

# Uparedna analiza Q i GSI klasifikacije za definisanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase

Vojislav Đorđević



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Uparedna analiza Q i GSI klasifikacije za definisanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase | Vojislav Đorđević | | 2023  
||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007501>



**Univerzitet u Beogradu**  
**Rudarsko-geološki fakultet**



**Završni rad**

**Master akademske studije**

**Uporedna analiza Q i GSI klasifikacije za definisanje  
parametara smičuće čvrstoće stenske mase**

**Kandidat**

**Vojislav Đorđević**

**G618/22**

**Mentor**

**Zoran Berisavljević, doc. dr**

**Beograd, jul 2023. god.**

## **Komisija:**

1. Zoran Berisavljević, doc. dr, mentor

---

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

2. Miloš Marjanović, van. prof. dr, član

---

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

3. Dušan Berisavljević, doc. dr, član

---

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

## **Datum odbrane:**

10. VII 2023.

---

## APSTRAKT

Problem odabira parametara čvrstoće na smicanje intenzivno ispucale, izotropne stenske mase, koja se može smatrati kontinuumom, predstavlja jedan od najvažnijih i najizazovnijih koraka pri analizama stabilnosti kosina, tunela, temelja i drugih objekata koji se izvode u stenskoj masi. Stoga, za potrebe izrade završnog rada master akademskih studija studijskog programa Geotehnika, na Rudarsko-geološkom fakultetu, izvršena je uporedna analiza dva klasifikaciona sistema koji nude mogućnost određivanja parametara smičuće čvrstoće stenske mase. Osnovni cilj pisanja ovog rada je detaljna analiza dva klasifikaciona sistema koji su široko rasprostranjeni u geotehničkoj praksi, GSI i Q, odnosno njihovih mogućnosti i ograničenja primene, parametara koji se koriste prilikom klasifikacije, prednosti i mana, kao i postupaka za dobijanje Mohr-Coulombovih parametara smičuće čvrstoće,  $c$  i  $\varphi$ . Takođe, urađen je i praktični primer klasifikovanja stenske mase prema GSI, Q i Q-slope sistemu, odabir MC parametara i analiza stabilnosti kosine izvedene u intenzivno ispucalem i izmenjenim dijabazima, pored regionalnog puta Valjevo-Bajina Bašta, na lokalitetu Debelo Brdo. Metodološki pristup koji je korišćen za rešavanje postavljenog problema je analiza strukturnog sklopa terenskim detaljnim inženjerskogeološkim kartiranjem i fotogrametrijskom analizom kosine, kao i kabinetska obrada prikupljenih podataka.

Krajnji zaključak izvedenih istraživanja je da pristup Q klasifikacije daje nešto niže vrednosti ugla smičuće otpornosti  $\varphi$ , a značajno više vrednosti kohezije  $c$ , od pristupa GSI klasifikacije. Faktor sigurnosti kosine je više nego dvostruko veći prilikom korišćenja MC parametara iz Q, nego iz GSI klasifikacije. Takođe, zaključeno je da je kod Q pristupa jednostavnije definisanje ulaznih parametara i omogućeno je vršenje proračuna i procena parametara direktno na terenu, bez upotrebe računarskih programa. Negativna strana Q pristupa je nedovoljno uzimanje u obzir naponskog stanja koje veoma utiče na vrednosti parametara čvrstoće, kao i nepodobnost primene na kosinama. S druge strane, GSI pristup u obzir uzima veliki broj faktora, poklanja odgovarajuću pažnju naponskom stanju, pogodan je za korišćenje kako u podzemnim objektima tako i na površinskim kopovima i kosinama, zasnovan je na eksperimentalnim opažanjima i ima dugu tradiciju primene. Njegova glavna mana je veliki stepen nepouzdanosti definisanja ulaznih parametara (pogotovo faktora oštećenja D), što može obeshrabriti njegovu primenu kod neiskusnijih inženjera.

Ključne reči: *stenska masa, parametri smičuće čvrstoće, klasifikacije stenske mase, MC kriterijum loma, analiza stabilnosti*

# SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPŠTE O KLASIFIKACIONIM SISTEMIMA STENSKIH MASA	3
3. GSI KLASIFIKACIJA I HB KRITERIJUM LOMA	4
3.1. Kvantifikovani GSI dijagrami	6
3.2. GSI dijagrami za različite vrste stenskih masa	9
3.3. HB kriterijum loma	13
4. Q KLASIFIKACIONI SISTEM	23
4.1. Procena parametara Q klasifikacije	24
4.2. Q-slope sistem	33
5. PRIMENA KLASIFIKACIONIH SISTEMA ZA DEFINISANJE MC PARAMETARA STENSKE MASE	37
5.1. Primena GSI i GHB kriterijuma loma za definisanje MC parametara	38
5.2. Primena Q klasifikacije za definisanje MC parametara	41
6. PRAKTIČAN PRIMER	44
6.1. Rezultati inženjerskogeološkog kartiranja kosine	46
6.1.1. Procena GSI vrednosti	52
6.1.2. Procena Q vrednosti	54
6.2. Rezultati fotogrametrijske analize kosine	56
7. ODABIR MC PARAMETARA STENSKE MASE	67
8. ZAKLJUČAK	73
LITERATURA	75

## UVOD

Sve stenske mase u prirodi predstavljaju DIANE materijal, odnosno diskontinualnu, heterogenu, anizotropnu, nelinearno elastičnu sredinu. Stoga, proučavanje mehaničkog ponašanja stenske mase predstavlja zahtevan i složen zadatak, koji sa sobom nužno povlači izvesne aproksimacije i uprošćavanja. Jedna od najčešće korišćenih aproksimacija je pretpostavka da se intenzivno ispucala, izotropna i homogena stenska masa može posmatrati kao hipotetička, ekvivalentna kvazikontinualna sredina. Takav uprošćen pristup sa sobom nužno povlači problem definisanja parametara smičuće čvrstoće ispucale stenske mase, neophodnih za sprovođenje analiza stabilnosti kosina, tunelskih otvora, nosivosti temelja i dr. Uzimanje neporemećenih uzoraka iz terena i njihovo laboratorijsko ispitivanje je nemoguće, a izvođenje in situ opita u razmeri 1:1 je veoma skupo i komplikovano. U svakodnevnoj geotehničkoj praksi, odabir parametara smičuće čvrstoće stenske mase se vrši pomoću klasifikacionih sistema, posebnih grupa iskustveno nastalih postupaka, koji se koriste prilikom projektovanja u stenskom materijalu, i koji se relativno jednostavno mogu sprovesti na terenu. U domaćoj geotehničkoj praksi, odabir parametara čvrstoće na smicanje stenske mase se vrši gotovo isključivo koristeći GSI klasifikaciju i prateći generalizovani Hoek-Brown-ov kriterijum loma, dok se postupak pomoću Q klasifikacije ređe upotrebljava. Upravo je i osnovni cilj pisanja rada prezentovanje retko korišćenih jednačina za definisanje parametara smičuće čvrstoće iz Q klasifikacije, testiranje njihove upotrebljivosti i poređenje dva klasifikaciona sistema i rezultata (parametara smičuće čvrstoće) koje oni daju.

Pitanje odabira parametara je obrađeno na sveobuhvatan način, uvažavajući sve relevantne činioce koji su od uticaja na rešenje postavljenog problema. Kako bi se problemu prišlo na celovit i detaljan način, završni rad ima sledeću strukturu: u drugom poglavlju su date opšte napomene o klasifikacionim sistemima koji se upotrebljavaju u mehanici stena. Treće poglavlje detaljno obrađuje GSI klasifikacioni sistem i prateći Hoek-Brown-ov kriterijum loma. Q klasifikacioni sistem i njegova modifikacija za upotrebu na kosinama Q-slope su prikazani u poglavlju 4. U petom poglavlju je prikazan postupak dobijanja Mohr-Coulombovih parametara smičuće čvrstoće upotrebom pomenutih klasifikacionih sistema. Šesto poglavlje prikazuje opšte podatke o kosini na kojoj je izvršen praktičan primer odabira parametara, rezultate terenskog, detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja i fotogrametrijske analize kosine. Poglavlje od suštinskog značaja, sedmo, bavi se rešavanjem postavljenog osnovnog problema odabira parametara na posmatranoj kosini i analizom stabilnosti iste. Osmo poglavlje predstavlja zaključak rada, sa odgovorima na osnovne ciljeve postavljene u apstraktu.

Prilikom pisanja rada korišćeni su i odgovarajući softverski alati: AutoCad za grafičku obradu priloga, CloudCompare i DSE (Discontinuity Set Extractor) za analizu strukturnog sklopa na oblaku tačaka, RocData za odabir parametara čvrstoće smicanja stenskih masa na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja (Point Load Test) i detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja kosine i Slide2, za globalnu analizu stabilnosti kosine. Rad u pomenutim programima je izvršen u računarskoj učionici geološkog odseka, na rudarsko-geološkom fakultetu. Snimanje kosine, dobijanje oblaka tačaka i rad u softverima CloudCompare i DSE je obavio mentor, doc. dr. Zoran Berisavljević, na čemu mu se srdačno zahvaljujem, kao i na pomoći prilikom kartiranja kosine.

U nastavku teksta biće korišćene skraćenice: HB za Hoek-Brown-ov kriterijum loma i MC za Mohr-Coulomb-ove parametre čvrstoće.



## 2. OPŠTE O KLASIFIKACIONIM SISTEMIMA STENSKIH MASA

Klasifikacija stenske mase predstavlja procenu kvaliteta stenske mase na osnovu nekog unapred definisanog kriterijuma, pri čemu se određene osobine koje su od značaja za njeno mehaničko ponašanje razvrstavaju u klase. Osobine koje se najčešće određuju i kvantifikuju, te razvrstavaju u klase, su intaktne karakteristike i karakteristike pojedinačnih pukotina, familija i sistema pukotina. Klasifikacioni sistemi su posebne grupe iskustveno nastalih postupaka koji se koriste prilikom projektovanja u stenskoj masi i koji moraju imati prihvatljiv stepen neizvesnosti (Berisavljević i dr, 2021). Prema Einstein i dr. (1979), klasifikacioni sistemi se mogu uspešno primeniti samo u slučaju da ispunjavaju sledeće zahteve:

- Moraju proizvesti ekonomično ali stabilno rešenje;
- Moraju biti primenljivi na razmatrani slučaj;
- Prilikom razmatranja neke pojave moraju uzeti u obzir sve značajne činioce, i pritom biti relativno jednostavni za upotrebu;
- Moraju biti sveopšte primenljivi na određenu grupu problema.

Veliki broj klasifikacionih sistema je nastao na bazi iskustva njihovih autora sa velikih projekata u građevinarstvu, i to pre svega u tunelogradnji, za potrebe projektovanja podgradnih sistema (na primer RMR i Q). U literaturi se može naći ogroman broj klasifikacionih sistema, međutim najširu primenu imaju:

- GSI i njegove modifikacije (brojne varijante kvantifikovanih GSI dijagrama i dijagrama za različite litološke vrste stenskih masa, primena za klasifikaciju iskopa, CGSI)
- RMR i njegove modifikacije (ARMR, MRMR, SMR, RMQR)
- Q i  $Q_{slope}$  sistem
- R<sub>Mi</sub>

S obzirom da je tema ovog rada primena GSI i Q klasifikacije za dobijanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase, neće biti detaljnije razmatrani RMR i R<sub>Mi</sub>, već samo GSI i Q.

Klasifikacioni sistemi ne uzimaju u obzir pojave vremenski zavisnih deformacija stenske mase, poput bubrenja i fizičko-hemijskog razaranja, kao i veličine dobijene merenjem deformacionih karakteristika stenske mase. Ovo su njihovi glavni nedostaci, te su iz tih razloga nastale modifikacije osnovnih oblika klasifikacionih sistema.

### **3. GSI KLASIFIKACIJA I HB KRITERIJUM LOMA**

GSI (Geological Strength Index – geološki indeks čvrstoće) predstavlja jedan od najkorišćenijih klasifikacionih sistema, koji svoju popularnost duguje činjenici da predstavlja sastavni deo opšteprihvaćenog Hoek-Brown-ovog kriterijuma loma za stensku masu, o kojem će biti više reči u poglavlju 3.3. Prema Stille i Palmstrom (2003), GSI ne predstavlja klasifikacioni sistem već samo iskustvenu veličinu koja se koristi kao parametar HB kriterijuma loma. Međutim, u ovom radu neće biti usvojeno pomenuto stanovište, nego će se smatrati da GSI predstavlja klasifikacioni sistem ravnopravan drugima. GSI uzima u obzir veličinu blokova i njihovu međusobnu uzglobljenost, kao i stanje diskontinuiteta. Njegova osnovna svrha je da se parametri HB kriterijuma loma dobijeni za monolit, redukuju na parametre ispucale stenske mase. GSI se može koristiti za klasifikaciju stenske mase koja predstavlja HB materijal: ispucala, homogena i izotropna stenska masa, sačinjena od međusobno uzglobljenih blokova. Pretpostavka o izotropnosti se može smatrati opravdanom kod stenskih masa sa četiri ili više familija pukotina (Hoek i Brown, 1980a).

GSI se može odrediti na prirodnim izdancima, čelu tunelskih iskopa, licu kosine ili jezgru istražne bušotine. Određivanje GSI na jezgru istražne bušotine je težak i nezahvalan posao, s obzirom da je veoma izazovno proceniti uzglobljenost blokova i stanje pukotina iz jezgra bušotine, pogotovo imajući u vidu da kvalitet bušenja ima presudan uticaj na kvalitet izvađenog jezgra.

Osnovni GSI dijagram se sastojao od četiri strukturne kategorije prikazane na vertikalnoj osi, koje zavise od blokovske izdeljenosti i međusobne uzglobljenosti stenske mase. Na horizontalnoj osi je prikazano stanje zidova pukotina, u pet kategorija. Dijagram je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. Osnovni GSI dijagram (Hoek i Brown, 1997, iz Berisavljević i dr, 2021)

Prema osnovnom dijagramu koji su objavili Hoek i Brown (1997), vrednost GSI se kretala u rasponu 10-80. U narednoj varijanti GSI dijagrama (Hoek i Marinos, 2000) dodate su dve nove strukturne kategorije, kojima se u razmatranje uzimaju masivne i tektonski oštećene i intenzivno smicane stenske mase. Po korigovanom dijagramu, vrednost GSI varira u granicama 5-95. Novi dijagram je prikazan na slici 3.2. Ipak, Hoek i dr. (2013) ističu da GSI klasifikacija ne bi trebalo da se primenjuje za intaktne i masivne, kao i za prethodno smicane, transportovane i intenzivno izmenjene stenske mase, te uklanjaju gornju i donju strukturnu kategoriju i vraćaju se prvobitnom GSI dijagramu (slika 3.1.)



Slika 3.2. GSI dijagram sa šest strukturnih kategorija (Hoek i Marinos, 2000, iz Berisavljević i dr, 2021)

### 3.1. Kvantifikovani GSI dijagrami

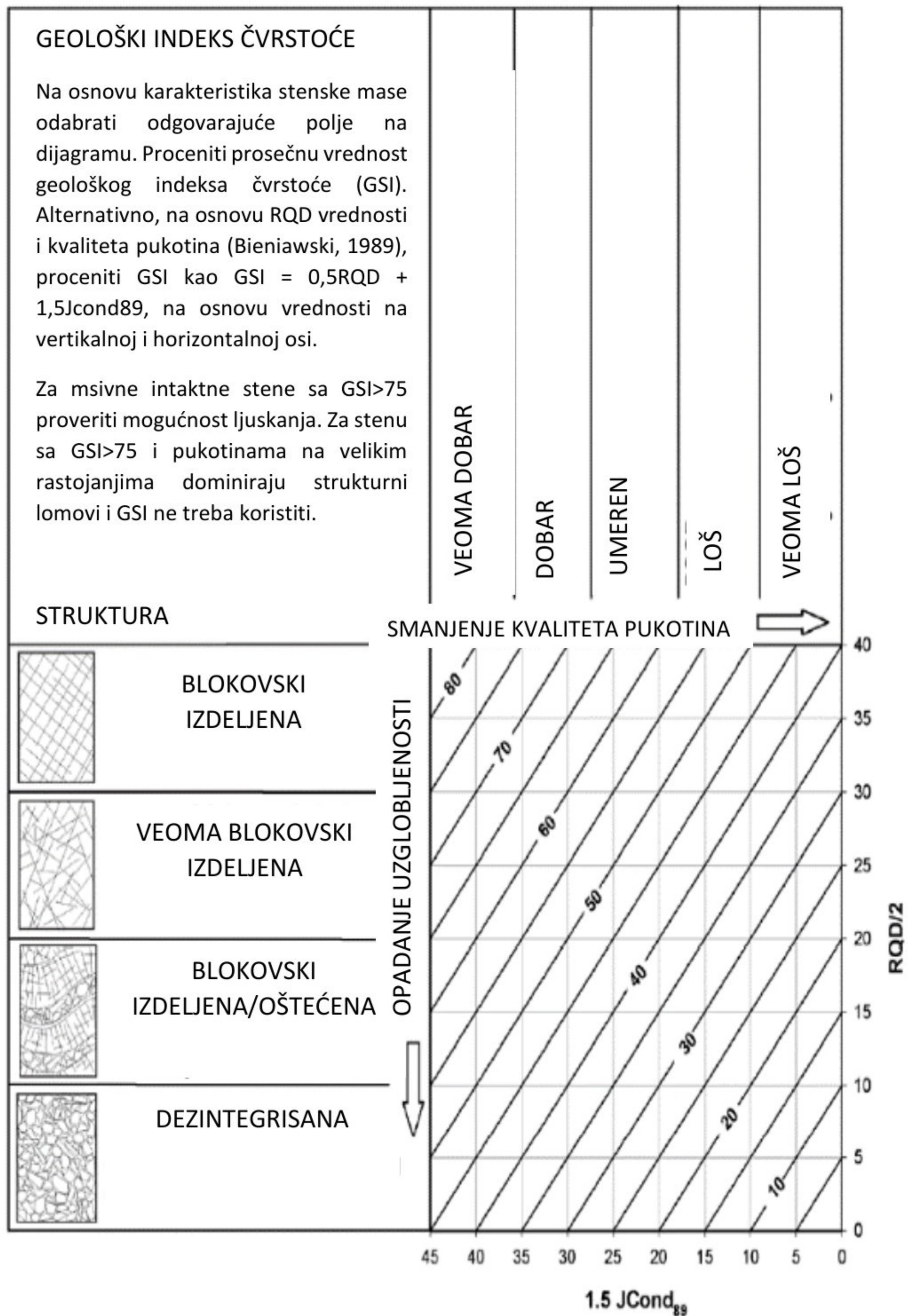
Jedan od osnovnih problema GSI klasifikacije je njen opisni karakter, gde veliku ulogu igra subjektivnost koja onemogućava pouzdanu primenu kod pojedinih neiskusnih korisnika. Pritom, postojanje kontura, odnosno izolinija na dijagramu može korisniku dati lažan osećaj objektivnosti dok zapravo određivanje GSI iziskuje neophodne aproksimacije i subjektivnost. Da bi se pomenuti problem prevazišao, u upotrebu su uvedeni kvantifikovani GSI dijagrami, koji omogućavaju relativno precizno i objektivno definisanje geološkog indeksa čvrstoće.

Prednosti kvantifikovanog pristupa navode Cai i dr. (2004): „...Stoga, kvantitativni pristup dodat GSI sistemu obezbeđuje način za konzistentnu karakterizaciju stenske mase i poboljšava korisnost GSI sistema.“ Za razliku od ovih autora, Yang i Elmo (2022) ukazuju da su parametri GSI klasifikacije suštinski kvalitativne prirode i da je iluzorno i nesvršishodno kvantifikovati ih, te da se kvantifikacijom ne postiže veća tačnost prilikom određivanja GSI. Ipak, korisno je prikazati neki od kvantifikovanih GSI dijagrama, s obzirom da mogu poslužiti u praksi, pre svega mlađim i neiskusnim inženjerima.

Kvantifikovani dijagrami su brojni i mahom zasnovani na parametrima dobijenim iz RMR, Q i R<sub>Mi</sub> klasifikacije. U nastavku je prikazan jedan od najčešće korišćenih kvantifikovanih dijagrama, razvijen od strane Hoek i dr. (2013). Struktura stenske mase se kvantifikuje pomoću indeksa kvaliteta stenske mase RQD, dok se parametar J<sub>cond89</sub> iz RMR klasifikacije koristi za kvantifikovanje stanja pukotinskih površi. J<sub>cond89</sub> predstavlja zbir broja bodova za kontinuitet, zev, hrapavost, izmenu i ispunu pukotina iz verzije RMR klasifikacije iz 1989. god. (Bieniawski, 1989). Hoek i dr. (2013) navode da se kvantifikovani dijagram (slika 3.3.) može koristiti za procenu GSI u tunelima prečnika do 10 m i kosinama ne višim od 20 m. Pored dijagrama, u upotrebi je i formula:

$$GSI = 0,5RQD + 1,5J_{cond89} \quad (1)$$

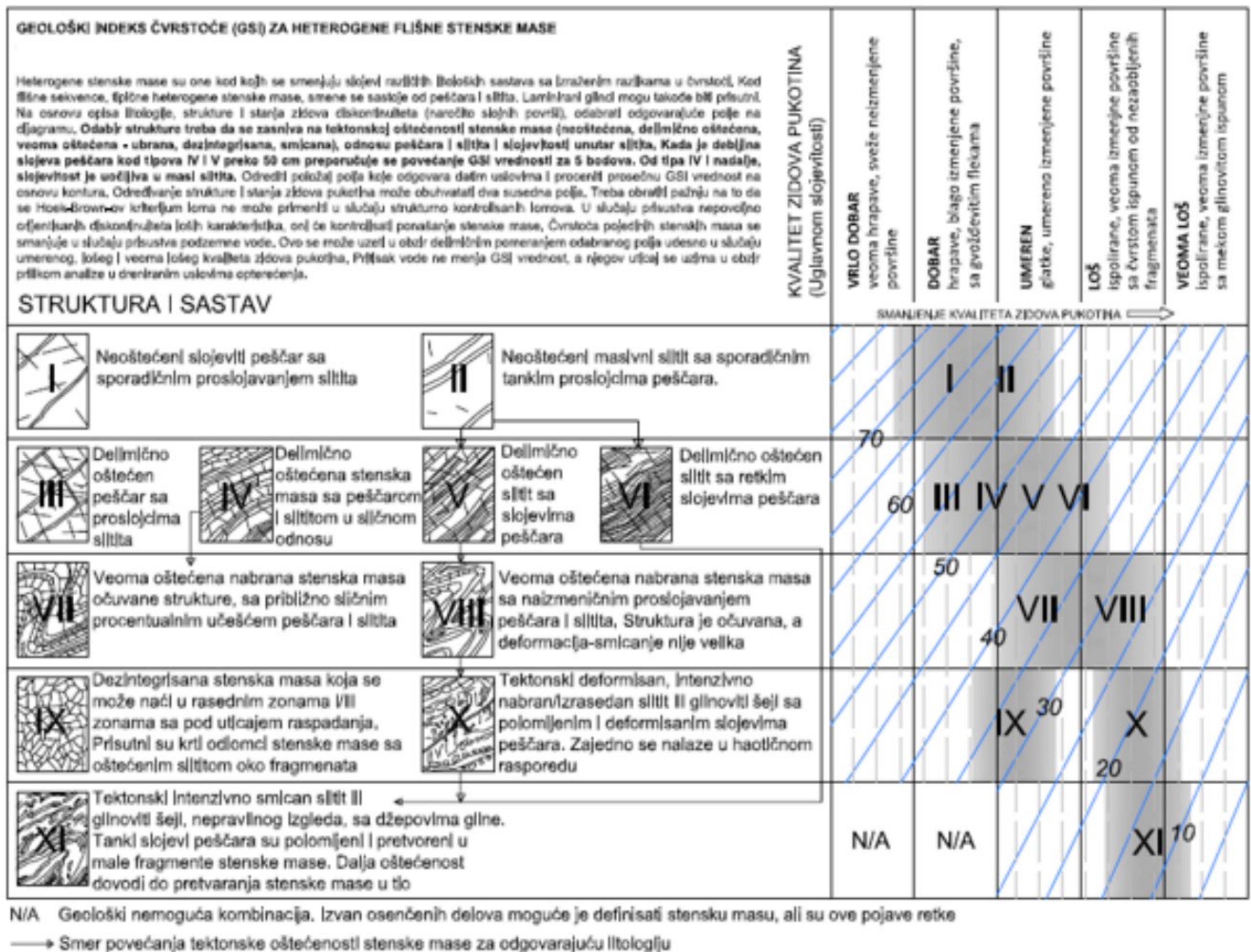
Hoek i dr. (2013) ističu da njihov kvantitativni GSI dijagram ima dve značajne mane. Prva je da u obzir uzima empirijsku vrednost kvaliteta zidova pukotina a ne fizičku vrednost dobijenu merenjem rezidualne smičuće čvrstoće pukotine. Druga je da se za procenu GSI koristi RQD, koji ne uzima u obzir odnos veličine bloka i dimenzija iskopa, što je od presudnog uticaja na to da li stensku masu posmatramo kao kontinuum ili diskontinuum. Iz tog razloga je i uvedeno ograničenje upotrebe na tunele prečnika do 10 m i kosine ne više od 20 m.



Slika 3.3. Kvantifikovani GSI dijagram, modifikovano prema Hoek i dr. (2013)

### 3.2. GSI dijagrami za različite vrste stenskih masa

Flišni sedimenti predstavljaju sekvence finozrnih (glinci, laporci, siltiti i šejlovi) i grubozrnih (peščari, konglomerati i krečnjaci) sedimentata koje se često međusobno smenjuju na malom upravnom rastojanju. Fliševi su mahom intenzivno ispucali, izrasedani, ubrani i navlačeni, te stoga zadaju velike probleme pri usecanju kosina i tunela. Iz tog razloga, uvedena je posebna varijanta GSI dijagrama namenjena flišnim sedimentima, razvijena od strane Marinos i Hoek (2001), koja je pretrpela nekoliko izmena i čije je najnovije izdanje (Marinos, 2017) prikazano na slici 3.4.

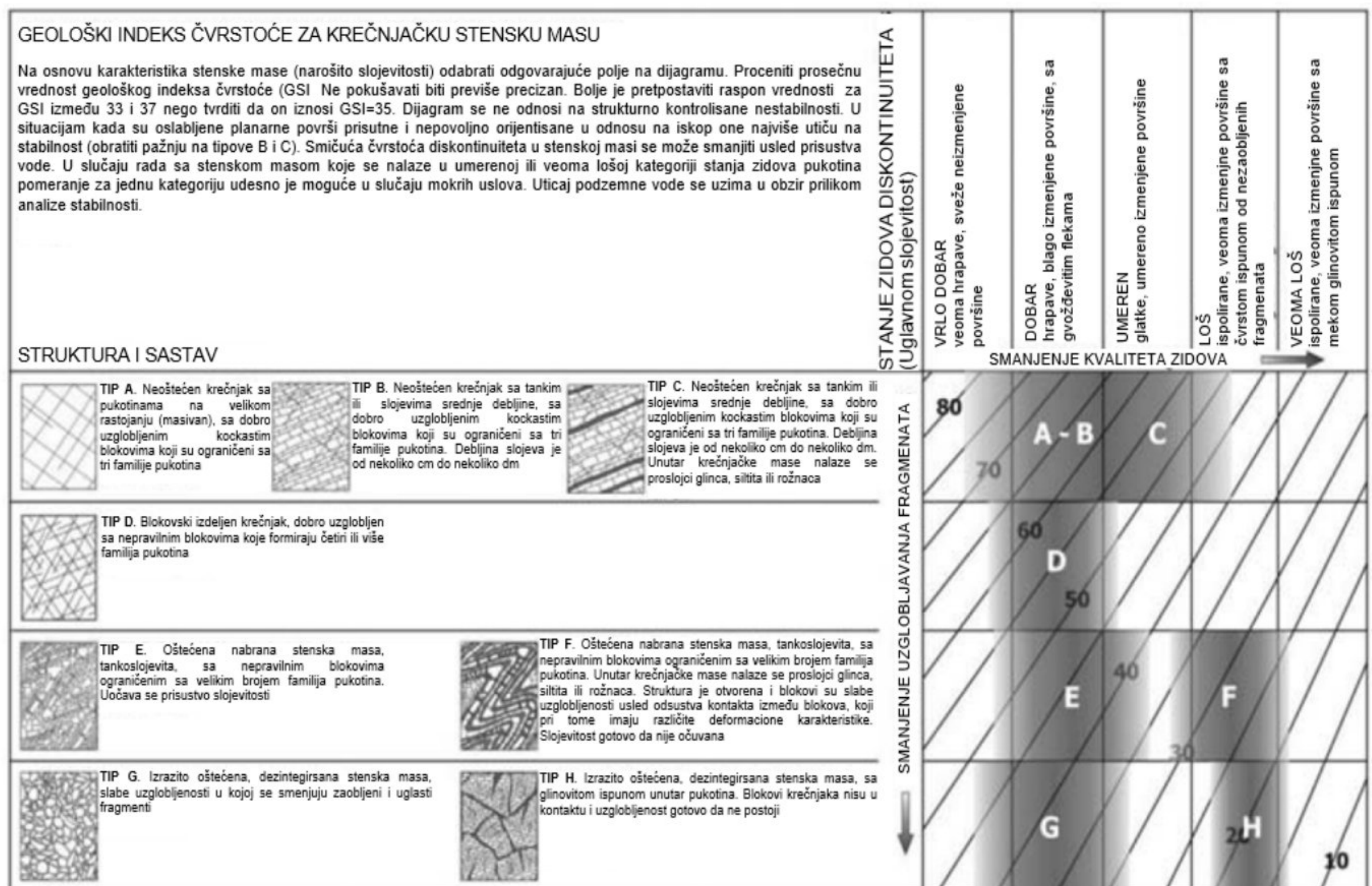


Slika 3.4. GSI dijagram za flišne tvorevine (Marinos 2017, iz Berisavljević i dr, 2021)

U ovom slučaju napravljen je izuzetak, s obzirom da flišni sedimenti poseduju izrazitu strukturnu anizotropiju, a jedan od osnovnih uslova koje stenska masa treba da ima da bi bila podvrgnuta osnovnoj GSI klasifikaciji je izotropnost. Fliš je podeljen u 11 kategorija, pri čemu je na vertikalnoj osi uzglobljenost blokova originalnog GSI dijagrama zamenjena tektonskom oštećenošću, dok horizontalna osa zadržava osnovni princip kvaliteta zidova pukotina. Svaku od 11 kategorija karakteriše određeni stepen tektonske oštećenosti i prisustva sitnozrne i

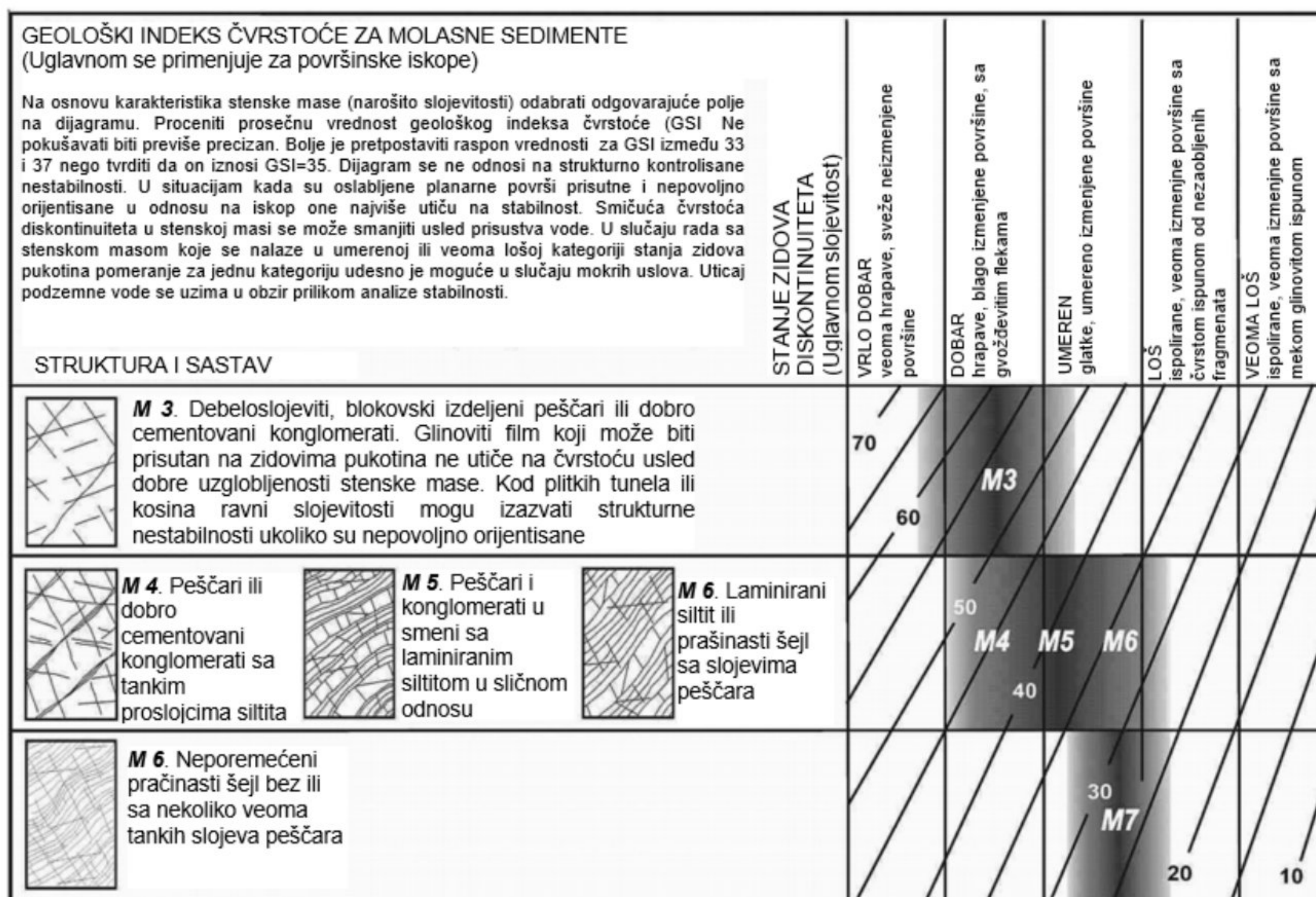
grubo-zrne komponente, pri čemu se sadržaj prašinate i glinovite frakcije povećava sa porastom tektonske oštećenosti. Kategorije su podeljene u dve kolone, levu u kojoj je peščar dominantan u odnosu na silit (alevrolit) ili su jednako zastupljeni, i desnu u kojoj sitnozrna komponenta prevladava. Flišne sekvence kartirane na terenu uglavnom “padaju” na osenčene površine dijagrama, sa označenim tipovima fliša, dok su pojave stenske mase izvan osenčenih delova retke. Na dijagramu su naznačene zone sa geološki nemogućim kombinacijama (N/A).

U nastavku teksta prikazani su GSI dijagrami za krečnjake, laminirane molasne sedimente i gnajs i petrografski slične stene (Marinos, 2010). Dijagrami za krečnjake i molasne sedimente su slični dijagramima za fliš, a kod oba je akcenat stavljen na slojevitost kao dominantnu strukturnu karakteristiku. Prikazani su na slikama 3.5. i 3.6. Dijagram za gnajs (slika 3.7.) ima šest strukturnih kategorija, u zavisnosti od stepena uzglobljenosti blokova stenske mase, dok je u horizontalnom pravcu umesto stanja pukotina, relevantan stepen raspadnutosti. Za razliku od do sada prikazanih GSI dijagrama, dijagram za gnajs poseduje zakrivljene linije. Može se primeniti i za granitne stene, koje pripadaju tipovima od “intaktne” do “dezintegrisane” stenske mase.



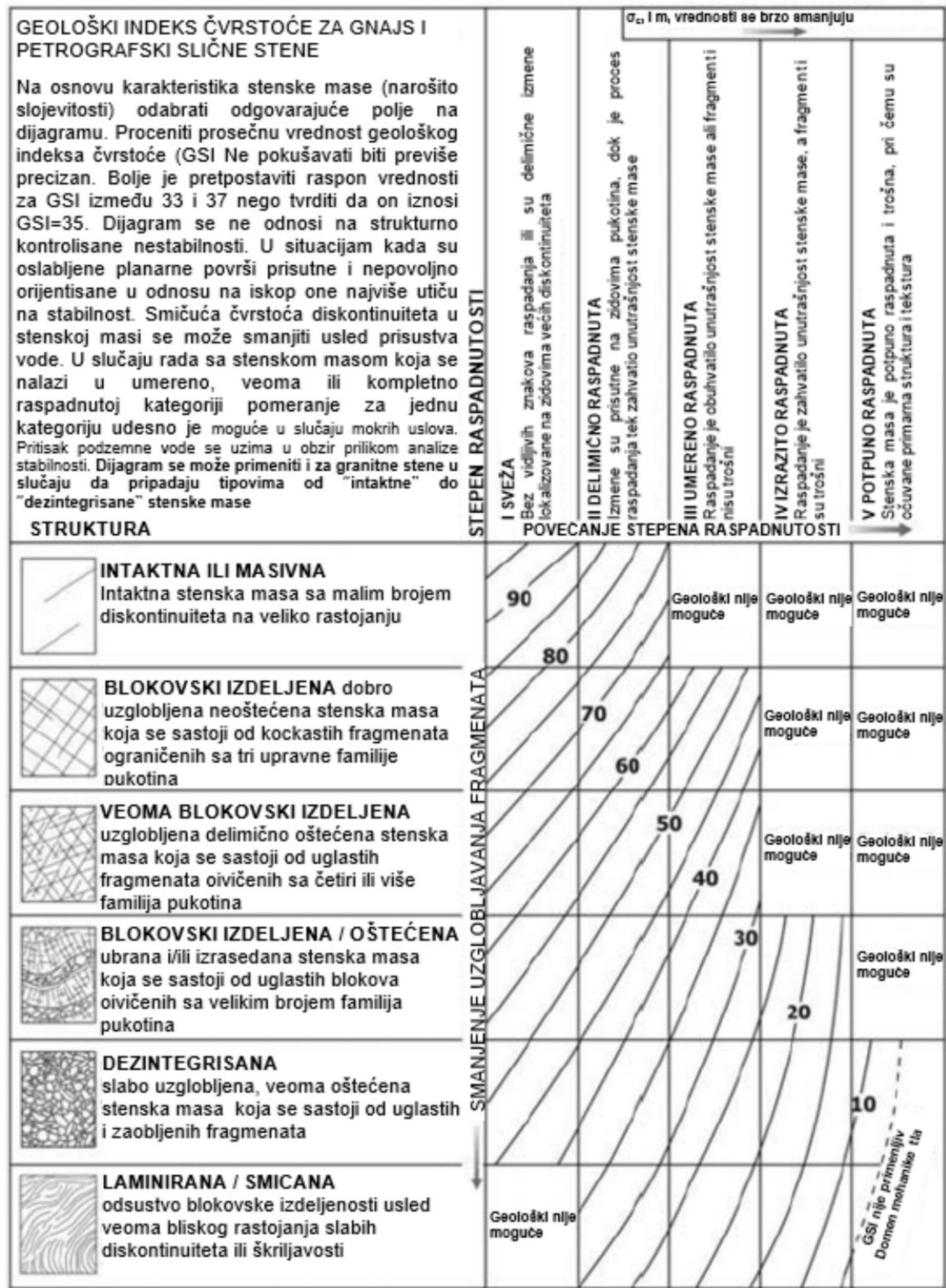
Slika 3.5. GSI dijagram za krečnjake (Marinos, 2010, iz Berisavljević i dr, 2021)





Slika 3.6. GSI dijagram za molasne sedimente (Marinos, 2010, iz Berisavljević i dr, 2021)

Postoji i mogućnost primene GSI dijagrama za kategorizaciju iskopa (Tsiambaos i Saroglou, 2010). Stenske mase su podeljene u četiri kategorije: iskop upotrebom miniranja; hidrauličkog čekića; riperovanjem; bagerom sa kašikom. Koji tehnološki postupak će biti primenjen zavisi od vrednosti GSI stenske mase i korigovanog indeksa tačkaste čvrstoće  $I_{S50}$ . Za stene sa većim GSI koristi se miniranje, dok sa opadanjem GSI u upotrebu ulaze hidraulički čekić, potom riperovanje, i na kraju, za stene sa najmanjim GSI, iskop bagerom sa kašikom.



Slika 3.7. GSI dijagram za gnajs i petrografski slične stene (Marinos, 2010, iz Berisavljević i dr, 2021)

### 3.3. HB kriterijum loma

Originalni Hoek-Brown-ov kriterijum loma (Hoek i Brown, 1980a) je inspirisan Grifitovom teorijom krtoq loma i njegovom analitičkom paraboličkom anvelopom loma (Griffith 1921, 1924), a odnosi se na intaktnu stenu i predstavljen je sledećom zavisnošću u polju glavnih napona (grafički prikazi anvelopa loma dati su na slikama 3.8 i 5.1.):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (2)$$

Gde  $\sigma_{ci}$  predstavlja jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak intaktne stene,  $m_i$  je Hoek-Brown-ova materijalna konstanta za intaktnu stenu, a  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  su veći i manji efektivni glavni naponi u trenutku loma, respektivno. Parametar  $\sigma_{ci}$  se može dobiti iz opita jednoaksijalne kompresije na prethodno obrađenim, cilindričnim uzorcima, ili iz opita triaksijalne kompresije kao odsečak na osi većeg glavnog napona  $\sigma_1$  u slučaju da je manji glavni napon,  $\sigma_3$ , jednak nuli. Alternativno, u slučaju nedostatka odgovarajućih laboratorijskih ispitivanja,  $\sigma_{ci}$  se može proceniti iz Point Load Test-a ili na terenu, pomoću Šmitovog čekića.

Materijalni parametar intaktne stene  $m_i$  donekle je analogan uglu smičuće otpornosti  $\varphi$  kod MC kriterijuma loma i najpouzdanije se određuje fitovanjem anvelope loma dobijene iz najmanje pet opita triaksijalne kompresije na intaktnim uzorcima prečnika 50 mm, sa jednako raspoređenim nivoima bočnih napona, od nula do jedne polovine jednoaksijalne čvrstoće na pritisak (Hoek i Brown 1980b, 1997; Hoek i dr. 1995). U praksi se, usled nedostatka triaksijalnih ispitivanja čvrstoće, parametar  $m_i$  uglavnom određuje iz tabele 3.1. (Marinos i Hoek, 2000).

Anvelopa loma dobijena iz opita triaksijalne kompresije daje previše optimistične vrednosti čvrstoće na zatezanje intaktnog uzorka. Iz tog razloga, HB kriterijum loma se uglavnom koristi sa odsecanjem zatezanja, tzv. „tension cut-off“. Hoek i Brown (2019) navode da vrednost čvrstoće na zatezanje intaktne stene, odnosno tension cut-off-a  $\sigma_t$  može da se odredi pomoću sledeće relacije:

$$\sigma_t = \frac{-\sigma_{ci}}{0,81m_i+7} \quad (3)$$

Tabela 3.1. Procenjene vrednosti parametra  $m_i$  za različite vrste stenskih masa (Marinos i Hoek 2000, iz Berisavljević i dr, 2021)

Vrsta stene	Klasa	Grupa	Veličina zrna				
			Grubo	Srednje	Fino	Veoma fino	
SEDIMENTNE	Klastične		Konglomerati (21 ± 3)	Peščari 17 ± 4	Siltiti 7 ± 2	Glinci 4 ± 2	
			Breče (19 ± 5)		Grauvake (18 ± 3)	Šejl (6 ± 2) Laporci (7 ± 2)	
	Organogene i hemisjke	Karbonati	Kristalasti krečnjaci (12 ± 3)	Sparitski krečnjaci (10 ± 2)	Mikritski krečnjaci (9 ± 2)	Dolomti (9 ± 3)	
		Evaporati	Gips 8 ± 2		Anhidrit 12 ± 2		
		Organske	Kreda 7 ± 2				
	METAMORFNE	Bez folijacije (masivne)		Mermer 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metapeščari (19 ± 3)	Kvarciti 20 ± 3	
				Umerena folijacija	Migmatiti (29 ± 3)	Amfiboliti 26 ± 6	Gnajs 28 ± 5
			Izražena folijacija		Škriljci 12 ± 3	Filiti (7 ± 3)	Argilošisti 7 ± 4
		MAGMATISKE	Plutonske	Svetle	Granit 32 ± 3	Diorit 25 ± 5	Granodiorit (29 ± 3)
	Tamne			Gabro 27 ± 3	Dolerit (16 ± 5)	Norit 20 ± 5	
	Hipoabisalne			Porfiriti (20 ± 5)	Dijabazi (15 ± 5)	Peridotiti (25 ± 5)	
Vulkanske	Lava		Riolit (25 ± 5)	Dacit (25 ± 3)	Andezit 25 ± 5	Bazalt (25 ± 5)	
	Piroklasititi		Aglomerati (19 ± 3)	Vulkanska breča (19 ± 5)		Tuf (13 ± 5)	

Hoek i Brown su proširili svoj kriterijum loma tako da obuhvata i ispucale stenske mase, a ne samo intaktne uzorke, usvajajući isti oblik paraboličke anvelope loma sa prilagođenim parametrima. Najvažnija komponenta modifikovanog HB kriterijuma loma za stensku masu je proces kojim se inženjerskogeološke opservacije na terenu koriste da redukuju otporno-deformabilne parametre intaktne stene do reprezentativnih vrednosti parametara za stensku masu (Marinos i Hoek, 2000). Napominjemo da je originalni HB kriterijum loma pretrpeo brojne promene, koje su se odnosile na odabir i prirodu parametara koji vrše redukciju čvrstoće intaktne stene na čvrstoću ispucale stenske mase. U ovom radu pomenute promene neće biti diskutovane, već će akcenat biti stavljen na najnovije verzije HB kriterijuma loma.

HB kriterijum loma za stensku masu se često naziva generalizovani HB kriterijum loma i njegova najnovija verzija, usvojena od strane Hoek i dr. (2002) i Hoek i Brown (2019) glasi:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

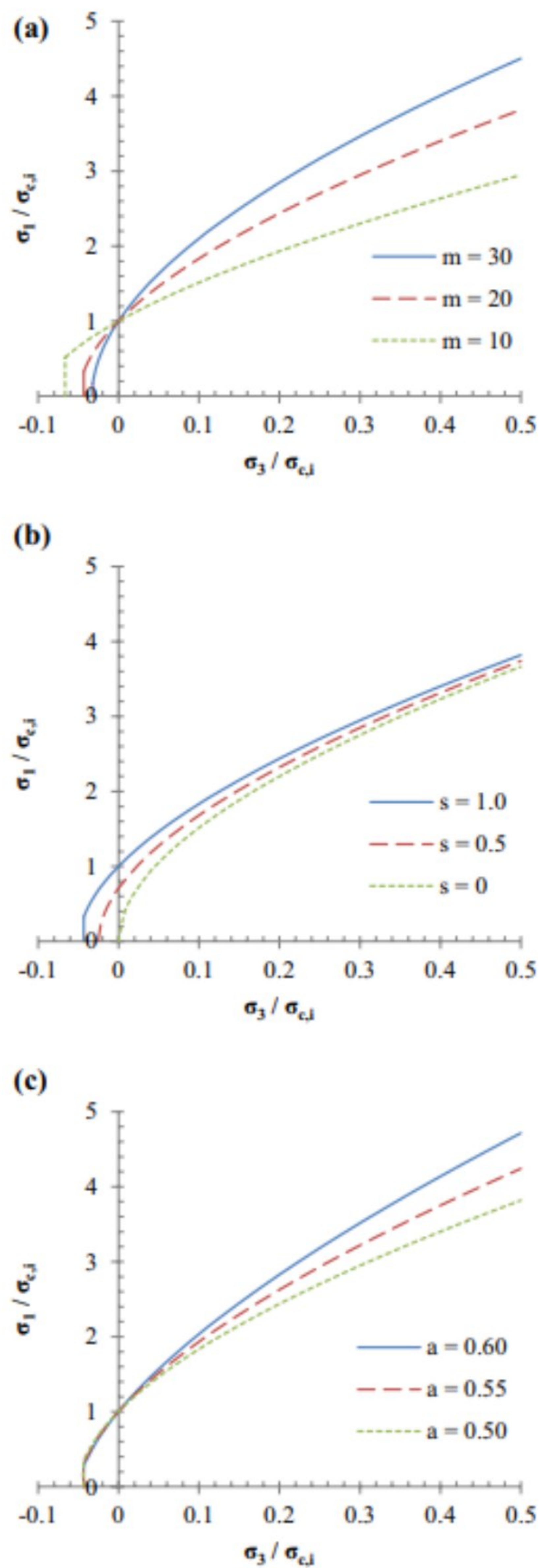
Parametar  $m_i$  za intaktnu stenu koji figuriše u jednačini (2) zamenjen je parametrom  $m$  (u literaturi se može naći i oznaka  $m_b$ ) za stensku masu. Slika 3.8.(a) prikazuje uticaj promene parametra  $m$  na anvelopu loma u polju normalizovanih glavnih napona. Smanjenje  $m$  uzrokuje smanjenje ugla nagiba anvelope loma, odnosno „frikcione“ komponente čvrstoće, pri čemu je analogija sa uglom smičuće otpornosti  $\varphi$  MC kriterijuma loma očigledna. Parametar  $s$  predstavlja „kohezivnu“ komponentu čvrstoće i ukazuje na izlomljenost stenske mase, a uticaj njegove promene na anvelopu loma prikazuje slika 3.8.(b). Smanjenje parametra  $s$  uzrokuje smanjenje čvrstoće na pritisak stenske mase na osi normalizovanog većeg glavnog napona. Za intaktni uzorak bez pukotina,  $s = 1$ , a čvrstoća na pritisak stenske mase  $\sigma_c$  jednaka je čvrstoći na pritisak intaktnog uzorka  $\sigma_{ci}$ . Za intenzivno ispucalu stenu  $s = 0$  i  $\sigma_c = 0$ . Variranje parametra  $a$  prikazano je na slici 3.8.(c). Eksponent  $a$  kontroliše stepen zakrivljenosti anvelope loma, čineći parabolu za  $a = 0,5$  i pravu liniju za  $a = 1$ . Jednačine koje su dali Hoek i dr. (2002) i Hoek i Brown (2019) ograničavaju vrednosti parametra  $a$  između 0,5 i 0,6, za većinu stenskih masa.

Pretpostavljajući da je  $\sigma_3 = 0$  u jednačini (4), može se dobiti jednoaksijalna čvrstoća na pritisak stenske mase  $\sigma_c$  korišćenjem sledećeg izraza:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \times s^a \quad (5)$$

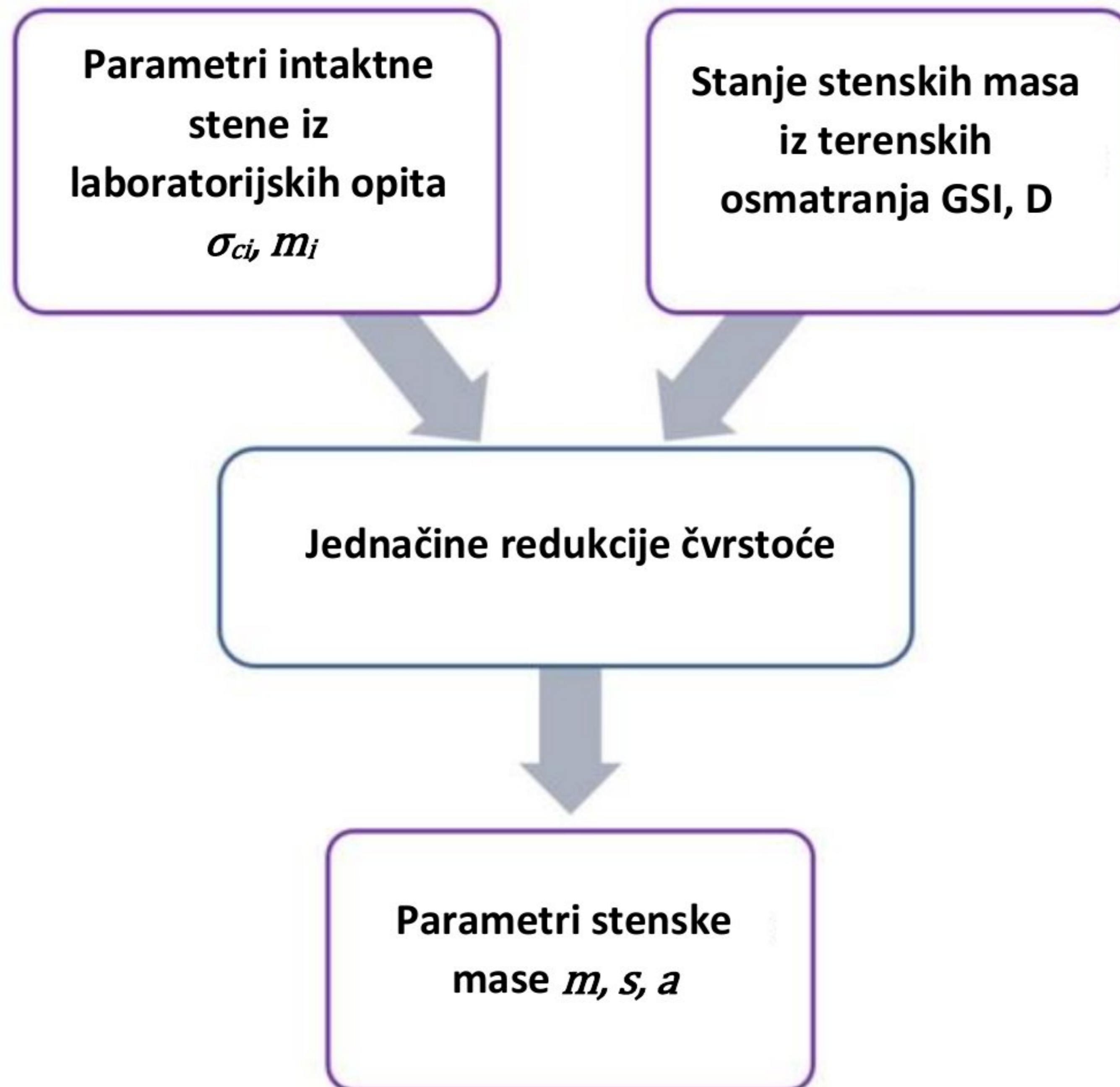
Hoek i dr. (2002) daju sledeću vrednost čvrstoće na zatezanje stenske mase pretpostavljajući da je  $\sigma_1 = \sigma_3$  u jednačini (4):

$$\sigma_t = \frac{-\sigma_{ci} \times s}{m} \quad (6)$$



Slika 3.8. Uticaj parametara  $m, s$  i  $a$  na anvelopu loma generalizovanog HB kriterijuma loma, koristeći: a)  $s = 1, a = 0,5$ ; b)  $m = 20, a = 0,5$ ; c)  $m = 20, s = 1.0$ . Vertikalni segment anvelope loma u domenu napona zatezanja predstavlja tension cut-off. Preuzeto iz Renani i Cai (2021).

Da bi se kriterijum loma uspešno koristio, mora se povezati sa inženjerskogeološkim ispitivanjem stenske mase na terenu. Stoga, od neprocenjive je važnosti kvalitetno prikupljanje terenskih podataka i njihova kvantifikacija koji će omogućiti obavljanje redukcije čvrstoće intaktnog uzorka na čvrstoću stenske mase. Pritom, u obzir se uzimaju dva aspekta stanja stenske mase u terenu: kvalitet stenske mase, izražen preko geološkog indeksa čvrstoće GSI i oštećenje stenske mase usled iskopa, izraženo faktorom oštećenja D. Postupak redukcije čvrstoće i odabir geotehničkih parametara stenske mase prikazan je na slici 3.9.



*Slika 3.9. Centralna uloga HB jednačina redukcije čvrstoće u proceni geotehničkih parametara stenske mase iz intaktnih parametara i inženjerskogeoloških istraživanja na terenu, modifikovano prema Renani i Cai (2021)*

Pomenute jednačine redukcije čvrstoće, odnosno zavisnosti kojima se dobijaju parametri stenske mase  $m$ ,  $s$  i  $a$  su predložili Hoek i dr. (2002), a potvrdili Hoek i Brown (2019):

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (7)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( \exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right) \quad (9)$$

O određivanju GSI je već bilo reči, a parametar  $D$  predstavlja faktor oštećenja stenske mase usled iskopa. Iskop stenske mase za potrebe formiranja kosina i tunela se često vrši miniranjem, pri čemu se vrši rastresanje i oštećenje u blizini površine iskopa. Takođe, uklanjanjem materijala dolazi do preraspodele napona i relaksacije stenske mase, usled čega se javlja širenje pukotina. Uticaj oštećenja usled iskopa je najintenzivniji na površini iskopa i slabi sa dubinom. Hoek i dr. (2002) uvode faktor oštećenja  $D$  i uputstva za njegovu procenu, prikazana u tabeli 3.2. Faktor  $D$  varira od 0, za neoštećene stenske mase, do 1 za potpuno oštećene partije. U opštem slučaju, efekat oštećenja i relaksacije napona igra značajniju ulogu kod kosina nego kod tunela, usled pojave nesprečenog bočnog širenja kosina. Ne postoje precizna uputstva za definisanje parametra oštećenja  $D$ , već samo preporuke pojedinih autora (Hoek i Karzulovic, 2000; Hoek, 2012 i dr.), koje na ovom mestu neće biti razmatrane. Uticaj faktora  $D$  na vrednost geotehničkih parametara za stensku masu može biti znatan. Na primer, stenska masa sa  $GSI = 50$  i  $D = 1$  je slabija od one sa  $GSI = 30$  i  $D = 0$  (Renani i Cai, 2021).

Zavisnost parametara  $m$ ,  $s$  i  $a$  od GSI je prikazana na slici 3.10. “Kohezivna” komponenta  $s$  naglo opada sa smanjenjem vrednosti GSI, što je od presudnog uticaja na činjenicu da jednoaksijalna čvrstoća na pritisak stenske mase opada na vrednost ispod 10 % od jednoaksijalne čvrstoće intaktne stene za vrednosti GSI od oko 60 i 70, za neporemećenu i potpuno poremećenu stensku masu, respektivno (Renani i Cai, 2021).

Generalizovani HB kriterijum loma je našao primenu i u određivanju deformabilnih karakteristika stenske mase, pre svih modula deformacije stenske mase  $Em$ . On se može odrediti poznavajući modul elastičnosti intaktne stene  $Ei$  i parametre GSI i  $D$  (prema Hoek i Diederichs, 2006):

$$Em = Ei \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + \exp\left(\frac{60 + 15D - GSI}{11}\right)} \right) \quad (10)$$

Ukoliko nemamo podatke o modulu elastičnosti intaktne stene, modul deformacije stenske mase  $Em$  se može proceniti iz jednačine:

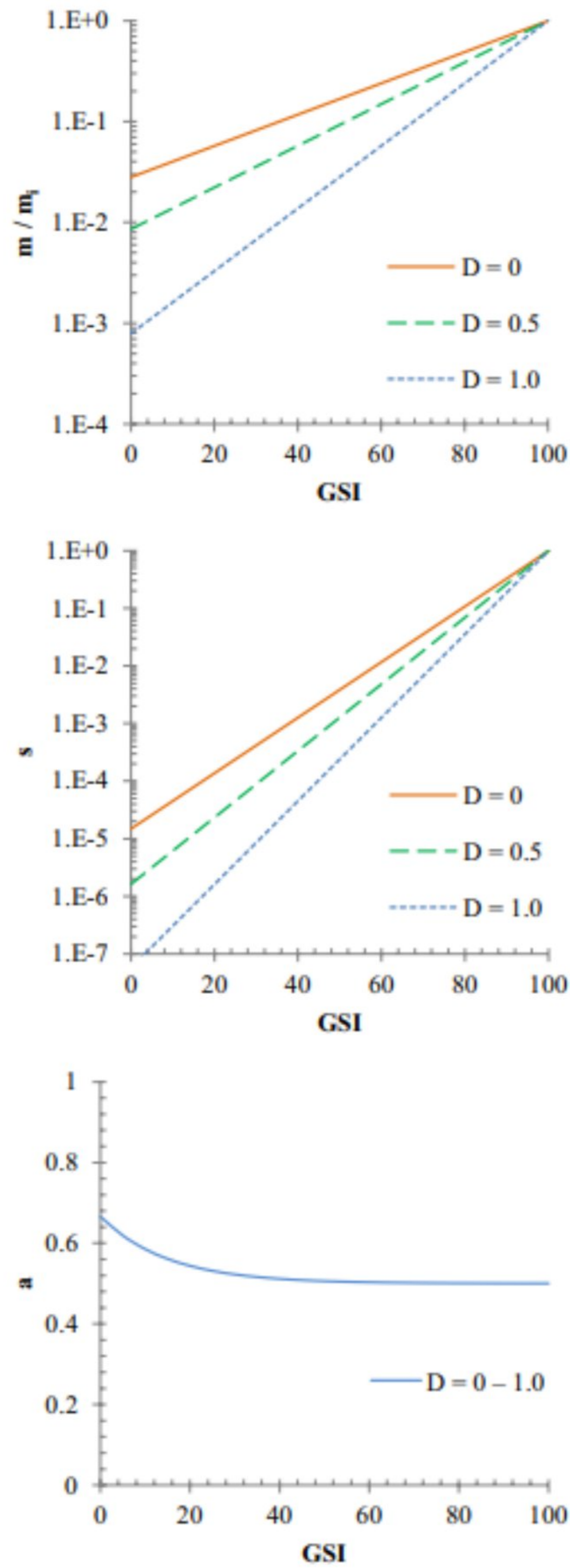
$$Em = 100 \left( \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + \exp\left(\frac{75 + 25D - GSI}{11}\right)} \right) \quad (11)$$

Brown (2008) smatra da su relacije (10) i (11) nepouzidane za stensku masu sa  $GSI < 30$ .



Tabela 3.2. Preporuke za procenu faktora oštećenja  $D$  (Hoek i dr, 2002, iz Berisavljević, 2015)

Izgled stenskog masiva	Opis stenske mase	Preporučena vrednost $D$
	<p>Kontrolisano miniranje odličnog kvaliteta ili otkopavanje pomoću mašine za kopanje tunela (TBM) najmanje poremećuje okolnu stensku masu tunela koja se nalazi u određenom naponskom stanju.</p>	<p><math>D = 0</math></p>
	<p>Mehanizovano ili ručno otkopavanje u stenskoj masi lošeg kvaliteta (bez miniranja) ima za posledicu minimalno oštećenje okolne stenske mase.</p> <p>U slučajevima gde se javljaju problemi povećanih pritisaka koji se ogledaju u većem bujanju podine, oštećenje može biti značajno ukoliko se ne postavi privremena podgrada, kao što je prikazano na slici.</p>	<p><math>D = 0</math></p> <p><math>D = 0,5</math></p>
	<p>Miniranje vrlo lošeg kvaliteta u čvrstim stenama dovodi do značajnog lokalnog oštećenja, koje se pruža 2 do 3 m unutar okolne stenske mase.</p>	<p><math>D = 0,8</math></p>
	<p>Miniranja manjih razmera za formiranje kosina u građevinarstvu dovode do manjih oštećenja stenske mase, naročito ako se primenjuje kontrolisano miniranje kao što je prikazano na levoj strani slike. Ipak, oslobađanje napona dovodi do određenog oštećenja.</p>	<p><math>D = 0,7</math> Dobro miniranje</p> <p><math>D = 1,0</math> Loše miniranje</p>
	<p>Kosine velikih površinskih kopova trpe značajna oštećenja usled miniranja velikih razmera i usled oslobađanja napona nakon uklanjanja otkrivke.</p> <p>U pojedinim mekšim stenama moguće je otkopavanje vršiti ripovanjem i guranjem i u tim slučajevima stepen oštećenja kosina je manji</p>	<p><math>D = 1,0</math> Miniranje velikih razmera</p> <p><math>D = 0,7</math> Mašinsko otkopavanje</p>



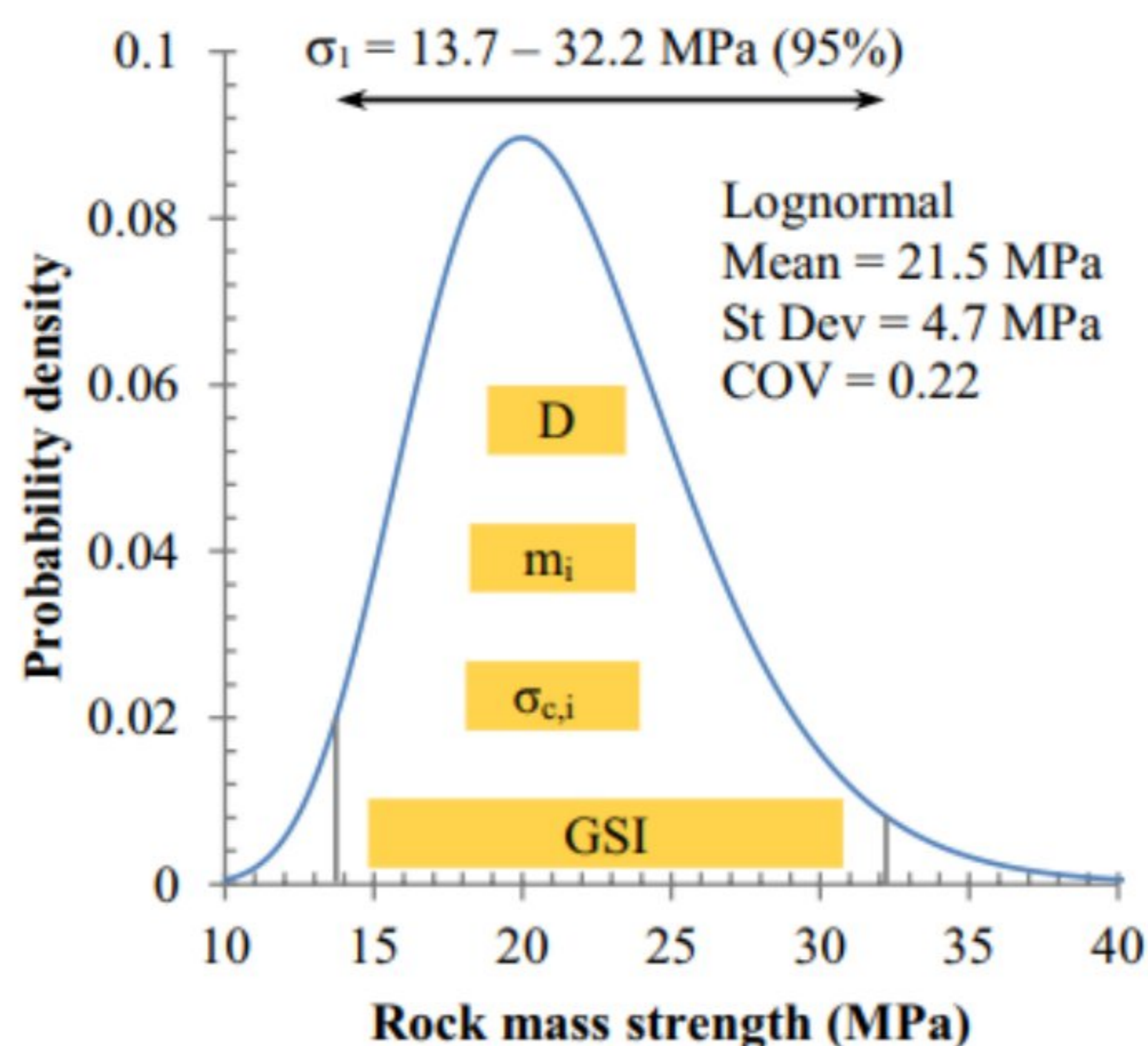
Slika 3.10. Zavisnost parametara stenske mase  $m$ ,  $s$  i  $a$  od  $GSI$  i  $D$  (Renani i Cai, 2021)

Generalizovani HB kriterijum loma zasnovan je na ograničenom broju eksperimentalnih podataka, te se pravilno može koristiti samo u određenim terenskim uslovima, u kojima su njegovi osnovni postulati zadovoljeni (Renani i Cai, 2021). Kriterijum se može koristiti za homogenu, blokovski ispucalu i izotropnu sredinu. Ovi uslovi su zadovoljeni kod stenske mase sa brojnim diskontinuitetima slične smičuće čvrstoće a različitih orijentacija, gde nema povlašćenih pravaca za razvoj loma. Lom stenske mase koja se može nazvati HB materijalom se odvija klizanjem i rotacijom intaktnih blokova nastalih presecanjem pukotina, bez značajnog učešća loma kroz intaktnu stenu. Ovo se može desiti u sredinama sa malim svestranim pritiscima, blizu površine terena. Jednačine redukcije čvrstoće su zasnovane na ispitivanjima čvrstoće Panguna andezita sa bočnim naponima  $\sigma_3 < 3,5$  MPa, a primena kriterijuma je ograničena na krti lom. Povećanjem svestranih pritisaka preko određene granice, definisane Mogi linijom čija je jednačina  $\sigma_3 = \sigma_1/3,4$ , dolazi do pojave duktilnog, odnosno plastičnog loma. Stoga, korišćenje generalizovanog HB kriterijuma loma u stenskim masama izloženim visokim svestranim pritiscima, na primer u tunelima položenim duboko ispod površine terena, nije preporučljivo. Preporuka je da se prilikom triaksijalnog ispitivanja vrednost manjeg glavnog napona kreće u intervalu  $0 < \sigma_3 < 0,5 \sigma_{ci}$ . Konvencionalni triaksijalni aparati imaju mogućnost nanošenja svestranog bočnog pritiska od maksimalno 60 MPa što ukazuje da je moguće ispitati uzorke čija jednoaksijalna čvrstoća na pritisak ne prelazi 120 MPa (Berisavljević i dr, 2021; Hoek i Franklin, 1968).

Prosečno rastojanje diskontinuiteta mora biti značajno manje od dimenzija iskopa da bi stabilnost iskopa bila kontrolisana sveukupnim karakteristikama stenske mase, a ne kretanjem pojedinačnih blokova duž nepovoljno orijentisanih diskontinuiteta. Na primer, ovo je zadovoljeno kod tunela prečnika 10 m sa prosečnim rastojanjem pukotina koje iznosi 0,5 m (Renani i Cai, 2021). Generalizovani HB kriterijum se ne može upotrebiti za smičući lom jako raspadnute stenske mase, nalik tlu, gde je pogodnija upotreba MC kriterijuma loma (Brown, 2008) ili za smicanje pojedinačnih krupnih blokova i klinova (pogodna je upotreba BB kriterijuma loma). Prema Cai i dr. (2004), upotreba generalizovanog HB kriterijuma loma je opravdana za stenske mase sa  $GSI < 75$ , dok Renani i Cai (2021) smanjuju taj opseg na  $GSI \approx 30-70$ , kako bi opravdali izvorne ideje o izotropnosti i uzglobljenosti blokova. Berisavljević i dr. (2021) navode da je optimalni opseg  $GSI \approx 5-65$ .

Jedna od osnovnih pretpostavki HB kriterijuma je da čvrstoća stena zavisi od efektivnih napona, a uticaj porne vode se može uzeti u obzir održavanjem prirodne vlažnosti uzorka pri testiranju. Kriterijum je razvijen koristeći podatke o vršnoj čvrstoći, odnosno napone pri lomu. Ipak, poznavanje postrupturnog ponašanja stenske mase može biti od značaja. Hoek i Brown (1997) navode da je veličina gubitka čvrstoće posle loma direktno proporcionalna kvalitetu stenske mase, izraženom preko GSI. Na primer, povećavanjem GSI od 30 do 50 i 75, za posledicu ima promenu postrupturnog ponašanja od savršeno plastičnog do deformacijskog omekšavanja i krtog loma, dok odnos rezidualne i vršne čvrstoće na pritisak stenske mase  $\sigma_c$  opada od 1 do 0,6 i 0, respektivno (Hoek i Brown, 1997).

Hoek (1998) navodi da raspon faktora sigurnosti kosine može biti „neprijatno velik“ čak i sa kvalitetnim laboratorijskim ispitivanjem i terenskim istraživanjem, kao i da rasponi mogu postati „alarmantno veliki“ sa neodgovarajućim izvođenjem i interpretacijom opita. Kao ilustracija navedena je analiza osetljivosti (slika 3.11, prema Renani i Cai, 2021) u kojoj su menjane vrednosti svakog ulaznog parametra u rasponu od 95 percentila (u pitanju je raspon vrednosti unutar kog se može naći 95 % opservacija pomenutih parametara) dok su drugi parametri ostajali isti. Može se zaključiti da nepouzdanost GSI ima daleko najveći uticaj na parametre čvrstoće stenske mase, praćeno nepouzdanostima  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$  i  $D$ . Teorijski posmatrano, smanjenje nepouzdanosti vrednosti GSI je najefektniji način za povećanje sveukupne tačnosti i pouzdanosti proračuna stabilnosti.



Slika 3.11. Reprezentativne distribucije čvrstoće stenske mase pri  $\sigma_3 = 2$  MPa. Žuti pravougaonici ukazuju na raspone vrednosti dobijene variranjem svakog parametra dok su drugi nepromenjeni (Renani i Cai, 2021)

## 4. Q KLASIFIKACIONI SISTEM

Q klasifikacioni sistem (Barton i dr, 1974) predstavlja, uz  $RMR_{89}$  (Bieniawski, 1989), najkorišćeniji sistem za klasifikaciju stenskih masa u svetu. Izvorno je formulisan za potrebe izvođenja podzemnih objekata, i služi za definisanje stepena stabilnosti podzemnih iskopa, kao i za projektovanje podgradnih sistema. Q sistem je razrađen u Norveškom geotehničkom institutu (NGI) 1973. godine. Nastao je na osnovu analize više od 200 izvedenih projekata, od kojih je oko 60 % iz Norveške i Švedske, a 50 % je vezano za objekte hidrocentrala – tunele i podzemne hale. Poboljšanje sistema je izvedeno 1993. godine, od strane Grimstad i Barton (1993), kada su uključena iskustva nastala tokom projektovanja i izvođenja 1050 različitih objekata (uglavnom u Norveškoj), uključujući i saobraćajne tunele velike dužine, na velikoj dubini, poput tunela Laerdal dužine 24,5 km, na dubini 1400 m (Barton, 2015). Druga modifikacija je usledila 2002. godine (Grimstad i dr, 2002), kada je uzeto u obzir više od 900 podzemnih iskopa u Norveškoj, Švajcarskoj i Indiji.

Q klasifikacija je bazirana na osnovu iskustava stečenih prilikom izgradnje podzemnih objekata mahom u krtim, ispucalim stenskim masama, karakterističnim za Skandinaviju. Iskustva autora klasifikacije sa mekim stenama su ograničena, te se u takvim situacijama, a posebno u stenskim masama sa izraženim pojavama vremenski zavisnih deformacija, predlaže kombinovanje Q sistema sa osmatranjem konvergencija i numeričkim analizama (Berisavljević i dr, 2021).

Q sistem može da se primeni u različitim fazama projektovanja podzemnih objekata, s tim što je definisanje parametara Q klasifikacije na jezgru istražne bušotine nepouzdanije i teže nego na licu iskopa, prilikom izvođenja objekta (NGI, 2015)

Q vrednost se izračunava na osnovu sledeće jednačine:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (12)$$

Gde je,  $RQD$ -indeks kvaliteta stenske mase;  $J_n$ -indeks broja familija i pojedinačnih pukotina;  $J_r$ -indeks hrapavosti pukotinskih površi;  $J_a$ -indeks izmene (alteracije) pukotina;  $J_w$ -indeks redukcije usled prisustva vode u stenskoj masi;  $SRF$ -faktor redukcije napona.

Tri količnika u jednačini (12) definišu sledeće faktore:

1) Stepen ispucalosti (veličina bloka) je definisan količnikom  $RQD/J_n$ . Ovaj faktor je od velikog značaja kod krtih, ispucalih stenskih masa, dok se kod mekih stena deformacije mogu javiti nezavisno od pukotina, te pomenuti faktor nema veći značaj (NGI, 2015).

2) Međublokovska smičuća čvrstoća (trenje duž diskontinuiteta) definisana je količnikom  $Jr/Ja$ .

3) Naponsko stanje definiše odnos faktora  $Jw/SRF$ . Na stabilnost podzemnih iskopa u krtim stenskim masama značajno utiče odnos intenziteta napona koji deluje na konturu iskopa i čvrstoće stenske mase. Najpovoljniji je umeren napon, dok su visoke i niske vrednosti napona manje poželjne. S tim u vezi, do ljuškanja stene može doći kada veći glavni napon dostigne vrednost od 20 % čvrstoće stenske mase na pritisak, dok do vremenski zavisnih deformacija može doći u slučaju kada tangenti napon prekorači vrednost čvrstoće na pritisak stenske mase (NGI, 2015).

Q vrednost se kreće u rasponu od 0,001 do 1000, a u slučaju ekstremnih gornjih i donjih graničnih uslova može biti veća od 1000, odnosno manja od 0,001. Visoka Q vrednost ukazuje na stensku masu dobrih karakteristika, a niska na lošu stensku masu.

#### 4.1. Procena parametara Q klasifikacije

**RQD** je definisao Deere 1963. godine (Deere, 1963), kao sumu dužina komada jezgra (ograničenih prirodnim pukotinama) dužih od 10 cm, u odnosu na dužinu intervala bušenja. Izražava se u procentima, u rasponu od 0 do 100. Zdrobljene stenske mase sa  $RQD = 0$  bi imale vrednost  $Q = 0$ . Da bi se to izbeglo, minimalna vrednost RQD koja se primenjuje u jednačini (12) je ograničena na 10. Procena RQD iz jezgra bušotine se vrši u fazama projektovanja podzemnih objekata, dok se prilikom njihovog izvođenja može dobiti trodimenzionalni prikaz stenske mase, te se RQD može odrediti pomoću podatka o broju pukotina po  $m^3$ , po formuli Palmstroma (Palmstrom, 2005):

$$RQD = 110 - 2,5Jv \quad (13)$$

Gde je  $Jv$  broj pukotina po  $m^3$ , i može se proceniti iz sledeće jednačine (Palmstrom, 1982):

$$Jv = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (14)$$

Gde je  $S_i$  prosečno rastojanje između pukotina u okviru  $i$ -te familije, izraženo u metrima. Na osnovu vrednosti RQD moguće je klasifikovati stensku masu u pet kategorija, kao što je prikazano u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Vrednovanje parametra RQD (NGI, 2015)

RQD – indeks kvaliteta stenske mase			RQD
A	Veoma loša	> 27 pukotina/m <sup>3</sup>	0-25
B	Loša	20-27 pukotina/m <sup>3</sup>	25-50
C	Zadovoljavajuća	13-19 pukotina/m <sup>3</sup>	50-75
D	Dobra	8-12 pukotina/m <sup>3</sup>	75-90
E	Odlična	0-7 pukotina/m <sup>3</sup>	90-100

Napomena: a) Kada je mereni RQD < 10, usvojiti vrednost 10  
b) RQD intervali od 5, npr. 95, 75, 60 su dovoljno tačni

**Parametar  $Jn$**  zavisi od broja familija pukotina i pojedinačnih pukotina. Kriterijum za razlikovanje familije od pojedinačne pukotine nije jasno definisan i zavisi od rastojanja između paralelnih pukotina i dimenzija iskopa. U opštem slučaju, ako je rastojanje unutar jedne familije veće od visine ili širine podzemne prostorije, pukotine se posmatraju kao pojedinačne. Kontinualnost pukotina na čelu iskopa nema direktnog uticaja na vrednost Q. U pojedinim slučajevima treba uzeti u obzir i veličinu bloka. Kod stubastog lučenja, jedini mogući lom je paralelan osi stuba. Usvajanje vrednosti  $Jn = 9$ , za tri familije pukotina bi bilo previše konzervativno, stoga je preporučena (NGI, 2015) vrednost  $Jn = 4$ , za dve familije pukotina. Vrednovanje parametra  $Jn$  u okviru Q klasifikacije dato je u tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Vrednovanje parametra  $Jn$  (NGI, 2015)

$Jn$ - indeks broja familija pukotina		$Jn$
A	Masivna stenska masa, bez ili sa nekoliko pojedinačnih pukotina	0,5-1,0
B	Jedna familija pukotina	2,0
C	Jedna familija sa pojavom pojedinačnih pukotina	3,0
D	Dve familije pukotina	4,0
E	Dve familije sa pojavom pojedinačnih pukotina	6,0
F	Tri familija pukotina	9,0
G	Tri familije sa pojavom pojedinačnih pukotina	12,0
H	Četiri ili više familija, nasumično intenzivno ispucala stenska masa	15,0
J	Zdrobljena stenska masa, nalik tlu	20,0

Napomena: a) Na mestima ukrštanja iskopa, koristiti vrednost  $Jn$  uvećanu 3 puta ( $3 * Jn$ )  
b) Za portalne delove iskopa koristiti  $2 * Jn$

**Indeks hrapavosti pukotina  $Jr$**  se određuje za najnepovoljniju familiju pukotina sa aspekta stabilnosti. Njegovo vrednovanje prikazano je u tabeli 4.3. Hrapavost pukotina se može proučavati u dve razmere posmatranja: termin hrapavost, u užem smislu, se odnosi na nepravilnosti pukotinske površi u mm-cm redu veličina. Termin zatalasanost se koristi za definisanje nepravilnosti u dm-m redu veličina, i mora se posmatrati u odnosu na prosečnu veličinu bloka. Ukoliko je blok manjih dimenzija od zatalasanosti, onda ona nije merodavna za određivanje  $Jr$ .

Ukoliko pukotina poseduje ispunu koja onemogućava ostvarivanje kontakta između zidova pukotine, tada je merodavna čvrstoća materijala ispune, pri čemu se usvaja  $Jr = 1$ . Ako je prisutan tanak sloj ispune, gde pre smicanja od 10 cm dolazi do kontakta zidova pukotine, onda se usvaja vrednost indeksa  $Jr$  kao za slučaj bez ispune. Za zatalasane i hrapave pukotine je potrebna veća debljina ispune za sprečavanje ostvarivanja kontakta zidova nego u slučaju glatkih, planarnih diskontinuiteta. U slučaju diskontinuiteta kod kojih je hrapavost različita u dva upravna pravca, što je čest slučaj kod rasednih ogledala sa izraženim strijama, merodavna je hrapavost merena u smeru mogućeg smicanja (NGI, 2015).

Indeks hrapavosti za masivne, neispucane stenske mase iznosi 4, dok za zdrobljen materijal nalik rezidualnom tlu iznosi 1 (NGI, 2015). Kod mekih neispucanih stena, indeks hrapavosti nije relevantan, s obzirom da pomeranje zavisi od čvrstoće stenske mase i naponskog stanja oko podzemne prostorije.

Indeks hrapavosti  $Jr$  se može odrediti pomoću koeficijenta hrapavosti pukotina JRC, parametra dobro poznatog iz BB kriterijuma loma. Korelacija između dva parametra prikazana je na slici 4.1.

**Indeks izmene pukotina  $Ja$**  značajno utiče na njihovu smičuću čvrstoću. Prilikom njegovog određivanja, pukotine su podeljene u tri klase („a“, „b“ i „c“) na osnovu postojanja ispune i stepena ostvarivanja kontakta zidova pukotine. Vrednovanje ovog indeksa prikazano je u tabeli 4.4. Indeks izmene  $Ja$  bi trebalo da se odredi za sve familije pukotina na licu iskopa, međutim, prilikom određivanja vrednosti  $Q$ , relevantan je indeks izmene najnepovoljnije orijentisane pukotine. Veliki uticaj na procenu indeksa  $Ja$  imaju mineraloške karakteristike ispune i potencijalno prisustvo bubrivih, montmorionitskih glina, koje izrazito nepovoljno utiču na stabilnost iskopa.












Tabela 4.3. Vrednovanje parametra  $J_r$  (NGI, 2015)

$J_r$ – indeks hrapavosti pukotina		$J_r$
a) Ostvaren kontakt zidova pukotina;		
b) Ostvaren kontakt zidova pukotina pre smicanja u iznosu 10 cm		
A	Diskontinualne pukotine	4
B	Hrapave ili nepravilne, talasaste pukotine	3
C	Glatke, talasaste pukotine	2
D	Ispolirane, talasaste	1,5
E	Hrapave ili nepravilne, ravne pukotine	1,5
F	Glatke, ravne pukotine	1
G	Ispolirane, ravne pukotine	0,5
Napomena: a) Termini hrapave, glatke i ispolirane se odnose na hrapavost u mm-cm redu veličina, dok termini talasaste i ravne ukazuju na zatalasanost u dm-m redu veličina		
c) Bez dodira zidova pukotina posle smicanja		
H	Glinena ispuna dovoljne debljine da spreči kontakt zidova pukotina	1,0
Napomena: b) Na vrednost $J_r$ dodati 1 ako je srednje rastojanje pukotina unutar familije veće od 3 m (zavisi od veličine podzemnog iskopa)		
c) $J_r = 0,5$ se može koristiti za ispolirane, ravne pukotine sa lineacijom orijentisanom u smeru mogućeg kretanja		

**Faktor redukcije zbog uticaja vode u pukotinama  $J_w$**  je uveden zbog dvostrukog negativnog dejstva vode u terenu. Voda može omekšati ili ispirati mineralnu ispunu, kao i uzrokovati bubrenje montmorionitskih glina, što izaziva smanjenje ugla smičuće otpornosti diskontinuiteta. Takođe, pritisak vode smanjuje normalni napon koji deluje na zidove pukotina, smanjujući time smičuću čvrstoću blokova stene. Procena faktora  $J_w$  se vrši osmatranjem dotoka i pritiska vode u podzemni iskop. Veoma niske vrednosti ovog faktora ( $J_w < 0,2$ ) ukazuju na velike probleme sa nestabilnošću podzemnih otvora (NGI, 2015). Određivanje faktora  $J_w$  je povezano sa pojedinim nepouzdanostima. Kod plitko položenih podzemnih objekata, dotok vode može znatno varirati u zavisnosti od godišnjeg doba i količine padavina kada se vrši iskop. Ponekad, stenska masa može biti suva odmah po iskopu, sa naknadno uspostavljenim dotokom vode. U suprotnim slučajevima, veliki doticaj vode neposredno po

obavljenom iskopu se može znatno smanjiti posle nekog vremena. Vrednovanje parametra  $J_w$  prikazano je u tabeli 4.5.

Veza između $J_r$ i $JRC_n$		$J_r$	$JRC_{20}$	$JRC_{100}$
I	hrapava	4	20	11
				
	glatka			
II	ispolirana	3	14	9
				
III	Stepeničasta	2	11	8
				
IV	hrapava	3	14	9
				
	glatka			
V	ispolirana	2	11	8
				
VI	Zatalasana	1.5	7	6
				
VII	hrapava	1.5	2.5	2.3
				
	glatka			
VIII	ispolirana	1.0	1.5	0.9
				
IX	Planarna	0.5	0.5	0.4
				

Slika 4.1. Korelacija koeficijenta hrapavosti pukotina  $JRC$  i indeksa hrapavosti  $J_r$  (Barton, 1987, iz Barton et al, 2023).  $JRC_{20}$  i  $JRC_{100}$  predstavljaju koeficijente hrapavosti pukotina određene na profilima diskontinuiteta veličine 20 i 100 cm, respektivno.

**Faktor redukcije napona (SRF)** – opisuje odnos napona oko podzemne prostorije i čvrstoće stenske mase. Njegovo vrednovanje je prikazano u tabeli 4.6. SRF se može proceniti poznavajući vrednosti većeg glavnog ili tangencijalnog napona oko podzemnog otvora i čvrstoće stenske mase na pritisak. Da bi se utvrdio faktor SRF, stenska masa se mora razvrstati u jednu od četiri kategorije. U tom pogledu, SRF se može odrediti za slučaj:

a) Prisustva oslabljenih, rasednih zona koje presecaju iskop. Ilustracija uticaja prisustva rasednih zona na vrednost faktora SRF prikazana je na slici 4.2.

b) Problema karakterističnih za krte stenske mase

c) Pojave vremenski zavisnih plastičnih deformacija u uslovima visokih pritisaka

d) Stena sa izraženim zapreminskim promenama, pre svih bubrenjem

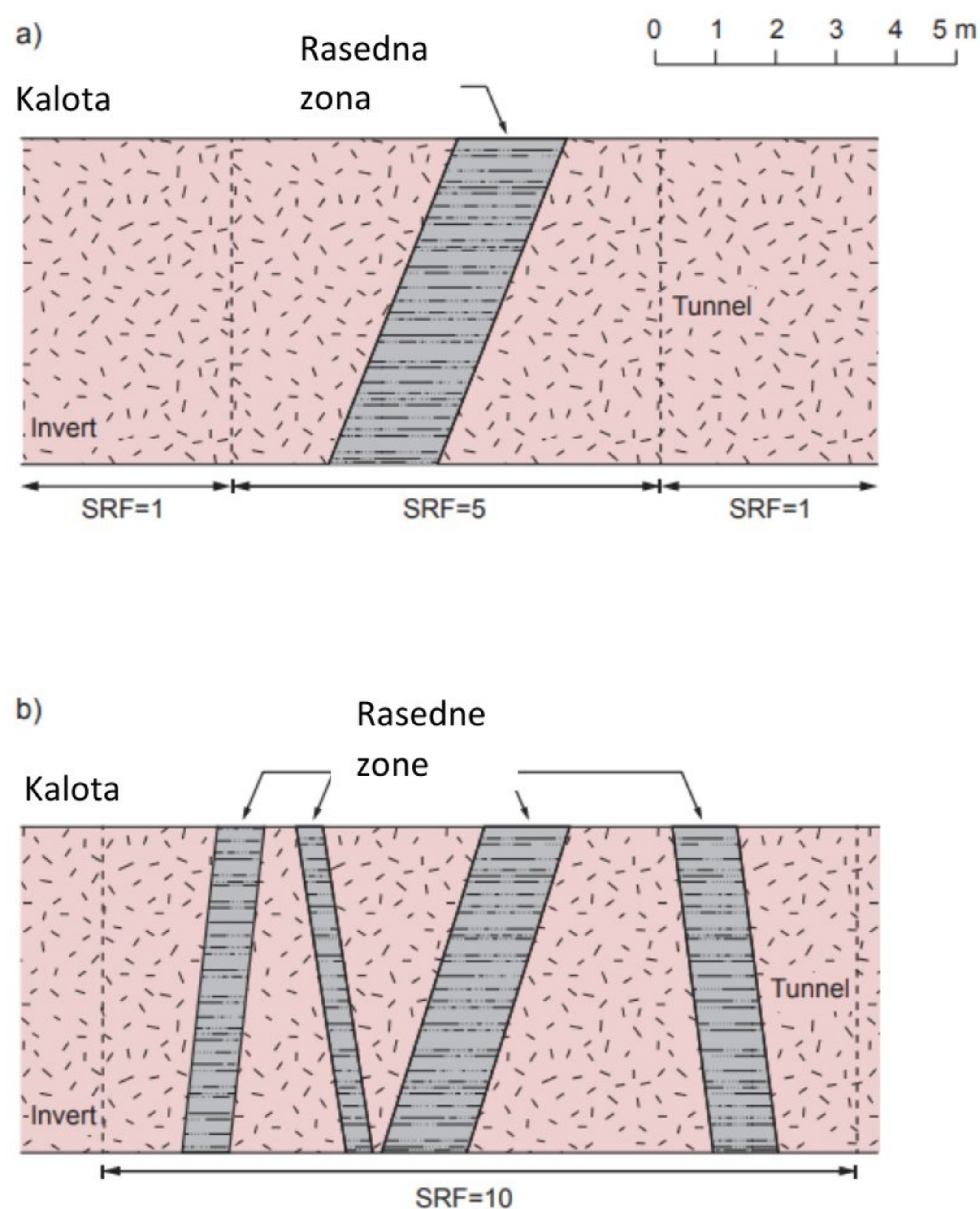
Tabela 4.4. Vrednovanje parametra *Ja* (NGI, 2015)

<b><i>Ja</i> – indeks izmene pukotina</b>		$\varphi_r$ (°)	<b><i>Ja</i></b>
a) Kontakt zidova pukotine (nema mineralne ispune, samo prevlaka)			
A	Zalečene pukotine sa čvrstom, nepropusnom ispunom (kvarc i epidot najčešće)	>35	0,75
B	Neizmenjeni zidovi pukotina, samo su pukotinske površi izmenile boju u vidu skrama	25-35	1
C	Slabo izmenjeni zidovi pukotina, pukotinske površi sa prevlakama od tvrdih minerala, peskovitih čestica i ne sadrže minerale glina	25-30	2
D	Prašinasta ili peskovito-glinovita prevlaka sa malo čvrste glinovite frakcije	20-25	3
E	Meke, sa malim uglom trenja, prevlake od kaolinita, liskuna, hlorita, talka, gipsa, grafita i drugih mekih minerala i malom količinom bubrivih glina	8-16	4
b) Ostvaren kontakt zidova pukotina pre smicanja od 10 cm (tanka ispuna)			
F	Pukotine ispunjene sitnom peskovitom raspadinom stena, bez glinenih frakcija	25-30	4
G	Jako prekonsolidovana, tvrda i kontinualna glinena ispuna, debljine < 5 mm	16-24	6
H	Srednje ili manje prekonsolidovana meka i kontinualna glinena ispuna, debljine < 5 mm	12-16	8
J	Glinena ispuna sklona bubrenju, kontinualna, debljine < 5 mm. Vrednost <i>Ja</i> zavisi od procenta glinenih frakcija sklonih bubrenju	6-12	8-12
c) Bez dodira zidova pukotina (debela ispuna)			
K	Zone drobine, jako prekonsolidovane	16-24	6
L	Zone zaglinjene drobine, srednje ili malo prekonsolidovana glinena ispuna	12-16	8
M	Zone zaglinjene drobine, sa bubrivim glinama. <i>Ja</i> zavisi od procenta glinenih frakcija sklonih bubrenju	6-12	8-12
N	Debele, kontinualne zone gline, jako prekonsolidovane	12-16	10
O	Debele, kontinualne zone gline, srednje do malo prekonsolidovane	12-16	13
P	Debele, kontinualne zone bubrive gline. <i>Ja</i> zavisi od procenta glinenih frakcija sklonih bubrenju	6-12	13-20

Tabela 4.5. Vrednovanje parametra  $Jw$  (NGI, 2015)

$Jw$ - Faktor redukcije zbog uticaja vode u pukotinama		$Jw$
A	Iskop u suvom ili sa manjim lokalnim dotokom vode (vlažno ili sa par kapi)	1,0
B	Srednji dotok, povremeno ispiranje pukotinske ispune (brojne kapi/"kiša")	0,66
C	Dotok u mlazu ili visok pritisak vode u kompetentnoj steni sa pukotinama bez ispune	0,5
D	Veliki dotok ili visok pritisak vode, sa znatnim ispiranjem pukotinskih ispuna	0,33
E	Izuzetno velik dotok ili pritisak vode koji opada sa vremenom. Izaziva ispiranje ispune i moguće zarušavanje	0,2-0,1
F	Izuzetno velik dotok ili pritisak vode koji ne opada sa vremenom. Izaziva ispiranje ispune i moguće zarušavanje	0,1-0,05

Napomena: a) Vrednosti faktora C-F su grube procene. Povećati  $Jw$  ako se stena drenira ili je vršeno injektiranje  
 b) Posebni problemi izazvani stvaranjem ledenih sočiva nisu uzeti u obzir



Slika 4.2. Uticaj prisustva rasednih zona na vrednost SRF.  $SRF = 5$ , za prisustvo jedne zone;  $SRF = 10$ , za prisustvo više zona (NGI, 2015)

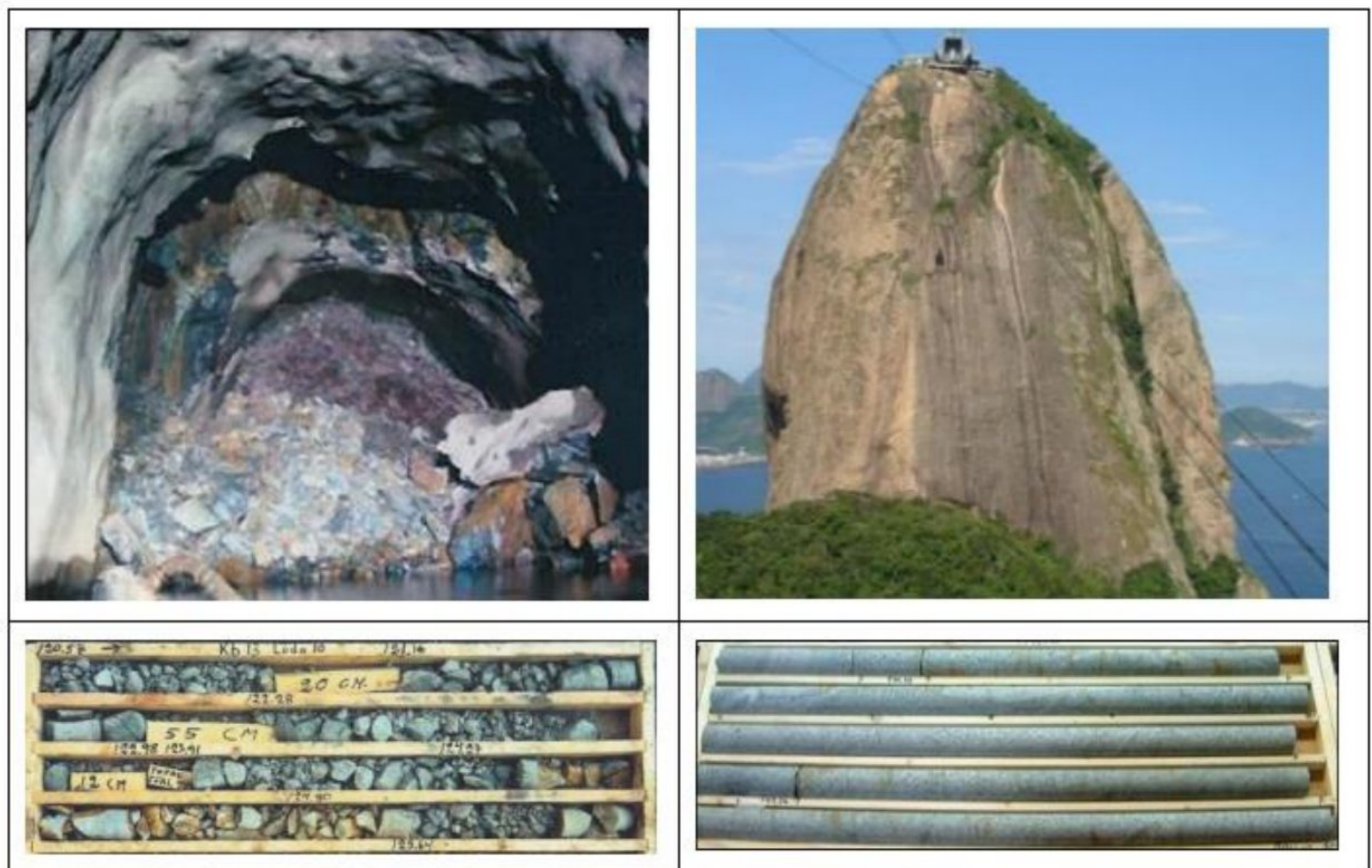
Tabela 4.6. Vrednovanje faktora redukcije napona SRF (NGI, 2015)

<b>SRF - Faktor redukcije napona</b>			<b>SRF</b>	
a) Slabe zone presecaju iskop, što može da oslabi stensku masu				
A	Brojne pojave oslabljenih zona na malom rastojanju, koje sadrže glinu ili hemijski izmenjenu, veoma slabu stensku masu, ili dugačke deonice sa slabom stenom (bilo koja dubina)		10	
B	Brojne zone smicanja na kratkim rastojanjima u čvrstoj steni bez gline, okružene slabom stenom (bilo koja dubina)		7,5	
C	Pojedinačna slaba zona sa ili bez gline i hemijski izmenjene stene (dubina < 50 m)		5	
D	Slabe, otvorene pukotine, izrazito ispucala stena (bilo koja dubina)		5	
E	Pojedinačna slaba zona sa ili bez gline i hemijski izmenjene stene (dubina > 50 m)		2,5	
Napomena: a) Smanjiti vrednosti SRF za 25-50 % ako slabe zone utiču na ali ne presecaju iskop				
b) Krta, mahom masivna stenska masa		$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_t/\sigma_c$	SRF
F	Nizak napon, blizu površine terena, otvorene pukotine	>200	<0,01	2,5
G	Srednji nivo napona, povoljno stanje napona	200-10	0,01-0,3	1
H	Visok napon, stisnute pukotine. Uglavnom povoljno za stabilnost. Može biti nepovoljno za stabilnost u zavisnosti od orijentacije napona u odnosu na pukotine*	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2-5*
J	Umereno ljuskanje i ispadanje ploča posle > 1h u masivnoj steni	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Ljuskanje ili gorski udar nakon par minuta u masivnoj steni	3-2	0,65-1	50-200
L	Jaki gorski udari i trenutne dinamičke deformacije u masivnoj steni	<2	>1	200-400
Napomena: b) Za izrazito anizotropno primarno stanje napona (ako je izmereno):kada je $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$ , koristiti $0,75\sigma_c$ umesto $\sigma_c$ . Kada je $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , koristiti $0,5\sigma_c$ , gde je $\sigma_c$ čvrstoća na pritisak stenske mase				
c) Kada je rastojanje od kalote do površine manje od širine prostorije, koristiti SRF = 5 za pomenuti slučaj (videti F)				
c) Vremenski zavisna plastična deformacija nekompetentne stenske mase, usled visokog pritiska		$\sigma_t/\sigma_c$		SRF
M	Pritisci koji izazivaju male plastične deformacije	1-5		5-10
N	Pritisci koji izazivaju velike plastične deformacije	>5		10-20
Napomena: d) Određivanje vremenski zavisne deformacije mora da se izvrši prema relevantnoj literaturi				
d) Stena koja bubri; bubrenje usled hemijskih reakcija zavisi od prisustva vode			SRF	
O	Umereni pritisak bubrenja		5-10	
P	Visok pritisak bubrenja		10-15	

Osnovna svrha Q klasifikacionog sistema je da se na osnovu vrednosti Q dobijene iz jednačine (12) odredi podgradni sistem podzemne prostorije. Na odabir elemenata podgrade i njihovo dimenzionisanje, pored vrednosti Q, utiču visina i dužina nepodgrađenog iskopa, kao i zahtevana sigurnost objekta. Tako na primer, podzemno odlagalište nuklearnog otpada ima veći zahtevani stepen sigurnosti od privremenog iskopa u rudniku. Međutim, određivanje elemenata trajne podgrade nije od značaja za temu ovog rada, te dijagram kvaliteta stenske mase i odabira podgrade (NGI, 2015) neće biti prikazan.

Pored osnovnog oblika Q (jednačina 12), u upotrebi je i normalizovani oblik, takozvani  $Q_c$  (Barton, 1995), koji se dobija množenjem osnovne Q vrednosti sa  $\sigma_c/100$ , gde je  $\sigma_c$  izraženo u MPa ( $Q_c = Q \cdot \sigma_c/100$ ). Vrednost  $Q_c$  se može dalje koristiti za korelacije sa brzinom prostiranja P talasa, modulom deformacije stenske mase i opterećenjem na podgradu (Barton i dr, 2015). Pomenute korelacione jednačine neće biti detaljnije diskutovane.

Kao osnovnu prednost Q klasifikacije u odnosu na RMR i GSI, Barton (Barton i dr, 2015) navodi logaritamsku skalu sa rasponom od  $10^{-3}$  do  $10^3$ .  $Q_c$  skala može imati raspon od  $10^{-4}$  do  $10^4$ , čime se približava stvarnoj varijabilnosti stanja stenskih masa koja je zastupljena u prirodi. Ilustracija širokog raspona kvaliteta stenskih masa u prirodi prikazana je na slici 4.3.



Slika 4.3. Kontrast najgoreg ( $Q = 0,001$ ) i najboljeg ( $Q = 1000$ ) kvaliteta stenske mase. Slike gore su iz Brazila, dole levo iz Švedske i dole desno iz Hong Konga (Barton i dr, 2015)

Po Bartonu (Barton, 2014), GSI i RMR nisu u mogućnosti svojim linearnim skalama da obuhvate ekstremnu nelinearnost i anizotropiju prirode, što čini jednačine generalizovanog HB kriterijuma loma (prikazane u poglavlju 3.3.) nepotrebno kompleksnim. Takođe, Q sistem daje mogućnost predviđanja postojanja problema suvišnog profila u tunelima, kroz procenu neobične kombinacije Q parametara:  $J_n/J_r$ . Ako je odnos  $J_n/J_r > 6$ , to automatski ukazuje na veliku verovatnoću pojave suvišnog profila, uprkos kvalitetno izvedenom miniranju (Barton i dr, 2015)

Ipak, određeni autori navode nedostatke Q sistema. Tako na primer, Berisavljević i dr. (2021) ukazuju da je Q sistem pogodan za upotrebu pre svega u krtim, masivnim i umereno ispucalim stenskim masama, koje su na prostoru Srbije manje zastupljene od intenzivno ispucalih, raspadnutih i alterisanih stenskih masa.

## 4.2. Q-slope sistem

Q-slope klasifikacija (Barton i Bar, 2015) predstavlja modifikovani oblik Q sistema, namenjen proceni stabilnosti kosina i optimalnog ugla nagiba kosine bez izvedenih sanacionih mera. Q-slope je moguće primeniti na kosine izvedene u različitim stenskim masama, visine od 5 do 250 m. Ukoliko je stenska masa litološki heterogena, ograničenje visine kosine je 50 m (Bar i Barton, 2017). Klasifikaciju nije moguće primeniti na kosine izgrađene od flišnih sekvenci. Nastala je na osnovu više od 400 dokumentovanih primera iz prakse, Australije, Azije, Srednje Amerike i Evrope (Slovenija, Srbija i Španija).

Jednačina kojom se određuje Q-slope je ostala suštinski nepromenjena u odnosu na originalnu (jednačina 12), i glasi:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (15)$$

Gde je  $RQD/J_n$  veličina bloka;  $J_r/J_a$  smičuća čvrstoća najnepovoljnije orijentisane familije pukotina ili  $(J_r/J_a)_1 * (J_r/J_a)_2$ , za slučaj klizanja klina;  $J_{wice}/SRF_{slope}$  uticaj spoljašnjih činilaca i naponskog stanja.

Vrednovanje parametara  $RQD$ ,  $J_n$ ,  $J_r$  i  $J_a$  ostalo je nepromenjeno u odnosu na Q sistem (prikazano u tabelama 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4), dok su parametri  $J_w$  i  $SRF$  modifikovani kako bi bili uzeti u obzir efekti atmosferskih činilaca i leda i aspekti značajni za stabilnost kosine, respektivno.

Faktor orijentacije diskontinuiteta O se množi sa količnikom  $Jr/Ja$  (vrednosti O faktora prikazane su u tabeli 4.7). Faktor orijentacije A primenjuje se kod najnepovoljnije orijentisane familije pukotina. Ako se analizira stabilnost klina, faktor B se primenjuje na drugu familiju pukotina koja čini klin.

Tabela 4.7. Vrednovanje O faktora (Berisavljević i dr, 2021)

O-faktor	Familija A	Familija B
Veoma povoljna orijentacija	2,0	1,5
Umereno povoljna	1,0	1,0
Nepovoljna	0,75	0,9
Veoma nepovoljna	0,50	0,8
Izaziva nestabilnost ako se ne podgradi	0,25	0,5

Zahvaljujući izloženosti kosinama atmosferskim činiocima u dugom vremenskom periodu, uveden je modifikovani faktor koji definiše ambijentalne (atmosferske i klimatske) i geološke uslove,  $Jwice$ , čije je vrednovanje prikazano u tabeli 4.8. Faktoru  $Jwice$  je neophodno pripisati najnepovoljnije uslove koji se mogu očekivati tokom trajanja eksploatacionog perioda kosine. Termin kompetentna stena se odnosi na bolji kvalitet, manju podložnost eroziji i raspadanju.

Tabela 4.8. Vrednovanje faktora  $Jwice$  (Berisavljević i dr, 2021)

$Jwice^*$	Pustinjsko okruženje	Vlažno okruženje	Tropske oluje	Pojava ledenih klinova
Stabilna struktura; kompetentna stena	1,0	0,7	0,5	0,9
Stabilna struktura; nekompetentna stena	0,7	0,6	0,3	0,5
Nestabilna struktura; kompetentna stena	0,8	0,5	0,1	0,3
Nestabilna struktura; nekompetentna stena	0,5	0,3	0,05	0,2

\*Ukoliko su primenjene drenažne mere koristiti  $1,5*Jwice$ . U slučaju ojačanja kosine koristiti  $1,3*Jwice$ . Ukoliko je kosina ojačana i primenjene su drenažne mere koristiti  $1,5*1,3*Jwice$



Faktor redukcije čvrstoće *SRFslope* predstavlja najnepovoljniju vrednost od sledeće tri:

*SRFa* definiše u kojoj meri je kosina podložna raspadanju i eroziji, a obuhvata i uticaj miniranja.

*SRFb* definiše odnos naponskog stanja u kosini i čvrstoće stenske mase koja izgrađuje kosinu. Parametar ima nepovoljne (visoke) vrednosti za visoke kosine i malu čvrstoću stenske mase.

*SRFc* definiše uticaj dominantnih struktura, poput rasednih zona, na redukciju čvrstoće. Vrednovanje ovih parametara prikazano je u tabeli 4.9.

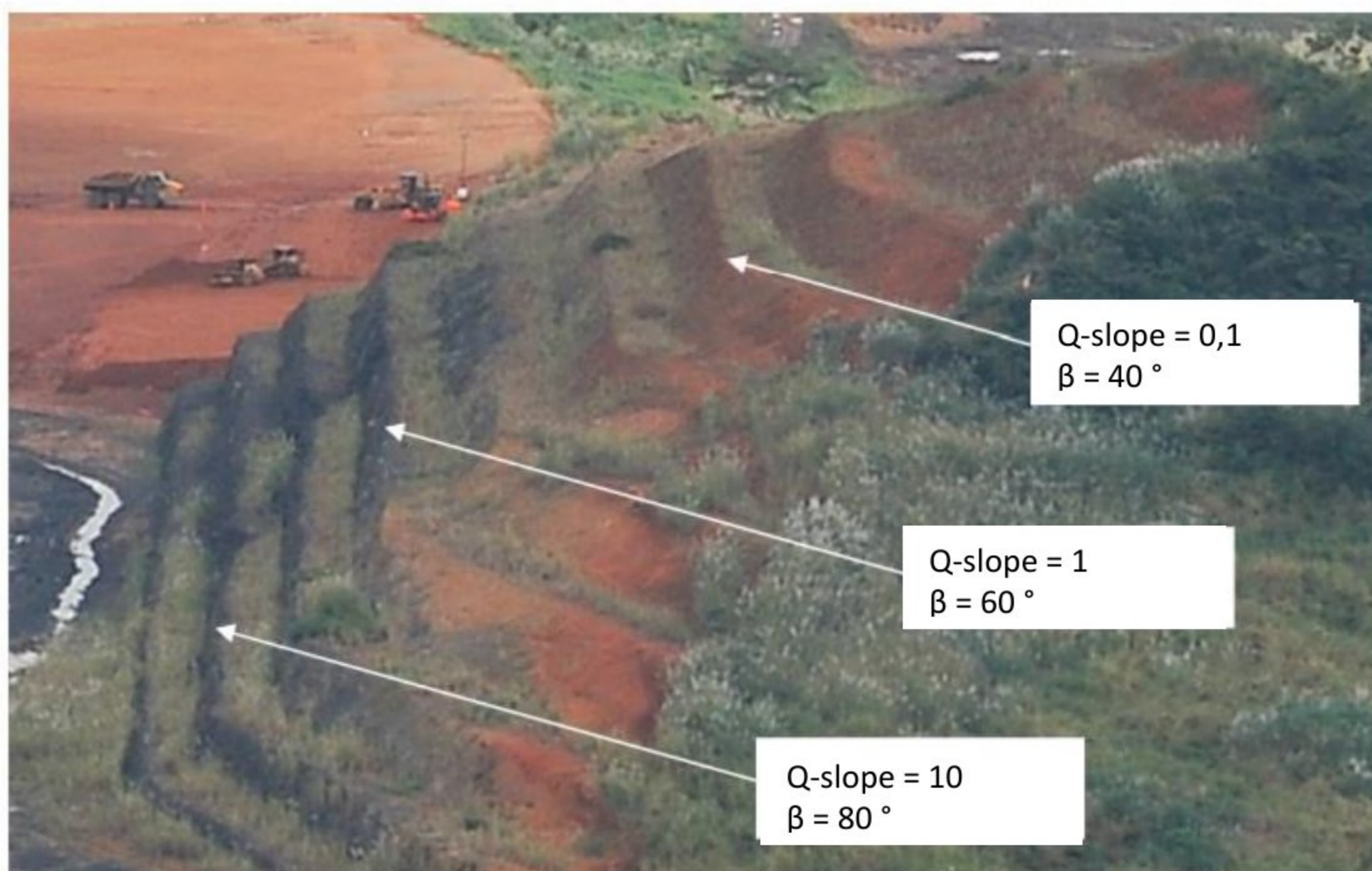
Tabela 4.9. Vrednovanje parametra *SRFslope* (Berisavljević i dr, 2021)

Vrednovanje <i>SRFa</i> faktora - opis		SRFa			
A	Neznatno rastresanje u površinskom delu, usled miniranja ili iskopa	2,5			
B	Labilni blokovi, početak pojava pukotina zatezanja i smicanja duž pukotina, podložnost raspadanju, znatan poremećaj usled miniranja	5			
C	Kao i B, ali je veoma podložna raspadanju	10			
D	Kosina je u podmaklom stadijumu raspadanja, usled dejstva vode i/ili leda	15			
E	Kosina od rezidualnog tla sa znatnim transportom materijala niz kosinu	20			
Vrednovanje <i>SRFb</i> faktora - opis		$\sigma_c/\sigma_1^*$	SRFb		
F	Umereni domen odnosa čvrstoće i napona	50-200	2,5-1		
G	Visoki domen odnosa čvrstoće i napona	10-50	5-2,5		
H	Lokalni lom intaktne stene	5-10	10-5		
J	Drobljenje ili puzanje	2,5-5	15-10		
K	Tečenje materijala sa deformacijskim omekšanjem	1-2,5	20-15		
$\sigma_c$ – čvrstoća na pritisak stenske mase; $\sigma_1$ – veći glavni napon					
Vrednovanje faktora <i>SRFc</i> - opis		Povoljno	Nepovoljno	Veoma nepovoljno	Izaziva nestabilnost ukoliko je nepodgrađen
L	Glavni diskontinuitet sa malo ili bez gline	1	2	4	8
M	Glavni diskontinuitet sa $RQD_{100} = 0^a$ , zbog prisustva gline i izlomljene stene	2	4	8	16
N	$RQD_{300} = 0^b$ , zbog prisustva gline i izlomljene stene	4	8	12	24
a) $RQD_{100}$ – RQD na dužini od 1 m upravno na diskontinuitet; b) $RQD_{300}$ – RQD na dužini od 3 m upravno na diskontinuitet					

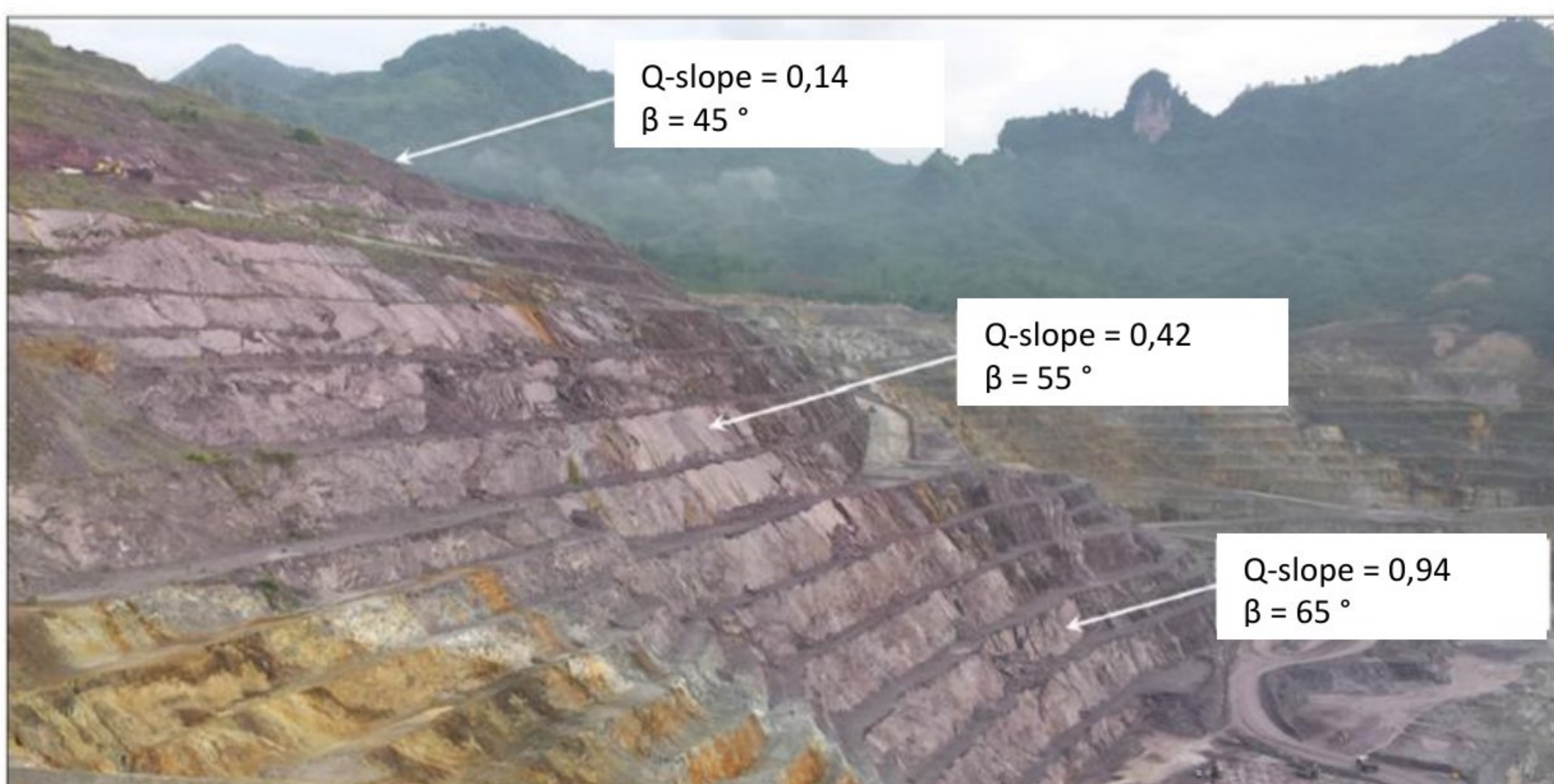
Osnovni cilj Q-slope klasifikacije je određivanje najvećeg mogućeg nagiba kosine  $\beta$  (bez ikakvih mera ojačanja), pri kome će kosina ostati stabilna duži vremenski period (od 6 meseci do 50 godina). Jednačinu zavisnosti Q-slope i ugla  $\beta$  su dali Bar i Barton (2017) u sledećem obliku:

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (16)$$

Primeri određivanja optimalnog ugla nagiba etaža u okviru visokih kosina dati su na slikama 4.4. i 4.5.



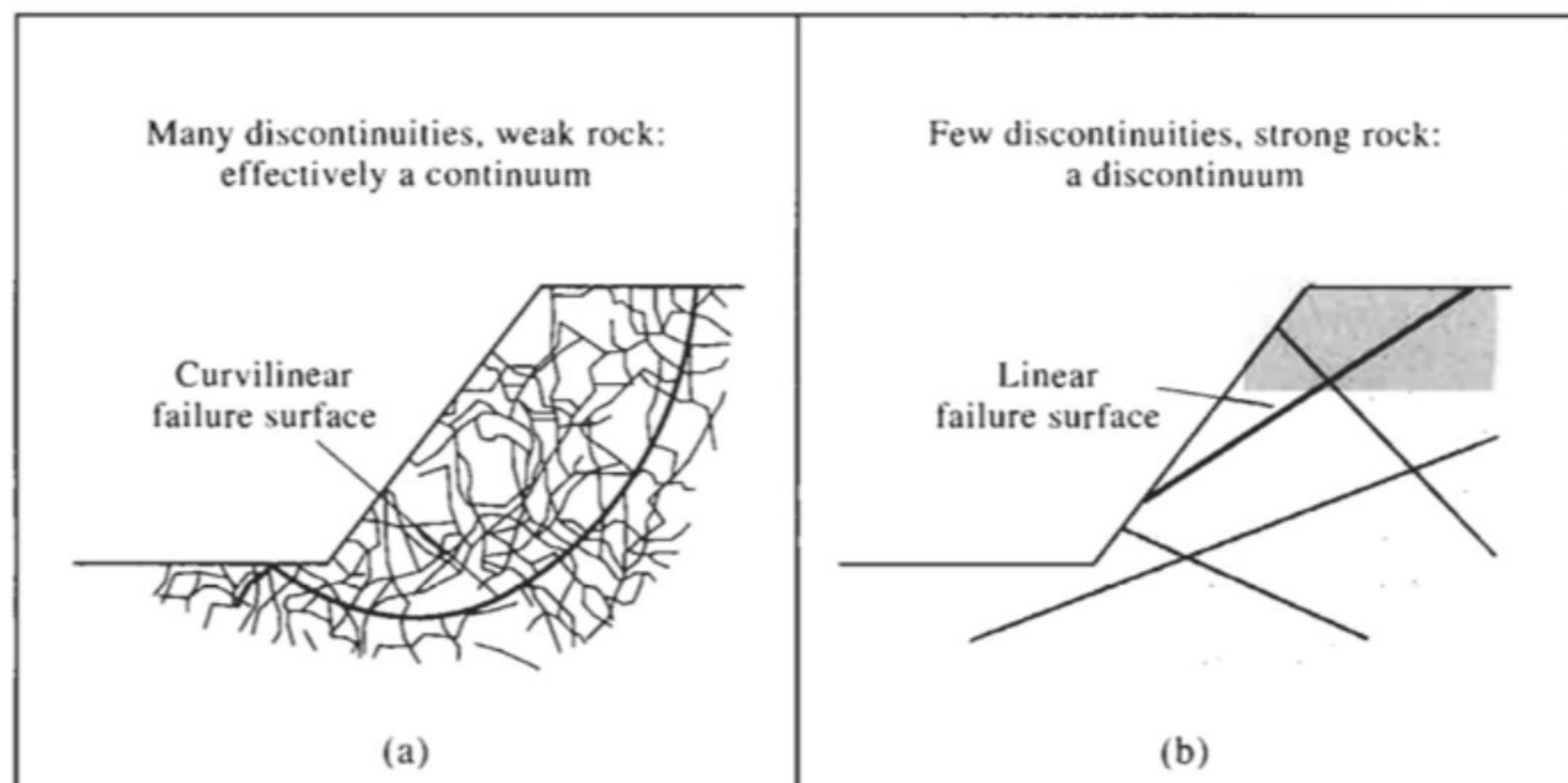
*Slika 4.4. Kosina u promenljivom nagibu etaža (Barton i Bar, 2015)*



*Slika 4.5. Kosina površinskog kopa u promenljivom nagibu etaža (Barton i Bar, 2017)*

## 5. PRIMENA KLASIFIKACIONIH SISTEMA ZA ODREĐIVANJE MC PARAMETARA STENSKE MASE

Prilikom projektovanja u stenskoj masi, nju je moguće posmatrati na dva različita načina. Ukoliko je intenzivno ispucala, sa rastojanjima pukotina koja su mnogo manja od dimenzija iskopa i bez preferiranih ravni anizotropije (ukratko, ako je u pitanju HB materijal, videti potpoglavlje 3.3.), stenska masa se može smatrati hipotetičkim, ekvivalentnim kontinuumom. U tom slučaju, do loma dolazi kroz stensku masu u celini i pritom se stvaraju cilindrične klizne površi, a merodavna je smičuća čvrstoća stenske mase (izražena generalizovanim HB kriterijumom loma). Suprotni pristup je diskontinualno modeliranje, gde dolazi do loma duž diskontinuiteta i klizanja pojedinačnih blokova, a gde je merodavna smičuća čvrstoća pukotina (predstavljena najčešće BB kriterijumom loma). Ovo je ilustrovano na slici 5.1.



Slika 5.1. a) Kontinualna stenska masa; b) Diskontinualna stenska masa (Hudson i Harrison, 1997)

Barton i dr. (2023) navode da su pristupi kontinuuma i diskontinuuma međusobno isključivi, i da se ne mogu koristiti za istu stensku masu. Takođe, navode da je diskontinuum primenljiv u velikoj većini slučajeva ( $> 90\%$ ), a kontinuum znatno ređe ( $< 10\%$ ). Pomenute procentualne vrednosti su procenjene na osnovu višedecenijskog iskustva na stotinama projekata u desetinama država širom sveta (Barton i dr, 2023). Ipak, pomenute podatke treba uzeti sa rezervom. U Srbiji i državama u okruženju intenzivno ispucale i raspadnute stenske mase veoma rasprostranjene, što opravdava čestu upotrebu modela kontinuuma.

Za vršenje analiza stabilnosti kontinuuma, neophodno je poznavanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase. U svakodnevnoj geotehničkoj praksi, najčešće su u upotrebi

MC parametri: kohezija  $c$  i ugao smičuće otpornosti  $\varphi$ . Barton u brojnim publikacijama (Barton, 2002; Barton 2012; Barton i dr. 2023) navodi krupne nedostatke MC pristupa, od kojih će biti navedena dva glavna. Prvi je da stvarno ponašanje stenske mase ne prati pristup „ $c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ “, već da je realnost degradacija kohezije (lom materijalnih mostova) pri malim deformacijama i mobilizacija dilatancije i trenja (prvo vršnog, pa rezidualnog) pri većim deformacijama (pristup „ $c$  then  $\sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ “). Drugi nedostatak je da ugao smičuće otpornosti i kohezija stenske mase nemaju realno fizičko značenje, te da je teško znati šta oni stvarno predstavljaju. Ipak, Barton (Barton, 2002) daje jednačine za određivanje  $c$  i  $\varphi$  stenske mase, koje će na narednim stranama biti upoređene sa onima po generalizovanom HB kriterijumu loma.

### 5.1. Primena GSI i GHB kriterijuma loma za definisanje MC parametara

HB kriterijum je originalno razvijen za upotrebu u analizama i projektovanju podzemnih iskopa (Hoek i Brown, 1980a). U takvim slučajevima, pogodnije je čvrstoću stenske mase izraziti preko glavnih napona, koji mogu da se uporede sa indukovanim sekundarnim glavnim naponima oko tunelskog otvora. Međutim, u analizama stabilnosti kosina, čvrstoća materijala se najčešće izražava preko normalnih i smičućih napona, te otuda potreba za konverzijom HB kriterijuma loma iz polja glavnih napona u polje normalnih i smičućih napona (Renani i Cai, 2021).

Hoek (1983) navodi rešenje za Morovu anvelopu loma koja se najbolje poklapa sa anvelopom po originalnom HB kriterijumu, za parametar  $a = 0,5$ :

$$\tau = [ctg(\varphi^{ins}) - \cos(\varphi^{ins})] / \left(\frac{m\sigma_{ci}}{8}\right) \quad (17)$$

Značenje parametara  $m$  i  $\sigma_{ci}$  je već poznato (potpoglavlje 3.3.), a ugao smičuće otpornosti  $\varphi^{ins}$  i kohezija  $c^{ins}$  se mogu dobiti iz sledećih izraza:

$$\varphi^{ins} = \arctg \left\{ 4 \left[ 1 + \frac{16(m\sigma_n + s\sigma_{ci})}{3m^2\sigma_{ci}} \right] \cos^2 \left[ \frac{\pi}{6} + \frac{1}{3} \arcsin \left( 1 + \frac{16(m\sigma_n + s\sigma_{ci})}{3m^2\sigma_{ci}} \right)^{-1,5} \right] - 1 \right\}^{-0,5} \quad (18)$$

$$c^{ins} = \tau - \sigma_n \times \operatorname{tg}(\varphi^{ins}) \quad (19)$$

$\varphi^{ins}$  i  $c^{ins}$  predstavljaju trenutne, tangentne vrednosti ugla smičuće otpornosti i kohezije, respektivno. U pitanju su parametri linearne anvelope loma koja predstavlja tangentu na HB

paraboličku anvelopu, za određeni nivo normalnog napona  $\sigma_n$ . Ovi parametri nisu konstante za određeni materijal s obzirom da zavise od nivoa normalnog napona.

Uključivanje različitih vrednosti eksponenta  $a$  u generalizovani HB kriterijum loma uslovalo je dodatno usložnjavanje jednačina 17, 18 i 19 (Renani i Cai, 2021). Hoek (1994b) i Hoek et al. (1995) predlažu numerički pristup koji koristi rešenje dobijeno od strane Balmer (1952) za generisanje parova  $\sigma_n$ ,  $\tau$  iz generalizovanog HB kriterijuma za dobijanje odgovarajuće Morove anvelope loma:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3} + 1} \quad (20)$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3}} \quad (21)$$

Hoek (1994b) i Hoek i dr. (1995) predlažu korišćenje ekvivalentnih parametara čvrstoće, koji se mogu odrediti fitovanjem linearne MC anvelope prema parovima  $\sigma_n$ ,  $\tau$ :

$$\tau = c^{eq} + \sigma_n \times \operatorname{tg}(\varphi^{eq}) \quad (22)$$

Međutim, oni nisu naznačili optimalni nivo napona za koji bi se izvršio odabir MC parametara. Hoek i Brown (1997) naglašavaju da je najvažniji aspekt izbora ekvivalentnih parametara  $\varphi^{eq}$  i  $c^{eq}$  odabir nivoa napona u kom bi se izvršilo fitovanje krive. Njihov predlog je da optimalan raspon manjeg glavnog napona  $\sigma_3$  bude od nule do gornje granice,  $\sigma_{3max}$ , jednake  $0,25\sigma_{ci}$ . Marinos i Hoek (2000) naglašavaju da je pomenuta gornja granična vrednost  $\sigma_{3max} = 0,25\sigma_{ci}$  pogodna za tunele na dubini većoj od 30 m. Ipak, za plitke tunele i kosine oni predlažu vrednost  $\sigma_{3max}$  koja je jednaka vertikalnom efektivnom naponu u kaloti tunela, odnosno na prosečnoj dubini klizne površi kada su kosine u pitanju.

Vrednosti ekvivalentnog ugla smičuće otpornosti i kohezije se mogu dobiti koristeći sledeće zavisnosti, po Hoek i dr. (2002):

$$c^{eq} = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m\sigma_{3n}](s+m\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+[6am(s+m\sigma_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad (23)$$

$$\varphi^{eq} = \arcsin \left[ \frac{6am(s+m\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am(s+m\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (24)$$

Gde  $\sigma_{3n}$  predstavlja normalizovanu gornju graničnu vrednost svestranog pritiska, a dobija se po formuli:

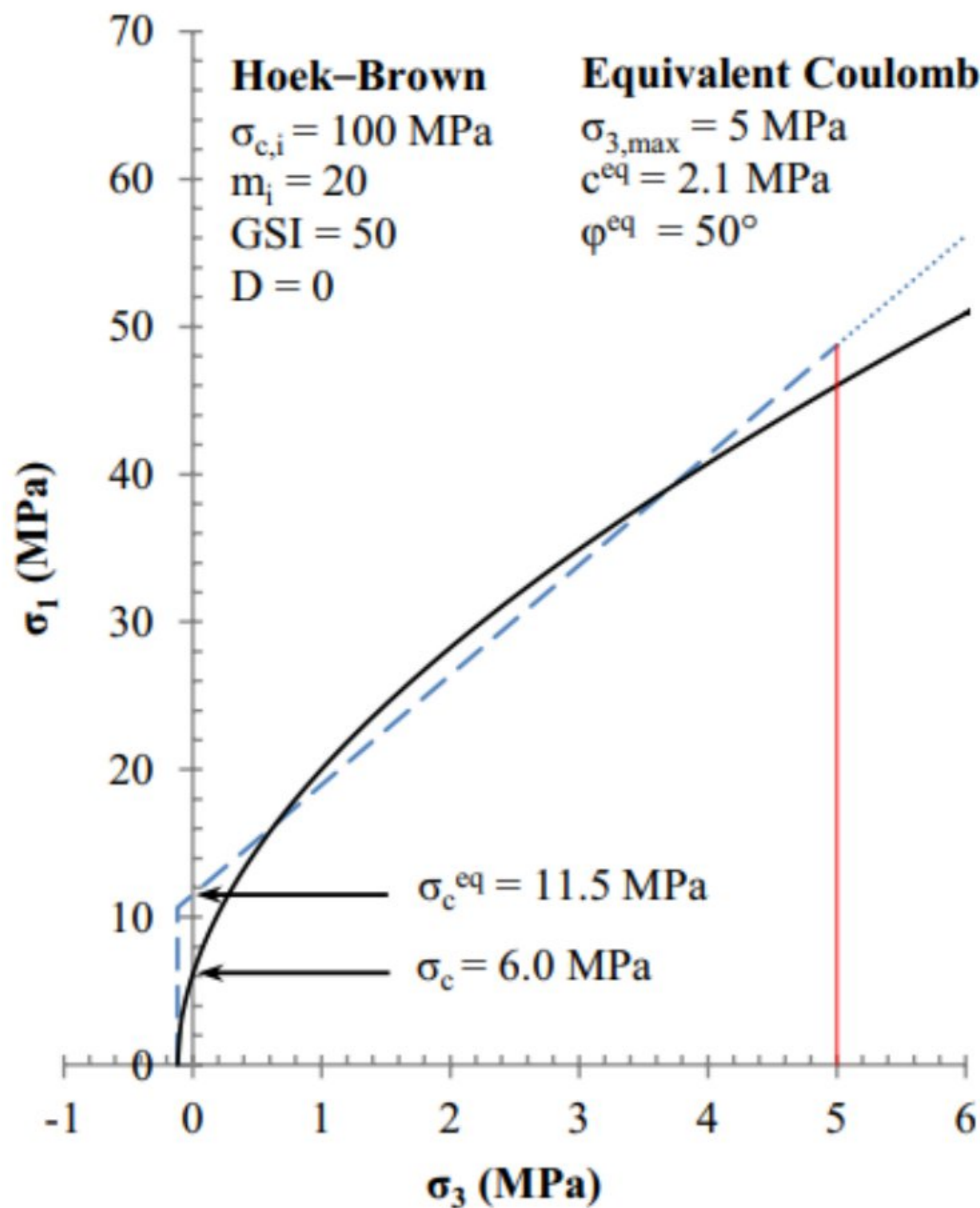
$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (25)$$

Gde je  $\sigma_{3max}$  gornja granična vrednost svestranog pritiska.

Ekvivalentni parametri mogu poslužiti za dobijanje ekvivalentne vrednosti jednoaksijalne čvrstoće na pritisak  $\sigma_c^{eq}$ :

$$\sigma_c^{eq} = \frac{2c^{eq} \cos(\varphi^{eq})}{1 - \sin(\varphi^{eq})} \quad (26)$$

Na slici 5.1. prikazane su nelinearna HB anvelopa i linearna ekvivalentna MC anvelopa loma za neoštećenu stensku masu sa parametrima:  $\sigma_{ci} = 100$  MPa,  $GSI = 50$ ,  $m_i = 20$  i  $D = 0$ , za raspon svestranog pritiska od 0 do  $\sigma_{3,max} = 5$  MPa. Može se pokazati da sa porastom  $\sigma_{3,max}$ ,  $c^{eq}$  i  $\sigma_c^{eq}$  rastu, dok  $\varphi^{eq}$  opada (Renani i Cai, 2021). Ovo je očekivano, s obzirom da sa porastom nivoa normalnog, odnosno svestranog napona, doprinos dilatancije opada, nagib krive postaje sve manji a „kohezivni“ odsečak veći. U opštem slučaju, jednoaksijalna čvrstoća na pritisak dobijena iz ekvivalentnih MC parametara (koristeći jednačinu 26) je veća od one dobijene iz generalizovanog HB kriterijuma loma (koristeći jednačinu 5). Ova razlika raste sa porastom  $\sigma_{3,max}$ .



Slika 5.1. HB (puna linija) i ekvivalentna MC (isprekidana linija) anvelopa loma, za  $\sigma_{3,max} = 5$  MPa

Hoek i dr. (2002) navode da se gornja granična vrednost svestranog pritiska  $\sigma_{3max}$ , za tunele, može proceniti iz jednačine (27), a za kosine iz jednačine (28):

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0,47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma Z} \right)^{-0,94} \quad (27)$$

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0,72 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \quad (28)$$

Gde je  $\gamma$  zapreminska težina stenske mase,  $Z$  dubina tunela a  $H$  prosečna dubina klizne površi na kosini. Parametar  $\sigma_{c,m}$  se naziva globalna čvrstoća stenske mase. Ona je ekvivalentna  $\sigma_{c^{eq}}$  kada je  $\sigma_{3,max} = 0,25\sigma_{ci}$ , i može se dobiti iz jednačine (29). Ukoliko je primarni horizontalni napon veći od vertikalnog, on treba da zameni  $\gamma H$ , odnosno  $\gamma Z$  u jednačinama (27) i (28).

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m+4s-a(m-8s))\left(\frac{m}{4}+s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (29)$$

Korišćenje jednačina (23) do (29) za dobijanje ekvivalentnih parametara smičuće čvrstoće je preporučeno od strane Hoek i Brown (2019) u njihovoj poslednjoj reviziji kriterijuma loma.

Renani i Martin (2020) su sprovedli niz komparativnih analiza stabilnosti kosina koristeći tačno rešenje Morgenstern i Price (1965) za klizne površi proizvoljnog oblika. Pokazali su da konzistencija između rezultata HB i ekvivalentnog MC kriterijuma može biti znatno unapređena koristeći sledeću jednačinu za dobijanje gornje granične vrednosti svestranog pritiska  $\sigma_{3,max}$ :

$$\frac{\sigma_{3max}}{\gamma H} = \frac{0,175}{tg\beta} \quad (30)$$

Ovime, oni ukazuju na značajan uticaj nagiba kosine  $\beta$  na vrednost  $\sigma_{3,max}$ .

## 5.2. Primena Q klasifikacije za definisanje MC parametara

U svojim brojnim naučnim radovima, Barton (Barton 2002; Barton 2012; Barton 2021; Barton i dr. 2023) obeshrabruje, a ponegde i potpuno odbacuje modeliranje stenske mase kao kontinuuma, navodeći da je ponašanje stenske mase kompleksnije i interesantnije od kontinuuma, i da takav pristup obično daje netačne rezultate (Barton 2021). Ipak, u slučaju da se inženjer opredeli za modeliranje primenom mehanike kontinuuma, Barton (2002) predlaže korišćenje Q klasifikacije za definisanje MC parametara smičuće čvrstoće, ukazujući na njene prednosti u odnosu na HB jednačine (23) i (24), naročito u publikacijama Barton 2012; Barton 2021.

Tokom razvijanja Q sistema 1973, primećeno je da potreba za torkretiranjem i ugradnjom ankeru u tunelima zavisi od odnosa  $RQD/Jn$  i  $Jr/Ja$ . Pritom, potreba za torkretom raste sa smanjivanjem veličine bloka (nizak  $RQD/Jn$ ), a potreba za ankerisanjem postoji kod stena sa malim trenjem između blokova (nizak  $Jr/Ja$ ) (Barton, 2002). Na osnovu povratnih analiza utvrđeno je da  $tg^{-1}(Jr/Ja)$  dobro koreliše sa vrednostima  $\varphi + i$  i  $\varphi - i$ , za dilatantne (hrapave, bez ispune) i kontraktivne (sa debelom glinovitom ispunom) diskontinuitete. Pored odnosa  $Jr/Ja$ , uvodi se i faktor prisustva vode  $Jw$ , kao korekcionni faktor za efektivno naponsko stanje i omekšavanje pukotinske ispune (Barton, 2002). „Frikciona komponenta“ čvrstoće stenske mase FC se može odrediti iz sledeće jednačine:

$$FC = arctg \left( \frac{Jr}{Ja} \times Jw \right) \quad (31)$$

S obzirom da se parametri  $Jr$  i  $Ja$  određuju za najnepovoljniji slučaj, dobija se minimalna komponenta čvrstoće FC.

Kohezija stenske mase zavisi od veličine bloka, koji je definisan odnosom  $RQD/Jn$ . Kako bi se uzeo u obzir uticaj efekta fragmentacije i naponskog stanja stenske mase, za potrebe određivanja kohezije uveden je i parametar  $SRF$ . „Kohezivna komponenta“ čvrstoće stenske mase, sačinjena od tri parametra Q klasifikacije ( $RQD$ ,  $Jn$  i  $SRF$ ) može biti generalizovana i poboljšana normalizovanom vrednošću čvrstoće na pritisak intaktne stene,  $\sigma_{ci}/100$  (Barton, 2002). Ona može biti procenjena iz sledeće zavisnosti:

$$CC = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \quad (32)$$

Gde je, čvrstoća na pritisak intaktne stene  $\sigma_{ci}$  izražena u MPa. Može se primetiti da komponente čvrstoće FC i CC čine dva dela jednačine za određivanje normalizovane vrednosti  $Qc$  ( $Qc = RQD/Jn * Jr/Ja * Jw / SRF * \sigma_{ci} / 100$ ). Istaknuto je (Barton, 20002) da parametar  $Qc$  ima fundamentalni značaj, i da se njegova vrednost približno može izraziti u MPa. Samim tim, i komponente čvrstoće FC i CC imaju realnije fizičko značenje od ekvivalentnih parametara čvrstoće po HB kriterijumu loma. Prema Barton (2012), niske vrednosti „frikcione komponente“ FC zahtevaju ugradnju ankeru, a niske vrednosti „kohezivne komponente“ CC zahtevaju torkretiranje.

Barton (2012) navodi da komponente čvrstoće FC i CC suštinski ne predstavljaju ugao smičuće otpornosti i koheziju stenske mase, ali da je pogodnije odrediti MC parametre koristeći jednačine (31) i (32) nego kao fiksne, diskretne vrednosti za određenu Q klasu. Na primer,

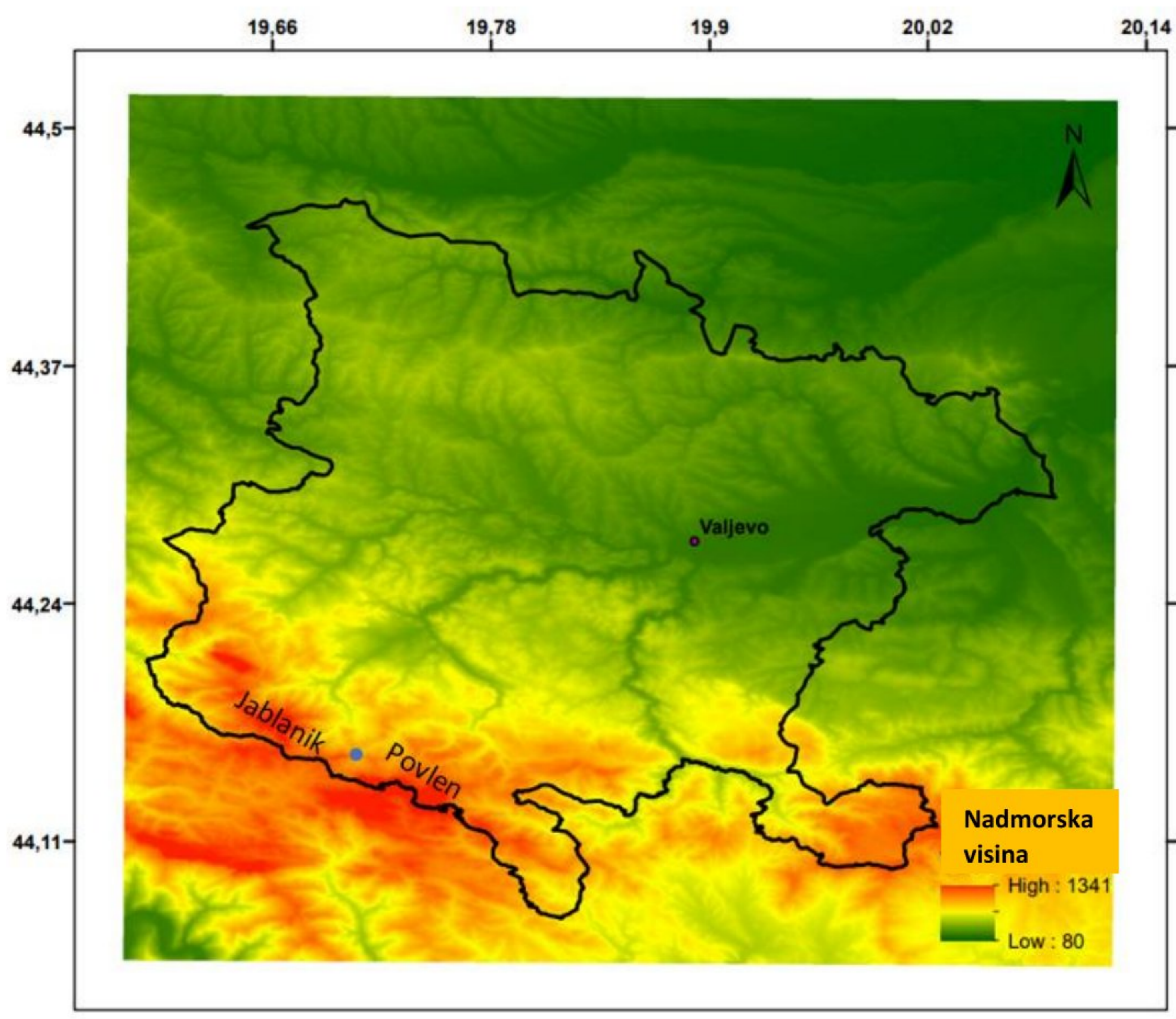


predlog da je  $c > 10$  MPa, a  $\varphi > 45^\circ$ , za  $Q = 10-100$  je manje tačno rešenje od pomenutih jednačina.

Za kraj, biće navedene potencijalne prednosti, po Bartonu, korišćenja jednačina Q sistema u odnosu na one generalizovanog HB kriterijuma loma, za modeliranje stenske mase koja se može aproksimirati kontinuumom. Ove prednosti su istaknute u publikacijama: Barton (2013) i Barton (2021). Autor kao osnovni razlog za primenu jednačina (31) i (32) navodi njihovu jednostavnost i mogućnost primene bez korišćenja programa, direktno na terenu. Takođe, može se vizuelizovati uticaj promenjenih hidrogeoloških uslova, prisustva glinene ispune ili dodatne familije pukotina, na vrednost MC parametara. Zanimljivo je da autor navodi nemogućnost HB relacija da u obzir uzmu prisustvo glinovite ispune, što je očigledno netačno: glinena ispuna će uticati na smanjenje vrednosti GSI preko smanjenja kvaliteta pukotinskih površi. S druge strane, navedeno je da kompleksnost jednačina (23) i (24) ne iziskuje nužno i njihovu veću preciznost. Jednačine izvedene iz Q sistema ne predstavljaju samo aproksimativne zavisnosti za preliminarnu procenu MC parametara, već se mogu koristiti i prilikom numeričkog modeliranja stenske mase, kao što je rađeno u dva rudnika podzemne eksploatacije u Indiji (Barton i Pandey, 2011). Autori GSI klasifikacije i HB kriterijuma loma nisu vršili poređenja svojih jednačina (23) i (24) sa onima po Q sistemu.

## 6. PRAKTIČAN PRIMER

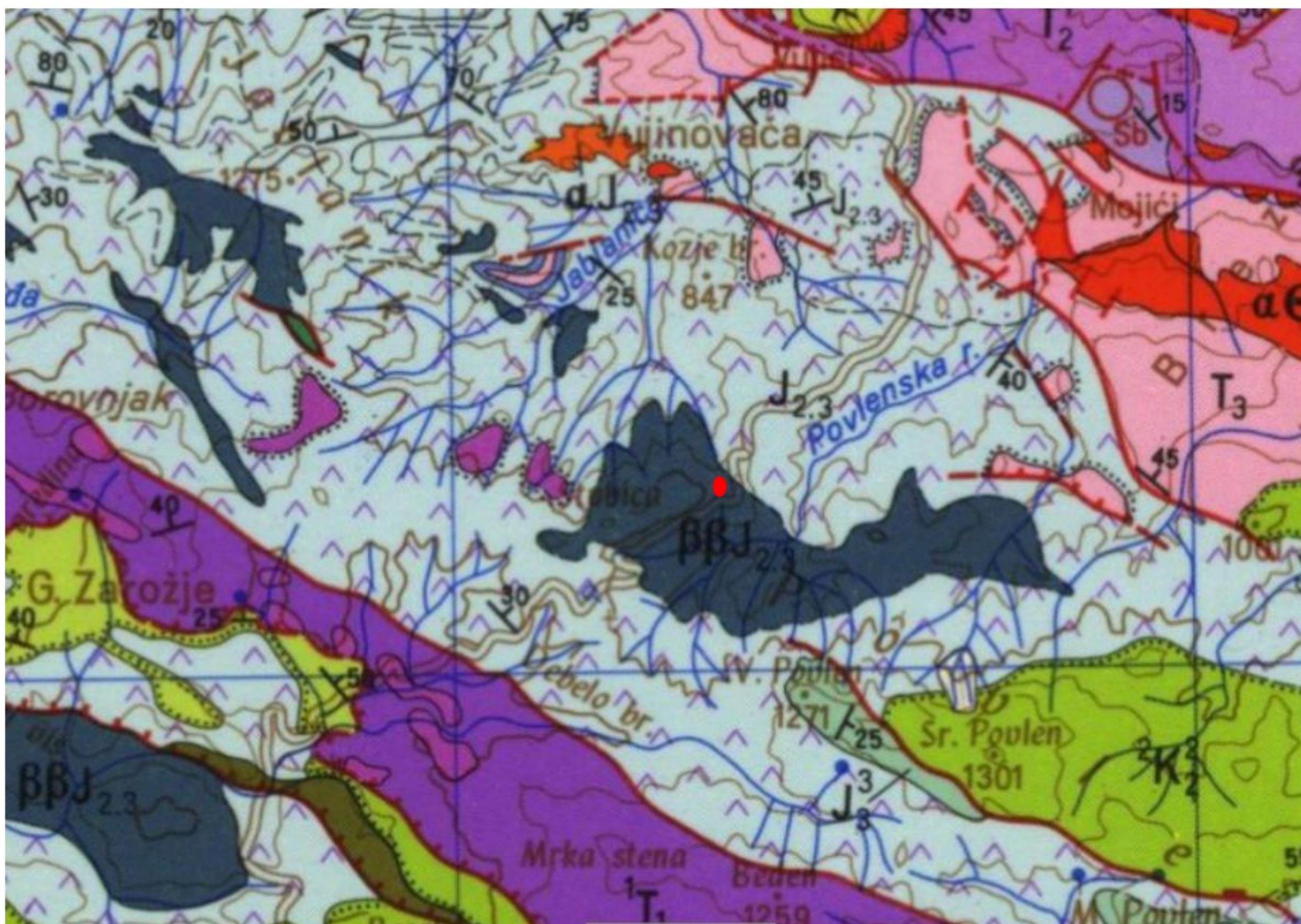
Uporedna analiza dobijanja MC parametara iz dva različita postupka, prikazana u prethodnom poglavlju, izvršena je na primeru kosine pored regionalnog puta 170 Valjevo-Bajina Bašta, na lokalitetu Debelo Brdo. Položaj kosine na topografskoj osnovi opštine Valjevo, dobijenoj iz DTM-a, prikazan je na slici 6.1. Kosina se nalazi na severnoj padini planinskog prevoja Debelo Brdo, smeštenog između planina Jablanik i Povlen, na nadmorskoj visini 962 mnm. Prosečna godišnja količina padavina iznosi oko 1000 mm. Geografske koordinate kosine su: 44°9'25" severne geografske širine i 19°42'13" istočne geografske dužine. Dužina kartiranog dela kosine iznosi oko 45 m, a visina od 7-10 m.



Slika 6.1. Položaj kosine (označeno plavom tačkom) na topografskoj osnovi Valjeva (preuzeto i obrađeno sa sajta <https://earthexplorer.usgs.gov> )

Kosina je izvedena u intenzivno ispucalim i izmenjenim dijabazima. Dijabazi genetski pripadaju geološkoj formaciji ofiolitskog melanža, nastaloj u subdukcionom trogu usled mešanja nelitifikovanih sedimenata pasivnog oboda, zapune subdukcionog troga i olistolita donetih sa subdukovanog okeanskog dna i gravitaciono sa pasivnog oboda (Dimitrijević, 1989). Melanž kom pripada posmatrana kosina je srednje i gornjo jurske starosti. U starijoj literaturi ofiolitski melanž se naziva dijabaz-rožna formacija, koja je tumačena kao kompleks sedimenata

oceanskog dna sa utisnutim vulkanitima, najčešće bazičnim. Osnovna karakteristika ofiolitskog melanža je izrazita heterogenost u pogledu litološkog sastava, veoma složena i haotična građa, sa neritmičkim smenjivanjem i bočnim isklinjavanjem litoloških članova i njihovim nepravilnim smenjivanjem u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Stenski kompleks ofiolitskog melanža u široj okolini kosine izgrađuju: glinci, peščari, rožnaci, laporci i krečnjaci, od sedimentnih stena. Uz njih se javljaju magmatske stene: dijabazi, melafiri, peridotiti, gabrovi i spiliti. Sedimentne stene ovog kompleksa u blizini predmetne lokacije, pogotovo glinci i peščari, su tankoslojevite i često raspadnute do nivoa rezidualnog tla. Dijabazi su često kuglasto lučeni, a mestimično intenzivno ispucali, sa osobinama sitnozrnog glinovitog peščara. Submarinskog su porekla, sinhroni sa sedimentima u koje su se izlili. Intenzivno su alterisani. Najizraženiji procesi alteracije su uralitizacija i karbonatizacija, zatim albitizacija i retko silifikacija. Izgrađeni su od alterisanog plagioklasa koji u svežijim primercima odgovara labradoritu i monokliničnog piroksena koji je najčešće transformisan u sekundarni amfibol. Struktura je ofitska. Navedeno je preuzeto iz Mojsilović i dr. (1975). Položaj kosine na OGK, list Valjevo (Mojsilović i dr, 1975) naznačen je crvenom tačkom na slici 6.2.



Slika 6.2. Geološka građa šire okoline Debelog Brda, sa označenim položajem kosine.  
 Legenda:  $T_1$ -peskovito-laporoviti krečnjaci;  $T_3$ -sprudni krečnjaci;  $\alpha$ -porfiriti;  $\beta\beta J_{2,3}$  – dijabazi;  $J_{2,3}$ -dijabaz-rožna formacija;  $J_3^3$ -krečnjaci;  $K_2^2$ -slojeviti, laporoviti krečnjaci (Mojsilović i dr, 1975)

Na posmatranoj kosini, dijabazi su crno-zelene boje, sa crvenim skramama, intenzivno ispucali i izmenjeni. Alteracija stenske mase nije ograničena samo na pukotine, već se prostire u dubinu stenske mase, dajući joj izgled glinca. Na kosini je prisutno umereno osipanje i odronjavanje malih blokova, međutim nema klizišta i tragova linijske erozije. Površinsko spiranje je umerenog intenziteta i obuhvata sitnozrne frakcije drobinske raspadine.

Važno je napomenuti da su zavisnosti (31) i (32) za izračunavanje MC parametara prema Q klasifikaciji, namenjene za upotrebu u tunelima. U ovom slučaju, one će biti upotrebljene za kosinu, s tim što će u pomenutim zavisnostima biti korišćeni parametri Q, a ne Q-slope sistema, kako bi se očuvala originalna formulacija pomenutih zavisnosti.

### **6.1. Rezultati inženjerskogeološkog kartiranja kosine**

Detaljno inženjerskogeološko kartiranje kosine izvršeno je 29. aprila 2023. godine, u dužini od oko 45 m. Tom prilikom, izdvojene su dve kvazihomogene zone po parametru ispucalosti (prikazano na slici 6.3.). Zonu I karakteriše intenzivna ispucalost stenske mase, sa tri familije i pojedinačnim pukotinama, na malom rastojanju. Stenska masa je homogeno ispucala, sa dobro uzglobljenim blokovima čije su dimenzije mnogo manje u odnosu na dimenzije kosine. Ne postoje dominantne strukturne ravni anizotropije, stenska masa je izotropna i ispoljava krto naponsko-deformacijsko ponašanje. Kosina je relativno male visine, te su svestrani pritisci niski. Sve navedeno ukazuje na odličnu podobnost aproksimiranja stenske mase HB materijalom i klasifikaciju pomoću GSI sistema (videti potpoglavlje 3.3.). Stabilnost kosine u ovoj zoni je uslovljena čvrstoćom na smicanje stenske mase koja se može smatrati ekvivalentnim kontinuumom. GSI i Q klasifikacija i odabir MC parametara je izvršen za kvazihomogenu zonu I.

Kvazihomogena zona II je okarakterisana značajno manjim stepenom ispucalosti i većom kontinualnošću pukotina, te većom veličinom bloka. Prisutno je ispadanje klinova po familijama spregnutih pukotina i veća količina odronjenog materijala nego u zoni I. Stabilnost kosine u ovoj zoni uslovljena je smičućom čvrstoćom pukotina koje formiraju klin, stenska masa predstavlja diskontinualnu sredinu i ne može se aproksimirati ekvivalentnim kontinuumom, te nije pogodno koristiti HB kriterijum loma. Kako odabir ekvivalentnih MC parametara stenske mase u ovoj zoni nema smisla, ona neće biti predmet daljeg detaljnijeg proučavanja. U narednim pasusima biće prikazane osnovne karakteristike familija pukotina zone I, kao i rezultati GSI i Q klasifikacije.

Konturni dijagram elemenata pada pukotina prikazan je na slici 6.5. Napravljen je na osnovu 23 izmerena elementa pada diskontinuiteta. Mogu se uočiti 3 familije pukotina i pojedinačne pukotine. Rasipanje elemenata pada unutar svake familije, odnosno zatalasanost u metarskoj razmeri, je veliko. Za izdvajanje familija pukotina korišćena je opcija Sets From Cluster Analysis, a maksimalni ugao rasipanja vrednosti unutar jedne familije iznosi  $20^\circ$ . Elementi pada kosine iznose 130/68.

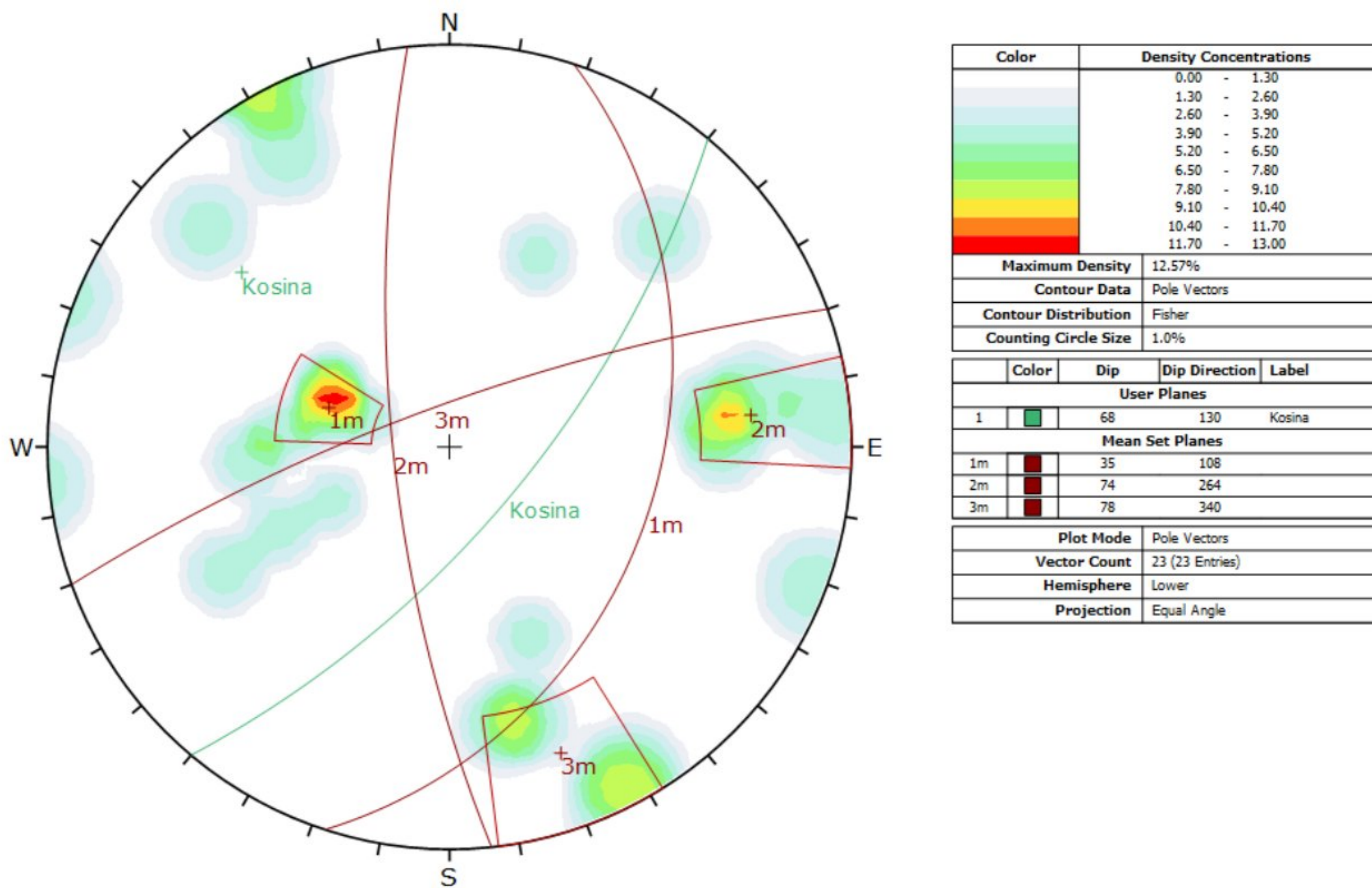
Familija  $F_1$  ima statističku vrednost elemenata pada 108/35 (mereno sa dijagrama sa slike 6.5.). Pukotine su umereno hrapave i umereno izmenjene do izmenjene, male kontinualnosti ( $< 1,0$  m), stisnute, bez ispune, na rastojanju 10-20 cm.



*Slika 6.3. Kosina sa izdvojenim kvazihomogenim zonama po parametru ispucalosti*



Slika 6.4. Stenska masa u kvazihomogenoj zoni I

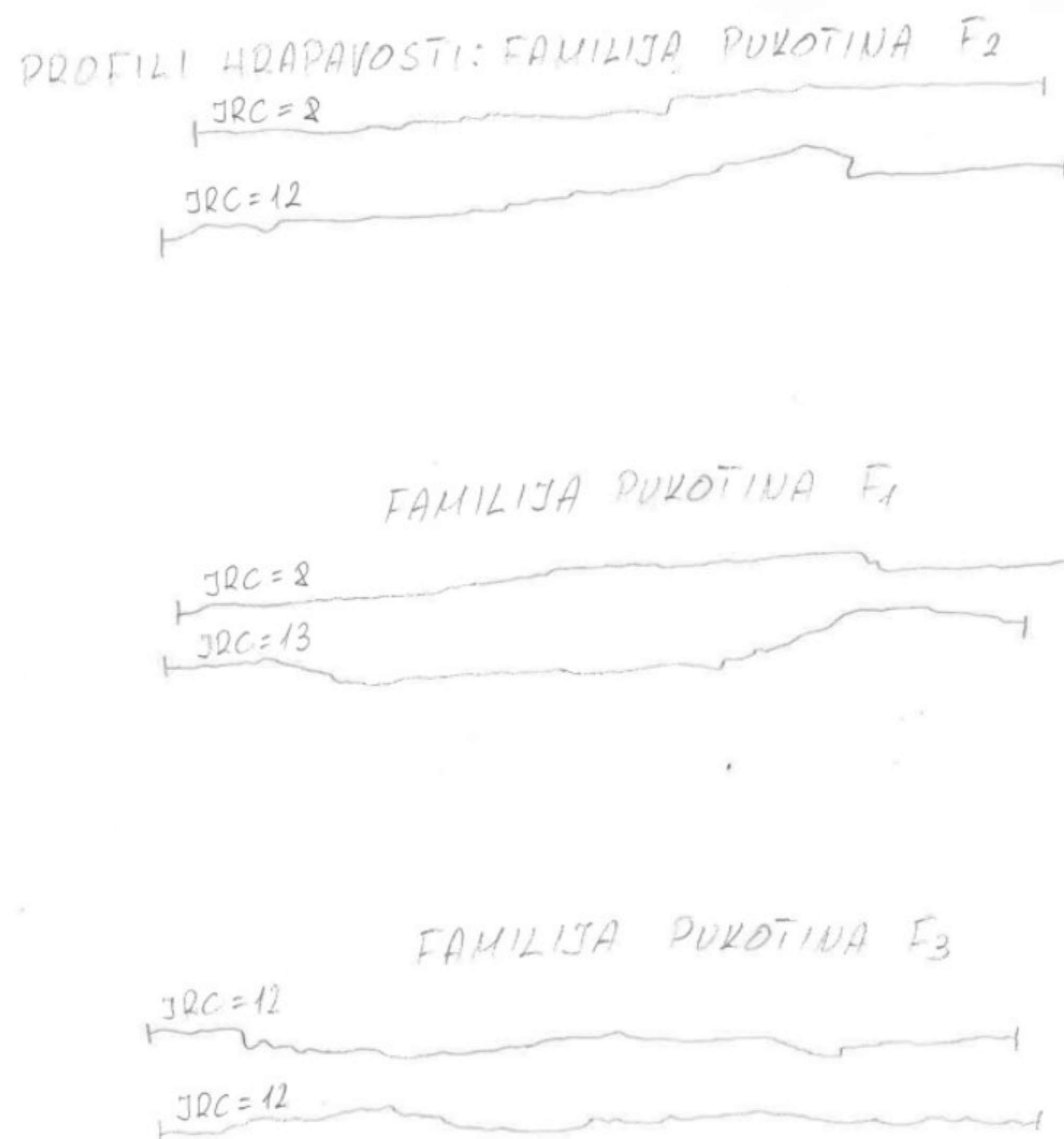


Slika 6.5. Konturni dijagram EP pukotina merenih geološkim kompasom

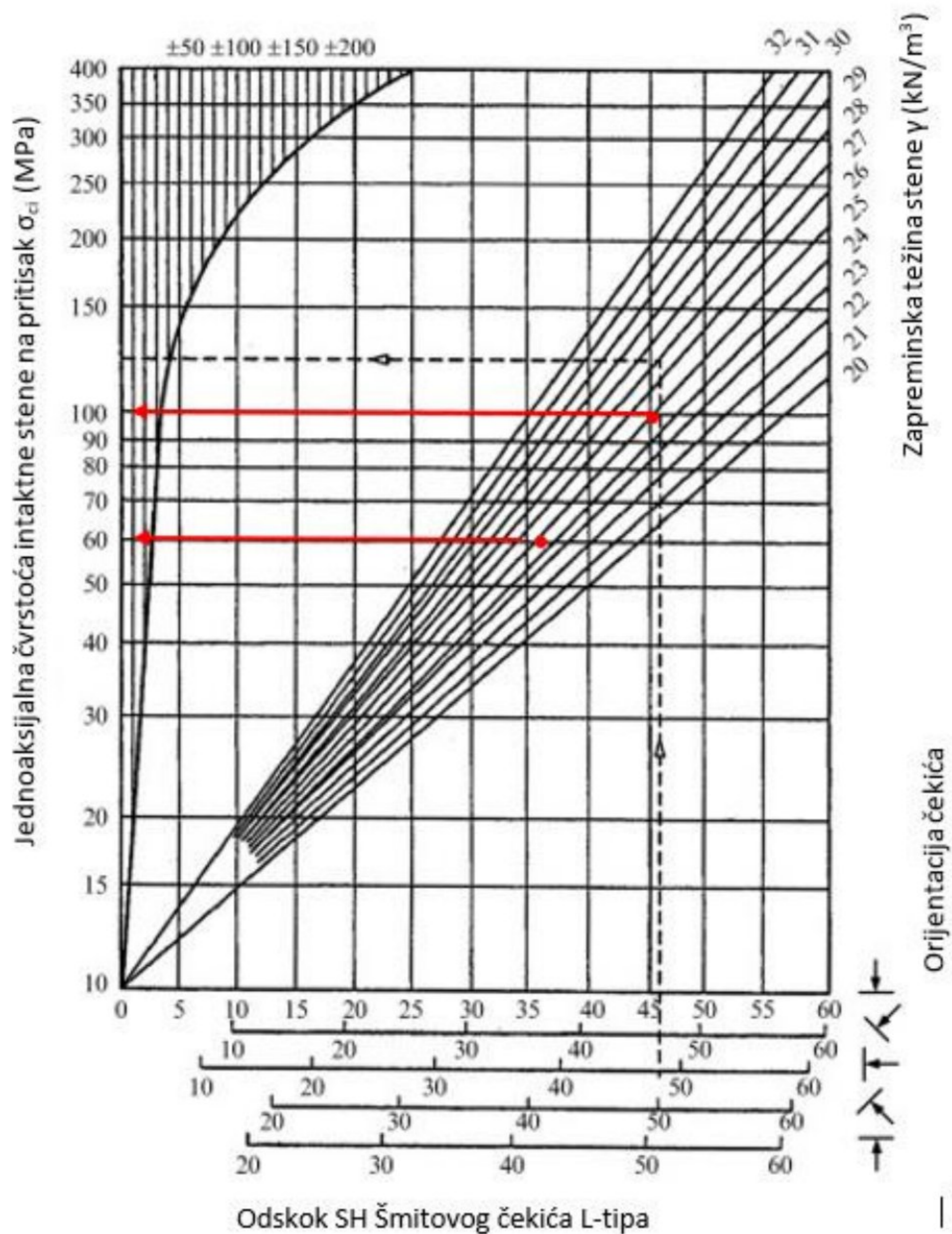
Familija  $F_2$  ima statističke vrednosti elemenata pada 264/74. Pukotine ove familije su umereno hrapave do glatke, umereno izmenjene do izmenjene, stisnute, a mestimično sa zevom do 1 mm, bez ispune. Kontinualnost iznosi 1-3 m, mestimično i preko 3 m, a rastojanje između pukotina unutar familije iznosi 10-20 cm.

Familija  $F_3$  ima statističke vrednosti elemenata pada 340/78. Pukotine su umereno hrapave, umereno izmenjene do izmenjene, sa zevom do 1 mm, sa tankom tvrdom ispunom. Kontinualnost je  $< 1,0$  m, a rastojanje pukotina nešto veće nego kod prethodne dve familije i iznosi 10-30 cm. Sve tri familije pukotina imaju približno slična svojstva, što ukazuje na opravdanu pretpostavku o homogenosti stenske mase. Profili hrapavosti pukotinskih površi, sa procenjenim vrednostima JRC-a dati su na slici 6.6.

Izvršeno je 22 merenja Šmitovim čekićem. Na svežem prelomu stenske mase izvršeno je 15 merenja, a dobijena je srednja vrednost odskoka  $SH = 45$ . U nedostatku laboratorijskih ispitivanja vrednost zapreminske težine stenske mase je procenjena na  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ . Očitavanjem sa dijagrama prikazanog na slici 6.7. dobijena je vrednost jednoaksijalne čvrstoće na pritisak intaktne stene  $\sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$ . Na izmenjenoj stenskoj masi izvršeno je 7 opita Šmitovim čekićem, sa dobijenom srednjom vrednošću odskoka  $SH = 36$ . Usvojena je ista vrednost zapreminske težine  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ , a očitavanjem sa dijagrama određena je vrednost  $\sigma_{ci} = 60 \text{ MPa}$ .



Slika 6.6. Profili hrapavosti pukotinskih površi, sa vrednostima JRC-a



Slika 6.7. Dijagram zavisnosti odskoka Šmitovog čekića i čvrstoće na pritisak intaktne stene (Deere i Miller, 1966)

Tabela 6.1. Rezultati ispitivanja Point Load Test-a

Uzorak	W (m)	D (m)	L (m)	Ekvivalentni prečnik $D_e$ (m)	Sila pri lomu P (kN)	Indeks tačkaste čvrstoće $I_s$ (kPa)	Korekcionni faktor f	Korigovani $I_{s50}$ (kPa)	Čvrstoća na pritisak $\sigma_c$ (MPa)	Komentar
U-1*	0,05	0,035	0,05	0,047215457	1,1	493,4285714	0,974543852	480,8677809	11,54082674	T3-lom po pukotini
U-1**	0,05	0,035	0,045	0,047215457	5,52	2476,114286	0,974543852	2413,081955	57,91396692	T1-lom kroz masu
U-2	0,055	0,025	0,04	0,041852029	1,3	742,1818182	0,923072754	685,0878151	16,44210756	T3-lom po pukotini
U-3	0,055	0,037	0,04	0,050915191	3,99	1539,140049	1,008195648	1551,754299	37,24210317	T1-lom kroz masu
U-4	0,065	0,045	0,045	0,061041909	4,528	1215,206838	1,093946659	1329,37146	31,90491503	T2-kombinovani lom
U-5	0,06	0,035	0,03	0,051721942	2,008	750,6095238	1,015353258	762,1338253	18,29121181	T2-kombinovani lom



Uzeto je 6 uzoraka za ispitivanje Point Load Test-om, koje je izvršeno na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, uz pomoć mentora, doc. dr Zorana Berisavljevića. Rezultati PLT su prikazani u tabeli 6.1. Od šest izvršenih testova, dva su neuspešna (desio se lom po pukotini), dva delimično uspešna (kombinovani lom) i dva uspešna (lom kroz masu). Prilikom korelacije indeksa tačkaste čvrstoće  $Is_{50}$  i čvrstoće na pritisak  $\sigma_{ci}$  korišćena je zavisnost  $\sigma_{ci} = 24Is_{50}$ , po Broch i Franklin (1972). Navedena korelacija je odabrana kao najčešće korišćena u praksi, s obzirom na nedostatak odgovarajućih ispitivanja veze  $\sigma_{ci}$  i  $Is_{50}$  za dijabaze. Vrednosti  $\sigma_{ci}$  dobijene iz testova pri kojima se desio lom kroz masu iznose 37 i 58 MPa. Imajući u vidu navedene vrednosti, kao i one dobijene pomoću Šmitovog čekića, koji je u ovom slučaju bio pouzdaniji metod, usvojena je vrednost koja će biti korišćena za proračune  $\sigma_{ci} = 70$  MPa. Fotografije uzoraka pre i posle loma su prikazane na slici 6.8. Iz razloga tehničke prirode nisu fotografisani svi uzorci.



Slika 6.8. Uzorci pre (levo) i posle (desno) loma

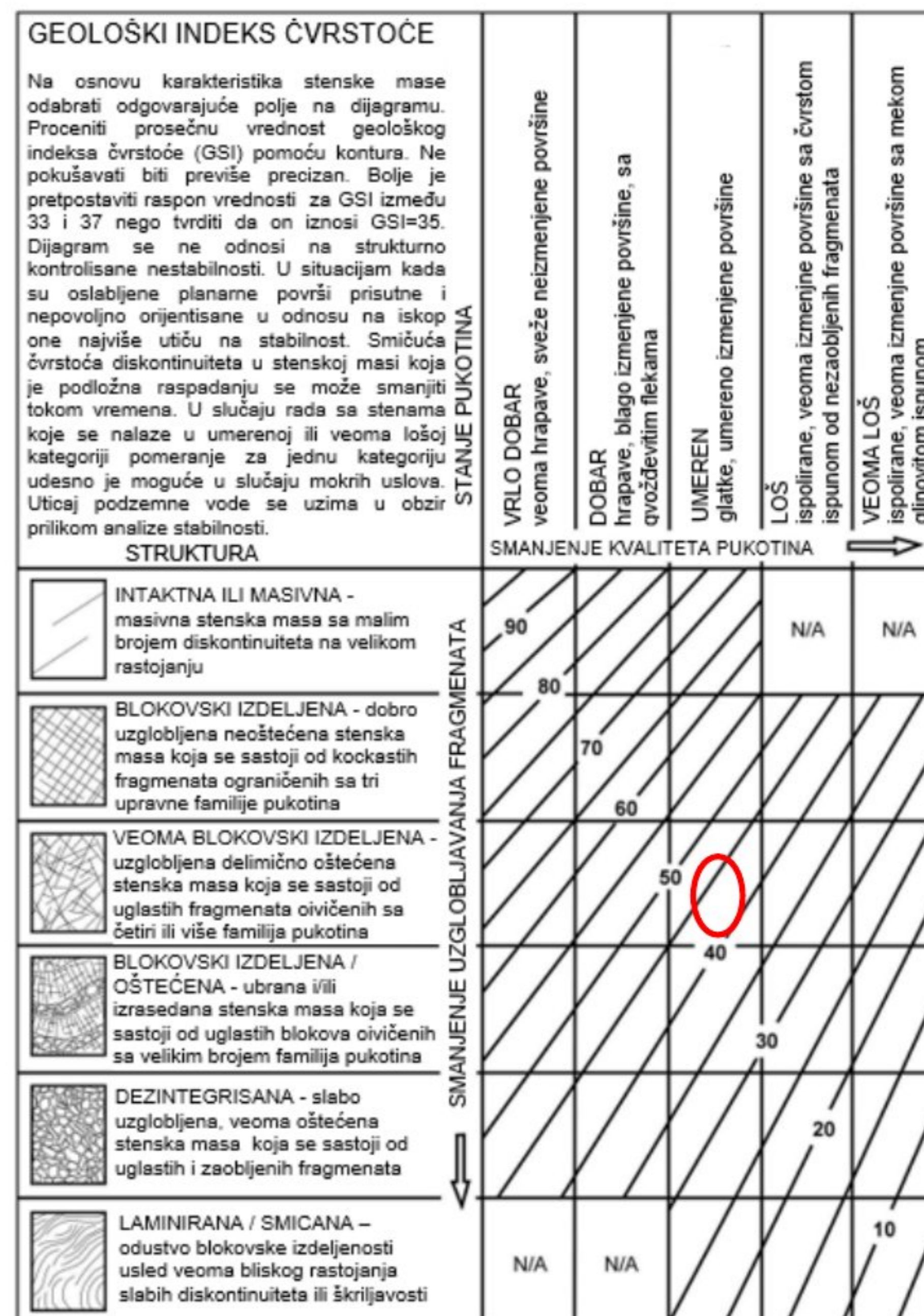
### 6.1.1. Procena GSI vrednosti

GSI je određen pomoću dijagrama sa 6 strukturnih kategorija (Hoek i Marinos, 2000), prikazanog na slici 6.9. i kvantifikovanog dijagrama (Hoek i dr, 2013) prikazanog na slici 6.10. Neophodni ulazni podaci su indeks kvaliteta stenske mase RQD i faktor kvaliteta pukotinskih površi iz RMR<sub>89</sub> klasifikacije, Jcond<sub>89</sub>. Parametar RQD je određen preko zapreminske učestalosti pukotina  $J_v$  koristeći jednačine (13) i (14). Tom prilikom, kao prosečna rastojanja pukotina unutar familija odabrane su vrednosti 0,1; 0,1; 0,12 m. Pomenute vrednosti su odabrane kao donje granične vrednosti raspona rastojanja pukotina pomenutih na stranama 49 i 50, kako bi analiza bila na strani sigurnosti, ali i kako bi u obzir bile uzete pojedinačne pukotine koje utiču na vrednost RQD ali nisu eksplicitno uključene u jednačine (13) i (14).

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} = \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,12} = 28,3$$

$$RQD = 110 - 2,5J_v = 110 - 2,5 \cdot 28,3 = 110 - 70,75 = 39$$

Podaci o kvalitetu zidova pukotina i veličini parametra Jcond<sub>89</sub> su prikazani u tabeli 6.2.

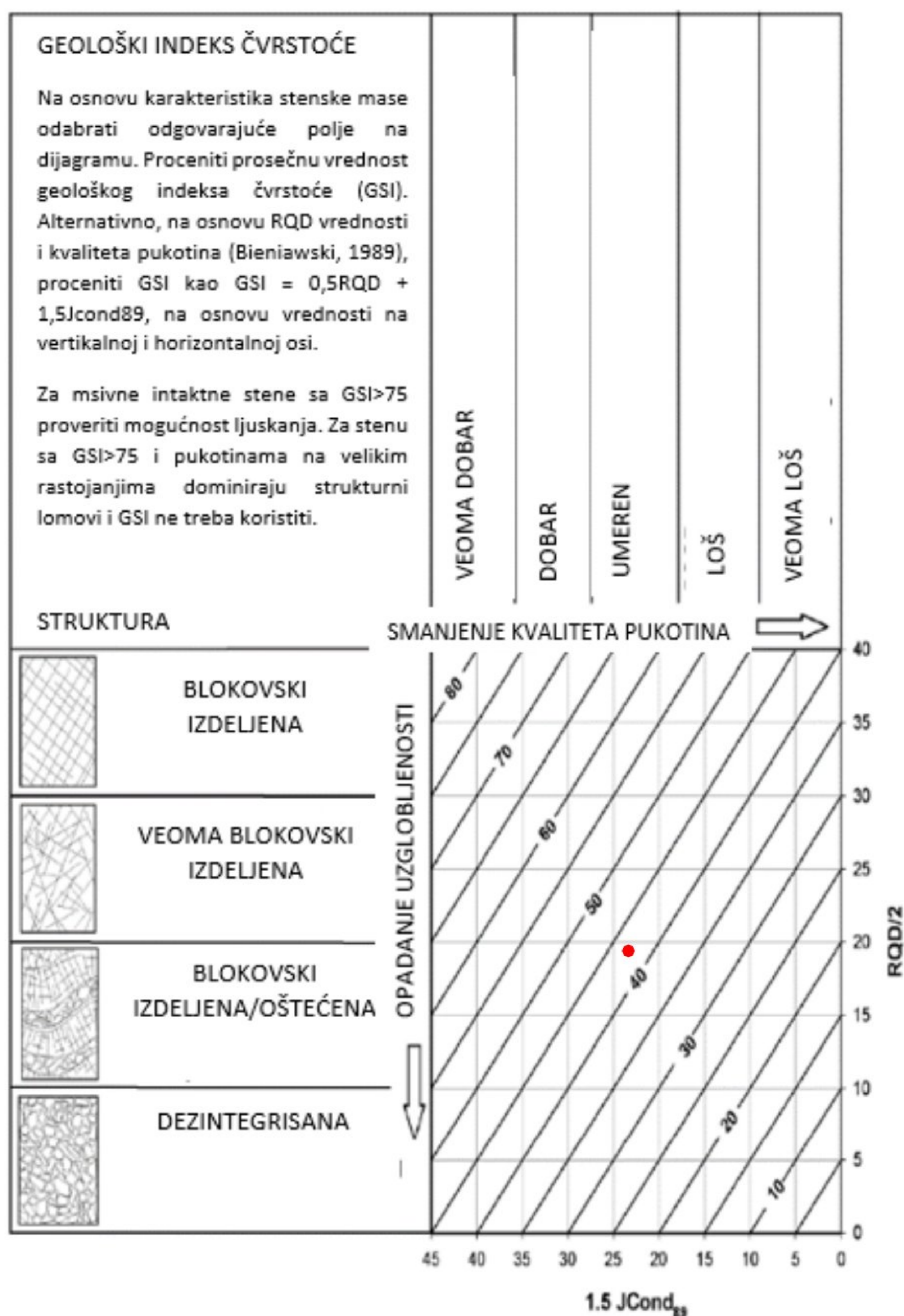


Slika 6.9. GSI dijagram sa šest strukturnih kategorija i označenom vrednošću stenske mase na kosini (Hoek i Marinos, 2000, iz Berisavljević i dr, 2021)

Tabela 6.2. Bodovanje stanja pukotina prema  $RMR_{89}$  klasifikaciji (Bieniawski, 1989)

Svojstvo pukotina	Opis	Bodovanje	Familija I	Familija II	Familija III	Usvojen broj bodova
Kontinualnost (prostiranje u dubinu mase)	vrlo mala < 1 m	6	x		x	2
	mala 1-3 m	4				
	srednja 3-10 m	2		x		
	velika 10-20 m	1				
	vrlo velika >20 m	0				
Zev	zatvorene	6	x			4
	< 0,1 mm	5				
	0,1-1 mm	4		x	x	
	1-5 mm	1				
	> 5 mm	0				
Hrapavost	vrlo hrapave	6				3
	hrapave	5	x		x	
	umereno hrapave	3		x		
	glatke	1				
	klizave	0				
Ispuna (u skladu sa zevom)	bez ispune	6	x	x		4
	tvrda ispuna < 5 mm	4			x	
	tvrda ispuna > 5 mm	2				
	meka ispuna < 5 mm	2				
	meka ispuna > 5 mm	0				
Izmena zidova pukotina	neizmenjene	6				3
	neznatno izmenjene	5				
	umereno izmenjene	3	x	x	x	
	jako izmenjene	1				
	potpuno izmenjene	0				
					Ukupno	16

Vrednost parametra stanja pukotinskih površi  $J_{cond89}$  iznosi 16. Tom prilikom, usvajane su najniže vrednosti za svojstva pukotina, a ne vrednosti najnepovoljnije orijentisane familije, s obzirom na pretpostavku o izotropnosti stenske mase. Sa slike 6.9. se vidi da se vrednost GSI kreće u rasponu 40-46. Sa kvantifikovanog dijagrama je očitana vrednost GSI od 43, koja je usvojena za proračun MC parametara smičuće čvrstoće.



Slika 6.10. Kvantifikovani GSI dijagram sa naznačenom vrednošću stenske mase na kosini (prema Hoek i dr, 2013)

### 6.1.2. Procena Q vrednosti

Vrednost RQD-a je već usvojena i iznosi 39. Vrednost indeksa broja familija pukotina  $J_n$  iznosi 12, zahvaljujući činjenici da su zastupljene tri familije pukotina i brojne pojedinačne pukotine. Indeks hrapavosti pukotina  $J_r$  je određen poredeći profile pukotinskih površi, prikazane na slici 6.6, sa standardnim profilima prikazanim na slici 4.1. Usvojen je za familiju pukotina sa najnižom vrednošću JRC-a, koja je ujedno i najnepovoljnije orijentisana, niz kosinu (familija  $F_2$ ). Indeks izmene pukotinskih površi  $J_a$  ima vrednost 2. Određen je za prvu kategoriju

stenske mase (videti tabelu 4.4.) kod koje je ostvaren kontakt zidova pukotina koje ne sadrže ispunu, već samo mineralnu prevlaku, tj skramu.

Vrednost faktora prisustva vode  $Jw$  je procenjena na 1 (videti tabelu 4.5.), s obzirom da je iskop potpuno suv, bez prisustva vode. Treba imati na umu da je kartiranje kosine vršeno u suvom periodu, te da prilikom intenzivnih padavina može doći do lokalnog procurivanja vode iz pukotina. Ipak, stenska masa je dobro ocedita, a pojava izvora u blizini nema. Faktor redukcije napona  $SRF$  je procenjen na 2,5 (videti tabelu 4.6.). Pritom, na kosini nema prisustva slabih, rasednih zona, kao ni stenskih masa koje potencijalno bubre ili ispoljavaju pojave vremenski zavisnih plastičnih deformacija. Stenska masa ispoljava krto naponsko-deformacijsko ponašanje, te je odnos napona i njene čvrstoće relevantan. Kako je kosina veoma niska, vrednosti svestranih pritisaka su male, te je usvojena vrednost  $SRF$  faktora za najveći odnos čvrstoće i napona, tj. za stensku masu blizu površine terena.

Q vrednost se može proceniti iz jednačine (12):

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF} = \frac{39}{12} \times \frac{2}{2} \times \frac{1}{2,5} = 1,3$$

Na kosini je izvršena i Q-slope klasifikacija. Pritom, vrednosti parametara  $RQD$ ,  $Jn$ ,  $Jr$  i  $Ja$  ostaju iste. Faktor orijentacije  $O$  (videti tabelu 4.7.) je procenjen na 0,75, za nepovoljnu orijentaciju diskontinuiteta (s obzirom da familija  $F_2$  pada niz kosinu, međutim ne izaziva nestabilnosti), dok faktor atmosferskih uslova  $Jwice$  (tabela 4.8.) ima vrednost 0,7, za kompetentnu stenu stabilne strukture u vlažnim uslovima. Parametar  $SRFslope$  je procenjen na 2,5, za stensku masu u umerenom do visokom domenu odnosa čvrstoće i napona, koja je pretrpela neznatno rastresanje usled iskopa (videti tabelu 4.9.). Q-slope vrednost je dobijena iz jednačine (15):

$$Qslope = \frac{RQD}{Jn} \times \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_O \times \frac{Jwice}{SRFslope} = \frac{39}{12} \times \left(\frac{2}{2} \times 0,75\right) \times \frac{0,7}{2,5} = 0,6825$$

Optimalan ugao nagiba kosine, prema jednačini (16) iznosi:

$$\beta = 20 \log_{10} Qslope + 65^\circ = 20 \log_{10} 0,6825 + 65^\circ = -3^\circ + 65^\circ = 62^\circ$$

Ovo je solidno slaganje sa izmerenim stvarnim uglom nagiba kosine, koji iznosi 65-68°.

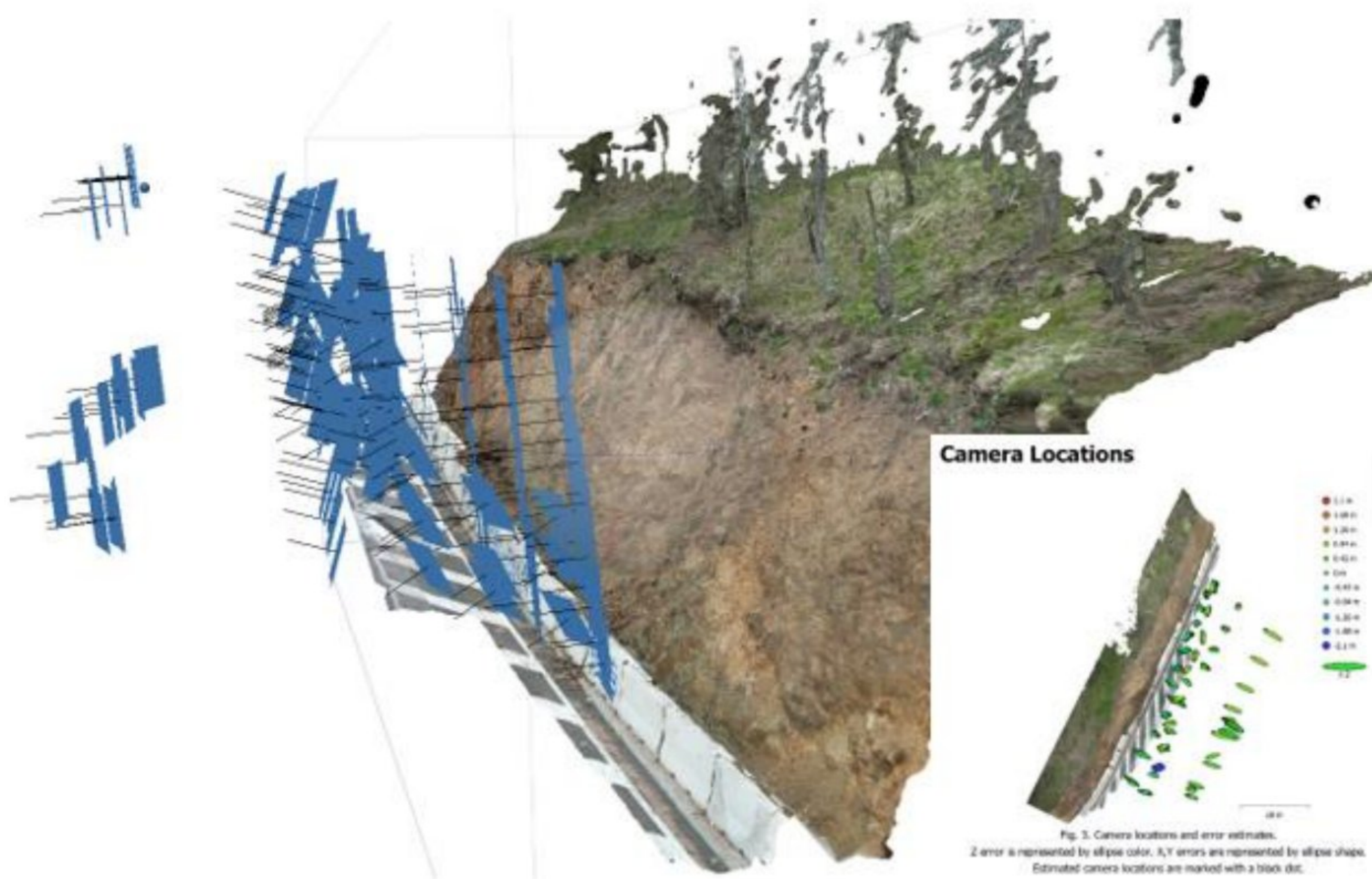
## 6.2. Rezultati fotogrametrijske analize kosine

Radi boljeg razumevanja primene fotogrametrije za analizu strukturnog sklopa stenske mase, u kraćim crtama će biti prikazana teorijska osnova postupka formiranja 3D digitalnog modela na osnovu primene bezkontaktne optičke metode, odnosno fotogrametrije.

Fotogrametrija spada metodu daljinske detekcije čiji se princip zasniva na projektovanju optičkog signala na realan trodimenzionalni predmet (u našem slučaju površ kosine) i detektovanje reflektovane informacije sa tog predmeta. Ideja same metode bazirana je na stereovizijskom principu, koji podrazumeva projektovanje najmanje dve slike istog objekta, snimljene pod različitim uglovima, čime se stvara efekat treće dimenzije, tj. dubine. Na osnovu poznavanja pozicije svake kamere i parametara kamere (npr. žižna daljina) moguće je odrediti rastojanja na svakoj tački objekta, na osnovu čega se uvodi treća dimenzija.

U ovom radu je korišćen postupak SfM (Structure from Motion) fotogrametrije, kod koga, za razliku od gore pomenutog stereo postupka, na samom početku procesa nije potrebno poznavati položaje i parametre kamere, već se oni određuju primenom specijalnog algoritma. Algoritam na početku procesa prepoznaje tzv. ključne (referentne) tačke na svakoj fotografiji, na osnovu kojih se sa dvodimenzionalnih fotografija, koje među sobom moraju imati odgovarajući završni i bočni preklop (obično 60-80%), mogu odrediti položaji kamera (vrši se tzv. poravnavanje kamera). Kod SfM postupka parametri kamere se izračunavaju tokom samog procesiranja fotografija na osnovu detektovanih karakterističnih obeležja-tačaka i taj proces se još naziva autokalibracija. SfM postupak je korišćen u ovom radu, a implementiran je u programski paket Agisoft Metashape. Na slici 6.11. prikazani su položaji kamere u odnosu na snimljenu kosinu.

Sa prikupljenih fotografija se izdvajaju ključna obeležja, takozvani deskriptori, koji se opisuju pomoću algoritma, koji prepoznaje njihova podudaranja.



*Slika 6.11. Položaji kamere u odnosu na kosinu*

Zatim se na osnovu određivanja spoljašnjih i unutrašnjih parametara kamere formira retki oblak tačaka (oblak tačaka niske rezolucije), slika 6.12. U narednom međukoraku, ovaj oblak je „filtiran“, tj. uklonjen je određeni broj tačaka (oko 10% od ukupnog broja) za koje program smatra da nisu pouzdano rekonstruisane. Rekonstruisani model se zatim može pozicionirati u prostoru u realan, svetski koordinatni sistem preko GCP (Ground Control Points). Za potrebe ovog rada korišćen je lokalni koordinatni sistem, pri čemu je objekat stavljen u odgovarajuću razmeru na osnovu poznatih rastojanja između markera označenih na terenu (plusevi u crvenom spreju na licu kosine).

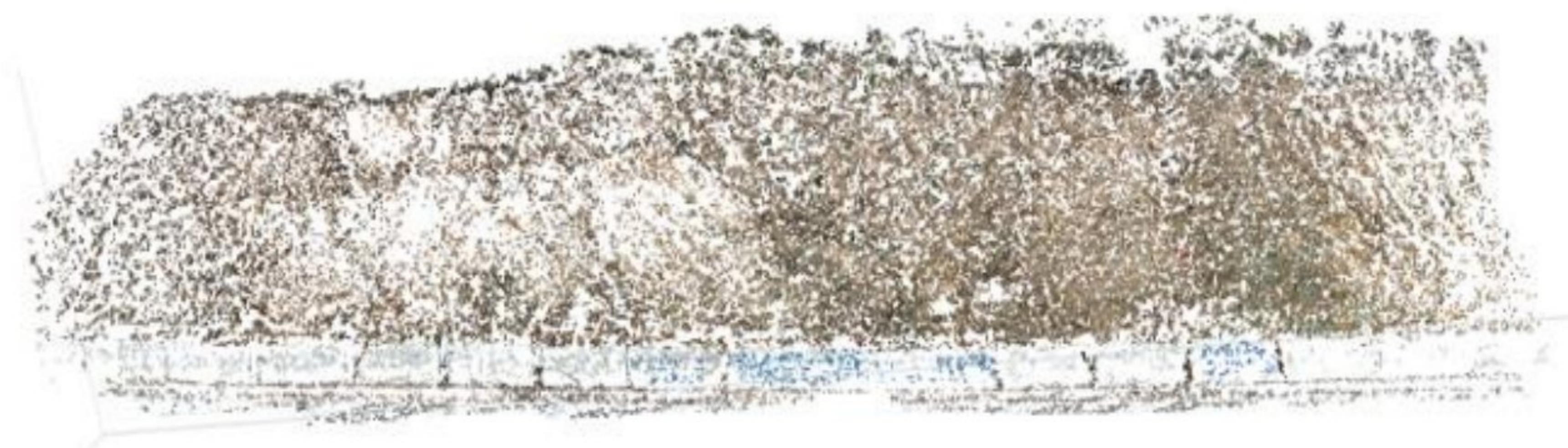
Da bi se dopunio redak oblak tačaka, povećanje gustine se sprovodi odgovarajućim algoritmom koji generiše dubinsku mapu piksela slike. Na ovaj način dobija se gusti oblak tačaka (oblak tačaka visoke rezolucije), slika 6.13. Na tačnost prikazanog postupka utiče nekoliko faktora, od kojih su najznačajniji: dimenzije objekta koji se fotografiše, broj fotografija i njihovo preklapanje i rezolucija fotografija. Manje dimenzije objekta podrazumevaju i manje rastojanje od mesta snimanja fotografija, što povećava preciznost, a samim tim i tačnost merenja. U principu veći broj fotografija, sa što većim preklapom omogućiće dobijanje kvalitetnijeg podatka, tj. preciznijeg položaja tačaka u prostoru.

Kosina je snimljena dronom DJI Air 2S, koji poseduje kameru od 20 MPix sa 1-inch CMOS senzorom. Putanja snimanja podrazumevala je višestruke manuelne prelete u

horizontalnom i vertikalnom pravcu (u odnosu na lice kosine) i prekrivanje površine od oko 552 m<sup>2</sup> sa 195 fotografija. Rezolucija snimanja iznosila je 2,01 mm/pix.

U narednom koraku, a na osnovu gustog oblaka tačaka, formiran je poligonalni trodimenzionalni model (3D mesh), nakon čega se formira tekstura objekta. Detalj kosine sa realnom teksturom prikazn je na slici 6.14.

Digitalni elevacioni model (DEM) rekonstruisan je takođe na osnovu gustog oblaka tačaka sa rezolucijom od 4,03 mm/pix, odnosno 6,17 tačaka/cm<sup>2</sup>, slika 6.15.



*Slika 6.12. Retki oblak tačaka (111 456 tačaka)*

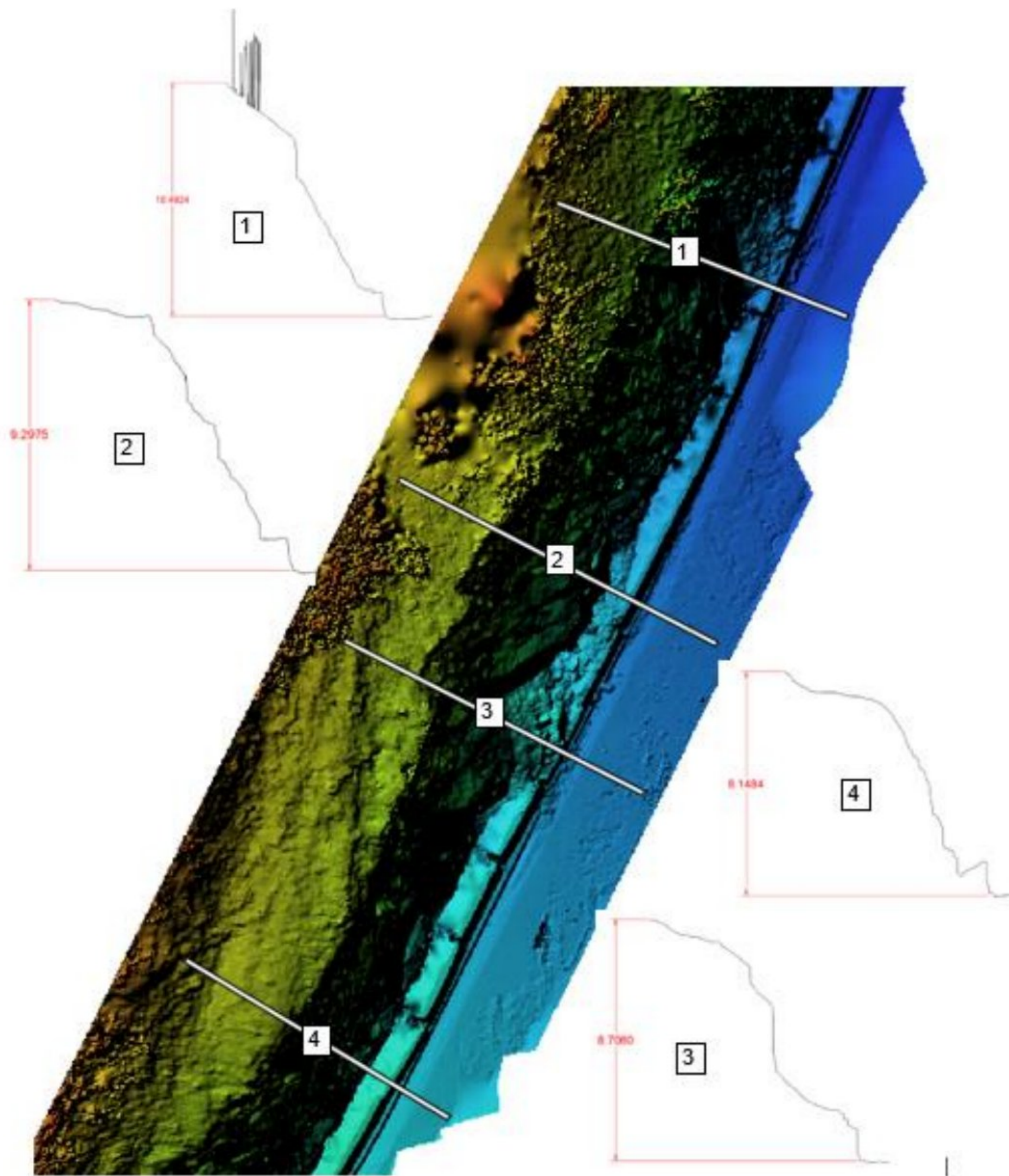


*Slika 6.13. Gusti oblak tačaka (65 621 141 tačaka)*





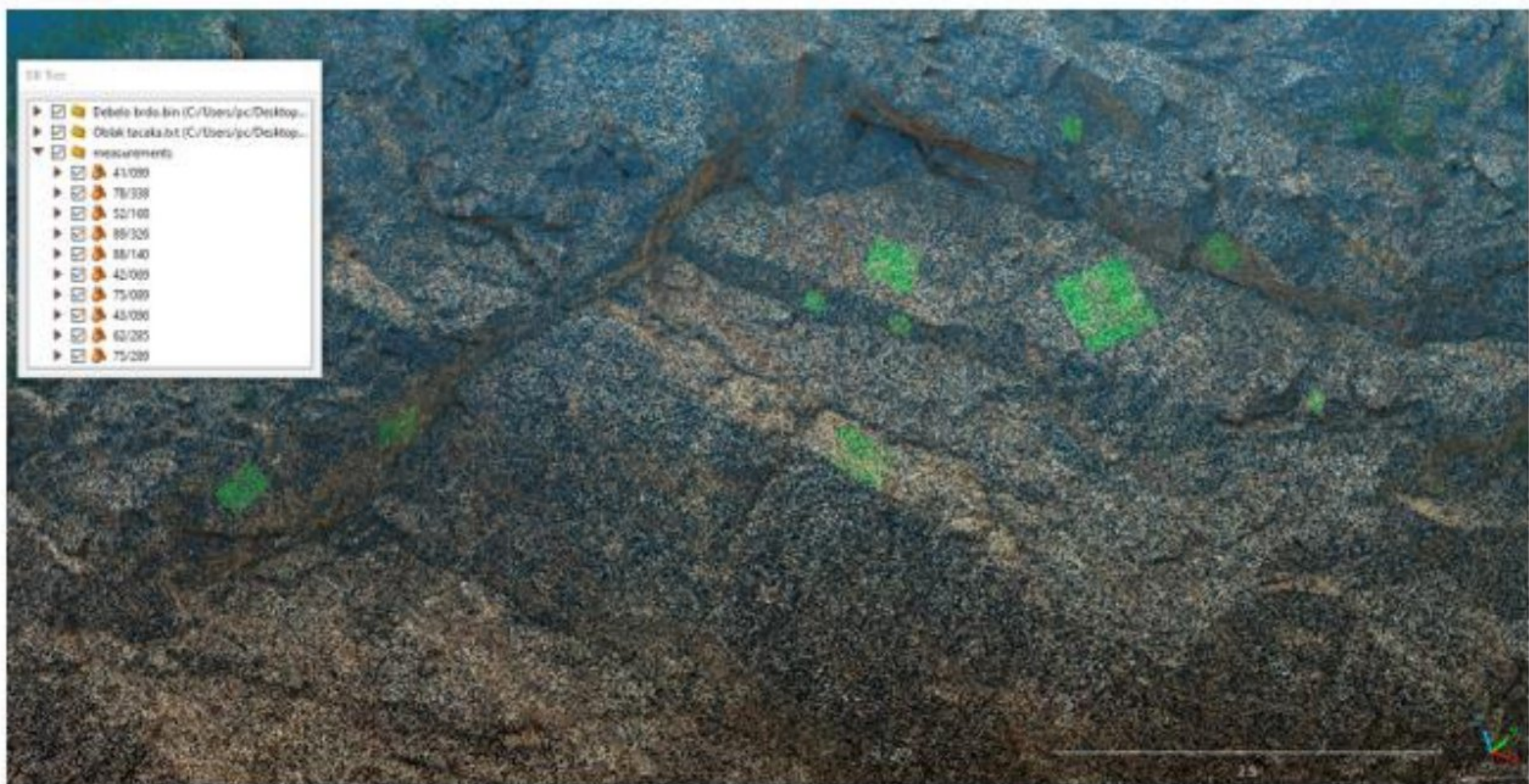
*Slika 6.14. Detalj 3D modela sa prikazanom opcijom za merenje rastojanja*



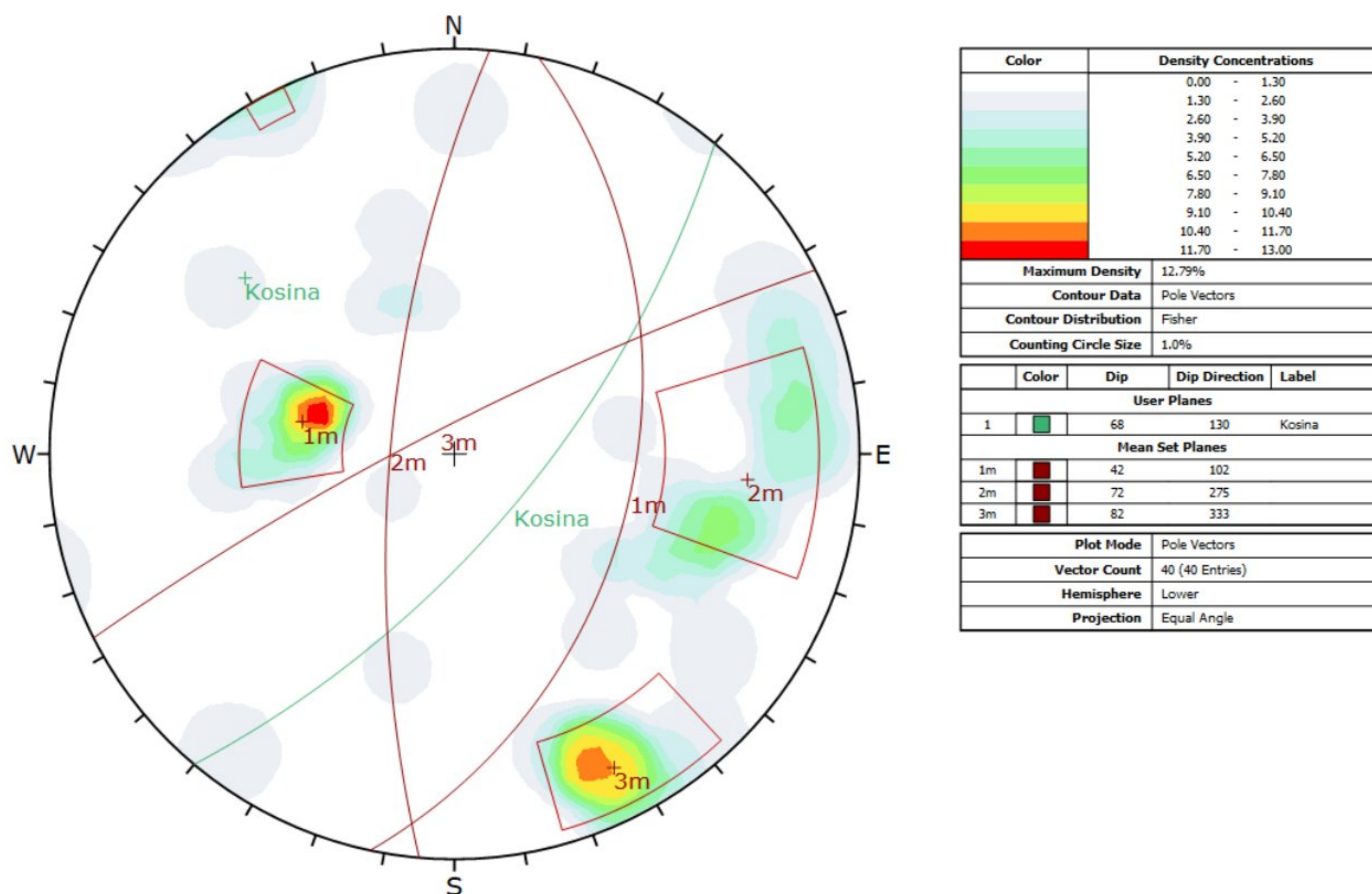
*Slika 6.15. Digitalni elevacioni model sa položajem poprečnih preseka*

### 6.2.1. Analiza strukturnog sklopa na oblaku tačaka

Nakon izrade trodimenzionalnog modela, gusti oblak tačaka je u .xyz ekstenziji izvežen u program CloudCompare. Ovaj „open source“ program je besplatan i veoma je pogodan za rad sa oblacima tačaka. Za njega postoji veliki broj tzv. dodataka (plugin-ova), između ostalih i za potrebe analiziranja strukturnog sklopa stenske mase. Za potrebe rada korišćen je programski dodatak „Compass“, koji omogućava da se za bilo koji deo oblaka tačaka manuelno izmere elementi pada (azimut i padni ugao), slika 6.16. Osenčene zelene površine, predstavljaju planaru, na kojoj je prikazan i vektor normale. Ovu opciju je potrebno koristiti na „ravnim delovima“ oblaka tačaka, tj. onim delovima gde je jasno da se radi o pukotinama. Ovo omogućava da se na virtuelan način izmeri veliki broj elemenata padova na lokacijama, koje konvencionalnim terenskim merenjem, nisu dostupne. Konturni dijagram elemenata padova pukotina merenih pomoću opcije „Compass“ prikazan je na slici 6.17. Uočava se odlično poklapanje sa elementima pada merenim geološkim kompasom, koji su prikazani na konturnom dijagramu na slici 6.5.



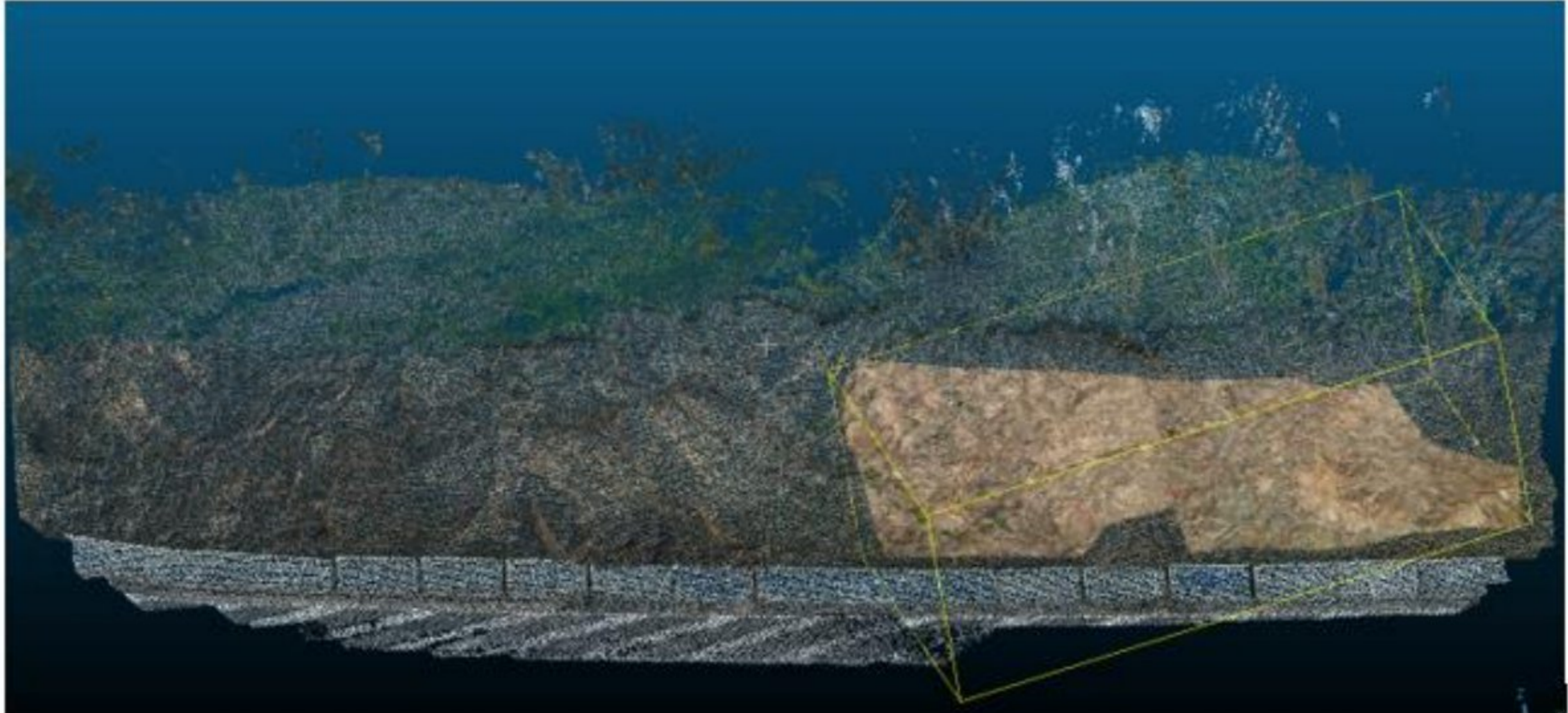
*Slika 6.16. Princip merenja elemenata pada pomoću opcije "Compass"*



Slika 6.17. Konturni dijagram EP pukotina merenih pomoću opcije "Compass", iz oblaka tačaka

Pored manuelnog, korišćen je i postupak polu-automatskog izdvajanja familija pukotina na osnovu rekonstruisanog oblaka tačaka. Za ove potrebe korišćen je besplatan program DSE (Discontinuity Set Extractor). U programu DSE su nakon klasifikovanja i podele oblaka tačaka u pojedine familije pukotina, određena normlana rastojanja između njih, kao i kontinualnost pukotina unutar pojedinih familija. U nastavku će se ukratko prikazati metodologija rada u ovom programu.

Pre same primene navedenog programa, u programu CloudCompare smanjena je rezolucija gustom oblaku tačaka (na 1 500 000 tačaka) i analiziran je samo jedan njegov deo, u kom je stenska masa najintezivnije ispucala i izotropna, slika 6.18.



*Slika 6.18. Isečeni deo oblaka tačaka korišćen za poluautomatsku strukturnu analizu*

Metodologija izdvajanja familija pukotina u programu DSE zasnovana je na vektorskoj i statističkoj analizi i obavlja se u nekoliko koraka:

1. Određivanje lokalne zakrivljenosti i vektora normale;
2. Statistička analiza polova ravni;
3. Analiza klastera

Da bi se odredila lokalna zakrivljenost, odnosno formirali klasteri (planare), potrebno je odrediti skupove tačaka slične orijentacije. Na početku procesa se u okolini jedne tačke definiše podskup sa određenim brojem susednih tačaka (npr. 30). Za tako određeni podskup se formira najbolje poklopljena ravan u prostoru, za koju se odredi normalni vektor. Ovo se ponavlja za susedne tačke (susedne podskupove). Nakon toga, se može (a ne mora, što je ostavljeno kao opcija u programu) izvršiti test komplanarnosti da bi se utvrdilo da li sve tačke određenog podskupa pripadaju datoj ravni. Polovi normala tako definisanih ravni (podskupovi tačaka) se nanose na stereografsku mrežu pri čemu se dobijaju gustine polova u svakom delu stereo mreže, slika 6.19.a. Nakon toga se prema određenoj proceduri (kernel density estimation) određuju gustine polova koje se prikazuju neparametarskim funkcijama gustine raspodele, slika 6.19.b. Gustina raspodele polova se može prikazati i u tri dimenzije (slika 6.19.c). Postupak je praćen unosom dva parametra: raspon uglova u kojima se nalaze normale odgovarajućih planara i maksimalnim brojem familija pukotina koje se mogu izdvojiti na osnovu ove analize. Zatim se uvidom u stereomrežu mogu izbrisati dodeljene familije pukotina, u slučaju da imaju pripisanu malu gustinu polova. Sa slike 6.19. vidi se veoma dobro poklapanje sa konturnim dijagramima dobijenim iz geološkog kompasa (slika 6.5.) i manuelnim očitavanjem sa oblaka

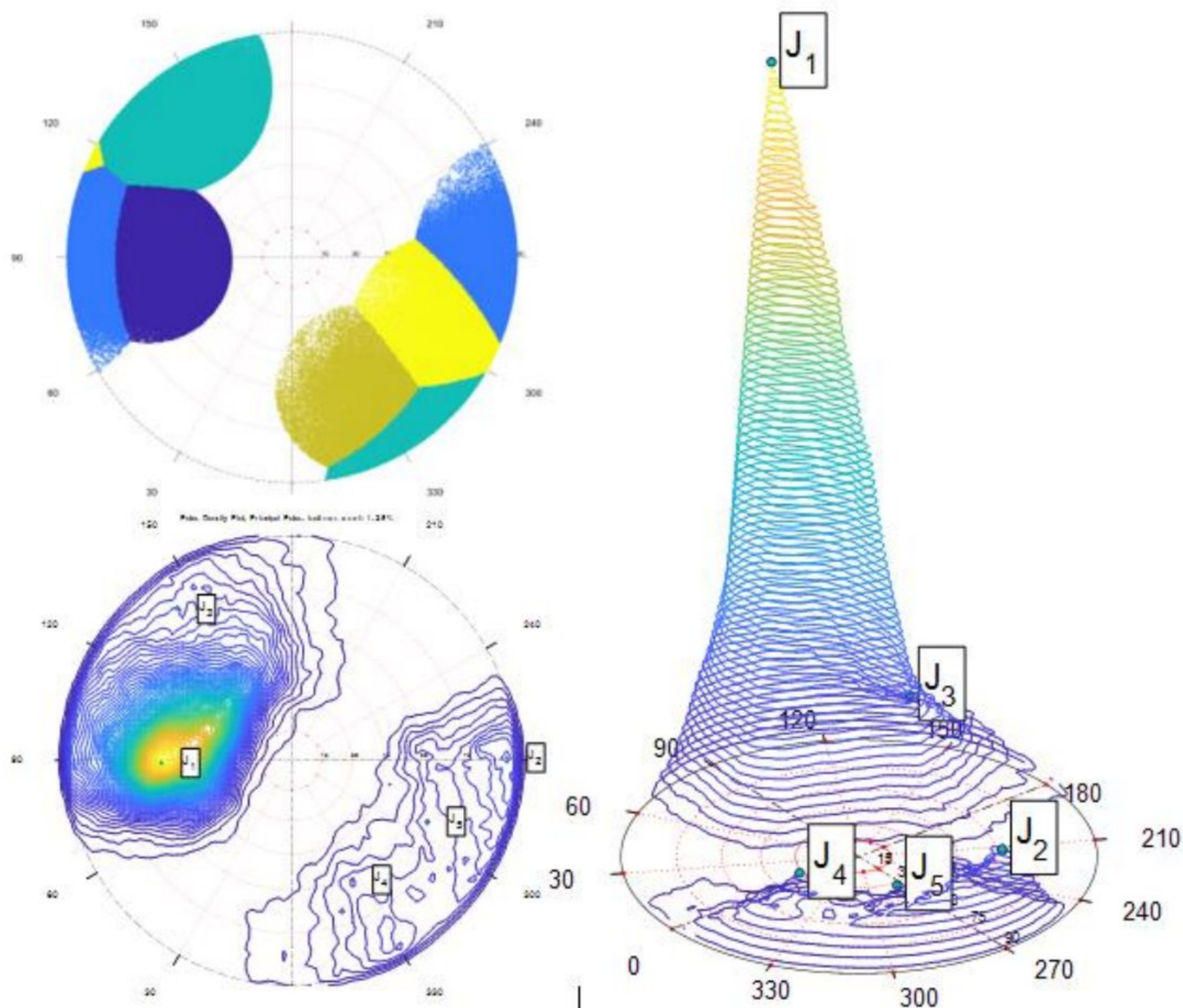
tačka (slika 6.17.). Ipak, sa automatskim očitavanjem elemenata pada planara treba biti obazriv, s obzirom da je u ovom slučaju čitavo lice kosine pripisano familiji  $J_1$ , što ne odgovara u potpunosti realnosti.

Izgled oblaka tačaka nakon izvršene klsterske analize prikazan je na slici 6.20.

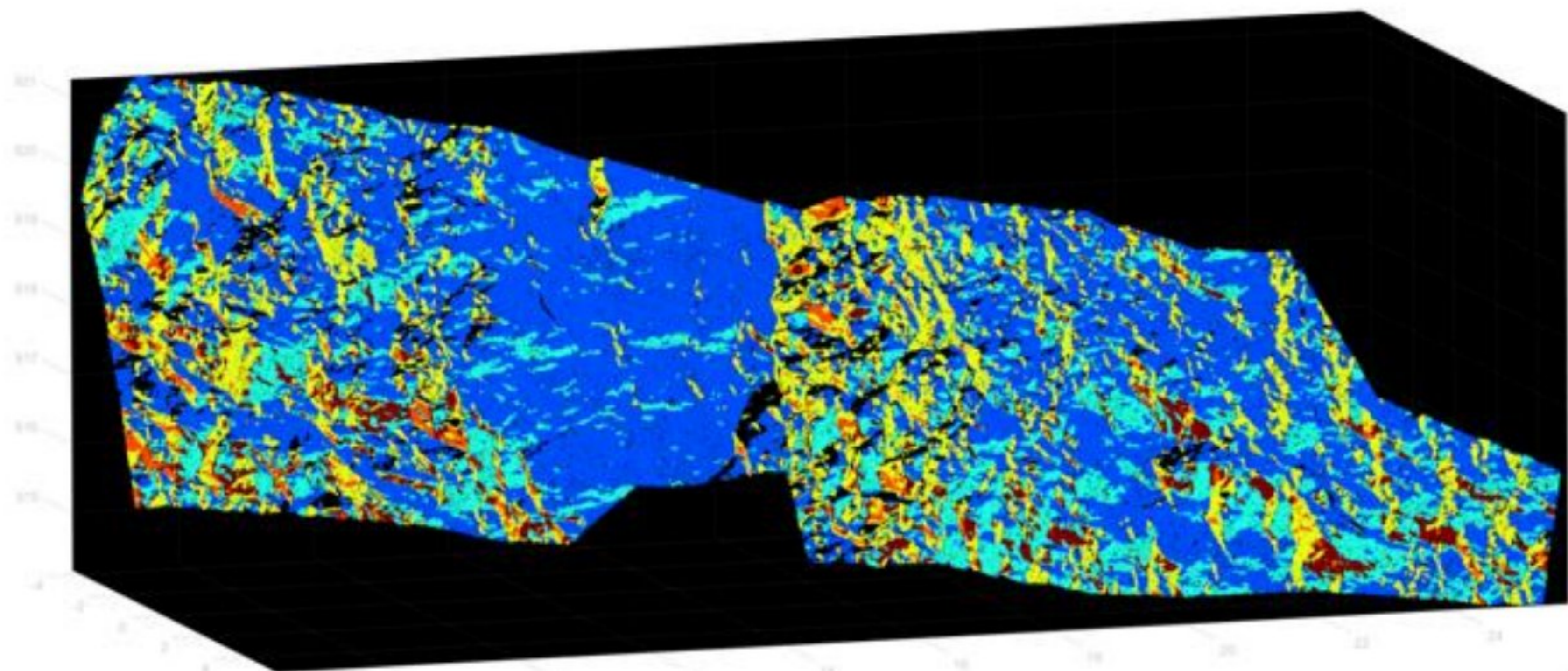
Nakon definisanja familija pukotina na trodimenzionalnom modelu, dopunskim analizama mogu se odrediti normalna rastojanja između pojedinih klastera (planara) određene familije, kao i njihova kontinualnost. Za ove potrebe koristi se opšta skalarna jednačina ravni u obliku:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (33)$$

gde su:  $A$ ,  $B$  i  $C$  komponente vektora normale na ravan;  $D$  - konstanta koja definiše položaj ravni u prostoru (rastojanje od koordinatnog početka).

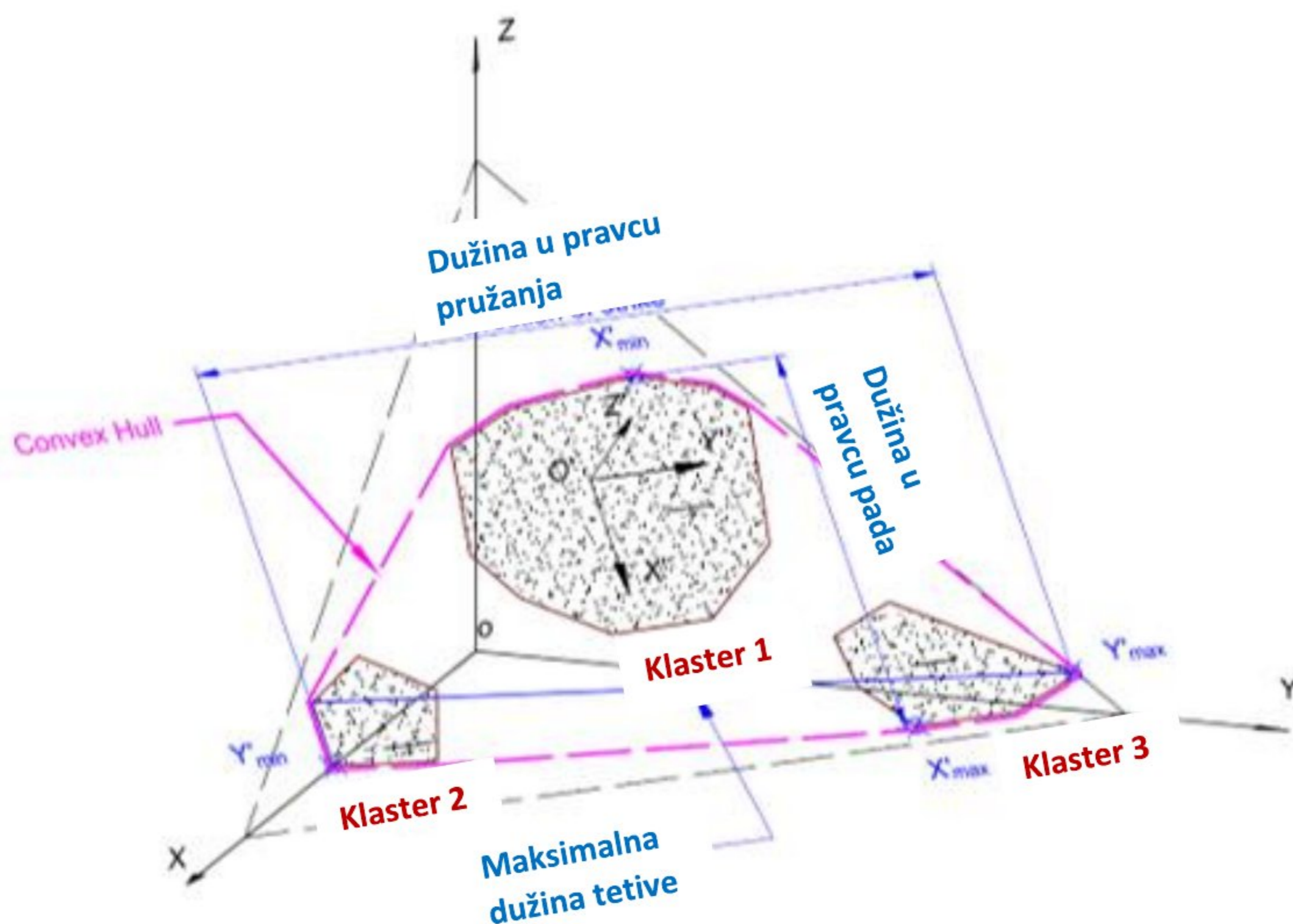


Slika 6.19. Gustina polova ravni prikazana na stereografskoj mreži: a) koncentracije polova u različitim bojama; b) gustine sa izolinijama; c) 3D prikaz slike pod 6.11.b



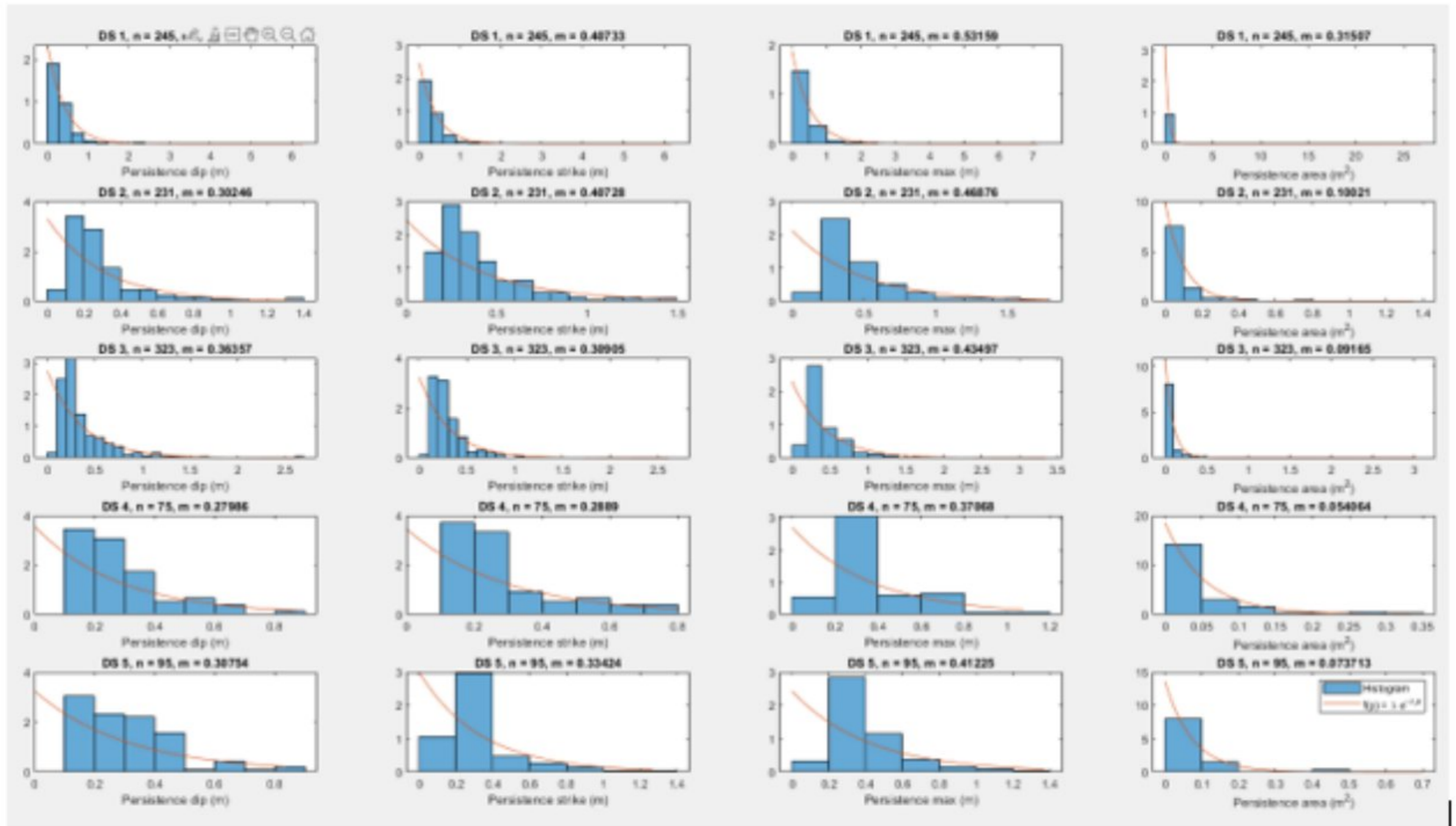
Slika 6.20. Klasifikovani oblak tačaka sa izdvojenim familijama pukotina

Za svaku izdvojenu familiju pukotina računa se rastojanje između susednih klastera – parametar  $D$  iz jednačine (33). Kontinualnost pukotina se određuje na taj način što se pojedini klasteri jedne familije (sa istom orijentacijom u prostoru), koji imaju isti ili sličan parametar  $D$ , objedinjuju u jednu „veću“ planaru njihovim okonturivanjem, tj. formiranjem zatvorene anvelope, slika 6.21. Za tako formiranu pukotinu kontinualnost se automatski određuje za tri slučaja (prostom merenjem rastojanja između dve tačke): po pravcu najduže tetive, u pravcu pada planare i u pravcu njenog pružanja.



Slika 6.21. Formiranje pukotina od više klastera iz jedne familije

Na slici 6.22. prikazani su histogrami kontinualnosti pukotina iz pojedinih familija. Pored toga, na dijagramima je prikazana i najbolje poklopljena negativna eksponencijalna raspodela (crvena linija). U redovima su prikazane familije pukotina, a u kolonama različiti načini merenja kontinualnosti pukotina (u pravcu pada, pružanja i najduže tetive). Takođe, u poslednjoj koloni je prikazana veličina prosečne površine pukotina pojedinih familija.



Slika 6.22. Histogrami kontinualnosti za izdvojene familije pukotina

Rezultati proračuna normalnog rastojanja i kontinualnosti prikazani su i tabelarno (tabele 6.3. i 6.4.). Automatskim postupkom je izdvojeno pet familija pukotina, dok je terenskim merenjem izdvojeno tri. Pritom, familiji  $J_1$  odgovara familija  $F_1$ ,  $J_4$  je  $F_2$ , a  $J_5$  i  $J_2$  predstavljaju  $F_3$ . Najbolje poklapanje je prisutno kod familije  $F_1$  ( $J_1$ ), gde je terenskim kartiranjem određeno normalno rastojanje 10-20 cm, a pomoću programa DSE 0,14 cm. Kod ostalih familija, program DSE daje nešto veća rastojanja. Podaci o kontinualnosti se ne poklapaju najbolje sa terenskim podacima (tabela 6.2.)

Tabela 6.3. Normalna rastojanja pukotina u okviru familija  $J_1$ - $J_5$

Familija pukotina	Srednja vrednost (m)	Min (m)	Max (m)	Modus (m)	Standardna devijacija (m)
$J_1$	0,14	0,012	0,63	0,012	0,11
$J_2$	0,17	0,011	0,94	0,011	0,14
$J_3$	0,15	0,011	1,57	0,011	0,15
$J_4$	0,44	0,012	3,19	0,011	0,57
$J_5$	0,25	0,010	1,45	0,010	0,27

Tabela 6.4. Prosečne vrednosti kontinualnosti pukotina familija J<sub>1</sub>-J<sub>5</sub>

Familija pukotina	Po padu planare (m)	Po pružanju (m)	Maksimalna dužina tetive (m)	Površina zatvorene anvelope (m <sup>2</sup> )
J <sub>1</sub>	0,39	0,40	0,53	0,31
J <sub>2</sub>	0,30	0,40	0,46	0,10
J <sub>3</sub>	0,36	0,31	0,43	0,09
J <sub>4</sub>	0,28	0,29	0,37	0,05
J <sub>5</sub>	0,31	0,33	0,41	0,07

RQD je moguće odrediti i na osnovu srednjih vrednosti normalnih rastojanja unutar jedne familije, određenih automatski pomoću softvera DSE. Postupak je zasnovan na jednačinama (13) i (14) i identičan je onom već sprovedenom za terenski merena rastojanja:

$$Jv = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} = \frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,17} + \frac{1}{0,15} + \frac{1}{0,44} + \frac{1}{0,25} = 26$$

$$RQD = 110 - 2,5Jv = 110 - 2,5 \cdot 26 = 110 - 65 = 45$$

RQD dobijen iz terenski merenih rastojanja između pukotina iznosi 39, što je solidno poklapanje sa gore navedenom vrednošću od 45.



## 7. ODABIR MC PARAMETARA STENSKE MASE

Proračun kohezije  $c$  i ugla smičuće otpornosti  $\varphi$  stenske mase, preko GSI klasifikacije i HB kriterijuma loma, vršen je po jednačinama (23) i (24). Proračun je izvršen pomoću softverskog alata RSDData, paketa Rocscience. Odabir parametara je izvršen za oštećenu i neoštećenu stensku masu, za vrednosti faktora oštećenja  $D$  koje iznose 0,7 i 0, respektivno. Vrednosti ostalih ulaznih podataka su:

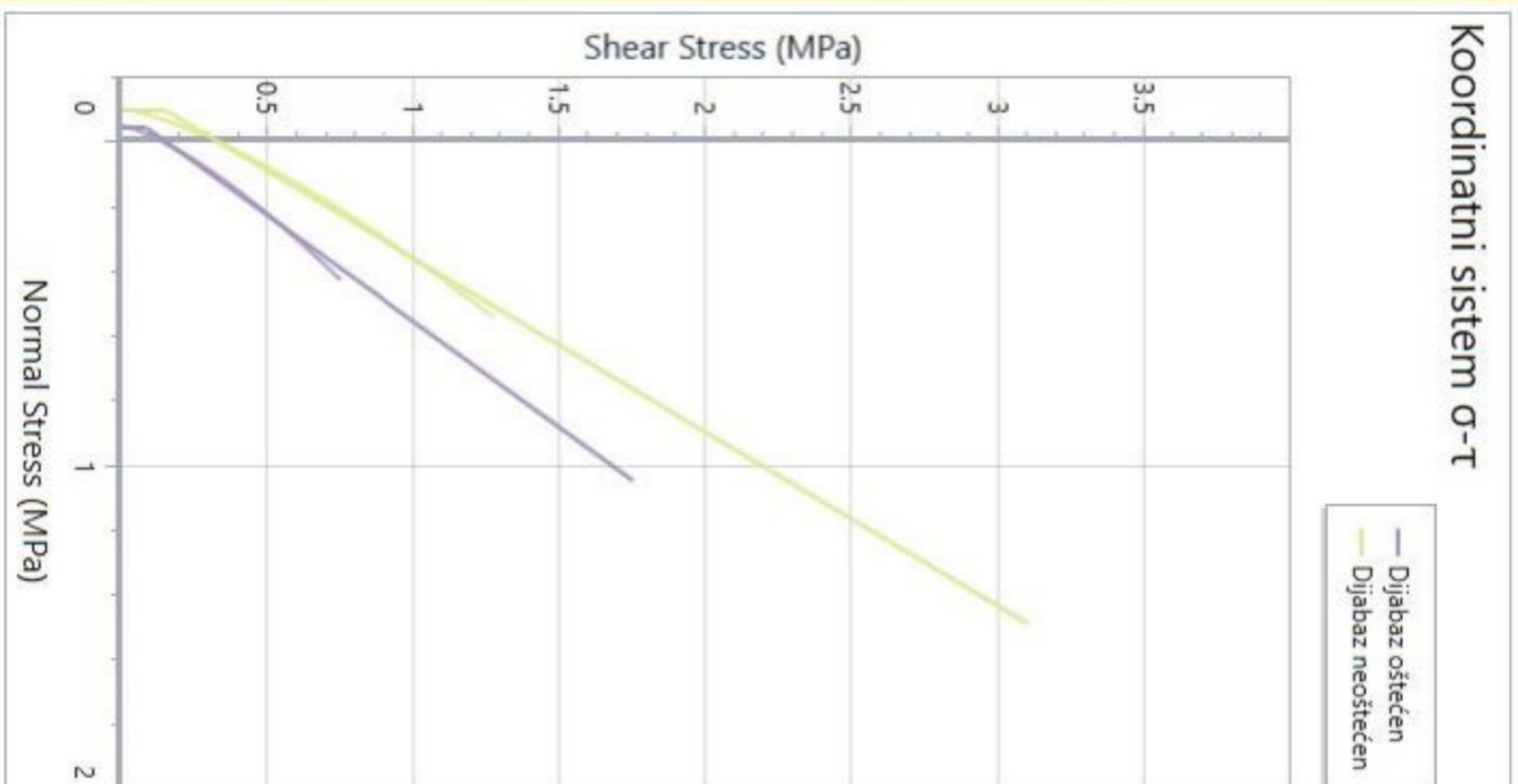
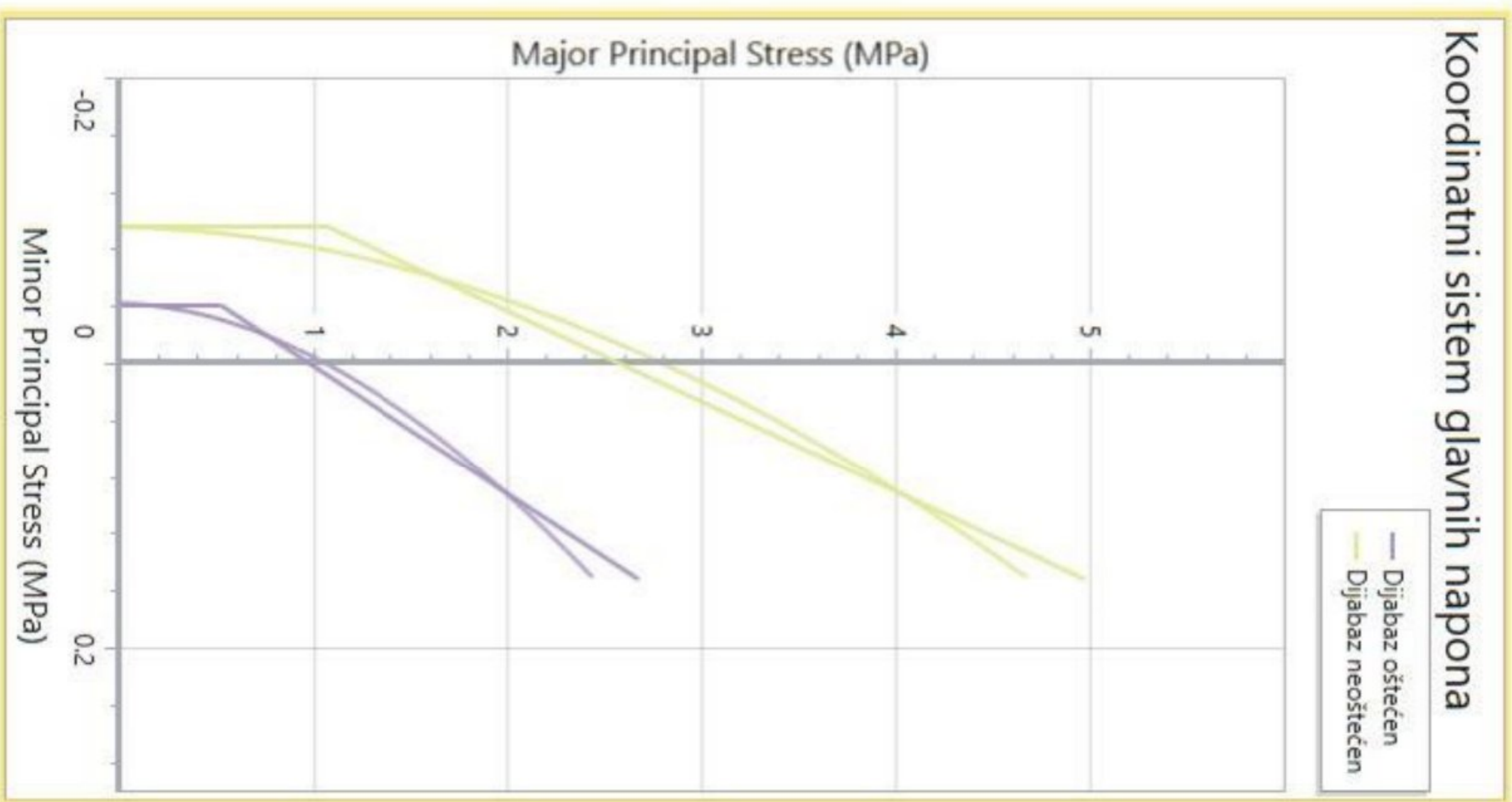
- Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak intaktne stene  $\sigma_{ci} = 70$  MPa
- Geološki indeks čvrstoće  $GSI = 43$
- Materijalni parametar intaktne stene  $m_i = 10$ . Za dijabaz, vrednost ovog parametra varira u rasponu  $15 \pm 5$  (videti tabelu 3.1.). Odabrana je najniža vrednost,  $m_i = 10$ , s obzirom na intenzivnu izmenjenost čitave stenske mase.
- Visina kosine, od koje zavise gornja granična vrednost svestranog pritiska  $\sigma_{3max}$  i njena normalizovana vrednost  $\sigma_{3n}$ , koje figurišu u jednačinama (23) i (24). Visina kosine je procenjena na 5 m, što predstavlja prosečnu dubinu do potencijalnih kliznih površi na kosini.

Nelinearne HB anvelope loma za oštećen dijabaz, u poljima normalnih i smičućih i glavnih napona, prikazane su na slici 7.1. Takođe su plotovane i linearne MC anvelope loma za odgovarajući nivo napona. Za prethodno pomenute vrednosti parametara  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $GSI$  i  $D$ , dobijene su vrednosti ugla smičuće otpornosti  $\varphi^{eq} = 56^\circ$ , kohezije  $c^{eq} = 0,146$  MPa i jednoaksijalne čvrstoće na pritisak stenske mase  $\sigma_c = 1,042$  MPa. Za neoštećen dijabaz (slika 7.2.) dobijene su vrednosti:  $\varphi^{eq} = 61^\circ$ ,  $c^{eq} = 0,324$  MPa i  $\sigma_c = 2,782$  MPa. Očigledan je veliki uticaj faktora oštećenja  $D$  na redukciju fizičko-mehaničkih karakteristika stenske mase, pre svega kohezije i jednoaksijalne čvrstoće na pritisak stenske mase.

Proračun MC parametara (odnosno „frikcione“ i „kohezivne“ komponente stenske mase) prema Q klasifikaciji izvršen je po jednačinama (31) i (32). Pritom, korišćeni su ulazni podaci iz Q, a ne Q-slope klasifikacije, kako bi se očuvala istovetnost sa originalnim formulacijama. Usvojeni parametri Q klasifikacije su navedeni u potpoglavlju 6.1.2.

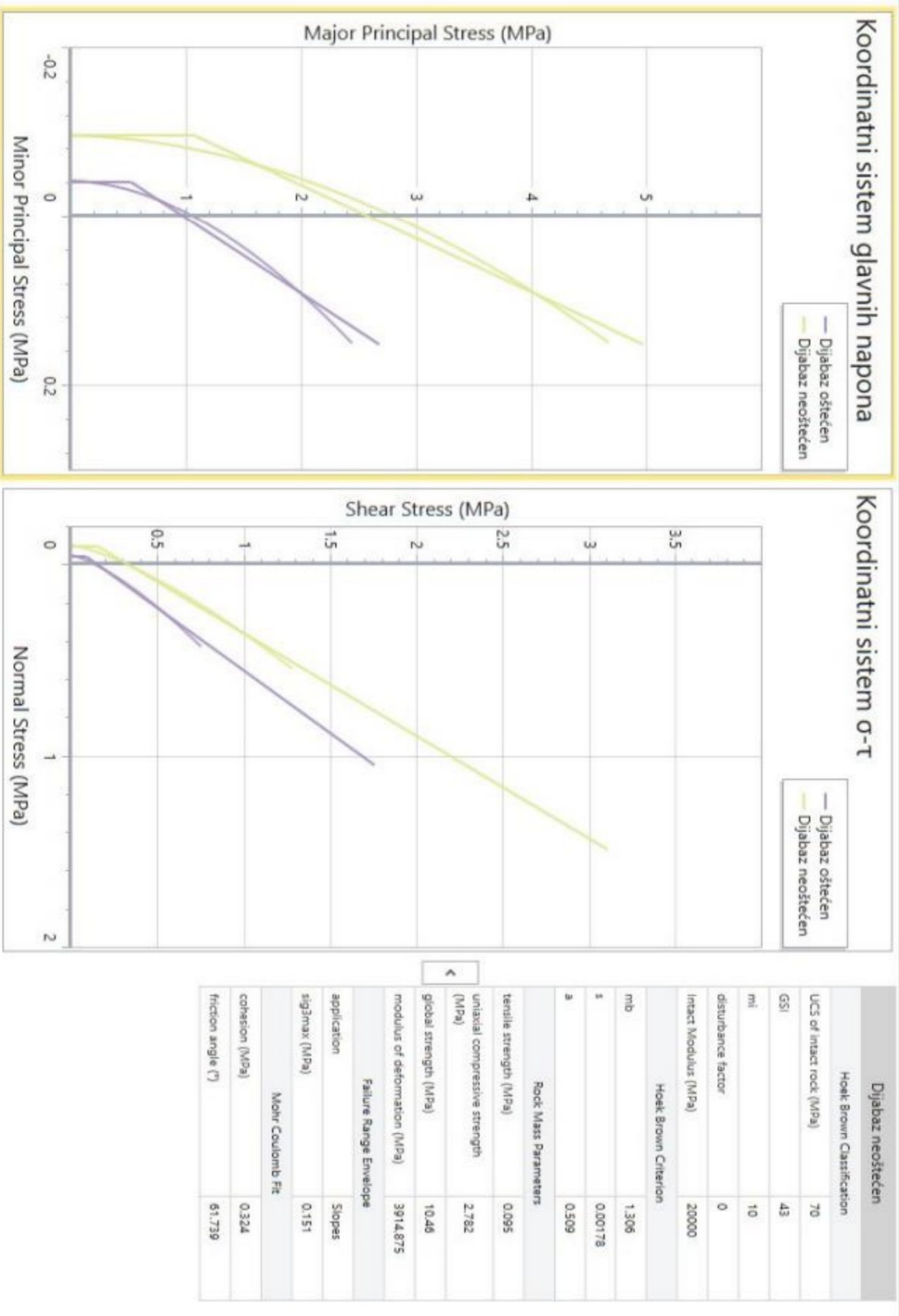
$$FC = \varphi = \arctg \left( \frac{J_r}{J_a} \times J_w \right) = \arctg \left( \frac{2}{2} \times 1 \right) = \arctg (1) = 45^\circ$$

$$CC = c = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100} = \frac{39}{12} \times \frac{1}{2,5} \times \frac{70}{100} = 0,91 \text{ MPa}$$



Dijabaz oštećen	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	70
GSI	43
$m_i$	10
disturbance factor	0.7
Intact Modulus (MPa)	20000
Hoek Brown Criterion	
$m_b$	0.436
$s$	0.000258
$a$	0.509
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.041
uniaxial compressive strength (MPa)	1.042
global strength (MPa)	5.92
modulus of deformation (MPa)	1386.156
Failure Range Envelope	
application	Slopes
$\text{sig3max}$ (MPa)	0.127
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.146
friction angle ( $^\circ$ )	56.705

Slika 7.1. Proračun MC parametara za oštećen dijabaz ( $D = 0,7$ )



Slika 7.2. Proračun MC parametara za neoštećen dijabaz ( $D = 0$ )

Pristup Q klasifikacije daje nešto niže vrednosti ugla smičuće otpornosti od GSI pristupa ( $45^\circ$  naspram  $56^\circ$ , za oštećenu, i  $61^\circ$  za neoštećenu stensku masu). S druge strane, daje znatno veću vrednost kohezije (0,91 MPa naspram 0,146 MPa i 0,324 MPa). Navedeno ukazuje na veoma loše poklapanje rezultata posmatranih pristupa. Treba imati na umu da MC parametri dobijeni na dva posmatrana načina ne zavise od istih ulaznih parametara. Kod GSI pristupa,  $\varphi^{eq}$  i  $c^{eq}$  zavise od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak intaktne stene, materijalnog parametra intaktne stene  $m_i$ , stepena ispucalosti i stanja pukotinskih površi (izraženih preko GSI vrednosti), naponskog stanja na kosini (izraženog preko visine kosine, odnosno parametara  $\sigma_{3max}$  i  $\sigma_{3n}$ ) i oštećenosti usled iskopa (faktor oštećenja  $D$ ). Q pristup kao ulazne podatke koristi: jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak intaktne stene; stepen ispucalosti i stanje pukotinskih površi (izraženi preko kombinacije parametara  $RQD/Jn$  i  $Jr/Ja$ ); uticaj vode (izražen faktorom  $Jw$ , koji u ovom konkretnom slučaju nema uticaja); naponsko stanje stenske mase (izraženo faktorom redukcije napona  $SRF$ ). Oštećenje stenske mase usled iskopa nema uticaj kod Q pristupa, međutim ono može biti uzeto u obzir korišćenjem parametra  $SRFslope$  koji obuhvata između ostalog i efekte miniranja. Zanimljivo je da ugao smičuće otpornosti po GSI pristupu zavisi od svih gorepomenutih parametara (izuzev čvrstoće na pritisak intaktne stene) dok po Q pristupu on zavisi samo od stanja pukotinskih površi, a ne i od nivoa normalnog napona, što ne odgovara realnosti. Takođe, frikciona komponenta FC uopšte ne zavisi od kohezivne komponente CC, odnosno promenom CC ne menja se FC. Ovo je u skladu sa prethodno iznetim Bartonovim mišljenjem da se kohezivna i frikciona komponenta angažuju potpuno odvojeno, za različite nivoje deformacija.

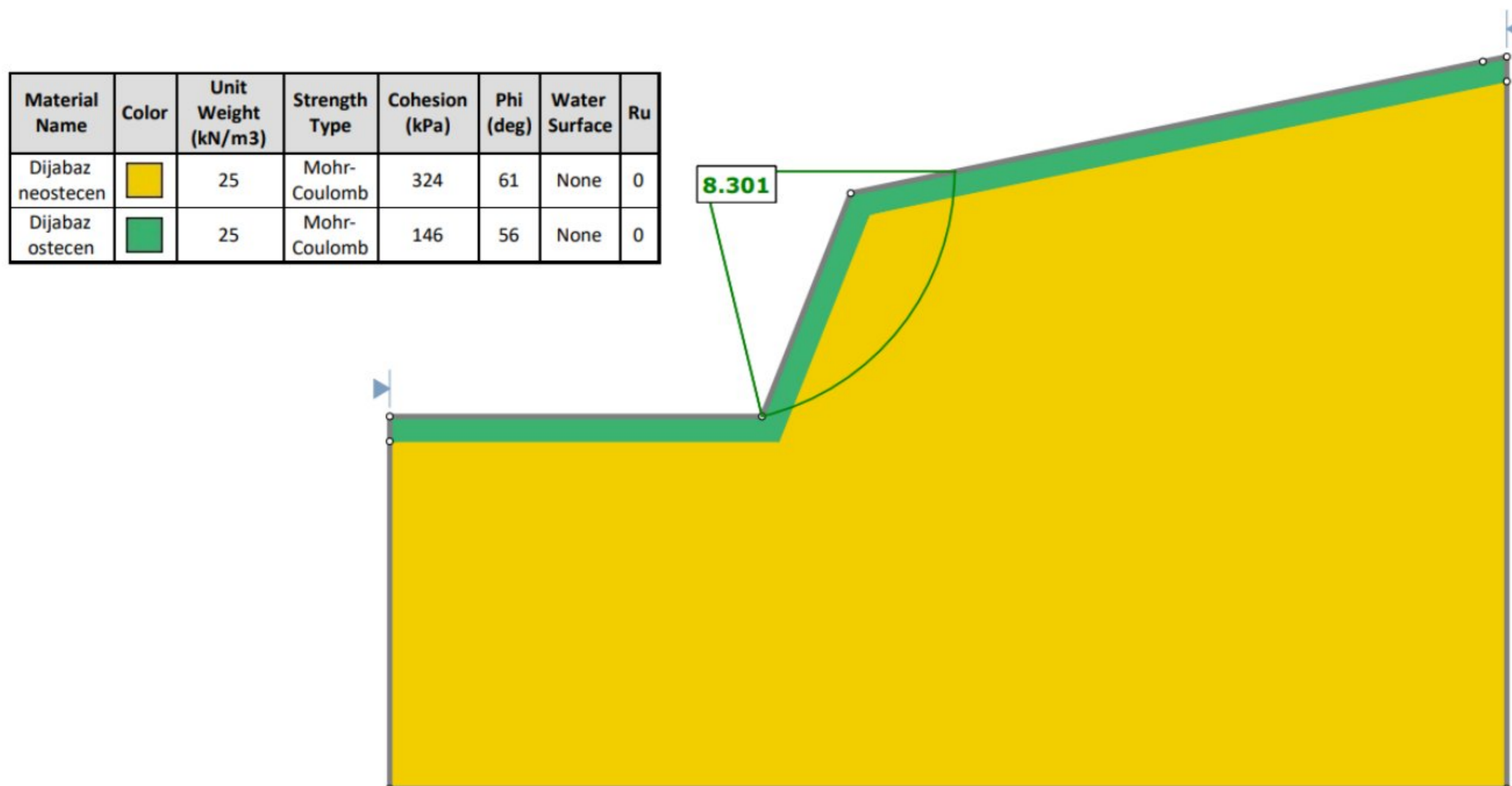
Ono što posebno treba naglasiti je uticaj naponskog stanja na veličine parametara. Na strani 40 je pokazano da sa porastom gornje granične vrednosti svestranog pritiska  $\sigma_{3max}$  (koja je proporcionalna težini nadsloja, odnosno dubini tunela/visini kosine) ugao smičuće otpornosti opada a kohezija raste. Tako na primer, brza analiza u programu RSDData pokazuje da se za istu stensku masu ( $\sigma_{ci} = 70$  MPa,  $m_i = 10$ ,  $GSI = 43$  i  $D = 0$ ) u tunelu na dubini od 200 m, dobijaju parametri ekvivalentni onima iz Q pristupa:  $c = 0,9$  MPa i  $\varphi = 45^\circ$ . S druge strane, Q pristup ne omogućava takvu fleksibilnost pri radu sa vrednostima napona, s obzirom da  $SRF$  faktor koji u obzir uzima naponsko stanje ima diskretne vrednosti u veoma ograničenom rasponu (tabela 4.6.). U tunelu na dubini 200 m, u domenu visokog napona, vrednost faktora  $SRF$  varira u granicama 0,5-2,0, što je manje od vrednosti  $SRF = 2,5$ , za stensku masu na površini. Ovo ukazuje na višu koheziju, međutim teško je precizno proceniti parametar  $SRF$ . U rasponu 0,5-2,0 on može dati i do 4 puta različite vrednosti za koheziju koristeću jednačinu (32). Još jedan interesantan podatak je da parametar  $SRFslope$  iz Q-slope klasifikacije raste sa porastom težine

nadsloja (visine kosine), samim tim smanjujući koheziju. Navedeno ukazuje na nedovoljan tretman naponskog stanja kod Q pristupa i slabu podobnost jednačina (31) i (32) za korišćenje na kosinama.

U nastavku će biti prikazana globalna analiza stabilnosti posmatrane kosine korišćenjem dva seta parametara dobijenih različitim načinima. Analiza je izvršena pomoću softverskog alata Slide, paketa Rocscience, na preseku 1 (videti sliku 6.15.) koji se nalazi u kvazihomogenoj zoni I, gde je vršen odabir parametara.

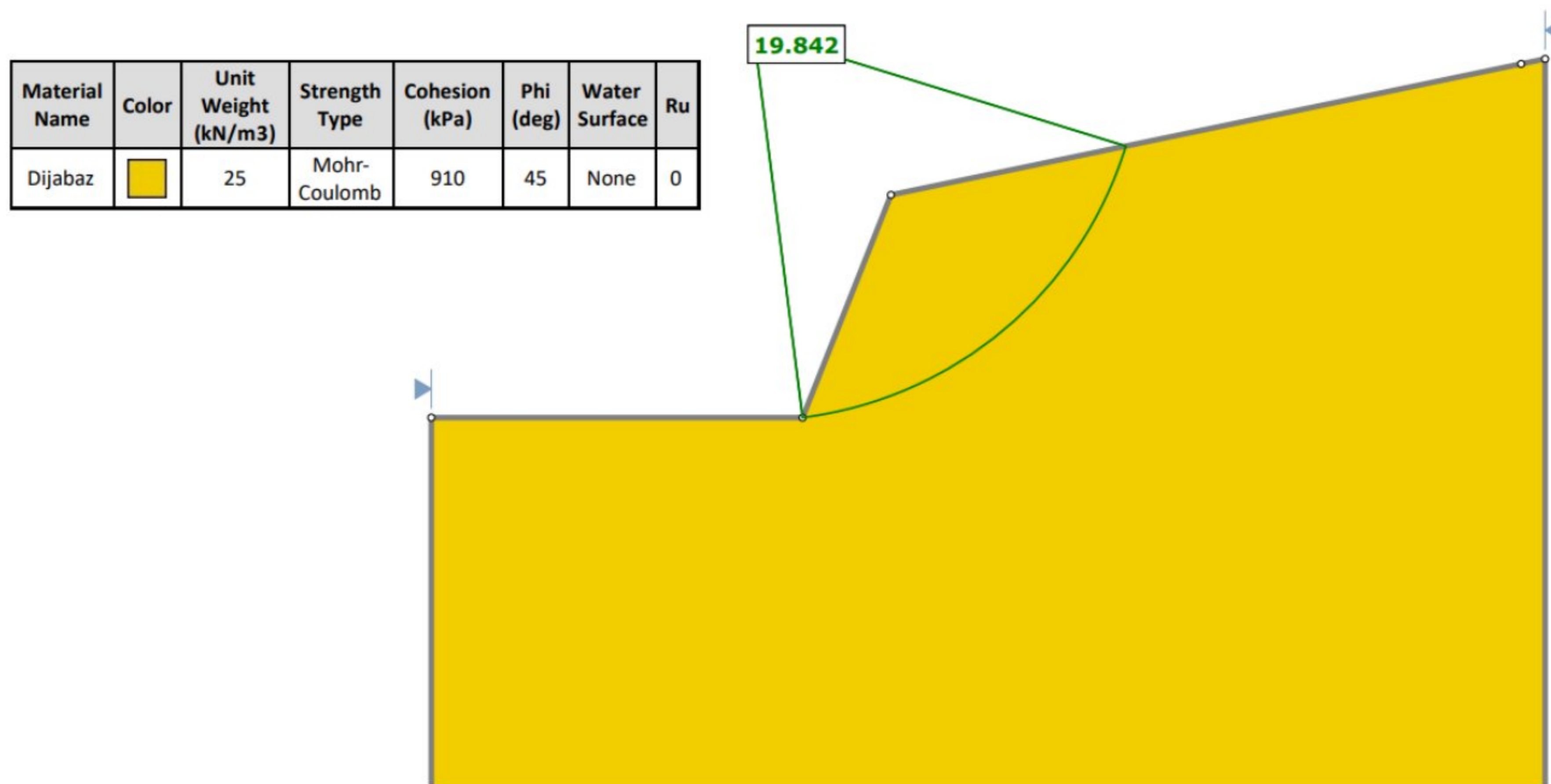
Tom prilikom, odabrana je uprošćena Bišopova metoda granične ravnoteže. Ona je pogodna za analizu kružne klizne površine s obzirom da zadovoljava uslove ravnoteže momenata. Pretpostavljena je kružna klizna površina, što je razumljivo imajući u vidu da je stenska masa homogena i izotropna. Potencijalna klizna tela su podeljena na 50 lamela. Korišćen je Auto Refine Search postupak nalaska centra rotacije kliznih tela. Na kosini nema podzemne vode. Visina kosine na preseku 1 je 9 m, a ugao nagiba  $68^\circ$ . Nagib šumovitog terena iznad kosine iznosi  $12^\circ$ .

Globalna analiza stabilnosti kosine izvršena sa parametrima dobijenim preko GSI klasifikacije prikazana je na slici 7.3. Tom prilikom, usvojena je vrednost faktora oštećenja  $D = 0,7$  na dubini od 1 m u stenskoj masi. Dobijena je visoka vrednost faktora sigurnosti za kosinu,  $F_{smin} = 8,30$ , koja ukazuje na to da nema opasnosti od pojave opšteg loma stenske mase. Nisu prikazane sve klizne površi s obzirom da imaju visoke vrednosti  $F_s$ .



Slika 7.3. Globalna analiza stabilnosti kosine (koristeći MC parametre dobijene iz GSI klasifikacije) na preseku 1

Na slici 7.4. prikazana je globalna analiza stabilnosti kosine na preseku 1, uz korišćenje MC parametara dobijenih iz Q klasifikacije. Upadljivo je odsustvo zone oštećenja stenske mase. Dobijeni minimalni faktor sigurnosti  $F_{smin} = 19,84$  je više nego dvostruko veći od onog dobijenog putem parametara iz GSI klasifikacije, što se može objasniti značajno većom vrednošću kohezije (0,91 MPa naspram 0,324 MPa i 0,146 MPa).



Slika 7.4. Globalna analiza stabilnosti kosine (koristeći MC parametre dobijene iz Q klasifikacije) na preseku 1

## 8. ZAKLJUČAK

Zastupljeno je mišljenje - ispravno – da su stenske mase najkompleksniji inženjerski materijal sa kojim čovek ima posla. Izbor između pristupa kontinuuma i diskontinuuma, kao i metode odabira parametara čvrstoće smicanja u slučaju pristupa ekvivalentnog kontinuuma nije lak i zavisi od mnogih faktora, od kojih neki nisu geotehničke prirode (raspoloživo vreme za vršenje analize, raspoloživa finansijska sredstva i softverski alati i dr.). S druge strane, naši inženjerski izbori su mnogo važniji od onoga što većina ljudi misli, a problemima odabira parametara diskutovanih u ovom radu treba prići na veoma obazriv, detaljan i sveobuhvatan način. Iz tog razloga je i napisan ovaj rad, kao pokušaj da se proverí pristup procene frikcione i kohezivne komponente iz Q klasifikacije, jedan relativno nov i, na teritoriji Srbije, do sada retko upražnjavan postupak u odabiru MC parametara čvrstoće smicanja.

Kao osnovne prednosti ovog postupka navedene su njegova jednostavnost, mogućnost upotrebe direktno na terenu, bez programa, fundamentalni značaj relacija iz koje se dobijaju parametri čvrstoće, kao i njihovo realno fizičko značenje. Detaljno je obrađen i pristup pomoću GSI klasifikacije i pratećeg HB kriterijuma loma, koji je u praksi dominantan i čija je glavna prednost uzimanje u obzir širokog raspona parametara, počev od karakteristika intaktnih stena, preko stanja stenskih masa u sklopu terena i njihove oštećenosti usled iskopa, do nivoa napona za koji se vrši odabir parametara čvrstoće. Takođe, HB pristup je nastao na osnovu eksperimentalnih ispitivanja, dok su relacije za izračunavanje FC (31) i CC (32) direktna posledica klasifikacije.

Kako se oba načina koriste za isti tip stenske mase, koja se može predstaviti ekvivalentnim kontinuumom, ostaje da se na konkretnom primeru stenske mase odrede MC parametri koristeći dva analizirana pristupa, i na taj način uporede. Najvažniji zaključci koji mogu da se izvuku iz izvedene uporedne analize su: Q pristup daje nešto nižu vrednost ugla smičuće otpornosti  $\varphi$ , ali značajno višu vrednost kohezije  $c$ , što uzrokuje i višu vrednost faktora sigurnosti kosine. Samim tim, GSI pristup je konzervativniji. Pored razlika između dva pristupa navedenih u prethodnom pasusu, uputno je navesti i one manje očigledne, do kojih se došlo tokom izrade master rada. Ulazni podaci koji figurišu u Q klasifikaciji i jednačinama za procenu FC (31) i CC (32) imaju diskretne vrednosti, relativno su jasno definisani i laki za određivanje, što eliminiše nedoumice prilikom njihovog odabira. Jedini parametar čija varijacija može biti znatna je jednoaksijalna čvrstoća na pritisak intaktne stene  $\sigma_{ci}$ , što je uzrokovano relativnom nepouzdanošću korišćenih metoda (Šmitov čekić i Point Load Test-PLT). Ovo se može prevazići izvođenjem standardnog opita jednoaksijalne čvrstoće na cilindričnim, obrađenim

uzorcima. S druge strane, parametar koji figurišu u GSI klasifikaciji i HB kriterijumu loma - faktor oštećenja  $D$  može biti težak i nepouzdan za procenu, dok je krajnji rezultat senzitivn na njegovu promenu (primer je razlika u vrednostima  $c$  i  $\varphi$  za različite vrednosti  $D$ , prikazano na slikama 7.1. i 7.2.). Ovo je detaljnije obrađeno na kraju potpoglavlja 3.3. Može se zaključiti da su osnovne prednosti Q postupka jednostavnost i jednoznačna određenost ulaznih parametara, dok je njegova velika mana nedovoljno poklanjanje pažnje uticaju veličine napona na vrednosti parametara čvrstoće i slaba podobnost za upotrebu na kosinama. Prednost GSI pristupa je uzimanje u obzir velikog broja faktora i raspona vrednosti u kojima se oni mogu naći, zasnovanost pristupa na eksperimentalnim podacima, odgovarajući tretman uticaja naponskog stanja i mogućnost primene kod raznih objekata u stenskim masama: kosina, tunela i temelja. Najveća mana je nepouzdanost procene faktora oštećenja  $D$  i njegov značajan uticaj na konačne vrednosti MC parametara.

Iako je dobijena vrednost kohezije  $c = 0,91$  MPa veoma velika i teško se može pripisati stenskoj masi na posmatranoj kosini, za detaljniju studiju upoređivanja dve metode i dobijanje merodavnijih rezultata, bilo bi neophodno izvesti brojne uporedne analize na kosinama izvedenim različitim metodama, različitim visinama, u stenskim masama raznog kvaliteta. Do tada, ostaje da u praksi ne zanemarujemo Q pristup i koristimo isključivo GSI, ako ni zbog čega drugog a onda zbog svoje jednostavnosti i lakoće primene.

**Mesto i datum završetka rada**

Beograd, 5.7.2023.

**Svojeručni potpis studenta**

\_\_\_\_\_



## LITERATURA

Balmer, G. (1952) A general analytical solution for Mohr's envelope. *Am Soc Test Mat* 52:1260–1271

Barton N, Lien R, Lunde J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech* 6:189–236

Barton N. (1987) Rock mass classification, tunnel reinforcement selection using the Q-system. *Proceedings of the ASTM Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. Cincinnati, Ohio.

Barton N. (1995) The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *Keynote Lecture, 8th Congress of ISRM, Tokyo, vol. 3*. Rotterdam: Balkema.

Barton, N. (2002) Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 39/2:185-216.

Barton N, Pandey SK. (2011) Numerical modelling of two stoping methods in two Indian mines using degradation of  $c$  and mobilization of  $\phi$  based on Q-parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*;48(7), 1095–1012

Barton, N.R. (2013) Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: problems and some solutions. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 5 (4), 249e 261

Barton, N. (2014) Lessons learned using empirical methods applied in mining. *Keynote lecture. 1st. Int. Conf. on Applied Empirical Methods in Mining*. Lima, Peru, 24p.

Barton, N.R. (2015) *Forty Years with the Q-system – Lessons and Developments*. NB&A, Oslo, Norway

Barton, N.R., Quadros, E. (2015) Anisotropy is everywhere, to see, to measure, and to model. *Rock Mech. Rock Eng.* 48 (4), 1323e1339

Barton, N.R., Bar, N. (2015) Introducing the Q-Slope Method and its Intended Use within Civil and Mining Engineering Projects. *Geomechanics Colloquium*, pp. 157e162

Bar N, Barton N (2017) The Q-slope Method for Rock Slope Engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering*, December 2017, Volume 50, Issue 12, Springer-Verlag: 3307-3322

Barton, N.R. (2021) Continuum or discontinuum GSI or JRC. Geotechnical Challenges in Mining, Tunnelling and Underground Structures (ICGCMTU2021) Malaysia. Invited keynote lecture.

Barton N et al. (2023) Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.0>

Berisavljević, Z. (2015) Definisavanje parametara čvrstoće na smicanje kod izvođenja kosina u ispucalom stenskom masivu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Berisavljević, Z., Berisavljević D., Marjanović M. (2021) Stabilnost kosina u stenskoj masi, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons, New York, 251 p

Broch, E. and Franklin, J.A. (1972) The Point-Load Strength Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 669-697

Brown E.T. (2008) Estimating the mechanical properties of rock masses. In: Potvin Y et al (eds) Proceedings of the 1st Southern Hemisphere international rock mechanics symposium. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp 3–2

Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y., Minami M. (2004) Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system. Int J Rock Mech Min Sci 41:3–19

Deere, D.U. (1963): Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie 1: 16-22

Deere, D.U., Miller, R.P. (1966) Engineering classification and index properties of rock. Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory

Dimitrijević, M., Dimitrijević M. (1989) Depozicioni sistemi klastita, Jugoslavenski komitet svjetskih kongresa za naftu; časopis "Nafta" Zagreb; institut za geološka istraživanja, OOUR za geologiju Zagreb, Zagreb

Einstein, H., Steiner, W., Baecher, G.B. (1979) Assessment of empirical design methods for tunnels in rock. RETC 1979, 683–705

Griffith A.A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos Trans R Soc Lond (ser a)* 221:163–198

Griffith A.A. (1924) Theory of rupture. In: *Proceedings of the 1st international congress on applied mechanics*. Delft, Netherlands, pp 55–63

Grimstad, E., Barton, N. (1993) Updating the Q-System for NMT. *Proc. int. symp. on sprayed concrete-modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*, Fagernes. 46-66. Oslo: Norwegian Concrete Assn

Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. and Kaynia, A. (2002) Rock Mass Quality Q Used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption. *Proceedings of International Symposium on Sprayed Concrete*, Davos, 22-26 September 2002, 134-142.

Hoek, E., Franklin, J.A. (1968). A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock. *Trans. Instn Min. Metall.* 77, A22- 26

Hoek E., Brown E.T. (1980a) *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London

Hoek E, Brown E.T. (1980b) Empirical strength criterion for rock masses. *J Geotech Eng Div, ASCE* 106:1013–1035

Hoek E. (1983) Strength of jointed rock masses. *Geotech* 23:187–223

Hoek E. (1994) Strength of rock and rock masses. *ISRM News J* 2:4–16

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995) *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam

Hoek, E., Brown, E.T. (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int J Rock Mech Min Sci*, 34(8):1165–1186

Hoek, E. (1998) Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *Int J Rock Mech Min Sci* 35:63–68

Hoek, E., Read, J., Karzulovic, A., Chen, Z.Y. (2000) Rock slopes in civil and mining engineering. Published in *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng2000*, Melbourne

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002) Hoek-Brown criterion-2002 edition. In: Proceedings of the NARMS-TAC conference, Toronto, vol 1, 267–273

Hoek E, Diederichs M.S. (2006) Empirical estimation of rock mass modulus. *Int J Rock Mech Min Sci* 43:203–215

Hoek E. (2012) Blast damage factor D. <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/winter2012/Blast-Damage-Factor-DHoek.pdf>. Accessed 15 Oct 2020

Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. (2013) Quantification of the Geological Strength Index Chart. In: Proceedings of the 47th US rock mechanics/geomechanics symposium, San Francisco, No. 672

Hoek E., Brown E.T. (2019) The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *J Rock Mech Geotech Eng* 11:445–463

Hudson, J., Harrison, J. (1997) Engineering rock mechanics: An introduction to the principles. Elsevier Science Ltd. Oxford, 444 p

Marinos, P., Hoek, E. (2000) GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, 1422-1442

Marinos, P., Hoek, E. (2001) Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull Eng Geol Environ*, 60:85–92

Marinos, V. (2010) New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses. *Bull Geol Soc Greece XLIII*, 3:1248–1258

Marinos, V. (2017) A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bull Eng Geol Environ* **78**, 899–912. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1151-z>

Mojsilović S. i dr. (1975) Tumač za list Valjevo, Savezni geološki zavod, Beograd

Morgenstern, N.R., Price, V.E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1):79–93

NGI (2015) Handbook: Using the Q-system. Rock mass classification and support design, Oslo.

Palmstrom A. (1982) The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi, p V.221 - V.228

Palmstrom A. (2005) Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunn Undergr Sp Tech* 20:326–377

Rafei Renani H., Martin C.D. (2020) Slope stability analysis using equivalent Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria. *Rock Mech Rock Eng* 53:13–21

Renani H., Cai M. (2021) Forty-Year Review of the Hoek–Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2022) 55:439–461

Stille, H., Palmstrom, A. (2003) Classification as a tool in rock engineering. *Tunnel Underground Space Technol*, 18:331–345

Tsiambaos, G., Saroglou, H. (2010). Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI). *Bull Eng Geol Environ*, 69(1):13-274

United States Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>

Yang, B., Elmo, D. (2022) Why Engineers Should Not Attempt to Quantify GSI. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110417>

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Војислав Ђорђевић

Број индекса Г618/22

### И з ј а в љ у ј е м

да је завршни рад под насловом

Упоредна анализа Q и GSI класификације за дефинисање параметара  
смичуће чврстоће стенске масе

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 4.7.2023.

**Потпис студента**

**ИЗЈАВА**  
**О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ**  
**ЗАВРШНОГ РАДА**

Име (име родитеља) и презиме студента Војислав (Сава) Ђорђевић

Број индекса Г618/22

Студијски програм Геотехника

Наслов рада Упоредна анализа Q и GSI класификације за дефинисање параметара смичуће чврстоће стенске масе

Ментор Зоран Берисављевић, доц. др

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

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

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 4.7.2023.

**Потпис студента**

\_\_\_\_\_

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

---

Упоредна анализа Q и GSI класификације за дефинисање параметара  
смичуће чврстоће стенске масе

---

који је моје ауторско дело.

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

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је *(заокружити једну од две опције)*:

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

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

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

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

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

*(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)*

У Београду, 4.7.2023.

**Потпис ментора**

**Потпис студента**

---

---



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
  2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
  3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
  4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
  5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
  6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-