

Primena Barton-Bandisovog kriterijuma loma kod proračuna nestabilnih klinova oko konture podzemnog objekta

Stefan Jovanović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Primena Barton-Bandisovog kriterijuma loma kod proračuna nestabilnih klinova oko konture podzemnog objekta | Stefan Jovanović | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006487>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET
Departman za geotehniku



Završni rad
Master akademske studije

**Primena Barton-Bandisovog kriterijuma
loma kod proračuna nestabilnih klinova oko
konture podzemnog objekta**

Student:
Stefan Jovanović g633/19

Mentor:
doc. dr Zoran Berisavljević

Beograd, septembar 2022.

Komisija:

1. doc. dr Zoran Berisavljević, mentor

Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

2. van. prof. dr Miloš Marjanović, član

Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

3. doc. dr Dušan Berisavljević, član

Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane : _____

REZIME

Barton-Bandis-ov kriterijum loma predstavlja postupak kojim se omogućava procena smičuće čvrstoće na pukotinama stenskih masa. U radu je prezentovana praktična primena Barton-Bandisovog kriterijuma loma pri proračunu nestabilnih klinova oko konture podzemnog objekta. Pored toga, obrađena je teorijska osnova kriterijuma i različite metode pomoću kojih se mogu odrediti hrapavost površine pukotine (JRC), čvrstoća na pritisak površi pukotine (JCS), i trenje po površini diskontinuiteta (φ_r - rezidualni ugao trenja) koji čine tri ulazna parametra. Ova tri parametra čine osnovu nelinearne jednačine logaritamskog tipa vršne čvrstoće Bartona (1973) i Barton i Choubey (1977). Šmitov čekić je instrument na osnovu koga se može proceniti jednoaksijalna čvrstoća na pritisak zidova diskontinuiteta. Metode koje se najčešće koriste u praksi pri određivanju indeksa hrapavosti su Bartonov češalj, različite laserske i fotogrametrijske metode. Bazni ugao trenja (φ_b) je parametar koji se određuje pomoću opita naginganja (tilt test) ili opitom direktnog smicanja za različite nivoe normalnog napona.

Za potrebe izrade rada korišćeni su realni parametri dobijeni tokom izvođenja niskopa do rudnog tela Čukaru Peki u blizini Bora. U okviru niskopa izvođene su dve paralelne cevi na osovinskom rastojanju od 30 m, pojedinačne dužine oko 3 km. Poprečni presek površine cevi iznosi približno 30 m² i izvođen je u obliku potkovice. Niskop u najvećem delu prolazi kroz borske klastite, odnosno slojevite konglomerate i peščare. Na poslednjih nekoliko stotina metara zastupljeni su tankoslojeviti do slojeviti laporci, i na samom kraju niskopa epiklastiti. Zbog pojava nestabilnosti u vidu ispadanja klinova tokom izvođenja niskopa vršena je provera i redefinisane parametara stenske mase u cilju određivanja adekvatnije podgrade u niskopu. Terenska istraživanja su obuhvatala merenja hrapavosti diskontinuiteta pomoću Bartonovog češlja (JRC), čvrstoće zidova pukotina pomoću Šmitovog čekića (JCS), dok je bazni ugao trenja određen opitom naginganja. Preporučeni parametri pukotina u veoma ispucalim konglomeratima i šejlovima gde je dolazilo do pojava nestabilnosti, iznosili su JRC=6; JCS=22 MPa; $\varphi_r=28^\circ$. Prilikom kartiranja tunelskog iskopa beleženi su elementi pada diskontinuiteta koji su iskorišćeni prilikom analize stabilnosti klinova. Kako bi se utvrdila mogućnost da dođe do ispadanja klinova stenske mase oko konture iskopa primenjena je "teorija bloka" (Goodman i Shi, 1985) koja je primenljiva u tvrdim, blokovski izdijeljenim stenskim masama, kod kojih se usled nepovoljne orijentacije diskontinuiteta javljaju kinematski uslovi za kretanje blokova. U analizi je korišćen programski paket UnWedge (RocScience, inc.). Analiza stabilnosti se ne vrši samo da bi se dobio faktor sigurnosti za poznate parametre, već i radi određivanja parametara čvrstoće pri lomu ukoliko je došlo do pojave nestabilnosti.

Povratnom analizom pomoću primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma izvršena je provera terenski dobijenih podataka na mestima gde se dogodilo ispadanje klinova. Traženi su parametri koji odgovaraju ovoj realno konstatovanoj situaciji ako je poznato da je pri lomu $Fos \leq 1$. Adekvatnost preporučenih parametara proverena je dobijenim vrednostima faktora sigurnosti od 0.996 i 0.808 za date ulazne parametre što odgovara konstatovanom stanju na terenu.

Ključne reči: Barton-Bandisov kriterijum, nestabilni klinovi, UnWedge, parametri pukotina, niskop Čukaru Peki

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Potreba za definisanjem kriterijuma	2
2.1 Izvođenje empirijske jednačine	3
3. JCS - čvrstoća na pritisak zidova pukotina	4
3.1 Šmitov čekić	5
3.1.1 Princip rada	6
3.1.2 Tipovi čekića	6
3.1.3 Uslovi ispitivanja	7
3.1.4 Uticajni faktori	8
3.1.5 Terensko i laboratorijsko ispitivanje	9
3.1.6 Rezultati merenja	10
4. JRC - Koeficijent hrapavosti pukotina	12
4.1 Pukotine velikih razmera – metoda linearnog profila	13
4.2 Određivanje hrapavosti u tri dimenzije	13
4.3 Merenje hrapavosti upotrebom Bartonovog češlja	14
4.4 Profili hrapavosti	15
4.5 Opisni pojmovi pukotina	16
4.6 Određivanje hrapavosti laserskim i fotogrametrijskim metodama	17
4.8 Određivanje JRC vrednosti korišćenjem statističkih parametara	19
5. Bazni i rezidualni ugao trenja	20
5.1 Rezidualni ugao trenja	22
5.2 Određivanje baznog ugla trenja opitom naginjanja	23
5.2.1 Aparatura za opit	23
5.2.2 Dodatni uređaji	23
5.2.3 Oblik i veličina uzoraka	24
5.2.4 Priprema uzoraka	24
5.2.5 Postupak ispitivanja	24
5.2.6 Proračun dobijenih vrednosti	25
5.2.7 Prikazivanje rezultata	25
5.3 Procena koeficijenta JRC-a na osnovu tilt testa	26
6. Uticaj efekta razmere	28
6.1 uticaj razmere na uzorke	28

6.2 Efekat veličine bloka na smicanje	30
7. Uticaj vode na smičuću čvrstoću diskontinuiteta	33
8. Orijentacija diskontinuiteta.....	33
8.1 Klizanje klina.....	34
9. Metodologija određivanja nestabilnih klinova	35
9.1 Teorijske osnove teorije bloka.....	35
10. Praktični primer analize stabilnosti klinova	38
10.1 Opšti podaci o niskopu	39
10.2 Izvedena istraživanja	39
10.3 Rezultati istraživanja	40
10.3.1 Zastupljene inženjerskogeološke jedinice	40
10.3.2 Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak borskih klastita	41
10.3.3 Zatezna čvrstoća (Brazilijanski opit) borskih klasita	42
10.3.4 Čvrstoća na pritisak zidova pukotina.....	43
10.3.5 Koeficijent hrapavosti pukotina.....	44
10.3.6 Bazni ugao trenja	45
10.3.7 GSI klasifikacija zastupljene stenske mase	46
10.3.8 Preporučeni proračunski parametri.....	49
10.3.9 Provera svojstava pukotina na osnovu povratne analize	49
11. Zaključak	53
12. literatura.....	55

1. UVOD

Tokom izgradnje kapitalnih objekata često dolazi do nesuglasica između investitora i izvođača koje su najčešće ekonomske prirode. Različiti propusti tokom projektovanja nastali usled kratkih rokova i nedovoljne istraženosti terena uzrokuju cenu radova veću od predviđene. U takvim slučajevima angažuju se nezavisni eksperti koji na osnovu realnih pokazatelja na terenu mogu nepristrasno izneti svoje mišljenje i dati ocenu u vezi spornog predmeta.

U cilju rešavanja jednog takvog spora tokom 2019/20. godine Rudarsko-Geološki Fakultet je bio angažovan od strane izvođača radova, firme "Ostu Sttetin" kao konsultantska firma na projektu izgradnje niskopa do rudnog tela Čukaru Peki. Posao su vodili eksperti sa Rudarsko-Geološkog fakulteta, dok sam ja kao student učestvovao u svojstvu pomoćnika. Pored svakodnevnih izazova sa kojima smo se suočavali tokom vremena provedenog na projektu, događale su se određene situacije koje su od nas zahtevale brz, jasan i nedvosmislen odgovor. Jedna od takvih situacija je bila i ispadanje klinova u niskopu koji su prouzrokovali štetu i ugrozili bezbednost radnika. To je bio razlog da se postojeći parametri stenske mase provere i eventualno redefinišu u cilju određivanja adekvatnije podgrade u niskopu. U sklopu analiza koje smo sprovedeli zbog provere parametara, vršili smo i povratne analize ispalih klinova primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma. Ova problematika mi je bila izuzetno zanimljiva te sam na predlog mentora upravo to izabrao za temu master rada.

Rad je koncipiran iz dve celine. Prva celina se bavi teorijskim osnovama, parametrima i primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma, dok je u drugom delu predstavljena praktična primena kriterijuma za određivanje stabilnosti klinova oko konture niskopa.

Barton-Bandis-ov kriterijum loma predstavlja postupak kojim se omogućava procena smičuće čvrstoće na pukotinama stenskih masa. Kvantitativna karakterizacija je ključni aspekt kriterijuma kako bi se odredila tri ulazna parametra za pojedinačne pukotine i familije pukotina. Ove tri stavke odnose se na hrapavost površine pukotine (JRC - koeficijent hrapavosti pukotine), čvrstoće na pritisak površi pukotine (JCS - jednoaksijalna čvrstoća na pritisak zida pukotine), i trenje po površini diskontinuiteta (ϕ_r – rezidualni ugao trenja). Ova tri faktora imaju tipične opsege vrednosti: JRC=0-20 (glatke do veoma hrapave), JCS=10-200 MPa (veoma slabe i izmenjene do veoma čvrstih i neizmenjenih) i $\phi_r = 20^\circ$ - 35° (slabe-izmenjene do sveže-neizmenjene). Ova tri parametra čine osnovu nelinearne jednačine logaritamskog tipa vršne čvrstoće Bartona (1973) i Barton i Choubey (1977). Svaki od ovih parametara se može dobiti jednostavnim opitima koji ne iziskuju velike troškove, ili se parametri mogu iskustveno proceniti.

Posebnu zahvalnost bih izrazio profesorima Milošu Marjanoviću i Zoranu Berisavljeviću koji su mi omogućili učestvovanje na projektu čime mi je bila ukazana velika čast. Takođe se zahvaljujem i kolegi Milovanu Popoviću na pomoći pri skupljanju i analizi podataka tokom trajanja projekta. Iskustvo stečeno učestvovanjem na ovom projektu je mnogo uticalo na moje lično i profesionalno usmerenje i napredovanje.

2. POTREBA ZA DEFINISANJEM KRITERIJUMA

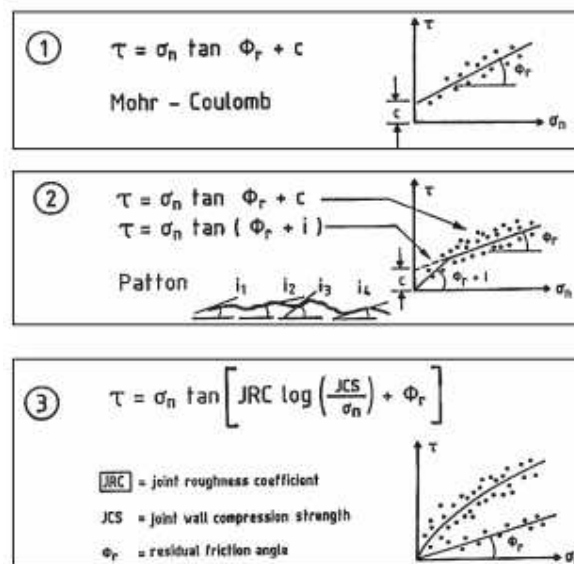
U ovom poglavlju će ukratko biti predstavljeni najbitniji razlozi zbog kojih se ovaj kriterijum razvio kao i način na koji se razvijao, dok će u narednim poglavljima biti detaljno opisan svaki parametar ovog kriterijuma.

Efektivni normalni napon je najvažniji spoljni faktor koji utiče na smičuću čvrstoću. Prilikom radova u stenama maksimum efektivnog normalnog napona kreće se u rasponu od 0.1-2.0 MPa za pukotine koje su kritične sa aspekta stabilnosti. Ovo je oko tri reda veličine niže od vrednosti koju su koristili geofizičari kada su proučavali čvrstoću smicanja u laboratorijskim uslovima za nivoe napona od 100 do 2000 MPa. Posledice toga su da literatura sadrži podatke o smičućoj čvrstoći pukotina koji obuhvata najmanje 4 reda veličina. To je bio razlog da sredinom dvadesetog veka mišljenja koja se tiču smičuće čvrstoće diskontinuiteta budu veoma različita (Barton i Choubey, 1977).

Zbog toga je bilo uobičajeno da se Coulomb-Mohr-ov kriterijum loma uklapa u rezultate ispitivanja smičuće čvrstoće pukotina:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

Prilikom korišćenja jednačine (1) za računanje čvrstoće na smicanje po hrapavom diskontinuitetu, pod velikim i malim normalnim naponom, događalo se da rezultat istraživanja geofizičara bude kohezija od nekoliko MPa i ugao trenja od 20°, dok su inženjeri dobijali vrednost ugla trenja od oko 70° i koheziju 0 pri istim uslovima. Anvelope vršne čvrstoće na smicanje za neplanarne pukotine je u stvari veoma zakrivljena za razliku od linearne Coulomb-Mohr-ove anvelope što se može videti na slici 1.



Slika 1. Razvoj anvelope nelinearnog kriterijuma smičuće čvrstoće za diskontinuitete (Barton, 2013)

Ova činjenica je bila prepoznata od (Jaeger, 1959; Krsmanović i Langof, 1964; Lane i Heck, 1964; Patton, 1966; Byerlee, 1967), kao i od velikog broja istraživača tokom šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog veka.

Međutim navike su ostale da se čvrstoća na smicanje diskontinuiteta opisuje u uslovima Culomb-Mohr-ovih konstanti c i φ . Obe su promenljive u zavisnosti od napona. Takođe su zavisne i od razmere.

Pre uvođenja zadovoljavajuće metode za opis čvrstoće stena po diskontinuitetu, bilo je potrebno ispitati empirijske odnose. Proračun stabilnosti kako u mehanici tla tako i u mehanici stena vrši se u odnosu na uobičajena naprezanja. Odnosno, određeni nivo napona jednak je sili podeljenoj sa površinom, bez obzira na atomsko, mikroskopsko ili vidljivo kontaktno područje. Pa ipak poznato je da je kontaktna površina prilikom smicanja po diskontinuitetima izuzetno mala. Prema oštećenima vidljivim na kraju opita smicanja, stvarna površina može iznositi od jedne desetine do jednog hiljaditog dela (ili manje) bruto površine. Barton (1971) i Jaeger (1971) su izvršili serije opita na smicanje stena sa vrednošću JCS-a u rasponu od oko 20-200 MPa. Dobljene vrednosti su sugerisale u kojoj meri je odnos ukupne i efektivne površine usko povezana sa vrednošću odnosa JCS i normalnog napona (σ_n). U tipičnom problemu mehanike stena sa JCS = 100 MPa i $\sigma_n = 0.1$ MPa, stvarna, normalna i smičuća naprezanja koja deluju preko hrapavog kontakta mogu biti i hiljadu puta veća od klasičnih naprezanja. Stoga nije iznenadjujuće da je za pravilno opisivanje čvrstoće na smicanje potrebno empirijsko oblikovanje, ako se koriste konvencionalni izrazi.

2.1 IZVOĐENJE EMPIRIJSKE JEDNAČINE

Empirijski odnos koji je Barton dao bio je neuobičajen po tome što se može koristiti i za ekstrapolaciju ekperimentalnih podataka i za njihovo predviđanje. Ustanovio je tri konstante tako da se pomoću njih može precizno odrediti srednja vrednost ugla smičuće čvrstoće ($\arctan \tau\text{-}\sigma_n$)°.

Izvođenje ovog empirijskog odnosa opisao je Barton (1973) na sledeći način:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (2)$$

gde je:

τ = maksimalna čvrstoća na smicanje;

σ_n = normalni napon koji deluje na zid pukotine;

JRC = koeficijent hrapavosti;

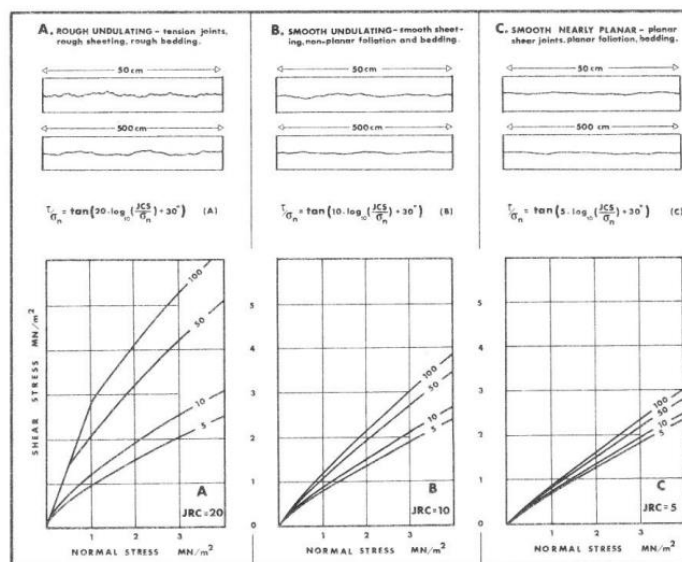
JCS = čvrstoća na pritisak zidova pukotina;

φ_b = bazni ugao trenja.

Familije anvelope vršne čvrstoće na slici 2, ilustruju praktičnu prirodu ovog empirijskog zakona. Vrednosti JRC-a od 20, 10 i 5 koriste se za ilustraciju efekta hrapavosti pukotina, dok kriva obeležena brojevima 5, 10, 50, 100 (MPa) ilustruje efekat čvrstoće na pritisak zidova pukotina (JCS). Treba napomenuti da su anvelope predviđene za najhrapavije pukotine skraćene do krive linearnog oblika. Arctang $\tau/\sigma_n = 70^\circ$ je predloženi maksimum dozvoljene čvrstoće na smicanje u svrhu projektovanja.

Na slici 2 je pretpostavljen osnovni ugao trenja od 30° . Vrednost ϕ_b za većinu glatkih, neizmenjenih površi pukotina se nalazi između 25° i 35° . Kasnije će biti pokazano da za slučaj izmenjenih pukotina rezidualni ugao trenja $\phi_r (< \phi_b)$ može biti zamenjen sa ϕ_b .

Metoda za procenu rezidualnog ugla trenja (ϕ_r) koji kasnije tokom razvijanja kriterijuma menja u jednačini bazni ugao trenja (ϕ_b) biće detaljno opisan u narednim poglavljima.



Slika 2. Empirijski zakon u grafičkom obliku, svaka kriva je numerisana određenom JRC vrednošću (Barton i Choubey, 1977)

3. JCS - ČVRSTOĆA NA PRITISAK ZIDOVA PUKOTINA

Kod primene Barton-Bandis-ovog kriterijuma loma, JCS je parameter od suštinskog značaja. Čvrstoća na pritisak zidova pukotina je važan faktor koji utiče na smičuću čvrstoću i deformabilnost, posebno ako su zidovi pukotina u direktnom kontaktu, kao i u slučaju kada u pukotinama nema ispune. Neznatno pomeranje pojedinih pukotina koji je uzrokovan naprezanjima stenske mase često rezultira vrlo malim kontaktima po neravnim površima zidova pukotina i naponima koji se lokalno približavaju ili premašuju čvrstoću na pritisak zidova pukotina.

Stene često u blizini površine mogu biti alterisane ili izmenjene zbog različitih fizičko-hemijskih uticaja. Vremenske prilike imaju veliki uticaj na zidove pukotina, mnogo više nego na unutrašnju strukturu same stene. Rezultat toga je čvrstoća zida pukotine koja je samo deo čvrstoće koja bi se dobila merenjem na svežem prelomu iste stene. Opis stanja pukotina i raspadnutosti ili alteracije je veoma važan prilikom utvrđivanja čvrstoće zida pukotine.

Dva dominantna faktora koja utiču na raspadanje pukotina jesu mehanički i hemijski. Uopšteno i mehanički i hemijski činioci deluju združeno, ali zavisno od klime, jedan ili drugi faktor mogu biti izraženiji. Mehanička degradacija vremenom rezultira otvaranjem diskontinuiteta, stvaranjem novih diskontinuiteta i lomljenjem stene, lomom ili cepanjem po predisponiranim površinama. Hemijsko raspadanje doprinosi promeni boje stene i dovodi do eventualne razgradnje silikatnih minerala u minerale gline. Neki minerali, posebno kvarc, odolevaju hemijskim uticajima i mogu ostati pošteđeni tog uticaja. Rastvaranje je veoma važan hemijski proces u karbonatima i evaporatima.

Čvrstoća relativno tankog površinskog sloja na zidovima stena koji utiče na smičuću čvrstoću i deformabilnost može se ispitati pomoću jednostavnih opita. Čvrstoća na pritisak pukotina može se odrediti pomoću Šmitovog čekića ili procenom pomoću geološkog čekića koji je grubo kalibrisan na temelju velikog broja ispitivanja. Mineralizacija će imati velikog uticaja na čvrstoću smicanja po diskontinuitetu ukoliko su zidovi ravni i glatki. Ukoliko je moguće prepoznati mineralizaciju, treba je opisati. Ukoliko postoje nedoumice oko vrste mineralizacije, potrebno je uzeti uzorak za laboratorijsku analizu.

3.1 ŠMITOV ČEKIĆ

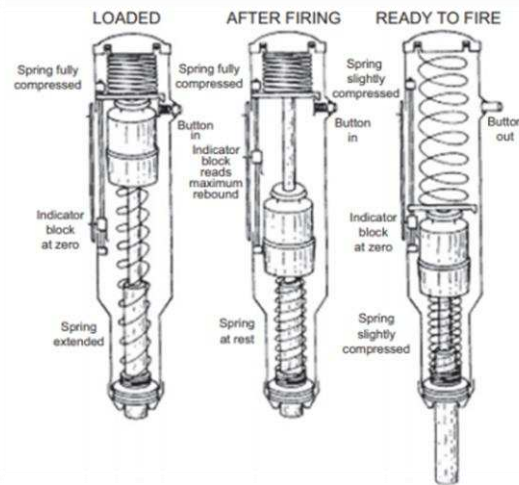
Zbog svojih dobrih karakteristika, koje se pre svega ogledaju u jednostavnosti rukovanja i lakoj prenosivosti, Šmitov čekić (slika 3) je našao veliku primenu u mehanici stena. Vrednost (R) je indeks koji se dobija prilikom upotrebe aparata i na osnovu koga se može proceniti jednoaksijalna čvrstoća na pritisak i modul elastičnosti stene in situ ili u laboratorijskim uslovima. Takođe, veliku primenu ima prilikom određivanja čvrstoće na pritisak zidova diskontinuiteta, što je jedan od ključnih parametara Barton-Bandis-ovog kriterijuma loma. U prethodne četiri decenije težilo se uspostavljanu što tačnije korelacije između vrednosti (R) koja se meri čekićem i UCS vrednosti, kao i korelacije između vrednosti (R) sa modulom elastičnosti (E) (Aydin, 2009).



Slika 3. Izgled Šmitovog čekića (Izvor: <https://www.amazon.com>).

3.1.1 Princip rada

Da bi se realizovalo merenje Šmitovim čekićem potrebno je upravno postavljanje na ispitivanu površinu, u ovom slučaju površ pukotine. Kada se čekić u tom položaju aktivira na ispitivanu površinu dolazi do otpuštanja opruge (slika 4). Visina odskoka klipa se meri na linearnoj skali. Čvršće površine uzrokuju veći odskok. Udaljenost koju je klip prošao nakon odskoka naziva se vrednost odskoka (R), što se smatra indeksom površinske čvrstoće.



Slika 4. Princip rada Šmitovog čekića (Aydin, 2009)

3.1.2 Tipovi čekića

Standardni Šmitovi čekići L i N tipa su napravljeni za različite nivoe udarne energije od 0.735 Nm za L, odnosno 2.207 Nm za N tip. Uslov je da dejstvo čekića rezultuje ujednačenim dejstvom na stenu (bez drobljenja diskretnih zrna, urušavanje strukture ili usitnjavanja). Merena odskočna vrednost površine sa dva različita nivoa energije treba da bude konstantna. Veća udarna energija trebalo bi da smanji rasipanje vrednosti dobijene u različitim tačkama heterogene površine.

Uslovi koje uzorci moraju da ispunjavaju

Uzorci treba da budu neporemećeni, intaktni (bez vidljivih oštećenja), petrografski jednolični i reprezentativni na steni koja je predmet merenja. Površine na kojima se radi ispitivanje, posebno one gde se vrši opit ispod klipa (tačka udara), treba da budu glatke i bez čestica prašine. Za zaglađivanje grubih površina može se koristiti brusni papir. Jezgra i blokove treba sušiti na vazduhu pre ispitivanja. Ukoliko ovo nije moguće, potrebno je naznačiti da li je uzorak u trenutku testiranja mokar, vlažan ili suv.

U pogledu veličina koje treba da zadovoljavaju, uzorci iz jezgra moraju imati minimalni prečnik 54.7 mm, dok je za čekić N tipa bilo poželjno obezbediti prečnik najmanje 84 mm (Aydin, 2009). Uzorci blokova moraju biti debljine minimum 100 mm (Aydin, 2009). Veoma je bitno da tačke udara ne budu previše blizu granicama uzoraka da se energija udara ne bi rasipala. Potrebno je da tačke udara budu udaljene pola debljine od ivica uzoraka, ili ako je u pitanju jezgro da budu što bliže centru kruga poprečnog preseka.

Dužina jezgra i površina blokova trebaju biti dovoljno velike za ispitivanje. Na osnovu sugestija primera radi, ako se uzmu udarne tačke na razmaku od 2 cm, potrebna dužina jezgra iznosi 43,5 cm ili površina bloka 268 cm² (za debljinu stene od 10 cm), što je dovoljno za 20 udara. Test je nedestruktivan za stene najmanje srednje čvrstoće 80 MPa, a takav se uzorak kasnije može primeniti i za određivanje jednoaksijalne čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti (Aydin, 2009).

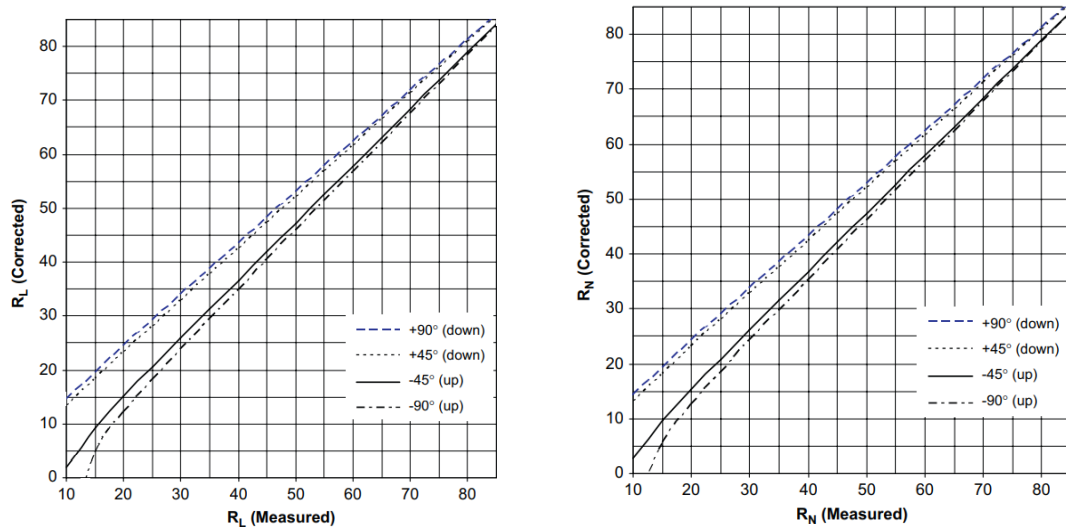
3.1.3 Uslovi ispitivanja

Relativni uticaj smera

Ukoliko smer prilikom udara čekića na ispitivanu površinu ostane grubo vertikalna, postoji opasnost od proklizavanja vrha klipa, uklanjanja materijala usitnjavanjem i delimičnim prenosom energije ka i od čekića. Stoga je izuzetno važno da se čekić drži pod pravim uglom u odnosu na ispitivanu površ, tako da odstupanje ne prelazi $\pm 5\%$ od vertikale.

Normalizacija vrednosti odskoka u odnosu na horizontalni smer udarca

Funkciju analitičke normalizacije koja definiše ekvivalentnu vrednost odbijanja u horizontalnom smeru (slika 5) prikazali su Basu i Aydin (2004). Ova formulacija omogućava testiranje u bilo kom smeru, posebno za primenu na licu mesta (npr. ispitivanje uske površine diskontinuiteta ili kod kružnih zidova tunela). Proizvođačima Šmitovog čekića se sugeriše da sa aparatom isporučuju i digitalni ili mehemički uređaj za merenje ugla.



Slika 5. Normalizovane vrednosti odskoka za čekić L i N tipa (Aydin, 2009)

Ispitivanje uzoraka

Prilikom izvođenja opita na uzorcima, oni se moraju pričvrstiti na čvrstu i ravnu čeličnu podlogu sa minimalnom težinom od 20 kg za čekić L tipa i 40 kg za čekić N tipa (Aydin, 2009). Uzorci jezgra se smeštaju u obrađeni kalup formiran u čeličnoj podlozi u obliku luka, kao i u kalup V poprečnog preseka koji se izbegavaju ukoliko su stene slabije čvrstoće.

Prikupljanje i redukcija podataka

Kao što je ranije navedeno, preporuka ISRM-a da se određivanje vrednosti vrši za 20 vrednosti odskoka tako što će se svako pojedinačno merenje biti odvojeno najmanje za prečnik klipa od prethodnog. Ukoliko u prvih deset čitanja vrednosti se ne razlikuju za više od 4 onda nije potreban veći broj ponavljanja od 10.

Kada nema dovoljne količine dostupnih mikrostrukturalno jednolikih uzoraka, a stena je izotropna, nekoliko setova čitanja može se uzeti sa različitih lica blokova ili duž bilo koje četiri linije rotiranjem jezgra za 90°. Skup očitavanja treba dati odgovarajućim redosledom i svako konstantno smanjenje prvog seta merenja (zbog pucanja udarom na primer) treba pažljivo pratiti.

Na vrednosti materijala (UCS i E) uticaja ima povećanje gustine, distribucija i povezanost njenih mikrostrukturnih elemenata. U tom smislu visoka i niska vrednost merenja ukazuju na heterogenost materijala i njegovu prirodu. Stoga ne treba odbacivati srednje vrednosti (artimetrički prosek), način rada i opseg čitanja treba predstaviti tako da bi mogli u potpunosti izraziti varijacije u tvrdoći površine.

Digitalne slike ispitivanog područja pre i nakon svakog udara mogu pružiti osnovu za analizu ovih statistika i eliminisati potrebu za snimanjem detaljnog opisa oštećenja kao što su drobljenje zrna, radijalno i bočno pucanje. U terenskim uslovima inženjer ili tehničar takođe treba da zabeleži približne dimenzije ispitivanih blokova (dubina je dužina bloka bez vidljivih pukotina), njihovu prirodu (zid diskontinuiteta, izmenjen ili mehanički zdrobljen blok), hrapavost originalne površine i način na koji je uglančana tačka udara (Aydin, 2009).

3.1.4 Uticajni faktori

Čvrstoća zrna i matriksa

Na stepen rasipanja vrednosti odskoka značajan uticaj ima čvrstoća matriksa, rasprostranjenost i veličina zrna. Kada stena sadrži zrna uporedivih veličina sa prečnikom vrha klipa, očitavanja sa ovih zrna mogu značajno da odstupaju od proseka u zavisnosti od njihove čvrstoće u poređenju sa čvrstoćom matrice ili dominantne veličine zrna. U takvim slučajevima treba odabrati tačke udara da bi se dobile vrednosti odboja od pojedinačnih grubih zrna i matriksa odvojeno. Prosečne vrednosti odskoka ovih komponenti mogu rezultirati pogrešnim određivanjem tvrdoće.

Raspadnutost i sadržaj vlage

Mikrostrukturne promene izazvane raspadanjem stene usled različitih uticaja rezultuju različitim mehanizmima reakcije, naročito kod magmatskih stena gde vrednosti odskoka mogu biti značajno različite. Diferencijalno raspadanje različitih minerala stena povećava heterogenost na nivou zrna, što će u grubozrnim stenama rezultirati velikim brojem različitih odskočnih vrednosti. Stoga je presudno da uzorci budu jednolični u pogledu ukupnog stepena raspadanja i petrografskih karakteristika.

Kada testirani uzorci ili pojedinačne površine pokazuju promenljiv stepen raspadanja, smanjenje vrednosti odskoka od prvog do drugog udara može biti uzeta u istoj tački kao mehanički indeks raspadanja (Aydin, 2009).

Sadržaj vlage u steni unutar zone uticaja udara može značajno uticati na vrednost odboja u zavisnosti od mikrostrukturalnog karaktera. Vлага olakšava klizanje među zrnima i dovodi do omekšavanja zrna i labavog skeletnog veziva koje vezuje zrna. Ovi mehanizmi najefikasnije utiču na raspadnute, porozne i slabo cementovane stene, ali takođe mogu uticati i na sveže stene sa obilnim mikropukotinama unutar zrna. Kada je svrha SH testova da se uspostave korelacije između UCS i/ili E i povratne vrednosti, sva ispitivanja treba da budu izvedena sa istim sadržajem vlage. Međutim, stene sa niskom propustljivošću treba testirati u suvom stanju zbog poteškoća u postizanju ravnomerne zasićenosti.

Anizotropija

Stene poput škriljaca i filita imaju izraženu anizotropiju koja utiče na vrednosti čvrstoće. Vrednosti čvrstoće se izrazito smanjuju za slučaj udara čekićem normalno na ravni anizotropije. U tom slučaju će doći do apsorbovanja energije udara dok će se UCS i E vrednosti naglo smanjivati ukoliko se udar nanese pod kosim uglom. Zbog toga se upotreba SH u takvim stenama ne preporučuje, osim ako su intakne ploče debljine veće od 10 cm. U svakom slučaju, uticaj pravca čekića i takvih karakteristika treba zabeležiti i pokušati sa korelacijom UCS-a i E za isti pravac (Aydin, 2009).

3.1.5 Terensko i laboratorijsko ispitivanje

Prilikom terenskih ispitivanja javljaju se poteškoće u utvrđivanju prisustva pukotina i drugih diskontinuiteta direktno pod tačkom udara. Potrebno je izbegavati merenja direktno izloženih površina sa folijacijom, oštećenih i izlomljenih stena zbog mogućnosti vertikalne deformacije i vibracije na takvim mestima. Ispitivanja u anizotropnim stenama poput škriljca daju uzak raspon vrednosti odboja njihove jednolike i prirodno glatke prirode, ali isto tako značajno niske vrednosti zbog prirode stene. Međutim, u većini slučajeva stepen rasipanja će se povećavati i prosek veličina odskočnih vrednosti će se smanjiti pri terenskom testiranju. S druge strane, laboratorijski opiti trpe ograničene dimenzije uzorka jezgra i bloka. Uticaj geometrije uzorka, granično rastojanje i hrapavosti malih dimenzija na skok vrednosti treba istražiti upotrebom ujednačenih sintetičkih materijala različite tvrdoće i elasto-plastičnih karakteristika.

Ispitivanje zidova pukotine

Ispitivanje Šmitovim čekićem je jedan od nekoliko opita kojima se može ispitivati čvrstoća površine pukotine. Zajedničke karakteristike zidova pukotina koje utiču na čvrstoću u različitim proporcijama su stepen izmenjenosti površi pukotine, mineralizacija i prisutvo tankog filma na površini pukotine boljih ili lošijih karakteristika od same stene. Kako ove karakteristike nisu jednolične na površini pukotine, treba očekivati širok raspon vrednosti odskoka. Utvrđivanje i predstavljanje ovog rasipanja vrednosti je ključno za interpretaciju mogućeg raspona čvrstoće na smicanje. Ukoliko se radi o tankim, slabim slojevima koji su formirani na površini pukotine, potrebno je izbeći njihovo poliranje ili ih lagano polirati. To se radi u cilju izbegavanja dobijanja smanjenja vrednosti odskoka, ali ne doprinosi suštinski čvrstoći na smicanje.

Međutim, najpametnije je prikupiti dve grupe podataka pre i nakon poliranja površine pukotine kako bi se izračunala gornja i donja granica čvrstoće na smicanje.

3.1.6 Rezultati merenja

Poželjno je da izveštaj o ispitivanju sadrži sledeće podatke: a) Litološki opis stene (opseg čvrstoće, boju, teksturu, vremenske uslove, alteraciju ukoliko postoji, naziv stene ukoliko je identifikacija moguća); b) Geografski položaj i dubina uzorkovanja ili in situ položaj stene; c) datum uzimanja uzorka ili ispitivanja; d) Uzorak ili broj lica; e) Vrsta uzorka (jezgro, blokovi, lice iskopa); f) Metoda iskopa ili način uzimanja bloka za testiranje; g) Dimenzije uzorka ili in situ površina gde se merenje vrši; h) Vlažnost (sadržaj vode u %); i) Tip čekića (L, N ili drugi tip); j) Orjentacija ose čekića; l) Položaj čekića na stene koje imaju anizotropna svojstva m) Histogram od 20 očitavanja.

Sve je veći broj studija koje se bave procenom jednoaksijane čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti na osnovu korelacije sa vrednostima dobijenim Šmitvim čekićem za intaknu stenu. Važno je da prilikom korišćenja ovih korelacija korisnici budu svesni da visoki koeficijenti korelacije ne garantuju nužno bolje procene (Aydin, 2009).

Smernice za korelaciju

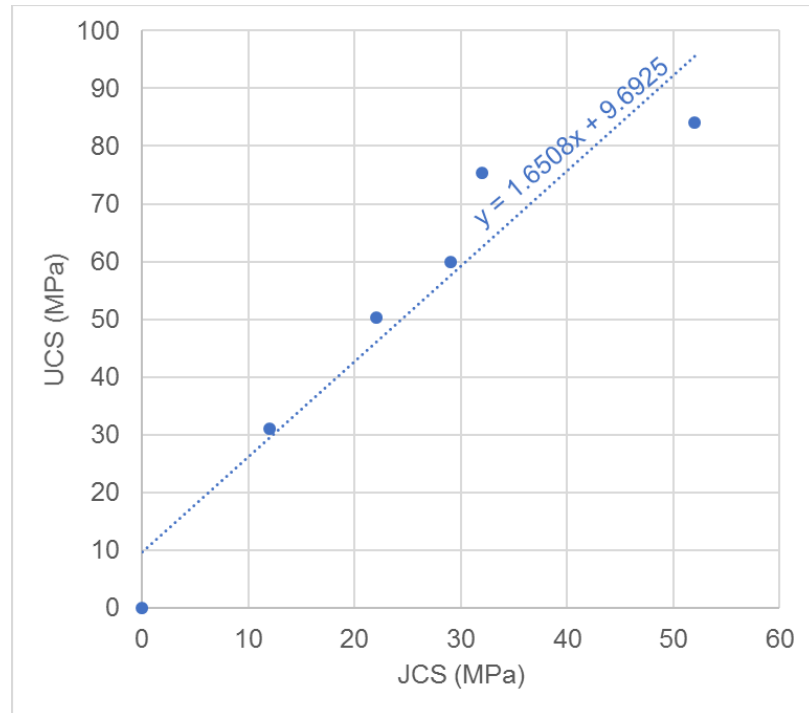
Korelacije bi trebalo da budu uspostavljene za datu stenu čija vrednost pada unutar jednog opsega.

Nelinearne korelacije ukazuju na mikrostrukturne promene unutar naizgled identične stene (Aydin, 2009).

Kada je svrha izvesti opštu korelaciju za veliku grupu stena, od suštinske važnosti je da se osigura nepostojanje velikih praznina u opsegu i sve izrazite varijetete u mikrostrukтури za svaku vrstu stene je potrebno naznačiti.

U pogledu procedura prikupljanja i smanjenja podataka, očigledno je da je prosečno očitavanje pojedinih uticaja jedini racionalni pristup. Prilikom vršenja opita potrebno je znati da će pri višestrukome udaru klipa na jednu tačku doći do promene originalne mikrostrukture što će razultirati različitim merenjima na jednom mestu.

Korelacija se uspostavlja između UCS ili E u odnosu na R koristeći srednju vrednost odboja svih merenja za određenu mernu tačku. Struktura podataka o svakoj odskočnoj vrednosti pokazuje prirodu heterogenosti površine i nije odmah očigledno koji mikrostrukturni element ili karakteristika kontroliše ili dominira nad vrednošću UCS ili E odgovarajuće stene. Dakle, srednja vrednost odskoka i način merenja (sa brojem ponavljanja) takođe treba da budu prikazani na korelacijskim graficima u cilju lakšeg tumačenja potencijalne varijabilnosti u UCS i E vrednostima svakog uzorka. Primer korelacije UCS-a i vrednosti odskoka R za Šmitov čekić tipa L prikazan je na slici 6.



Slika 6. Odnos UCS-a i vrednosti odskoka R (Marjanović i sar., 2022)

Vrednosti UCS i E razmatrane stene su veoma osetljive na neznatne promene u strukturi (uticaj vremenskih prilika, gustina i orijentacija mikro pukotina, raspodela veličine zrna, mineralni sastav). Međutim, sistematska analiza potencijalno velike varijabilnosti u ovim osnovnim mehaničkim svojstvima nije uvek izvodljiva zbog poteškoća u laboratorijskim ispitivanjima. Kao rezultat, u uspostavljanju korelacija (posebno onih koje uključuju više vrsta stena), samo nekoliko vrednosti UCS ili E su često dostupne za predstavljanje punog raspona varijabilnosti u svakom tipu stene.

Za ocenu uticaja stepena raspadnutosti u granitima Basu i Aydin (2004) su pokazali da promene u vidu skokova vrednosti između prvog i drugog udara daju najbolju korelaciju.

U cilju da se shvate tendencije među različitim vrstama stena razvijen je jedan od sledećih generalizovanih izraza koji se može koristiti za uspostavljanje vrednosti UCS i E u odnosu na odskok R, koji daje Aydin (2009):

$$UCS = ae^{bR}, E_t = ce^{dR} \quad (3)$$

$$UCS = aR^b, E_t = cR^d \quad (4)$$

gde su a, b, c i d pozitivne konstante koje zavise od vrste stena. Međutim kao poslednja napomena o opravdanosti generalizovanja izraza Basu i Aydin (2004) kažu da su ove korelacije validne ukoliko se pretpostavi sličan način i sled mikrostrukturnih promena. To je ključno razmatranje tokom odabira odgovarajućih funkcija za procenu vrednosti UCS i E, a samim tim i takve generalizovane izraze ne preporučuju u praksi ako ih je više. Za odgovarajuće mikrostrukture dostupni su određeni izrazi.

Dokazano je da kada su ispitivanja Šmitovim čekićem sprovedena na temelju preporuka iznesenih u ISMR-ovoj (Aydin, 2009) predloženoj metodi, vrednosti odboja R dobijeni upotrebom standardnih Šmitovih čekića L i N tipa gotovo se savršeno poklapaju sa vrlo ograničenim rasponom od $R_L > 30$ ili $R_N > 40$. Ovu korelaciju daje Aydin (2009) sledećim izrazom:

$$R_N = 1.0646 \cdot R_L + 6.3673 \quad (r = 0.99) \quad (5)$$

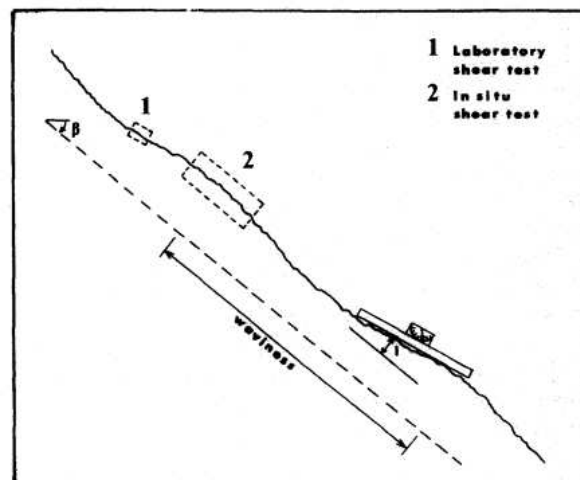
Ovaj odnos je izveden na uzorcima jezgra granita sa relativno glatkim površinama u laboratorijskim uslovima. Može se očekivati da će se rasipanje podataka pogoršati u slučaju ispitivanja u terenskim uslovima i ispitivanja slabih poroznih stena zbog razlike u energijama udara.

4. JRC - KOEFICIJENT HRPAVOSTI PUKOTINA

Hrapavost zida pukotine je važna komponenta njegove smičuće čvrstoće. Može se okarakterisati zatalasanošću ili hrapavošću u zavisnosti od razmere posmatranja. Zatalasanost se odnosi na metarski red veličina, dok se za hrapavost podrazumeva cm i dm red veličina, ovo je ilustrovano na slici 7. Na diskontinuitetima koji se mogu okarakterisati kao talasasti doći će do pojave dilatancije (uzglobljavanja diskontinuiteta povećanjem smičućeg napona) pri dejstvu smičuće sile ukoliko su pukotine u kontaktu. Pukotine manjih dimenzija koje se karakterišu kao hrapave imaju tendenciju ka oštećenju prilikom dejstva smičuće sile, osim ako su zidovi velike čvrstoće ili su nivoi naprezanja niski, u suprotnom dilatancija se može javiti i kod pukotina centimetarskog reda veličina (ISRM, 1977).

Uticaj zatalasanosti diskontinuiteta utiče na početni smer smicanja u odnosu na srednju ravan diskontinuiteta, dok hrapavost utiče na čvrstoću smicanja koja se obično određuje u laboratoriji ili in situ direktnim smicanjem.

U daljem tekstu biće obrađeno nekoliko metoda koje se koriste pri određivanju indeksa hrapavosti. Izbor metode u praksi zavisice od razmere diskontinuiteta, pristupačnosti, kao i same svrhe ispitivanja.



Slika 7. Različite razmere hrapavosti (ISRM, 1977)

4.1 PUKOTINE VELIKIH RAZMERA – METODA LINEARNOG PROFILA

Ako je poznat smer potencijalnog kretanja, hrapavost se može uzorkovati linearnim profilima uzetim paralelno sa ovim smerom. U mnogim slučajevima relevantan pravac je paralelan pravcu tonjenja planare. U slučajevima kada klizanjem upravljaju dve ravni koje se seku, pravac potencijalnog klizanja je paralelan liniji preseka ravni (klizanja klina). U ovom slučaju hrapavost treba uzeti na mestu presečne ravni.

Ukoliko je pravac potencijalnog klizanja nepoznat, ali ga je važno odrediti, hrapavost se može uzorkovati u tri dimenzije. To se može učiniti kompasom i disk-klinometrom ili nekim od savremenih postupaka za trodimenzionalnu analizu hrapavosti. Očitavanje azimuta i padnog ugla razmatranog diskontinuiteta može se prikazati na položajnoj polulopti. Polulopta se najčešće projektuje na ravan u ekvivalentnoj i konformnoj projekciji.

Alternativno, površine diskontinuiteta mogu se pronaći u odnosu na njihove srednje ravni pomoću fotogrametrijskih metoda. Ova metoda je veoma korisna u slučaju da su kritične površine nepristupačne.

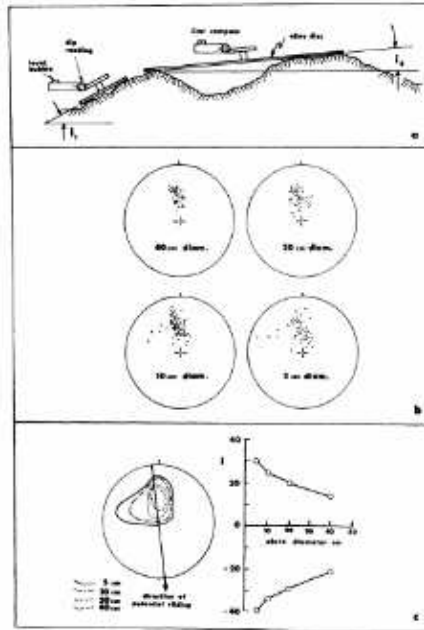
4.2 ODREĐIVANJE HRAPAVOSTI U TRI DIMENZIJE

Biraju se tipični diskontinuiteti gde se pretpostavlja moguće smicanje. Takođe ove površine moraju biti pristupačne. Merenje se obavlja tako što se najveća kružna ploča (40 cm) postavlja na površinu diskontinuiteta u najmanje 25 različitih položaja i beleži im se azimut i padni ugao za svaki položaj. Ovaj postupak se ponavlja i za ostale razmere ploče. Ukupna preciznost je poboljšana ako se zabeleži veliki broj položaja sa manjim prečnicima ploče, na primer 50 položaja sa 20 cm prečnikom ploče, 75 položaja sa 10 cm položom, 100 položaja sa pločom 5 cm. Svaki skup podataka sa azimutom i padnim uglom nacrtani su na posebnoj polarnoj mreži. Za svaki set polova se crtaju konture. Maksimalni uglovi hrapavosti za date veličine diskova mogu se postaviti za bilo koji smer potencijalnog klizanja.

Merenje azimuta i padnog ugla dobijenih diskovima različite razmere trebaju biti prikazane na polarnim ili ekvivalentnim mrežama jednakih površina, po jedan za svaki disk. Oni se mogu kombinovati i prikazivati na jednom konturnom dijagramu, kao što je prikazano na slici 8. Merenja sa nekoliko diskontinuiteta mogu se grupisati na istoj mreži u cilju prikazivanja opsega hrapavosti. Fotografije odgovarajućih površina koje prikazuju minimalnu, srednju i maksimalnu hrapavost treba da se naprave zajedno sa polarnim dijagramima.

Tangenta ovih maksimalnih uglova hrapavosti pomnožena sa odgovarajućom dužinom baze (prečnik diska) daje pomeranje (dilatancije) koja će se javiti normalno na diskontinuitet. Na taj način se analizira nekoliko osnovnih dužina tako da se može dobiti dilataciona kriva (ISRM, 1977).

Ako je potrebno izmeriti veliki broj podataka, preporučuju se fotogrametrijske metode. Ako je poznat potencijalni pravac klizanja preporučuje se metoda profilisanja, čime se količina prikupljenih podataka smanjuje na pojedinačni pravac potencijalnog klizanja.

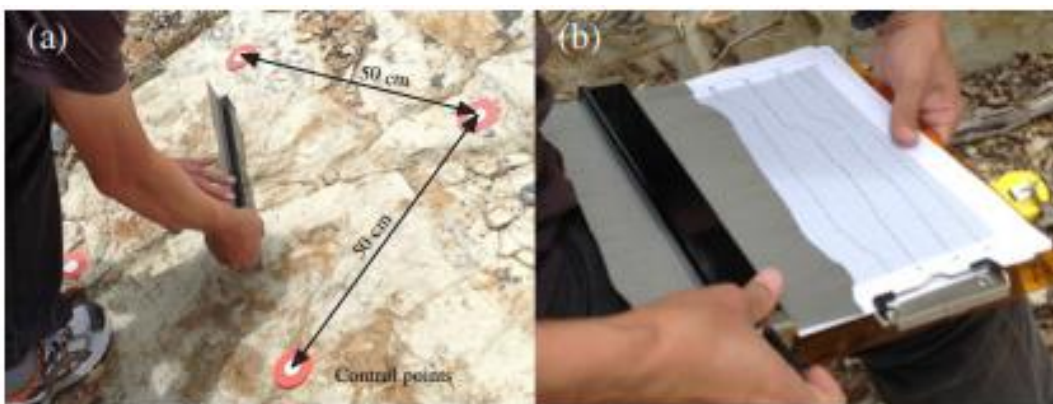


Slika 8. Metoda snimanja diskontinuiteta u tri dimenzije (ISRM, 1977)

4.3 MERENJE HRPAVOSTI UPOTREBOM BARTONOVOG ČEŠLJA

Ova metoda određivanja JRC-a odnosi se na terenska merenja koja se izvode pomoću Bartonovog češlja prikazanog na slici 9. Ovaj jednostavan i pouzdan uređaj se koristi za snimanje 2D kratkih profila hrapavosti do 30 cm dužine. Vrednosti JRC-a varira od 0 do 20 i dobija se upoređivanjem snimljenih profila sa standardnim profilima hrapavosti, slike 10 i 11 (Barton i Choubey, 1977).

Merenje se izvodi u nekoliko jednostavnih koraka. Pre samog nanošenja na površinu pukotine potrebno je profilmetar izravnati tako da sve igle iz češlja budu u istom nivou. Nakon toga se češalj nanosi blagim pritiskom po karakterističnom diskontinuitetu tako da sve igle dotaknu površinu. Nakon toga se prislanja na papir kako bi se precrtao snimljeni profil koji se kasnije kvantifikuje na osnovu upoređivanja sa standardnim Bartonovim profilima prikazanim na slici 11.

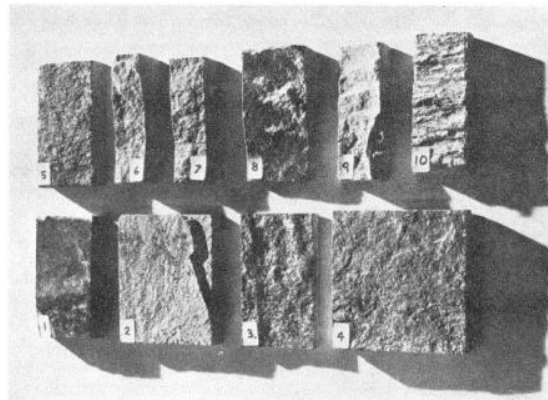


Slika 9. Postupak snimanja profila hrapavosti upotrebom Bartonovog češlja (Dong i sar., 2014)

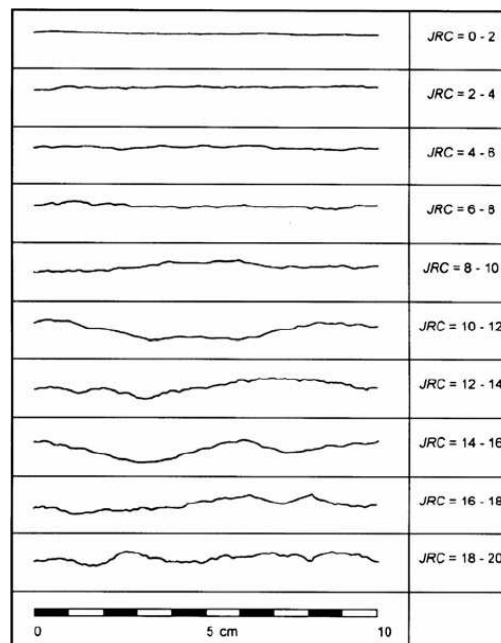
4.4 PROFILI HRAPAVOSTI

U preliminarnim fazama projektovanja značajno je napraviti procenu smičuće čvrstoće po pukotinama i utvrditi da li su potrebna detaljnija ispitivanja. Usklađivanje profila hrapavosti i njihove grube procene JRC (5, 10 i 20) koje je dao Barton (1973) prikazane su na slici 2.

Ovaj empirijski zakon je formiran kao preliminarni vodič za one koji ne mogu precizno definisati parametar JRC tokom istraživanja. Barton i Choubey (1977) izvršili su testiranje na 136 uzoraka sa diskontinuitetima. U većini slučajeva su izmerena tri profila na svakom od ovih uzoraka kako bi se izabrali najtipičniji profili svake grupe. Konkretni diskontinuiteti koje su izabrali da predstavljaju specifične vrednosti JRC-a prikazani su na slici 10, dok su odgovarajući profili za te diskontinuitete prikazani na slici 11.



Slika 10. Izgled diskontinuiteta koji odgovaraju Bartonovim standardnim profilima hrapavosti sa slike 11 (Barton i Choubey, 1977)



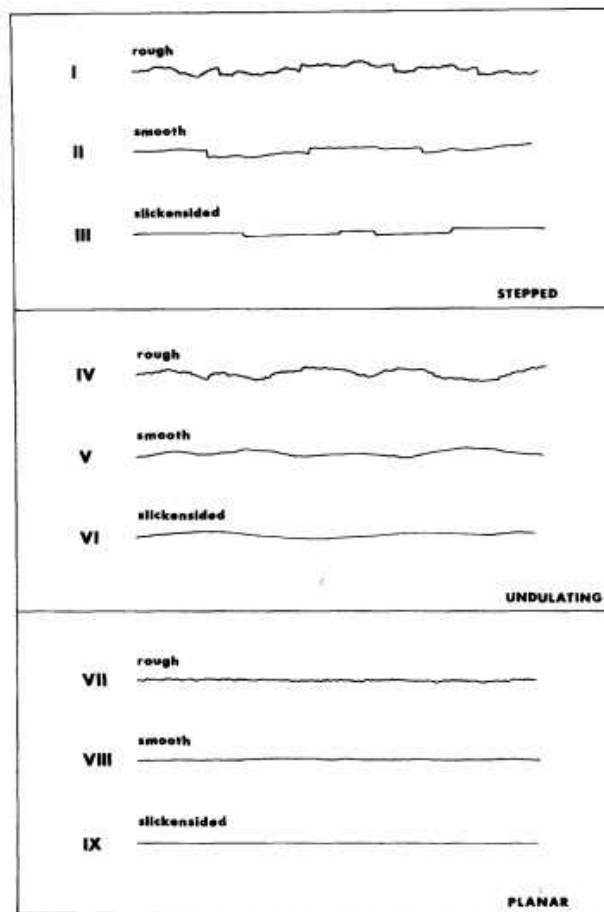
Slika 11. Standardni Bartonovi profili hrapavosti koji pokazuju tipični opseg JRC vrednosti (Barton i Choubey, 1977)

4.5 OPISNI POJMOVI PUKOTINA

U preliminarnim fazama kartiranja terena vremenska ograničenja mogu sprečiti upotrebu gore navedenih tehnika merenja hrapavosti. U tom slučaju opis hrapavosti biće ograničen na opisne pojmove koji se zasnivaju na dve razmere opažanja: 1) Mala razmera (centimetarska razmera), 2) Srednja razmera (metarska razmera).

Prilikom opisa pukotina koriste se sledeći termini (ISRM, 1977): I-Gruba (nepravilna), stepenasta; II-Glatka, stepenasta; III-Klizava, stepenasta; IV-Gruba (nepravilna), talasasta; V-Glatka, talasasta; VI-Klizava, talasasta; VII-Gruba (nepravilna), ravna; VIII-Glatka, ravna; IX-Klizava, ravna. Profili hrapavosti tipični za ovih 9 klasa prikazani su na slici 12.

Izraz „slickensided“ treba koristiti samo ako postoje jasni dokazi o predhodnom pomeranju smicanjem duž pukotine.



Slika 12. Tipični profili hrapavosti i predložena nomenklatura, veličina pukotina se odnosi na opseg od 1 do 10 m (ISRM, 1977)

Srednja razmera (metarska razmera) hrapavosti je podeljena u tri klase: stepenastog, talasastog i planarnog karaktera, dok je svaka od tih klasa podeljena na tri tipa: gruba, glatka i klizava.

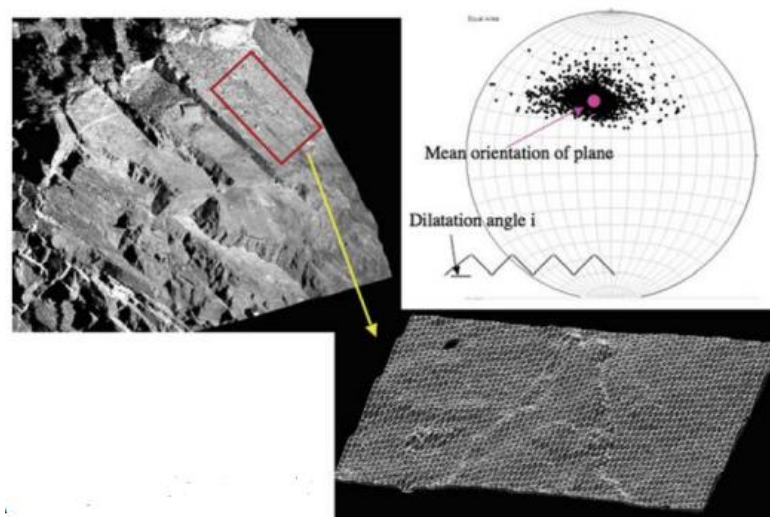
Potrebno je zabeležiti pravac strijacije jer smičuća čvrstoća može varirati u zavisnosti od smera. Efektivni uglovi hrapavosti prikazani u ovih devet kategorija u smislu čvrstoće na smicanje imaju odnos: $I > II > III > IV > V > VI > VII > VIII > IX$, pod pretpostavkom da ne postoji mineralni film na pukotinama ili da je prisutan u istoj meri.

U određenim slučajevima mogu se javiti izvesna odstupanja, kao na primer čvrstoća pukotine sa opisom VII može biti čvršća od III, to će zavisiti od toga da li je dilatancija uslovljena ili ne. Dilatancija oko podzemnog iskopa obično je uslovljena krutošću okolne stenske mase (ISRM, 1977).

4.6 ODREĐIVANJE HRAPAVOSTI LASERSKIM I FOTOGRAMETRIJSKIM METODAMA

U današnje vreme sve više se pribegava korišćenju modernih bezkontaktnih tehnika snimanja i merenja trodimenzionalne hrapavosti diskontinuiteta od kojih se ističu LiDAR (laserska metoda) i fotogrametrija. LiDAR (Light Detection and Ranging) se zasniva na merenju refleksije emitovanih elektromagnetnih talasa, na osnovu čega se izračunava rastojanje od objekta. Na ovaj način se uz primenu rotirajućih ogledala mogu snimiti milioni tačaka određenih površina. Uređaji koji se koristi za snimanje površina nazivaju se laserski skeneri. Uređaji za snimanje mogu se podeliti na: 1) ALS - uređaji za snimanje iz vazduha, 2) TLS - Uređaji za terestričko snimanje, 3) MLS – uređaji za snimanje na mikro nivou. Na osnovu principa rada mogu se podeliti na pulsne, fazne i na osnovu tehnike triangulacije. Preciznost merenja je uslovljena preciznošću merenja vremena. Takođe neophodan je odgovarajući softver koji će dobijeni oblak tačaka pretvoriti u x, y i z koordinate što omogućava dalju primenu u softverima. Primenom odgovarajućih softvera mogu se analizirati karakteristike pukotina među kojima je i hrapavost.

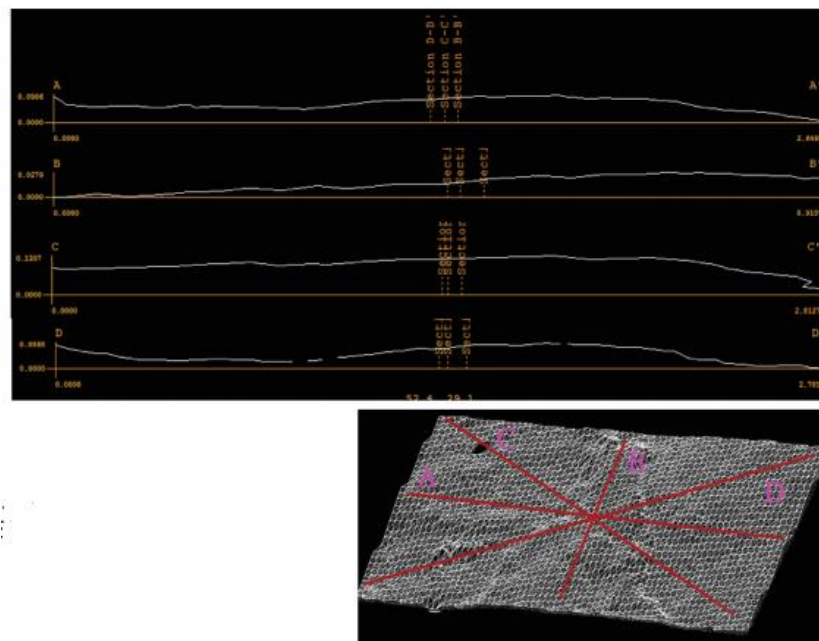
Određivanje hrapavosti pukotina može se odrediti na dva načina: 1) korišćenjem trougaone mreže (TIN-a), slika 13; 2) Formiranjem topografskih preseka različite orijentacije po površi diskontinuiteta, slika 14.



Slika 13. Primer određivanja ugla dilatancije pomoću TIN-a (FHWA, 2008)

Prilikom korišćenja trougaone mreže (TIN-a) formirane iz oblaka tačaka na stereomrežu se nanese polovi svih trouglova za izdvojenu pukotinu. Rasipanje podataka oko prosečne vrednosti predstavlja indikator o veličini ugla dilatancije, što se može objasniti testerastim modelom dilatancije. Veličina ugla dilatancije zavisi od veličine generisanih trouglova. Moguće je ispitati uticaj veličine trouglova na promenu dilatancije jer različite veličine trouglova daju različite vrednosti ugla dilatancije (Berisavljević i sar., 2021).

Drugi način dobijanja koeficijenta JRC je formiranjem topografskih preseka različite orijentacije po razmatranoj površini. Prilikom analiziranja stabilnosti kosina od najvećeg značaja će biti profili orijentisani u smeru mogućeg kretanja stenske mase duž pukotina.



Slika 14. Formiranje topografskih preseka različite orijentacije po razmatranoj površi (FHWA, 2008)

Sa druge strane, fotogrametrijska metoda se zasniva na postupku triangulacije. Ovaj postupak predstavlja dobijanje 3D oblika objekta sa slika ili digitalnih fotografija. Potrebno je slikati najmanje dve fotografije tako da se razmatrani objekat nalazi i na jednoj i na drugoj fotografiji, tj. potrebno je određeno preklapanje između njih. Ukoliko se koristi digitalni zapis objekta, onda se ovaj postupak naziva digitalna fotogrametrija. Da bi se objekat postupkom fotogrametrije georeferencirao potrebno je odrediti koordinate pojedinih kontrolnih tačaka.

Digitalnom fotogrametrijskom restitucijom sadržaj fotogrametrijskih snimaka se prevodi u digitalni vektorski oblik. U zavisnosti od postupka snimanja i restitucije tačaka objekta, fotogrametrija se može podeliti na stereofotogrametriju i konvergentnu fotogrametriju. Princip na kome se zasniva fotogrametrija je princip centralne projekcije.

Postupkom konvergentne restitucije objekat se slika sa različite udaljenosti iz vise uglova. U ovom slučaju se stereoutisak ne može uvek dobiti, tako da se tada pojedine tačke prepoznaju na svakoj fotografiji i istovremenom obradom fotografija se posebnim matematičkim aparatom mogu odrediti koordinate tačaka objekta. Kod ovog postupka prilikom prikupljanja podataka o diskontinuitetima na licu iskopa neophodno je ispoštovati nekoliko bitnih koraka. Tu spada: 1) Kalibracija kamere; 2) Kontrolno merenje; 3) Snimanje fotografija iz vise uglova i rastojanja; 4) Primena softvera za obradu podataka; 5) Kvantifikacija geometrije pukotina.

4.8 ODREĐIVANJE JRC VREDNOSTI KORIŠĆENJEM STATISTIČKIH PARAMETARA

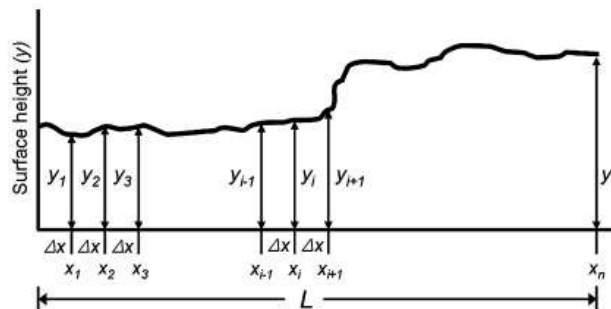
Ideja određivanja JRC vrednosti na ovaj način preuzeta je iz mašinstva gde se hrapavost metalnih površi određuje utvrđivanjem prosečnog odstupanja površi od centralne linije. Ovo se može iskazati izračunavanjem vrednosti RMS (root mean square) ili vrednosti RMS po prvom (Z_2) ili drugom (Z_3) izvodu profila.

Ovde će samo biti kratko prikazane vrednosti Z_2 , SF i R_p za standardne profile hrapavosti koji su digitalizovani na intervalu uzorkovanja od 0.5 mm, koji ne mora biti fiksni. Svaki od ovih parametara izračunava se koristeći drugačiji statistički pristup. Z_2 vrednosti se odnose na nagib hrapavosti, SF vrednosti se odnose na stepen promene visine hrapavosti i R_p vrednosti su povezane sa stvarnom dužinom profila. Za profil prikazan na slici 15 vrednosti Z_2 , SF i R_p se mogu odrediti iz sledećih jednačina (Hyun i sar., 2014):

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$SF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} [f(x + dx) - f(x)]^2 dx = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i)^2 (x_{i+1} - x_i), \quad (7)$$

$$R_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$



Slika 15. Dijagram korišćen za određivanje statičkih parametara (Hyun i sar., 2014)

Gde su:

y_i = visina pukotine na udaljenosti x_i ;

Δx = udaljenost između x_i i x_{i+1} ;

L = horizontalna dužina profila bušotina.

Z_2 je najčešće korišćeni parametar u analizi hrapavosti. Tse i Cruden (1979) su predložili vezu između Z_2 i JRC-a zasnovanu na digitalizaciji standardnog profila u intervalu uzorkovanja od 0.5 mm sledećom jednačinom:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \cdot \log Z_2 \quad (9)$$

Pored toga, Yu i Vayssade (1991) izveštavaju o linearnom odnosu između Z_2 i JRC –a:

$$JRC = 61.79 \cdot Z_2 - 3.47 \quad (10)$$

Dok, Tatone i Grasselli (2010) daju sledeću zavisnost:

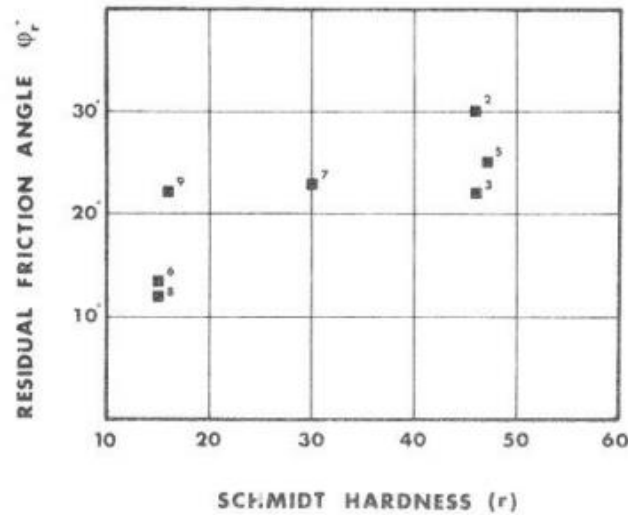
$$JRC = 51.85 \cdot Z_2^{0.60} - 10.37 \quad (11)$$

5. BAZNI I REZIDUALNI UGAO TRENJA

U cilju definisanja smičuće čvrstoće diskontinuiteta uveden je parametar baznog ugla trenja φ_b . Ovaj parametar se može odrediti opitom direktnog smicanja za nekoliko nivoa normalnog napona. Anvelopa loma dobijena u ovom slučaju je prava linija čija je vrednost kohezije jednaka nuli. Prilikom vršenja opita potrebno je da površi diskontinuiteta budu u dovoljnoj meri obrađene i ispolirane. Uzorci za opit se najčešće izdvajaju sečenjem dijamantskom testerom. U pojedinim slučajevima između opita je potrebno vršiti peskirenje površina. Takođe, vrednost baznog ugla trenja se može odrediti pomoću opita naginjanja (tilt test).

Vrednosti baznog ugla trenja (φ_b) dobijane prilikom opita direktnog smicanja i naginjanja posledica su rezidualne čvrstoće koje ispoljavaju neizmenjene, planarne površine pukotina. Ukoliko su površine pukotina izmenjene, ne mogu se primenjivati za navedeni opiti. Izuzetak predstavlja slučaj kada se na površini nalazi tanak mineralni film koji će usled dejstva velikog normalnog napona omogućiti kontakt između svežih površina.

Ukoliko normalni efektivni napon nije dovoljno velik, tanak mineralni film ili alterisani površinski deo pukotine može kontrolisati veličinu smičuće čvrstoće (Richards, 1975). Ovaj zaključak je izveden na osnovu opita kojima je dobijena vrednost rezidualnog ugla trenja od 12° pri niskim nivoima normalnog napona. Rezultati ukazuju na dobru korelaciju sa vrednošću r koja se odnosi na broj odbijanja meren Šmitovim čekićem za alterisan i vlažan diskontinuitet. Rezultati su prikazani na slici 16.



Slika 16. Rezultati dobijeni na sedam uzoraka izmenjenog peščara (Richards, 1975)

Za visoke nivoe normalnog napona do izražaja dolazi čvrstoća peščara ispod izmenjenog površinskog dela, tako da je srednja vrednost rezidualnog ugla trenja φ_r u ovim uslovima bila 28.5° , što se takođe vidi na slici 16.

Na osnovu prethodno navedenih rezultata Ričardson je tokom 1974. godine izveo prvi metod procene rezidualnog ugla trenja na osnovu rezultata dobijenih Šmitovim čekićem (Barton i Choubey, 1977):

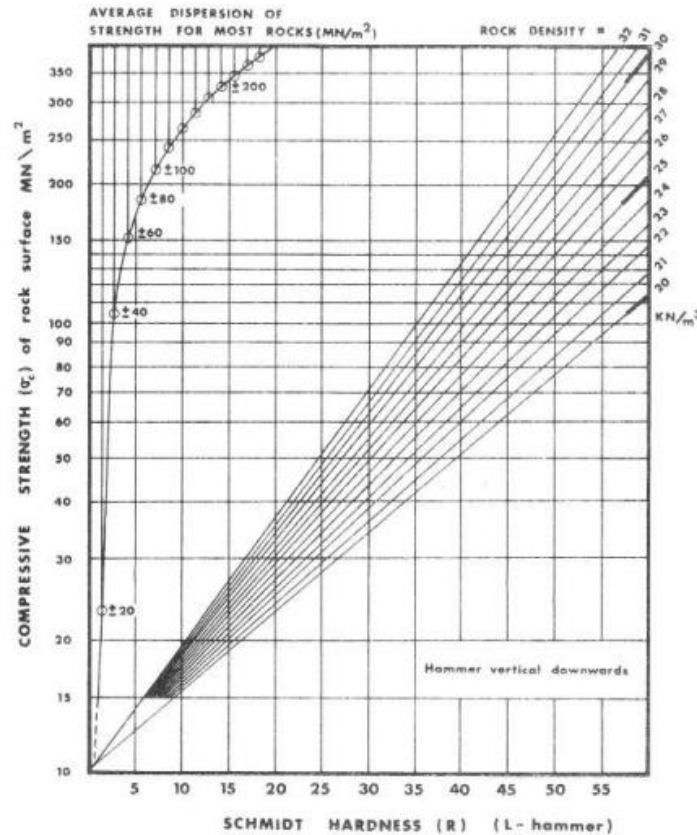
$$\varphi_r = 10^\circ + r/R \cdot (\varphi_b - 10^\circ) \quad (12)$$

r = broj odbijanja meren Šmitovim čekićem za alterisan i vlažan diskontinuitet;

R = broj odbijanja meren Šmitovim čekićem za nealterisanu i suhu površ loma.

Kasnije je Richards (1975) na osnovu ove jednačine procenio vrednost rezidualnog ugla trenja $\varphi_r = 30^\circ$ kao realnu srednju vrednost za peščare. Pored toga za sedam pukotina razmatranog peščara su vrednosti JRC-a od 5 ili 10, uzete iz tabele. Dobijena vrednost odskoka r merena Šmitovim čekićem je pretvorena u JCS vrednost na osnovu dijagrama prikazanog na slici 17. Vrednost rezidualnog ugla trenja (φ_r) procenjena je na osnovu jednačine (12). Na osnovu ovih parametara bilo je moguće proceniti ukupnu srednju vrednost vršnog ugla smičuće čvrstoće ($\arctan \tau/\sigma_n$) za sedam pukotina. Razlika u merenoj i procenjenoj vrednosti nalazila se u rasponu od 1° (merena srednja vrednost = 38.6° , procenjena srednja vrednost = 37.6°). Nakon toga Barton i Choubey (1977) bilo je jasno da je za opšti slučaj izmenjenih i neizmenjenih pukotina potrebno koristiti jednačinu:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (13)$$



Slika 17. Korelacija između vrednosti odskoka merene Šmitovim čekićem i vrednosti jednoosijalne čvrstoće (Barton i Choubey, 1977)

U radu Bartona i Choubeya (1977) prikazani su rezultati ispitivanja na 136 pojedinačnih parova uzoraka za osam različitih vrsta stena. Za potrebe ispitivanja uzeti su uzorci iz blokova koji su sadržali diskontinuitete. Ta studija je imala za cilj razvijanje jednostavne metode za procenu vršne smičuće čvrstoće, tako da nije imalo smisla meriti φ_r za svaki uzorak. Takođe je bilo nepraktično koristiti jednačinu (12) za procenu φ_r ako se relevantna vrednost φ_b nije mogla naći u literaturi. Iz ovog razloga razvili su mnogo jednostavnije rešenje u vidu testa naginjanja (tilt test).

5.1 REZIDUALNI UGAO TRENJA

Prilikom izvođenja opita naginjanja zadržani su prethodno korišćeni uzorci (136 parova uzoraka). Nakon temeljnog pranja kako bi se uklonila prašina nastala sečenjem, i nakon vazdušnog sušenja, ponovo su upareni blokovi koji su naginjani sve dok nije došlo do klizanja. Po deset parova blokova korišćeno je za karakterizaciju svake vrste stene.

Opit naginjanja u osnovi predstavlja test smicanja pri veoma malim normalnim naponima. Tokom serije izvedenih testova, većina površina bi kliznula pod uglom nagiba od oko 30° , u opsegu vrednosti normalnog napona od 1 do 5 kN/m^2 (0.01 do 0.05 kg/cm^2). Nakon opita naginjanja, neizmenjene, suve površine su testirane Šmitovim čekićem kako bi se dobila vrednost R.

U slučaju škrljaca, blokovi sa kojih su uzorci sečeni, morali su biti integrisani zbog njihove krhke prirode. Iz tog razloga se opiti naginjanja i Šmitov čekić ne mogu izvesti na blokovima velikih razmera kao kod ostalih tipova stena.

Empirijska relacija korišćena za procenu vrednosti φ_r na osnovu vrednosti φ_b dobijena na osnovu opita naginjanja, razlikuje se od jednačine (12). Prednost ove jednačine je u tome što omogućava veći raspon vrednosti rezidualnog ugla trenja φ_r , čak i kada je pukotina jako izmenjana. Pretehodna jednačina kojom je definisan rezidualni ugao trenja teži smanjenju mineraoloških razlika jer φ_r ima tendenciju da postigne minimalnu vrednost od 10° kada je r nula. Iz tog razloga Barton i Choubey (1977) formiraju sledeću zavisnost:

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20^\circ) + 20 \cdot \frac{r}{R} \quad (14)$$

φ_b = bazni ugao trenja, dobijen pomoću opita naginjanja za uzorke suve i neizmenjene površi;

r = broj odbijanja meren Šmitovim čekićem za alterisan i vlažan diskontinuitet;

R = broj odbijanja meren Šmitovim čekićem za nealterisanu i suhu površ loma.

5.2 ODREĐIVANJE BAZNOG UGLA TRENJA OPITOM NAGINJANJA

5.2.1 Aparatura za opit

Postoje različite varijante uređaja za određivanje baznog ugla trenja koje se mogu razlikovati u pojedinim karakteristikama, što zavisi od proizvođača. Glavnu komponentu koji poseduje svaki urađaj sa ovom namenom čini kruta ploča sa mogućnošću rotacije oko ose. Potrebno je da ploča pre početka opita bude horizontalna, kao i da brzina povećanja nagiba bude konstantna. Takođe aparat mora posedovati mehanizam zaustavljanja rotacije ploče u svakom trenutku. Osnovne razlike koje se javljaju kod različitih tipova uređaja je pokretački mehanizam koji može biti elektromotor, komprimovani vazduh ili ručno pokretan sa mehanizmom zupčanika i reduktora brzine.

Do sada je vršeno nekoliko istraživanja kako bi se ocenio uticaj brzine priraštaja nagiba na rezultate opita. Zaključeno je da brzina nema velikih uticaja na tačnost rezultata, dok značajan uticaj može imati vibracija ukoliko se javi tokom testiranja. Na osnovu tih istraživanja preporučene su brzine priraštaja nagiba između 10° i $20^\circ/\text{min}$ za maksimalna horizontalna ubrzanja usled vibracije manja od 0.01 g, ili 5° do $10^\circ/\text{min}$ za vibracije preko 0.01 g (Alejano i sar., 2018).

5.2.2 Dodatni uređaji

Ukoliko u aparat nije integrisan uređaj za merenje ugla nagiba, potrebno ga je uvesti kao dodatni uređaj. Potrebno je da zadovoljava tačnost u opsegu od $\pm 0.5^\circ$. Takođe se preporučuje posedovanje uređaja za registrovanje vertikalnog i horizontalnog ubrzanja. Sa razvitkom pametnih telefona napravljene su aplikacije koju poseduju mogućnost merenja obe komponente.

Ako uređaj nije u dovoljnoj meri horizontalan, izravnjanje se može vršiti pomoću malih drvenih, plastičnih ili kartonskih klinova.

5.2.3 Oblik i veličina uzoraka

Uzorci koji se koriste za test naginjanja moraju zadovoljavati određene oblike i dimenzije preporučene za opit. Kod pravougaonih uzoraka mora biti zadovoljen uslov da odnos dužine i visine mora biti veći od 4 (l/h), ali se preporučuje da taj odnos bude 6. Za odnos širine i visine (w/h) se predlaže odnos veći od 4. Kontaktne površine ($l*w$) moraju biti veće od 50 cm^2 , a širina uzorka treba da bude 10 puta veća od veličine zrna stene, a najmanje 50 mm.

Ukoliko se za potrebe ispitivanja koriste uzorci iz jezgra, osnovni uslov koji treba da ispune je isti prečnik za koji se preporučuje veličina preko 50 mm. Odnos dužine i prečnika (l/d) treba da bude minimum 2.5 ili vise. Jezgrovanje se mora vršiti dijamantskom krunom na terenu ili u laboratoriji.

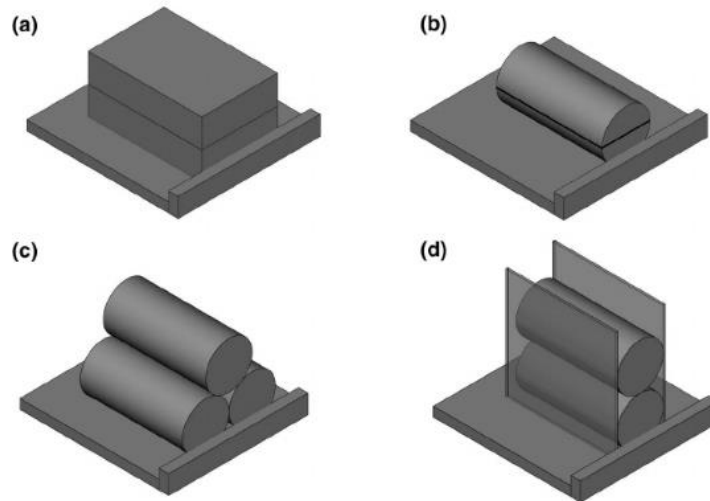
5.2.4 Priprema uzoraka

Izdvajanje uzoraka i površina pravougaonog oblika, kao i sečenje uzoraka iz jezgra po dužini moraju se obaviti pomoću mašine za cirkularno sečenje. Testere koje se preporučuju za ovu upotrebu treba da sadrže dijamantske zube u opsegu od 60-100 zuba na testeri kvaliteta u opsegu od 0.6-0.8 karata/ cm^3 . Veličina testere treba da bude takva da se iz jednog poteza može iseći predviđena površina, dok je brzinu sečenja potrebno održavati konstantnom. Planarnost površine se može vizuelno proveriti, dok se hrapavost može odrediti upotrebom laserskih uređaja. Nakon provere hrapavosti i planarnosti uzorke koji ne ispunjavaju zahtevan kvalitet treba odbaciti. Bočne strane uzorka moraju biti glatke i ravne sa dozvoljenim odstupanjem od 0.3 mm po celoj dužini uzorka. Oštećenja na uzorcima prilikom sečenja ili bušenja u vidu žljebova, udubljenja ili promene prečnika jezgra, ne mogu se tolerirati tako da je takve uzorke potrebno izostaviti iz opita.

5.2.5 Postupak ispitivanja

Postupak testiranja se započinje učvršćivanjem donjeg uzorka na nagibnu ploču uz proveru horizontalnosti ploče. Pre svakog testa uzorci i sama nagibna ploča se moraju očistiti od kamene prašine nastale tokom sečenja pomoću meke četke za farbanje. Sledeći korak predstavlja stavljanje gornjeg uzorka zadovoljavajućih dimenzija koji će sa donjim formirati kontaktnu površinu. Uzorke je potrebno postaviti tako da će smer klizanje biti duž najveće dimenzije.

Pre početka naginjanja ploče potrebno je još jednom proveriti da li je ploča sa uzorcima horizontalna i zabeležiti vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha. Nakon ovih postupaka može se započeti opit naginjanja sa brzinom rotacije od 5° - $20^\circ/\text{min}$, do trenutka kada gornji uzorak krene da kliza. U trenutku klizanja potrebno je zaustaviti rotaciju. Dužina klizanje ne treba da prelazi 10% dužine uzorka sa ciljem da se minimizira habanje i poliranje kontaktne površine. Nakon toga se beleži nagibni ugao pri kom je došlo do klizanja. Preporučuje se da se vrše ponavljanja opita za više kontaktnih površi kako bi se dobila konačna srednja vrednost ugla. Uzorci se mogu postaviti u različitim varijantama. Mogu biti pravougaonici, jezgro sečeno po dužini, tri uzorka jezgra (Stimpsonov metod), ili opit sa dva jezgra. Sve ove varijante prikazane su na slici 19.



Slika 18. Različite varijante tilt testa (Alejano i dr., 2018)

5.2.6 Proračun dobijenih vrednosti

Za pravougaone uzorke gde je kontaktna površ planarna, Alejano, Muralha, i Charlie (2018) daju sledeću jednačinu za računanje baznog ugla trenja (φ_b):

$$\varphi_b = \text{medijana } \beta_i = 1.5 \quad (15)$$

gde je β ugao pri kom je došlo do klizanja, a medijana je srednji broj po veličini među datim brojevima.

Ukoliko se izvede više od 5 ponavljanja, jednačinu je potrebno izmeniti u skladu sa tim.

Za varijantu sa tri uzorka jezgra Alejano i sar.,(2018) daju bazni ugao trenja kao:

$$\varphi_b = \text{medijana} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \tan \beta_i = 1.5 \right) \right] \quad (16)$$

Takođe, ukoliko je bilo više od 5 ponavljanja, jednačinu treba korigovati u skladu sa tim.

5.2.7 Prikazivanje rezultata

Izveštaj o rezultatima opita nagnjanja treba da sadrži sledeće informacije: (a) litološki opis stene; (b) najmanje jednu fotografiju testiranog uzorka, testirana površina se mora jasno videti na fotografiji; (c) geografski položaj uzorka, datum sečenja iz originalnih stenskih blokova uslovi skladištenja (temperatura i vlažnost vadauha); (d) za uzorke iz jezgra je potrebno navesti projekat za koji se radi, broj bušotine, dužinu i prečnik bušotine; (e) karakteristike testere za sečenje; (f) broj testiranih uzoraka; (g) dimenzije uzoraka; (g) Datum ispitivanja; (h) uslovi životne sredine tokom ispitivanja; (k) rezultate testova (φ_b) za sva ponavljanja β_i .

5.3 PROCENA KOEFICIJENTA JRC-A NA OSNOVU TILT TESTA

Za glatke, neizmenjene površine diskontinuiteta stenske mase, ovaj opit će biti test mineraoloških svojstava stenske mase. Iako bi mikroskopska ispitivanja nesumnjivo pokazala postojanje hrapavosti, u vidljivoj razmeri posmatranja test nema komponentu hrapavosti. Prilikom testiranja za sve namene površ se tretira kao nedilatirajuća. Ako se ista vrsta nagibnog ispitivanja vrši na hrapavom spoju kao što je prikazano na slici 19, ugao α pri kom dolazi do klizanja može biti za 40° ili 50° veći od φ_B . Ova dodatna smičuća čvrstoća je rezultat geometrijskog dejstva hrapavosti. Maksimalni ugao dilatancije (d_0) dat je sledećim jednostavnim odnosom (Barton i Choubey, 1977):

$$d_0 = \alpha - \varphi_r \quad (17)$$

Ugao nagiba (α) je funkcija odnosa između smičuće čvrstoće (τ_0) i normalnog napona (σ_{n0}) koji deluje na spoj u trenutku kada se dođe do klizanja pri veoma niskim nivoima napona (Barton i Choubey, 1977):

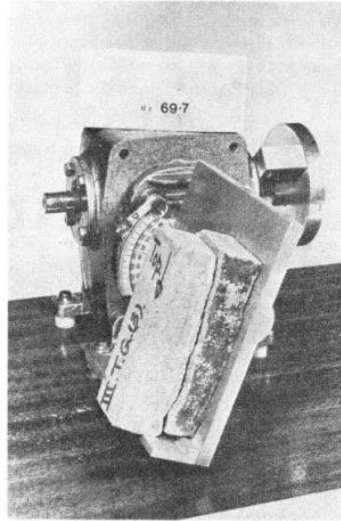
$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tau_0}{\sigma_{n0}}\right) \quad (18)$$

Efektivni normalni napon (σ_{n0}) generisan gravitacionom silom, od težine nadsloja, deluje na gornju polovinu bloka za sledeći slučaj beskonačno dugog bloka (Barton i Choubey, 1977):

$$\sigma_{n0} = \gamma \cdot h \cdot \cos \alpha \quad (19)$$

h = visina nadsloja (m);

γ = zapreminska težina za razmatranu stenu (kN/m^3);



Slika 19. Tilt test za određivanje JRC-a. Gornji deo bloka će kliznuti pod uglom od 69.7° (Barton i Choubey, 1977)

Tendencija da se zatezanje razvije na vrhu diskontinuiteta, praćena preturanjem, kada je pukotina još strmije nagnuta, čini vrednost napona dobijenog jednačinom (19) za beskonačnu ravan diskutabilnom (Barton i Choubey, 1977).

Pored toga, odnos dužine i debljine je oko 4 na testu sa slike 19, što je verovatno povoljnije od očekivanog odnosa na terenu kada su dva bloka nagnuta i u većoj razmeri nego u laboratorijskim uslovima.

Iz ovih razloga Barton i Choubey (1977), koriste sledeći empirijski odnos:

$$\sigma_{n0} = \gamma \cdot h \cdot \cos^2 \alpha \quad (20)$$

Ovo omogućava određenu neravnomernu raspodelu napona, posebno kada je α veliko. Još je važnije što se automatski ograničava opseg primene tilt testa na površine koje su dovoljno glatke da se ispituju, a da se ne dogodi preturanje umesto klizanja. Opiti na 57 uzoraka koji su bili dovoljno glatki za testiranje, pružili su procene JRC-a koje su bile dovoljno tačne da se srednji ugao čvrstoće smicanja ($\arctan \tau_n/\sigma_n$) istih uzoraka predvidi unutar 0.2° . Empirijski korekcionni faktor ($\cos \alpha$) korišćen u prethodnoj jednačini je prema tome verovatno realan. Vrednosti JRC-a se procenjuju na osnovu tilt testa korišćenjem jednačine (Barton i Choubey, 1977) :

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (21)$$

zamenom vrednosti α i σ_n pa se prema tome dobija jednačina:

$$JRC = \frac{\alpha - \varphi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (22)$$

6. UTICAJ EFEKTA RAZMERE

Veoma širok spektar veličina blokova stenske mase koji se nalaze u prirodi ima snažan i očigledan uticaj na morfologiju terena. Razlika u nagibu i visini prirodnih padina formiranih od kvarcita veličine “kocke šećera” i tela monolitnog granita, ukazuje da veličina bloka može biti kontrolni faktor ako su čvrstoća na pritisak i otpornost visoki u oba slučaja. Stoga je jasno da će veličina bloka veoma uticati na čvrstoću, deformabilnost i način deformacije stenske mase.

Dalje, Barton i Bandis (1982) navode da način deformacije ne može biti isključivo vezan za veličinu bloka. Opterećena zapremina u odnosu na veličinu bloka i nivo napreznjanja u odnosu na napon tečenja će težiti da kontroliše način deformacije. Navedeni faktori ilustruju poteškoće koje se često javljaju pri odabiru odgovarajuće veličine uzorka za opit. Obično će ispucali uzorak laboratorijske veličine biti mali u poređenju sa veličinom prirodnog bloka, i veoma mali u poređenju sa opterećenom zapreminom in situ. Efekti veličine će tada biti očigledni. Povremeno se mogu izvući jezgra velikih dimenzija koja uključuju reprezentativan broj međusobno povezanih blokova, dajući dobru aproksimaciju čvrstoće i deformabilnosti jako ispucale stenske mase.

6.1 UTICAJ RAZMERE NA UZORKE

Familije pukotina ili pojedinačne pukotine često su glavni faktor stabilnosti i deformabilnosti objekata projektovanih u steni. Pokušaji uzorkovanja i testiranja ovih površina su manje uspešni nego što se generalno čini. Razlog tome je što veličina uzorka za ispitivanje često određuje veličinu dobijenih podataka o čvrstoći.

Efekti veličine uzorka ilustrovani su na slici 20 i 21. Ovi opiti smicanja su izvedeni sa malim uticajem normalnog napona, (samo pritisak od sopstvene težine). Izražena razlika u čvrstoći je striktno funkcija različite efektivne hrapavosti spoja. Mali uzorci imaju neophodan stepen slobode da se lagano rotiraju i “osete” manje, strmije neravnine, dok monolitni blokovi registruju samo ravnije nagibe većih neravnina.

Kombinovani efekat smanjenja efektivne hrapavosti i povećane pojedinačne kontaktne površine izaziva značajnu promenu oblika krive zavisnosti smicanja od smičućeg napona kako se veličina uzorka povećava. Ovi efekti su grafički ilustrovani na slici 21. Opsežna laboratorijska ispitivanja od strane Bandisa (1980) sugerišu da veoma različit oblik ovih ilustrativnih krivulja čvrstoća-pomeranje ni na koji način nije preuveličan za slučaj grubih ili umereno grubih pukotina. Međutim, glatke planarne pukotine ukazuju na samo ograničene efekte kada se veličina uzorka poveća. Bandis (1981) nakon niza laboratorijskih ispitivanja sugeriše da različiti oblici krive (smičući napon-smicanje) za različite veličine ispitanih uzoraka nisu preterani u slučaju grubih i umereno grubih diskontinuiteta. Za glatke i ravne pukotine veličina uzorka će imati ograničen efekat.

Pored toga Bandis (1981) daje pogodan način tumačenja efekata navedenih veličina za izražavanje čvrstoće smicanja u smislu njegovih komponenti preko vršnog dreniranog ugla trenja φ' koji se izražava kao:

$$\varphi' = \varphi_r + i \quad (23)$$

gde su:

φ_r = rezidualni ugao trenja za glatku površinu;

i = komponenta ukupne hrapavosti;

Dok je komponentu ukupne hrapavosti " i " Bandis (1981) predstavio sledećim izrazom:

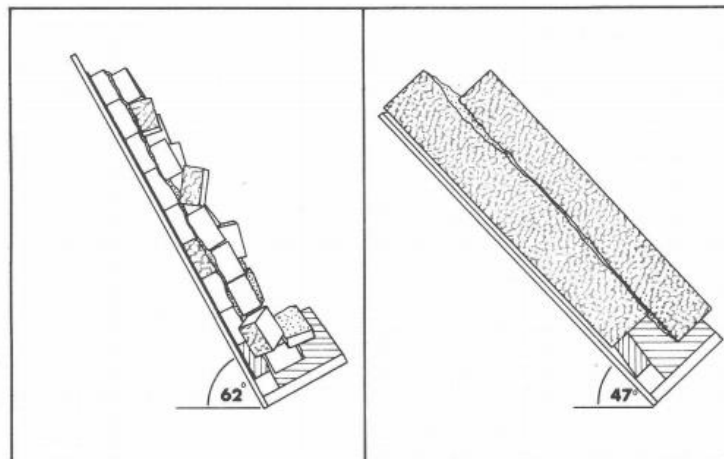
$$i = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n'}\right) \quad (24)$$

gde je:

σ_n' = efektivni normalni napon.

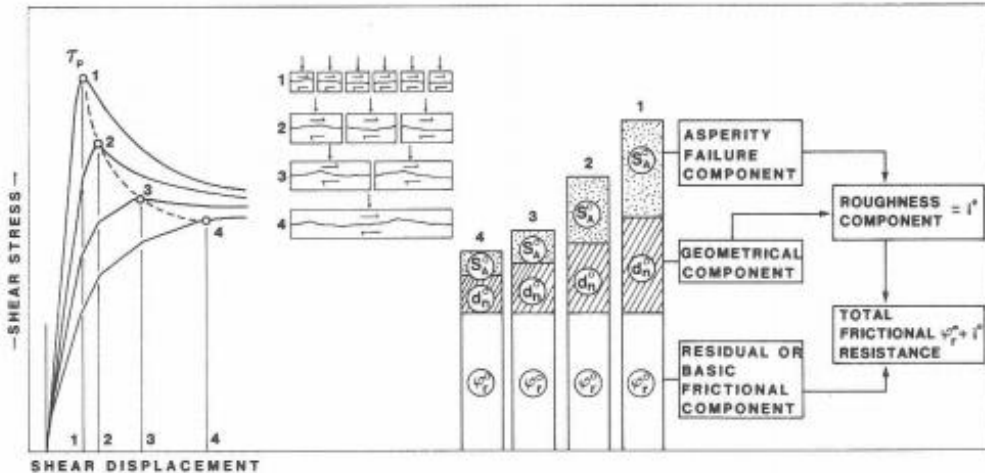
Čvrstoća na pritisak zidova pukotina je merena Šmitovim čekićem, dok je obrazac za određivanje koeficijenta hrapavosti spoja izveden na osnovu jednačina (23) i (24) Bandisa (1981):

$$JRC = \frac{\varphi' - \varphi_r}{\log\left(\frac{JCS}{\sigma_n'}\right)} \quad (25)$$



Slika 20. Uporedna analiza smičuće čvrstoće za različite veličine blokova za isti stenski material (Barton i Bandis, 1982)

Povećanje veličine uzorka izaziva tri fundamentalne promene u ponašanju koje se odlikuju smanjenjem hrapavosti, smanjenjem dilatancije i povećanjem potrebnog pomeranja kako bi se mobilisala vršna čvrstoća, što se može videti na slici 21.

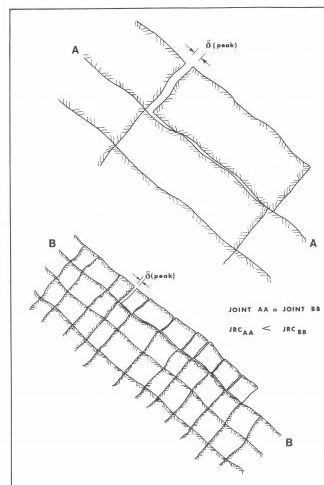


Slika 21. Promena veličine smičuće čvrstoće sa promenom veličine bloka (Barton i Bandis, 1982)

6.2 EFEKAT VELIČINE BLOKA NA SMICANJE

Efekti navedeni u prethodnom poglavlju su u osnovi rezultat smanjenog stepena slobodne rotacije kako se veličina bloka povećava. Nemogućnost velikog bloka da se malo rotira i registruje sve nivoe hrapavosti rezultira situacijom prikazanom na slici 22.

Parametar δ (intenzitet smicanja) se povećava kako se povećava veličina bloka. Tokom istraživanja vršeno je oko 650 opita u laboratoriji i *in situ*. Radi praktičnosti podaci su grupisani u tri kategorije testirane površine: laboratorija (30-300mm), *in situ* (300mm-3m) i za diskontinuitete (3-12m) (Barton i Bandis, 1982).



Slika 22. Ilustracija zavisnosti veličine bloka od veličine smicanja potrebnog za mobilizaciju vršne čvrstoće (Barton i Bandis, 1982)

Slika broj 23 prikazuje očiglednu pravilnost u intenzitetu pomeranja zapaženih u testovima na smicanje koji uključuju opterećenje pri smicanju i magnitude proklizavanja u zemljotresu koji uključuju rasterećenje pri smicanju. Analiza podataka pokazuje da sledeća jednačina daje razumnu aproksimaciju posmatranim vrednostima (Barton i Bandis, 1982):

$$\delta = \frac{L}{500} \cdot \left(\frac{JRC}{L} \right)^{0.33} \quad (26)$$

gde je:

δ = intenzitet smicanja potreban za mobilizaciju vršne čvrstoće ili nastale rasterećenjem tokom zemljotresa;

L = dužina diskontinuiteta ili smaknutog bloka (izražava se u metrima).

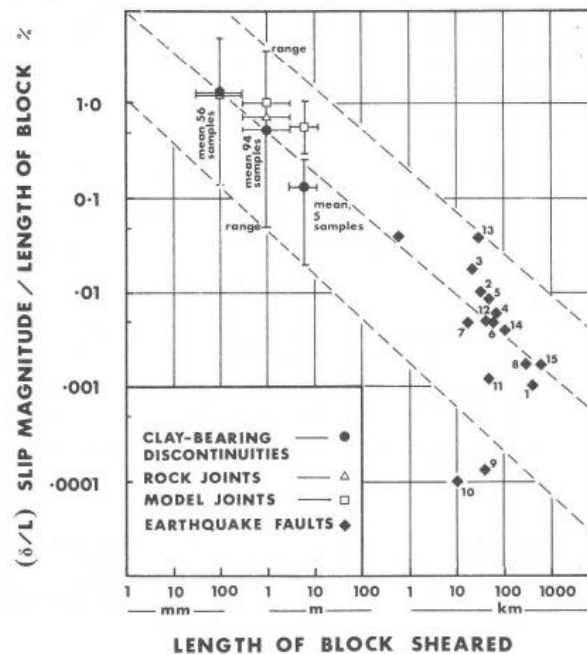
Na onovu ove jednačine mogu se dati primeri za sve tri kategorije:

Primer 1: Laboratorijski uzorak; $JRC = 15$, $L = 0.1$ m, $\delta = 1$ mm

Primer 2: Ispucali blok in situ; $JRC = 7.5$, $L = 1$ m, $\delta = 3.9$ mm

Primer 3: Rased nastao zemljotresom; $JRC = 0.5$, $L = 100$ km, $\delta = 3.6$ m

Ovi primeri pokazuju da efekat veličine koji ilustruje prethodna jednačina daje prihvatljiv stepen tačnosti za većinu praktičnih primena. Pretpostavka da je δ manje kada su površine glatke ili im je koeficijent hrapavosti veoma mali (JRC teži 0) je u skladu sa ovim rezultatima.



Slika 23. Potrebna veličina smicanja za mobilizaciju vršne čvrstoće pokazuje konzistentan efekat za različite dužine bloka (Barton i Bandis, 1982)

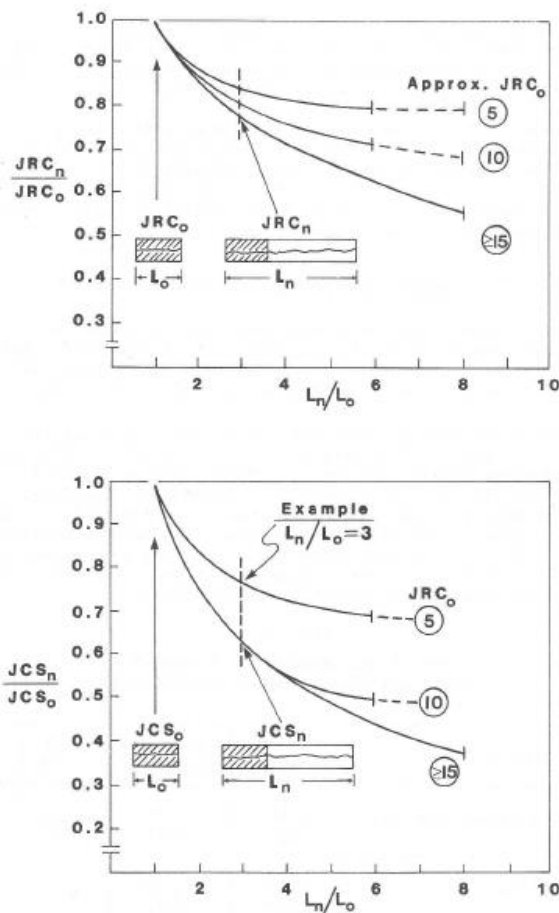
Zavisnost prema kojoj se vrši korekcija JRC-a i JCS-a obzirom na razmeru dali su Barton i Bandis (1982) i ona je predstavljena sledećim relacijama:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (27)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0} \quad (28)$$

Koeficijenti sa oznakom "0" se odnose na uzorke dužine 10 cm ($L_0=10$ cm), dok koeficijenti sa oznakom "n" odgovaraju prirodnoj veličini diskontinuiteta.

Na slici broj 24 prikazana je metoda za korekciju parametara JRC i JCS kako bi se uvažili efekti razmere između laboratorijskih i in situ veličina uzoraka.



Slika 24. Uticaj efekta razmere između laboratorijskih i in situ veličina uzoraka (Barton i Bandis, 1982)

7. UTICAJ VODE NA SMIČUĆU ČVRSTOĆU DISKONTINUITETA

Prisustvo vode u pukotinama dovodi do pojave različitih mehaničkih i hemijskih efekata, od kojih najveći uticaj ima smanjenje efektivnog napona. Voda smanjuje čvrstoću veze kristalnih zrna u steni, a takođe teži smanjenju površinske energije diskontinuiteta. To ima dodatni efekat na smanjenje čvrstoće smicanja, gde je najveći uticaj na neplanarne pukotine, neznatno hrapave. Međutim, za pukotine nekih vrsta stena voda ima mali uticaj, osim na smanjenje efektivnog napona.

Deere i Horn (1962) navode da se koeficijenti trenja masivnih kristalastih struktura, kao što su kvarcne i kalcitske stene povećavaju u prisustvu vode. Suprotno njima, za stene koje sadrže hlorit i liskune dolazi do smanjenja koeficijenta trenja. Takođe, u istraživanjima je pokazano da se dejstvo podmazivanja površina pukotina masivnih kristalastih stena povećava kako se hrapavost površine smanjuje. Na osnovu toga, ovaj efekat će uticati samo na glatke, polirane površine pukotina, poput manjih pukotina bez ispune. Coulson (1970) je utvrdio da su površine gnajsa, granita i peščara koji su polirani, a ne oštećeni tokom sečenja pokazali značajno povećanje čvrstoće u prisustvu vode.

Na većinu glatkih, poliranih površina prisustvo vode nema uticaja ili se povećava čvrstoća usled dejstva vode. Većina prirodnih, hrapavih površina pukotina smanjuje čvrstoću kada je mokra. Izuzeci se generalno mogu objasniti mineralnim sastavom. Detaljna zapažanja oštih lomova na granitnom gnajsu o kojima piše Jaeger (1959) ukazuju na to da se klizave pukotine najbrže razvijaju kada su površine zasićene, a posledice su smanjene čvrstoće na smicanje i veće zakrivljenosti anvelope čvrstoće. Takve promene u ponašanju nisu moguće za glatke pukotine, te otuda tendencija da na glatke, polirane površi voda ne utiče ili čak povećava čvrstoću.

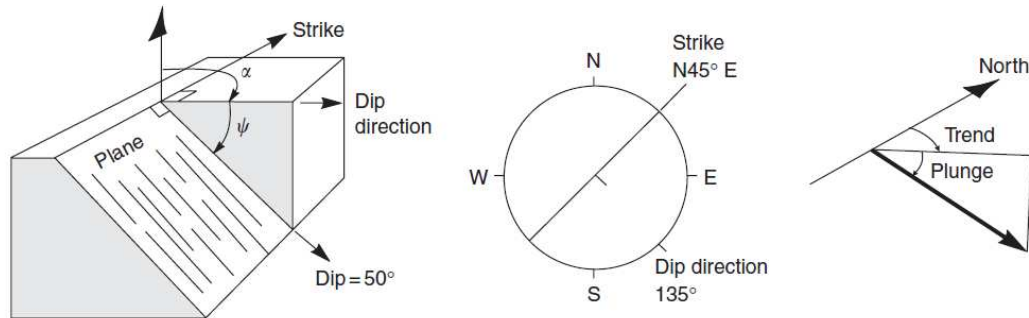
Sa inženjerskog aspekta, smanjenje smičuće čvrstoće usled prisutva vode čini se najznačajnijim efektom, a iz ograničenih podataka izgleda da se ta vrednost može kretati od 5 do 30%, a u izuzetnim slučajevima i više. U slučaju rezidualne čvrstoće, smanjenje je manje. Rezidualna čvrstoća peskiranih površina od deset vrsta stena koje je ispitivao Coulson (1970, 1972) bila je uglavnom između 5 i 10% manja kad je vlažna. Opšte smanjenje za neplanarne pukotine je povezano sa štetnim uticajem vlage na čvrstoću krhkih materijala. To zauzvrat utiče na čvrstoću na pritisak, za koju se zna da kontroliše čvrstoću smicanja neplanarnih pukotina.

8. ORIJENTACIJA DISKONTINUITETA

U prethodnim poglavljima navedeni su parametri pukotina koji se koriste prilikom definisanja Barton-Bandisovog kriterijuma loma, kao i različite metode koje se mogu koristiti pri određivanju istih. Međutim, prilikom određivanja stabilnosti stenske mase potrebno je pored definisanja svojstava diskontinuiteta utvrditi i njihov međusobni odnos.

Podaci o orijentaciji pukotina mogu se dobiti na osnovu kartiranja izdanaka stenske mase, kartiranjem kosina i podzemnih iskopa, na osnovu orijentisanog jezgra iz istražnih bušotina, različitih geofizičkih podataka ili kombinovanjem ovih metoda. Termini koji se koriste za definisanje orijentacije su pružanje, azimut i padni ugao.

Padni ugao je maksimalni nagib diskontinuiteta od horizontale, dok je azimut pada pravac horizontalnog traga linije pada mereno u smeru kazaljke na satu počevši od severa. Pružanje je teremin koji se koristi za definisanje orijentacije ravni i to je trag preseka nagnute ravni sa horizontalnom referentnom ravni. Pružanje je pod pravim uglom u odnosu na azimut pada što se može videti na slici broj 25. Ovaj sistem označavanja orijentacije diskontinuiteta olakšava prikupljanje podataka sa terena, njihov prikaz i analizu (Duncan i sar., 2005).



Slika 25. Terminologija koja definiše orijentaciju diskontinuiteta (Duncan C. Wyllie i Christopher W. Mah, 2005)

U zavisnosti od geometrijskih odnosa pojedinih diskontinuiteta i njihovog položaja može se izvršiti tzv. kinematska analiza kako bi se utvrdilo da li postoje uslovi za formiranje nestabilnosti. Kinematska analiza se vrši nanošenjem elemenata pada diskontinuiteta na stereomrežu.

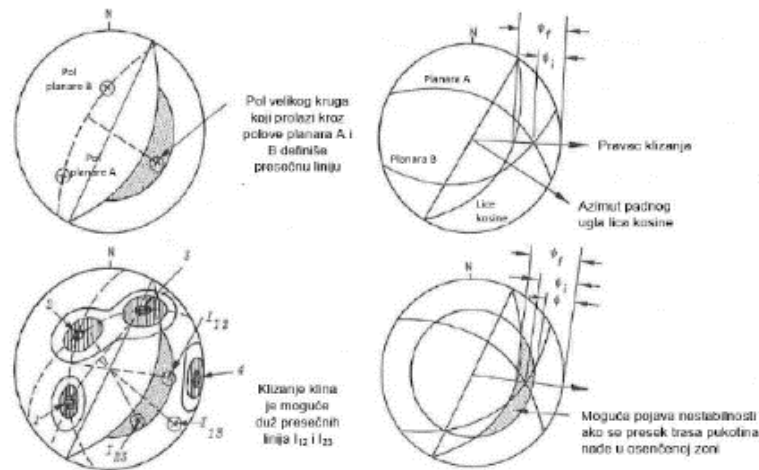
8.1 KLIZANJE KLINA

U slučaju formiranja klina pretpostavlja se da će do klizanja doći duž presečne linije dva planarna diskontinuiteta. Ako su diskontinuiteti u kontaktu svojom čitavom dužinom, do loma može doći duž presečne linije, u slučaju kada ona „isklinjava“ na licu kosine ili na čelu iskopa u podzemnim prostorijama. Padni ugao presečne linije mora biti manji od padnog ugla lica kosine ili čela iskopa, mereno u smeru tonjenja presečne linije.

Takođe, ako je navedeni geometrijski uslov ispunjen, do loma može doći u slučaju kada je padni ugao presečne ravni veći od ugla smičuće otpornosti materijala od koga je izgrađena stenska masa (pod pretpostavkom da je kohezija duž diskontinuiteta jednaka nuli). Ugao smičuće otpornosti se može predstaviti frikcionim konusom odgovarajuće veličine na stereomreži (Berisavljević i sar., 2021).

Međutim, klinovi ne moraju nužno da klize duž linije preseka dve spojne ravni. Klinovi mogu kliziti na jednoj od ravni, ako jedna ravan ima povoljniji smer za klizanje od linije preseka. U ovom slučaju, druga ravan zgloba deluje kao ravan za otpuštanje, a ne kao klizna ravan.

Osenčena površ na slici 26 predstavlja zonu u kojoj može doći do formiranja klina. Ona je sa gornje strane ograničena padnim uglom kosine, a sa donje strane uglom smičuće otpornosti materijala.



Slika 26. Različiti geometrijski uslovi formiranja klina (Hoek i Bray 1981, preuzeto iz Berisavljević i sar., 2021)

9. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA NESTABILNIH KLIHOVA

Kako bi se utvrdila mogućnost da dođe do ispadanja blokova (klinova) stenske mase oko konture iskopa primenjena je “teorija bloka” (Goodman i Shi, 1985) koja je primenljiva u tvrdim, blokovski izdijeljenim stenskim masama, kod kojih se usled nepovoljne orijentacije diskontinuiteta javljaju kinematski uslovi za kretanje blokova. U analizi je korišćen programski paket UnWedge (RocScience, inc.).

Na bazi ulaznih podataka definisan je: položaj, dimenzije i veličina faktora sigurnosti nestabilnih klinova. U nastavku će ukratko biti izložen teorijski koncept teorije bloka, nakon čega će biti prikazan praktičan primer.

9.1 TEORIJSKE OSNOVE TEORIJE BLOKA

Teorija bloka se suštinski bazira na geometrijskoj analizi moguće pojave “ključnih” blokova određene veličine i položaja u odnosu na geometriju iskopa, u tri dimenzije. Ključni blok se može definisati kao blok kod koga postoji mogućnost kretanja ka konturi tunelskog iskopa i koji je nestabilan ukoliko se ne podgradi.

S obzirom da su prilikom kartiranja tunelskog iskopa u svakom koraku zabeleženi elementi pada diskontinuiteta (i ostale karakteristike značajne sa aspekta analize teorijom bloka) ovi podaci su iskorišćeni za analizu na svakom poprečnom preseku. Da bi teorija bloka bila primenljiva potrebno je da stenska masa bude ispresecana sa najmanje 3 familije pukotina. Ove familije u preseku sa nepodgrađenim iskopom formiraju klinove (tetraedar) čije dimenzije i položaj (u odnosu na konturu iskopa) zavise od orijentacije diskontinuiteta i orijentacije i geometrije tunelskog iskopa.

U zavisnosti od parametara smičuće čvrstoće duž diskontinuiteta određuju se veličine faktora sigurnosti svakog klina. U slučaju kada je faktor sigurnosti klina $FoS \leq 1.0$, smatra se da neposredno nakon iskopa može doći do ispadanja klina. U slučaju kada je u stenskoj masi prisutno 4 ili više familija pukotina, moguće je uraditi analizu za kombinaciju bilo koje 3 familije i na taj način odrediti najkritičniji slučaj. Analize se mogu ponoviti sa različitim kombinacijama familija pukotina i na taj način definisati sve potencijalno nestabilne blokove oko konture iskopa.

Veoma je važno napomenuti da dimenzije klinova zavise od kontinualnosti pukotina i dužine nepodgrađenog iskopa. U slučaju kontinualnih pukotina i beskonačne dužine iskopa veličina bloka je ograničena maksimalnom veličinom „ključnog bloka”, koja se može dobiti iz geometrijskih odnosa kao najveća piramidalna površ u preseku familija pukotina i iskopa. Da bi se dobile realne dimenzije klinova za svaku analiziranu stacionažu usvojena dužina nepodgrađenog iskopa koja odgovara dužini iskopnog koraka, a kontinualnost je usvojena na bazi RMR klasifikacije.

Trodimenzionalna analiza teorije bloka se zasniva na primeni vektorske analize.

Stabilnost klinova oko konture podzemnog iskopa se određuje u nekoliko koraka:

1. U prvom koraku se određuje geometrija i položaj klina oko konture iskopa (prema gore objašnjenjnoj teoriji bloka). Za ovako definisan klin mogu se odrediti njegova zapremina, površina svake strane, vektori normala na svaku ravan klina, slika 27;

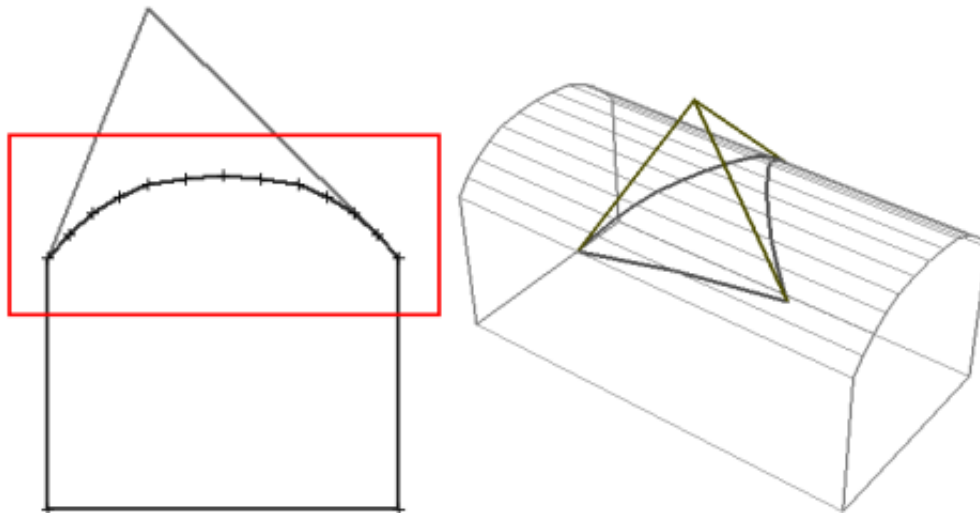
2. Zatim se određuju sve sile koje deluju na klin, na osnovu kojih se određuju rezultante aktivnih (gurajućih) i pasivnih (otpornih) sila;

3. U narednom koraku se određuje smer klizanja klina;

4. U sledećem koraku se određuju normalne sile koje deluju na stranama klina;

5. Zatim se određuju otporne sile kao posledica smičuće čvrstoće diskontinuiteta

6. U poslednjem koraku se određuje veličina faktora sigurnosti kao odnos otpornih i gurajućih sila.



Slika 27. Primer klina u dve i tri dimenzije oko konture podzemnog iskopa (Rocscience, 2019)

Rezultujući aktivni vektor sila (**A**) se dobija kao:

$$\mathbf{A} = \mathbf{W} + \mathbf{C} + \mathbf{X} + \mathbf{U} + \mathbf{E} \quad (29)$$

gde je, **W** - vektor težine klina; **C** - vektor težine torkreta; **X** - vektor aktivnog pritiska na klin; **U** - vektor pritiska vode; **E** - vektor seizmičke sile.

Rezultujući pasivni vektor (**P**) se dobija vektorskim sabiranjem sledećih komponentalnih vektora:

$$\mathbf{P} = \mathbf{H} + \mathbf{Y} + \mathbf{B} \quad (30)$$

gde je, **H** - vektor smičuće otpornosti torkreta; **Y** - vektor pasivnog otpora; **B** - vektor rezultantne sile od ankeri.

Veličina svakog od navedenih vektora može se odrediti prema jednačinama koje su prikazane u teorijskom uputstvu programa (Unwedge, Theory manual).

U analizi mogućnosti ispadanja klina oko konture nepodgrađenog iskopa tunela od aktivnih i pasivnih vektora značajni su vektori težine klina, dok vektor seizmičke sile, vektori aktivnog i pasivnog pritiska i vektori težine i smičućeg otpora podgrade (torkreta), pritiska vode i rezultantne sile od ankeri nisu merodavni.

Smer klizanja klina se određuje prema teorijskim osnovama teorije bloka. Za ove potrebe koriste se samo aktivne sile (**A** vektor). Za klin oblika tetraedra (oivičen sa tri familije pukotina i površinom iskopa) postoji 7 mogućih pravaca duž kojih može doći do klizanja. Klizanje može biti posledica gravitacionog ispadanja (ili izdizanja klina), kretanja po nekoj od tri familije pukotina ili kretanja duž presečne linije dve familije pukotina.

Proračun smera klizanja podrazumeva da se u prvom koraku odredi svih sedam mogućih pravaca, nakon čega se u drugom koraku određuje koji je od sedam mogućih pravaca klizanja validan. Ovo se određuje uspostavljanjem vektorskih nejednčina u svakom pojedinačnom slučaju. U slučaju da određeni pravac zadovoljava sve vektorske nejednakosti, on predstavlja pravac klizanja. U suprotnom, tj. ukoliko svih 7 mogućih pravaca klizanja nisu preferencijalni pravci, duž kojih može doći do klizanja, klin je bezuslovno stabilan.

Normalne sile koje deluju na ravan(i) po kojoj dolazi do klizanja klina (jedna u slučaju klizanja duž pukotine i dve u slučaju klizanja duž presečne linije) određuju se u zavisnosti od prethodno određenog pravca klizanja. One su neophodne kako bi se odredio normalni napon (sila/površina) na ravan klizanja. Normalni napon se koristi prilikom određivanja smičuće čvrstoće duž diskontinuiteta.

Kao što je već napomenuto, za definisanje smičuće čvrstoće diskontinuiteta korišćen je Barton-Bandis-ov kriterijum loma.

Otporna sila (J_i), koja je posledica angažovanja smičuće čvrstoće duž diskontinuiteta, i koja deluje u smeru suprotnom od smera klizanja može se odrediti iz sledeće jednačine:

$$J_i = \tau_i \cdot \alpha_i \cdot \cos\theta_i \quad (31)$$

gde je, τ_i - smičuća čvrstoća i-tog diskontinuiteta definisana BB kriterijumom loma; α_i - površina i-tog diskontinuiteta; θ_i - ugao između pravca klizanja i i-te pukotine.

Veličina faktora sigurnosti, u slučaju nepodgrađenog iskopa (bez dejstva seizmičke i sile od vode), određuje se po principu metoda granične ravnoteže na osnovu sledeće jednačine:

$$Faktor\ sigurnosti = \frac{Otporne\ sile\ (smičuća\ čvrstoća)}{Gurajuće\ sile\ (težina\ klina)} \quad (32)$$

Prilikom određivanja veličine faktora sigurnosti razmatra se samo uslov ravnoteže sila u smeru klizanja, dok se uslov ravnoteže momenata zanemaruje. Ovo je opravdano imajući u vidu da se radi o planarnom klizanju, te zanemarivanje uslova ravnoteže momenata nema velikog uticaja na konačni rezultat.

10. PRAKTIČNI PRIMER ANALIZE STABILNOSTI KLINOVA

Tokom izvođenja niskopa do ležišta bakra i zlata “Čukaru Peki“ (2019/20 god.) vršeno je kontinualno inženjerskogeološko karitanje čela i zidova niskopa, kao i klasifikacija stenske mase prema RMR sistemu. Na osnovu klasifikacije stenske mase vršen je izbor odgovarajućeg tipa podgrade. Međutim, u pojedinim intervalima niskopa dešavale su se nestabilnosti u vidu ispadanja klinova pre ili nakon ugrađene primarne podgrade. To je bio razlog da se uradi ponovna procena svojstava stenske mase u cilju prilagođavanja ili izmene elemenata podgradne konstrukcije u skladu sa novim vrednostima parametara. Rezultati su prikazani u formi “Specijalnog izveštaja o geotehničkim parametrima u niskopu Čukaru Peki”, (Berisavljević i Marjanović, 2020).

U cilju preciznijeg određivanja karakterisitka stenske mase u niskopu vršene su opsežne analize koje su obuhvatale terenska i laboratorijska ispitivanja. Jedna od analiza vršenih u sklopu redefinisavanja svojstava stenske mase bila je i analiza stabilnosti klina primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma pomoću softvera UnWedge (RocScience, inc.).

Izgled ulaznog portala niskopa prikazan je na slici broj 28.



Slika 28. Izgled ulaznog portala u niskop sa odlagališta

10.1 OPŠTI PODACI O NISKOPU

Niskop je lociran na oko 3 do 6 km južno od Bora na području Brestovac-Metovnica, u neposrednoj okolini sela Brestovac.

U morfološkom pogledu šire područje analizirane oblasti je brdskog tipa sa srednjom nadmorskom visinom od približno 500 m. Prema morfološkim karakteristikama prostor je sličan celokupnom borskom istražnom prostoru. Čine ga srednje do visoko brdski tereni sa nadmorskim visinama od 300 m do preko 400 m.

Niskop u najvećem delu prolazi kroz borske klastite, odnosno slojevite konglomerate i peščare. Na poslednjih nekoliko stotina metara zastupljeni su tankoslojeviti do slojeviti laporci, mestimično sa izraženom laminarnom slojevitošću, i na samom kraju niskopa epiklastiti. Dublje delove terena izgrađuju andeziti koje niveleta niskopa neće zahvatiti. U strukturnom pogledu uže područje zone niskopa se nalazi u domenu izražene antiforme sa osom poniranja prema severozapadu.

U okviru niskopa izvođene su dve paralelne cevi na osovinskom rastojanju od 30 m, istočna i zapadna, pojedinačne dužine oko 3 km, sa podužnim padom od 8° i poprečnim prolazima raspoređenim na svakih 300 m. Poprečni presek površine cevi iznosi približno 30 m^2 i izvođen je u obliku potkovice. Proširenja u cevima su izvođena na svakih 150 m gde se površina poprečnog preseka cevi povećavala na 42 m^2 . Iskop cevi je vršen u jednoj fazi miniranjem punog profila nakon čega bi čelo iskopa mašinski kavalari i izvozili iskopanu stensku masu.

10.2 IZVEDENA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe provere i redefinisivanja parametara stenske mase korišćeni su podaci dobijeni na osnovu kartiranja i RMR klasifikacije stenske mase tokom izvođenja. Pored toga bilo je potrebno uraditi još nekoliko terenskih i laboratorijskih opita na osnovu kojih su određene karakteristike stenske mase i pukotina. Urađeni su opiti za određivanje:

- Jednoaksijane čvrstoće na pritisak (UCS);
- Indeksa tačkaste čvrstoće (PLT);
- Zatezne čvrstoće (Brazilianski opit);
- Čvrstoće na pritisak zidova pukotina (JCS);
- Koeficijenta hrapavosti pukotina (JRC);
- Baznog ugla trenja φ_b .

Ispitivanja stenske mase obuhvatila su interval niskopa od 174.11 m, od stacionaže W 1365.23 m do W 1539.34 m za zapadnu cev, i E 1362.44 m do E 1552.26 u dužini od 189.82 m za istočnu cev. Najveći nadsloj u niskopu iznosi oko 500 m, dok je nadsloj u intervalu gde su vršena ispitivanja iznosio oko 300 m. Iskop u ovom intervalu je izvođen u borskim klastitima, litološkom paketu sačinjenom od krupnozrnih konglomerata koga proslojavaju peščari i šejlovi.

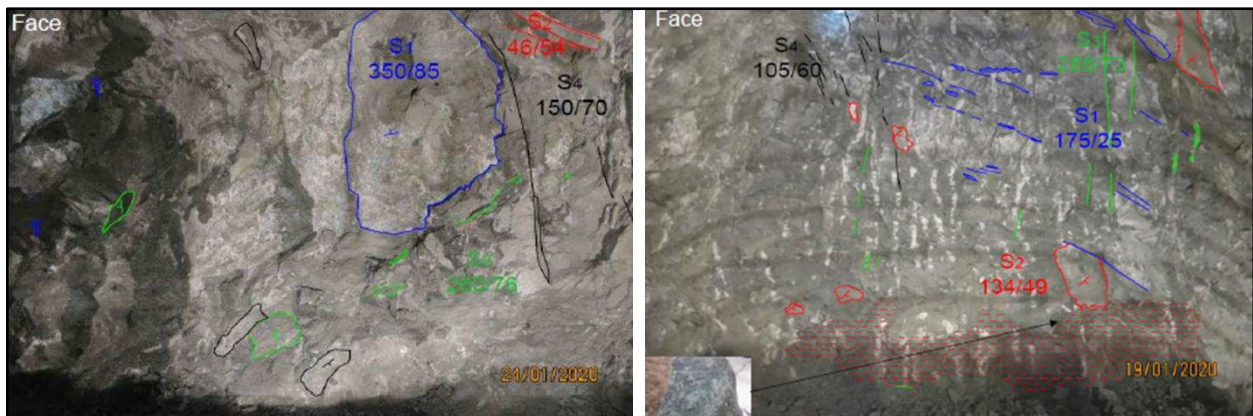
10.3 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

10.3.1 Zastupljene inženjerskogeološke jedinice

Izdvojene su dve inženjerskogeološke sredine na osnovu kartiranja i klasifikovanja stenske mase u niskopu. U pogledu inženjerskogeoloških karakteristika zastupljeni su:

- 1) Srednje čvrsti, ispucali do veoma ispucali sivi konglomerati i peščari (SaCg), sa četiri familije pukotina. Pukotine su zeva manjeg od 5 mm zapunjene belom kalcitnom ispunom. Površni pukotina su blago do umereno alterisane, umereno hrapave do glatke. Orjentacije pukotina pogoduje formiranju klinova, ali zbog kvaliteta stenske mase i kvaliteta pukotina mogućnost ispadanje klinova u ovoj sredini je veoma mala.
- 2) Slabi i veoma ispucali zelenkasti konglomerati i šejlovi (SaCg*). Klasti konglomerata su cementirane hloritsko-glinovitim matriksom dajući mu niske vrednosti jednoaksijalne čvrstoće. Zbog svoje slabe prirode i visokog stepena ispucalosti materijal se lako kida. Ova sredina je zastupljena u blizini rasednih zona. Prisustvo značajnije količine podzemne vode koja povećava porni pritisak u stenskoj masi je česta pojava u ovoj sredini. Intenzivna tektonika je proizvela klizave površi pukotina sa orjentacijom pogodnom za ispadanje klinova ili planarnog klizanja. Povremeno je potrebno čelo iskopa dodatno osigurati određenim elementima podgrade (torkret, ankeri, čelične mreže), kako bi se sprečile strukturne nestabilnosti.

Zastupljene sredine se smenjuju u intervalima od nekoliko metara do nekoliko desetina duž niskopa. Promene su obično nagle i događaju se u jednom koraku iskopa kada stensku masu jako dobrih i povoljnih karakteristika smenjuje veoma loša i nepovoljna. Ove nagle promene se mogu objasniti genezom borskih klastita. Na slici broj 29 mogu se videti čela karakteristična za ove dve sredine.

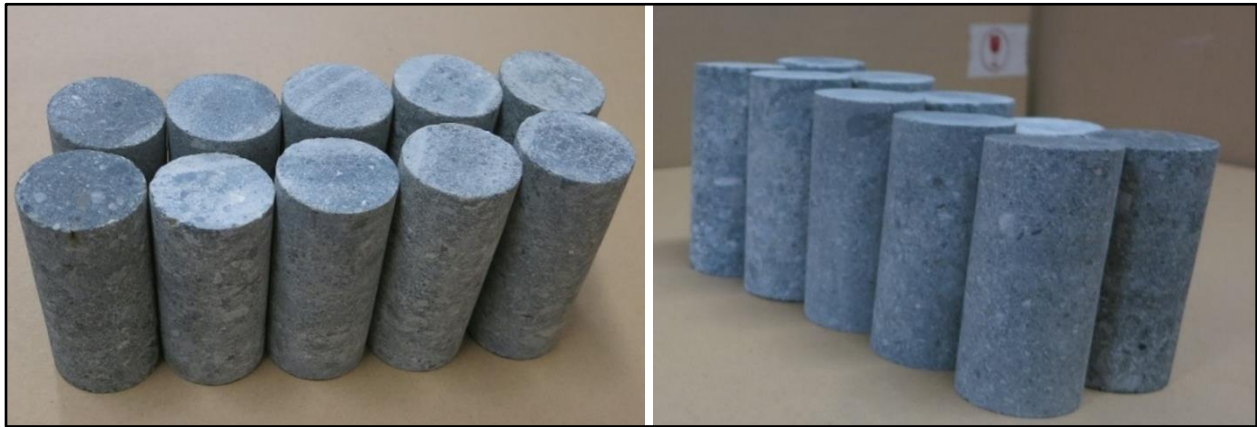


Slika 29. Tipičan izgled čela iskopa u Borskim klastitima za SaCg (levo) na stacionaži E 1538.62 m (RMR=42) i SaCg (desno) na stacionaži E 1508.45 m (RMR=26)*

10.3.2 Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak borskih klastita

Iz blokova stenske mase koja odgovara stacionaži E 1536.22 m izdvojeno je 10 uzoraka za laboratorijska ispitivanja. Uzorci su pripremljeni prema ISRM i ASTM standardima, izdvojeni su i ispitani u laboratoriji za mehaniku stena Rudarskog fakulteta u Boru. Vrednost jednoaksijalne čvrstoće određena je na uzorcima koji pripadaju konglomeratima dobrih do veoma dobrih karakteristika.

U tabeli broj 1 dati su rezultati opita jednoaksijalne čvrstoće na pritisak za uzorke prikazane na slici 30.



Slika 30. Uzorci izvađeni iz blokova koji odgovaraju stacionaži E 1536.22 m

Tabela 1. UCS vrednosti uzoraka stenske mase sa stacionaže E 1536.22 km

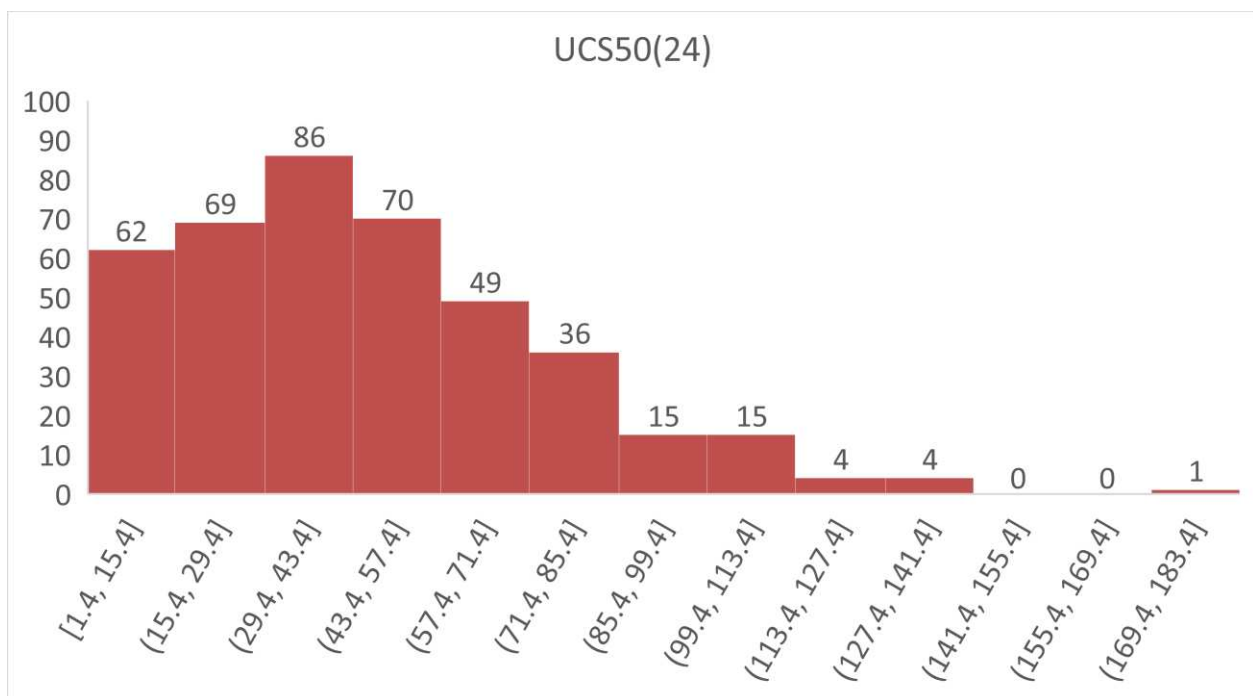
Uzorak Br.	Zapreminska težina kN/m ³	UCS (MPa)
U-1	26,0	68.72
U-2	26,1	56.24
U-3	26,1	33.03
U-4	26,1	31.1
U-5	26,0	50.28
U-6	26,0	63.19
U-7	26,1	83.31
U-8	26,1	62.51
U-9	26,0	75.42
U-10	26,0	84.11
Prosečna vrednost	26.05	59.91

Rezultati UCS opita korišćeni su za proveru vrednosti PLI-a dobijenih na osnovu PLT opita za stensku masu na stacionaži E 1536.22 m .

Od početka učestvovanja na projektu stručnjaci sa Rudarsko-geološkog fakulteta angažovani kao konsultanti koristili su PLT opit za određivanje indeksa tačkaste čvrstoće (PLI), u cilju preciznije klasifikacije stenske mase. Nakon opsežnog pregleda literature i prema iskustvu, faktor konverzije korišćen za konverziju PLI vrednosti u UCS bio je 24.

Prosečne vrednosti jednoaksijalne čvrstoće na pritisak (za svako kartirano čelo) prikazane su na slici broj 3. Na slici broj 31 sumiraju se PLI rezultati koristeći faktor korekcije 24 (UCS=24PLI).

Na stacionaži E 1536.22 m vrednosti USC-a dobijene na osnovu PLI-a kretale su se u rasponu od 22 do 84 MPa, dok je prosečna vrednost iznosila 56 MPa. Rezultati dobijeni laboratorijskim opitom prikazani u tabeli broj 1 bili su u rasponu od 31 do 84 MPa, dok je prosečna vrednost bila 60 MPa. Ovo pokazuje veoma dobro podudaranje rezultata što znači da je usvojena metodologija bila adekvatna.



lika 31. Histogram od 411 izvedenih PLT opita prikazuje: Na x osi intervale sa rasponima izmerenih vrednosti UCS50 (MPa); Na y osi broj uzorka zastupljenih po intervalima definisanim na x osi.

10.3.3 Zatezna čvrstoća (Brazilijanski opit) borskih klasita

Vrednosti zatezne čvrstoće određene su Brazilijanskim opitom na 10 uzoraka izvađenim iz blokova sa stacionaže E 1536.22 m isto kao za opit jednoaksijalne čvrstoće. Teoretski opseg vrednosti zatezne čvrstoće iznosi 10-20% UCS vrednosti.

Uzorci su pripremljeni prema ISRM i ASTM standardima, izdvojeni su i ispitani u laboratoriji za mehaniku stena Rudarskog fakulteta u Boru .

Tabela 2. Vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka stenske mase sa stacionaže E 1.0536.22 m

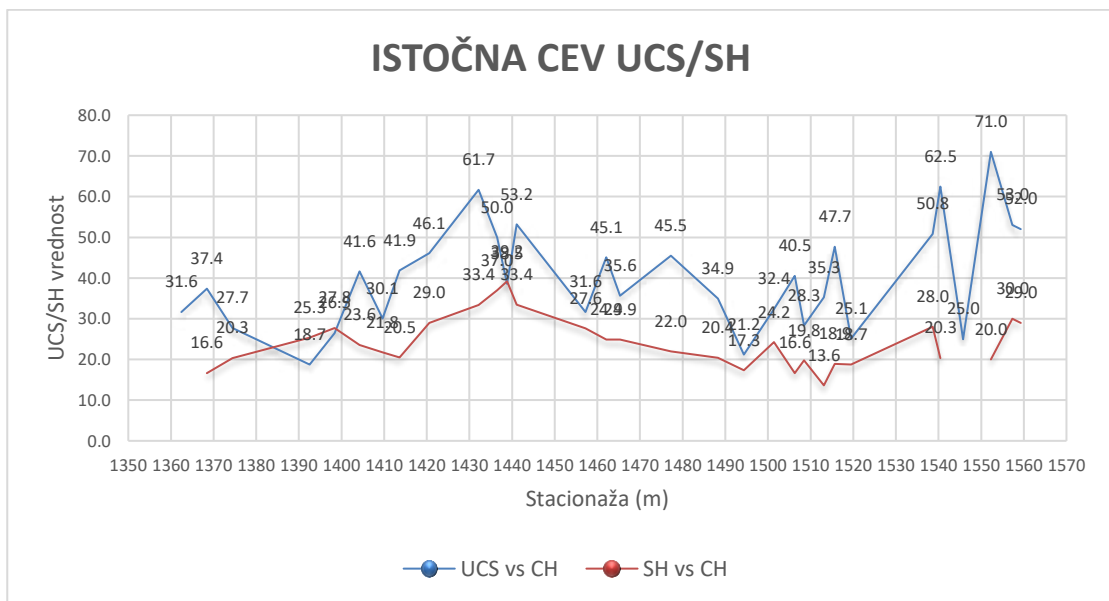
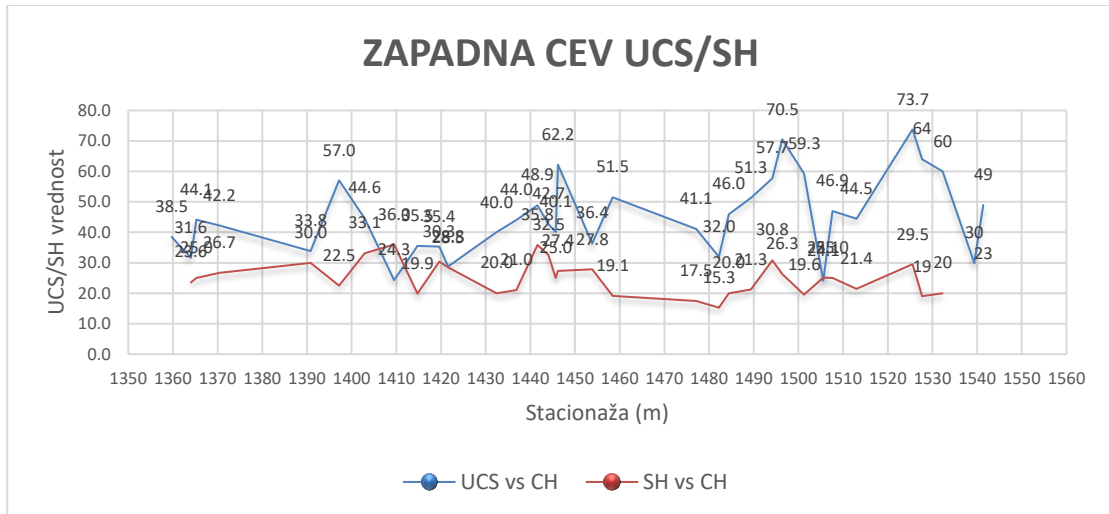
Uzorak br.	h (mm)	d (mm)	m (g)	ρ (kg/dm ³)	F (kN)	σ_t (MPa)	σ_1 (MPa)
1	30.1	45.5	126.9	2.59	11.50	-5.3	16.0
2	33.5	45.4	141	2.60	14.38	-6.0	18.1
3	29.9	45.3	122.7	2.55	15.69	-7.4	22.1
4	34	45.4	147	2.67	15.65	-6.5	19.4
5	32	45.5	133.4	2.56	10.72	-4.7	14.1
6	30.2	45.4	125.8	2.57	16.33	-7.6	22.7
7	31.6	45.3	133	2.61	15.71	-7.0	20.9
8	33.1	45.4	138.5	2.58	12.58	-5.3	15.9
9	30.4	45.4	126.1	2.56	12.00	-5.5	16.6
10	30.4	45.4	128.4	2.61	11.40	-5.3	15.8
Prosečna vrednost	31.52	45.40	132.28	2.59	13.60	-6.1	18.2


Slika 32. Izgled uzoraka pre i posle izvedenog Brazilijanskog opita

10.3.4 Čvrstoća na pritisak zidova pukotina

Čvrstoća na pritisak zidova pukotina je određena korišćenjem Šmitovog čekića L i N tipa. Usvojena je metodologija da se opiti izvode u što većem broju po površima pukotina na čelu i bokovima iskopa, u nepodgrađenim uslovima. U slučajevima kada je na čelu iskopa preovladavala stenska masa ujednačenih karakteristika usvajana je prosečna vrednost JCS-a za to čelo. Ove vrednosti su grafički prikazane na slici broj 33.

Grafikoni na slici broj 33 prikazuju prosečne vrednosti odskoka Šmitovog čekića za svako kartirano čelo u prikazanom intervalu i njihovo poređenje sa prosečnom vrednosti UCS-a.

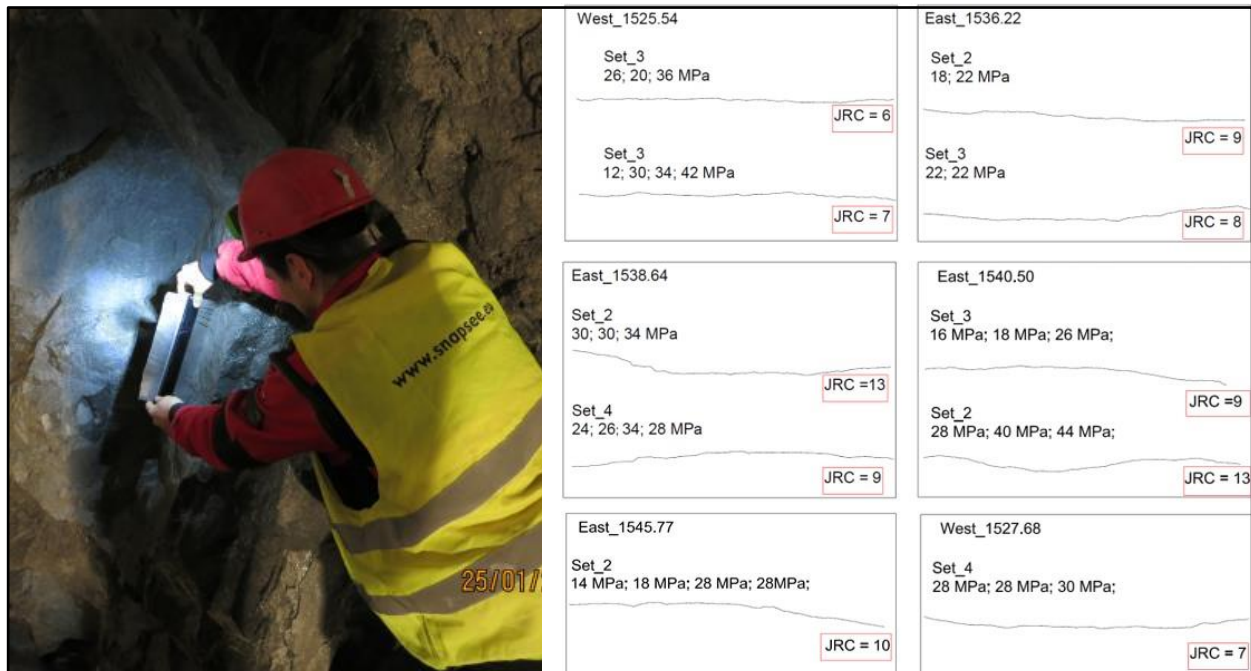


Slika 33. Prosečne vrednosti UCS i SH duž istočne i zapadne cevi u niskopu

10.3.5 Koeficijent hrapavosti pukotina

Profili hrapavosti pukotina su mereni pomoću Bartonovog profilmetra. Prikupljeni profili su digitalizovani i upoređivani sa Standardizovanim profilima na osnovu kojih je procenjena vrednost JRC-a za mereni diskontinuitet. Procenjene vrednosti su proverene korišćenjem zavisnosti koju je dao Maerz (1990) JRC 411(Rp-1), gde je Rp odnos prave dužine profila L_t i njegove projektovane dužine L (najkraće rastojanje).

Uzorkovanje profila hrapavosti na stacionaži W 1.525.52 m i nekoliko digitalizovanih profila merenih na različitim stacionažama za karakteristične familije pukotina prikazano je na slici broj 34.



Slika 34. Uzorkovanje profilmetrom i digitalizovani profili hrapavosti

10.3.6 Bazni ugao trenja

Bazni ugao trenja određen je opitom naginjanja predloženom prema ISRM-u (Alejano i sar., 2018) Stimpsonovom metodom u varijanti sa tri cilindrična uzorka. Test je obavljen na tri seta uzoraka (ukupno devet jezgara). Merenje nagiba pri kom dolazi do klizanja gornjeg uzorka ponavljano je pet puta za svaki set. Na osnovu ove vrednosti sračunat je bazni ugao trenja φ_b pomoću jednačine (15). Na slici 35 prikazan je raspored elemenata prilikom izvođenja opita naginjanja sa tri cilindrična uzorka.



Slika 35. Opit naginjanja sa tri uzorka

Kompletni rezultati opita su prikazani u tabeli broj 3. Dobijena je prosečna vrednost baznog ugla trenja od $\varphi_b=33^\circ$. Ova vrednost je iskorišćena za dobijanje rezidualnog ugla trenja φ_r neophodnog u primeni Barton-Bandisovog kriterijuma loma.

Tabela 3. Rezultati dobijeni opitom naginjanja

Uzorak 1	1	2	3	4	5
β	33.72	37.4	36.75	37.4	37.52
phib_n	30.03	33.51	32.89	33.51	33.62
$\text{phib}_{\text{median}}$	33.51				
Uzorak 2	1	2	3	4	5
β	35.21	36.3	36.75	37.65	35.59
phib_n	31.43	32.46	32.89	33.75	31.79
$\text{phib}_{\text{median}}$	32.46				
Uzorak 3	1	2	3	4	5
β	37.12	36.3	36.66	38.56	37.7
phib_n	33.24	32.46	32.80	34.62	33.80
$\text{phib}_{\text{median}}$	33.24				

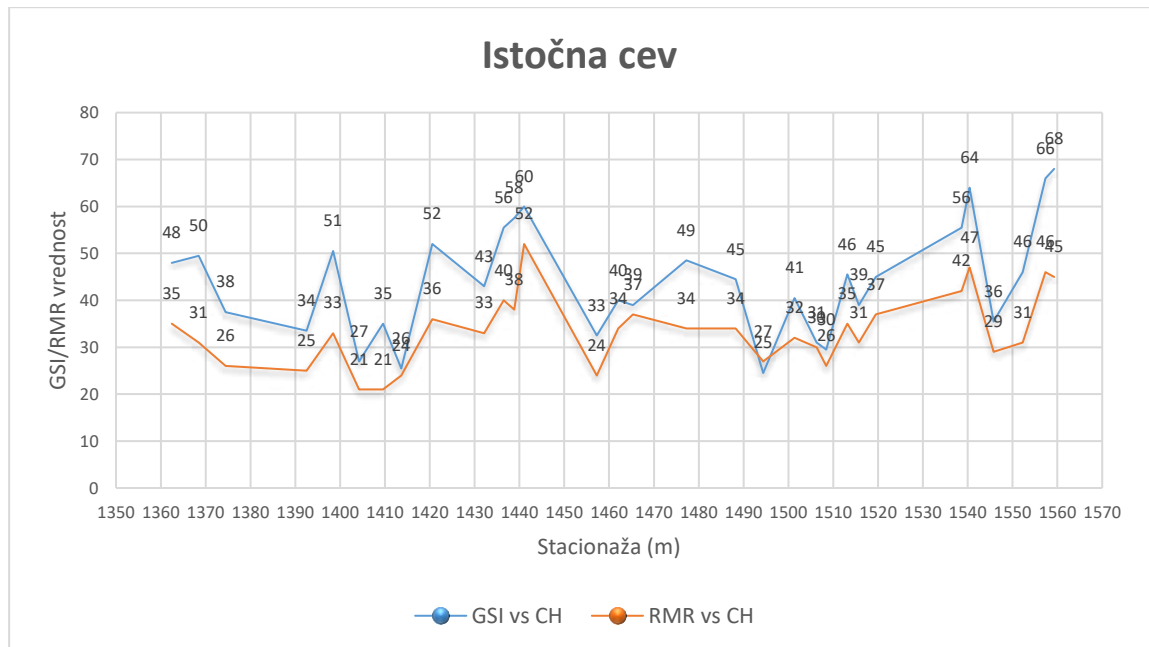
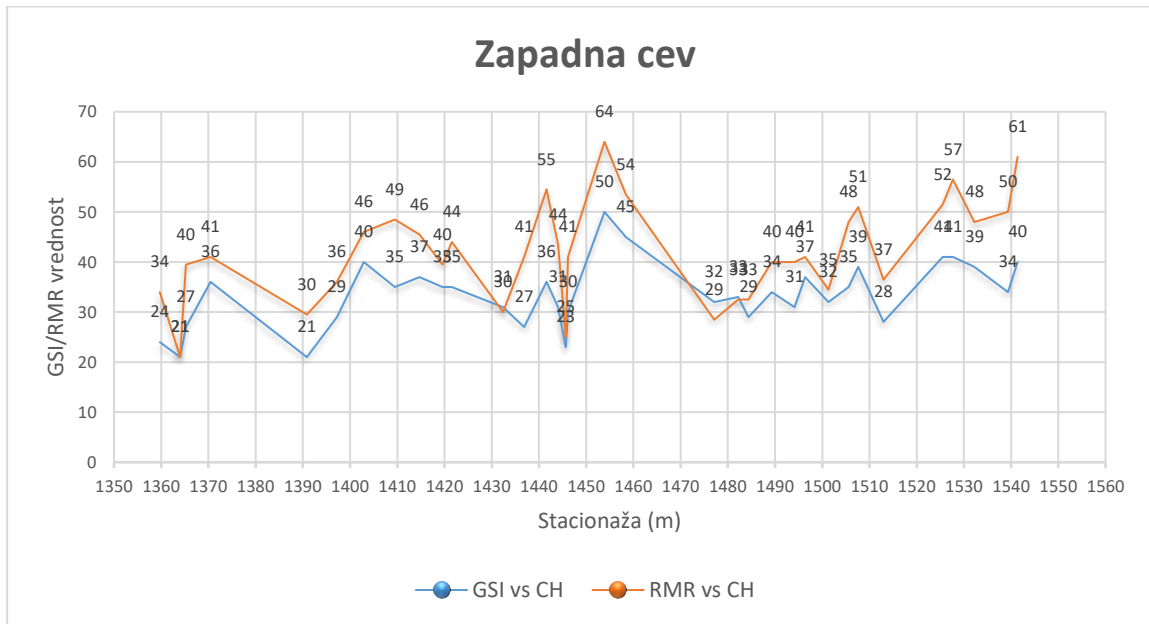
10.3.7 GSI klasifikacija zastupljene stenske mase

Kako bi se odredili parametri stenske mase po Hoek-Brown-ovom kriterijumu određena je vrednost geološkog indeksa čvrstoće (GSI) na svakom kartiranom čelu. Vrednosti su određene inverznom metodom na osnovu parametara Jcon89 koji definiše stanje pukotina prema pet parametara iz RMR klasifikacije. Drugi parametar pomoću koga se definiše GSI vrednost na kvantifikovanom dijagramu predstavlja ispucalost stenske (RQD).

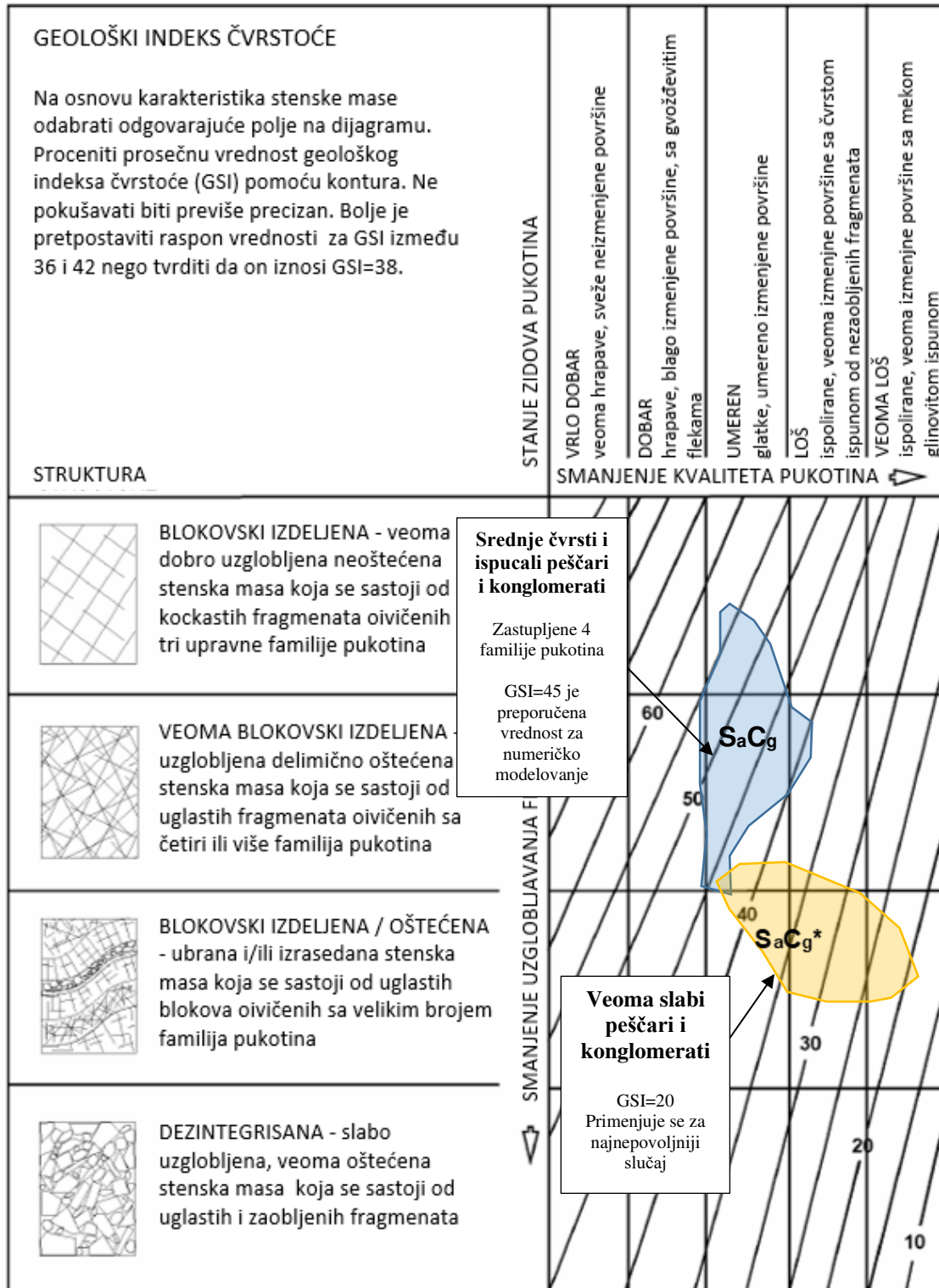
Čela iskopa su kategorizovana prema preovlađujućem materijalu (CaCg ili CaCg*). Zatim je određena prosečna GSI vrednost za svako čelo i postavljena na kvantifikovani GSI dijagram. Položaj svake GSI vrednosti je omogućio da se opseg konturiše kao što je prikazano na slici 37.

Evidentno je da vrednosti GSI-ja za CaCg materijal kreću između 40 i 50, dok za CaCg* Zmaterijal ove vrednosti mogu biti u rasponu od 20 do 40.

Poređenje vrednosti RMR i GSI duž niskopa prikazano je na slici 36.



Slika 36. RMR i GSI vrednosti duž istočne i zapadne cevi u niskopu



Slika 37. Predložene GSI vrednosti zastupljenih stenskih masa

10.3.8 Preporučeni proračunski parametri

Analizirajući osnovna svojstva izdvojenih inženjerskogeoloških jedinica određeni su preporučeni prognozni parametri prikazani u tabeli broj 4. Preciznost definisanja parametara bila je uslovljena heterogenošću stenske mase i čestim, nepravilnim smenjivanjima duž niskopa. Zbog nestabilnosti izazvanih ispadanjem klinova posebna pažnja bila je usmerena na definisanje svojstava pukotina. U tom cilju rađeno je proveravanje terenski dobijenih podataka o svojstvima pukotina povratnom analizom pomoću softvera Unwedge primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma.

Tabela 4. Preporučeni parametri izdvojenih inženjerskogeoloških sredina

	Gen. Hoek-Brown $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}(m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a$	Mohr-Coulomb $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$	Barton-Bandis $\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right]$
S_aC_g*	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$; $\sigma_{ci} = 40 \text{ MPa}$; GSI= 20; $m_i = 7$ $E_i = 30000 \text{ MPa}$ $E_{rm} = 1370 \text{ MPa}$	Stenska masa: $H = 270 \text{ m}$; $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$; $c = 0.4 \text{ MPa}$; $\phi = 27^\circ$ Pukotine: $c = 0 \text{ MPa}$; $\phi = 45^\circ$ Pukotine (glatke): $c = 0 \text{ MPa}$; $\phi = 30^\circ$	Pukotine: JRC=6; JCS=22 MPa; $\phi_b = 33^\circ$ ($\phi_r = 28^\circ$) Glatke i klizave: JRC=2; JCS=12 MPa; $\phi_r = 25^\circ$
S_aC_g	$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$; $\sigma_{ci} = 45$; GSI= 45; $m_i = 17$ $E_i = 30000 \text{ MPa}$ $E_{rm} = 1370 \text{ MPa}$	Stenska masa: $H = 270 \text{ m}$; $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$; $c = 1.03 \text{ MPa}$; $\phi = 44^\circ$ Pukotine: $c = 0.001 \text{ MPa}$; $\phi = 57^\circ$	Pukotine: JRC=9; JCS=26 MPa; $\phi_b = 33^\circ$ ($\phi_r = 28^\circ$)

10.3.9 Provera svojstava pukotina na osnovu povratne analize

Analiza stabilnosti se ne vrši samo da bi se dobio faktor sigurnosti za poznate parametre, već i radi određivanja parametara čvrstoće pri lomu ukoliko je došlo do pojave nestabilnosti. Ako je poznato da je pri lomu $F_s = 1$, traže se parametri koji odgovaraju ovoj realno konstatovanoj situaciji.

U ovom slučaju povratna analiza je vršena kako bi se proverila tačnost terenski dobijenih podataka o svojstvima pukotina (JCS, JRC i ϕ_r) u okviru izdvojene sredine (CaCg*), gde je došlo do pojave nestabilnosti, odnosno ispadanja klinova.

Terenska istraživanja su obuhvatala merenja hrapavosti diskontinuiteta pomoću Bartonovog češlja (JRC), čvrstoće zidova pukotina pomoću Šmitovog čekića (JCS).

Primer I:

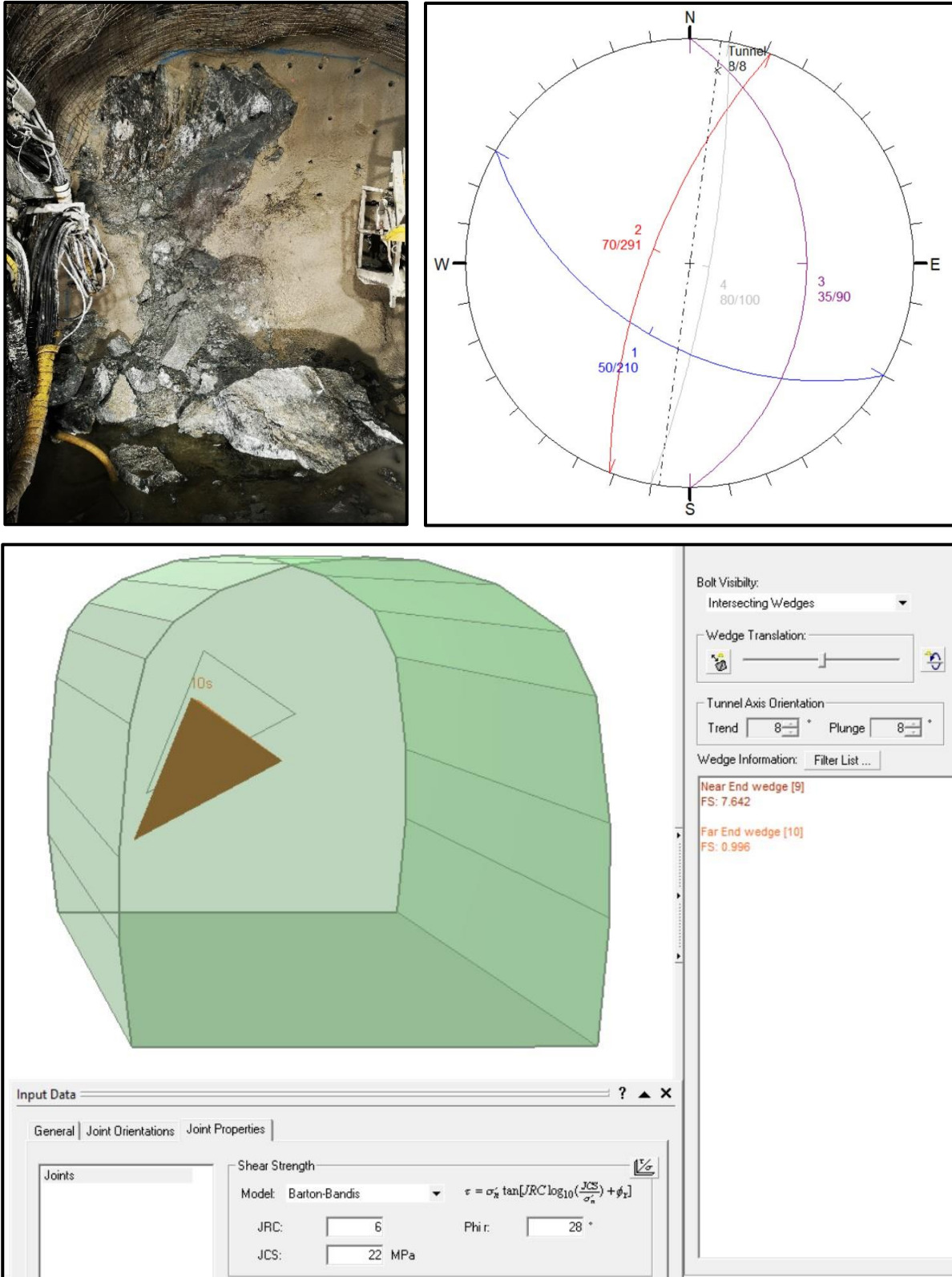
Povratna analiza urađena je na stacionaži E 1397.19 m gde je usled formiranja klina ispalo oko 0.5 m³ materijala sa čela iskopa. Ispadanje se dogodilo odmah nakon nanošenja torkreta, pre nego što je očvrsao zbog čega prilikom analize torkret nije uzet u obzir. Kombinovanjem izmerenih familija pukotina (J₁,J₂,J₃,J₄), pomoću softvera “Unwedge” dobijen je klin sličnog oblika i zapremine. Zastupljene familije pukotina su na osnovu terenskih merenja okarakterisane kao glatke sa vrednostima JRC-a između 6 i 7. Merena čvrstoća zidova pukotina za površi diskontinuiteta bila je u rasponu od 15 do 31 MPa. Usvojene vrednosti parametara korišćenih u analizi iznosile su: JRC=6; JCS=22 MPa; $\varphi_r=28^\circ$, u skladu sa preporučenim parametrima za sredinu SaCg* prikazanim u tabeli 4.

Analiza dobijene vrednosti faktora sigurnosti od 0.996 (Fs=0.996) za date ulazne parametre pokazuje ispadanje klina što apsolutno odgovara konstatovanom stanju na terenu. Ovime je potvrđena adekvatnost preporučenih parametara. Analiza je prikazana na slici 38.

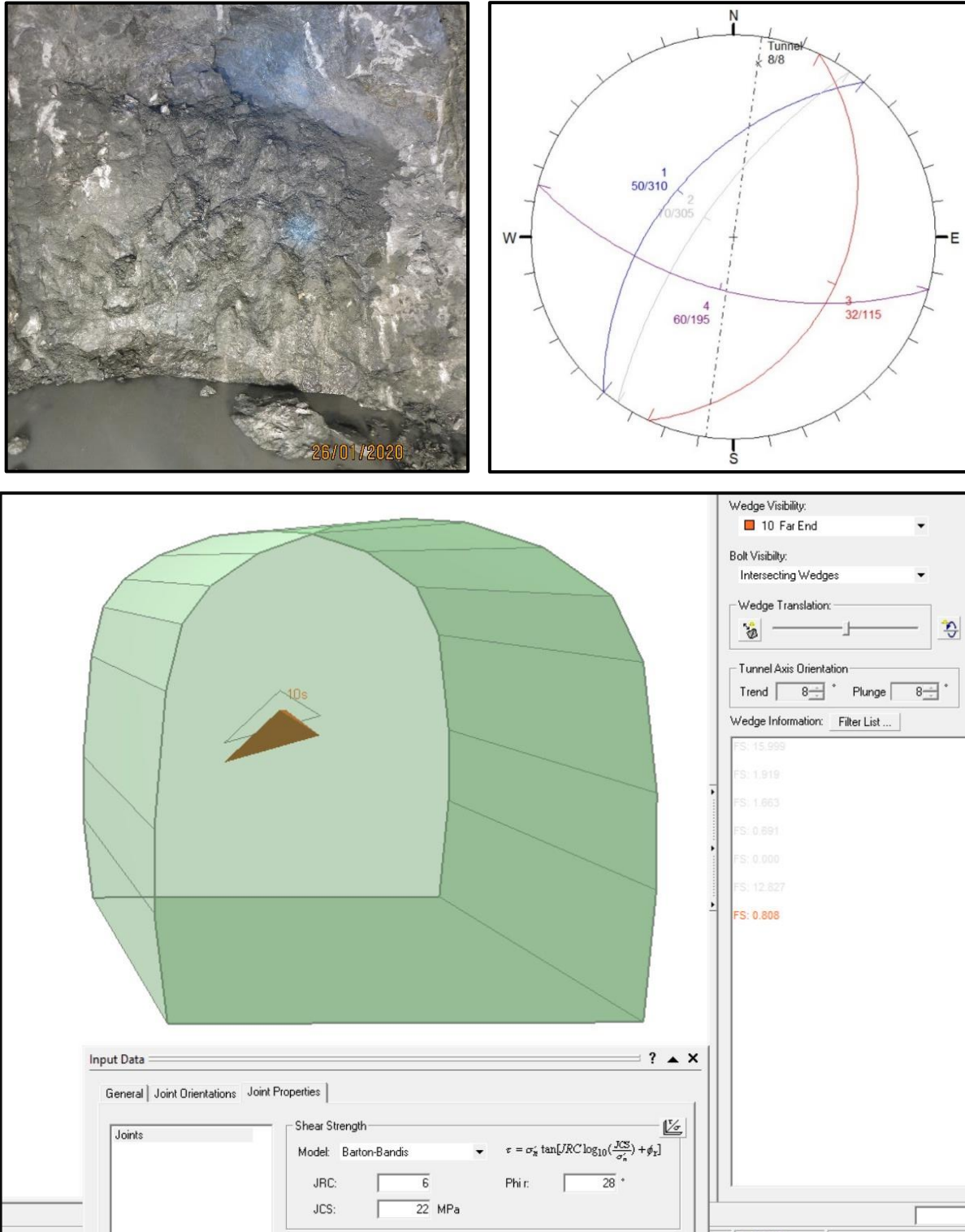
Primer II:

Na stacionaži E 1545.7 m sa čela iskopa je ispalo oko 0.15 m³ materijala usled nestabilnosti izazvane formiranjem klina. Zastupljene familije pukotina su analizom u programu UNWEDGE obrazovale klin sličan ispalom. Površi zastupljenih pukotina bile su glatke sa vrednostima JRC-a između 6 i 8. Vrednosti JCS-a varirale su u rasponu 14-28 MPa. Kao u prethodnoj analizi korišćeni su parametri preporučeni za sredinu SaCg* prikazani u tabeli 4.

Dobijena vrednost faktora sigurnosti od 0.808 (Fs=0.808) ukazuje na ispadanje klina što je terenskim opservacijama utvrđeno, slika 39. Ovime je dodatno potvrđena adekvatnost preporučenih parametara.



Slika 38. Povratna analiza nakon ispadanja klina na stacionaži E 1397.19 m



Slika 38. Povratna analiza nakon ispadanja klina na stacionaži E 1545.77 m

11. ZAKLJUČAK

Barton-Bandis-ov kriterijum loma predstavlja postupak kojim se omogućava procena smičuće čvrstoće na pukotinama stenskih masa. Kvantitativna karakterizacija je ključni aspekt kriterijuma za pojedinačne pukotine, familije pukotina ili familije, kako bi se obezbedila tri ulazna parametra. Ove tri stavke odnose se na hrapavost površine pukotine (JRC), čvrstoće na pritisak površi pukotine (JCS), i trenje po površini diskontinuiteta (ϕ_r - rezidualni ugao trenja). Tipični opsezi vrednosti ova tri faktora iznose: JRC=0-20 (glatke do veoma hrapave), JCS=10-200 MPa (veoma slabe i izmenjene do veoma čvrstih i neizmenjenih) i ϕ_r 20°-35° (slabe-izmenjene do sveže-neizmenjene). Ova tri parametra čine osnovu nelinearne jednačine logaritamskog tipa vršne čvrstoće Bartona (1973) i Barton i Choubey (1977).

Šmitov čekić je instrument na osnovu koga se može proceniti jednoaksijalna čvrstoća na pritisak zidova diskontinuiteta.

Metode koje se koriste pri određivanju indeksa hrapavosti zavisiće od razmere diskontinuiteta, pristupačnosti, kao i same svrhe ispitivanja. U praksi se najčešće koristi Bartonov češalj, a u novije vreme i različite laserske i fotogrametrijske metode prilikom istraživanja za potrebe izgradnje kapitalnih objekata.

Bazni ugao trenja (ϕ_b) je parametar koji se određuje opitom direktnog smicanja za nekoliko nivoa normalnog napona, ili pomoću opita naginjanja (tilt test).

Koeficijenti hrapavosti i čvrstoća na pritisak zidova pukotina su relativni u odnosu na veličinu posmatranog područja. Zavisnost prema kojoj se vrši korekcija JRC-a i JCS-a obzirom na razmeru dali su Barton i Bandis (1982).

Pojave nestabilnosti tokom izvođenja niskopa do ležišta "Čukaru Peki" bile su razlog da se postojeći parametri stenske mase provere i eventualno redefinišu u cilju određivanja adekvatnije podgrade. Vrednosti parametara pukotina dobijane na osnovu terenskih istraživanja proveravane su povratnim analizama ispalih klinova primenom Barton-Bandisovog kriterijuma loma.

Za potrebe provere i redefinisavanja parametara stenske mase korišćeni su podaci dobijeni na osnovu kartiranja i RMR klasifikacije stenske mase tokom izvođenja niskopa. Pored toga bilo je potrebno uraditi još nekoliko terenskih i laboratorijskih opita na osnovu kojih su određene karakteristike stenske mase i pukotina.

Ispitivanja stenske mase obuhvatila su interval niskopa od 174.11 m, od stacionaže W 1365.23 m do W 1539.34 m za zapadnu cev, i E 1362.44 m do E 1552.26 u dužini od 189.82 m za istočnu cev. Nadsloj u intervalu gde su vršena ispitivanja iznosio je oko 300 m. Iskop u ovom intervalu je izvođen u borskim klastitima, litološkom paketu sačinjenom od krupnozrnih konglomerata koga prosljavaju peščari i šejlovi.

Na osnovu kartiranja i klasifikovanja stenske mase u niskopu izdvojene su dve inženjerskogeološke sredine. U pogledu inženjerskogeoloških karakteristika zastupljeni su srednje čvrsti, ispucali do veoma ispucali sivi konglomerati i peščari (SaCg), i slabi i veoma ispucali zelenkasti konglomerati i šejlovi (SaCg*).

Analizirajući osnovna svojstva izdvojenih inženjerskogeoloških jedinica određeni su preporučeni parametri. Preciznost definisanja parametara bila je uslovljena heterogenošću stenske mase i čestim, nepravilnim smenjivanjima duž niskopa. Zbog nestabilnosti izazvanih ispadanjem klinova posebna pažnja bila je usmerena na definisanje svojstava pukotina. U tom cilju rađeno je

proveravanje terenski dobijenih podataka o svojstvima pukotina povratnom analizom pomoću softvera “Unwedge“ u uslovima Barton-Bandisovog kriterijuma loma.

Softver “Unwedge“ funkcioniše tako što analizira geometriju i stabilnost klinova definisanih presecima diskontinuiteta u stenskoj masi koja okružuje podzemni objekat.

Analiza stabilnosti može se koristiti radi određivanja parametara čvrstoće pri lomu ukoliko je došlo do pojave nestabilnosti. Ako je poznato da je pri lomu $F_s=1$, traže se parametri koji odgovaraju ovoj realno konstatovanoj situaciji.

Povratna analiza je vršena kako bi se proverila tačnost terenski dobijenih podataka o svojstvima pukotina (JCS , JRC i φ_r) u okviru izdvojene sredine ($CaCg^*$), gde je došlo do pojava nestabilnosti, odnosno ispadanja klinova.

Analizom dobijenih vrednosti faktora sigurnosti ($F_s=0.808$, $F_s=0.996$) potvrđena je adekvatnost preporučenih parametara pukotina.

12. LITERATURA

- Alejano, L., Muralha, J., Charlie, Ulusay, R. (2018). ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51, p. 3853-3858.
- Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, p. 627-634.
- Barton, N. (1971). A relationship between joint roughness and joint shear strength. *International symposium on Rock Mechanics, Rock fracture*, (pp. p. 1-27). Nancy.
- Barton, N. (1973). *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 13, p. 255-279.
- Barton, N. (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*, p. 249-261.
- Barton, N., Bandis, S. (1982). Effect of block size on the shear behavior of jointed rock. *Issues in Rock Mechanics. Proceedings of the 23rd Symposium on Rock Mechanics* (pp. 739-760). University of California, Berkeley, August 25-27, 1982.: Society of mining engineers - American Institute of mining, metallurgical and petroleum engineers.
- Barton, N., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 10, p. 3.
- Basu, A., Aydin, A. (2004). A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, p. 1212-1214.
- Berisavljević, Z., Berisavljević, D., Marjanović, M. (2021). *Stabilnost kosina u stenskoj masi*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Berisavljević, Z., Marjanović, M. (2020). *Special report on the selection of geotechnical parameters for Čukaru Peki declines*. Belgrade.
- Byerlee, J. D. (1967). *Frictional characteristics of granite under high confining pressure*. J. Geophys.
- Dong, H. K., Gratchev, I., Arumugam, B. (2014). Determination of joint roughness coefficient (JRC) for slope stability analysis: A case study from the Gold Coast area, Australia. *Landslides* 10, p. 657-664.
- Duncan, C. W., Mah, C. W. (2005). *Rock slope engineering*. Taylor & Francis e-Library.
- Goodman, R. E. (1974). Deformability of joints . In A. s. Materials, *Determination of the in situ Modulus of Deformation of Rock* (pp. 174-196). ASTM.
- Goodman, R. E., Gen-hua, S. (1985). *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. London: Prentice-Hall.
- Hyun-Sic, J., Seong-Seung, K., Bo-An, J. (2014). Determination of Joint Roughness Coefficients Using Roughness Parameters. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 47, p. 2061-2073.
- ISRM. (1977). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, p. 319-368.

- Jaeger, J. C. (1959). The frictional properties of joints in rock. *Geofisica Pura e Applicata* 43, p.148-158.
- Jaeger, J. C. (1971). Friction of rocks and stability of rock slopes. *Géotechnique, Vol.21(2)*, pp. 97-134.
- Kemeny, J., Turner, K. (2008). *Ground-based LiDAR : rock slope mapping and assessment*. Arizona: United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.
- Krsmanović, D., Langof, Z. (1964). Large scale laboratory tests of the shear strength of rocky material. *Rock mechanics*, 20-30.
- Lane, K., Heck, W. J. (1964). Triaxial testing for strength of rock joints. *Symp. Rock. Mech.*, (pp. 98-108). Kristiansand.
- Marjanović, M., Berisavljević, Z., Popović, M., Jovanović, S. (2022). *Shear Strength Properties Of The Bor Clastites*. Ohrid: Macedonian Association for Geotechnics.
- Patton, F. D. (1966). *Multiple modes of shear failure in rock in rock and related materials*.
- Richards, L. R. (1975). *The shear strength of joints in weathered rock*. London: University of London, Imperial College.
- Rocscience. (2019). *UnWedge Stability Analysis of Underground Wedges*. Retrieved from UnWedge Theory - Rocscience: https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/UnWedge/UnWedge_Theory.pdf
- Tatone, B., Grasselli, G. (2010). A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, p. 1391-1400.
- Tse, R., Cruden, D. M. (1979). Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 16, p. 303-307.
- Wang, H., Hang, L., Ping, C. (2016). Correlation of UCS Rating with Schmidt Hammer Surface Hardness for Rock Mass Classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 50, p. 1-9.

Internet sajtovi:

<https://www.amazon.com/Concrete-rebound-Resiliometer-10-60Mpa>

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента СТЕФАН ЈОВАНОВИЋ

Број индекса Р633/19

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

ПРИМЕНА БАРТОН - БАНДИСОВОГ КРИТЕРИЈУМА
ЛОМА КОД ПРОРАЧУНА НЕСТАБИЛНИХ
КЛИЦОВА ОКО КОНТУРЕ ПОДЗЕМНОГ ОБЈЕКТА

- 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, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента СТЕФАН (ДРАГАН) ЈОВАНОВИЋ
Број индекса Р633/19
Студијски програм ГЕОТЕХНИКА
Наслов рада ПРИМЕНА БАРТОН-БАНДИСОВОГ КРИТЕРИЈУМА
ЛОМА КОЈ ПРORAЧУНА НЕСТАБИЛНИХ
КЛИНОВА ОКО КОНТУРЕ ПОДЗЕМНОГ ОБЈЕКТА
Ментор ДОЦ. ДР ЗОРАН БЕРИСАВЉЕВИЋ

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, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

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

ПРИМЕНА БАРТОН - БАНДВИСОВОГ КРИТЕРИЈУМА КОМА
КОЈ ПРORAЧУНА НЕСТАБИЛНИХ КЛИНОВА ОКО
КОНТУРЕ ПОВЪЗЕМОГ ОБЈЕКТА

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, _____

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.
-