976), pružanja SZ–JI, koja je nastala uslijed kompresijske tektonike koja je na ovom području trajala od krede do miocena. Prema Marinčić i dr. (1977) jezgra antiklinale izgrađena je od rudistnih vapnenaca senonske starosti, dok su krila antiklinale izgrađena od breče, vapnenaca i flišolikih naslaga eocenske starosti (slika 3.5). Na širem omiškom području, kontakti između krednih i paleogenskih naslaga su uglavnom duž strmih reversnih rasjeda, pružanja SZ–JI do I–Z, s vergencijom prema JZ do J (slika 3.5). Također, ovo područje se nalazi u zoni aktivnog reversnog rasjeda Biokovo-Mosor, a prema Herak i dr. (2011) šire omiško područje spada u seizmički vrlo aktivna područja.

Terenskim kartiranjem utvrđeno je da su istraživane stijenske kosine u potpunosti izgrađene od rudistnih vapnenaca senonske starosti iako bi prema preklopu područja istraživanja s Osnovnom geološkom kartom SFRJ M 1:100.000 – list Omiš (Marinčić i dr., 1976) trebali biti prisutni i laporoviti vapnenci s lećama lapora srednje eocenske starosti na području između reversnog rasjeda pružanja I–Z s vergencijom prema J i normalnog rasjeda istog pružanja s vergencijom prema S (slika 3.5). Prilikom terenskog kartiranja na ovom području nisu utvrđeni izdanci laporovitih vapnenaca s ulošcima lapora već su bile vidljive

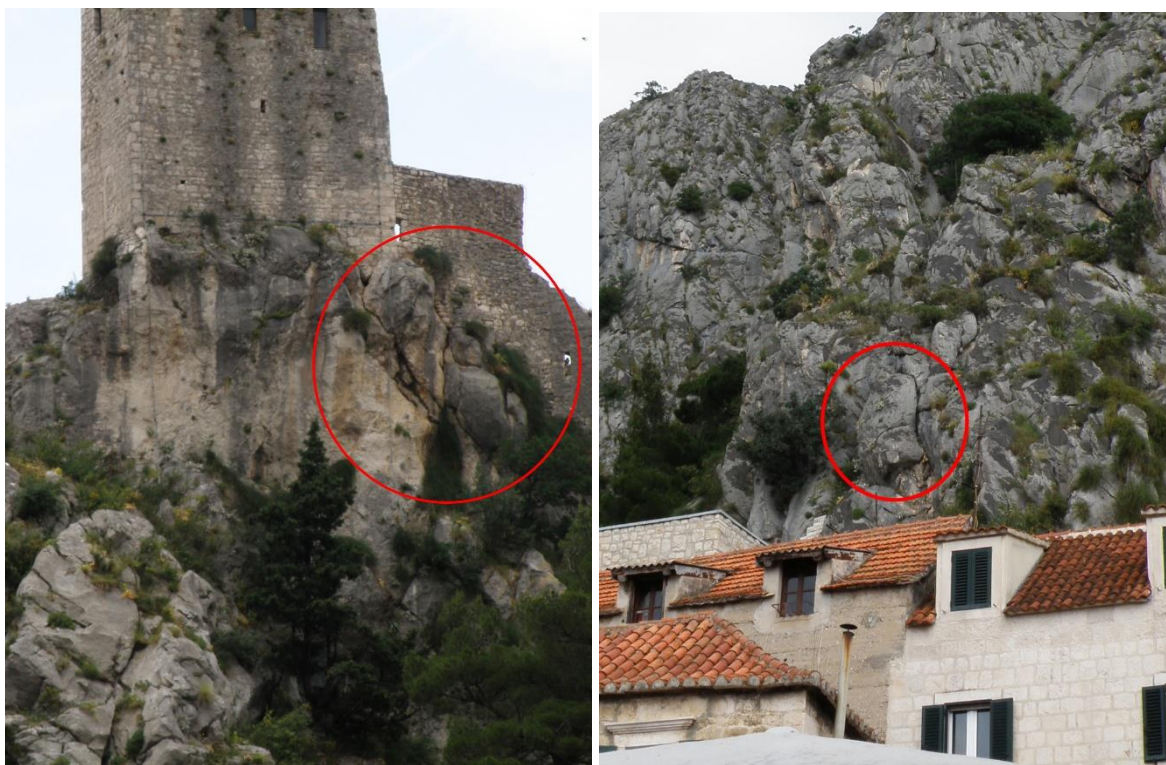


**Slika 3.5.** Prikaz lokacije istraživanja (ružičasti poligon) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Omiš (Marinčić i dr., 1976).

samo naslage pokrivača, odnosno koluvijalne i deluvijalne naslage kvartarne starosti koje u inženjerskom smislu predstavljaju tlo, a čiju podlogu tj. matičnu stijenu vjerojatno čine laporoviti vapnenci s ulošcima lapora, prikazani na Osnovnoj geološkoj karti.

Rudistni vapnenci senonske starosti, koji izgrađuju stijensku masu na istraživanim kosinama, bogati su fosilnom faunom, a prema Tumaču Osnovne geološke karte SFRJ – list Omiš (Marinčić i dr., 1977) najdominantniji su rudisti roda *Hippurites* i *Radiolites*. Ovi vapnenci su slaboslojeni i masivni pri čemu im debljina slojeva varira u metarskim dimenzijama, često su brečoliki, a povremeno se pojavljuju i ulošci dolomita. Vapnenci su čvrsti, svijetlosive do svijetlosmeđe boje, imaju pukotinsku i mjestimično kaverno-znu poroznost te su dobro propusni. U istraživanoj stijenskoj masi formirani su mnogobrojni diskontinuiteti koji omeđuju stijenske blokove, a posljedica su složene strukturno-geološke građe u široj okolini, odnosno boranja i rasjedanja te recentne seizmičnosti.

Inženjerskogeološkim kartiranjem i rekognosciranjem dostupnih dijelova stijenske mase utvrđen je veliki broj potencijalno nestabilnih blokova (slika 3.6) koji su omeđeni diskontinuitetima nepovoljne orijentacije. Klinasti slom i prevrtanje identificirani su kao najčešći potencijalni mehanizmi nestabilnosti. S obzirom na površinu koju zauzimaju potencijalna izvorišta odrona kao i na utvrđen veliki broj potencijalno nestabilnih blokova, seizmičnost i intenzivne oborine kao moguće prirodne inicijatore, odroni predstavljaju veliki rizik za stanovništvo, infrastrukturu i materijalna dobra u staroj gradskoj jezgri i njezinoj okolini. Stoga je nužno odrediti zone podložnosti odronima koje predstavljaju ulazni podatak za određivanje prioriteta područja za projektiranje mjera zaštite, procjene hazarda i ublažavanja rizika od odrona.



**Slika 3.6.** Fotografije potencijalno nestabilnih blokova iznad stare gradske jezgre.

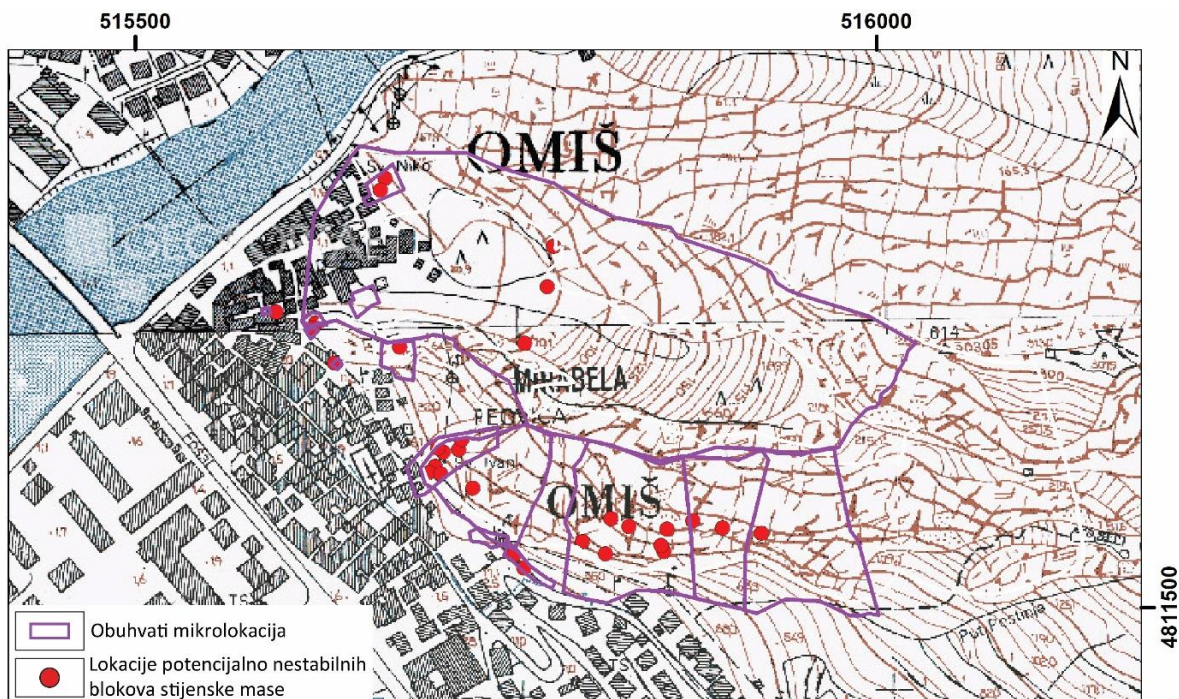
### 3.1.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja

Prema Osnovnoj inženjerskogeološkoj karti SFRJ M 1:300.000 (Čubrilović i dr., 1967) istraživane stijenske kosine spadaju u inženjerskogeološku jedinicu kriptokristalastih vapnenaca koji su uslojeni, jako ispucani, nejednoliko i često okršeni te vodopropusni. Prema istim autorima, prosječna tlačna čvrstoća ovih vapnenaca iznosi 15,7 MPa, brzina trošenja  $15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ , dok prosječni kut nagiba padina iznosi  $45\text{-}85^\circ$ . Također, na širem omiškom područje učestala je pojava sipara i odrona, a maksimalan intenzitet potresa iznosi  $9^\circ$  po MCS ljestvici.

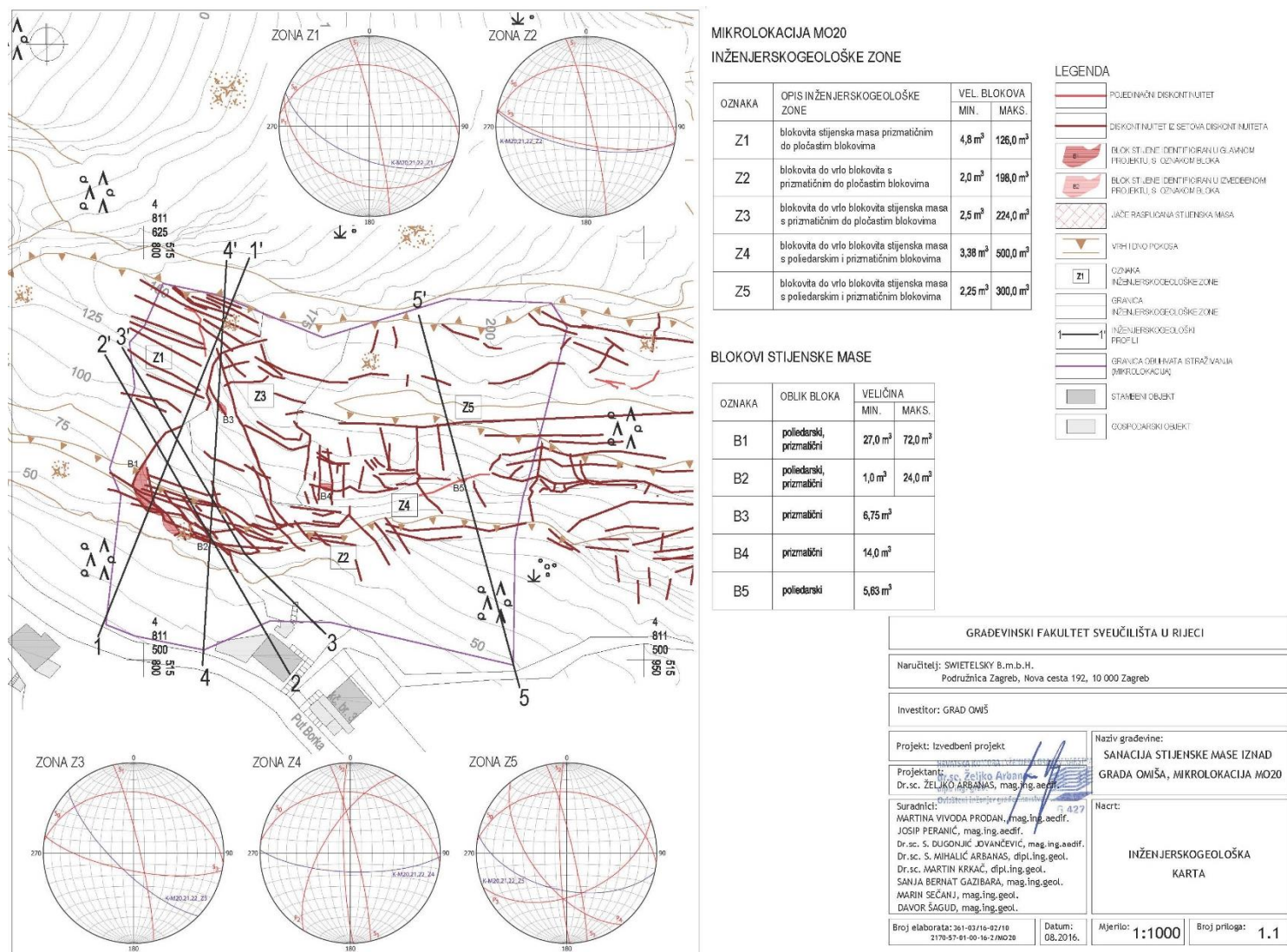
Na stijenskim kosinama iznad grada Omiša provedena su detaljna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja u okviru Izvedbenog projekta Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiš (Arbanas i dr., 2016; Arbanas i dr., 2019) za 22 mikrolokacije (slika 3.7) koje su definirane u okviru Glavnog projekta (Čagalj i dr., 2008) i Izmjena i dopuna glavnog projekta sanacije potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša (Čagalj i dr., 2014). Inženjerskogeološka istraživanja u okviru navedenog Izvedbenog projekta uključivala su detaljno inženjerskogeološko kartiranje stijenskog pokosa na terenu i pomoću daljinskih istraživanja za čije potrebe je izrađen digitalni model stijenskih kosina dobiven snimanjem iz zraka te terestričkim laserskim skeniranjem. Isti digitalni model stijenskih kosina korišten je i pri izradi ovog rada. Na temelju provedenih



inženjerskogeoloških istraživanja u okviru Izvedbenog projekta (Arbanas i dr., 2016), za svaku mikrolokaciju definirane su inženjerskogeološke zone istog stupnja kvalitete stijenske mase, značajke stijenske mase, orijentacija i značajke pojedinačnih diskontinuiteta, setovi diskontinuiteta na osnovi orijentacije svih izmjerenih diskontinuiteta, veličina i oblik prisutnih stijenskih blokova te potencijalne vrste slomova s obzirom na prisutne diskontinuitete. Na 22 mikrolokacije autori su izdvojili 36 inženjerskogeoloških zona i utvrdili su da je stijenska masa masivna do poremećena, a najčešće blokovita do vrlo blokovita. Veličina stijenskih blokova kreće se u rasponu od  $0,06 \text{ m}^3$  do oko  $500 \text{ m}^3$ , pri čemu se najčešće pojavljuju stijenski blokovi veličine od oko  $30 \text{ m}^3$ . Broj utvrđenih setova diskontinuiteta po inženjerskogeološkim zonama značajno varira, od dva do osam, uz veliki broj pojedinačnih diskontinuiteta koji ne pripadaju niti jednom setu. Ukupno je utvrđeno 30 potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase (slika 3.7), a najčešći tipovi sloma na stijenskim kosinama su planarni i klinasti slom te ispadanje stijenskih blokova iz dijelova kosine u prevjesu. Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja prikazani su inženjerskogeološkim modelom svake mikrolokacije, odnosno inženjerskogeološkim kartama (slika 3.8) i profilima (slika 3.9). Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja korišteni su kao ulazni podatak za izradu prognoznih geotehničkih modela pokosa, određivanje stupnja geotehničkog hazarda te u konačnici za projektno rješenje sanacije pokosa.

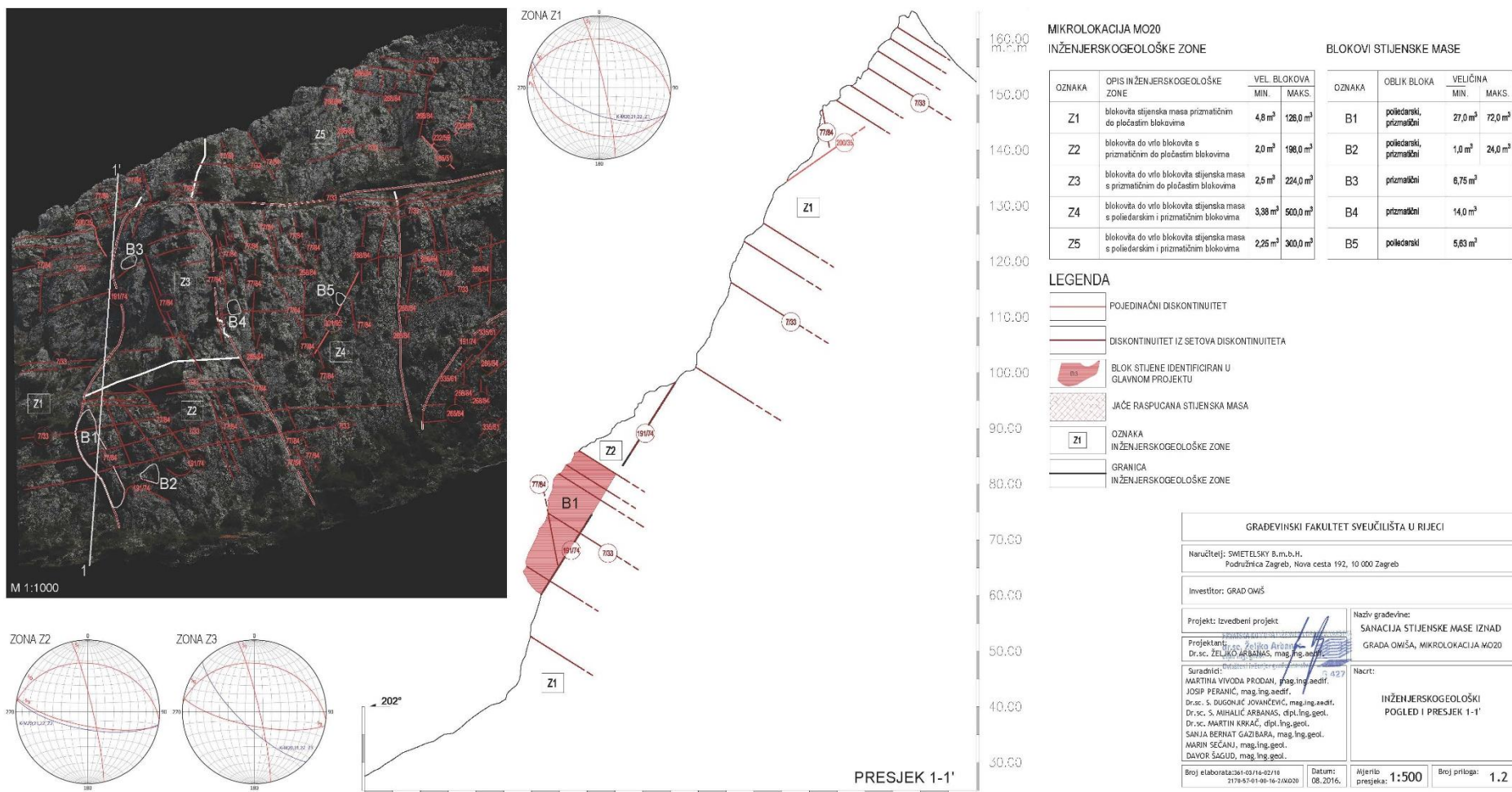


**Slika 3.7.** Prikaz obuhvata mikrolokacija i utvrđenih lokacija potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase obuhvaćenih Izvedbenim projektom „Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša“ na Hrvatskoj osnovnoj karti M 1:5000 (modificirano prema Arbanas i dr., 2016).



**Slika 3.8.** Prikaz inženjerskogeološke karte za jednu od mikrolokacija iz Izvedbenog projekta „Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša“ (preuzeto iz Arbanas i dr., 2016).

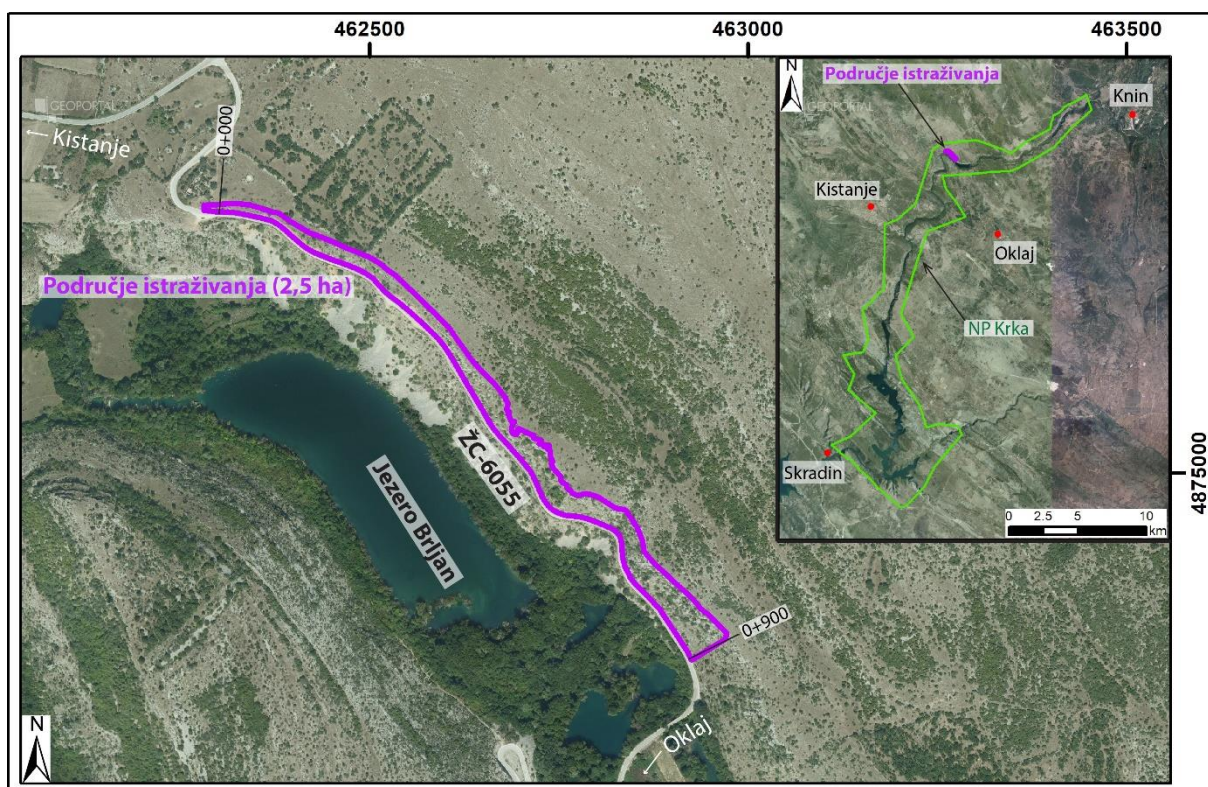




**Slika 3.9.** Prikaz inženjerskogeološkog profila za jednu od mikrolokacija iz Izvedbenog projekta Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša (preuzeto iz Arbanas i dr., 2016).

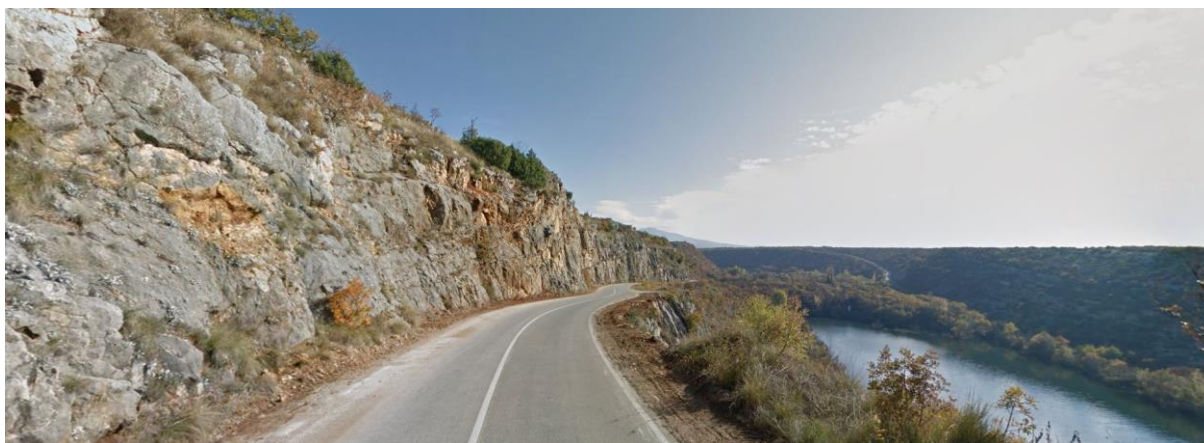
### 3.2. Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan

Pilot područje 2 predstavljaju stijenske kosine koje se nalaze uz županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Oklaj, lokacija Brljan, unutar granica Nacionalnog parka Krka (slika 3.10) u Šibensko-kninskoj županiji. Područje istraživanja nalazi se na oko 14 km zračne udaljenosti ZJZ od Knina, oko 7 km SI od Kistanja, oko 6 km SZ od Oklaja i oko 23 km SSI od Skradina. Istraživane stijenske kosine ukupne su duljine od oko 900 m i površine od oko 25 000 m<sup>2</sup> (2,5 ha), dio su desnog boka kanjona rijeke Krke, a nalaze se pri vrhu SZ dijela kanjona jezera Brljan (slika 3.10). Županijska cesta ŽC-6055, uz koju su izvedeni zasjeci s istraživanim stijenskim kosinama (slika 3.11), spaja naselja Kistanje i Oklaj. Predmetna dionica je više puta bila zatvarana zbog odrona, odnosno pada stijenskih blokova na prometnicu, koji su onemogućili dnevnu migraciju lokalnog stanovništva i turista koji obilaze NP Krka te je stoga u nekoliko navrata bila i sanirana. Zbog visokog rizika po ljude i važnosti prometnice, stijenski zasjeci i pokosi na ovoj dionici izabrani su kao pilot područje za razvoj metodologije za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu za specifičnu lokaciju.



Slika 3.10. Geografski položaj područja istraživanja prikazan na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine.





**Slika 3.11.** Pogled prema jugozapadu na jezero Brljan te na istraživane stijenske kosine u zasjecima na dionici ŽC-6055.

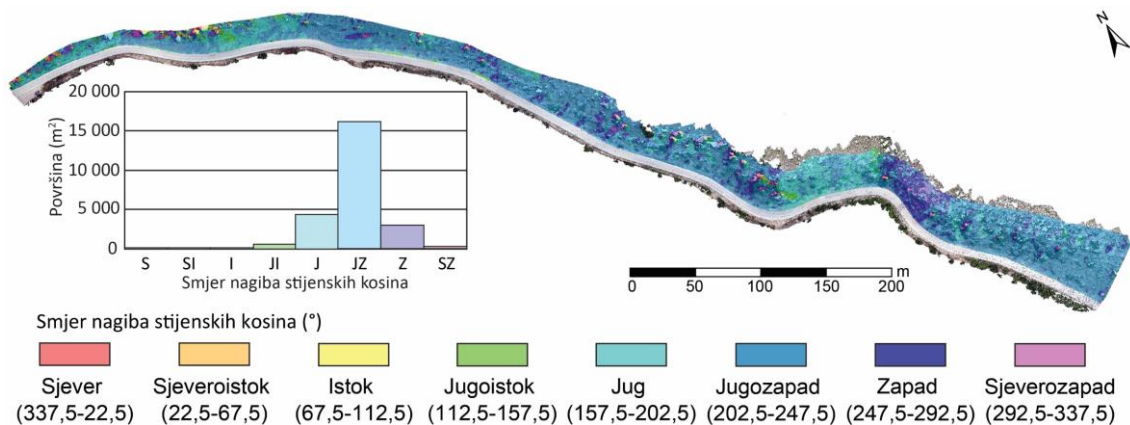
### 3.2.1 Prirodne značajke istraživanih područja

#### 3.2.1.1 Geomorfološke značajke

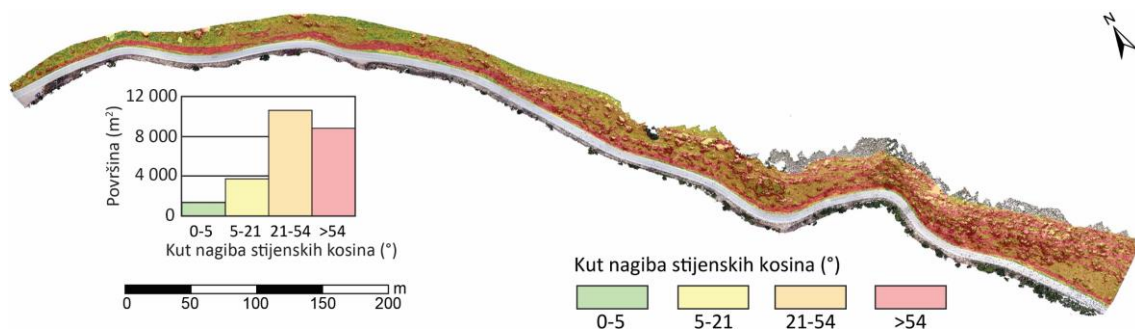
Područje istraživanja i cijeli središnji tok rijeke Krke pripadaju subgeomorfološkoj regiji Sjevernodalmatinska zaravan (Bognar, 2001). Prema Perica i dr. (2005) ovu jedinicu karakterizira duboko usijecanje doline Krke i jednaka uravnjenost neovisno o litološkom sastavu pri čemu se teren postupno uzdiže prema SZ. Od aktivnih geomorfoloških procesa Perica i dr. (2005) navode aktivne sipare koji prekrivaju fosilne pleistocenske siparišne breče koje ukazuju na starost i cikličku prirodu usijecanja doline Krke. Također, navode da je moguće pratiti razdoblja jačeg usijecanja i zatrpavanja doline okolnim padinskim materijalom. Prema autorima, s obzirom na prosječni kut nagiba dolinskih strana od  $32^\circ$ , derazijski (padinski) procesi su najizraženiji procesi oblikovanja reljefa, koji za posljedicu imaju stvaranje koluvijalnih zastora, a intenzitet padinskih procesa uvjetovan je antropogenim i zoogenim značajkama.

Bok kanjona na kojem se nalaze istraživane stijenske kosine pruža se u smjeru SZ-JI, a generalni smjer nagiba mu je prema JZ (slika 3.12). Visina stijenskih kosina iznad prometnica postupno se povećava idući od SZ prema JI, odnosno od 6 m na SZ do 63 m na JI dijelu istraživanih kosina. Donji dio istraživanih stijenskih kosina zasječen je za potrebe izgradnje prometnice, središnji i gornji dio čine stijenske kosine u prirodnom stanju, a poviše njih je visoravan. Zračna udaljenost istraživanih kosina od rijeke Krke je oko 100 m u smjeru JZ. Nadmorska visina rijeke Krke je na oko 170 m n.m., dok se istraživane stijenske kosine nalaze na 195 do 255 m n.m. Analizom smjera nagiba istraživanih kosina (slika 3.12) utvrđeno je da najveću površinu istraživanih kosina čine kosine nagnute u smjeru JZ ( $16\,435\text{ m}^2$ , tj. 65,7%),

J (4448 m<sup>2</sup>, tj. 17,8%) i Z (3056 m<sup>2</sup>, tj. 12,2%), odnosno u smjeru prometnice koja se nalazi u njihovom podnožju. Kosine nagnute prema JI (471 m<sup>2</sup>) i SZ (273m<sup>2</sup>) zauzimaju 1,9%, odnosno 1,1 % površine istraživanih kosina, dok sve ostale zauzimaju manje od 1%. Analizom kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina (slika 3.13) te klasifikacijom padina u specifične morfološke jedinice prema Strahler (1950), utvrđeno je da najveću površinu na području istraživanja (43,3%, 10 835 m<sup>2</sup>) zauzimaju strmo nagnute padine nagiba 21-54°. Litice, nagiba većeg od 54°, zauzimaju 36% istraživanog područja (9011 m<sup>2</sup>), dok blago nagnute padine, nagiba 5-21°, obuhvaćaju 15,1% (3789 m<sup>2</sup>) površine istraživanog područja. Najmanji dio područja istraživanja obuhvaćaju ravnice nagiba 0-5° (5,5%, 1379,5 m<sup>2</sup>). Najstrmije su kosine sa smjerom nagiba prema JZ i Z s prosječnim kutom nagiba od oko 45°, a slijede ih kosine sa smjerom nagiba prema J s prosječnim kutom nagiba od oko 39°. Sve ostale kosine imaju prosječni kut nagiba od 26-31°. S obzirom da najveću površinu zauzimaju kosine koje su nagnute u smjeru prometnice te da je i njihov prosječni kut nagiba najveći, ove kosine predstavljaju najveću opasnost za prometnu infrastrukturu te lokalno stanovništvo i turiste koji prometuju njome zbog većeg broja potencijalnih izvorišta odrona.



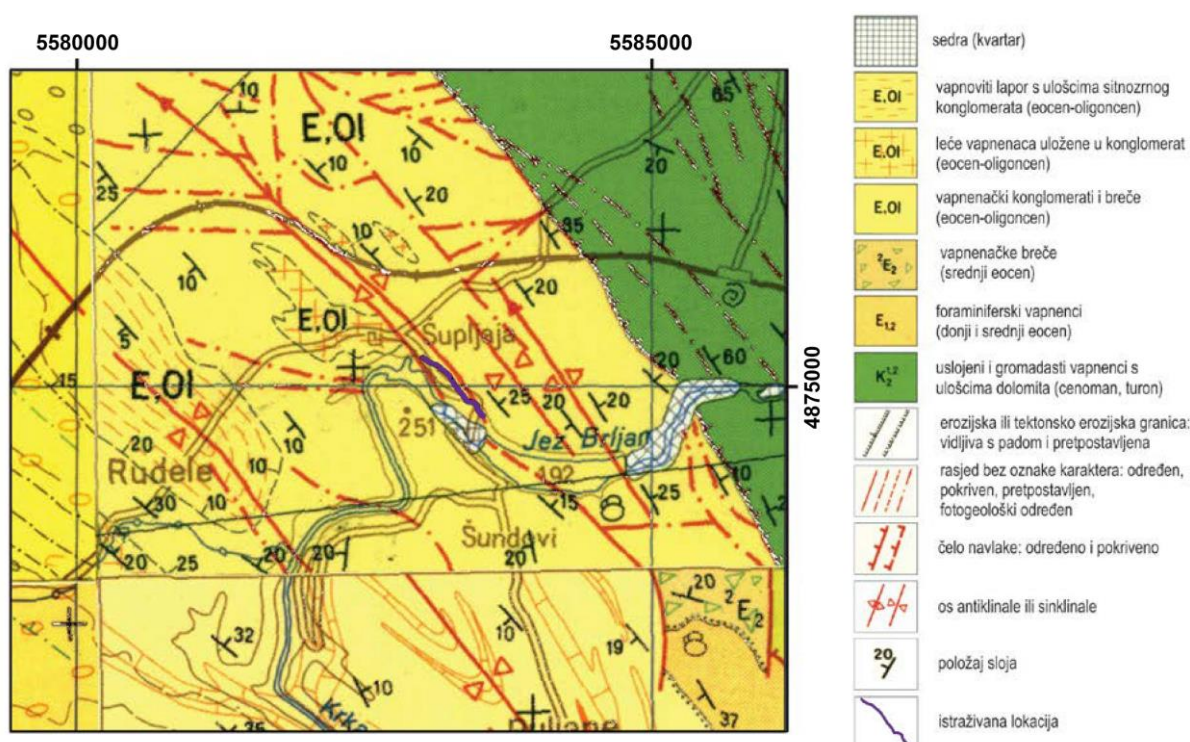
**Slika 3.12.** Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih stijenskih kosina uz ŽC – 6055, dionica Brljan, dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.



**Slika 3.13.** Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina uz ŽC – 6055, dionica Brljan, dobivenih iz DMT-a rezolucije 0,5x0,5 m.

### 3.2.1.2 Geološke značajke

Prema Osnovnoj geološkoj karti SFRJ M 1:100.000 – list Knin (Grimani i dr., 1972) i pripadajućem tumaču (Grimani i dr., 1975) istraživane stijenske kosine, a i šire područje, izgrađuju vapnenački konglomerati i breče srednje-eocenske do donje-oligocenske starosti (slika 3.14), koje spadaju u Prominske naslage. Ove naslage većim dijelom se sastoje od vapnenačkog konglomerata s ulošcima vapnenaca i laporovitog vapnenca, a manjim dijelom od lapora s ulošcima sitnozrnastog konglomerata. U izmjeni s laporima mjestimično se pojavljuju slojevi i leće ugljena. S obzirom da taložni okoliši variraju od morsko-deltskog do slatkovodnog i kopnenog, jedna od karakteristika prominskih naslaga je česta bočna i vertikalna izmjena različitih litoloških članova, odnosno ove naslage su vrlo heterogene. Prema Grimani i dr. (1975) vapnenački konglomerati i breče od kojih su izgrađene istraživane kosine su dobro uslojeni, sive do sivosmeđe boje, heterogene strukture s veličinom zrna koja varira od 1-7 cm, a rjeđe i do 25 cm. Vezivo među zrnima je mikrokristalasti kalcit ili kalkarenit, a zrna su najčešće izgrađena od rožnjaka, pješčenjaka i vapnenaca. Na padinama ispod prometnice, tj. područja istraživanja, utvrđene su i padinske naslage kvartarne starosti, odnosno deluvijalne i koluvijalne naslage.



**Slika 3.14.** Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (ljubičasta linija) na uvećanim isječcima Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Knin (Grimani i dr., 1972), list Drniš (Ivanović i dr., 1977), list Obrovac (Ivanović i dr., 1973) i list Šibenik (Mamužić i dr., 1971).

Prema Grimani i dr. (1972) šire područje istraživanja pripada tektonskoj jedinici Popina-Kom-Radučić. Na oko 1,5 km SZ od područja istraživanja konglomerati i breče srednje-eocenske do donje-oligocenske starosti u kontaktu su sa starijim naslagama, tj. rudistnim vapnencima gornjokredne starosti duž reversnog rasjeda pružanja SZ-JI, s vergencijom prema JZ, a koji predstavlja čelo navlake. Konglomerati i breče srednje-eocenske do donje-oligocenske starosti izgrađuju podinu navlake, dok krovinu izgrađuju rudistni vapnenci gornjokredne starosti (slika 3.14). JZ od spomenute navlake Prominske naslage su blago borane na što ukazuje niz antiklinala i sinklinala, pri čemu je orijentacija osi bora paralelna okolnim strukturama, tj. SZ-JI. Krila antiklinala i sinklinala su blago nagnuta, s nagibima slojeva između 10 i 25°. Iako prema Grimani i dr. (1972) jedna od osi antiklinala prolazi područjem istraživanja, pregledom ortofoto snimke utvrđeno je da se istraživane stijenske kosine nalaze oko 500 m SZ od njezine osi, tj. u njezinom SI krilu ili u JZ krilu sinklinala čija je os oko 400 m SZ od istraživanih stijenskih kosina, na što ukazuje i orijentacija slojeva na istraživanim kosinama koji generalno padaju prema SI s kutovima nagiba od 20-30°. Pružanje osi ovih struktura paralelno je padinama na kojoj se nalazi područje istraživanja, tj. SZ-JI, pri čemu os ucrtane antiklinala tone prema SZ. Također, prema Grimani i dr. (1972) uz JZ dio istraživane lokacije prikazan je rasjed nepoznatog karaktera pomaka. Navedeno boranje i rasjedanje uzrokovalo je nastanak mnogobrojnih diskontinuiteta u stijenskoj masi koji, zajedno s antropogenim utjecajem, odnosno zasijecanjem padine radi izgradnje prometnice, predstavljaju glavne preduvjete za česte nastanke odrona. Intenzivne oborine ili potresi vjerojatno predstavljaju glavne pokretače, s obzirom da je šire kninsko područje jedno od seizmički najaktivnijih područja u Hrvatskoj (Herak i dr., 2011).

### 3.2.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja

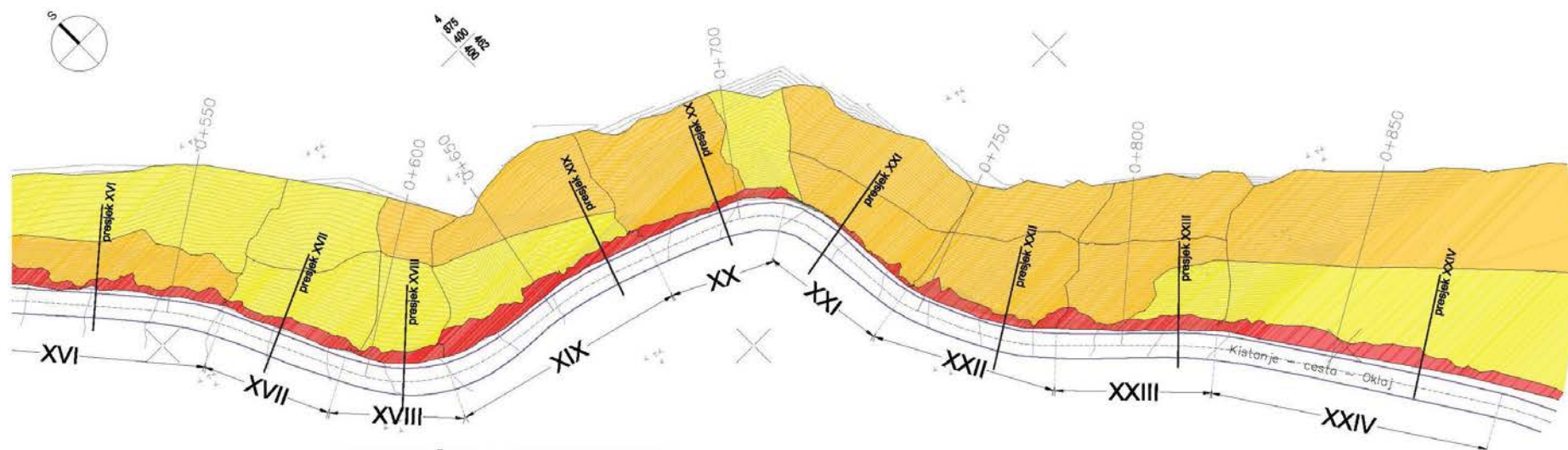
Prema Osnovnoj inženjerskogeološko karti SFRJ M 1:300.000 (Čubrilović i dr., 1967) područje istraživanja spada u inženjerskogeološku jedinicu koju izgrađuju lapori i vapnenci paleogenske starosti koji su pločasti, uslojeni i debelo uslojeni, jako ispucani i srednje propusni. Također, prema istim autorima na širem području istraživanja mogući je maksimalni intenzitet potresa od 7° po MCS ljestvici.

Na stijenskim kosinama uz županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Okalj, dionica Brljan provedena su detaljna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja u okviru Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015). Inženjerskogeološka istraživanja u okviru navedenog Izvedbenog projekta uključivala su detaljno inženjerskogeološko kartiranje stijenskih pokosa na terenu i



pomoću daljinskih istraživanja za čije potrebe je izrađen digitalni model stijenskih kosina dobiven snimanjem iz zraka i terestričkim laserskim skeniranjem. Isti digitalni model stijenskih kosina korišten je i za potrebe izrade ovog rada. Na temelju provedenih inženjerskogeoloških istraživanja u okviru navedenog Izvedbenog projekta utvrđene su 24 inženjerskogeološke/geotehničke zone istovrsnih karakteristika stijenske mase, s obzirom na značajke intaktnog materijala i na raspucanost stijenske mase. Za svaku zonu identificirani su karakteristični setovi diskontinuiteta te su utvrđene njihove geometrijske značajke. Autori su utvrdili je da je stijenska masa dezintegrirana i raspucana te da su prisutni različiti stupnjevi trošnosti stijenske mase. Također, identificirano je više setova diskontinuiteta (1-4 seta ovisno o inženjerskogeološkoj zoni) koji tvore stijenske blokove, a utvrđena je i prisutnost pojedinačnih diskontinuiteta koji su značajni za potencijalni slom stijenske mase. Na osnovu tih podataka za svaku zonu provedena je i RMR klasifikacija stijenske mase.

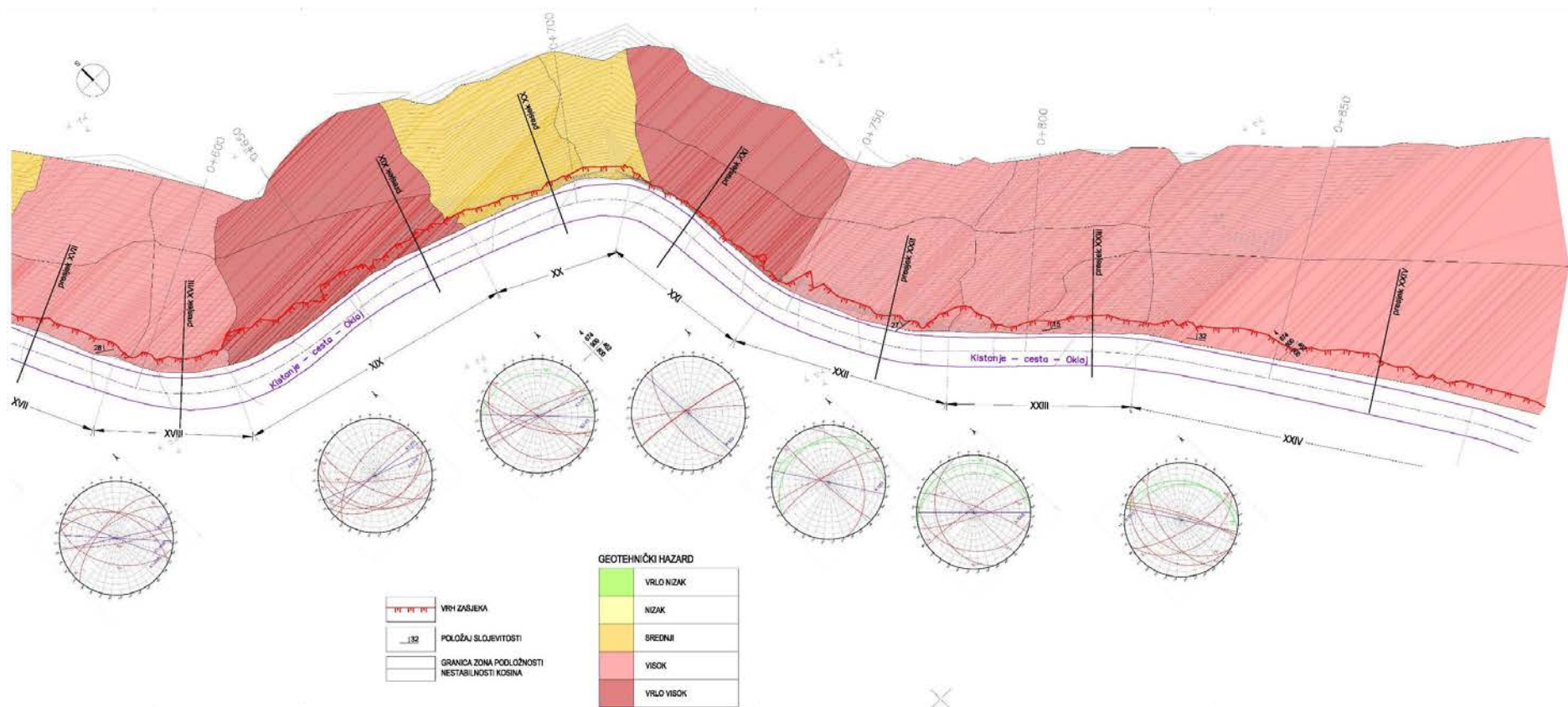
Digitalni model stijenskih kosina korišten je za polu-automatizirano određivanje setova diskontinuiteta u računalnom program *Split-FX* (Split Engineering LCC., 2017) te za ekstrapolaciju granica inženjerskogeoloških zona i za vizualnu identifikaciju zona podložnosti stijenskih kosina odronima. Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja u okviru Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59 – Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015) predstavljeni su inženjerskogeološkim modelima za svaku inženjerskogeološku zonu, odnosno zonama podložnosti stijenskih kosina odronima za svaku zonu (slika 3.15). Autori razlikuju tri stupnja podložnosti, odnosno zone srednje, visoke i vrlo visoke podložnosti u kojima su identificirani mogući uvjeti za nastanak nekog od tipa sloma stijenske mase, pri čemu su najčešći planarni i klinasti slom te su prisutni uvjeti za odronjavanje i kotrljanje nestabilnih blokova niz padinu. Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja korišteni su kao ulazni podatak za izradu prognoznih geotehničkih modela pokosa, geostatičke analize i utvrđivanje geotehničkog hazarda (slika 3.16) na osnovu kojih su izrađena projektna rješenja sanacije pokosa.



#### ZONE PODLOŽNOSTI NESTABILNOSTI KOSINA

	<p>ZONA SREDNJE PODLOŽNOSTI u kojoj mjestimično postoje uvjeti za lokalne nestabilnosti kosina, odronjavanje i kotrljanje nestabilnih blokova. Općenito, nagib pokosa u zonama srednje opasnosti varira u rasponu 30-55°, izdanci stijenske mase nalaze se na površini terena samo mjestimično, zbog čega su rijetki nestabilni blokovi, a gusti vegetacijski pokrov smanjuje mogućnost transporta blokova.</p>
	<p>ZONA VISOKE PODLOŽNOSTI u kojoj postoje uvjeti za lokanu nestabilnost kosina, slomove stijenske mase, odronjavanja i kotrljanja nestabilnih blokova. Općenito, nagib pokosa u zonama vrlo visoke opasnosti varira u rasponu 45-60°, litice pokosa su prirodne, vegetacijski pokrov je samo mjestimičan i mjestimično smanjuje mogućnost transporta blokova.</p>
	<p>ZONA VRLO VISOKE PODLOŽNOSTI u kojoj postoje uvjeti za lokanu i globalnu nestabilnost kosina, slomove stijenske mase, odronjavanja i kotrljanja nestabilnih blokova. Općenito, nagib pokosa u zonama vrlo visoke opasnosti varira u rasponu 60-90°, litice pokosa su prirodne ili umjetne (zasjek), vegetacijski pokrov gotovo potpuno nedostaje ili je samo mjestimičan i ne doprinosi stabilnosti ili ne umanjuje značajno mogućnost transporta blokova.</p>

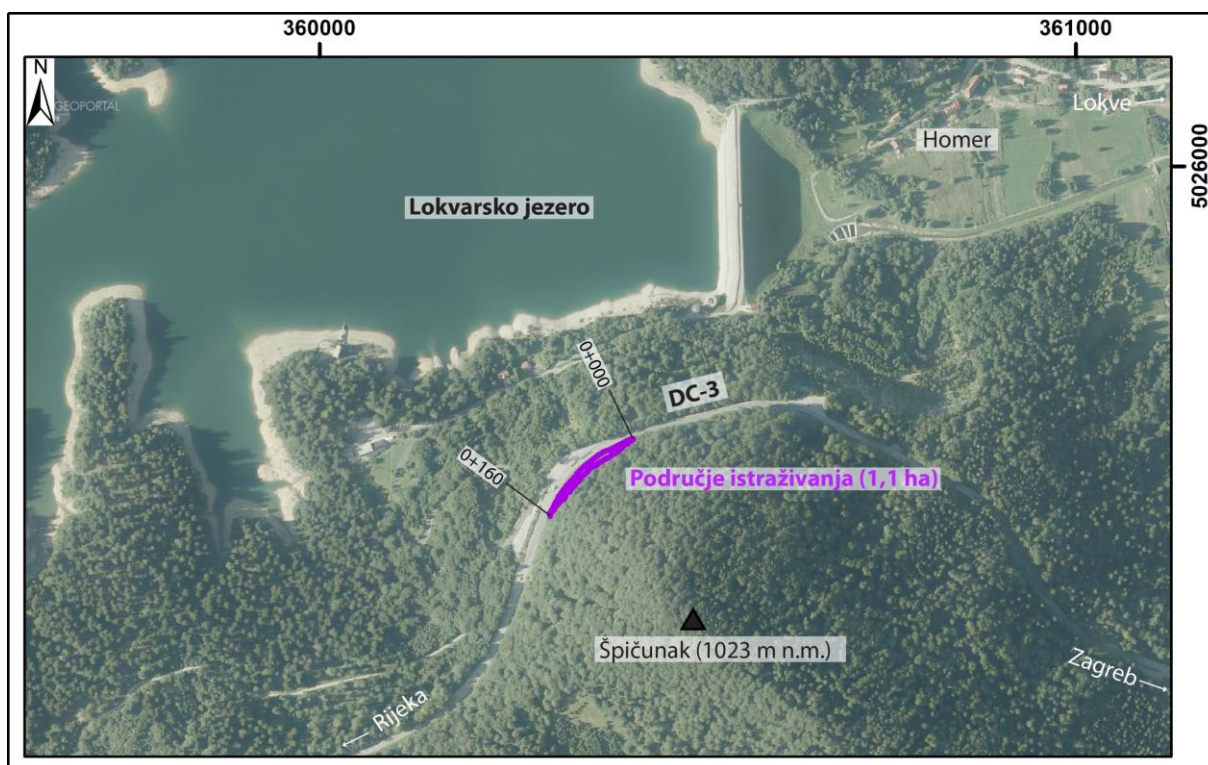
**Slika 3.15.** Prikaz karte podložnosti stijenskih kosina odronima (stacionaže 0+500 – 0+900) iz Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015).



**Slika 3.16.** Prikaz karte geotehničkog hazarda (stacionaže 0+500 – 0+900) iz Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015).

### 3.3. Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak

Pilot područje 3 predstavlja stijenski zasjek uz državnu cestu DC-3, dionica Delnice-Rogozno, na spoju s nerazvrstanom cestom koja vodi prema Lokvarskom jezeru u Gorskom kotaru. Istraživani stijenski zasjek nalazi se na oko 140 m zračne udaljenosti J od Lokvarskog jezera, oko 240 m SSZ od vrha Špičunak, oko 1 km JZ od naselja Homer (slika 3.17) te oko 1,8 km Z od mjesta Lokve. Istraživani stijenski zasjek, duljine oko 160 m i površine od oko 11 000 m<sup>2</sup> (1,1 ha), nastao je zasijecanjem vrlo strme prirodne padine koja se proteže od vrha Špičunak do Lokvarskog jezera, radi izgradnje državne ceste DC-3. Ovaj stijenski zasjek je odabran kao pilot područje za razvoj i testiranje metodologije za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu za specifičnu lokaciju zbog toga što je izveden za potrebe izgradnje vrlo frekventne prometnice, subvertikalna je, mjestimično u prevjesu, stijenska masa je promjenjivog stupnja trošnosti te su česte pojave odrona (slika 3.18).



**Slika 3.17.** Geografski položaj stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak prikazanog na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine.





**Slika 3.18.** Pogled prema JZ na središnji dio stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak uz Državnu cestu DC-3 u blizini Lokvarskog jezera.

### 3.3.1 Prirodne značajke istraživanog područja

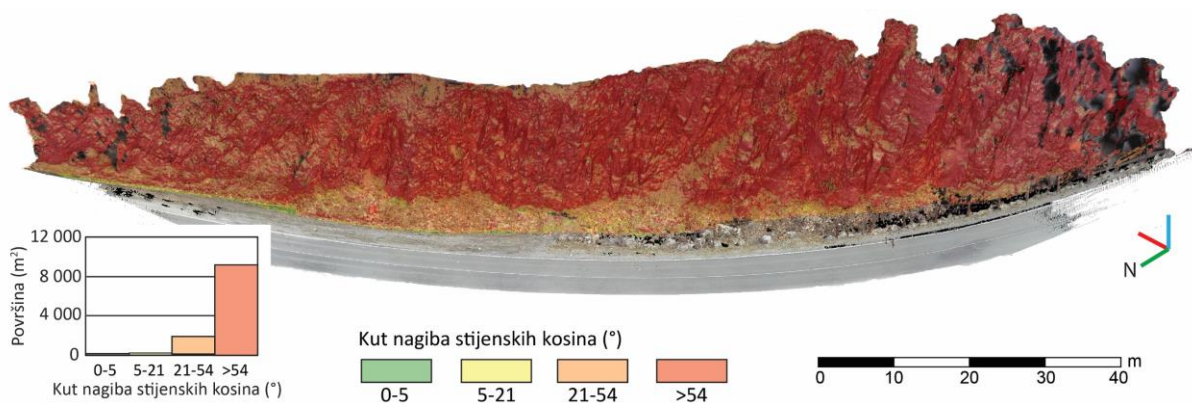
#### 3.3.1.1 Geomorfološke značajke

Područje istraživanja i okolica pripadaju subgeomorfološkoj regiji Fužinsko-lokvarsko brdsko-zavalsko područje (Bognar, 2001). Dio padine na kojoj se nalazi istraživani stijenski zasjek pruža se SI-JZ, a generalni smjer nagiba joj je prema SZ. Najviši vrh padine je vrh Špičunak na 1023 m n.m., dno padine nalazi se uz Lokvarsko jezero na oko 765 m n.m, dok se prometnica uz istraživani stijenski zasjek nalazi na oko 859 m n.m. na SI dijelu istraživanog područja i 865 m n.m. na JZ dijelu. Prosječni kut nagiba padine iznad istraživanog stijenskog zasjeka je oko  $36^\circ$ , dok je ispod oko  $29^\circ$ . Prema klasifikaciji za specifične morfološke jedinice (Strahler, 1950) ove padine spadaju u strmo nagnute padine. Osim odrona, na širem području istraživanja od aktivnih geomorfoloških procesa prisutno je klizanje koje zahvaća državnu i nerazvrstanu cestu u podnožju krajnjeg JZ dijela istraživanog stijenskog zasjeka te veliki dio padine zapadno od njega. Morfologija klizišta na padini nije jasno vidljiva zbog toga što je više puta bila modificirana zbog izgradnje ceste, a tragovi klizanja vidljivi su u obliku pukotina na državnoj i nerazvrstanoj cesti te na kamenoj oblozi koja se nalazi između njih.

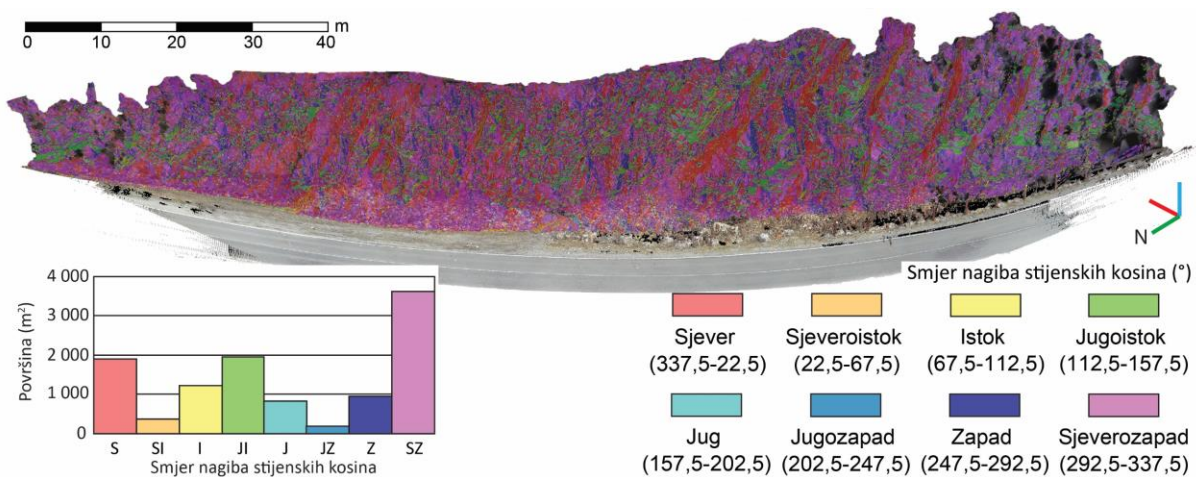
Visina istraživanog stijenskog zasjeka kreće se u rasponu od 8 m na krajnjem SI dijelu do 22 m na JZ dijelu. Analizom kuta nagiba istraživanog stijenskog zasjeka (slika 3.19) te klasifikacijom padina u specifične morfološke jedinice prema Strahler (1950), utvrđeno je da najveću površinu područja istraživanja ( $81,9\%$ ,  $9080 \text{ m}^2$ ) zauzimaju litice nagiba većeg od  $54^\circ$ .

Strmo nagnute padine, nagiba 21-54°, zauzimaju 17,1% istraživanog područja (1898 m<sup>2</sup>), dok blago nagnute padine, nagiba 5-21°, obuhvaćaju 0,8% (94 m<sup>2</sup>) površine istraživanog područja. Najmanji dio područja istraživanja obuhvaćaju ravnice nagiba 0-5° (0,1%, 5,4 m<sup>2</sup>).

Analizom smjera nagiba (slika 3.20) utvrđeno je da najveću površinu istraživanog stijenskog zasjeka čine kosine nagnute u smjeru SZ (3634 m<sup>2</sup>, tj. 32,8%), odnosno u smjeru prometnice koja se nalazi u njihovom podnožju. Veliku površine zauzimaju i kosine suprotnog smjera nagiba tj. nagnute u smjeru JI (1959 m<sup>2</sup>, tj. 17,7%) koje mogu ukazivati na brojne prevjese. Površine slične veličine zauzimaju i kosine nagnute u smjeru S (1901 m<sup>2</sup>, tj. 17,2%) koje su mjestimično nagnute u smjeru prometnice u njihovom podnožju, a mjestimično su u prevjesu. Kosine nagnute u smjeru I (1236 m<sup>2</sup>) zauzimaju oko 11,2% površine, dok one nagnute u smjeru Z (953 m<sup>2</sup>) i J (826 m<sup>2</sup>) zauzimaju 8,6%, odnosno 7,5 % ukupne površine istraživanih kosina. Kosine nagnute u smjeru SI (387 m<sup>2</sup>, 3,5%) i JZ (178 m<sup>2</sup>, 1,6%) zauzimaju najmanju površinu na istraživanom stijenskom zasjeku. Prosječni kut nagiba kosina, neovisno o smjeru nagiba, iznosi 72°. S obzirom da najveću površinu zauzimaju kosine koje su nagnute u smjeru prometnice i da prosječni kut nagiba iznosi 72°, čime se povećava mogućnost za nastanak odrona, ove kosine predstavljaju opasnost za prometnu infrastrukturu, kao i za vozila i ljude na prometnici.



**Slika 3.19.** Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanog stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak uz DC-3, dionica Delnice-Rogozno, dobivenih iz modela oblaka točaka visoke rezolucije.



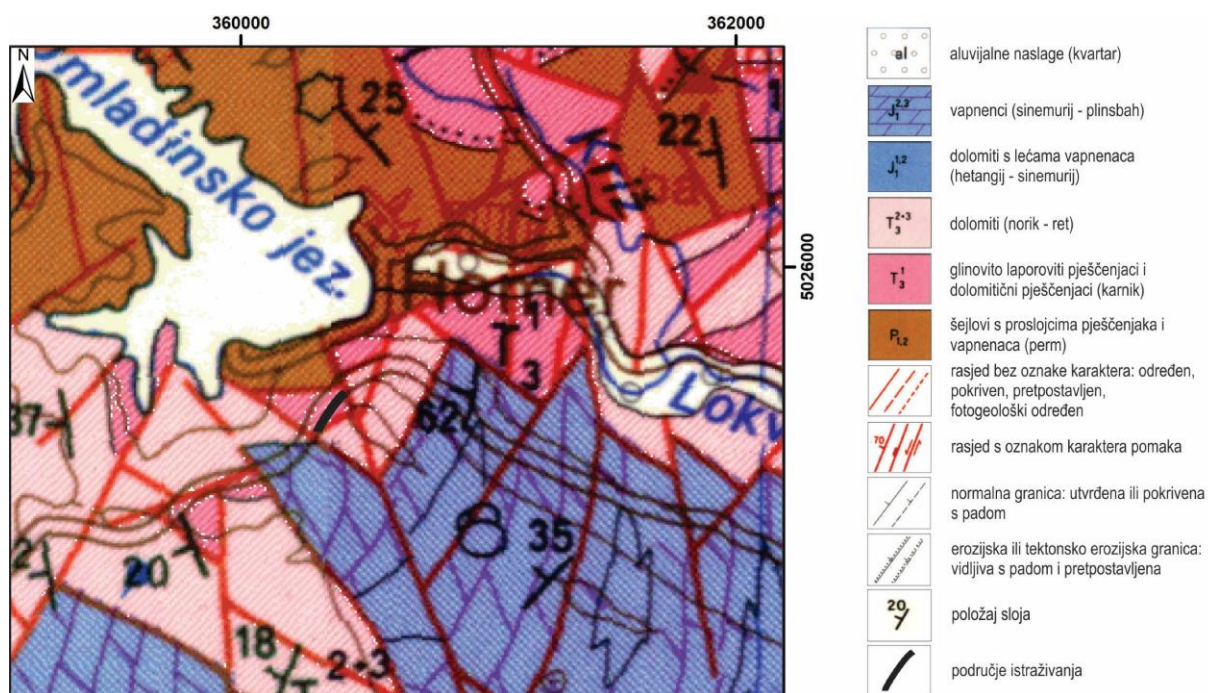
**Slika 3.20.** Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanog stijenskog zasjea Špičunak uz DC-3, dionica Delnice-Rogozno, dobivenih modela oblaka točaka visoke rezolucije.

### 3.3.1.2 Geološke značajke

Prema Herak (1980) na području Gorskog kotara nalaze se tri tektonske zone: 1) blago borana gorska zona s neotektonskim prodorima paleozoika kroz primarno naljuskane podzone, zatim 2) kompleksna alohtona zona s navlačcima i oknima te 3) zona sjevernoistočnog pobrđa s djelomično prekrivenim ljuskanjem. Istraživane stijenske kosine pripadaju blago boranoj gorskoj zoni pri čemu spomenute prodore paleozoika predstavlja tzv. doma Omladinskog jezera (Savić i Dozet, 1985). Prema Osnovnoj geološkoj karti SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet, 1984) šire područje istraživanja izgrađeno je od klastičnih i karbonatnih naslaga permske, trijaskе i jurske starosti (slika 3.21). Savić i Dozet (1985) navode da naslage donjo- i srednjopermske starosti čine glinene stijene (šejlovi) s proslojcima pješčenjaka i vapnenaca, kvarcni konglomerati i konglomeratično–pješčane stijene te pješčenjaci. Autori opisuju da se u vršnom dijelu ovog slijeda nalaze barit, dolomit i dolomitno–baritni mješanci na kojima slijede naslage gornjeg trijasa, tj. karnički klastiti. Karničke naslage su interpretirane i opisane kao glineno–laporovite pješčano–tinčaste i dolomitno–laporovito–pješčane naslage. Na karničkim naslagama, duž oštre litološke granice, slijede dolomiti noričko–retske starosti u kojima je često vidljiva stromatolitna laminacija te su stoga interpretirani kao stromatolitni dolomiti. Kontakte između permskih, trijaskih i jurskih naslaga na širem području istraživanja Savić i Dozet (1984) interpretirali su kao rasjedne kontakte, ali bez oznake karaktera pomaka (slika 3.21).

Prema Osnovnoj geološkoj karti SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet, 1984) istraživani stijenski zasjek trebao bi biti izgrađen od klastičnih naslaga karničke starosti (slika 3.21), ali je terenskim kartiranjem utvrđeno da ga izgrađuje glavni dolomit noričko–retske starosti. Prema istim autorima, naslage glavnog dolomita noričko–retske starosti imaju jasno





**Slika 3.21.** Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (crna linija) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet., 1984).

izraženu slojevitost s debljinom slojeva od 5 cm do 100 cm. Mjestimično su utvrđene glinovito-laporovite slojne prevlake te je vidljiva i milimetarska kosa i valovita laminacija. Dolomiti su dolomikritnog do dolosparitnog tipa. Boja glavnog dolomita je različitih nijansi sive do smeđe boje. Glavni dolomit na području istraživanja je tamnosive do crvenkasto-smeđe boje pri čemu boja ovisi o stupnju trošnosti stijenske mase koja značajno varira na istraživanom zasjeku (slika 3.18). Također, prilikom terenskog kartiranja, u vršnim dijelovima zasjeka utvrđena je izmjena kasno- i ranodijagenetskog dolomita te stromatolitna laminacija. Prema Savić i Dozet (1984) istraživani stijenski zasjek omeđen je s četiri rasjeda nepoznatog karaktera pomaka. Uz SI rub istraživanog područja ucrtan je rasjed pružanja SSZ-JJI nepoznatog karaktera pomaka. Rasjed slične orijentacije utvrđen je prilikom terenskog kartiranja na središnjem dijelu istraživanog područja. Na JZ rubu istraživanog područja Savić i Dozet (1984) prikazuju sjecište dva rasjeda pružanja SZ-JI i ISI-ZJZ nepoznatih karaktera pomaka, dok uz sjeverni rub ceste prikazuju rasjed pružanja I-Z također nepoznatog karaktera pomaka. Svi navedeni rasjedi predstavljaju geološke granice između različitih litostratigrafskih jedinica, a sve prikazane jedinice utvrđene su prilikom terenskog kartiranja šireg područja istraživanja i prilikom geotehničkih istražnih radova za potrebe sanacije ranije spomenutog klizišta Špičunak (Arbanas i dr., 2018).

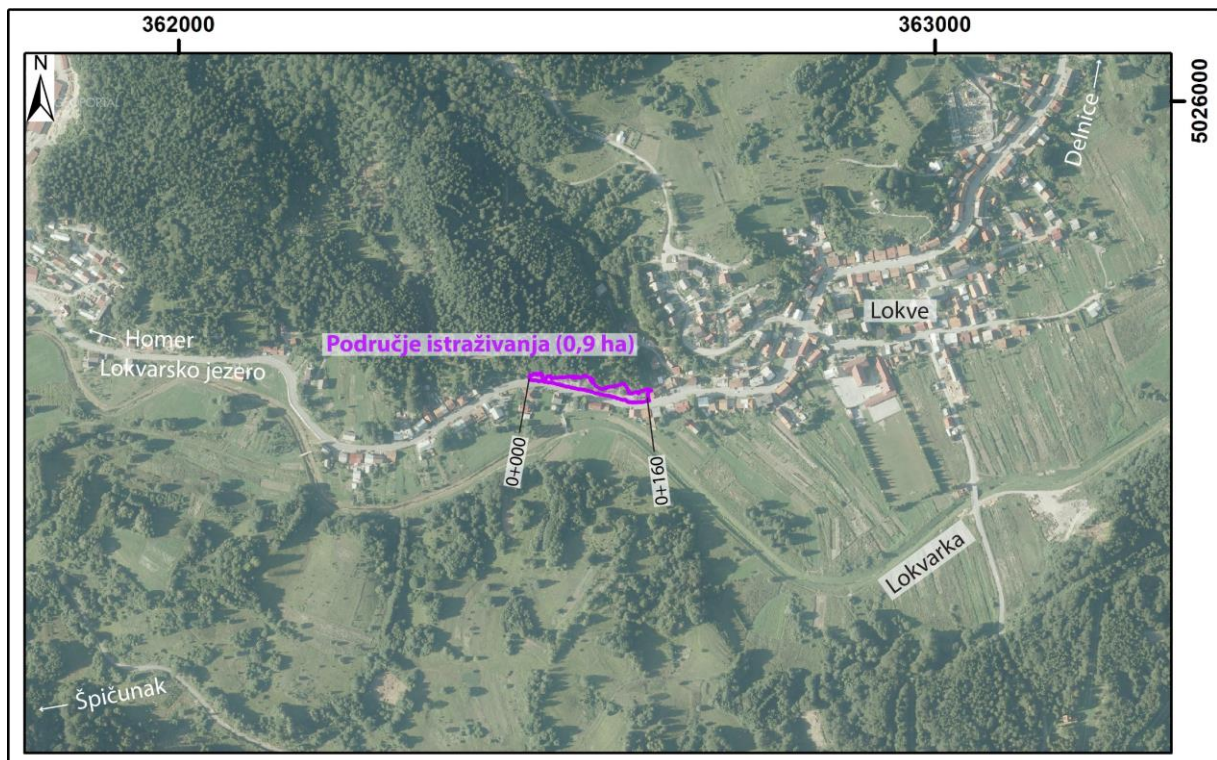


### 3.3.2 Dosadašnja inženjerskogeološka istraživanja

Prema Osnovnoj inženjerskogeološkoj karti SFRJ M 1:300.000 (Čubrilović i dr., 1967) šire područje istraživanja spada u inženjerskogeološku jedinicu kriptokristalastih masivnih i debelouslojenih dolomita koji su ispucani i okršeni, a trošenjem stvaraju dolomitski pijesak koji je podložan eroziji. Osim inženjerskogeoloških istraživanja prikazanih u geotehničkom elaboratu Klizište na državnoj cesti DC 3, lokacija Špičunak (Arbanas i dr., 2018), podaci o ranijim inženjerskogeološkim istraživanjima na istraživanom zasjeku nisu bili dostupni iako je moguće da postoje s obzirom da na zasjeku postoje mjere sanacije odrona u obliku zaštitnih mreža za zaštitu od odrona te pričvršćenih i torkretiranih stijenskih blokova. Na stijenskom zasjeku na lokaciji Špičunak provedena su istraživanja u svrhu izrade diplomskog rada Primjena tehnologije oblaka točaka za projektiranje sanacije stijenske kosine Špičunak (Đikić, 2016) prilikom kojih je izrađen digitalni model oblaka točaka koji je preuzet od autora i korišten u ovom radu. Đikić (2016) navodi da je stijenska masa na zasjeku Špičunak potpuno do jako raspucana, vrlo blokovita do blokovito-poremećena, srednjeg do slabog stupnja trošnosti, ali i mjestimično dezintegrirana te jako trošna. Također, isti autor navodi da su na stijenskom zasjeku prisutne nestabilnosti kao što su ispadanje blokova veličine do 0,5 m<sup>3</sup> te mehanička erozija dezintegriranih dijelova stijenske mase. Od mogućih vrsta slomova na stijenskom zasjeku autor navodi isključivo prevrtanje. Na temelju informacija prikupljenih terenskim kartiranjem te primjenom daljinskih istraživanja Đikić (2016) je predložio moguće mjere sanacije stijenskog zasjeka Špičunak.

### 3.4. Pilot područje 4 – stijenski zasjek u naselju Lokve

Pilot područje 4 predstavlja stijenski zasjek u naselju Lokve u Gorskom kotaru koji se nalazi uz lokalnu cestu koja vodi od centra mjesta prema naselju Homer i Lokvarskom jezeru (slika 3.22). Naselje Lokve nalaze se na oko 6 km zračne udaljenosti JZ od grada Delnice te oko 2 km I od Lokvarskog jezera pri čemu se istraživani stijenski zasjek nalazi u podnožju blaže nagnutih padina, oko 400 m Z od samog centra Lokvi te oko 2 km I od stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak, opisanog u prethodnom poglavlju. Ukupna duljina stijenskog zasjeka je oko 160 m, dok mu je površina oko 9000 m<sup>2</sup> (0,9 ha). Za razliku od prethodno opisanih pilot područja izgrađenih od karbonatnih stijena, ovaj stijenski zasjek izgrađen je od izmjene klastičnih i karbonatnih stijena (slika 3.23) te je upravo radi drugačijeg geološkog okoliša ovo područje izabrano za razvoj i testiranje metodologije za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu.



**Slika 3.22.** Geografski položaj stijenskog zasjeka u Lokvama prikazanog na digitalnom ortofoto snimku snimljenom 2011. godine.



**Slika 3.23.** Pogled prema SI na zapadni dio istraživanih stijenskih kosina u Lokvama.

### 3.4.1 Prirodne značajke istraživanih područja

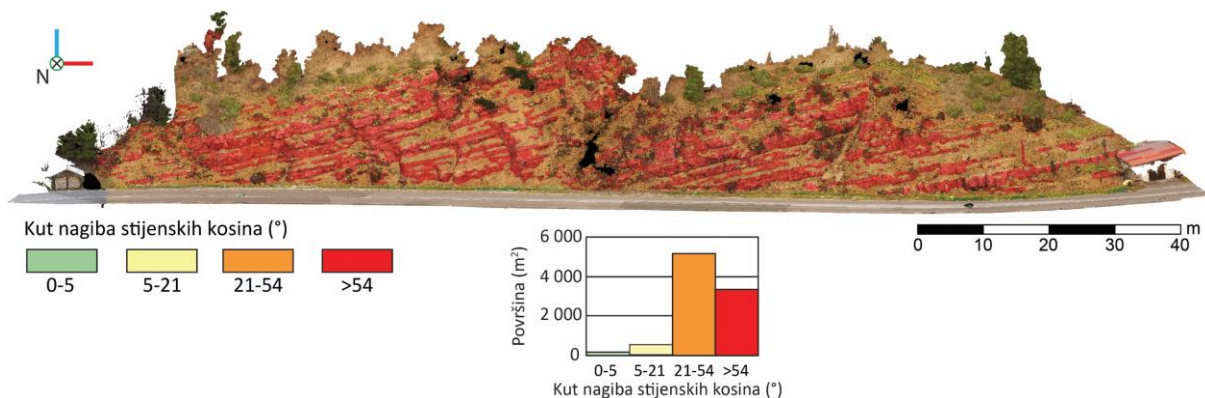
#### 3.4.1.1 Geomorfološke značajke

Područje istraživanja i okolica, kao i prethodno opisani stijenski zasjek na lokaciji Špičunak, pripadaju subgeomorfološkoj regiji Fužinsko-lokvarsko brdsko-zavalsko područje (Bognar, 2001). Padina, u čijem podnožju se nalazi istraživani stijenski zasjek, pruža se ZSZ-IJI, a generalni smjer nagiba joj je prema JJZ. Najviši vrh padine nalazi se na oko 820 m n.m., dno padine nalazi se uz potok Lokvarka koji se nalazi na oko 720 m n.m, dok se prometnica uz istraživani stijenski zasjek nalazi na oko 723 m n.m. Prosječni kut nagiba padine, u čijem podnožju se nalazi istraživani stijenski zasjek, je u rasponu od 15° iznad istočnog dijela do 41° iznad zapadnog dijela zasjeka, što ju prema Strahler (1950) svrstava u slabo do strmo nagnute padine. Uz odrone, na širem području istraživanja od aktivnih geomorfoloških procesa prisutni su osipavanje, spiranje i jaružanje na stijenskim kosinama izgrađenim od klastičnih i karbonatnih naslaga i naslagama pokrivača.

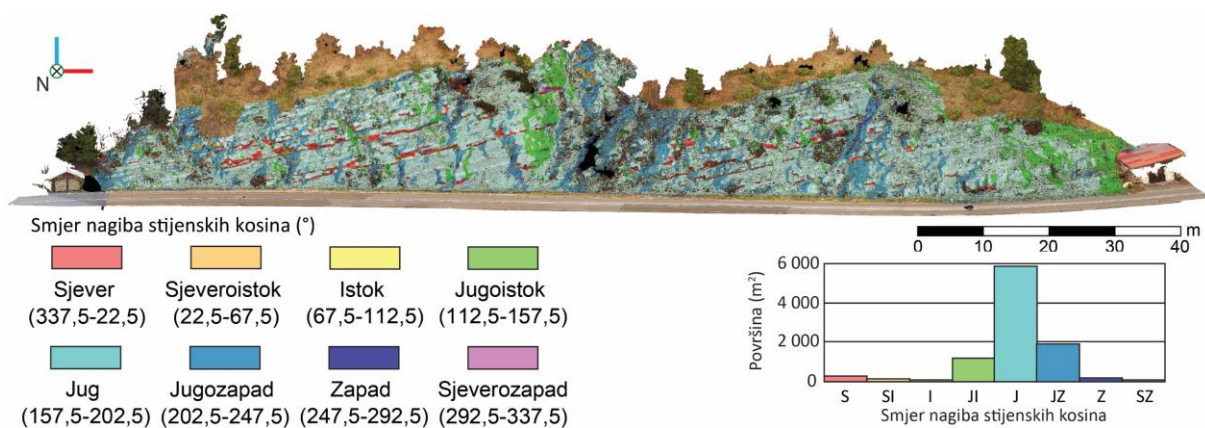
Visina istraživanih stijenskih zasjeka kreće se u rasponu od 12 m na Z dijelu, 20 m u središnjem do 7 m na I dijelu. Analizom kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina (slika 3.24) te klasifikacijom padina u specifične morfološke jedinice prema Strahler (1950), utvrđeno je da najveću površinu područja istraživanja (56,1%, 5176 m<sup>2</sup>) zauzimaju strmo nagnute padine, nagiba 21-54°. Litice, nagiba većeg od 54°, zauzimaju 36,2% istraživanih područja (3339 m<sup>2</sup>), dok blago nagnute padine, nagiba 5-21°, obuhvaćaju 6,3% (578 m<sup>2</sup>) površine istraživanih



područja. Najmanji dio površine obuhvaćaju ravnice nagiba 0-5° (1,4%, 131 m<sup>2</sup>). Analizom smjera nagiba (slika 3.25) utvrđeno je da najveću površinu istraživanog stijenskog zasječka čine kosine nagnute u smjeru J (5881 m<sup>2</sup>, tj. 63,7,8%), odnosno u smjeru prometnice. Značajniju površinu zauzimaju i kosine smjera nagiba prema JZ (1911 m<sup>2</sup>, tj. 20,7%) i JI (865m<sup>2</sup>, tj. 9,4%), dok kosine nagnute u ostalim smjerovima zauzimaju manje ili oko 1% (<132 m<sup>2</sup>) površine istraživanih kosina uz izuzetak onih nagnutih u smjeru S (240 m<sup>2</sup>) koje iznose 2,6% površine. Stijenske kosine sa smjerom nagiba prema S ukazuju na mogućnost prevjesa, pri čemu je njihov prosječni kut nagiba 77°. Prosječni kut nagiba kosina, nagnutih prema J i JZ i koje zauzimaju najveću površinu je 48°, dok kod onih sa smjerom nagiba prema JI prosječni kut nagiba iznosi 42°. Najmanji prosječni kut nagiba imaju kosine sa smjerom nagiba prema I i SI koji iznosi 26°, odnosno 29°. Odroni s ovih kosina mogu predstavljati potencijalnu opasnost za prometnu infrastrukturu, vozila i ljude na prometnici s obzirom da najveću površinu zauzimaju kosine koje su nagnute u smjeru prometnice i da prosječni kut nagiba kosina koji su djelomično u prevjesu iznosi 77°, čime je povećana mogućnost za nastanak odrona na ovim kosinama.



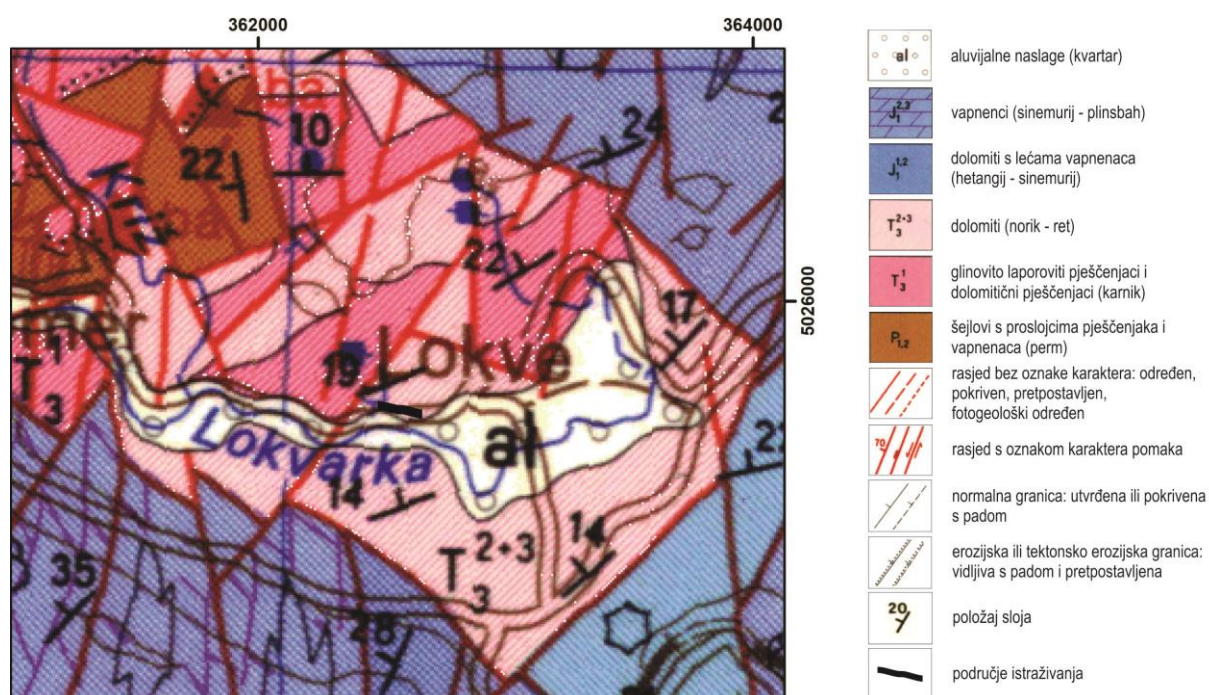
**Slika 3.24.** Raspodjela vrijednosti kuta nagiba istraživanih stijenskih kosina u naselju Lokve dobivenih iz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka.



**Slika 3.25.** Raspodjela vrijednosti smjera nagiba istraživanih stijenskih kosina u naselju Lokve dobivenih iz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka.

### 3.4.1.2 Geološke značajke

Geološka građa šireg područja istraživanja jednaka je onoj opisanoj u poglavlju 3.3.1.2. s obzirom na blizinu istraživanih kosina i prisutnost istih litostratigrafskih jedinica. Prema Osnovnoj geološkoj karti SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet, 1984) istraživani stijenski zasjek bi trebao biti izgrađen od glavnog dolomita noričko-retske starosti (slika 3.26), ali je terenskim kartiranjem utvrđeno da ga izgrađuje izmjenjena klastičnih i karbonatnih naslaga karničke starosti (slika 3.23). Šćavničar i Šušnjara (1967) navode da klastične naslage karničke starosti na području Lokvi i okolice izgrađuju crveni, crvenoljubičasti i zelenkastosivi klastiti koji se u vršnim dijelovima slijeda postupno izmjenjuju s dolomitima. Pavić (2018) je proveo detaljna petrografska i mineraloška istraživanja na stijenskom zasjeku u Lokvama i utvrdio je da stijensku masu na istraživanom zasjeku izgrađuje ritmička izmjenjena sitno do srednje zrnastih klastičnih naslaga i dolomita pri čemu u vršnom dijelu zasjeka postupno opada prisutnost klastičnih naslaga, a prisutni su isključivo dolomiti. Autor navodi da klastične naslage čine peliti, najvjerojatnije muljnjac i dolomitični muljnjac te pješčenjac klasificirani kao areniti i grauvske. Dolomiti su determinirani kao rano- ili kasnodijagenetski, tj. dolobiolititi, dolobiomikriti, dolomikriti i dolobiospariti. Također, Pavić (2018) navodi da je debljina slojeva klastičnih naslaga od 20-122 cm, pri čemu su slojevi pješčenjaka najdeblji, dok je debljina slojeva dolomita od 35-145 cm.



**Slika 3.26.** Prikaz lokacije istraživanih stijenskih kosina (crna linija) na uvećanom isječku Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet., 1984).

Prema Savić i Dozet (1984) uz zapadni rub istraživanog zasjeka nalazi se rasjed pružanja SI-JZ nepoznatog karaktera pomaka duž kojeg se u kontaktu nalaze klastične naslaga karničke starosti SZ od rasjeda i glavni dolomit noričko-retske starosti JZ od rasjeda (slika 3.26). Ova geološka granica utvrđena je prilikom terenskog kartiranja, ali nije u potpunosti jasno radi li se o rasjednom kontaktu ili koninuiranom prijelazu s obzirom na prekrivenost terena vegetacijom. Također, položaj litostratigrafskih jedinica je obrnut u odnosu na ono što prikazuju Savić i Dozet (1984) kao što je već ranije spomenuto. Na kontaktu ovih litostratigrafskih jedinica nalazi se i stalni izvor pitke vode. Prema Pavić (2018) na istraživanom stijenskom zasjeku utvrđen je reversni rasjed pružanja SI-JZ s vergencijom prema JI koji je potvrđen i prilikom terenskog kartiranja pri čemu je pomak duž rasjeda oko 1 m u smjeru JI. Također, prilikom terenskog kartiranja utvrđeno je i nekoliko manjih sin-sedimentacijskih rasjeda s pomakom od nekoliko centimetara.

Hidrogeološki uvjeti na području istraživanja uvjetovani su litološkom građom, strukturnim odnosima i stupnjem trošnosti. Pješčenjaci i peliti su srednje do intenzivno trošni, a peliti imaju i visoki stupanj razlomljenosti što ukazuje na srednju do visoku međuzrnsku i pukotinsku poroznost. Dolomiti su svježi do srednje trošni, djelomično razlomljeni te zbog navedenog imaju nisku do srednju pukotinsku poroznost. Prilikom terenskog kartiranja utvrđena je pojava curenja i kapanja vode duž granica različitih litotipova, dok je pojačano vlaženje primijećeno na površinskim dijelovima izgrađenim od pelita. Navedeno ukazuje da se otjecanje podzemne vode odvija kroz pukotinske sustave duž kontakta pelita i dolomita te međuzrnski kroz same pelite. Također, duž geološke granice između naslaga karničke i noričko-retske starosti u blizini zapadne granice istraživanog zasjeka nalazi se stalni izvor vode, koji vjerojatno drenira većinu podzemne vode u zoni istraživanog zasjeka, dok ostatak otječe prema potoku Lokvarka.

Za istraživani stijenski zasjek nisu dostupni podaci o prijašnjim inženjerskogeološkim istraživanjima, a prema Osnovnoj inženjerskogeološkoj karti SFRJ M 1:300.000 (Čubrilović i dr., 1967) područje istraživanja spada u inženjerskogeološku jedinicu kriptokristalastih masivnih i debelouslojenih dolomita koji su ispucani i okršeni, a trošenjem stvaraju dolomitski pijesak koji je podložan eroziji.

## 4. METODE ISTRAŽIVANJA

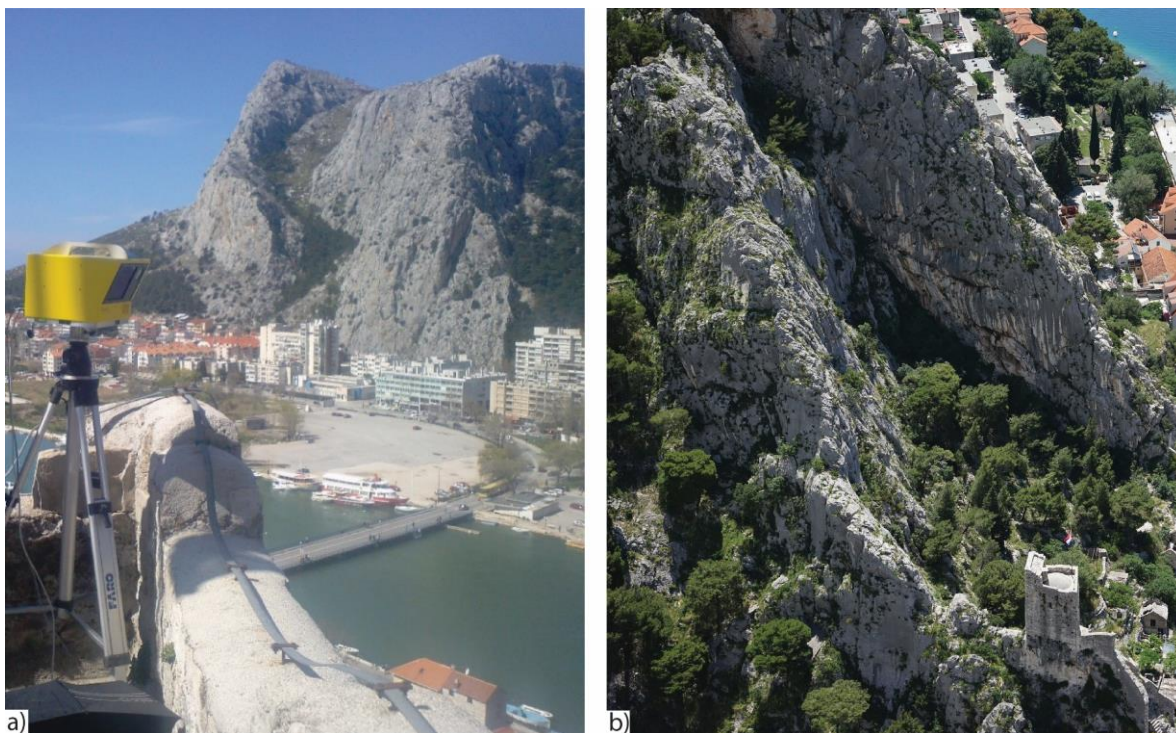
U ovom poglavlju opisane su metode snimanja istraživanih stijenskih kosina bespilotnom letjelicom i terestričkim laserskim skenerom te izrada 3D digitalnih modela površina stijenskih kosina i oblaka točaka. U nastavku su opisane korištene metode određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, algoritam za automatizirano određivanje setova diskontinuiteta kao i statističke analize podataka o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta. Opisana je i metoda izdvajanja različitih vrsta stijena na temelju intenziteta povratnog signala lasera na području stijenskog zasjeka u Lokvama te je ukratko prikazana vizualna metoda određivanja zona različitog stupnja trošnosti stijenske mase na digitalnim modelima. U središnjem dijelu poglavlja opisana je metoda za određivanje kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona i provedene analize vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnice diskontinuiteta za svaku ćeliju digitalnog modela. U završnom dijelu poglavlja opisani su korišteni uvjeti i jednačbe za provedbu prostornih kinematičkih analiza na normalno nagnutim dijelovima kosine te dijelovima kosine u prevjesu. Također, opisan je razvoj metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima, utemeljene na vjerojatnostima unija događaja te njena verifikacija na sintetičkoj kosini - polusferi. Poglavlje završava s opisom algoritma *ROCKS*, razvijenog za potrebe automatizacije postupka izračuna indeksa podložnosti za planarni, klinasti i slom prevrtanjem te indeksa podložnosti odronima na temelju integracije statističkih i prostornih kinematičkih analiza.

#### 4.1. Fotogrametrijsko snimanje bespilotnom letjelicom i terestričko lasersko skeniranje stijenskih kosina

Kako bi se precizno odredile geometrijske značajke stijenske mase i diskontinuiteta, moguće vrste slomova na cijeloj površini stijenske mase te u konačnici procijenila podložnost stijenskih kosina odronima potrebno je provesti detaljno kartiranje stijenske mase. Tradicionalnim terenskim kartiranjem to najčešće nije moguće s obzirom da je u većini slučajeva veći dio površine stijenskih kosina nepristupačan, a alpinističko kartiranje je vremenski vrlo zahtjevno i često ekonomski neisplativo. Radi toga, istraživanja u ovom radu provedena su na temelju podataka dobivenih tehnikama daljinskih istraživanja, u okviru kojih su izrađeni digitalni modeli stijenskih kosina za sva pilot područja. Digitalni modeli oblaka točaka dobiveni su snimanjem terestričkim laserskim skenerom (TLS-a) i/ili fotogrametrijskim snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom čime je omogućen pristup svakom dijelu istraživanih stijenskih kosina.

Snimanje pilot područja stijenskih kosina iznad grada Omiša provedeno je 2016. godine u okviru Izvedbenog projekta Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša (Arbanas i dr., 2016). Prilikom snimanja korišteni je *Optech ILRIS-3D Time of Flight* (TOF) TLS (slika 4.1a) i bespilotna letjelica (slika 4.1b) samostalne izrade čije su detaljne specifikacije navedene u radu Kordić i dr. (2019). Brzina izmjere *Optech ILRIS-3D* TLS-a iznosi 2000 točaka u sekundi s dometom od 3-800 m. Preciznost uređaja prilikom snimanja sa 100 m udaljenosti iznosi 7 mm. Stijenske kosine su TLS-om snimane su s nekoliko stajališta na udaljenosti većoj od 100 m te s nekoliko stajališta na manjim udaljenostima koje su se nalazile u starom gradu i u podnožju Omiške Dinare. Pomoću bespilotne letjelice snimljeni su svi dijelovi istraživanih stijenskih kosina koje nije bilo moguće snimiti s TLS-om. Obradom snimaka dobiven je jedinstven model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina visoke rezolucije (slika 4.2) koji sadrži oko 280 milijuna točaka s prostornom rezolucijom od oko 4242 točka/m<sup>2</sup> i prosječnim razmakom između točaka oko 2 cm. Svaka točka modela oblaka točaka sadrži vrijednosti koordinate X, Y i Z u HTRS96/TM koordinatnom sustavu te vrijednosti boja, odnosno RGB komponentu. S obzirom da je ovaj model oblaka točaka preuzet, nije bilo moguće utjecati na parametre snimanja. Također, model oblaka točaka dobiven dostavljen je u XYZ formatu koji osim spomenutih vrijednosti koordinata i RGB vrijednosti sadrži i intenzitet lasera, ali nije bilo moguće odrediti da li su vrijednosti intenziteta već ranije korigirane što onemogućava njihovo korištenje. Sukladno tome ovaj model je bilo moguće koristiti isključivo za određivanje geometrijskih značajki stijenskih kosina i diskontinuiteta.





**Slika 4.1.** Fotografije: (a) terestričkog laserskog skeniranja Omiške Dinare i (b) dijela Omiške Dinare snimljenog bespilotnom letjelicom.



**Slika 4.2.** Izrađeni model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina Omiške Dinare vizualiziran u *AutoCAD*-u.

Snimanje pilot područja stijenskih kosina koje se nalaze uz županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Oklaj iznad jezera Brljan, provedeno je u svibnju 2015. godine za potrebe izrade Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015). Prilikom snimanja korišteni je *Faro Focus 330* TLS i bespilotna letjelica samostalne izrade čije su detaljne specifikacije navedene u radu Kordić i dr. (2019). *Faro Focus 330* TLS ima domet od 0,6-330 m, pri čemu mu brzina izmjere seže do 976 000 točaka/s. Preciznost uređaja prilikom snimanja sa 25 m udaljenosti iznosi +/- 2 mm, dok je rezolucija snimke 70 MPx. Stijenske kosine su pomoću navedenog TLS-a snimane s 30 stajališta, tj. u prosjeku svakih 30 m istraživanog zasjeke čime su obuhvaćeni zaszeci uz prometnicu te s prometnice vidljivi dijelovi prirodnih stijenskih kosina iznad njih. Viši dijelovi stijenskih kosina koji nisu u potpunosti snimljeni TLS-om snimljeni su bespilotnom letjelicom, a obradom snimaka dobiven je jedinstven visoko-rezolucijski model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina (slika 4.3) koji sadrži oko 120 milijuna točaka, s prostornom rezolucijom od 4800 točka/m<sup>2</sup> i prosječnim razmakom između točaka od oko 1 cm. Svaka točka modela oblaka točaka sadrži vrijednosti koordinate X, Y i Z u HTRS96/TM koordinatnom sustavu, vrijednosti boja, odnosno RGB komponentu i vrijednosti intenziteta lasera.

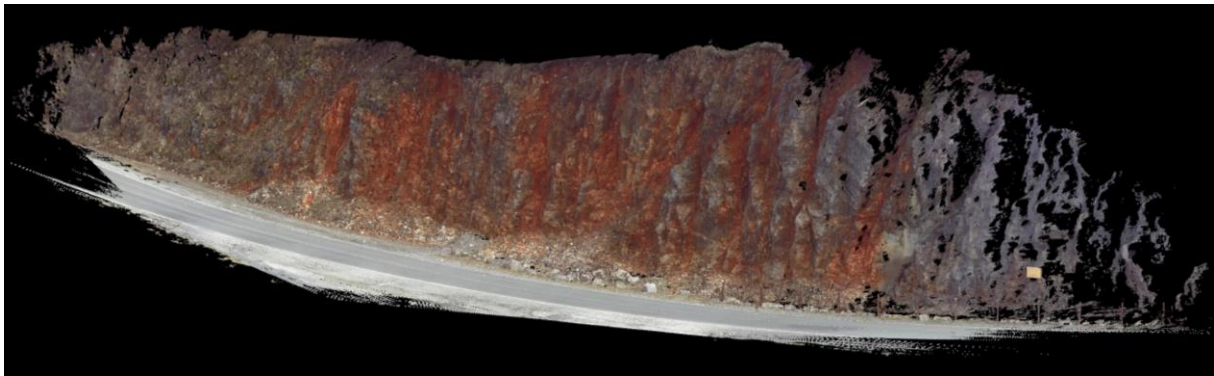
Terestričko lasersko skeniranje pilot područja stijenskog zasjeke Špičunak provedeno je u svrhu izrade diplomskog rada Primjena tehnologije oblaka točaka za projektiranje sanacije stijenske kosine Špičunak (Đikić, 2016). Prilikom snimanja stijenskog zasjeke korišten je *Faro Focus 3D s120* TLS s dometom od 0,6-120 m i brzinom izmjere od 970 000 točaka/s. Preciznost izmjere navedenog uređaju iznosi +/- 2mm prilikom snimanja s 10 i 25 m udaljenosti od objekta snimanja s rezolucijom od 70 MPx. Stijenske kosine su pomoću navedenog TLS-a snimane s osam stajališta s prosječnom udaljenosti od 10 m čime je obuhvaćen cijeli istraživani zasjek.



**Slika 4.3.** Model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina Brljan vizualiziran u računalnom programu *CloudCompare*.



Obradom snimaka sa svih stajališta dobiven je jedinstven visoko-rezolucijski model oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina (slika 4.4) koji sadrži oko 24 milijuna točaka s prostornom rezolucijom od oko 2181 točka/m<sup>2</sup> i prosječnim razmakom između točaka od oko 1 cm. Svaka točka modela oblaka točaka sadrži vrijednosti koordinate X, Y i Z u MGI Balkans 5 koordinatnom sustavu, vrijednosti boja, odnosno RGB komponentu i vrijednosti intenziteta lasera. Navedeni model oblaka točaka dobiven terestričkim laserskim skeniranjem preuzet je u izvornom obliku od autora te je korišten i obrađivan za potrebe izrade ovog rada uz njegovo dopuštenje.



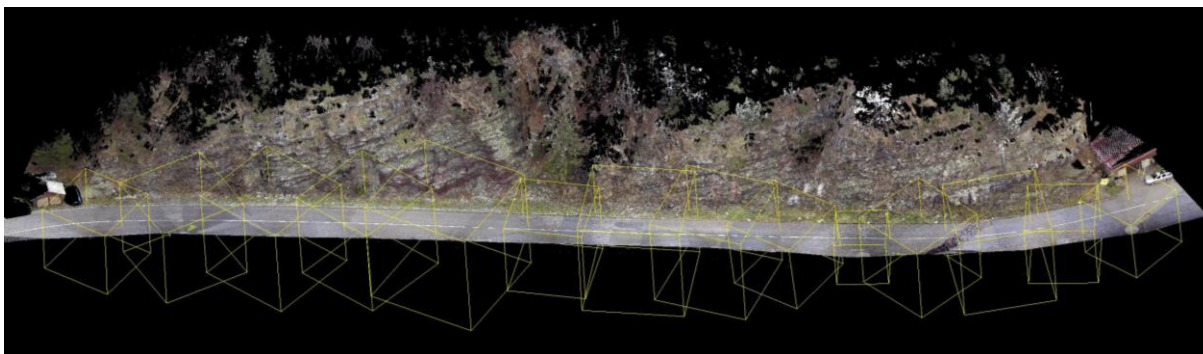
**Slika 4.4.** Model oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjeke na lokaciji Špičunak vizualiziran u računalnom programu *CloudCompare*.

Na pilot području u Lokvama provedeno je terestričko lasersko skeniranje istraživanog stijenskog zasjeke i snimanje iz zraka pomoću bespilotne letjelice. Navedena snimanja provela je geodetska tvrtka U.O.I.G. Vidmar isključivo u svrhu izrade ovog rada, a prije samog snimanja definirani su svi parametri snimanja, obrade snimaka i izrade visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka. Terestričko lasersko skeniranje provedeno je s *Trimble TX5* TLS-om (slika 4.5). Njegov domet iznosi od 0,6-120 m, dok mu je brzina izmjere 976.000 točaka/s. Preciznost izmjere navedenog uređaju iznosi +/- 2 mm s 10 i 25 m udaljenosti od objekta snimanja dok je maksimalna rezolucija snimaka 70 MPx. Istraživani stijenskih zasjeke sniman je sa 14 stajališta s prosječnim razmakom između stajališta od 10 m čime su postignuta višestruka preklapanja pojedinih snimaka (slika 4.6). Visoko-rezolucijski model oblaka točaka stijenskog zasjeke u Lokvama, dobiven obradom snimaka terestričkog laserskog skeniranja, sadrži oko 407 milijuna točaka, tj. oko 29 milijuna točaka po stajalištu snimanja. Prostorna rezolucija modela oblaka točaka je oko 45 000 točaka/m<sup>2</sup>, pri čemu prosječni razmak između točaka iznosi oko 1 mm. Svaka točka modela sadrži vrijednosti koordinate X, Y i Z u HTRS96/TM koordinatnom sustavu, vrijednosti boja, odnosno RGB komponentu, udaljenost točke od uređaja, orijentaciju vektora normale te vrijednosti intenziteta lasera



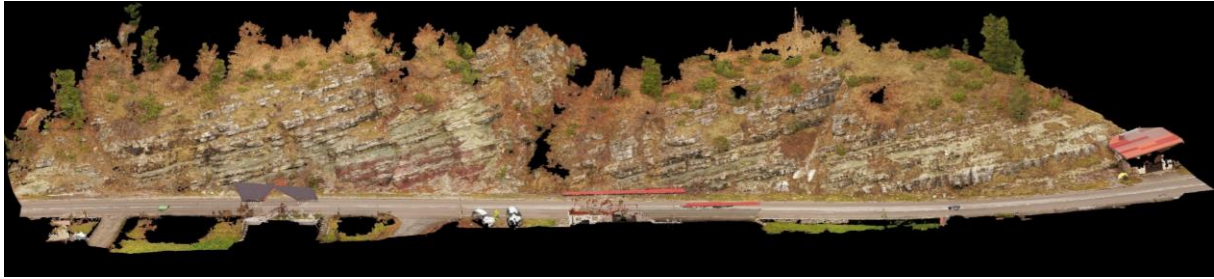
**Slika 4.5.** Fotografija terestričkog laserskog skeniranja stijenskog zasjea u Lokvama s *Trimble TX5 TLS*-om.

Uz terestričko lasersko skeniranje stijenskog zasjea u Lokvama provedeno je i snimanje iz zraka bespilotnom letjelicom *DJI Phantom 4 Pro*. Navedena letjelica na troosnom gimbalu ima montiranu kameru s 1-inčnim senzorom i mehaničkim okidačem, maksimalne rezolucije od 20 MPx, koja omogućava snimanje videa te fotografija visoke rezolucije. Maksimalno vrijeme letenja na jednoj bateriji iznosi 30 minuta što je bilo dovoljno za snimanje stijenskog zasjea ovakve veličine. Osim snimanja s viših visina snimano je i s visine od 1 m kako bi se snimili dijelovi zasjea koji nisu vidljivi iz zraka poput donjih slojnih ploha i sl. Fotogrametrijskom obradom videa i fotografija snimljenih bespilotnom letjelicom dobiven je visoko-rezolucijski model oblaka točaka koji sadrži oko 158 milijuna točaka (slika 4.7).



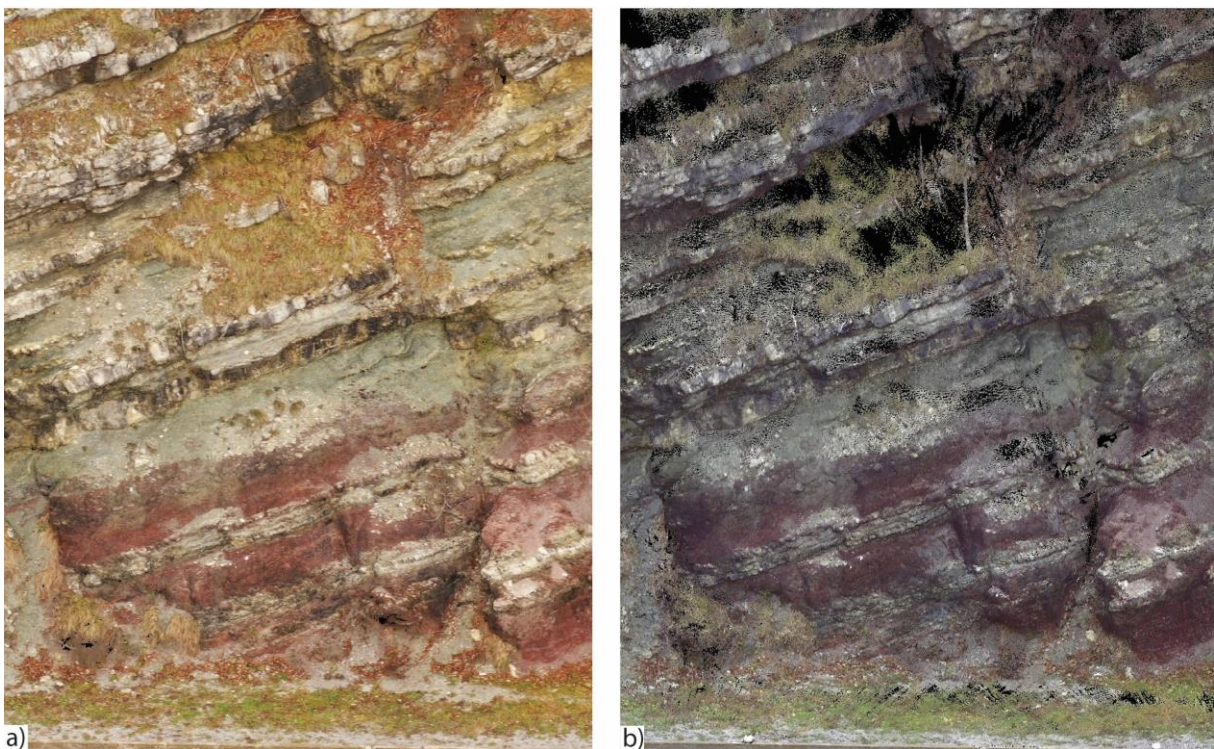
**Slika 4.6.** Prikaz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjea u Lokvama dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem s položajem svih 14 stajališta, označenih žutim kvadratima.





**Slika 4.7.** Prikaz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka istraživanog stijenskog zasjeke u Lokvama dobivenog snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom *DJI Phantom 4 Pro*.

Prostorna rezolucija modela oblaka točaka je oko  $17\,600$  točaka/m<sup>2</sup>, pri čemu prosječni razmak između točaka iznosi oko 5 mm. Svaka točka modela sadrži vrijednosti koordinate X, Y i Z u HTRS96/TM koordinatnom sustavu i vrijednosti boja, odnosno RGB komponentu. Usporedba modela oblaka točaka dobivenih terestričkim laserskim skeniranjem i snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom prikazana je na slici 4.8. Model dobiven fotogrametrijom (slika 4.8a) vizualno bolje izgleda od onog dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem (slika 4.8b), ali potonji sadrži više informacija i geometrijski je precizniji na što ukazuju i vidljivo oštrije bridovi. Analiza oba modela odvojeno te usporedba i spajanje rezultata trebalo bi doprinijeti većoj preciznosti i objektivnosti prilikom određivanja značajki stijenske mase, geometrijskih značajki diskontinuiteta te, u konačnici, podložnosti stijenskih kosina odronima.



**Slika 4.8.** Vizualna usporedba visoko-rezolucijskih modela oblaka točaka dijela stijenskog zasjeke u Lokvama dobivenih: a) fotogrametrijskim snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom i b) TLS-om.

## 4.2. Izrada 3D digitalnih modela površine stijenskih kosina

Modeli oblaka točaka prikazani u prethodnom poglavlju, pogodni su za vizualizaciju snimljenog područja, filtriranje točaka na temelju intenziteta ukoliko su svi parametri poznati te za ručno određivanje orijentacije kosine i strukturnih elemenata postavljanjem najbolje odgovarajuće plohe (engl. *best fitting plane*) kroz grupu točaka. Polu-automatizirane i automatizirane tehnike određivanja geometrijskih značajki stijenskih kosina i diskontinuiteta nije moguće provesti direktno na modelima oblaka točaka s obzirom da svaka točka modela sadrži vrijednost vektora normale, tj. vrijednost orijentacije u prostoru, čime bi se dobila velika količina šuma. Upravo radi toga potrebno je grupirati točke sa sličnim vrijednostima orijentacije u plohe i konstruirati modele površine stijenske kosine. U poglavlju 2.2.2 navedene su i opisane najčešće korištene tehnike konstruiranja digitalnih modela površine stijenskih kosina iz literature, a u daljnjem tekstu bit će opisane tehnike i alati korišteni u ovom radu.

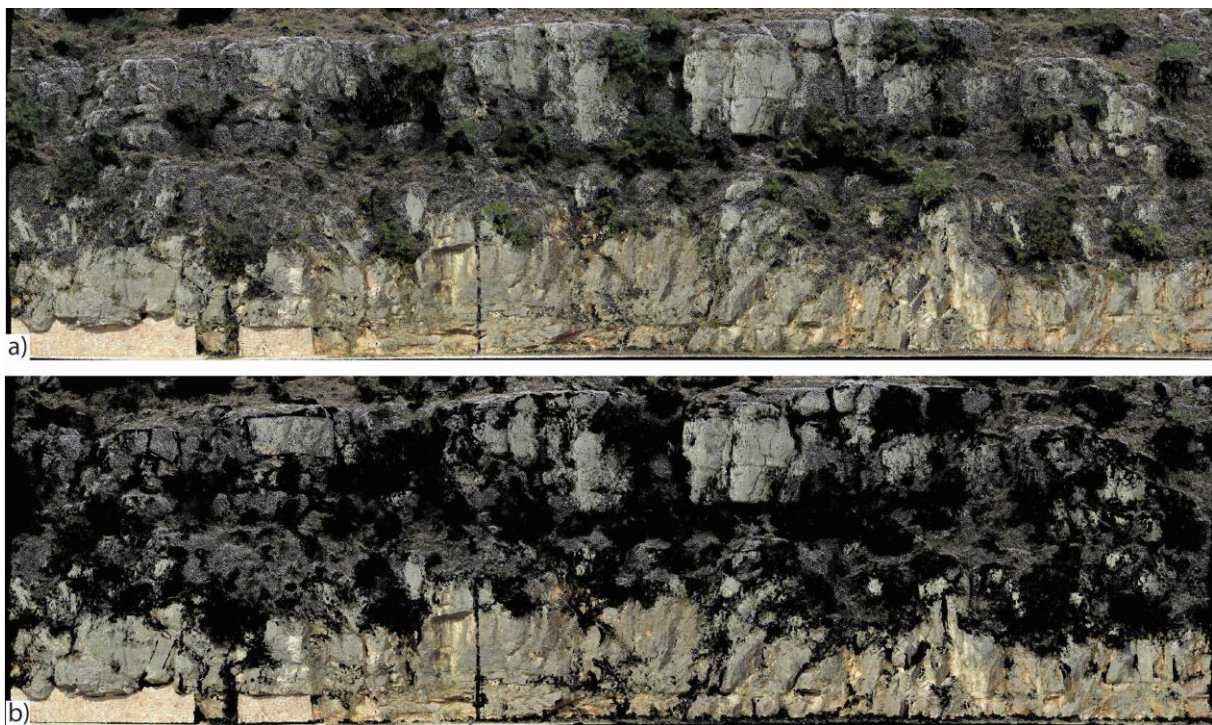
Za potrebe vizualizacije, analiziranja i modeliranja površina stijenskih kosina iz modela oblaka točaka korišteni su računalni programi *CloudCompare* (CloudCompare, 2019) i *Split FX* (Split Engineering, LCC., 2017). U navedene računalne programe model oblaka točaka uvezen je kao .xyz, .asc, .las ili .e57 datoteka ovisno o pilot području i metodama daljinskih istraživanja kojima je model izrađen. Datoteke formata .xyz i .asc. uglavnom sadrže samo informacije o prostornom položaju i boji točaka, .las datoteka sadrži dodatno i vrijednosti intenziteta lasera dok .e57 datoteka sadrži uz sve ranije navedeno i lokaciju TLS-a prilikom skeniranja, što je važno prilikom korekcije intenziteta.

Kako bi bilo moguće izraditi pouzdani model površine stijenskih kosine iz modela oblaka točaka, prvo je potrebno ukloniti sve elemente koji bi mogli predstavljati šumove na modelu površine poput vegetacije, građevina, cesta i sl. Objekti i prometnice iz modela oblaka točaka uklanjani su ručno, brisanjem točaka koje ne pripadaju stijenskom zasjeku, dok su za potrebe uklanjanja vegetacije iz modela oblaka točaka korištene ručne i polu-automatizirane metode sadržane u računalnom programu *CloudCompare* (CloudCompare, 2019). Polu-automatizirano uklanjanje vegetacije provedeno je pomoću *qCanupo* klasifikatora (Brodu i Lague, 2012) koji predstavlja metodu strojnog učenja u kojoj se model oblaka točaka trenira s obzirom na ulazne parametre. Ulazni parametri za treniranje modela oblaka točaka istraživanih kosina bili su izdvojeni modeli oblaka točaka koji predstavljaju isključivo stijensku masu i koji predstavlja isključivo vegetaciju na određenom testnom području. Također, bilo je potrebno definirati broj susjednih točaka u modelu koji se analizira te mjerilo promatranja. Treniranjem testnog dijela modela *qCanupo* klasifikatora dobiveni su parametri koji definiraju vegetaciju,



odnosno stijensku masu te je izrađen klasifikator na temelju koje je analiziran cijeli model oblaka točaka kako bi se izdvojile točke koje predstavljaju vegetaciju. Klasifikatori su izrađeni za svako pilot područje, a njihovom primjenom uspješno se izdvoji oko 60-80% točaka koje predstavljaju vegetaciju. Primjer izdvajanja točaka koje predstavljaju vegetaciju pomoću *qCanupo* klasifikatora prikazan je na slici 4.9. Preostale točke koje predstavljaju vegetaciju, a nisu uklonjene navedenom polu-automatiziranim metodom, uklonjene su ručno brisanjem iz modela.

Modeli oblaka točaka očišćeni od vegetacije i ostalih stranih objekata korišteni su kao ulazni podatak za izradu modela površina stijenske mase. U svrhu izrade što preciznijeg i kvalitetnijeg modela površine testirane su različite metode interpolacije i različiti ulazni parametri koje je moguće definirati u računalnim programima *Split FX* i *Cloud Compare*. *Split FX* korišten je samo za stijenske kosine iznad grada Omiša i na lokaciji Brljan, dok je *CloudCompare* korišten na svim modelima oblaka točaka. Proces generiranja modela površine stijenske mase u *Split FX*-u započinje pravilnim orijentiranjem modela oblaka točaka u odnosu na „instrument“ koji predstavlja pogled s kojeg su vidljive sve točke. Na ovaj način se „pomaže“ algoritmu pri izradi modela površine kako bi pravilno odredio smjer vektora normala svih točaka. S obzirom da iz jednog pogleda najčešće nisu vidljive sve točke, modele oblaka točaka je bilo potrebno podijeliti na manje dijelove te za svaki dio zasebno generirati model površine.

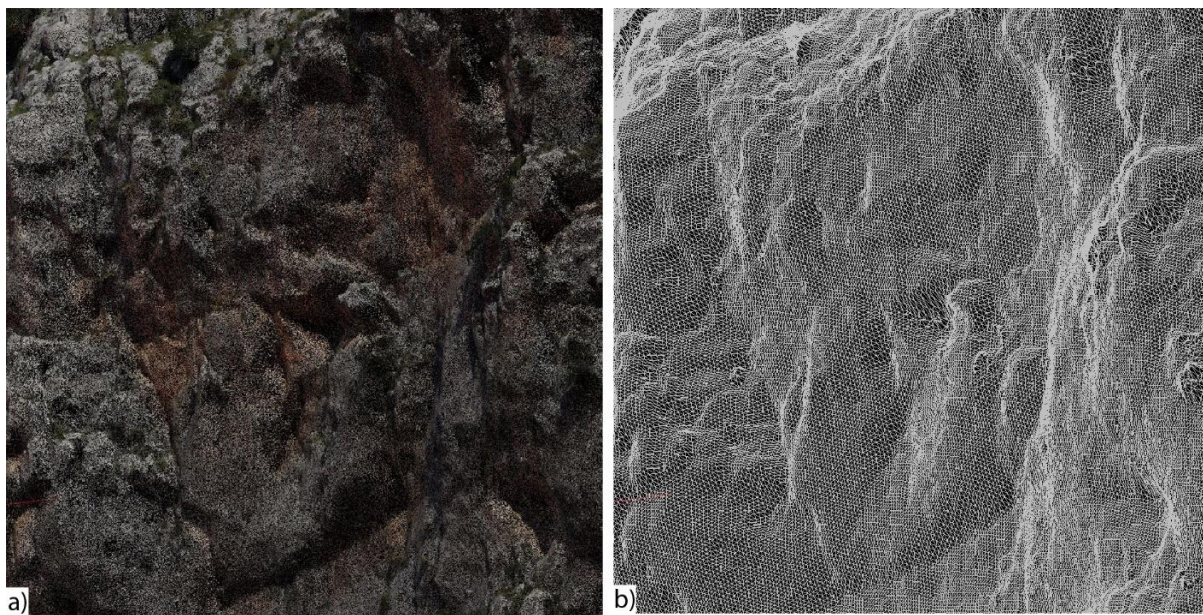


**Slika 4.9.** Usporedba dijela modela oblaka točaka stijenskih kosina na lokaciji Brljan: a) u izvornom obliku i b) nakon primjene *qCanupo* klasifikatora i uklanjanja točaka koje predstavljaju vegetaciju.

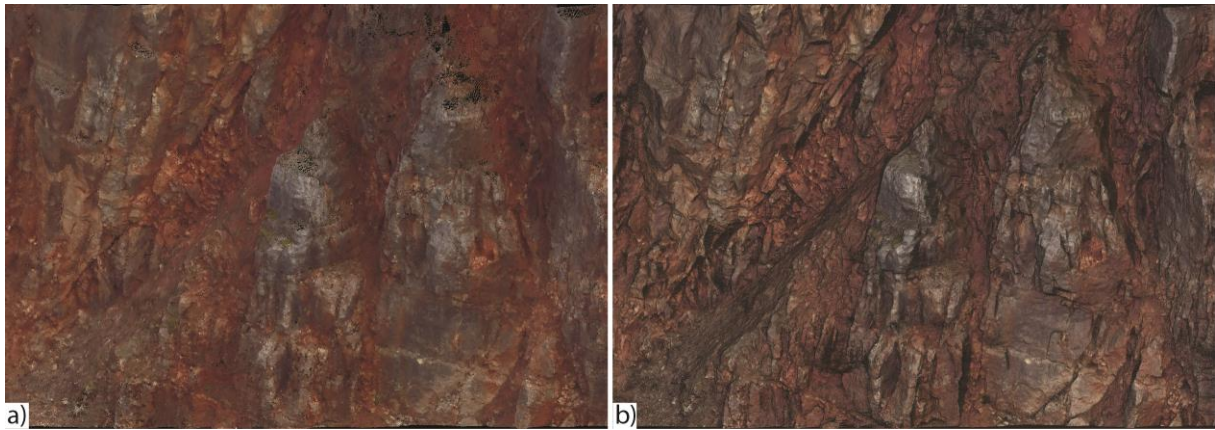


Za svaki dio podijeljenog modela oblaka točaka pokrenut je algoritam za izradu modela površine koji se u *Split-FX*-u naziva *mesh*, a predstavlja poligonalni model površine dobiven 2D pravilnim omrežavanjem (*engl. gridding*) i Delaunay-evom triangulacijom. Prema Kemeny i Donovan (2005), ovom tehnikom izrađuje se virtualna ploha koja je paralelna generalnom pružanju kosine te se interpoliraju vrijednosti udaljenosti između svakog čvorišta virtualne plohe i oblaka točaka koristeći Delaunay-evu triangulaciju. Rezultat algoritma je 2,5D model površine stijenske mase predstavljen mrežom nepravilnih trokuta (slika 4.10). Prilikom izrade „*mesha*“ moguće je kontrolirati parametre interpolacije tj. unaprijed definirati broj trokuta po jedinici površine. Veći broj trokuta rezultira vjernijim prikazom i oštrijim bridovima, ali uključuje više šumova te je potrebno više vremena za interpolaciju. Manji broj trokuta smanjuje vrijeme interpolacija i šumove, ali i „zaglađuje“ površinu te time podcjenjuje vrijednosti i oštre bridove. Najbolji modeli površine za kosine iznad grada Omiša i stijenskih kosina na lokaciji Brljan, odnosno optimalan omjer potrebnog vremena, šumova i zaglađenosti dobiven je s gustoćom od 10 000 trokuta/m<sup>2</sup>.

Istom metodom kao i u *Split-FX*-u, model površine stijenske mase može se izraditi i u *CloudCompare*-u pomoću klasične Delaunay-eve triangulacije, ali za razliku od 2,5D modela površine u jednoj boji dobivenog u *Split FX*-u, rezultat u *CloudCompare*-u predstavlja 3D model predstavljen obojanim *meshom* (slika 4.11). Izrada ovog modela je vrlo brza i traje svega par sekundi, pri čemu ulazne parametre predstavljaju pravilno orijentirani vektori normala svake točke modela oblaka točaka i maksimalna duljina stranica trokuta.



**Slika 4.10.** Prikaz: a) modela oblaka točaka dijela stijenskih kosina iznad grada Omiša i b) pripadajućeg modela površine stijenske mase predstavljenog mrežom nepravilnih trokuta konstruiranog u *Split FX*-u.

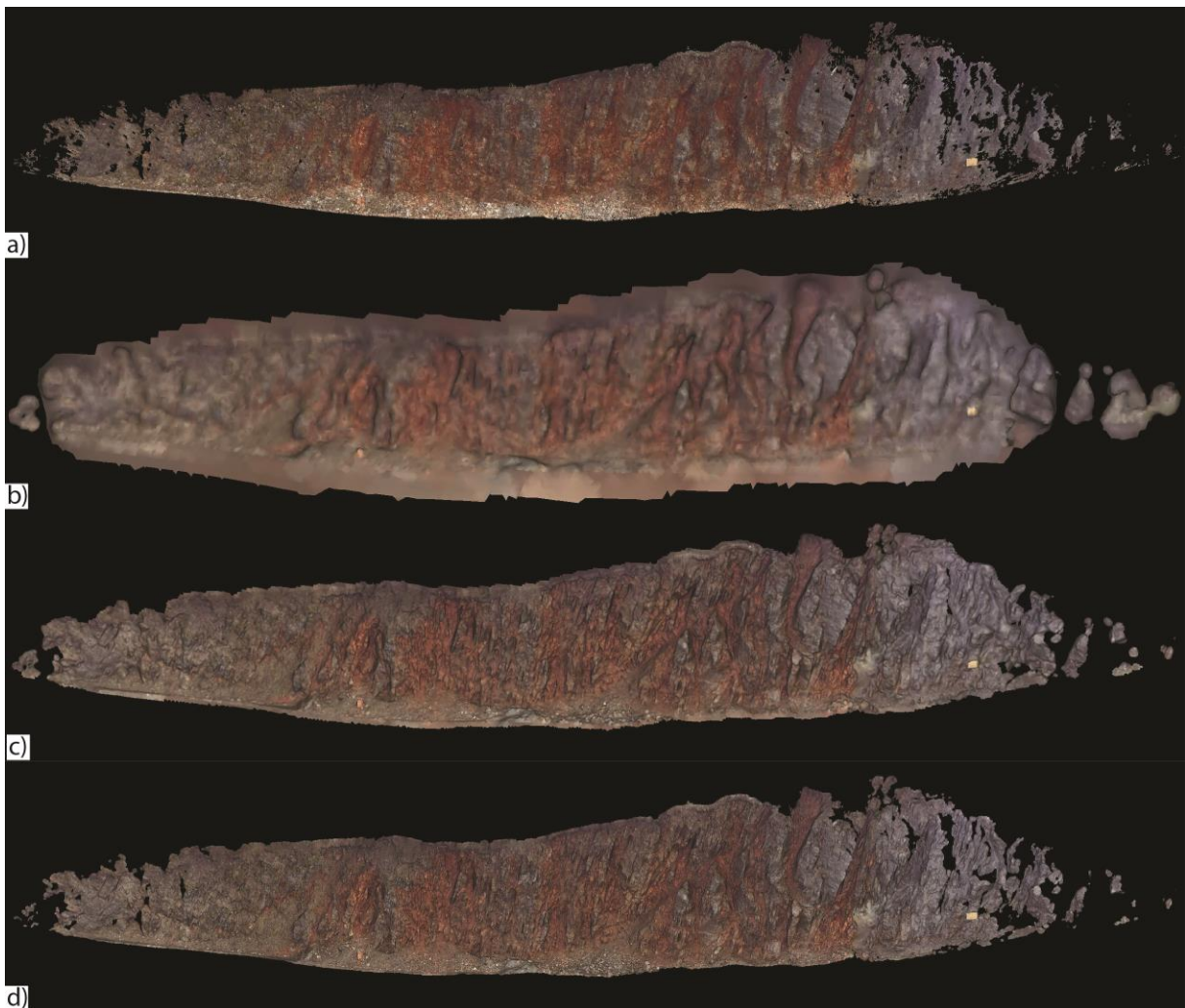


**Slika 4.11.** Prikaz: a) modela oblaka točkaka dijela stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak i b) 3D modela površine stijenske mase izrađenog metodom Delaunay-eve triangulacije u *CloudCompare*-u.

Prvi korak prilikom izrade modela površine stijenske mase u *CloudCompare*-u je definiranje pravilne orijentacije vektora normala svake točke modela oblaka točkaka. Ovaj postupak provodi se automatizirano postavljajući najbolje odgovarajuće plohe triangulacijom određenog broja susjednih točkaka koje zadaje korisnik. Vektore normale algoritam konstruira ortogonalno na generirane plohe i pritom su za sve plohe definirani kutovi nagiba vektora normala. Kako bi se pravilno odredili smjerovi nagiba vektora normala koristi se algoritam Minimalnih razapinjućih stabala (König i Gumhold, 2009), gdje algoritam kreće od točke s poznatim vektorom normale i provjerava normalu svake sljedeće točke. Ukoliko smjer nagiba vektora normale nije konstantan s prethodnim točkama, algoritam ga rotira za  $180^\circ$  i postavlja u pravi položaj. Nakon što su sve normale modela oblaka točkaka pravilno orijentirane moguće je izraditi 3D model površine stijenskih kosina. Model površine stijenske mase izrađen metodom Delaunay-eve triangulacije u *CloudCompare*-u je reprezentativan za sve dijelove gdje je gustoća točkaka bila velika, dok tamo gdje to nije slučaj algoritam generira značajne šumove, što je najveći problem na rubovima modela. Upravo radi toga, u *CloudCompare*-u testiran je i algoritam *Poisson*-ove rekonstrukcije površine (Kazhdan i dr., 2006). Ulazne parametre ovog algoritma čine dubina *Octree-a* (podjela oblaka točkaka na kubne slagaline određenog volumena), broj uzorkovanja po čvorištu *Octree-a*, važnost točkaka iz oblaka prilikom interpolacije te da li je potrebna interpolacija RGB vrijednosti točkaka. Testiranjem različitih vrijednosti ulaznih parametara te usporedbom izrađenog modela površine stijenske mase s ulaznim modelom oblaka točkaka (slika 4.12), definirani su parametri na temelju kojih je postignut optimalan omjer potrebnog vremena za provedbu algoritma, dobivenih šumova i preciznosti bridova modela površine stijenske mase. Najprecizniji modeli površine stijenske mase najčešće su dobiveni postavljanjem dubine *Octree-a* na 12, broj uzorkovanja po čvorištu je iznosio 1,5, a važnost točkaka prilikom



interpolacije 8, pri čemu najznačajniju ulogu igra dubina *Octree*-a koja u biti definira rezoluciju modela (slika 4.12d). Postavljanjem *Octree*-a na dubinu 8, koja je zadana od strane *CloudCompare*-a, algoritam previše izgladi bridove modela te generira veliki broj šumova i artefakata (slika 4.12b) čime model površine stijenske mase nije reprezentativan i nije upotrebljiv. Postavljanjem *Octree*-a na dubinu 10 dobiva se poprilično realističan model površine stijenske mase koji sadrži manje šumove uz rubove modela te na područjima gdje je gustoća točaka bila mala, ali i dalje sadrži određeni broj artefakata (slika 4.12c). Iako se postavljanjem *Octree*-a na dubinu 12 generira najtočniji model površine stijenske mase, vremensko provođenje algoritma je značajno duže od onog kada je dubina *Octree*-a postavljena na 10 te je algoritam povremeno podložan smrzavanju. Upravo radi toga je za određene dijelove modela različitih pilot područja korištena dubina *Octree*-a 10.



**Slika 4.12.** Usporedba izrađenih modela površine stijenske mase algoritmom Poissonove rekonstrukcije površine s a) ulaznim modelom oblakom točaka za pilot područje stijenskog zasjeke Špičunak, gdje je: b) model površine stijenske mase s dubinom *Octree*-a 8, c) model površine stijenske mase s dubinom *Octree*-a 10 i d) model površine stijenske mase s dubinom *Octree*-a 12.

S obzirom na sve navedeno, metode interpolacije i algoritmi korišteni prilikom izrade modela površine stijenskih kosina svih pilot područja nisu bili jednoznačni te se svakom dijelu pojedinog modela trebalo pristupiti individualno. U tablici 4.1 prikazane su sve metode interpolacije i algoritmi korišteni prilikom izrade modela površina stijenskih kosina za sva pilot područja. Prilikom izrade modela površine stijenskih kosina u *Split FX*-u za pilot područja u Omišu i na Brljanu, modeli oblaka točaka su morali biti podijeljeni na najveći broj manjih dijelova, s obzirom na ranije navedenu potrebu ručnog orijentiranja modela oblaka točaka prema pogledu s kojeg se vide sve točke modela kako bi algoritam mogao pravilno odrediti orijentacije vektora normale. Prilikom izrade modela površina stijenskih kosina u *CloudCompare*-u za pilot područja u Omišu i Brljanu, modeli oblaka točaka su također morali biti podijeljeni na manje dijelove. Razlog tome su bile nedovoljno jake performanse računala zbog čega nije bilo moguće procesirati ukupan broj točaka iz modela na ukupnoj površini. Za pilot područja u Lokvama i na lokaciji Špičunak izrađeni su po jedan model za svaku lokaciju u *Cloud Compare*-u bez obzira što model u Lokvama sadrži najveći broj točaka. Na temelju izrađenih modela oblaka točaka i površina stijenske mase pristupilo se određivanju geometrijskih značajki stijenskih kosina i diskontinuiteta te određivanju značajki stijenske mase.

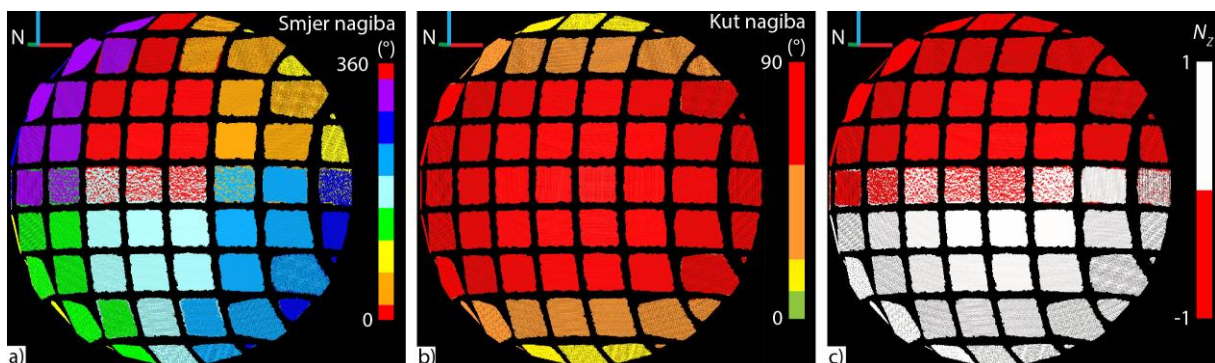
**Tablica 4.1.** Pregled korištenih računalnih programa, metoda interpolacije i korištenih algoritama prilikom izrade modela površine stijenskih kosina na svim pilot područjima.

Pilot područje	Računalni program	Metoda interpolacije	Korišteni parametri	Rezultat
Omiš	<i>Split FX</i>	Delaunay-eva triangulacija	10.000 trokuta/m <sup>2</sup>	18 2,5D modela površine stijenske mase
	<i>Cloud Compare</i>	Delaunay-eva triangulacija	duljina bridova trokuta: maksimalna	19 3D modela površine stijenske mase
Brljan	<i>Split FX</i>	Delaunay-eva triangulacija	10.000 trokuta/m <sup>2</sup>	24 2,5D modela površine stijenske mase
	<i>Cloud Compare</i>	Delaunay-eva triangulacija	duljina bridova trokuta: maksimalna	sedam 3D modela površine stijenske mase
Poissonova rekonstrukcija površine		-dubina Octree-a :10 ili 12 -broj uzorkovanja po čvorištu: 1,5 - važnost točaka: 5-8	33 modela površine stijenske mase	
Špičunak	<i>Cloud Compare</i>	Delaunay-eva triangulacija	Duljina bridova trokuta: maksimalna	jedan 3D model površine stijenske mase
		Poissonova rekonstrukcija površine	-dubina Octree-a : 12 -broj uzorkovanja po čvorištu: 1,5 - važnost točaka: 8	jedan 3D model površine stijenske mase
Lokve	<i>Cloud Compare</i>	Delaunay-eva triangulacija	Duljina bridova trokuta: maksimalna	jedan 3D model površine stijenske mase
		Poissonova rekonstrukcija površine	-dubina Octree-a : 12 -broj uzorkovanja po čvorištu: 1,5 - važnost točaka: 8	jedan 3D model površine stijenske mase

#### 4.2.1 Određivanje geometrijskih značajki stijenskih kosina i utvrđivanje prevjesa

Geometrijske značajke stijenskih kosina, tj. smjer i kut nagiba svakog dijela lica stijenske mase predstavlja vrlo važan ulazni parametar u prostornim kinematičkim analizama. Iz tog razloga neophodno je precizno odrediti orijentaciju svake plohe digitalnog modela. Također, vrlo je bitno odrediti dijelove stijenskih kosina koji se nalaze u prevjesu s obzirom da na tim dijelovima kosina postoji povećana opasnost od ispadanja i slobodnog pada stijenskih blokova. Orijehtacija lica stijenske mase određivana je pomoću vektora normala koji su generirani za svaku plohu digitalnog modela prema jednadžbama 24-26. Automatiziranom pretvorbom vektora normale iz kartezijevog koordinatnog sustava u sferni prema jednadžbi 1 svakoj su plohi dodijeljene vrijednosti kuta i smjera nagiba (slika 4.13 i 4.14).

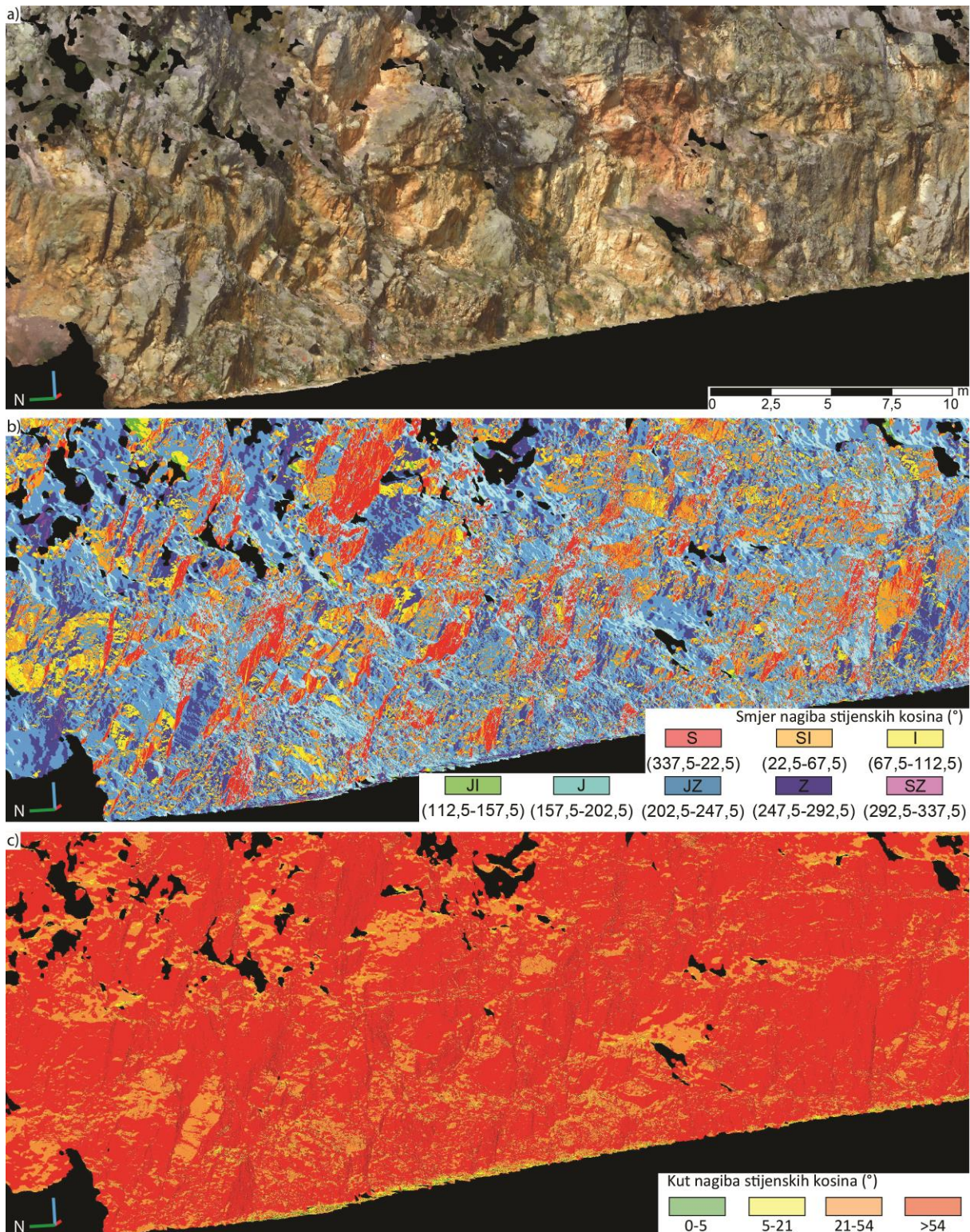
Već na temelju ovih informacija vizualnom procjenom moguće je izdvojiti dijelove modela koji se nalaze u prevjesu, s obzirom da će imati dijametralno suprotan smjer nagiba od prosječnog smjera nagiba kosine (npr. svi dijelovi kosina koji generalno padaju na sjever na slici 4.13a i 4.14b). No takav postupak bi bio predugačak i podložan greškama te su radi toga dijelovi stijenskih kosina koji se nalaze u prevjesu izdvajani automatizirano na temelju z komponente vektora normale ( $N_z$ ). Naime, vektor normale određene ravnine će imati negativnu vrijednost  $N_z$  kada je usmjeren prema dolje, što bi trebao biti i slučaj kod plohi modela površina stijenskih kosina koje se nalaze u prevjesu. U svrhu testiranja ovog zaključka u *CloudCompare*-u je izrađen model površine konkavne sintetičke polusfere koji sadrži sve moguće grupe orijentacija te čiji bi gornji dio trebao predstavljati stijensku kosinu u prevjesu, a donji normalno orijentiranu stijensku kosinu (slika 4.13). Za sve plohe modela sintetičke polusfere generirani su vektori normale, određeni smjer i kat nagiba (slika 4.13 a i b) te je izdvojena vrijednost  $n_z$  svakog vektora normale kao skalarno polje (slika 4.13c). Prikazom svih vektora s negativnom



**Slika 4.13.** Prikaz određene orijentacije plohi digitalnog modela sintetičke polusfere na temelju vektora normala gdje a) prikazuje smjer nagiba svake plohe; b) kuta nagiba i c) vrijednosti  $N_z$  svake plohe digitalnog modela pri čemu njegove negativne vrijednosti označavaju dijelove sintetičke polusfere koje se nalaze u prevjesu.

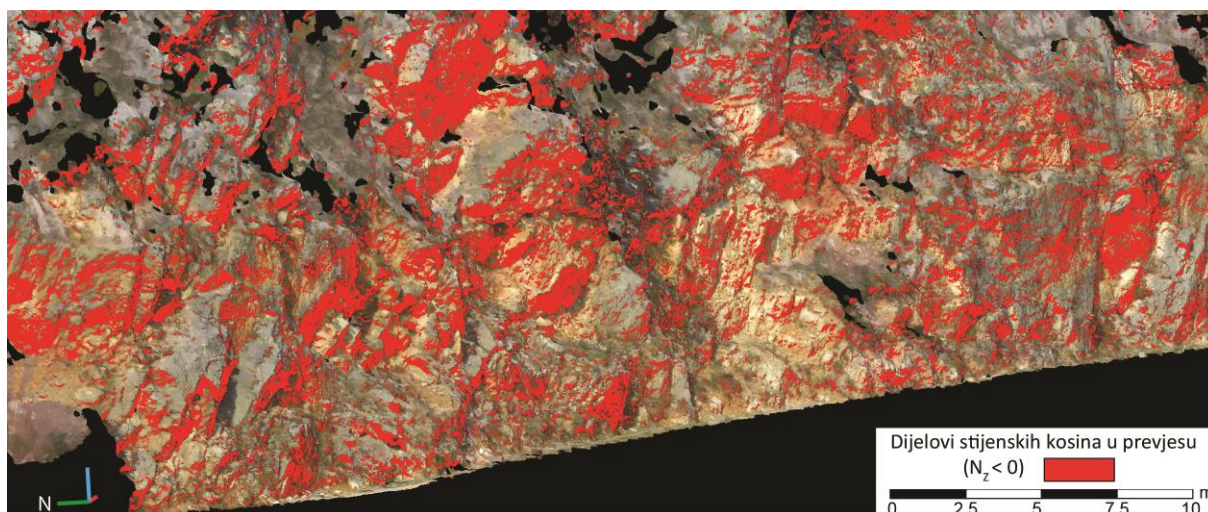


vrijednost  $N_z$  i usporedbom s orijentacijom kosine potvrđeno je da se dijelovi stijenskih kosina u prevjesu mogu automatizirano određivati na ovaj način. Primjer primjene navedene tehnike određivanja orijentacije i dijelova kosine u prevjesu prikazan je na slikama 4.14 i 4.15.



**Slika 4.14.** Prikaz: a) dijela modela površine stijenske mase na području istraživanja Brljan te za svaku plohu digitalnog modela određene orijentacije, tj. b) smjera nagiba i c) kuta nagiba.





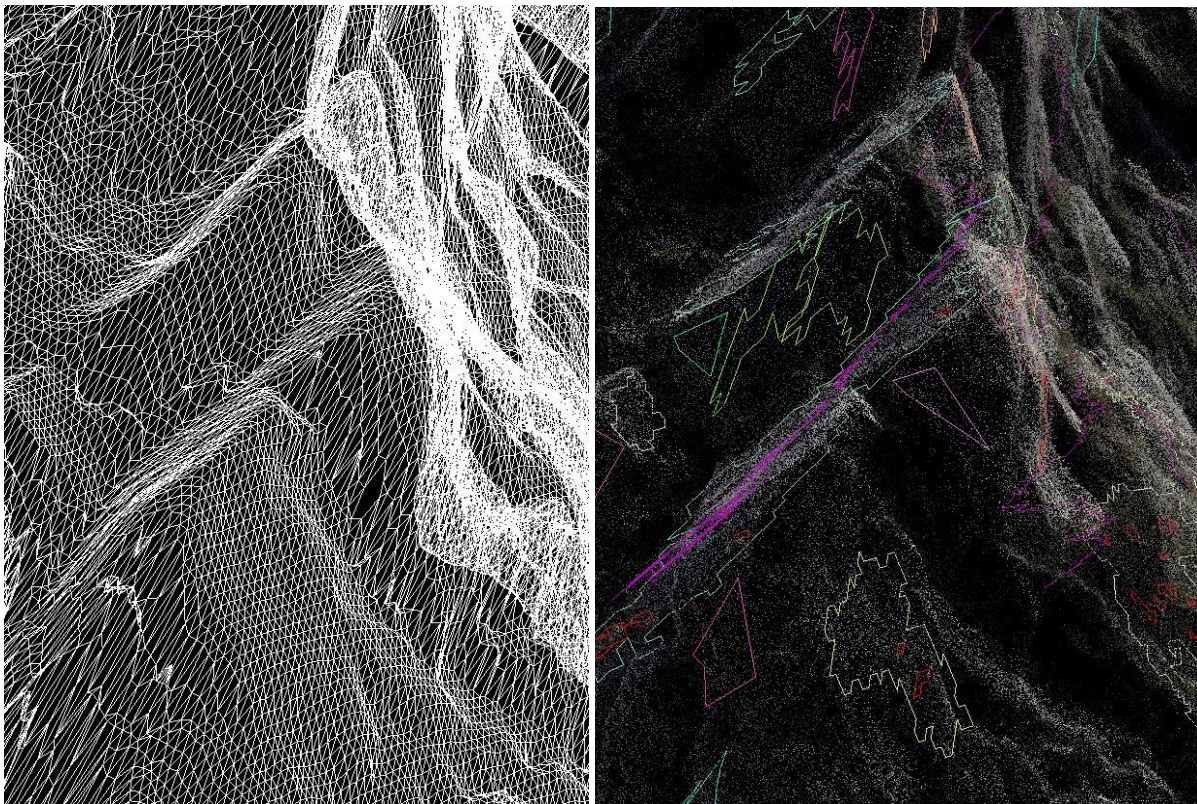
**Slika 4.15.** Prikaz modela površine stijenske mase s označenim dijelovima stijenskih kosina u prevjesu dobivenih na temelju negativnih vrijednosti  $N_z$ .

### 4.3. Određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta i značajki stijenske mase iz digitalnih modela

Visoko-rezolucijski modeli oblaka točaka, dobiveni terestričkim laserskim skeniranjem i snimanjem iz zraka bespilotnom letjelicom, kao i izvedeni modeli površine stijenske mase činili su ulazne podatke za određivanje značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta na opisanim područjima istraživanja. Za potrebe određivanja orijentacije diskontinuiteta testirane su polu-automatizirane i ručne tehnike sadržane u komercijalnom računalnom programu *Split-FX* (Split Engineering, 2017) te u besplatnim računalnim programima *CloudCompare* (CloudCompare, 2019) i *Discontinuity Set Extractor (DSE)* (Riquelme i dr., 2014). Setovi diskontinuiteta preliminarno su određivani metodom konturnih dijagrama te uspoređivani s automatiziranom metodom grupiranja polova kombinacijom spektralnog klasteriranja i neizrazitog grupiranja, za čije potrebe je napisan računalni kod u *MATLAB* (Matworks, 2016) okruženju. U svrhu određivanja razmaka i postojanosti diskontinuiteta testirane su, uspoređivane i korištene automatizirane metode sadržane u računalnom programu *DSE* (Riquelme i dr., 2016; 2018) te ručne metode tehnikom prozorskog mjerenja. Od značajki stijenske mase određivana je trošnost i vrsta stijene vizualnom metodom te polu-automatizirano na temelju filtracije oblaka točaka s obzirom na vrijednosti intenziteta reflektiranih laserskih zraka. Detaljan opis svih korištenih metoda i tehnika prikazan je u poglavljima 4.3.1-4.3.4.

#### 4.3.1 Orijentacija diskontinuiteta

Određivanje orijentacije diskontinuiteta za sva područja istraživanja provedeno je u računalnim programima *Split-FX* (Split Engineering, 2017), *DSE* (Riquelme i dr., 2014). i *CloudCompare* (CloudCompare, 2019) pri čemu su se na dva izdvojena testna područja koristile i uspoređivale polu-automatizirane i ručne metode određivanja orijentacije kako bi se utvrdila preciznija metoda u svrhu primijene na ostalim područjima istraživanja. Polu-automatizirano određivanje orijentacije diskontinuiteta pomoću algoritma sadržanog u *Split-FX*-u zasniva se na metodi grupiranja susjednih trokuta iz mreže nepravilnih trokuta modela površine stijenske mase koji zadovoljavaju kriterij zaravnjenosti, pri čemu smjer i kut nagiba susjednih trokuta ne smiju odstupati više od kuta zadanog od strane korisnika. Nakon što algoritam grupira susjedne trokute površine terena koji zadovoljavaju zadane uvjete, kroz njihove centroide postavlja najbolju odgovarajuću plohu. Na ovaj način generiraju se plohe (engl. *patches*) koje predstavljaju diskontinuitete (slika 4.16) pri čemu se njihova orijentacija određuje preko vektora normala te iskazuje smjerom i kutom nagiba. Testiranjem različitih vrijednosti ulaznih parametara od algoritma, tj. zadavanja minimalnog broja susjednih trokuta i maksimalnog kuta odstupanja između susjednih trokuta koje će algoritam grupirati, definirano je da minimalno 15



**Slika 4.16.** Prikaz a) modela površine stijenske mase iz kojeg su b) polu-automatizirano generirane plohe diskontinuiteta u *Split FX*-u.

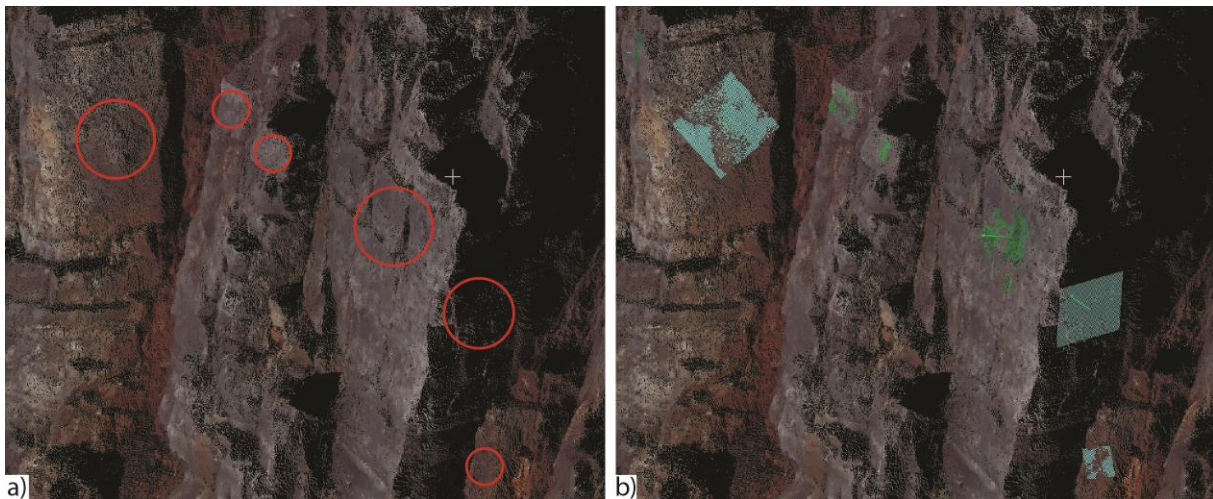


susjednih trokuta čini jedan diskontinuitet, kako bi i slabo izraženi diskontinuiteti bili prepoznati. Maksimalni kut odstupanja između susjednih trokuta iznosi  $10^\circ$  kako bi algoritam pravilno prepoznao diskontinuitete s obzirom na valovitost površine diskontinuiteta. Nakon što je algoritam odredio plohe koje predstavljaju diskontinuitete, bilo je potrebno pregledati model kako bi se ručno uklonile sve plohe koje predstavljaju šumove te ručno dodali svi diskontinuiteti koji nisu prepoznati. Algoritam niti prilikom iterativnih pokušaja unošenja različitih vrijednosti ulaznih parametara nije uspijevaio prepoznati niti jedan diskontinuitet koji je bio predstavljen samo svojim tragom na licu stijenske kosine. U tim slučajevima tragovi diskontinuiteta su ručno iscrtani na visoko-rezolucijskom modelu oblaka točaka te su kroz njihove tragove ručno postavljene najbolje odgovarajuće plohe (slika 4.17). Također, algoritam je često diskontinuitete prikazivao s više ploha te je radi toga bilo potrebno ukloniti duplirajuće plohe kako bi se umanjilo precjenjivanje rezultata, odnosno prenaplašavanje određenih orijentacija diskontinuiteta. Iako algoritam vrlo brzo procesira model površine, dobiveni rezultati nisu bili zadovoljavajući s obzirom na utrošeno vrijeme prilikom odabira optimalnih ulaznih parametara, brisanje višestruko generiranih plohi na istom diskontinuitetu te plohi koje predstavljaju šumove, kao i ručnog unošenja svih onih diskontinuiteta koje algoritam nije prepoznao.



**Slika 4.17.** Prikaz primjera ručno postavljenih najbolje odgovarajućih ploha koje predstavljaju diskontinuitete (označeno ljubičastom bojom) na temelju iscrtanih tragova ravnina u *Split FX*-u.

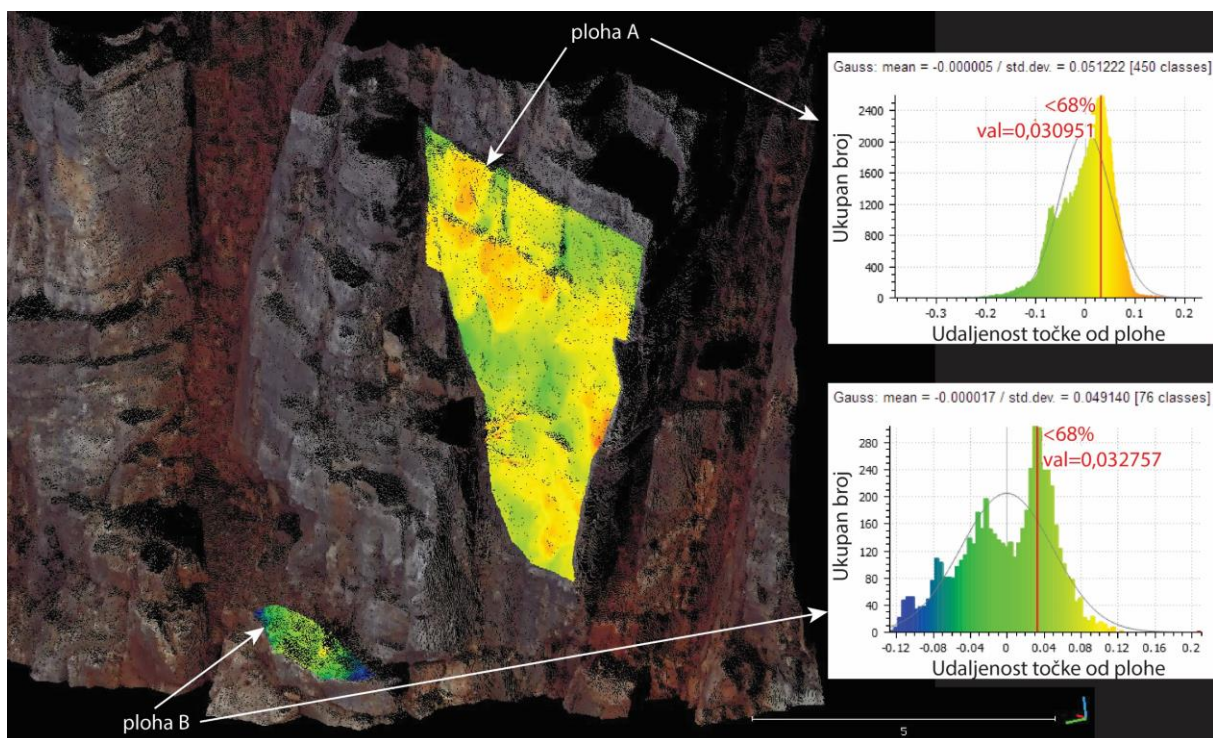
Radi svega navedenog, *Split FX* je testiran samo na dijelu stijenskih kosina iznad grada Omiša i na stijenskom zasjeku Brljan, a dobiveni rezultati se nisu koristili prilikom daljnjih analiza. U računalnim programima *CloudCompare* i *DSE* orijentacija diskontinuiteta određivana je ručnom i polu-automatiziranim metodama izravno iz visoko-rezolucijskog modela oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina. Ručno određivanje orijentacije diskontinuiteta provedeno je pomoću dodatka *Compass* (Thiele i dr., 2017). Prilikom određivanja orijentacije diskontinuiteta navedenim dodatkom potrebno je vizualno odrediti njegovu plohu te odabrati radijus unutar kojega se koriste sve točke za izračun orijentacije (slika 4.18a) primjenom metode najmanjih kvadrata (engl. *least squares*). Osim tekstualnog prikaza smjera i kuta nagiba diskontinuiteta koji se može izvesti u formatu *.txt* i *.xml* datoteke, na modelu oblaka točaka prikazuje se i ploha koja označava mjereni diskontinuitet (slika 4.18b). Orijentacija onih diskontinuiteta koji su vidljivi kao tragovi određuje se odabirom početne i završne točke traga ravnine, a algoritam iscrtava trag te postavlja najbolju odgovarajuću plohu i procjenjuje njenu orijentaciju. Orijentacija diskontinuiteta određena ovom metodom odgovara onoj mjerenoj geološkim kompasom na terenu te su vrijednosti orijentacije dobivene ručnom metodom uzete kao referentne vrijednosti prilikom polu-automatiziranog određivanja orijentacije diskontinuiteta u *CloudCompare*-u i *DSE*-u.



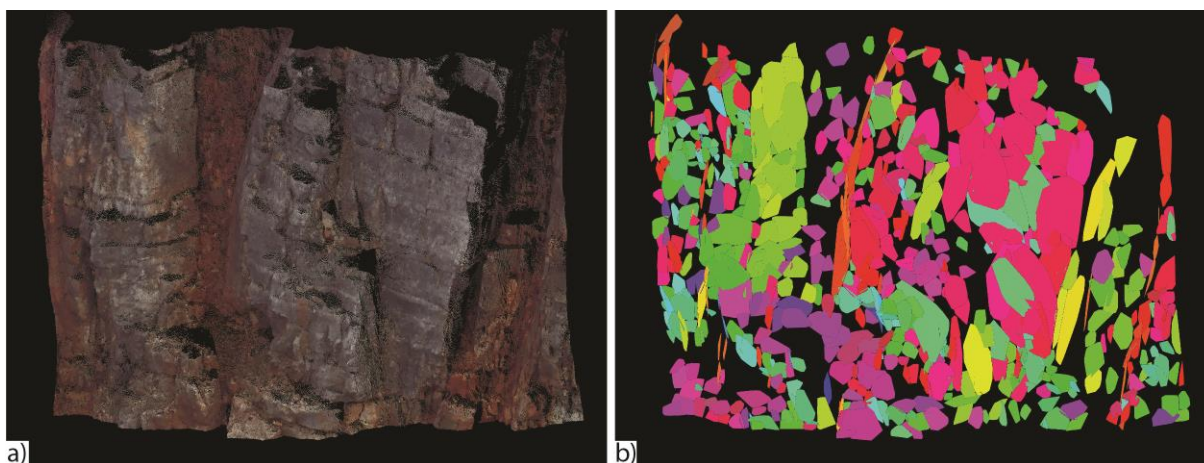
**Slika 4.18.** Prikaz: a) odabira različitih radijusa (crvene kružnice) na modelu oblaka točaka za procjenu orijentacije diskontinuiteta metodom najmanjih kvadrata pomoću dodatka *Compass* i b) generirane plohe koje predstavljaju orijentaciju diskontinuiteta.



Polu-automatizirana metoda određivanja diskontinuiteta u računalnom programu *CloudCompare* izvodi se pomoću dodatka *qFacets*, odnosno pomoću *brzo marširajućeg* (engl. *fast marching*) algoritma (Dewez i dr., 2016). Ovom metodom model oblaka točaka podijeli se na planarne plohe (engl. *patch*) koje se na temelju maksimalne ortogonalne udaljenosti točaka od tih ploha te minimalnog broja točaka regrupiraju u višestruke planarne plohe koje predstavljaju diskontinuitete (engl. *facets*). Za provedbu polu-automatizirane metode kao ulazni parametar potrebno je odrediti dubinu *Octree*-a, maksimalnu udaljenost između točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta pri 68, 95 ili 99% vjerojatnosti (za  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  i  $3\sigma$ ), minimalni broj točaka po višestrukoj planarnoj plohi i maksimalna duljina ruba plohe. Parametar koji predstavlja najveću nepoznanicu je maksimalna udaljenost između točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta. Taj parametar određivan je izdvajanjem dijelova modela oblaka točaka koji predstavljaju jasno izražen diskontinuitet s malom valovitosti te dijelova koji predstavljaju slabo izražen diskontinuitet s većom valovitosti (plohe A i B na slici 4.19). Kroz izdvojene točke ručno su postavljene najbolje odgovarajuće plohe te je izračunata udaljenost svake točke od te plohe (slika 4.19). Na temelju Gaussovih distribucija udaljenosti određena je prosječna vrijednost udaljenosti točke od plohe pri 68% standardne devijacije (slika 4.19). Primjer rezultata polu-automatizirane metode s unaprijed zadanim parametrima prikazan je na slici 4.20, a rezultate s vrijednostima smjera i kuta nagiba moguće je izvesti u txt ili xml datoteci.

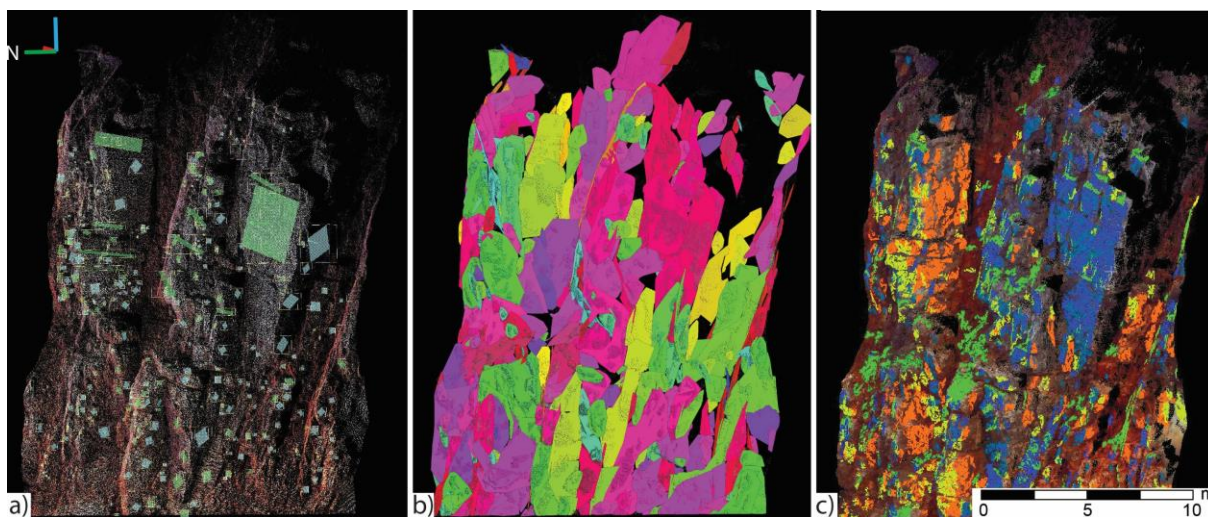


**Slika 4.19.** Prikaz primjera određivanja vrijednosti maksimalne udaljenosti točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta pri 68% vjerojatnosti ( $1\sigma$ ).



**Slika 4.20.** Prikaz: a) dijela modela oblaka točaka za kojeg su b) polu-automatizirano generirane sve potencijalne plohe diskontinuiteta pri čemu različite boje označavaju različite smjerove nagiba plohi.

Algoritam kojim se provodi polu-automatizirana metoda određivanja orijentacije diskontinuiteta iz modela oblaka točaka u *DSE*-u opisan je u poglavlju 2.2.3. Ulazne parametre za provođenje ove polu-automatizirane metode predstavljaju: 1) maksimalan broj susjednih točaka čija se orijentacija analizira, 2) maksimalna udaljenost između točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta, 3) maksimalni broj očekivanih setova diskontinuiteta, 4) maksimalno odstupanje orijentacije potencijalnih plohi diskontinuiteta u odnosu na orijentaciju seta diskontinuiteta te 5) minimalni broj točaka koji tvori jedan diskontinuitet. Iz navedenog je vidljivo da je vrlo značajno procijeniti maksimalni mogući broj setova diskontinuiteta, što često nije moguće za veća područja istraživanja. Radi toga potrebno je pretpostaviti najveći broj mogućih setova kako bi algoritam približno odredio potencijalne setove i sve diskontinuitete koji im pripadaju. Samim time, metoda je izrazito podložna subjektivnoj procjeni, a kako bi se testirala i provjerila da li je prikladna za korištenje na istraživanim stijenskim kosinama, bez nasumičnog pogađanja točnih ulaznih parametara, potrebna je referentna vrijednost u odnosu na koju će se provjeravati. Upravo radi toga te kako bi se utvrdilo koja je od navedenih metoda najpreciznija i najbrža, koji su optimalni ulazni parametri te da li su polu-automatizirane metode pouzdane, provedeno je testiranje na izdvojenom dijelu istraživanih stijenskih kosina predstavljenim kvadratnim prozorom. Ovo područje predstavlja relativno jasnu situaciju na stijenskom zasjeku na lokaciji Špičunak, gdje su jasno izraženi setovi diskontinuiteta koji čine blokove. Orijetacija diskontinuiteta određenih ručnom metodom u *CloudCompare* pomoću alata *Compass* (slika 4.21a i 4.22) postavljena je kao referentna vrijednost te su testirane različite vrijednosti ulaznih parametara polu-automatiziranih metoda kako bi se postigao što bolji rezultat u svrhu definiranja parametara za eventualnu upotrebu na svim dijelovima istraživanih stijenskih kosina.

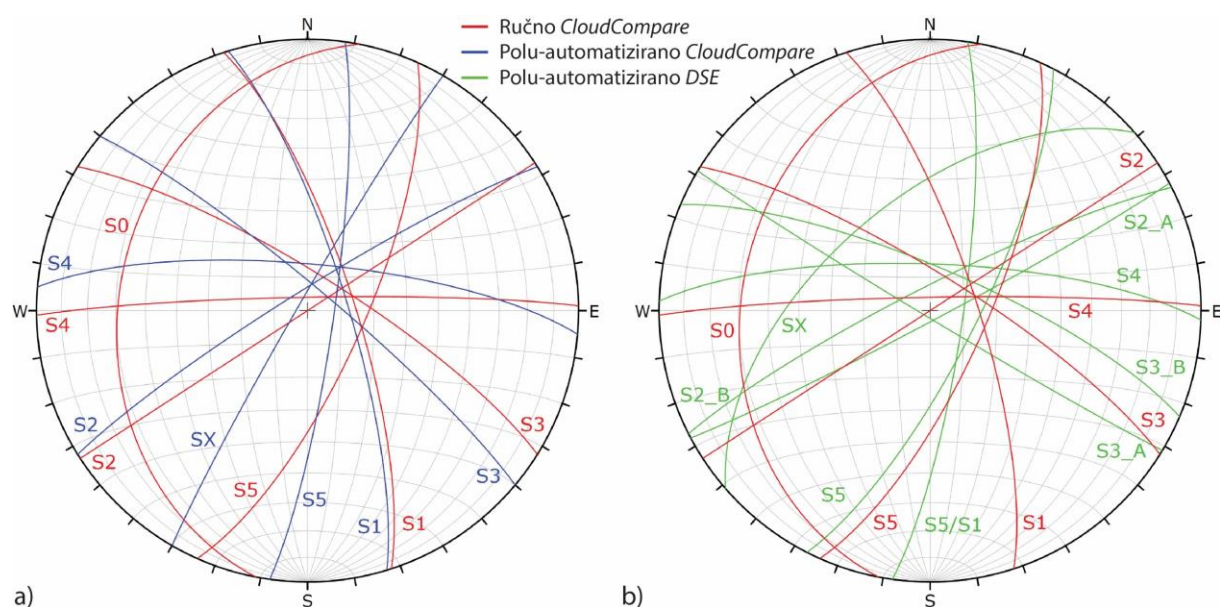


**Slika 4.21.** Prikaz usporedbe rezultata određivanja orijentacije diskontinuiteta za testno područje a) ručnom i b) polu-automatiziranom metodom u *CloudCompare*-u te c) polu-automatiziranom metodom u *DSE*-u.

Ručnom metodom na testnom području, predstavljenim pravokutnim prozorom, identificirano je 420 diskontinuiteta (slika 4.21a). Metodom konturnih dijagrama na stereografskoj projekciji diskontinuiteti su preliminarno grupirani u šest setova (crveno obojani tragovi ravnina na stereografskim projekcijama na slici 4.22) čije su srednje vrijednosti orijentacije prikazane u tablicama 4.2 i 4.3. Svrstavanje diskontinuiteta u setove pokazalo je da su slojevitost i dva seta diskontinuiteta okomita na prosječno pružanje stijenske kosine najučestaliji s obzirom na udio diskontinuiteta u pojedinom setu u odnosu na ukupan broj utvrđenih diskontinuiteta ( $N_D/N_{TOT}$  u tablici 4.2 i 4.3), što je jasno vidljivo iz vizualnog pregleda modela (slika 4.21a). Rezultati polu-automatiziranih metoda, dobiveni na temelju definiranih optimalnih ulaznih parametara (tablica 4.4) nakon niza iterativnih testiranja, prikazani su na slikama 4.21b i c. Prosječne vrijednosti orijentacije određenih setova diskontinuiteta prikazane su pomoću tragova ravnina na stereografskoj projekciji te uspoređivane s referentnim vrijednostima (slika 4.22; tablice 4.2 i 4.3). Na temelju provedenog testiranja polu-automatizirane metode u *CloudCompare*-u identificirana su 499 diskontinuiteta na testnom području. Metodom konturnih dijagrama na stereografskoj projekciji diskontinuiteti su preliminarno grupirani u šest setova od kojih četiri relativno dobro odgovaraju referentnim vrijednostima uz mala odstupanja (S1-S4 na slici 4.22a i u tablici 4.2), dok jedan ima veća odstupanja (S5 na slici 4.22a i u tablici 4.2). Set diskontinuiteta S0, koji predstavlja slojevitost, (slika 4.22a i tablica 4.2) nije utvrđen ovom metodom, a razlog je taj što algoritam niti sa jednom višestrukom planarnom plohom na modelu oblaka točaka nije identificirao slojevitost. Algoritam je prepoznao jedan dodatan set koji nije utvrđenom ručnom metodom (SX na slici 4.22a i u tablici 4.2), ali se pregledom modela ustanovilo da plohe koje pripadaju ovom setu



predstavljaju šumove. Također, problematična se pokazala i učestalost određenih diskontinuiteta, gdje je zastupljenost diskontinuiteta određenog seta precijenjena, npr. S2 koji je sub-paralelan licu stijenske mase; dok su neki podcijenjeni poput S1 i S3, a koji bi uz slojevitost trebali biti najučestaliji, čime podaci o orijentaciji diskontinuiteta postaju neupotrebljivi prilikom bilo kakvih daljnjih statističkih analiza S obzirom na sve navedeno polu-automatizirana metoda u *CloudCompare*-u se neće upotrebljavati prilikom određivanja orijentacije diskontinuiteta na istraživanim stijenskim kosinama budući da se i s optimalnim parametrima pokazala kao neprecizna i nepotpuna.



**Slika 4.22.** Prikaz usporedbe tragova ravnina prosječne orijentacije setova diskontinuiteta određenih a) ručnom i polu-automatiziranom metodom u *CloudCompare*-u i b) ručnom metodom u *CloudCompare*-u i polu-automatiziranom metodom u *DSE*-u

**Tablica 4.2.** Prikaz srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih ručnom i polu-automatiziranom metodom u *CloudCompare*-u, udjela diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu u odnosu na ukupan broj diskontinuiteta te odstupanja između prosječnih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta

Oznaka seta diskontinuiteta	Ručno <i>CloudCompare</i>			Polu-automatizirano <i>CloudCompare</i>			Odstupanje (+/-)	
	$\alpha_R$ (°)	$\beta_R$ (°)	$N_D/N_{TOT}$ (%)	$\alpha_{CC}$ (°)	$\beta_{CC}$ (°)	$N_D/N_{TOT}$ (%)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
S0	281	31	19,0	/	/	/	/	/
S1	72	76	23,8	73	78	4,9	1	2
S2	147/327	90	5,7	328	84	24,9	1	6
S3	32	79	13,1	40	83	2,4	8	4
S4	359	86	5,2	5	76	7,1	6	10
S5	114	73	4,0	98	82	8,5	16	9
SX	/	/	/	300	87	12,7	/	/

Polu-automatiziranom metodom u *DSE*-u utvrđeno je 985 diskontinuiteta na testnom području koji su grupirani u osam setova. Rezultati ove metode prikazani na slici 4.21c pri čemu je vrlo korisno što su različitim bojama obojani dijelovi oblaka točaka koji pripadaju određenom setu. Usporedbom s referentnim vrijednostima na stereografskoj projekciji (slika 4.22b i tablica 4.3) utvrđeno je da setovi S2-S5 imaju relativno mala odstupanja, pri čemu je algoritam diskontinuitete koji pripadaju setovima S2 i S3 nepotrebno podijelio u četiri seta (slika 4.22b i tablica 4.3), što se utvrdilo pregledom modela oblaka. Kao i kod rezultata polu-automatizirane metode u *CloudCompare*-u, *DSE* nije prepoznao set diskontinuiteta koji predstavlja slojevitost te je prepoznao jedan set diskontinuiteta više u odnosu na referentne vrijednosti (SX na slici 4.22b i u tablici 4.3). Pregledom modela oblaka točaka utvrđeno je da se radi o šumu. Značajna odstupanja pokazuje orijentacija seta diskontinuiteta S1 (slika 4.22b i tablica 4.3), gdje je *DSE* određeni broj diskontinuiteta koji pripadaju setu S5 svrstavao u set S1. Također, opet se pokazala problematična učestalost diskontinuiteta koji pripadaju setu S2 koja je značajno precijenjena te onih koji pripadaju setovima S1 i S3, koji su podcijenjeni (tablica 4.3), čime podaci o orijentaciji diskontinuiteta dobiveni ovom metodom postaju neupotrebljivi prilikom bilo kakvih daljnjih statističkih analiza. Prema svemu ranije navedenom odlučeno je da se *DSE* neće koristiti za određivanje vrijednosti orijentacije diskontinuiteta, ali je ipak bio korišten kao pomoć prilikom ručnog kartiranja diskontinuiteta na svim istraživanim stijenskim kosinama s obzirom da rezultirajući obojani oblak točaka ubrzava ručno određivanje određenih plohi diskontinuiteta i njihovih orijentacija. Parametri korišteni prilikom polu-automatiziranih analiza u *CloudCompare*-u i *DSE*-u prikazani su u tablici 4.4.

**Tablica 4.3.** Prikaz srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih ručnom metodom u *CloudCompare*-u i polu-automatiziranom metodom u *DSE*-u, udjela diskontinuiteta koji pripadaju određenom setu u odnosu na ukupan broja diskontinuiteta te odstupanja između prosječnih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta

Oznaka seta diskontinuiteta	Ručno <i>CloudCompare</i>			Polu-automatizirano <i>DSE</i>			Odstupanje (+/-)	
	$\alpha_R$ (°)	$\beta_R$ (°)	$N_D/N_{TOT}$ (%)	$\alpha_{CC}$ (°)	$\beta_{CC}$ (°)	$N_D/N_{TOT}$ (%)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
S0	281	31	19,0	/	/	/	/	/
S1	72	76	23,8	98	80	7,9	26	4
S2 ( $\frac{S2_A}{S2_B}$ )	147/327	90	5,7	152	87	13,8	5	3
				333	83	14,9	6	7
S3 ( $\frac{S3_A}{S3_B}$ )	32	79	13,1	211	88	4,4	179	9
				23	77	3,1	9	2
S4	359	86	5,2	2	76	9,2	3	10
S5	114	73	4,0	117	76	10,4	3	3
SX	/	/	/	319	57	8,2	/	/



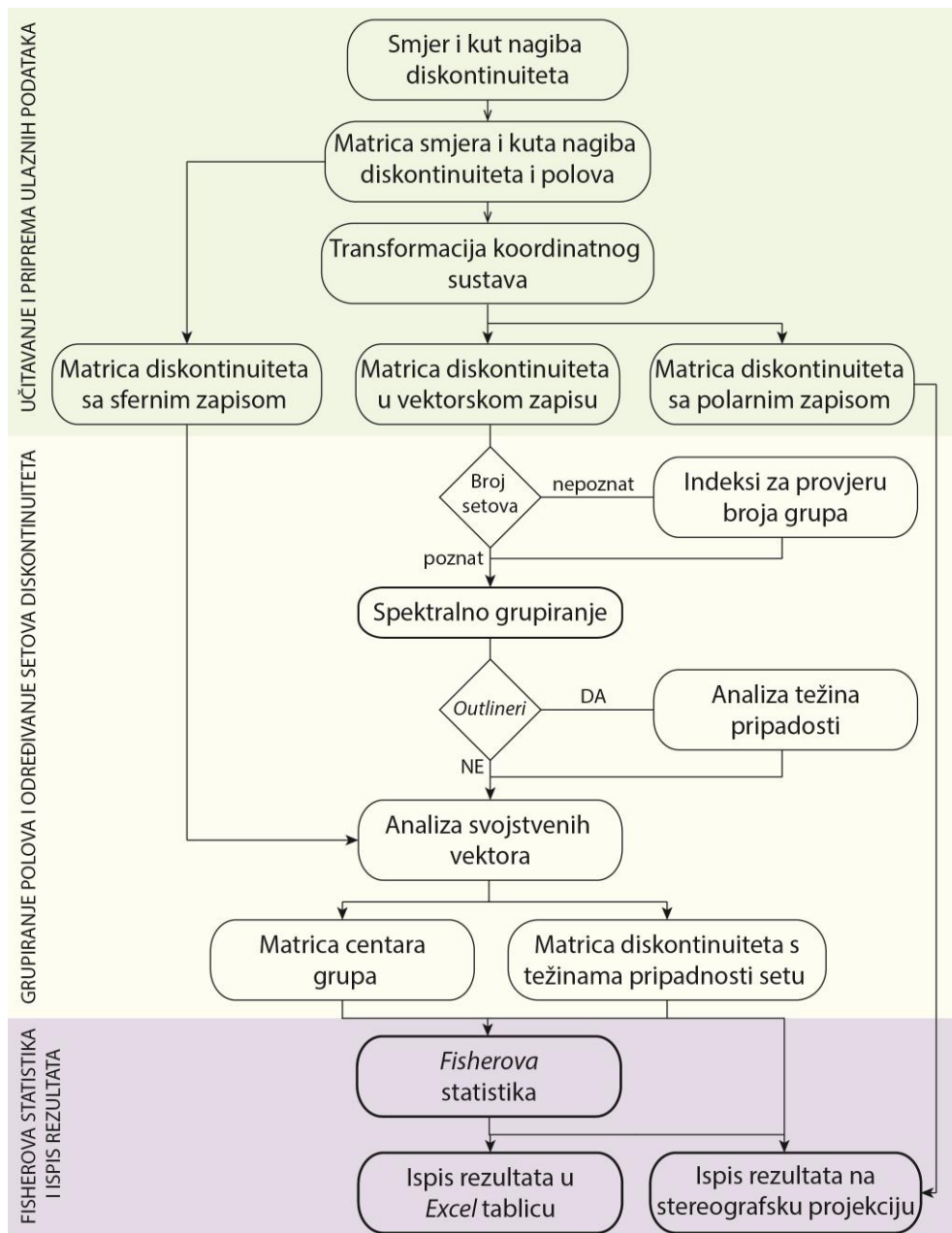
**Tablica 4.4.** Prikaz optimalnih parametara korištenih prilikom polu-automatiziranih analiza u *CloudCompare*-u te raspona parametara u DSE pomoću kojih su dobiveni rezultati najbliži onima dobivenim ručnom metodom i korišteni kao pomoć prilikom ručnog kartiranja diskontinuiteta na svim istraživanim stijenskim kosinama

Parametar	<i>CloudCompare</i>	<i>DSE</i>
Dubina <i>Octree-a</i>	8	/
Maksimalna udaljenost između točaka i potencijalne plohe diskontinuiteta	0,012 m	/
Maksimalna duljina ruba plohe diskontinuiteta	2 m	/
Minimalni broj točaka koji čine jedan diskontinuitet	400	200-600
Broj susjednih točaka koji se analizira	/	50-100
Minimalna razlika u orijentaciji između prosječne vrijednosti seta diskontinuiteta	/	15-20°
Maksimalni broj očekivanih setova diskontinuiteta	/	6-10
Konus kuta za grupiranje diskontinuiteta u setove	/	20°

#### 4.3.2 Automatizirano grupiranje diskontinuiteta u setove

U prethodnom poglavlju prilikom grupiranja diskontinuiteta u setove, u svrhu direktne usporedbe rezultata testiranja, korištena je metoda konturnih dijagrama na stereografskoj projekciji. S obzirom na iznimno veliki broj podataka o orijentaciji diskontinuiteta koji je bio očekivan na svim istraživanim stijenskim kosinama te kako bi se smanjio utjecaj moguće subjektivnosti, za potrebe automatiziranog određivanja setova diskontinuiteta napisana je skripta i niz funkcija u programskom jeziku *MATLAB* (MathWorks, 2016).

Automatizirano grupiranje diskontinuiteta u setove utemeljeno je na metodi spektralnog grupiranja koju su razvili Jimenez-Rodriguez i Sitar (2006), a detaljno je opisana u poglavlju 2.1.1.1. U svrhu implementacije i provedbe ove metode napisan je algoritam u programskom jeziku *MATLAB*, čiji je pojednostavljeni dijagram toka prikazan na slici 4.23. Glavna skripta povezuje i poziva niz napisanih funkcija s određenim odvojenim zadacima. Skripta je generalno podijeljena u tri dijela: 1) učitavanje i priprema ulaznih podataka, 2) grupiranje polova i određivanje setova diskontinuiteta i 3) *Fisherova* statistika te ispis rezultata na stereografsku projekciju i u *Excel* tablicu (slika 4.23). Funkcija za učitavanje ulaznih podataka se sastoji od uvoza podataka o orijentaciji diskontinuiteta u obliku smjera i kuta nagiba u stupnjevima iz *Excel* tablice, definiranja veličine skupa podataka, izračuna orijentacije polova diskontinuiteta te transformacije tabličnog oblika zapisa u matrični. Dobiveni matrični zapis ulazi u funkciju za obradu i pripremu podataka, gdje funkcija provodi transformaciju iz sfernog koordinatnog sustava u polarni i kartezijski koordinatni sustav te se provodi pretvorba ulaznih podataka u vektorski zapis koji se sprema u zasebne matrice, a svi podaci su predstavljeni različitim varijablama. Na temelju obrade ulaznih podataka pripremljene su tri matrice koje predstavljaju



**Slika 4.23.** Prikaz pojednostavljenog dijagrama toka algoritma za automatizirano određivanje setova diskontinuiteta, prikaz podataka na stereografskoj projekciji te izračuna Fisherove statistike.

vektore orijentacije diskontinuiteta (tri varijable) te vrijednosti polova u sfernom (dvije varijable) i polarnom koordinatnom sustavu (dvije varijable). Ove matrice predstavljaju ulazne podatke koje glavna skripta prosljeđuje funkciji za grupiranje polova, unutar koje jedan dio predstavlja algoritam za spektralno grupiranje opisan u poglavlju 2.1.1.

Broj setova diskontinuiteta, odnosno broj grupa podataka, moguće je zadati kao ulazni parametar algoritmu za spektralno grupiranje, a moguće ga je i procijeniti putem indeksa za provjeru grupa (engl. *cluster validity indices*). Prilikom procjene broja grupa, tj. setova diskontinuiteta korištena su tri indeksa grupa: *Sillhouette* (Rouseeuw, 1987), *Fukuyama-Sugeno*

(Fukuyama i Sugeno, 1989) i *Xie-Beni* (Xie i Beni, 1991) indeks, koji su iterativno računati za 3 do 9 grupa kako bi se odredio optimalan broj grupa koji je predstavljan s najvećom ili najmanjom vrijednosti indeksa (slika 4.24c-e). *Sillhouette* indeks ( $S_i$ ) dostupan je u *MATLAB*-u kao integrirana funkcija, a predstavlja maksimizirajući indeks koji vrednuje sličnost svake točke ( $i$ ) s točkama iz iste grupe u odnosu na sličnost s točkama iz drugih grupa, a definiran je izrazom (MathWorks, 2019):

$$S_i = (b_i - a_i) / \max(a_i, b_i) \quad (35)$$

gdje je  $a_i$  prosječna udaljenost  $i$ -te točke od druge točke u istoj grupi,  $b_i$  minimalna prosječna udaljenost  $i$ -te točke od drugih točaka u drugim grupama, minimizirana s obzirom na grupu.  $S_i$  se kreće u rasponu od -1 do 1, pri čemu visoke vrijednosti indeksa ukazuju da točka  $i$  odgovara grupi u kojoj se nalazi. Ako većina točaka ima visoke vrijednosti  $S_i$  broj grupa  $i$  podaci u grupama su odgovarajući, dok niske i negativne vrijednosti ukazuju na preveliki ili premali broj grupa (slika 4.24e). *Fukuyama-Sugeno* indeks (Fukuyama i Sugeno, 1989) predstavlja minimizirajući indeks definiran kao:

$$V_{FS} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N (u_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2 - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N (u_{ij})^m \|v_i - \bar{x}\|^2 \quad (36)$$

gdje  $k$  predstavlja broj grupa,  $N$  broj podataka unutar grupe,  $u_{ij}$  težinska pripadnost  $j$ -tog podatka  $i$ -toj grupi,  $m$  je eksponent neizrazitosti (engl. *fuzzification exponent*) unaprijed zadan, a  $\bar{x}$  predstavlja srednju vrijednost srednjih vrijednosti skupa podataka. Izraz  $\|x_j - v_i\|^2$  predstavlja euklidsku udaljenost između  $j$ -tog podatka skupa  $x$  i  $i$ -tog centra prototipa grupe  $v_i$ . S obzirom da se udaljenost vektora koji predstavljaju diskontinuitete ne može računati s euklidskom udaljenosti, ovaj izraz zamijenjen je udaljenosti normom kvadriranog sinusa (engl. *sine-squared norm*), tj. s  $1 - (x_j \cdot v_i)$ . Prvi izraz u jednadžbi 36 predstavlja vrijednost različitosti unutar grupe, dok drugi izraz poprima sve manje vrijednosti kako se povećava stupanj preklapanja između grupa. S obzirom da je indeks minimizirajući, optimalan broj setova bit će onaj pri kojem je vrijednost indeksa najmanja (slika 4.24d). Posljednji korišteni indeks bio je minimizirajući *Xie-Beni* indeks, a definiran je sljedećim izrazom (Xie i Beni, 1991):

$$V_{XB} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N (u_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2}{N \min_{i \neq k} \|v_i - v_j\|^2} \quad (37)$$

gdje je euklidska udaljenost ponovno zamijenjena udaljenosti normom kvadriranog sinusa, a ostale varijable jednake su onima kod prethodno opisanog indeksa. S obzirom da je i ovaj indeks minimizirajući, optimalan broj grupa bit će onaj pri kojem je vrijednost indeksa najmanja. Broj grupa na koje ukazuju indeksi korišteni su kao optimalan broj grupa, tj. setova diskontinuiteta prilikom spektralnog grupiranja i automatizacije određivanja setova diskontinuiteta i njihove prosječne orijentacije. Spektralno grupiranje postoji kao dostupna funkcija u *MATLAB-u*, ali je za potrebe ovog rada modificirana u svrhu izdvajanja diskontinuiteta koji ne pripadaju niti jednom setu (engl. *outliners*) na način da je *k-means* grupiranje koje se provodi u višedimenzionalnom prostoru spektralnog grupiranja zamijenjeno s *fuzzy c-means* grupiranjem razvijenim od strane Hammah i Curran (1998). Pomoću ove modifikacije dobivene su vrijednosti težina pripadnosti svakog podatka određenoj grupi, što je omogućilo izdvajanje onih podataka koji imaju male vrijednosti težina pripadnosti određenim setovima (vrijednost pripadnosti se smanjuje udaljavanjem od centra grupe) što u konačnici povećava preciznost određivanja vrijednosti orijentacije određenog seta diskontinuiteta te svih diskontinuiteta koji njemu pripadaju (slika 4.24). Rezultate spektralnog grupiranja skripta prosljeđuje funkciji za analizu svojstvenih vektora kojom se definiraju vrijednosti centara grupa, odnosno vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta. Centri grupa su određeni na temelju pronalaženja svojstvenog vektora s najvećom svojstvenom vrijednosti unutar grupe, tj. seta diskontinuiteta, s obzirom da taj svojstveni vektor minimizira *fuzzy* objektivnu funkciju kojom se definiraju protipovi grupa u n-dimenzionalnom prostoru (Hammah i Curran (1998), Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006). Skripta prosljeđuje rezultate spektralnog grupiranja i analize svojstvenih vektora, u obliku matrice centara grupa i matrice pripadajućih podataka određenoj grupi, funkciji za obradu i ispis rezultata na stereografskoj projekciji i u *Excel* datoteku.

Prije samog prikaza na stereografskoj projekciji, funkcija za svaki set diskontinuiteta računa *Fisherovu* statistiku tj. *Fisherovu* konstantu  $\kappa$ , konuse pouzdanosti i varijacije pri 99, 95 i 68% vjerojatnosti s obzirom da je pretpostavljeno da će diskontinuiteti jednog seta određeni na manjem području poprimiti *Fisherovu* raspodjelu. *Fisherova* konstanta  $\kappa$  dobivena je sljedećim izrazom (Fisher, 1953):

$$\kappa = \frac{N - 1}{N - R} \quad (38)$$

gdje je  $N$  broj diskontinuiteta unutar seta, a  $R$  duljina resultantnog vektora seta diskontinuiteta. Konusi varijacije pri 99, 95 i 68 % vjerojatnosti ( $P$ ) definiraju područja na stereografskoj projekciji u kojima će bilo koja nasumična orijentacija koja pripada određenom setu zatvarati

kut s pravom orijentacijom koji je manji od vrijednosti konusa varijacije ( $\theta_v$ ), gdje su konusi računati iterativno za svaki set diskontinuiteta na sljedeći način (Fisher, 1953):

$$\cos \theta_v = 1 + \frac{\ln (1 - P(< \theta_v))}{\kappa} \quad (39)$$

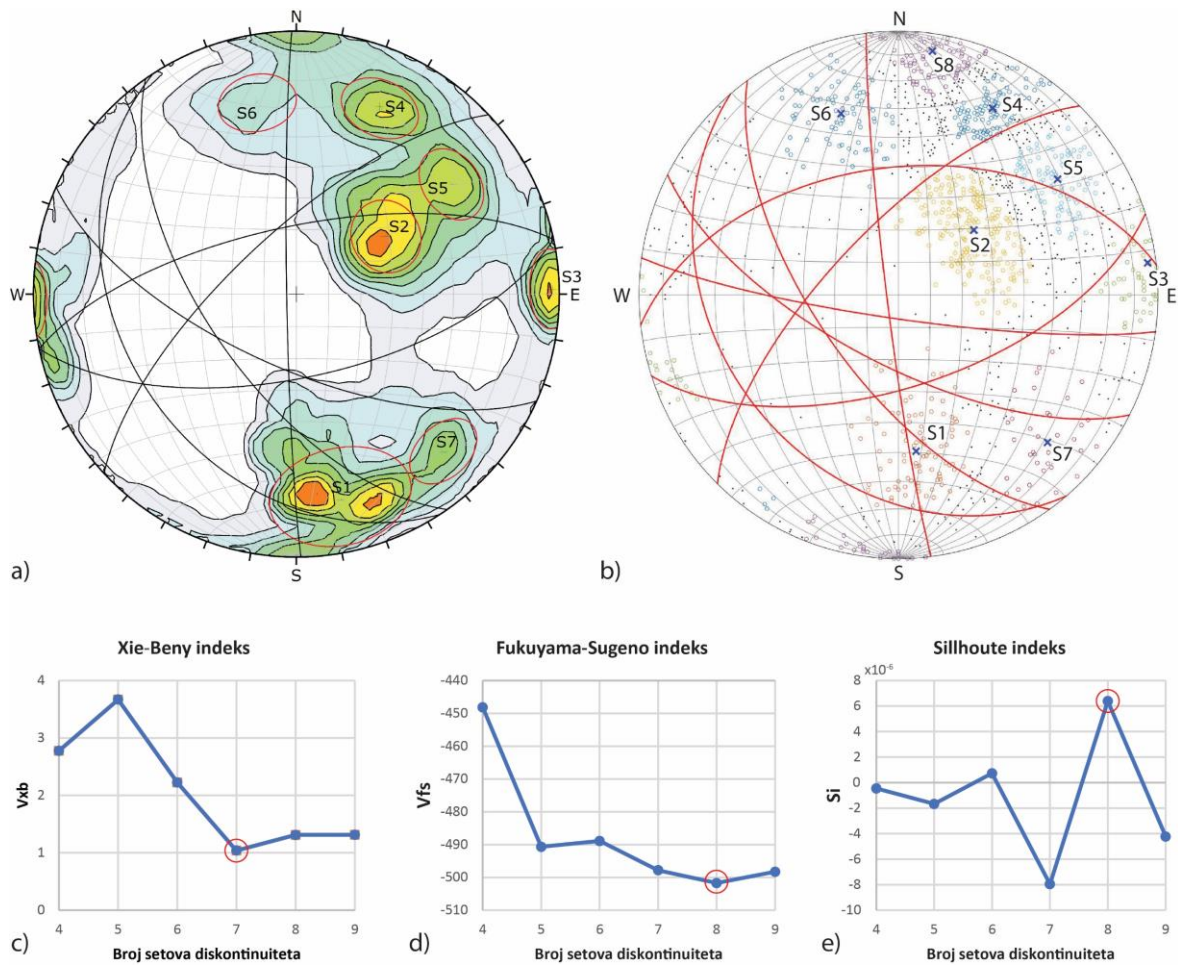
Konusi pouzdanosti pri 99, 95 i 68 % vjerojatnosti ( $P$ ) definiraju područja na stereografskoj projekciji u kojima će orijentacija resultantnog vektor  $R$  (pretpostavljena orijentacija seta diskontinuiteta) zatvarati kut manji od vrijednosti konusa pouzdanosti ( $\theta_c$ ) s pravom orijentacijom seta diskontinuiteta, pri čemu su konusi pouzdanosti računati na sljedeći način (Fisher, 1953):

$$\cos \theta_c = 1 + \frac{\ln (1 - P(< \theta_c))}{\kappa \cdot R} \quad (40)$$

Vrijednosti *Fisherove* statistike i parametre *Fisherove* raspodjele je moguće je koristiti za provjeru vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta te za dodatno uklanjanje diskontinuiteta koji ne pripadaju niti jednom setu. Naime, vrijednosti normaliziranog resultantnog vektora seta diskontinuiteta između 0,9-1,0 ukazuju na visoku preciznost vrijednosti orijentacije seta diskontinuiteta jednako kao i male vrijednosti konusa pouzdanosti pri 99% vjerojatnosti (prema Priest (1993) to su sve vrijednosti manje od 5°), što opravdava postojanje tog seta diskontinuiteta. Također, ukoliko je velika disperzija podataka (mala vrijednost *Fisherove* konstante  $\kappa$ ) unutar seta, rubne orijentacije diskontinuiteta koje možda i ne pripadaju setu (*outlineri*) moguće je isključiti na temelju konusa varijacije (poglavlje 2.1.1.1). Na posljatku funkcija ispisuje centre grupa, tj. orijentacije setova diskontinuiteta i sve polove diskontinuiteta na stereografskoj projekciji te označava koji diskontinuiteti pripadaju kojem setu (slika 4.24b), a konačne rezultate skripta izvozi u *Excel* datoteku. Rezultati automatiziranog određivanja setova diskontinuiteta za istraživane stijenske kosine prikazane su u poglavlju 5.

Primjer rezultata automatiziranog određivanja setova diskontinuiteta, tj. spektralnog grupiranja, vrijednosti indeksa grupa te usporedba rezultata sa setovima diskontinuiteta određenih metodom konturnih dijagrama za jedan dio istraživanih stijenskih kosina u Omišu prikaz je na slici 4.24 i tablici 4.5. Metodom konturnih dijagrama utvrđeno je sedam setova diskontinuiteta, dok je automatiziranom metodom utvrđen jedan set više s obzirom da su dva od tri indeksa grupa ukazala da postoji osam setova diskontinuiteta (slika 4.24c-e), što se pokazalo opravdano s obzirom vrijednosti *Fisherove* konstante, normaliziranog resultantnog vektora i male vrijednosti konusa pouzdanosti pri 99% vjerojatnosti (tablica 4.5).





**Slika 4.24.** Prikaz usporedbe utvrđenih setova diskontinuiteta: a) metodom konturnih dijagrama i b) automatiziranom metodom pomoću spektralnog grupiranja. Broj setova diskontinuiteta je pretpostavljen na temelju vrijednosti: c) *Xie-Beny*, d) *Fukuyama-Sugeno* i e) *Silhouette* indeksa za provjeru grupa. Polovi diskontinuiteta prikazani na slici b obojani su različitim bojama ovisno o setu diskontinuiteta kojem pripadaju, dok oni prikazani crnim točkicama ne pripadaju niti jednom setu i predstavljaju *outlinere*.

**Tablica 4.5.** Prikaz usporedbe srednjih vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta određenih metodom konturnih dijagrama u računalnom programu *DIPS* i automatiziranom metodom uz prikaz ukupnog broja diskontinuiteta ( $N$ ) koji pripadaju određenom setu te parametrima *Fisherove* statistike.

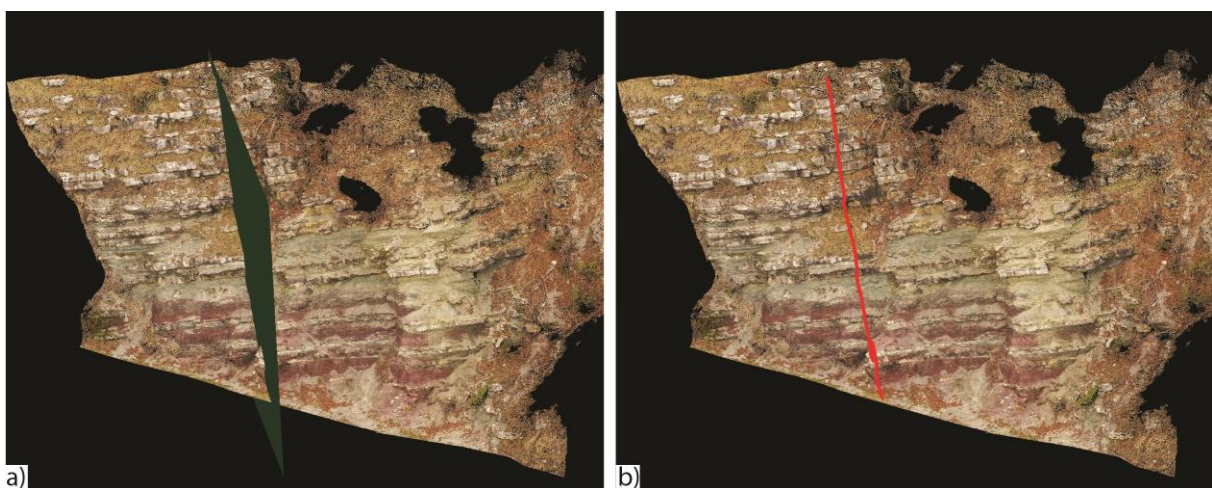
Set	Metoda konturnih dijagrama			Automatizirana metoda						Odstupanje (+/-)	
	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$N$	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$N$	$\kappa$	$r$	$\theta_p$ (°)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
S1	348	69	158	353	50	128	34,5	0,971	2,62	5	19
S2	237	33	161	230	31	238	39,4	0,975	1,83	7	2
S3	269	87	92	263	86	90	72,9	0,987	2,62	6	1
S4	204	67	119	207	68	120	15,7	0,937	4,33	3	1
S5	235	62	115	234	64	110	79,8	0,988	1,95	1	2
S6	168	64	62	162	61	82	41,4	0,976	3,07	6	3
S7	317	71	82	314	69	71	42,5	0,977	4,69	3	2
S8	/	/	/	188	83	114	90,8	0,989	1,82/	/	/
ostatak	/	/	660	/	/	496	/	/	/	/	/

### 4.3.3 Razmak diskontinuiteta

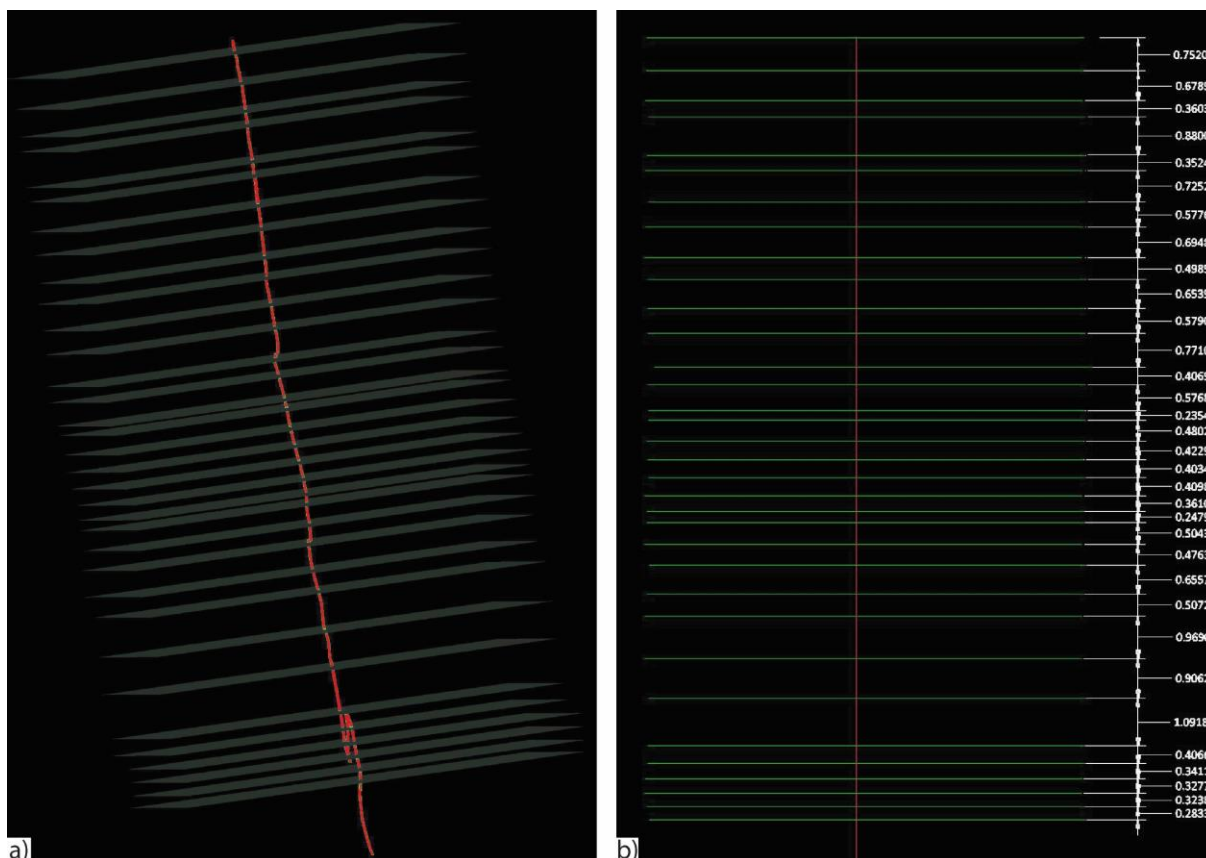
Na temelju definiranih setova diskontinuiteta za svaki set moguće je odrediti raspodjelu razmaka i njegovu srednju vrijednost, a njihovo određivanje provedeno je u pet koraka:

- 1) postavljanjem plohi koje su okomite na prosječnu orijentaciju seta diskontinuiteta,
- 2) postavljanjem plohi prosječne orijentacije seta diskontinuiteta u presjecišta okomite plohe iz koraka 1 i traga ravnine diskontinuiteta,
- 3) mjerenje normalnog razmaka diskontinuiteta, tj. udaljenosti između dva susjedna diskontinuiteta koji pripadaju istom setu, mjereno okomito na prosječno pružanje seta,
- 4) definiranje raspodjele podataka o razmaku, srednje vrijednosti i varijance,
- 5) verifikacija određene raspodjele pomoću  $\chi^2$  (*Hi-kvadrat*) testa.

Nakon što su dobiveni rezultati automatiziranog određivanja orijentacije setova diskontinuiteta, za svaki set diskontinuiteta su u računalnom programu *CloudCompare* generirane plohe okomito na prosječnu orijentaciju seta te su postavljene unutar prozora tako da presijecaju sve diskontinuitete određenog seta (slika 4.25a). Ukoliko nije bilo moguće postaviti plohu da presijeca sve diskontinuitete određenog seta postavljeno je više ploha unutar prozora kako bi se obuhvatilo što je više moguće diskontinuiteta, pri čemu su ponavljajuće vrijednosti uklanjanje kako bi se dobio što točniji uzorak. Na mjestu presjecišta ravnine okomite na orijentaciju seta diskontinuiteta i stijenske kosine generiran je profil (slika 4.25b), a u svim točkama gdje diskontinuiteti sijeku profil postavljene su plohe s prosječnom orijentacijom seta diskontinuiteta (slika 4.26a).



**Slika 4.25.** Prikaz primjera prvog koraka prilikom određivanja razmaka diskontinuiteta na jednom dijelu istraživanih stijenskih zasjeka u Lokvama tj. a) postavljanje plohe koja je okomita prosječnom pružanju seta diskontinuiteta (slojevitost) i b) trag presjecišta virtualne plohe s površinom stijenskog zasjeka (topografski profil).



**Slika 4.26.** Prikaz: a) primjera postavljenih plohi s prosječnom orijentacijom seta diskontinuiteta na mjestima gdje slojevitost presijeca topografski profil za slučaj sa slike 4.25 i b) izmjerene vrijednosti normalnog razmaka.

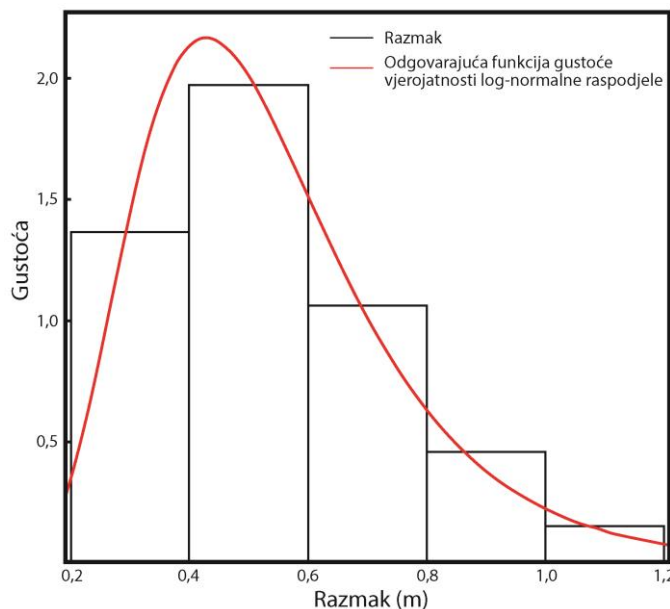
Postavljanjem plohi sa srednjom vrijednosti orijentacije seta diskontinuiteta omogućeno je mjerenje normalnog razmaka diskontinuiteta, tj. mjerenje udaljenosti između dviju plohi diskontinuiteta okomito na prosječno pružanje seta (slika 4.26b).

Sve izmjerene vrijednosti normalnog razmaka uvezene su u *MATLAB* te je na temelju njih izrađen histogram gustoća razmaka (slika 4.27) pri čemu su vrijednosti razmaka svrstane u klase prema *Freedman-Diaconis* pravilu (Freedman i Diaconis, 1981), odnosno sljedećim izrazom:

$$\text{širina klase} = 2 \frac{IQR(x)}{\sqrt[3]{n}} \quad (41)$$

gdje je  $n$  broj promatranja u nizu podataka  $x$ , a  $IQR(x)$  predstavlja interkvartilni raspon, tj. mjeru statističke disperzije, a računa se kao razlika između trećeg i prvog kvartila zadanog niza podataka (Freedman i Diaconis, 1981). S obzirom da se pretpostavlja da će vrijednosti razmaka pripadati ili log-normalnoj ili negativno eksponencijalnoj raspodjeli (poglavlje 2.1.1.2) na histogramima su postavljene funkcije gustoće vjerojatnosti prema jednadžbama 5 i 6, ovisno o obliku histograma, tj. vrijednostima gustoće klase prikazanim na histogramu (slika 4.27). Kako

bi se potvrdila teza da vrijednosti razmaka za svaki set diskontinuiteta pripadaju log-normalnoj nasuprot negativno-eksponencijalnoj raspodjeli proveden je  $\chi^2$  (*Hi-kvadrat*, engl. *Chi-squared*) statistički test prikladnosti modela za svaki set diskontinuiteta pomoću funkcije *Chi-square goodness-of-fit test - chi2gof.m* (MathWorks, 2016) koja je dostupna u *MATLAB*-u. Ova funkcija provodi navedeni statistički test te povratno vraća vrijednosti testne statistike i odluku da li se odbacuje ili prihvaća nulta hipoteza da podaci iz zadanog skupa pripadaju testiranoj raspodjeli pri 5% značajnosti. Nulta hipoteza bit će prihvaćena ukoliko vrijednost testne statistike ne upadaju unutar kritičnog područja (slika 4.27). Definiranjem raspodjele kojoj pripadaju vrijednosti razmaka, na prethodno opisani način, pouzdano su određene srednje vrijednosti razmaka svakog seta diskontinuiteta, što je od velikog značaja za određivanja vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz određenog seta na dijelu istraživane stijenske kosine (više u poglavlju 4.5).



**Parametri razmaka:**

$$r_{min} = 0,2354 \text{ m}$$

$$r_{max} = 1,0918 \text{ m}$$

$$\bar{r} = 0,542682 \text{ m}$$

$$(r')^2 = 0,0504321 \text{ m}$$

**Parametri funkcije:**

$$\mu = -0,690264 \text{ m}$$

$$\sigma = 0,397576 \text{ m}$$

**Testna statistika ( $\chi^2$  test):**

Granice razreda [-1,4465; -0,6793; 0,0878]

$p$  vrijednost pri 5% značajnosti = 0,1570

Nulta hipoteza se prihvaća

**Slika 4.27.** Histogram gustoće razmaka (vezano za slike 4.26 i 4.27) i odgovarajuće funkcije gustoće vjerojatnosti log-normalne raspodjele s prikazom izračunatih parametara razmaka (minimalni i maksimalni razmak –  $r_{min}$  i  $r_{max}$ ; srednja vrijednost i varijanca -  $\bar{r}$  i  $(r')^2$ ), parametara funkcije (srednja vrijednost logaritama razmaka –  $\mu$  i standardna devijacija logaritama razmaka -  $\sigma$ ) i rezultatima testne statistika kojom je potvrđena nulta hipoteza da skup podataka pripada log-normalnoj raspodjeli.



#### 4.3.4 Postojanost diskontinuiteta

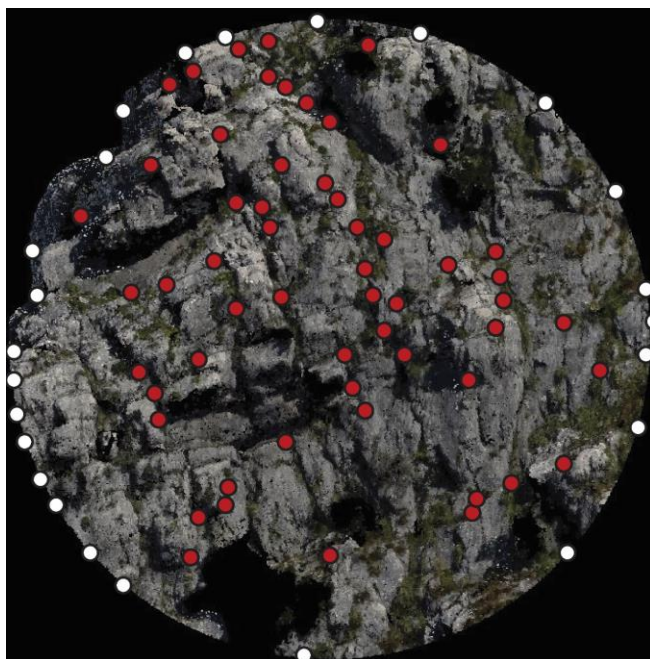
Prilikom procjene postojanosti diskontinuiteta, promatrane kao duljina traga diskontinuiteta na istraživanim stijenskim kosinama te utvrđivanja srednje vrijednosti postojanosti diskontinuiteta, primijenjena je metoda kružnog topografskog prozora (Zhang i Einstein, 1998; Sturzenegger i dr., 2011) koja predstavlja primjenu modificiranog kružnog prozora na 3D modelu oblaka točaka (slika 4.28) na relativno brz i efektivan način. Primjenom ove metode pretpostavlja se da će vrijednosti postojanosti diskontinuiteta poprimiti negativno-eksponencijalnu raspodjelu te da će se umanjiti pristranost maskiranja duljine traga diskontinuiteta koja je uzrokovana mjerilom promatranja i/ili orijentacijom prozora (Sturzenegger i dr., 2011). Radijusi i lokacija topografskih kružnih prozora na istraživanim stijenskim kosinama određivani su subjektivno, na način da je što veći broj tragova diskontinuiteta sadržan unutar prozora, a da u isto vrijeme što veći broj tragova diskontinuiteta presijeca prozor (slika 4.28), pritom vodeći računa da minimalni radijus prozora bude veći od procijenjene prosječne veličine blokova. Ukoliko prozor na određenom dijelu istraživanih stijenskih kosina nije dovoljno dobro obuhvaćao sve setove diskontinuiteta te dovoljan broj diskontinuiteta ukupno, bilo je potrebno postaviti dodatne prozore različitih radijusa.

Na jednom izdvojenom topografskom kružnom prozoru, za određeni set diskontinuiteta, označavani su krajevi svih tragova diskontinuiteta koji su sadržani unutar prozora (označeni crvenim kružićima na slici 4.29) te onih koji sijeku granice kružnog topografskog prozora (označeni bijelim kružićima na slici 4.29). Njihovim prebrojavanjem dobivene su potrebne vrijednosti za određivanje srednje vrijednosti ( $\bar{p}$ ) i intenziteta postojanosti ( $I$ ) (slika 4.29) koji su računati prema jednadžbama 10 i 13.



**Slika 4.28.** Primjer izdvajanja topografskog kružnog prozora s radijusom od 15 m na stijenskim kosinama iznad grada Omiš.





- sjecište traga diskontinuiteta s topografskim prozorom,  $n = 24$
  - krajevi tragova diskontinuiteta unutar prozora,  $m = 54$
- Radijus topografskog prozora -  $r = 15$  m  
 Intenzitet postojanosti -  $I = 0,4$  m/m<sup>2</sup>  
 Srednja vrijednost postojanosti -  $\bar{p} = 10,472$  m

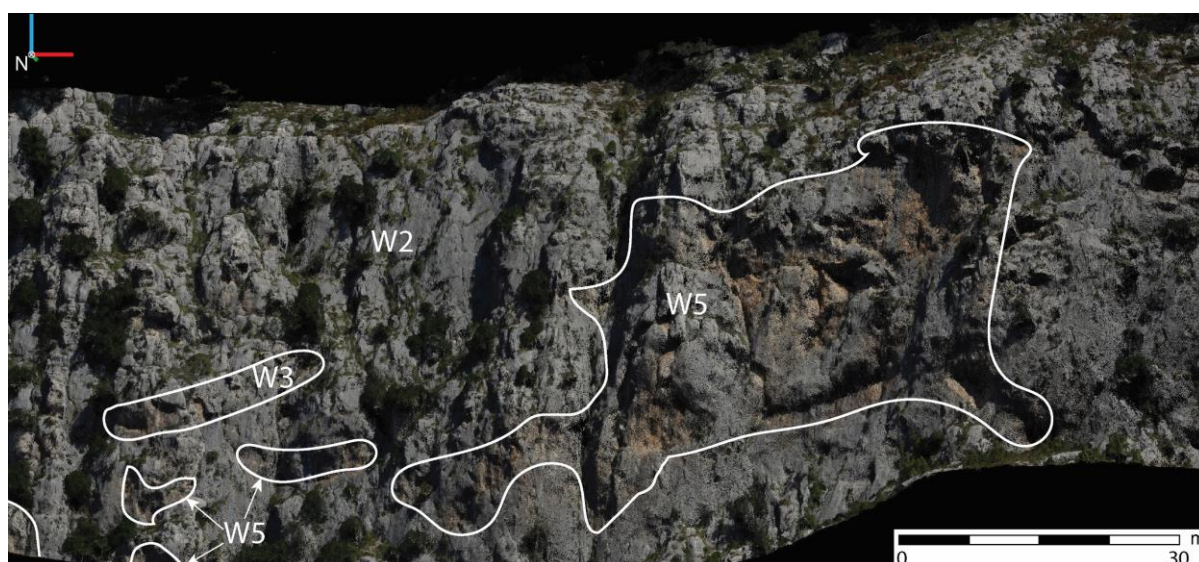
**Slika 4.29.** Primjer primjene metode kružnog topografskog prozora s označenim krajevima tragova diskontinuiteta sadržanih unutar prozora (crveni kružići) i mjesta gdje tragovi diskontinuiteta sijeku granice kružnog topografskog prozora (bijeli kružići), na jednom dijelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša, u svrhu određivanja parametara postojanosti diskontinuiteta.

#### 4.3.5 Značajke stijenske mase

Primjenom ručnih i polu-automatiziranih metoda iz digitalnih modela oblaka točaka istraživanih stijenskih kosina određivani su stupnjevi trošnosti stijenske mase i vrste stijena. Za istraživane stijenske kosine Omiške Dinare, na lokaciji Brljan i stijenski zasjek na lokaciji Špičunak korištene su isključivo ručne metode određivanja stupnja trošnosti stijenske mase na temelju vizualne interpretacije modela oblaka točaka i modela površina stijenske mase. S obzirom na vizualno određene razlike u stupnju trošnosti stijenske mase, izdvajani su odgovarajući dijelovi oblaka točaka (slika 4.30), kategorizirani prema tablici 4.6. Ovako kategorizirani dijelovi digitalnih modela oblaka točaka korišteni su kao jedan od ulaznih podataka prilikom određivanja inženjerskogeoloških zona te prilikom prostornih kinematičkih analiza (više u poglavljima 5 i 6).

**Tablica 4.6.** Prikaz kategorija trošnosti stijenske mase i njihovog opisa prilikom terenskog određivanja stupnja trošnosti (modificirano prema USBR, 2001).

Oznaka kategorije	Naziv	Opis stijenskog materijala i diskontinuiteta
W1	Svježa	Nema promjene boje ni na stijeni ni duž diskontinuiteta
W2	Slabo trošna do svježa	/
W3	Slabo trošna	Manje ili potpune promjene boje ograničene na površinu diskontinuiteta i/ili neposredno uz njih
W4	Srednje do slabo trošna	/
W5	Srednje trošna	Promjena boje stijene se širi od diskontinuiteta, a svim diskontinuitetima je boja u potpunosti promijenjena
W6	Intenzivno do srednje trošna	/
W7	Intenzivno trošna	Potpuna promjena boje stijene i diskontinuiteta, površina diskontinuiteta je „degradirana“
W8	Vrlo intenzivno trošna	/
W9	Raspadnuta	Stijenski materijal je dezintegriran, a struktura je djelomično ili potpuno očuvana

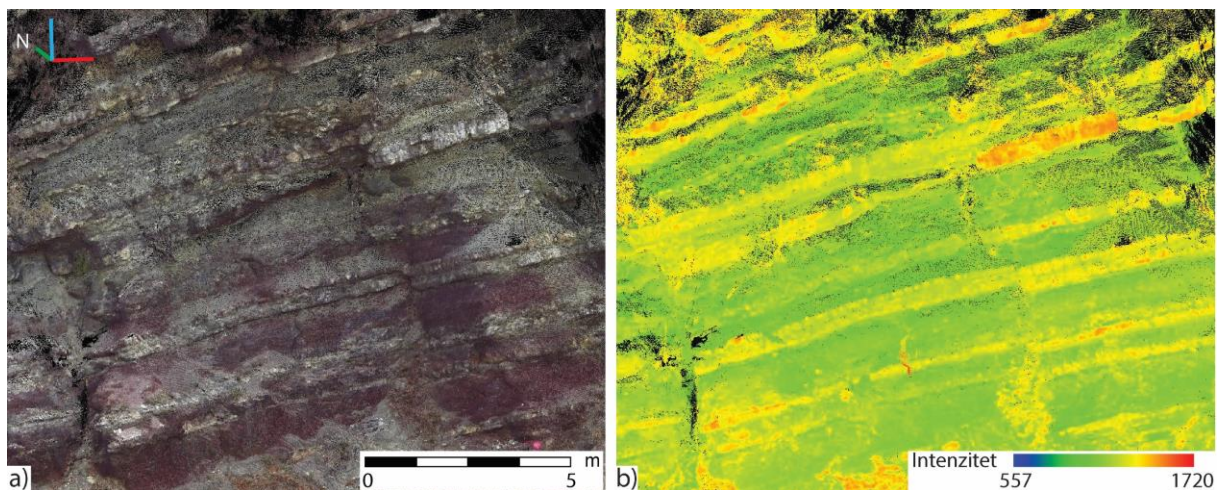


**Slika 4.30.** Primjer vizualnog izdvajanja različitih stupnjeva trošnosti stijenske mase na modelu oblaka točaka stijenskih kosina iznad grada Omiša.

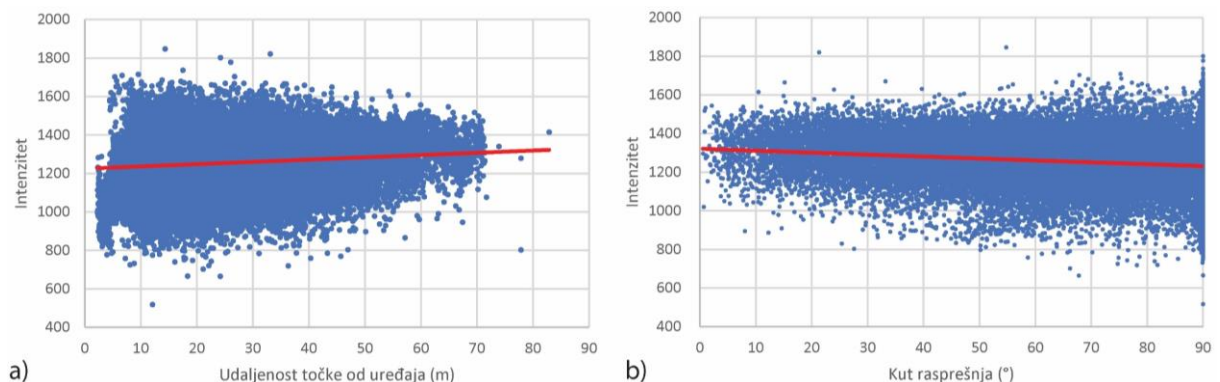
Na istraživanom stijenskom zasjeku u Lokvama primijenjena je polu-automatizirana metoda određivanja vrste stijene na temelju vrijednosti intenziteta lasera dobivenih terestričkim laserskim skeniranjem. Prvi korak uključivao je korekciju vrijednosti intenziteta lasera s obzirom da su sirove vrijednosti precijenjene ili podcijenjene ovisno o udaljenosti TLS-a od objekta snimanja i kuta upada laserske zrake na površinu objekta, tj. o kutu raspršenja laserske zrake (Matasci i dr., 2015). Korekcija sirovih vrijednosti intenziteta izvršena je prema slijedećoj jednadžbi (Kaasalainen i dr., 2011):

$$I_{korigiran} = \frac{I_{sirov} R^2}{\cos(k\alpha)} \quad (42)$$

gdje  $R$  predstavlja udaljenost između određene točke iz modela oblaka točaka i TLS-a,  $k$  konstantu raspršenja i  $\alpha$  kut raspršenja laserske zrake (engl. *scattering angle ili incidence angle*). Udaljenost i kut raspršenja laserske zrake određeni su automatizirano pomoću alata u *CloudCompare*-u s obzirom da su prilikom terestričkog laserskog skeniranja zabilježene pozicije svih stajališta, a oblak točaka strukturiran s obzirom na svako stajalište, čime je omogućena i automatizirana korekcija intenziteta pomoću matematičkih funkcija u *CloudCompare*-u, tj. izračuna korigiranog intenziteta za svaku točku iz modela oblaka točaka prema jednadžbi 42 (slika 4.31). Verifikacija korekcije intenziteta provedena je provjerom odnosa korigiranog intenziteta s udaljenosti točke od uređaja (slika 4.32a), odnosno s kutom raspršenja (slika 4.32b). Naime, ukoliko su navedeni odnosi predstavljeni linearnim funkcijama prihvaća se korigirani intenzitet, jer ne postoje značajna odstupanja korigiranog intenziteta u odnosu na udaljenost svake točke od TLS-a i u odnosu na kut raspršenja laserske zrake.



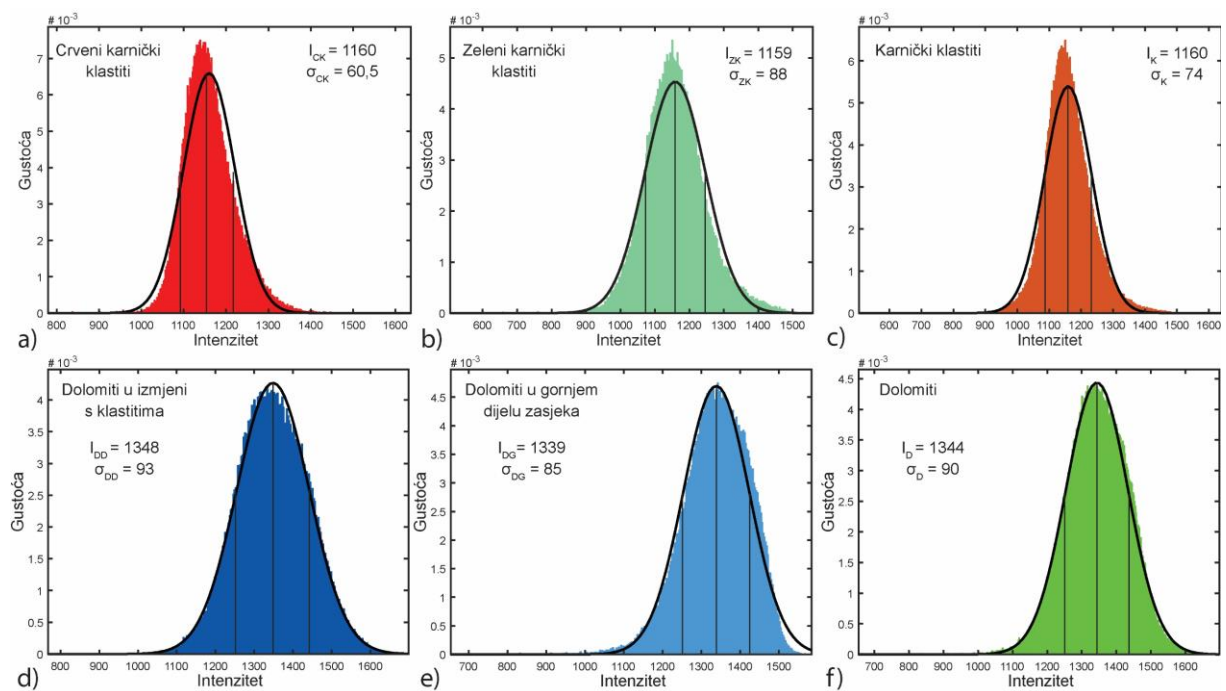
**Slika 4.31.** Prikaz a) dijela modela oblaka točaka stijenskog zasjeka u Lokvama i b) korigiranih vrijednosti intenziteta za te točke.



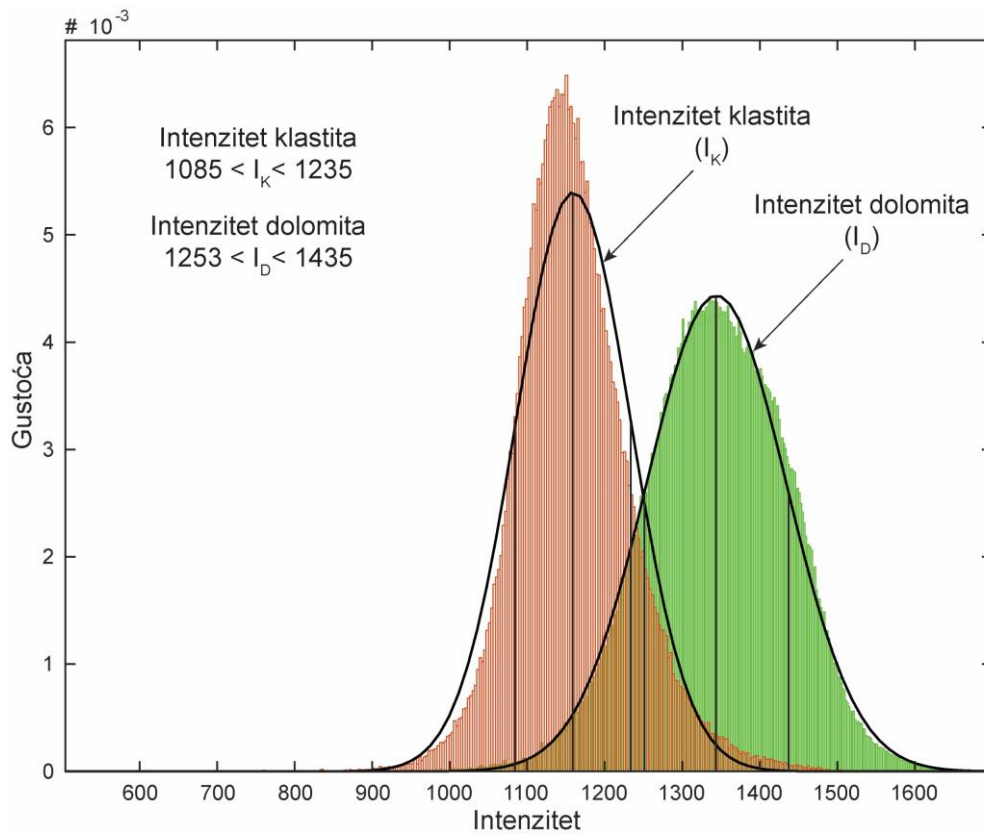
**Slika 4.32.** Prikaz linearnog odnosa između a) korigiranog intenziteta i udaljenosti točke od uređaja te b) korigiranog intenziteta i kut raspršenja laserske zrake.



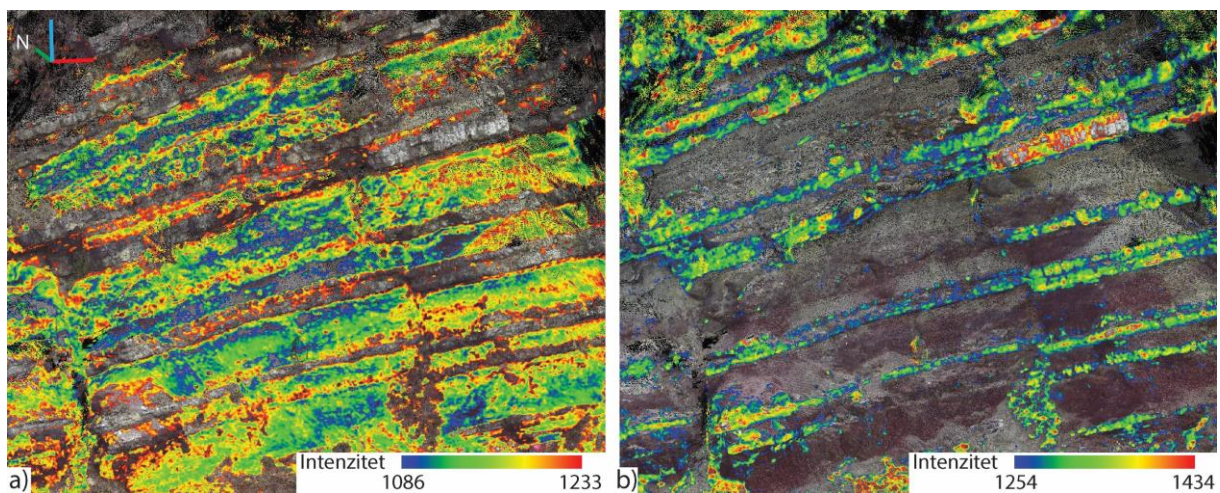
Kako bi se testirala mogućnost polu-automatiziranog određivanja vrste stijene na temelju vrijednosti korigiranog intenziteta, iz modela oblaka točka stijenskog zasjeka u Lokvama izdvojene su četiri grupe točaka s nekoliko lokacija koje predstavljaju crvene i zelene klastične naslage, dolomite koji se nalaze u ritmičkoj izmjeni s navedenim klastitima te dolomiti koji su kontinuirano taloženi na ranije navedenu ritmičku izmjenu. Ove četiri grupe točaka su izdvojene s pretpostavkom da bi svaka grupa trebala imati različite parametre normalne raspodjele intenziteta. Za svaku grupu izrađeni su histogrami odnosa gustoće vjerojatnosti i intenziteta na temelju kojih su postavljene krivulje normalne raspodjele te izračunate srednje vrijednosti intenziteta ( $I_{grupa}$ ) i standardne devijacije ( $\sigma_{grupa}$ ) svake grupe (slika 4.33 a, b, d i e). S obzirom da su srednje vrijednosti intenziteta i crvenih i zelenih klastičnih naslaga ( $I_{CK}$  i  $I_{ZK}$ ) pokazivale približno iste vrijednosti (slika 4.33a i b), klastične naslage su objedinjene u jednu grupu te je određen njihov raspon intenziteta (slika 4.33c). Isti slučaj se pokazao i kod dvije grupe dolomita (slika 4.33d i e) te su i one grupirani kako bi se definirao raspon intenziteta za dolomite (slika 4.33f). Prikazom normalnih raspodjela intenziteta za dolomite i klastite s pripadajućim srednjim vrijednostima i standardnim devijacijama na istom histogramom (slika 4.34) utvrđena je dovoljno jasna razlika između raspona vrijednosti intenziteta klastita i dolomita. Prema utvrđenim rasponima intenziteta iz modela oblaka točaka izdvojene su točke koje pripadaju klastičnim naslagama i dolomitima (slika 4.35).



**Slika 4.33.** Prikaz histograma gustoće vjerojatnosti intenziteta i pripadajuće normalne raspodjele za: a) crvene, b) zelene klastite, c) klastite objedinjeno, d) dolomite u izmjeni s klastitima, e) dolomite koji su kontinuirano taloženi i f) dolomite objedinjeno, s definiranim srednjim vrijednostima ( $I$ ) i standardnim devijacijama ( $\sigma$ ).



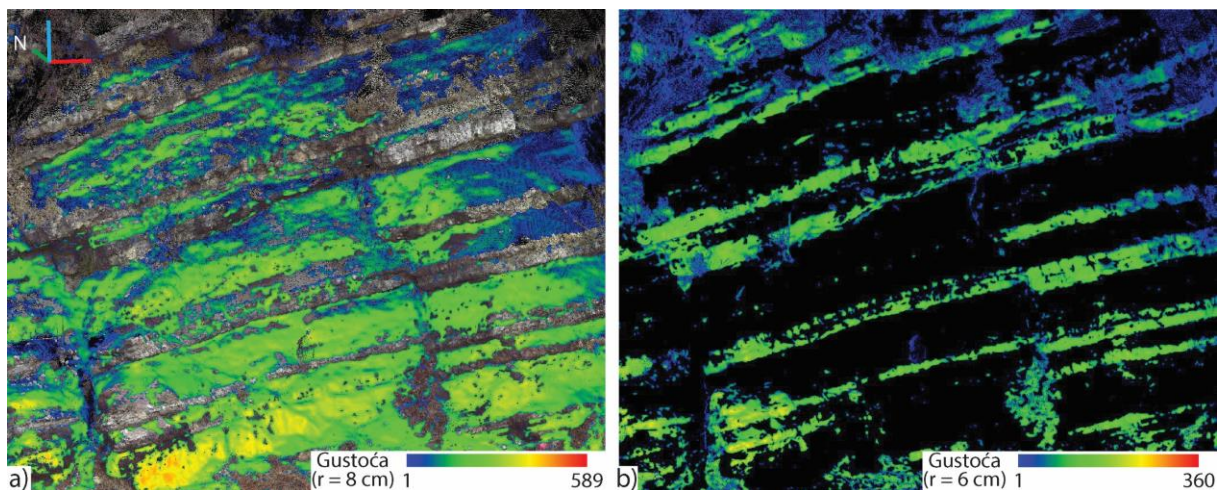
**Slika 4.34.** Usporedba gustoći vjerojatnosti intenziteta za klastite i dolomite te određenih intervala intenziteta na temelju kojih su klasificirane točke oblaka točaka stijenskog zasjeka u Lokvama.



**Slika 4.35.** Prikaz klasificiranih točaka modela oblaka točaka koje pripadaju a) klastitima i b) dolomitima s obzirom na utvrđen raspon vrijednosti intenziteta.

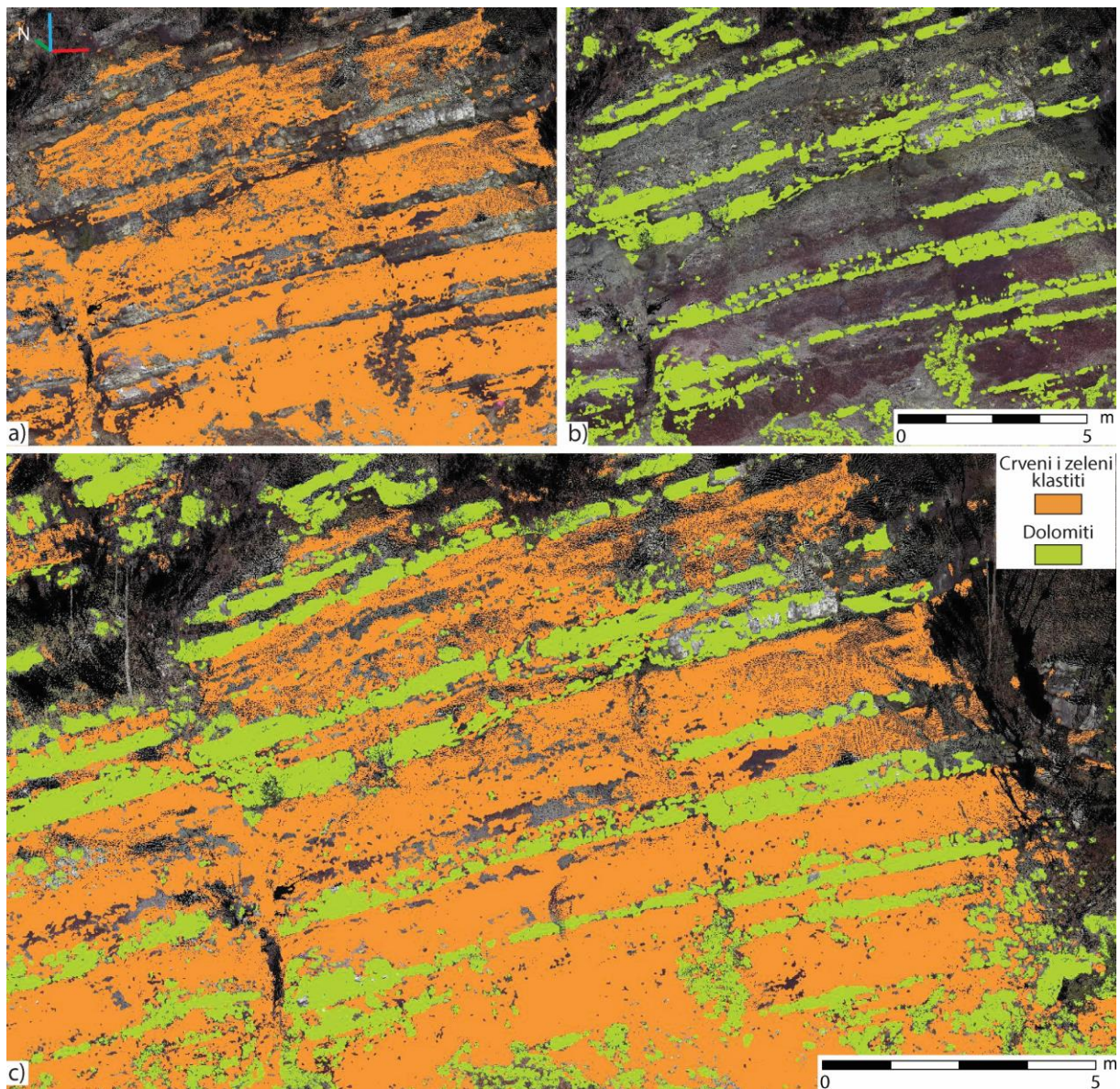


S obzirom da je određeni dio točaka, klasificiranih s obzirom na intenzitet, predstavljao šum, tj. nije predstavljao ni dolomite ni klastite, u svrhu njihovog uklanjanja i preciznije klasifikacije izrađeni su modeli gustoća točaka (slika 4.36). Navedeni modeli su izrađeni na temelju analize vrijednosti intenziteta susjednih točaka unutar određenog radijusa, odnosno za svaku točku određivan je broj susjednih točaka s približno istim vrijednostima intenziteta. Ukoliko određena točka nema veliki broj susjednih točaka s istim vrijednostima intenziteta, vrijednosti gustoće točaka na tom području će biti male (dio plavih zona na slici 4.36) i u većini slučajeva predstavljaju šum. Područja s malom gustoćom su uklonjena te su preostale točke koje predstavljaju isključivo klastične naslage (slika 4.37a) i dolomite (slika 4.37b). Primjer objedinjenih klasificiranih točaka koje pripadaju klastičnim naslagama i dolomitima s uklonjenim šumovima za dio modela oblaka točaka stijenskog zasjeke u Lokvama prikazan je na slici 4.37c, dok je konačan rezultat određivanja vrste stijene s obzirom na vrijednosti intenziteta prikazan u poglavlju 5.4 i korišten kao ulazni podatak prilikom definiranja inženjerskogeoloških zona te u prostornim kinematičkim analizama.



**Slika 4.36.** Prikaz vrijednosti gustoća točaka s približno istim vrijednostima intenziteta za a) klastite i b) dolomite.



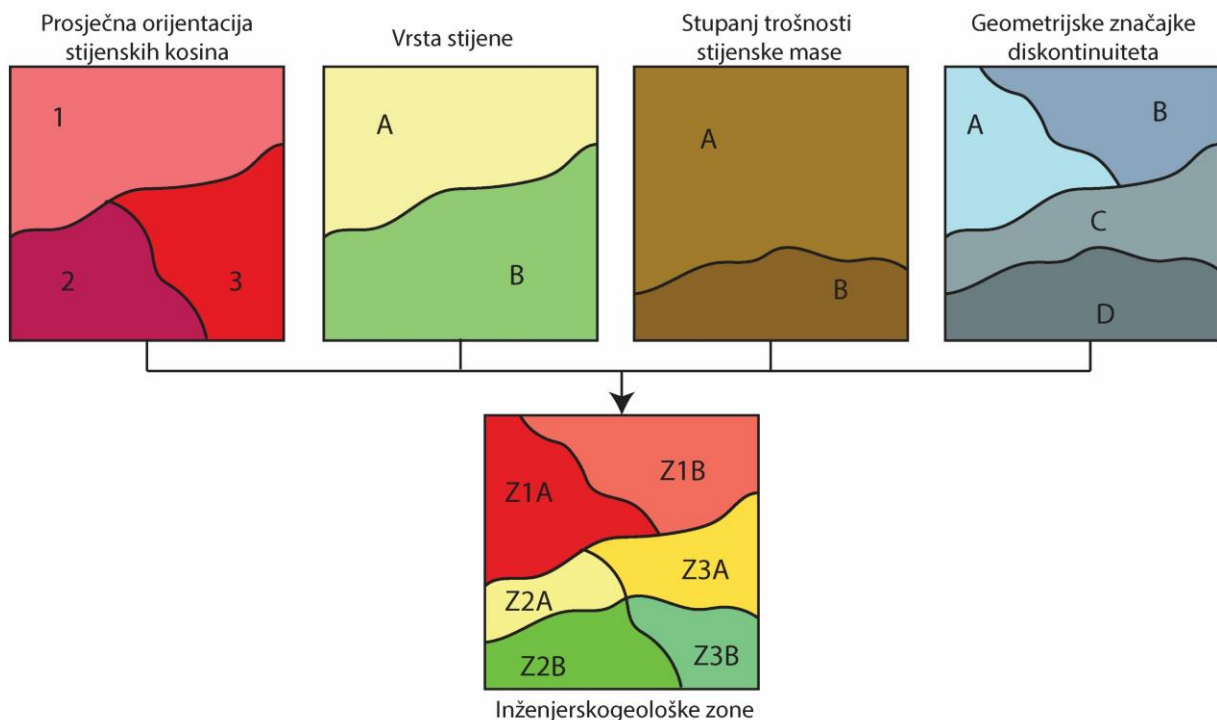


**Slika 4.37.** Prikaz klasifikacije točaka iz oblaka točaka koje predstavljaju: a) klastične naslage i b) dolomite te c) objedinjeni prikaz klasificiranih točaka koje pripadaju klastičnim naslagama i dolomitima s uklonjenim šumovima za dio modela oblaka točaka stijenskog zasjeka u Lokvama.

#### 4.4. Određivanje inženjerskogeoloških zona

Podjela istraživanih stijenskih kosina na inženjerskogeološke zone, tj. na zone kvazi-homogenih uvjeta vrlo je važan korak s obzirom da podaci iz jedne određene zone (statistički homogene cjeline) predstavljaju ulazni podatak za statističke analize te za prostorne kinematičke analize i procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Naime, korištenje podataka sa cijelog istraživanih područja u navedenim analizama uzrokovalo bi precjenjivanje ili podcjenjivanje broja mogućih slomova te vrstu slomova stijenske mase. Naime, ne bi bilo moguće procijeniti vjerojatnost da se određeni setovi diskontinuiteta pojavi na istom dijelu stijenske kosine, a što je potrebno odrediti statističkim analizama. Samim time podložnosti tog dijela stijenske kosine odronima ne bi mogla biti pravilno kvantificirana.

U okviru ovog rada inženjerskogeološke zone su određivane na temelju podataka koje je bilo moguće odrediti iz digitalnih modela oblaka točka i modela površina istraživanih stijenskih kosina na temelju: 1) prosječne orijentacije stijenskih kosina, 2) vrste stijena, 3) stupnja trošnosti stijenske mase i 4) geometrijskih značajki diskontinuiteta (slika 4.38). Prvi preliminarni korak u izdvajanju inženjerskogeoloških zona bio je izdvajanje područja različite prosječne orijentacije stijenskih kosina koja je utvrđena iz digitalnim modela površina.

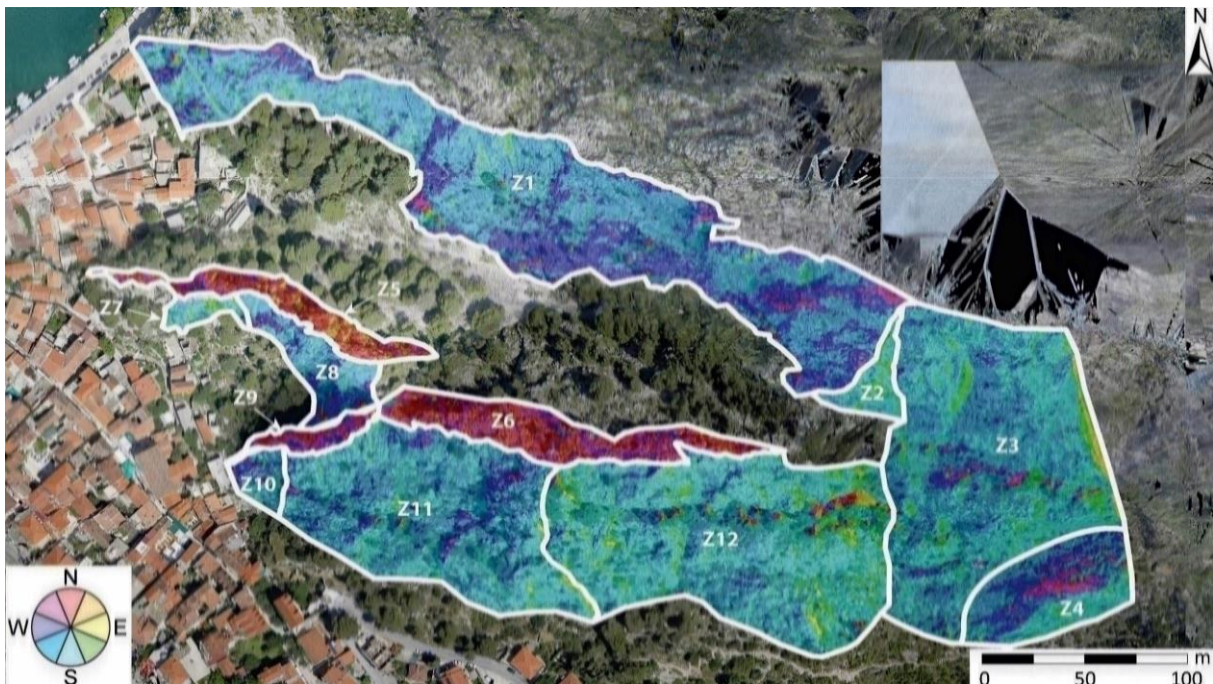


**Slika 4.38.** Shematski dijagram određivanja inženjerskogeoloških zona na temelju utvrđenih podataka o prosječnoj orijentaciji stijenskih kosina, vrsti stijene, stupnju trošnosti stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta.



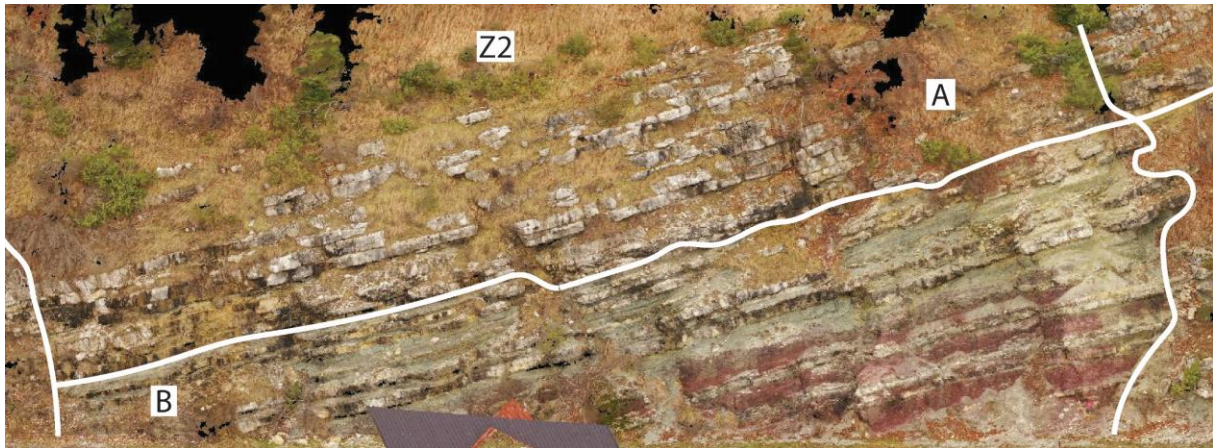
Područja izdvojena s obzirom na prosječnu orijentaciju stijenskih kosina predstavljaju dijelove kosina koje generalno padaju na različite strane svijeta (slika 4.39), čime će i potencijalno kretanje stijenskih blokova niz padinu imati različitu putanju. Osim prosječne orijentacije stijenskih kosina u ovom koraku, uziman je u obzir i odnos kosine i ugroženih građevina, bilo da se radi o prometnicama ili stambenim objektima. Ovako dobivene zone predstavljaju osnovne inženjerskogeološke zone te su služile za početno ograničavanje područja unutar kojih su provedena sustavna mjerenja geometrijskih značajki diskontinuiteta. Osnovne inženjerskogeološke zone dijeljene su na manje podzone s obzirom na utvrđene značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta unutar njih (slika 4.38). Pritom nisu uvijek korištene sve značajke, već određene kombinacije značajki ovisno o njihovoj izraženosti ili značajnosti. Ukoliko nije postajala značajna razlika u prosječnoj orijentaciji stijenskih kosina, kao što je bio slučaj na stijenskim zasjecima na lokaciji Špičunak i u Lokvama, zone su određivane na temelju značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta.

Kriterij vrste stijene za daljnju podjelu u podzone korišten je jedino na stijenskom zasjeku u Lokvama, s obzirom da je jedino na njemu bilo moguće izdvojiti različite vrste stijena. Ova podjela je bila nužna s obzirom da nije bilo moguće na isti način provesti statističke i kinematičke analize te procjenu podložnosti u donjim dijelovima zasjeka, gdje stijensku masu izgrađuju izmjene dolomita i klastita te u gornjem dijelu, gdje stijensku masu izgrađuju samo dolomiti (slika 4.40).



**Slika 4.39.** Podjela istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša na osnovne inženjerskogeološke jedinice s obzirom na orijentaciju stijenskih kosina.





**Slika 4.40.** Podjela inženjerskogeološke zone Z2 na dvije podzone A i B s obzirom na različitu vrstu stijena na stijenskom zasjeku u Lokvama. U podzoni A stijensku masu izgrađuje kontinuirano taloženi dolomiti, dok ju u zoni B izgrađuje izmjena klastita i dolomita.

Kriterij stupanj trošnosti stijenske mase korišten je na svim istraživanim stijenskim kosinama, prvenstveno kako bi se izdvojile zone unutar kojih se neće provoditi prostorne kinematičke analize i procjenjivati podložnost stijenskih kosina odronima, odnosno zone gdje je stijenska masa intenzivno trošna do raspadnuta i raspadnuta. Unutar takvih zona očekuju se procesi osipavanja i spiranja koji nisu bili obuhvaćeni ovim istraživanjem. Osim navedenog, izdvajanje zona s obzirom na kriterij stupnja trošnosti bilo je važno jer one zone s višim stupnjevima trošnosti stijenske mase često sadrže ishodišna područja odrona (npr. područje kojem je određen stupanj trošnosti stijenske mase W5 na slici 4.30) te se mogu koristiti kao jedna od metoda verifikacije rezultata procjene podložnosti stijenskih kosina odronima. Naime, takve zone trebale bi biti ocjenjene visokim vrijednostima podložnosti.

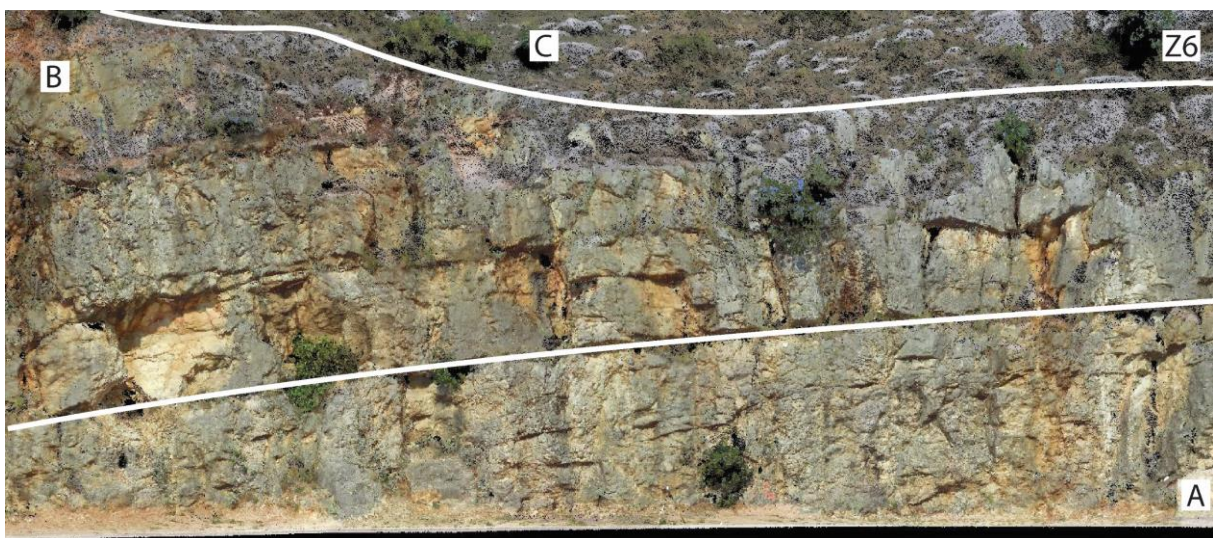
Najzahtjevnija podjela na podzone je ona s obzirom na geometrijske značajke diskontinuiteta. Prvo su osnovne inženjerskogeološke zone podijeljene na manje zone ukoliko su postojali značajni strukturni elementi poput rasjeda ili vrlo postojanih diskontinuiteta koji su predstavljali granice podzona (slika 4.41 i 4.42). Zatim su unutar podzona sustavno određene orijentacije svih diskontinuiteta i definirani setovi (poglavlje 4.3.1 i 4.3.2). Ukoliko su određeni setovi diskontinuiteta izostajali s određenog dijela podzone, ona je dodatno podijeljena kako bi unutar jedne podzone bili zastupljeni samo oni setovi diskontinuiteta i njima pripadajući diskontinuiteti koji se zaista i pojavljuju. Nakon ove podjele, unutar svake podzone određivani su parametri razmaka svih setova diskontinuiteta. Ukoliko se distribucija vrijednosti razmaka značajno mijenjala na određenim dijelovima podzona, takve zone bilo je potrebno dodatno podijeliti (slika 4.42) kako bi se dobile statistički homogene zone. Također, ovakve zone je bilo

važno izdvojiti s obzirom da se s promjenom distribucije razmaka mijenja i veličina stijenskih blokova.

Preklapom svih osnovnih zona i podzona dobivene su konačne inženjerskogeološke jedinice, a za svaku od njih provedene su statističke i kinematičke analize te provedena procjena podložnosti stijenskih kosina odronima. Rezultati podjele stijenskih kosinu u inženjerskogeološke zone prikazani su u poglavlju 5 te na priložima 1-4.



**Slika 4.41.** Podjela dijela stijenskog zasjeke na lokaciji Špičunak na dvije zone gdje granicu između zona predstavlja normalni rasjed pri čemu je vidljiva razlika u stupnju trošnosti stijenske mase i u geometrijskim značajkama diskontinuiteta u svakoj pojedinoj zoni.



**Slika 4.42.** Primjer podjele dijela stijenskih kosina na lokaciji Brljan u tri podzone s obzirom na različitu prisutnost setova diskontinuiteta i distribuciju razmaka diskontinuiteta. Granica između zone A i B čini diskontinuitet velike postojanosti, a granicu zone B i C vrh stijenskog pokosa pri čemu zonu C čine prirodne stijenske kosine.



#### 4.5. Vjerojatnost pojave diskontinuiteta i presječnica

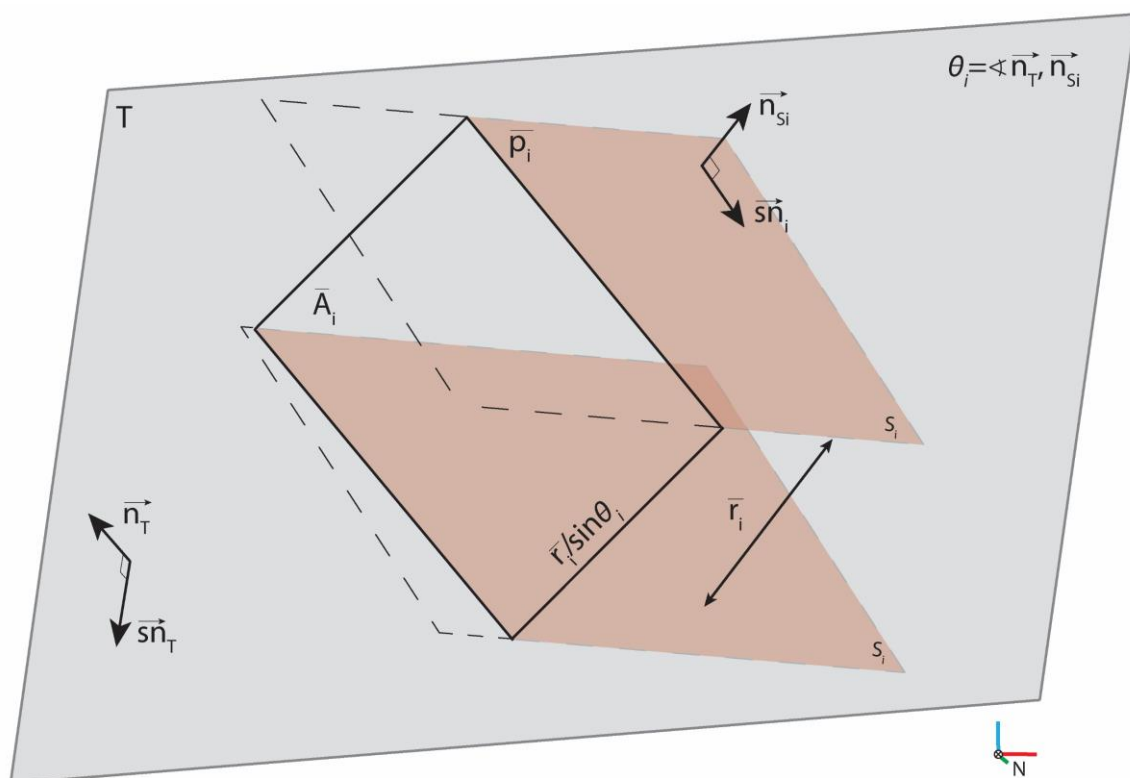
Obrada i statističke analize podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima prikazane su u poglavljima 4.2-4.4, a uključivale su: 1) određivanje orijentacije stijenskih kosina, tj. orijentacije plohi digitalnog modela i njihovih vektora normala, 2) određivanje setova diskontinuiteta i pripadajućih parametara *Fisherove* raspodjele, tj. srednje vrijednosti orijentacije seta diskontinuiteta i standardne devijacije, 3) definiranje raspodjele razmaka setova diskontinuiteta i svih njenih parametara, 4) definiranje srednje vrijednosti postojanosti setova diskontinuiteta te 5) određivanje inženjerskogeoloških zona. Svi navedeni podaci predstavljaju ulazne podatke za procjenu vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz pripadajućeg seta na određenom dijelu stijenske kosine, odnosno vjerojatnost pojave barem jedne presječnice koju čine određena dva seta diskontinuiteta, što omogućava precizniju provedbu prostornih kinematičkih analiza te u konačnici i precizniju procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Metodu za utvrđivanje vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta na 2,5D modelu površine padine (DMT rezolucije 25x25m) opisali su Jaboyedoff i dr. (2004). U okviru ovog rada navedena metoda je modificirana i nadograđena kako bi se mogla primjenjivati na 3D modelima stijenskih kosina visoke rezolucije. Također, u okviru nadogradnje metode definirana je vjerojatnost pojave presječnica diskontinuiteta te su u analizu uvršteni i diskontinuiteti koji ne pripadaju niti jednom setu.

Dva diskontinuiteta koja pripadaju istom setu tvore zamišljenu lateralnu površinu u obliku pravokutnika, a koja je definirana s razmakom i postojanosti diskontinuiteta (slika 4.43). Ukoliko je površina promatranja (ćelija digitalnog modela) okomita na orijentaciju diskontinuiteta, prosječna lateralna površina ( $\bar{A}$ ) računa se na sljedeći način:

$$\bar{A} = \bar{r} \cdot \bar{p} \quad (43)$$

gdje  $\bar{r}$  i  $\bar{p}$  predstavljaju srednju vrijednost normalnog razmaka, odnosno postojanosti diskontinuiteta. S obzirom da je vrlo rijedak slučaj da su svi diskontinuiteti okomiti na promatranu površinu, potrebno je napraviti korekciju s obzirom na kut ( $\theta$ ) što ga normala diskontinuiteta ( $\vec{n}_{Sl}$ ) zatvara s normalom ćelije digitalnog modela ( $\vec{n}_T$ ). Tada će normalni razmak postati prividni (slika 4.43), a korigirana prosječna lateralna površina ( $\bar{A}'$ ) bit će jednaka:

$$\bar{A}' = \frac{\bar{r}}{\sin\theta} \cdot \bar{p} \quad (44)$$



**Slika 4.43.** Shematski prikaz određivanja lateralne površine u obliku pravokutnika, koju tvore dva diskontinuiteta iz istog seta na licu stijenske mase tj. na ćeliji digitalnog modela (T).

Lateralne površine korištene su u svrhu procjene mogućeg broja diskontinuiteta iz određenog seta koji su sadržani ili prolaze kroz ćelije digitalnog modela. Odnosno, broj diskontinuiteta iz određenog seta sadržanih unutar ćelije ili koji prolaze kroz ćeliju bit će jednak omjeru površine ćelije i lateralne površine. S obzirom da su 3D modeli površine stijenskih kosina predstavljeni mrežnom pravokutnih trokuta, a ne ćelijama u obliku kvadrata, broj diskontinuiteta sadržan unutar ćelije ili koji prolaze kroz ćeliju ( $N_D(S_i)$ ) bit će jednak omjeru površine trokuta koji predstavlja jednu ćeliju ( $T$ ) i lateralne površinu u obliku pravokutnog trokuta, odnosno:

$$N_D(S_i) = T / \frac{\bar{A}'}{2} = 2T / \frac{\bar{r}}{\sin\theta} \cdot \bar{p} \quad (45)$$

S obzirom da će se lateralne površine pojavljivati nasumično na stijenskoj kosini može se pretpostaviti da će pripadati *Poisson*-ovoj raspodjeli. Vjerojatnost da će se barem jedan diskontinuitet iz seta pojaviti u ćeliji 3D modela površine stijenskih kosina može se odrediti iz odgovarajuće funkcije vjerojatnosti ( $f_T(S_i)$ ), tj. ona će biti jednaka:

$$f_T(S_i) = 1 - e^{-N_D} \quad (46)$$



gdje  $S_i$  predstavlja set diskontinuiteta  $i$ . Prema prethodnom izračunu, vjerojatnost da se pojavi barem jedan diskontinuitet uvijek će biti manja od 1, što u posebnim slučajevima neće odražavati realno stanje. Vjerojatnost da se barem jedan diskontinuitet pojavi na promatranoj površini bit će jednaka 1 kada je lateralna površina jednaka ili manja od površine ćelije modela (slika 4.43), pri čemu se prilikom izračuna lateralne površine mora uključiti maksimalni razmak seta diskontinuiteta ( $r_{max}$ ):

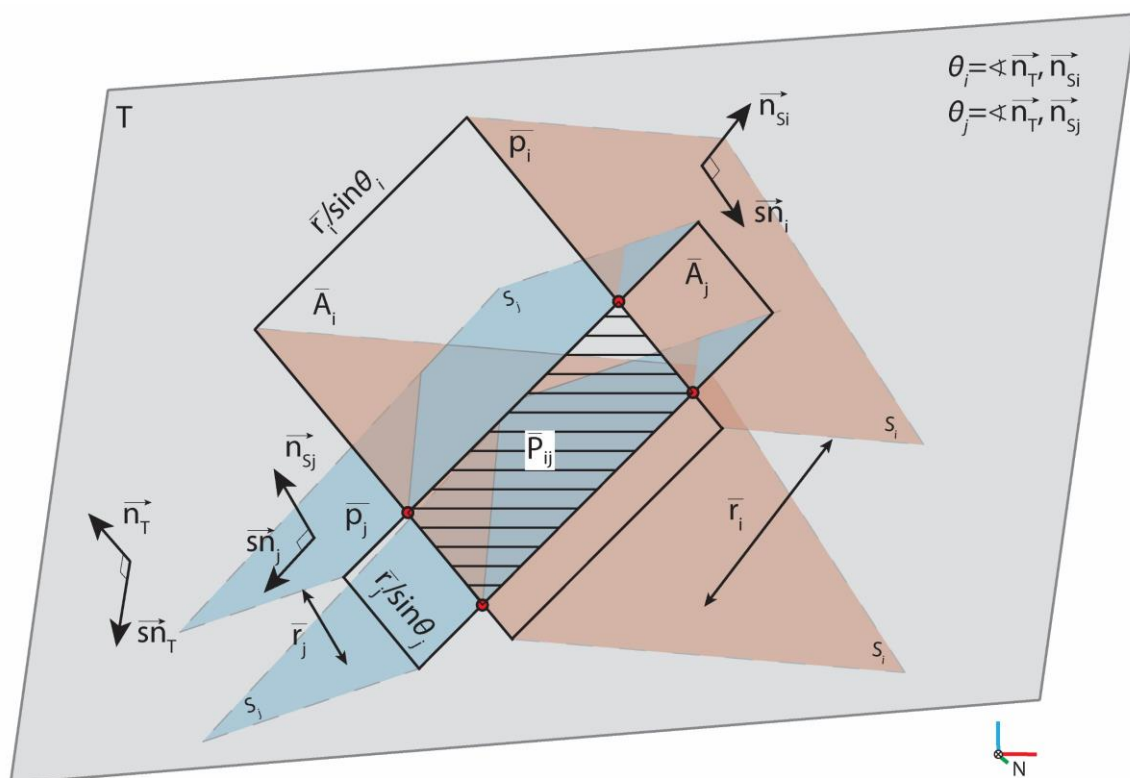
$$f_T(S_i) = 1; \text{ ako je } \frac{r_{max}}{\sin\theta} \cdot \bar{p} \leq T \quad (47)$$

jer se jedino na taj način eliminira mogućnost da lateralna površina ne presijeca promatranu površinu. Za one diskontinuitete koji se pojavljuju kao pojedinačni, tj. ne pripadaju niti jednom setu te im nije bilo moguće odrediti razmak, vjerojatnost je računata uzimajući u obzir pretpostavljeni razmak koji je dovoljno velik kako bi se osigurala pretpostavka da se samo jedan takav diskontinuitet pojavljuje unutar promatrane zone. Pretpostavljeni razmak ( $r_{img}$ ) računat je na sljedeći način:

$$r_{img} = \sqrt{v^2 + \check{s}^2} \quad (48)$$

gdje  $v$  i  $\check{s}$  predstavljaju visinu i širinu inženjerskogeološke zone aproksimiranu pravokutnikom, pri čemu pretpostavljeni razmak predstavlja duljinu dijagonale pravokutnika. Time se osigurava pretpostavka da je moguća pojava samo jednog takvog diskontinuiteta unutar promatrane inženjerskogeološke zone bez obzira na njegovu orijentaciju.

Vjerojatnost pojave barem jedne presječnice koju čine dva diskontinuiteta iz različitih setova na prvi pogled mogla bi se razmatrati kao umnožak pojedinačnih vjerojatnosti da se pojavi barem jedan diskontinuitet iz svakog seta. No takvim razmatranjem dobivena vjerojatnost bi samo značila da se oba diskontinuiteta pojavljuje, ali ne nužno da se i sijeku. Kako bi se pravilno odredila vjerojatnost pojave barem jedne presječnice, potrebno je razmatrati lateralnu površinu koja nastaje preklapanjem dviju lateralnih površina ( $\bar{A}_i$  i  $\bar{A}_j$ ) setova diskontinuiteta  $S_i$  i  $S_j$  (slika 4.44). Dobivena lateralna površina tvorit će pravokutnik ukoliko je kut između vektora normale setova diskontinuiteta jednak  $90^\circ$ , odnosno paralelogram ako je drugačiji odnos između kutova normala setova diskontinuiteta. Površina lateralne površine ( $\bar{P}_{ij}$ ) ovisi o srednjim vrijednostima normalnih razmaka oba seta diskontinuiteta ( $\bar{r}_i$  i  $\bar{r}_j$ ), korigiranih s obzirom na kutove što ga normale diskontinuiteta zatvaraju s normalom površine ( $\theta_i$  i  $\theta_j$ ) (slika 4.44).



**Slika 4.44.** Shematski prikaz određivanja prosječne lateralne površine presječnica ( $\bar{P}_{ij}$ ) koju tvore dva seta diskontinuiteta ( $S_i$  i  $S_j$ ) na licu stijenske mase tj. na ćeliji digitalnog modela (T).

S obzirom na navedeno, prosječna lateralna površina za presječnice ( $\bar{P}_{ij}$ ) bit će jednaka:

$$\bar{P}_{ij} = \frac{\bar{r}_i}{\sin\theta_i} \cdot \frac{\bar{r}_j}{\sin\theta_j} \quad (49)$$

pomoću koje je moguće odrediti pretpostavljeni broj presječnica ( $N_P$ ) na promatranoj površini, prema slijedećoj jednadžbi:

$$N_P(S_i, S_j) = T / \frac{\bar{P}_{ij}}{2} = 2T / \frac{\bar{r}_i}{\sin\theta_i} \cdot \frac{\bar{r}_j}{\sin\theta_j} \quad (50)$$

Poznajući očekivani broj presječnica moguće je odrediti vjerojatnost da će se barem jedna presječnica, koju čine diskontinuiteti iz dva različita seta, pojaviti na promatranoj površini, tj. ćeliji 3D modela površine stijenskih kosina. Funkcija vjerojatnosti pojave barem jedne presječnice bit će jednaka:

$$f_T(P_{ij}) = 1 - e^{-N_P} \quad (51)$$

Kao i u slučaju s vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta, vjerojatnost pojave barem jedne presječnice će uvijek biti manja od 1. Vjerojatnost da se barem jedna presječnica pojavi

na promatranoj površini bit će jednaka 1 kada je lateralna površina presječnica manja ili jednaka površini ćelije modela, pri čemu se prilikom izračuna lateralne površine mora uključiti maksimalni razmak oba seta diskontinuiteta koji tvore presječnicu ( $r_{i \max}$  i  $r_{j \max}$ ), tj.:

$$f_T(P_{ij}) = 1; \text{ ako je } \frac{r_{i \max}}{\sin\theta_i} \cdot \frac{r_{j \max}}{\sin\theta_j} \leq T \quad (52)$$

jer se jedino na taj način eliminira mogućnost da lateralna površina presječnica ne presijeca promatranu površinu. Vjerojatnost pojave presječnice koju čine diskontinuitet iz određenog seta te pojedinačni diskontinuitet određivana je na način da je jedna od srednjih vrijednosti razmaka seta diskontinuiteta iz jednadžbi 49 i 50 zamijenjena s vrijednostima pretpostavljenog razmaka iz jednadžbe 48.

Opisana metoda za određivanje vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta, odnosno presječnice na promatranoj ćeliji digitalnog modela površine stijenskih kosina, uklopljena je u algoritam za automatiziranu provedbu prostornih kinematičkih analiza i procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima (više u poglavlju 4.6 i 4.7).

#### 4.6. Kvantifikacija podložnosti stijenskih kosina odronima

Metode za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu, poznate iz literature, opisane su u poglavlju 2.3. Od opisanih metoda jedino ona prikazana u radu Matasci i dr. (2017) zapravo kvantificira podložnost, ali ne definira njenu maksimalnu vrijednost, što onemogućava usporedbu podložnosti u različitim inženjerskogeološkim zonama te izradu modela podložnosti za istraživano područje na kojem se lokalni uvjeti na kosini mijenjaju. Upravo radi toga glavni zadatak prilikom kvantifikacije podložnosti stijenskih kosina odronima u ovom radu bio je osmisliti indeks za podložnost odronima koji će biti u rasponu od 0 do 1, tj. od 0-100%, a koji mora uzimati u obzir podložnosti pri pojavi tri tipa sloma stijenske mase (planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem) na određenom dijelu kosine, a koji bi također trebali biti u rasponu od 0-1, odnosno od 0-100%. Kako bi bilo moguće odrediti podložnost za određeni tip sloma, prije svega je potrebno utvrditi na kojim dijelovima stijenskih kosina su zadovoljeni geometrijski uvjeti za nastanak određenog tipa sloma, za što je bilo potrebno provesti prostorne kinematičke analize.

##### 4.6.1 Prostorne kinematičke analize

Ulazni podaci za prostorne kinematičke analize unutar svake inženjerskogeološke zone bili u: (1) orijentacija stijenske kosine, tj. orijentacija svake ćelije digitalnog modela površine (poglavlje 4.2.1), (2) podaci o orijentaciji svih izmjerenih diskontinuiteta (poglavlje 4.3.1), (3) podaci o identificiranim setovima diskontinuiteta (poglavlje 4.3.2) te (4) bazični kut unutarnjeg trenja (vrijednosti preuzete iz Wyllie i Mah, 2005; Nikolić, 2015; Sećanj i dr., 2018).

Za bilo koju orijentaciju stijenske kosine moguće je utvrditi da li određeni diskontinuiteti ili prosječne vrijednosti setova diskontinuiteta zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak određenog tipa sloma prema jednadžbama 18-23, pri čemu je rezultat 0 ili 1, odnosno informacija da li su zadovoljeni geometrijski uvjeti za određeni tip sloma ili ne. Međutim, ako se u analizu uzimaju u obzir samo orijentacije diskontinuiteta bez informacije o pripadnosti određenom setu ili samo prosječne vrijednosti setova diskontinuiteta bez informacije o broju diskontinuiteta i varijaciji u vrijednostima orijentaciji, moguće je dobiti i pogrešnu informaciju, pogotovo ako su vrijednosti orijentacije diskontinuiteta blizu rubnih vrijednosti uvjeta iz jednadžbi 18-23. Kako bi se maksimalno umanjila mogućnost za pogrešku, Kinematički indeks hazarda (jednadžbe 28-31) (Casagli i Pini, 1993), modificiran je u svrhu primjene za svaki set diskontinuiteta odvojeno pritom uključujući sve diskontinuitete koji pripadaju samo tom setu. Modifikacija uključuje i odvojeno testiranje presječnica



diskontinuiteta koju čine određene kombinacije setova diskontinuiteta i njima pripadajućih diskontinuiteta te određivanje mogućih tipova slomova na kosinama koje su u prevjesu. Modificirani Kinematički indeks hazarda računat je na sljedeći način za svaku ćeliju digitalnog modela površine stijenskih kosina ( $K_l$ ) za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem:

$$KIH_{pl}(K_l, S_i) = 100 \cdot (N_{pl}(S_i) / N_D(S_i)) \text{ za planarni slom,} \quad (53)$$

$$KIH_{kl}(K_l, P_{ij}) = 100 \cdot (N_{kl}(P_{ij}) / N_P(P_{ij})) \text{ za klinasti slom,} \quad (54)$$

$$KIH_{pr}(K_l, S_i) = 100 \cdot (N_{pr}(S_i) / N_D(S_i)) \text{ za slom prevrtanjem,} \quad (55)$$

gdje  $N_{pl}$  i  $N_{pr}$  predstavljaju broj diskontinuiteta iz seta  $S_i$  koji zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak planarnog sloma te sloma prevrtanjem, dok  $N_D$  predstavlja ukupni broj diskontinuiteta sadržanih u setu  $S_i$ .  $N_{kl}(P_{ij})$  je ukupan broj presječnica diskontinuiteta, koji pripadaju setovima  $S_i$  i  $S_j$ , a zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak klinastog sloma, dok  $N_P(P_{ij})$  predstavlja ukupni broj presječnica koje čine diskontinuiteti iz setova  $S_i$  i  $S_j$ , vodeći računa da diskontinuiteti iz istog seta ne mogu tvoriti presječnicu. Broj diskontinuiteta i presječnica koji zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak određenog tipa sloma dobiven je na temelju uvjeta iz jednadžbi 18-23, nadograđenih dodatnim uvjetima kako bi se mogli analizirati i dijelovi kosina u prevjesu.

Uz uvjete iz jednadžbe 18 i 19, u kinematičku analizu dodani su i sljedeći uvjeti za planarni slom za kosinu u prevjesu, kada je  $\vec{n}_z(K_i) < 0$ :

$$(\alpha_{K_i} - 180) - 20 \leq \alpha_i \leq (\alpha_{K_i} - 180) + 20 \quad (56)$$

$$\beta_i > \phi \quad (57)$$

gdje su  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  smjer i kut nagiba diskontinuiteta,  $\alpha_{K_i}$  smjer nagiba ćelije modela,  $\phi$  kut unutarnjeg trenja, dok 20 označava dozvoljeno odstupanje u smjeru nagiba. U kinematičke analize za klinasti slom, uz uvjete iz jednadžbi 20 i 21, dodani su sljedeći uvjeti kako bi se mogli analizirati dijelovi kosine u prevjesu, kada je  $\vec{n}_z(K_i) < 0$ :

$$(\alpha_{K_i} - 180) - 90 \leq \alpha_{ij} \leq (\alpha_{K_i} - 180) + 90 \quad (58)$$

$$\beta_{ij} > \phi \quad (59)$$

gdje su  $\alpha_{ij}$  i  $\beta_{ij}$  smjer i kut nagiba presječnice koju čine diskontinuiteti  $i$  i  $j$ . Kod klinastog sloma maksimalno dozvoljeno odstupanje u smjeru nagiba presječnice u odnosu na smjer nagiba

kosine je  $90^\circ$  kako bi se uzela u obzir mogućnost za nastanak klinastog sloma gdje se slom odvija duž jednog od diskontinuiteta koji čine presječnice, a ne duž same presječnice, pri čemu takav diskontinuitet mora zadovoljavati uvjete za nastanak planarnog sloma. Uz uvjete iz jednadžbi 22 i 23, u kinematičke analize za slom prevrtanjem, za provedbe analize u dijelu kosine koja je u prevjesu dodani su sljedeći uvjeti, kada je  $\vec{n}_z(K_i) < 0$ :

$$\alpha_{K_i} - 20 \leq \alpha_i \leq \alpha_{K_i} + 20 \quad (60)$$

$$\beta_i > \phi \quad (61)$$

Provedba prostornih kinematičkih analiza i izračuna kinematičkih indeksa hazarda za svaku ćeliju digitalnih modela stijenskih kosina za potrebe procjene podložnosti stijenskih kosina odronima u potpunosti je automatizirana (više u poglavlju 4.7). Međutim, vrijednosti kinematičkih indeksa hazarda za svaki tip sloma same po sebi nisu dovoljne za kvantifikaciju podložnosti stijenskih kosina odronima zbog toga što jedino odgovaraju na pitanje da li su geometrijski uvjeti za slom zadovoljeni i koliko diskontinuiteta iz seta zadovoljava te uvjete. Odnosno, koristeći samo vrijednosti kinematičkih indeksa hazarda pretpostavlja se da se svi diskontinuiteti i sve presječnice mogu pojaviti na svakom dijelu stijenske kosine što nije točno. Upravo radi toga prostorne kinematičke analize potrebno je primijeniti zajedno s analizama vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz pripadajućeg seta i/ili presječnice diskontinuiteta koji pripadaju određenim setovima (poglavlje 4.5), kako bi se dobili pouzdaniji i precizniji podatci o mogućim tipovima slomova na određenom dijelu stijenske kosine.

#### 4.6.2 Indeks podložnosti odronima

Kako bi bilo moguće kvantificirati podložnost stijenskih kosina odronima i postaviti je u rasponu 0-1, tj. 0-100%, potrebno je odrediti uvjete u kojima će ona biti maksimalna i koji će sve faktori pridonositi povećanju podložnosti. S obzirom na osnovnu definiciju podložnosti stijenskih kosina odronima (poglavlje 2.1), potrebno je utvrditi mogućnost pojave odrona na određenom dijelu stijenske kosine. Prema tome, prva pretpostavka bi bila da postoji vjerojatnost da će se određeni diskontinuitet i/ili presječnica diskontinuiteta pojaviti na određenom dijelu stijenske kosine i da vrijednosti orijentacije takvih diskontinuiteta i/ili presječnica u nekoj mjeri zadovoljavaju uvjete za nastanak određenog tipa sloma. Ova pretpostavka, odnosno mogućnost ili točnije vjerojatnost pojave odrona, definirana je kao vjerojatnost presjeka dva nezavisna događaja, a moguće ju je iskazati na sljedeći način:

$$P(\text{zadovoljavaju uvjete za slom} \cap \text{pojavit će se}) = KIH \cdot f_T \quad (62)$$

gdje KIH predstavlja vrijednost kinematičkog indeksa hazarda za jedan od tipova slomova za određeni set diskontinuiteta ili presječnicu diskontinuiteta iz različitih setova, dok je  $f_T$  vjerojatnost da se taj diskontinuitet ili presječnica diskontinuiteta pojavi na tom dijelu stijenske kosine. Međutim, na ovaj način različiti setovi diskontinuiteta mogu u konačnici polučiti iste vrijednosti podložnosti ukoliko su dobivene iste ili slične vrijednosti kinematičkog indeksa hazarda i vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice, što ne mora nužno biti točno. Naime, ako uzmemo u obzir dva seta diskontinuiteta kojima je vjerojatnost da će se pojaviti na promatranoj površini 100% i svi diskontinuiteti iz oba seta zadovoljavaju uvjete za nastanak npr. planarnog sloma, tj. za oba seta  $KIH_{pl}$  će biti jednak 100% i prema jednadžbi 62 podložnost za oba seta će biti jednaka 100%. No, ako je poznato da je jedan set diskontinuiteta strmiji od drugog, onda duž njega postoji veća vjerojatnost za slom i faktor sigurnosti se smanjuje (Hoek i Bray, 1981; Wyllie i Mah, 2005). Analogno tome, podložnost dobivena analizom strmijeg seta diskontinuiteta trebala bi biti veća. Kako bi se izbjegla ovakva situacija postavljena je druga pretpostavka: podložnost stijenskih kosina odronima ovisi i o kutu nagiba diskontinuiteta i presječnica te će podložnost biti veća što je kut nagiba diskontinuiteta ili presječnice veći. Prema svemu navedenom, za svaki set diskontinuiteta i presječnica setova diskontinuiteta, ovisno o tipu sloma stijenske mase, podložnost može se računati na sljedeći način:

- 1) Podložnost za planarni slom ( $P_{pl_i}$ ), za promatrani set diskontinuiteta ( $S_i$ ), kinematički indeks hazarda ( $KIH_{pl}(S_i)$ ), vjerojatnost pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta ( $f_{K_i}(S_i)$ ) i s obzirom na kut nagiba seta diskontinuiteta ( $\sin\beta_{S_i}$ ) na promatranoj ćeliji digitalnog modela površine stijenskih kosina ( $K_i$ ) bit će jednaka:

$$P_{pl_{S_i}} = KIH_{pl}(S_i) \cdot f_{K_i}(S_i) \cdot \sin\beta_{S_i} \quad (63)$$

- 2) Podložnost za klinasti slom ( $P_{kl_i}$ ) za promatranu presječnicu diskontinuiteta ( $P_{ij}$ ), kinematički indeks hazarda ( $KIH_{kl}(P_{ij})$ ), vjerojatnost pojave barem jedne takve presječne ( $f_{K_i}(P_{ij})$ ) i s obzirom na kut nagiba presječne ( $\sin\beta_{P_{ij}}$ ) na promatranoj ćeliji digitalnog modela površine stijenskih kosina ( $K_i$ ) bit će jednaka:

$$P_{kl_{P_{ij}}} = KIH_{kl}(P_{ij}) \cdot f_{K_i}(P_{ij}) \cdot \sin\beta_{P_{ij}} \quad (64)$$

- 3) Podložnost za prevrtanje savijanjem ( $P_{ps_i}$ ), za promatrani set diskontinuiteta ( $S_i$ ), kinematički indeks hazarda ( $KIH_{ps}(S_i)$ ), vjerojatnost pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta ( $f_{K_i}(S_i)$ ) i s obzirom na kut nagiba seta diskontinuiteta ( $\sin\beta_{S_i}$ ) na promatranoj ćeliji digitalnog modela površine stijenskih kosina ( $K_i$ ) bit će jednaka:

$$P_{pr_{S_i}} = KIH_{pr}(S_i) \cdot f_{K_i}(S_i) \cdot \sin\beta_{S_i} \quad (65)$$

Na temelju navedenih pretpostavki i jednadžbi 63-65 moguće je definirati podložnost stijenskih kosina na određeni tip sloma za određene setove diskontinuiteta i presječnice u rasponu od 0-1, tj. 0-100%. Međutim, kako bi se u potpunosti kvantificirala podložnost za određeni tip sloma i njena ukupna vrijednost potrebno je uzeti u obzir sve setove diskontinuiteta i sve moguće presječnice koje tvore diskontinuiteti iz različitih setova.

Pristup autora postojećih metoda podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu (npr. Gigli i dr., 2012, Matasci i dr., 2017) uključivao je zbrajanje podložnosti po diskontinuitetu, setu ili tipu sloma kako bi se izračunala ukupna podložnost, što dovodi do toga da ukupna podložnost može biti jednaka bilo kojem broju većem od 0, ovisno o korištenoj metodi. Kako bi se eliminirala ova mogućnost i nejasna maksimalna vrijednost podložnosti, podložnost stijenskih kosina odronima ovisno o vrsti sloma i ukupna podložnost, u ovom radu računata je kao vjerojatnost unije, tj. kao vjerojatnost složenog događaja. Razlog tome je što predstavlja mogućnost za pojavljivanje bilo koje kombinacije događaja iz jednadžbi 63-65, a izračun je proveden odvojeno za svaki tip sloma te uzimajući u obzir sve moguće vrste slomova



zajedno. Ovaj pristup je primijenjen na temelju pretpostavke da svaki dodatni set diskontinuiteta ili presječnica diskontinuiteta koji zadovoljavaju uvjete za nastanak određene vrste sloma, uz uvjet da postoji određena vjerojatnost da se oni pojave na određenom dijelu stijenske kosine (vrijednosti iz jednadžbi 63-65 su veći od 0), pridonosi podložnosti po vrsti sloma, a ukupna vrijednost podložnosti po vrsti sloma pridonosi ukupnoj podložnosti stijenskih kosina odronima. Na temelju navedenog, podložnost stijenskih kosina odronima, ovisno o vrsti sloma moguće je računati za svaku ćeliju digitalnog modela na sljedeći način:

Indeks podložnosti za planarni slom ( $IP_{pl}$ )

$$IP_{pl} \left( \bigcup_{i=1}^n S_i \right) = \sum_{i=1}^n P_{pl_i} - \sum_{i<j} (P_{pl_i} \cdot P_{pl_j}) + \sum_{i<j<k} (P_{pl_i} \cdot P_{pl_j} \cdot P_{pl_k}) + \dots \\ + (-1)^{n-1} \sum_{i<\dots<n} \left( \prod_{i=1}^n P_{pl_i} \right) \quad (66)$$

Indeks podložnosti za klinasti slom ( $IP_{kl}$ )

$$IP_{kl} \left( \bigcup_{i,j=1}^n P_{ij} \right) = \sum_{i=1}^n P_{kl_i} - \sum_{i<j} (P_{kl_i} \cdot P_{kl_j}) + \sum_{i<j<k} (P_{kl_i} \cdot P_{kl_j} \cdot P_{kl_k}) + \dots \\ + (-1)^{n-1} \sum_{i<\dots<n} \left( \prod_{i=1}^n P_{kl_i} \right) \quad (67)$$

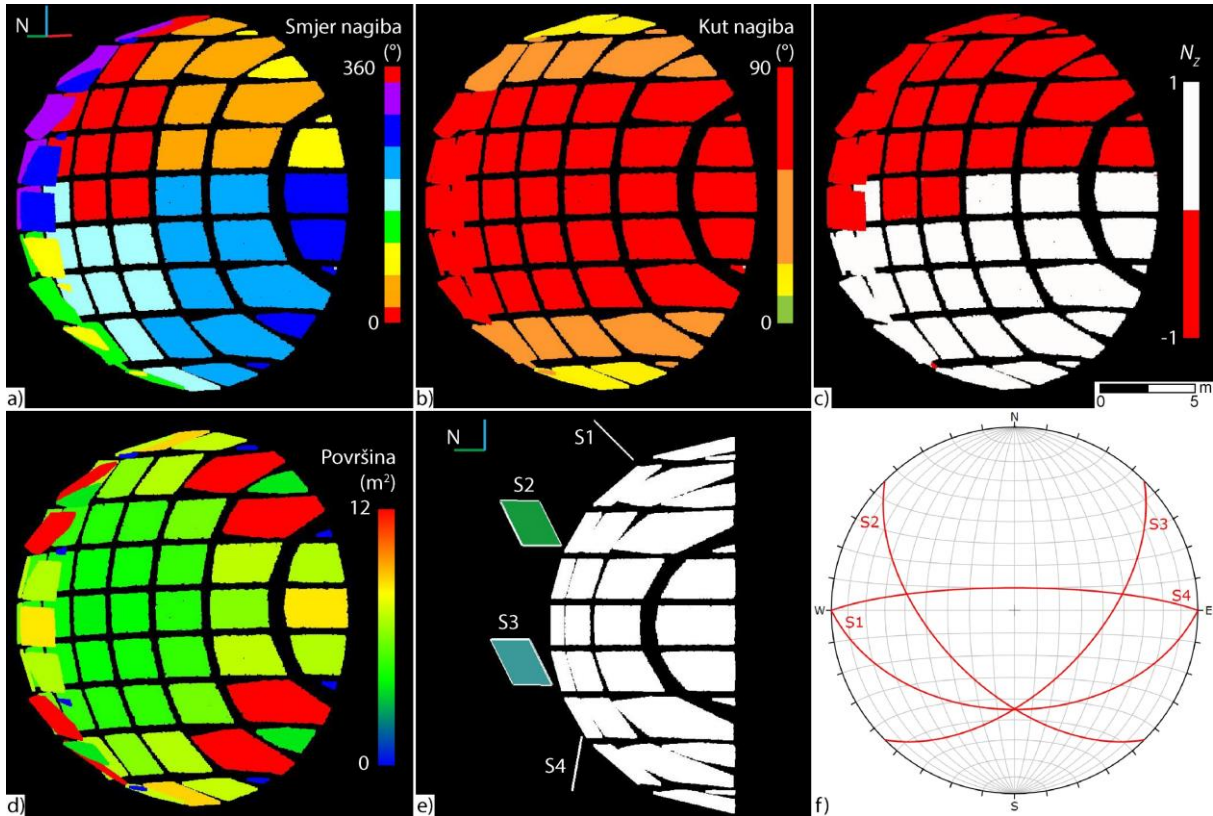
Indeks podložnosti za slom prevrtanjem ( $IP_{pr}$ )

$$IP_{pr} \left( \bigcup_{i=1}^n S_i \right) = \sum_{i=1}^n P_{pr_i} - \sum_{i<j} (P_{pr_i} \cdot P_{pr_j}) + \sum_{i<j<k} (P_{pr_i} \cdot P_{pr_j} \cdot P_{pr_k}) + \dots \\ + (-1)^{n-1} \sum_{i<\dots<n} \mathbb{P} \left( \prod_{i=1}^n P_{pr_i} \right) \quad (68)$$

gdje je  $n$  broj setova diskontinuiteta, odnosno presječnica setova diskontinuiteta ovisno o vrsti sloma stijenske mase, a  $P_{pl_i}$ ,  $P_{kl_i}$  i  $P_{pr_i}$  vrijednosti podložnosti po setu diskontinuiteta, tj. presječnici setova diskontinuiteta ovisno o vrsti sloma stijenske mase. Prvi članovi jednadžbe predstavljaju zbrajanje vrijednosti podložnosti kojima pridonose određeni setovi diskontinuiteta, dok ostali članovi, metodom uključivanja-isključivanja, predstavljaju presjek vjerojatnosti mogućih kombinacija po dva člana, tri člana do  $n$  članova, ovisno koliko ima ulaznih podataka. S obzirom na dobivene rezultate iz jednadžbi 66-68, moguće je na isti način, tj. vjerojatnosti unije izračunati ukupnu podložnost stijenskih kosina odronima ( $IPO$  - indeks podložnosti odronima) za bilo koju ćeliju digitalnog modela pomoću sljedeće jednadžbe:

$$IPO \left( \bigcup_{i=p,l,kl,pr} IP_i \right) = \sum_{i=1}^n IP_i - \sum_{i<j} (IP_i \cdot IP_j) + (IP_i \cdot IP_j \cdot IP_k) \quad (69)$$

Ovim pristupom i metodom izračuna indeksa podložnosti odronima, vrijednost podložnosti će uvijek biti u rasponu od 0-1, tj. 0-100%. Verifikacija ove metode izračuna indeksa podložnosti odronima provedena je na sintetičkoj konkavnoj polusferi sa četiri definirana seta diskontinuiteta (slika 4.45 i tablica 4.7).



**Slika 4.45.** Prikaz sintetičke stijenske kosine u obliku konkavne polu-sfere i setova diskontinuiteta pomoću kojih je provedena verifikacija izračuna indeksa podložnosti stijenskih kosina odronima, pri čemu je: a) smjer nagiba, b) kut nagiba kosine, c) prikaz dijelova sintetičke kosine koji su u prevjesu (crveno obojane plohe), d) površina plohi sintetičke kosine, e) pogled na polu-sferu sa zapada i prikaz jednog diskontinuiteta iz svakog seta i f) prikaz prosječne orijentacije setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji.

**Tablica 4.7.** Podaci o setovima diskontinuiteta, odnosno orijentaciji, prosječnom i maksimalnom razmaku te prosječnoj postojanosti na temelju kojih je određivana podložnost na sintetičkoj kosini

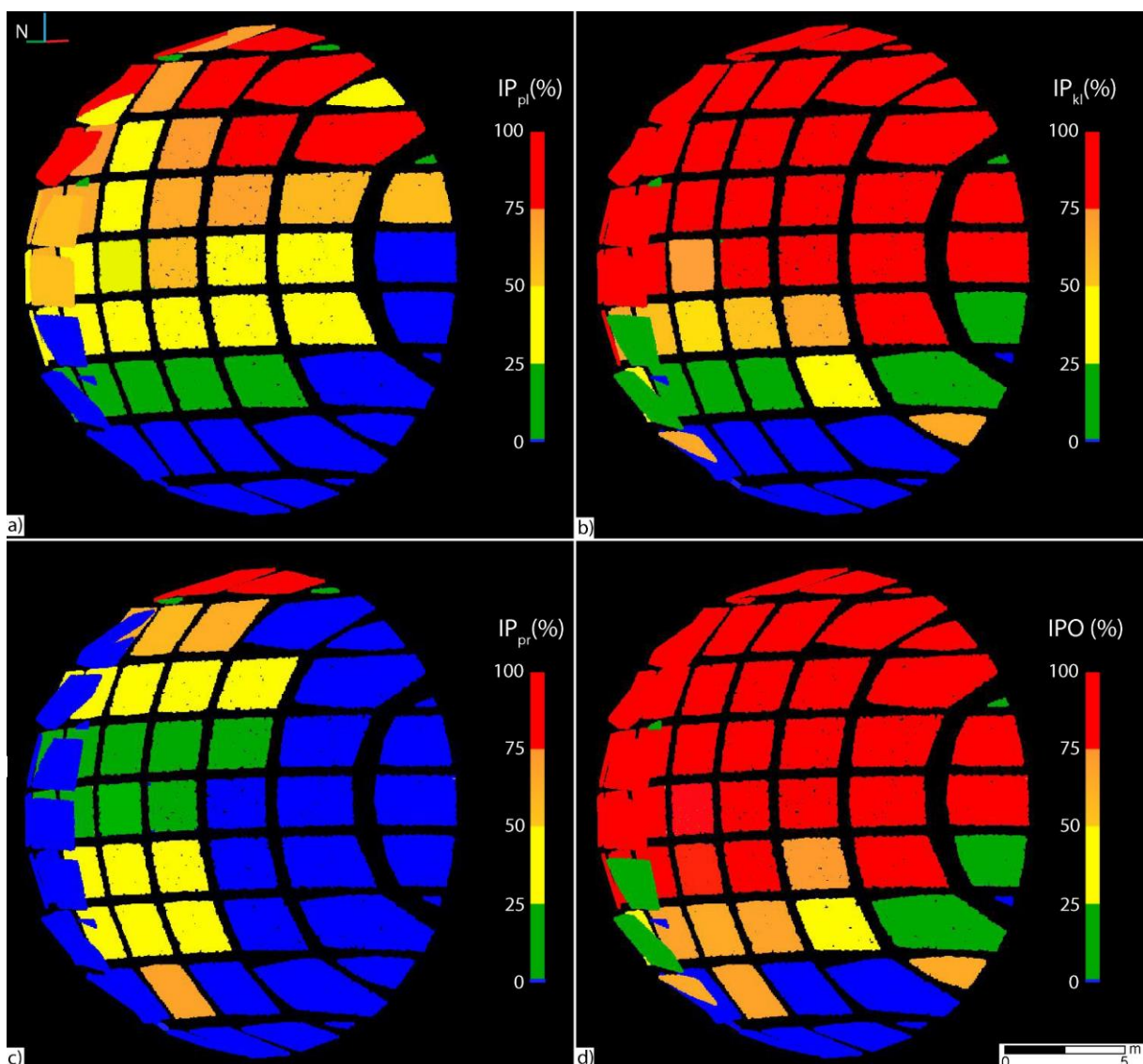
Set diskontinuiteta	Orijentacija (°)	$\bar{\Gamma}(m)$	$\Gamma_{\max}(m)$	$\bar{p}(m)$
S1	180/45	1,5	2	3
S2	225/55	1,5	2	3
S3	135/55	1,5	2	3
S4	0/80	1,5	2	3

Sintetička kosina u obliku konkavne polusfere korištena je kao testni poligon s obzirom da sadrži plohe različitih orijentacija (slika 4.45a i b) te dijelove koji predstavljaju prevjes (slika 4.45c), kako bi se mogle verificirati prostorne kinematičke analize s obzirom na četiri postavljena seta diskontinuiteta (slika 4.45e i f, tablica 4.7) za koje se zna da sigurno zadovoljavaju uvjete za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem, a sama kosina trebala bi biti vrlo podložna odronima. Set S1 zadovoljava uvjete za planarni slom u dijelovima sintetičke kosine sa smjerom nagiba prema J te u prevjesu, na dijelovima sintetičke kosine koje padaju prema S. Setovi S2 i S3 zadovoljavaju uvjete za planarni slom na dijelovima sintetičke kosine koji padaju prema JZ, odnosno JI, i u prevjesu na dijelovima stijenske kosine koji padaju prema SZ, odnosno SI. S obzirom na četiri seta diskontinuiteta ukupno je šest mogućih kombinacija setova koji mogu tvoriti presječnice (S1-S2, S1-S3, S1-S4, S2-S3, S2-S4 i S3-S4) i za očekivati je da mogu uzrokovati klinasti slom u svim dijelovima sintetičkog zasjeka osim u njegovom središnjem donjem dijelu gdje plohe sintetičkog zasjeka padaju na J, JZ i JI, a kut nagiba im je manji od  $40^\circ$  (slika 4.45a i b). Za očekivati je da bi slom prevrtanjem jedino mogao nastati duž seta S4 i to duž središnjeg dijela sintetičke kosine, odnosno plohi sintetičke kosine koje padaju prema J, JI i JZ te u prevjesu na plohama koje padaju prema S, SZ i SI (slika 4.45 a i b). Kako bi se metoda za izračun vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz određenog seta ili presječnice koju čine diskontinuiteti iz dva različita seta testirala u okviru izračuna indeksa podložnosti, plohe sintetičke kosine su različite površine (slika 4.45d), a setovima diskontinuiteta su pridodane vrijednosti srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednja vrijednost postojanosti (tablica 4.7). Za očekivati je da će vjerojatnost varirati i da će biti veća na dijelovima sintetičke kosine gdje je površina plohi veća, a samim time je za očekivati da će na tim dijelovima, ukoliko su zadovoljeni uvjeti za jednu od vrsta slomova, i vrijednosti podložnost biti veće.

Za svaku plohu sintetičke kosine provedene su prostorne kinematičke analize prema jednadžbama 18-23 i 53-61 te je izračunata vjerojatnost pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta, tj. za svaku plohu sintetičkog zasjeka računati su četiri vrijednosti vjerojatnosti, s obzirom na četiri postavljena seta diskontinuiteta, prema jednadžbama 44-47. Također, za šest mogućih kombinacija setova diskontinuiteta koji tvore presječnicu, za svaku plohu sintetičkog zasjeka računata je vjerojatnost pojave barem jedne presječnice iz svake kombinacije prema jednadžbama 48-52. Na temelju ovih rezultata za svaku plohu sintetičkog zasjeka i za svaki set diskontinuiteta, odnosno presječnicu, računati su indeksi podložnosti po setu, tj. presječnici, ovisno o vrsti sloma prema jednadžbama 63-65. S obzirom na prethodno dobivene vrijednosti, prema jednadžbama 66-68 dobiveni su indeksi podložnosti s obzirom na vrstu sloma

(slika 4.46a, b i c), a prema jednadžbi 69 za svaku plohu sintetičke kosine izračunat je indeks podložnosti odronima (*IPO*) (slika 4.46d), koji predstavlja uniju vjerojatnosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem.

Rezultati izračuna indeksa podložnosti u skladu su s očekivanim vrijednostima pri čemu je jasno vidljivo da je podložnost veća na ploham s većom površinom (npr. za planarni slom na slici 4.46a, u „normalnom“ dijelu sintetičke kosine i u prevjesu) gdje je i veća vjerojatnost za pojavu određenog seta diskontinuiteta ili presječnice. Također, podložnost raste u slučaju kad više diskontinuiteta ili presječnica na određenom dijelu kosine zadovoljava uvjete za određenu vrstu sloma (npr. za planarni i klinasti slom idući od središnjeg dijela kosine prema istoku,



**Slika 4.46.** Prikaz vrijednosti indeksa podložnosti dobivenih na temelju jednadžbi 63-69 i ulaznih podataka prikazanih na slici 4.45 te u tablici 4.7 za a) planarni slom ( $IP_{pl}$ ), b) klinasti slom ( $IP_{kl}$ ), c) slom prevrtanjem ( $IP_{pr}$ ) i d) ukupnu podložnost (*IPO*). Plavo obojane plohe označavaju dijelove kosine gdje određene vrste slomova nisu mogući.



odnosno zapadu na slici 4.46a i b). Nadalje, vrijednosti podložnosti za planarni i klinasti slom su veće kako raste kut nagiba plohe u dijelu sintetičke kosine koji nije u prevjesu (slika 4.46a i b) zbog veće vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta ili presječnice s obzirom da se s povećanjem kuta nagiba plohe smanjuje kut između normale diskontinuiteta, odnosno presječnice, koji zadovoljavaju uvjete za planarni i klinasti slom te normale površine kosine. Iako je za očekivati da će podložnost na slom prevrtanjem poprimiti visoke vrijednosti u centralnom dijelu sintetičke kosine gdje je kut nagiba plohe kosine oko  $90^\circ$ , podložnost je u tom dijelu mala (slika 4.46c) zbog male vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta S4. Razlog tome je što kut između vektora normale diskontinuiteta i plohe lica kosine iznosi  $10^\circ$  (diskontinuitet i ploha kosine se sijeku pod vrlo ostrim kutom) što značajno povećava zamišljenu lateralnu površinu iz jednadžbe 46, odnosno značajno smanjuje vjerojatnost za pojavu barem jednog diskontinuiteta iz tog seta. Također, visoka podložnost na prevrtanje u vršnom dijelu prevjesa (slika 4.46c) u potpunosti je opravdana s obzirom da je set S4 subvertikalni i praktički okomito siječe plohu lica kosine. To je moguće jer je na ovom dijelu kosine vjerojatnost za pojavu barem jednog diskontinuiteta iz tog seta jednaka 1, a svi diskontinuiteti iz navedenog seta zadovoljavaju uvjete za slom prevrtanjem u prevjesu. Ovaj primjer je samo jedan od mnogih koji pridodaju važnosti nadogradnji uvjeta u kinematičkim analizama za nastanak određene vrste sloma u prevjesu te važnosti analize vjerojatnosti prilikom procjene podložnosti jer klasičnim kinematičkim analizama u ovom dijelu kosine prevrtanje ne bi bilo prepoznato kao jedan od mogućih vrsta slomova.

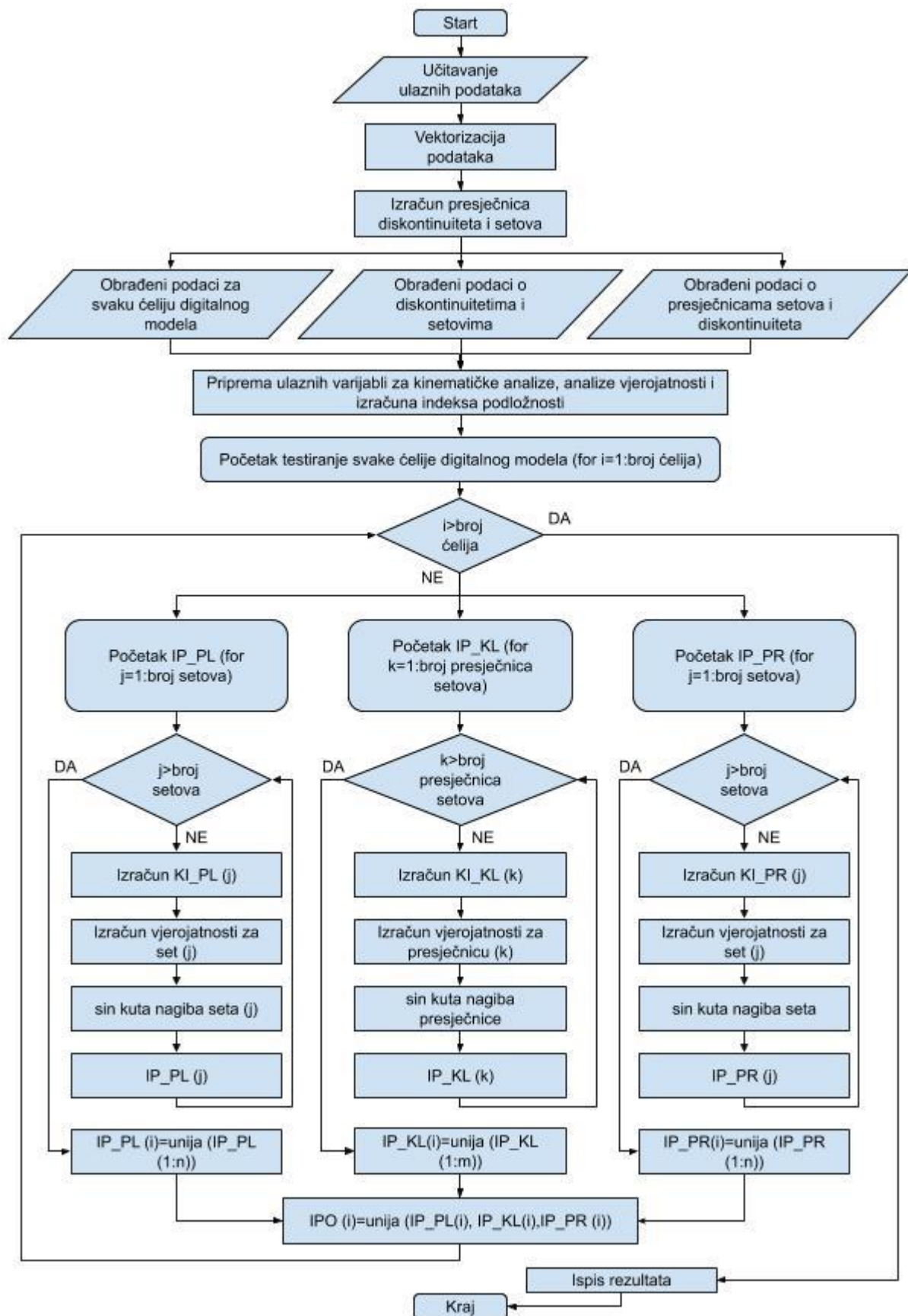
Procjena ukupne podložnosti, izražena indeksom podložnosti odronima na slici 4.46d, u potpunosti je u skladu s očekivanjima s obzirom na vrlo nepovoljno orijentirane diskontinuitete i na broj mogućih vrsta slomova stijenske mase, pri čemu je jasno vidljivo kako podložnosti na određenu vrstu sloma pridonose ukupnoj podložnosti. Također, indeksima podložnosti i ukupnoj podložnosti je jasno definiran minimum i maksimum. Podložnost stijenskih kosina odronima bit će 0 kada na promatranom dijelu kosine nije zadovoljen niti jedan uvjet za nastanak planarnog i klinastog sloma te sloma prevrtanjem, a bit će maksimalna, tj. 1 ili 100% kad su na određenom dijelu kosine zadovoljeni svi uvjeti za nastanak bilo koje vrste sloma, svi diskontinuiteti iz setova i sve presječnice zadovoljavaju uvjete za nastanak određene vrste slome te kad je vjerojatnost da se ti diskontinuiteti pojave na tom dijelu kosine jednaka 1, tj. 100%. Radi svega navedenog, kao i rezultata testiranja i verifikacije metode za izračun podložnosti stijenskih kosina odronima na sintetičkoj stijenskoj kosini, opisana metoda je korištena na svim stijenskim kosinama koji su istraživani u okviru ovog rada.

#### 4.7. Automatizacija kvantitativne procjene podložnosti

Analiza vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice na promatranoj površini kosine (poglavlje 4.5), prostorne kinematičke analize (poglavlje 4.6.1) i izračuni indeksa podložnosti (poglavlje 4.6.2) sadrže niz jednažbi za većinu kojih je potreban iterativni postupak proračuna s obzirom na broj diskontinuiteta, presječnica, kinematičkih analiza ovisno o vrsti sloma te veliki broj plohi digitalnog modela. Vrijeme potrebno za izračun indeksa podložnosti za sintetički zasjek iz poglavlja 4.6.2 mjerilo bi se u desecima sati, a za realne stijenske kosine kao što su npr. one iznad grada Omiša, vjerojatno u tjednima. Zbog toga, cijeli izračun indeksa podložnosti, odnosno kvantitativna procjena podložnosti stijenskih kosina odronima u potpunosti je automatizirana u programskom jeziku *MATLAB* te je izrađen algoritam *ROCKS* (engl. *ROCKfall Susceptibility*), čiji je pojednostavljeni dijagram toka prikazan na slici 4.47.

Algoritam sadrži četiri skripte zadužene za provedbu jednostavnih zadataka te povezivanja i pozivanje ostalih skripti i funkcija i 12 funkcija zaduženih za kompliciranije zadatke i izračune. Popis izrađenih skripti i funkcija te njihovih općenitih zadataka prikaz je u tablici 4.8, dok su osnovni podaci o samom računalnom kodu prikazani u tablici 4.9. Centralni dio cijelog algoritma je skripta *ROCKS.m*, čiji je zadatak definirati i usmjeravati potrebne varijable te preuzimati rezultate i nove varijable u svrhu povezivanja svih ostalih skripti i funkcija. Konačni cilj skripte *ROCKS.m* je pravilan ispis rezultata, tj. vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te indeksa podložnosti odronima.

Skripta *ucitavanje\_podataka.m* učitava podatke iz tri *Excel* tablice koje sadržavaju: 1) podatke o značajkama svake plohe digitalnog modela, 2) podatke o orijentaciji svih izmjerenih diskontinuiteta i 3) podatke o setovima diskontinuiteta. Tablica sa značajkama svake plohe digitalnog modela treba sadržavati podatke o orijentaciji kosine (smjer i kut nagiba), bazičnom kutu trenja, vrijednosti  $\vec{n}_z$  vektora normale, stupnju trošnosti stijenske mase, vrsti stijene te površini plohe. Tablica s podacima o izmjerenim diskontinuitetima sadržava i podatke o orijentaciji diskontinuiteta (smjer i kut nagiba) te kojem setu diskontinuiteta pripadaju. Tablica s podacima o setovima diskontinuiteta sadrži podatke o prosječnoj orijentaciji setova diskontinuiteta (smjer i kut nagiba), oznaci seta, prosječnom i maksimalnom razmaku te prosječnoj postojanosti diskontinuiteta. Od navedenih ulaznih podataka, svi podaci prikazani u sfernom koordinatnom sustavu se pretvaraju u kartezijev koordinatni sustav (vektORIZACIJA podataka na slici 4.47) koristeći funkcije *sf2kart.m*. te se podaci prosljeđuju skripti *presjecnice.m*.



**Slika 4.47.** Shema pojednostavljenog dijagrama toka algoritma *ROCKS*, izrađenog u programskom jeziku *MATLAB* u svrhu automatizacije kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima.

**Tablica 4.8.** Popis napisanih skripti i funkcija u *MATLAB*-u za potrebe automatizacije kvantitativne procjene podložnosti s prikazom zadataka svake skripte ili funkcije.

Naziv	Skripta/funkcija	Zadatak
<i>ROCKS.m</i>	skripta	glavna skripta koja povezuje i poziva sve ostale skripte i funkcije te ispisuje konačne rezultate
<i>ucitavanje_podataka.m</i>	skripta	učitavanje i obrada ulaznih podataka iz <i>Excel</i> tablica, vektorizacija ulaznih podataka
<i>sf2kart.m</i>	funkcija	pretvorba sfernih u kartezijeve koordinate
<i>presjecnice.m</i>	skripta	obrada vektorskih podataka o diskontinuitetima i setovima diskontinuiteta i izračun njihovih presječnica
<i>kart2sf.m</i>	funkcija	pretvorba kartezijevih u sferne koordinate
<i>podloznost.m</i>	skripta	priprema varijabli i matricno indeksiranih struktura, iterativno pozivanje obrađenih ulaznih podataka te pozivanje i povezivanje preostalih skripti i funkcija
<i>P_set_PS.m</i>	funkcija	iterativno računanje za svaki set diskontinuiteta vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>KI_planarni.m</i>	funkcija	iterativno računanje kinematičkog indeksa za planarni slom za svaki set diskontinuiteta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>IP_PL_unija.m</i>	funkcija	iterativno računanje unije vjerojatnosti podložnosti za planarni slom s obzirom na podložnost svakog seta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>P_presjecnica.m</i>	funkcija	iterativno računanje za svaku kombinaciju setova diskontinuiteta vjerojatnosti pojave barem jedne presječnice svake kombinacije za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>KI_klinasti.m</i>	funkcija	iterativno računanje kinematičkog indeksa za klinasti slom za svaku kombinaciju presječnica setova diskontinuiteta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>IP_KL_unija.m</i>	funkcija	iterativno računanje unije vjerojatnosti podložnosti za klinasti slom s obzirom na podložnost svake kombinacije presječnice setova za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>P_set_PR.m</i>	funkcija	iterativno računanje za svaki set diskontinuiteta vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>KI_prevrtanje.m</i>	funkcija	iterativno računanje kinematičkog indeksa za slom prevrtanjem za svaki set diskontinuiteta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>IP_PR_unija.m</i>	funkcija	iterativno računanje unije vjerojatnosti podložnosti za slom prevrtanjem s obzirom na podložnost svakog seta za svaku ćeliju digitalnog modela
<i>IPO_unija.m</i>	funkcija	iterativno računanje unije vjerojatnosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem te izračun indeksa podložnosti odronima za svaku ćeliju digitalnog modela

Skripta *presjecnice.m* najprije računa prosječne vrijednosti presječnica različitih kombinacija setova diskontinuiteta, a zatim pronalazi diskontinuitete koji pripadaju određenim kombinacijama setova te određuje presječnice svih diskontinuiteta iz tih kombinacija, uz uvjet da diskontinuiteti iz istog seta ne mogu tvoriti presječnicu. Skripta zapisuje vektorske podatke o kombinacijama setova diskontinuiteta i pripadajućih diskontinuiteta u strukturni podatkovni



**Tablica 4.9.** Osnovni podaci o računalnom kodu na temelju kojeg je nastao algoritam *ROCKS*.

Ukupno linija koda	1795 (53 A4 stranice)
Broj napisanih skripti	4
Broj napisanih funkcija	12
Broj korištenih varijabli	149
Broj struktura podatkovnih nizova	4
Broj indeksiranih matičnih struktura	29
Broj jednostrukih i višestrukih <i>IF</i> petlji	56
Broj jednostrukih i višestrukih <i>FOR</i> petlji	23

niz osiguran za podatke o presječnicama. Korištenjem funkcije *kart2sf.m* vektorske podatke prikazuje i u sfernom koordinatnom sustavu te ih sprema u zasebni dio strukturnog podatkovnog niza. Zadnji zadatak skripte *presjecnice.m* je preuzeti sve podatke o setovima diskontinuiteta i pridružiti ih kombinacijama setova diskontinuiteta, što je potrebno za kasnije računanje vjerojatnosti pojave barem jedne presječnice za određenu kombinaciju setova diskontinuiteta. Nakon zapisa podataka o presječnicama, skripta *ucitavanje\_podataka.m* vraća u glavnu skriptu četiri strukture podatkovnog niza (*KOSINA*, *DISKONTINUITETI*, *SETOVI* i *PRESJEČNICE*) koji sadrže sve sirove i obrađene ulazne podatke.

Glavna skripta, *ROCKS.m*, navedene podatke prosljeđuje skripti *podloznost.m* kojoj je zadatak definirati sve ulazne varijable za prostorne kinematičke analize, izračun kinematičkih indeksa hazarda, vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice te izračun indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te ukupnog indeksa podložnosti odronima. Nakon pripreme podataka, u okviru glavne *FOR* petlje (slika 4.47), započinje testiranje za svaku ćeliju digitalnog modela, tj. za svaki red strukture podatkovnog niza *KOSINA*. Skripta *podloznost.m* za svaku ćeliju digitalnog modela i za svaki set, odnosno presječnicu setova diskontinuiteta (višestruke *FOR* petlje slika 4.47) poziva funkcije: 1) *KI\_planarni.m*, *P\_set\_PS.m*, *IP\_PL\_unija.m* u svrhu izračuna indeksa podložnosti za planarni slom, 2) *KI\_klinasti.m*, *P\_presjecnica.m*, *IP\_KL\_unija.m* u svrhu izračuna indeksa podložnosti za klinasti slom i 3) *KI\_prevrtanje.m*, *P\_set\_PR.m*, *IP\_PR\_unija.m* u svrhu izračuna podložnosti za slom prevrtanjem.

Funkcija *KI\_planarni.m* za svaki set diskontinuiteta iterativno testira sve diskontinuitete koji pripadaju određenom setu da li zadovoljavaju uvjete za nastanak planarnog sloma i vraća vrijednost kinematičkog indeksa za planarni slom za svaki set diskontinuiteta (izračun *KI\_PL(j)* sa slike 4.47). Funkcija *P\_set\_PS.m* za svaki set diskontinuiteta iterativno računa vjerojatnost da se barem jedan diskontinuitet iz tog seta pojavi na promatranoj ćeliji digitalnog modela te vraća dobivene vrijednosti vjerojatnosti (izračun vjerojatnost za set (*j*) sa slike 4.47). Na temelju

dobivenih vrijednosti za svaki set diskontinuiteta, zajedno s izračunatim sinusom kuta nagiba diskontinuiteta, skripta *podloznost.m* računa podložnost svakog seta diskontinuiteta za planarni slom te sprema dobivene vrijednosti (IP\_PL (j) sa slike 4.47). Dobivene vrijednosti podložnosti na planarni slom za svaki set šalju se u funkciju *IP\_PL\_unija.m*. koja računa indeks podložnosti za planarni slom na testiranoj ćeliji digitalnog modela (IP\_PL(i)=unija (IP\_PL (1:n)) sa slike 4.47).

Funkcija *KI\_klinastii.m* za svaku kombinaciju setova diskontinuiteta koji čine presječnicu iterativno testira sve diskontinuitete, koji pripadaju određenoj kombinaciji setova, da li zadovoljavaju uvjete za nastanak klinastog sloma i sprema vrijednost kinematičkog indeksa za klinasti slom za svaku kombinaciju setova diskontinuiteta koji tvore presječnicu (izračun KI\_KL(k) sa slike 4.47). Funkcija *P\_presjecnica.m* za svaku presječnicu setova diskontinuiteta iterativno računa vjerojatnost da se barem jedna presječnica diskontinuiteta koji pripadaju toj kombinaciji pojavi na testiranoj ćeliji digitalnog modela te sprema dobivene vrijednosti vjerojatnosti (izračun vjerojatnosti za presječnicu (k) sa slike 4.47). Na temelju dobivenih vrijednosti za svaku presječnicu setova diskontinuiteta, zajedno sa izračunatim sinusom kuta nagiba presječnice, skripta *podloznost.m* računa podložnost svakog seta diskontinuiteta na klinasti slom te sprema dobivene vrijednosti (IP\_KL (k) sa slike 4.47). Dobivene vrijednosti podložnosti za klinasti slom za svaku presječnicu šalju se u funkciju *IP\_KL\_unija.m*. koja računa indeks podložnosti za klinasti slom na testiranoj ćeliji digitalnog modela (IP\_KL(i)=unija (IP\_KL (1:m)) sa slike 4.47).

Funkcija *KI\_prevrtanje.m* za svaki set diskontinuiteta iterativno testira sve diskontinuitete koji pripadaju određenom setu da li zadovoljavaju uvjete za nastanak sloma prevrtanjem i sprema vrijednosti kinematičkog indeksa za slom prevrtanjem za svaki set diskontinuiteta (izračun KI\_PR(j) sa slike 4.47). Funkcija *P\_set\_PR.m* za svaki set diskontinuiteta iterativno računa vjerojatnost da se barem jedan diskontinuitet iz tog seta pojavi na promatranoj ćeliji digitalnog modela te sprema dobivene vrijednosti vjerojatnosti (izračun vjerojatnost za set (j) sa slike 4.47). Na temelju dobivenih vrijednosti za svaki set diskontinuiteta, zajedno sa izračunatim sinusom kuta nagiba diskontinuiteta, skripta *podloznost.m* računa podložnost svakog seta diskontinuiteta za slom prevrtanjem te sprema dobivene vrijednosti (IP\_PR (j) sa slike 4.47). Dobivene vrijednosti podložnosti za slom prevrtanjem za svaki set diskontinuiteta šalju se u funkciju *IP\_PR\_unija.m*. koja računa indeks podložnosti za slom prevrtanjem na testiranoj ćeliji digitalnog modela (IP\_PR(i)=unija (IP\_PR (1:n)) sa slike 4.47).

Dobivene vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem skripta *podloznost.m* prosljeđuje funkciji *IPO\_unija.m* koja računa indeks podložnosti odronima za testiranu ćeliju digitalnog modela ( $IPO(i) = unija(IP\_PL(i), IP\_KL(i), IP\_PR(i))$ ) sa slike 4.47). Funkcija *podloznost.m* dobivene rezultate izračuna indeksa podložnosti sprema u indeksiranu matričnu strukturu, a glavna *FOR* petlja prelazi na iduću ćeliju digitalnog modela te ponavlja cijeli postupak testiranja. Nakon što završi testiranje svih ćelija digitalnog modela i zapis svih indeksa podložnosti u indeksiranu matričnu strukturu, skripta *podloznost.m* vraća podatke u glavnu skriptu *ROCKS.m* koja priprema rezultate za ispis, nudi odabir *Excel* datoteke za ispis podataka te rezultate ispisuje u odabranu datoteku. Dobivena datoteka može se učitati u bilo koji računalni program za prikaz oblaka točaka, a sami rezultati vizualizirati.

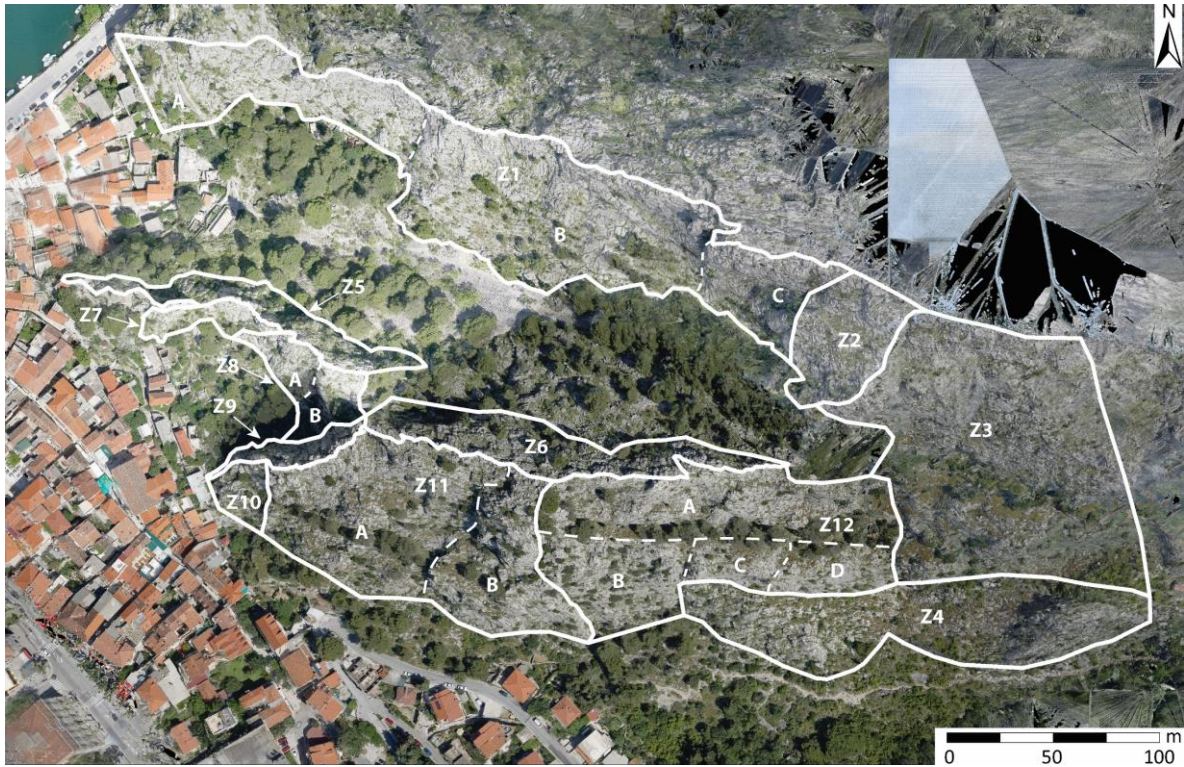
Opisani algoritam koristi sve jednadžbe iz poglavlja 4.5 i 4.6, a podatke o stupnju trošnosti i vrsti stijene koristi kao uvjet da li da provodi izračun indeksa podložnosti odronima ili ne (opisano u poglavlju 4.3.5). Također, algoritam je korišten prilikom verifikacije metode izračuna indeksa podložnosti iz poglavlja 4.6.2, čime je provjerena i njegova točnost. Ovim algoritmom provedene su analize za svaku inženjerskogeološku zonu na istraživanim kosinama s obzirom na geometrijske značajke diskontinuiteta i značajke stijenske mase koji su utvrđeni u određenoj zoni. Opisani algoritam služio je za automatiziranu kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima na svim istraživanim stijenskim kosinama, a dobiveni rezultati prikazani su u poglavlju 6 i u prilogima 1-4.

## 5. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE DISKONTINUITETA I STIJENSKE MASE UTVRĐENE ANALIZAMA DIGITALNIH MODELA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati analiza provedenih na digitalnim visoko-rezolucijskim modelima stijenskih kosina za sva četiri pilot područjima, odnosno za svaku njihovu inženjerskogeološku zonu. Za svaku zonu prikazani su utvrđeni rasponi stupnja trošnosti stijenske mase te raspodjele smjera i kuta nagiba normalno orijentiranih stijenskih kosina i onih u prevjesu, izvedenih iz ćelija digitalnih modela površine stijenske mase. Također, prikazani su mjereni diskontinuiteti te utvrđeni setovi diskontinuiteta dobiveni na temelju algoritma spektralnog grupiranja koji je automatiziran u računalnom jeziku *MATLAB*. Za svaki set diskontinuiteta prikazani su parametri *Fisherove* statistike te izračunate vrijednosti razmaka i postojanosti dobivene statističkim analizama i metodom topografskom kružnog prozora. Svi podaci prikazani u ovom poglavlju predstavljaju ulazne podatke za automatiziranu analizu podložnosti stijenskih kosina odronima.

### 5.1. Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša

Na temelju analiza provedenih na visoko-rezolucijskim 3D modelima stijenskih kosina i utvrđenih značajki stijenske mase, geometrijskih značajki diskontinuiteta te orijentacije stijenskih kosina, područje istraživanja iznad grada Omiša podijeljeno je na 12 osnovnih inženjerskogeoloških zona, pri čemu je njih četiri dodatno podijeljeno na dvije ili više podzone (slika 5.1). Kriterij za izdvajanje inženjerskogeoloških zona prikazan je u tablici 5.1. Vizualnim pregledom digitalnih modela utvrđeno je da stijensku masu na području istraživanja izgrađuju svježe do intenzivno trošni vapnenci (W2-W6). Alatom *Compass* u računalnom programu *CloudCompare* određena je orijentacija 2452 diskontinuiteta koji su, ovisno o inženjerskogeološkoj zoni, podijeljeni u tri do pet setova diskontinuiteta (osam setova diskontinuiteta ukupno) na temelju algoritma za spektralno grupiranje, tj. automatiziranom metodom pomoću napisanih skripti i funkcija u programskom jeziku *MATLAB*. Za svaki set diskontinuiteta određene su srednja i maksimalna vrijednost razmaka te srednja vrijednost postojanosti. U nastavku su za svaku inženjerskogeološku zonu prikazani rezultati provedenih analiza na visoko-rezolucijskim modelima, odnosno utvrđene značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koji su predstavljali ulazne podatke za automatiziranu kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.



**Slika 5.1.** Prikaz granica 12 inženjerskogeoloških zona (označeno sa Z1-Z12) i podzona (označeno sa A, B, C i D) na ortofoto snimci za pilot područje stijenskih kosina iznad grada Omiša.

**Tablica 5.1.** Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot područja iznad grada Omiša.

IG zona	Podzona	Kriterij izdvajanja
Z1	Z1A	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta
	Z1B	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta
	Z1C	Orijentacija stijenskih kosina, stupanj trošnosti, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
Z2	/	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta
Z3	/	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z4	/	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z5	/	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta
Z6	/	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z7	/	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z8	Z8A	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z8B	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z9	/	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z10	/	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti stijenske mase
Z11	Z11A	Rasjed, stupanj trošnosti stijenske mase, geometrijske značajke diskontinuiteta
	Z11B	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z12	Z12A	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z12B	Orijentacija stijenskih kosina, rasjed geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z12C	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z12D	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti

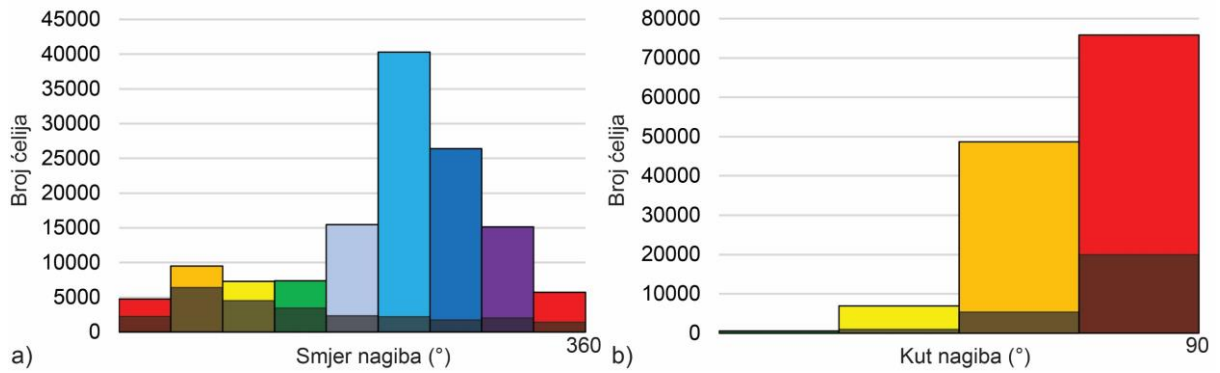


### 5.1.1 Inženjerskogeološka zona Z1

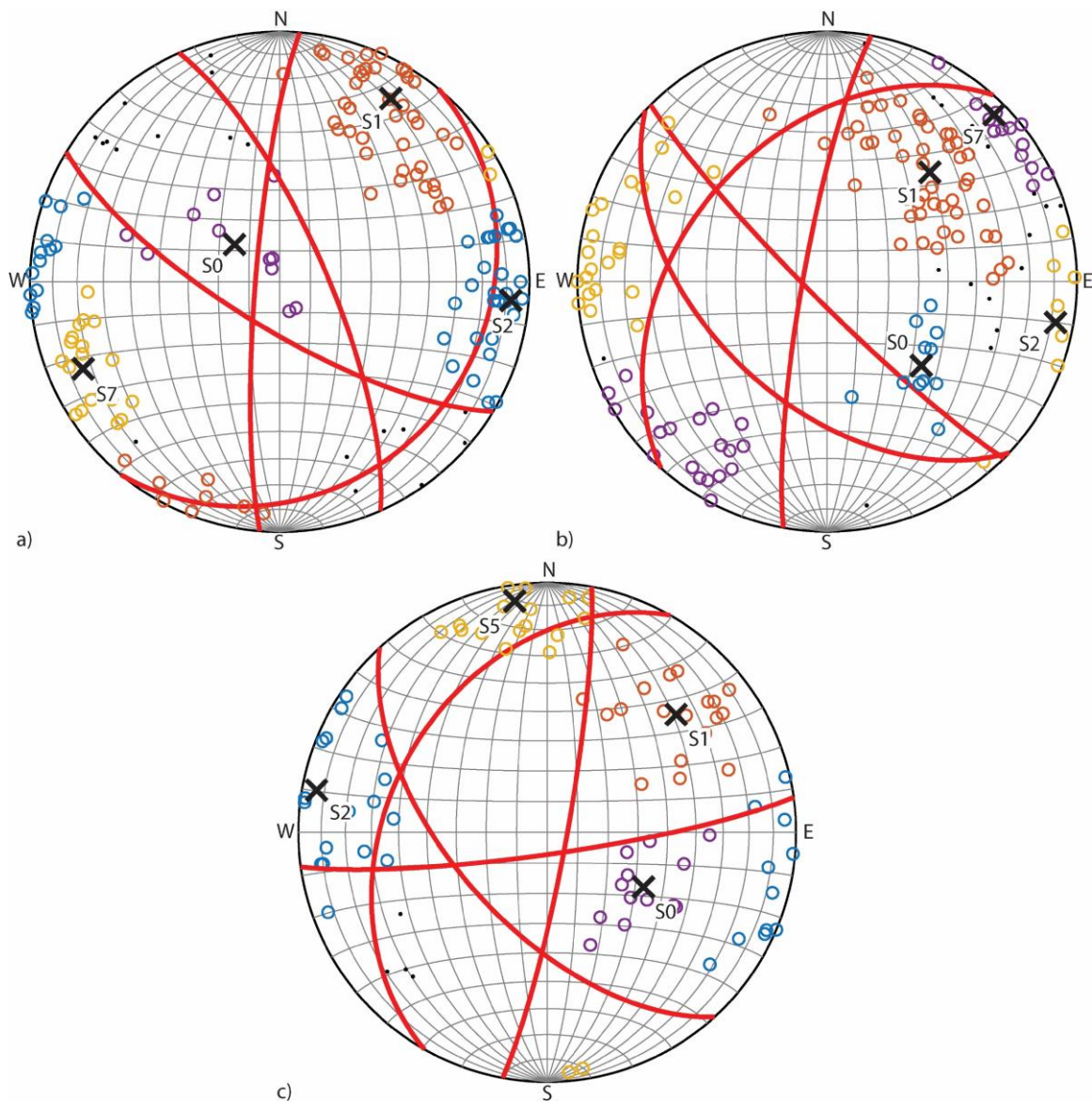
Inženjerskogeološka zona Z1 nalazi se na sjevernom dijelu istraživanog područja (slika 5.2) i obuhvaća stijenske kosine ukupne površine od oko 40 327 m<sup>2</sup> koje generalno padaju prema JZ i Z, s prosječnim kutom nagiba od oko 56°, od čega se 20% površine kosina nalazi u prevjesu (slika 5.3). Na zapadnom dijelu ove zone, u podnožju stijenskih kosina, nalaze se stambeni objekti uz samu granicu, dok na J i JZ zona graniči sa točilom u kojem je formiran sipar od materijala koji se odronjava s okolnih stijenskih kosina. Na krajnjem istočnom dijelu ova zona graniči sa inženjerskogeološkom zonom Z2, pri čemu granicu predstavlja pretpostavljeni subvertikalni rasjed, pružanja SZ-JI, nepoznatog karaktera pomaka. S obzirom na promjene u prosječnoj orijentaciji stijenskih kosina, prisutnosti određenih setova diskontinuiteta te stupnja trošnosti stijenske mase, inženjerskogeološka zona Z1 podijeljena je u tri podzone (slika 5.2). U zoni Z1A, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni do svježi vapnenci (W2-W3). Alatom *Compass* određena je orijentacija 163 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.4a i tablica 5.2). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.2).



**Slika 5.2.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z1 s ucrtanim granicama podzona Z1A, Z1B, Z1C na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.3.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.4.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1A, b) inženjerskogeološku zonu Z1B i c) inženjerskogeološku zonu Z1C dobiven automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

U zoni Z1B, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni do svježi vapnenci (W2-W3). Alatom *Compass* određena je orijentacija 159 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.4b i tablica 5.2) Setovi su isti kao i u zoni Z1A, ali im se mijenja prosječna orijentacija te vrijednosti razmaka i postojanosti. Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmak na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.2).

U zoni Z1C, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 100 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.4c i tablica 5.2) Setovi su gotovo jednaki kao i u zoni Z1A, ali mijenja im se prosječna orijentacija te vrijednosti razmaka i postojanosti. Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.2).

**Tablica 5.2.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z1 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$ (m)	$r_{\max}$ (m)	$\bar{p}$
Z1A	S0	130	84	29,0	2,8	1,8	3,1	2,2
	S1	211	50	14,1	3,5	0,6	1,9	2,4
	S2	275	42	29,9	4,8	1,4	3,5	7,9
	S7	66	82	2,3	13,8	2,2	4,5	8,8
Z1B	S0	312	42	29,9	4,8	0,83	2,5	1,6
	S1	223	50	14,1	3,5	1,1	2,8	3,2
	S2	280	82	2,3	13,8	1,22	2,3	4,6
	S7	225	84	29,0	2,8	0,72	2,9	4,2
Z1C	S0	300	19	10,7	8,3	0,5	2,4	2,2
	S1	228	75	17,8	3,0	0,5	4,7	1,2
	S2	100	82	4,5	7,1	0,9	2,1	3,1
	S5	172	75	39,0	3,1	1,3	3,8	4,2

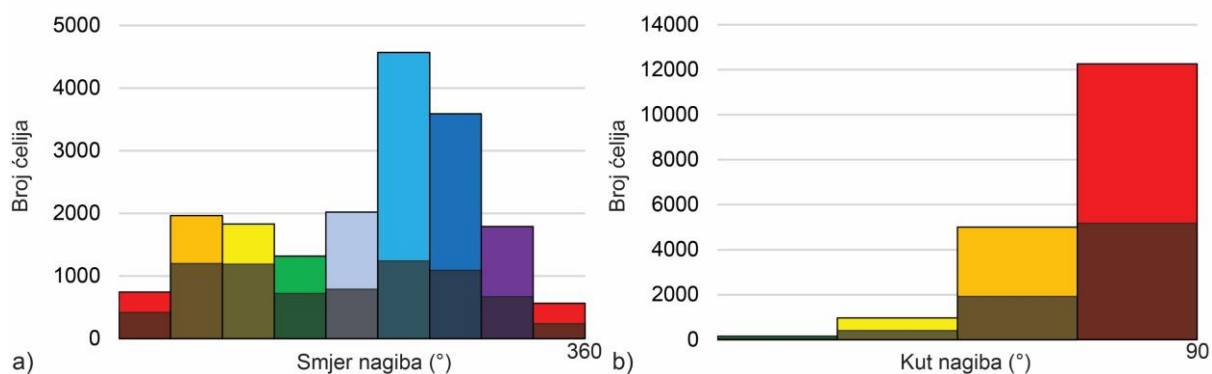


### 5.1.2 Inženjerskogeološka zona Z2

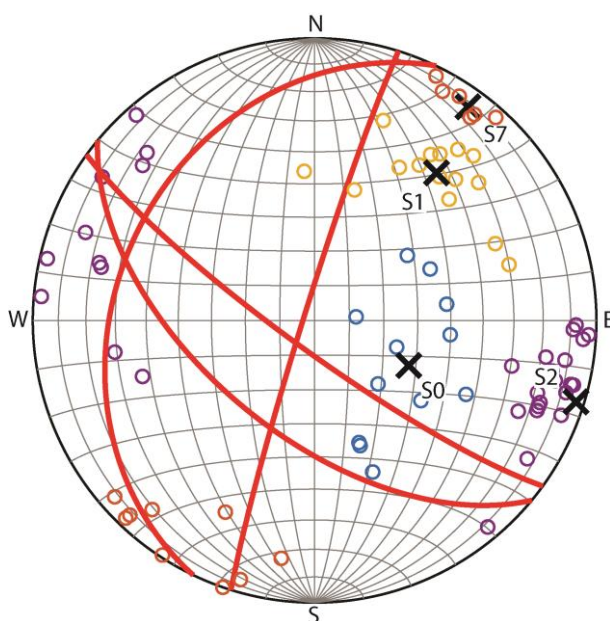
Inženjerskogeološka zona Z2 nalazi se na SZ dijelu istraživanog područja i smještena je između zona Z1 na zapadu i Z3 na istoku (slika 5.5). Obuhvaća stijenske kosine ukupne površine od oko 5745 m<sup>2</sup> koje generalno padaju prema JZ i Z, s prosječnim kutom nagiba od oko 64°, od čega se 41,1% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu (slika 5.6). U podnožju stijenskih kosina u ovoj zoni nalazi se vršni dio sipara, odnosno točila. Granica s inženjerskogeološkom zonom Z3 predstavlja hrbat koji razdvaja stijenske kosine sa različitim smjerom nagiba. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 104 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.7 i tablica 5.3). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.3).



**Slika 5.5.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z2 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.6.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.7.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z2 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

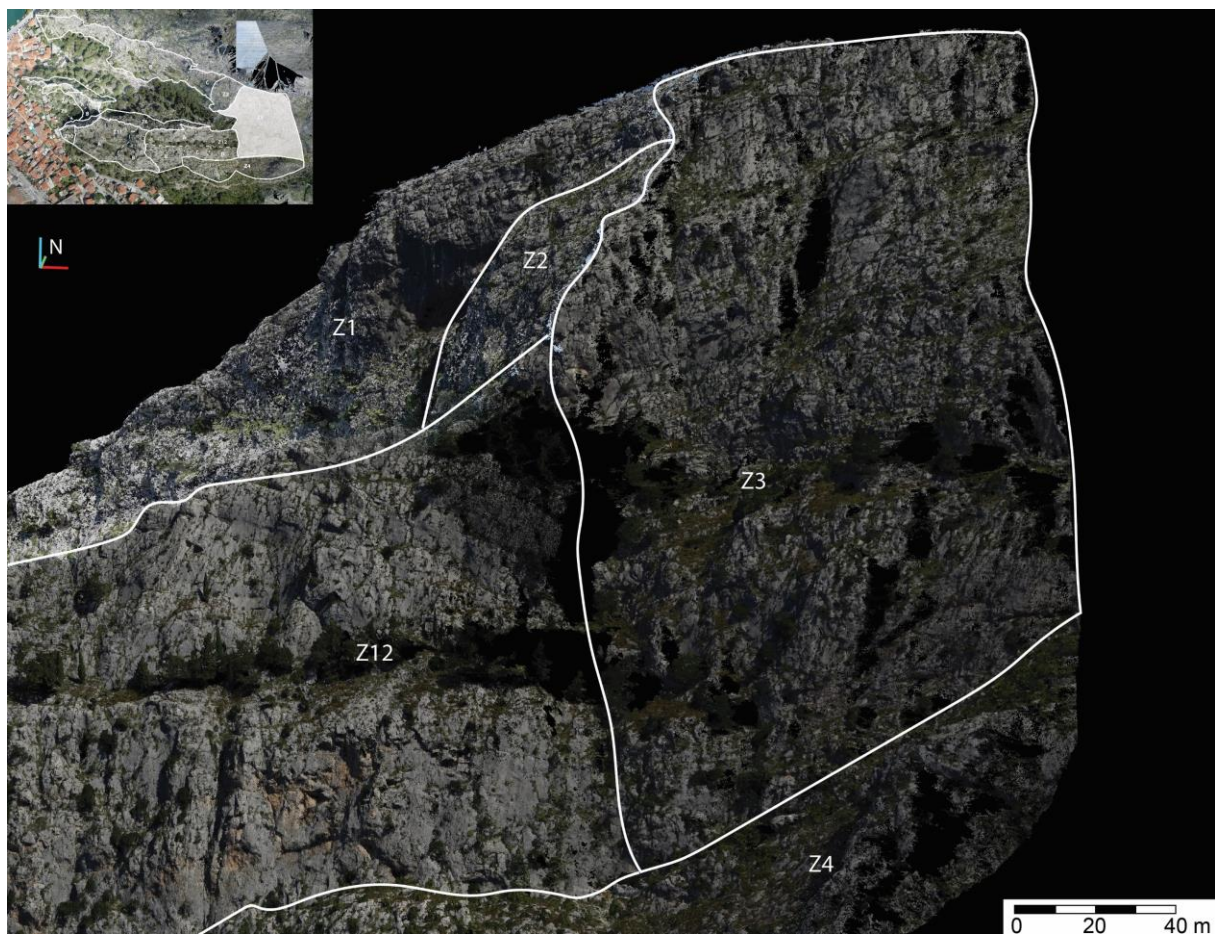
**Tablica 5.3.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z2 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (*Fisherova* konstanta, konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$ (m)	$r_{\max}$ (m)	$\bar{p}$
Z2	S0	287	87	7,4	6,1	1,1	3,1	7,2
	S1	220	57	20,1	5,1	1,3	3,1	4,1
	S2	296	30	11,7	7,6	1,2	2,8	2,2
	S7	287	87	7,4	6,1	1,1	3,1	7,2

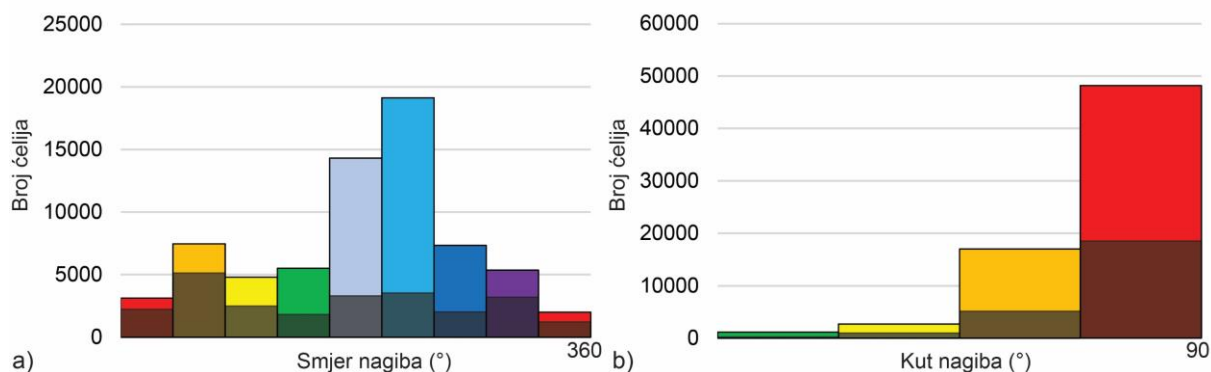


### 5.1.3 Inženjerskogeološka zona Z3

Inženjerskogeološka zona Z3 nalazi se istočno od inženjerskogeološke zone Z2, na krajnjem istočnom dijelu istraživanih stijenskih kosina (slika 5.8). Osim sa zonom Z3 ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z4, koja se nalazi u njenom podnožju te inženjerskogeološkom zonom Z12 koja se nalazi u njenom zapadnom dijelu (slika 5.8). Granica sa zonom Z4 je u samoj nožici stijenske kosine i predstavlja promjenu u morfologiji padine, dok je granica sa zonom Z12 oštra, na mjestu gdje dolazi do nagle promjene u broju diskontinuiteta i identificiranih setova te vrijednosti razmaka setova diskontinuiteta. Inženjerskogeološka zona Z3 obuhvaća stijenske kosine ukupne površine oko 24 440 m<sup>2</sup> koje generalno padaju prema J i JZ, s prosječnim kutom nagiba oko 63°, od čega se 35,9% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu (slika 5.9). U središnjem dijelu zone nalazi se prirodna berma koja razdvaja ovu zonu na dva dijela. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W4).

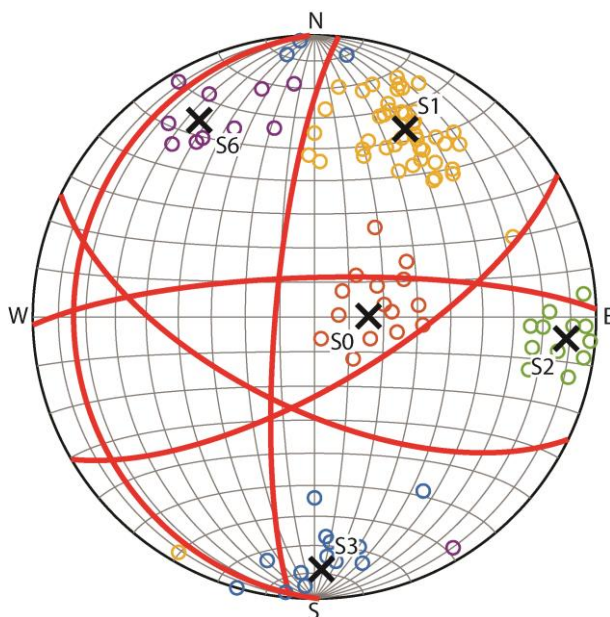


**Slika 5.8.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z3 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3, Z4 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.9.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Alatom *Compass* određena je orijentacija 139 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.10 i tablica 5.4). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.4).



**Slika 5.10.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z3 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

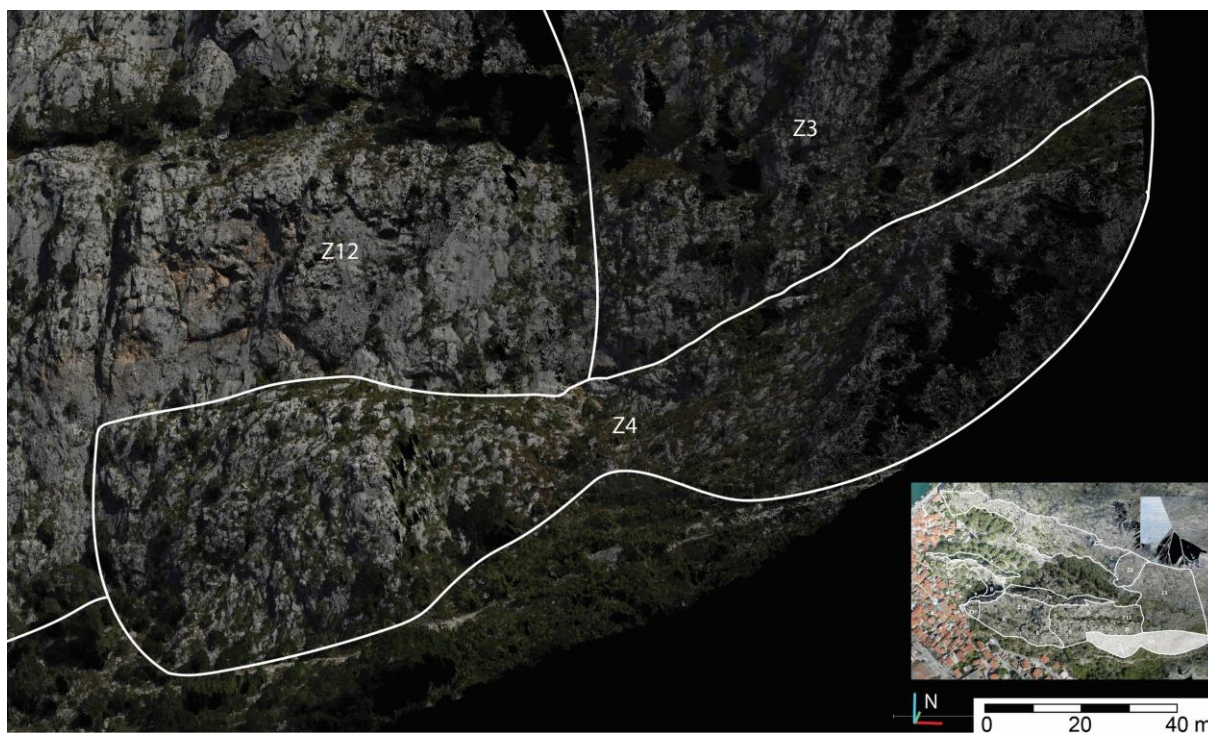
**Tablica 5.4.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z3 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z3	S0	269	16	7,8	12,3	0,7	1,7	2,2
	S1	206	63	13,9	3,5	0,8	3,1	4,5
	S2	275	79	35,8	8,4	0,9	4,2	2,8
	S3	358	79	31,9	3,9	0,9	1,9	2,9
	S6	150	70	3,7	15,3	1,6	4,6	4,1

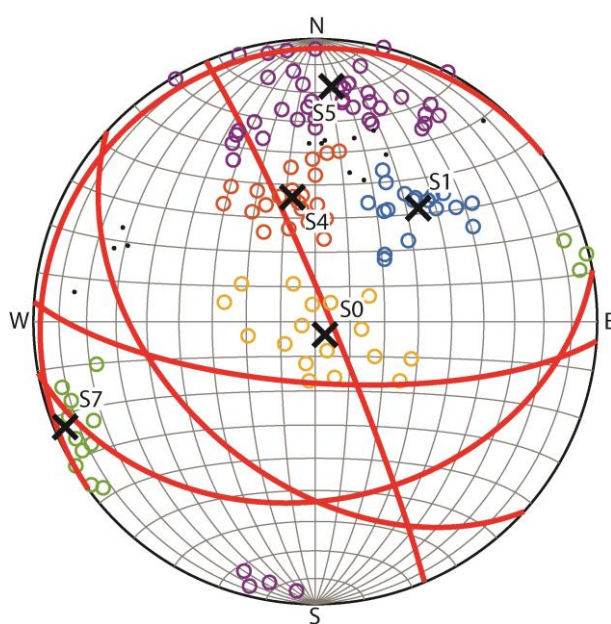
#### 5.1.4 Inženjerskogeološka zona Z4

Inženjerskogeološka zona Z4 nalazi se u podnožjima inženjerskogeoloških zona Z3 i Z12 i predstavlja dva manja hrpta (slika 5.11) ukupne površine od oko 17 835 m<sup>2</sup>, od čega se 24,2% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu, a izdvojena je s obzirom na različitu morfologiju te s obzirom na različite značajke setova diskontinuiteta u odnosu na okolne zone. U podnožju ove zone nalazi se planinarska staza, a između dva manja hrpta u ovoj zoni postavljena je i zaštitna mreža za prihvatanje odronjavanja materijala stijenske mase iz inženjerskogeološke zone Z3 i Z4. Stijenske kosine u ovoj zoni generalno padaju prema J i JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 50° (slika 5.13). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 126 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.12 i tablica 5.5). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.5).

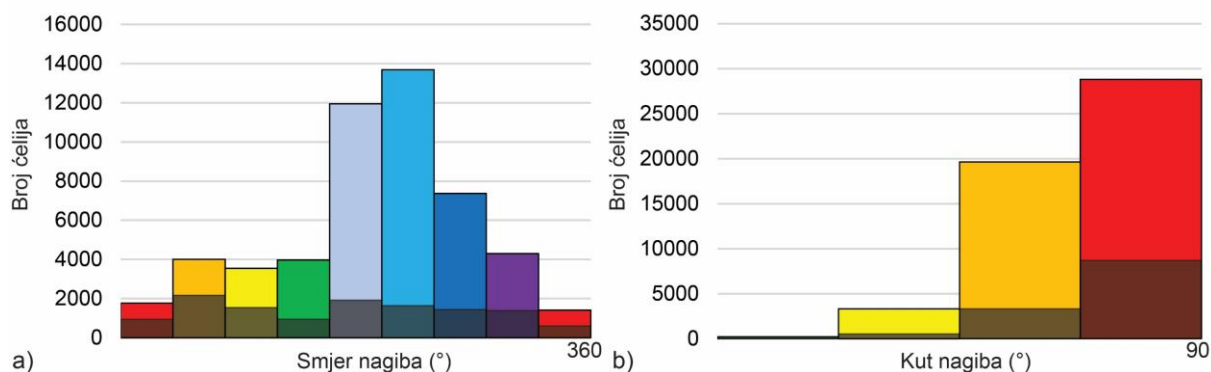




**Slika 5.11.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z4 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z3, Z4 i Z12 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.12.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z4 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.



**Slika 5.13.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.5.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z4 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z4	S0	324	5	7,0	12,3	0,5	2,1	1,8
	S1	222	45	47,0	2,9	1,4	2,7	1,3
	S4	170	37	51,3	2,5	0,6	1,5	1,2
	S5	184	72	19,7	3,0	0,6	1,6	1,9
	S7	67	86	38,1	4,7	0,7	3,6	2,0

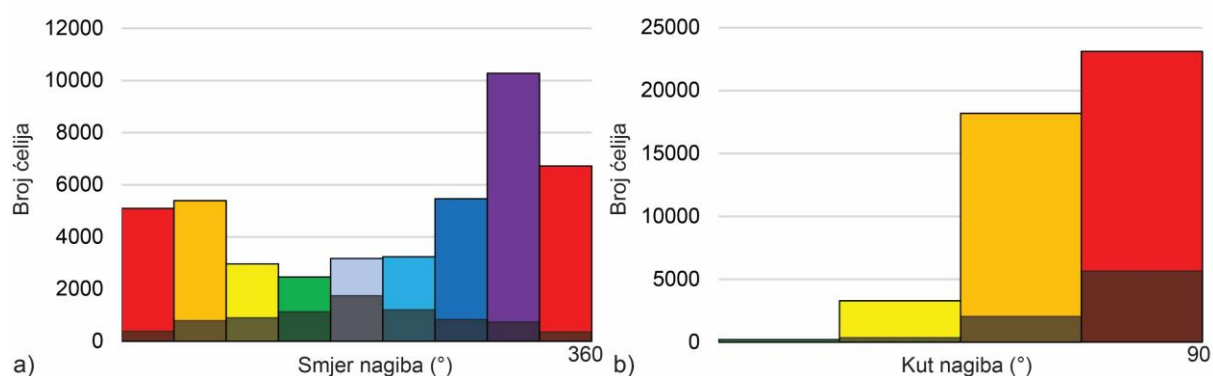
### 5.1.5 Inženjerskogeološka zona Z5

Inženjerskogeološka zona Z5 nalazi se u južnom boku donjeg dijela točila, na sjevernim padinama ispod tvrđave Mirabela te zauzima površinu od oko 15 582 m<sup>2</sup> (slika 5.14), od čega se 18,1% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu. Na jugu graniči s inženjerskogeološkim zonama Z7, Z8 i Z10 duž vrha hrpta, dok na istoku graniči sa inženjerskogeološkom zonom Z6. Zapadno i sjeverno od ove zone, u podnožju kosine nalaze se stambene građevine. Stijenske kosine u ovoj zoni generalno padaju prema S i SZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 48° (slika 5.15). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W5). Alatom *Compass* određena je orijentacija 90 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.16 i tablica 5.6). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.6).





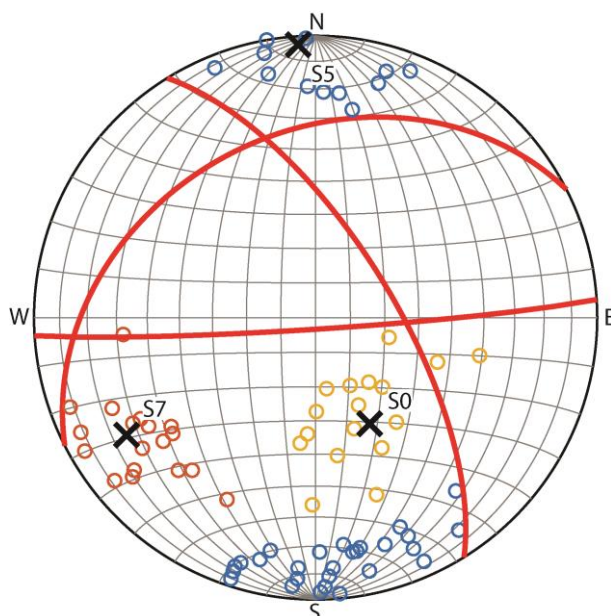
**Slika 5.14.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z5 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z5, Z6 i Z9 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.15.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.6.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z5 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

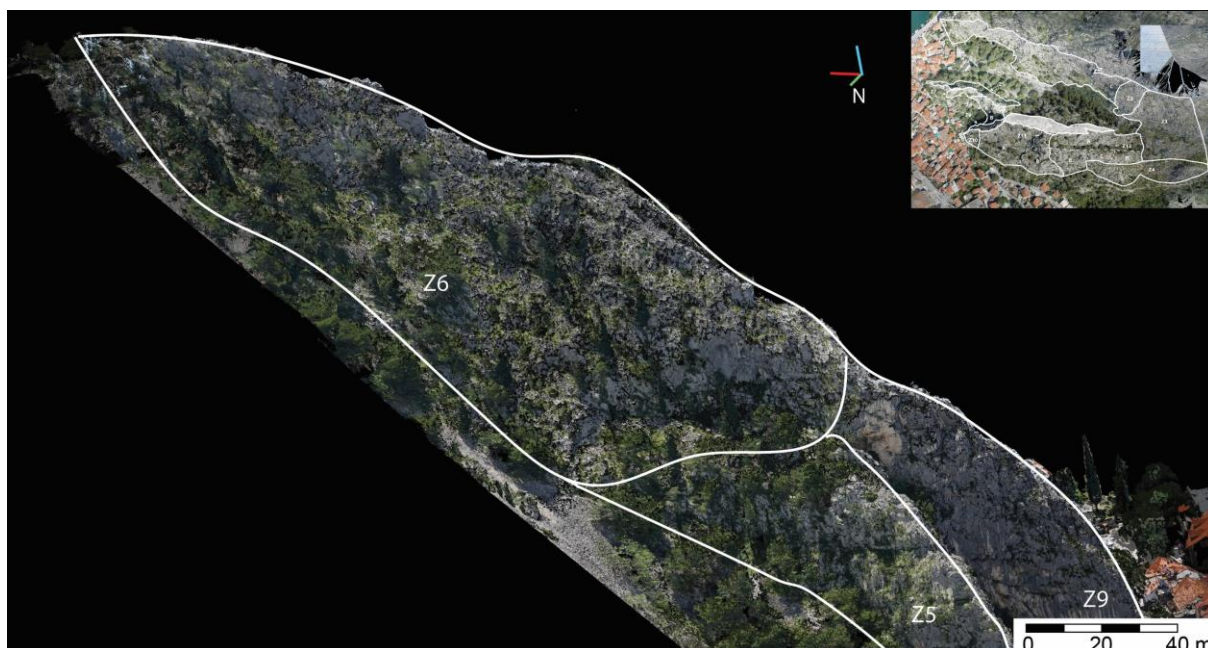
IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z5	S0	333	35	11,9	7,8	0,7	2,0	0,8
	S5	176	87	8,7	4,7	0,5	1,8	1,9
	S7	58	68	8,0	7,3	0,7	2,1	1,7



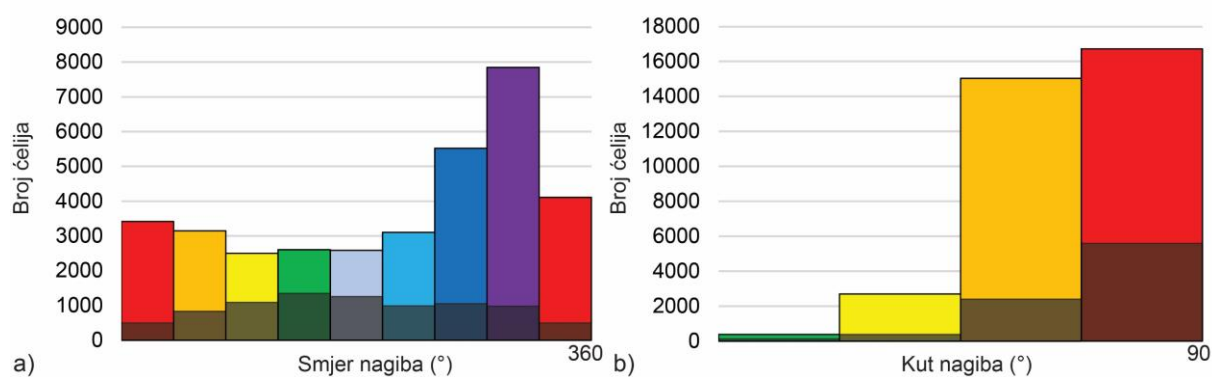
**Slika 5.16.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

#### 5.1.6 Inženjerskogeološka zona Z6

Inženjerskogeološka zona Z6 nalazi se u južnom boku točila te zauzima površinu od oko 10 682 m<sup>2</sup> (slika 5.17), pri čemu se oko 24,5% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu. Na zapadu graniči sa inženjerskogeološkim zonama Z5 i Z9 pri čemu granicu predstavlja promjena u morfologiji stijenske kosine i stupnju trošnosti stijenske mase. Južno od ove zone nalaze se inženjerskogeološke zone Z11 i Z12, a granicu predstavlja vrh hrpta koji ih odjeljuje, pri čemu se mijenja orijentacija kosine. Stijenske kosine u ovoj zoni generalno padaju prema S i SZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 45° (slika 5.18). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni vapnenci (W3). Alatom *Compass* određena je orijentacija 80 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.19 i tablica 5.8). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.7).



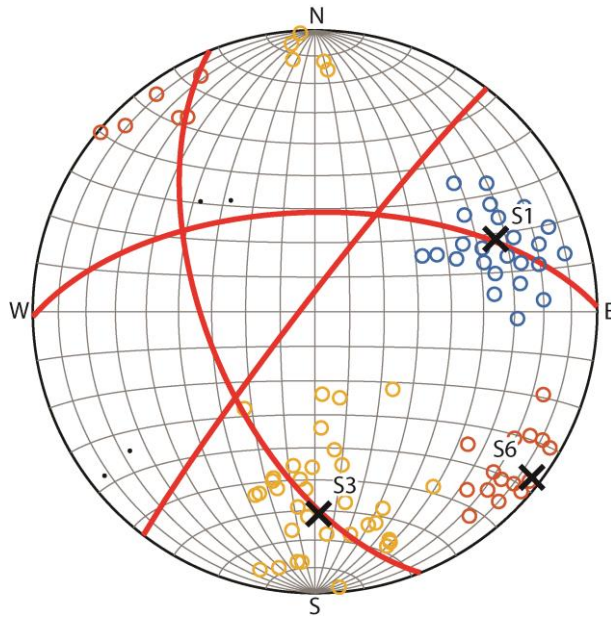
**Slika 5.17.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z6 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z5, Z6 i Z9 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.18.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z6 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.7.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z6 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z6	S1	248	58	11,5	10,0	0,9	3,1	2,1
	S3	359	61	3,6	8,4	1,1	2,7	3,2
	S6	307	86	4,6	11,9	0,8	2,9	1,6



**Slika 5.19.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z6 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja

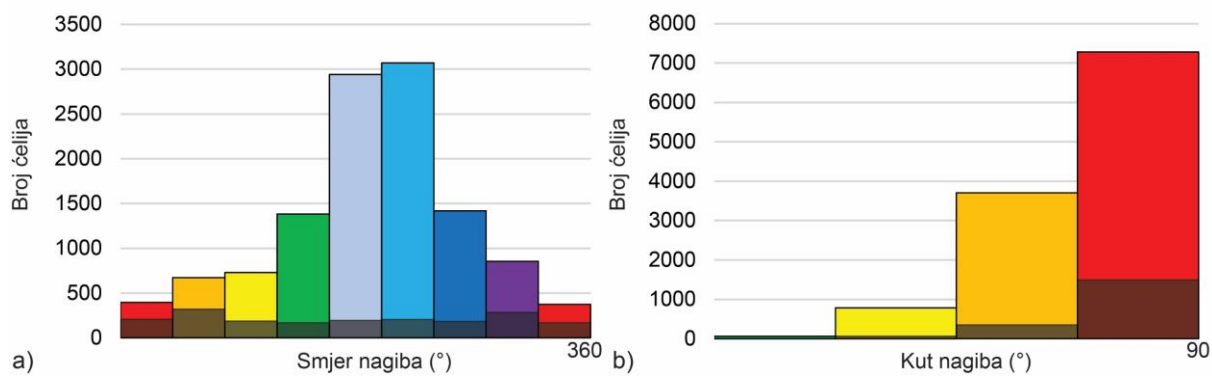
#### 5.1.7 Inženjerskogeološka zona Z7

Inženjerskogeološka zona Z7 nalazi se na južnim padinama ispod tvrđave Mirabela te zauzima površinu od oko 4203 m<sup>2</sup> (slika 5.20), od čega se 16,2% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu, a u podnožju ove zone nalaze se stambene građevine. Na sjeveru, duž vrha hrpta, graniči s inženjerskogeološkom zonom Z5, dok na istoku graniči sa inženjerskogeološkom zonom Z8, a granicu predstavlja nagla promjena u orijentaciji kosine te pretpostavljeni subvertikalni rasjed, pružanja SZ-JI i nepoznatog karaktera pomaka. Stijenske kosine u ovoj zoni generalno padaju prema J, s prosječnim kutom nagiba od oko 52° (slika 5.21). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do slabo trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 97 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.22 i tablica 5.8). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.8).

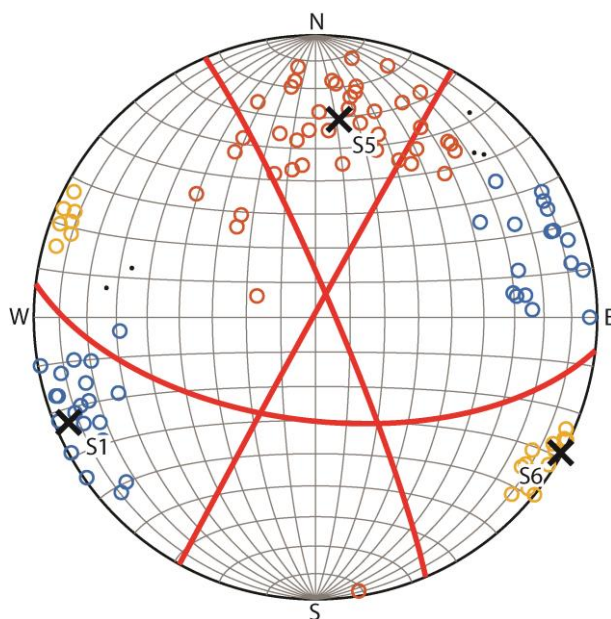




**Slika 5.20.** Pogled na inženjerskogeološku zonu Z7 s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z7 i Z8 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.21.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z7 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.22.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z7 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.8.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z7 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z6	S1	67	85	18,5	3,7	1,5	3,1	2,3
	S5	187	60	8,3	4,9	0,4	2,2	2,1
	S6	299	89	57,6	4,3	1,3	3,7	3,1

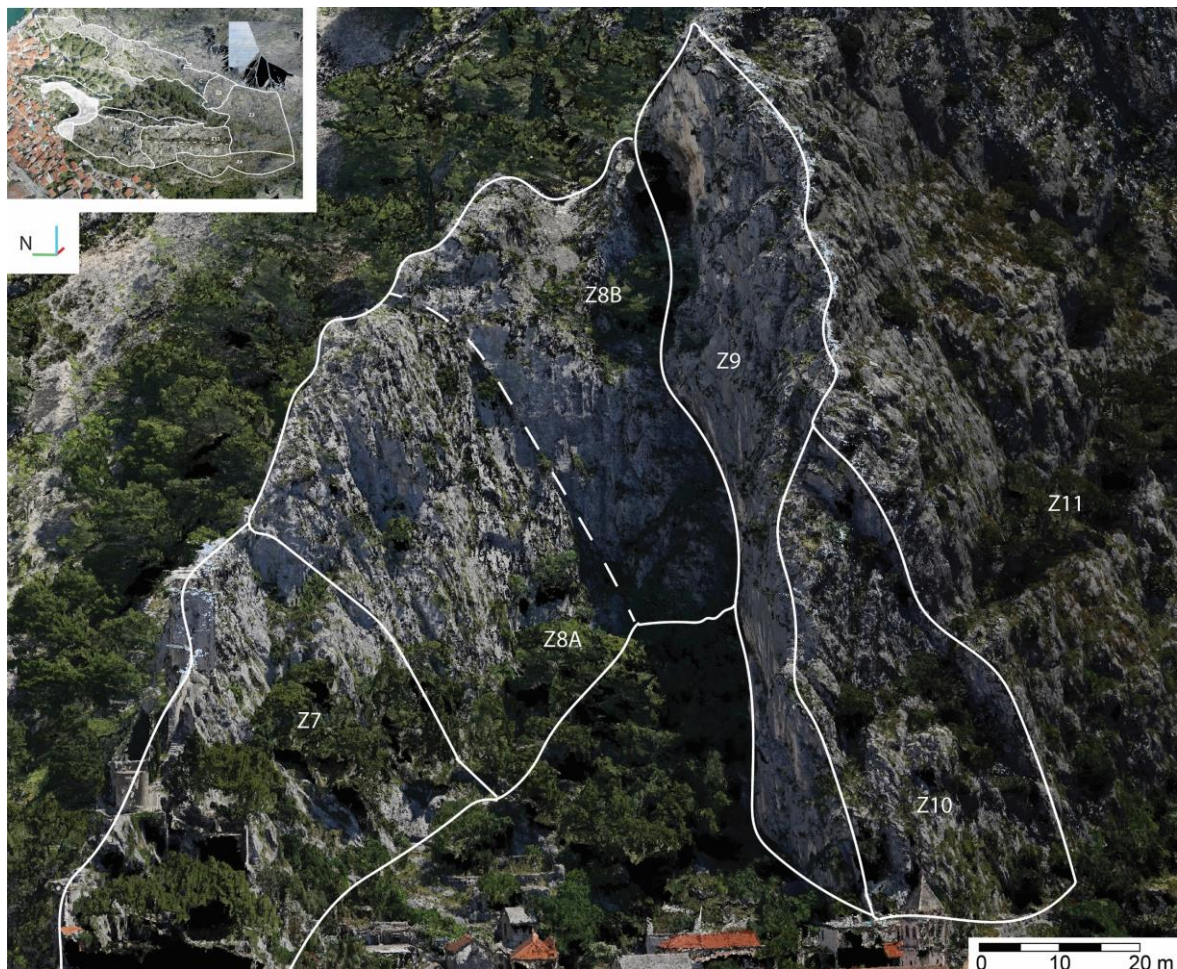
### 5.1.8 Inženjerskogeološka zona Z8

Inženjerskogeološka zona Z8 nalazi se na zapadnom dijelu istraživanih područja iznad stare gradske jezgre (slika 5.23). Na SZ graniči s inženjerskogeološkom zonom Z7 duž već spomenutog rasjeda, na SI duž vrha hrpta sa inženjerskogeološkom zonom Z5, a na jugu s inženjerskogeološkom zonom Z9 duž pretpostavljenog subvertikalnog rasjeda pružanja SI-JZ i nepoznatog karaktera pomaka. Površina stijenskih kosina u ovoj zoni iznosi oko 4840 m<sup>2</sup>, od čega se 13,2% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema JZ i Z, s prosječnim kutom nagiba od oko 56° (slika 5.24). S obzirom na promjene u orijentaciji stijenskih kosina, setova diskontinuiteta te stupnja trošnosti stijenske mase, inženjerskogeološka zona Z8 podijeljena je u dvije podzone (slika 5.23).

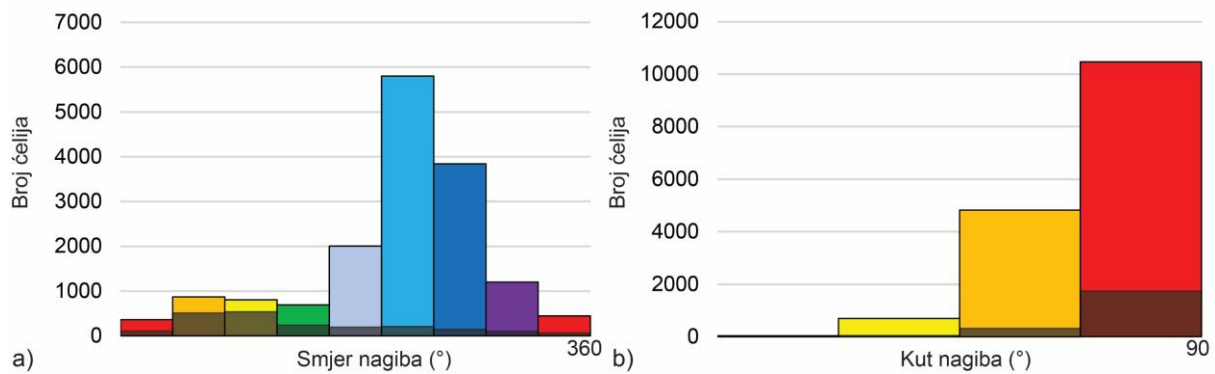


U zoni Z8A, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni do svježi vapnenci (W2-W3). Alatom *Compass* određena je orijentacija 102 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.25a i tablica 5.9). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.9).

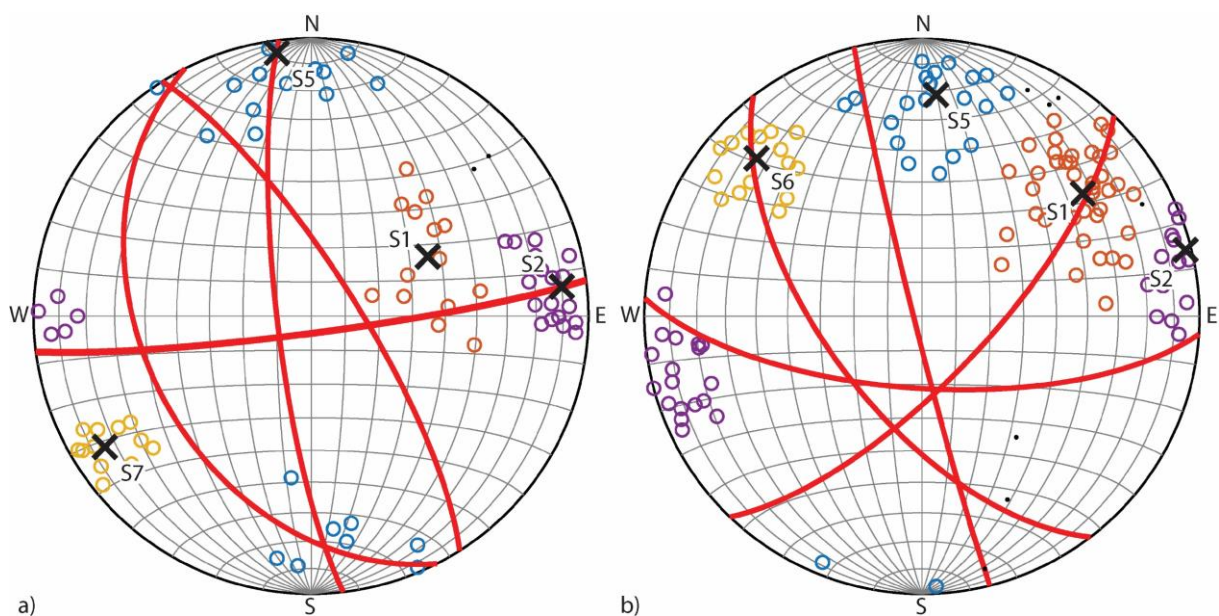
U zoni Z8B, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do slabo trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 124 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.25b i tablica 5.9). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.9).



**Slika 5.23.** Pogled sa zapada na inženjerskogeološke zone Z7, Z8, Z9 i Z10 s ucrtanim granicama podzona Z8A i Z8B na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.24.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z8 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.25.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z8A i b) inženjerskogeološku zonu Z8B dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

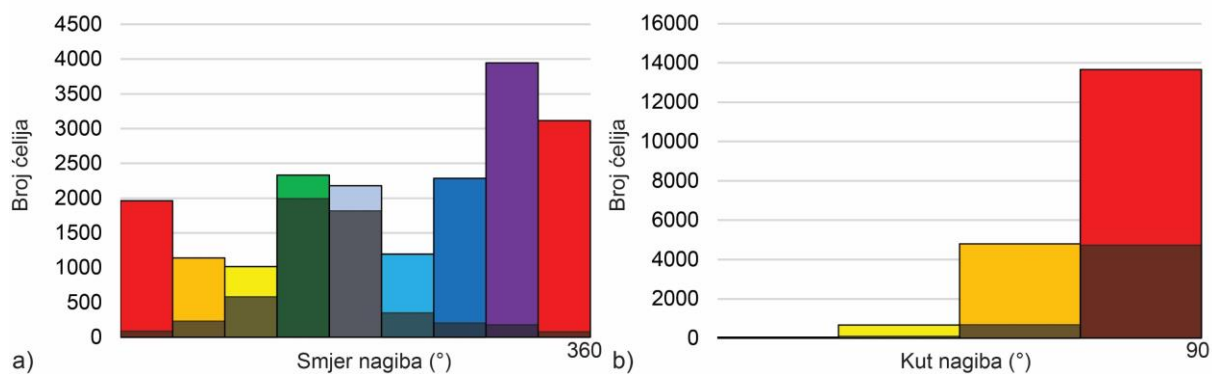


**Tablica 5.9.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z8A koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

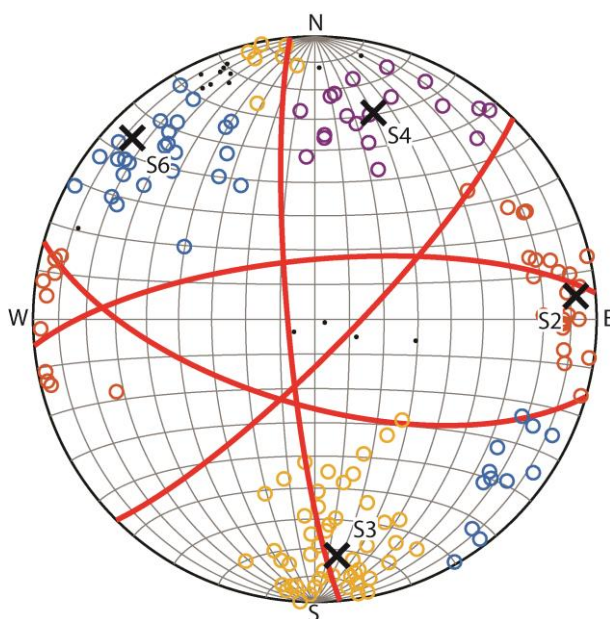
IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z8A	S1	243	39	9,9	7,7	1,2	6,2	4,2
	S2	263	80	22,4	6,2	1,7	3,9	4,9
	S5	173	85	18,0	4,6	1,5	3,2	5,9
	S7	58	77	41,4	7,8	1,9	3,6	5,5
Z8B	S1	233	62	22,2	3,0	0,9	2,3	5,2
	S2	256	88	19,7	3,6	1,8	5,1	5,3
	S5	184	69	4,8	9,4	0,7	2,2	3,8
	S6	134	71	23,8	10,4	1,7	4,1	4,8

### 5.1.9 Inženjerskogeološka zona Z9

Inženjerskogeološka zona Z9 nalazi se na JZ dijelu istraživanih stijenskih kosina, iznad stambenih građevina u staroj gradskoj jezgri (slika 5.23). Na sjeveru ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z8, na jugu s inženjerskogeološkim zonama Z10 i Z11, pri čemu granicu predstavlja vrh hrpta gdje dolazi do promjene orijentacije stijenskih kosina. Stijenske kosine u ovoj zoni zauzimaju površinu od 5741 m<sup>2</sup>, od čega se 28,8% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju na S, a prosječni kut nagiba im je 59° (slika 5.26). Osim različite orijentacije kosine u odnosu na okolne zone, vizualnim pregledom digitalnog modela utvrđena i razlika u stupnju trošnosti stijenske mase, odnosno u ovoj zoni stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni vapnenci (W5-W6). Također, specifičnost ove zone da se nalazi u uskoj zoni subvertiklanog rasjeda, pružanja SII-JZZ i nepoznatog karaktera pomaka koji se jasno ocrta duž cijele zone te uz koji je vezan set diskontinuiteta S6 (slika 5.27). Alatom *Compass* određena je orijentacija 184 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.27 i tablica 5.10). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.10).



**Slika 5.26.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z9 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



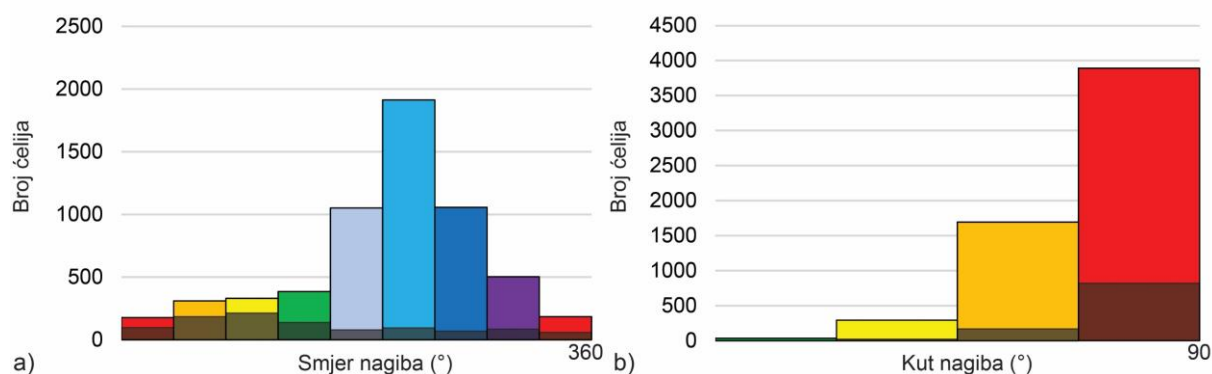
**Slika 5.27.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z9 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.10.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z9 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{max}$	$\bar{p}$
Z9	S2	265	82	29,0	2,8	1,6	3,1	2,9
	S3	355	73	20,6	2,6	1,7	3,6	4,5
	S4	196	65	21,0	4,2	1,3	4,2	4,3
	S6	135	80	26,9	2,8	1,9	3,8	5,2

### 5.1.10 Inženjerskogeološka zona Z10

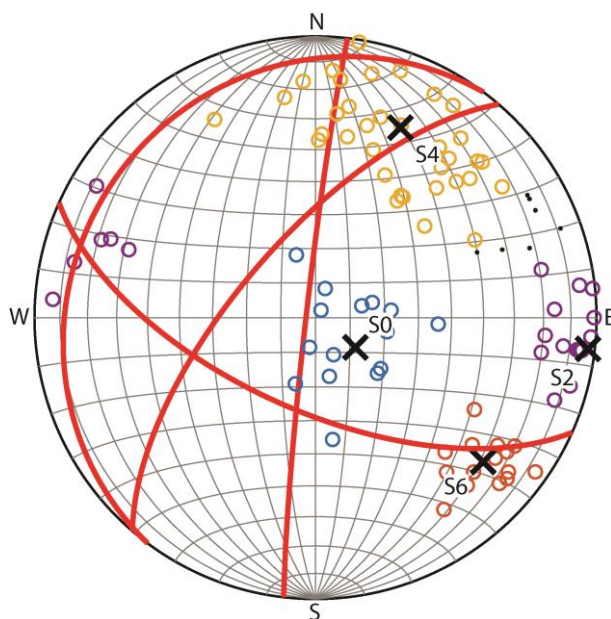
Inženjerskogeološka zona Z10 je relativno mala zona, ukupne površine oko 1771 m<sup>2</sup>, odvojena s dva rasjeda od inženjerskogeoloških zona Z9 na sjeveru i Z11 na istoku. Nalazi se na najjužnijim padinama Omiške Dinare, na zapadnom rubu, tik iznad stambenih građevina smještenih u staroj gradskoj jezgri (slika 5.23). Stijenske kosine u ovoj zoni generalno padaju na JZ i Z, a prosječni kut nagiba im je 54°, pri čemu se 17,3% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu (slika 5.28). Vizualnim pregledom digitalnog modela utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do slabo trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 104 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.29 i tablica 5.11). Set diskontinuiteta S6 vezan je za rasjed koji odvaja ovu zonu od zone Z9 na sjeveru, dok je S2 vezan za rasjed koji odvaja ovu zonu sa zonom Z12 na istoku. Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.11).



**Slika 5.28.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z10 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.11.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z10 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z10	S0	307	14	9,0	12,3	1,9	4,2	3,6
	S2	277	87	5,0	9,6	1,2	2,3	2,6
	S4	204	63	6,6	5,8	1,1	2,1	1,8
	S6	311	68	41,6	4,5	1,8	4,4	3,2



**Slika 5.29.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z10 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

#### 5.1.11 Inženjerskogeološka zona Z11

Inženjerskogeološka zona Z11 obuhvaća stijenske kosine koje se nalaze iznad stare gradske jezgre, a od inženjerskogeoloških zona Z10 na zapadu i Z12 na istoku odvojena je sa subvertikalnim rasjedima pružanja S-J i nepoznatog karaktera pomaka (slika 5.30). Površina stijenskih kosina u ovoj zoni iznosi oko 24 764 m<sup>2</sup>, generalno padaju prema JZ i Z, s prosječnim kutom nagiba oko 58°, pri čemu se 19% površine stijenskih kosina nalazi u prevjesu (slika 5.31). S obzirom na promjene u orijentaciji stijenskih kosina, setova diskontinuiteta te stupnja trošnosti stijenske mase, inženjerskogeološka zona Z11 podijeljena je u dvije podzone (slika 5.30).

U zoni Z11A, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do slabo trošni vapnenci (W4-W5). Alatom *Compass* određena je orijentacija 144 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.32a i tablica 5.12). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.12).

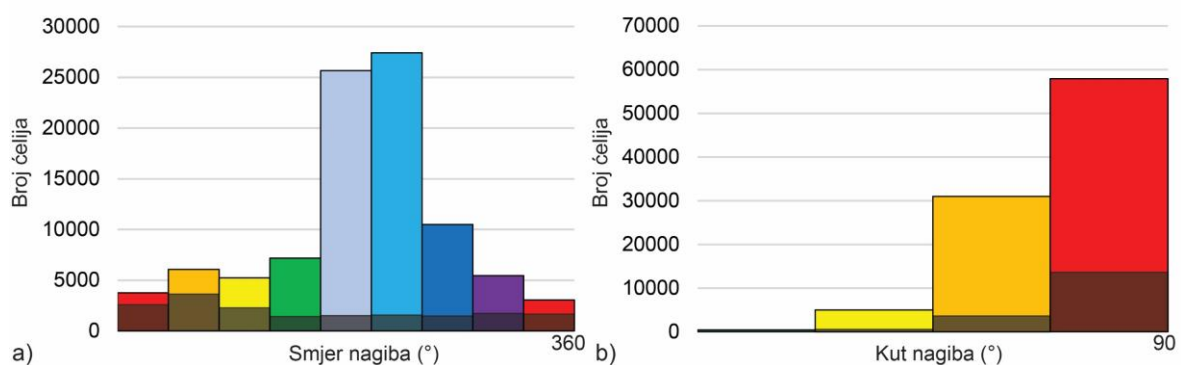
U zoni Z11B, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni vapnenci (W5-W6). Alatom *Compass* određena je



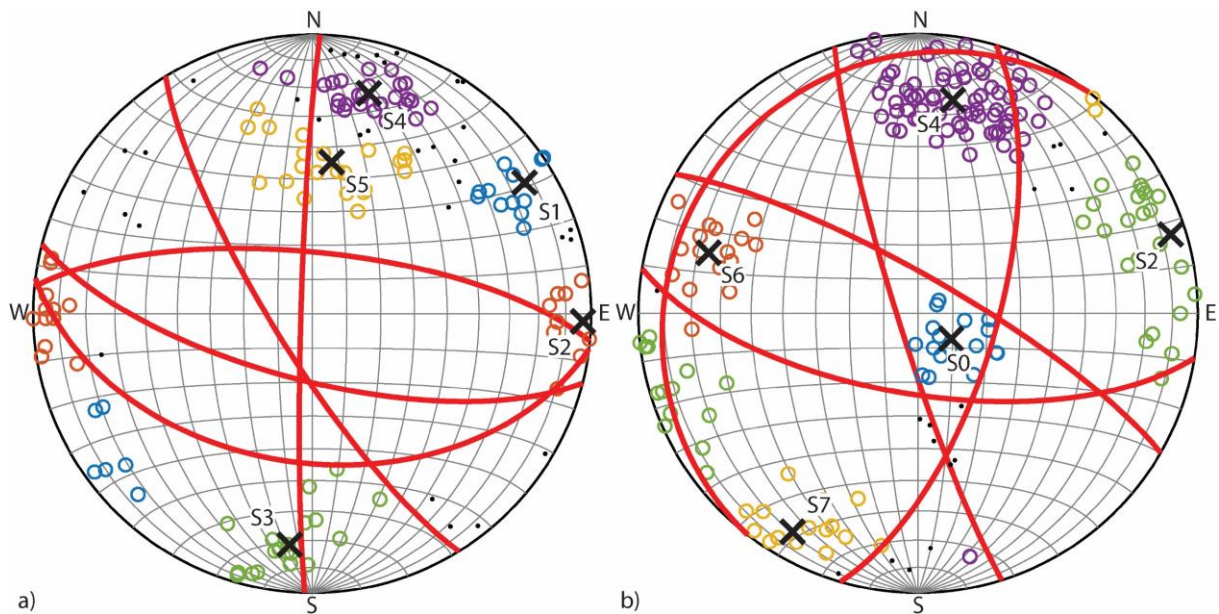
orijentacija 190 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.32b i tablica 5.15). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.12).



**Slika 5.30.** Pogled prema S, SZ na inženjerskogeološku zonu Z10, Z11 i Z12 s ucrtanim granicama podzona Z11A i Z11B na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.31.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z11 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.32.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z11A i b) inženjerskogeološku zonu Z11B dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.12.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z11 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z11A	S1	238	78	15,4	5,7	1,4	3,2	3,9
	S2	272	87	1,2	42,7	1,1	1,8	3,2
	S3	6	72	32,5	3,5	0,8	1,8	1,6
	S4	194	70	56,8	2,2	0,9	2,6	3,1
	S5	187	46	26,8	3,6	1,6	3,7	4,1
Z11B	S0	308	12	27,6	5,9	1,0	3,1	1,2
	S2	253	84	27,2	2,8	1,0	1,6	3,6
	S4	189	66	9,2	3,2	1,4	2,7	2,8
	S6	106	67	31,8	4,9	0,9	1,6	4,1
	S7	30	79	33,9	3,5	1,1	2,6	1,1

### 5.1.12 Inženjerskogeološka zona Z12

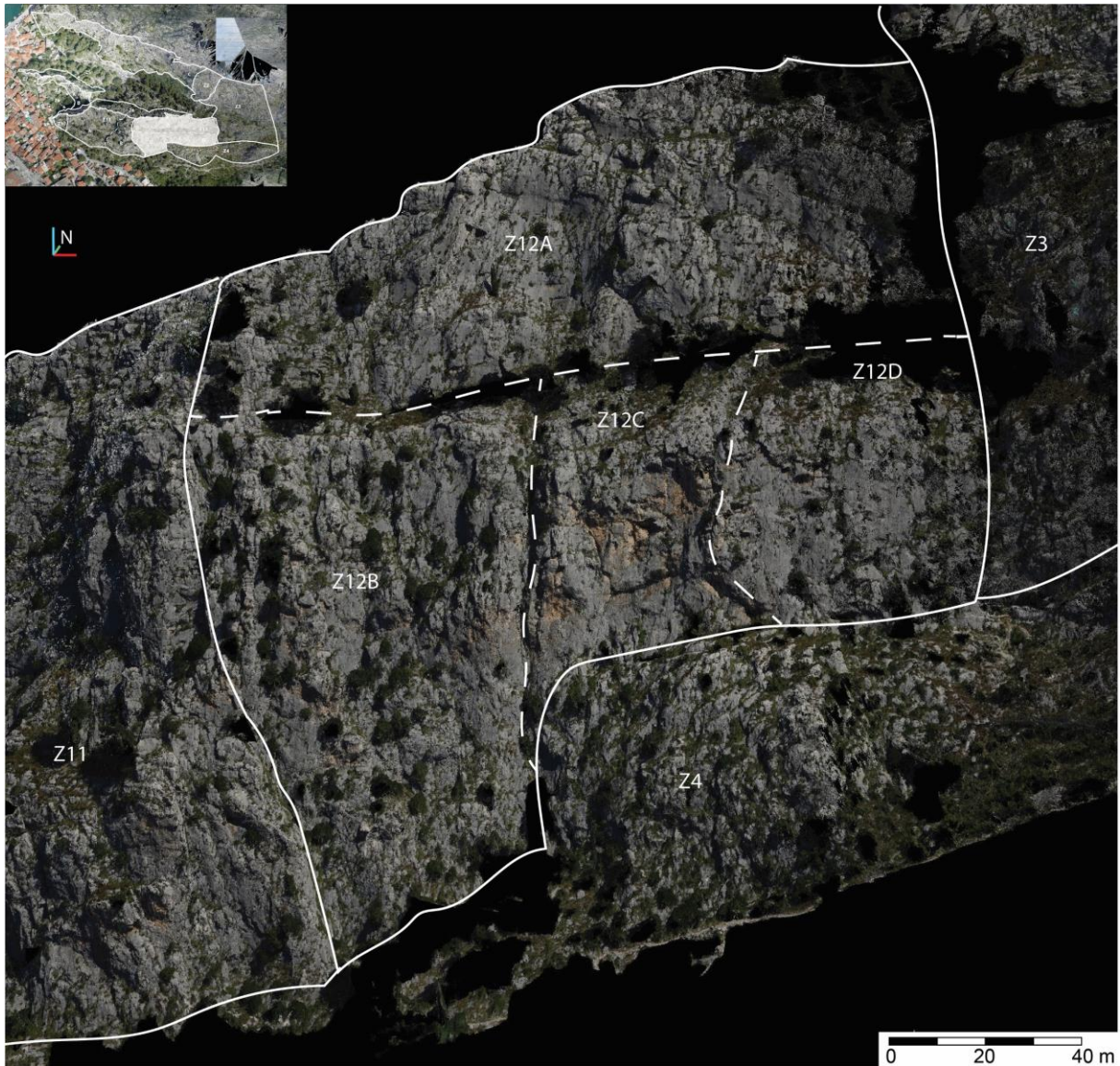
Inženjerskogeološka zona Z12 nalazi se u središnjem južnom dijelu istraživnog područja i omeđena je sa inženjerskogeološkim zonama Z3 i Z4 na zapadu, Z6 na sjeveru, Z11 na istoku te stambenim građevinama u njenom podnožju (slika 5.33). Stijenske kosine u ovoj zoni zauzimaju površinu oko 26 877 m<sup>2</sup>, generalno padaju prema J i JZ, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 57°, pri čemu se oko 17,4% stijenskih kosina nalazi u prevjesu (slika 5.34). U središnjem dijelu ove zone nalazi se prirodna berma koja razdvaja ovu zonu u dva dijela. Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta djelomično se razlikuju u gornjem i donjem dijelu, a uz to u donjem dijelu stupanj trošnosti stijenske mase te prisutnost određenih setova diskontinuiteta kao i njihove vrijednosti razmaka i postojanosti variraju od zapada prema istoku. S obzirom na navedene razlike u pojedinim dijelovima ove zone, ona je dodatno podijeljena u četiri podzone (slika 5.33).

U zoni Z12A, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo i srednje do slabo trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 191 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.35a i tablica 5.13). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.13).

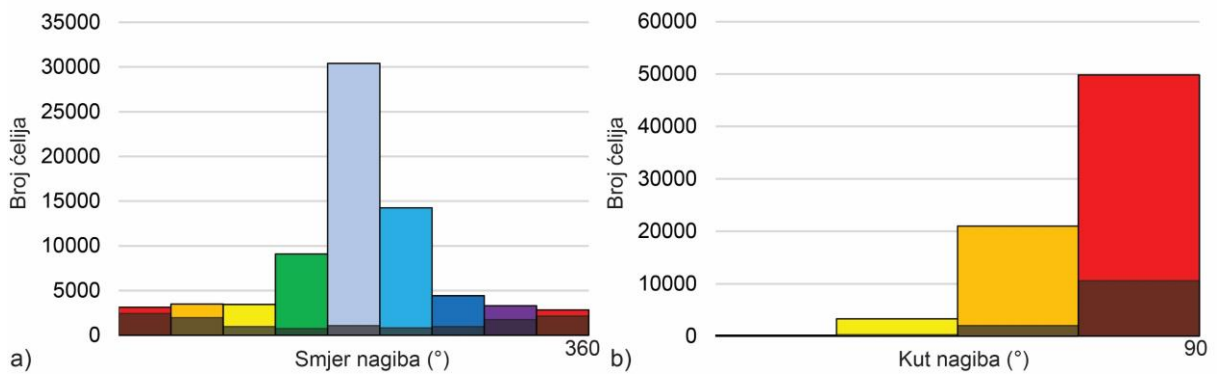
U zoni Z12B, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni vapnenci (W3-W5). Alatom *Compass* određena je orijentacija 171 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.35b i tablica 5.13). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.13).

U zoni Z12C, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni vapnenci (W4-W6). Alatom *Compass* određena je orijentacija 90 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.35c i tablica 5.13). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.13).





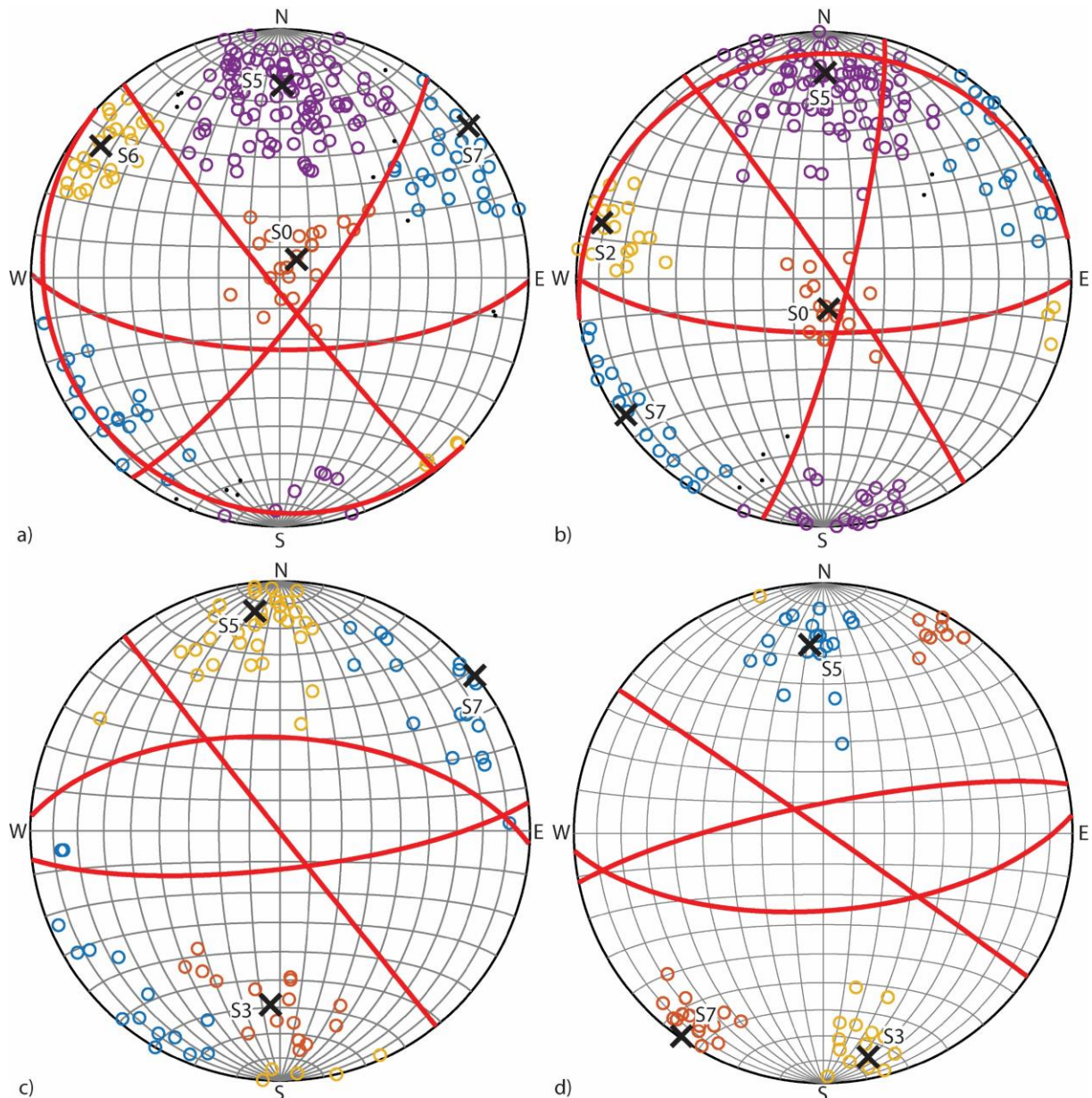
**Slika 5.33.** Pogled prema sjeveru na inženjerskogeološku zonu Z12 s ucrtanim granicama podzona Z12A, Z12B, Z12C i Z12D te na dijelove susjednih inženjerskogeoloških zona Z3, Z4 i Z11 na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.34.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z12 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



U zoni Z12D, vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo i srednje do slabo trošni vapnenci (W3-W4). Alatom *Compass* određena je orijentacija 42 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta s pripadajućim parametrima *Fisherove* statistike (slika 5.35d i tablica 5.13). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju metode kružnog topografskog prozora (tablica 5.13).



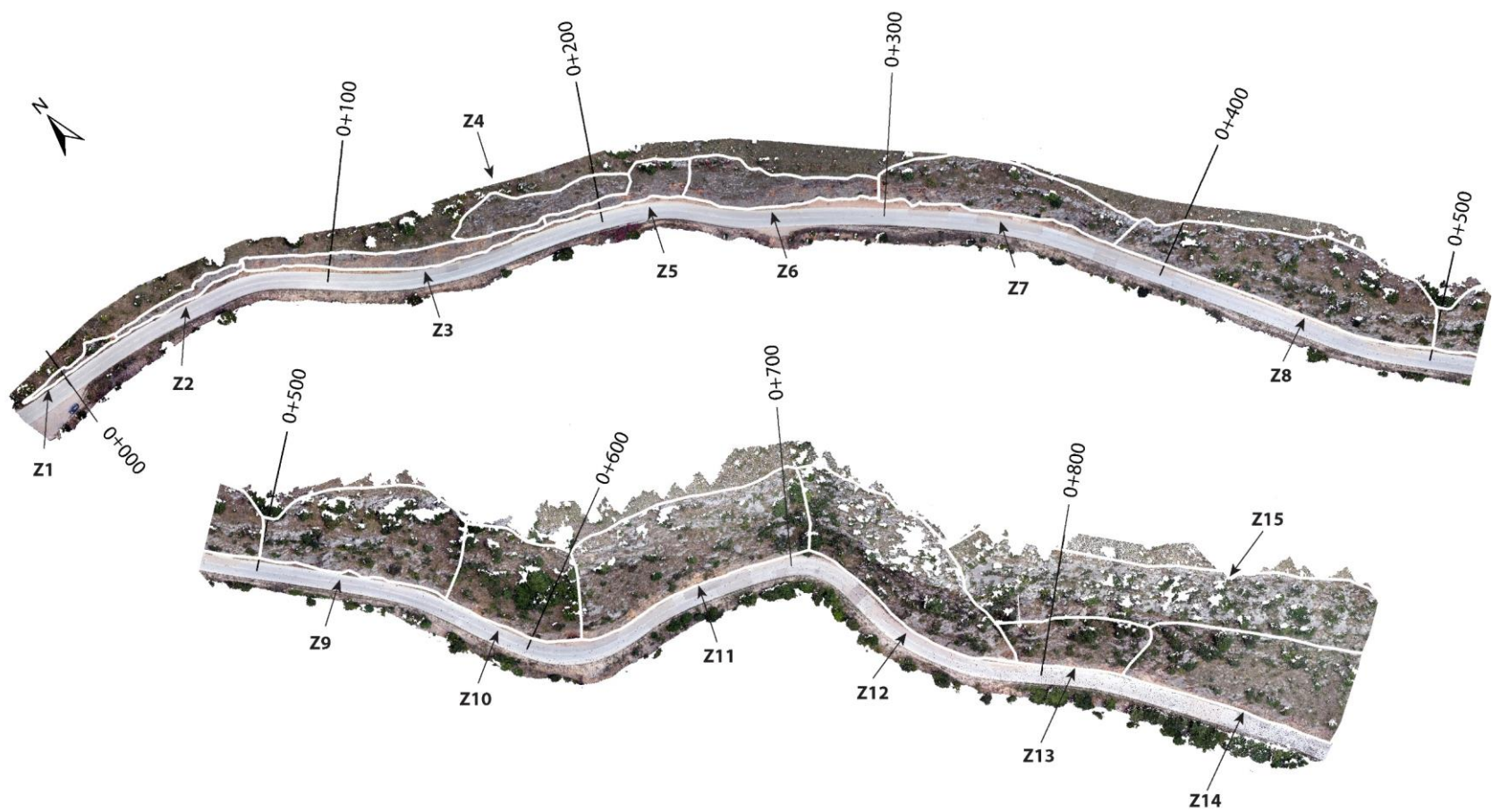
**Slika 5.35.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z12A, b) Z12B, c) Z12C i d) Z12D dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.13.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z12 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z12A	S0	223	8	27,4	3,6	0,8	2,1	2,4
	S5	178	64	15,2	2,4	1,0	2,6	3,2
	S6	237	85	24,4	3,9	2,1	3,6	4,2
	S7	195	90	23,1	3,9	1,4	3,8	4,8
Z12B	S0	351	10	44,9	3,2	0,8	2,1	2,9
	S2	104	82	21,2	6,8	0,9	2,3	1,5
	S5	180	72	18,0	2,0	1,3	3,6	5,2
	S7	56	87	22,5	3,3	1,1	2,3	4,1
Z12C	S3	12	66	2,3	17,8	1,9	3,2	3,1
	S5	173	78	23,9	2,8	1,8	3,1	4,2
	S7	231	90	15,5	4,4	0,9	1,2	3,5
Z12D	S3	349	80	20,7	8,6	1,1	1,8	2,8
	S5	176	65	29,2	3,8	1,8	3,9	5,8
	S7	35	89	167,1	4,7	1,3	3,2	4,2

## 5.2. Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan

Na temelju provedenih analiza na visoko-rezolucijskim 3D modelima stijenskh kosina i utvrđenih značajki stijenske mase, geometrijskih značajki diskontinuiteta te orijentacije stijenskih kosina, stijenske kosine koje se nalaze uz županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Okljaj, na lokaciji Brljan, podijeljene su na 15 inženjerskogeoloških zona, pri čemu je njih 11 podijeljeno dodatno na dvije ili više podzone (slika 5.24). Kriteriji za izdvajanje inženjerskogeoloških zona prikazani su u tablici 5.14. Vizualnim pregledom digitalnih modela utvrđeno je da stijensku masu na području istraživanja izgrađuju svježije do intenzivno trošni konglomerati i breče (W2-W7). Pomoću alata *Compass* u računalnom programu *CloudCompare* određena je orijentacija 1904 diskontinuiteta koji su, ovisno o inženjerskogeološkoj zoni, podijeljeni u tri do pet setova diskontinuiteta na temelju algoritma za spektralno grupiranje, tj. automatiziranom metodom pomoću napisanih skripti i funkcija u programskom jeziku *MATLAB*. Za svaki set diskontinuiteta određene su srednja i maksimalna vrijednost razmaka te srednja vrijednost postojanosti. U nastavku su za svaku inženjerskogeološku zonu prikazani rezultati provedenih analiza na visoko-rezolucijskim modelima, odnosno značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koji su predstavljali ulazne podatke za automatiziranu kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.



**Slika 5.36.** Prikaz granica 15 inženjerskogeoloških zona (označeno sa Z1-Z15) na ortofoto snimci pilot područja stijenskih kosina na lokaciji Brljan, određenih na temelju različite orijentacije stijenskih kosina, značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta.



**Tablica 5.14.** Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na pilot području stijenske kosine na lokaciji Brljan.

IG zone	Podzona	Kriterij izdvajanja
Z1		Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti stijenske mase
Z2		Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, orijentacija stijenskih kosina
Z3		Orijentacija stijenskih kosina,
Z4		Geometrijske značajke diskontinuiteta
Z5	Z5A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z5B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z6	Z6A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti,
	Z6B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z7	Z7A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
	Z7B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
	Z7C	Geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
Z8	Z8A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed, stupanj trošnosti, slojevitost velike postojanosti
	Z8B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed, slojevitost velike postojanosti
	Z8C	Geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed, stupanj trošnosti
	Z8D	Geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
Z9	Z9A	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti, stupanj trošnosti
	Z9B	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti, stupanj trošnosti
	Z9C	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti, stupanj trošnosti
	Z9D	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti, stupanj trošnosti
Z10	Z10A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, Orijetacija stijenskih kosina
	Z10B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, Orijetacija stijenskih kosina
Z11	Z11A	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
	Z11B	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
	Z11C	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
Z12	Z12A	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
	Z12B	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
	Z12C	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
	Z12D	Orijentacija stijenskih kosina, geometrijske značajke diskontinuiteta, slojevitost velike postojanosti
Z13	Z13A	Stupanj trošnosti, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
	Z13B	Stupanj trošnosti, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
Z14	Z14A	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, slojevitost velike postojanosti
	Z14B	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, slojevitost velike postojanosti
Z15	Z15A	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, slojevitost velike postojanosti
	Z15B	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti slojevitost velike postojanosti

### 5.2.1 Inženjerskogeološke zone Z1 i Z2

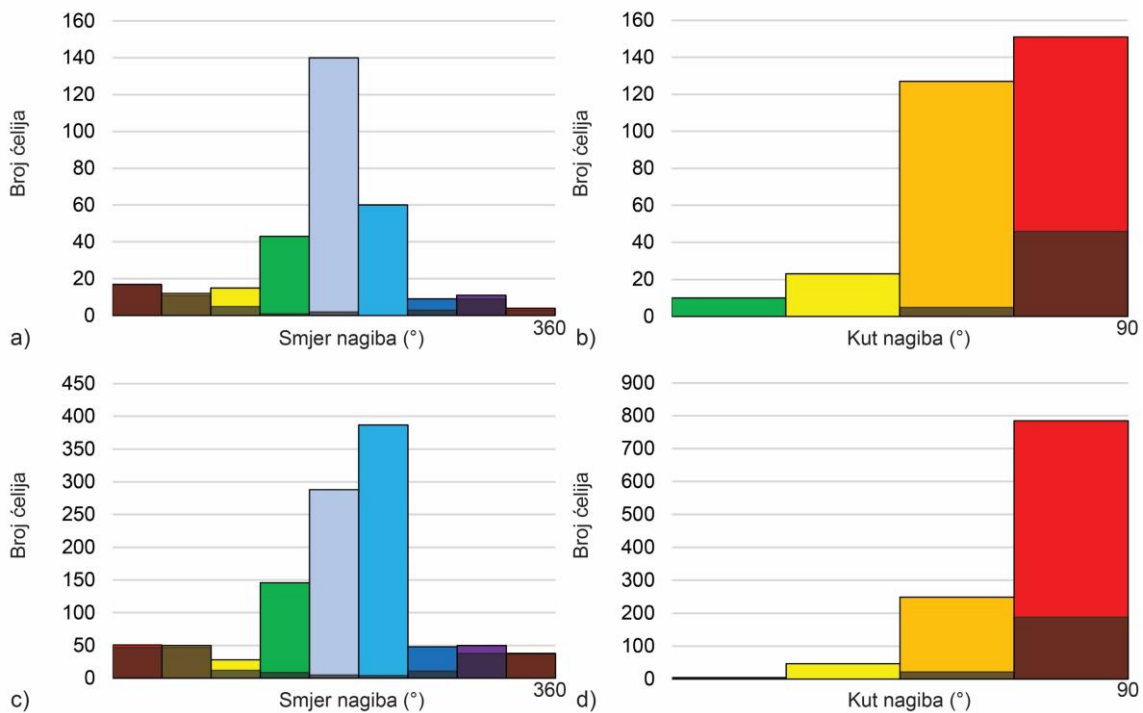
Inženjerskogeološka zona Z1 nalazi se na sjeverozapadnom dijelu istraživanog područja (slika 5.36 i 5.37), na samom početku istraživane dionice ceste. Počinje 15 m prije nulte stacionaže i završava na stacionaži 0+020. Ova zona obuhvaća stijenski zasjek ukupne površine od oko 111 m<sup>2</sup>, od čega se 16,4% površine nalazi u prevjesu pri čemu stijenske kosine generalno padaju prema J, s prosječnim kutom nagiba od oko 59° (slika 5.38a). Visina zasjeka u ovoj zone kreće se od 1 m na njegovom zapadnom dijelu do 3 m na istoku. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do intenzivno trošni konglomerati (W3-W7). Alatom *Compass* određena je orijentacija 40 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherova* statistika (slika 5.39a i tablica 5.15). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.15). Na istoku ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z2 duž uske zone povećanog stupnja trošnosti stijenske mase (slika 5.37) pri čemu dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta i stupnju trošnosti stijenske mase.



**Slika 5.37.** Pogled prema sjeveru na inženjerskogeološke zone Z1 i Z2 s ucrtanim granicama na visokorezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.

Inženjerskogeološka zona Z2 počinje na stacionaži 0+020, a završava na 0+065 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek ukupne površine oko 338 m<sup>2</sup>, od čega se 19,3% površine nalazi u prevjesu pri čemu stijenske kosine generalno padaju prema J i JZ, s prosječnim kutom nagiba oko 70° (slika 5.38b). Visina zasjeka u ovoj zone kreće se od 3,0 m na njegovom zapadnom dijelu do 7,0 m na istoku. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni konglomerati (W3). Alatom *Compass* određena je orijentacija 55 diskontinuiteta koja su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.39b i tablica 5.15).

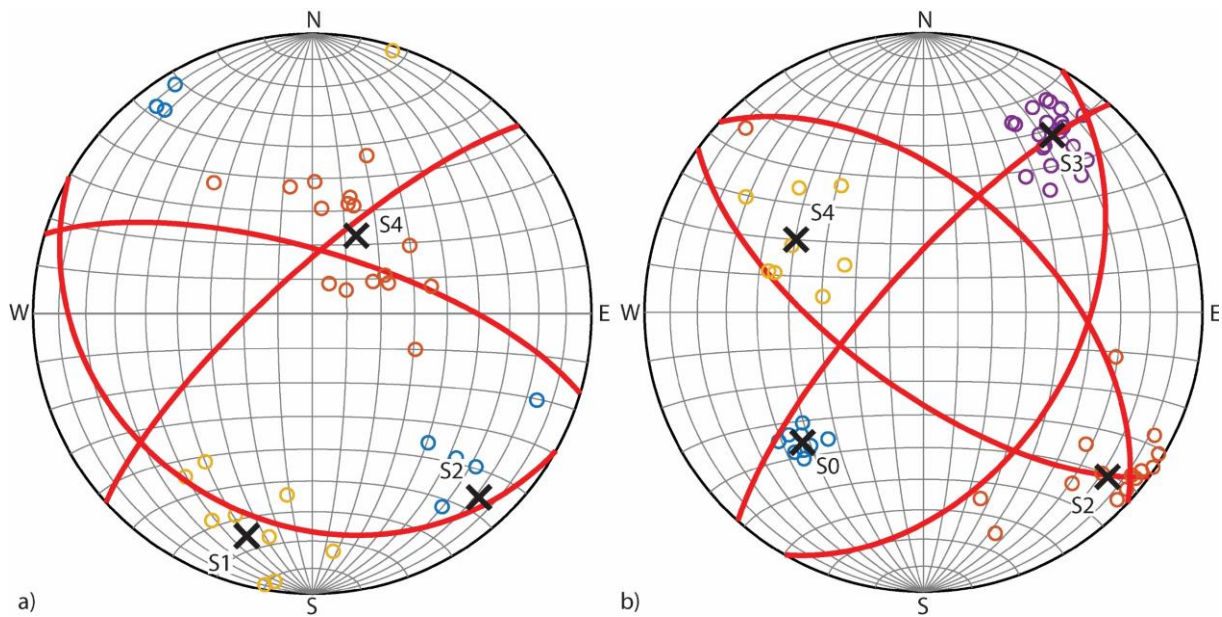
Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.15). Na istoku ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z3 gdje dolazi do promjene u orijentaciji ceste i samog zasjeka (slika 5.37) pri čemu se mijenjaju odnosi geometrijskih značajki diskontinuiteta i stijenske mase.



**Slika 5.38.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 te c) smjera i d) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.15.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zonama Z1 i Z2 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{max}$	$\bar{p}$
Z1	S1	17	72	19,09	6,40	0,19	0,7	0,37
	S2	318	78	23,05	6,48	1,62	3,2	1,08
	S4	209	26	13,77	6,04	0,10	0,13	0,71
Z2	S0	43	53	339,7	3,3	0,7	1,9	1,5
	S2	312	77	14,1	6,0	1,5	4,5	1,7
	S3	216	67	67,4	2,4	0,6	1,5	2,9
	S4	120	44	21,3	6,7	1,2	6,8	0,8

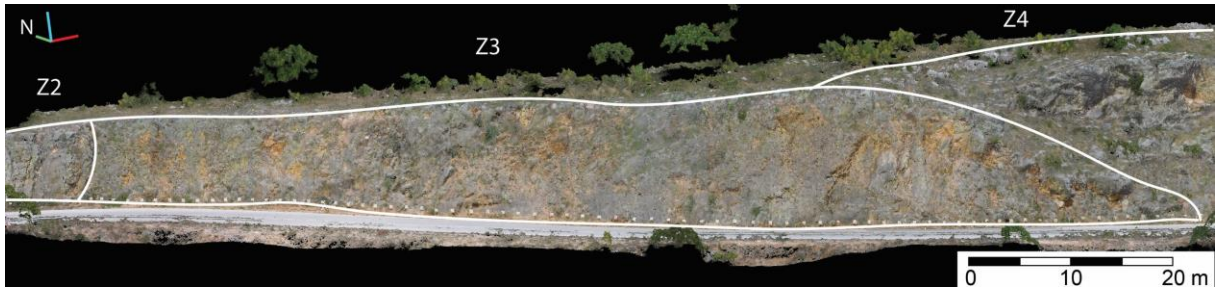


**Slika 5.39.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1 i b) inženjerskogeološku zonu Z2 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

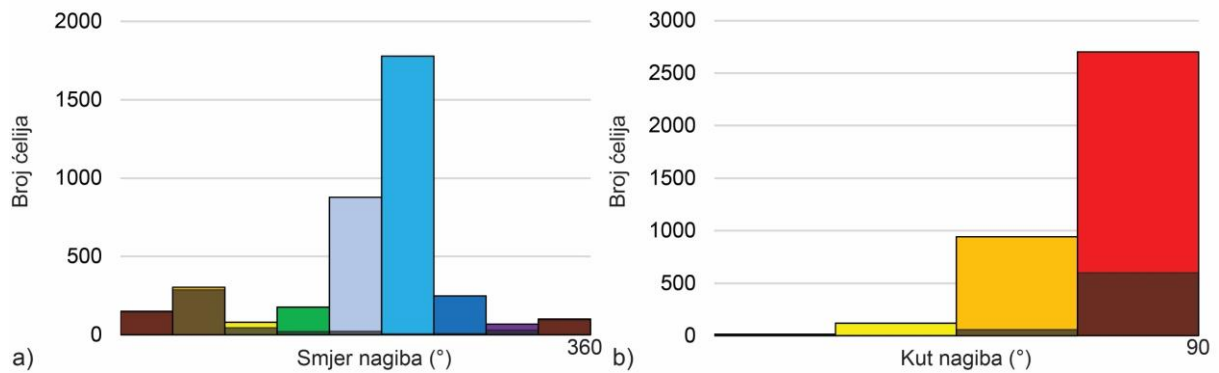
### 5.2.2 Inženjerskogeološka zona Z3

Inženjerskogeološka zona Z3 počinje na stacionaži 0+065, a završava na 0+180 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek ukupne površine oko 1126 m<sup>2</sup>, od čega se 17,6% površine nalazi u prevjesu pri čemu stijenske kosine generalno padaju prema J i JZ s prosječnim kutom nagiba od oko 70° (slika 5.41). Visina zasjeka u ovoj zone kreće se od 7,0 m na njegovom SZ dijelu do 12,5 m na JI nakon čega se smanjuje na 4,7 m na samom kraju zone (slika 5.40). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni konglomerati (W5-W7). Alatom *Compass* određena je orijentacija 70° diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.42 i tablica 5.16). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.16). Na JI ova zona graniči s prirodnim stijenskim kosinama u inženjerskogeološkoj zoni Z4 te s inženjerskogeološkom zonom Z5, pri čemu dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta i stijenske mase.

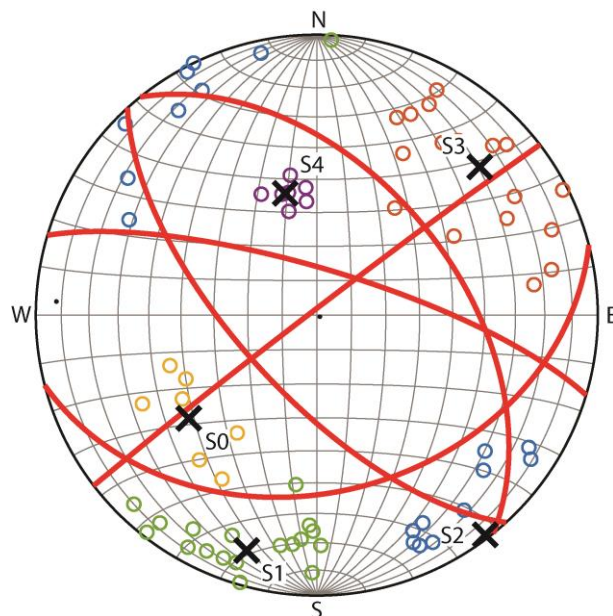




**Slika 5.40.** Pogled prema SI na inženjerskogeološku zone Z3 s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.41.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.42.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta u zoni Z3 na stereografskoj projekciji dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.16.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z3 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

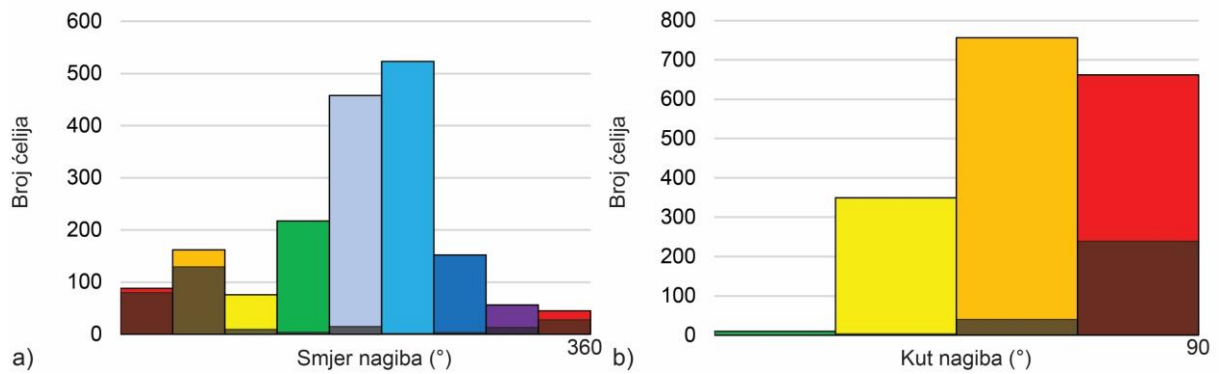
IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z3	S0	51	49	27,2	6,4	2,1	6,2	2,3
	S1	17	76	23,0	4,2	0,8	2,8	3,3
	S2	323	88	19,4	4,4	1,1	3,3	1,2
	S3	228	67	14,0	5,8	0,6	1,4	0,6
	S4	166	37	20,6	1,4	0,4	3,0	1,6

### 5.2.3 Inženjerskogeološka zona Z4

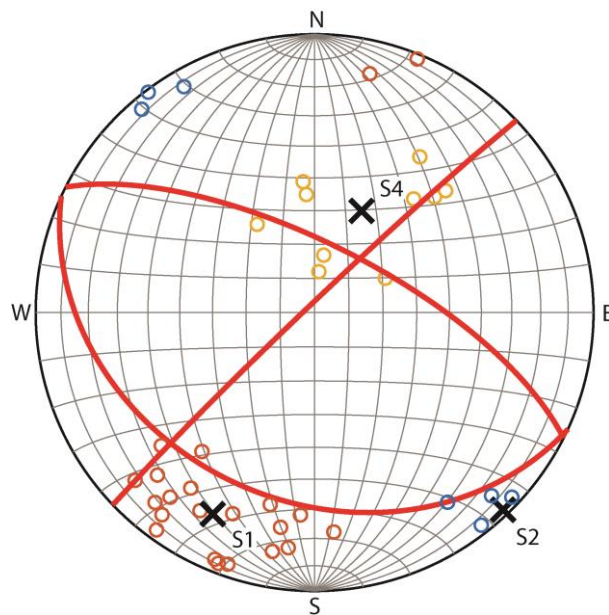
Inženjerskogeološka zona Z4 predstavlja prirodne stijenske kosine koje se nalaze na višem hipsometrijski položaju od stijenskih zasjeka u inženjerskogeološkim zonama Z3 i Z5 na JZ (slika 5.36 i 5.43). Ova zona počinje na stacionaži 0+150, a završava na 0+210 (slika 5.36). Stijenske kosine zauzimaju ukupnu površinu od oko 541 m<sup>2</sup>, od čega se 15,9% površine nalazi u prevjesu. Djelomično padaju na S, SI te djelomično na J, JZ, a prosječni kut nagba im iznosi oko 59° (slika 5.44). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje trošni konglomerati (W4-W5). Alatom *Compass* određena je orijentacija 37 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.45 i tablica 5.17). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.17). Na JI ova zona graniči s prirodnim stijenskim kosinama u inženjerskogeološkoj zoni Z3 te s inženjerskogeološkom zonom Z5, pri čemu dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta i stijenske mase.



**Slika 5.43.** Pogled prema SI na inženjerskogeološku zonu Z4 i djelove susjednih zona Z3 i Z5 s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.44.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.45.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z4, dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

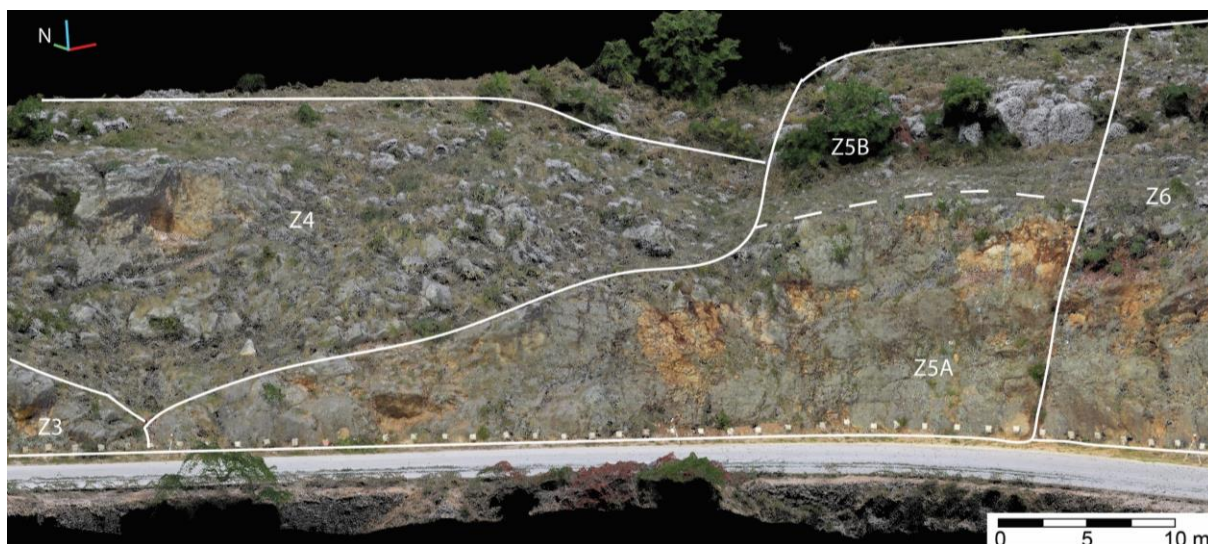
**Tablica 5.17.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z4	S1	27	70	4,2	10,2	0,6	1,3	1,2
	S2	316	88	8,4	15,4	2,2	5,5	1,7
	S4	205	33	11,5	8,4	0,8	1,5	1,8

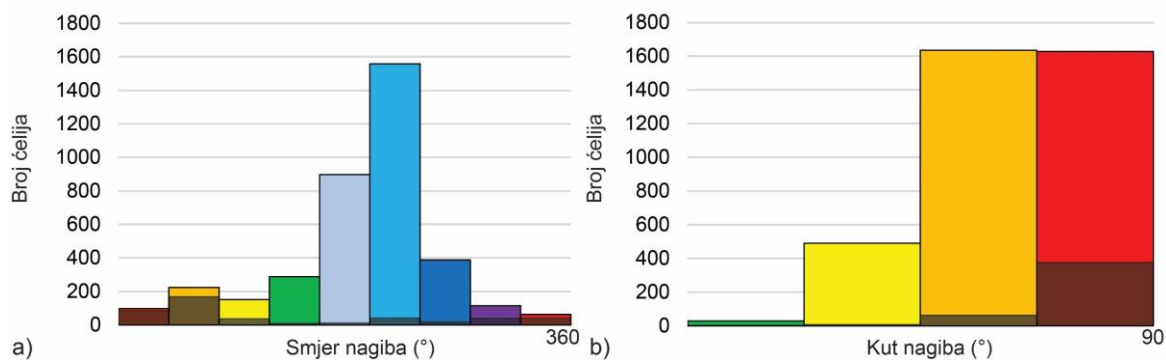
#### 5.2.4 Inženjerskogeološka zona Z5

Inženjerskogeološka zona Z5 počinje na stacionaži 0+180, a završava na 0+230 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine iznad zasjeka te je radi toga podijeljena u dvije podzone (slika 5.46). Ukupna površina ove zone je oko 1367 m<sup>2</sup>, od čega se 11,9% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zona Z5A) generalno padaju prema J i JZ, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 70, dok prirodne kosine (inženjerskogeološka zona Z5B) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 45° (slika 5.47). Visina zasjeka u inženjerskogeološkoj zoni Z5A kreće se od oko 2,0 m na njegovom SZ dijelu do 11,3 m na JI. Vizualnim pregledom digitalnog modela utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni konglomerati (W5-W7). Alatom *Compass* određena je orijentacija 60 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.48 i tablica 5.18). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.18). U inženjerskogeološkoj zoni Z5B, vizualnim pregledom modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo trošni do svježi konglomerati (W2), a Alatom *Compass* određena je orijentacija 10 diskontinuiteta koji pripadaju setovima S2, S3 i S4 (slika 5.48). Na JI (stacionaža 0+230) ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z6 duž uske vertikalne trošne zone, gdje dolazi značajne promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta te promjene u stupnju trošnosti stijenske mase.

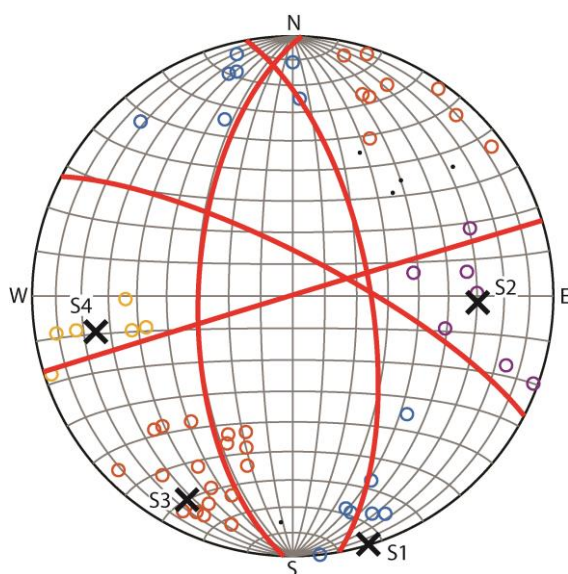




**Slika 5.46.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z5A i Z5B i susjedne zone Z4 i Z6 s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.47.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



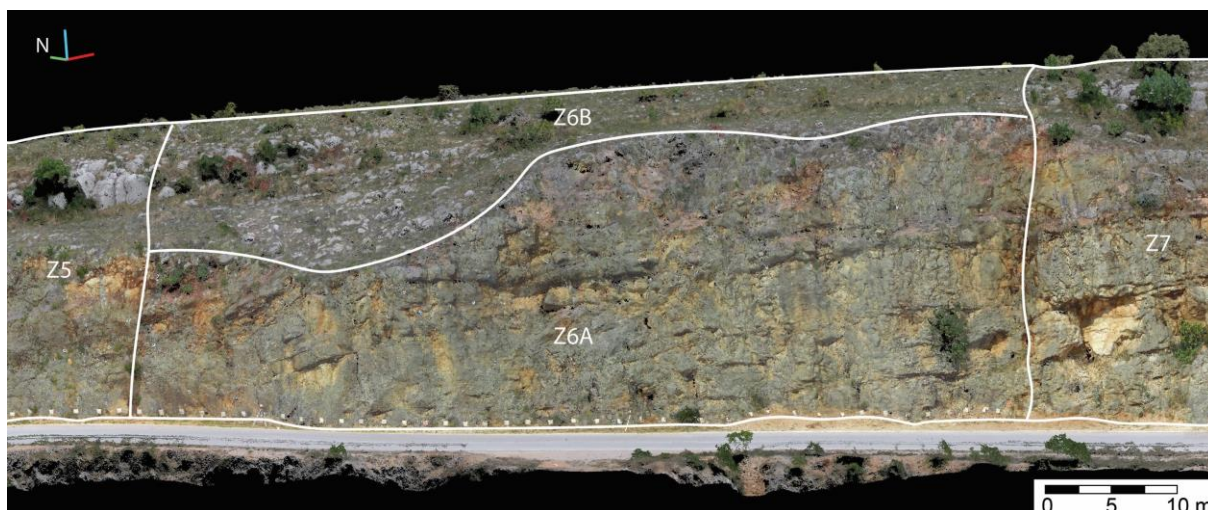
**Slika 5.48.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.18.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z5 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

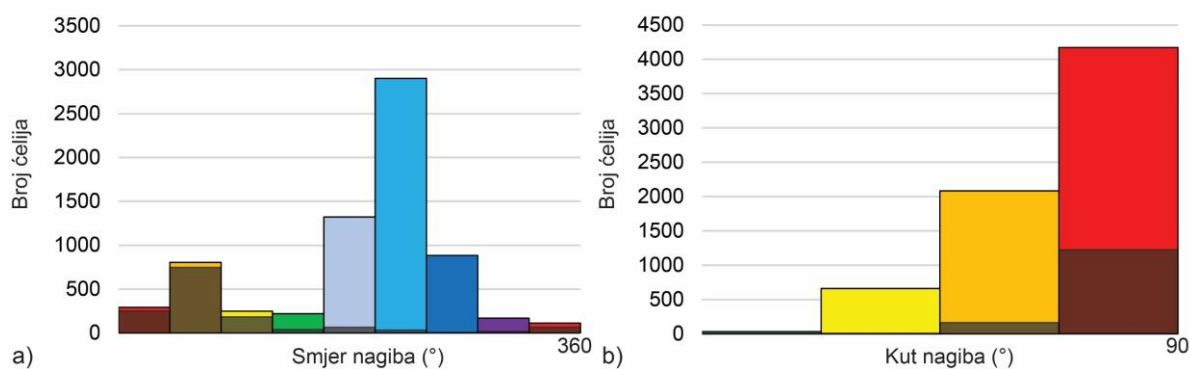
IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z5	S1	340	75	95,8	4,4	1,1	4,1	1,3
	S2	289	81	38,0	10,0	0,6	1,3	0,8
	S3	25	84	12,0	4,5	0,4	2,8	1,5
	S4	82	57	35,7	7,3	1,2	3,6	3,1

### 5.2.5 Inženjerskogeološka zona Z6

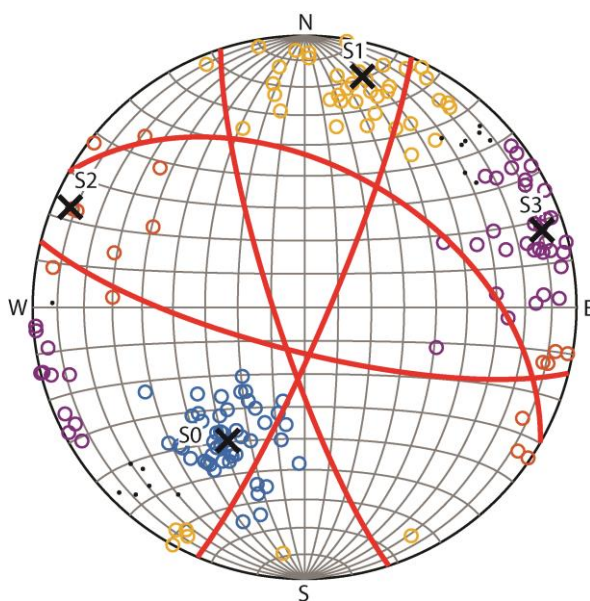
Inženjerskogeološka zona Z6 počinje na stacionaži 0+230, a završava na 0+295 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine iznad zasjeka te je radi toga podijeljena u dvije podzone (slika 5.49). Ukupna površina ove zone je oko 1877 m<sup>2</sup>, od čega se 20,3% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zona Z6A) generalno padaju prema JZ, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 73°, dok prirodne kosine (inženjerskogeološka zona Z6B) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 30° (slika 5.50). Visina zasjeka u inženjerskogeološkoj zoni Z6A kreće se od oko 11,3 m na njegovom SZ dijelu do 21,8 m na JI. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju srednje do intenzivno trošni konglomerati (W5-W6). Alatom *Compass* određena je orijentacija 175 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.51 i tablica 5.19). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (tablica 5.19). U inženjerskogeološkoj zoni Z6B prisutni su izrazito mali blokovi stijenske mase na kojima nije bilo moguće identificirati diskontinuitete niti stupanj trošnosti stijenske mase (slika 5.49). Na JI (stacionaža 0+295) ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z7 duž vertikalnog diskontinuiteta koji pripada setu S3 duž kojeg je povećano procjeđivanje podzemne vode, što je vidljivo na digitalnom modelu kao promjena boje duž uske zone oko diskontinuiteta (slika 5.49 i 5.5.52).



**Slika 5.49.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z6A i Z6B s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.50.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z6 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.51.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta u zoni Z6 na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.



**Tablica 5.19.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta u zoni Z6 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednju vrijednost postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z6	S0	30	47	35,4	2,2	0,43	1,32	6,22
	S1	194	77	20,2	2,9	0,83	2,20	0,96
	S2	113	83	22,8	4,6	0,64	1,58	2,10
	S3	252	81	26,5	2,6	0,66	1,50	2,70

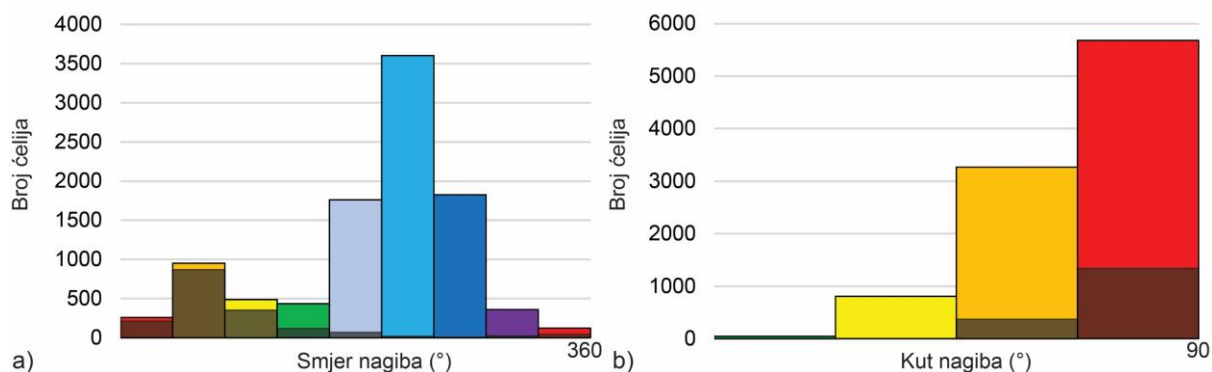
### 5.2.6 Inženjerskogeološka zona Z7

Inženjerskogeološka zona Z7 počinje na stacionaži 0+295, a završava na 0+380 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek na kojem po visini dolazi do promjene u raspodjeli razmaka i postojanosti te prirodne stijenske kosine na višem hipsometrijskom položaju te je radi toga podijeljena u tri podzone (slika 5.52). Ukupna površina ove zone je oko 2694 m<sup>2</sup>, od čega se 17,6% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološke zone Z7A i Z7B) generalno padaju prema SI i JZ, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 73°, dok prirodne kosine (inženjerskogeološka zona Z7C) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 40° (slika 5.53). Visina zasjeka koji obuhvaća inženjerskogeološke zone Z7A i Z7B kreće se od oko 21,8 m na njegovom SZ dijelu do 20,8 m na JI. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje do intenzivno trošni konglomerati (W4-W6), dok stijensku masu na prirodnim stijenskim kosinama u inženjerskogeološkoj zoni Z7C izgrađuju slabo trošni do svježi konglomerati (W2).



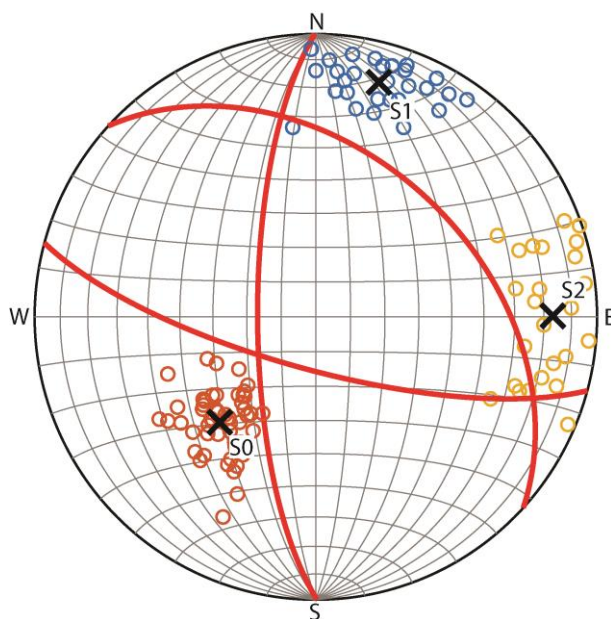
**Slika 5.52.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z7A, Z7B i Z7C s ucrtanim granicama zone na visokorezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.





**Slika 5.53.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z7 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Alatom *Compass*, na području cijele inženjerskogeološke zone Z7, određena je orijentacija 126 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (slika 5.54 i tablica 5.20, 5.26, 5.27). U ovoj zoni su najjasnije izraženi setovi diskontinuiteta, a prosječna vrijednost orijentacije im se ne mijenja te su stoga iste vrijednosti setova važeće za sve podzone. Iako se orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja, raspodjele razmaka i postojanosti se značajno mijenjaju u podzonama, a jasne promjene počinju na granici zona Z7A i Z7B, koju predstavlja diskontinuitet iz seta S0 velike postojanosti (slika 5.36), pri čemu se srednja vrijednost razmaka i postojanosti povećava (slika 5.54 i tablica 5.20). Također, srednje vrijednosti razmaka i postojanosti se mijenjaju na prelasku iz zone Z7B u Z7C, odnosno na prelasku iz stijenskog zasjeka u prirodne stijenske kosine (slika 5.54 i tablica 5.20). Na JI (stacionaža 0+380) ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z8 duž pretpostavljenog sub-vertikalnog rasjeda koji pripada setu diskontinuiteta S1 (slika 5.52 i 5.54), nakon kojeg dolazi do značajne promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta.



**Slika 5.54.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z7 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.20.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z7 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z7A	S0	42	42	50,7	1,7	0,57	1,88	3,50
	S1	195	75	42,3	2,5	0,59	2,08	1,10
	S2	270	73	20,9	3,9	0,54	1,35	0,70
Z7B	S0	42	42	50,7	1,7	0,74	1,50	4,20
	S1	195	75	42,3	2,5	0,54	1,60	2,10
	S2	270	73	20,9	3,9	0,58	1,70	2,20
Z7C	S0	42	42	50,7	1,7	0,43	1,32	6,22
	S1	195	75	42,3	2,5	0,83	2,20	0,96
	S2	270	73	20,9	3,9	0,66	1,50	2,70

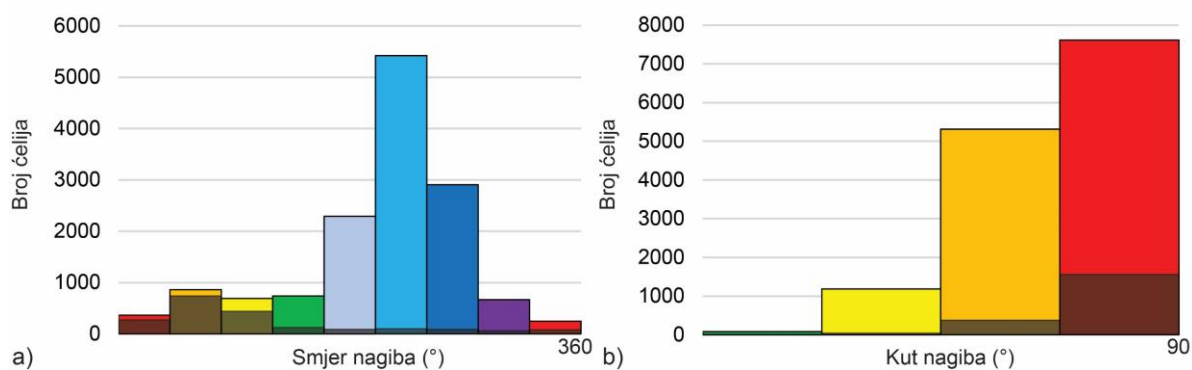
### 5.2.7 Inženjerskogeološka zona Z8

Inženjerskogeološka zona Z8 počinje na stacionaži 0+380, a završava na 0+500 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine, na višem hipsometrijskom položaju, na kojima po visini i po pružanju dolazi do promjene u raspodjeli razmaka i postojanosti te je radi toga podijeljena u četiri podzone (slika 5.55). Ukupna površina ove zone je oko 4350 m<sup>2</sup>, od čega se 14% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološke zone Z8A, Z8B i Z8C) generalno padaju prema JZ, Z, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 74°, dok prirodne kosine (inženjerskogeološka zona Z8D) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 48° (slika 5.56). Visina zasjeka koji obuhvaća inženjerskogeološke zone Z8A, Z8B i Z8C kreće se od oko 15,4 m na njegovom SZ dijelu do 12,5 m na JI dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu izgrađuju slabo do srednje do intenzivno trošni konglomerati (W3-W7), dok stijensku masu na prirodnim stijenskim kosinama u inženjerskogeološkoj zoni Z8D izgrađuju slabo trošni do svježi konglomerati (W2). Alatom *Compass* na području cijele inženjerskogeološke zone Z8 određena je orijentacija 444 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta na području stijenskog zasjeka (zone Z8A, Z8B i Z8C) (slika 5.57) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.21). Na području prirodnih stijenskih kosina (zona Z8B) prisutna su tri seta diskontinuiteta pri čemu set diskontinuiteta S3 izostaje (tablica 5.21). Unutar svake zone, za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (tablica 5.21).

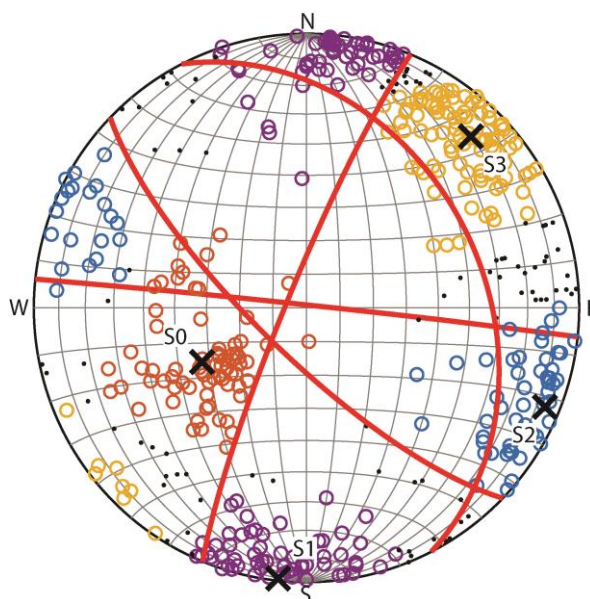
Iako se orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja u zoni zasjeka, raspodjele razmaka i postojanosti se značajno mijenjaju u podzonama, a jasne promjene počinju na granici zona Z8A i Z8B koju predstavlja diskontinuitet iz seta S0 velike postojanosti te zona Z8A i Z8C, koju predstavlja zona povećane trošnosti, odnosno subvertikalni diskontinuitet koji pripada setu S2 (slika 5.57). Srednje vrijednosti razmaka diskontinuiteta se postupno povećavaju od SZ prema JI u području zasjeka, dok su na području prirodnih stijenskih kosina (zona Z8D) sličnije onima iz inženjerskogeološke zone Z7C. Na JI (stacionaža 0+500) ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z9 duž pretpostavljenog sub-vertikalnog diskontinuiteta koji pripada setu diskontinuiteta S1, vjerojatno vezan za rasjed koji je odvajao inženjerskogeološke zone Z7 i Z8, nakon kojeg dolazi do značajne promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta.



**Slika 5.55.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z8A, Z8B, Z8C i Z8D s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.56.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z8 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.57.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z8 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.



**Tablica 5.21.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z8 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z8A	S0	63	35	21,3	2,2	0,74	1,50	3,30
	S1	6	89	34,1	1,4	0,58	2,10	1,10
	S2	292	84	31,2	1,9	0,52	1,70	1,30
	S3	224	76	30,4	1,6	0,59	1,60	1,20
Z8B	S0	63	35	21,3	2,2	0,80	2,00	1,30
	S1	6	89	34,1	1,4	0,48	1,65	1,90
	S2	292	84	31,2	1,9	0,43	1,50	1,10
	S3	224	76	30,4	1,6	0,59	1,60	1,20
Z8C	S0	63	35	21,3	2,2	0,75	3,00	3,10
	S1	6	89	34,1	1,4	0,68	1,75	0,90
	S2	292	84	31,2	1,9	0,90	1,80	0,87
	S3	224	76	30,4	1,6	0,80	3,10	0,85
Z8D	S0	63	35	21,3	2,2	0,74	1,50	4,20
	S1	6	89	34,1	1,4	0,54	1,60	2,10
	S2	292	84	31,2	1,9	0,58	0,58	1,70

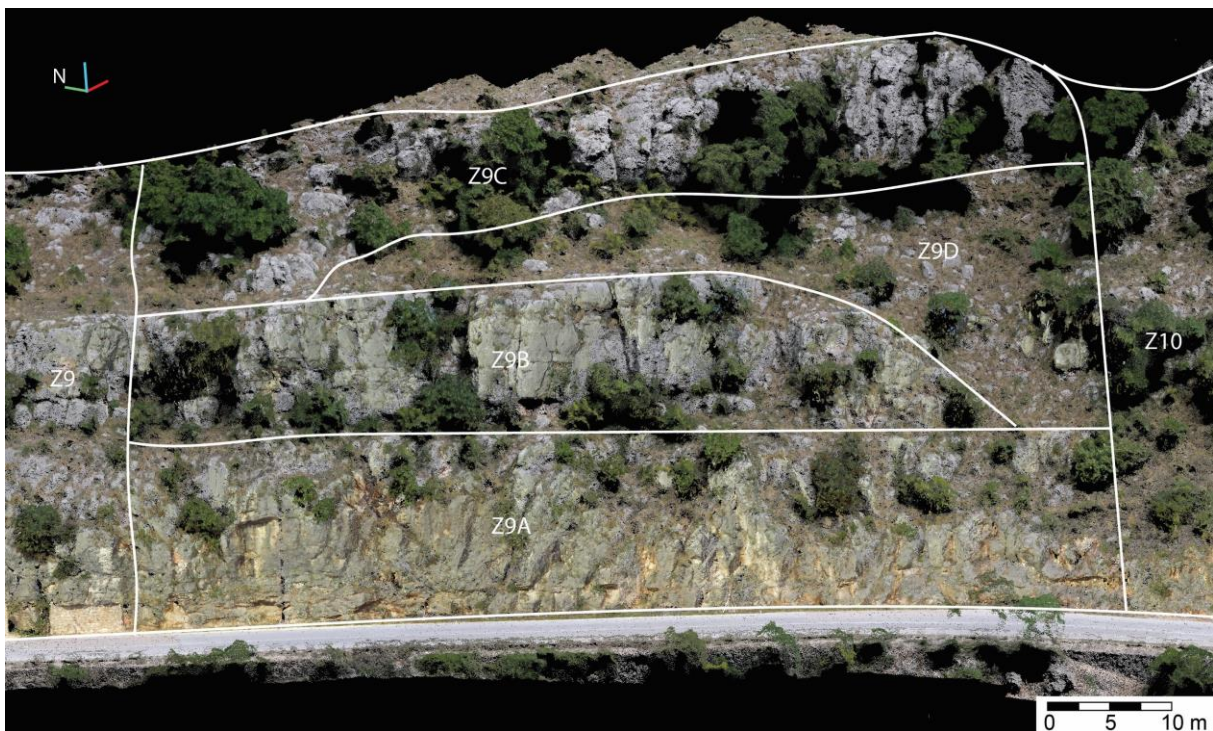
### 5.2.8 Inženjerskogeološka zona Z9

Inženjerskogeološka zona Z9 počinje na stacionaži 0+500, a završava na 0+570 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine, na višem hipsometrijskom položaju, na kojima po visini dolazi do promjene u raspodjeli razmaka i postojanosti te stupnja trošnosti stijenske mase pa je radi toga podijeljena u tri podzone koje su međusobno odvojene slojevitosti, odnosno diskontinuitetima velike postojanosti koji pripadaju setu S0 (slika 5.58). Ukupna površina ove zone je oko 3416 m<sup>2</sup>, od čega se 15,1% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zone Z9A) generalno padaju prema J, JZ i Z, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 72°, dok prirodne kosine (inženjerskogeološke zone Z9B i Z9C) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 66° u zoni Z9B i oko 42° u zoni Z9C (slika 5.59). Visina zasjeka koji obuhvaća inženjerskogeološku zonu Z9A kreće se od oko 13,3 m na njegovom SZ dijelu do 11,2 m na JI.

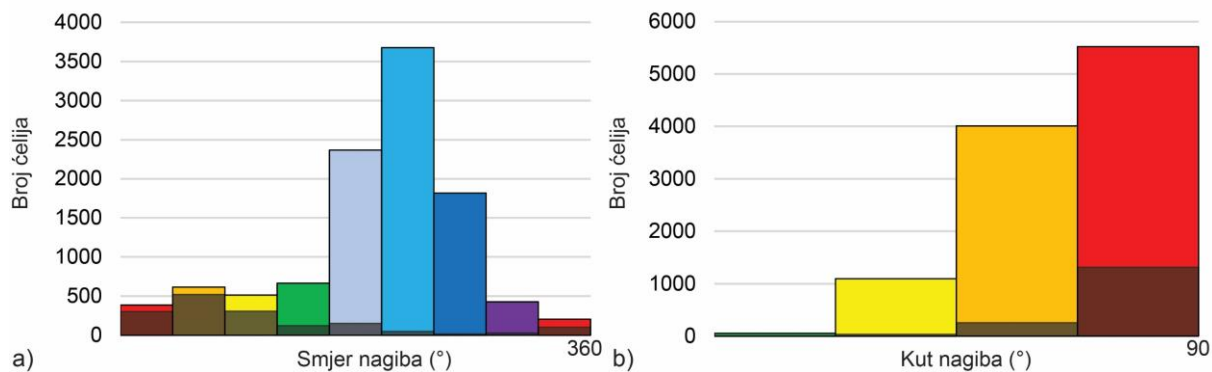
Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z9A izgrađuju slabo do srednje trošni konglomerati (W3-W5), dok stijensku masu na prirodnim stijenskim kosinama, izgrađuju svježi do slabo trošni te slabo trošni konglomerati (W2-W3) u inženjerskogeološkoj zoni Z9B te svježi do svježi do slabo trošni konglomerati (W1-W2) u inženjerskogeološkoj zoni Z9C. Alatom *Compass*, na području inženjerskogeološke zone Z9,

određena je orijentacija 202 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta koji su prisutni u svim podzonama (slika 5.60) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.22). Unutar svake zone, za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (tablica 5.22).

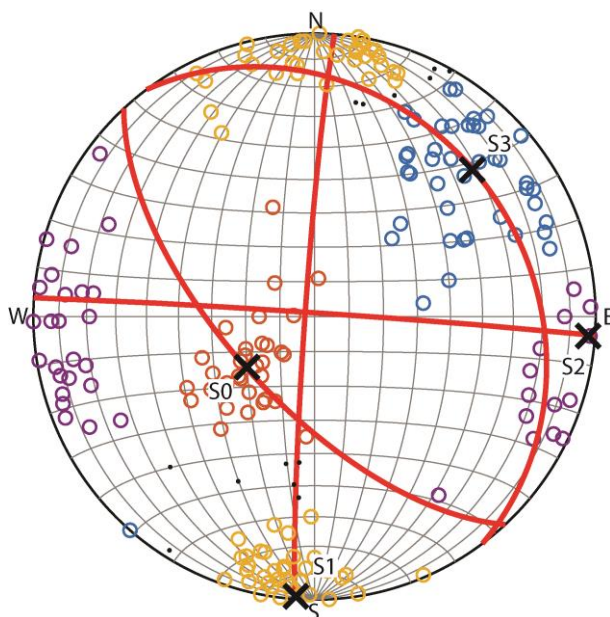
Iako se orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja u zoni zasjeka i prirodnih kosina, raspodjele razmaka i postojanosti se značajno mijenjaju u podzonama, a jasne promjene počinju na granicama podzona koju predstavljaju diskontinuitet velike postojanosti koji pripadaju setu S0. Srednje vrijednosti razmaka i postojanost diskontinuiteta su najveći u zoni Z9B, a najmanji u zoni Z9A. Vrijednosti razmaka diskontinuiteta se postupno povećavaju od SZ prema JI u području zasjeka, dok su na području prirodnih stijenskih kosina (zona Z9D) sličniji onima iz inženjerskogeološke zone Z7C. Prema JI, tj. na kraju zone (stacionaža 0+570) nalazi se jaruga duž koje ova zona graniči s inženjerskogeološkom zonom Z10, a nakon koje dolazi do značajne promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta i stupnju trošnosti stijenske mase.



**Slika 5.58.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z9A, Z9B, Z9C i Z9D s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.59.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z9 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.60.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z9

**Tablica 5.22.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z9 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z9A	S0	53	24	26,3	2,9	0,65	1,50	0,80
	S1	4	89	37,4	1,7	0,58	2,10	1,00
	S2	274	87	19,6	4,9	0,44	1,10	0,90
	S3	227	65	19,8	4,5	0,48	1,20	1,30
Z9B	S0	53	24	26,3	2,9	0,50	0,90	1,50
	S1	4	89	37,4	1,7	0,58	2,10	1,00
	S2	274	87	19,6	4,9	0,82	1,30	1,70
	S3	227	65	19,8	4,5	0,75	1,40	1,10
Z9C	S0	53	24	26,3	2,9	0,74	1,50	4,20
	S1	4	89	37,4	1,7	0,54	1,60	2,10
	S2	274	87	19,6	4,9	0,58	0,58	1,70
	S3	227	65	19,8	4,5	0,82	1,85	1,85

### 5.2.9 Inženjerskogeološka zona Z10

Inženjerskogeološka zona Z10 počinje na stacionaži 0+570, a završava na 0+615 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine na višem hipsometrijskom položaju te je radi toga podijeljena u dvije podzone (slika 5.62). Ukupna površina ove zone je oko 2844 m<sup>2</sup>, od čega se 13,5% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zone Z10A) generalno padaju prema JZ i Z, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 69°, dok prirodne kosine (inženjerskogeološka zona Z10B) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 46° (slika 5.62). Visina zasjeka, koji obuhvaća inženjerskogeološku zonu Z10A, kreće se od oko 4,3 m na njegovom SZ dijelu do 10,2 m na JI dijelu.

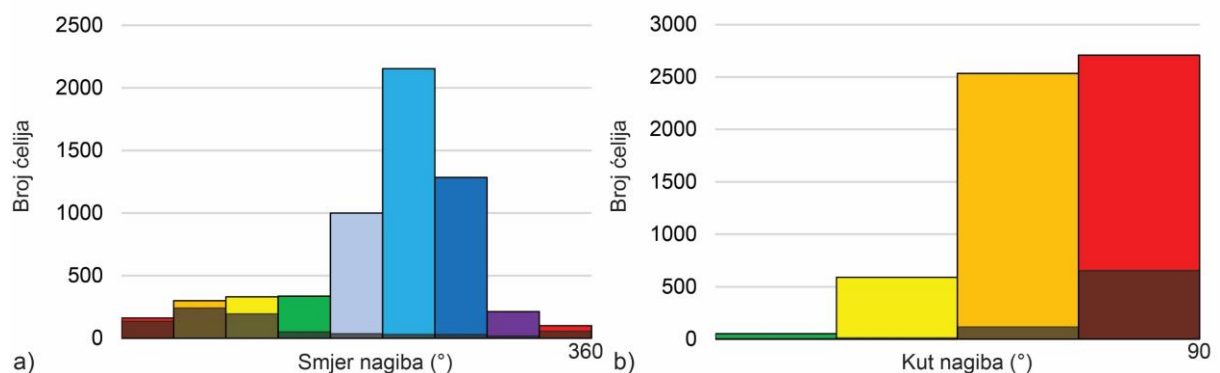
Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z10A izgrađuju srednje do intenzivno trošni konglomerati (W5-W7), dok stijensku masu na prirodnim stijenskim kosinama, u inženjerskogeološkoj zoni Z10B, izgrađuju svježe do slabo trošni i slabo trošni konglomerati (W2-W3). Alatom *Compass*, na području inženjerskogeološke zone Z10A, određena je orijentacija 100 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.63) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.23). U inženjerskogeološkoj zoni Z10B nije bilo moguće odrediti orijentaciju diskontinuiteta zbog lošije kvalitete digitalnog modela i izostanka dijelova stijenskih kosina te je pretpostavljena ista orijentacija diskontinuiteta kao i u zoni



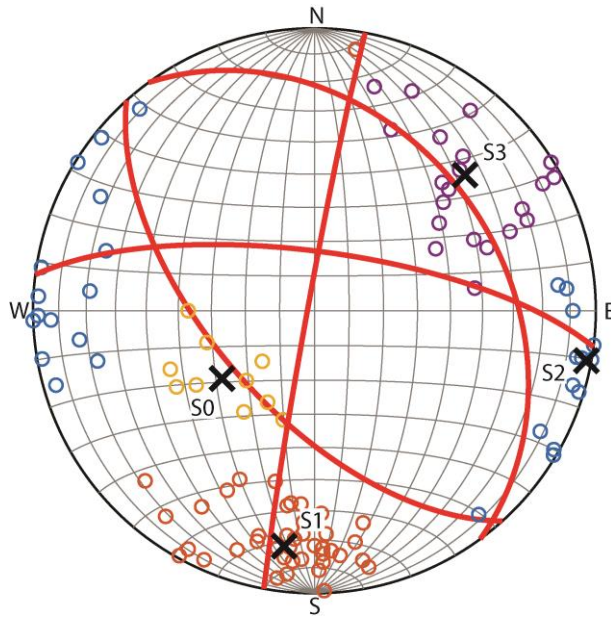
Z10A. Vrijednosti postojanosti i razmaka preuzete iz prethodne inženjerskogeološke zone Z9C (tablica 5.23). Završetak ove zone (stacionaža 0+615) obilježen je značajnom promjenom u orijentaciji stijenskih kosina, nakon kojeg dolazi do promjene odnosa u geometrijskim značajkama diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z11.



**Slika 5.61.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z10A i Z10B s ucrtanim granicama zone na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.62.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z10 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.63.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za inženjerskogeološku zonu Z10 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

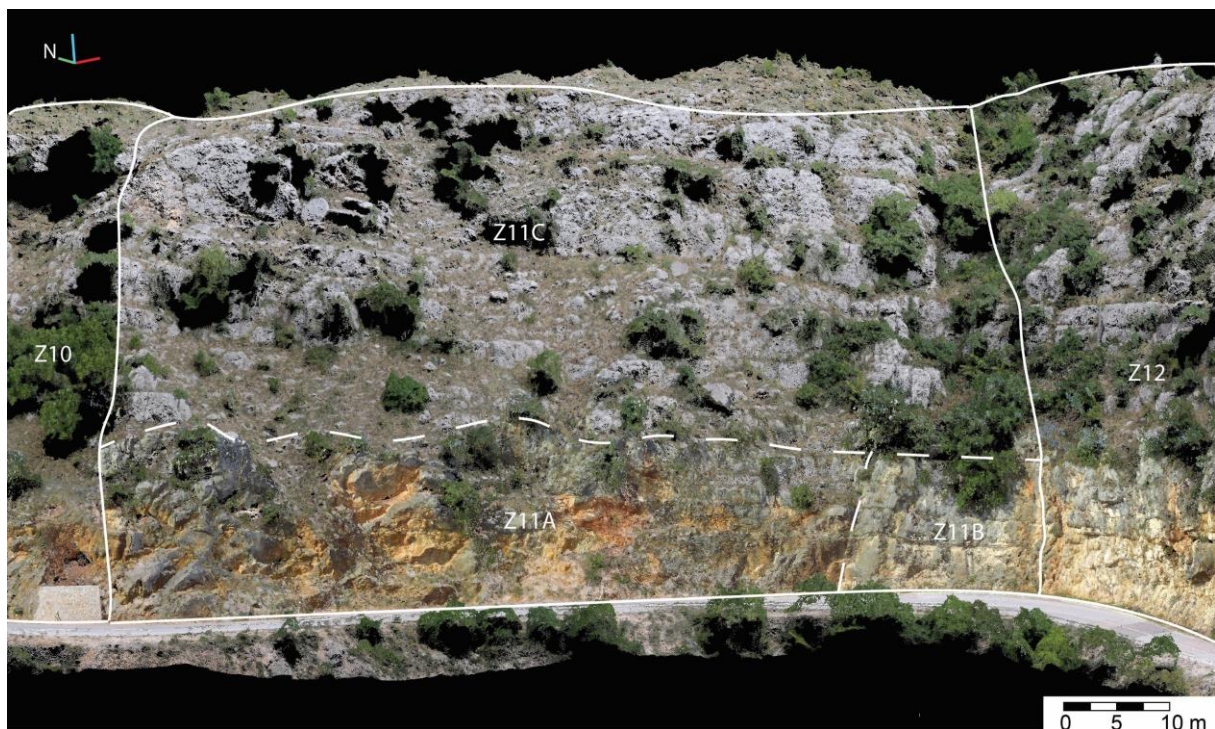
**Tablica 5.23.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z10 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultatni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z10A	S0	54	33	19,1	8,2	0,68	2,30	1,90
	S1	7	73	26,3	2,7	0,57	1,10	1,10
	S2	280	88	18,8	13,7	0,62	1,50	0,90
	S3	228	61	11,0	5,7	0,57	1,70	1,30
Z10B	S0	54	33	19,1	8,2	0,74	1,50	4,20
	S1	7	73	26,3	2,7	0,54	1,60	2,10
	S2	280	88	18,8	13,7	0,58	0,58	1,70
	S3	228	61	11,0	5,7	0,82	1,85	1,85

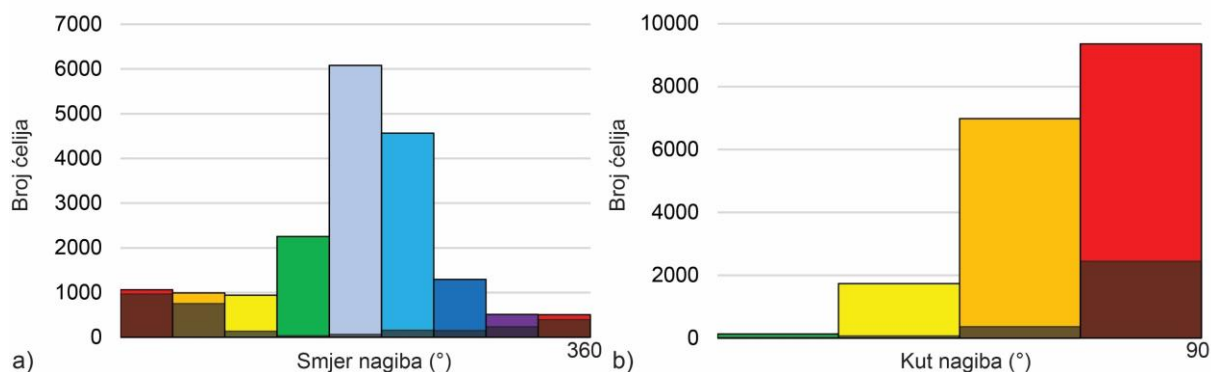


### 5.2.10 Inženjerskogeološka zona Z11

Inženjerskogeološka zona Z11 počinje na stacionaži 0+615, a završava na 0+710 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek na kojem po pružanju dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta te stupnju trošnosti. Također, obuhvaća i prirodne stijenske kosine na višem hipsometrijskom položaju te je radi toga podijeljena u tri podzone (slika 5.64). Ukupna površina ove zone je oko 5509 m<sup>2</sup>, od čega se 16% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološke zone Z11A i Z11B) generalno padaju prema J, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 73°, dok prirodne stijenske kosine (inženjerskogeološka zona Z11C) generalno padaju na JZ, s prosječnim kutom nagiba oko 49° (slika 5.65). Visina zasjeka, koji obuhvaća inženjerskogeološke zone Z11A i Z11B, kreće se od oko 18,1 m na njegovom ZSZ dijelu do 13,4 m na IJI dijelu.



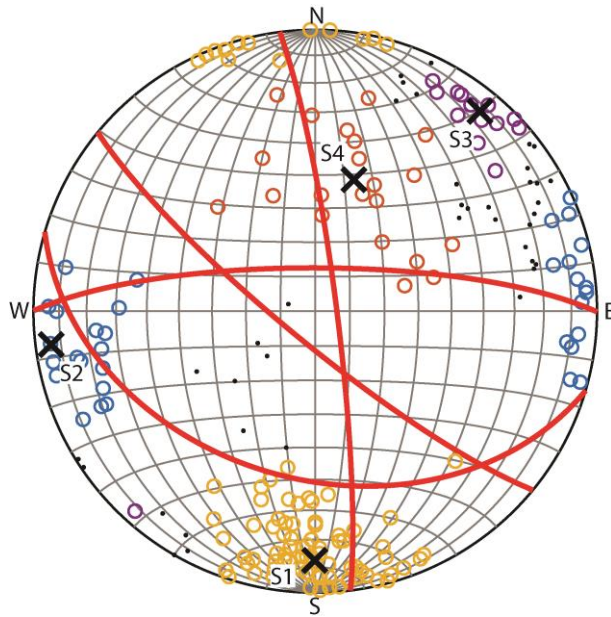
**Slika 5.64.** Pogled prema S na inženjerskogeološke zone Z11A, Z11B i Z11C s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.65.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z11 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z11A izgrađuju srednje do intenzivno trošni konglomerati (W5-W7), dok stijensku masu u zoni Z11B izgrađuju slabo i slabo do srednje trošni konglomerati (W3-W4). Granicu između ovih podzona predstavlja pretpostavljeni subvertikalni rasjed pružanja I-Z i nepoznatog karaktera pomaka, koji pripada setu diskontinuiteta S1 (slika 5.64 i 5.66). Stijensku masu u inženjerskogeološkoj zoni Z11C izgrađuju svježi do slabo trošni i slabo trošni konglomerati (W2-W3). alatom *Compass*, u zoni zasjeka, tj. inženjerskogeološkim zonama Z11A i Z11B, određena je orijentacija 202 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.66) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.24). U inženjerskogeološkoj zoni Z11C, osim diskontinuiteta koji pripadaju setu S1, nije bilo moguće identificirati orijentaciju diskontinuiteta koji pripadaju ostalim setovima zbog lošije kvalitete digitalnog modela i izostanka dijelova stijenskih kosina te je pretpostavljena ista orijentacija diskontinuiteta kao i u zoni Z9C. Također, preuzete su i vrijednosti razmaka i postojanosti jer su vizualno izgledale slično. Utvrđeni setovi diskontinuiteta nisu odgovarali prisutnim diskontinuitetima u inženjerskogeološkoj zoni Z11B zbog prevelikog utjecaja onih diskontinuiteta prisutnih u zoni Z11A. Stoga su zoni Z11B pridodane vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta iz sljedeće zone s obzirom im u potpunosti odgovaraju. Vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta određivane su odvojeno zbog različite orijentacije kosine, što je razlog i drugačijom raspodjeli vrijednosti (tablica 5.24). Završetak ove zone (stacionaža 0+710) obilježen je značajnom promjenom u orijentaciji stijenskih kosina duž jaruge koja je formirana iznad stijenskih zasjeka, na području prirodnih stijenskih kosina, a nakon koje dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z12.





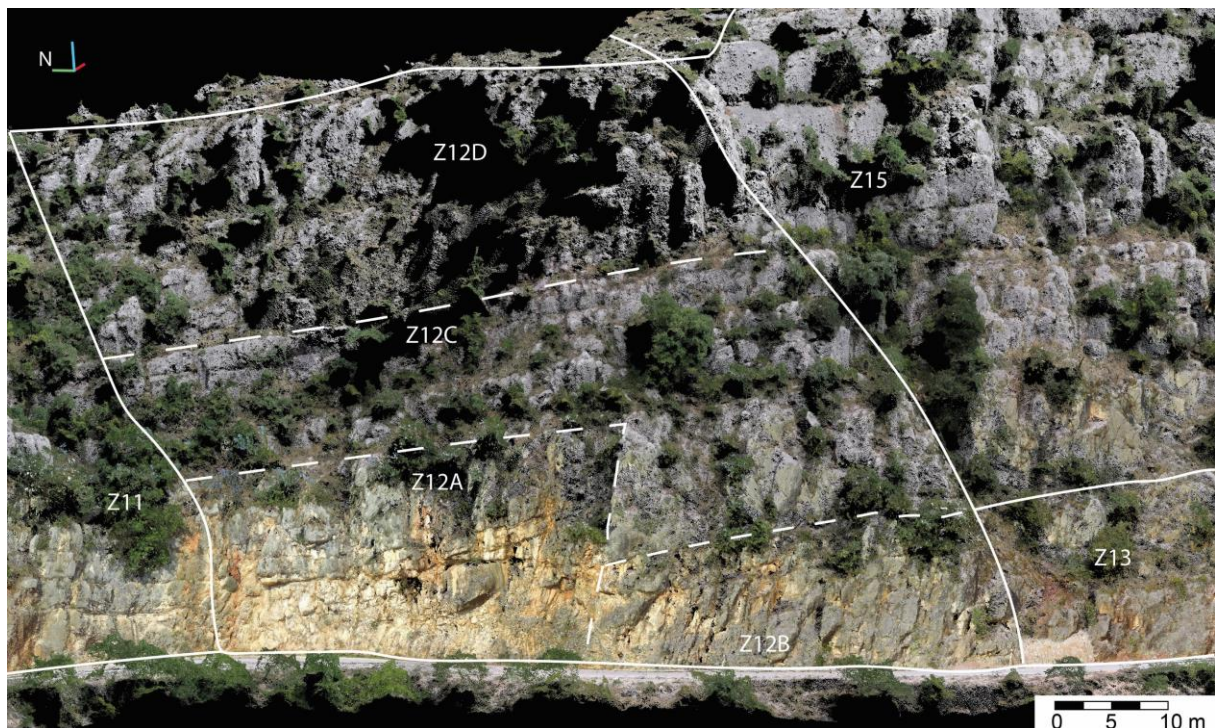
**Slika 5.66.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: inženjerskogeološku zonu Z11.

**Tablica 5.24.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z11 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

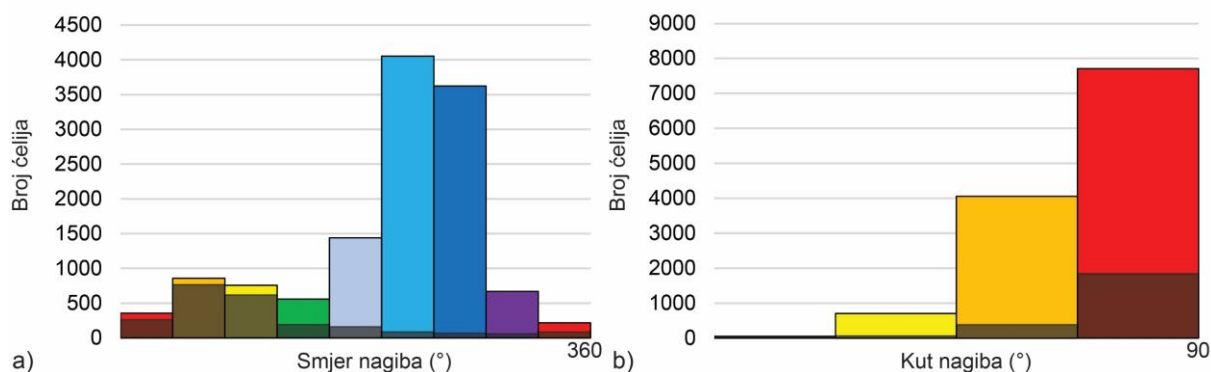
IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z11A	S1	0	77	25,1	1,8	0,38	0,80	1,10
	S2	83	84	32,1	2,7	0,65	0,90	0,75
	S3	219	81	77,9	2,6	0,60	1,00	1,20
	S4	196	40	7,6	6,8	0,45	0,70	0,80
Z11B	S0	56	26	15,8	4,9	1,40	3,20	4,20
	S1	12	83	44,7	1,7	1,20	2,30	0,90
	S3	236	80	27,9	2,5	0,70	2,00	1,70
Z11C	S0	53	24	26,3	2,9	0,74	1,50	4,20
	S1	4	89	37,4	1,7	0,54	1,60	2,10
	S2	274	87	19,6	4,9	0,58	0,58	1,70
	S3	227	65	19,8	4,5	0,82	1,85	1,85

### 5.2.11 Inženjerskogeološka zona Z12

Inženjerskogeološka zona Z12 počinje na stacionaži 0+710, a završava na 0+785 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek na kojem po pružanju dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta te stupnju trošnosti. Također, obuhvaća i prirodne stijenske kosine na višem hipsometrijskom položaju na kojima po visini dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Zbog navedenih razloga ova zona je podijeljena u četiri podzone (slika 5.67). Ukupna površina ove zone je oko 4354 m<sup>2</sup>, od čega se 18,4% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološke zone Z12A i Z12B) generalno padaju prema Z, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 72°, dok prirodne stijenske kosine (inženjerskogeološka zona Z12C i Z12D) generalno padaju na Z i JZ, s prosječnim kutom nagiba od oko 62° u inženjerskogeološkoj zoni Z12C i oko 50° u inženjerskogeološkoj zoni Z12D (slika 5.68). Visina zasjeka, koji obuhvaća inženjerskogeološke zone Z12A i Z12B, kreće se od oko 12,9 m na njegovom S dijelu do oko 8,9 m na J dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z12A izgrađuju srednje do intenzivno trošni i intenzivno trošni konglomerati (W6-W7), dok stijensku masu u zoni Z12B izgrađuju srednje trošni konglomerati (W5). Granicu između ovih podzona predstavlja blaga promjena u orijentaciji zasjeka nakon koje, osim u stupnju trošnosti stijenske mase, dolazi do promjene u vrijednostima razmaka i postojanosti diskontinuiteta (slika 5.67 i tablica 5.25).

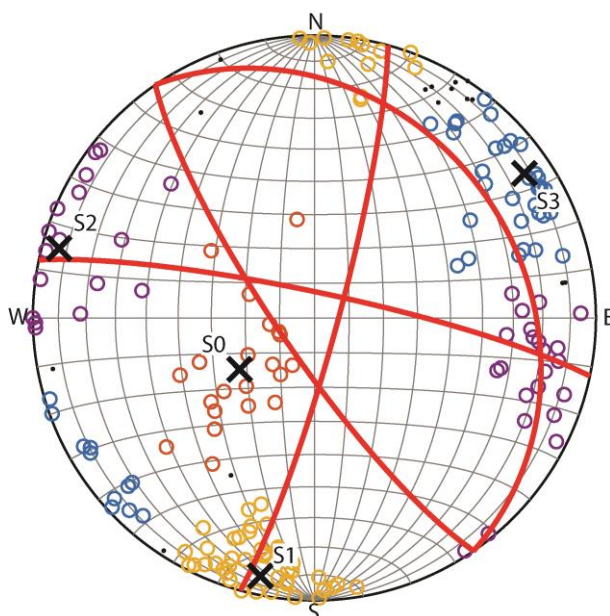


**Slika 5.67.** Pogled prema I na inženjerskogeološke zone Z12A, Z12B, Z12C i Z12D s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.



**Slika 5.68.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z12 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Na području prirodnih stijenskih kosina (inženjerskogeološke zone Z12C i Z12D) stijensku masu izgrađuju svježi i slabo trošni do svježi konglomerati (W1-W2). Alatom *Compass*, u inženjerskogeološkoj zoni Z12, određena je orijentacija 192 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.69) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.25). Diskontinuiteti mjereni u području prirodnih stijenskih kosina pripadaju istim setovima kao i oni mjereni u području stijenskog zasjeka te su stoga za cijelu ovu zonu prihvaćeni rezultati automatizirane analize grupiranja diskontinuiteta u setove. Iako se prosječna orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja po podzonama, mijenjaju se vrijednosti razmaka i postojanosti. U inženjerskogeološkoj zoni Z12B razmak i postojanost diskontinuiteta su veći nego u zoni Z12A, pri čemu dolazi do postupnog povećanja razmaka i postojanosti u Z12C, a najveće vrijednosti su u zoni Z12D. Granice zona po visini predstavlja slojevitost (slika 5.67), odnosno diskontinuitet velike postojanosti koji pripada setu S0, a nakon kojeg dolazi do promjene u vrijednostima razmaka i postojanosti (tablica 5.25). Završetak ove zone (stacionaža 0+785) obilježen je blagom promjenom u orijentaciji stijenskog zasjeka nakon koje dolazi do promjene u stupnju trošnosti stijenske mase te geometrijskih značajki diskontinuiteta.



**Slika 5.69.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: inženjerskogeološku zonu Z12 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

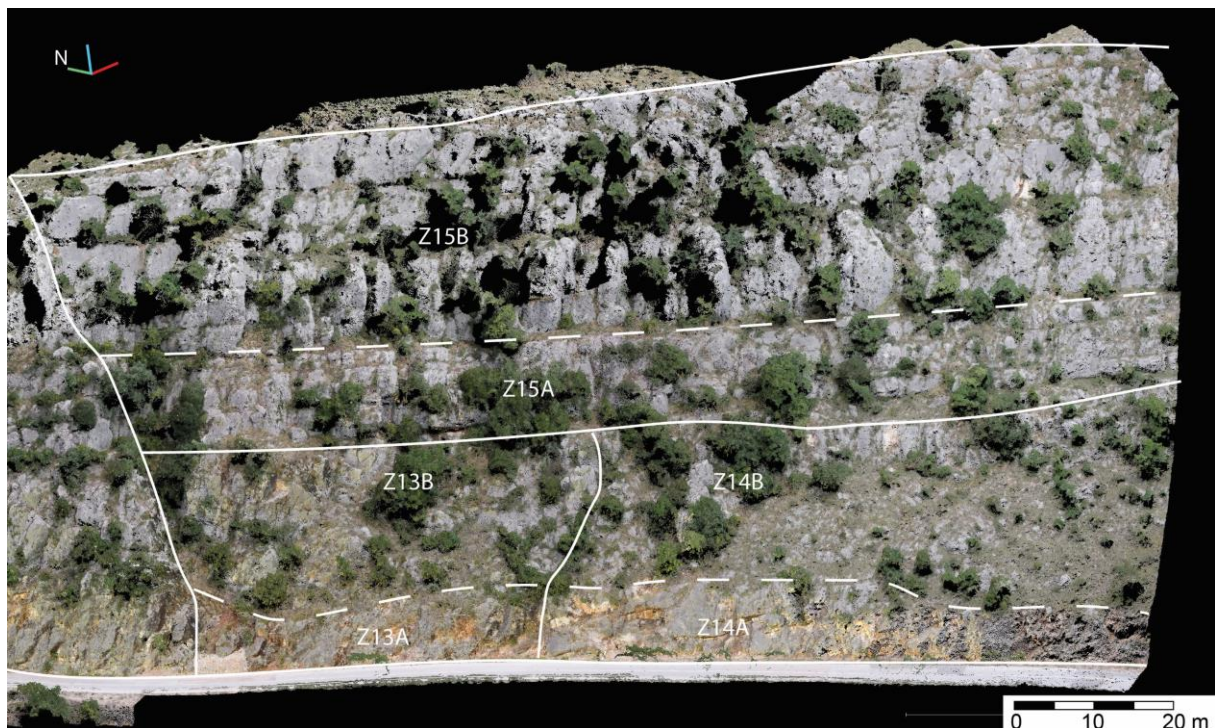
**Tablica 5.25.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zonu Z12 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta, normalizirani rezultantni vektor i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z12A	S0	56	26	15,8	4,9	0,48	1,95	0,80
	S1	12	83	44,7	1,7	0,32	1,20	1,10
	S2	105	83	19,0	3,2	0,90	2,10	1,00
	S3	236	80	27,9	2,5	0,42	0,90	0,50
Z12B	S0	56	26	15,8	4,9	0,80	2,20	2,90
	S1	12	83	44,7	1,7	0,67	1,67	2,20
	S2	105	83	19,0	3,2	0,90	2,10	0,80
	S3	236	80	27,9	2,5	0,50	1,20	1,40
Z12C	S0	56	26	15,8	4,9	0,52	1,00	2,2
	S1	12	83	44,7	1,7	0,48	1,20	1,10
	S2	105	83	19,0	3,2	0,95	1,80	1,45
	S3	236	80	27,9	2,5	0,49	0,98	0,62
Z12D	S0	56	26	15,8	4,9	2,20	5,80	6,70
	S1	12	83	44,7	1,7	0,90	1,60	1,80
	S2	105	83	19,0	3,2	0,95	1,85	1,90
	S3	236	80	27,9	2,5	1,10	2,10	3,10



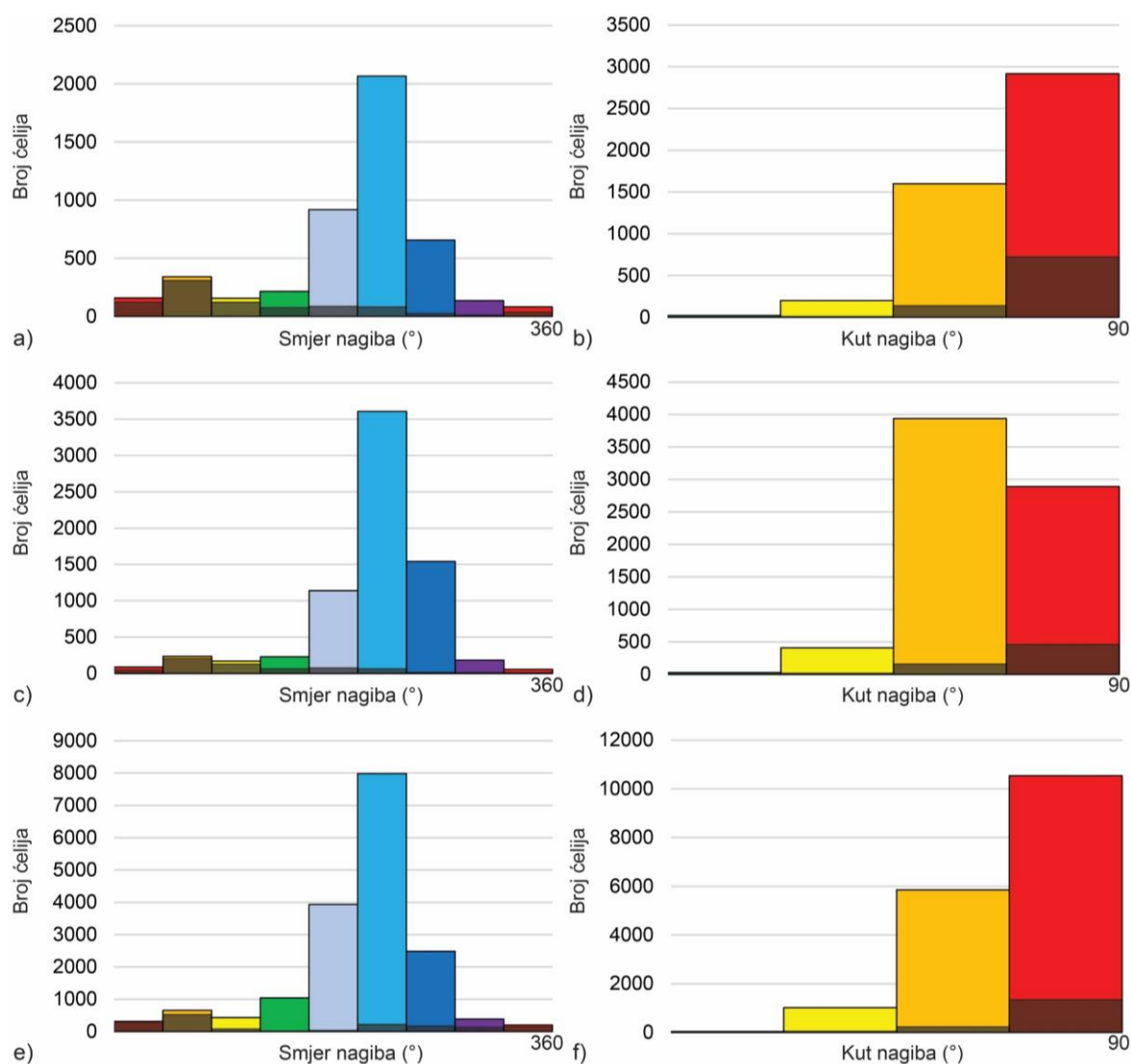
### 5.2.12 Inženjerskogeološke zone Z13, Z14 i Z15

Inženjerskogeološka zona Z13 počinje na stacionaži 0+785, a završava na 0+830 (slika 5.36). Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i dio prirodnih stijenskih kosina na višem hipsometrijskom položaju na kojima dolazi do promjene u stupnju trošnosti stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta te je radi toga ova zona podijeljena u dvije podzone (slika 5.70). Granica s inženjerskogeološkom zonom Z14 je duž subvertikalnog diskontinuiteta koji pripada setu diskontinuiteta S1 nakon kojeg dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Inženjerskogeološka zona Z14 počinje na stacionaži 0+830, a završava na 0+900. Ova zona obuhvaća stijenski zasjek i prirodne stijenske kosine na višem hipsometrijskom položaju na kojima dolazi do promjene stupnju trošnosti stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta te je radi toga ova zona podijeljena u dvije podzone (slika 5.70). Granica ovih dviju zona s inženjerskogeološkom zonom Z15, koju predstavljaju prirodne stijenske kosine (slika 5.48), pruža se duž diskontinuiteta velike postojanosti koji pripada setu diskontinuiteta S0. S obzirom na promjene u vrijednostima razmaka i postojanosti diskontinuiteta po visini, ova zona je također podijeljena u dvije podzone (slika 5.70) pri čemu se razmak i postojanost diskontinuiteta povećava u hipsometrijski višoj zoni Z15B, a granicu između ovih zona predstavlja diskontinuitet velike postojanosti koji pripada setu diskontinuiteta S0.



**Slika 5.70.** Pogled prema SI na inženjerskogeološke zone Z13A, Z13B, Z14A, Z14B i Z15 s ucrtanim granicama zona na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu istraživanih stijenskih kosina.

Ukupna površina inženjerskogeološke zone Z13 je oko 1536 m<sup>2</sup>, od čega se 18,6% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zona Z13A), kao i prirodne stijenske kosine (inženjerskogeološka zona Z13B) generalno padaju prema JZ, a prosječni kut nagiba, u zoni zasjeka, iznosi oko 73°, dok je u slučaju prirodnih kosina oko 64° (slika 5.71a). Visina zasjeka kreće se od 5,6 m na njegovom SZ dijelu do 8,9 m na JI dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z13A izgrađuju srednje trošni konglomerati (W5), dok stijensku masu na području prirodnih stijenskih kosina (inženjerskogeološka zona Z13B) izgrađuju svježje do slabo trošni i slabo trošni konglomerati (W2-W3).



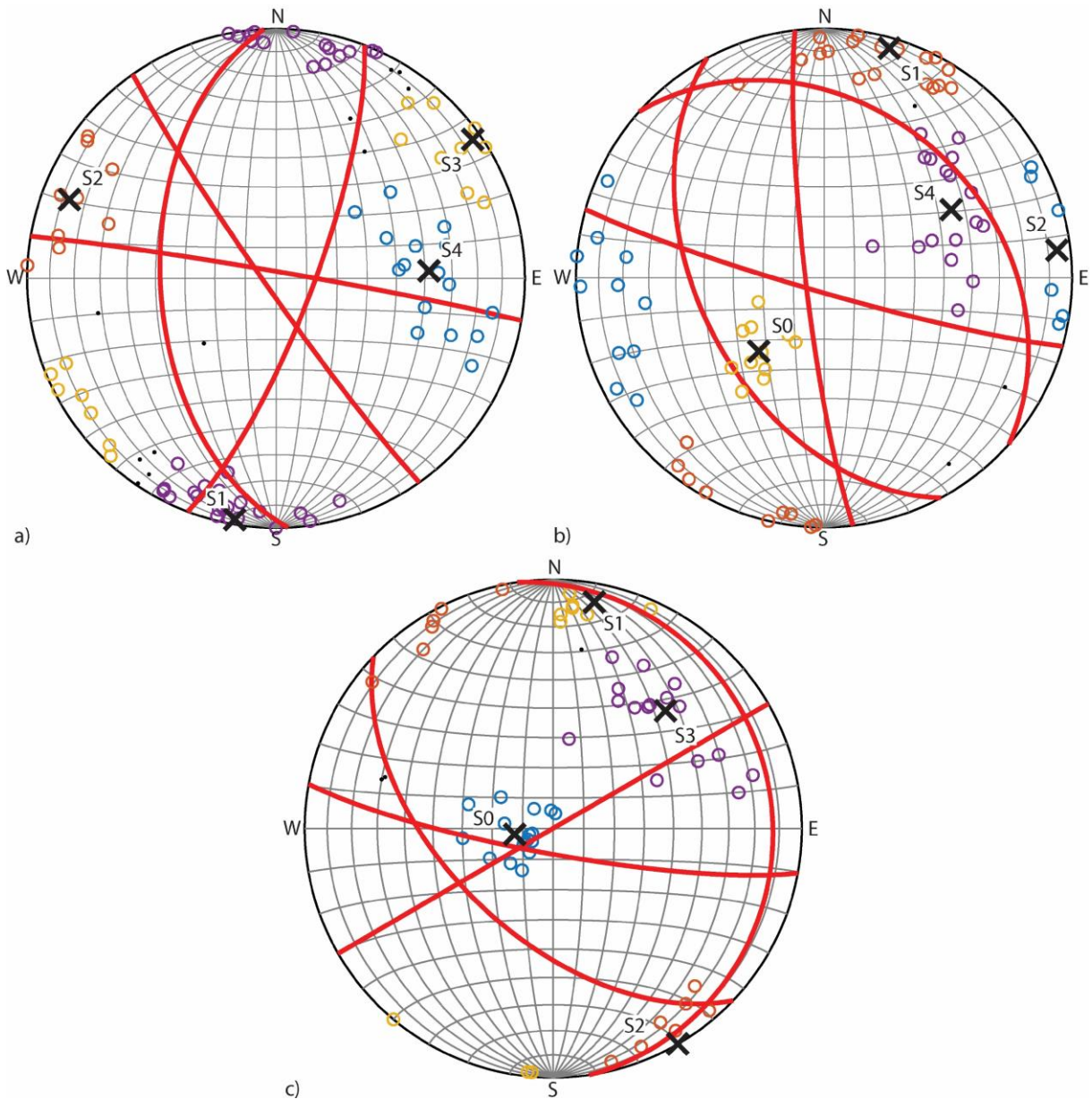
**Slika 5.71.** Prikaz raspodjele: a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z13; c) smjera i d) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z14 i e) smjera i f) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z15 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Alatom *Compass*, u inženjerskogeološkoj zoni Z13, određena je orijentacija 96 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.72a) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.26). Diskontinuiteti mjereni u području prirodnih stijenskih kosina pripadaju istim setovima kao i oni mjereni u području stijenskog zasjeka te su stoga za cijelu ovu zonu prihvaćeni rezultati automatizirane analize grupiranja diskontinuiteta u setove. Iako se prosječna orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja po podzonama, mijenjaju se vrijednosti razmaka i postojanosti.

Ukupna površina inženjerskogeološke zone Z14 je oko 2602 m<sup>2</sup>, od čega se 8,9% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka (inženjerskogeološka zona Z14A) kao i prirodne stijenske kosine (inženjerskogeološka zona Z14B) generalno padaju prema JZ, a prosječni kut nagiba, u zoni zasjeka, iznosi oko 67° dok je u slučaju prirodnih kosina oko 48° (slika 5.71b). Visina zasjeka kreće se od oko 6,3 m na njegovom SZ dijelu do oko 8,3 m na JI dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u zoni Z14A izgrađuju srednje do slabo trošni do intenzivno do srednje trošni konglomerati (W4-W6), dok stijensku masu na području prirodnih stijenskih kosina (inženjerskogeološka zona Z14B) izgrađuju slabo trošni konglomerati (W3). Alatom *Compass*, u inženjerskogeološkoj zoni Z14 određena je orijentacija 75 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.72b) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.26). Diskontinuiteti mjereni u području prirodnih stijenskih kosina pripadaju istim setovima kao i oni mjereni u području stijenskog zasjeka te su stoga za cijelu ovu zonu prihvaćeni rezultati automatizirane analize grupiranja diskontinuiteta u setove. Iako se prosječna orijentacija setova diskontinuiteta ne mijenja po podzonama, mijenjaju se vrijednosti razmaka i postojanosti.

Ukupna površina inženjerskogeološke zone Z15 je oko 6314 m<sup>2</sup>, od čega se 9,4% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine u zoni zasjeka u ovoj zoni generalno padaju prema JZ, a prosječni kut nagiba, u zoni zasjeka, iznosi oko 56° (slika 5.71c). Razlika u visini stijenskih kosina u ovoj zoni kreće se oko 27,9 m na SZ dijelu do oko 35,5 m na JI dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u inženjerskogeološkoj zoni Z15 izgrađuju svježi i slabo trošni do svježi trošni konglomerati (W1-W2). Alatom *Compass*, u inženjerskogeološkoj zoni Z15 određena je orijentacija 81 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.72c) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.26). Iako je prosječna orijentacija setova diskontinuiteta ista u cijeloj zoni, vrijednosti razmaka i postojanosti setova diskontinuiteta se

povećavaju u podzoni Z15B, nakon granice duž slojevitosti, odnosno diskontinuiteta velike postojanosti koji pripada setu S0 (tablica 5.26)



**Slika 5.72.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z13; b) inženjerskogeološku zonu Z14 i c) inženjerskogeološku zonu Z15 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.



**Tablica 5.26.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za zone Z13, Z14 i Z15 koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta,  $i$  konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z13A	S1	10	88	38,2	2,4	0,60	2,27	1,20
	S2	111	78	18,4	8,4	1,50	4,60	1,10
	S3	235	86	41,6	3,4	0,57	1,84	1,35
	S4	267	52	13,9	5,8	0,72	3,10	0,60
Z13B	S1	10	88	38,2	2,4	0,59	2,52	1,35
	S2	111	78	18,4	8,4	1,70	3,60	1,27
	S3	235	86	41,6	3,4	0,65	2,11	1,40
	S4	267	52	13,9	5,8	0,76	3,20	0,95
Z14A	S0	42	32	52,0	3,6	0,62	2,40	2,20
	S1	196	85	24,3	3,4	0,58	1,60	1,10
	S2	263	84	19,3	4,9	1,10	2,50	1,80
	S4	242	49	14,7	5,6	0,57	1,84	1,35
Z14B	S0	42	32	52,0	3,6	0,70	1,36	1,28
	S1	196	85	24,3	3,4	0,76	1,95	1,65
	S2	263	84	19,3	4,9	0,98	1,86	0,96
	S4	242	49	14,7	5,6	0,74	1,65	1,15
Z15A	S0	82	13	50,5	2,9	0,75	1,45	6,70
	S1	190	82	34,5	3,5	0,80	1,25	1,60
	S2	330	90	36,8	3,9	0,78	1,32	1,50
	S3	224	55	19,2	3,9	1,10	2,10	2,20
Z15B	S0	82	13	50,5	2,9	2,20	5,80	6,70
	S1	190	82	34,5	3,5	0,90	1,60	1,80
	S2	330	90	36,8	3,9	0,95	1,85	1,90
	S3	224	55	19,2	3,9	1,10	2,10	3,10

### 5.3. Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak

Na temelju provedenih analiza na visoko-rezolucijskim 3D modelima stijenskih kosina i utvrđenih značajki stijenske mase, geometrijskih značajki diskontinuiteta te orijentacije stijenskih kosina, stijenski zasjek na lokaciji Špičunak, podijeljen je u 4 inženjerskogeološke zone, pri čemu je jedna od njih dodatno podijeljena u dvije podzone (slika 5.73). Kriterij za izdvajanje inženjerskogeoloških zona prikazan je u tablici 5.27. Vizualnim pregledom digitalnih modela utvrđeno je da stijensku masu na području istraživanja izgrađuju slabo do vrlo intenzivno trošni dolomiti (W3-W8). Alatom *Compass* u računalnom programu *CloudCompare* određena je orijentacija 450 diskontinuiteta koji su, ovisno o inženjerskogeološkoj zoni, podijeljeni u tri do pet setova diskontinuiteta na temelju algoritma za spektralno grupiranje, tj. automatiziranom metodom pomoću napisanih skripti i funkcija u programskom jeziku *MATLAB* (slika 5.78). Za svaki set diskontinuiteta određene su srednja i maksimalna vrijednost razmaka te srednja vrijednost postojanosti. Također, vizualnim pregledom modela uočena je i mjestimična pojava sitnozrnaste ispune veće debljine u inženjerskogeološkim zonama Z3 i Z4. Iako ovakvog tip ispune negativni utjecaj na posmičnu čvrstoću stijenski diskontinuiteta ona nije bila predmet istraživanja u ovom radu, budući da daljinskim istraživanjima nije moguće odrediti njene karakteristike s dovoljnom preciznošću. U nastavku su za svaku inženjerskogeološku zonu prikazani rezultati provedenih analiza na visoko-rezolucijskim modelima, odnosno utvrđene značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koji su predstavljali ulazne podatke za automatiziranu kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

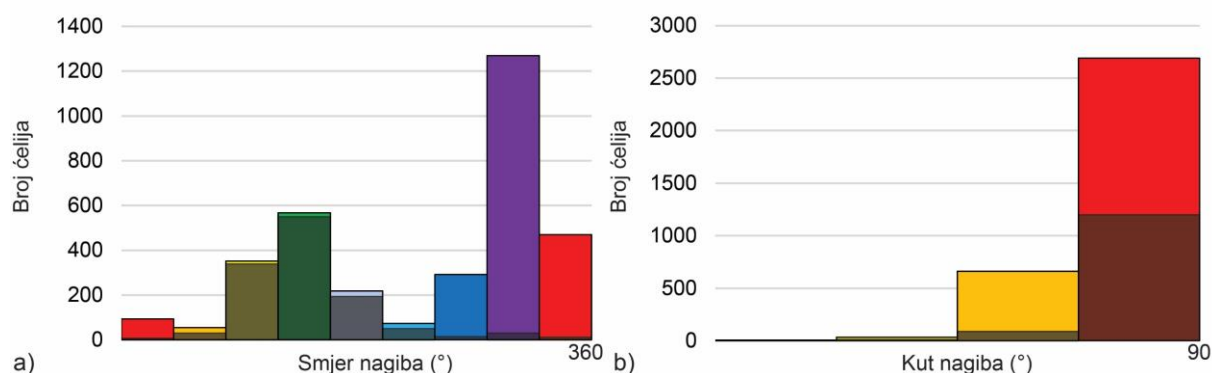
**Tablica 5.27.** Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.

Inženjerskogeološka zona	Podzona	Kriterij izdvajanja
Z1	/	Geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti stijenske mase
Z2	/	Stupanj trošnosti stijenske mase, geometrijske značajke diskontinuiteta
Z3	/	Rasjed, geometrijske značajke diskontinuiteta
Z4	Z4A	Orijentacija stijenskih kosina, stupanj trošnosti stijenske mase, geometrijske značajke diskontinuiteta, rasjed
	Z4B	Torkretirana stijenska masa



**Slika 5.73.** Pogled na stijenski zasjek Špičunak s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2, Z3, Z4A i Z4B

Inženjerskogeološka zona Z1 počinje na stacionaži 0+000, a završava na 0+035. Ukupna površina ove zone je oko 481 m<sup>2</sup>, od čega se 36,1% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine djelomično padaju prema Z i I, a prosječni kut nagiba iznosi oko 72° (slika 5.74). Visina zasjeka kreće se od oko 8,0 m na njegovom SI dijelu do oko 13,8 m na JZ dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u ovoj izgrađuju slabo i slabo do srednje trošni dolomiti (W3-W4). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 85 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u tri seta diskontinuiteta (slika 5.78a) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.28). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.28). Granicu s inženjerskogeološkom zonom Z2 predstavlja 3,0-6,9 m široka zona deluvijalnih naslaga koja se suzuje s povećanjem visine te u kojoj nisu prisutni stijenski izdanci, a nakon koje dolazi do povećanja broja setova diskontinuiteta te promjene njihovih geometrijskih značajki, kao i stupnja trošnosti stijenske mase.

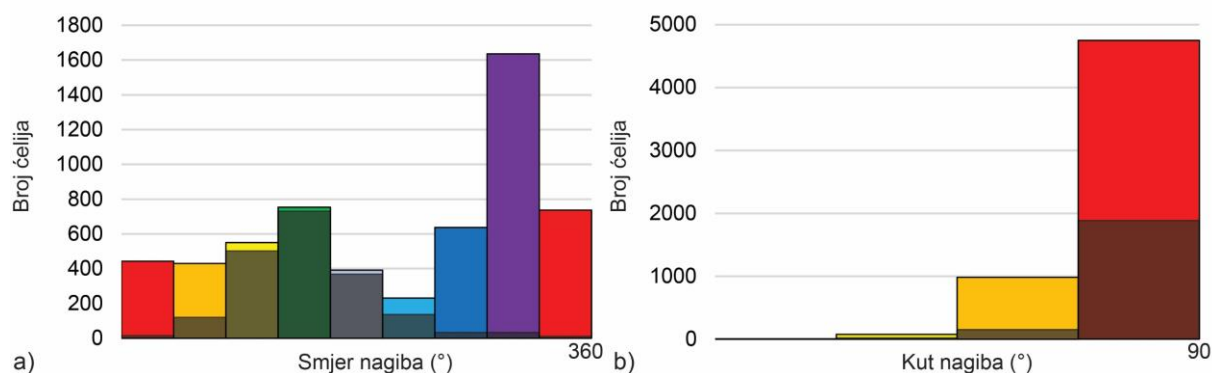


**Slika 5.74.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjele kosina u prevjesu.

Inženjerskogeološka zona Z2 počinje na stacionaži 0+042, a završava na 0+080. Ukupna površina ove zone je oko 552 m<sup>2</sup>, od čega se 33,6% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine djelomično padaju prema II i Z, a prosječni kut nagiba iznosi oko 73° (slika 5.75). Visina zasjeka kreće se od oko 5,5 m na njegovom SI dijelu do oko 16,7 m na JZ dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u ovoj izgrađuju srednje do intenzivno trošni dolomiti (W5-W7). Stupanj trošnost stijenske mase se mijenja ritmički po zonama širine 3,0, 6,1, i 12,1 m širine duž pružanja zasjeka (slika 5.73) s time da granice promjena u stupnju trošnosti predstavljaju diskontinuiteti koji pripadaju setu S1 (slika 5.78b i tablica 5.28). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 100 diskontinuiteta



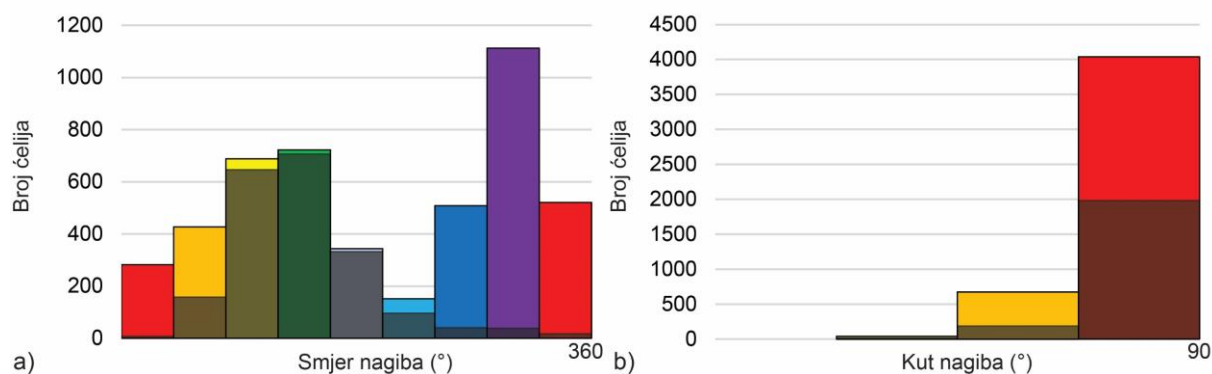
koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.78b) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.28). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.28). Granicu sa inženjerskogeološkom zonom Z3 predstavlja oko 1,5 m široka zona vrlo intenzivno trošnih (W8) dolomita nakon koje dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta.



**Slika 5.75.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

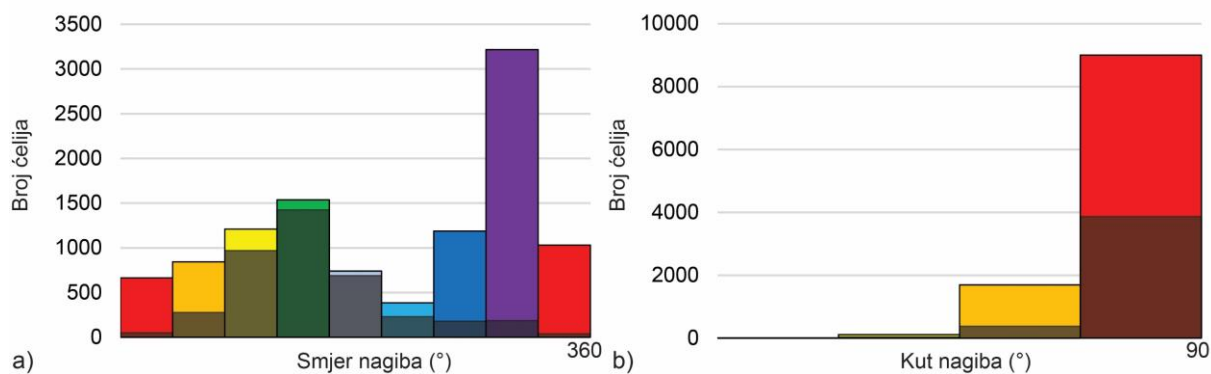
Inženjerskogeološka zona Z3 počinje na stacionaži 0+080, a završava na 0+106. Ukupna površina ove zone je oko 418 m<sup>2</sup>, od čega se 42,8% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine djelomično padaju prema I, JI te Z, a prosječni kut nagiba iznosi oko 74° (slika 5.76). Visina zasjeka kreće se od oko 16,2 m na njegovom SI dijelu do oko 20,1 m na JZ dijelu s time da se u središnjem i JZ dijelu ova zona nalazi iznad inženjerskogeološke zone Z4. Vizualnim pregledom digitalnog modela utvrđeno je da stijensku masu u ovoj izgrađuju srednje do vrlo intenzivno trošni dolomiti (W5-W8), a trošnost se ritmički izmjenjuje duž seta diskontinuiteta S1 (slike 5.73 i 5.78c; tablica 5.28). Alatom *Compass*, u ovoj zoni identificirana je orijentacija 130 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta (slika 5.78c) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.28). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.28). Granicu s inženjerskogeološkom zonom Z4 (slika 5.73) predstavlja pretpostavljeni normalni rasjed, pružanja SZ-JI, s kutom nagiba oko 75° uz koji su vjerojatno vezani diskontinuiteti iz seta diskontinuiteta S3 na istraživanom stijenskom zasjeku. Uz rasjed nalazi se 0,5-1,5 m široka zona zdrobljenog materijala. Prelaskom u inženjerskogeološku zonu Z4

mijenja se odnos orijentacije stijenskog zasjeka, prosječne orijentacija setova diskontinuiteta kao i njihove geometrijske značajke te stupanj trošnosti stijenske mase.



**Slika 5.76.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

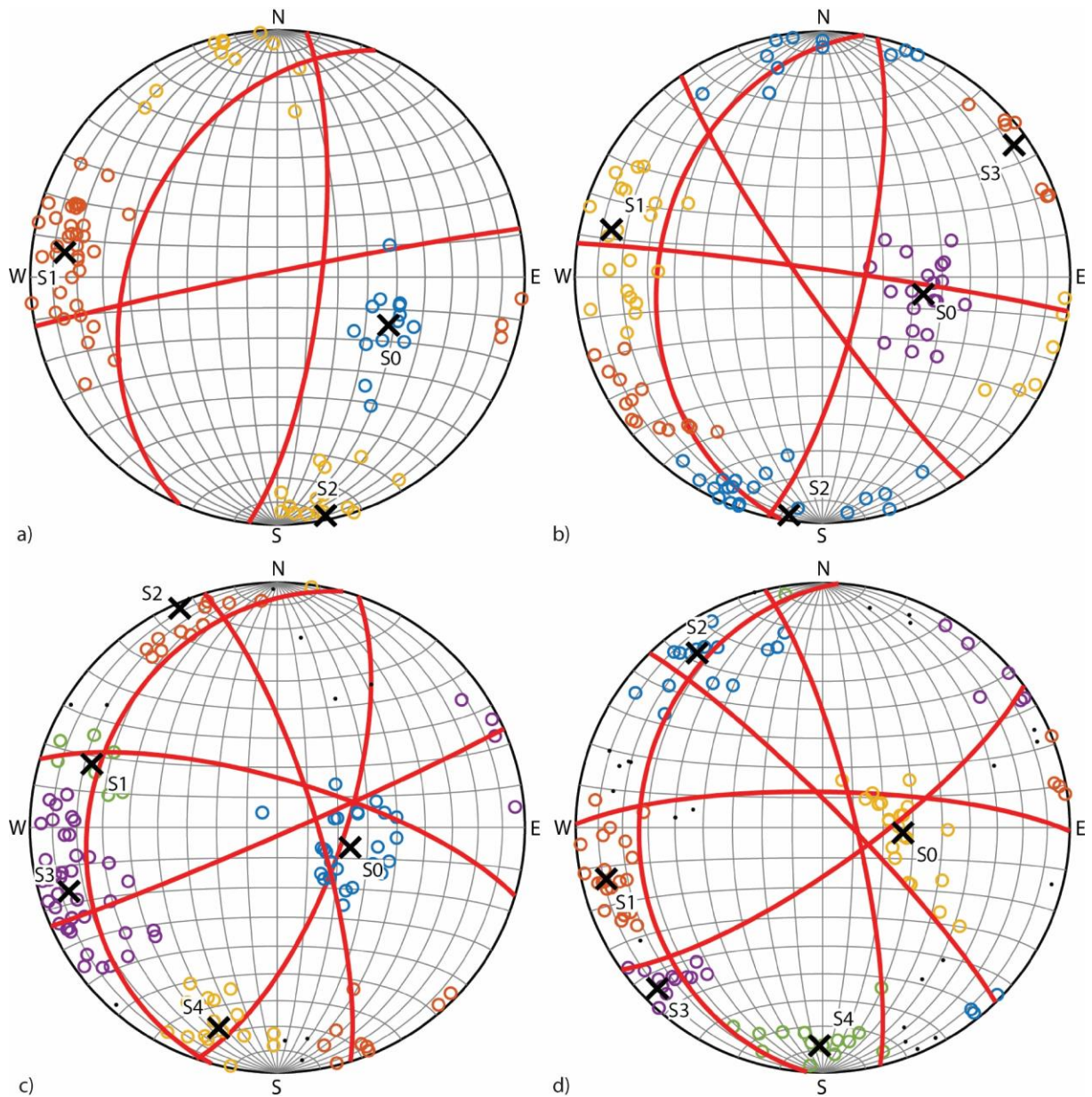
Inženjerskogeološka zona Z4 počinje na stacionaži 0+106, a završava na 0+160. Ukupna površina ove zone je oko 1350 m<sup>2</sup>, od čega se 37,3% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine djelomično padaju prema I, SZ te S, a prosječni kut nagiba iznosi oko 74° (slika 5.77). Visina zasjeka kreće se od oko 11,0 m na njegovom SSI dijelu, oko 23,0 m u središnjem dijelu do oko 7,3 m na JJZ dijelu dijelu. Na SSI dijelu ova zona se nalazi na hipsometrijski nižem položaju od prethodne inženjerskogeološke zone (slika 5.73). Ova inženjerskogeološka zona podijeljena je u dvije podzone (slika 5.73) s obzirom da su dijelovima podzone Z4B torkretirani, a i digitalni model je na tom dijelu slabije kvalitete. Iz tog razloga za tu podzону nije bilo moguće odrediti značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta. Granicu ovih podzona predstavlja diskontinuitet čija je postojanost veća od visine stijenskog zasjeka, a pripada setu diskontinuiteta S4 (slika 5.78d). Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u inženjerskogeološkoj zoni Z4A izgrađuju slabo do vrlo intenzivno trošni dolomiti (W3-W8), a trošnost se ritmički izmjenjuje u smjeru pružanja zasjeka pri čemu se materijal većeg stupnja trošnost nalazi u „džepovima“ koje tvore diskontinuiteti iz setova diskontinuiteta S1 i S3 (slika 5.73 i 5.78d). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 133 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta (slika 5.78d) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.28). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta na temelju mjerenja tragova diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (tablica 5.28).



**Slika 5.77.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

**Tablica 5.28.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za sve inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka Špičunak koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z1	S0	293	40	35,7	3,8	0,3	1,3	1,16
	S1	97	76	27,2	2,7	0,5	1,1	1,6
	S2	349	88	38,6	2,7	0,6	2,1	1,5
Z2	S0	280	34	33,3	3,4	0,3	0,9	0,8
	S1	103	76	21,1	3,8	0,5	0,9	1,9
	S2	8	87	16,9	3,9	0,6	1,2	2,1
	S3	235	84	38,9	3,1	0,9	1,8	1,3
Z3	S0	285	25	30,7	3,2	0,5	1,3	1,5
	S1	109	68	35,2	5,6	0,9	1,7	2,4
	S2	156	87	42,5	3,0	0,5	0,7	2,2
	S3	73	77	23,3	2,7	0,8	1,4	1,9
	S4	16	74	43,4	3,2	0,7	1,8	2,1
Z4	S0	274	27	24,9	3,8	0,5	1,3	1,8
	S1	77	79	52,0	2,3	0,8	1,4	2,6
	S2	145	77	30,6	3,7	0,5	0,8	1,9
	S3	46	83	60,0	2,7	0,7	1,4	2,1
	S4	1	78	32,7	4,0	0,7	1,4	2,4



**Slika 5.78.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1; b) inženjerskogeološku zonu Z2; c) inženjerskogeološku zonu Z3 i d) inženjerskogeološku zonu Z4 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

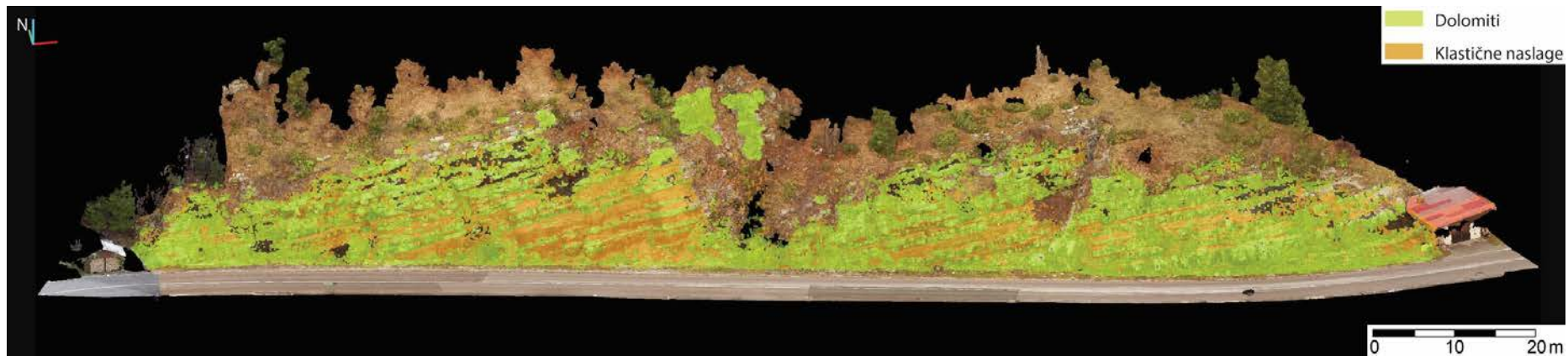


#### 5.4. Pilot područje 4 – stijenski zasjek Lokve

Na temelju provedenih analiza na visoko-rezolucijskim 3D modelima stijenskih kosina i utvrđenih značajki stijenske mase, geometrijskih značajki diskontinuiteta te orijentacije stijenskih kosina, stijenski zasjek u Lokvama podijeljen je u pet inženjerskogeoloških zona. Tri zone su dodatno podijeljene, svaka u dvije podzone s obzirom na rezultate analize intenziteta lasera, odnosno automatiziranog određivanja vrste stijene (slika 5.79 i 5.80). Kriterij za izdvajanje inženjerskogeoloških zona prikazan je u tablici 5.29. Vizualnim pregledom digitalnih modela utvrđeno je da stijensku masu na području istraživanja ritmička izmjena vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9) te slabo do srednje trošnih dolomita (W3-W5). Alatom *Compass* u računalnom programu *CloudCompare* određena je orijentacija 316 diskontinuiteta koji su, ovisno o inženjerskogeološkoj zoni, podijeljeni u četiri ili pet setova diskontinuiteta na temelju algoritma za spektralno grupiranje, tj. automatiziranom metodom pomoću napisanih skripti i funkcija u programskom jeziku *MATLAB* (slika 5.86). Za svaki set diskontinuiteta određene su srednja i maksimalna vrijednost razmaka te srednja vrijednost postojanosti. U nastavku su za svaku inženjerskogeološku zonu prikazani rezultati provedenih analiza na visoko-rezolucijskim modelima, odnosno utvrđene značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta koji su predstavljali ulazne podatke za automatiziranu kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

**Tablica 5.29.** Popis kriterija po kojima su izdvajanje inženjerskogeološke zone i podzone na području pilot stijenskog zasjeka Lokve

Inženjerskogeološka zona	Podzona	Kriterij izdvajanja
Z1	/	Geometrijske značajke diskontinuiteta
Z2	Z2A	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
	Z2B	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti
Z3	Z3A	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, rasjed
	Z3B	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, rasjed
Z4	Z4A	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, rasjed
	Z4B	Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, rasjed
Z5		Vrsta stijene, geometrijske značajke diskontinuiteta, stupanj trošnosti, rasjed

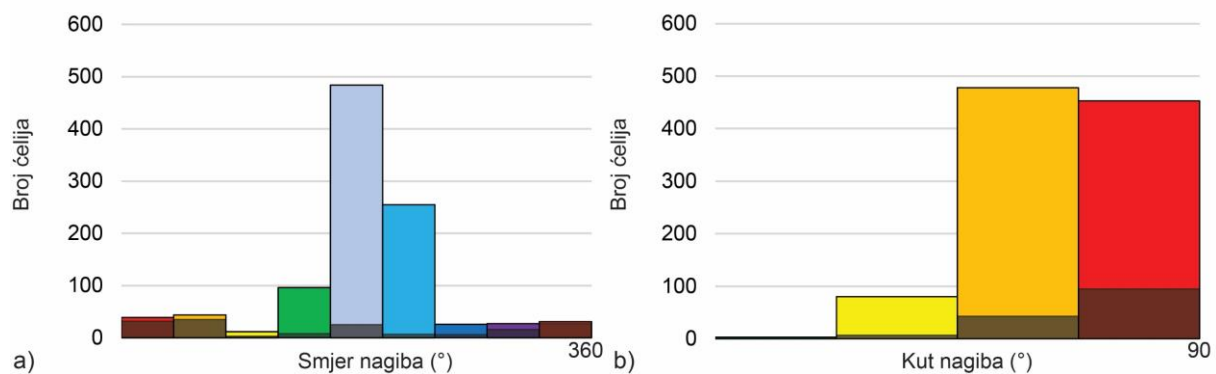


Slika 5.79. Pogled na stijenski zasjek Lokve s prikazom različitih vrsta stijena na digitalnom modelu stijenskog zasjeka.



Slika 5.80. Pogled na stijenski zasjek Lokve s ucrtanim granicama inženjerskogeoloških zona Z1, Z2A, Z2B, Z3A, Z3B, Z4A, Z4B i Z5.

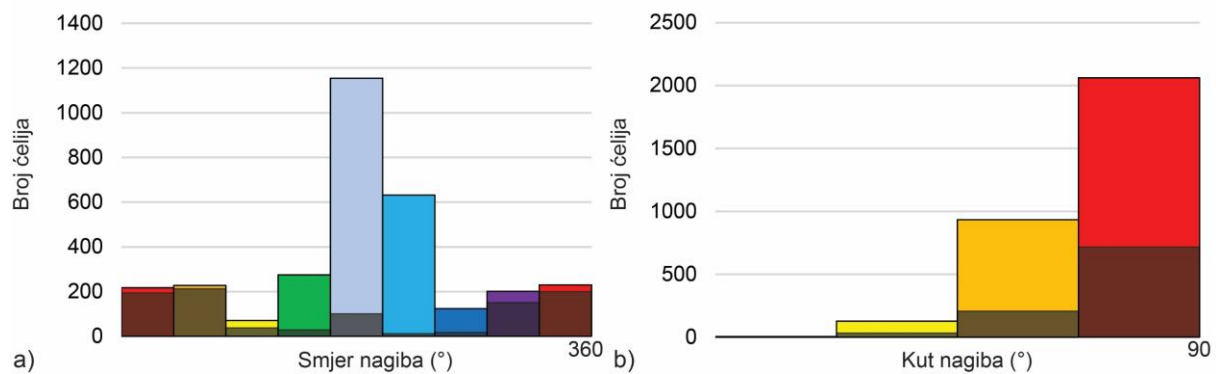
Inženjerskogeološka zona Z1 predstavlja malu zonu na početku stijenskog zasjeka na zapadu, koja počinje na stacionaži 0+000, a završava na 0+013. Ukupna površina ove zone je oko 151 m<sup>2</sup>, od čega se 15,7% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema J, a prosječni kut nagiba iznosi oko 39° (slika 5.81). Visina zasjeka kreće se oko 4,0 m na njegovom Z dijelu do oko 7,5 m na I dijelu. Vizualnim pregledom digitalnog modela, utvrđeno je da stijensku masu u ovoj zoni izgrađuje ritmička izmjena raspadnutih klastičnih naslaga (W9) te srednje trošnih dolomita (W5). Alatom *Compass*, u ovoj zoni identificirana je orijentacija 41 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.86a) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.30). Za svaki set diskontinuiteta određene su prosječna i maksimalna vrijednost razmaka te postojanosti diskontinuiteta (tablica 5.30). Granicu s inženjerskogeološkom zonom Z2 predstavlja oko 2,0 m široka jaruga u kojoj nisu prisutni stijenski izdanci nakon koje dolazi do promjene u geometrijskim značajkama diskontinuiteta i stijenske mase.



**Slika 5.81.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z1 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Inženjerskogeološka zona Z2 počinje na stacionaži 0+013, a završava na 0+040. Ukupna površina ove zone je oko 588 m<sup>2</sup>, od čega se 30,5% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema J i JZ, a prosječni kut nagiba iznosi oko 54° (slika 5.82). Visina zasjeka kreće se od oko 10,4 m na njegovom Z dijelu do oko 12,5 m na I dijelu. S obzirom na rezultate analize intenziteta i klasifikacije dijelova kosina prema vrsti stijena (slika 5.79), ova zona je podijeljena na dvije podzone (slika 5.80). U inženjerskogeološkoj zoni Z2A stijensku masu izgrađuje ritmička izmjena vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9) te srednje trošnih dolomita (W5) dok u inženjerskogeološkoj zoni Z2B stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni dolomit (W3-W5) pri čemu im granicu predstavlja slojevitost velike postojanosti koja pripada setu diskontinuiteta S0 (slika 5.80 i 5.86b). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 82 diskontinuiteta koji su

automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.86b) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.30). Za svaki set diskontinuiteta određene su prosječna i maksimalna vrijednost razmaka te postojanosti diskontinuiteta (tablica 5.30). Utvrđene geometrijske značajke diskontinuiteta vrijede za cijelu zonu bez obzira na promjenu u vrsti stijena. Granicu s inženjerskogeološkom zonom Z3 predstavlja pretpostavljeni normalni rasjed pružanja SZ-JI s vergencijom prema SI pri čemu je utvrđeno da pomak po rasjedu iznosi 1,33m.

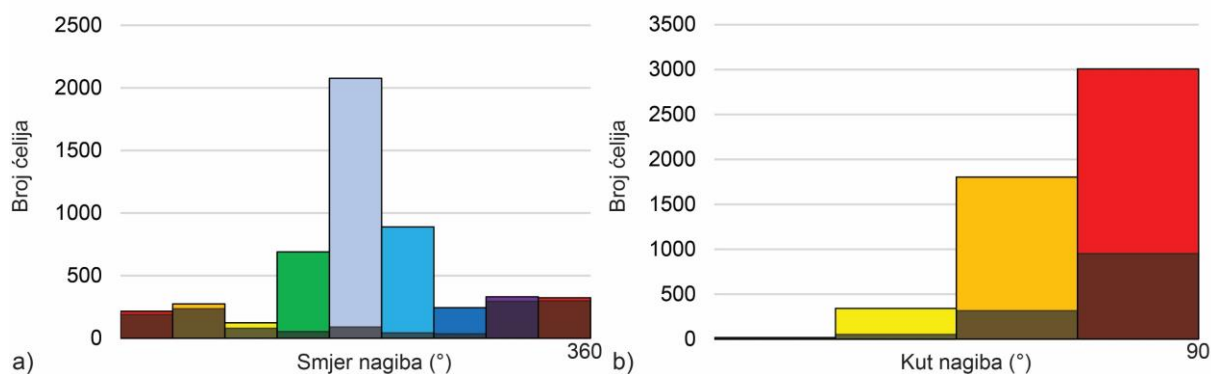


**Slika 5.82.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z2 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Inženjerskogeološka zona Z3 počinje na stacionaži 0+040, a završava na 0+075. Ukupna površina ove zone je oko 969 m<sup>2</sup>, od čega se 25,7% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema J, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 51° (slika 5.83). Visina zasjeka kreće se od oko 13,7 m na njegovom Z dijelu do oko 19,5 m na I dijelu. S obzirom na rezultate analize intenziteta i klasifikacije dijelova kosina prema vrsti stijena (slika 5.79), ova zona je podijeljena na dvije podzone (slika 5.80). U inženjerskogeološkoj zoni Z3A stijensku masu izgrađuje ritmička izmjena vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9) te srednje trošnih dolomita (W5). U inženjerskogeološkoj zoni Z3B stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni dolomit (W3-W5) pri čemu im granicu predstavlja slojevitost velike postojanosti koja pripada setu diskontinuiteta S0 (slika 5.86c). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 87 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u četiri seta diskontinuiteta (slika 5.86c) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.30). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (tablica 5.30). Utvrđene geometrijske značajke diskontinuiteta vrijede za cijelu zonu bez obzira na promjenu u vrsti stijena. Granicu s inženjerskogeološkom zonom Z3 predstavlja

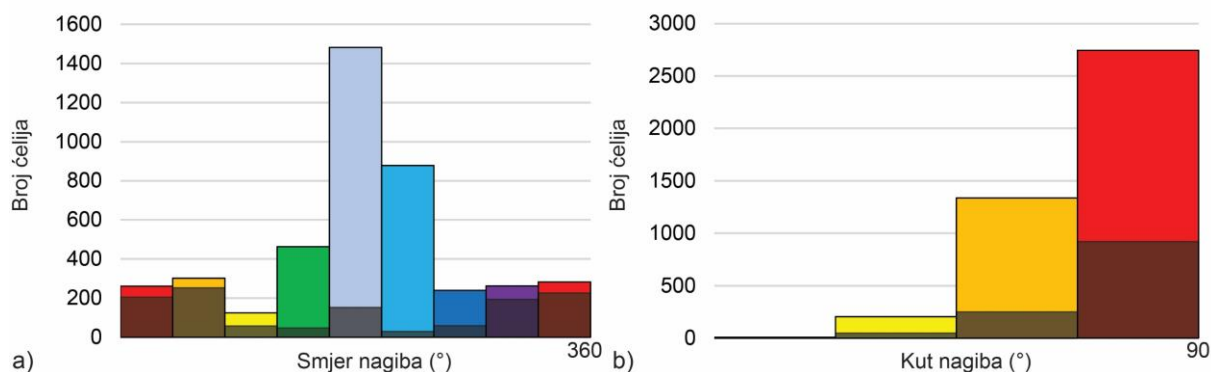


jaruga koja je nastala duž pretpostavljenog normalnog rasjeda pružanja SZ-JI s vergencijom prema SI, pri čemu je utvrđeno da pomak po rasjedu iznosi oko 17 m.



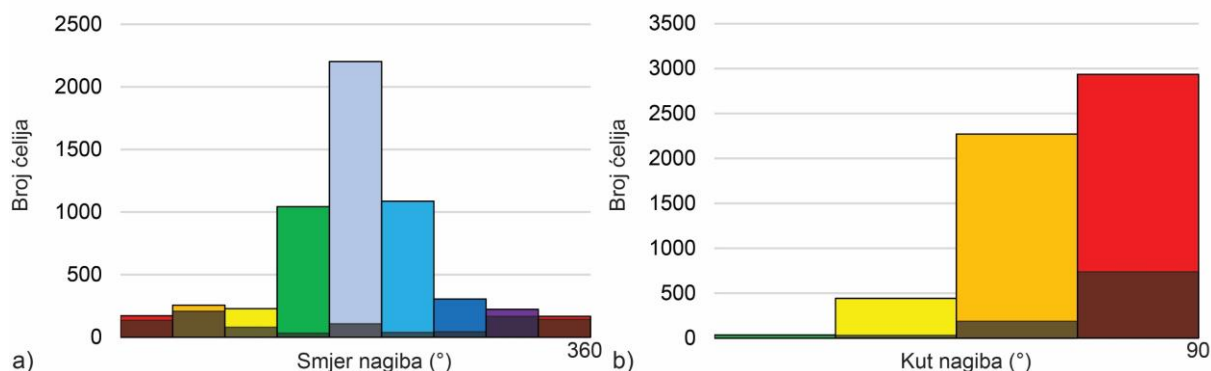
**Slika 5.83.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z3 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Inženjerskogeološka zona Z4 počinje na stacionaži 0+075, a završava na 0+112. Ukupna površina ove zone je oko 852 m<sup>2</sup>, od čega se 28,5% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema J, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 51° (slika 5.84). Visina zasjeka kreće se od oko 12,2 m na njegovom Z dijelu do oko 15,9 m na I dijelu. S obzirom na rezultate analize intenziteta i klasifikacije dijelova kosina s obzirom na vrstu stijena (slika 5.79), ova zona je podijeljena na dvije podzone (slika 5.80). U inženjerskogeološkoj zoni Z4A stijensku masu izgrađuje ritmička izmjena vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9) te srednje i srednje do intenzivno trošnih dolomita (W5-W6). U inženjerskogeološkoj zoni Z4B stijensku masu izgrađuju slabo do srednje trošni dolomit (W3-W5) pri čemu granicu sa zonom Z4A predstavlja slojevitost velike postojanosti koja pripada setu diskontinuiteta S0 (slika 5.80 i 5.86d). Alatom *Compass*, u ovoj zoni određena je orijentacija 84 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta (slika 5.85d) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.30). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (tablica 5.30). Utvrđene geometrijske značajke diskontinuiteta vrijede za cijelu zonu bez obzira na promjenu u vrsti stijena. Granicu sa inženjerskogeološkom zonom Z5 predstavlja jaruga pružanja SI-JZ koja je nastala duž pretpostavljenog normalnog rasjeda

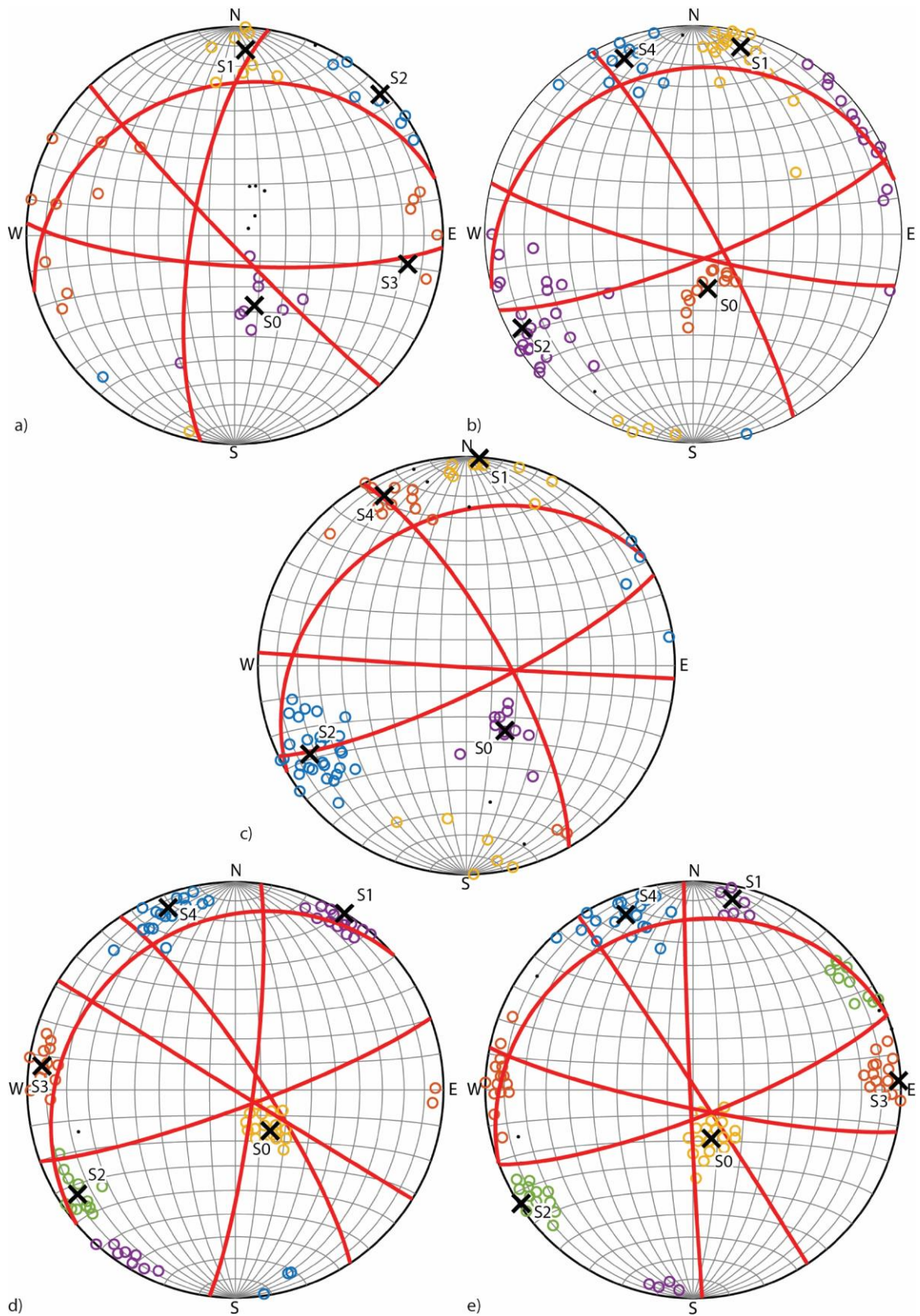


**Slika 5.84.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z4 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.

Inženjerskogeološka zona Z5 počinje na stacionaži 0+112, a završava na 0+160. Ukupna površina ove zone je oko 949 m<sup>2</sup>, od čega se 16,9% površine nalazi u prevjesu. Stijenske kosine generalno padaju prema J, a prosječni kut nagiba im iznosi oko 41° (slika 5.85). Visina zasjeka kreće se od oko 15,9 m na njegovom Z dijelu do oko 6,1 m na I dijelu. Stijensku masu u ovoj zoni izgrađuje ritmička izmjena vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9) te srednje i srednje do intenzivno trošnih dolomita (W5-W6). Alatom *Compass*, u ovoj zoni identificirana je orijentacija 86 diskontinuiteta koji su automatiziranom analizom grupirani u pet setova diskontinuiteta (slika 5.85e) te su im izračunati parametri *Fisherove* statistike (tablica 5.30). Za svaki set diskontinuiteta izračunate su vrijednosti prosječnog i maksimalnog razmaka na temelju statističkih analiza normalnih razmaka te prosječna vrijednost postojanosti (tablica 5.30).



**Slika 5.85.** Prikaz raspodjele a) smjera i b) kuta nagiba ćelija visoko-rezolucijskog digitalnog modela istraživanih stijenskih kosina za inženjerskogeološku zonu Z5 pri čemu su tamnijom bojom označeni udjeli kosina u prevjesu.



**Slika 5.86.** Prikaz polova diskontinuiteta i utvrđenih setova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji za: a) inženjerskogeološku zonu Z1, b) inženjerskogeološku zonu Z2, c) inženjerskogeološku zonu Z3, d) inženjerskogeološku zonu Z4 i e) inženjerskogeološku zonu Z5 dobivenih automatiziranom analizom spektralnog grupiranja.

**Tablica 5.30.** Prikaz podataka o setovima diskontinuiteta za sve inženjerskogeološke zone na stijenskom zasjeku Lokve koji uključuju prosječne vrijednosti orijentacije setova diskontinuiteta, parametre *Fisherove* statistike (Fisherova konstanta i konus pouzdanosti pri 68%), srednje i maksimalne vrijednosti razmaka te srednje vrijednosti postojanosti.

IG zona	Orijentacija seta diskontinuiteta i <i>Fisherova</i> statistika					Razmak		Postojanost
	Set	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\kappa$	$\Theta_{68}$ (°)	$\bar{r}$	$r_{\max}$	$\bar{p}$
Z1	S0	344	29	18,7	6,8	0,4	0,8	1,6
	S1	183	78	37,5	4,8	0,5	1,0	0,6
	S2	226	87	39,9	4,9	1,2	2,7	0,6
	S3	279	73	1,5	33,6	0,5	1,0	0,7
Z2	S0	345	22	61,9	3,2	0,5	0,8	9,9
	S1	194	82	27,6	3,7	0,5	0,9	1,3
	S2	61	83	18,9	3,4	1,6	2,9	0,8
	S4	159	80	35,1	4,3	0,5	1,0	0,7
Z3	S0	329	30	48,5	3,8	0,5	1,1	9,1
	S1	184	89	29,0	4,2	0,5	1,0	1,2
	S2	61	75	36,9	2,5	1,4	3,2	0,6
	S4	154	80	48,6	3,5	0,5	0,9	1,1
Z4	S0	320	21	345,2	1,9	0,4	0,8	7,9
	S1	212	90	61,7	4,5	0,4	1,5	0,9
	S2	56	80	92,4	2,6	1,3	2,8	0,4
	S3	97	83	36,3	8,4	0,4	1,0	0,5
	S4	160	83	66,5	2,5	0,4	0,8	0,8
Z5	S0	339	20	68,0	3,3	0,4	1,4	6,9
	S1	192	83	92,7	5,2	0,4	1,5	0,7
	S2	57	89	99,6	2,5	0,9	2,2	0,4
	S3	267	89	44,8	4,1	0,4	1,0	0,5
	S4	159	79	47,0	2,8	0,4	0,8	0,8



## 6. REZULTATI AUTOMATIZIRANIH ANALIZA I MODELI PODLOŽNOSTI STIJENSKIH KOSINA ODRONIMA

Na temelju ulaznih podataka, prikazanih u prethodnom poglavlju, provedena je automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima algoritmom *ROCKS* napisanim u programskom jeziku *MATLAB* (poglavlje 4.7). Ulazni podaci grupirani su u tri tablice za svaku utvrđenu inženjerskogeološku zonu: 1) tablica koja sadrži podatke o vrijednostima orijentacija ploha digitalnog modela, vrijednostima  $z$  komponente vektora normale plohe, stupnju trošnosti stijenske mase, vrijednostima bazičnog kuta trenja i površine svih ćelija digitalnog modela stijenskih kosina; 2) tablica koja sadrži podatke o broju i orijentaciji setova diskontinuiteta te pripadajućim srednjim i maksimalnim vrijednostima razmaka i postojanosti diskontinuiteta te 3) tablica koja sadrži sve orijentacije diskontinuiteta koje pripadaju setovima diskontinuiteta kao i orijentacije pojedinačnih diskontinuiteta. Rezultati su indeksi podložnosti za svaku vrstu sloma kao i vrijednosti konačnog indeksa podložnosti odronima (*IPO*), koji su ispisani u prvoj od navedenih tablica, u rasponu od 0-100%, vežući se za plohe digitalnog modela za koje su provedene analize. Rezultati indeksa podložnosti uvezeni su u računalni program *CloudCompare*, a njihove vrijednosti interpolirane su u svrhu izrade modela podložnosti stijenskih kosina odronima. Interpolacijom su izrađeni modeli podložnosti za svaku vrstu sloma stijenske mase te modeli podložnosti stijenskih kosina odronima svih područja istraživanja. U nastavku su opisani dobiveni rezultati koji su uspoređivani sa značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta te su prikazani modeli podložnosti za svaku vrstu sloma. Modeli podložnosti stijenskih kosina odronima, na kojima je podložnost iskazana pomoću indeksa podložnosti odronima, prikazani su za svako područje istraživanja na prilogima 1-4.

## 6.1. Pilot područje 1 – stijenske kosine iznad grada Omiša

Na području stijenskih kosina iznad grada Omiša, za svaku inženjerskogeološku zonu provedena je automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju prikupljenih podataka o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Izračunate su vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te za slom prevrtanjem, kao i indeks podložnosti odronima za svaku ćeliju digitalnog modela stijenskih kosina. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za inženjerskogeološke zone te njihova usporedba sa stupnjem trošnosti stijenske mase, brojem setova diskontinuiteta i udjelom kosina u prevjesu prikazani su u tablici 6.1, na slikama 6.1-6.4 te u prilogu 1/1 i 1/2.

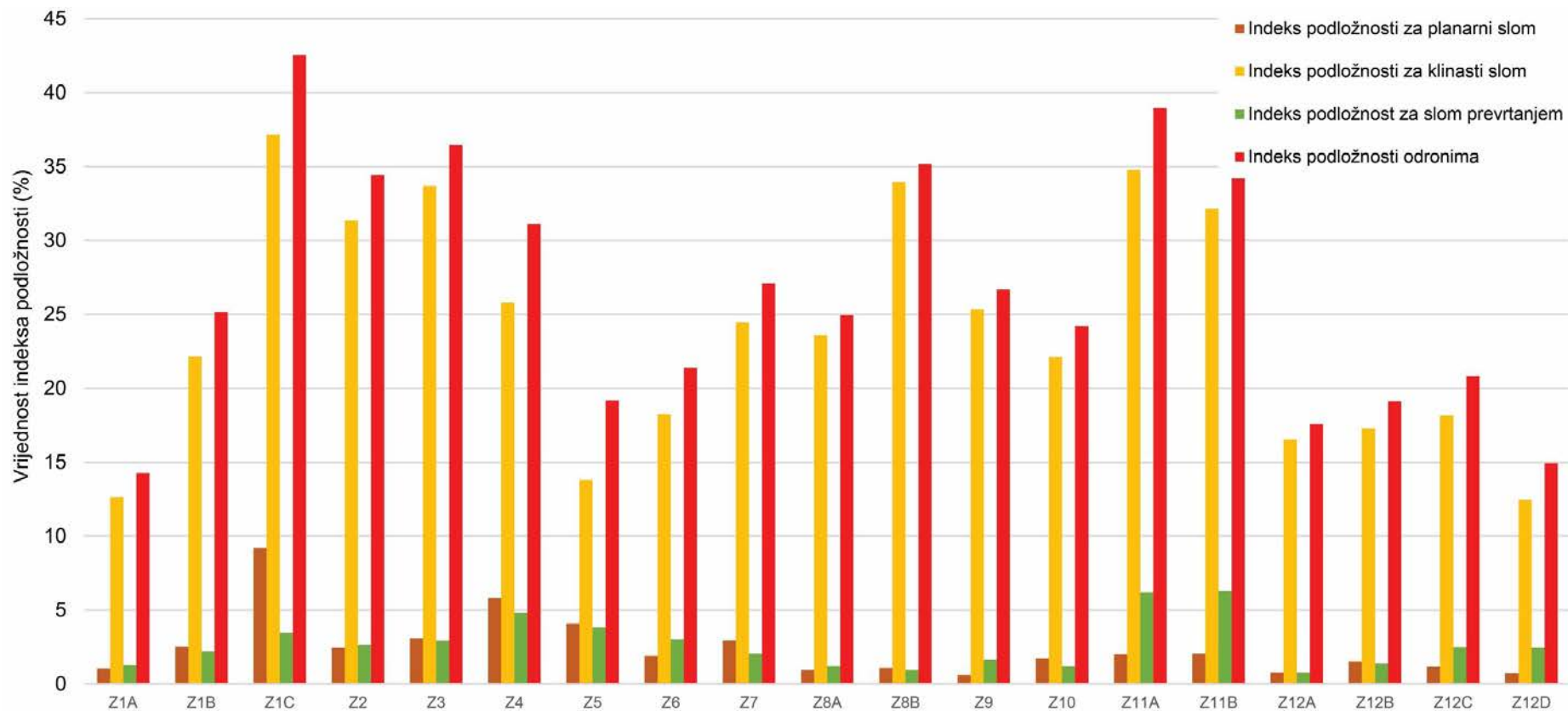
Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama su u rasponu od 14,3-42,5%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama Z1C (42,5%), Z11A (39,0%) i Z11B (36,5%) (slika 6.1, tablica 6.1), a u kojima je utvrđeni najveći stupanj trošnosti stijenske mase (W3-W6) i relativno visoki udjeli stijenskih kosina u prevjesu (18,6-34,1%). U ovim zonama ukupnoj podložnosti najviše pridonose podložnosti na klinasti slom (32,1-37,1%) (slika 6.1), dok podložnosti na planarni slom i slom prevrtanjem pridonose podjednako (2,0-9,2%) (tablica 6.1). Najmanja prosječna vrijednost podložnost stijenskih kosina odronima je u inženjerskogeološkoj zoni Z1A, pri čemu *IPO* iznosi 14,3%, na što najviše utječe podložnost na klinasti slom od 12,6% (tablica 6.1). U ovoj zoni utvrđen je niski stupanj trošnosti stijenske mase te drugi najmanji postotak stijenskih kosina u prevjesu od 14,5% (tablica 6.1).

Prema rezultatima automatizirane procjene podložnosti, prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama općenito su proporcionalne utvrđenom rasponu stupnja trošnosti stijenske mase u tim zonama (slika 6.2) te se može zaključiti da će vrijednosti indeksa podložnosti biti veće u zonama gdje stijenska masa ima viši stupanj trošnosti. Iz slike 6.3 vidljivo je da u nekim zonama porast broja utvrđenih setova diskontinuiteta prati i porast vrijednosti  $\overline{IPO}$ -a, ali nije jednoznačno potvrđeno da će s porastom broja setova diskontinuiteta rasti i podložnost stijenskih kosina i obratno. Iz odnosa prosječnih vrijednosti *IPO*-a i udjela stijenskih kosina u prevjesu može se zaključiti da  $\overline{IPO}$  također proporcionalno raste kao i u slučaju trošnosti (slika 6.4). Izuzetak predstavlja inženjerskogeološka zona Z8B u kojoj se, u odnosu na okolne zone, smanjuje udio stijenskih kosina u prevjesu s porastom prosječne vrijednosti podložnosti. Veće vrijednosti podložnosti vjerojatno su posljedica visokog stupnja trošnosti stijenske mase i većeg broja utvrđenih setova diskontinuiteta

(tablica 6.1 i slike 6.2-6.4). Bez obzira na navedene izuzetke, može se zaključiti da na stijenskim kosinama iznad grada Omiša podložnost stijenskih kosina odronima raste s povećanjem udjela stijenskih kosina u prevjesu.

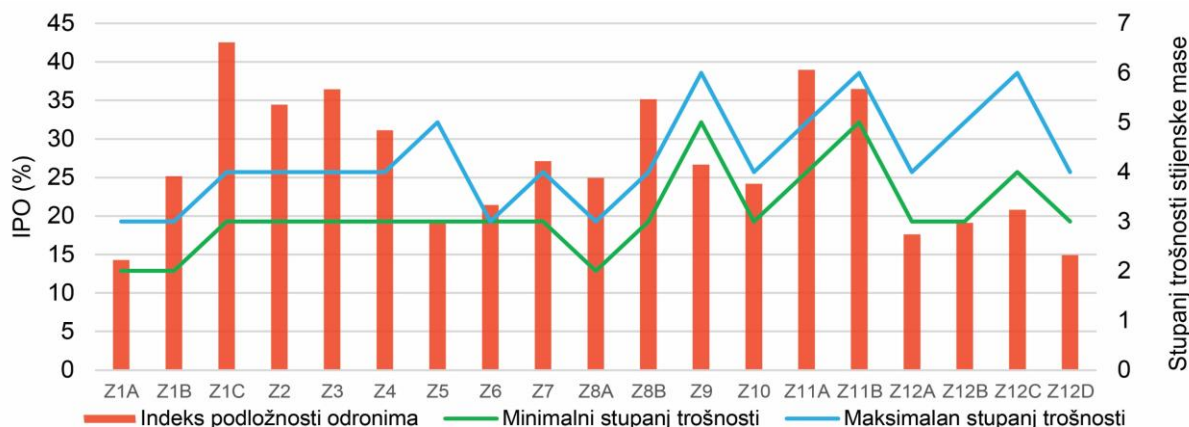
**Tablica 6.1.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$ ,  $\overline{IP_{PR}}$ ), indeksa podložnosti odronima ( $\overline{IPO}$ ), raspon stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te udio stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu.

Inženjerskogeološka zona	$\overline{IP_{PL}}$ (%)	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IP_{PR}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	Stupanj trošnosti stijenske mase	Broj setova diskontinuiteta	Prevjes (%)
Z1A	1,1	12,6	1,3	14,3	W2-W3	4	14,5
Z1B	2,5	22,2	2,2	25,2	W2-W3	4	19,9
Z1C	9,2	37,1	3,5	42,5	W3-W4	4	34,1
Z2	2,4	31,3	2,6	34,4	W3-W4	4	41,1
Z3	3,1	33,7	2,9	36,4	W3-W4	5	35,9
Z4	5,8	25,8	4,8	31,1	W3-W4	5	24,2
Z5	4,1	13,8	3,8	19,2	W3-W5	5	18,1
Z6	1,9	18,2	3,0	21,4	W3-W3	3	24,5
Z7	2,9	24,5	2,0	27,1	W3-W4	3	16,2
Z8A	1,0	23,6	1,2	24,9	W2-W3	4	16,4
Z8B	1,1	33,9	1,0	35,2	W3-W4	4	10,9
Z9	0,6	25,3	1,6	26,7	W5-W6	4	28,8
Z10	1,7	22,1	1,2	24,2	W3-W4	4	17,3
Z11A	2,0	34,8	6,2	39,0	W4-W5	5	18,6
Z11B	2,0	32,1	6,3	36,5	W5-W6	5	19,6
Z12A	0,8	16,5	0,8	17,6	W3-W4	4	16,0
Z12B	1,5	17,3	1,4	19,1	W3-W5	4	18,4
Z12C	1,2	18,2	2,5	20,8	W4-W6	4	19,6
Z12D	0,7	12,5	2,4	14,9	W3-W4	3	15,9

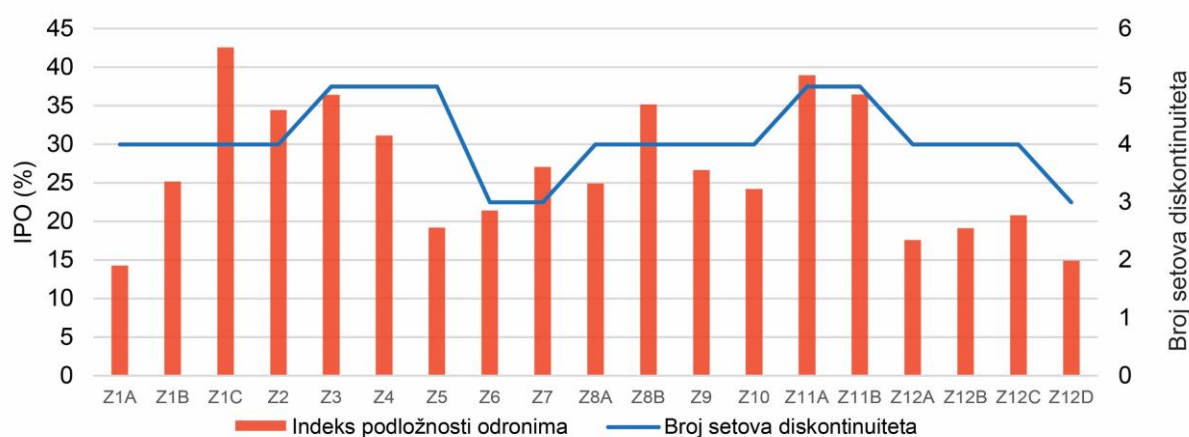


**Slika 6.1.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za svih 19 inženjerskogeoloških zona na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša.

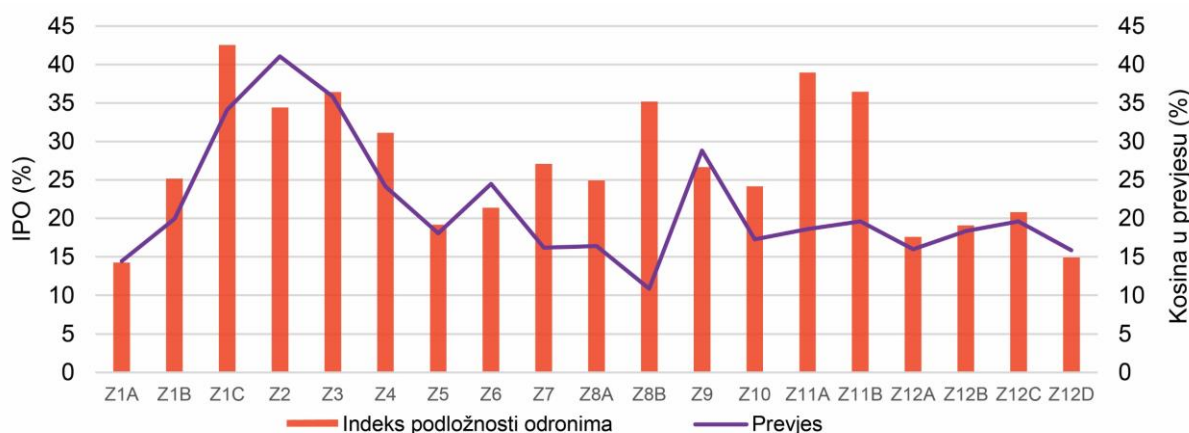




**Slika 6.2.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i stupnja trošnosti stijenske mase po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša.



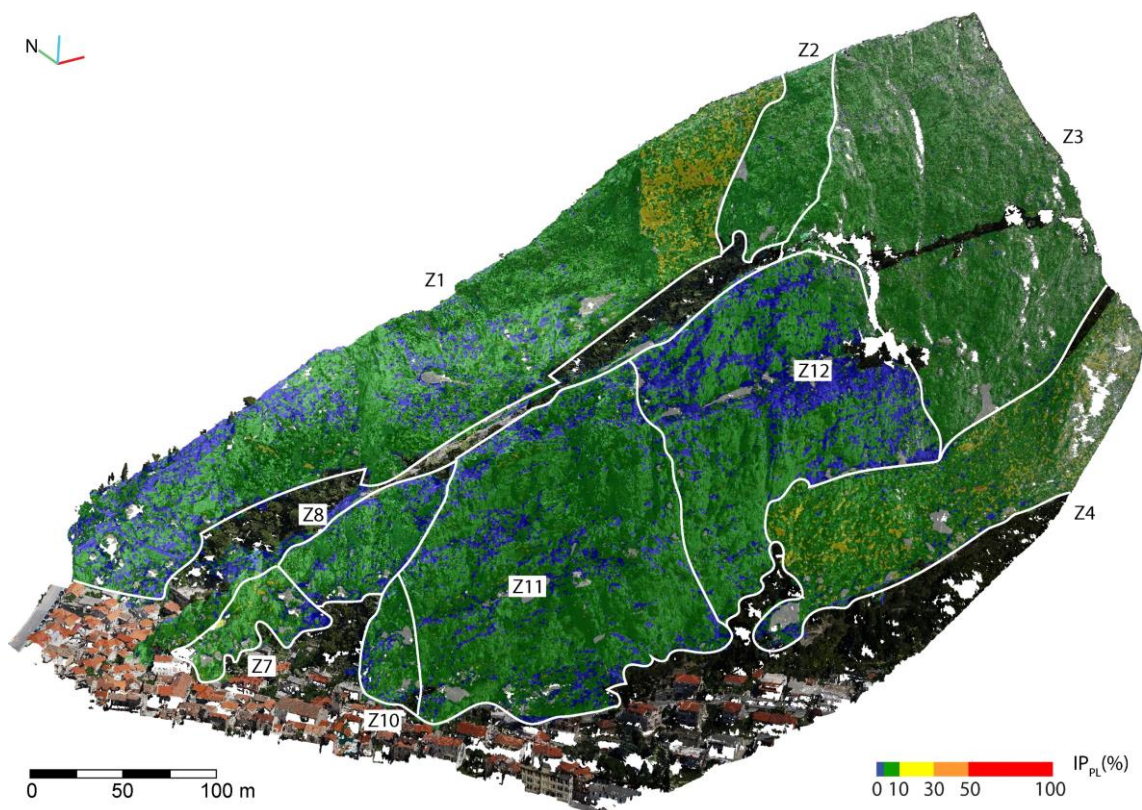
**Slika 6.3.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i broja identificiranih setova diskontinuiteta po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša.



**Slika 6.4.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i udjela stijenskih kosina u prevjesu po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša.

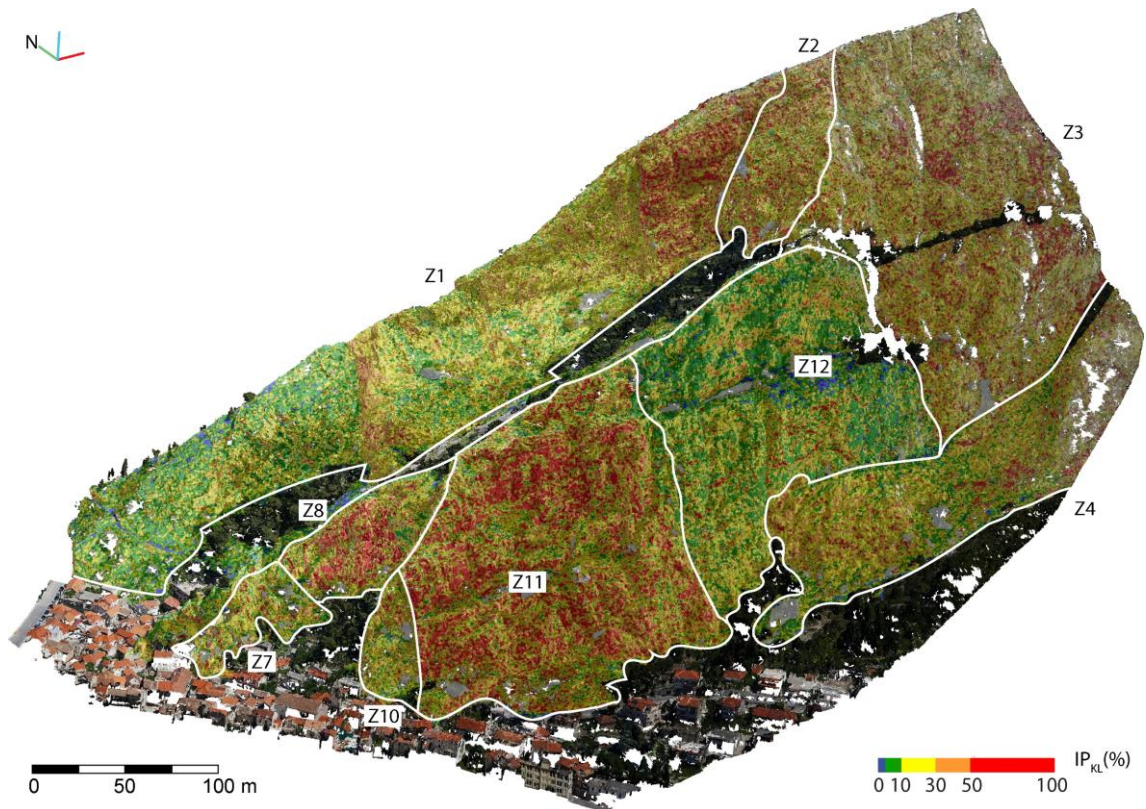
Tablični podaci s pojedinačnim vrijednostima indeksa podločnosti za sve vrste sloma te vrijednostima ukupnog indeksa podločnosti odronima uvezene su u *CloudCompare* u kojemu su dodijeljene ćelijama visoko-rezolucijskog modela površine istraživanih stijenskih kosina te su interpolirane metodom najbližih susjeda. Interpolacijom vrijednosti indeksa podločnosti dobiveni su modeli podločnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te model podločnosti stijenskih kosina odronima (slike 6.5-6.10, prilozi 1/1 i 1/2). Modeli podločnosti obojani su u pet različitih boja na način da toplije boje označavaju veću podločnost stijenskih kosina određenoj vrsti sloma odnosno odronima, dok plava boja označava područja na kojima nije vjerojatan nastanak niti jedne vrste sloma, odnosno podločnost stijenskih kosina odronima je jednaka nuli (slike 6.5-6.10, prilozi 1/1 i 1/2).

Modeli podločnosti za pojedine vrste sloma stijenske mase ukazuju na povećanu podločnost stijenskih kosina klinastom slomu (slike 6.6 i 6.9), posebno u I dijelu inženjerskogeološke zone Z1 te u zonama Z8 i Z11 (slike 6.6 i 6.9) u kojima su vrijednosti  $IP_{KL}$  i do 99%. Vrijednosti  $IPO$ -a ukazuju da su stijenske kosine iznad grada Omiša podjednako podložne planarnom i slomu prevrtanjem (slike 6.5, 6.7, 6.8, 6.10).

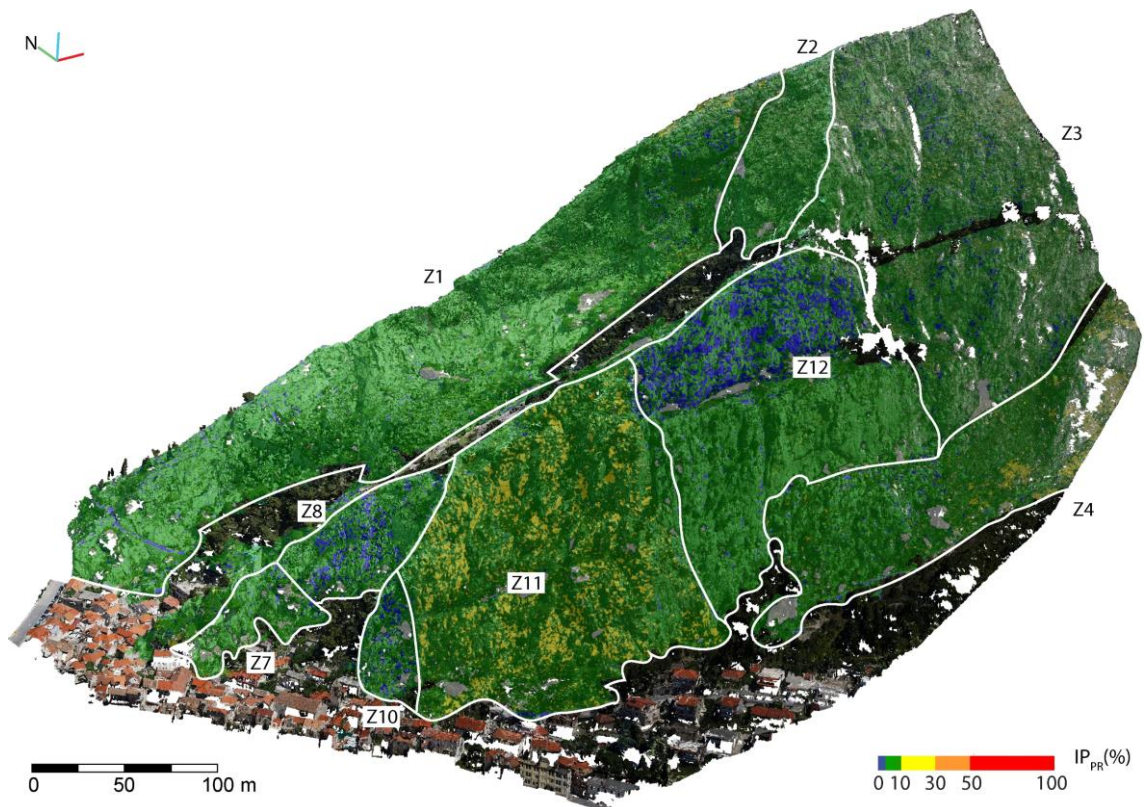


**Slika 6.5.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podločnosti za planarni slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4, Z7, Z8 i Z10-Z12.





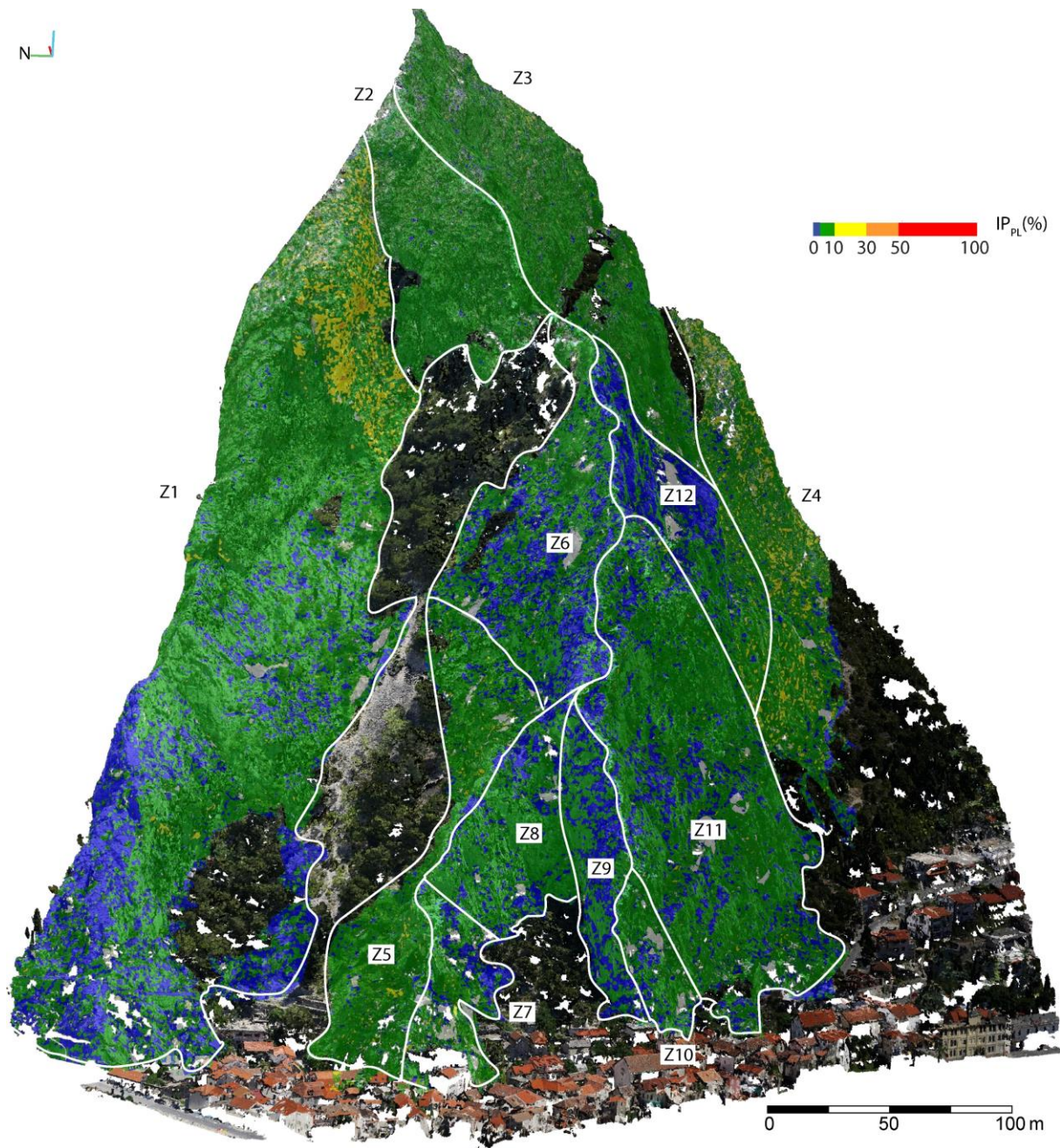
**Slika 6.6.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za klinasti slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4, Z7, Z8 i Z10-Z12.



**Slika 6.7.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za slom prevrtanjem na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z4, Z7, Z8 i Z10-Z12.

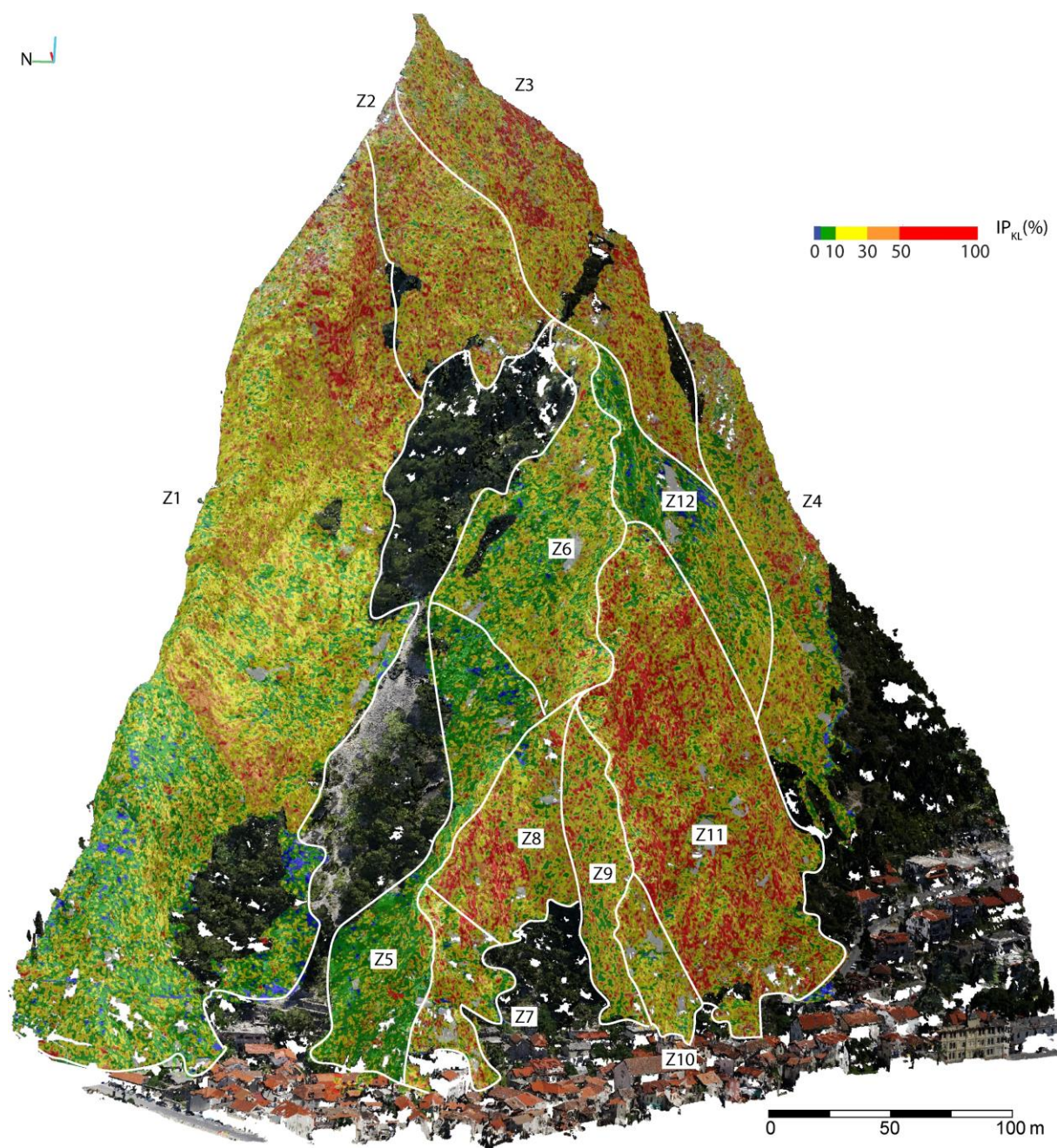
Podložnost stijenskih kosina planarnom slomu izraženija je u inženjerskogeološkim zonama Z1C i Z4 (slika 6.5 i 6.8), u kojima je veći stupanj podložnosti u odnosu na ostale zone na istraživanom području, a vrijednosti  $IP_{PL}$ -a su i do 51,2%. Najveća podložnost stijenskih kosina slomu prevrtanjem je u inženjerskogeološkim zonama Z4 i Z11 (slike 6.7 i 6.10) pri čemu vrijednosti  $IP_{PR}$ -a sežu do 53,2%. Iz modela podložnosti ovisno o vrsti sloma (slike 6.5-6.10) jasno se ističu inženjerskogeološke zone Z1, Z3, Z4, Z8 i Z11 u kojima su zabilježene visoke vrijednosti indeksa podložnosti određenim vrstama slomova. Posebno se ističe inženjerskogeološka zona Z11 s najvišim vrijednostima podložnosti klinastom slomu i slomu prevrtanjem, odnosno  $IP_{KL}$ -a iznosi do 99%, a  $IP_{PR}$ -a do 38,5%. U toj zoni utvrđen je i visok stupanj trošnosti stijenske mase, veliki broj setova diskontinuiteta (pet) te visok udio stijenskih kosina u prevjesu, oko 20% (tablica 6.1 i slike 6.2-6.4). Ova činjenica potvrđena je i na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima na kojem se inženjerskogeološke zone Z1C i Z11 jasno ističu najtoplijim bojama koje odražavaju najviše vrijednosti  $IPO$ -a (prilozi 1/1 i 1/2) dobivene unijom vjerojatnosti podložnosti na planarni i klinasti slom te slomu prevrtanjem. U tim zonama je najveća i prosječna vrijednost  $IPO$ -a (tablica 6.1), a rasponi vrijednosti  $IPO$ -a su od 0-100%. Osim navedenih zona, s obzirom na visoki stupanj podložnosti stijenskih kosina odronima ističu se i inženjerskogeološke zone Z3, Z4 i Z8. Ove bi zone, zajedno sa zonom Z11, trebale predstavljati prioritetne zone za provedbu mjera ublažavanja hazarda od odrona i mjera sanacije jer stijenski blokovi odronjeni iz tih zona imaju izravnu putanju prema stambenim građevinama u podnožju stijenskih kosina (prilozi 1/1 i 1/2). Najvjerojatniju vrstu sloma u ovim zonama predstavlja klinasti slom koji je predisponiran presječnicama diskontinuiteta iz setova S1-S2, S1-S4, S1-S5, S2-S4, S2-S5 i S2-S6 te slom prevrtanjem duž diskontinuiteta koji pripadaju setu diskontinuiteta S3, što je vidljivo na stereografskim projekcijama iz poglavlja 5.1.





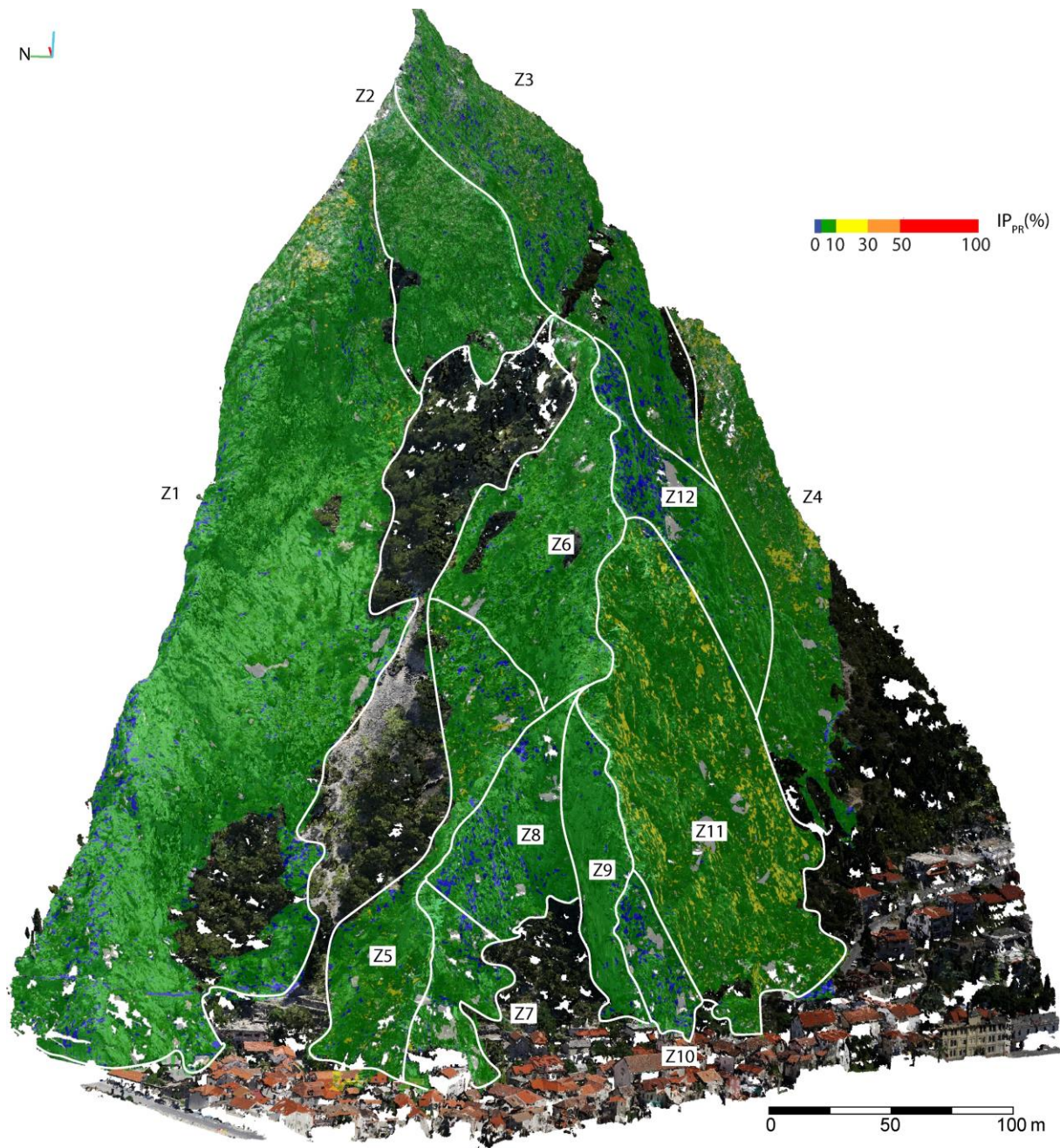
**Slika 6.8.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12.





**Slika 6.9.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za klinasti slom na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12.





**Slika 6.10.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za slom prevrtanjem na visoko-rezolucijskom 3D modelu istraživanih stijenskih kosina iznad grada Omiša za inženjerskogeološke zone Z1-Z12.

## 6.2. Pilot područje 2 – stijenske kosine na lokaciji Brljan

Na području stijenskih kosina na lokaciji Brljan, za svaku inženjerskogeološku zonu provedena je automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju prikupljenih podataka o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Izračunati su indeksi podložnosti za planarni i klinasti slom te za slom prevrtanjem, kao i indeks podložnosti odronima za svaku ćeliju digitalnog modela stijenskih kosina. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za inženjerskogeološke zone te njihova usporedba sa stupnjem trošnosti stijenske mase, brojem setova diskontinuiteta i udjelom kosina u prevjesu prikazani su u tablici 6.2, na slikama 6.11-6.14 te u prilogu 2.

Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama kreću se u rasponu od 3,6-55,6%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama Z11A (55,6%) i Z12A (49,5%) (slika 6.11, tablica 6.2), koje predstavljaju stijenske zasjeka s najvišim stupnjem trošnosti stijenske mase (W6-W7) i najvećim udjelom površina stijenskih kosina u prevjesu (35,5-40,8%). Ukupnoj podložnosti stijenskih kosina odronima najviše pridonosi podložnost klinastom slomu (40,5% u Z11A i 38,2% u Z12A; slika 6.11), dok podložnosti planarnom slomu i slomu prevrtanjem pridonose podjednako (15,2-19,3%) (tablica 6.2). Najmanja prosječna podložnost stijenskih kosina odronima je na prirodnim kosinama u inženjerskogeološkoj zoni Z7C gdje *IPO* iznosi 4,9%. Njoj najviše pridonosi podložnost klinastom slomu od 3,6% (tablica 6.2), pri čemu je u ovoj zoni utvrđen i niski stupanj trošnosti stijenske mase te najmanji udio stijenskih kosina u prevjesu (tablica 6.2).

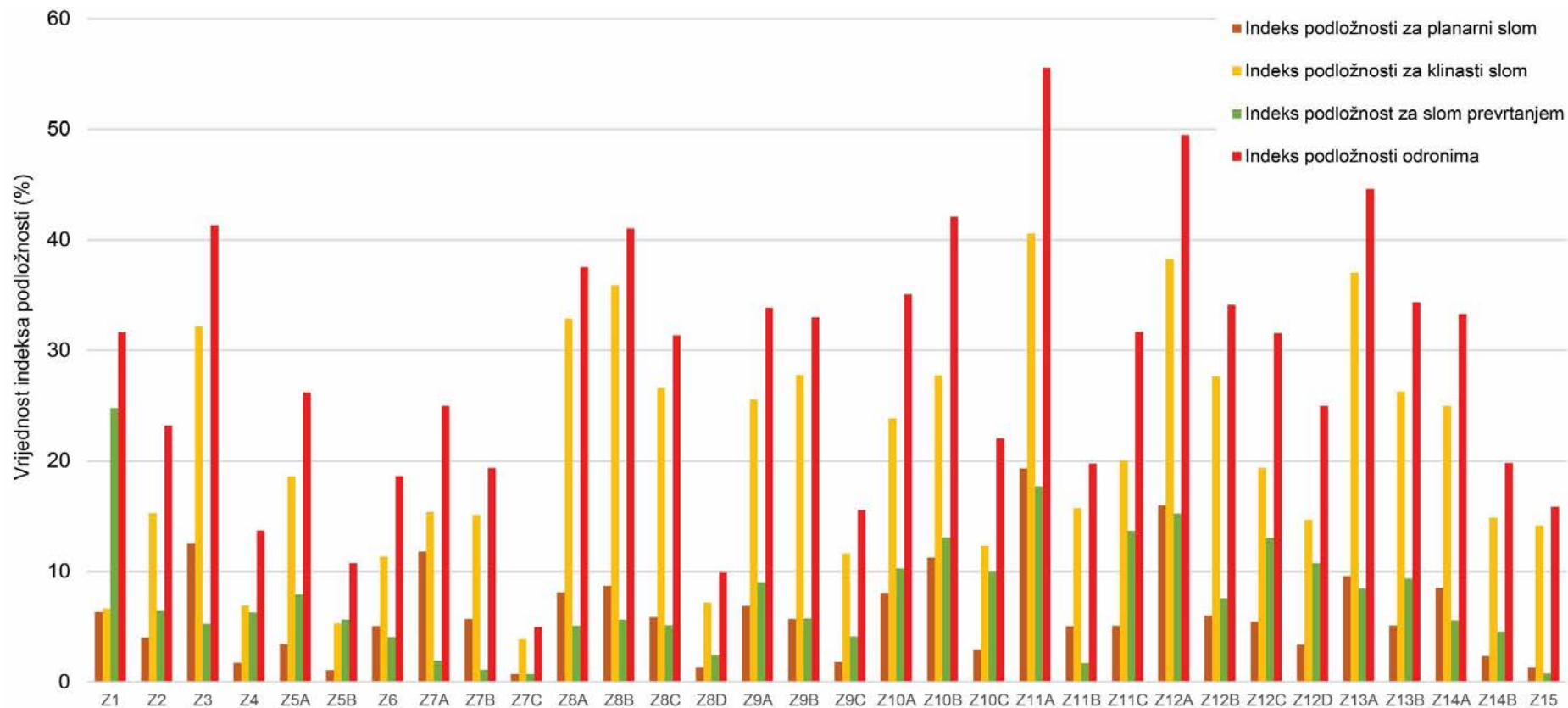
Prema rezultatima automatizirane procjene podložnosti, prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama općenito su proporcionalne utvrđenom rasponu stupnja trošnosti stijenske mase izuzev u zonama Z12C i Z12D koje predstavljaju izuzetak (slika 6.12). Bez obzira na ovaj izuzetak može se zaključiti da će vrijednosti indeksa podložnosti biti veće u zonama u kojima stijenska masa ima viši stupanj trošnosti. Iz slike 6.13 vidljivo je da u pojedinim zonama porast broja utvrđenih setova diskontinuiteta prati i porast vrijednosti *IPO*-a, ali nije potvrđeno da će s porastom broja setova diskontinuiteta rasti i podložnost stijenskih kosina i obratno. Kao i u slučaju trošnosti, iz odnosa prosječnih vrijednosti *IPO*-a i udjela površine stijenskih kosina u prevjesu, općenito se može reći da su proporcionalni (slika 6.14) pri čemu jedini izuzetak predstavlja inženjerskogeološka zona Z11B u kojoj dolazi do smanjena vrijednosti podložnosti usprkos porastu udjela površine stijenskih kosina u prevjesu. Uzrok nižih vrijednosti indeksa podložnosti odronima vjerojatno je niski stupanj trošnosti stijenske mase i mali broj utvrđenih setova diskontinuiteta (tablica 6.2 i slike 6.12-6.14).



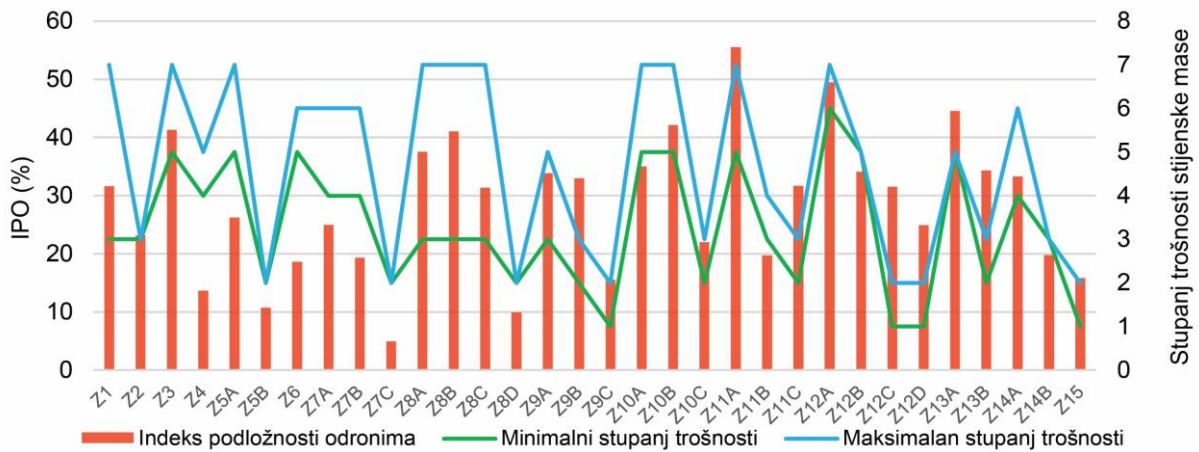
Bez obzira na izuzetak, može se zaključiti da na stijenskim kosinama na lokaciji Brljan podložnost stijenskih kosina odronima raste s porastom udjela površine stijenskih kosina u prevjesu.

**Tablica 6.2.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$ ,  $\overline{IP_{PR}}$ ), indeksa podložnosti odronima ( $\overline{IPO}$ ), raspon stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te udio stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu.

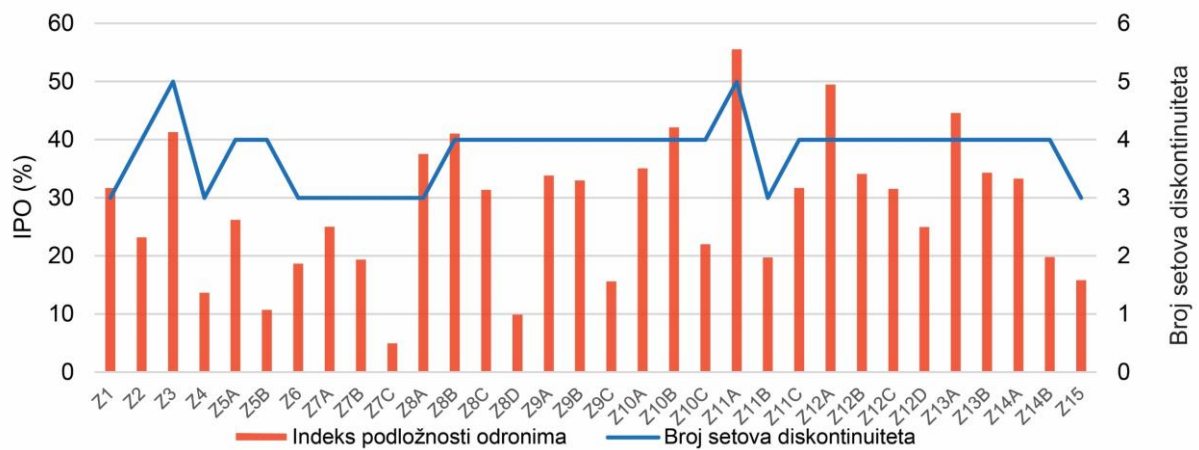
Inženjerskogeološka zona	$\overline{IP_{PL}}$ (%)	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IP_{PR}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	Stupanj trošnosti stijenske mase	Broj setova diskontinuiteta	Prevjes (%)
Z1	6,3	6,6	24,8	31,7	W3-W7	3	16,4
Z2	4,0	15,3	6,4	23,2	W3	4	19,3
Z3	12,6	32,1	5,3	41,3	W5	5	17,6
Z4	1,7	6,9	6,3	13,7	W4-W5	3	15,9
Z5A	3,4	18,6	7,9	26,2	W5-W7	4	23,6
Z5B	1,1	5,3	5,7	10,7	W2	4	4,4
Z6A	5,0	11,3	4,1	18,6	W5-W6	3	27,4
Z7A	11,8	15,4	1,9	25,0	W4-W6	3	26,3
Z7B	5,7	15,1	1,1	19,4	W4-W6	3	25,7
Z7C	0,7	3,9	0,7	4,9	W2	3	3,9
Z8A	8,1	32,9	5,1	37,5	W3-W7	3	28,8
Z8B	8,7	35,9	5,6	41,0	W3-W7	4	32,3
Z8C	5,9	26,6	5,1	31,3	W3-W7	4	21,1
Z8D	1,3	7,2	2,5	9,9	W2	4	6,0
Z9A	6,9	25,6	9,0	33,8	W3-W5	4	22,3
Z9B	5,7	27,8	5,8	33,0	W2-W3	4	20,5
Z9C	1,8	11,6	4,1	15,6	W1-W2	4	5,3
Z10A	8,1	23,9	10,3	35,0	W5-W7	4	32,9
Z10B	11,2	27,7	13,0	42,1	W5-W7	4	33,0
Z10C	2,9	12,3	10,0	22,0	W2-W3	4	5,7
Z11A	19,3	40,5	17,7	55,6	W6-W7	5	35,5
Z11B	5,0	15,7	1,7	19,7	W3-W4	3	38,8
Z11C	5,1	20,1	13,7	31,7	W3-W5	4	7,2
Z12A	16,0	38,2	15,2	49,5	W6-W7	4	40,8
Z12B	6,0	27,6	7,6	34,1	W5	4	34,4
Z12C	5,4	19,3	13,0	31,5	W1-W2	4	11,9
Z12D	3,4	14,7	10,7	24,9	W1-W2	4	4,6
Z13A	9,6	37,0	8,4	44,6	W5	4	36,0
Z13B	5,1	26,3	9,3	34,3	W2-W3	4	14,2
Z14A	8,5	25,0	5,6	33,3	W4-W6	4	24,2
Z14B	2,3	14,9	4,6	19,8	W3	4	4,9
Z15	1,3	14,1	0,8	15,8	W1-W2	3	9,4



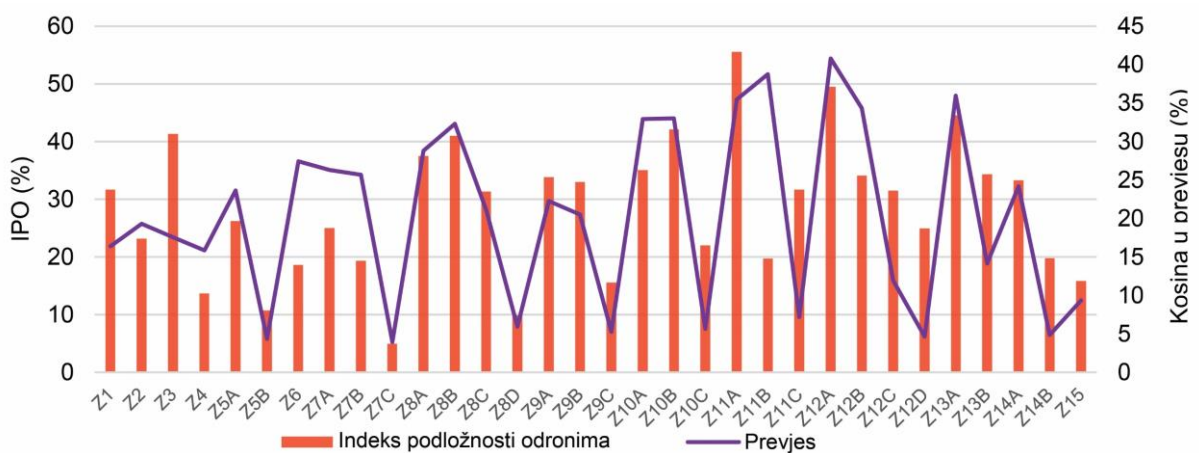
**Slika 6.11.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za sve inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan.



**Slika 6.12.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i stupnja trošnosti stijenske mase po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan.



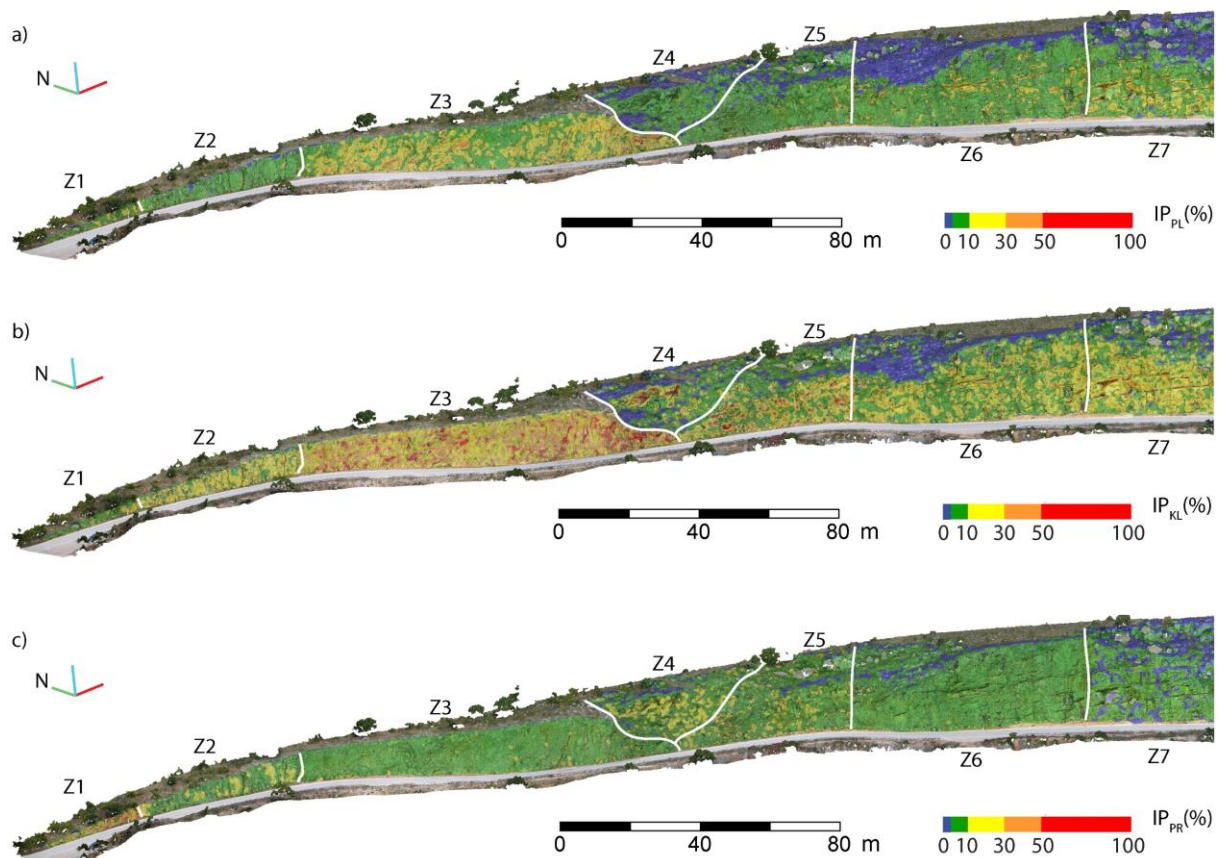
**Slika 6.13.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i identificiranih setova diskontinuiteta po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan.



**Slika 6.14.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i udjela stijenskih kosina u prevjesu po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan.

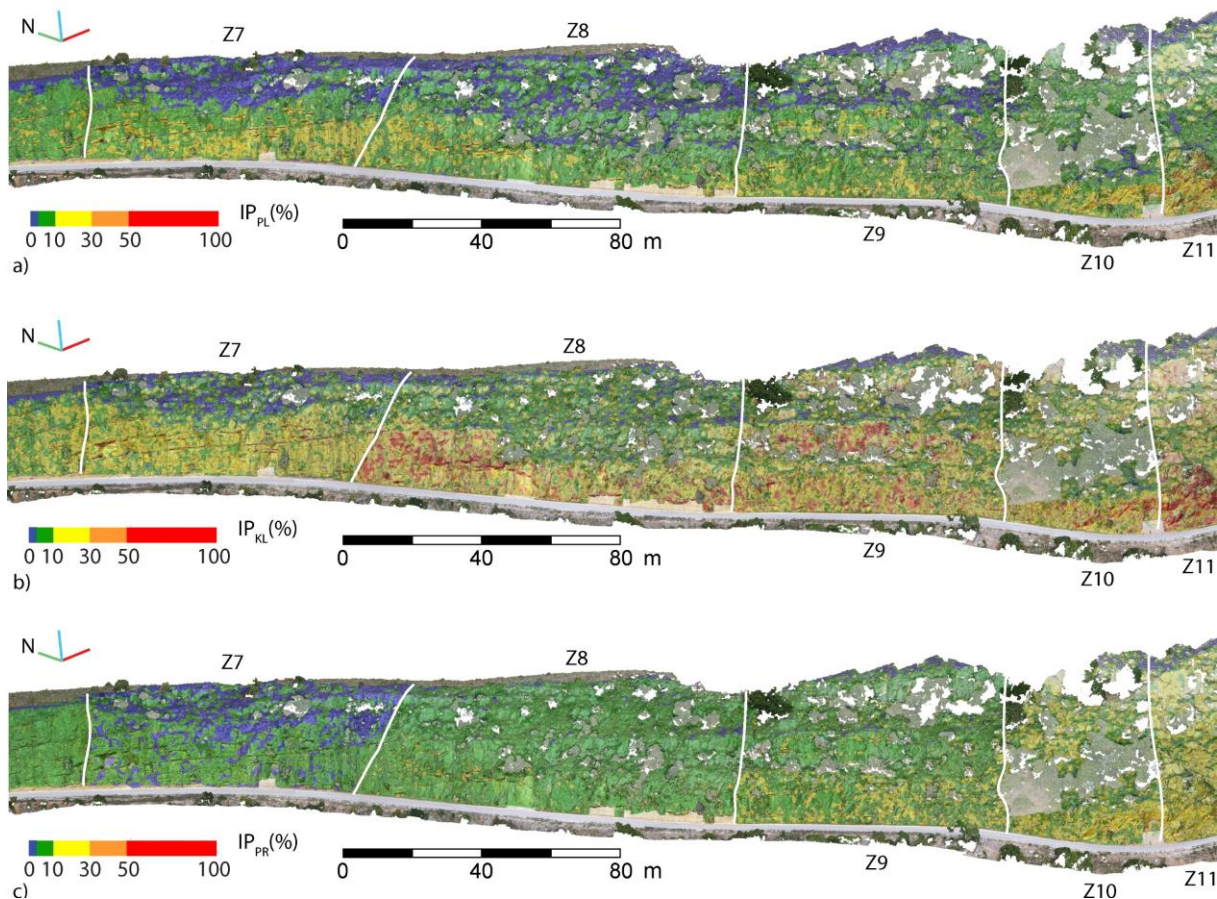
Tablični podaci s pojedinačnim vrijednostima indeksa podložnosti za sve vrste sloma te vrijednostima ukupnog indeksa podložnosti odronima uvezene su u *CloudCompare* u kojemu su dodijeljene ćelijama visoko-rezolucijskog modela površine istraživanih stijenskih kosina te su interpolirane metodom najbližih susjeda. Interpolacijom vrijednosti indeksa podložnosti dobiveni su modeli podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te model podložnosti stijenskih kosina odronima (slike 6.15-6.17, prilozi 2/1-2/3). Modeli podložnosti obojani su u pet različitih boja na način da toplije boje označavaju veću podložnost stijenskih kosina određenoj vrsti sloma odnosno odronima, dok plava boja označava područja na kojima nije vjerojatan nastanak niti jedne vrste sloma, odnosno podložnost stijenskih kosina odronima je jednaka nuli (slike 6.15-6.17, prilozi 2/1-2/3).

Modeli podložnosti pojedinih vrsta sloma stijenske mase jasno ukazuju na povećanu podložnost stijenskih kosina klinastom slomu (slike 6.15-6.17), osobito u inženjerskogeološkim zonama Z3 (slika 6.15b), Z8, Z9 (slika 6.16b), Z11, Z12 i Z13 (slika 6.17b) u kojima vrijednosti  $IP_{KL}$ -a dosežu i do 99%.



**Slika 6.15.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za inženjerskogeološke zone Z1-Z6 na visoko-rezolucijskom 3D modelu stijenskih kosina na lokaciji Brljan za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem.

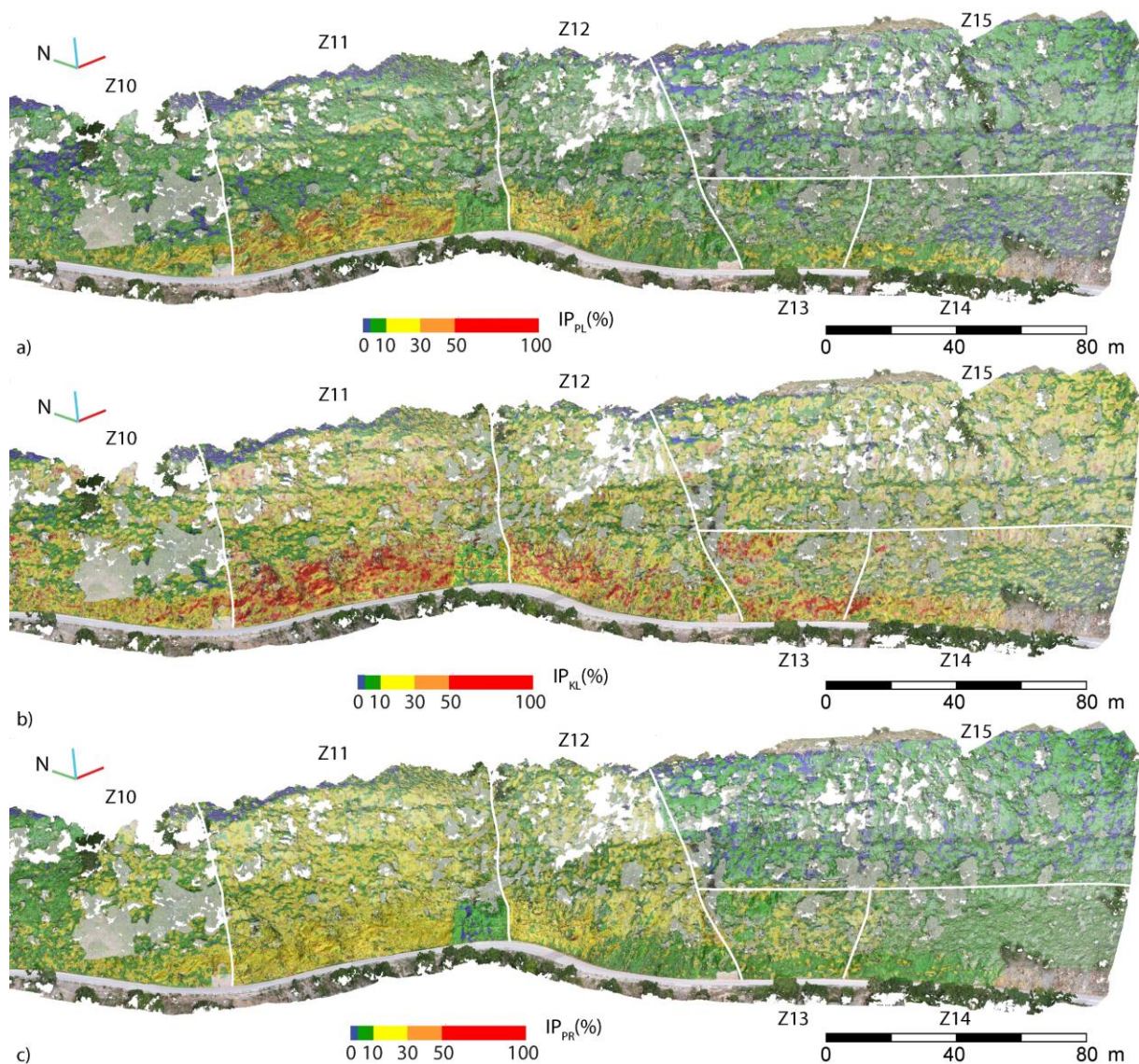




**Slika 6.16.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za inženjerskogeološke zone Z7-Z11 na visoko-rezolucijskom 3D modelu stijenskih kosina na lokaciji Brljan za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem.

Nasuprot podložnosti klinastom slomu, vrijednosti indeksa podložnosti ukazuju da su istraživane stijenske kosine najmanje podložne slomu prevrtanjem, izuzev u inženjerskogeološkim zonama Z10, Z11 i Z12 (slika 6.17c) koje pokazuju veći stupanj podložnosti na slom prevrtanjem u odnosu na ostale zone, a vrijednosti  $IP_{PR}$ -a dosežu i do 82%. Najveća podložnost stijenskih kosina planarnom slomu je u inženjerskogeološkim zonama Z3, Z11 i Z12 (slike 6.15a- 6.17a), u kojima vrijednosti  $IP_{PL}$ -a dosežu do 77%. S obzirom na visoke vrijednosti indeksa podložnosti ističu se inženjerskogeološke zone Z3, Z9, Z11 i Z12, u kojima su indeksi podložnosti visoki za sve tri vrste sloma (slike 6.15-6.17). U inženjerskogeološkoj zoni Z11 zabilježeni su najveće vrijednosti indeksa podložnosti za sve pojedine vrste slomova, s maksimalnim vrijednostima  $IP_{PL}$ -a od 77%,  $IP_{KL}$ -a od 99% te  $IP_{PR}$ -a od 82%. U toj zoni utvrđen je i visok stupanj trošnosti stijenske mase te visok udio površine stijenskih kosina u prevjesu (tablica 6.2). Ova je potvrđeno i na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima na kojemu se inženjerskogeološka zona Z11 jasno ističe najtoplijim bojama odnosno najvišim vrijednostima  $IPO$ -a (prilog 2/3), a u njoj je utvrđena i najveća prosječna vrijednost  $IPO$ -a

(tablica 6.2). U ovoj zoni nisu jednoliko zastupljene vrijednosti *IPO*-a, jer se najveća gustoća visokih vrijednosti *IPO*-a nalazi u području stijenskog zasjeka označenog kao zona Z11A (prilog 2/3), dok se gustoća visokih vrijednosti *IPO*-a na prirodnim stijenskim kosinama u zoni Z11C smanjuje (prilog 2/3). Osim navedene zone, po visokom stupnju podložnosti stijenskih kosina odronima ističu se i inženjerskogeološke zone Z3, Z8, Z9, Z10, Z12 i Z13, koje bi zajedno sa zonom Z11 trebale predstavljati prioritetne zone za ublažavanje hazarda od odrona i za sanaciju. Također, osim stijenskih zasjeka u tim zonama posebnu pažnju trebalo bi obratiti i na prirodne stijenske kosine u zonama Z4, Z9, Z10, Z11, Z13 i Z15 za koje je procijenjen visoki stupanj podložnosti stijenskih kosina odronima (prilozi 2/1-2/3).



**Slika 6.17.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za inženjerskogeološke zone Z10-Z15 na visokorezolucijskom 3D modelu stijenskih kosina na lokaciji Brljan za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem.



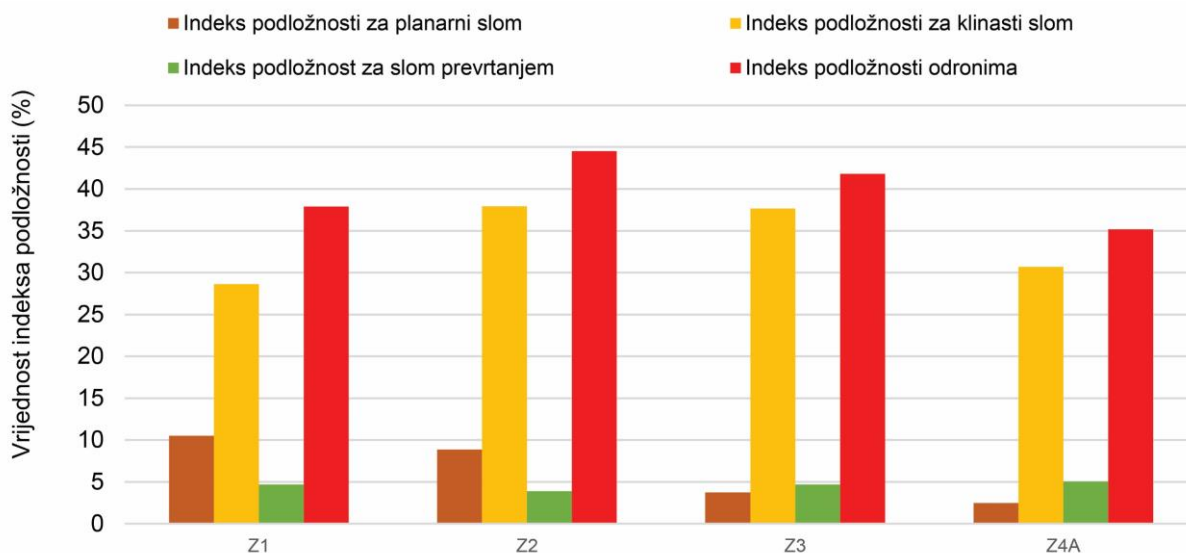
### 6.3. Pilot područje 3 – stijenski zasjek na lokaciji Špičunak

Na području stijenskih kosina na lokaciji Špičunak, za svaku inženjerskogeološku zonu provedena je automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju prikupljenih podataka o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Izračunate su vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te za slom prevrtanjem, kao i indeks podložnosti odronima za svaku ćeliju digitalnog modela stijenskih kosina. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za inženjerskogeološke zone te njihova usporedba sa stupnjem trošnosti stijenske mase, brojem setova diskontinuiteta i udjelom kosina u prevjesu prikazani su u tablici 6.3, na slikama 6.18-6.21 te u prilogu 3.

Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama kreću se u rasponu od 35,2-44,5%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama Z2 (44,5%) i Z3 (41,8%) (slika 6.18, tablica 6.3), koje predstavljaju stijenske zasjeka s najvišim stupnjem trošnosti stijenske mase (W5-W8) i visokim udjelom površina stijenskih kosina u prevjesu (33,6-42,8%). Ukupnoj podložnosti na istraživanom stijenskom zasjeku najviše pridonosi podložnost klinastom slomu (28,6-38%; tablica 6.3 i slika 6.18), dok podložnosti planarnom slomu i slomu prevrtanjem pridonose značajno manje (2,5-10,5%) (tablica 6.3 i slika 6.18). Najmanja prosječna vrijednost podložnosti stijenskih kosina odronima utvrđena je u inženjerskogeološkoj zoni Z4, gdje *IPO* iznosi 35,2% (tablica 6.2 i slika 6.18). U ovoj zoni utvrđen je i najveći raspon stupnja trošnosti stijenske mase (W3-W8).

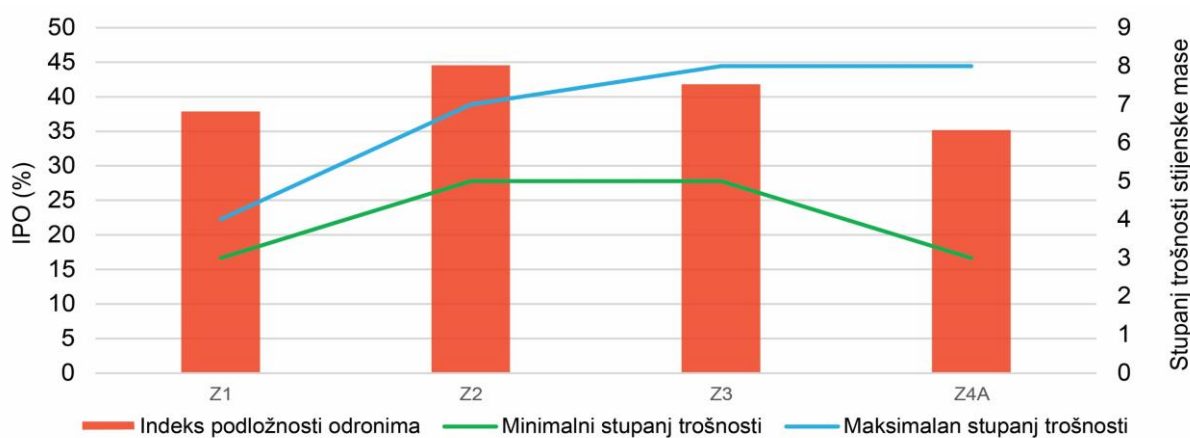
**Tablica 6.3.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$ ,  $\overline{IP_{PR}}$ ), indeksa podložnosti odronima ( $\overline{IPO}$ ), raspon stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta i udjela stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu.

Inženjerskogeološka zona	$\overline{IP_{PL}}$ (%)	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IP_{PR}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	Stupanj trošnosti stijenske mase	Broj setova diskontinuiteta	Prevjes (%)
Z1	10,5	28,6	4,7	37,9	W3-W4	3	36,1
Z2	8,9	38,0	3,9	44,5	W5-W7	4	33,6
Z3	3,7	37,7	4,7	41,8	W5-W8	5	42,8
Z4A	2,5	30,7	5,0	35,2	W3-W8	5	37,3



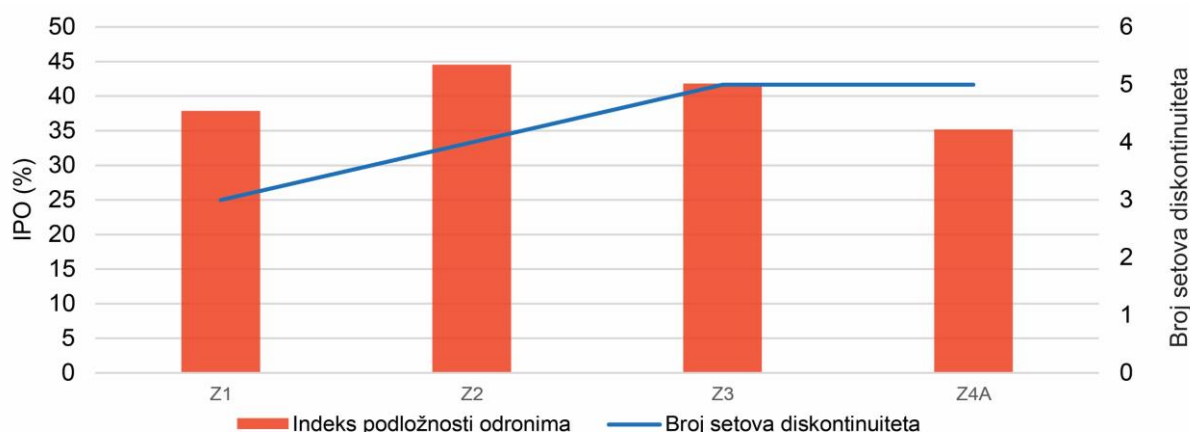
**Slika 6.18.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima za sve inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.

Prema rezultatima automatizirane procjene podložnosti, prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama uglavnom su proporcionalne utvrđenom rasponu stupnja trošnosti stijenske mase u tim zonama (slika 6.19), dok broj utvrđenih setova diskontinuiteta nema značajan utjecaj na porast ili smanjenje prosječne vrijednosti *IPO*-a (slika 6.20). Kao i u slučaju trošnosti, iz odnosa prosječnih vrijednosti *IPO*-a i udjela stijenskih kosina u prevjesu, općenito se može reći da su proporcionalni (slika 6.21). Jedini izuzetak predstavlja inženjerskogeološka zona Z2 u kojoj rastu vrijednosti indeksa podložnosti sa smanjenja udjela površine stijenskih kosina u prevjesu u odnosu na susjedne zone (tablica 6.3 i slika 6.21). Iz navedenog se može zaključiti da stupanj trošnosti stijenske mase, kao i udio površina stijenskih kosina u prevjesu imaju utjecaj na prosječnu vrijednost *IPO*-a.

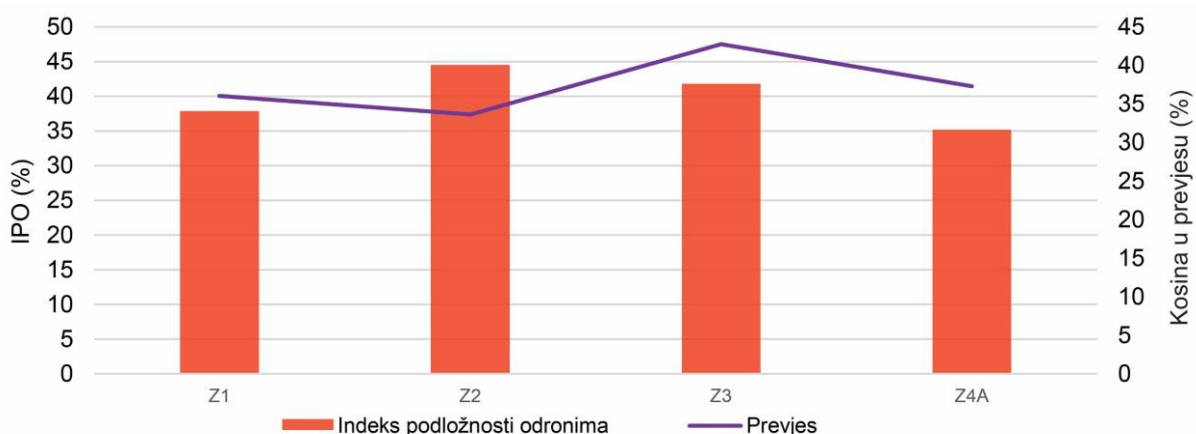


**Slika 6.19.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i stupnja trošnosti stijenske mase za inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.



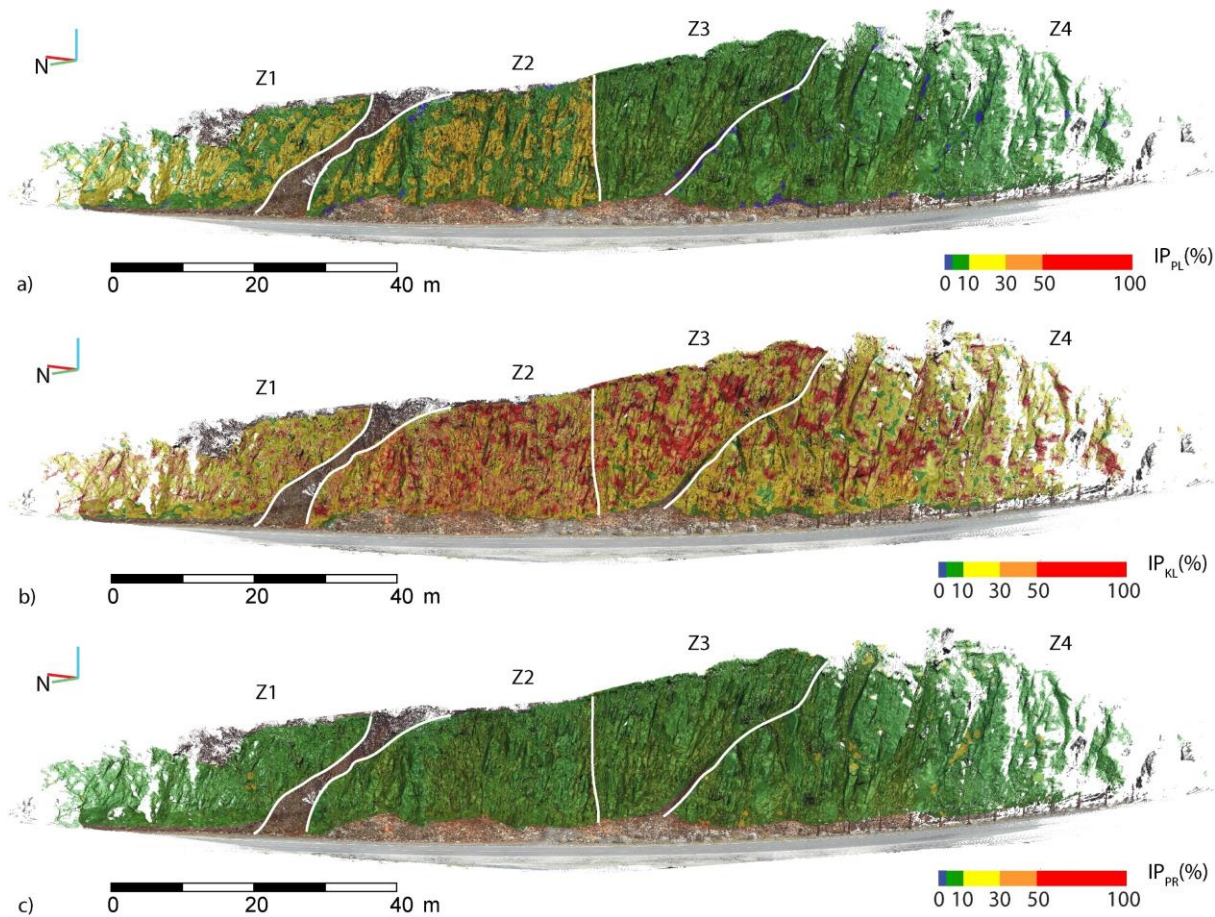


**Slika 6.20.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i identificiranih setova diskontinuiteta za inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.



**Slika 6.21.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i postotka stijenskih kosina u prevjesu za inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak.

Tablični podaci s vrijednostima indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te indeksa podložnosti odronima uvezene su u *CloudCompare*, u kojemu su vrijednosti podložnosti pridodane ćelijama visoko-rezolucijskog modela površine istraživanih stijenskih kosina te su interpolirane metodom najbližih susjeda. Interpolacijom vrijednosti indeksa podložnosti dobiveni su modeli podložnosti planarnom i klinastom slom, slomu prevrtanjem te model podložnosti stijenskih kosina odronima (slika 6.22, prilog 3). Modeli podložnosti obojani su u pet različitih boja na način da toplije boje označavaju veću podložnost stijenskih kosina određenoj vrsti sloma odnosno odronima, dok plava boja označava područja na kojima nije vjerojatan nastanak niti jedne vrste sloma, odnosno podložnost stijenskih kosina odronima je jednaka nuli (slike 6.22, prilog 3).



**Slika 6.22.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za inženjerskogeološke zone Z1-Z6 na visoko-rezolucijskom 3D modelu stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem.

Modeli podložnosti pojedinih vrsta sloma stijenske mase jasno ukazuju na povećanu podložnost stijenskih kosina klinastom slomu, osobito u inženjerskogeološkim zonama Z2 i Z3 (slika 6.22b), u kojima vrijednosti  $IP_{KL}$ -a doseže i do 100%. Maksimalne vrijednosti  $IP_{KL}$ -a u inženjerskogeološkoj zoni Z1 iznose 98%, dok u zoni Z4 iznose 99%. Vrijednosti indeksa podložnosti ukazuju da su stijenske kosine najmanje podložne slomu prevrtanjem (slika 6.22c), pri čemu su maksimalne vrijednosti  $IP_{PR}$ -a po zonama u rasponu od 32,1-36,9%. Vrijednosti podložnosti stijenskih kosina planarnom slomu najviše su u inženjerskogeološkim zonama Z1 i Z2 (slike 6.22a) uz maksimalne vrijednosti  $IP_{PL}$ -a oko 38%. Maksimalna vrijednost  $IP_{PL}$ -a u inženjerskogeološkoj zoni Z3 iznosi 26,2% dok u zoni Z4 iznosi 24,3%. Usporedbom indeksa podložnosti za pojedine vrste sloma, jasno se ističe inženjerskogeološka zona Z2 s najvećom gustoćom visokih vrijednosti indeksa podložnosti klinastom i planarnom slomu (slike 6.22b). Ova je potvrđeno i na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima na kojemu se inženjerskogeološka zona Z2 jasno ističe najtoplijim bojama, odnosno najvećom gustoćom visokih vrijednosti  $IPO$ -a (prilog 3) te najvećom prosječnom vrijednosti  $IPO$ -a (tablica 6.3).

U ostalim zonama vrijednosti ukupne podložnosti su podjednake s time da se inženjerskogeološka zona Z3 ističe većom gustoćom visokih vrijednosti *IPO*-a (obojanih crvenom bojom) u odnosu na Z1 i Z4 (prilog 3). Podložnost u zoni Z2 vjerojatno je najviša zbog vrlo malih vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta te nepovoljno orijentiranih diskontinuiteta i njihovih presječnica u odnosu na orijentaciju kosine. Također, vjerojatni razlog je i ritmička izmjena stijenske mase visokog i srednjeg stupnja trošnosti, a udio stijenske mase s višim stupnjem trošnosti veći je nego u ostalim zonama.

#### 6.4. Pilot područje 4 – stijenski zasjek Lokve

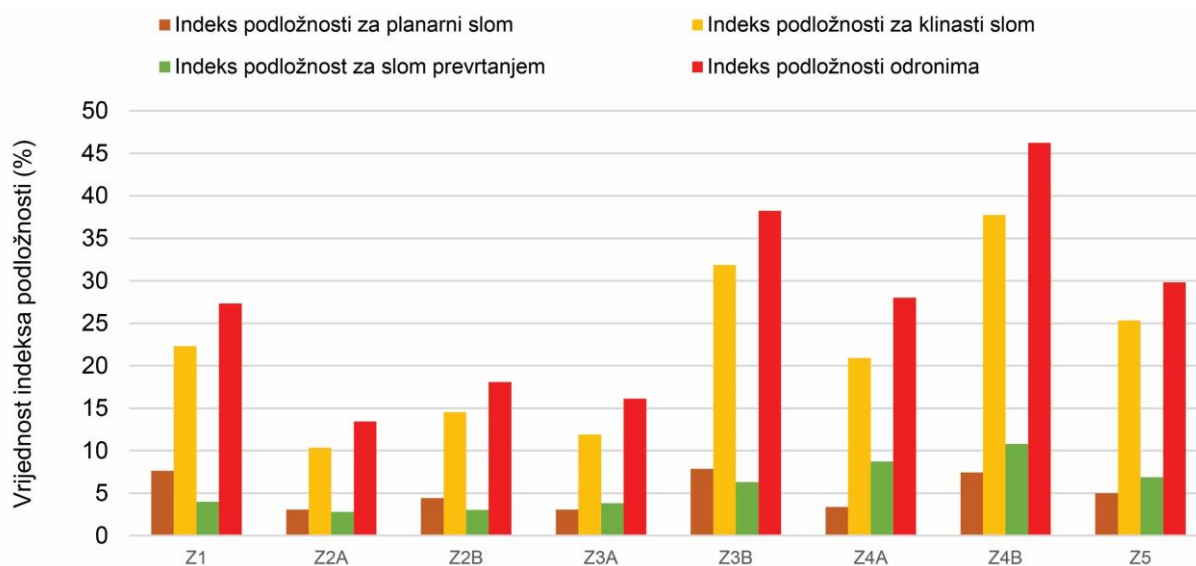
Na području stijenskih kosina u naselju Lokve za svaku inženjerskogeološku zonu provedena je automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju prikupljenih podataka o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Izračunate su vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te za slom prevrtanjem, kao i indeks podložnosti odronima za svaku ćeliju digitalnog modela stijenskih kosina. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za sve vrste sloma i indeksa podložnosti odronima za inženjerskogeološke zone te njihova usporedba sa stupnjem trošnosti stijenske mase, brojem setova diskontinuiteta i udjelom kosina u prevjesu prikazani su u tablici 6.4, na slikama 6.23-6.26 te u prilogu 4.

Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama kreću se u rasponu od 13,5-46,2%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama Z3B (38,2%) i Z4B (46,2%) (slika 6.23, tablica 6.4), koje predstavljaju stijenske zasjeka s visokim udjelom površina stijenskih kosina u prevjesu (33,7-44,9%). Ukupnoj podložnosti na istraživanom stijenskom zasjeku najviše pridonosi podložnost klinastom slomu čije su prosječne vrijednosti po inženjerskogeološkim zonama u rasponu od 10,3-37,7% (tablica 6.4 i slika 6.23). Podložnosti planarnom slomu i slomu prevrtanjem pridonose značajno manje (2,8-10,8%) (tablica 6.4 i slika 6.23). Najmanje prosječne vrijednosti podložnosti stijenskih kosina odronima su u inženjerskogeološkim zonama Z2A i Z3A u kojima prosječne vrijednosti *IPO*-a iznose 13,5-16,1% (tablica 6.4 i slika 6.23). Razlog tome je što stijensku masu u navedenim zonama, osim srednje trošnih dolomita (W5) izgrađuju i vrlo intenzivno trošne do raspadnute klastične naslaga (W8-W9) za koje nisu provedene analize podložnosti s obzirom u njima nije moguć proces odronjavanja.

**Tablica 6.4.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$ ,  $\overline{IP_{PR}}$ ), indeksa podložnosti odronima ( $\overline{IPO}$ ), raspon stupnja trošnosti, broja utvrđenih setova diskontinuiteta te udio stijenskih kosina u prevjesu za svaku inženjerskogeološku zonu.

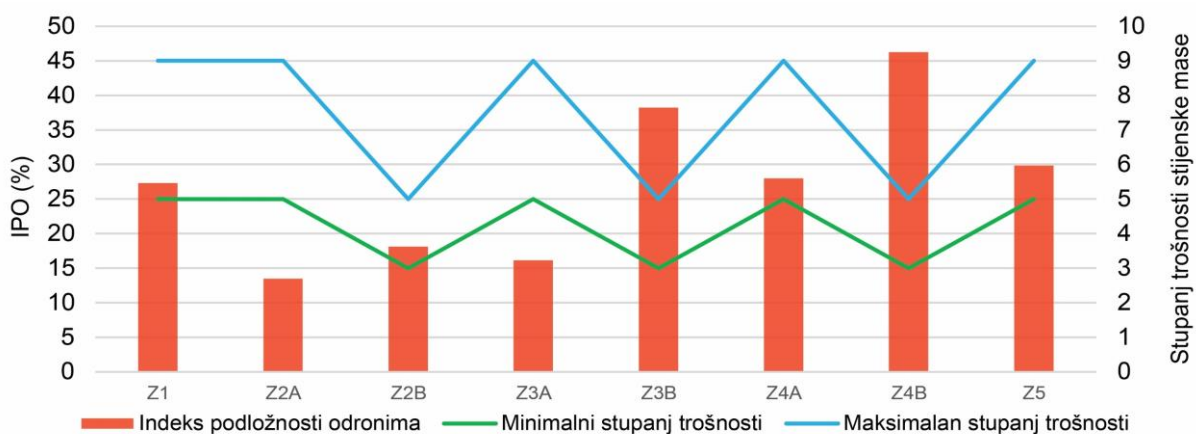
Inženjerskogeološka zona	$\overline{IP_{PL}}$ (%)	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IP_{PR}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	Stupanj trošnosti stijenske mase	Broj setova diskontinuiteta	Prevjes (%)
Z1	7,6	22,3	4,0	27,3	W5-W9	4	30,5
Z2A	3,1	10,3	2,8	13,5	W5-W9	4	25,9
Z2B	4,4	14,6	3,1	18,1	W3-W5	4	34,8
Z3A	3,1	11,9	3,8	16,1	W5-W9	4	20,0
Z3B	7,9	31,9	6,3	38,2	W3-W5	4	44,9
Z4A	3,4	20,9	8,7	28,0	W5-W9	5	21,2
Z4B	7,5	37,7	10,8	46,2	W3-W5	5	33,7
Z5	5,0	25,3	6,9	29,8	W5-W9	5	16,9





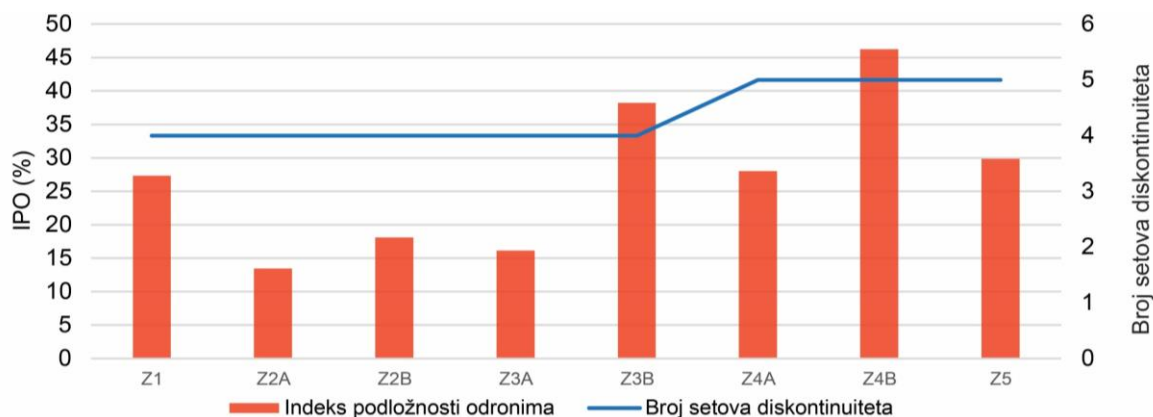
**Slika 6.23.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma i indeksa podložnosti odronima za sve inženjerskogeološke zone na pilot području stijenskog zasjeka u Lokvama.

Prema rezultatima automatizirane procjene podložnosti, prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama su obrnuto proporcionalne utvrđenom rasponu stupnja trošnosti stijenske mase (slika 6.24), što je suprotno prethodno opisanim rezultatima dobivenim na ostalim pilot područjima. Razlog tomu je značajno smanjenje prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti u zonama u kojima se pojavljuju klastične naslage zbog toga što su u njima vrijednosti svih indeksa podložnosti na svim plohama digitalnog modela jednake nuli (slika 6.27, prilog 4). Budući da je trošnost klastičnih naslaga vrlo visoka, dobiva se lažan dojam da su podložnost i trošnost obrnuto proporcionalni.

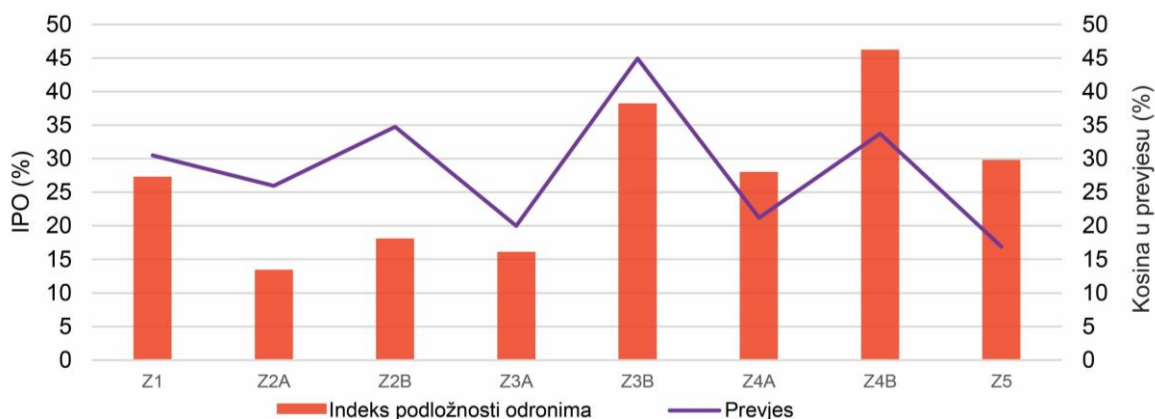


**Slika 6.24.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i stupnja trošnosti stijenske mase po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskog zasjeka u Lokvama.

Broj utvrđenih setova diskontinuiteta veći je u zonama s većim prosječnim vrijednostima *IPO*-a (slika 6.25), dok iz odnosa prosječnih vrijednosti *IPO*-a i udjela površine stijenskih kosina u prevjesu proizlazi da su ovi odnosi proporcionalni (slika 6.26), odnosno da udio površine kosina u prevjesu ima utjecaj na podložnost stijenskih kosina odronima.



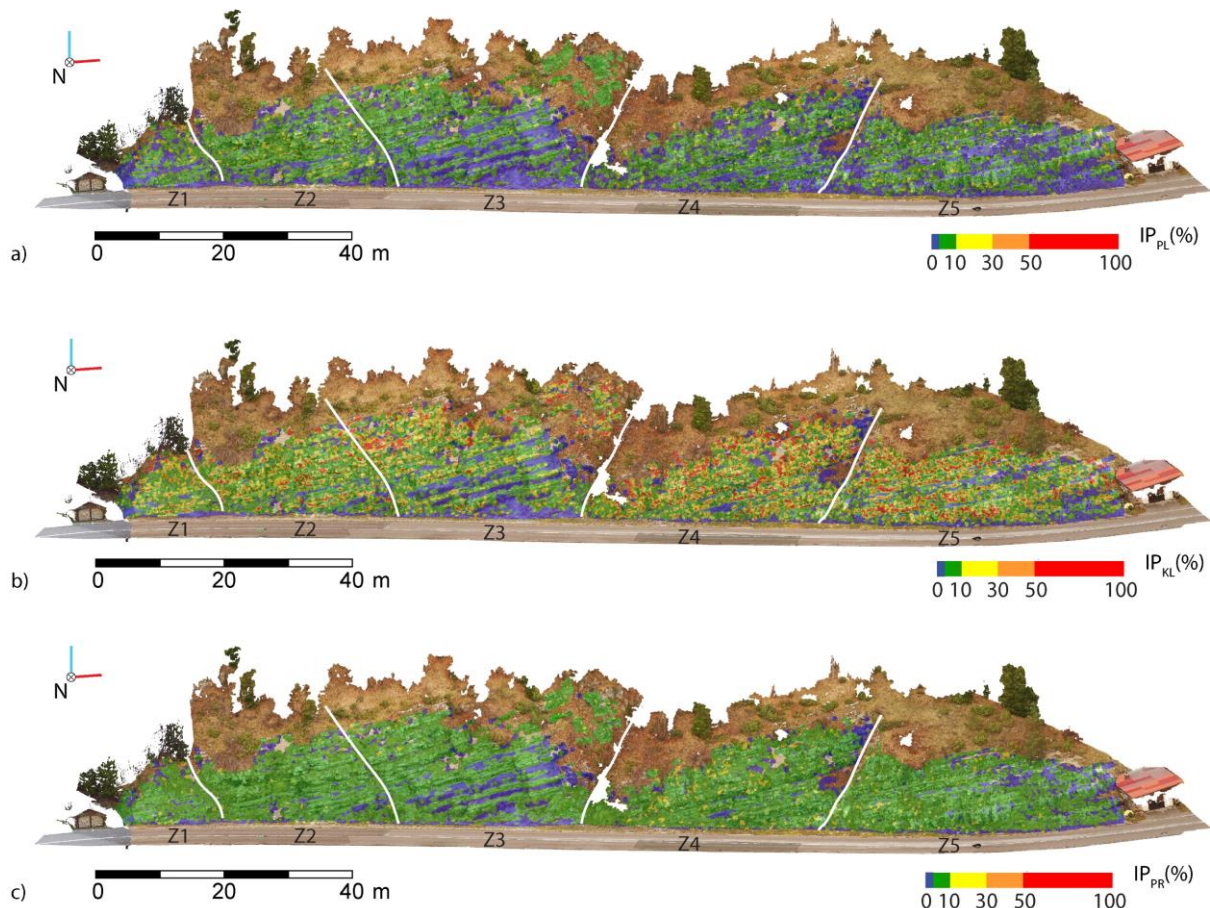
**Slika 6.25.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i identificiranih setova diskontinuiteta po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskog zasjeka u Lokvama.



**Slika 6.26.** Prikaz odnosa prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima i udjela površina stijenskih kosina u prevjesu po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskog zasjeka u Lokvama.

Tablični podaci s pojedinačnim vrijednostima indeksa podložnosti za sve vrste sloma te vrijednostima *IPO*-a uvezene su u *CloudCompare* u kojemu su dodijeljene ćelijama visoko-rezolucijskog modela površine stijenskih kosina te su interpolirane metodom najbližih susjeda. Interpolacijom vrijednosti indeksa podložnosti dobiveni su modeli podložnosti planarnom i klinastom slomu, slomu prevrtanjem i model podložnosti stijenskih kosina odronima (slika 6.27, prilog 4). Modeli podložnosti obojani su u pet različitih boja na način da toplije boje označavaju veću podložnost stijenskih kosina pojedinoj vrsti sloma, dok plava boja označava područja na kojima nije vjerojatan nastanak niti jedne vrste sloma, tj. podložnost stijenskih kosina odronima je jednaka nuli (slike 6.27, prilog 4).

Modeli podložnosti pojedinih vrsta slomova ukazuju na povećanu podložnost stijenskih kosina klinastom slomu, osobito u inženjerskogeološkim zonama Z3 i Z4 (slika 6.27b), u kojima vrijednosti  $IP_{KL}$ -a dosežu i do 100%. Vrijednosti indeksa podložnosti ukazuju da su stijenske kosine najmanje podložne planarnom slomu (slika 6.27a), s maksimalnim vrijednostima  $IP_{PL}$ -a u rasponu od 50,7-88,0%. Vrijednosti podložnosti stijenskih kosina slomu prevrtanjem najviše su u inženjerskogeološkoj zoni Z4 (slike 6.27b), a maksimalna zabilježena vrijednosti  $IP_{PR}$ -a je 85%. Na modelima podložnosti ističe se inženjerskogeološka zona Z4 s najvećom gustoćom visokih vrijednosti indeksa podložnosti neovisno o vrsti sloma, što je vidljivo i na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima (prilog 4). U ostalim zonama određene vrijednosti podložnosti su podjednake s time da se inženjerskogeološka zona Z3A ističe najvećom gustoćom niskih vrijednosti podložnosti koja iznosi 0% (obojanih plavom bojom). Ovo je posljedica velike zastupljenosti klastičnih naslaga visokog stupnja trošnosti u kojima se ne očekuje proces odronjavanja (prilog 4).



**Slika 6.27.** Prikaz interpoliranih vrijednosti indeksa podložnosti za inženjerskogeološke zone Z1-Z5 na visokorezolucijskom 3D modelu stijenskog zasljeva u Lokvama za: a) planarni sloma, b) klinasti slom, c) slom prevrtanjem.

## 7. VERIFIKACIJA MODELA PODLOŽNOSTI

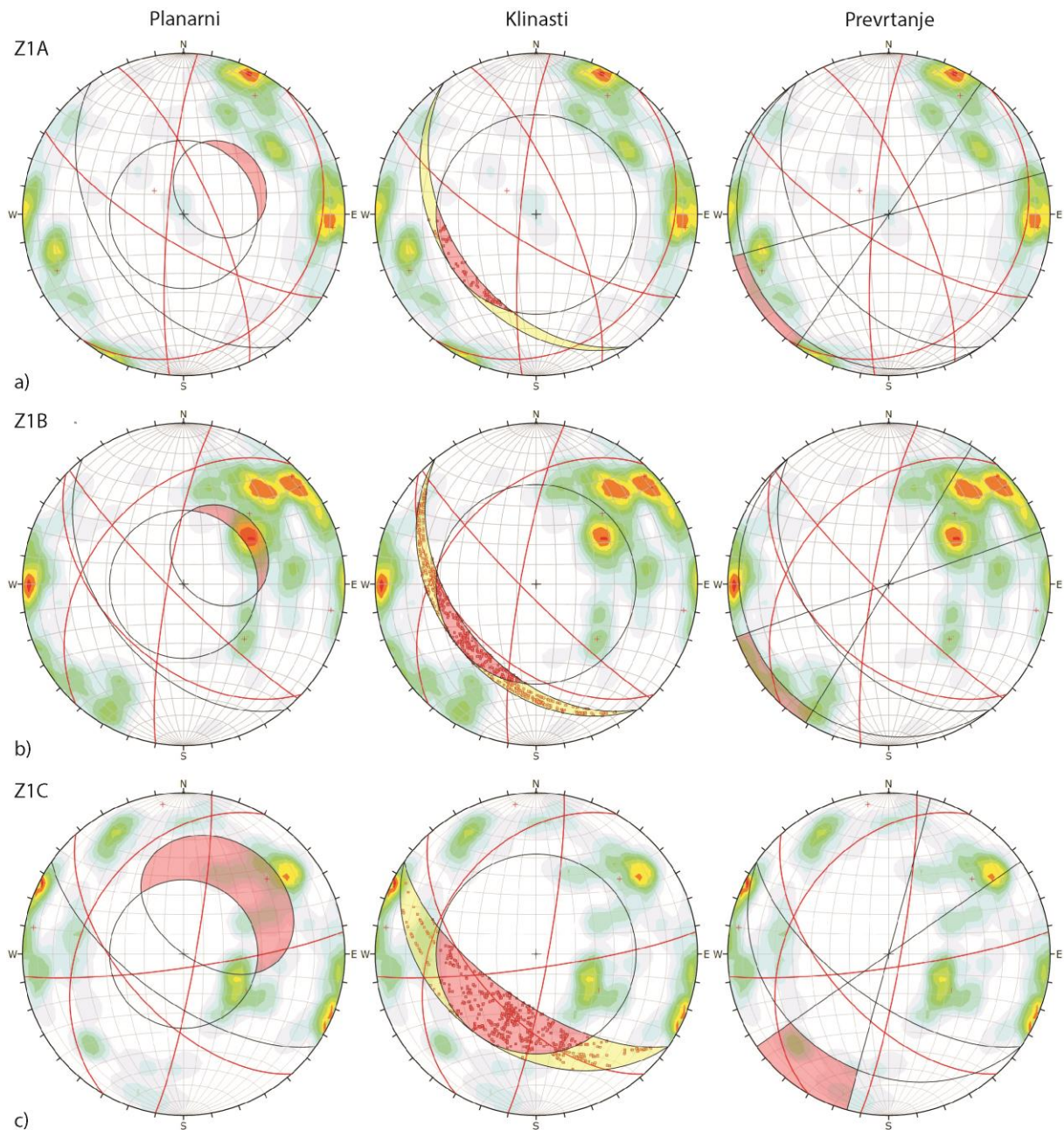
Verifikacija koncepta automatizirane procjene podložnosti stijenskih kosina odronima algoritmom *ROCKS* djelomično je provedena na sintetičkom stijenskom zasjeku u obliku konkavne polusfere, kao što je prikazano u poglavlju 4.6. Ulazni podaci bili su testni setovi diskontinuiteta s pripadajućim vrijednostima razmaka i postojanosti te određenim brojem pripadajućih diskontinuiteta. Rezultati ovih analiza bili su indeksi podložnosti za svaku pojedinu vrstu sloma i indeks podložnosti odronima, a dobivene vrijednosti bile su u skladu s očekivanjima. Time je potvrđena ispravnost metode izračuna svih indeksa podložnosti na temelju izračuna unija vjerojatnosti pojave diskontinuiteta ili presječnica, rezultata prostornih kinematičkih analiza te sinusa kuta nagiba diskontinuiteta, uzimajući pri tome u obzir i dijelove kosine koji su u prevjesu, koji inače nisu uključeni u standardne kinematičke analize.

Najjednostavnija verifikacija dobivenih rezultata podložnosti stijenskih kosina odronima na stvarnim stijenskim zasjecima provedena je usporedbom rezultata automatiziranih analiza s kinematičkim analizama na stereografskoj projekciji (tablica 7.1 i slika 7.1). Za usporedbu je izabrana inženjerskogeološka zona Z1 na stijenskim kosinama iznad grada Omiša jer su za njezine podzone dobivene najveće i najmanje prosječne vrijednosti *IPO*-a (tablica 7.1). Za ove podzone uspoređivane su prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma i *IPO*-a s rezultatima grafičke metode kinematičkih analiza u kojima su odabrane prosječne vrijednosti orijentacije stijenskih kosina, ne uzimajući u obzir dijelove kosina u prevjesu. Grafičkim analizama stabilnosti utvrđeni su jednaki odnosi između uspoređivanih inženjerskogeoloških zona kao i između prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti (tablica 7.1). U inženjerskogeološkoj zoni Z1C identificiran je najveći broj setova i presječnica kao i udjela mjerenih diskontinuiteta i presječnica koji zadovoljavaju uvjete za određenu vrstu sloma, dok su u zoni Z1A ti udjeli najmanji (tablica 7.1, slika 7.1).

**Tablica 7.1.** Usporedba prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$ ,  $\overline{IP_{PR}}$ ,  $\overline{IPO}$ ) s rezultatima grafičkih analiza na stereografskoj projekciji, odnosno brojem setova i njihovih presječnica ( $S_{PL}$ ,  $P_{KL}$ ,  $S_{PR}$ ) te udjelom svih određenih diskontinuiteta i presječnica ( $N_{PL}(\%)$ ,  $N_{KL}(\%)$ ,  $N_{PR}(\%)$ ) koji zadovoljavaju uvjete za slom.

IG zona	Prevjes (%)	$\overline{IP_{PL}}$ (%)	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IP_{PR}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	$S_{PL}$	$N_{PL}(\%)$	$P_{KL}$	$N_{KL}(\%)$	$S_{PR}$	$N_{PR}(\%)$
Z1A	14,5	1,1	12,6	1,3	14,3	0	0,7	0	0,87	0	2,1
Z1B	19,9	2,5	22,2	2,2	25,2	0	6,5	1	7,2	0	4,4
Z1C	34,1	9,2	37,1	3,5	42,5	1	10,7	2	20,7	0	7,1



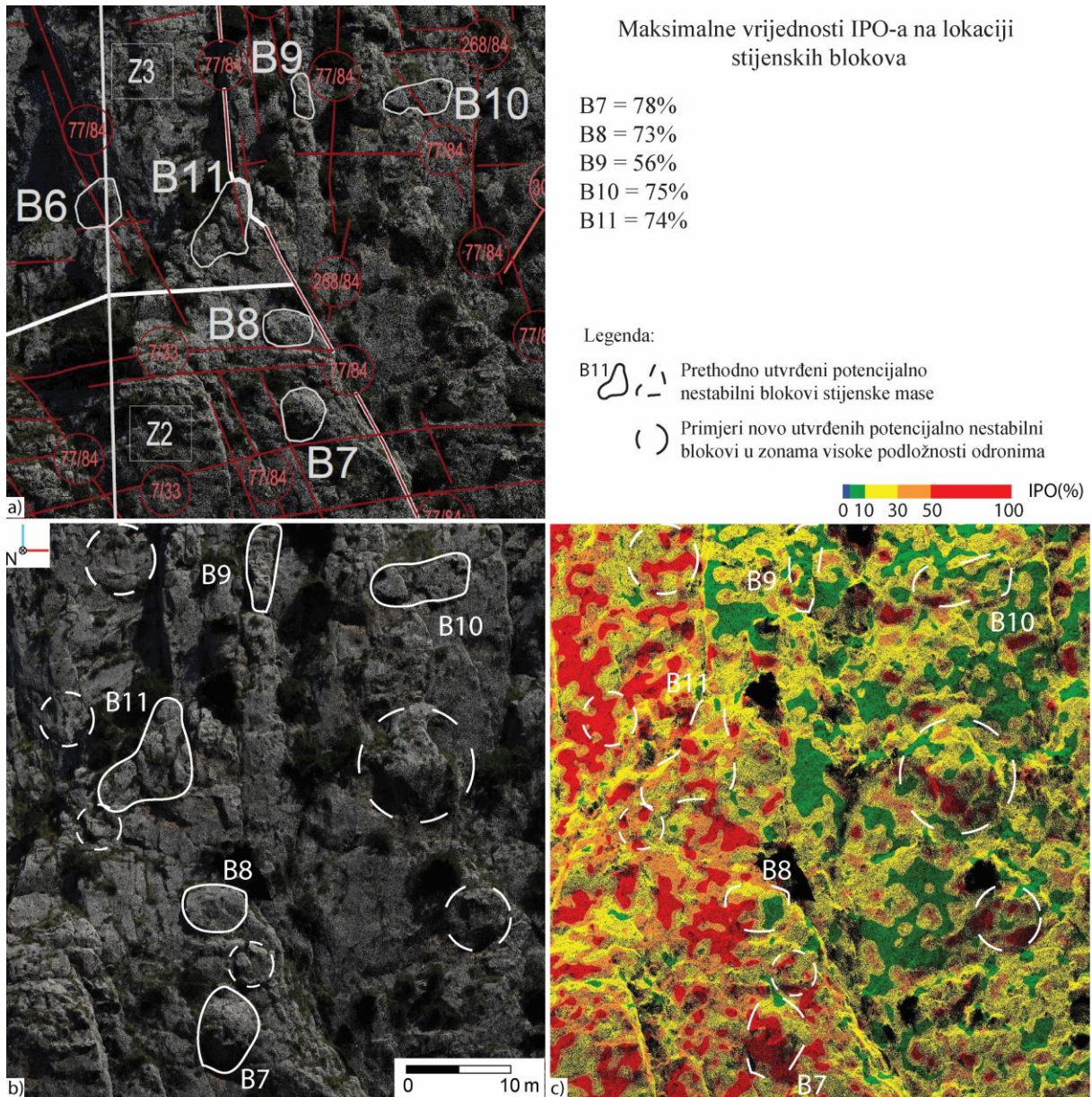


**Slika 7.1.** Prikaz kinematičkih analiza za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem na stereografskim projekcijama za inženjerskogeološke zone: a) Z1A; b) Z1B; c) Z1C.

Također, međusobni odnosi udjela mjerenih diskontinuiteta ili presječnica ( $N_{PL}$ ,  $N_{KL}$  i  $N_{PR}$  u tablici 7.1) koji zadovoljavaju kinematičke uvjete ovisno o vrsti sloma jednaki su kao i odnosi prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti sloma ( $\overline{IP_{PL}}$ ,  $\overline{IP_{KL}}$  i  $\overline{IP_{PR}}$  u tablici 7.1). U svim zonama najviše su prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za klinasti slom ( $\overline{IP_{KL}}$ ) što je u skladu s rezultatima grafičkih analiza (slika 7.1 i tablica 7.1), u kojima su omjeri presječnica diskontinuiteta koje zadovoljavaju uvjete za klinasti slom ( $N_{KL}$ ) veći u odnosu na omjere diskontinuiteta koji zadovoljavaju uvjete za planarni slom i slom prevrtanjem ( $N_{PL}$  i  $N_{PR}$ ).

Uz navedeno, rezultati analiza podložnosti za pilot područja uspoređivani su s prijašnjim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima na pilot područjima u Omišu i na lokaciji Brljan te vizualnim pregledom odabranih zona visoke podložnosti stijenskih kosina i izvorišnih zona odronjavanja. U poglavlju 3.1.2 opisana su detaljna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja u okviru Izvedbenog projekta „Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiš“ (Arbanas i dr., 2016) izrađenog za 22 mikrolokacije, odnosno 22 stijenska blokova ili grupe stijenskih blokova (slika 3.7). Na slici 7.2 prikazana je usporedba jedne od mikrolokacija s utvrđenim potencijalno nestabilnih blokova tijekom izrade spomenutog Izvedbenog projekta (slika 7.2a) s modelom podložnosti stijenskih kosina odronima, dobivenog interpolacijom rezultata automatiziranih analiza (slika 7.2c). Na slikama 7.2b i 7.2c prikazani su potencijalno nestabilni stijenski blokovi, prethodno i novo utvrđeni te su za pojedinačne lokaciju stijenskih blokova iskazane maksimalne vrijednosti *IPO*-a. Maksimalne vrijednosti *IPO*-a najčešće se nalaze u podnožju promatranog stijenskog bloka (slika 7.1b i c), a ukazuju na jedan ili više diskontinuiteta duž kojih bi moglo doći do sloma određenog stijenskog bloka. Osim što su visoke vrijednosti podložnosti (56-78%) utvrđene na lokacijama prethodno identificiranih stijenskih blokova, identificirani su i dodatni potencijalno nestabilni blokovi koji su na slikama 7.1b i c prikazani zasebnim oznakama radi lakše usporedbe. Maksimalne vrijednosti *IPO*-a na tim područjima su između 74-100%. Navedeni primjer potvrđuje da je model podložnosti stijenskih kosina odronima valjan, a osim potvrde već prethodno poznatih potencijalno nestabilnih stijenskih blokova, model ukazuje na niz drugih blokova koji do tada nisu bili identificirani kao potencijalno nestabilni.





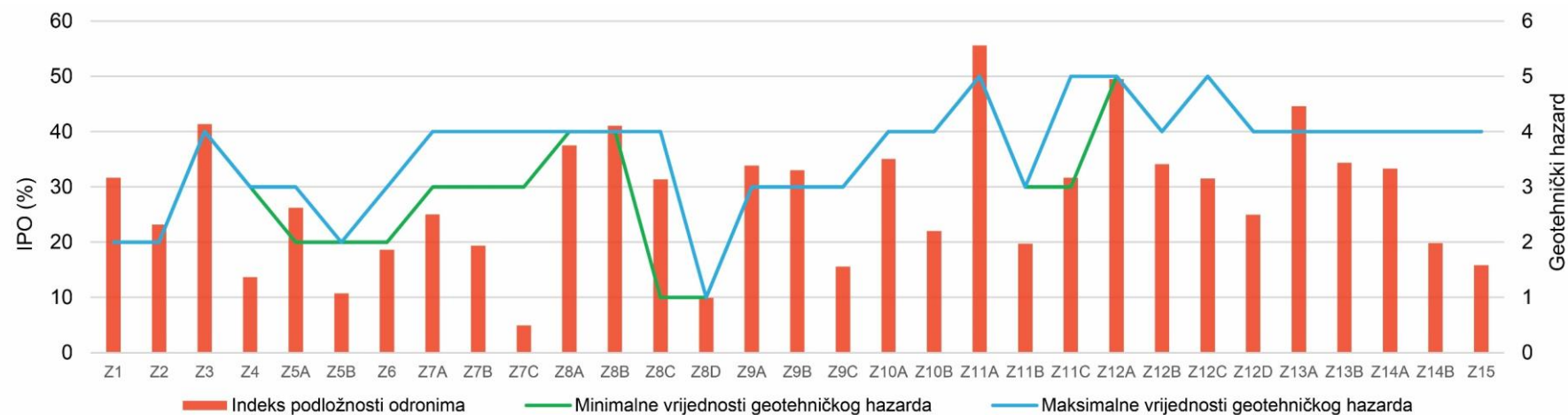
**Slika 7.2.** Usporedba: a) prethodno utvrđenih potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase iz Izvedbenog projekta (Arbanas i dr., 2016) te istih lokacija na b) visoko-rezolucijskom modelu stijenskih kosina iznad grada Omiša te c) na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima iskazanim s vrijednostima *IPO*-a, pri čemu toplije bolje označavaju veću podložnost stijenskih kosina odronima. Uz prikaz prethodno utvrđenih potencijalno nestabilnih stijenskih blokova, na temelju visokih vrijednosti podložnosti izdvojeno je nekoliko dodatnih primjera potencijalno nestabilnih blokova.

U poglavlju 3.2.2 opisana su detaljna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja provedena u okviru Izvedbenog projekta sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59 – Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015). U navedenom projektu utvrđene su 24 inženjerskogeološke/geotehničke zone od kojih su neke podijeljene na zasjek i prirodne kosine. Za ove zone je procjenjivan stupanj podložnosti nestabilnostima na temelju terenskog kartiranja i daljinskih istraživanja, uzimajući u obzir trošnost stijenske mase, pojavu mogućih vrsta slomova te kut nagiba i visinu stijenskih kosina. Podložnost nestabilnostima podijeljena je u tri opisne kategorije, tj. na zonu srednjeg, visokog i vrlo visokog stupnja podložnosti (oznake 1-3). Također, za iste zone određen je i geotehnički hazard na temelju geostatičkih analiza, pri čemu je geotehnički hazard svrstan u pet kategorija (vrlo nizak, nizak, srednji, visok i vrlo visok). Inženjerskogeološke/geotehničke zone iz navedenog projekta preklapljene su s 32 zone (uključujući i podzone) utvrđene u ovom radu, a njihova usporedba prikazana je u tablici 7.2 te na slikama 7.3 i 7.4. Prosječne vrijednosti *IPO*-a za svaku inženjerskogeološku zonu uspoređivane su s kategorijama podložnosti i geotehničkog hazarda iz Izvedbenog projekta. Iako se nazivi i broj zona ne podudaraju u cijelosti, većina granica zona se nalazi na istom mjestu, a na mjestima gdje su granice zona različite, prosječne vrijednosti *IPO*-a uspoređivane su s rasponima kategorija podložnosti i geotehničkog hazarda (tablica 7.2 te slike 7.3 i 7.4). Iz slike 7.3 jasno se može vidjeti da se prosječne vrijednosti *IPO*-a općenito dobro poklapaju s kategorijama podložnosti iz Izvedbenog projekta osim zona Z11B i Z15. Razlika u zoni Z11B nastala je zbog detaljnije podjela na zone u odnosu na Izvedbeni projekt. U slučaju zone Z15 glavni je razlog taj što su u doktorskom istraživanju utvrđene veće vrijednosti razmaka i postojanosti u ovoj zoni nego u okolnim zonama, čime je smanjena vjerojatnost pojave određenog diskontinuiteta ili presječnice diskontinuiteta, a samim time i vrijednosti indeksa podložnosti (poglavlje 4.6). S obzirom na navedeno, podložnost stijenskih kosina odronima prati trend stupnjeva podložnosti procijenjenim izvedbenim projektom, a razlike su posljedica detaljnijih analiza provedenih u ovom istraživanju. Vrlo zanimljiva je usporedba prosječnih vrijednosti *IPO*-a s raspodjelom kategorija geotehničkog hazarda po inženjerskogeološkim zonama (slika 7.3), gdje najviše prosječne vrijednosti *IPO*-a odgovaraju najvišem stupnju geotehničkog hazarda. U većini zona trend porasta ili smanjenja prosječne vrijednosti *IPO*-a odgovara porastu ili smanjenju stupnja geotehničkog hazarda (slika 7.3), izuzev inženjerskogeoloških zona Z7C (u kojoj su podložnosti obrnuto proporcionalne geotehničkom hazardu) te Z14 i Z15 koje predstavljaju prirodne stijenske kosine, a u kojima je podložnost stijenskih kosina na odrone manja u odnosu na geotehnički hazard zbog manje trošnosti stijenske mase te povoljnijih geometrijskih značajki diskontinuiteta u odnosu na okolne zone.





**Slika 7.3.** Prikaz usporedbe prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području Brljan te vrijednosti podložnosti stijenskih kosina utvrđenih u Izvedbenom projektu sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015).



**Slika 7.4.** Prikaz usporedbe prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima za svaku inženjerskogeološku zonu na pilot području Brljan te vrijednosti geotehničkog hazarda na stijenskih kosina utvrđenih u Izvedbenom projektu sanacije pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke (Arbanas i dr., 2015).

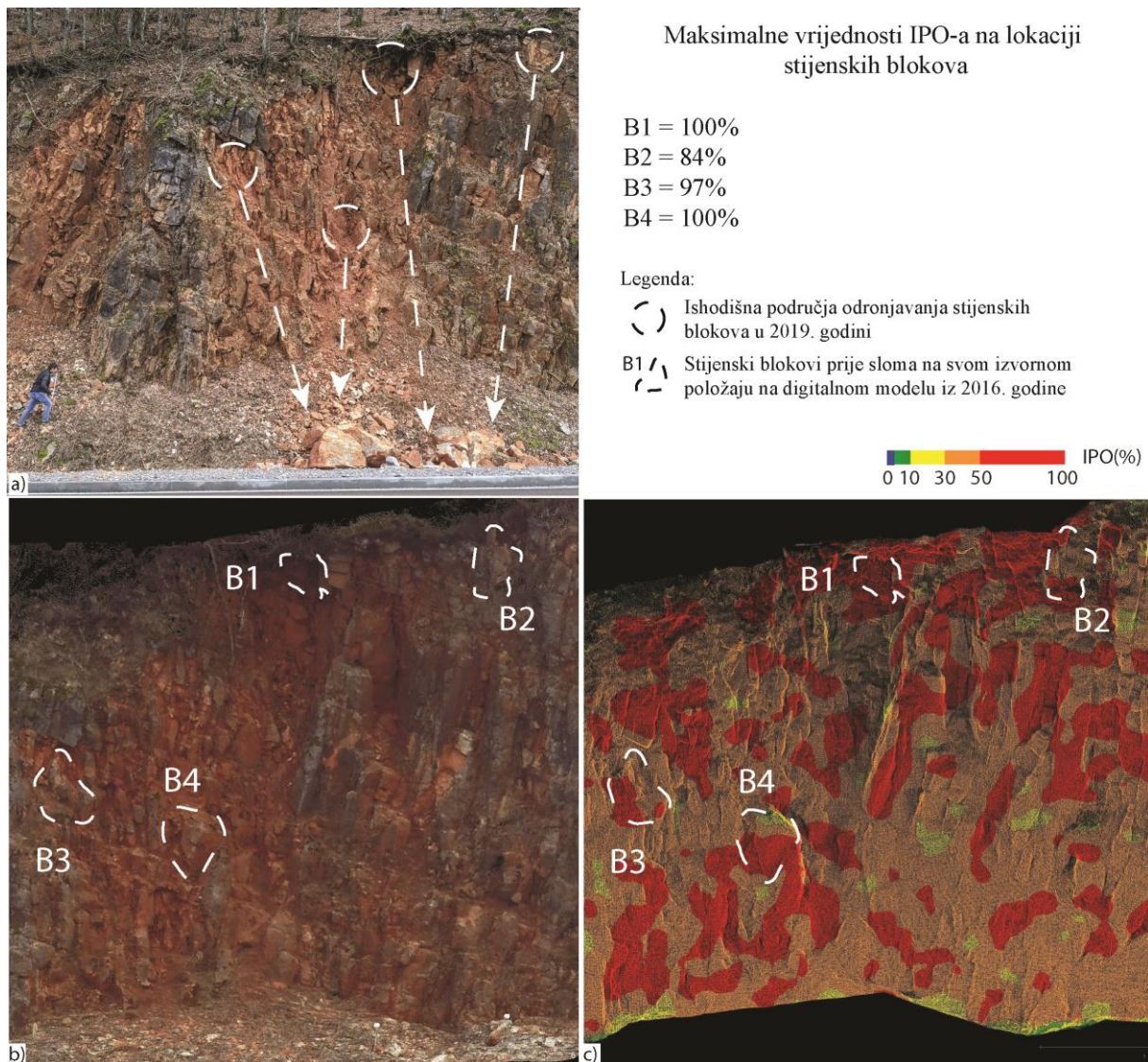
**Tablica 7.2.** Usporedba inženjerskogeoloških zona iz doktorskog istraživanja te inženjerskogeoloških/geotehničkih zona definiranih u Izvedbenom projektu „Sanacija pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59 – Most preko rijeke Krke“ (Arbanas i dr., 2015) s prikazom prosječnih vrijednosti IPO-a te zonama podložnosti nestabilnosti kosina i kategorijama geotehničkog hazarda.

IG zona	IPO (%)	Inženjerskogeološka/geotehnička zona	Zona podložnosti nestabilnosti kosina	Geotehnički hazard
Z1	31,7	I - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	nizak (2)
Z2	23,2	I - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	nizak (2)
		II - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	nizak (2)
Z3	41,3	III - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
		IV - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
		V - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
		VI - zasjek;	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
Z4	13,7	VI - prirodni pokos	zona srednje podložnosti (1)	srednji (3)
		VII - prirodni pokos	zona srednje podložnosti (1)	srednji (3)
Z5A	26,2	VII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
		VIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	nizak (2)
Z5B	10,7	VIII - gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	nizak (2)
Z6	18,6	VIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	nizak (2)
		IX - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
Z7A	25,0	X - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
		XI - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
		XII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z7B	19,4	X- litica dijelom u prevjesu	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
		XI- litica dijelom u prevjesu	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z7C	4,9	X - gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	srednji (3)
		XI - gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	visok (4)
		XII - gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	visok (4)
Z8A	37,5	XIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z8B	41,0	XIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z8C	31,3	XIV - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	vrlo nizak (1)
		XV- zasjek; središnji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2) - zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z8D	9,9	XIII- središnji i gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	vrlo nizak (1)
		XIV- središnji i gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1) - zona visoke podložnosti (2)	vrlo nizak (1)
		XV - gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	vrlo nizak (1)
Z9A	33,8	XVI - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
Z9B	33,0	XVI- središnji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	srednji (3)
Z9C	15,6	XVI - gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	srednji (3)
Z10A	35,0	XVII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
		XVIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z10B	22,0	XVII- središnji i gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	visok (4)
		XVIII- središnji i gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1) - zona visoke podložnosti (2)	visok (4)

IG zona	IPO (%)	Inženjerskogeološka/geotehnička zona	Zona podložnosti nestabilnosti kosina	Geotehnički hazard
Z11A	55,6	XIX - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	vrlo visok (5)
Z11B	19,7	XX - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	srednji (3)
Z11C	31,7	XIX- središnji i gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	vrlo visok (5)
		XX- gornji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1) - zona visoke podložnosti (2)	srednji (3)
Z12A	49,5	XXI- donji dio pokosa	zona vrlo visoke podložnosti (3)	vrlo visok (5)
Z12B	34,1	XXII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z12C	31,5	XXI - središnji i gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	vrlo visok (5)
Z12D	24,9	XXII - središnji i gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	visok (4)
Z13A	44,6	XXIII - zasjek	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z13B	34,3	XXIII - središnji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1) - zona visoke podložnosti (2)	visok (4)
Z14A	33,3	XXIV - donji dio pokosa	zona vrlo visoke podložnosti (3)	visok (4)
Z14B	19,8	XXIV - središnji dio pokosa	zona srednje podložnosti (1)	visok (4)
Z15	15,8	XXIII - gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	visok (4)
		XXIV - gornji dio pokosa	zona visoke podložnosti (2)	visok (4)

Također, u istom Izvedbenom projektu inženjerskogeološke/geotehničke zone su rangirane s obzirom na prioritet izvođenja sanacije pri čemu su inženjerskogeološke/geotehničke zone XIX i XXI procijenjene kao prioritetne (Arbanas i dr., 2015). Navedene zone odgovaraju inženjerskogeološkim zonama Z11 i Z12 u kojima je utvrđena najveća gustoća visokih vrijednosti *IPO*-a (prilog 2/3) te najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a (slika 7.3). U okviru poglavlja 6.2, za obje zone je navedeno da su prioritetne za daljnje istraživanje i sanaciju. Iz navedenog proizlazi da je podložnost stijenskih kosina odronima za pilot području na lokaciji Brljan utvrđena u ovom radu u skladu s prethodnim detaljnim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima.

Metodologija i rezultati procjene podložnosti stijenskih kosina odronima također su verificirani na pilot područja stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak. Visoko-rezolucijski digitalni model zasjeka Špičunak snimljen je 2016. godine, a zatim je tijekom 2019. godine došlo do odronjavanja blokova stijenske mase u jednom dijelu stijenskog zasjeka (slika 7.5a). Ovime je omogućena usporedba lokacije blokova stijenske mase prije sloma s modelom podložnosti stijenskih kosina odronima (slike 7.5b i c). Svi blokovi stijenske mase nalazili su se u zonama visoke do vrlo visoke podložnosti (narančasto i crveno obojani na slici 7.5c). Vrijednosti *IPO*-a na lokaciji stijenskih blokova iznosili su od 45-100%, a najviše vrijednosti *IPO*-a nalaze se duž diskontinuiteta u bazi i u boku stijenskog bloka, po kojima je došlo do sloma.



**Slika 7.5.** Usporedba: a) ishodišnih područja odronjavanja stijenskih blokova iz 2019. godine sa istim lokacijama na b) visoko-rezolucijskom modelu stijenskog zasjeke na lokaciji Špičunak, izrađenom 2016. godine s blokovima stijenske mase prije odronjavanja te c) istih lokacija na modelu podložnosti stijenskih kosina odronima iskazanim s vrijednostima *IPO*-a, pri čemu toplije bolje označavaju veću podložnost stijenskih kosina odronima.

Uz navedeno, za ova četiri bloka proveden je proračun pojednostavljenog faktora sigurnosti za klinasti slom, u kojem nije uzet u obzir utjecaj vode te je pretpostavljeno da je kohezija jednaka nuli i da je neovisan o dimenzijama kosine (Wyllie i Mah, 2005). Prema istim autorima, izračun pojednostavljenog faktora sigurnosti na ovaj način omogućava brzu provjeru stabilnosti stijenskih kosina u preliminarnim istraživanjima, a koja se temelji na orijentaciji diskontinuiteta koji tvore klin. Orijentacije diskontinuiteta koji su tvorili klinove na analiziranim blokovima te prosječne orijentacije kosine na tom dijelu digitalnog modela prikazane su u tablici 7.3. Proračun faktora sigurnosti proveden je u računalnom programu *Swedge* pri čemu je korišten *Mohr-Coulombov* model proračuna (Wyllie i Mah, 2005; Rocscience Inc., 2006).



Osim orijentacije diskontinuiteta i kosine, ulazni parametri bili su kut unutarnjeg trenja (pretpostavljeno  $30^\circ$  za sve diskontinuitete), kohezija (postavljeno 0 MPa), uz pretpostavljene suhe uvjete na kosini. Izračunate vrijednosti faktora sigurnosti u rasponu su od 1,07-1,22 pri čemu su najniže vrijednosti faktora sigurnosti imaju blokovi oko kojih je utvrđena i najveća vrijednost podložnosti stijenskih kosina odronima (tablica 7.3). Dobivene vrijednosti faktora sigurnosti su neposredno iznad granice stabilnosti te i najmanje negativne promjene u uvjetima na kosini mogu uzrokovati pad vrijednosti faktora sigurnosti ispod 1. Također, prema Wyllie i Mah (2005) ovakve vrijednosti faktora sigurnosti ukazuju na potencijalno nestabilne blokove s obzirom na metodu proračuna iako su vrijednosti veće od 1. Prema autorima, pojednostavljeni faktor sigurnosti mora biti veći od 2 da bi se kosina smatrala stabilnom jer u tom slučaju niti najgora kombinacija parametara koji negativno utječu na stabilnost kosine neće dovesti do sloma (maksimalni negativni utjecaj umanjuje faktor sigurnosti za 50%).

**Tablica 7.3.** Prikaz prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti klinastom slomu ( $\overline{IP_{KL}}$ ), indeksa podložnosti odronima ( $\overline{IPO}$ ) te vrijednosti korištenih parametara i izračunatog faktora sigurnosti za stijenske blokove B1-B4.

Stijenski blok	Vrsta sloma	$\overline{IP_{KL}}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)	Orijentacija diskontinuiteti		Orijentacija kosine	Pretpostavljeni kut unutarnjeg trenja	<i>FS</i>
B1	Klinasti slom	100	100	230/82	92/66	181/65	30	<b>1,07</b>
B2	Klinasti slom	80	84	250/82	112/60	146/85	30	<b>1,22</b>
B3	Klinasti slom	93	97	240/37	180/85	311/73	30	<b>1,16</b>
B4	Klinasti slom	100	100	32/82	333/38	307/75	30	<b>1,13</b>

S obzirom na provedene verifikacije modela podložnosti proizlazi da metoda za procjenu stijenskih kosina odronima prikazana u ovom radu daje rezultate koji se mogu primjenjivati u inženjerstvu kao jedna od metoda istraživanja stijenskih kosina. Usporedba rezultata metode za izradu modela podložnosti sa rezultatima detaljnijih inženjerskogeoloških/geotehničkih istraživanja pokazala je da se modeli podložnosti mogu koristiti u preliminarnim istraživanjima za procjenu i rangiranje ili zoniranje opasnosti od odrona, a također i u geotehničkim istraživanjima za utvrđivanje lokacija ili zona nestabilnih blokova koje je potrebno detaljnije istražiti. Rezultati ove metode za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima identificiraju nepovoljno orijentirane diskontinuitete, a time ukazuju i na potencijalno nestabilne blokove. Osim toga, zone veće gustoće visokih vrijednosti indeksa podložnosti odronima kao i prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima po inženjerskogeološkim zonama ukazuju na prioritete za sanaciju odrona ili druge mjere ublažavanja hazarda i rizika od odrona.

## 8. DISKUSIJA

Za pilot područja stijenskih kosina iznad grada Omiša, stijenskih kosina na lokaciji Brljan u Nacionalnom parku Krka te stijenskih zasjeka na lokacijama Špičunak i Lokve u Gorskom kotaru izrađeni su modeli podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju rezultata automatiziranih analiza provedenih pomoću algoritma *ROCKS*, izrađenog u programskom jeziku *MATLAB*. Ulazni podaci za automatiziranu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima prikupljeni su po kvazi-homogenim inženjerskogeološkim zonama, a činili su ih podaci o geometrijskim značajkama stijenskih kosina, značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Podaci za analize izvedeni su iz 3D digitalnih modela visoke razlučivosti i preciznosti izrađenih na osnovi rezultata terestričkog laserskog skeniranja i fotogrametrijskog snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice. Pilot područja su obuhvatila prirodne i umjetne stijenske kosine s različitim strukturno-geološkim značajkama i različitim stupnjevima trošnosti stijenske mase, što je omogućilo testiranje osmišljene metode za kvantitativnu procjenu podložnosti s obzirom na različite inženjerskogeološke uvjete na stijenskim kosinama.

Snimanje pilot područja stijenskih kosina iznad grada Omiša terestričkim laserskim skenerom i bespilotnom letjelicom provedeno je 2016. godine u okviru izrade projekta „Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiš“ (Arbanas i dr., 2016). Navedeni projekt imao je za cilj ublažavanje hazarda i rizika od odrona mjerama sanacije stijenskih kosina s obzirom da su grad Omiš i njegova povijesna jezgra ugroženi odronima zbog svoje specifične lokacije u podnožju strmih stijenskih kosina Omiške Dinare (Sečanj i dr., 2017, 2019; Arbanas i dr., 2019). Prema „Procjeni ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša – Grad Omiš“ (Pehar i dr., 2014) najveću opasnost za ljude, materijalna dobra i infrastrukturu predstavljaju odroni sa sjeverozapadnog dijela Omiške Dinare i njezinih južnih padina u čijem podnožju se nalazi stara gradska jezgra. Terestričko lasersko skeniranje i snimanje iz zraka bespilotnom letjelicom pilot područja stijenskih kosina koje se nalaze uz županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Okalj, iznad jezera Brljan u Nacionalnom parku Krka, provedeno je u svibnju 2015. godine za potrebe izrade Izvedbenog projekta „Sanacija pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59 – Most preko rijeke Krke“ (Arbanas i dr., 2015). Županijska cesta ŽC-6055 uz koju se nalaze istraživane stijenske kosine spaja naselja Kistanje i Okalj, a više puta je bila zatvorena zbog odrona koji su onemogućili dnevnu migraciju lokalnog stanovništva i turista koji obilaze NP Krka, pri čemu je kolnička konstrukcija više puta bila oštećena i sanirana. Terestričko lasersko skeniranje stijenskog

zasjeka na lokaciji Špičunak uz državnu cestu DC-3, dionica Delnice-Rogozno, na spoju s nerazvrstanom cestom koja vodi prema Lokvarskom jezeru u Gorskom kotaru, provedeno je u svrhu izrade diplomskog rada „Primjena tehnologije oblaka točaka za projektiranje sanacije stijenske kosine Špičunak“ (Đikić, 2016). Ovaj zasjek izveden je za potrebe izgradnje vrlo frekventne prometnice, subvertikalna je, mjestimično u prevjesu, a stijenska masa je visokog stupnja trošnosti zbog čega često dolazi do odronjavanja. Terestričko lasersko skeniranje istraživanog stijenskog zasjeka u naselju Lokve u Gorskom kotaru, koji se nalazi uz lokalnu cestu koja vodi od centra mjesta prema naselju Homer i Lokvarskom jezeru, provedeno je u prosincu 2019. godine isključivo za potrebe ovog doktorskog rada. Za razliku tri pilot područja izgrađenih od karbonatnih stijena, ovaj stijenski zasjek izgrađuje izmjena klastičnih naslaga i dolomita. Upravo radi drugačije geološke građe, odnosno izmjene litoloških članova i slojevitosti decimetarskog reda veličine, ovo područje je izabrano za razvoj i testiranje metodologije za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu. Na temelju provedenih geodetskih snimanja i izvedenih visoko-rezolucijskih digitalnih modela kosina za sva četiri pilot područja, bilo je moguće identificirati i utvrditi geometrijske značajke stijenskih kosina, značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta, neovisno o veličini područja istraživanja.

Identifikacija i određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta primjenom daljinskih istraživanja uobičajen je postupak prilikom istraživanja stijenske mase jer omogućava pristup svim dijelovima kosine, provodi vrlo precizne izmjere, omogućava trajni zapis podataka u vremenu te automatizaciju određenih procesa putem računalnih programa i algoritama. Većina autora koristi isključivo TLS za snimanje i istraživanje stijenskih kosina (npr. Slob i dr., 2005; Gigli i Casagli, 2011; Sturzenegger i dr., 2011; Lato i dr., 2012; Riquelme i dr., 2014; Matasci i dr., 2015) dok mali broj autora koristi kombinaciju TLS-a i fotogrametrijske metode snimanja iz zraka pomoću bespilotne letjelice koja je korištena u istraživanjima za potrebe izrade ovog rada. Kombinacija ovih metoda pokazala se korisnom s obzirom da jedna metoda dopunjuje drugu kompenzirajući nedostatke (Sturzenegger i dr., 2007; Sturzenegger i Stead, 2009). Trenutno je dostupno više komercijalnih i besplatnih računalnih programa u kojima su razvijene metode i algoritmi za određivanje geometrijskih značajki diskontinuiteta iz modela površine stijenskih kosina i modela oblaka točaka kao što su *DSE* (Riquelme i dr., 2014, 2015 i 2017), *CloudCompare* (CloudCompare, 2017) i *Split-FX* (Split Engineering LCC, 2017). Geometrijske značajke diskontinuiteta određuju se često ručno, izravno iz modela površina stijenskih kosina ili iz oblaka točaka (npr. Jaboyedoff i dr., 2004; Abellan i dr., 2006; Sturzenegger i Stead, 2009; Lato i dr., 2012; Cantarella i dr., 2016). U posljednje vrijeme sve

češće se primjenjuju algoritmi za polu-automatizirano i automatizirano određivanje orijentacije diskontinuiteta, grupiranje diskontinuiteta u setove te utvrđivanje vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta, a koji su sadržani u komercijalnim i besplatnim računalnim programima te algoritmima (npr. Slob i dr., 2005; Gigli i Casagli, 2011; Riquelme i dr., 2014; Dewez i dr., 2016; Riquelme i dr., 2018). Iz relevantne literature poznate su i vizualne i polu-automatizirane metode određivanja vrste stijene iz digitalnih modela oblaka točaka na temelju vrijednosti intenziteta lasera (npr. Matasci i dr., 2015) i metodom strojnog učenja na osnovi prepoznavanja boja koje pripadaju određenoj stijeni iz digitalnih modela dobivenih fotogrametrijskom metodom snimanja iz zraka bespilotnom letjelicom (Beretta i dr., 2019).

Ulazne podatke za procjene podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu primarno čine orijentacija stijenskih kosina i geometrijske značajke diskontinuiteta. Orijehtacija stijenskih kosina određuje se iz digitalnih modela površina stijenskih kosina ili oblaka točaka, dok se od geometrijskih značajki diskontinuiteta koriste ili isključivo orijentacija diskontinuiteta (Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013; Gigli i dr., 2014) ili orijentacija setova diskontinuiteta te vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta (Matasci i dr., 2017). Prva grupa autora provodi prostorne kinematičke analize na temelju orijentacije svih identificiranih diskontinuiteta i orijentacija kosina izvedenih iz digitalnih modela, a podložnost iskazuje Kinematičkim indeksom hazarda u rasponu od 0-1 za svaku vrstu sloma stijenske mase ili maksimalnom vrijednosti indeksnog pokazatelja bez obzira na vrstu sloma. Vrijednosti podložnosti stijenskih kosina odronima dobivene na ovaj način predstavljaju gustoću pojava svih mogućih slomova na jednoj plohi ili točki digitalnog modela, ne uzimajući u obzir mogu li se određeni diskontinuiteti pojaviti na nekom dijelu istraživane stijenske kosine i da li je moguće da se diskontinuiteti sijeku i tvore presječnicu na tom dijelu kosine. Druga skupina autora provodi kinematičke analize s obzirom na utvrđenu orijentaciju setova diskontinuiteta bez obzira gdje se nalaze na stijenskoj kosini, pritom ne uzimajući u obzir kutnu varijaciju diskontinuiteta koji mogu pripadati tom setu te orijentaciju vektora normala svih točaka u modelu. Podložnost stijenskih kosina odronima iskazuju indeksima podložnosti slomu za svaku pojedinu vrstu sloma za one točke digitalnog modela gdje su kinematičke analize utvrdile da su geometrijski uvjeti za nastanak sloma mogući. U izračun indeksnih pokazatelja uključuju kut nagiba kosine te broj diskontinuiteta i presječnica na određenom dijelu stijenske kosine, izračunatih iz vrijednosti orijentacije seta, razmaka i postojanosti diskontinuiteta. Vrijednosti indeksnih pokazatelja, ovisno o vrsti sloma, su u rasponu su od 0-∞. Ukupna podložnost stijenskih kosina odronima iskazana je indeksom podložnosti slomu koja je jednaka zbroju svih indeksnih pokazatelja pri čemu gornja granica podložnosti, odnosno njezin maksimum nije



definiran. Autori obje metode navode da su određeni dijelovi izračuna prostornih kinematičkih analiza i izračuna indeksnih pokazatelja automatizirani, ali u objavljenim radovima ne opisuju i ne navode na koji način je to provedeno.

Identifikacija diskontinuiteta i određivanje njihove orijentacije iz digitalnih modela oblaka točaka u ovom radu provedena je ručnom metodom pomoću alata *Compass* (Thiele i dr., 2017). Mjereni diskontinuiteti grupirani su u setove na osnovni algoritma Spektralnog grupiranja (Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006), koji je dijelom modificiran i automatiziran pomoću napisanog algoritma u programskom jeziku *MATLAB*, a istim automatiziranim algoritmom za svaki set diskontinuiteta računati su parametri *Fisherove* statistike (Fisher, 1953). Vrijednosti razmaka za svaki set diskontinuiteta određeni su statističkim analizama raspodjela normalnih razmaka (Harr, 1977; Priest i Hudson, 1981; Priest, 1993), a vrijednosti postojanosti diskontinuiteta metodom topografskog kružnog prozora (Zhang i Einstein, 1998; Sturzenegger i dr. 2011) i izravnim mjerenjem na digitalnom modelu. Stupanj trošnosti stijenske mase procjenjivan je vizualnom metodom prema terenskoj klasifikaciji (USBR, 2001), pri čemu su izdvajani dijelovi modela oblaka točaka stijenskih kosina s različitim stupnjem trošnosti stijenske mase. Vrsta stijene na stijenskom zasjeku Lokve određivana je polu-automatiziranim metodom na temelju statističke analize vrijednosti intenziteta povratnog signala lasera (modificirana i nadograđena metoda prema Matasci i dr., 2015).

Na temelju svih utvrđenih značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta te raspodjele vrijednosti orijentacija stijenskih kosina, istraživane stijenske kosine podijeljene su u kvazi-homogene inženjerskogeološke zone. Svakoj zoni pridružene su pripadajuće značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta. Analizom orijentacije setova diskontinuiteta te pripadajućih vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta, za svaku inženjerskogeološku zonu utvrđivana je vjerojatnost pojave određenog seta diskontinuiteta i presječnica setova diskontinuiteta te svih njihovih kombinacija za svaku plohu 3D digitalnog modela (modificirana metoda prema Jaboyedoff i dr., 2004). Na osnovu prostorne raspodjele orijentacija 3D ploha digitalnog modela te identificiranih setova diskontinuiteta i njima pripadajućih diskontinuiteta, provedene su prostorne kinematičke analize (Markland, 1972; Goodman i Bray, 1976; Hoek i Bray, 1981; Hudson i Harrison 1997) koje su dodatno modificirane na način da analiziraju i stabilnost stijenskih kosina u prevjesu. Uz provedene prostorne kinematičke analize, računati su i modificirani kinematički indeksi hazarda (modificirano prema Casagli i Pini, 1993) u svrhu utvrđivanja vjerojatnosti da će diskontinuiteti iz određenog seta ili iz određene kombinacije setova koji tvore presječnice, na određenom dijelu stijenske kosine zadovoljiti kinematičke uvjete za nastanak sloma.

Podložnost stijenskih kosine odronima iskazana je s novo osmišljenim indeksnim pokazateljima za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem. Indeksni pokazatelji računati su na temelju sljedećih vjerojatnosti unija: 1) vjerojatnosti pojave određenog diskontinuiteta i/ili presječnice na određenom dijelu kosine; 2) vjerojatnosti da će diskontinuiteti iz određenog seta ili kombinacije diskontinuiteta iz određene kombinacije setova koji tvore presječnice, na određenom dijelu stijenske kosine zadovoljiti kinematičke uvjete za nastanak sloma; i 3) kuta nagiba seta diskontinuiteta s čijim porastom je veća vjerojatnost za nastanak sloma. Kvantitativna procjena podložnosti stijenskih kosina odronima iskazana je indeksnim pokazateljem dobivenim izračunom vjerojatnosti unije za planarni i klinasti slom te slom prevrtanjem. Cijeli postupak određivanja vjerojatnosti, prostornih kinematičkih analiza, izračuna modificiranih kinematičkih indeksa hazarda i izračuna indeksnih pokazatelja u potpunosti je automatiziran algoritmom *ROCKS*, izrađenim tijekom istraživanja za potrebe izrade doktorskog rada. Modeli podložnosti za različite vrste sloma te modeli podložnosti stijenskih kosina odronima dobiveni su interpolacijom vrijednosti indeksnih pokazatelja i prikazani su na digitalnim modelima istraživanih stijenskih kosina.

### **8.1. Značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta određene iz digitalnih modela stijenskih kosina**

Prilikom istraživanja, u svrhu pronalaska optimalne i učinkovite metode za identifikaciju diskontinuiteta na digitalnim modelima stijenskih kosina, ispitivane su mogućnosti jedne metode polu-automatizirane identifikacije diskontinuiteta i setova diskontinuiteta iz digitalnih modela površina stijenskih kosina korištenjem komercijalnog računalnog programa *Split-FX* (Split Engineering LCC, 2017) te dvije metode polu-automatizirane metode identifikacije diskontinuiteta i setova diskontinuiteta iz digitalnih modela oblaka točaka u besplatnim računalnim programima *DSE* (Riquelme i dr., 2014, 2015 i 2017) i *CloudCompare* (CloudCompare, 2017). Ove metode daju realne i relativno precizne rezultate na idealnim modelima stijenske mase s dva ili tri seta diskontinuiteta. Međutim, primjena u okršenim karbonatnim stijenama s tri ili više setova diskontinuiteta ili na stijenskim kosinama gdje je prisutan veliki broj diskontinuiteta koji su iskazani samo sa svojim tragovima na kosini, čine rezultate polu-automatiziranih metoda izrazito nepreciznima. Pritom znatno naglašavaju one diskontinuitete koji su jasno vidljivi, a podcjenjuju one koji su slabije izraženi. Također, ove metode rezultiraju s jako velikom količinom šumova koji najčešće predstavljaju površinu stijenske kosine, ali ne i plohe diskontinuiteta, što u konačnici dovodi do neprecizne i nerealne identifikacije setova diskontinuiteta. U svrhu pokušaja pronalaska optimalnih parametara polu-

automatiziranih metoda, na istraživanim stijenskim kosina identificirani su svi diskontinuiteti kao i setovi diskontinuiteta ručnom metodom pomoću alata *Compass* (Thiele i dr., 2017). Iterativnim postupcima mijenjani su parametri polu-automatiziranih metoda u svrhu približavanja rezultata onima koji su stvarno i precizno utvrđeni ručnom metodom. Određeni su optimalni parametri, ali rezultati polu-automatiziranih metoda su i tada pokazivali znatna odstupanja te su odbačeni (poglavlje 4.3.2). S obzirom na to odlučeno je da će se identifikacija diskontinuiteta na digitalnim modelima stijenskih kosina za sva pilot područja provesti ručnom metodom alatom *Compass* (Thiele i dr., 2017). Iako je metoda znatno sporija od polu-automatiziranih metoda, daje znatno preciznije rezultate. Ovom metodom na svim istraživanim stijenskim kosinama identificirano je ukupno 5122 diskontinuiteta za koje je određena orijentacija, za što je bilo potrebno oko četiri dana rada. Identifikacija diskontinuiteta na ovaj način iziskivala je razumijevanje strukturno-geološke građe istraživanog područja te potrebno iskustvo istraživača prilikom sustavnog mjerenja kako bi se izbjegla identifikacija, odnosno dupliranje istih ploha diskontinuiteta. Također, ručnom metodom bilo je moguće izdvojiti i sve one diskontinuitete koji su vidljivi samo kao tragovi ravnina na površini stijenskih kosina.

U svrhu grupiranja diskontinuiteta u setove, u početku istraživanja korištena je metoda konturnih dijagrama koja se pokazala vremenski zahtjevnom i djelomično podložnom subjektivnosti i previdima. U svrhu optimiziranja grupiranja mjerenih diskontinuiteta u setove korištena je metoda spektralnog grupiranja (Jimenez-Rodriguez i Sitar, 2006), koja je automatizirana napisanim algoritmom u programskom jeziku *MATLAB*, pri čemu je dijelom modificirana metoda spektralnog grupiranja. Jedna od inačica metode spektralnog grupiranja postoji kao ugrađena funkcija u *MATLAB*-u, ali je za potrebe ovog rada modificirana u svrhu izdvajanja diskontinuiteta koji ne pripadaju niti jednom setu na način da je *k-means* grupiranje, koje se provodi u višedimenzionalnom prostoru spektralnog grupiranja, zamijenjeno s *fuzzy c-means* grupiranjem razvijenim od strane Hammah i Curran (1998). Ovom modifikacijom dobivene su vrijednosti težina pripadnosti svakog podatka određenoj grupi što je omogućilo izdvajanje podataka s malim vrijednostima težina pripadnosti određenim setovima, odnosno diskontinuiteta udaljenijih od centara grupa. Ovo u konačnici povećava preciznost određivanja vrijednosti orijentacije određenog seta diskontinuiteta kao i svih diskontinuiteta koji mu pripadaju. Osim grupiranja diskontinuiteta u setove, ovim algoritmom omogućen je i automatizirani izračun svih parametara *Fisherove* statistike (Fisher, 1953), nužnih za validaciju utvrđenih setova diskontinuiteta te odabir diskontinuiteta iz setova koji će biti korišteni prilikom kinematičkih analiza. Za procjenu broja grupa, tj. broja setova diskontinuiteta korištena su i tri indeksa za procjenu i provjeru broja grupa, *Sillhouette* (Rouseeuw, 1987), *Fukuyama-Sugeno*

(Fukuyama i Sugeno, 1989) i *Xie-Beni* (Xie i Beni, 1991) indeks, koji su iterativno računati za tri do devet grupa kako bi se odredio optimalan broj grupa koji je predstavljan s najvećom ili najmanjom vrijednosti indeksa. Iako su svi indeksi za većinu analiza pokazali stvaran broj setova diskontinuiteta, za nekoliko kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona su precijenili ili podcijenili broj grupa. To je utvrđeno prilikom analize razmaka diskontinuiteta u kojoj se ispostavilo da određeni set diskontinuiteta ne postoji ili da jedan set diskontinuiteta predstavlja zapravo dva seta čiji se diskontinuiteti međusobno sijeku. U tim slučajevima analiza spektralnog grupiranja i identifikacija setova diskontinuiteta je ponovljena s ispravnim brojem setova diskontinuiteta koji je ručno unesen. Primjenom ovog algoritma izvršena je analiza na 50 skupova podataka s vrijednostima orijentacije diskontinuiteta i time je potpuno automatizirano izrađeno 50 stereografskih projekcija s prikazom mjerenih podataka i utvrđenih setova diskontinuiteta. Primjenom ove metode i njezine automatizacije, vrijeme potrebno za identifikaciju setova te prikaz mjerenih podataka skraćeno je s nekoliko dana na nekoliko minuta, pri čemu je maksimalno smanjenja subjektivnost prilikom određivanja setova diskontinuiteta i njima pripadajućih diskontinuiteta. Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša identificirano je ukupno osam različitih setova diskontinuiteta (tri do pet setova diskontinuiteta po inženjerskogeološkoj zoni). Orijetacija pet setova odgovara lokalnoj strukturno-geološkoj građi, tj. dva su povezana s orijentacijom lokalnih rasjeda koji su jasno izraženi u morfologiji terena, dok dva čine njihove konjugirane parove, a peti set diskontinuiteta označava slojevitost karbonatnih naslaga. Geneza preostalih setova i njima pripadajućih diskontinuiteta nije u potpunosti jasna, a pretpostavlja se da su vezani uz različite faze stanja naprezanja u Dinaridima. Na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan ukupno je identificirano pet različitih setova diskontinuiteta (tri do pet po inženjerskogeološkoj zoni) pri čemu četiri seta odgovaraju lokalnoj strukturno-geološkoj građi dok je peti, sub-vertikalni i pružanjem paralelan stijenskim zasjecima, vjerojatno nastao kao posljedica rasterećenja naprezanja prilikom iskopa na području stijenskih zasjeka. Na pilot području stijenskog zasjeka Špičunak identificirano je ukupno pet različitih setova diskontinuiteta (tri do pet po inženjerskogeološkoj zoni) pri čemu svi setovi diskontinuiteta vezani za strukturno-geološku građu, od koji su dva vezana za lokalne rasjedne strukture, jedan za slojevitost, a preostala dva predstavljaju primarne diskontinuitete koji su vezani uz genezu glavnog dolomita gornjo trijasko starosti. Na području stijenskog zasjeka Lokve identificirano je ukupno pet različitih setova diskontinuiteta (tri do pet po zonama) gdje svi setovi odgovaraju lokalnoj strukturno-geološkoj građi, pri čemu je geneza diskontinuiteta ista kao i u slučaju stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak. S obzirom na navedeno, identifikacija diskontinuiteta i setova diskontinuiteta



pokazala se preciznom i točnom, što je bilo od iznimne važnosti prilikom utvrđivanja vrijednosti razmaka i postojanosti za sve setove diskontinuiteta na istraživanim stijenskim zasjecima.

Određivanje vrijednosti razmaka diskontinuiteta, za sve identificirane setove diskontinuiteta na istraživanim stijenskim kosinama, provedeno je ručno u računalnom programu *CloudCompare* postavljajući plohe prosječne vrijednosti orijentacije seta diskontinuiteta u sve točke presjecišta topografskog profila (okomitog na prosječnu orijentaciju seta) i diskontinuiteta koji pripadaju tom setu. Postavljanjem plohi sa srednjom vrijednosti orijentacije seta diskontinuiteta omogućilo je mjerenje normalnog razmaka diskontinuiteta, tj. mjerenje udaljenosti između dvije plohe diskontinuiteta, okomito na prosječno pružanje seta. Sve izmjerene vrijednosti normalnog razmaka uvezene su u *MATLAB* te su na temelju njih izrađeni histogrami gustoća razmaka kako bi se za svaki identificirani set diskontinuiteta utvrdila raspodjela kojoj pripada, odnosno srednja vrijednosti razmaka diskontinuiteta. Pri tome je utvrđeno da razmaci setova diskontinuiteta, ovisno o setu diskontinuiteta i inženjerskogeološkoj zoni, pripadaju ili log-normalnoj ili negativno-eksponencijalnoj razdiobi. U određenim inženjerskogeološkim zonama nije bilo moguće prikupiti dovoljno podataka za analizu i utvrđivanje raspodjele te su u tim zonama prihvaćene prosječne vrijednosti mjerenih razmaka, što posljedično u tim zonama djelomično smanjuje preciznost izračunate vjerojatnosti pojave diskontinuiteta ili presječnice na određenom dijelu kosine. Prilikom procjene postojanosti diskontinuiteta, promatrane kao duljina traga diskontinuiteta vidljivog na stijenskim kosinama te utvrđivanja srednje vrijednosti postojanosti diskontinuiteta za svaki identificirani set diskontinuiteta, primijenjena je metoda kružnog topografskog prozora (Zhang i Einstein, 1998; Sturzenegger i dr. 2011). Ova metoda predstavlja primjenu modificiranog kružnog prozora na 3D modelu oblaka točaka na relativno brz i učinkovit način. Primjenom ove metode pretpostavlja se da će vrijednosti postojanosti diskontinuiteta poprimiti negativno-eksponencijalnu raspodjelu te da će se umanjiti pristranost maskiranja duljine traga diskontinuiteta koja je uzrokovana mjerilom promatranja i/ili orijentacijom prozora (Sturzenegger i dr. 2011). Radijusi i točna lokacija topografskih kružnih prozora na istraživanim stijenskim kosinama određivani su subjektivno, na način da je što veći broj tragova diskontinuiteta sadržan unutar prozora, a da u isto vrijeme što veći broj tragova diskontinuiteta presijeca prozor. U određenim inženjerskogeološkim zonama nije bilo moguće postaviti prozor koji obuhvaća dovoljan broj podataka zbog čega je u tim zonama prosječna vrijednost postojanosti izračunata kao prosječna vrijednost mjerenih duljina tragova diskontinuiteta. Ovo umanjuje točnost i preciznost vrijednosti postojanosti i umanjuje preciznost procjene

vjerojatnosti pojave diskontinuiteta iz određenog seta ili presječnice diskontinuiteta na određenom dijelu stijenske kosine.

Od značajki stijenske mase određivan je stupanj trošnosti stijenske mase na svim pilot područjima, a vrsta stijene samo na pilot području stijenskog zasjeka Lokve. Stupanj trošnosti stijenske mase određivan je vizualnom metodom na visoko-rezolucijskom digitalnom modelu oblaka točaka, na način da su određivane zone različitog stupnja trošnosti stijenske mase. Provedena je klasifikacija trošnosti s obzirom na devet stupnjeva trošnosti prema USBR (2001), pri čemu su oznake stupnjeva trošnosti pridružene točkama digitalnog modela. Osim za izdvajanje inženjerskogeoloških zona, stupanj trošnosti stijenske mase korišten je i prilikom kinematičkih analiza na dva načina: 1) za one dijelove modela gdje su utvrđeni najviši stupnjevi trošnosti stijenske mase (W8 i W9), kinematičke analize nisu provođene jer se na tim područjima ne očekuje proces odronjavanja stijenske mase već denudacija i 2) za procjenu bazičnog kuta trenja, potrebnog za kinematičke analize, gdje se bazični kut trenja smanjuje s povećanjem stupnja trošnosti stijenske mase. Rasponi bazičnog kuta trenja preuzeti su iz ranijih istraživanja ili su pretpostavljeni na osnovi opće prihvaćenih raspona u literaturi. Metoda određivanja trošnosti je izrazito subjektivna i ovisi o iskustvu i procjeni istraživača. Također, dobivene vrijednosti bazičnog kuta trenja s obzirom na stupanj trošnosti stijenske mase su gruba procjena što je vjerojatno dovelo do podcjenjivanja ili precjenjivanja vrijednosti na određenim dijelovima stijenskih kosina. Kako bi se utvrdio precizan i točan bazični kut trenja bilo bi potrebno provesti detaljna laboratorijska istraživanja, koja nisu bila predmet istraživanja ovog doktorskog rada.

Na istraživanom stijenskom zasjeku u Lokvama primijenjena je polu-automatizirana metoda određivanja vrste stijene na temelju klasifikacije vrijednosti intenziteta laserskih zraka dobivenih terestričkim laserskim skeniranjem. Provedena je korekciju vrijednosti intenziteta lasera s obzirom da su sirove vrijednosti precijenjene ili podcijenjene ovisno o udaljenosti TLS-a od objekta snimanja i kuta upada laserske zrake na površinu objekta, tj. ovisno o kutu raspršenja laserske zrake (Matasci i dr. 2015). Korekcija sirovih vrijednosti intenziteta izvršena je prema Kaasalainen i dr. (2011). S obzirom da su tijekom terestričkog laserskog skeniranja zabilježene pozicije svih stajališta, a oblak točaka strukturiran s obzirom na svako stajalište, omogućena je automatizirana korekcija intenziteta korištenjem matematičkih funkcija u *CloudCompare-u*, kojima su izračunati korigirane vrijednosti intenziteta za svaku točku iz modela oblaka točaka. Verifikacija korekcije intenziteta provedena je provjerom odnosa korigiranog intenziteta s udaljenosti točke od uređaja, odnosno s kutom raspršenja. Kako bi se testirala mogućnost polu-automatiziranog određivanja vrste stijene na temelju vrijednosti

korigiranog intenziteta, iz modela oblaka točka stijenskog zasjeka u Lokvama izdvojene su četiri grupe točaka koje predstavljaju crvene i zelene klastične naslage, dolomite koji se nalaze u ritmičkoj izmjeni s navedenim klastičnim naslagama te dolomite kontinuirano taložene na prethodno navedenu ritmičku izmjenu. Za svaku grupu izrađeni su histogrami odnosa gustoće vjerojatnosti i intenziteta na temelju kojih su postavljene krivulje normalne raspodjele te su izračunate srednje vrijednosti intenziteta i standardne devijacije svake grupe. S obzirom da su srednje vrijednosti intenziteta crvenih i zelenih klastičnih naslaga pokazivale približno iste vrijednosti, klastične naslage su objedinjene u jednu grupu te je za njih određen zajednički raspon intenziteta. Isto se pokazalo i s dvije grupe dolomita te su i oni grupirani kako bi se definirao njihov zajednički raspon intenziteta. Prikazom normalnih raspodjela intenziteta za dolomite i klastite, s pripadajućim srednjim vrijednostima i standardnim devijacijama na istom histogramu, utvrđena je dovoljno jasna razlika između raspona vrijednosti intenziteta za klastite i dolomite. Prema utvrđenim rasponima intenziteta iz modela oblaka točaka zasebno su izdvojene točke koje pripadaju klastičnim naslagama i dolomitima. Određeni dio točaka, klasificiranih s obzirom na intenzitet, predstavljao je šum, odnosno nije predstavljao niti jednu vrstu stijena. U svrhu uklanjanja šumova i preciznije klasifikacije, izrađeni su modeli gustoća točaka na kojima su područja s malom gustoćom klasificiranih točaka lažno predstavljala klastite i dolomite. Nakon uklanjanja ovih točaka, na modelu su preostala područja samo s većom gustoćom točaka koje predstavljaju isključivo klastične naslage i dolomite. Klasificirane točke digitalnog modela stijenskog zasjeka prema pripadnosti različitoj vrsti stijene korištene su kao ulazni podatak za definiranje inženjerskogeoloških zona, pri čemu su posebno izdvajane zone s klastičnim naslagama u izmjeni s dolomitima od zona u kojima su prisutni samo dolomiti. Također, ovi rezultati su korišteni i u prostornim kinematičkim analizama, koje nisu provedene na dijelovima modela koji pripadaju klastičnim naslagama zbog visokog stupnja trošnosti. Rezultati određivanja vrste stijena na osnovi vrijednosti intenziteta lasera pokazale su se iznimno precizne i korisne te bi se korištena metoda mogla vrlo lako primijeniti na svim stijenskim kosinama koje su izgrađene od različitih vrsta stijena, ali i za utvrđivanja stupnja trošnosti stijenske mase. Nažalost, ista metoda nije mogla biti primijenjena na stijenskom zasjeku na lokaciji Špičunak u svrhu automatiziranog izdvajanja dijelova stijenske mase visokog stupnja trošnosti. Naime, digitalni model koji je preuzet nije sadržavao parametre stajališta i uređaja terestričkog laserskog skenera, što je onemogućilo korekciju sirovih vrijednosti intenziteta lasera. Na pilot područjima stijenskih kosina iznad grada Omiša i na lokaciji Brljan nisu provedene analize intenziteta lasera s obzirom da su korišteni modeli predstavljali spojene modele dobivene terestričkim laserskim skeniranjem i snimanjem iz zraka.

Pri tome nisu bili poznati parametri i lokacije stajališta, a vrijednosti intenziteta bile su u rasponu od 0-1, što ukazuje da se ne radi o sirovim vrijednostima intenziteta lasera. S obzirom na sve prethodno navedeno, ukoliko se želi analizirati intenzitet lasera, prilikom planiranja istraživanja i snimanja stijenskih kosina s terestričkim laserskim skenerom, treba voditi računa da se stijenske kosine snime s dovoljno velikog broja stajališta te da se zabilježe parametri stajališta. Također, treba voditi računa da se prilikom izvoza snimaka vrijednosti intenziteta lasera prikažu u sirovim vrijednostima i da se oblak točaka strukturira s obzirom na stajališta kako bi se mogla provesti precizna korekcija vrijednosti intenziteta lasera te utvrditi značajke stijenske mase iz istih.

U svrhu preciznog odabira ulaznih podataka za kinematičke analize i za procjenu podložnosti, stijenske kosine bilo je potrebno podijeliti u kvazi-homogene inženjerskogeološke zone. Podjela istraživanih stijenskih kosina na inženjerskogeološke zone s kvazi-homogenim uvjetima vrlo je važan korak s obzirom da ove zone trebaju predstavljati statistički homogene cjeline kako bi se mogli odabrati reprezentativni ulazni podaci za statističke analize. Isto vrijedi i za prostorne kinematičke analize te za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima. Korištenje podataka sa cijelog područja istraživanja, bez podjele na kvazi-homogene zone, u navedenim analizama uzrokovalo bi precjenjivanje ili podcjenjivanje broja mogućih slomova i vrsta slomova stijenske mase s obzirom da ne bi bilo moguće procijeniti da li postoji vjerojatnost da se određeni set diskontinuiteta pojavi na određenom dijelu stijenske kosine. Samim time podložnost stijenske kosine odronima ne bi mogla biti pravilno kvantificirana. Upravo zato, ovim istraživanjem se ukazuje na nedostatak podjele istraživanog područja na kvazi-homogene zone u relevantnim istraživanjima koja opisuju metode procjene podložnosti stijenskih kosina odronima u literaturi (npr. Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013; Gigli i dr., 2014; Matasci i dr., 2017). Izdvajanje kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona na pilot područjima provedeno je na temelju podataka koje je bilo moguće odrediti iz digitalnih modela oblaka točka i modela površina istraživanih stijenskih kosina, odnosno na temelju kriterija: 1) prosječne orijentacije stijenskih kosina; 2) stupnja trošnosti stijenske mase; 3) geometrijskih značajki diskontinuiteta (orijentacija, razmak i postojanost); i 4) vrste stijena (samo stijenski zasjek Lokve). Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša utvrđeno je 19 inženjerskogeoloških zona, a stijenske kosine na lokaciji Brljan podijeljene su na 33 inženjerskogeološke zone. Stijenski zasjek na lokaciji Špičunak je podijeljen je na pet zona, dok je zasjek u Lokvama podijeljen na osam inženjerskogeoloških zona, pri čemu su u ukupnom broju zona uključene i podzone. Svakoj inženjerskogeološkoj zoni pridodane su pripadajuće značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta, što predstavlja pravilan i točan



ulazni podataka za izračun vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta i/ili presječnice na promatranoj površini digitalnog modela, za provedbu prostornih kinematičkih analiza te u konačnici i za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

## **8.2. Vjerojatnost pojave diskontinuiteta i presječnica diskontinuiteta**

U svrhu povećanja pouzdanosti i preciznosti prostornih kinematičkih analiza i procjene podložnosti stijenskih kosina odronima u analizu je potrebno uključiti podatke o razmaku i postojanosti setova diskontinuiteta. To je moguće provesti putem analize vjerojatnost pojave barem jednog diskontinuiteta iz pripadajućeg seta na određenom dijelu stijenske kosine, odnosno vjerojatnost pojave barem jedne presječnice koju čine određena dva seta diskontinuiteta. Osim podataka o vrijednostima razmaka i postojanosti setova diskontinuiteta, u analizu vjerojatnosti uključeni su podaci o orijentaciji setova diskontinuiteta kao i njima pripadajućih diskontinuiteta. Metodu za utvrđivanje vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz seta na 2,5D modelu površine padine (DMT rezolucije 25x25m) opisali su Jaboyedoff i dr. (2004). U okviru ovog doktorskog istraživanja navedena metoda je modificirana i nadograđena kako bi se mogla primjenjivati na 3D modelima stijenskih kosina visoke rezolucije. Također, kao nadogradnja definirana je vjerojatnost pojave presječnica diskontinuiteta te su definirani uvjeti u kojima će vjerojatnost iznositi 100%. U analizu su uvršteni i diskontinuiteti koji ne pripadaju niti jednom setu. Metoda za procjenu navedene vjerojatnosti (Jaboyedoff i dr., 2004) temelji se na lateralnim površinama koju tvore diskontinuiteti iz istog seta (definiranim orijentacijom, razmakom i postojanosti diskontinuiteta). Lateralne površine će se pojavljivati nasumično na stijenskoj kosini te se stoga može pretpostaviti da će pripadati Poisson-ovoj raspodjeli. Vjerojatnost da će se barem jedan diskontinuitet iz seta pojaviti u ćeliji modela površine stijenskih kosina može se odrediti iz odgovarajuće funkcije vjerojatnosti, a pritom će vjerojatnost zbog prirode raspodjele uvijek biti manja od 1, tj. manja od 100%. Autori nisu uzeli u obzir slučaj kada je lateralna površina manja od promatrane površine te da u tom slučaju vjerojatnost za pojavu barem jednog diskontinuiteta iznosi 100%. Ovaj dodatni uvjet je dodan u metodu koristeći maksimalne vrijednosti razmaka i utvrđene vrijednosti postojanosti, čime je utvrđena najveća pretpostavljena lateralna površina s obzirom na dostupne podatke. Ukoliko je ova pretpostavljena lateralna površina veća ili jednaka promatranoj površini ćelije digitalnog modela stijenskih kosina, vjerojatnost će biti jednaka 100%, a ukoliko je veća, vjerojatnost se računa prema Poissonovoj funkciji vjerojatnosti. Jaboyedoff i dr. (2004) naveli su da je izračun vjerojatnosti za presječnice koju tvore diskontinuiteti iz različitih setova vrlo sličan, ali ga nisu opisali. Vjerojatnost pojave

barem jedne presječnice koju čine dva diskontinuiteta iz različitih setova mogla bi se razmatrati kao umnožak vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz prvog seta s vjerojatnosti pojave diskontinuiteta iz drugog seta koji tvore presječnicu. Takvim razmatranjem dobivena vjerojatnost bi samo značila da se oba diskontinuiteta pojavljuje, ali ne nužno da se i sijeku. Kako bi se pravilno odredila vjerojatnost pojave barem jedne presječnice, potrebno je razmatrati lateralnu površinu koja nastaje preklapanjem dviju lateralnih površina koju tvore diskontinuiteti iz dva različita seta, a koja je definirana prividnim razmacima setova diskontinuiteta. Princip određivanja vjerojatnosti za pojavu barem jedne presječnice je nakon toga potpuno isti kao prethodno opisani za pojavu barem jednog diskontinuiteta, ali se koriste maksimalni razmaci diskontinuiteta kako bi se odredila maksimalna lateralna površina presječnice. Ukoliko je ona manja ili jednaka površini promatrane ćelije digitalnog modela vjerojatnost će biti jednaka 100%. Ukoliko je veća, vjerojatnost se određuje prema Poissonovoj funkciji vjerojatnosti. Dio metode koju je prikazao Jaboyedoff i dr. (2004) primjenjuju Matasci i dr. (2017) prilikom procjene podložnosti stijenskih kosina odronima, pri čemu ne računaju vjerojatnost pojave diskontinuiteta ili presječnice, već broj diskontinuiteta ili presječnica koji se može pojaviti na nekoj promatranoj površini. Nedostatak modificirane metode izračuna vjerojatnosti primijenjene u ovom radu je velika ovisnost o precizno određenim vrijednostima razmaka i postojanosti te korištenje srednje vrijednosti postojanosti, s obzirom da maksimalnu postojanost nije bilo moguće definirati primjenom metode topografskog kružnog prozora. Zbog toga, za određene setove diskontinuiteta vjerojatnost bi mogla biti precijenjena, odnosno iznositi 100%. Ovaj nedostatak ne javlja se prilikom procjene vjerojatnosti za presječnice i procjene vjerojatnosti za diskontinuitete u slučaju kada je lateralna površina veća od promatrane površine ćelije digitalnog modela s obzirom da se koriste srednje vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta. Vjerojatnost pojave diskontinuiteta ili presječnice, dobivena ovom modificiranom i nadograđenom metodom, primijenjena je prilikom prostornih kinematičkih analiza i kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima. Mjerene i analizirane vrijednosti razmaka i postojanosti su putem izračuna vjerojatnosti povećale preciznost i pouzdanost prostornih kinematičkih analiza, a time i procjene podložnosti stijenskih kosina odronima.

### **8.3. Automatizacija kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima i izrada modela podložnosti**

Metode za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu poznate iz literature (Pannatier i dr., 2009; Gigli i dr., 2012; Fanti i dr., 2013; Sdao i dr., 2013; Gigli i dr., 2014; Gupta i dr. 2015; Sorrentino i dr., 2016) u većini primjera ne kvantificiraju podložnost. Rezultati procjena podložnosti najčešće su različiti omjeri broja diskontinuiteta i presječnica koji zadovoljavaju uvjete za nastanak određenog sloma i ukupnog broja diskontinuiteta i presječnica ili su to opisne vrijednosti pojedinih zona. Jedino metoda prikazana u radu Matasci i dr. (2017) zapravo kvantificira podložnost, ali ne definira njezinu maksimalnu vrijednost. To onemogućava usporedbe podložnosti u različitim inženjerskogeološkim zonama kao i izrade modela podložnosti za istraživana područja na kojima se mijenjaju lokalni uvjeti na kosini. Upravo zato, glavni zadatak prilikom kvantifikacije podložnosti stijenskih kosina odronima u ovom radu bio je osmisliti indeks za podložnost odronima koji će biti u rasponu od 0 do 1, tj. od 0 do 100%. Prvi korak u razvoju metode predstavljao je način određivanja vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice na određenom dijelu stijenske kosine, dok je drugi predstavljao modifikaciju prostornih kinematičkih analize u svrhu utvrđivanja dijelova stijenskih kosina na kojima su zadovoljeni geometrijski uvjeti za nastanak sloma. Za bilo koju orijentaciju stijenske kosine moguće je utvrditi da li određeni diskontinuiteti ili prosječne vrijednosti setova diskontinuiteta zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak određenog tipa sloma pri čemu je rezultat 0 ili 1, odnosno dobiti informaciju jesu li zadovoljeni geometrijski uvjeti za određeni tip sloma ili ne. Međutim, ako se u analizu uzimaju u obzir samo orijentacije diskontinuiteta, bez informacije o pripadnosti određenom setu, ili samo prosječne vrijednosti orijentacija setova diskontinuiteta, bez informacije o broju diskontinuiteta i varijaciji u vrijednostima orijentacije, moguće je dobiti i pogrešnu informaciju, osobito ako su prosječne vrijednosti orijentacije diskontinuiteta blizu rubnih vrijednosti geometrijskih uvjeta. Kako bi se maksimalno umanjila mogućnost za pogrešku, Kinematički indeks hazarda (Casagli i Pini, 1993) modificiran je u svrhu primjene za svaki set diskontinuiteta odvojeno, pritom uključujući sve diskontinuitete koji pripadaju samo tom setu. Također, modifikacija uključuje i odvojeno testiranje presječnica diskontinuiteta koje čine određene kombinacije setova diskontinuiteta i njima pripadajućih diskontinuiteta te određivanje mogućih vrsta slomova na kosinama koje su u prevjesu. Međutim, vrijednosti kinematičkih indeksa hazarda za svaku vrstu sloma same po sebi nisu dovoljne za kvantifikaciju podložnosti stijenskih kosina odronima zbog toga što daju jedino odgovor na pitanje jesu li geometrijski uvjeti za slom

zadovoljeni i koliko diskontinuiteta iz seta zadovoljava te uvjete. Odnosno, koristeći samo vrijednosti kinematičkih indeksa hazarda pretpostavljamo da se svi diskontinuiteti i sve presječnice pojavljuju na svakom dijelu stijenske kosine što nije točno. Upravo zato, prostorne kinematičke analize bilo je potrebno primijeniti zajedno s analizama vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz pripadajućeg seta i/ili presječnice diskontinuiteta koji pripadaju određenim setovima, kako bi podatci o mogućim tipovima slomova na određenom dijelu stijenske kosine bili precizniji i pouzdaniji.

Da bi se mogla kvantificirati podložnost stijenskih kosina odronima, bilo je potrebno definirati podložnost u rasponu 0-1, tj. 0-100% i postaviti pretpostavke kada će ona biti maksimalna te koji će sve faktori doprinosti povećanju podložnosti. S obzirom na osnovnu definiciju podložnosti stijenskih kosina odronima (Brabb, 1984) potrebno je definirati mogućnost, tj. vjerojatnost pojave odrona na određenom dijelu stijenske kosine. Stoga je prva pretpostavka bila da postoji određena vjerojatnost da će se određeni diskontinuitet i/ili presječnica diskontinuiteta pojaviti na određenom dijelu stijenske kosine i da vrijednosti orijentacije tih diskontinuiteta i/ili presječnica u nekoj mjeri zadovoljavaju uvjete za nastanak određenog tipa sloma. Ova pretpostavka, odnosno vjerojatnost pojave odrona, definirana je kao vjerojatnost presjeka dva nezavisna događaja. Međutim, na ovaj način različiti setovi diskontinuiteta mogu u konačnici polučiti iste vrijednosti podložnosti ukoliko su dobivene iste ili slične vrijednosti kinematičkog indeksa hazarda i vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice na dijelu kosine, što ne mora nužno biti točno. No ako je jedan set diskontinuiteta strmiji od drugog, onda je duž njega veća vjerojatnost za slom, a pritom se i faktor sigurnosti smanjuje (Hoek i Bray, 1981; Wyllie i Mah, 2005). Analogno tome, podložnost dobivena analizom strmijeg seta diskontinuiteta trebala bi biti veća, jer podložnost stijenskih kosina odronima ovisi i o kutu nagiba diskontinuiteta i presječnica zbog čega će podložnost biti veća što je kut nagiba određenih diskontinuiteta ili presječnice veći. Na temelju svih prethodno navedenih pretpostavki definirana je mjera podložnosti jednog seta diskontinuiteta ili presječnice setova diskontinuiteta. Kako bi se u potpunosti kvantificirala podložnost za određeni tip sloma i njezina ukupna vrijednost, potrebno je uzeti u obzir sve setove diskontinuiteta i sve moguće presječnice koje tvore diskontinuiteti iz različitih setova.

Pristup autora već postojećih metoda podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu (npr. Gigli i dr., 2012, Matasci i dr., 2017) uključivao je zbrajanje podložnosti po diskontinuitetu, setu ili tipu sloma kako bi se izračunala ukupna podložnost. To dovodi do toga da ukupna podložnost može biti jednaka bilo kojem broju većem od 0, ovisno o korištenoj metodi. Kako bi se eliminirala ova mogućnost i nejasna maksimalna vrijednost podložnosti, u



ovom doktorskom radu podložnost stijenskih kosina odronima određena je kao vjerojatnost unija, tj. kao vjerojatnost složenog događaja s obzirom da predstavlja mogućnost za pojavljivanje bilo koje kombinacije događaja, a izračun je proveden odvojeno za svaki tip sloma te u konačnici uzimajući u obzir sve vrste slomova zajedno. Ovaj pristup je primijenjen na temelju pretpostavke da svaki dodatni set diskontinuiteta ili presječnica diskontinuiteta, koji zadovoljavaju uvjete za nastanak određene vrste sloma, uz uvjet da postoji određena vjerojatnost da se oni pojave na određenom dijelu stijenske kosine, pridonose ukupnoj podložnosti po vrsti sloma, a ukupna vrijednost podložnosti po vrsti sloma pridonosi ukupnoj podložnosti stijenskih kosina odronima. Na temelju navedenih pretpostavki definirani su indeksni pokazatelji za podložnost planarnom i klinastom slomu te slomu prevrtanjem, a podložnost stijenskih kosina odronima kvantificirana je indeksom podložnosti odronima.

Analiza vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice na promatranoj površini, prostorne kinematičke analize i izračuni indeksa podložnosti sadrže niz jednadžbi za što je potreban iterativni postupak proračuna s obzirom na broj diskontinuiteta, presječnica, kinematičkih analiza ovisno o vrsti sloma te veliki broj plohi digitalnog modela za koje je potrebno provesti izračun. Vrijeme potrebno za izračun indeksa podložnosti za vrlo male stijenske kosine mjerilo bi se u danima, a za stijenske kosine velikih površina kao što su one iznad grada Omiša, vjerojatno u tjednima. Upravo radi toga, tijekom istraživanja za potrebe izrade doktorskog rada, cijeli postupak izračuna indeksa podložnosti, odnosno kvantitativna procjena podložnosti stijenskih kosina odronima u potpunosti je automatizirana u programskom jeziku *MATLAB* te je izrađen algoritam *ROCKS* (engl. *ROCKfall Susceptibility*). Razvoj algoritma trajao je dvije godine, a sadrži 1795 linija programskog koda na 53 A4 stranice. Programski kod podijeljen je u četiri skripte i 12 funkcija gdje su skripte zadužene za provedbu jednostavnih zadataka te povezivanja i pozivanje ostalih skripti i funkcija, a funkcije su zadužene za složenije zadatke i proračune. Glavni zadaci algoritma su da na temelju ulaznih podataka o orijentaciji stijenske kosine, značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta za svaku ćeliju digitalnog modela provede analizu vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta ili presječnice na promatranoj ćeliji, prostorne kinematičke analize, izračun modificiranih kinematičkih indeksa hazarda, izračun indeksnih pokazatelja za svaku vrstu slome te u konačnici izračun indeksa podložnosti odronima. Prvo testiranje algoritma i metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima provedeno je na sintetičkoj stijenskoj kosini u obliku konkavne polusfere, koja sadrži plohe različite orijentacije te dijelove kosine u prevjesu. Sintetičkoj stijenskoj kosini pridodani su i podaci o diskontinuitetima koji su grupirani u četiri seta, a koji mogu tvoriti šest različitih presječnica s

obzirom na kombinaciju setova i za koje su poznati dijelovi sintetičkog zasjeka na kojima zadovoljavaju uvjete za nastanak sloma. Rezultati testiranja i proračuna indeksa podložnosti u skladu su s očekivanim vrijednostima pri čemu su rezultati ukazali da konačne vrijednosti podložnosti za testiranu plohu digitalnog modela znatno ovise o njezinoj površini te da bi površine testiranih ćelija duž cijelog modela trebale biti jednake prilikom testiranja na stvarnim modelima stijenskih zasjeka. Također, podložnost raste u slučaju kada više diskontinuiteta ili presječnica na određenom dijelu kosine zadovoljava uvjete za određenu vrstu sloma pri čemu je podložnost veća za iste plohe u prevjesu u odnosu na one koje su normalno orijentirane. To pridonosi važnosti nadogradnje uvjeta kinematičkih analiza za nastanak određene vrste sloma u prevjesu te važnosti analize vjerojatnosti prilikom procjene podložnosti. Naime, tradicionalnim kinematičkim analizama na stereografskoj projekciji određene vrste slomova na dijelovima kosine u prevjesu ne bi bile prepoznate. Kvantitativna procjena podložnosti stijenskih kosina odronima na sintetičkom stijenskom zasjeku, izražena indeksom podložnosti odronima, u potpunosti je opravdala očekivanja s obzirom da ukazuje na nepovoljno orijentirane diskontinuitete i na broj mogućih vrsta slomova stijenske mase pri čemu je jasno vidljivo kako podložnosti na određenu vrstu sloma pridonose ukupnoj podložnosti. Također, za sve indeksne pokazatelje podložnosti jasno je definiran minimum i maksimum. Podložnost stijenskih kosina odronima će biti 0 kada na promatranom dijelu kosine nije zadovoljen niti jedan uvjet za nastanak planarnog, klinastog ili sloma prevrtanjem. Podložnost stijenskih kosina odronima će biti maksimalna, tj. 1 ili 100%, kada su na određenom dijelu kosine zadovoljeni svi uvjeti za nastanak bilo koje vrste sloma, svi diskontinuiteti iz setova i sve presječnice zadovoljavaju uvjete za nastanak određene vrste slome te kada je vjerojatnost da se ti diskontinuiteti ili presječnice pojave na tom dijelu kosine jednaka 1, tj. 100%. Radi svega navedenog, kao i rezultata testiranja i verifikacije metode za proračun podložnosti stijenskih kosina odronima dobivenih na sintetičkoj stijenskoj kosini, opisana metoda je korištena na svim stijenskim kosinama koje su istraživane u ovom doktorskom rada.

Automatizirana procjena podložnosti stijenskih kosina odronima algoritmom *ROCKS* provedena je za stijenske kosine na svim pilot područjima i za sve inženjerskogeološke zone. Automatizirana procjena algoritmom *ROCKS* je provedena je na osnovi prikupljenih i obrađenih podataka o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta. Rezultati algoritma su vrijednosti indeksa podložnosti za planarni i klinasti slom te za slom prevrtanjem, kao i vrijednosti indeksa podložnosti odronima (IPO) za svaku ćeliju digitalnog modela stijenskih kosina. Također, utvrđene su prosječne vrijednosti indeksa podložnosti za svaku vrstu sloma te prosječne vrijednosti *IPO*-a za svaku inženjerskogeološku zonu,

a uspoređivane su sa stupnjem trošnosti stijenske mase, brojem setova diskontinuiteta i udjelom površina stijenskih kosina u prevjesu. Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama kreću se u rasponu od 14,3-42,5%, a u kojima je utvrđeni i najveći stupanj trošnosti stijenske mase (W3-W6) i relativno visoki udjeli površina stijenskih kosina u prevjesu (18,6-34,1%). Od četiri zone s najvećom prosječnom vrijednosti *IPO*-a, tri se nalaze iznad stare gradske jezgre. Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskih kosina Brljan kreću se u rasponu od 3,6-55,6%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama na stijenskim zasjecima uz prometnicu, a u kojima je utvrđen i najveći stupanj trošnosti stijenske mase (W6-W7) i jedan od najvećih udjela površine stijenskih kosina u prevjesu (35,5-40,8%). Prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak kreću se u rasponu od 35,2-44,5%, a u kojima su utvrđeni visoki stupnjevi trošnosti stijenske mase (W5-W8) i visoki udio stijenskih kosina u prevjesu (33,6-42,8%). Najveća prosječna vrijednosti *IPO*-a utvrđena je u inženjerskogeološkoj zoni u kojoj je unatrag godinu dana došlo do odrona stijenskih blokova sa zasjeka. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima po inženjerskogeološkim zonama na pilot području stijenskog zasjeka Lokve kreću se u rasponu od 13,5-46,2%. Najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama u kojima su visoki udjeli površine stijenskih kosina u prevjesu (33,7-44,9%). Najmanje prosječne vrijednosti podložnosti *IPO*-a su u inženjerskogeološkim zonama koje izgrađuje ritmička izmjena srednje trošnih dolomita (W5) i vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9), a za koji nisu provedene analize podložnosti jer u njima nije moguć proces odronjavanja već se odvijaju procesi denudacije stijenskog materijala. Na svim pilot područjima, podložnost klinastom slomu najviše pridonosi ukupnoj podložnosti što je u skladu sa tvrdnjom da je klinasti slom najčešća vrsta sloma stijenske mase na stijenskim kosinama (Wyllie i Mah, 2005). Usporedbom prosječnih vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama s rasponom stupnja trošnosti stijenske mase, udjelom površina kosina u prevjesu te s brojem utvrđenih setova diskontinuiteta, utvrđeno je da su na svim pilot područjima prosječne vrijednosti *IPO*-a u pravilu proporcionalne stupnju trošnosti stijenske mase i postotku površina kosina u prevjesu. Također, utvrđeno je da broj setova diskontinuiteta ne utječe na podložnosti stijenskih kosina odronima. Modeli podložnosti za sve vrste sloma kao i modeli podložnosti stijenskih kosina odronima za sva pilot područja izrađeni su interpolacijom vrijednosti indeksnih pokazatelja metodom najbližih susjeda, a prikazani su na 3D modelima stijenskih kosina visoke rezolucije.

Verifikacija izrađenih modela podložnosti stijenskih kosina odronima, dobivenih u ovom radu, provedena je usporedbom s prijašnjim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima na pilot područjima u Omišu i Brljanu, odnosno s izvedbenim projektima „Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiš“ (Arbanas i dr., 2016) i „Sanacija pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke“ (Arbanas i dr., 2015). Također, na svim pilot područjima provedena je i verifikacija vizualnim pregledom zona visoke podložnosti stijenskih kosina i izvorišnih zona odronjavanja. Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša visoke vrijednosti podložnosti (56-78%) utvrđene su na lokaciji potencijalno nestabilnih stijenskih blokova iz prethodnih istraživanja, a također su identificirani i dodatni potencijalno nestabilni blokovi koji nisu bili identificirani ranijim inženjerskogeološkim istraživanjima, pri čemu su maksimalne vrijednosti IPO-a na tim područjima iznosile između 74-100%. Na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan rezultati su uspoređivani s rezultatima iz prethodno navedenog Izvedbenog projekta, u kojem je za 24 inženjerskogeološke/geotehničke zone procjenjivan stupanj podložnosti nestabilnostima kosine. Podložnost je podijeljena u tri kategorije na temelju terenskog kartiranja i daljinskih istraživanja, uzimajući u obzir trošnost stijenske mase, moguće vrste slomova, kao i kut nagiba i visinu stijenskih kosina. Također, u navedenom Izvedbenom projektu, za iste zone procjenjivan je i geotehnički hazard na temelju geostatičkih analiza, pri čemu je geotehnički hazard svrstan u pet kategorija (vrlo nizak, nizak, srednji, visok i vrlo visok). Iako se nazivi i broj zona ne podudaraju s onima utvrđenim u ovom doktorskom radu, granice zona postavljene su većinom na istom mjestu, a na mjestima gdje su granice zona različite uspoređivane su prosječne vrijednosti IPO-a s rasponima kategorija podložnosti i geotehničkog hazarda. Prosječne vrijednosti IPO-a, dobivene metodom kvantitativne procjene podložnosti stijenskih kosina odronima, generalno su proporcionalne kategorijama podložnosti iz Izvedbenog projekta i prate njihov trend. Izuzetak u proporcionalnosti rezultata predstavljaju dvije zona pri čemu je razlika nastala zbog preciznije podjele inženjerskogeoloških zona u ovom radu. Također, u tim zonama utvrđene su veće vrijednosti razmaka i postojanosti diskontinuiteta, što smanjuje vjerojatnost za pojavu određenog diskontinuiteta ili presječne diskontinuiteta, a samim time i vrijednosti indeksa podložnosti. Vrlo zanimljivom se pokazala usporedba prosječnih vrijednosti IPO-a s raspodjelom kategorija geotehničkog hazarda po inženjerskogeološkim zonama. Najviše prosječne vrijednosti IPO-a odgovaraju najvišem stupnju geotehničkog hazarda, a pritom u većini zona trend porasta ili smanjenja prosječne vrijednosti IPO-a odgovara porastu ili smanjenju stupnja geotehničkog hazarda. Izuzetak predstavljaju inženjerskogeološke zone koje predstavljaju prirodne stijenske kosine, a u kojima



je podložnost stijenskih kosina na odrona manja zbog manje trošnosti stijenske mase te povoljnijih geometrijskih značajki diskontinuiteta u odnosu na okolne zone, ali je procijenjeni geotehnički hazard visok. Također, u spomenutom Izvedbenom projektu inženjerskogeološke/geotehničke zone su rangirane s obzirom na prioritet izvođenja sanacije pri čemu su inženjerskogeološke/geotehničke zone XIX i XXI procijenjene kao prioritetne (Arbanas i dr., 2015). Te zone odgovaraju inženjerskogeološkim zonama Z11 i Z12 iz ovog doktorskog rada, a u kojima je najveća gustoća visokih vrijednosti *IPO*-a te su najveće prosječne vrijednosti *IPO*-a, a obje zone su i u ovom radu navedene kao prioritetne za daljnje istraživanje i sanaciju. Na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak provedena je usporedba modela podložnosti koji je dobiven na temelju analiza na digitalnom modelu stijenskog zasjeka iz 2016. godine s odronima stijenskih blokova koji su se dogodili 2019. godine. Ova usporedba omogućila je identifikaciju blokova stijenske mase prije sloma, odnosno dok su bili na svom originalnom položaju na stijenskom zasjeku tijekom 2016. godine, a također i provjeru vrijednostima *IPO*-a iz modela podložnosti stijenskih kosina odronima za blokove koji su naknadno odronjeni. Svi odronjeni blokovi stijenske mase nalazili su se u zonama visoke do vrlo visoke podložnosti, pri čemu su vrijednosti *IPO*-a na lokaciji blokova iznosili od 45-100%, a najviše vrijednosti *IPO*-a raspoređene su uz diskontinuitete duž kojih je došlo do sloma. Verifikacijom modela podložnosti utvrđeno je da visoke vrijednosti indeksnih pokazatelja podložnosti u velikom broju slučajeva ukazuju na nepovoljno orijentirane diskontinuitete od kojih većina tvori nepovoljno orijentirane presječnice kojima je blok omeđen. To je posebno istaknuto prilikom verifikacije na stijenskom zasjeku na lokaciji Špičunak, gdje su visoke vrijednosti *IPO*-a ukazivale upravo na diskontinuitete duž kojih je došlo do sloma, tj. nastanka odrona.

S obzirom na sve navedeno, metoda za procjenu stijenskih kosina odronima razvijena u ovom doktorskog radu može se primjenjivati u različitim vrstama istraživanja stijenskih kosina, bilo za inženjerske projekte sanacije i zaštite stijenskih kosina ili mjere ublažavanja hazarda i rizika od odrona na osnovi procjene podložnosti. Metoda ukazuje na potencijalno nestabilne blokove, nepovoljno orijentirane diskontinuitete, a zone veće gustoće visokih vrijednosti *IPO*-a kao i prosječne vrijednosti *IPO*-a po inženjerskogeološkim zonama ukazuju na prioritete za sanaciju i ublažavanje hazarda i rizika od odrona.

## 9. ZAKLJUČAK

U okviru doktorskog istraživanja prikazana je nova metoda za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima zasnovana na rezultatima daljinskih istraživanja. Metoda obuhvaća identifikaciju i određivanje značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta iz digitalnih modela površina stijenskih kosina na temelju kojih su provedene automatizirane analize vjerojatnosti pojave diskontinuiteta i njihovih presječnica, prostorne kinematičke analize i izračuni indeksnih pokazatelja podložnosti sa svrhom izrade modela podložnosti stijenskih kosina odronima kao konačnih rezultata. Razvoj ove metode proveden je na 3D digitalnim modelima visoke preciznosti i razlučivosti za četiri pilot područja: 1) prirodne stijenske kosine iznad grada Omiša, 2) prirodne stijenske kosine i stijenski zasjeci uz Županijsku cestu ŽC-6055 Kistanje-Oklaj na lokaciji Brljan u Nacionalnom parku Krka, 3) stijenski zasjek uz Državnu cestu DC-3 Zagreb-Rijeka na lokaciji Špičunak te 4) stijenski zasjek uz lokalnu cestu u naselju Lokve u Gorskom kotaru. Pojedinačni postupci u okviru doktorskog istraživanja u svrhu razvoja metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima bili su:

- izrada modela površina stijenskih kosina i oblaka točaka koji sadrže podatke o smjeru i kutu nagiba svake ćelije ili točke modela te vrijednosti vektora normala i dijelova stijenskih kosina u prevjesu;
- određivanje 65 kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona na četiri pilot područja i analiza pripadajućih podatke o značajkama stijenske mase i geometrijskim značajkama diskontinuiteta;
- razvoj algoritma u programskom jeziku *MATLAB* za grupiranje diskontinuiteta u setove, njihovu statističku analizu i prikaz podataka na stereografskoj projekciji;
- izrada 3D modela stijenskog zasjeka Lokve s prikazom prostorne raspodjele različite vrste stijena, dobivenog polu-automatiziranom analizom vrijednosti intenziteta laserskog signala terestričkog laserskog skenera;
- određivanje načina proračuna vjerojatnosti pojave diskontinuiteta ili presječnica na određenom dijelu stijenske kosine na osnovi podataka o orijentaciji diskontinuiteta i setova te podataka o razmaku i postojanosti diskontinuiteta;
- definiranje geometrijskih uvjeta za prostorne kinematičke analize u prevjesu i razvoj modificiranog izračuna kinematičkog indeksa hazarda;

- definiranje indeksnih pokazatelja za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te indeksnog pokazatelja za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima na temelju analiza vjerojatnosti i prostornih kinematičkih analiza;
- razvoj i izrada algoritma *ROCKS* u programskom jeziku *MATLAB* za automatiziranu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima, a koji uključuje automatizirane analize vjerojatnosti, prostorne kinematičke analize i izračune indeksnih pokazatelja podložnosti;
- analiza i izrada 16 modela podložnosti koji uključuju modele podložnosti za planarni i klinasti slom, slom prevrtanjem te modele podložnosti stijenskih kosina odronima za sva pilot područja koji su izrađeni algoritmom *ROCKS*.

Na osnovi snimaka dobivenih terestričkim laserskim skeniranjem i fotogrametrijskom metodom snimanja iz zraka bespilotnom letjelicom izrađeni su 3D modeli oblaka točaka stijenskih kosina visoke preciznosti i razlučivosti za četiri prethodno navedena pilot područja. Modeli su analizirani u računalnom programu *CloudCompare* te su izrađeni 3D modeli površina stijenskih kosina, a za svaku ćeliju modela automatiziranom analizom u *CloudCompare*-u utvrđena je orijentacija definirana smjerom i kutom nagiba te vektorom normale. Na osnovi analize vrijednosti vektora normala i eliminacije svih vrijednosti s negativnom  $n_z$  komponentom, utvrđeni su dijelovi stijenskih kosina koji se nalaze u prevjesu.

Primjenom alata *Compass* identificirana je orijentacija ukupno 5122 diskontinuiteta na svim pilot područjima koji su grupirani u setove na osnovi modificiranog algoritma spektralnog grupiranja, a koji je automatiziran algoritmom u programskom jeziku *MATLAB*, pri čemu su za svaki set diskontinuiteta izračunati parametri *Fisherove* statistike. Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiš utvrđeno je ukupno osam različitih setova diskontinuiteta, dok je na preostalim pilot područjima utvrđeno po pet različitih setova diskontinuiteta. Za svaki set diskontinuiteta određene su srednje i maksimalne vrijednost razmaka diskontinuiteta na temelju statističkih analiza raspodjele vrijednosti normalnih razmaka utvrđenih na digitalnim modelima kosina te srednja vrijednost postojanosti određena metodom topografskog kružnog prozora. Vizualnim pregledom digitalnih modela stijenskih kosina identificirani su stupnjevi trošnosti stijenske mase na svim pilot područjima. Na pilot području stijenskog zasjeka Lokve polu-automatiziranom analizom vrijednosti intenziteta laserskog signala, dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem, identificirani su i izdvojeni dijelovi stijenskog zasjeka izgrađeni od klastičnih naslaga od onih izgrađeni od dolomita karničke starosti, a modeli oblaka točaka i površine stijenskog zasjeka su klasificirani s obzirom na vrstu stijene.

Na osnovi navedenih značajki stijenske mase i geometrijskih značajki diskontinuiteta, stijenske kosine iznad grada Omiša podijeljene su u 19 kvazi-homogenih inženjerskogeoloških zona, dok su stijenske kosine na lokaciji Brljan podijeljene u 33 zone. Stijenski zasjek na lokaciji Špičunak je podijeljen u pet zona, dok je onaj u Lokvama podijeljen u osam zona, pri čemu su u ukupnom broju kvazi-homogenih zona uključene i podzone. Svakoj zoni pridružene su pripadajuće značajke stijenske mase i geometrijske značajke diskontinuiteta, što je predstavljalo ulazne podatke za analize vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta i/ili presječne na promatranoj površini digitalnog modela, prostorne kinematičke analiza te u konačnici, procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima.

Preciznija i pouzdanija provedba prostornih kinematičkih analiza omogućena je analizom vjerojatnosti pojave barem jednog diskontinuiteta iz pripadajućeg seta na određenom dijelu stijenske kosine na temelju lateralnih površina diskontinuiteta, odnosno vjerojatnost pojave barem jedne presječne koju čine određena dva seta diskontinuiteta na osnovi analize lateralnih površina presječna čime je ostvarena i preciznija procjena podložnosti stijenskih kosina odronima. Osim podataka o vrijednostima razmaka i postojanosti setova diskontinuiteta, u analizu vjerojatnosti uključeni su podaci o orijentaciji setova diskontinuiteta kao i njima pripadajući diskontinuiteti. Također, definirani su uvjeti u kojima će vjerojatnost za pojavu diskontinuiteta ili presječna biti jednaka 100%.

Pouzdanost prostornih kinematičkih analiza povećana je i definiranjem geometrijskih uvjeta za nastanak određene vrste sloma na dijelu stijenske kosine koja se nalazi u prevjesu. Također, modificiran je izračun kinematičkog indeksa hazarda kako bi se preciznije definiralo u kojoj mjeri diskontinuiteti iz određenog seta ili diskontinuiteti koji tvore presječnicu, a pripadaju nekoj od kombinacija setova diskontinuiteta, zadovoljavaju geometrijske uvjete za nastanak određene vrste sloma. Time je izračunata vjerojatnost da će određeni diskontinuitet ili presječna, ukoliko se pojave na određenom dijelu stijenske kosine, zadovoljiti uvjete za nastanak analizirane vrste sloma stijenske mase.

U svrhu kvantificiranja podložnosti stijenskih kosina odronima, osmišljena su tri indeksna pokazatelja za planarni, klinasti i slom prevrtanjem te indeks podložnosti odronima s kojima je kvantificirana ukupna podložnost stijenskih kosina odronima za promatranu površinu digitalnog modela. Za promatranu ćeliju digitalnog modela kao ulazni podaci definirani su vjerojatnost pojave određenog diskontinuiteta ili presječne na kosini te vjerojatnost da će ti diskontinuiteti ili presječne zadovoljiti uvjete za nastanak određene vrste sloma. Također, uklopljena je i vrijednost sinusa kuta nagiba diskontinuiteta ili presječne s čijim porastom raste vjerojatnost da će na određenom diskontinuitetu ili presječnici nastati slom. Indeksn



pokazatelji za planarni, klinasti te slom prevrtanjem definirani su kao vjerojatnosti unija podložnosti svih setova ili presječnica diskontinuiteta, a koji predstavljaju vjerojatnost složenog događaja. Indeksni pokazatelj putem kojeg je u konačnici kvantificirana podložnost stijenskih kosina odronima, definiran je pomoću vjerojatnosti unije indeksnih pokazatelja za planarni, klinasti i slom prevrtanjem. Ovime je podložnost stijenskih kosina odronima kvantificirana i svrstana u raspon od 0-1, tj. 0-100% što nije slučaj u dosadašnjim metodama primjenjivanim za procjenu podložnosti.

Cijeli proračun u potpunosti je automatiziran algoritmom *ROCKS*, napisanim u programskom jeziku *MATLAB*, kako bi se omogućio ovako složeni proračun podložnosti stijenskih kosina odronima koji uključuje izračun vjerojatnost pojave diskontinuiteta i presječnica na kosini, modificirane kinematičke analize, izračun kinematičkih indeksa hazarda te izračun osmišljenih indeksnih pokazatelja. Algoritam provodi analizu podložnosti zasebno za svaku kvazi-homogenu inženjerskogeološku zonu s podacima koji pripadaju toj zoni. Rezultate algoritma predstavljaju indeksni pokazatelji za planarni, klinasti i slom prevrtanjem te indeks podložnosti odronima. Interpolacijom indeksnih pokazatelja izrađeno je 16 modela podložnosti stijenskih kosina odronima, odnosno 4 modela podložnosti po pilot području.

Na temelju rezultata automatizirane procjene podložnosti stijenskih kosina odronima i izrađenih modela podložnosti utvrđeno je da su na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima u rasponu od 14,3-42,5% ovisno o inženjerskogeološkoj zoni. Također, utvrđeni su i visoki stupnjevi trošnosti stijenske mase (W3-W6) i relativno visoki udjeli površina stijenskih kosina u prevjesu (18,6-34,1%). Od četiri zone s najvećom prosječnom vrijednosti indeksa podložnosti odronima, tri se nalaze iznad stare gradske jezgre. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan kreću se u rasponu od 3,6-55,6%, ovisno o inženjerskogeološkoj zoni. Najveće prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama koje se nalaze na stijenskim zasjecima uz prometnicu. U tim zonama utvrđen je i najveći stupanj trošnosti stijenske mase (W6-W7) i visok udio površine stijenskih kosina u prevjesu (35,5-40,8%). Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak su u rasponu od 35,2-44,5%. Utvrđen je visoki stupnjevi trošnosti stijenske mase (W5-W8) i visoki udio površine stijenskih kosina u prevjesu (33,6-42,8%). Najveća prosječna vrijednost indeksa podložnosti odronima utvrđena je u inženjerskogeološkoj zoni u kojoj je unatrag posljednjih godinu dana došlo do odrona stijenskih blokova. Prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima na pilot području stijenskog zasjeka Lokve u rasponu su od 13,5-46,2%. Najveće prosječne vrijednosti indeksa

podložnosti odronima utvrđene su u inženjerskogeološkim zonama u kojima su visoki udjeli stijenskih kosina u prevjesu (33,7-44,9%), a najmanje prosječne vrijednosti podložnosti stijenskih kosina odronima su u inženjerskogeološkim zonama koje izgrađuje ritmička izmjena srednje trošnih dolomita (W5) i vrlo intenzivno trošnih do raspadnutih klastičnih naslaga (W8-W9). Za dijelove kosine izgrađene od klastičnih naslaga nije analizirana podložnosti jer u njima nije moguć proces odronjavanja već se odvija proces denudacije. Na svim pilot područjima podložnost klinastom slomu najviše pridonosi ukupnoj podložnosti. Usporedbom prosječnih vrijednosti indeksa podložnosti odronima po inženjerskogeološkim zonama sa rasponom stupnja trošnosti stijenske mase, postotkom kosina u prevjesu te brojem utvrđenih setova diskontinuiteta, na svim pilot područjima, utvrđeno je da su prosječne vrijednosti podložnosti općenito proporcionalne stupnju trošnosti stijenske mase i udjelu površina kosina u prevjesu, dok broj utvrđenih setova diskontinuiteta ne utječe na povećanje ili smanjenje vrijednosti podložnosti stijenskih kosina odronima.

Verifikacija izrađenih modela podložnosti stijenskih kosina odronima provedena je usporedbom s prijašnjim inženjerskogeološkim i geotehničkim istraživanjima na pilot područjima u Omišu i na lokaciji Brljan. Na pilot području stijenskog zasjeka Špičunak modeli podložnosti verificirani su vizualnim pregledom zona visoke podložnosti stijenskih kosina i izvorišnih zona odronjavanja koja su se dogodila nakon izrade digitalnog modela. Na pilot području stijenskih kosina iznad grada Omiša visoke vrijednosti podložnosti utvrđene su na lokaciji potencijalno nestabilnih stijenskih blokova iz prethodnih istraživanja, a također su identificirani i dodatni potencijalno nestabilni blokovi koji nisu bili identificirani ranijim inženjerskogeološkim istraživanjima. Na pilot području stijenskih kosina na lokaciji Brljan prosječne vrijednosti indeksa podložnosti odronima proporcionalne su kategorijama podložnosti i geotehničkog hazarda iz prijašnjih inženjerskogeoloških i geotehničkih istraživanja. Na pilot području stijenskog zasjeka na lokaciji Špičunak svi odronjeni blokovi stijenske mase nalazili su se u zonama visoke do vrlo visoke podložnosti. Prilikom verifikacije modela podložnosti utvrđeno je da visoke vrijednosti indeksnih pokazatelja podložnosti ukazuju na nepovoljno orijentirane diskontinuitete od kojih većina tvori nepovoljno orijentirane presječnice kojima je blok omeđen, što je potvrđeno prilikom verifikacije na stijenskom zasjeku na lokaciji Špičunak, gdje su visoke vrijednosti indeksa podložnosti odronima ukazivale upravo na diskontinuitete duž kojih je došlo do sloma, tj. nastanka odrona.

S obzirom na sve navedeno, metoda za kvantitativnu procjenu stijenskih kosina odronima prikazana u ovom radu može se primjenjivati u različitim vrstama istraživana stijenskih kosina bilo za geotehnička istraživanja za potrebe inženjerskih projekata sanacije i

zaštite stijenskih kosina ili za razvoj i primjenu drugih mjera za ublažavanje hazarda i rizika od odrona. Visoke vrijednosti indeksa podložnosti odronima ukazuje na potencijalno nestabilne blokove, nepovoljno orijentirane diskontinuitete, a zone veće gustoće visokih vrijednosti indeksa podložnosti odronima, kao i njihove prosječne vrijednosti, ukazuju na prioritete za sanaciju odrona ili druge mjere ublažavanja hazarda i rizika od odrona.

Prikazanim istraživanjem u ovom doktorskom radu ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

- doprinos razvoju metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u detaljnom mjerilu primjenom daljinskih istraživanja;
- razvoj algoritma *ROCKS* za automatiziranu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima koja uključuje analize vjerojatnosti, prostorne kinematičke analize i izračun indeksnih pokazatelja podložnosti stijenskih kosina odronima;
- doprinos razvoju metodologije za polu-automatizirano prepoznavanje različitih vrsta stijena analizom vrijednosti intenziteta laserskog signala dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem;
- doprinos poznavanju strukturnih značajki stijenskih kosina na pilot područjima.

S obzirom na rezultate ostvarene istraživanjem u okviru ovog dokorskog rada u budućnosti su planirane sljedeće aktivnosti:

- izrada detaljnih karata podložnosti stijenskih kosina odronima za stijenske kosine iznad grada Omiša koje se mogu koristiti kao podloga u prostornom planiranju te procjeni hazarda i rizika od odrona;
- izrada modela i karata hazarda od odrona za pilot područja na temelju rezultata istraživanja dokorskog rada;
- kompiliranje programskog koda algoritma *ROCKS* i izrada grafičkog sučelja za primjenu u operativnom sustavu *Windows* kao samostalnog računalnog programa;
- primjena razvijene metode za kvantitativnu procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima u znanstvenim i inženjerskim projektima vezanim za ublažavanje hazarda i rizika od odrona;
- prilagodba razvijene metode za procjenu podložnosti stijenskih kosina odronima za primjenu analizama za izradu karata sitnijeg mjerila;
- primjena metode analize vrijednosti intenziteta laserskog signala dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem prilikom procjene stupnja trošnosti stijenske mase.

## 10. LITERATURA

- Abellan, A., Vilaplana, J.M., Martinez, J. (2006). Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain). *Eng Geol* 88:pp. 136–148.
- Abellan, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M., Lato, M. J. (2014). Review of terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms* (39/1):pp. 80–97.
- Alba, M., Barazzetti, L., Roncoroni, F., Scaioni, M. (2011). Filtering vegetation from terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras. *Ital. J. Remote Sens.*, 43, pp. 55–75.
- Alejano, L.R., García-Cortés, S., García-Bastante, F., Martínez-Alegría, R. (2013) Study of a rockfall in a limy conglomerate canyon (Covarrubias, Burgos, N. Spain). *Environ Earth Sciences*. 70:pp. 2703–2717
- Allmendinger, R.W., Cardozo, N., Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*. Cambridge University Press, Cambridge, England, pp. 289.
- Arbanas, Ž., Grošić, M., Udovič, D., Mihalić, S. (2012). Rockfall hazard analyses and rockfall protection along the Adriatic coast of Croatia. *J Civ Eng Arch David Publishing Company* 6(3): pp. 344–355.
- Arbanas, Ž., Bernat, S., Vivoda, M., Sečanj, M., Krkač, M., Mihalić Arbanas, S. (2015). Izvedbeni projekt Sanacija pokosa na županijskoj cesti ŽC 6055, Dionica D59– Most preko rijeke Krke. Županijska uprava za ceste na području Šibensko-kninske županije, Šibenik
- Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Sečanj, M., Šagud, D., Dugonjić Jovančević, S., Vivoda Prodan, M., Peranić, J. (2016). Izvedbeni projekt Sanacija potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša. Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
- Arbanas, Ž., Udovič, D., Sečanj, M., Đomlija, P., Mihalić Arbanas, S. (2018). Recentna iskustva u procjeni hazarda i rizika od odrona u stijenskoj masi. U: Zbornik radova VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (ur. Holcinger, N.). Zagreb, Državna uprava za zaštitu i spašavanje, 2018. pp. 225-234.



Arbanas, Ž., Krkač, M., Sečanj, M., Bernat Gazibara, S. (2018). Geotehnički elaborat Klizište na državnoj cesti DC 3, lokacija Špičunak. Arhiva Hrvatskih cesta, d.o.o., Zagreb.

Arbanas, Ž., Vivoda Prodan, M., Dugonjić Jovančević, S., Peranić, J., Udovič, D., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2019). Rockfall Modelling and Rockfall Protection at the Slopes above the City of Omiš, Croatia. U: Geotechnical challenges in karst (ur. Sokolić, I., Mišćević, P., Štambuk Cvitanović, N., Vlastelica, G.), Omiš, Hrvatska, 11-13. travanj, 2019. Hrvatsko geotehničko društvo, Split. pp. 121–126

Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Sartori, M. (2003). Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, pp. 435–442.

Barlow, J., Lim, M., Rosser, N., Petley, D., Brain, M., Norman, E., Geer, M. (2012). Modeling cliff erosion using negative power law scaling of rockfalls. *Geomorphology* 139: pp. 416–424.

Barreiro, A., Dominguez, J.M., Crespo, A.J.C., Gonzales-Jorge, H., Roca, D., Gomez-Gesteira, M. (2014). Integration of UAV Photogrammetry and SPH Modelling of Fluids to Study Runoff on Real Terrains. *PLoS ONE* 9(11).

Barton, N. i Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10. pp. 1-54.

Barton, N. (1982). Shear Strength Investigations for Surface Mining, Ch. 7, 3rd Int. Conf. Surface Mining, Vancouver, SME 1982, pp. 171-196.

Beretta, F., Rodrigues, A. L., Peroni, R. L., Costa, J. F. C. L. (2019). Automated lithological classification using UAV and machine learning on an open cast mine. *Applied Earth Science*, pp. 1–10.

Bernik, A. (2010). Vrste i tehnike modeliranja. *Tehnički glasnik* (4):45-47.

Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. U: Exploration for Rock Engineering, Proc. Symp. (ur. Bieniawski, Z. T.) Vol. 1, Cape Town, Balkema, pp. 97–106.

Billings, M.P. (1972). Structural geology. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Bingham, C. (1964). Distributions on the sphere and on the projective plane. PhD Thesis, Yale University, New Haven, Connecticut.

- Bognar, A. (1995). Geomorfološke značajke Splita i njegove okolice. *Geografski horizont*, 2, pp. 4-15.
- Bognar, A. (2001). Geomorfološka regionalizacija Hrvatske. *Acta Geographica Croatica*, 31/1, pp. 7-29.
- Brabb, E. (1984). Innovative Approaches for Landslide Hazard Evaluation. IV International Symposium on Landslides, Toronto, 307-323.
- Brodu, N. i Lague, D. (2012). 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, 68, pp.121-134.
- Brunsdon, D. (1984). Mudslides. U: *Slope Instability* (ur Brunsdon, D., Prior, D.B.). Wiley, Chichester, p.p. 363-418
- Cantarella, V.P., Monticeli, J.P., Cacciari, P.P., Futai, M.M. (2016). JRC estimation with 3D laser scanner images. *ISRM Specialized Conference 19-22 October*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.
- CloudCompare (v2.9.1) [GPL software]. (2017). Preuzeto s <http://www.cloudcompare.org/> (15.12.2017).
- Crosta, G.B. i Agliardi, F. (2003) A new methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3:pp. 407–422.
- Crozier, M.J. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. Croom Helm, London.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. U: *Landslides, Investigation and Mitigation* (ur. Turner, A.K., Schuster, R.L.). Transportation Research Board, Special Report 247, Washington D.C., SAD, pp. 36–75.
- Čagalj, M., Pavić, N., Čagalj, V., Jurčević, A., Urličić, I. (2008). Glavni projekt sanacije potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša. *Conex – ST*, Split.
- Čagalj, M., Pavić, N., Čagalj, V., Jurčević, A., Urličić, I. (2014). Izmjena i dopuna glavnog projekta sanacije potencijalno obrušavajućih fragmenata stijenske mase iznad grada Omiša. *Conex – ST*, Split.

Čubrilović, P., Palavestrić, Lj., Nikolić, T., Ćirić, B., (1967): Inženjerskogeološka karta SFRJ M 1:300.000, Beograd: Savezni geološki zavod.

Day, R.W. (1997). Case studies of rockfall in soft vs. hard rock. *Env Engin Geosc* 3: pp.133-140.

Dershowitz, W., Busse, R., Geier, J., Uchida, M. (1996). A stochastic approach for fracture set definition. Proceedings of the second North American rock mechanics symposium, NARMS'96, a regional conference of ISRM. Rock mechanics tools and techniques, vol. 2. (Ur. Aubertin, M., Hassani, F., Mitri, S.) Rotterdam, Nizozemska. A. A. Balkema. pp. 1809–13.

Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. (2016). Facets: A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B5, 799-804.

Dorren, L.K.A. (2003). Mountain geoecosystems: GIS modelling of rockfall and protection forest structure. Doktorski rad, University of Amsterdam, Nizozemska.

Državni zavod za statistiku, DZS (2011): Statistička izvješća - Popis stanovništva iz 2011. Godine. URL: <http://www.dzs.hr> (zadnji pristup: 12. ožujak, 2020.)

Đikić, Z. (2016). Primjena tehnologije oblaka točaka za projektiranje sanacije stijenske kosine Špičunak. Diplomski rad. Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, pp. 111.

Evans S.G. i Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can Geotech J* 30(4): pp. 620–636

Fanti, R., Gigli, G., Lombardi, L., Tapete, D., Canuti, P. (2013). Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy). *Landslides*. 10: 409-420.

Fardin, N., Feng, Q., Stephansson, O. (2004). Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness. *Int J Rock Mech Min Sci* 41:329–335.

Fecker, E. i Rengers, N.F. (1971). Measurement of large-scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass. First International Symposium on Rock Mechanics, Nancy. pp. 1-18.

- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.* 102: pp. 85–98.
- Feng, Q., Sjögren, P., Stephansson, O., Jing, L. (2001). Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Eng Geol* 59: pp.133–146.
- Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H.I. (2009). Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. *Rock Mech Rock Eng* 42, pp. 631–665
- Fisher, N. I., Lewis, T. L., Embleton B. J. (1987). *Statistical Analysis of Spherical Data*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fisher, R. (1953). Dispersion on a sphere. *Proceedings Royal Society London A*217, pp. 295-305.
- Flageollet, J.C., Weber, D. (1996). *Fall. U: Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes* (Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M. (ur). Wiley, Chichester, pp 13-28.
- Francioni, M., Salvini, R., Stead, D., Giovannini, R., Riccucci, S., Vanneschi, C., Gulli, D. (2015). An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: Slope stability assessment through kinematic and numerical methods. *Comput. Geotech.* 67:46-63.
- Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S. (2009). Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 64(6), pp. 522–528.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F. (2008) Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology* 94: pp. 419–437.
- Freedman, D., Diaconis, P. (1981). On the histogram as a density estimator:  $L_2$  theory. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw Gebiete* 57, pp. 453–476.
- Fukuyama, Y., Sugeno, M. (1989). A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-means method. U: *Proceedings of 5th fuzzy systems symposium*, pp. 247–250.
- Gigli, G. i Casagli, N. (2011). Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *Int J Rock Mech Min Sci* 48(2):187–198.

- Gigli, G., Frodella, W., Mugnai, F., Tapete, D., Cigna, F., Fanti, R., Intrieri, E., Lombardi, L. (2012). Instability mechanisms affecting cultural heritage sites in the Maltese Archipelago. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12: pp. 1883-1903.
- Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S., Casagli, N. (2014). Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios. *Landslides* 11, pp. 1–14.
- Goodman, R.E., Bray, J.W. (1976). Toppling of rock slopes. *Proceedings of Special Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder, Colorado, ASCE, 2: 201–234
- Goodman, R.E., Shi, G. (1985). *Block theory and its application to rock engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*, 2<sup>nd</sup> edition. New York, Wiley and Sons, 1989.
- Grimani, I., Šikić, K., Šimunić, A. (1972). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Knin K33–141.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1966), Savezni geološki zavod Beograd.
- Grimani, I., Juriša, M., Šikić, K., Šimunić, A. (1975). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Knin K33–141.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1966), Savezni geol. zavod, Beograd, pp. 33 – 46.
- Guenther, A., Wienhoefer, J., Konietzky, H. (2012). Automated mapping of rock slope geometry, kinematics and stability with RSS-GIS, *Nat Hazards* 61:29–49.
- Gupta, R.P. (2003). *Remote Sensing Geology*, 2<sup>nd</sup> edition. Springer, Berlin, 2003.
- Gupta, V., Tandon, R.S. (2014). Kinematic rockfall hazard assessment along a transportation corridor in the Upper Alaknanda valley, Garhwal Himalaya, India. *Bull. Eng. Geol. Environ.* (74):315-326.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Wieczorek, G. F. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, pp. 491–503.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Trittler, M. (2011). Performance test on UAV-based photogrammetric data collection. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*. 14-16 September 2011. Vol. XXXVIII-1/C22.



- Hack, H.R.G.K., Price, D.G. (1995). Determination of discontinuity friction by rock mass classification. Proc. 8th ISRM congress. Tokyo. Publ. Balkema, Rotterdam. pp. 23-27.
- Hammah, R.E., Curran, J.H. (1998). Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joint sets. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 35(7). pp. 889–905.
- Harr, M. E. (1977). *Mechanics of Particulate Matter—A Probabilistic Approach*. McGraw-Hill, New York. pp. 543.
- Herak, M. (1980). Sustav navlaka između Vrbovskog i Delnica u Gorskom kotaru (Hrvatska).—*Acta Geologica*, 10/2, pp. 35–51.
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I. (2011). Karta potresnih područja Republike Hrvatske M 1:800.000, Geofizički zavod PMF-a, Zagreb.
- Hobbs, B.E. (1993). The Significance of Structural Geology in Rock Mechanics. *Comprehensive Rock Engineering* (Hudson ur.), Vol. 1, pp. 25-62.
- Hocking, G. (1976). A method for Distinguishing between Single and Double Plane Sliding of Tetrahedral Wedges. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 13. Pergamon Press. Velika Britanija, pp. 225-226.
- Hoek, E., Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering*. Revised Third Edition. Institution of Mining and Metallurgy, London. pp 257-250
- Hudson, J.A. (1989). *Rock Mechanics. Principles in Engineering Practice*. CIRIA/Butterworths, London.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P. (1997). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles and applications*. Pergamon ed., Oxford
- Hungr, O., Evans, S., Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls along the main transportation corridors of south-western British Columbia. *Can Geotech J* 36: pp. 224–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, pp. 167-194.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int.J.Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.* 15, 319-368.

ISRM (1981) Rock Characterization, Testing and Monitoring; ISRM Suggested Method. Pergamon Press, Oxford, UK.

Ivanović, A., Sakač, K., Marković, S., Sokač, B., Šušnjar, M., Nikler, L., Šušnjara, A. (1973). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Obrovac L33–140.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1962–1967), Savezni geološki zavod, Beograd.

Ivanović, A., Sikirica, V., Marković, S. Sakač, K. (1977). Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000. List Drniš K33–9.– Inst. geol. istraž. Zagreb (1967–1972), Savezni geol. zavod Beograd.

Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipossian, F., Rouiller, J.D. (2004). Assessing the fracture occurrence using the „Weighted fracturing density“: a step towards estimating rock instability hazard. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 4, 83–93.

Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.H., Locat, J., Durmel, D. (2007). New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging clouds points: COLTOP-3D software. In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T (eds) *Rock mechanics: meeting society's challenges and demands*. Taylor & Francis, London, pp. 61–68.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abella'n, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* (61): 5-28.

Jimenez-Rodriguez, R., Sitar, N. (2006). A spectral method for clustering of rock discontinuities sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, pp. 1052-1061.

Kaasalainen, S., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A., Kukko, A. (2011). Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: search for correction methods. *Remote Sensing*, 3: pp. 2207–2221.

Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pp. 61–70.

Kemeny, J. i Post, R. (2003) Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Comput Geosci* 29, pp. 65–77.

Kemeny, J. i Donovan, J. (2005). Rock mass characterization using LiDAR and automated point cloud processing. *Ground Engineering*, 38 (11). pp. 26-29.

- Kent, J.T. (1982). The Fisher-Bingham distribution on a sphere. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 44/1, pp.71–80.
- Klose, C., Seo, S., Obermayer, K. (2005). A new clustering approach for partitioning directional data. *Int J Rock Mech Mining Sci Geomech Abstracts* 42(2). pp 15–21.
- Kordić, B., Lužar-Oberiter, B., Pikelj, K., Matoš, B., Vlastelica, G. (2019). Integration of Terrestrial Laser Scanning and UAS Photogrammetry in Geological Studies: Examples from Croatia. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 63 (4), pp. 1–15.
- Kovačević, M.S., Mirčeta, A., Librić, L. (2012). The Stupica Tunnel – Rockfall Protection. Road and Rail Infrastructure II, Proceedings of Conference CETRA 2012 / Lakušić, Stjepan (ur.).Zagreb : Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2012. 789-796.
- König, S., Gumhold, S. (2009). Consistent propagation of normal orientations in point clouds. *International Workshop on Vision, Modelling and Visualization*. pp. 83–92.
- Lato, M.J., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., Harrap, R. (2009). Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, 194–199.
- Lato, M.J., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., Harrap, R. (2012). Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols. *Nat Hazards* 60:831–864
- Lato, M.J. i Vöge, M. (2012). Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 54: 150–158.
- Lato, M. J., Gauthier, D., Hutchinson, D. J. (2015). Rock slopes asset management: selecting the optimal three-dimensional remote sensing technology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2510: pp. 7–14.
- Laubscher, D.H. (1990). A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute Of Mining and Metallurgy*, 90 (10). pp. 257-273.
- Liu, Q., Kieffer, D. S., Bitenc, M. (2018). Three-Dimensional UAV-Based Photogrammetric Structural Models for Rock Slope Engineering. *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 1*, 283–287.

- Loye, A., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at regional scale using a DEM-based quantitative geomorphometric analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1643–1653.
- Maerz, N.H., Franklin, J.A., Bennett, C.P. (1990). Joint roughness measurement using shadow profilometry. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*. Vol. 27. pp. 329-343.
- Mahtab, M.A. i Yegulalp, T.M. (1982). A rejection criterion for definition of clusters in orientation data. *Proceedings 22nd US symposium rock mechanics* (ur. Goodman, R.E., Heuze, F.E.). *Soc. Min. Eng. Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Eng.* pp. 116–23.
- Mamužić, P. (1971). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Šibenik K33–8.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1962–1965), Savezni geol. zavod, Beograd,
- Marinčić, S., Korolija, B., Majcen, Ž. (1976). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Omiš K33–32.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1968–1969), Savezni geol. zavod, Beograd
- Marinčić, S., Korolija, B., Mamužić, B., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M., Benček, Đ. (1977). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Omiš K33–32.– Institut za geološka istraživanja Zagreb (1969), Savezni geol. zavod, Beograd, pp. 21 – 35
- Markland, J.T. (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Reprints* 19:1–10.
- Matasci B. (2015). Rockfall susceptibility assessment and remote geological mapping with LiDAR point clouds, Doktorski rad, Institute of Earth Sciences, FGSE, University of Lausanne, Švicarska.
- Matasci, B., Stock, G.M., Jaboyedoff, M., Carrea, D., Collins, B.D., Guérin, A., Matasci, G., Ravelin, L. (2017). Assessing rockfall susceptibility in steep and overhanging slopes using three-dimensional analysis of failure mechanisms. *Landslides*: 1-20.
- MathWorks (2016). MATLAB, the language of technical computing. v2016b. Mathworks Inc.
- Mauldon, M. (1998). Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 31 (4), 201-216.

- Mauldon, M., Dunne, W.M., Rohrbaugh, M.B. (2001). Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal of Structural Geology* 23, pp. 247-258.
- Messenzehl, K., Meyer, H., Otto, J-C., Hoffmann, T., Dikau, R. (2016) Regional-scale controls on the spatial activity of rockfalls (Turtmann Valley, Swiss Alps)—a multivariate modeling approach. *Geomorphology*.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques 2/2.2*. pp. 1-12.
- Michoud, C., Derron, M.H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F.J., Loye, A., Nicolet, P., Pedrazzini, A., Queyre, A. (2012). Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 615–629.
- Mihalić Arbanas, S., Sećanj, M., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Begić, H., Džindo, A., Zekan, S.; Arbanas, Ž. (2017). Landslides in the Dinarides and Pannonian Basin — from the largest historical and recent landslides in Croatia to catastrophic landslides caused by Cyclone Tamara (2014) in Bosnia and Herzegovina. *Landslides*. 14, 6: pp. 1861-1876.
- Nikolić, M. (2015). Rock mechanics, failure phenomena with pre-existing cracks and internal fluid flow through cracks. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Laboratoire de Mécanique et Technologie, École Normale Supérieure de Cachan. Cachan, France, Split, Croatia.
- Pahl, P.H. (1981). Estimating the mean length of discontinuity traces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 18, 221-228.
- Palmström, A. (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In *IAEG Congress*. New Delhi, pp. 221-228.
- Palmström, A. (1995). RMi - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, Vol. 1, Number 2, 1995, pp. 69-108.
- Palmström, A. (2005). Measurement of correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology* 2005;20:362–77.



- Pannatier, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Stock, G.M. (2009). Rockfall susceptibility mapping of Yosemite Valley (USA) using a high-resolution digital elevation model. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 11, EGU2009-7692-1, EGU General Assembly.
- Pavić, I. (2018). Petrografske i mineraloške karakteristike gornjotrijaskih naslaga Gorskog kotara i Like. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. pp. 70.
- Pehar, R., Radić-Lima, D., Ravlić, Ž., Dželalija, A., Šurjak, J. (2014). Procjena ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša za Grad Omiš. ALFA ATEST d.o.o., Split.
- Perica, D., Orešić, D., Trajbar, S. (2005). Geomorfološka obilježja doline i poriječja rijeke Krke s osvrtom na dio od Knina do Bilušić buka. *Geoadria*, 10/2, pp. 131-156.
- Popescu, M.E. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 50, pp. 71–74.
- Priest, S.D., Hudson, J.A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min Sci. Geomech. Abstr.* 18, pp. 183-197.
- Priest, S.D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman and Hall, London, 473.
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52.
- Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Eng. Geol.* 195, pp. 185–195.
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L., Abellán, A. (2018). Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 10/2018.
- Ritchie, A.M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. Highway Research Record 17, Highway Research Board, National Research Council, Washington DC, SAD. pp. 13-28.
- Rocscience Inc. (2006). *Swedge Version 5.0 - 3D Surface Wedge Analysis for Slopes*. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

Rocscience Inc. (2012). Dips Version 6.0 User manual. - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

Rouseeuw, P.J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 20, No. 1, 1987, pp. 53–65.

Ruff, M., Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology* 94(3–4): pp. 314–324.

Savić, D. i Dozet, S. (1984). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Delnice L33–90.– Geološki zavod Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1970–1983), Savezni geol. zavod, Beograd.

Savić, D. i Dozet, S. (1985). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Delnice L33–90.– Geološki zavod Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1970–1983), Savezni geol. zavod, Beograd, pp. 8 – 49.

Sdao, F., Lioi, D.S., Pascale, S., Caniani, D., Mancini, I.M. (2013). Landslide susceptibility assessment by using a neuro-fuzzy model: a case study in the Rupestrian heritage rich area of Matera. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13: 397-407.

Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., Kordić, B., Krkač, M., Bernat Gazibara, S. (2017): Identification of Rock Fall Prone Areas on the Steep Slopes Above the Town of Omiš, Croatia. U: *Advancing Culture of Living with Landslides* (ur. Mikoš, M., Vilimek, V., Yin, Y., Sassa, K.). Springer, 2017. 481–487.

Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., KRKAČ, M., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Arbanas, Ž. (2019). Preliminary rockfall susceptibility assessment of the rock slopes above the Town of Omiš (Croatia). U: *Geotechnical challenges in karst* (ur. Sokolić, I., Mišćević, P., Štambuk Cvitanović, N., Vlastelica, G.), Omiš, Hrvatska, 11-13. travanj, 2019. Hrvatsko geotehničko društvo, Split. pp. 347–352.

Shan, J. i Toth, K. (2008). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, UK.

Slob, S., Hack, R., Turner, K. (2002). An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. In: *Proceedings of ISRM EUROCK 2002 : Funchal, Portugal, 25-28 November 2002 / ed. by C. Dinid da Gama and L. Riberia e Sousa*. Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2002. pp. 87-94.

- Slob, S., Hack, R., Van Knapen, B., Turner, K., Kemeny, J. (2004). Automated identification and characterization of discontinuity sets in outcropping rock masses using 3-D terrestrial laser scan survey techniques. In: Proceedings of the ISRM regional symposium EUROCK 2004 and 53<sup>rd</sup> geomechanics colloquy. pp. 439-443.
- Slob, S., Hack, R., Van Knapen, B., Turner, K., Kemeny, J. (2005). A method for automated discontinuity analysis of rock slopes with 3D laser scanning. *Transport Res Rec* 1913:187–208.
- Sorrentino, V., Matasci, B., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Marino, E., Pignatola, A., Santo, A. (2016). Rockfall susceptibility assessment of carbonatic coastal cliffs, Palinuro (Southern Italy). EGU General Assembly, 17.-22. travanja, 2016. Beč, Austrija, id. EPSC2016-12886 Poster.
- Split Engineering, LCC. (2007). Split-FX V 2.4, Tucson, AZ.
- Shanley, R.J. i Mahtab, M.A. (1976). Delineation and analysis of clusters in orientation data. *J Math Geol*, 8(1). pp 9–23.
- Stimpson, B. (1982). A rapid field method for recording joint roughness profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 19(6). pp. 345-346.
- Strahler, A. N. (1950). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis, *Am. J. Sci.*, 248, 673–696, pp. 800–814.
- Sturzenegger, M., Sartori, M., Jaboyedoff, M., Stead, D. (2007). Regional deterministic characterization of fracture networks and its application to GIS-based rock fall risk assessment. *Engineering Geology* 94, pp. 201–214.
- Sturzenegger, M. i Stead, D. (2009). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9: pp. 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., Elmo, D. (2011). Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology* 119, pp. 96–111.
- Šćavničar, B. i Šušnjara, A. (1967). Geološka i petrografska istraživanja trijaskih naslaga u Gorskom kotaru (Područje Lokve–Gerovo). *Geološki vjesnik* 20, Zagreb. 87–103

Šikić, D., Pleničar, M., Šparica, M. (1972). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Ilirska Bistrica L33–89.– Institut za geološka istraživanja Zagreb i Geološki zavod Ljubljana (1958–1967), Savezni geol. zavod, Beograd

Šikić, D. i Pleničar, M. (1975). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Ilirska Bistrica L33–89.– Institut za geološka istraživanja Zagreb i Geološki zavod Ljubljana (1967), Savezni geol. zavod, Beograd

Thiele, S.T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S.A., Cruden, A.R. (2017). Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data, *Solid Earth Discuss.* 8, pp. 1241-1253

Tomljenović, B. (2012): Aktivno naprezanje u Zemljinoj kori. Prezentacija 3. predavanja iz kolegija Strukturna geomorfologija, Diplomski studij, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. URL:[http://rudar.rgn.hr/~bruntom/nids\\_bruntom/PDF%20Strukturna%20geomorfologija/02%20-%20Aktivno%20naprezanje.pdf](http://rudar.rgn.hr/~bruntom/nids_bruntom/PDF%20Strukturna%20geomorfologija/02%20-%20Aktivno%20naprezanje.pdf). (31.10.2016.)

Tung, W. Y., Nagendran, S. K., Mohamad Ismail, M. A. (2018). 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169, 012051.

USBR (2001). *Engineering Geology Field Manual*, 2nd edition. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/geologyfieldmanual.html>).

Vallejo, L.I.G. i Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. Taylor & Francis Group, London.

van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S.B., Dorren, L. (2008). Hillslope Processes: Mass Wasting, Slope Stability and Erosion. *Slope Stability and Erosion Control* (ur. Norris, J.E. i dr.). *Ecotechnological Solutions*. Springer, Dordrecht, p.p. 17-64.

Varnes, D. J. (1978). Slope movements: types and processes, in: *Landslide analysis and control*, Transportation Research Board, Special Report 176, edited by: Schuster, R. L. and Krizek, R. J., Washington, DC, 11–33.

Vlastelica, G., Mišćević, P., Fukuoka, H. (2014). Rockfall Monitoring by Terrestrial Laser Scanning - Case Study of the Rock Cliff at Duće, Croatia. *Landslide and Flood Hazard Assessment, Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan*

Region with the 3rd Workshop of the Japanese-Croatian Project "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia" / Mihalić Arbanas S ; Arbanas Ž. (ur.). Zagreb: Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb and Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, 2014. 51-55.

Wang, X., Zhang, L., Ding, J., Meng, Q., Iqbal, J., Li, L., Yang, Z. (2014). Comparison of rockfall susceptibility assessment at local and regional scale: a case study in the north of Beijing (China). *Environmental Earth Sciences*, 72, pp. 4639-4652.

Whalley, W.B. (1996). *Rockfalls. U: Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes* (ur. Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.). Wiley, Chichester pp 217-256.

Wyllie, D.C. i Mah, C.W. (2005). *Rock slope engineering, Civil and mining*, 4<sup>th</sup> edition, New York, Spoon Press.

Xie, X.L., Beni, G. (1991). A validity measure for fuzzy clustering. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 13:pp. 841–847.

Zhang, L. i Einstein, H.H. (1998). Estimating the mean trace length of rock discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 31 (4), 217-235.

Zhou, W. i Maerz, N.H. (2002). Implementation of multivariate clustering methods for characterizing discontinuities data from scanlines and oriented boreholes. *Comput Geosci* 28(7). pp. 827–39.



## ŽIVOTOPIS AUTORA

Marin Sečanj rođen je 29.03.1990. u Zagrebu. Pohađao je osnovnu školu „Cvjetno naselje“ i srednju školu I. Tehnička škola „Tesla“ u Zagrebu. Preddiplomski studij Geološkog inženjerstva na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, upisuje 2008. godine, a diplomski studij Geološkog inženjerstva, smjer Hidrogeologija i inženjerska geologija 2012. godine. Dobitnik je Rektorove nagrade u akademskoj godini 2013./2014. za rad pod nazivom „Geološka istraživanja na području značajnog krajobraza Vražji prolaz i Zeleni vir s ciljem izrade geološke poučne staze“ izrađenog pod mentorstvom doc.dr.sc. Uroša Barudžije i prof. dr. sc. Brune Tomljenovića. Diplomom magistra inženjera geološkog inženjerstva stječe u rujnu 2014. godine obranom diplomskog rada pod nazivom „Geološko kartiranje i rekonstrukcija geološke građe okolice Skrada u Gorskom kotaru“ izrađenog pod mentorstvom prof. dr. sc. Brune Tomljenovića.

Od prosinca 2014. godine zaposlen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao asistent na Zavodu za geologiju i geološko inženjerstvo. Poslijediplomski doktorski studij na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, smjer Geološko inženjerstvo, upisuje 2015. godine. Tijekom poslijediplomskog studija usavršavao se na međunarodnoj ljetnoj školi LARAM (International school on Landslide Risk Assessment and Mitigation) Sveučilišta u Salernu (Italija) u trajanju od dva tjedna. Suradnik je na dva aktivna znanstvena projekta: „Razvoj metodologije procjene podložnosti na klizanje za planiranje namjene zemljišta primjenom LiDAR tehnologije (LandSlidePlan)“ (HRZZ-9900) i „PRIMJER – Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama“ (ESI fondovi), a od 2016. do 2018. godine sudjelovao je kao suradnik na bilateralnom hrvatsko- austrijskom projektu, pod nazivom „Mineralogija glina pri procjeni opasnosti od klizanja“.

U koautorstvu je objavio 25 znanstvenih radova od kojih je većina iz područja znanosti o klizištima. Sudjelovao je na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima na kojima je imao ukupno pet izlaganja. Od 2014. godine član je Hrvatske grupe za klizišta koja je proglašena Svjetskim centrom izvrsnosti za smanjenje rizika od klizišta za razdoblje 2014.-2017. i 2017.-2020. godine od strane Međunarodnog konzorcija za klizišta (ICL). Također, od 2015. godine član je Hrvatskog geološkog društva (HGD), Međunarodnog društva za inženjersku geologiju (IAEG), Hrvatskog geotehničkog društva (HGD), Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) i Međunarodnog društva za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo (ISSMGE).

## **POPIS OBJAVLJENIH RADOVA**

### **Poglavlja u knjigama**

Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Komac, M., Sečanj, M., Arbanas, Ž. (2018): TXT- tool 2.385-1.1 A Comprehensive Landslide Monitoring System: The Kostanjek Landslide, Croatia. Sassa, K., Guzzetti, F., Yamagishi, H., Arbanas, Ž., Casagli, N., McSaveney, M., Dang, K. (ur.): Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Volume 1: Fundamentals, Mapping and Monitoring. Cham, Springer, 449-464.

### **Radovi u časopisima**

Mihalić Arbanas, S., Kalinić, P., Bernat, S., Krkač, M., Arbanas, Ž., Sečanj, M. (2015): Landslide risk management for the purpose of civil protection in the City of Zagreb, Croatia. *Baltic Horizons*, 23 (116), 26-34.

Mihalić Arbanas, S., Sečanj, M., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Begić, H. Džindo, A., Zekan, S., Arbanas, Ž. (2017): Landslides in the Dinarides and Pannonian Basin - from the largest historical and recent landslides in Croatia to catastrophic landslides caused by Cyclone Tamara (2014) in Bosnia and Herzegovina. *Landslides*, 14 (6), 1861-1876.

### **Znanstveni radovi u zbornicima skupova**

Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda Prodan, M., Peranić, J., Sečanj, M., Bernat Gazibara, S., Krkač, M. (2017) Preliminary Investigations and Numerical Simulations of a Landslide Reactivation. U: Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (ur.) *Advancing culture of living with landslides*, Vol 2. *Advances in Landslide Science*.

Arbanas, Ž., Sečanj, M., Vivoda Prodan, M., Dugonjić Jovančević, S., Peranić, J., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Udovič, D. (2019) Protection of the City of Omiš, Croatia, from rockfall threats. U: Uljarević, M., Zekan, S., Salković, S., Ibrahimović, D. (ur.) *Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region* doi:10.35123/ReSyLAB\_2019.

Arbanas, Ž., Udovič, D., Sečanj, M., Đomlija, P., Mihalić Arbanas, S. (2018) Recentna iskustva u procjeni hazarda i rizika od odrona u stijenskoj masi. U: Holcinger, N. (ur.) *Zbornik radova VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa*.

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Peranić, J., Udovič, D., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2019) Rockfall Modelling and Rockfall Protection at the Slopes above the City of Omiš, Croatia. U: Mišćević, P. (ur.) Proceedings of the ISRM Specialised Conference „Geotechnical challenges in karst“.

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Mihalić Arbanas, S., Peranić, J., Sečanj, M., Bernat, S., Krkač, M. (2017) Analysis of a reservoir water level impact on landslide reactivation. U: Abolmasov, B., Marjanović, M., Đurić, U. (ur.) Proceedings of the 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region.

Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2017) Identification and mapping of shallow landslides in the City of Zagreb (Croatia) using the LiDAR-based terrain model. U: Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (ur.) Advancing Culture of Living with Landslides.

Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Vlahek, I., Pavlić, K., Begić, H., Zekan, S., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2018) Extreme precipitation events and landslides activation in Croatia and Bosnia and Herzegovina. U: Jemec Auflić, M., Mikoš, M., Verbovšek, T. (ur.) Proceedings of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic Balkan Region: Advances in Landslide Research.

Bernat, S., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Sečanj, M. (2017) Catalog of precipitation events that triggered landslides in northwestern Croatia. U: Abolmasov, B., Marjanović, M., Đurić, U. (ur.) Proceedings of the 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic- Balkan Region.

Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Sečanj, M., Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S. (2019) Continuous monitoring of the Kostanjek landslide. U: Uljarević, M., Zekan, S., Salković, S., Ibrahimović, D. (ur.) Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region.

Krkač, M., Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Bernat Gazibara, S., Sečanj, M. (2017) Prediction of the Kostanjek Landslide Movements Based on Monitoring Results Using Random Forests Technique. U: Mikoš, M., Arbanas, Ž., Yin, Y., Sassa, K. (ur.) Advancing Culture of Living with Landslides, Volume 3, Advances in Landslide Technology.

Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Vivoda Prodan, M., Đomlija, P., Jagodnik, V., Dugonjić Jovančević, S., Sečanj, M., Peranić, J. (2017) Landslide Risk

Reduction in Croatia: Scientific research in the framework of the WCoE 2014- 2017, IPL 173, IPL 184, ICL ABN. U: Sassa, K., Mikoš, M., Yin, Y. (ur.) Advancing Culture of Living with Landslides. Vol. 1 ISDR-ICL Sendai Partnership 2015-2025.

Mihalić Arbanas, S., Bernat Gazibara, S., Sečanj, M., Damjanović, V., Oršanić, D., Penović, S., Krkač, M., Cindrić Kalin, K., Đomlija, P., Jagodnik, V., Arbanas, Ž. (2019) Landslide risk management in Croatia: Current state. U: Uljarević, M., Zekan, S., Salković, S., Ibrahimović, D. (ur.) Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region.

Mihalić Arbanas, S., Sečanj, M., Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Arbanas, Ž. (2017) Identification and Mapping of the Valići Lake Landslide (Primorsko-Goranska County, Croatia). U: Abolmasov, B., Marjanović, M., Đurić, U. (ur.) Proceedings of the 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region.

Sečanj, M., Bernat Gazibara, S., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Martinko, M., Arbanas, Ž. (2018) Identification of potentially unstable rock blocks on the road cut in the Krka National park, Croatia. U: Jemec Auflič, M., Mikoš, M., Verbovšek, T. (ur.) Advances in Landslide Research - Proceedings of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic Balkan Region.

Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., Kordić, B., Krkač, M., Bernat Gazibara, S. (2017) Identification of Rock Fall Prone Areas on the Steep Slopes Above the Town of Omiš, Croatia. U: Mikoš, M., Vilimek, V., Yin, Y., Sassa Kyoji (ur.) Advancing Culture of Living with Landslides.

Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Arbanas, Ž. (2019) Preliminary rockfall susceptibility assessment of the rock slopes above the Town of Omiš (Croatia). U: Sokolić, I., Mišćević, P., Štambuk Cvitanović, N., Vlastelica, G. (ur.) Geotechnical challenges in karst.

### **Stručni radovi u zbornicima skupova**

Bernat Gazibara, S., Krkač, M., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2018) Izrada karata klizišta primjenom LiDAR tehnologije. U: Holcinger, N. (ur.) Zbornik radova VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa.

Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S. (2018) Praćenje i predviđanje gibanja klizišta. U: Holcinger, N. (ur.) Zbornik sažetaka VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa.

Mihalić Arbanas, S., Bernat Gazibara, S., Cindrić Kalin, K., Krkač, M., Sečanj, M., Đomlija, P., Arbanas, Ž. (2018) Analize hazarda i rizika klizanja: iskustva u svijetu i u Hrvatskoj tijekom posljednjih 20 godina. U: Holcinger, N. (ur.) Zbornik radova.

### **Sažeci sa skupova**

Sečanj, M., Gudac, I. (2014) Geological exploration in the area of Zeleni Vir (Green Whirlpool) and Vražji prolaz (Devil's Passage) (Skrad, Croatia). U: Pal-Molnar, E., Kiss, G. (ur.) Acta Mineralogica-Petrographica Abstract series.

Sečanj, M., Gudac, I., Tomljenović, B., Barudžija, U. (2015) Navlačni odnosi u središnjem dijelu Gorskog kotara. U: Horvat, M., Wacha, L. (ur.) Knjiga sažetaka/Abstracts Book 5. Hrvatskog geološkog kongresa s međunarodnim sudjelovanjem.

Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Arbanas, Ž. (2019) Rockfall Susceptibility Assessment at the Slope Scale. U: Horvat, M., Matoš, B., Wacha, L. (ur.) 6th Croatian Geological Congress Abstracts Book.

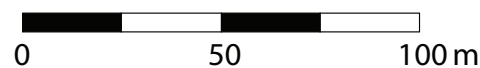
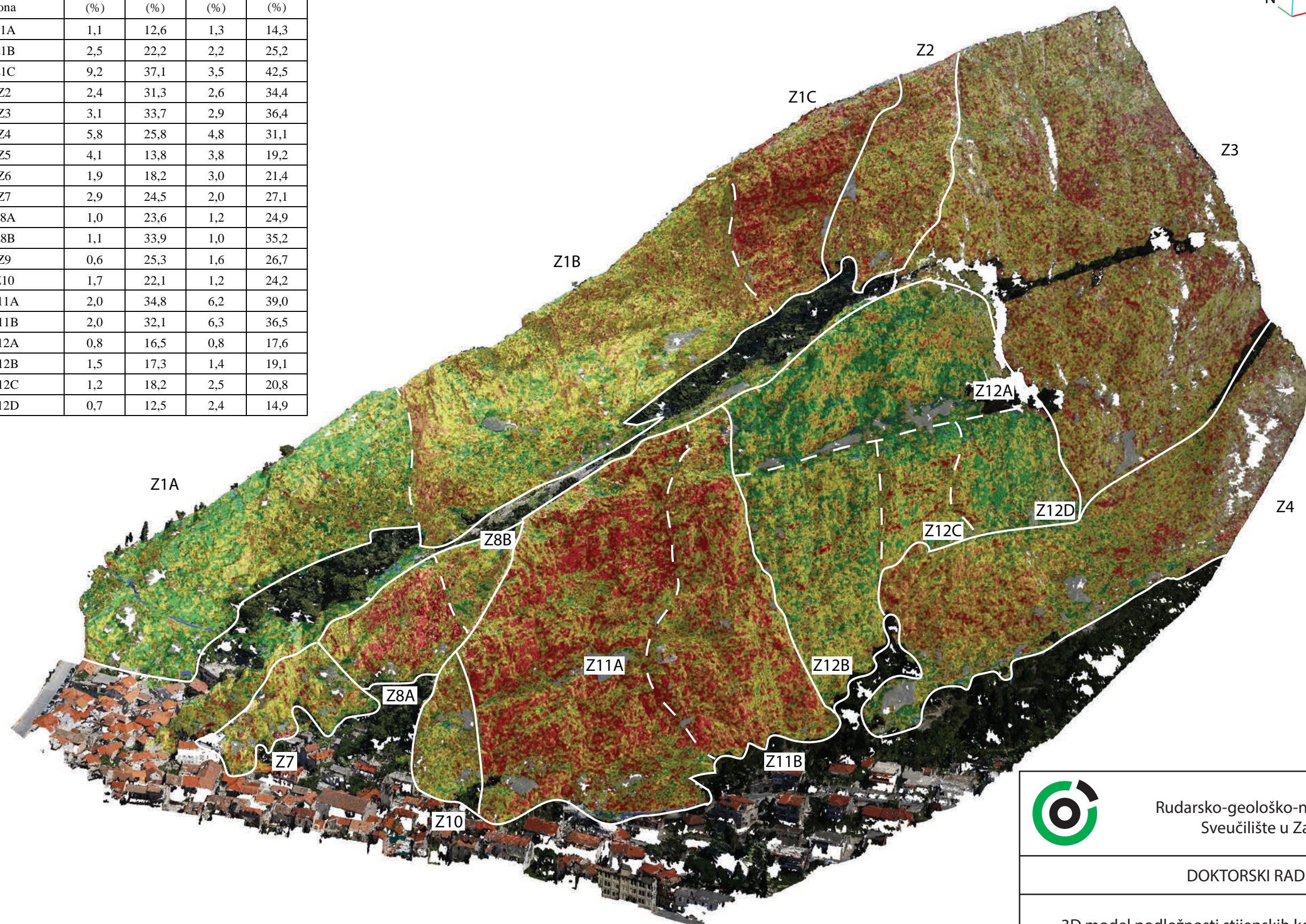
### **Ostale vrste radova**

Gudac, I., Sečanj, M. (2014) Geološka istraživanja na području značajnog krajobraza Vražji prolaz i Zeleni vir s ciljem izrede geološke poučne staze. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Rad ocijenjen rektorovom nagradom u ak. god. 2014..

Matoš, B., Rukavina, D., Sečanj, M., Barudžija, U. (2017) Sedimentary and tectonic evolution of Karst Dinarides. 74 str.. Vodič geološke stručne ekskurzije.



Inženjerskogeološka zona	IP <sub>PL</sub> (%)	IP <sub>KL</sub> (%)	IP <sub>PR</sub> (%)	IPO (%)
Z1A	1,1	12,6	1,3	14,3
Z1B	2,5	22,2	2,2	25,2
Z1C	9,2	37,1	3,5	42,5
Z2	2,4	31,3	2,6	34,4
Z3	3,1	33,7	2,9	36,4
Z4	5,8	25,8	4,8	31,1
Z5	4,1	13,8	3,8	19,2
Z6	1,9	18,2	3,0	21,4
Z7	2,9	24,5	2,0	27,1
Z8A	1,0	23,6	1,2	24,9
Z8B	1,1	33,9	1,0	35,2
Z9	0,6	25,3	1,6	26,7
Z10	1,7	22,1	1,2	24,2
Z11A	2,0	34,8	6,2	39,0
Z11B	2,0	32,1	6,3	36,5
Z12A	0,8	16,5	0,8	17,6
Z12B	1,5	17,3	1,4	19,1
Z12C	1,2	18,2	2,5	20,8
Z12D	0,7	12,5	2,4	14,9



Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Sveučilište u Zagrebu

DOKTORSKI RAD

3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za  
pilot područje - stijenske kosine iznad grada Omiša

LIST 1/2 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z4 i Z7-Z12

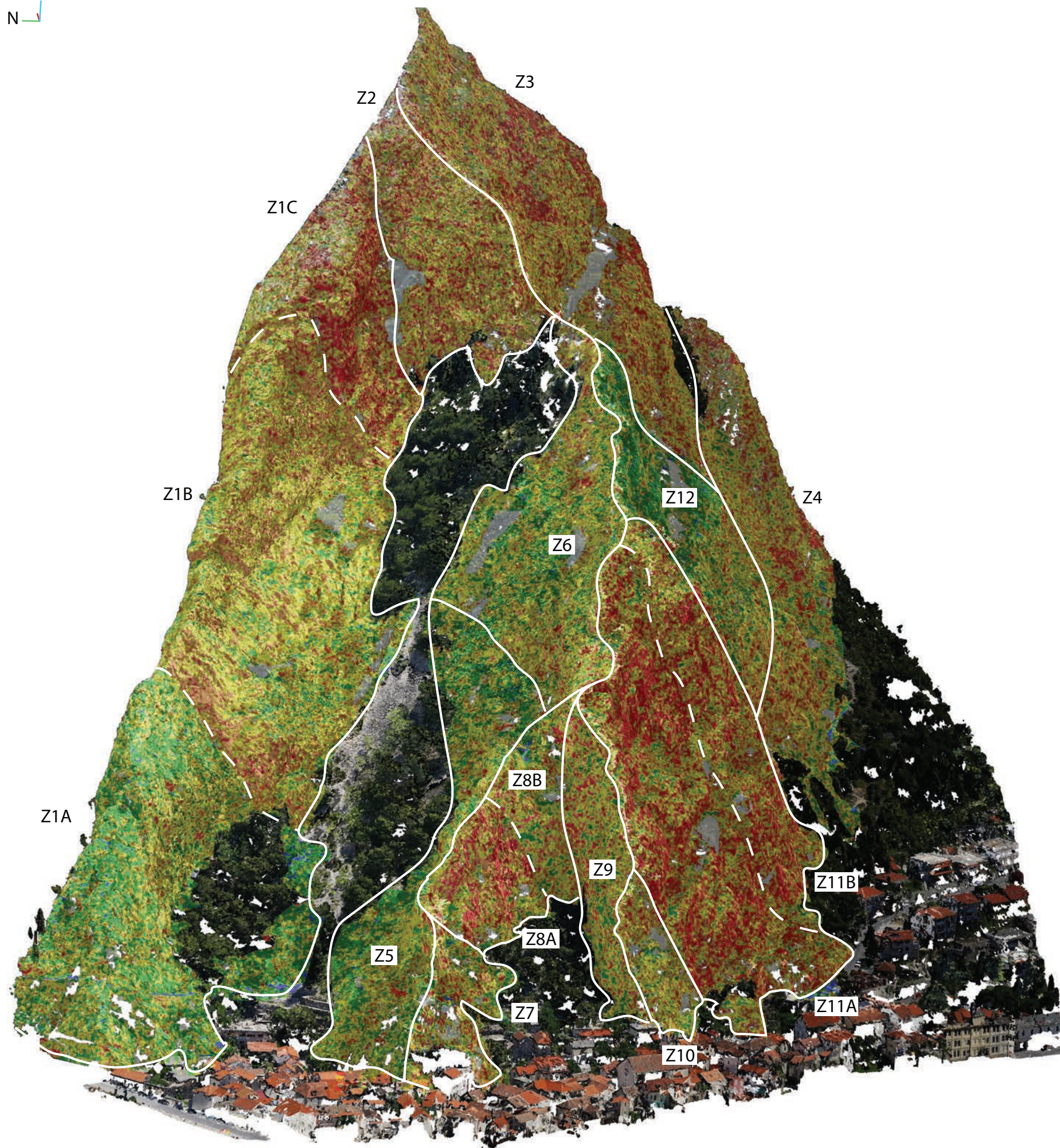
IZRADIO:  
Marin Sečanj, mag. ing. geol.

MENTOR:  
Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas

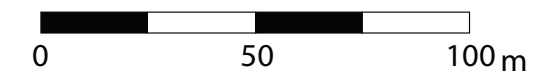
listopad, 2020.

PRILOG BR. 1/1





Inženjerskogeološka zona	$\bar{IP}_{PL}$ (%)	$\bar{IP}_{KL}$ (%)	$\bar{IP}_{PR}$ (%)	$\bar{IPO}$ (%)
Z1A	1,1	12,6	1,3	14,3
Z1B	2,5	22,2	2,2	25,2
Z1C	9,2	37,1	3,5	42,5
Z2	2,4	31,3	2,6	34,4
Z3	3,1	33,7	2,9	36,4
Z4	5,8	25,8	4,8	31,1
Z5	4,1	13,8	3,8	19,2
Z6	1,9	18,2	3,0	21,4
Z7	2,9	24,5	2,0	27,1
Z8A	1,0	23,6	1,2	24,9
Z8B	1,1	33,9	1,0	35,2
Z9	0,6	25,3	1,6	26,7
Z10	1,7	22,1	1,2	24,2
Z11A	2,0	34,8	6,2	39,0
Z11B	2,0	32,1	6,3	36,5
Z12A	0,8	16,5	0,8	17,6
Z12B	1,5	17,3	1,4	19,1
Z12C	1,2	18,2	2,5	20,8
Z12D	0,7	12,5	2,4	14,9



Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Sveučilište u Zagrebu

DOKTORSKI RAD

3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za  
pilot područje - stijenske kosine iznad grada Omiša

LIST 2/2 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z12

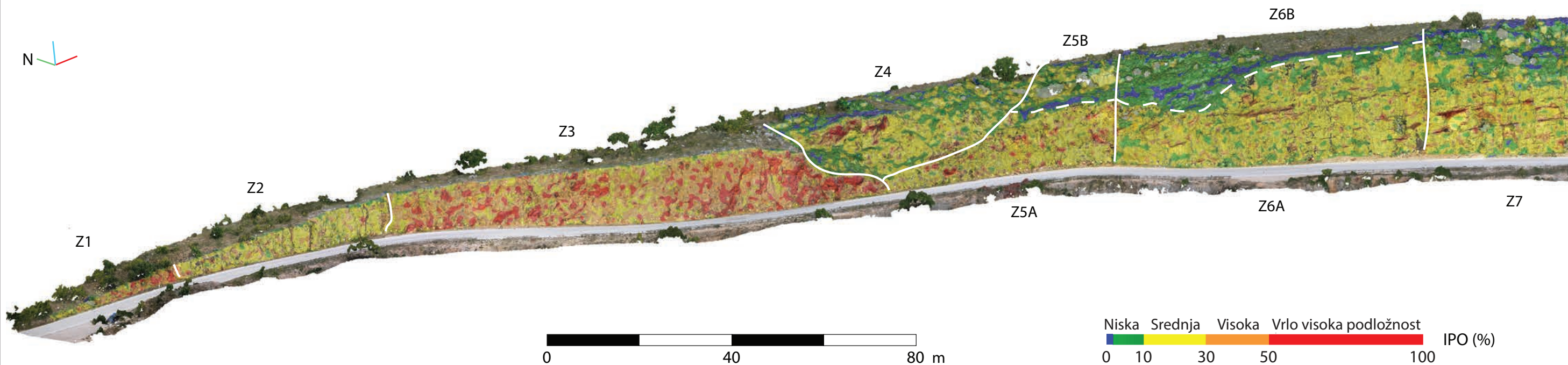
IZRADIO:  
Marin Sečanj, mag. ing. geol.

MENTOR:  
Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas


listopad, 2020.

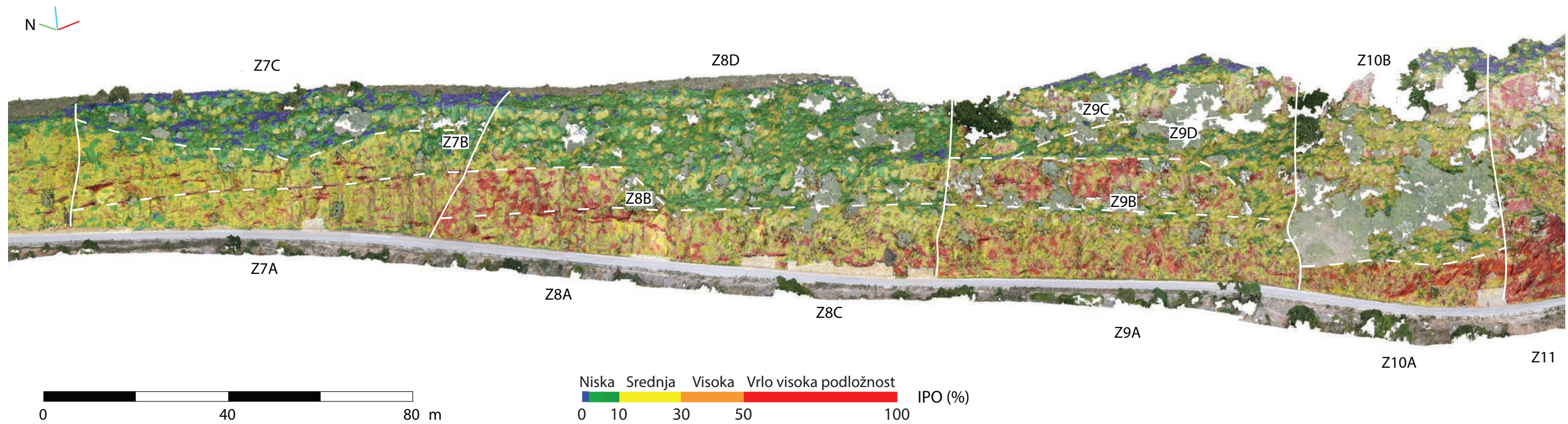
PRILOG BR. 1/2





Inženjerskogeološka zona	$\bar{IP}_{PL}$ (%)	$\bar{IP}_{KL}$ (%)	$\bar{IP}_{PR}$ (%)	$\bar{IPO}$ (%)
Z1	6,3	6,6	24,8	31,7
Z2	4,0	15,3	6,4	23,2
Z3	12,6	32,1	5,3	41,3
Z4	1,7	6,9	6,3	13,7
Z5A	3,4	18,6	7,9	26,2
Z5B	1,1	5,3	5,7	10,7
Z6A	5,0	11,3	4,1	18,6

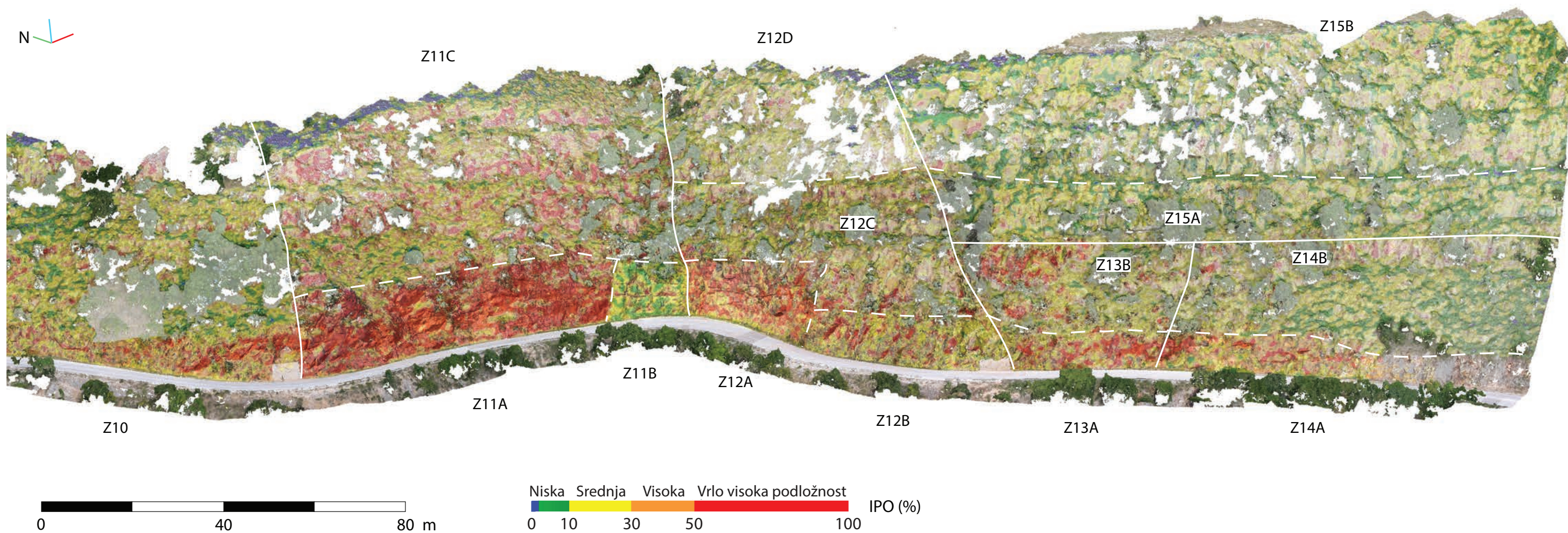
 Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu	
DOKTORSKI RAD	
3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan	
LIST 1/3 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z6	
IZRADIO: Marin Sečanj, mag. ing. geol.	MENTOR: Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas
listopad, 2020.	PRILOG BR. 2/1



Inženjerskogeološka zona	$\bar{IP}_{PL}$ (%)	$\bar{IP}_{KL}$ (%)	$\bar{IP}_{PR}$ (%)	$\bar{IPO}$ (%)
Z7A	11,8	15,4	1,9	25,0
Z7B	5,7	15,1	1,1	19,4
Z7C	0,7	3,9	0,7	4,9
Z8A	8,1	32,9	5,1	37,5
Z8B	8,7	35,9	5,6	41,0
Z8C	5,9	26,6	5,1	31,3
Z8D	1,3	7,2	2,5	9,9
Z9A	6,9	25,6	9,0	33,8
Z9B	5,7	27,8	5,8	33,0
Z9C	1,8	11,6	4,1	15,6
Z10A	8,1	23,9	10,3	35,0
Z10B	11,2	27,7	13,0	42,1
Z10C	2,9	12,3	10,0	22,0

	
Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu	
<b>DOKTORSKI RAD</b>	
3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan	
LIST 2/3 - Inženjerskogeološke zone Z7-Z10	
IZRADIO: Marin Sečanj, mag. ing. geol.	MENTOR: Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas
listopad, 2020.	PRILOG BR. 2/2





Inženjerskogeološka zona	$\bar{IP}_{PL}$ (%)	$\bar{IP}_{KL}$ (%)	$\bar{IP}_{PR}$ (%)	$\bar{IPO}$ (%)
Z11A	19,3	40,5	17,7	55,6
Z11B	5,0	15,7	1,7	19,7
Z11C	5,1	20,1	13,7	31,7
Z12A	16,0	38,2	15,2	49,5
Z12B	6,0	27,6	7,6	34,1
Z12C	5,4	19,3	13,0	31,5
Z12D	3,4	14,7	10,7	24,9
Z13A	9,6	37,0	8,4	44,6
Z13B	5,1	26,3	9,3	34,3
Z14A	8,5	25,0	5,6	33,3
Z14B	2,3	14,9	4,6	19,8
Z15	1,3	14,1	0,8	15,8



Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Sveučilište u Zagrebu

DOKTORSKI RAD

3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za  
pilot područje - stijenske kosine na lokaciji Brljan

LIST 3/3 - Inženjerskogeološke zone Z11-Z15

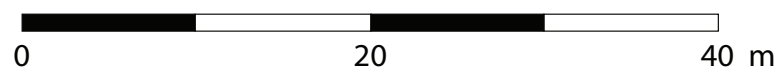
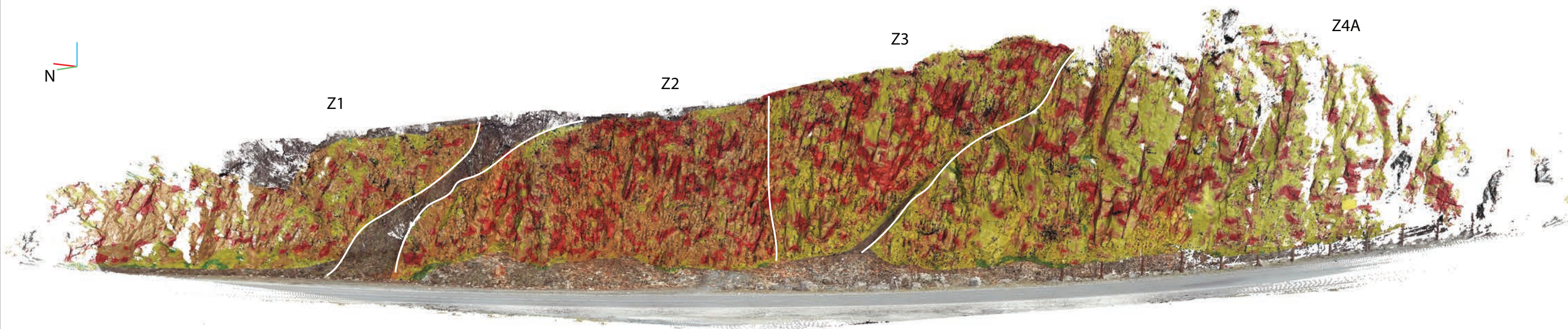
IZRADIO:  
Marin Sečanj, mag. ing. geol.

MENTOR:  
Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas

listopad, 2020.

PRILOG BR. 2/3





Inženjerskogeološka zona	$\bar{IP}_{PL}$ (%)	$\bar{IP}_{KL}$ (%)	$\bar{IP}_{PR}$ (%)	$\bar{IPO}$ (%)
Z1	10,5	28,6	4,7	37,9
Z2	8,9	38,0	3,9	44,5
Z3	3,7	37,7	4,7	41,8
Z4A	2,5	30,7	5,0	35,2



Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Sveučilište u Zagrebu

DOKTORSKI RAD

3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za pilot područje - stijenske zasjek na lokaciji Špičunak

LIST 1/1 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z4

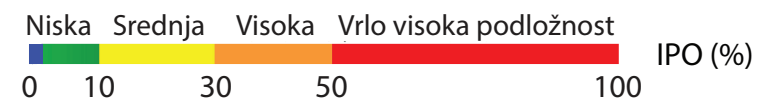
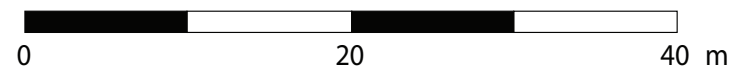
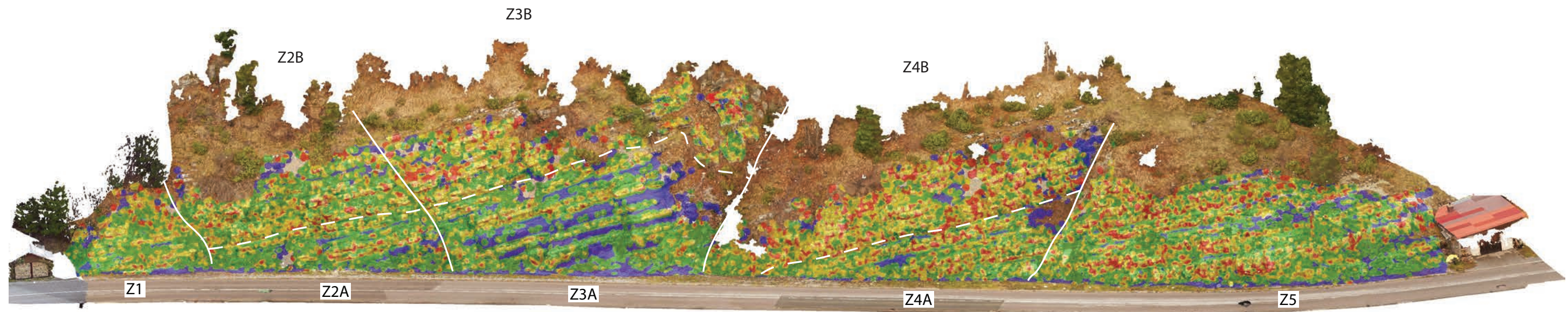
IZRADIO:  
Marin Sečanj, mag. ing. geol.

MENTOR:  
Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas

listopad, 2020.

PRILOG BR. 3





Inženjerskogeološka zona	$\overline{IP}_{PL}$ (%)	$\overline{IP}_{KL}$ (%)	$\overline{IP}_{PR}$ (%)	$\overline{IPO}$ (%)
Z1	7,6	22,3	4,0	27,3
Z2A	3,1	10,3	2,8	13,5
Z2B	4,4	14,6	3,1	18,1
Z3A	3,1	11,9	3,8	16,1
Z3B	7,9	31,9	6,3	38,2
Z4A	3,4	20,9	8,7	28,0
Z4B	7,5	37,7	10,8	46,2
Z5	5,0	25,3	6,9	29,8



Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Sveučilište u Zagrebu

DOKTORSKI RAD

3D model podložnosti stijenskih kosina odronima za  
pilot područje - stijenske zasjek u naselju Lokve

LIST 1/1 - Inženjerskogeološke zone Z1-Z5

IZRADIO:  
Marin Sečanj, mag. ing. geol.

MENTOR:  
Prof. dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas

listopad, 2020.

PRILOG BR. 4/1