Model za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase

Jug, Jasmin

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:843105

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Jasmin Jug

MODEL ZA PROCJENU PRIMJENJIVOSTI TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA U ODNOSU NA ZNAČAJKE STIJENSKE MASE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Jasmin Jug

MODEL ZA PROCJENU PRIMJENJIVOSTI TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA U ODNOSU NA ZNAČAJKE STIJENSKE MASE

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak

Zagreb, 2020.

University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Jasmin Jug

MODEL FOR THE ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF EXCAVATION TECHNOLOGIES IN RELATION TO THE ROCK MASS CHARACTERISTICS

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Assoc. Prof. Petar Hrženjak, Ph.D.

Zagreb, 2020.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak

Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Doktorski rad sadrži: 178 stranica teksta, 110 slika, 42 tablice i 7 priloga.

ZAHVALE

Posebnu zahvalnost želim izraziti mentoru, izv.prof.dr.sc. Petru Hrženjaku, na savjetima u svojstvu studijskog savjetnika, poticaju za izučavanje problematike otkopavanje stijenske mase, te na svesrdnoj pomoći koju mi je pružio za vrijeme izrade ove doktorske disertacije. Veliku zahvalnost dugujem predsjedniku povjerenstva doc.dr.sc. Tomislavu Kormanu, te članovima povjerenstva doc.dr.sc. Mariu Klanfaru, izv.prof.dr.sc. Mariu Dobriloviću, , doc.dr.sc. Zlatku Briševcu i izv.prof.dr.sc. Hrvoju Meaškom na mnogim savjetima pruženima tijekom izrade ovog rada.

Kod terenskih istraživanja, interpretacije podataka i određivanja inženjersko-geoloških i geomehaničkih značajki stijenskih masa veliku pomoć pružili su mi prof.dr.sc. Stjepan Strelec i dr.sc. Janislav Kapelj dipl.ing.geol., pa im se želim zahvaliti. Doc.dr.sc. Bojan Đurin puno mi je pomogao na području višekriterijskih analiza, pa i njemu puno hvala. Zahvaljujem Tomislavu Nemčeviću dipl.ing.rud., direktoru tvrtke Kaming d.d., te Đuri Šilhanu mag.ing.geoing., direktoru tvrtke Zagorje kamen d.o.o., na suglasnostima za provođenje istraživanja u kamenolomima i ustupljenim podacima. Zahvaljujem i kolegama iz tvrtki SPP d.o.o. i Geomin d.o.o. na ustupljenim terenskim podacima s niza iskopa na području hrvatskog krša.

Svim djelatnicima Geotehničkog fakulteta, a posebno članovima Zavoda za geotehniku, zahvaljujem na suradnji. Rad na disertaciji bio je lakši uz stručne, ali i nestručne rasprave s kolegama dr.sc. Davorom Stankom, Nikolom Kranjčićem mag.ing.geod. et geoinf., Alenom Filipovićem mag.ing.geoing. i Ivanom Golubom dipl.ing.geot., pa im se želim iskreno zahvaliti.

Hvala svim mojim prijateljima na ugodnim druženjima. Zahvalnost izražavam kumovima i cijeloj rodbini, a posebno stricu Stjepanu Jugu dipl.ing.geot., koji me uveo u rudarsku struku. Posebna zahvalnost pripada mojim roditeljima, Tomi i Snježani, te baki i djedu, koji su omogućili da postojim i budem to što jesam. Hvala i bratu Vedranu, uz njega je moje djetinjstvo bilo zabavnije.

Najveću zahvalu ipak dugujem svojoj obitelji, supruzi Tanji, te sinovima Janu i Adamu, na pruženoj potpori i strpljenu. Dio vremena utrošenog na ovaj rad trebao je pripasti njima.

SAŽETAK: Odabir najprikladnije tehnologije otkopavanja jedan je od vrlo važnih zadataka prilikom projektiranja i izvođenja različitih inženjerskih objekata u stijenskim masama. Pregledom raspoložive literature o dosadašnjem razvoju, karakteristikama i korištenju pojedinih metoda za procjenu mogućnosti primjene tehnologija otkopavanja stijenske mase, zaključeno je kako navedeno prije svega ovisi o značajkama intaktne stijene, diskontinuiteta i stijenske mase. Prema tim značajkama stijenska se masa klasificira različitim empirijskim klasifikacijama za procjenu primjenjivosti i učinkovitosti tehnologija otkopavanja, ali ne postoji jedinstvena i općenito prihvatljiva metoda. Zato se pristupilo razvoju modela za procjenu primjenjivosti dostupnih površinskih tehnologija i njihovih mehanizama otkopavanja s obzirom na značajke čvrste stijenske mase. Analizom karakteristika, razlika i mogućnosti primjene postojećih metoda za procjenu mogućnosti otkopavanja, identificirani su utjecaji pojedinih značajki intaktne stijene i stijenske mase na tehnologije i mehanizme otkopavanja, na temelju kojih su utvrđene najvažnije značajke. Definiran je postupak kvalitativne karakterizacije stijenske mase za procjenu njezine podatljivosti razrušavanju i otkopavanju. Osim toga, istražena su i moguća ograničenja pojedinih tehnologija otkopavanja, a uvedena je i klasifikacija mehaničkih tehnologija otkopavanja prema osnovnom mehanizmu izdvajanja komada stijene iz stijenske mase. Na temelju analize svih prikupljenih saznanja i podataka, te dodatno provedenih istraživanja, prvo je predložena metoda za preliminarnu procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju preko izmjerenih brzina posmičnih seizmičkih valova. Detaljna procjena provodi se pomoću razvijenog jedinstvenog modela za rangiranje i procjenu primjenjivosti tehnologija površinskog otkopavanja čvrstih stijenskih masa na temelju značajki intaktnog stijenskog materijala, strukturnih značajki i značajki stijenske mase, uz mogućnost korištenja dodatno postavljenih uvjeta i specifičnosti otkopavanja. Model je zasnovan na višekriterijskoj analizi za donošenje odluka i procjenu optimalne varijante rješenja, uz primjenu metode PROMETHEE. Validacija predložene metode i modela provedena je na više prikladnih lokacija koje su odabrane s ciljem obuhvaćanja što više vrsta čvrste stijenske mase tipičnih za područje Republike Hrvatske. Na odabranim lokacijama provedena su istraživanja kroz karakterizaciju i ocjenu stijenske mase, na temelju kojih su dobiveni parametri iskorišteni kao ulazni podaci za analize. Procjene predloženih metoda uspoređene su sa stvarno primijenjenim tehnologijama otkopavanja, na temelju čega je utvrđena vrlo visoka razina podudarnosti.

KLJUČNE RIJEČI: značajke stijenske mase, podatljivost stijena otkopavanju, tehnologije površinskog otkopavanja, seizmičke geofizičke metode, višekriterijska analiza.

ABSTRACT: Selection the most appropriate excavation technology is one of the most important tasks during the design and construction of various engineering objects in rock masses. A review of current literature on the development, characteristics and use of individual methods to evaluate the application of rock mass excavation technologies, it was concluded that stated first of all depends on the characteristics of intact rock, discontinuity and rock mass. According to these features, the rock mass is classified using different empirical classifications for assessing the applicability and efficiency of excavation technologies, but there is no uniform and generally acceptable method. Therefore, a model has been developed to assess the applicability of the available surface technologies and their mechanisms of excavation considering the characteristics of the solid rock mass. By analysing the characteristics, differences and possibilities of applying existing methods for assessing the possibility of excavation, the effects of certain properties of intact rock and rock mass on the technologies and mechanisms of excavation have been identified, and the most important properties were determined. A procedure for the qualitative characterization of rock mass has been defined for assessment the malleability of the same to destruction and excavation. In addition, the possible limitations of certain excavation technologies were investigated, and a classification of mechanical excavation technologies according to the basic mechanism of extracting a piece of rock from a rock mass was introduced. Based on the analysis of the collected information and data, as well as the additional investigations, the method for preliminary assessment of the rock mass excavation malleability was first proposed, over measured shear seismic waves velocities. A detailed assessment is made by developing a unique model for ranking and assessing the applicability of surface technologies for solid rock mass excavation, based on intact rock material properties, rock structure and rock mass properties, with the possibility of using additional set conditions and specificity of excavation. The model is based on multicriteria analysis for decision making and assessing of the most optimal variant of the solution, using the PROMETHEE method. The validation of the proposed method and model was carried out at several suitable locations, which were selected in order to encompass as many types of solid rock mass typical for the Croatia territory. At selected study sites investigations were carried out through the characterization and evaluation of rock mass, and the obtained parameters were used as input data for analysis. The assessments of the proposed methods were compared with actually applied excavation technologies, and a very high level of matching was found.

KEYWORDS: rock mass properties, rock excavation malleability, surface excavation technologies, seismic geophysical methods, multicriteria analysis.

PROŠIRENI SAŽETAK

Kod projektiranja bilo kakvog iskopa u stijenskoj masi postavlja se pitanje o najprikladnijoj tehnologiji otkopavanja, koja je uvelike ovisna o značajkama stijenske mase koja se planira kopati. Prirodne stijenske mase u pravilu su razlomljene (diskontinuirane), heterogene, anizotropne i već se nalaze u nekom prirodnom stanju naprezanja. Zato je kod ovog istraživanja opaženo da je kod procjene podatljivosti stijenske mase otkopavanju poželjno u analizu uključiti različite parametre, koji uključuju značajke intaktne stijene, diskontinuiteta i stijenske mase.

Kroz više desetaka godina unatrag zabilježeni su brojni pokušaji razvoja klasifikacija i metoda za procjenu mogućnosti primjene tehnologija otkopavanja. No, uočeno je kako je većina metoda primjenjiva samo na određene tehnologije otkopavanja, a rijetke povezuju više različitih tehnologija. Osim toga, ne postoji jedinstvena i općenito prihvatljiva metoda za definiranje podatljivosti stijene otkopavanju. Zato je cilj ovog doktorskog istraživanja bio razviti općeniti model koji će omogućiti kvalitativnu procjenu primjenjivosti dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na značajke čvrste stijenske mase koja se planira otkopavati. Slijedom istraživanja proučavane su tehnologije otkopavanja stijenske mase i osnove mehanike loma stijene. Tehnologije otkopavanja, prema glavnom mehanizmu rada, dijele se u dvije osnovne grupe: 1) Miniranje i 2) Mehaničko otkopavanje. Predložena je klasifikacija mehaničkih tehnologija otkopavanja prema osnovnom mehanizmu izdvajanja komada stijene iz stijenske mase, kako slijedi: kopanje, rijanje, razbijanje i rezanje.

Provedena su opsežna terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja za 7 lokacija izgrađenih od sedimentnih stijena (vapnenac, konglomerat, fliš, dolomit, breča) različitog stupnja trošnosti i stanja čvrstoće (23 podatka) s područja hrvatskog krša. Na temelju dobivenih podataka i usporedbe s postojećim klasifikacijskim metodama za procjenu mogućnosti otkopavanja, predložen je novi pristup u primjeni seizmičkih metoda za preliminarnu procjenu mogućnosti površinskog otkopavanja sedimentnih stijena, koristeći prednosti koje donosi primjena MASW seizmičke istraživačke metode čiji su rezultat profili brzina S-valova. Utvrđeno je kako se sedimentna stijenska masa V_S brzine ispod 600 m/s može kopati, rijanje je uglavnom uspješno u stijenama s V_S brzinama između 600 i 1000 m/s, za otkopavanje stijene s V_S brzinama između 1000 i 1200 m/s predloženo je razbijanje primjenom hidrauličnog čekića, dok je sedimentnu stijensku masu s izmjerenim brzinama V_S većim od 1200 m/s potrebno minirati.

Najvažniji dio disertacije prikazuje upotrebu višekriterijske analize za razvijanje detaljnog modela za procjenu i rangiranje primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke

stijenske mase te dodatne uvjete. Za analizu je korištena metoda PROMETHEE (Preferance ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations), koja pripada u skupinu metoda „višeg ranga" jer princip višeg ranga koristi u svrhu rangiranja opcija u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenjem složenosti. Drugim riječima, izvršena je paralelna usporedba akcija (tehnologije otkopavanja) u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na kriterije (značajke stijenske mase). Opravdanost metode PROMETHEE vidljiva je u prikladnosti i prilagodljivosti primjene na predmetnu problematiku, uz primjenu programskog paketa Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.

Tehnologije površinskog otkopavanja postale su akcije unutar višekriterijske analize, a podijeljene su u dvije grupe. Po hijerarhiji su kriteriji podijeljeni u dva klastera, pri čemu se svaki klaster još dijeli u dvije grupe. U grupu kriterija koji opisuju značajke intaktne stijene uključeni su čvrstoća, tvrdoća, žilavost i abrazivnost intaktne stijene. Što se tiče grupe kriterija koji opisuju strukturu i značajke stijenske mase, kreirana su dva modela. U modelu A stijenska masa karakterizira se parametrima koji su izdvojeni na temelju dosadašnjih istraživanja (razmak diskontinuiteta, orijentacija, postojanost i otvorenost pukotina, trošnost i brzina P-valova stijenske mase). U modelu B za karakterizaciju stijenske mase predložene izmjene parametara (volumetrijski broj pukotina, orijentacija dominantnog seta pukotina, stanje pukotina, trošnost i brzina S-valova stijenske mase), kao rezultat zapažanja nastalih doktorskim istraživanjem.

Kod uspoređivanja tehnologija otkopavanja stijenske mase (akcije) u odnosu na značajke stijenske mase (kriteriji) korištena je kvalitativna evaluacija kriterija. Unutar modela A evaluirani su kriteriji dovedeni u vezu s akcijama tijekom prethodnih istraživanja, u modelu B evaluirani su svi novopredloženi kriteriji te je pri tome korištena klasična kvalitativna ljestvica od 5 razina.

Ponderiranje kriterija značajki stijenske mase unutar predloženih modela uvelike je ovisno o udaljenosti između lokacije otkopavanja i štićenog objekta (društveno-ekološki kriterij). Što je lokacija otkopavanja bliže štićenom objektu, to je veća težina društveno ekološkog kriterija (do max. 30 %). Ponderiranje pojedinačnih kriterija za model A unutar grupa „Intaktna stijena" i „Stijenska masa" provedeno je na temelju rezultata analiza prethodnih istraživanja. Unutar Modela B svi novopredloženi kriteriji unutar grupe „Stijenska masa" jednako su ponderirani, odnosno svim tim kriterijima dodijeljena je jednaka važnost.

Za brži postupak evaluacije i ponderiranja kriterija unutar MS Excel programa izrađena je aplikacija koja na temelju unesenih vrijednosti kriterija pomoću „IF" funkcije omogućuje logičko uspoređivanje između vrijednosti i očekivane vrijednosti.

Validacija razvijenih modela provedena je temeljem istraživanja u tri kamenoloma na području sjeverozapadne Hrvatske (Marčan, Špica i Hruškovec), čime se obuhvatilo više vrsta čvrste stijenske mase tipičnih za područje Republike Hrvatske. Značajke dobivene na terenu korištene su kao ulazni podaci (kriteriji) za modele.

Uspoređivanjem tehnologija koje se stvarno primjenjuju u kamenolomima s procijenjenim primjenjivim tehnologijama iz analiza, zaključeno je kako su oba kreirana modela (A i B) prilično uspješna. U gotovo svim slučajevima su tehnologije koje se stvarno primjenjuju zapravo najbolje rangirane tehnologije prema rezultatima analiza. Uspoređujući modele A i B, zaključeno je kako je model B nešto uspješniji jer je neto protok Φ kod prvorangiranih tehnologija unutar modela B uvijek veći od neto protoka prvorangiranih tehnologija unutar modela A.

Specifičnost rezultata višekriterijskih analiza iz primjera kamenoloma Špica i Hruškovec je svakako prikaz rezanja kao jedne od primjenjivih tehnologija otkopavanja. No, rezanje za sada nema primjenu kod površinskog otkopavanja stijenske mase na području Hrvatske. Zato bi to mogao biti poticaj proizvođačima strojeva koji sudjeluju u operacijama otkopavanja rezanjem da intenziviraju istraživanja oko mogućnosti primjene svojih strojeva na hrvatskim površinskim kopovima stijenske mase.

EXTENDED ABSTRACT

When designing any excavation in the rock mass, the question arises about the most appropriate excavation technology, which is greatly dependent on the characteristics of the rock mass that is planned to dig. Natural rock masses are fractured (discontinuous), heterogeneous, anisotropic and already in a natural state of stress. Therefore, it has been observed in this study that it is desirable to include different parameters in the analysis when assessing the rock mass excavation malleability, which includes the properties of intact rock, discontinuity, and rock mass.

Over the decades, numerous attempts have been made to develop classifications and methods to evaluate the possibility of using excavation technologies. However, it was observed that most of the methods are applicable only to certain technologies of excavation, a rare link to many different technologies. In addition, there is no unique and generally acceptable method for defining the malleability of rock excavation. Therefore, the aim of this doctoral research was to develop a general model that will provide a qualitative assessment of the applicability of available surface excavation technologies, with respect to the characteristics of the solid rock mass which is planned to excavate.

As a result of the research, rock mass excavation technologies and the basics of rock fracture mechanics were studied. Excavation technologies, according to the main mechanism of operation, are divided into two basic groups: 1) Blasting and 2) Mechanical excavation. It is proposed classification of mechanical excavation technologies according to the basic mechanism of extracting a piece of rock from a rock mass, as follows: digging, ripping, breaking and cutting.

Extensive field and laboratory studies were performed on eight sedimentary rock sites (Limestone, Conglomerate, Flysch, Dolomite, Breccia) with a variety of weathering and strength conditions (23 data) in the area of Croatian karst. Based on the obtained data and a comparison with the existing classification methods for the assessment of the possibility of excavation, a new approach in the application of seismic methods for the preliminary assessment of the possibility of sedimentary rocks surface excavation is proposed. A new approach uses the advantages of applying the MASW seismic investigation method that results in S-wave velocity profiles. It has been determined that sedimentary rock mass with V_S velocities below 600 m/s can be dug, and ripping is generally successful in rocks with V_S velocities between 600 and 1000 m/s. For excavating of rock with V_S velocities between 1000

and 1200 m/s, it was suggested breaking using a hydraulic hammer, while the sedimentary rock mass with measured V_S velocities exceeding 1200 m/s needs to be blasted.

The most important part of the thesis presents the use of multi-criteria analysis to develop a detailed model for assessment and ranking the applicability of excavation technologies in relation to the characteristics of the rock mass, and additional conditions. PROMETHEE (Preference ranking organization METHod for Enrichment Evaluations) was used for the analysis, which belongs to the group of "higher rank" methods because it uses the higher rank principle to rank options in combination with ease of use and reduction of complexity. In other words, a parallel comparison of actions (excavation technologies) was performed to rank them against criteria (rock mass characteristics). The justification of the PROMETHEE method is evident in the appropriateness and adaptability of the application to the subject matter, with the help of Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.

Surface excavation technologies have become actions within multi-criteria analysis, and are divided into two groups. According to the hierarchy, the criteria are divided into two clusters, with each cluster still divided into two groups. The group of criteria that describes the properties of intact rock include strength, hardness, toughness and abrasiveness. Two models have been created - one for the set of criteria that describe the structure and one for characteristics of the rock mass. In model A, the rock mass is characterized by parameters extracted from previous studies (discontinuity spacing, the orientation, joint persistence and separation, rock mass weathering degree and P-wave velocity). The model B proposed changes of parameters for rock mass characterization (joint volumetric number, orientation of dominant joint set, joint condition, rock mass weathering degree and velocity of S-waves), as a result of observations made by doctoral research.

In comparing rock excavation technologies (actions) versus rock mass characteristics (criteria), a qualitative evaluation was used. Within model A, the criteria related to actions during the previous research were evaluated. In model B, all the newly proposed criteria were evaluated. In both models, the classical qualitative scale of 5 levels was used.

The weighting of the rock mass characteristic criteria within the proposed models is mostly dependent on the distance between the excavation site and the protected object (socio-ecological criterion). If the location of excavation is close to the protected object, the weight of the socio-ecological criterion is greater (up to a maximum of 30%). The weighting of the individual criteria for model A within the groups "Intact Rock" and "Rock Mass" was

performed based on the results of the analyses of previous studies. Within the model B all newly proposed criteria within a group "Rock mass" are equally weighted, or all of these criteria were given equal importance.

For faster evaluation and weighting of the criteria, an application was created within MS Excel that, based on the entered values of the criteria using the "IF" function, allows a logical comparison between the values and the expected value.

Validation of the developed models was carried out on the basis of investigations in three quarries in the area of north-western Croatia (Marčan, Špica and Hruškovec), which included several types of solid rock mass typical for the territory of the Republic of Croatia. Field characteristics were used as inputs (criteria) for the models.

By comparing the technologies actually applied in the quarries with the estimated applicable technologies from the analyses, it was concluded that both created models (A and B) were quite successful. The results of the analyses are very well. In almost all cases, the technologies actually applied are, in fact, the best ranked. Comparing models A and B, it was concluded that model B is more successful because the net flow Φ for first-rate technology within Model B is always greater than the net flow for first-rate technology within Model A.

The specificity of the results of multi-criteria analysis from the examples of the Špica and Hruškovec quarries is certainly the presentation of cutting as one of the applicable excavation technology. However, cutting is currently not applicable to the surface rock excavation in Croatia. Therefore, it could be an incentive for manufacturers of machines that participate in the operations of excavation with cutting to intensify research on the possibility of application of their machines on Croatian quarries.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. ZNAČAJKE INTAKTNE STIJENE, DISKONTINUITETA I STIJENSKE MASE KOJE SE KORISTE KOD PROCJENE MOGUĆNOSTI OTKOPAVANJA 5
2.1. Značajke intaktne stijene 5
2.1.1. Tvrdoća 6
2.1.2. Abrazivnost 7
2.1.3. Lomna žilavost 8
2.1.4. Jednoosna tlačna čvrstoća 9
2.1.5. Indeks čvrstoće opterećenjem u točki (PLTi) 11
2.1.6. Vlačna čvrstoća 12
2.1.7. Brzina širenja elastičnih valova 13
2.1.8. Stupanj trošnosti intaktne stijene 14
2.2. Značajke diskontinuiteta 15
2.2.1. Razmak 18
2.2.2. Postojanost 19
2.2.3. Orijentacija 20
2.2.4. Hrapavost stijenki 21
2.2.5. Čvrstoća stijenki 23
2.2.6. Zijev 24
2.2.7. Ispuna 25
2.2.8. Voda u diskontinuitetu 26
2.3. Značajke stijenske mase 26
2.3.1. Broj i orijentacija sustava diskontinuiteta 27
2.3.2. Veličina blokova 28
2.3.3. Stupanj raspucanosti 29
2.3.4. Brzina širenja seizmičkih valova 30
2.3.5. Stupanj trošnosti 32
2.3.6. Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase 33
2.3.6.1. Značajke intaktne stijene 34
2.3.6.2. Geološki indeks čvrstoće (GSI) 35
2.3.6.3. Parametri koji opisuju karakteristike čvrstoće stijenske mase 36
2.3.6.4. Deformabilnost stijenske mase 39

3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA O MOGUĆNOSTIMA OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE 41
3.1. Povijesni slijed istraživanja u svijetu 41
3.2. Povijesni slijed istraživanja za područje Hrvatske 55
4. TEHNOLOGIJE OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE 57
4.1. Osnove mehanike loma stijene 58
4.2. Otkopavanje stijenske mase miniranjem 61
4.2.1. Bušenje minskih bušotina 62
4.2.2. Miniranje stijenske mase 63
4.2.3. Značajke stijenske mase koje utječu na mogućnost primjene miniranja 69
4.2.4. Fragmentacija odminirane stijenske mase 72
4.3. Mehaničko otkopavanje stijenske mase 74
4.3.1. Kopanje 76
4.3.2. Rijanje 81
4.3.3. Razbijanje 86
4.3.4. Rezanje 91
4.4. Ovisnost primjenjivosti tehnologija otkopavanja o značajkama stijene 97
5. ISTRAŽIVANJA PRIMJENJIVOSTI POVRŠINSKIH TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE 98
5.1. Uvod 98
5.2. Osnovne značajke geofizičkih seizmičkih metoda 99
5.2.1. Prostorni seizmički valovi 100
5.2.2. Površinski seizmički valovi 100
5.2.3. Plitka seizmička refrakcija 102
5.2.4. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW) 105
5.3. Provedena istraživanja 108
5.3.1. Geološke značajke istražnih lokacija 108
5.3.2. Rezultati terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja 111
5.4. Razvoj metode klasifikacije 113
5.5. Verifikacija metode 118
6. MODEL ZA PROCJENU PRIMJENIVOSTI TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA U ODNOSU NA ZNAČAJKE STIJENSKE MASE 122
6.1. Uvod 122
6.2. Razvoj modela za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase 123
6.2.1. Višekriterijska analiza 123

6.2.1.1. Metoda PROMETHEE 125
6.2.1.2. Metoda GAIA 130
6.2.2. Programski paket Visual PROMETHEE 131
6.2.2.1. Glavni prozor 133
6.2.2.2. Alatne trake 135
6.2.2.3. Evaluacija kriterija unutar Visual PROMETHEE-a 136
6.2.2.4. Prikaz rezultata PROMETHEE-GAIA analiza 137
6.2.3. Akcije za razvoj modela 141
6.2.4. Kriteriji i scenariji modela 142
6.2.5. Evaluacija kriterija u modelu 147
6.2.6. Težinski faktori kriterija i ostale postavke modela 150
6.3. Validacija modela 152
6.3.1. Kamenolom „Marčan“ 152
6.3.2. Kamenolom „Špica“ 160
6.3.3. Kamenolom „Hruškovec“ 167
6.4. Diskusija rezultata dobivenih modelom 172
7. ZAKLJUČAK 174

POPIS LITERATURE

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA I SIMBOLA

PRILOZI

Prilog 1. Sažetak prethodnih istraživanja - značajke korištene kod procjene mogućnosti otkopavanja stijenske mase ..... 1 list

Prilog 2. Karakteristični IG profil istražne lokacije u Segetu Donjem ..... 1 list

Prilog 3. Kvalitativne ocjene kriterija (značajki stijenske mase) u vidu utjecaja na akcije (tehnologije otkopavanja) .....4 lista

Prilog 4. Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja u kamenolomima .....3 lista

Prilog 5. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Marčan .....8 listova

Prilog 6. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Špica .....8 listova

Prilog 7. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Hruškovec .....4 lista

ŽIVOTOPIS

1. UVOD

Odabir tehnologije otkopavanja predstavlja jedan od vrlo važnih i zahtjevnih zadataka prilikom planiranja iskopa u čvrstim stijenama, bilo na površinskom kopu ili građevnoj jami. Raznolikost značajki stijenske mase ima velik utjecaj na učinkovitost primjene određene tehnike i tehnologije otkopavanja. Naime, značajke nisu jednolične po nekom promatranom volumenu i nije moguće odrediti koja se inženjerska tehnika iskopa može primijeniti bez prethodnih istražnih radova na lokaciji budućeg iskopa.

Cilj ovog istraživanja bio je razviti općeniti model koji će omogućiti procjenu najprimjenjivije od svih dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na kvalitativne značajke čvrste stijenske mase koja se planira otkopavati. Postavljena je glavna hipoteza koja glasi: Moguće je razviti jedinstveni model za procjenu najprimjenjivije tehnologije površinskog otkopavanja čvrstih stijenskih masa na temelju značajki intaktnog stijenskog materijala, strukture i značajki stijenske mase te postavljenih uvjeta otkopavanja. Pri tome je pretpostavljeno kako su čvrstoća, tvrdoća i žilavost presudne značajke intaktnog stijenskog materijala kod odabira odgovarajućeg mehanizma loma, dok su veličina i oblik blokova presudne strukturne značajke stijenske mase kod odabira tehnologije otkopavanja.

Očekivani znanstveni doprinos ovog istraživanja je:

1) Izrada modela za procjenu mogućnosti primjene tehnologija otkopavanja s obzirom na značajke stijenske mase, koji će se moći koristiti u projektnoj fazi bilo koje vrste površinskoga iskopa u stijenskoj masi, odabiru strojeva koji sudjeluju u operacijama otkopavanja, ali i kao temelj za dodatna znanstvena istraživanja te poboljšanje i proširenje osnovnog modela.
2) Identifikacija značajki stijenske mase koje najviše utječu na mogućnost primjene određene tehnologije otkopavanja.
3) Uvođenje klasifikacije mehaničkih tehnologija otkopavanja prema osnovnom mehanizmu izdvajanja komada stijene iz stijenske mase.

Iako su mehanička svojstva stijena ključna za otkopavanje, geološki parametri imaju značajniji utjecaj na različita svojstva stijena (Thuro i sur., 2002). Pod pojmom otkopavanja u ovom radu misli se na otkopavanje drobljenjem stijene (npr. tehničko-građevni kamen), dok otkopavanje odnosno vađenje blokova stijene (npr. arhitektonsko-građevni kamen) nije obuhvaćeno niti razmatrano. Dakle, mogućnost otkopavanja stijene ovisi o geotehničkim svojstvima intaktne stijene i stijenske mase. Kao najvažniji parametri intaktne stijene ističu se tlačna čvrstoća,

tvrdoća, abrazivnost i žilavost, dok stanje stijenske mase najbolje opisuju parametri diskontinuiteta (orijentacija, razmak, postojanost, otvorenost ili zijev, ispuna, te čvrstoća, hrapavost i trošnost stijenki diskontinuiteta), stupanj trošnosti te brzina prolaza seizmičkih valova kroz stijensku masu. U poglavlju 2 detaljno su obrazložene sve značajke intaktne stijene, diskontinuiteta i stijenske mase koje, manje ili više, utječu na mogućnost otkopavanja.

Općenito, klasifikacija stijenske mase provodi se pomoću klasifikacijskih sustava koji koriste čvrstoću, trošnost, seizmička svojstva i diskontinuiranost stijenske mase kao ulazne podatke. Međutim, većina sustava za klasifikaciju stijena uglavnom je razvijana u svrhu procjene stabilnosti stijenskih masa oko objekata. Zato se moralo ciljano pristupiti razvoju specijaliziranih metoda klasifikacije za procjenu koliko je neka stijena povoljna za otkopavanje. Kroz više desetaka godina unatrag postoje brojni pokušaji razvoja takvih klasifikacija. Mnoge od njih temelje se na empirijskim sustavima ocjenjivanja, a postoje i grafičke metode, dok neki autori predlažu korištenje brzina seizmičkih valova kao direktni pokazatelj podatljivosti stijenske mase otkopavanju. S druge strane, postoji i određeni broj klasičnih modela koji su razvijeni s ciljem definiranja sile odlamanja na vrhu ili zubu rudarskog alata kojim se otkopava. U Republici Hrvatskoj najčešće je u upotrebi vrlo jednostavna kategorizacija tla (tri kategorije) za iskop, u sklopu općih tehničkih uvjeta (OTU) za zemljane radove na cestama (IGH, 2001). Detaljniji pregled dosadašnjih istraživanja u području otkopavanja stijenske mase s obzirom na značajke stijenske mase nalazi se u poglavlju 3.

Poznate tehnologije ili metode otkopavanja mogu biti jednostavne, poput otkopavanja ručnim otkopnim čekićem, i zahtjevnije, koje koriste rotorne bagere (engl. *Bucket wheel excavator*), bagere s lopatom (engl. *Power shovels*), dozere s riperima ili rijačima (engl. *Bulldozer-rippers*), postrojenja za kontinuirano otkopavanje (engl. *Continuous miners*) i/ili eksploziv. Prema tome, metode otkopavanja temelje se na dva glavna mehanizma: mehaničkom i miniranju (Khamehchiyan i sur., 2014). Mehaničko otkopavanje najčešće obuhvaća mehanizme kao što su rezanje (engl. *Cutting*), rijanje (engl. *Ripping*) ili razbijanje (engl. *Breaking*). Npr. kopanje se definira kao proces rezanja i premještanja pomoću lopate ili korpe, te se uglavnom izvodi pomoću bagera u mekanijim stijenama (Hadjigeorgiou i Poulin, 1998). Rijanje je proces lomljenja čvršćih stijena povlačenjem zubaca spojenih na dozer ili ruku hidrauličnog bagera. Razrušavanje i razbijanje stijene hidrauličnim čekićem postiže se prijenosom udara klipa po radnom alatu u udarnoj glavi na stijenu, uz iskorištavanje prirodnih defekata u njoj. Kod mehaničkog načina iskopa potrebno je razlikovati primjenu klasičnih građevinskih strojeva od rudarskih strojeva. Iako i jedni i drugi koriste jednake tehnologije rada, rudarski strojevi mogu

biti višestruko većih dimenzija i snaga, a time i puno učinkovitiji. U čvrstim i vrlo čvrstim stijenama rudarenje uglavnom počinje bušenjem minskih bušotina i miniranjem, čiji rezultati utječu na sve operacije koje slijede. Metode otkopavanja mogu se s druge strane podijeliti na kontinuirane i diskontinuirane (cikličke). Obje grupe uključuju operacije iskopa, punjenja i premještanja otkopanog materijala, a ovise o karakteristikama čvrstoće stijenske mase. Kontinuirano otkopavanje vrši se različitim postrojenjima za kontinuirano otkopavanje (npr. rotorni bageri), dok su rijanje dozerom, kopanje bagerom s lopatom, bušačko-minerski radovi tipične tehnologije cikličkog otkopavanja. Poglavlje 4 opisuje najčešće tehnologije otkopavanja stijenske mase, pri čemu je svaka tehnologija zasebno dovedena u vezu sa značajkama stijenske mase koje utječu na njihovu primjenu, na temelju provedenih istraživanja različitih proizvođača. Tako su izdvojene najvažnije značajke stijenske mase koje najviše utječu na mogućnost primjene tehnologije, odnosno mehanizma otkopavanja, kao temeljni kriteriji za uspostavu modela.

S obzirom da ne postoji generalno prihvatljiva metoda za definiranje podatljivosti stijene otkopavanju, jasno je da postoji potreba za istraživanjem problematike otkopavanja stijenske mase u odnosu na njezine značajke, poboljašavanjem postojećih metoda i razvijanjem novih. Osim toga, mehaničko otkopavanje često je neopravdano podređeno miniranju kod iskopa stijenske mase, dok se postojeće metode klasifikacije stijenske mase koriste samo djelomično uspješno za potrebe projektiranja otkopavanja.

Korištenje brzina seizmičkih valova kao direktnog pokazatelja podatljivosti stijenske mase otkopavanju ima više prednosti poput brzine izvođenja, neinvazivnosti i male cijene koštanja. Često investitorima nisu prihvatljiva duga i skupa istraživanja, što je bio dobar poticaj da se krene u smjeru poboljšanja metoda za preliminarnu procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na kvalitetu stijenske mase detektirane kroz izmjerene brzine seizmičkih valova. Osim toga, značajke diskontinuiteta u stijenskoj masi uvelike utječu na podatljivost stijenske mase otkopavanju, a diskontinuiranost se vrlo uspješno istražuje seizmičkim geofizičkim metodama. Međutim, primjena postojećih metoda koje koriste brzinu kompresijskih ili primarnih P-valova kao ulazni parametar može dovesti do loše procjene zbog njihove osjetljivosti na prisutnost fluida u stijenskoj masi. Također, primjena plitke refrakcijske seizmike kao metode istraživanja nije uvijek najbolje rješenje, pogotovo u slučaju pojave inverzije brzine (brzina P-valova pada s dubinom) ili ako su na lokaciji prisutni slojevi vrlo male debljine (skriveni slojevi). Zato je s ciljem poboljšanja postojeće metode predložen novi pristup pa se za terenska mjerenja preporučuje metoda višekanalne analize površinskih valova,

čiji je rezultat mjerenja brzina posmičnih ili sekundarnih S-valova. Detaljniji opis predložene metode koja predviđa četiri kategorije stijenske mase za iskop prikazan je u poglavlju 5.

Međutim, glavni cilj ovog istraživanja bio je razviti općeniti model za analizu predmetne problematike. U ovom konkretnom slučaju takav model mora usmjeriti inženjera da od svih dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja (alternative) odredi najprimjenjiviju u odnosu na kvalitativne značajke čvrste stijenske mase (kriteriji) koja se planira otkopavati. Upravo to omogućuje višekriterijska analiza, a riječ je o matematičko-statističkom alatu za donošenje odluka i procjenu optimalne varijante rješenja od više mogućih alternativa u odnosu na veći broj različitih kriterija. Višekriterijska analiza provodi se korištenjem višekriterijskih metoda (Roy, 1996). Višekriterijske metode međusobno se razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka. Najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije. Kao najprikladnija metoda za istraživanje iz ovog rada odabrana je metoda PROMETHEE (Preferance ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) (Brans i Vincke, 1985). Ta metoda koristi princip „višeg ranga“ u svrhu rangiranja alternativa u odnosu na broj kriterija (Lai i sur., 2008), a jednostavna je za uporabu i manje je složenosti u odnosu na neke druge metode višekriterijske analize. Za numeričku obradu problema korištena je programska podrška Visual PROMETHEE, dok je sustav za definiranje relativnih težina kreiran unutar programskog alata MS Excel. Razvoj i validacija modela prikazani su u poglavlju 6.

2. ZNAČAJKE INTAKTNE STIJENE, DISKONTINUITETA I STIJENSKE MASE KOJE SE KORISTE KOD PROCJENE MOGUĆNOSTI OTKOPAVANJA

U mehanici čvrstih tijela, normalno se pretpostavlja da materijali mogu biti kontinuirani, izotropni, elastični i linearni, ali to nije slučaj kod stijena. I intaktni blokovi stijene i kompaktna stijenska masa imaju široko područje varijacija fizikalnih i mehaničkih svojstava, a rezultat toga je različito ponašanje.

Često se pri teorijskom tumačenju pojedinih fizikalno-mehaničkih karakteristika ili mehaničkog ponašanja stijenskih masa u različitim uvjetima opterećenja usvajaju različite pretpostavke. Tako se na primjer pretpostavlja da je stijenska masa kontinuum, odnosno homogena i izotropna sredina. Na taj način omogućuje se lakša primjena postojećih teorija ili određenog matematičkog aparata.

Međutim, prirodne stijenske mase u pravilu su razlomljene (diskontinuirane), heterogene i anizotropne. Iz tih razloga istraživanja stijena moraju se izvoditi tako da omoguće definiranje geometrijskog, mehaničkog (fizikalnog), geotehničkog ili matematičkog modela unošenjem parametara i karakteristika općih fizikalno-strukturnih svojstava stijenske mase koja se istražuje.

U empirijskim klasifikacijama koje se koriste za određivanje mogućnosti eksploatacije i otkopavanja stijenske mase, koje su detaljno obrazložene u poglavlju 3, opaženo je da su poželjni različiti parametri za koje se smatra da utječu na mogućnost otkopavanja stijenske mase. Ti parametri mogu se klasificirati u 3 glavne grupe, kako slijedi:

a) značajke intaktne stijene
b) značajke diskontinuiteta
c) značajke stijenske mase.

2.1. Značajke intaktne stijene

Svojstva intaktne stijene mjerljiva su ili na neki drugi način opisiva svojstva materijala koja se mogu procijeniti ili odrediti na uzorku, odnosno svojstva koja se mogu odrediti u laboratoriju. Ta su svojstva vezana za fizikalna svojstva minerala koje uzorak sadrži i vrstu mineralne veze. Određuju se na uzorcima malih dimenzija (red veličine 10^{-3} m^3) iz izdanaka ili sadržaja poremećene ili neporemećene jezgre istražne bušotine. Pritom se koriste kvantitativne i kvalitativne procedure i jednostavni klasifikacijski testovi standardnih metoda. Rezultati se odnose isključivo na ispitivane uzorke intaktne stijene i ne uključuju diskontinuitete i granične uvjete stijenske mase.

Dakle, svojstva stijena rezultat su njihovog mineralnog sastava, načina postanka, geološke i deformacijske povijesti, utjecaja okoline, uključujući različite promjene i procese trošenja.

Već je utvrđeno da se mehanička svojstva monolita (intaktne stijene) bitno razlikuju od mehaničkih svojstava stijenske mase u prirodi. Mehaničke karakteristike, u prvom redu modul elastičnosti, modul deformacije i čvrstoća znatno su veće za monolit nego za stijensku masu.

2.1.1. Tvrdoća

Tvrdoća (engl. *Hardness*, Hd) je poznata kao fizikalno svojstvo materijala. Tvrdoća stijene definira se kao otpornost minerala ili stijene na prodiranje alata ili trajno utiskivanje. Važno je reći da je tvrdoća rezultat empirijskog ispitivanja i zato tvrdoća nije pravo svojstvo stijene. Često se događa da se dobivaju različite vrijednosti tvrdoće, primjenom različitih ispitivanja, a za isti komad stijene. Stoga se zaključuje da tvrdoća stijene ovisi o metodi ispitivanja (Hoseinie i sur., 2012).

Poznate su različite metode za određivanje tvrdoće, ovisno o svojstvima materijala koji se ispituje. Tako se na temelju tvrdoće minerala koji se nalaze u sastavu intaktne stijene određuje Mohsova tvrdoća, a od poznatih instrumentalnih metoda jedino je IHI (Indentation Hardness Index) prikladan za ispitivanje stijene i to je najnoviji predloženi način testiranja tvrdoće stijena. ISRM predlaže ispitivanje tvrdoće utiskivanjem konusa pod kutom od 60° s vrhom radijusa 5 mm. IHI vrijednost se dobiva omjerom maksimalnog opterećenja [kN] i maksimalne dubine prodiranja [mm]. Ovaj je indeks pokazatelj otpornosti stijene na elasto-plastičnu deformaciju.

Mohsova tvrdoća određuje se promatranjem koliko će se stijena oduprijeti ogrebotinama načinjenima pomoću alata ili druge stijene. Ova ljestvica je najpoznatija i najprikladnija metoda za procjenu i klasifikaciju tvrdoće stijene, jer je ova metoda izravno utemeljena na mineraloškim studijama i ima dobru sposobnost analize tvrdoće stijene. Vezano na Mohsovu tvrdoću, u tablici 2.1 prikazana je klasifikacija stijena. Konačna tvrdoća svake stijene izračunava se na temelju tvrdoće minerala koji se nalaze u njezinom sastavu, pomoću izraza 2.1, u kojem je X udio nekog minerala u sastavu stijene [%], H je Mohsova tvrdoća, a N broj minerala u sastavu stijene.

$$Tvrdoća = \sum_{i=1}^{N} X_i \cdot H_i \tag{2.1}$$

Schmidtov čekić omogućuje brzo i jeftino mjerenje površinske tvrdoće koja se koristi za procjenu mehaničkih svojstava stijena, a može se koristiti na terenu i u laboratoriju. Sastoji se od utega koji uslijed oprugom akumulirane energije udara u čelični klip, koji je u kontaktu s

površinom ispitivanog materijala. Vrijednost odskoka utega nakon udara, u odnosu na njegov ishodišni položaj prije udara, predstavlja zapravo mjeru odskočne tvrdoće ispitivanog materijala. Pokusni postupak za ispitivanje usvojilo je Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM), koje je i predložilo metodu za određivanje tvrdoće stijene na temelju odskoka Schmidtova čekića.

Tablica 2.1. *Klasifikacija stijena s obzirom na njihovu tvrdoću (Jimeno i sur., 1995)*

MOHSOVA TVRDOĆA	1 – 2	2 – 3	3 – 4,5	4,5 – 6	6 – 7	> 7
MINERALI TE TVRDOĆE	Talk, Gips	Kalcit	Fluorit, Apatit	Ortoklas	Kvarc	Topaz, Korund, Dijamant
OPIS TVRDOĆE STIJENE	Vrlo mekana	Mekana	Srednje mekana	Srednje tvrda	Tvrda	Vrlo tvrda

2.1.2. Abrazivnost

Abrazivnost (engl. *Abrasivity*, Ab) stijene ovisna je o vrsti i količini različitih minerala koji se nalaze u sastavu stijene te o graničnoj čvrstoći između mineralnih zrna, slično kao i tvrdoća stijene. Ispitivanjem abrazivnosti mjeri se otpornost stijena na trošenje. Ovi testovi uključuju trošenje korištenjem abrazivnog materijala, trošenje u dodiru s metalom i trošenje na temelju kontakta između stijena. U tablici 2.2 prikazana je jedna od najkorištenijih klasifikacija stijena po abrazivnosti.

Tablica 2.2. *Klasifikacija stijena po abrazivnosti (Baron i Kuznetsov, 1961)*

KAT.	OPIS	INDEKS ABRAZIVNOSTI	KARAKTERISTIČNI PRIMJERI STIJENA U KATEGORIJI
I	Izrazito slabo abrazivne stijene	< 5	Karbonati, mekani sulfidi bez kvarca (galenit, sfalerit, pirotin), apatit
II	Malo abrazivne stijene	5 – 10	Sulfidne rude, baritne sulfidne rude
III	Nešto više abrazivne stijene	10 – 18	Magmatske sitnozrne stijene, kvarcni pješčenjaci, željezne rude
IV	Srednje abrazivne stijene	18 – 30	Kvarcni pješčenjaci, sitnozrnati dijabazi, krupnozrnati pirit, kvarcni krečnjaci
V	Znatno abrazivne stijene	30 – 45	Srednjezrnati i krupnozrnati pješčenjaci, plagiograniti, sitnozrnati graniti i dioriti
VI	Povišeno abrazivne stijene	45 – 65	Srednjezrnati i krupnozrnati graniti i dioriti, granodioriti, porfiriti, sijeniti
VII	Visoko abrazivne stijene	65 – 90	Porfiriti, dioriti, graniti
VIII	Izrazito abrazivne stijene	> 90	Stijene sa sadržajem korunda

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM, 1981) za determinaciju otpornosti stijene na abraziju preporuča ispitivanje u Los Angeles uređaju. Metoda Los Angeles zbog svojih povoljnih karakteristika naišla je na široku primjenu kod utvrđivanja otpornosti različitih materijala na udarno-habajuća opterećenja pa tako i stijene. Drobljenje materijala izazvano je udaranjem i habanjem zrna o zrno, zrna o čeličnu kuglu i zrna o bubanj. U određenoj točki okretanja bubnja agregat s kuglama udara u prečku unutar bubnja koja ih diže do trenutka kada pod utjecajem sile teže oni padaju natrag na suprotnu stijenku bubnja te tako dolazi do udaranja i habanja kamenog agregata. Los Angeles koeficijent *LA* definira se kao postotak materijala koji prolazi kroz sito 1,6 mm nakon završetka ispitivanja.

2.1.3. Lomna žilavost

Lomna žilavost (engl. *Fracture Toughness*, FT) je mjera otpora materijala širenju pukotina, tj. mjera energije potrebne da bi se u materijalu pojavile nove površine (pukotine). Veća lomna žilavost ukazuje na veći otpor širenju pukotina.

Lomna žilavost stijena K_{IC} važna je za teoretska istraživanja i inženjersku primjenu vezanu za slom i otkopavanje stijene. Žilavost je otpor prema djelovanju dinamičkih sila (dinamička čvrstoća), koji u rudarstvu dolazi do izražaja u procesima gdje sila djeluje na stijenu u mahovima, diskontinuirano i pulsirajuće (npr. pri radu udarnih drobilica, hidrauličkog čekića te u manjoj mjeri kod bagera). Tablica 2.3 prikazuje iskustvena područja vrijednosti lomne žilavosti za neke vrste stijena, na temelju istraživanja koja je proveo Whittaker sa suradnicima (1992).

Tablica 2.3. *Područje vrijednosti lomne žilavosti za neke vrste stijena (Whittaker i sur., 1992)*

PRIMJERI STIJENA	LOMNA ŽILAVOST, K_{IC} [MPa $m^{1/2}$]
Bazalt	1,80 – 3,01
Ugljen	0,03 – 0,27
Dolomit	1,66 – 2,47
Granit	1,65 – 2,61
Vapnenac	0,85 – 2,06
Mramor	1,00 – 1,12
Pješčenjak	0,28 – 1,47
Škriljavac	0,37 – 1,08
Sijenit	1,21 – 1,93

U povijesti je korišteno više različitih metoda za ispitivanje, zbog čega Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM, 1988) predlaže dvije metode koje su uskoro postigle opću prihvaćenost. Prva metoda provodi se savijanjem zarezanog uzorka, a druga upotrebom „Short

rod“ uzorka (ISRM, 1988). Obje metode zahtijevaju uzorke u obliku jezgre (cilindra), a nude dvije razine ispitivanja. Ispitivanje prvog nivoa može se obaviti s prijenosnom opremom i zahtijeva bilježenje samo maksimalnog opterećenja tijekom ispitivanja. Ispitivanje drugog nivoa je više orijentirano ispitivanju u laboratoriju i relativno je složenije za provođenje.

2.1.4. Jednoosna tlačna čvrstoća

Jednoosna tlačna čvrstoća (engl. *Uniaxial Compressive Strength*, UCS) materijala je najčešće korištena značajka stijene. Zato je postupak ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće jedan od najčešćih i najvažnijih postupaka ispitivanja u mehanici stijena.

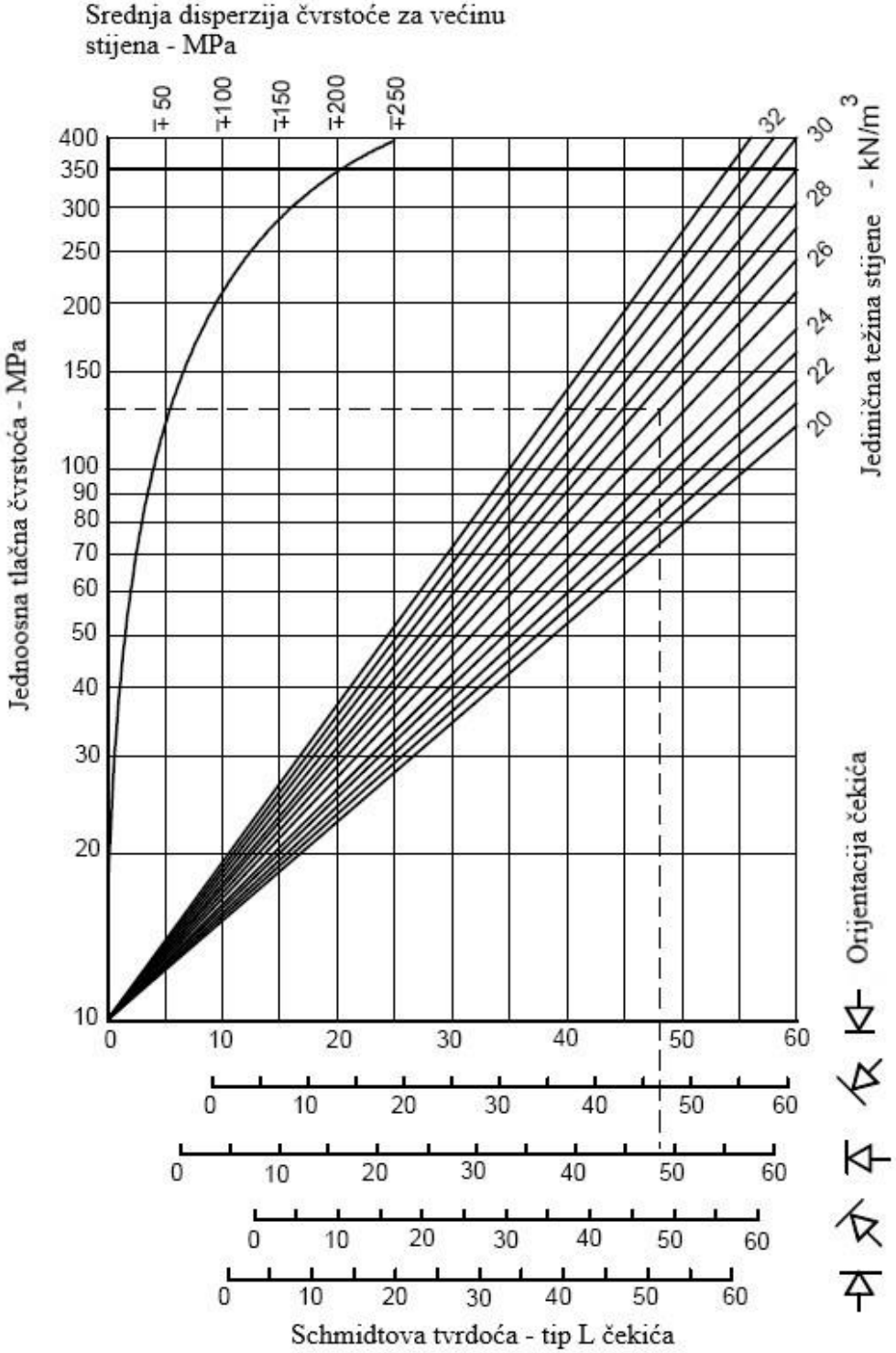
Ispitivanja se provode na uzorcima koji moraju biti pravilni valjci ili prizme s odnosom visine i promjera od 2,5 do 3 : 1, tj. promjerom ne manjim od promjera jezgre (približno 54 mm). Promjer uzorka mora biti najmanje 10 puta veći od promjera najvećeg zrna koje se nalazi u uzorku. Baze i plašt uzorka trebaju biti bez nepravilnosti (hrapavost, ispucalost), odnosno moraju po cijeloj svojoj površini biti glatki. Nestrojna obrada površine uzorka i korištenje materijala za čepljenje i poravnavanje neravnina nije dozvoljeno. Odstupanje promjera presjeka uzorka ne smije biti veće od 0,1 mm od prosjeka dva međusobno okomita promjera mjerena na gornjem, srednjem i donjem dijelu uzorka. Visina uzorka treba biti određena do približno 1 mm. Uzorci za ispitivanje ne smiju biti u skladištu duže od 30 dana, a trebaju biti skladišteni na način da im se zadrži prirodna vlažnost. Vlažnost mora biti utvrđena prema postupku određivanja sadržaja vode, poroznosti i gustoće. Broj potrebnih uzoraka za ispitivanje može se odrediti praktičnom procjenom ispitivača, ali preporučeni broj za ispitivanje je pet uzoraka.

Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene σ_{ci} je maksimalno tlačno naprezanje koje materijal može podnijeti u uvjetima jednoosnog naprezanja, koje se računa prema izrazu 2.2.

$$\sigma_{ci} = \frac{F_c}{A} = \frac{Nanesena\ tlačna\ sila}{Površina} \quad [MPa] \tag{2.2}$$

Ako nije moguće provesti standardni postupak ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, aproksimativna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće može se dobiti iz korelacije s indeksima dobivenim ispitivanjima kao što su ispitivanje opterećenjem u točki (PLT, Point Load Test), koje je opisano u sljedećem poglavlju, ili mjere odskoka kod ispitivanja Schmidtovim čekićem. Korelacije između jednoosne tlačne čvrstoće i Schmidtove tvrdoće (engl. *Schmidt hardness*) najbolje se utvrđuju eksponencijalnim funkcijama jer se jednoosna tlačna čvrstoća eksponencijalno povećava s produktom gustoće materijala i odskočne tvrdoće. Rezultirajuća vrijednost odskoka preko dijagrama na slici 2.1 u vezi je s jednoosnom tlačnom čvrstoćom,

koja ovisi o specifičnoj težini stijene (engl. *Unit weight of rock*) i inklinaciji između čekića i ispitivane plohe (engl. *Hammer orientation*). Na istoj slici prikazana je i krivulja srednje disperzije čvrstoće za većinu stijena (engl. *Average dispersion of strength for most rocks*).



Slika 2.1. *Dijagram za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće stijene na temelju vrijednosti odskoka Schmidtova čekića (Miller, 1965)*

2.1.5. Indeks čvrstoće opterećenjem u točki (PLTi)

Indeks čvrstoće opterećenjem u točki (engl. *Point load test index,* PLTi) određuje se pokusom opterećenja u jednoj točki. Ovo je postupak kod kojeg se ispitivanja mogu provoditi na pravilnim ili nepravilnim uzorcima stijene, što predstavlja jednu od osnovnih prednosti metode. Provedba ispitivanja sastoji se od stavljanja uzorka između dva čelična konusna šiljka, uz mjerenje razmaka između njih. Povećanjem opterećenja dolazi do sloma uzorka, za koji je potrebno da se dogodi u vremenskom razdoblju od 10 do 60 sekundi. Nakon sloma se bilježi koje je opterećenje bilo potrebno da je do njega dovelo. Svrha ispitivanja je određivanje indeksa čvrstoće za standardnu veličinu uzorka, koji se kasnije može koristiti u procjeni vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, klasifikacijama ili drugim procjenama.

Standardno ispitivanje provodi se na valjkastim uzorcima promjera 50 mm, a može se provoditi poprečno i osno. To je važno kod određivanja indeksa čvrstoće anizotropnih stijena kao i indeksa anizotropije materijala, jer je ispitivanje potrebno provesti u najjačem i najslabijem smjeru, tj. okomito i paralelno na plohe oslabljenja. Nakon što se uzorak slomi, ocjenjuje se valjanost ispitivanja koja se provodi na temelju izgleda lomnih ploha. Potrebno je ispitati najmanje 10 uzoraka istog materijala da bi konačni rezultat bio valjan (ISRM, 1981).

Ako se ispitivanje provodi na uzorcima nepravilnog oblika, indeks čvrstoće opterećenjem u točki $I_{S(50)}$ računa se pomoću izraza 2.3, u kojem je F korekcijski faktor, P veličina sile kod sloma, a D_e efektivni promjer uzorka. Korekcijski faktor uveden je za slučajeve kod kojih se ispitivanja provode na uzorcima nepravilnog oblika, odnosno uzorcima čiji efektivni promjeri ne iznose 50 mm, a određuje se izrazom 2.4. Efektivni promjer za uzorke nepravilnog oblika računa se izrazom 2.5, gdje je W prosječna širina uzorka, a D razmak između točaka opterećenja (konusnih čeličnih šiljaka), odnosno debljina uzorka na mjestu ispitivanja.

$$I_{S(50)} = F\frac{P}{D_e^2} \quad [N/m^2] \tag{2.3}$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \tag{2.4}$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} \quad [m] \tag{2.5}$$

Jednom kada je izračunan korigirani indeks čvrstoće opterećenjem u točki $I_{S(50)}$ za ispitivane uzorke, nakon odbacivanja dvije najveće i najmanje vrijednosti od 10 ili više valjanih ispitivanja, može se procijeniti vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće stijenskog materijala koja se može očekivati u ispitivanom smjeru. Veza između σ_{ci} i $I_{S(50)}$ prikazana je izrazom 2.6, u

kojem je *f* faktor konverzije. Vrijednost faktora *f* može varirati između 15 i 50, pogotovo za anizotropne stijene (ISRM, 1981), ali najčešće se kreće u granicama od 20 do 25, a ovisi o vrsti ispitivane stijene (veća vrijednost za tvrde i čvrste stijene, a manja za mekane stijene poput šejla i silta).

$$\sigma_{ci} = f \cdot I_{S(50)} \ [MPa] \tag{2.6}$$

Kvaliteta procjene jednoosne tlačne čvrstoće na temelju rezultata PLT ispitivanja ovisi o odnosu između σ_{ci} i vlačne čvrstoće stijene σ_t (poglavlje 2.1.6). Za većinu krtih stijena taj je odnos približno 10, no za neke mekane siltove taj odnos može biti bliže 5, a to onda znači da se PLT rezultati za slabije stijene moraju drugačije interpretirati. Drugi čimbenik koji utječe na kvalitetu rezultata PLT ispitivanja je broj provedenih ispitivanja.

Čvrstoća dobivena PLT ispitivanjem često zamjenjuje jednoosnu tlačnu čvrstoću, kada postoji dovoljno veliko povjerenje u odnos između $I_{S(50)}$ i σ_{ci} dobivene iz direktnog ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, jer je pravilno izvedeno PLT ispitivanje pouzdano i puno brže.

2.1.6. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća (engl. *Tensile strength*) je maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti kod jednoosnog rastezanja neposredno prije sloma, a označava se kao σ_t. Dobiva se nanošenjem vlačne sile na uzorak stijene prilikom ispitivanja u laboratoriju, a računa se prema izrazu 2.7. Uzorci moraju biti pripremljeni jednako kao i za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće. Vlačno naprezanje nanosi se kontinuirano i jednoliko, s prirastom u iznosu 0,5 – 1,0 MPa/s. Preporuka je izvesti najmanje pet testova, kako bi se dobila reprezentativna vrijednost σ_t (ISRM, 1981).

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} = \frac{Nanesena\ vlačna\ sila}{Površina\ poprečnog\ presjeka} \ [MPa] \tag{2.7}$$

Ispitivanje vlačne čvrstoće najčešće se provodi indirektno pomoću Brazilskog testa (ISRM, 1981). Brazilski test temelji se na eksperimentalnoj činjenici da se stijena koja se nalazi u stanju dvoosnog naprezanja najčešće lomi uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće pod uvjetima kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo tlačno. Tlačno naprezanje po iznosu ne prelazi trostruku vrijednost vlačnog naprezanja.

Vrijednost vlačne čvrstoće za intaktne stijene u pravilu se kreće od 5 % do 10 % vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće (10 % za većinu krtih stijena i bliže 5 % za mekane stijene), ali to može biti i 14 % – 16 % za neke sedimentne stijene (Duncan, 1999). U tablici 2.4 prikazane su

vrijednosti čvrstoće (tlačne i vlačne) za različite vrste stijena, u skladu s podacima različitih autora.

Tablica 2.4. *Vrijednosti čvrstoće intaktnih stijena (Walthan, 1999; Rahn, 1986; Farmer, 1968)*

SVJEŽA STIJENA	JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]		DIREKTNA VLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]
	PROSJEČNA VRIJEDNOST	PODRUČJE VRIJEDNOSTI	
Andezit	210 – 320	100 – 500	7
Amfibolit	280	210 – 530	23
Anhidrit	90	80 – 130	6 – 12
Bazalt	80 – 200	60 – 350	5 – 25
Dijabaz	240 – 350	130 – 365	55
Diorit	180 – 245	120 – 335	8 – 30
Dolorit	200 – 300	100 – 350	15 – 35
Dolomit	60 – 200	50 – 350	5 – 25
Gabro	210 – 280	180 – 300	14 – 30
Gnajs	60 – 200	50 – 250	5 – 20
Granit	70 – 200	50 – 300	7 – 25
Gips	25	10 – 40	1 – 2.5
Vapnenac	60 – 140	50 – 200	4 – 30
Mramor	120 – 200	60 – 250	6 – 20
Silt	20 – 40	10 – 90	1,5 – 10
Kvarcit	200 – 320	100 – 500	10 – 30
Sol	12	5 – 30	–
Pješčenjak	55 – 140	30 – 235	5 – 20
Škriljac	30 – 60	20 – 160	2 – 5,5
Šejl	40 – 150	30 – 200	7 – 20
Tuf	–	10 – 46	1 – 4

2.1.7. Brzina širenja elastičnih valova

Brzina širenja elastičnih primarnih ili P-valova (engl. *Sonic velocity*), kada prolaze kroz intaktnu stijenu, ovisi o gustoći i elastičnim svojstvima te stijene. Mjerenje ove brzine omogućava informaciju i o nekim drugim karakteristikama, kao što je na primjer poroznost. Brzina longitudinalnih ili kompresijskih valova V_P koristi se uglavnom kao klasifikacijski indeks. Ova vrijednost je u linearnoj korelaciji s σ_{ci} i indicira kvalitetu intaktne stijene. V_P brzina u stijenama kreće se između 1000 i 6000 m/s (tablica 2.5). Većina stijena ima široki raspon brzina i to uglavnom zbog varijacija gustoće (varijacije u poroznosti ili mineralnom sastavu).

Ispitivanje se provodi na uzorcima prirodne vlažnosti, koji su u obliku pravilnih valjaka ili prizmi. Da bi se ostvario prijenos P-valova, pretvornici moraju biti u kontaktnom opterećenju s

uzorkom pa zato baze uzorka moraju biti dobro obrađene. Za poboljšanje prijenosa valova površina uzorka može se premazati tankim slojem fine masti, glicerina ili ulja.

Tablica 2.5. *Iskustvene vrijednosti brzina širenja P-valova u intaktnoj stijeni (Gonzalez de Vallejo i Ferrer, 2011)*

SVJEŽA STIJENA	BRZINE ŠIRENJA VALOVA V_P [m/s]
Bazalt	4500 – 6500
Dijabaz	5500 – 7000
Dolomit	5000 – 6000
Granit	4500 – 6000
Gnajs	3100 – 6000
Vapnenac	2500 – 6000
Mramor	3500 – 6000
Silt	1400 – 3000
Kvarcit	5000 – 6500
Sol	4500 – 6000
Pješčenjak	1400 – 4200
Škriljac	4200 – 4900
Šejl	3500 – 5000
Konglomerat	2500 – 5000

Nešto rijeđe mjeri se brzina sekundarnih ili S-valova na uzorcima intaktne stijene. Razlog tome je problematičan prijenos posmičnih ili S-valova s pretvornika na uzorak stijene, čija je površina sferična.U takvim slučajevima mže pomoći poseban gel visoke viskoznosti, a mogu se koristiti specijalni mehanizmi za pritiskanje i otpuštanja petvornika na ispitni uzorak stijene. Bilo da se mjere P ili S-valovi, iz dobivenih vremena prolaska valova kroz uzorak t_P *ili* t_S i izmjerene duljine uzorka l računaju se brzine valova kroz uzorak prema izrazu 2.8.

$$V_P ili\ V_S = \frac{l}{t_P\ ili\ t_S} \quad [m/s], \tag{2.8}$$

2.1.8. Stupanj trošnosti intaktne stijene

Fizičko trošenje intaktne stijene prouzrokuje odlamanje dijelova stijenskog materijala duž ploha određenog usmjerenja. Otvaranje mikropukotina rezultat je djelovanja leda ili soli, dok varijacije temperature i sadržaja vode izazivaju promjene volumena.

Kemijsko trošenje dovodi do raspadanja topivih minerala i formiranja novih minerala kroz procese oksidacije, redukcije i hidratacije. Rezultati kemijskog trošenja kreću se u rasponu od promjene boje intaktne stijene pa do dekompozicije silikatnih i drugih materijala (osim kvarca). Procesi raspadanja igraju vrlo važnu ulogu u kemijskoj promjeni stijena kao što su karbonati,

gipso-ferozni i evaporitni materijali, osobito kamena sol. Djelovanje i efekti trošenja razlikuju se prema vrsti stijene, a direktno ovise o mineralnom sastavu i strukturi intaktne stijene.

Sedimentne stijene su najosjetljivije na fizičke procese trošenja koji utječu na njihova fizikalna i mehanička svojstva. Te stijene uglavnom ostaju stabilne samo u mineraloškom smislu. Magmatske i metamorfne stijene mogu biti kemijski nestabilne na površini, ako su nastale unutar vrlo različitih temperaturnih i naponskih uvjeta te ako su pretrpjele intenzivne kemijske i mineraloške promjene. Njihova otpornost na trošenje ovisi o mineralogiji, a uglavnom su puno otpornije na fizičko trošenje od sedimentnih stijena.

Smanjenje čvrstoće je najvažniji efekt dekompozicije stijene uzrokovane trošenjem. Malo povećanje sadržaja vode ili poroznosti stijene može značiti značajno smanjenje čvrstoće i deformacijskog modula. To znači da granit može imati vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće veću od 250 MPa kad je svjež, do polovice te vrijednosti kad je trošan, pa sve do manje od 100 MPa kad je intenzivno trošan. Brzina P-valova mu također pada s 5000 m/s na polovicu te vrijednosti kad je trošan pa sve do 800 m/s kad je raspadnut do razine rezidualnog tla.

Ispitivanja trajnosti i promjenjivosti vrše se u laboratoriju kako bi se ustanovilo koliko su stijene otporne na procese trošenja. Ispitivanja čvrstoće također daju kvalitativne informacije o otpornosti stijene na trošenje. Opseg u kojem su komponente intaktne stijene potrošene može se odrediti mineraloškom analizom. Za kvalitativnu klasifikaciju intaktne stijene baziranu na stupnju trošnosti koriste se vizualni opis i standardni indeksi, prema tablici 2.6.

Tablica 2.6. *Opis stupnja trošnosti intaktne stijene (ISRM, 1981)*

STUPANJ TROŠNOSTI	OPIS
Svježa	Nema vidljivih znakova trošenja stijenskog materijala.
Djelomično trošna u vidu promjena u boji	Promjene u boji u odnosu na izvorni stijenski materijal. Može se odrediti stupanj promjene u odnosu na izvornu boju. Ako je promjena boje ograničena na određene mineralne sastojke, to treba posebno razmotriti.
Trošna, dezintegrirana	Stijena je rastrošena do razine tla, ali mineralna zrnca nisu raspadnuta.
Izrazito trošna, raspadnuta	Stijena je rastrošena do razine tla, ali neka ili sva mineralna zrnca su raspadnuta.

2.2. Značajke diskontinuiteta

Jedna od osnovnih značajki stijenske mase je diskontinuiranost koju u najvećoj mjeri čine geološke strukture i njihovi elementi (Hrženjak, 2004). Diskontinuitet (engl. *Discontinuity*) je

općí pojam za mehanički prekid u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću okomito na smjer pružanja. Postoji više vrsta diskontinuiteta, a najčešći su:

a) Pukotina (engl. *Joint*) je lom u geološkoj formaciji uzduž kojeg nije došlo do vidljivog pomaka. Može biti zatvorena, otvorena, ispunjena ili neispunjena.
b) Rasjed (engl. *Fault*) je diskontinuitet ili zdrobljena zona uzduž koje je vidljiv posmični pomak (reda veličine nekoliko cm do nekoliko km).
c) Prslina (engl. *Fissure*) je zatvorena, golim okom teško vidljiva pukotina, najčešće se ne proteže kroz cijelo promatrano područje.
d) Slojne plohe (engl. *Bedding planes*) su površine između slojeva u sedimentnim stijenama.
e) Pukotinski klivaž je sustav uskih, gustih, paralelno poredanih pukotina.

Diskontinuiteti se genetski dijele na endokinetičke, koji su nastali tijekom unutarnjih procesa promjene gradive tvari stijene, i egzokinetičke, koji su nastali djelovanjem vanjskih sila (Dimitrijević, 1964). Uzroci pojave diskontinuiteta su geološki ili antropogeni. Uzroci geološke pojave diskontinuiteta su npr. djelovanje tektonskih sila, smanjenje volumena (kontrakcije) uslijed hlađenja magme, skupljanje istaloženih masa uslijed sušenja, vlastita težina (na strmim kosinama), rasterećenje uslijed djelovanja erozije, djelovanje temperaturnih promjena. Antropogeni uzrok pojave pukotina može biti promjena naprezanja uslijed iskopa ili miniranja.

Diskontinuiteti se svrstavaju u sustave, setove ili familije okarakterizirane svojim prosječnim reprezentativnim vrijednostima za orijentaciju i karakteristike čvrstoće. Diskontinuiteti u istoj familiji su paralelni ili subparalelni na svaki drugi. Kada je prisutan skup različitih diskontinuiteta, u različitim smjerovima, oni će odrediti razinu raspucanosti u stijenskoj masi te oblik i veličinu blokova intaktne stijene.

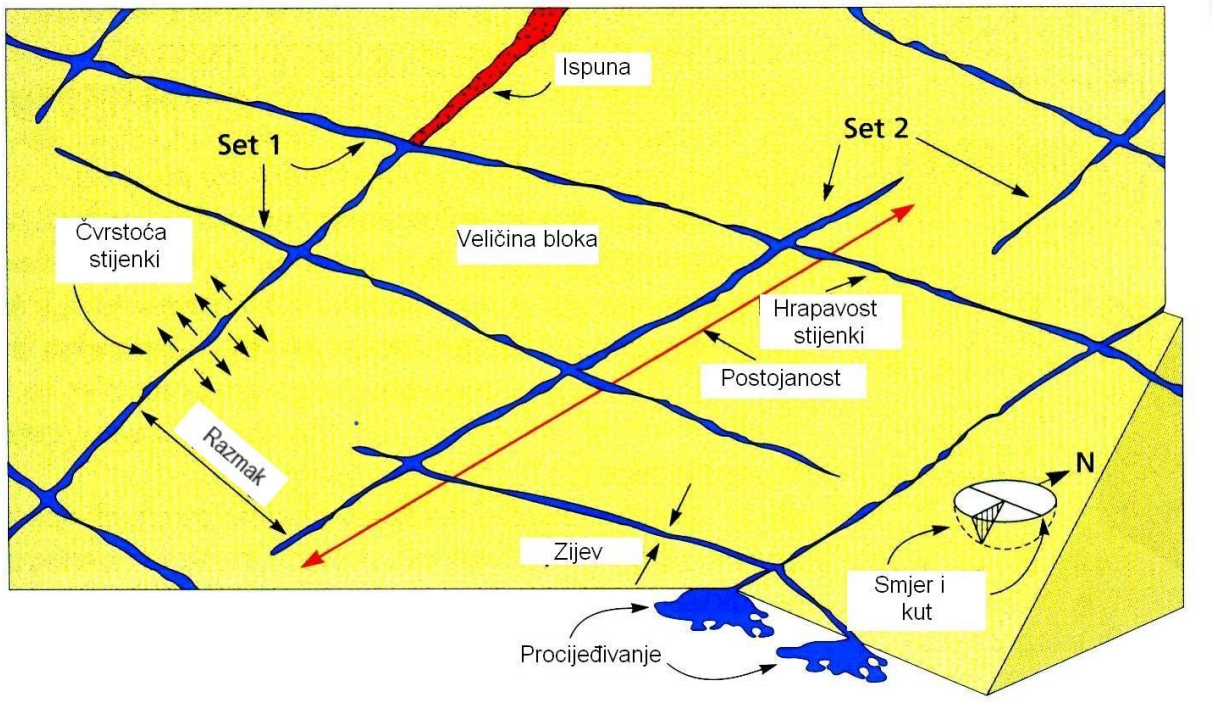
Plohe diskontinuiteta definiraju čvrstoću, deformacijska i hidraulička svojstva, te generalno ponašanje stijenske mase. Diskontinuiteti čine stijensku masu diskontinuiranom i anizotropnom, što znači da ju oslabljuju, tj. povećavaju joj deformabilnost. Sve navedeno prouzrokuje vrlo složenu procjenu mehaničkog ponašanja stijenske mase, u kontekstu inženjerskog posla.

Prema preporuci Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1981), određeno je deset parametara kojima se opisuju diskontinuiteti (slika 2.2):

1) razmak diskontinuiteta
2) postojanost diskontinuiteta

3) orijentacija diskontinuiteta
4) hrapavost stjenki diskontinuiteta
5) čvrstoća stijenki diskontinuiteta
6) zijev diskontinuiteta
7) ispuna diskontinuiteta
8) voda u diskontinuitetu
9) broj sustava diskontinuiteta
10) veličina blokova u stijenskoj masi.

Prva tri parametra opisuju geometrijska svojstva diskontinuiteta i često se koriste za potrebe procjene otkopavanja stijenske mase. Zatim slijedi niz od pet parametara kojima se opisuje stanje diskontinuiteta, a kod procjene podatljivosti stijene otkopavanju najčešće se koriste podaci o ispuni i hrapavosti stijenki diskontinuiteta. Posljednja dva parametra opisa diskontinuiteta (broj sustava diskontinuiteta i veličina blokova u stijenskoj masi) određuju ponašanje stijenske mase pa će biti opisani u sklopu inženjerskih svojstava stijenske mase.

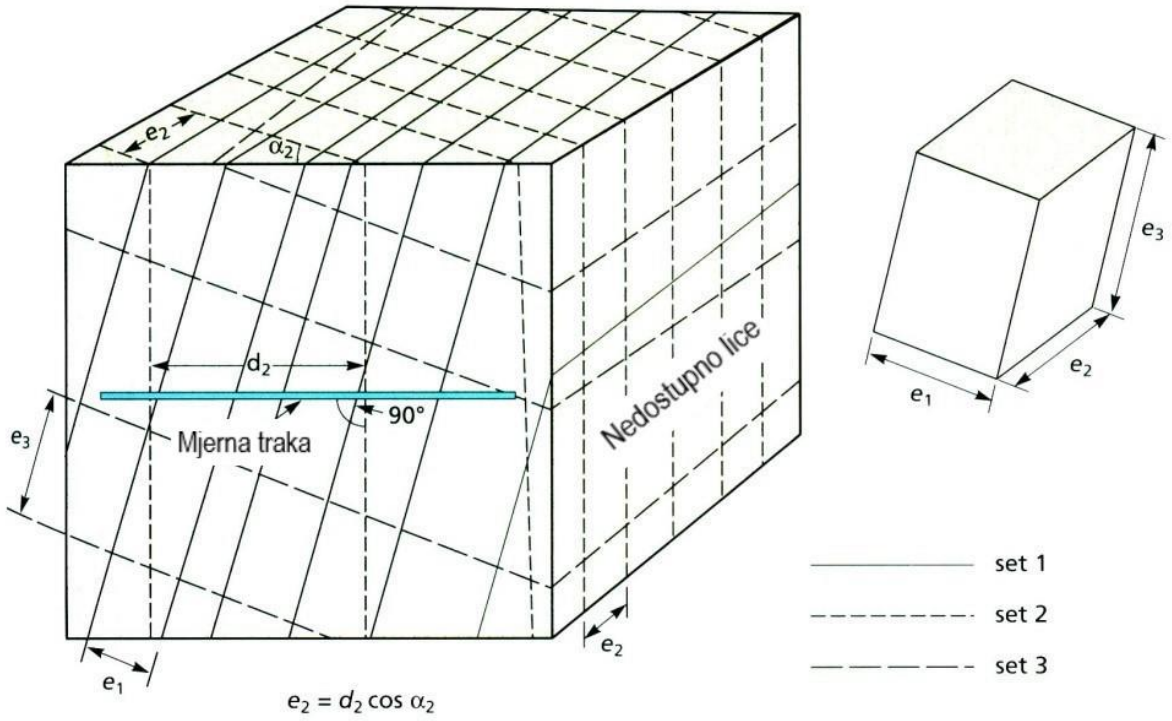


Slika 2.2. *Geometrijska svojstva diskontinuiteta (Hudson, 1989)*

2.2.1. Razmak

Međusobni razmak susjednih diskontinuiteta (engl. *Discontinuity spacing*, DS) kontrolira veličinu individualnih blokova intaktne stijene. Nekoliko sustava diskontinuiteta na malom međusobnom razmaku stvara uvjete male kohezije mase, a u slučaju velikog razmaka javljaju se uvjeti međusobnog zaglavljivanja.

Mjerenja razmaka obavljaju se mjernom trakom s milimetarskom podjelom, duljine najmanje 3 m. Traka se postavlja okomito na ravnine diskontinuiteta, a ako to nije moguće, potrebno je obaviti korekciju mjerenja (slika 2.3). Svi razmaci se registriraju na duljini uzorka koja ne smije biti manja od 3 m, odnosno treba biti veća od deseterostrukog procijenjenog međusobnog razmaka diskontinuiteta.



Slika 2.3. *Mjerenje razmaka diskontinuiteta opažanjem izdanaka stijena na površini (ISRM, 1981)*

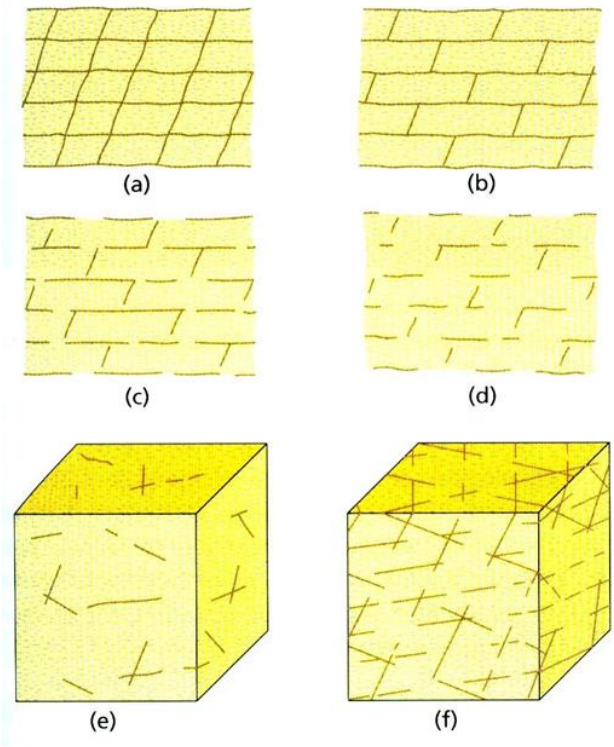
Minimalni, srednji i maksimalni međusobni razmak DS_{min}, DS i DS_{max} izražavaju se brojčano za svaki sustav diskontinuiteta, a kao dopuna brojčanim rezultatima mjerenja daje se i opis diskontinuiteta (tablica 2.7).

Tablica 2.7. *Opis razmaka diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

OPIS RAZMAKA	DS [m]
Ekstremno mali razmak	< 0,02
Vrlo mali razmak	0,02 – 0,06
Mali razmak	0,06 – 0,2
Srednji razmak	0,2 – 0,6
Veliki razmak	0,6 – 2
Vrlo veliki razmak	2 – 6
Ekstremno veliki razmak	> 6

2.2.2. Postojanost

Postojanost (engl. *Joint persistance*, JP) predstavlja prostiranje i veličinu diskontinuiteta unutar promatrane ravnine. Ovo je jedan od najvažnijih parametara stijenske mase, ali je i parametar koji je možda najteže precizno izmjeriti. Diskontinuiteti jednog sustava pukotina bit će često postojaniji od diskontinuiteta drugog sustava (slika 2.4). Kod kosina je posebno važno dobro procijeniti neprekinutost onih diskontinuiteta koji su nepovoljno orijentirani po stabilnost.



Slika 2.4. *Različiti modeli postojanosti za različite sustave diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

Mjerenja neprekinutosti diskontinuiteta obavljaju se mjernom trakom (duljine najmanje 10 m), a mjere se diskontinuiteti u smjeru nagiba i u pravcu pružanja. Relativna postojanost različitih

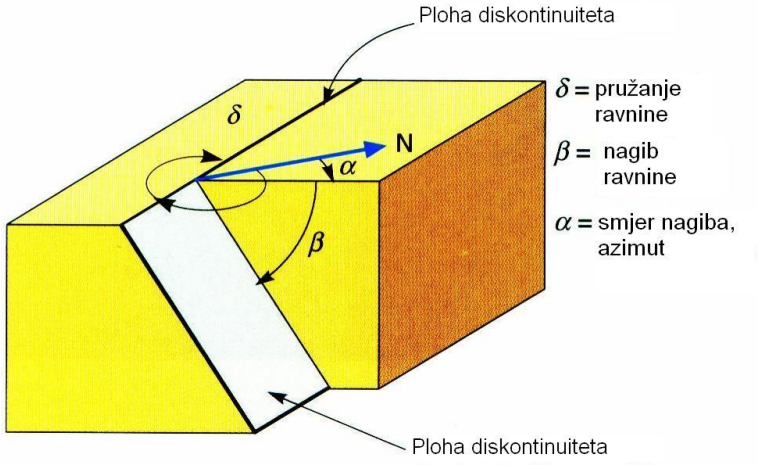
sustava prisutnih diskontinuiteta utječe na konačan opis stijenske mase, a JP se opisuje prema tablici 2.8.

Tablica 2.8. *Opis postojanosti diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

OPIS POSTOJANOSTI	JP [m]
Vrlo mala postojanost	< 1
Mala postojanost	1 – 3
Srednja postojanost	3 – 10
Velika postojanost	10 – 20
Vrlo velika postojanost	> 20

2.2.3. Orijentacija

Orijentacija pukotina (engl. *Joint orientation*, JO) u prostoru definirana je maksimalnim nagibom srednje ravnine pukotine mjereno od horizontalne ravnine (engl. *dip*) β i smjerom nagiba ili azimutom (engl. *dip direction*) α, mjerenim u smjeru kazaljke na satu od stvarnog sjevera do horizontalne projekcije maksimalnog nagiba (slika 2.5). Azimut smjera nagiba α i kut nagiba β u odnosu na horizontalnu ravninu mjere se geološkim kompasom i bilježe u obliku α/β.



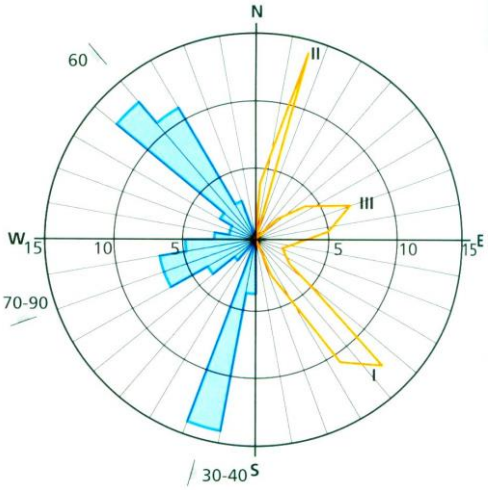
Slika 2.5. *Parametri orijentacije diskontinuiteta*

Različito orijentirani diskontinuiteti ukazuju na oblik blokova, slojeva i mozaika u stijenskoj masi, a to su vrlo važna svojstva koja diktiraju mogućnost otkopavanja stijenske mase pojedinim tehnologijama otkopavanja. Da bi se što bolje obuhvatio utjecaj orijentacije pukotina na podatljivost stijena otkopavanju, najprije se preporuča određivanje glavnog sustava

pukotina, od više sustava koji najčešće prožimaju stijensku masu. Detaljniji prikaz u poglavlju 2.3.1.

Grafičko prikazivanje orijentacije različitih sustava diskontinuiteta može se izvršiti na sljedeće načine:

a) Stereografska projekcija, prikazivanjem polova ili ploha s prosječnim vrijednostima različitih sustava. Rezultati mjerenja položaja sustava diskontinuiteta grafički se predstavljaju strukturnim dijagramima pukotina.
b) Rozeta-dijagram je uobičajeni način predstavljanja velikog broja mjerenja. Mjerenja se prikazuju na pojednostavljenoj rozeti s radijalnim pravcima na razmaku od 10° (slika 2.6). Rezultati se grupiraju u najbliži sektor. Broj pukotina je predstavljen duž radijalnih osi numeriranim koncentričnim kružnicama koje označavaju broj izmjerenih diskontinuiteta u smjeru nagiba. Područje promatranja nagiba prikazuje se izvan kruga.
c) Blok-dijagrami daju generalni pogled na sustave i njihove odgovarajuće orijentacije.
d) Nagib i pravac pružanja prikazuju se odgovarajućim simbolima na geološkoj karti. Oznake se u karte unose na točnim lokacijama diskontinuiteta. Uz svaku geološku kartu potrebno je uvijek dati i jasnu legendu simbola.



Slika 2.6. *Dvije metode prikazivanja podataka orijentacije na rozetnom dijagramu (ISRM, 1981)*

2.2.4. Hrapavost stijenki

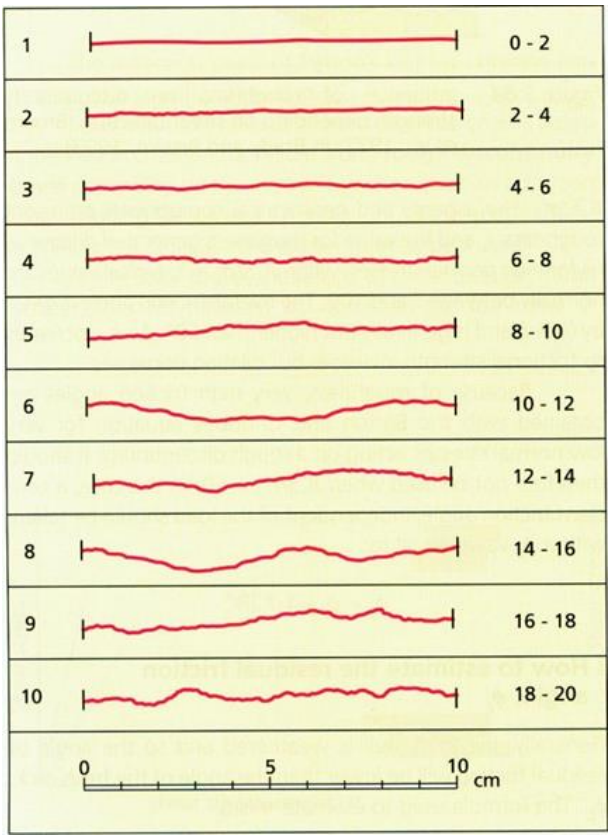
Termin hrapavost (engl. *Roughness*) se u širem smislu koristi kada se opisuje valovitost ploha diskontinuiteta u stijenskoj masi, ali i općenito kada se govori o malim nepravilnostima drugih ploha. Hrapavost se u mehanici stijena može definirati kao valovitost ako se promatra u većem mjerilu ili kao neujednačenost u manjem mjerilu. Zato su kod opisa hrapavosti potrebna dva

razmjera. Prvi je decimetarski i metarski, koji se koristi kod definiranja valovitosti ploha (makrohrapavost), a može biti ravninska, valovita i stepeničasta. Drugi razmjer je milimetarski i centimetarski, a koristi se za nepravilnosti ili neujednačenosti (mikrohrapavost), koje onda mogu biti vrlo glatke (u slučaju da je već došlo do smicanja po plohama diskontinuiteta koji se promatra), glatke i hrapave. O hrapavosti stijenki diskontinuiteta potencijalno ovisi posmična čvrstoća diskontinuiteta. Zbog valovitosti, dolazi do izdizanja kod smicanja, a u slučaju neujednačenosti dolazi do mrvljenja stijenki diskontinuiteta.

Postoji nekoliko metoda za određivanje hrapavosti na terenu. Metoda se može temeljiti na kvalitativnoj procjeni ili numeričkom mjerenju. Odabir metode ovisi o točnosti i razmjeru potrebnog mjerenja te o pristupačnosti površine koja se promatra. Najbrža i najjednostavnija metoda određivanja mikrohrapavosti je vizualna usporedba sa standardnim profilima hrapavosti. Najčešće se to izvodi tako da se tzv. Bartonov profilometar prisloni uz stijenku diskontinuiteta pa se dobiveni profil uspoređuje sa standardnim profilima prikazanim na slici 2.7, s ciljem procjene koeficijenta hrapavosti JRC (engl. *Joint Roughness Coefficient*) koji može imati vrijednost od 1 do 20. Za numeričko mjerenje koriste se preciznije metode. Tako se metodom linearnih profila detaljno snimaju x-y vrijednosti iz kojih se mogu dobiti kutovi hrapavosti i valovitosti, dok se metodom ploče pomoću geološkog kompasa mjere kutovi hrapavosti ploha diskontinuiteta u nekoliko smjerova, najčešće kada je nepoznat smjer potencijalnog kretanja (ISRM, 1981). Općenito, mjerenja treba izvesti na profilima koji dobro reprezentiraju hrapavost ploha na istražnoj lokaciji.

Svrha određivanja hrapavosti je u procjeni posmične čvrstoće diskontinuiteta. Hrapavost je vrlo važna komponenta posmične čvrstoće, osobito kod pukotina bez kohezije i ispune. Generalno, hrapavost povećava posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. Patton (1966) među prvima predlaže model sloma u stijenskoj masi koji se temelji na utjecaju hrapavosti prisutnoj na stijenkama diskontinuiteta. Nepravilnost plohe diskontinuiteta definira se kutom hrapavosti *i*, koji se pribraja osnovnom kutu trenja Φ_B kako bi se dobila konačna vrijednost kuta Φ_P. Slijedeći spomenuti model, Barton i Choubey (1977) predstavljaju svoj empirijski kriterij. Na temelju analize ponašanja hrapavih diskontinuiteta kod laboratorijskih ispitivanja zaključuju kako su hrapavost i tlačna čvrstoća stijenki pukotina u vezi s normalnim efektivnim naprezanjem koje djeluje, prema izrazu 2.9, u kojem su τ i σ_n posmično i normalno efektivno naprezanje na plohi diskontinuiteta, Φ_r je rezidulani kut trenja, *JRC* je koeficijent hrapavosti diskontinuiteta, a *JCS* (engl. *Joint wall Compresion Strength*) tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (poglavlje 2.2.5).

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\left[JRC \cdot \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r\right] \tag{2.9}$$



Slika 2.7. *Standardni profili za određivanje JRC-a pomoću Bartonovog profilometra (Barton i Choubey, 1977)*

2.2.5. Čvrstoća stijenki

Tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta *JCS* uvelike ovisi o vrsti intaktne stijene i trošnosti, a važna je komponenta posmične čvrstoće i deformabilnosti, naročito kod pukotina bez ispune gdje su stijenke u direktnom kontaktu. Na čistim, svježim diskontinuitetima čvrstoća će biti jednaka čvrstoći intaktne stijene, no u normalnim uvjetima ona je manja zbog trošenja stijenki diskontinuiteta. Trošenje (alteracija) utječe na stijenke diskontinuiteta puno više nego na intaktnu stijenu. Zato se na početku mjerenja čvrstoće stijenki diskontinuiteta direktnim opažanjem na terenu procjenjuje stupanj rastrošenosti stijenske mase i stupanj rastrošenosti stijenskog materijala zidova individualnih diskontinuiteta ili opažanih sustava. Martin i Hencher (1986) predložili su šest stupnjeva trošnosti stijena, slično kao što je prikazano u tablici 2.9.

Tablica 2.9. *Ocjena stupnja rastrošenosti stijenke diskontinuiteta i stijenske mase*

NAZIV	OPIS	STUPANJ
Svježa	Nema vidljivih znakova raspadanja stijenskog materijala.	I
Malo rastrošena	Promjena boje ukazuje na početak rastrožbe.	II
Umjereno rastrošena	Manje od polovice stijenskog materijala je rastrošeno ili dezintegrirano u tlo.	III
Jako rastrošena	Više od polovine stijenskog materijala je rastrošeno ili pretvoreno u tlo.	IV
Potpuno rastrošena	Sav stijenski materijal je pretvoren u tlo. Izvorna struktura stijenske mase još uvijek je sačuvana.	V
Rezidualno tlo	Sav stijenski materijal pretvoren je u tlo, a struktura i tekstura stijene potpuno su uništeni. Postoji značajna promjena volumena, ali nije došlo do većeg pomaka tla.	VI

U drugoj se fazi procjenjuje JCS. Ova se procjena najčešće obavlja ručnim indeksnim testovima za procjenu vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, uz pomoć džepnog nožića i geološkog čekića (tablica 2.17), odnosno mjerenjem odskoka Schmidtovog čekića. Ovo ispitivanje uzima u obzir mehaničku čvrstoću tanke zone rastrošenog materijala zida neposredno uz površinu diskontinuiteta, što mu daje i odgovarajući značaj među ispitivanjima, s obzirom na to da upravo taj materijal značajno kontrolira posmičnu čvrstoću i određuje kvalitetu stijene. Ako na diskontinuitetu nema tragova trošenja, postupak procjene *JCS* isti je onom prikazanom u poglavlju 2.1.4. No, budući da je najčešće stijenka diskontinuiteta trošna, vrijednost *JCS* [MPa] može se dobiti iz rezultata ispitivanja Schmidtovim čekićem na stijenkama diskontinuiteta korištenjem izraza 2.10, gdje je γ [kN/m^3] specifična težina stijene, a r vrijednost odskoka Schmidtovog čekića. Ako nisu dostupna konkretna mjerenja, Gonzalez de Vallejo i Ferrer (2011) predlažu da se kao gruba procjena može koristiti izraz 2.11.

$$\log_{10} JCS = 0.00088 \cdot \gamma \cdot r + 1.01 \tag{2.10}$$

$$JCS/\sigma_{ci} = 0.25 \tag{2.11}$$

2.2.6. Zijev

Otvor ili zijev je okomiti razmak koji odvaja susjedne zidove otvorenog diskontinuiteta (engl. *Joint Separation*, JS), pri čemu je međuprostor ispunjen vodom ili zrakom. Ovi otvori nastaju kod pomaka diskontinuiteta velike hrapavosti i valovitosti, zbog vlačnih pukotina te prilikom ispiranja i trošenja.

Utjecaj veličine zijeva najbolje se procjenjuje pokusom vodopropusnosti. Tlak vode u pukotinama te dotok i otjecanje vode i plina ovise o veličini zijeva. Otvori vidljivi na stijenskom izdanku su uglavnom poremećeni pa je taj vidljivi zijev vjerojatno nešto veći od otvora koji postoje unutar stijenske mase.

Zijev diskontinuiteta bilježi se zasebno za svaki sustav pukotina. Pojedinačni diskontinuiteti sa zijevom znatno širim od uobičajenih trebaju se detaljno opisati i dopuniti podacima o orijentaciji i lokaciji diskontinuiteta. Ovisno o izmjerenoj veličini zijeva, diskontinuiteti se klasificiraju prema tablici 2.10.

Tablica 2.10. *Opis zijeva diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

VELIČINA ZIJEVA	OPIS ZIJEVA	
< 0,1 mm 0,1 – 0,25 mm 0,25 – 0,5 mm	Vrlo zatvoren Zatvoren Djelomično otvoren	„ZATVORENE“ STRUKTURE
0,5 – 2,5 mm 2,5 – 10 mm >10 mm	Otvoren Umjereno širok Širok	„RASPUCANE“ STRUKTURE
1 – 10 cm 10 – 100 cm > 1 m	Vrlo širok Ekstremno širok Kavernozan	„OTVORENE“ STRUKTURE

2.2.7. Ispuna

Ispuna diskontinuiteta (engl. *Joint Filling*, JF) predstavlja materijal koji se nalazi između susjednih zidova diskontinuiteta, a kao primjeri navode se kalcit, klorid, glina, prah ili breča. Okomiti razmak između susjednih zidova diskontinuiteta naziva se širinom ispune diskontinuiteta. Zbog velike raznolikosti ispuna diskontinuiteta, one pokrivaju široko područje fizikalnog ponašanja vezanog za posmičnu čvrstoću, deformabilnost i vodopropusnost stijenske mase. Ova širina područja fizikalnog ponašanja ovisi o mineralnom sastavu ispune, veličini čestica ispune, stupnju konsolidacije, sadržaju vode i vodopropusnosti, prethodnim pomacima, hrapavosti stijenki diskontinuiteta te širini i ispucanosti stijene.

Opisom ispune po individualnim diskontinuitetima ili sustavima pukotina određuje se:

a) Geometrija diskontinuiteta: širina zijeva, hrapavost stijenki, terenska skica.
b) Tip ispune zijeva: mineraloški sastav, veličina čestica, stupanj rastrožbe, indeksni parametri mehanike tla, potencijalno bubrenje.
c) Čvrstoća ispune: ručni indeksi, posmična čvrstoća, prekonsolidirani odnos, prethodni pomaci.
d) Procjeđivanje: sadržaj vode, kvantitativni podaci o vodopropusnosti.

2.2.8. Voda u diskontinuitetu

Procjeđivanje (engl. *Seepage*) vode kroz stijensku masu nastaje zbog toka vode kroz vodopropusne diskontinuitete. Kod sedimentnih stijena vodopropusnost stijenskog materijala može biti značajna. Prognoze razine, puta i aproksimativnog tlaka podzemne vode mogu često upozoriti na eventualnu nestabilnost stijenske mase. Nepravilne razine podzemnih voda mogu se pojaviti u stijenskoj masi koja je prožeta nepravilnim strukturama.

Hidrogeološka situacija procjenjuje se na temelju geoloških predviđanja mogućeg položaja vodonosnih i vodonepropusnih slojeva te na temelju tih slojeva predviđenih smjerova procjeđivanja. Procjeđivanje u diskontinuitetima opisuje se prema tablici 2.11.

Tablica 2.11. *Opis procjeđivanja u diskontinuitetima (ISRM, 1981)*

DISKONTINUITETI BEZ ISPUNE	DISKONTINUITETI S ISPUNOM	KATEGORIJA
Diskontinuitet je vrlo zatvoren i suh, nema pojave tečenja vode duž diskontinuiteta.	Materijal ispune je jako konsolidiran i suh; zbog nepropusnosti ispune ne očekuje se značajan protok.	I
Diskontinuitet je suh bez znakova tečenja vode.	Materijal ispune je vlažan, ali slobodna voda nije prisutna.	II
Diskontinuitet je suh, ali pokazuje znakove tečenja vode; primjerice boja hrđe.	Materijal ispune je vlažan; povremeno kapanje vode.	III
Diskontinuitet je vlažan, ali slobodna voda nije prisutna.	Materijal ispune pokazuje znakove ispiranja, kontinuirani protok vode (l/min)	IV
Diskontinuitet pokazuje filtraciju, povremeno kapanje vode, ali nema kontinuiranog toka.	Materijal ispune je lokalno ispran, značajan protok vode duž ispranih kanala (l/min, opisati protok).	V
Diskontinuitet pokazuje kontinuiran tok vode (l/min, opisati protok).	Materijal ispune je potpuno ispran, vrlo velik protok vode (l/min, opisati protok).	VI

2.3. Značajke stijenske mase

Svojstva stijenske mase su mjerljiva ili na neki drugi način opisiva litološka svojstva koja se moraju procijeniti ili odrediti na makroskopskoj razini i na terenu. To uključuje svojstva svih komponenti stijenske mase, a to su već opisana svojstva različitih vrsta diskontinuiteta i svojstva intaktne stijene.

Svojstva stijenske mase koja najviše utječu na mogućnost njezina otkopavanja su:

a) broj i orijentacija dominantnog sustava (seta, familije) diskontinuiteta
b) veličina i oblik blokova preko indeksa veličine bloka i volumetrijskog broja pukotina

c) stupanj raspucanosti koji se izražava RQD indeksom
d) brzina širenja seizmičkih valova
e) stupanj trošnosti stijenske mase.

2.3.1. Broj i orijentacija sustava diskontinuiteta

Broj sustava diskontinuiteta (engl. *Number of Joint Sets*, NJS) utječe na mehaničko ponašanje stijenske mase i određuje deformabilnost pri kojoj još ne dolazi do loma intaktne stijene. Utjecaj sustava na stijensku masu osobito dolazi do izražaja kod otkopavanja, a posebno kod miniranja gdje broj sustava definira stupanj odlamanja. Broj sustava značajan je i za stabilnost kosina, a ako je broj sustava velik, onda može odrediti i način loma (kružni, translatorni).

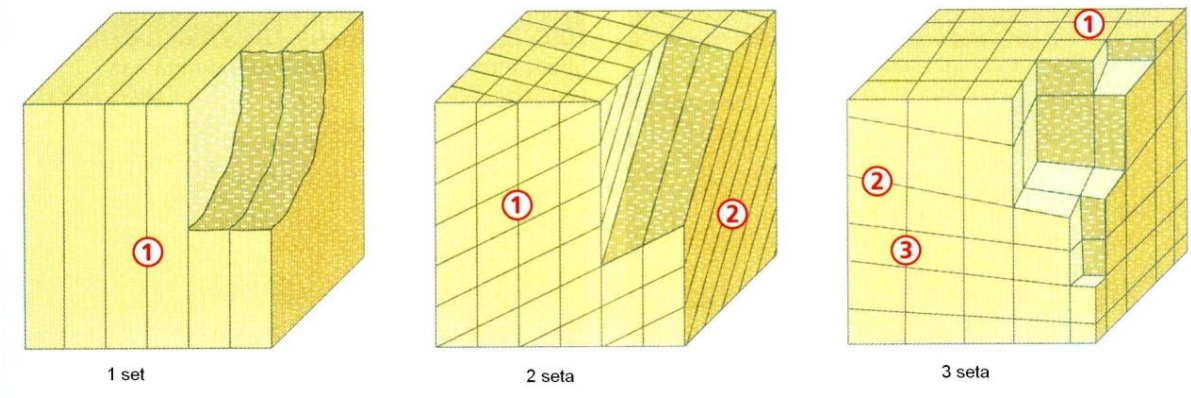
Prilikom istraživanja (kartiranja) stijenske mase svi prisutni sustavi moraju se utvrditi te za svaki sustav mora biti procijenjen stupanj važnosti. To se može izraziti kroz determinaciju i numeriranje sustava pukotina prema važnosti. Tako će glavni sustav s najvećim odnosom između postojanosti i razmaka diskontinuiteta (najveći JP, s malim DS), najčešće biti nazvan sustav broj 1 ili dominantni sustav. Pri označavanju sustava pukotina potrebno je odvojiti diskontinuitete koji ne pripadaju sustavima.

Prosječna orijentacija sustava diskontinuiteta dobiva se na temelju stereografske projekcije ili rozeta-dijagrama iz podataka o izmjerenoj orijentaciji svakog zasebnog diskontinuiteta u sustavu. Način određivanja i prikazivanja orijentacije svakog diskontinuiteta zasebno prikazan je u poglavlju 2.2.3.

Stijenska masa može se klasificirati po broju sustava pukotina, kako je prikazano u tablici 2.12. Tako klasa stijenske mase može varirati od masivne stijenske mase, preko stijenske mase sa samo jednim glavnim sustavom pukotina, do stijenske mase s četiri ili više sustava pukotina. U sedimentnim stijenama česta je pojava tri sustava koji su ortogonalni jedan na drugi, s time da je jedan od sustava najčešće slojna ploha. Sustavi diskontinuiteta mogu se prezentirati grafički u obliku blok-djagrama, kao što je to prikazano na slici 2.8.

Tablica 2.12. *Klasifikacija stijenske mase prema broju sustava diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

KLASA STIJENSKE MASE	BROJ SUSTAVA PUKOTINA
I	Masivna, moguća poneka pukotina
II	Jedan sustav pukotina
III	Jedan sustav pukotina s ponekim neodređenim pukotinama
IV	Dva sustava pukotina
V	Dva sustava pukotina s ponekim neodređenim pukotinama
VI	Tri sustava pukotina
VII	Tri sustava pukotina s ponekim neodređenim pukotinama
VIII	Četiri ili više sustava
IX	Razdrobljena trošna stijena, nalik na tlo



Slika 2.8. *Blok-dijagrami s prikazom sustava diskontinuiteta (Gonzalez de Vallejo i Ferrer, 2011)*

2.3.2. Veličina blokova

Veličina bloka je izuzetno važan indikator ponašanja stijenske mase. Dimenzije blokova određene su s DS (poglavlje 2.2.1), JP (poglavlje 2.2.2) i NJS (poglavlje 2.3.1). Efikasnost otkopavanja stijenske mase u funkciji je prirodne veličine blokova.

Broj sustava diskontinuiteta i njihova orijentacija određuju oblik blokova pa tako stijenska masa može izgledati blokovski, nepravilno, pločasto ili stupno. Kombinacija veličine bloka i međublokovske čvrstoće smicanja određuje mehaničko ponašanje stijenske mase.

Veličina bloka opisuje se pomoću indeksa veličine bloka (engl. *Block size index*) ili volumetrijskog broja pukotina (engl. *Volumetric joint count*). Indeks veličine bloka I_b određuje se odabiranjem nekoliko blokova tipične veličine, a zatim mjerenjem njihovih dimenzija (slika

2.3) te proračunom prema izrazu 2.12. Ovaj podatak bilježi se uz podatak o broju sustava diskontinuiteta.

$$I_b = \frac{(e_1+e_2+e_3)}{3} \tag{2.12}$$

Volumetrijski broj pukotina J_v prezentira ukupni broj pukotina po jedinici volumena stijenske mase. J_v uveo je Palmström (1982), a obično se determinira pomoću razmaka diskontinuiteta unutar jediničnog volumena stijenske mase prema izrazu 2.13, u kojem su *S1*, *S2* i *S3* razmaci između diskontinuiteta u svakom od promatranih sustava diskontinuiteta. Na temelju volumetrijskog broja pukotina može se opisati veličina blokova stijene, kako je prikazano u tablici 2.13.

$$J_v = \frac{1}{S1} + \frac{1}{S2} + \frac{1}{S3} + \cdots \tag{2.13}$$

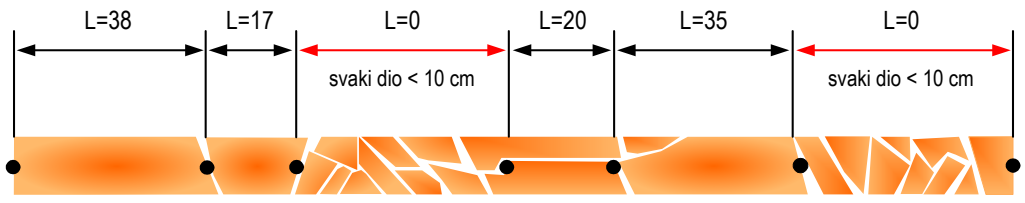
Tablica 2.13. *Opis veličine bloka na temelju volumetrijskog broja pukotina (ISRM, 1981)*

OPIS	J_v [pukotina/m^3]
Vrlo veliki blokovi	< 1
Veliki blokovi	1 – 3
Blokovi srednje veličine	3 – 10
Mali blokovi	10 – 30
Vrlo mali blokovi	> 30

2.3.3. Stupanj raspucanosti

Razlomljenost stijenske mase definirana je brojem diskontinuiteta, njihovim razmakom i stanjem te tipom i postankom. Stupanj raspucanosti (engl. *Fracture Degree*) uglavnom se izražava kroz RQD indeks (*Rock Quality Designation* Index). Indeks kvalitete stijenske mase ili RQD procjenjuje se na osnovi rekonstrukcije jezgre istražne bušotine. RQD indeks je definiran ovisno o broju i stanju pukotina kao postotak dijelova jezgre jednakih ili duljih od 10 cm $L_{\geq 10}$ u ukupnoj duljini izdvojene jezgre L_U (slika 2.9), a izračunava se prema izrazu 2.14.

$$RQD = \frac{\sum L_{\geq 10}}{L_U} \cdot 100 \quad [\%] \tag{2.14}$$



Slika 2.9. *Postupak mjerenja duljine bušotinske jezgre za proračun RQD indeksa*

RQD indeks kroz godine postao je standardni kvantifikator nabušene jezgre, a njegova prednost leži u jednostavnosti i neovisnosti o veličinskom razmjeru, odnosno u brzoj procjeni mehaničke kvalitete čak i za problematične, trošne, izrazito raspucane i razlomljene stijene. Međutim, taj indeks ne uzima u obzir JO, DS, JF i druge značajke diskontinuiteta. Također, RQD je ovisan o položaju i orijentaciji bušotine. Kako bi se mogla korigirati vrijednost RQD indeksa, Palmström (1982) je za procjenu vrijednosti RQD indeksa predložio rješenje izvedeno iz volumetrijskog broja pukotina po volumenu J_v (poglavlje 2.3.2), kada su tragovi pukotina vidljivi na površini stijenske mase. Pritom se pretpostavlja da u diskontinuitetima nema glinene ispune. Palmströmov izraz (izraz 2.15) je poznat kao volumni pukotinski račun (za $J_v < 4{,}5 \Rightarrow RQD = 100$). Povećanje broja pukotina smanjuje RQD indeks pa se tako korigira razina kvalitete stijenske mase. To je iznimno važno ako je razmak pukotina približno 10 cm, jer je za sve kontinuirane razmake nešto veće od 10 cm *RQD = 100*, a za sve nešto manje razmake od 10 cm je *RQD = 0*. Klasifikacija stijenske mase na temelju RQD indeksa prikazana je u tablici 2.14.

$$RQD = 115 - 3{,}3 \cdot J_v \tag{2.15}$$

Tablica 2.14. *Opis kvalitete stijenske mase prema RQD indeksu (Deere, 1968)*

RQD [%]	< 25	25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
KVALITETA STIJENE	Vrlo slaba	Slaba	Povoljna	Dobra	Vrlo dobra

2.3.4. Brzina širenja seizmičkih valova

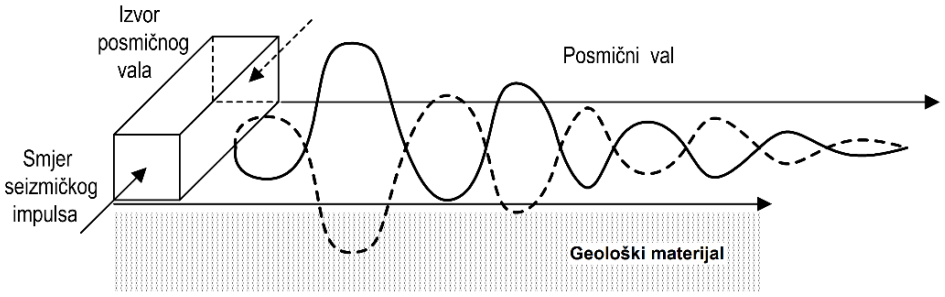
Neke geofizičke metode upotrebljavaju širenje seizmičkih valova karakterističnih brzina za određivanje značajki stijenske mase. Ova seizmička istraživanja provode se kod vrlo malih naprezanja i kao takva ostaju u elastičnoj domeni deformacija. U teoriji širenja seizmičkih valova pretpostavlja se da stijena u svakoj svojoj točki ima jednaka svojstva te da su ta svojstva u svim smjerovima jednaka. Ovaj slučaj nije nikada u potpunosti zadovoljen, ali se odstupanja zanemaruju. Polazna točka seizmičkih istraživanja je mjerenje vremena u kojem se seizmički valovi šire kroz podzemlje do nekih geoloških granica, na kojima se reflektiraju ili refraktiraju.

Seizmička refrakcija je geofizička metoda koja omogućuje određivanje brzina elastičnih valova u uslojenoj stijeni kao funkcije dubine. Naime, seizmički valovi se šire od izvora koji se nalazi na površini te se refraktiraju na granicama slojeva različitih seizmičkih brzina i vraćaju se na

površinu do niza geofona, koji su raspoređeni na određenim razmacima duž orijentiranog pravca – refrakcijskog profila. Postoji nekoliko tipova seizmičke refrakcije, a koji će se tip primijeniti, ovisi o ciljevima istraživanja. Najčešće korišteni tip zasniva se na prvim nailascima uzdužnih kompresijskih ili primarnih valova (P-valovi). Međutim, mogu se analizirati i prvi nailasci posmičnih ili sekundarnih S-valova. U tu se svrhu provode istraživanja generiranjem posmičnih valova s površine i mjerenjem vremena nailaska S-valova do horizontalnih geofona (slika 2.10). Detekcija nailazaka prvih poremećaja na nizu postavljenih geofona se uvijek odnosi na direktan val ili na refraktirani val.

Refrakcijskom seizmikom određuju se brzine elastičnih valova duž profila u postavljenom presjeku geomedija, a primjenjuje se za lociranje značajnijih diskontinuiteta i kontinuirano praćenje prostornog rasporeda i promjena fizikalno-mehaničkih svojstava geološke sredine. Prosječne brzine P i S-valova za neke vrste stijena prikazane su u tablici 2.15, a određuju ih:

a) svojstva intaktne stijene (mineralni sastav, struktura, gustoća, poroznost, anizotropija)
b) svojstva stijenske mase (prostorna raspodjela geoloških tijela, razlomljenost, zijev i ispuna diskontinuiteta, stanje naprezanja i prisutnost podzemne vode).



Slika 2.10. *Princip terenskog mjerenja brzina posmičnih valova seizmičkom refrakcijom*

Tablica 2.15. *Prosječne vrijednosti brzina P i S-valova i prosječne gustoće ρ za neke stijene (Bolllinger, 1972; Redpath, 1973)*

MATERIJAL	**V_P [m/s]**	**V_S [m/s]**	**ρ [g/cm^3]**
Granit	4000 – 6100	2150 – 3350	2,67
Gabro	6550	3450	2,98
Bazalt	5600	3050	3,00
Dijabaz	5500 – 7000	3000 – 4500	3,00
Pješčenjak	1800 – 4000	915 – 3000	2,45
Šejl	2500 – 4250	1000 – 3000	2,60
Vapnenac	2000 – 6100	1800 – 3800	2,65
Lapori	1800 – 3900	1050 – 2300	2,35

2.3.5. Stupanj trošnosti

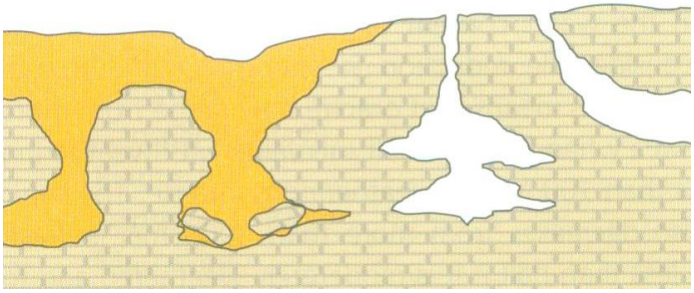
Kroz procese trošenja stijenske mase djeluje se na blokove intaktne stijene, kao i na postojeće diskontinuitete. Mehaničko ili fizičko trošenje može prouzročiti da se diskontinuiteti već prisutni u stijenskoj masi još više otvore ili da nastanu novi diskontinuiteti pucanjem veza između zrna ili minerala koji formiraju intaktnu stijenu. Diskontinuiteti su idealni putevi za tok vode, što doprinosi povećanju kemijskog i fizičkog trošenja.

Rezidualna tla su finalni produkt in situ trošenja stijenskih masa. Trošne stijenske mase čiji vertikalni profil zadržava svoju stijensku strukturu uvijek se mijenjaju kroz kompoziciju intaktne stijene, a ponekad se nazivaju saproliti ili regoliti. Osim postojećih diskontinuiteta, neki profili mogu sadržavati i druge plohe oslabljenja zbog preferencijalnog trošenja. U ovisnosti o stupnju trošenja, procesi trošenja mogu sačuvati originalne blokove intaktne stijene ili ih reducirati sve do razine tla.

Dubina trošenja ovisi o vrsti stijene, klimi i veličini izloženosti trošenju. Laporovite stijene, porozni pješčenjaci i slabi vapnenci često se troše do većih dubina nego graniti ili metamorfne stijene. U vlažnim tropskim klimama tla nastaju trošenjem stijenskih masa do dubine 30 m.

Proces erozije je važna posljedica trošenja stijenske mase. Kad se smanji litostatički tlak, stijenska masa se proširuje duž ploha pukotina koje su nastale paralelno s površinom tla, generirajući tako slojevitu strukturu. Ovaj fenomen je puno važniji u materijalima s postojećim plohama oslabljenja, kao što su siltovi i šejlovi.

Karbonatne stijenske mase troše se i na površini i u unutrašnjosti duž pukotina i slojnih ploha, stvarajući tako pukotinske formacije sa šupljinama nastalim raspadanjem. Ti procesi prouzrokuju nepravilni krški reljef u kojem se mjestimice nalaze i tvrde stijene s mekanom glinovitom ispunom, špilje i ponori (slika 2.11).



Slika 2.11. *Trošenje karbonatnih stijenskih masa*

Kad su magmatske stijene (graniti, diorioti) izložene, može se pojaviti dekompresija pukotina paralelnih s površinom, čime se olakšava kemijsko trošenje. Tim procesom magmatske stijene

prelaze u feldspate, tinjci u intaktnoj stijeni u minerale glina, a kvarc u pijesak. Diskontinuiteti su najvažnije zone promjena, a sferoidno trošenje događa se na blokovima intaktne stijene i između njih, ostavljajući jezgru intaktne stijene manje promijenjenom.

U metamorfnim stijenama (gnajs, amfibolit) feldspati i pirokseni imaju tendenciju da se promijene brže nego amfiboli, dok kvarc ostaje nepromijenjen. Gnajsi su karakteristične grupe minerala, a grupiranost minerala najviše odgovara kemijskim procesima trošenja koji u zonama stvaraju promjene pa nastaju oslabljena područja u stijenskoj masi.

Stupanj trošnosti u stijenskim masama (engl. *Rock Mass Weathering*, RMW) može se procijeniti iz stupnja ispucanosti koristeći *RQD* indeks, kao i iz dobivenog broja diskontinuiteta u stijenskoj masi sklonih trošenju. Vrijednost brzine seizmičkih valova kroz stijensku masu također može pokazati kakav je stupanj trošnosti. Kvalitativna klasifikacija stijenskih masa s obzirom na njihov stupanj trošnosti temelji se na vizualnom opisu i standardnim indeksima. Tablica 2.16 prikazuje klasifikaciju stijenske mase prema stupnju trošnosti.

Tablica 2.16. *Klasifikacija stijenske mase s obzirom na stupanj trošnosti*

STUPANJ TROŠNOSTI	TIP	OPIS
I	Svježa	Nema vidljivih znakova trošenja, eventualno lagana promjena boje na plohama diskontinuiteta.
II	Djelomično trošna	Promjena boje ukazuje na trošenje stijene i ploha diskontinuiteta. Takva stijena nešto je slabija u odnosu na svježu, netrošenu stijenu.
III	Srednje trošna	Manje od pola stijenskog materijala rastrošeno i pretvoreno u tlo.
IV	Jako trošna	Više od pola stijenskog materijala rastrošeno i pretvoreno u tlo.
V	Potpuno rastrošena	Sav stijenski materijal je dezintegriran u tlo.
VI	Rezidualno tlo	Stijenski materijal pretvoren je u tlo. Struktura mase je uništena. Moguće su velike promjene u volumenu, ali tlo nije transportirano.

2.3.6. Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase

Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase najbolje se opisuje općim Hoek-Brownovim kriterijem za prirodnu stijensku masu, a definiran je izrazom 2.16, u kojem su σ_1 i σ_3 najveće i najmanje efektivno naprezanje prilikom sloma, m je vrijednost Hoek-Brownove konstante m_i za stijensku masu, s i a su konstante koje ovise o karakteristikama stijenske mase.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot (m \cdot \sigma_3/\sigma_c + s)^a \tag{2.16}$$

Da bi se koristio Hoek-Brownov kriterij za procjenu čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase, potrebno je procijeniti tri značajke stijenske mase:

a) jednoosnu tlačnu čvrstoću σ_{ci} intaktnog uzorka stijene
b) veličinu Hoek-Brownove konstante m_i za intaktni uzorak stijene
c) veličinu geološkog indeksa čvrstoće *GSI* stijenske mase.

2.3.6.1. Značajke intaktne stijene

Za intaktni uzorak stijene vrijedi nešto jednostavniji oblik izraza 2.16, koji je dan izrazom 2.17. Veza između osnovnih naprezanja pri slomu za predmetnu stijenu definirana je pomoću dvije konstante, σ_{ci} i m_i. Kad god je moguće, veličine tih konstanti treba određivati statističkim analizama rezultata laboratorijskih ispitivanja. Ako laboratorijska ispitivanja nisu moguća, mogu se koristiti tablice 2.17 i 2.18.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot (m_i \cdot \sigma_3/\sigma_c + 1)^{0.5} \tag{2.17}$$

Tablica 2.17. *Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće (Brown, 1981)*

OCJENA	OPIS	σ_{ci} [MPa]	PLTi [MPa]	TERENSKA OCJENA ČVRSTOĆE	PRIMJERI
R6	Ekstremno čvrsta	> 250	> 10	Uzorak se može samo otkrhnuti geološkim čekićem	Svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit
R5	Vrlo čvrsta	100 – 250	4 – 10	Uzorak se slama brojnim udarcima geološkim čekićem	Amfibolit, pješčenjak, bazalt, gabro, riolit, tuf
R4	Čvrsta	50 – 100	2 – 4	Uzorak se slama nakon više od jednog udarca geol. čekićem	Vapnenac, mramor, pješčenjak
R3	Srednje čvrsta	25 – 50	1 – 2	Uzorak se slama nakon jednog udarca geol. čekićem	Filit, šist, silt
R2	Slaba	5 – 25	Ne primjenjuje se	Teško se struže nožićem, površinska udubljenja nastaju laganim udarcima šiljkom geol. čekića	Krednjak, lapor, silt, šejl, kamena sol
R1	Vrlo slaba	1 – 5	Ne primjenjuje se	Može se strugati nožićem, mrvi se laganim udarcima šiljkom geol. čekića	Jako trošna stijena, šejl
R0	Ekstremno slaba	0,25 – 1	Ne primjenjuje se	Para se noktima	Kruta ispuna pukotina

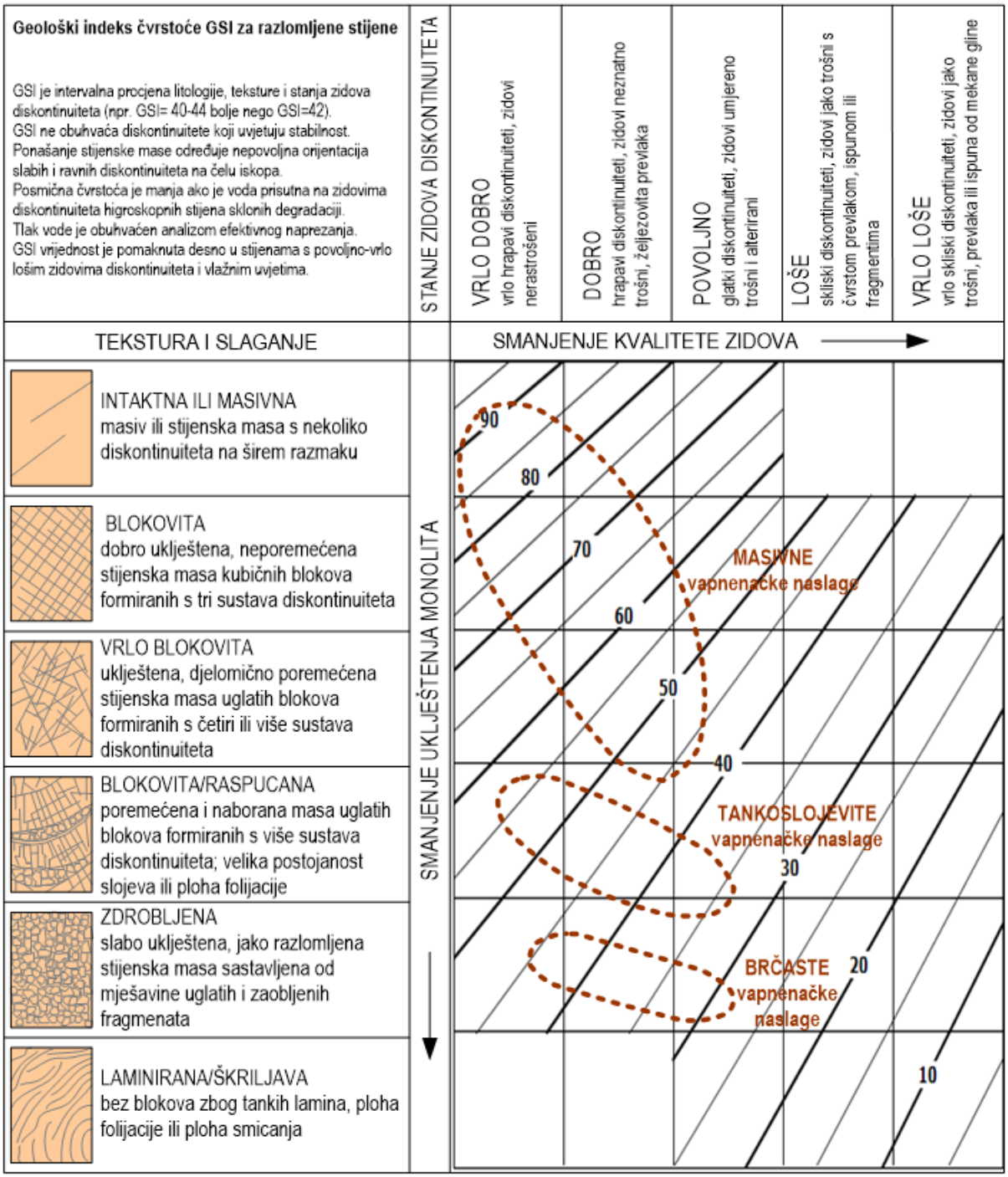
Tablica 2.18. *Procjena veličine konstante m_i za intaktnu stijenu, ovisno o vrsti stijene*

VRSTA STIJENE	KLASA	GRUPA	TEKSTURA			
			ZRNATA	SREDNJE -ZRNATA	FINA	VRLO FINA
SEDIMENTNE	Klastične		Konglomerat (21 ± 3)	Pješčenjak (17 ± 4)	Silt (7 ± 2)	Lapor (7 ± 2)
	Neklastične	Organogene	Ugljen (8 – 21)			
		Karbonatne	Vapnenac (12 ± 3)	Vapnenac (10 ± 2)	Vapnenac (9 ± 2)	Dolomit (9 ± 3)
		Kemijske		Gips (8 ± 2)	Anhidrit (12 ± 2)	
METAMORFNE	Neškriljave		Mramor (9 ± 3)	Hornfels (19 ± 4)	Kvarcit (20 ± 3)	
	Srednje škriljave		Migmatit (29 ± 3)	Amfibolit (26 ± 6)		
	Škriljave		Gnajs (28 ± 5)	Škriljavac (12 ± 3)	Filit (7 ± 3)	Škriljac (7 ± 4)
MAGMATSKE	Svijetle		Granit (32 ± 3)	Diorit (25 ± 5)	Riolit (14 ± 3)	Opsidijan (17 ± 3)
	Tamne		Gabro (27 ± 3) Norit (20 ± 5)	Dolerit (16 ± 5)	Andezit (17 ± 3) Bazalt (15 ± 4)	
	Efuzivne piroklastične		Aglomerat (19 ± 3)	Breča (19 ± 5)	Tuf (13 ± 5)	

2.3.6.2. Geološki indeks čvrstoće (GSI)

Čvrstoća stijenske mase ovisi o svojstvima intaktnih komada stijene, ali i o slobodi tih komada stijene da se kližu i kotrljaju kod različitih stanja naprezanja. Ta sloboda ovisi o geometrijskim oblicima komada intaktne stijene, kao i stanju površina između komada stijene. Uglati komadi stijene s čistim, hrapavim zidovima diskontinuiteta činit će vrlo čvrstu stijensku masu. S druge strane, obli komadi stijene okruženi trošnim materijalom čine stijensku masu male čvrstoće.

GSI (Hoek 1994; Hoek i sur., 1995; Hoek i Brown, 1997; Hoek i sur., 1998; Marinos i Hoek, 2000) je indeks sustava za procjenu promjena u čvrstoći stijenske mase za različite geološke uvjete. Taj sistem je komplementaran Hoek-Brownovom općem kriteriju sloma stijenske mase, gdje su vrijednosti indeksa posebno izdvojene za masivne, tankoslojevite i brečaste vapnenačke naslage (slika 2.12).



Slika 2.12. *GSI klasifikacija razlomljenih stijenskih masa (Marinos i Hoek, 2000)*

2.3.6.3. Parametri koji opisuju karakteristike čvrstoće stijenske mase

Jednom kada je procijenjen *GSI*, mogu se izračunati parametri koji opisuju karakteristike čvrstoće stijenske mase, pomoću izraza 2.18, 2.19 i 2.20 (Hoek i sur., 2002). Ti izrazi daju lagani, kontinuirani prijelaz za čitavo područje *GSI* vrijednosti, od stijenskih masa vrlo loše kvalitete (GSI < 25) do čvrstih stijena.

$$m = m_i \cdot exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \tag{2.18}$$

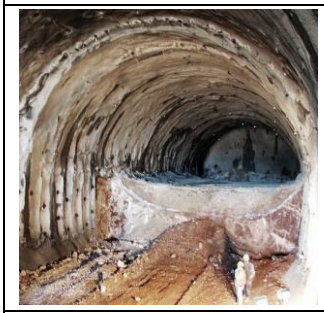
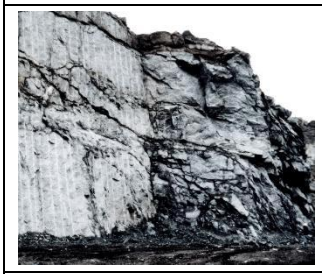
$$s = exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \tag{2.19}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \tag{2.20}$$

Parametar *D* u izrazima 2.17 i 2.18 je faktor koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase, a to može biti šteta nastala miniranjem ili poremećenost izazvana procesom relaksacije. Varira od 0 (za neporemećene stijenske mase) do 1 (za vrlo poremećene stijenske mase). Tablica 2.19 vrlo je korisna kod procjene vrijednosti. Međutim, treba imati na umu da se *D* primjenjuje samo na poremećenu zonu stijenske mase. Npr. u tunelima je zona poremećenosti nastala miniranjem debljine 1 – 2 m oko tunelske cijevi.

Za stijenske mase bolje kvalitete (*GSI > 25*), vrijednost *GSI* može se procijeniti direktno pomoću *RMR* indeksa iz geomehaničke klasifikacije (Bieniawski, 1976), ako je stanje podzemne vode ocijenjeno s 10 (suho), a ocjena za orijentaciju pukotinu je 0 (vrlo pogodno). Ako se koristi verzija geomehaničke RMR klasifikacije iz 1989. godine (Bieniawski, 1989) onda vrijedi da je $GSI = RMR_{89} - 5$, ako je ocjena stanja podzemne vode 15, a orijentacije pukotina 0. Za stijenske mase vrlo loše kvalitete vrijednost *RMR* teško je procijeniti. Zato se RMR ne koristi za procjenu *GSI* vrijednosti ako je *RMR < 25* (Hoek i Karzulović, 2000).

Tablica 2.19. *Upute za procjenu faktora poremećenosti D (Hoek i sur., 2002)*

IZGLED STIJENSKE MASE	OPIS STIJENSKE MASE	PREPORUČENA VRIJEDNOST FAKTORA *D*
	Kontrolirano miniranje izvrsne kvalitete ili otkopavanje tunelarom rezultira minimalnu poremećenost stijenske mase koja okružuje tunel.	*D = 0*
	Mehaničko ili ručno otkopavanje u stijenskoj masi loše kvalitete (bez miniranja) rezultira minimalnu poremećenost okružujuće stijenske mase. Gdje postoje problemi s istiskivanjem i povišenjem poda, poremećenost može biti značajna.	*D = 0* *D = 0,5*
	Miniranje vrlo loše kvalitete u čvrstoj stijenskoj masi rezultira nastankom ozbiljnih lokalnih oštećenja koja ulaze 2 do 3 m u okružujuću stijensku masu.	*D = 0,8*
	Manja miniranja kosina u građevinarstvu rezultiraju umjerenim oštećenjem stijenske mase, posebno ako se koristi kontrolirano miniranje. Međutim, rasterećenje rezultira određenim poremećajem.	*D = 0,7* Dobro miniranje *D = 1,0* Loše miniranje
	Stijenske kosine na velikim površinskim kopovima značajno su poremećene uslijed snažnih proizvodnih miniranja, ali i zbog rasterećenja nakon uklanjanja naslaga jalovine. U stijenama manje kvalitete otkopavanje se može izvesti rijanjem ili kopanjem pa je poremećenost kosina manja.	*D = 1,0* Proizvodno miniranje *D = 0,7* Mehaničko otkopavanje

2.3.6.4. Deformabilnost stijenske mase

Deformabilnost stijenske mase je svojstvo materijala koje određuje intenzitet razvoja deformacija uslijed promjene naprezanja. Deformabilnost se definira modulom deformacije *E*, koji daje odnos između naprezanja i nastale deformacije ($E = \sigma/\varepsilon$). Kao i druga svojstva stijenske mase, deformabilnost također pokazuje anizotropni i diskontinuirani karakter u prirodi tako da ju nije lako izmjeriti te je jedan od najvećih problema za rješavanje u mehanici stijena. Naime, deformabilnost stijenske mase ovisi i o deformabilnosti intaktne stijene i o deformabilnosti diskontinuiteta, a uvijek je manja nego deformabilnost intaktne stijene.

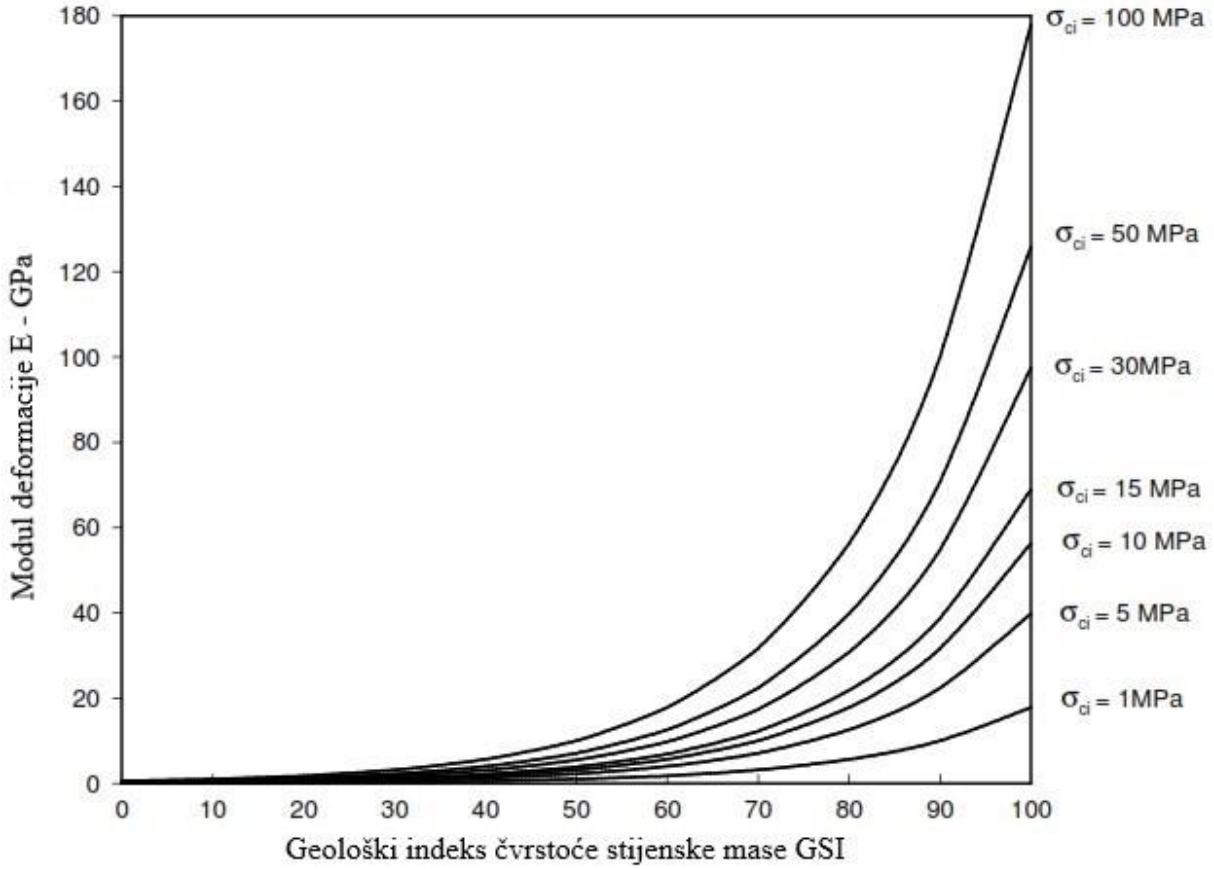
Metode za dobivanje deformabilnosti stijenske mase mogu se podijeliti na direktne i indirektne. Prva grupa uključuje terenska ispitivanja (npr. hidraulička raspinjača, hidraulički jastuk, sondažni dilatometar), a druga grupa uključuje geofizičke metode i serije empiričkih korelacija. Direktno mjerenje deformabilnosti je problematično jer je teško provesti tlačna ispitivanja stijenske mase u prirodnim uvjetima, također i ispitivanje u laboratoriju na reprezentativnom volumenu stijenske mase. Iako ih je teško izvesti, terenska ispitivanja su najprikladnija metoda određivanja deformabilnosti stijenske mase. Rezultati indirektnih metoda još uvijek nisu dovoljno uspoređivani s rezultatima direktnih metoda, kako bi se otkrilo koliko su one reprezentativne. Anizotropni karakter deformabilnosti i utjecaj metode ispitivanja na rezultat prouzrokuju uglavnom dobivanje vrijednosti koje vrlo često variraju, iako se radi o istoj vrsti stijenske mase.

Već je spomenuto kako se deformabilnost definira modulom deformacije, a u mehanici stijena najčešće Youngovim modulom elastičnosti E_m. Neki istraživači uspostavili su vezu između Youngovog modula deformacije i *RMR* klasifikacije. Tako Bieniawski (1978) daje izraz 2.21, za procjenu vrijednosti E_m za čvrste stijene bolje kvalitete ($RMR > 50$). Kod procjene E_m mekanijih stijena lošije kvalitete ($RMR < 50$) Serafim i Pereira (1983) predložili su izraz 2.22. Kasnije Hoek i Karzulović (2000) primjećuju kako izraz 2.22 ponekad daje prevelike vrijednosti modula deformacije za stijene jednoosne tlačne čvrstoće $\sigma_{ci} < 100\ MPa$ pa predlažu modifikaciju i korištenje izraza 2.23. U navedenom izrazu može se vidjeti kako je *RMR* vrijednost zamijenjena s *GSI* vrijednošću, a na slici 2.13 kako je vrijednost E_m progresivno reducirana kada σ_{ci} padne ispod $100\ MPa$. Ta redukcija temelji se na činjenici da deformabilnost stijenskih masa bolje kvalitete kontroliraju diskontinuiteti, dok na deformacijski proces stijenske mase lošije kvalitete velik utjecaj ima deformacija intaktne stijene.

$$E_m = 2 \cdot RMR - 100 \quad [GPa] \tag{2.21}$$

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad [GPa] \tag{2.22}$$

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad [GPa] \tag{2.23}$$



Slika 2.13. *Dijagram odnosa između modula deformacije i geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase (Hoek i Karzulović, 2000)*

Hoek i Diederichs (2006) preispitali su postojeće empirijske metode za procjenu modula deformacije stijenske mase i zaključili da nijedna od spomenutih metoda nije pružila najpouzdanije procjene za cijeli niz uvjeta u kojima se stijenska masa može naći. Analizom izmjerenih podataka iz Kine i Tajvana, uz pomoć programa za prilagođavanje krivulja, nastao je izraz 2.24 u koji su uključeni GSI, modul deformacije intaktne stijene E_i i faktor poremećenosti stijenske mase D. Rad sadrži i smjernice za odabir faktora D te procjenu E_i.

$$\frac{E_m}{E_i} = \left(0.02 \cdot \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right) \quad [MPa] \tag{2.24}$$

3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA O MOGUĆNOSTIMA OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE

Općenito, metode koje se koriste za procjenu mogućnosti otkopavanja stijene najčešće u obzir uzimaju jednoosnu tlačnu čvrstoću, stupanj trošenja i razmak između diskontinuiteta. Neke od metoda također uključuju brzine seizmičkih valova, kao i kontinuiranost, otvorenost, orijentaciju i hrapavost pukotina.

Predmetnom tematikom među prvima se bavio Duncan (1969), koji ističe kako se uspješnost determinacije mogućnosti otkopavanja stijenske mase temelji na razmatranju:

a) stijenskog materijala koji tvori blokove unutar in situ stijenske mase (otkopavanje podrazumijeva lomljenje i drobljenje stijenskog materijala koji čini velike blokove)
b) prirode, opsega i orijentacije pukotina
c) geološke strukture, poštujući boranje i rasjedanje.

Kod većine prethodnih istraživanja korišteni su izmjereni geomehanički parametri kako bi se izvela procjena mogućnosti otkopavanja stijenske mase, što znači da je ta procjena izvedena indirektno pa se takve metode nazivaju indirektne metode. Najčešće indirektne metode su grafičke, temeljene na seizmičkim brzinama i metode ocjenjivanja ili bodovanja (tablica 3.1). S druge strane, kada je procjenu teško izvršiti na temelju dostupnih podataka o stijenskoj masi, a dostupni su strojevi za otkopavanje, moguće je direktno (direktne metode) napraviti probna otkopavanja i tako doći do kvalitetnih procjena stijene za potrebe iskopa. Prema Caterpillaru (1988) postoje tri osnovne izravne metode za procjenu učinkovitosti otkopavanja (tablica 3.1):

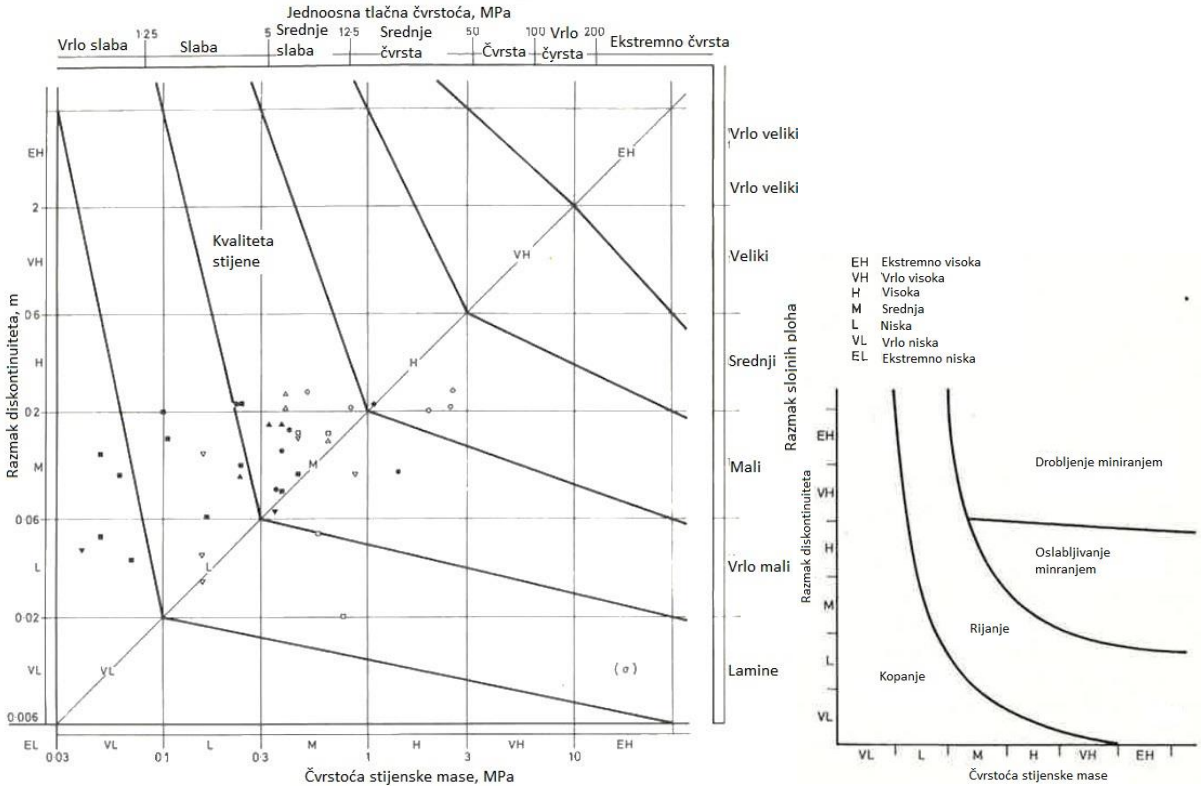
a) volumen po masi
b) volumen po presjeku
c) volumen po duljini.

3.1. Povijesni slijed istraživanja u svijetu

Jedna od prvih poznatih metoda za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase različitim tehnologijama temeljila se na rezultatima PLT ispitivanja nad intaktnim uzorcima stijene i indeksu razmaka između pukotina I_f (Franklin i sur., 1971). To je ustvari najstarija grafička metoda za procjenu mogućnosti otkopavanja različitih vrsta stijena koja se temelji na dva parametra, a to su razmak diskontinuiteta i čvrstoća intaktne stijene (slika 3.1). U isto vrijeme predlagano je da se mogućnost otkopavanja može predvidjeti korištenjem izmjerenih brzina longitudinalnih seizmičkih valova kroz različite vrste stijenskih masa (Atkinson, 1971).

Tablica 3.1. *Metode korištene za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase*

METODA		OPIS	
Direktne	Prema težini	Određuje se satna proizvodnja na temelju odnosa između težine otkopanog materijala i vremena potrošenog na kopanje.	
	Prema volumenu	Određuje se satna proizvodnja na temelju odnosa između volumena otkopanog materijala i vremena potrošenog na kopanje.	
	Prema duljini	Određuje se vrijeme potrebno za rijanje određene udaljenosti	
		PRIMJERI	
		Autor/istraživač	Korišteni geomehanički parametri
Indirektne	Metode koje se temelje na brzini P-valova	Atkinson (1971)	V_P
		Bailey (1975)	V_P
		Church (1981)	V_P i težina dozera
		Caterpillar (2015) i Komatsu (2013)	V_P i snaga stroja
		Moustafa (2015)	V_P
	Grafičke metode	Franklin i sur. (1971)	PLTi i DS
		Pettifer i Fookes (1994)	PLTi i DS
		Tsiambaos i Saroglou (2010)	PLTi i GSI
		Khamechiyan i sur. (2014)	Rock Mass Index (RMi) i volumen blokova stijenske mase
	Klasifikacijski sustavi koji se temelje na ocjenjivanju parametara	Weaver (1975)	V_P, DS, Hd, RMW, JP, JO
		Kirsten (1982)	σ_{ci}, RQD, NJS, indeks alteracije pukotina (Ja), JRC, JO
		Abdullatif i Cruden (1983)	PLTi, RMR i Q (Quality Index)
		Smith (1986)	V_P, σ_{ci}, RMW, DS, JP
		Singh i sur. (1987)	σ_t, RMW, V_P, DS i Ab
		Karpuz (1990)	σ_{ci}, DS, V_P, Hd, RMW
		Kramadibrata (1996)	Usporedba klasifikacijskih sustava različitih autora (Barton i sur. (1974) – Q system, Bieniawski (1976, 1989) – Rock mass rating RMR i Kirsten (1982) – Excavatability Index)
		Hoek i Karzulović (2000)	GSI
		Basarir i Karpuz (2004)	V_P, PLTi, σ_{ci}, DS, Hd



Slika 3.1. *Dijagram za grafičku procjenu mogućnosti otkopavanja na temelju čvrstoće stijene i I_f u stijenskoj masi (Franklin i sur., 1971)*

Weaver (1975) je osmislio klasifikacijski sustav za procjenu mogućnosti rijanja stijenske mase koji se bazira na brzinama P-valova i geološkim faktorima (*DS*, *Hd*, *RMW*, *JP*, *JO*). Taj sustav bodovanja značajki stijenske mase za potrebe procjene mogućnosti rijanja dozerom prikazan je u tablici 3.2.

Kirsten (1982) predlaže klasifikacijski sustav koji se temelji na relevantnim tehničkim svojstvima tla i koji ne dopušta da metoda iskopa diktira klasu iskopa. Sustav omogućuje razvrstavanje cjelokupnog raspona materijala od najslabijih tla do najčvršćih stijena bez obzira na veličinu, oblik ili način iskopa. Pruža se brzo određivanje klase iskopa empirijskim procjenama. Kako bi se izbjegli nesporazumi, dodatno se predviđa kvantitativno određivanje ulaznih parametara standardnim testovima. Pa se tako za stijene pažnja posvećuje *UCS*, *NJS*, *Ja*, *JRC*, *DS*, *JO*. Krajnji rezultat je indeks koji opisuje mogućnost otkopavanja stijenske mase (engl. *Excavatability Index*).

Minty i Kearns (1983) poboljšavaju pristup koji je predložio Weaver (1975). Također su koristili brzine P-valova i geološke podatke kako bi kreirali dijagram za procjenu mase potrebnog dozera za otkopavanje rijačem.

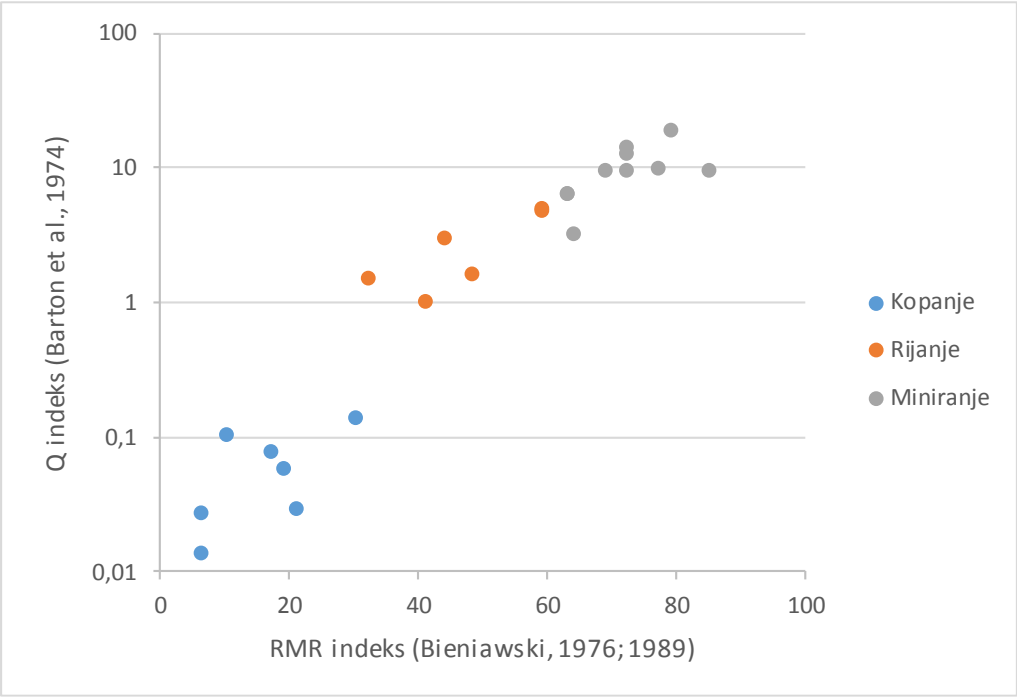
Tablica 3.2. *Sustav bodovanja značajki stijenske mase za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja različitih vrsta stijena rijanjem dozerom (Weaver, 1975)*

Klasa stijene	I	II	III	IV	V
Opis	Vrlo dobra	Dobra	Zadovoljavajuća	Loša	Vrlo loša
V_P [m/s]	> 2150	2150 – 1850	1850 – 1500	1500 – 1200	1200 – 450
Ocjena	26	24	20	12	5
Hd	Ekstremna	Vrlo tvrda	Tvrda	Mekana	Vrlo mekana
Ocjena	10	5	2	1	0
RMW	Svježa	Djelomično	Srednje	Jako	Potpuno
Ocjena	9	7	5	3	1
DS [mm]	> 3000	3000 – 1000	1000 – 300	300 – 50	< 50
Ocjena	30	25	20	10	5
JP	Nepostojane	Djelomično postojane	Postojane, neotvorene	Postojane, malo otvorene	Postojane, otvorene
Ocjena	5	5	3	0	0
JS	Neotvorene	Malo otvorene	Otvorenost < 1 mm	Otvorenost, zijev < 5 mm	Otvorenost, zijev > 5 mm
Ocjena	5	5	4	3	1
Smjer i kut nagiba pukotina*	Vrlo nepovoljan	Nepovoljan	Djelomično nepovoljan	Povoljan	Vrlo povoljan
Ocjena	15	13	10	5	3
Ukupna ocjena	100 – 90	90 – 70**	70 – 50	50 – 25	< 25
Mogućnost rijanja	Nemoguće rijanje, samo miniranje	Ekstremno teško rijanje ili miniranje	Vrlo teško rijanje	Teško rijanje	Lako rijanje
Odabir dozera	–	CAT DD9/D9 G	CAT D9/D8	CAT D8/D7	CAT D7
Snaga dozera	–	770 – 385 KS 575 – 290 kW	385 – 270 KS 290 – 200 kW	270 – 180 KS 200 – 135 kW	180 KS 135 kW

**Originalan smjer i kut nagiba pukotina prilagođen mogućnosti rijanja.*

***Kod ocjena većih od 75 treba smatrati da se ne može rijati bez prethodnog miniranja*

Abdullatif i Cruden (1983) različite vrste stijena (vapnenac, dolerit, granit, škriljac) s područja jugoistočne Engleske, u smislu kvalitete stijenske mase, klasificirali su prema tri različita parametra: 1. čvrstoća opterećivanjem u točki (PLT) nad intaktnim uzorcima stijene i razmak između pukotina (*DS*), 2. RMR (engl. *Rock Mass Rating*) sustavom (Bieniawski, 1976; 1989) i 3. Q (engl. *Rock Tunneling Quality Index*) sustavom (Barton i sur., 1974). Kada su rezultate usporedili s tehnologijama otkopavanja koje se primjenjuju u istraživanim kamenolomima (mehaničko kopanje i rijanje te miniranje), zaključeno je kako RMR sustav daje najbolje rezultate kada se u vezu dovodi procjena kvalitete stijenske mase i lakoća otkopavanja. Rezultantni dijagram spomenutog istraživanja nalazi se na slici 3.2.



Slika 3.2. *Dijagram odnosa RMR i Q indeksa kojim se klasificira stijenska masa za potrebe odabira metode otkopavanja* (*Abdullatif i Cruden, 1983)*

Scoble i Muftuoglu (1984) predložili su klasifikaciju stijena s obzirom na mogućnost otkopavanja koja ovisi o stupnju trošnosti stijenske mase, čvrstoći intaktne stijene, razmaku pukotina i razmaku između slojnih ploha u uslojenoj stijenskoj masi.

McLean i Gribble (1985) ispitivali su uzorke intaktne stijene i tako uspostavili vezu između *UCS* i *Hd* dobivene na temelju odskoka Schmidtova čekića pa su rezultate iskoristili za procjenu mogućnosti rijanja stijena.

Smith (1986) uspoređuje nekoliko metoda za procjenu mogućnosti rijanja, a naglašava prednosti uzimanja u obzir širokog spektra parametara stijenske mase. Preporuča sustavno korištenje šest parametara stijenske mase (V_P, *UCS, RMW, DS, JP, NJS*) za ocjenu mogućnosti rijanja (Rippability Rating, RR).

Singh i suradnici (1987) predlažu novi indeks za ocjenu mogućnosti rijanja ugljena, uzimajući u obzir σ_t, *RMW*, V_P, *DS* i *Ab* stijene.

Istovremeno Scoble i suradnici (1987) ističu kako za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase treba istražiti čvrstoću intaktne stijene PLT ispitivanjem, J_v, *JO* i *RMW*.

Kada se detaljno pogledaju neki od do sada spomenutih sustava klasifikacije (Weaver, 1975; Kirsten, 1982; Scoble i Muftuoglu, 1984; Smith, 1986; Singh i sur., 1987), može se primijetiti da se ulazni parametri razlikuju za svaki sustav. Također, dodijeljene ocjene za isti parametar

variraju u širokim granicama. Kod nekih metoda prisutno je precjenjivanje parametara, što je teško izbjeći zbog činjenice da je stijena prirodno nastali materijal. Navedeno se može vidjeti u tablici 3.3. Dakle, poželjno je još raspravljati o važnosti i ocjenjivanju parametara, odnosno značajkama stijenske mase koje se koriste u klasifikacijama, s ciljem poboljšanja.

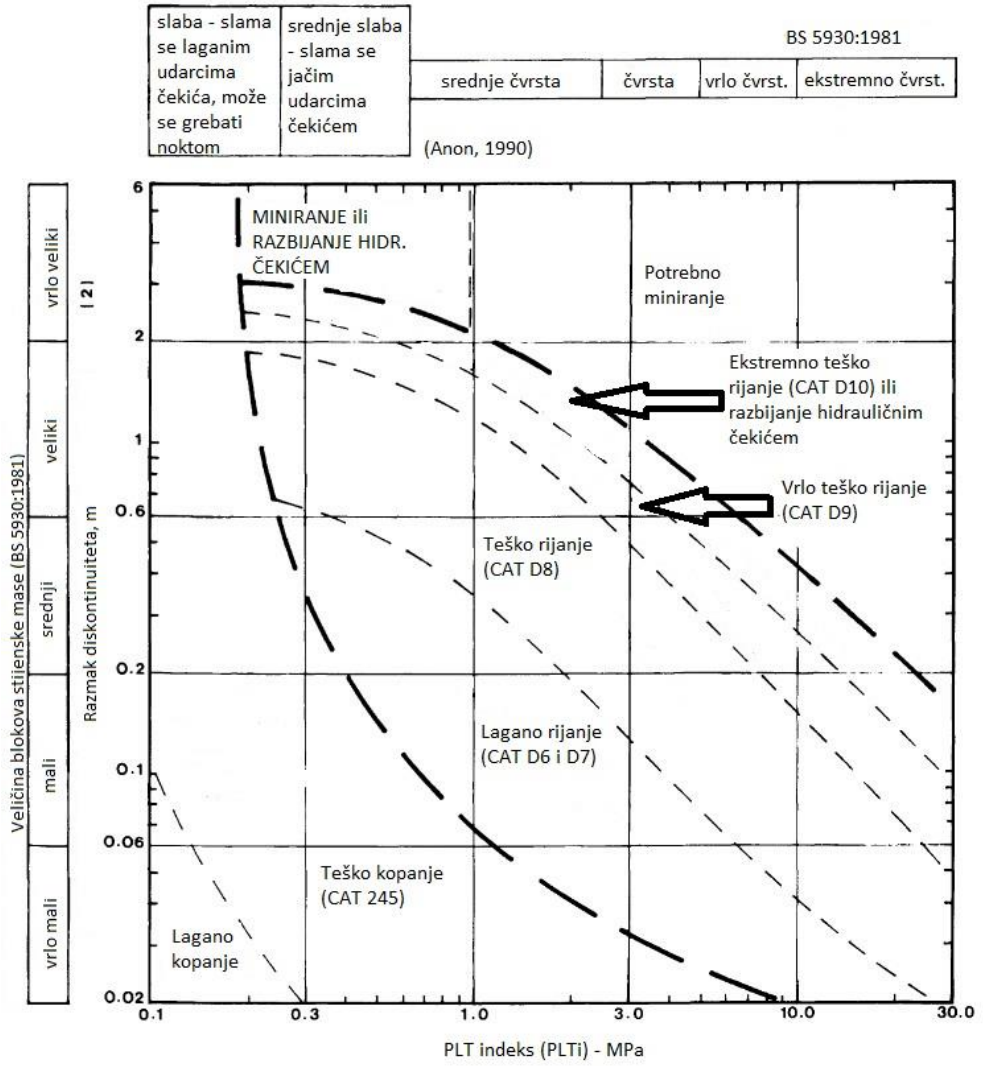
Tablica 3.3. *Analiza metoda bodovanja stijenske mase za procjene mogućnosti otkopavanja rijanjem*

Značajka stijenske mase	Dodijeljene ocjene za prikazanu metodu				
	Weaver (1975)	Kirsten (1982)	Scoble i Muftuoglu (1984)	Smith (1986)	Singh i sur. (1987)
V_P	26 – 5	Faktori se množe	Primjenjivo samo za pješčenjake i siltove	–	25 – 0
σ_c ili σ_t	10 – 0	280 – 0	25 – 0	10 – 0	17 – 0 (σ_t)
RMW	9 – 1	100 – 1	25 – 0	10 – 1	18 – 0
DS	30 – 5	RQD/NJS	50 – 5	30 – 5	33 – 0
JP	5 – 0	–	–	5 – 0	–
JS	5 – 1	18 – 0,75	–	5 – 1	–
JO	15 – 3	1,5 – 0,37	–	15 – 3	–
JRC	–	4 – 0,5	–	–	–
Ab	–	–	–	–	22 – 0

Hadjigeorgiou i Scoble (1988) u svojem radu uključuju teorijsko i fizičko modeliranje u proces kopanja, a model korigiraju s obzirom na geološko okruženje. Svojstva stijenske mase uključena u model su: *PLTi, NJS, RMW, DS i JO*.

Pettifer i Fookes (1994) misle da mogućnost otkopavanja stijena ovisi o njihovim individualnim svojstvima, opremi za otkopavanje i metodi rada. Zato su uveli zapažene modifikacije u Franklinov klasifikacijski sustav (Franklin i sur., 1971), tako da su razmak pukotina *DS* razmatrali u sve tri dimenzije i tako dobili puno realističnije podatke o srednjoj veličini blokova u stijenskoj masi (slika 3.3). Dakle, osim čvrstoće stijene *(PLTi)*, važne su i karakteristike diskontinuiranosti koje definiraju pojedinačne veličine blokova (I_b ili J_v), što je jedan od najvažnijih parametara za uspješnu primjenu rijanja kao metode otkopavanja.

MacGregor i suradnici (1994) tvrde da su dominantni geološki čimbenici koji utječu na produktivnost otkopavanja stijenske mase rijanjem UCS stijene, *RMW*, V_P, *JRC*, *JCS*, te *DS*.

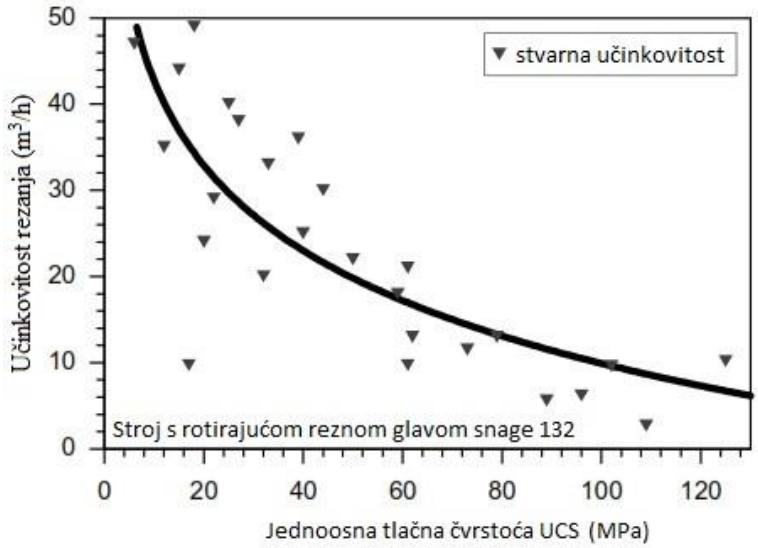


Slika 3.3. *Dijagram za grafičku procjenu mogućnosti otkopavanja na temelju čvrstoće stijene PLTi i veličine blokova stijene u stijenskoj masi (Pettifer i Fookes, 1994)*

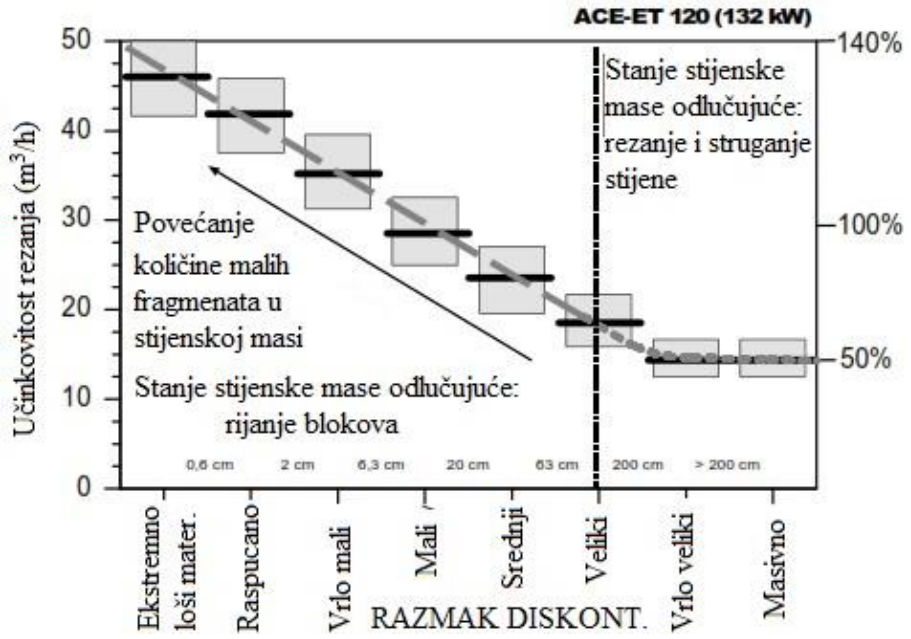
Kramadibrata (1996) u svojoj doktorskoj disertaciji proučava kako svojstva stijenske mase i intaktne stijene utječu na mogućnost otkopavanja. Usporedbom klasifikacijskih sustava različitih autora (Barton i sur. (1974) – Q system, Bieniawski (1976, 1989) – Rock mass rating RMR i Kirsten (1982) – Excavatability Index) zaključuje kako je Kirstenov sustav najprikladniji za ocjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase.

Hadjigeorgiou i Poulin (1998) osmislili su empirijski sustav za klasifikaciju stijena kod površinskih kopova, koji omogućuje procjenu mogućnosti kopanja mehaničkim bagerima. Najvažniji parametri stijenske mase, na kojima se temelji predmetna klasifikacija, jesu čvrstoća intaktnog uzorka stijene iz PLT-a, veličina blokova u stijenskoj masi određena kroz J_v, *RMW* i relativna struktura stijenske mase (koja može olakšati ili otežati iskop).

Thuro i Plinninger (1999) na temelju svojih istraživanja zaključuju da iako mnogo značajki stijene utječe na mogućnost primjene i učinkovitost strojeva s rotirajućim glodajućim elementima, geološki fenomeni mogu prouzročiti puno više problema kod otkopavanja nego samo velika vrijednost čvrstoće stijene. Zato u analizu uključuju i značajke strukturnog sklopa stijenske mase pa osim dijagrama odnosa UCS-a i učinkovitosti (slika 3.4), daju i dijagram odnosa *DS-a* i učinkovitosti stroja Atlas Copco ET 120, snage 132 kW (slika 3.5).

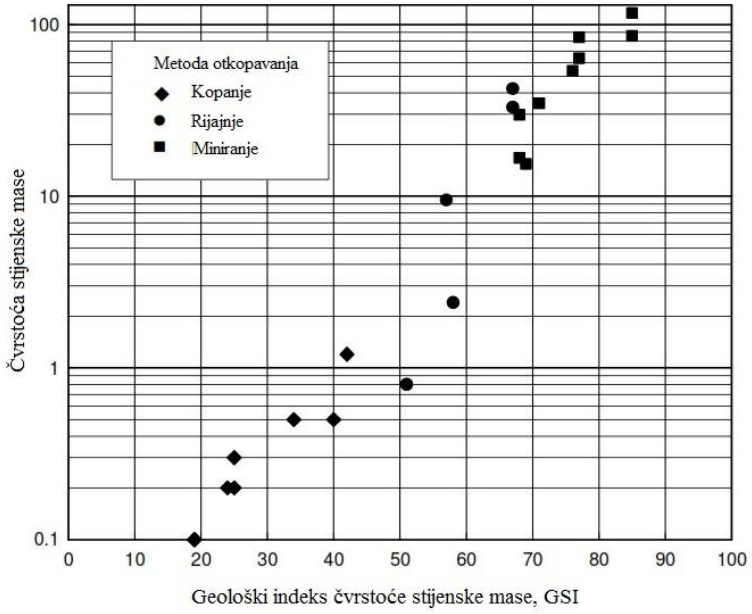


Slika 3.4. *Dijagram za procjenu učinkovitosti stroja za otkopavanje stijenske mase s rotirajućom glavom na temelju jednoosne tlačne čvrstoće (Thuro i Plinninger, 1999)*



Slika 3.5. *Dijagram za procjenu učinkovitosti stroja za otkopavanje stijenske mase s rotirajućom glavom na temelju razmaka pukotina (Thuro i Plinninger, 1999)*

Vrlo kvalitetan pristup svojem istraživanju imali su Hoek i Karzulović (2000) jer su primijenili Hoek-Brownov kriterij kod procjene mogućnosti otkopavanja stijenske mase. Oni su iskoristili procijenjene vrijednosti geološkog indeksa čvrstoće *GSI*, kako bi predložili područje *GSI* vrijednosti za različite tehnologije otkopavanja. Podatke za svoje istraživanje preuzeli su od Abdulatifa i Crudena (1983), koji su mogućnost otkopavanja i učinkovitost povezali s kvalitetom stijenske mase koristeći *RMR* sistem. Hoek i Karzulović zaključili su (slika 3.6) kako se stijenska masa može kopati bagerom ako je $GSI < 40$ i čvrstoća stijenske mase σ_{cm} oko *1 MPa*, rijanje je moguće u stijenskim masama *GSI* vrijednosti *40 – 60* i čvrstoće do *10 MPa*. Ako stijenska masa ima $GSI > 60$, a čvrstoću > *15 MPa*, jedina primjenjiva tehnologija otkopavanja je miniranje. Budući da je *GSI* sustav za procjenu promjena u čvrstoći stijenske mase za različite geološke uvjete nastao kao dio Hoek-Brownovog općeg kriterija sloma stijenske mase i komplementaran je istom kriteriju, u skladu s tim to je prva zabilježena primjena Hoek-Brownovog kriterija kod procjene mogućnosti otkopavanja stijenske mase.



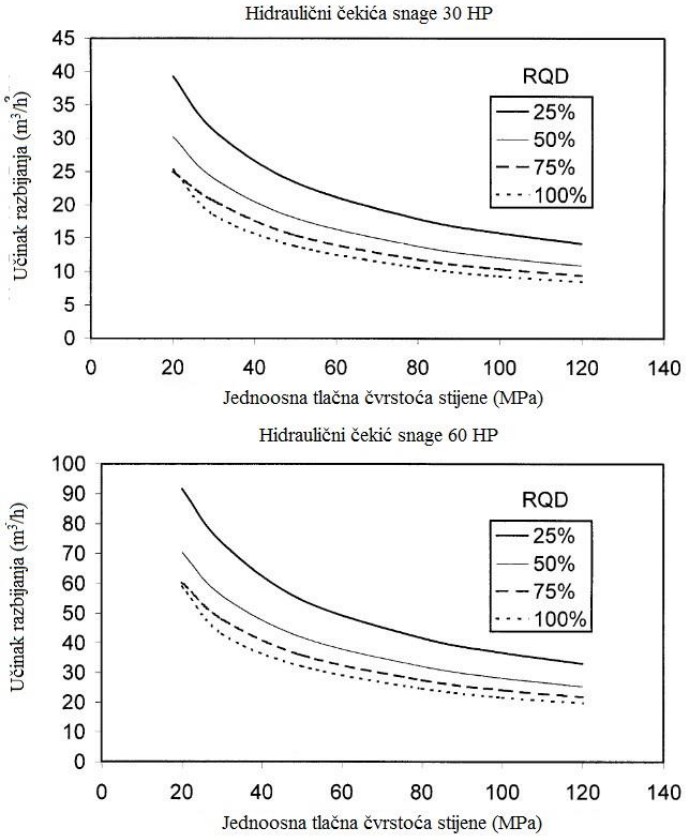
Slika 3.6. *Dijagram odnosa između čvrstoće stijenske mase i GSI-ja za različite tehnologije otkopavanja (Hoek i Karzulović, 2000)*

Bilgin i suradnici (2002) provodili su istraživanja o predviđanju učinkovitosti hidrauličnog čekića prilikom otkopavanja tunela u sedimentnim stijenama. Prilikom istraživanja prikupljani su uzorci stijene s čela tunela i poslani u laboratorij na ispitivanje UCS, a na čelu su također vršena ispitivanja Schmidtovim čekićem i mjerenja *DS*, koja su dovedena u vezu s RQD indeksom. Kao rezultat istraživanja nastao je statistički model za procjenu učinkovitosti hidrauličnog čekića na temelju značajki stijenske mase. Bilgin i sur. (2002) utvrđuju kako je

trenutni otkopni učinak čekića (engl. *Instantaneous Breaking Rate, IBR*) [m^3/h] ovisan o snazi hidrauličnog čekića (engl. *Cutting power, P*) [HP] i indeksu rezivosti stijenske mase (engl. *Rock Mass Cuttability Index, RMCI*) [MPa], prema izrazu 3.1. *RMCI* izračunava se pomoću izraza 3.2., a ovisi o veličini σ_{ci} i indeksu *RQD*. Slika 3.7 prikazuje karakterističnu vezu između *IBR-a* i σ_{ci} stijene, za dane vrijednosti *RQD*-a i *P* hidrauličnog čekića.

$$IBR = 4.24 \cdot P \cdot (RMCI)^{-0.567} \tag{3.1}$$

$$RMCI = \sigma_{ci} \cdot (RQD/100)^{2/3} \tag{3.2}$$



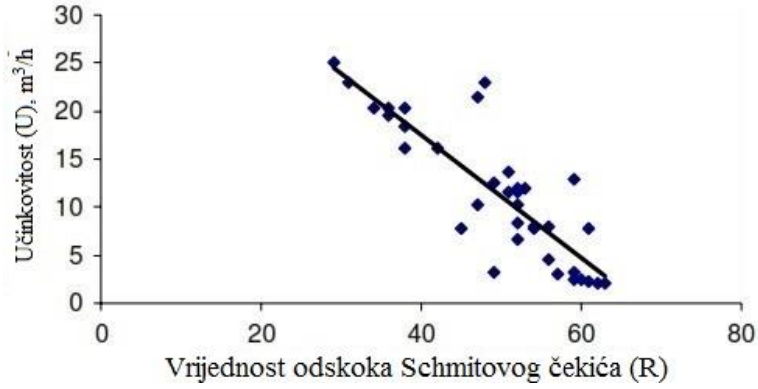
Slika 3.7. *Statistička zavisnost između IBR-a* i σ_{ci}*, za date vrijednosti RQD-a i P hidrauličnog čekića (Bilgin i sur., 2002)*

Kujundžić (2002) je u svojoj doktorskoj disertaciji pretpostavio da će energija potrebna za razbijanje stijene hidrauličnim čekićem ovisiti o tvrdoći i o lomnoj žilavosti. Naime, žilave stijene sposobne su plastičnim deformiranjem na neki način razgraditi naprezanja i tako povisiti svoju otpornost na krti lom. Zato za drobljenje takvih stijena treba utrošiti više udarne energije nego za krte stijene, kod kojih do sloma dolazi uslijed vrlo malih deformacija. Rezultati ispitivanja višestruke zavisnosti specifične energije razbijanja o *FT* i *Hd* ukazuju da specifična energija mnogo više ovisi o tvrdoći nego o lomnoj žilavosti stijena. Iz toga proizlazi zaključak da se glavnina energije razbijanja utroši na početno intenzivno fragmentiranje stijene ispod

radnog alata čekića prilikom zabijanja. Obrnuto proporcionalna ovisnost energije razbijanja o *FT* i Hd navodi na zaključak da će u stijenama male tvrdoće i male lomne žilavosti veću učinkovitost pri razbijanju imati čekić s većom frekvencijom udaraca i manjom energijom pojedinog udarca, dok je za razbijanje stijena velike tvrdoće i lomne žilavosti učinkovitije primijeniti čekić s manjim brojem udaraca, a većom energijom pojedinog udarca. Nešto kasnije isti autor sa suradnicima proučava utjecaj tvrdoće stijene na usitnjavanje hidrauličnim čekićem, te zaključuje kako tvrdoća ima znatno veći utjecaj na energiju usitnjavanja hidrauličnim čekićem nego na energiju za drobljenje u čeljusnoj drobilici (Kujundžić i sur., 2008). Strukturne značajke stijenske mase u vidu razmaka između diskontinuiteta, odnosno RQD indeksa, ostaju kao treće važno svojstvo kod procjene učinkovitosti hidrauličnog čekića pri otkopavanju.

Klasifikacijski sustav koji nudi procjenu mogućnosti rijanja ugljena i lapora na kopovima lignita temelji se na V_P, *PLTi* ili σ_{ci}, prosječnoj udaljenosti *DS* i *Hd* dobivenoj Schmidtovim čekićem, a osmislili su ga Basarir i Karpuz (2004).

Goktan i Gunes (2005) predlažu postupak za procjenu učinkovitosti strojeva s rotirajućom reznom glavom na temelju rezultata ispitivanja Schmidtove tvrdoće, odnosno veličine *r*. Kao prednost svoje metode ističu jednostavnost i pristupačnost primjene Schmidtova čekića koji direktno daje podatke o H stijeni, a indirektno se pomoću korelacije može dobiti i σ_{ci} (slika 2.1). Primjer veze između vrijednosti odskoka Schmidtova čekića i učinka *U* stroja Atlas Copco ET 120, snage 132 kW, s rotirajućom glavom srednje veličine prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8. *Korelacija između r i U za Atlas Copco ET 120 (Goktan i Gunes, 2005)*

Novije istraživanje vezano za geološki indeks čvrstoće stijenske mase provedeno je 2010. godine (Tsiambaos i Saroglou, 2010), kada je predložena metoda za klasifikaciju stijenske mase s obzirom na lakoću otkopavanja, a temelji se na vrijednosti *GSI* i *PLTi* intaktne stijene. Korišteni su originalni podaci istraživanja različitih stijenskih struktura (sedimentne i metamorfne stijene), od blokovitih do razdrobljenih, za čiji iskop se koriste različite tehnologije

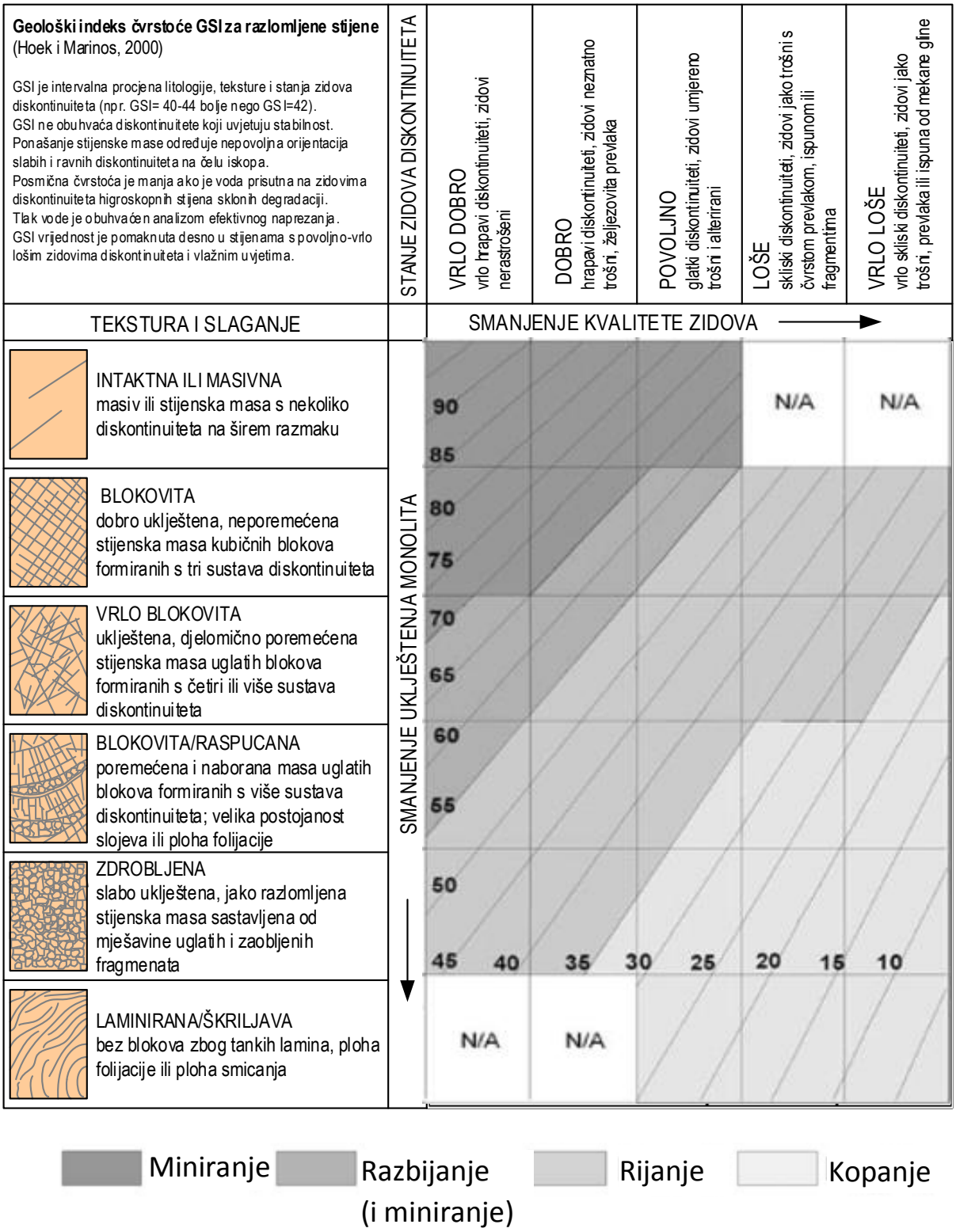
otkopavanja (miniranje, hidraulični čekić, rijanje, kopanje bagerom). Kao rezultat istraživanja nastala su dva klasifikacijska *GSI* dijagrama – prvi za stijenske mase čijim su *PLT* ispitivanjem dobivene vrijednosti čvrstoće ispod *3 MPa* (slika 3.9), a drugi za stijenske mase čijim su *PLT* ispitivanjem dobivene vrijednosti čvrstoće jednake ili veće od *3 MPa* (slika 3.10). Prema slici 3.10, miniranje je potrebno za *GSI > 60*, a prema slici 3.9, za *GSI > 65*, pri čemu je zaključeno da je miniranje uglavnom potrebno u masivnim, blokovitim i vrlo blokovitim stijenskim masama ili kada je zijev pukotina malen. Uspješno rijanje generalno je moguće izvoditi u stijenama s procijenjenom *GSI* vrijednošću između *20* i *45*. No, ako je izmjerena *PLT* čvrstoća stijene *< 3 MPa*, onda *GSI* može biti između *25* i *55* (slika 3.10). U prijelaznoj zoni, između miniranja i rijanja, otkopavanje je potrebno vršiti hidrauličnim čekićem. Nedostatak ove klasifikacije je u primjenjivosti samo na stijenske mase u kojima diskontinuiteti kontroliraju otkopavanje. Zato nije primjenjiva za heterogene stijenske mase (npr. fliševi) i vrlo mekane stijene, odnosno vrlo čvrsta tla.

Jovanovski i suradnici (2011) predstavili su klasifikacijski sustav kojim se ocjenjuje stijenska masa za potrebe iskopa, pod nazivom „Excavation Rock Mass Rating System – ERMR“. Metodologija za uspostavu ERMR sustava temelji se na rangiranju i ocjenjivanju oprezno odabranih parametara klasifikacije. Kao svojstva intaktne stijene preporučuju odrediti σ_{ci} ili *PLTi*, potom γ intaktnog uzorka stijene i *Hd* (Mohsova skala relativne tvrdoće ili ispitivanje Schmidtovim čekićem). Svojstva stijenskog masiva predstavljaju stupanj raspucanosti (na temelju *DS* ili alternativno pomoću RQD indeksa) i stanje zidova diskontinuiteta (*JP*, *JS*, *JRC*, *JF* i sl.). Utjecaj *JO* važan je kod metamorfnih i sedimentnih stijena (izražena anizotropija).

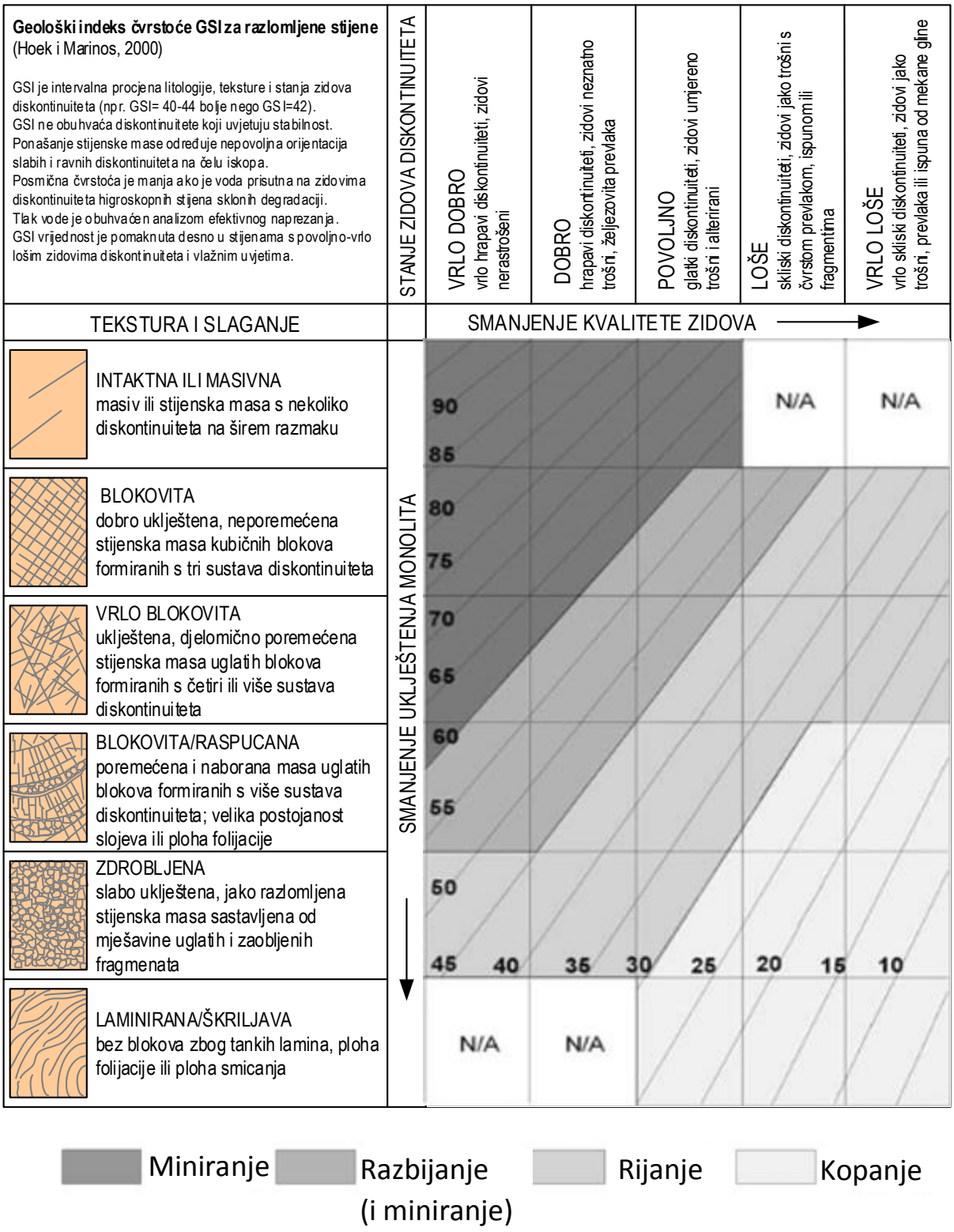
Khamechiyan i suradnici (2014) nude novu kategorizaciju za procjenu iskopa u stijenskim masama temeljenu na klasifikacijskom sustavu RMi (Palmström, 1995) i veličini blokova u stijenskoj masi kroz J_v.

Gurocak i Yalcin (2016) istražuju utjecaj stupnja trošnosti stijenske mase (engl. *Rock Mass Weathering*, RMW) na mogućnost otkopavanja. Usporedbom dobivenih rezultata utvrđeno je da RMW ima značajan utjecaj na mogućnost otkopavanja stijenske mase, te je poželjno kod empirijske klasifikacije stijena za potrebe iskopa u obzir uzimati i stupanj trošnosti. Isto potvrđuju Liang i suradnici (2017) koji su istraživali učinak površinskih metoda kod otkopavanja trošne sedimentne stijene u tropskom području.

Većina navedenih istraživanja prikazana je u prilogu 1, koji prikazuje različite geomehaničke parametre koje su koristili različiti autori kako bi mogli procijeniti mogućnost otkopavanja stijenske mase te predlagati klasifikacije stijenske mase za potrebe iskopa.



Slika 3.9. *Predloženi GSI dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase PLT čvrstoće < 3 MPa (Tsiambaos i Saroglou, 2010)*



Slika 3.10. *Predloženi GSI dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase PLT čvrstoće ≥ 3 MPa (Tsiambaos i Saroglou, 2010)*

3.2. Povijesni slijed istraživanja za područje Hrvatske

Jedna od prvih poznatih klasifikacija tla za iskop na području RH i bivše Jugoslavije bila je Građevinska norma (GN 200, 1978). Ta je norma ovdje prikazana kao povijesna činjenica koja je služila za obračun izvedenih radova više desetaka godina. Tablica 3.4 prikazuje kako GN 200 sve geološke formacije dijeli u sedam kategorija, no vidljivo je također kako je vrlo teško odrediti granice između dviju kategorija jer klasifikacija daje samo opisne podatke i pokazatelje za ocjenu kvalitete koji su podložni subjektivnoj procjeni. Tablica 3.5 prikazuje podjelu za kategorije od IV do VII temeljem mogućnosti strojnog iskopa bez eksploziva.

Tablica 3.4. *Klasifikacija tla prema načinu iskopa (GN 200, 1978)*

Kategorija	Vrsta tla	Način iskopa	Brzina širenja uzdužnih valova Vp [km/s]	Gustoća tla ρ [t/m^3]
I	humus, površinski sloj, (uklanja se)	lopata, grejder	< 0,2	12 – 13
II	sitnozrno, koherentno tlo, „zdravica“	kopača (štihača), utovarivač, bager	0,2 – 0,5	14 – 16
III	krupnozrno tlo s koherentnim vezivom – pijesak i šljunak s glinovitim vezačem	pijuk (mašklin), kopača, buldožer	0,5 – 1	16 – 20
IV	mješovito tlo, sipina, trošna stijena	pijuk, pajser (ćuskija), buldožer s rijačem	1 – 2	20 – 25
V	meke stijene (lapor, glinac, tuf, siltit i slično)	buldožer s rijačem, povremeno eksploziv	2 – 3	22 – 27
VI	čvrsta stijena (vapnenci i dolomiti)	eksploziv do 300 g/m^3	2,05 – 5	24 – 28
VII	čvrsta, žilava stijena (eruptivi, kvarciti i slično)	eksploziv do 500 g/m^3	5 – 7	25 – 30

Ova je norma odavno zastarjela i potpuno je neprimjerena novim tehnologijama iskopa. Naime, s vremenom je došlo do naglog razvoja strojeva za iskop, utovar i prijevoz. U takvim je okolnostima nestao ručni iskop kao i ručni alat za iskop koji se spominju unutar GN 200. Nažalost, još i danas neki projektanti pozivaju na tu normu.

Tablica 3.5. *Klasifikacija tla kategorije od IV do VII temeljem mogućnosti strojnog iskopa bez eksploziva (Lukić i Anagnosti, 2010)*

Kategorija tla prema GN 200	Vrsta tla	Ocjena pogodnosti za strojni iskop stijene temeljem kvalitete ocijenjene brzinom širenja uzdužnih valova Vp [km/s]			
		1	1,5	2	3
IV	meke sedimentne stijene, (pješčenjaci i glinci)	Pogodno za rad		Moguće	Nepogodno
V	škriljci, argilošisti	Pogodno za rad		Moguće	Nepogodno
VI	vapnenci, konglomerati	Pogodno za rad		Moguće	Nepogodno
VII	kvarcit, granit, bazalt	Pogodno za rad		Moguće	Nepogodno

Pozitivan pomak napravljen je u Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama, u kojima se govori o tri kategorije tla kod širokog iskopa (IGH, 2001). OTU razlikuju tri kategorije tla, a podjela se uglavnom svodi na sredstva kojima se vrši iskop (tablica 3.6).

Tablica 3.6. *Kategorizacija materijala za iskop pri zemljanim radovima na cestama (IGH, 2001)*

Kategorija	Opis	Način iskopa
A	Sve vrste čvrstih i vrlo čvrstih, kompaktnih stijena (eruptivnih, metamorfnih i sedimentnih) u zdravom stanju, uključujući i moguće tanje slojeve rastresitog materijala na površini ili takve stijene s mjestimičnim gnijezdima ilovače i lokalnim trošnim ili zdrobljenim zonama.	Potrebno miniranje kod cijelog iskopa.
B	Polučvrsta kamenita tla, flišne naslage, uključujući i rastresita tla, homogeni lapori, trošni pješčenjaci i mješavine lapora i pješčenjaka, većina dolomita (osim vrlo kompaktnih), raspadnute stijene na površini u debljim slojevima s miješanim raspadnutim zonama, jako zdrobljeni vapnenac, sve vrste škriljaca, neki konglomerati i slična tla.	Potrebno djelomično miniranje, a ostali se dio iskopa obavlja izravnim strojnim radom.
C	Sitnozrna vezana (koherentna) tla kao što su gline, prašine, prašinaste gline (ilovače), pjeskovite prašine i les. Krupnozrna nevezana (nekoherentna) tla kao što su pijesak, šljunak odnosno njihove mješavine, prirodne kamene drobine – siparišna ili slična tla. Mješovita tla koja su mješavina krupnozrnih nevezanih i sitnozrnih vezanih tala.	Nije potrebno minirati, nego se mogu kopati izravno, upotrebom pogodnih strojeva – dozerom, jaružalom ili skreperom.

4. TEHNOLOGIJE OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE

Poznate tehnologije ili metode otkopavanja mogu biti jednostavne, poput otkopavanja ručnim otkopnim čekićem, do onih zahtjevnijih, koje koriste rotorne bagere (engl. *Bucket wheel excavator*), bagere s lopatom (engl. *Power shovels*), dozere s rijačima (engl. *Bulldozer-rippers*), postrojenja za kontinuirano otkopavanje (engl. *Continuous miners*) i/ili eksploziv. Prema tome, metode otkopavanja temelje se na dva glavna mehanizma: mehaničkom i miniranju (Khamehchiyan i sur., 2014).

U čvrstim i vrlo čvrstim stijenama rudarenje uglavnom počinje bušenjem minskih bušotina i miniranjem, čiji rezultati utječu na sve operacije koje slijede. Već je rečeno da se rijanjem mogu otkopavati čvrste stijene, no metoda miniranja ima širu primjenu jer je rijanje vrlo skupo, tj. ekonomski neisplativo, a ima i određena fizička ograničenja.

S druge strane, miniranje je poznato po negativnim utjecajima na okoliš pa se mehaničko otkopavanje stijenske mase nudi kao alternativa. Tu se u prvom redu misli na primjenu hidrauličnog čekića, kojim je moguće otkopavanje čvrstih i vrlo čvrstih stijena. Čvrste stijene kopaju se i rijačima i vibrorijačima, ali i glodanjem stijene rotirajućim reznim elementima, dok se stijene nešto manje kvalitete kopaju bagerom s lopatom ili dozerskim nožem itd. Kod mehaničkog načina iskopa potrebno je razlikovati primjenu klasičnih građevinskih strojeva od rudarskih strojeva. Iako i jedni i drugi koriste jednake tehnologije rada, rudarski strojevi mogu biti višestruko većih dimenzija i snaga, a time i puno učinkovitiji.

Metode otkopavanja mogu se još podijeliti na kontinuirane i diskontinuirane (cikličke). Obje grupe uključuju operacije iskopa, punjenja i premještanja otkopanog materijala, a ovise o karakteristikama čvrstoće stijenske mase. Kontinuirano otkopavanje vrši se različitim postrojenjima za kontinuirano otkapanje (npr. rotorni bageri), dok su rijanje dozerom, kopanje bagerom s lopatom, bušačko-minerski radovi tipične tehnologije cikličkog otkopavanja.

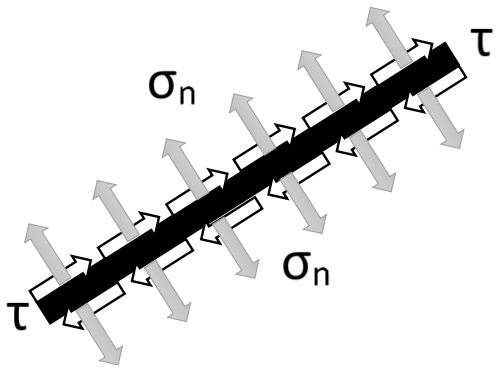
Spomenute metode otkopavanja stijenske mase uvijek uključuju lomljenje ili frakturiranje stijene u nekom obliku, a za lomljenje stijene sve redom koriste silu. Razumijevanje mehanike loma stijene je vrlo važno kod rješavanja mnogih inženjerskih problema koji uključuju geološke strukture. Mehaniku loma (engl. *Fracture Mechanics*) kod primjene tehnologija otkopavanja potrebno je razlikovati od mehanike loma stijene u kontinuumu (engl. *Failure Mechanics*), u nekom globalnom procesu, kada stijena ili stijenska masa prolazi kroz trajna oštećenja koja utječu na nosivost ili mogućnost primanja dodatnih opterećenja.

4.1. Osnove mehanike loma stijene

Da bi se razumjela načela koja se primjenjuju u specifičnim istraživanjima mehanike loma stijene, važno je prvo razumjeti osnovna načela. Mehanika loma ili točnije linearna elastična mehanika loma (engl. *Linear Elastic Fracture Mechanics*, LEFM) razvija se od 60-ih godina prošlog stoljeća, od kada su inženjeri počeli proučavati lomove konstrukcija izrađenih od visokokvalitetnih metalnih legura. Međutim, velike su razlike u strukturi i primjeni između stijena i metalnih materijala, zbog čega se one moraju uzeti u obzir pri usvajanju načela loma. Na primjer, krte stijene često se ponašaju neelastično kod naprezanja pa je za njih karakterističan nastanak mikropukotina umjesto loma. Zato se principi LEFM-a samo djelomično (osnovna teorija) primjenjuju na stijenske materijale i geološke strukture.

Postoji više teorija i kriterija, kao što su Mohr-Coulombov kriterij ili Hoek-Brownov kriterij, koji predviđaju stanje sloma stijene. Međutim, ti kriteriji često se direktno bave samim procesom sloma. Zato ne daju podatke o npr. broju, duljini, širini i stanju nastalih pukotina. Zato postoji parametar poznat kao parametar veličine naprezanja *K* (engl. *Stress Intensity Factor*), koji se određuje iz analize naprezanja koje rezultira pukotinom.

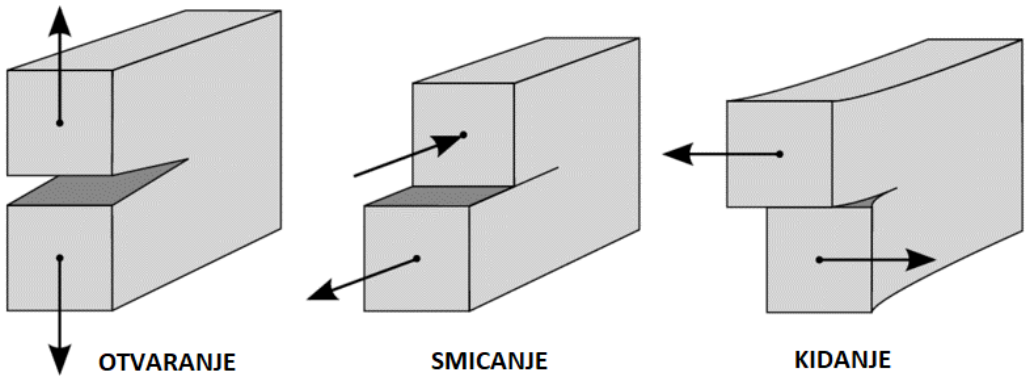
Kod analize polja naprezanja na linearno elastično tijelo prvo treba definirati pukotinu koja nastaje. Najjednostavniji model definira pukotinu kao pravac preko i/ili duž kojeg polje pomaka pokazuje diskontinuitet. Plohe (stijenke) diskontinuiteta mogu, ali i ne moraju biti pod naprezanjem. Djelovanja vanjskih (dodatnih) naprezanja, unutarnjih naprezanja i sile trenja mogu se svesti na liniju sloma (slika 4.1) pa je σ_n normalno naprezanje na liniju sloma, a τ posmično naprezanje.



Slika 4.1. *Sistem naprezanja na pukotinu*

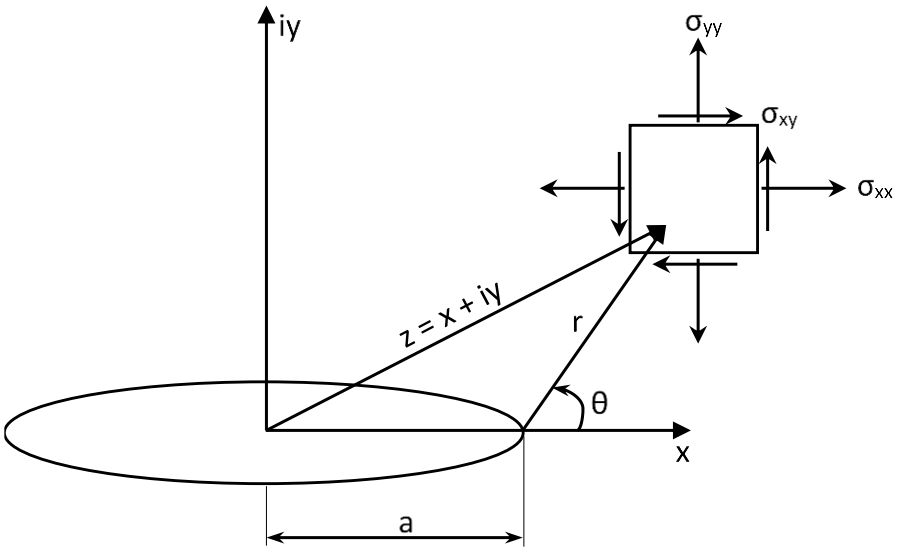
Pukotina se može deformirati na tri osnovna načina, kako je prikazano na slici 4.2. Kod prvog načina plohe diskontinuiteta otvaraju se okomito na ravninu diskontinuiteta. Kod drugog načina plohe diskontinuiteta kližu u ravnini diskontinuiteta, okomito na prednji rub. Treći način

predstavlja kidanje, s obzirom da se plohe diskontinuiteta pomiču također u ravnini diskontinuiteta, ali paralelno s prednjim rubom.



Slika 4.2. *Tri osnovna načina širenja pukotina*

Teorija elastičnosti za ravninske sustave pruža relativno jednostavna rješenja ovog generalnog problema nastanka loma, osobito metode analize naprezanja po Muskhelishviliju (1953) i Westergaardu (1939). Tako na primjer za najjednostavniji način deformacije pukotine, detaljno prikazan na slici 4.3, Kobayashi (1973) Westergaardovu funkciju naprezanja *Z* prikazuje kao izraz 4.1, u kojem je *g(z)* analitička funkcija ovisna o vanjskoj geometriji pukotine i pridruženim rubnim uvjetima.



Slika 4.3. *Prvi način deformiranja pukotine (otvaranje), okomito na ravninu pukotine*

$$Z_I = \frac{g(z)}{\sqrt{z^2 - a^2}} \tag{4.1}$$

Ako se promatranje ograniči na malo područje oko pukotine, a sva naprezanja prezentiraju pomoću lokalnog polarnog koordinatnog sustava s koordinatama r i θ, izraz 4.1 postaje izraz 4.2, u kojem je $\rho = re^{i\theta}$. Kada $\rho \rightarrow 0$ kompleksna funkcija $f(\rho)$ je stvarna konstanta $K/(2\pi r)^{-2}$, gdje je K već spomenuti parametar veličine naprezanja, koji se u ovom konkretnom slučaju definira izrazom 4.3.

$$Z_I = \frac{f(\rho)}{\sqrt{\rho}} \tag{4.2}$$

$$K = \lim_{r \to 0} \sigma_{yy}(r, \theta = 0) \cdot \sqrt{2\pi r} \tag{4.3}$$

Izrazi 4.4, 4.5 i 4.6 za lokalna naprezanja definirani su pomoću lokalnih koordinata. Za stanje ravninskog naprezanja komponente pomaka u_x i u_y, u x i y smjerovima mogu se izračunati pomoću izraza 4.7 i 4.8, gdje je G posmični modul, a ν Poissonov koeficijent.

$$\sigma_{xx} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2} \cdot \sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{4.4}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2} \cdot \sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{4.5}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} \cdot \csc\frac{3\theta}{2} \tag{4.6}$$

$$u_x = \frac{K}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\frac{\theta}{2}\left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \sin^2\frac{\theta}{2}\right] \tag{4.7}$$

$$u_y = \frac{K}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\frac{\theta}{2}\left[\frac{2}{1+\nu} - \cos^2\frac{\theta}{2}\right] \tag{4.8}$$

Prikazani način samo je jedan od brojnih načina rješavanja problema iz domene mehanike loma. Uglavnom, većina tih načina ili rješenja nastala je na temelju proučavanja i ispitivanja neprirodno nastalih struktura pa su zato takva rješenja samo djelomično prikladna za konfiguracije koje se često javljaju u geološkim strukturama. Na primjer, mnogi problemi loma stijena uključuju nekakve konačne granice, trodimenzionalnu konfiguraciju opterećenja, pukotine pod tlakom i sl. Također, problemi loma stijena često zahtijevaju rješenja za pomake, kao i intenzitet naprezanja, a oni se često zanemaruju.

Pukotine nikad nisu idealno glatke i nelinearno ponašanje u neposrednoj blizini pukotine karakteristično je za gotovo sve krte (lomljive) materijale. Neelastično ponašanje kod stijena često se manifestira nastankom mikropukotina. Razvoj modela zona mikropukotina za stijenske materijale temelji se na modelima koji su razvijeni za metalne materijale.

Tematika ovog rada vezana je za otkopavanje stijene pa će u nastavku biti više riječi o analizi pukotina koje se odnose na fragmentaciju stijene. Najčešći način fragmentacije stijene je detonacija eksplozivnog naboja u bušotini, kada se kroz stijensku masu šire tlačni i vlačni udarni val te tlak plinovitih tvari, dovodeći stijenu u stanje tlačnog i vlačnog naprezanja. S druge strane, postoje dva osnovna načina mehaničkog fragmentiranja stijene s različitim alatima. Tako se stijena može cijepati kombinacijom potisne sile i gibanja alata okomito na površinu stijene ili rezati kretanjem alata paralelno na površinu, također uz potisnu silu. Moguće su i kombinacije dva osnovna načina mehaničkog fragmentiranja stijene.

4.2. Otkopavanje stijenske mase miniranjem

U većini slučajeva teško je zamisliti izgradnju građevinskih konstrukcija, prometnica, pomorskih i zračnih luka, hidroenergetskih i drugih objekata u stijenama bez uporabe eksploziva i miniranja. Tehnologija otkopavanja stijenske mase miniranjem jedina je primjenjiva tehnologija otkopavanja u čvrstim i vrlo čvrstim, blokovitim stijenama. Međutim, često se primjenjuje i u stijenama manje čvrstoće zbog vrlo visoke učinkovitosti, mogućnosti kontrole fragmentacije odminirane stijenske mase, pri tome se mogu primijeniti za otkopavanje raznih količina ili volumena stijenske mase (već od nekoliko stotina m^3 za građevinske iskope pa do milijuna m^3 na velikim površinskim rudarskim kopovima).

Miniranje je tehnologija otkopavanja stijenske mase primjenom energije eksploziva. Ukupna raspoloživa energija dijeli se u dvije vrste energije: udarna energija i energija plinova ili potisna energija. Iniciranjem minskog polja i detonacijom eksplozivnih naboja u bušotinama dolazi do brojnih kemijskih, dinamičkih i fizikalnih procesa.

U nastavku ovog poglavlja bit će pokazano kako je kontrola fragmentacije ili veličine zrna odminiranog materijala vrlo dobro istražena za tehnologiju otkopavanja miniranjem. Ni jedna druga tehnologija otkopavanja, osim djelomično tehnologije otkopavanja hidrauličnim čekićem, ne posvećuje posebnu pažnju kontroli fragmentacije, što je velika prednost miniranja.

Unatoč navedenim velikim prednostima, tehnologija otkopavanja miniranjem teško je primjenjiva ili nije primjenjiva u određenim uvjetima. U prvom redu tu se misli na primjenu u urbanim sredinama ili u blizini njih, budući da se prilikom miniranja javljaju znatne vibracije tla koje uzrokuju pukotine u tlu i na građevinskim konstrukcijama, a još je važnije što postoji opasnost od razbacivanja fragmenata odminirane stijenske mase i buke, čime su ugroženi ljudski životi. Na zaštićenim područjima, bilo zbog prirodnih ili kulturnih znamenitosti, miniranje nije primjenjivo zbog vibracija, buke i zaprašenosti.

4.2.1. Bušenje minskih bušotina

Izvedba minskih bušotina u stijeni, tj. radovi na bušenju stijene jedan su od dva osnovna skupa organizacijskih i tehnoloških aktivnosti pri otkopavanju stijenske mase bušačko-minerskim radovima. Radovi bušenja obuhvaćaju izvedbu minskih bušotina te njihovo privremeno čepljenje ili neke druge oblike njihove zaštite od zapunjavanja prije punjenja eksplozivom. U tehničkom smislu, s obzirom na neposredno djelovanje samog alata na stijenu, bušenje može biti:

a) Udarno sa zakretanjem (perkusivno) – obuhvaća povremeni (ciklički) udar na alat za bušenje uz usporedno (istovremeno) zakretanje alata. Prevelik tlak udara izaziva teško okretanje alata, a premali tlak dovodi do odskakanja alata za bušenje. Odnos broja okretaja i broja udara je primjerice oko 1/9 do 1/10.
b) Kružno (rotacijsko) bušenje sastoji se od stalnog pritiska na alat za bušenje uz usporedno (istovremeno) okretanje alata.

Bušaća postrenja dijele se na:

a) Samostalne pretežito lake ručne bušaće čekiće na pogon komprimiranim zrakom (mase do 30 kg, promjeri bušenja 25 do 45 mm, dubine bušenja do najviše oko 4 m, brzina prodiranja u stijenu oko 35 cm/min, utrošak zraka od 1,5 do 4,5 m^3/min) gdje pribor za bušenje čine monoblok svrdla s jednobridnim, trobridnim ili križnim sječivom.
b) Srednje teške i teške lafetirane (s tornjem) bušaće garniture na nepokretnom ili polupokretnom postolju.
c) Samohodna bušaća postrojenja koja uz toranj i teške bušaće čekiće obuhvaćaju i svu ostalu opremu za njihov pogon i kretanje.

Bušaći čekići koji se koriste u kombinaciji s lafetiranim bušaćim postrojenjima mogu biti vanjski ili dubinski. Kod vanjskih (engl. *Drifter* ili *Top Hammer*) se udar i zakretanje izvode u čekiću izvan bušotine, dok se kod unutarnjih zakretanje izvodi uređajem izvan bušotine (pomoću hidraulike), a udar u čekiću (pomoću komprimiranog zraka) koji se nalazi unutar bušotine (engl. *Down The Hole* – DTH). Unutarnji bušaći čekići najčešće se koriste u kamenolomima i na površinskim kopovima, dok se pri građevinskim minerskim radovima najčešće rabe samohodne bušilice s vanjskim udarnim bušaćim čekićima na hidraulični pogon.

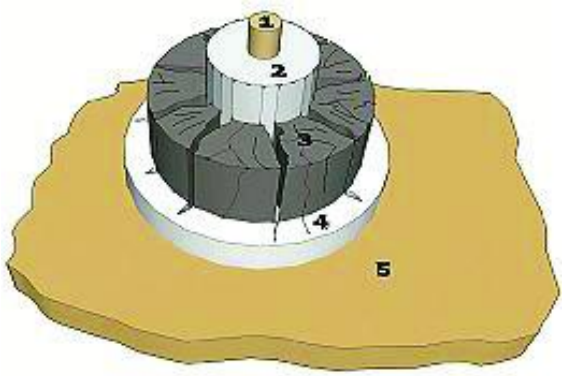
4.2.2. Miniranje stijenske mase

Drugi korak pri otkopavanju stijenske mase bušačko-minerskim radovima je punjenje minskih bušotina eksplozivom, koji predstavlja izvor energije. Iniciranjem minskog polja i detonacijom eksplozivnih naboja u bušotinama obavlja se miniranje stijenske mase. To je složeni fizikalno-mehanički proces i većina ga istraživača, više ili manje slično, analizira u četiri faze:

1) Odmah nakon detonacije eksploziva, drobi se zona neposredno uz bušotinu kao rezultat djelovanja udarnog vala.
2) Pukotine se šire od bušotine, dok se udarni val rasprostire kao sferni udarac do slobodne površine.
3) Nastaje vlačni val koji se odbija od slobodne površine prema bušotini.
4) Punjenje već otvorenih pukotina plinom te njihovo daljnje širenje, pokretanje cijele mase koja formira kamenu hrpu s bezbrojnim sudaranjima kamenih ulomaka koji se u srazovima usitnjavaju.

Udarna energija koja se sažima u prvoj, drugoj i trećoj fazi eksplozije kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti širi se kroz eksploziv i okolni materijal sferično u svim smjerovima od mjesta iniciranja i dovodi stijenu u stanje značajnih naprezanja koja prelaze dinamičku tlačnu čvrstoću stijene. Velika energija plinova, koja se širi i pokreće stijensku masu, produkt je ekspanzije plinova koji su pod visokim tlakom i temperaturom, a nastali su detonacijom.

Oštećenost stijenske mase, koja se mijenja s radijalnom udaljenošću od minske bušotine, moguće je razlikovati kroz pet zona oko minske bušotine, ovisno o karakteru stupnja oštećenja i izlomljenosti stijene (slika 4.4). Na slici 4.4 područje 1 je minska bušotina, 2 je područje drobljenja, 3 je frakturirano područje, 4 malo frakturirano područje i 5 je neporemećena stijena (Škrlec i sur., 2014).



Slika 4.4. *Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine: 1 – minska bušotina, 2 – područje drobljenja, 3 – frakturirano područje, 4 – malo frakturirano područje i 5 – neporemećena stijena (Dobrilović i Bohanek, 2013)*

Mnogo je autora opisivalo spomenute zone oštećenja, a neki su i odredili radijuse udaljenosti pojedinih zona od minske bušotine. Tako većina autora radijuse udaljenosti pojedinih zona daje u odnosu na radijus minske buštine (Ozkahraman, 2008; Dessureault, 2004; Bhandari, 1997), Hustrild (1999) kao parametar za odnos koristi radijus punjenja minske bušotine, neki su predložili izraze za izračun radijusa zone drobljenja (Djordjevic, 1999; Kanchibotla i sur., 1999), dok Li Chun-rui i suradnici (2009) daju izraze po kojima se mogu izračunati veličine pojedinih zona oštećenja.

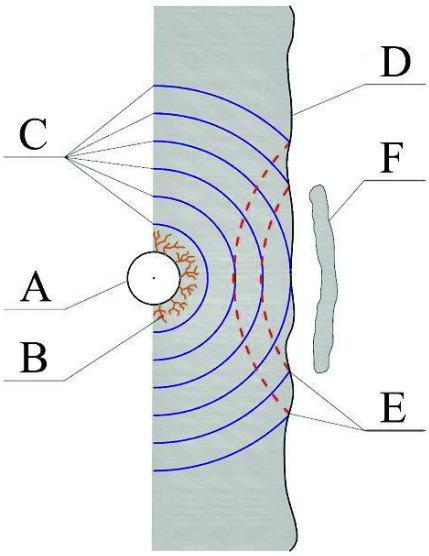
Udjel pojedinih energija u procesu loma stijene opisan je u teorijama miniranja, pri čemu postoje oprečna mišljenja različitih autora. Škrlec i sur. (2014) ističu najzastupljenije teorije miniranja:

a) Teorija refleksije valova naprezanja
b) Teorija ekspanzije plinova
c) Teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala
d) Teorija loma savijanjem
e) Teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova
f) Kombinirana teorija koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju
g) Teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina
h) Teorija dinamičkih i statičkih tlakova.

Teorija refleksije valova naprezanja objašnjava lom stijene prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini na sljedeći način: tlačni udarni valovi koji nastaju u procesu miniranja šire se do slobodne površine, gdje se reflektiraju i vraćaju prema mjestu detonacije eksploziva u obliku vlačnih udarnih valova. S obzirom na to da je stijena manje otporna na vlačna naprezanja odnosno vlačna čvrstoća je manja od tlačne čvrstoće stijene, kombiniranim djelovanjem vlačnih i tlačnih valova dolazi do odlamanja segmenata stijene na slobodnoj površini (Škrlec i sur., 2014). Na temelju istraživanja koja su proveli Ester (1996) i Antičević (2011), predložen je prikaz teorije refleksije valova naprezanja (slika 4.5) na kojem je slovom A označena minska bušotina, B označava zonu drobljenja, C označava širenje tlačnog vala, D je slobodna površina, E označava reflektirani (vlačni) val, a F odlomak dijela stijene na slobodnoj površini.

Teorija ekspanzije plinova opisuje nastanak radijalnih pukotina na udaljenosti od približno dva radijusa bušotine i šire se prema slobodnoj površini, kao rezultat zajedničkog rada reflektiranog vlačnog vala i plinova. Do pomaka, odnosno odlamanja stijene, dolazi tek kada radijalne

pukotine dođu do slobodne površine (Ester, 1996; Antičević, 2011). Coursen (1980), Britton i suradnici (1984) te Brinkman (1987) navode kako je upravo tlak ekspandirajućih plinova glavni mehanizam loma stijene eksplozivom, dok ostali mehanizmi loma ne pridonose u značajnijoj mjeri lomu stijene.



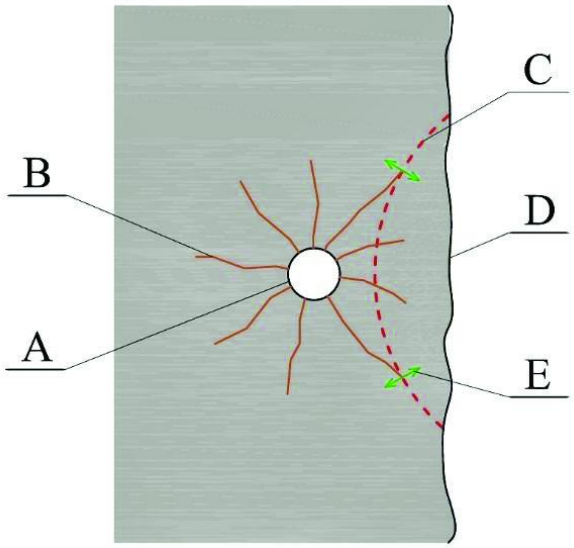
Slika 4.5. *Osnovni koncept teorije refleksije: A – minska bušotina, B – zona drobljenja, C – širenje tlačnog vala, D – slobodna površina, E – reflektirani (vlačni) val, F – odlomak dijela stijene na slobodnoj površini (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

Sljedeća teorija pokazuje važnost međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala, s obzirom na to da ono dovodi do povećanja brzine širenja pukotina koje su skoro paralelne s frontom reflektiranog vlačnog vala. Grafički prikaz teorije međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala dan je na slici 4.6, na kojoj slovo A označava minsku bušotinu, B radijalne pukotine, C vlačni val reflektiran od slobodne površine, D slobodnu površinu, a E vlačna naprezanja.

Teorija loma savijanjem opisuje lom stijene kao analogan savijanju i lomu grede, a glavni uzrok loma je tlak plinova. Teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova pokazuje da su valovi naprezanja i plinovi pod visokim tlakom isključivo zajednički odgovorni za lom i frakturiranje stijene (Dowding i Aimone, 1992). Po toj teoriji širina zona radijalnih pukotina ovisi o: vlačnoj čvrstoći stijene, brzini širenja valova u stijeni, detonacijom ostvarenom tlaku, svojstvima eksploziva i apsorpciji energije stijenske mase.

Mehanizam loma stijene kombiniranom teorijom koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju podijeljen je u tri faze (tablica 4.1). U prvoj fazi detonacijom eksplozivnog naboja najprije se stvaraju visoka temperatura i plinovi pod visokim tlakom, a

kada detonacijski val brzinom *2000 – 6000 m/s* uđe u stijenu, udarni tlačni val drobi stijensku masu oko bušotine. Zdrobljena zona dolazi pod utjecaj intenzivne radijalne kompresije, koja uzrokuje tangencijalna vlačna naprezanja. Kada ona prijeđu dinamičku vlačnu čvrstoću stijene, stvaraju se radijalne pukotine, čija dubina prodiranja ovisi o energiji eksploziva i parametrima čvrstoće stijene (Škrlec i sur., 2014). U drugoj fazi, kada udarni val dođe do slobodne površine, reflektira se na način da tlak naglo padne na negativnu vrijednost te se formira vlačni val koji se vraća nazad u stijenu pa nastaju primarne pukotine sloma zbog premašivanja vlačne čvrstoće stijene. Ako su ta vlačna naprezanja dovoljno velika, ona mogu uzrokovati ljuštenje (odlamanje) slobodne površine. U prvoj i drugoj fazi djelovanje energije udarnog vala priprema stijenu na način da inducira brojne male pukotine (Škrlec i sur., 2014). U trećoj fazi dolazi do rasterećenja stijene uslijed efekta ekspandirajućih plinova pa time dolazi do otvaranja već nastalih pukotina, ali i do nastajanja brojnih novih pukotina zbog posmičnog loma stijenske mase.

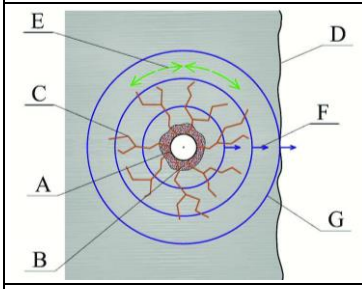
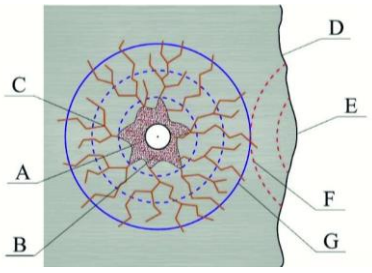
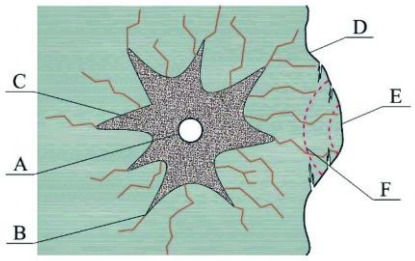


Slika 4.6. *Međudjelovanje radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala: A – minska bušotina, B – radijalne pukotine, C – vlačni val reflektiran od slobodne površine, D – slobodna površina, E – vlačna naprezanja (Ester, 1996)*

Teorijom jezgre ili valova naprezanja i pukotina, za razliku od do sada navedenih teorija, pokazano je da su valovi naprezanja vrlo važni kod fragmentiranja stijene, te uzrokuju brojne pukotine u zonama udaljenijim od minske bušotine. Ova teorija uključuje interakciju valova naprezanja i oštećenja u materijalu kao izvor i centar stvaranja i proširenja pukotina, odnosno riječ je o diskontinuitetima i pukotinskim sistemima od kojih se dalje proširuju postojeće pukotine te formiraju i razvijaju nove pukotine. Važno je spomenuti kako predmetna teorija

prepoznaje tlačne P-valove, ali i one sporije posmične S-valove, a kao rezultat njihove interakcije i kombinacije omogućavaju stvaranje novih pukotina ili širenje već postojećih pukotina. Rossmanith (2002) pokazuje vrlo visoku kompleksnost stvarnog mehanizma širenja udarnih valova i njihovog međudjelovanja u raspucanom mediju tako što ga dijeli na čak 10 faza: 1. detonacija eksplozivnog punjenja u bušotini, 2. proširenje pukotina oko bušotine, 3. ekstenzija zdrobljene zone, 4. dinamička stabilnost pukotina, 5. početak nastanka oštećenja, 6. brzo propagiranje valova i deformacija stijenske mase, 7. grananje pukotina, 8. interakcija pukotina i reflektiranih valova, 9. nestabilnost u smjeru pukotine i 10. slučajni progresivni lom. Ester (1996) i Antičević (2011) su kroz svoja istraživanja izradili grafički prikaz teorije jezgre na simuliranom geološkom sklopu stijenske mase (slika 4.7), a isti shematski prikaz koristili su Škrlec i suradnici (2014) u svojem radu.

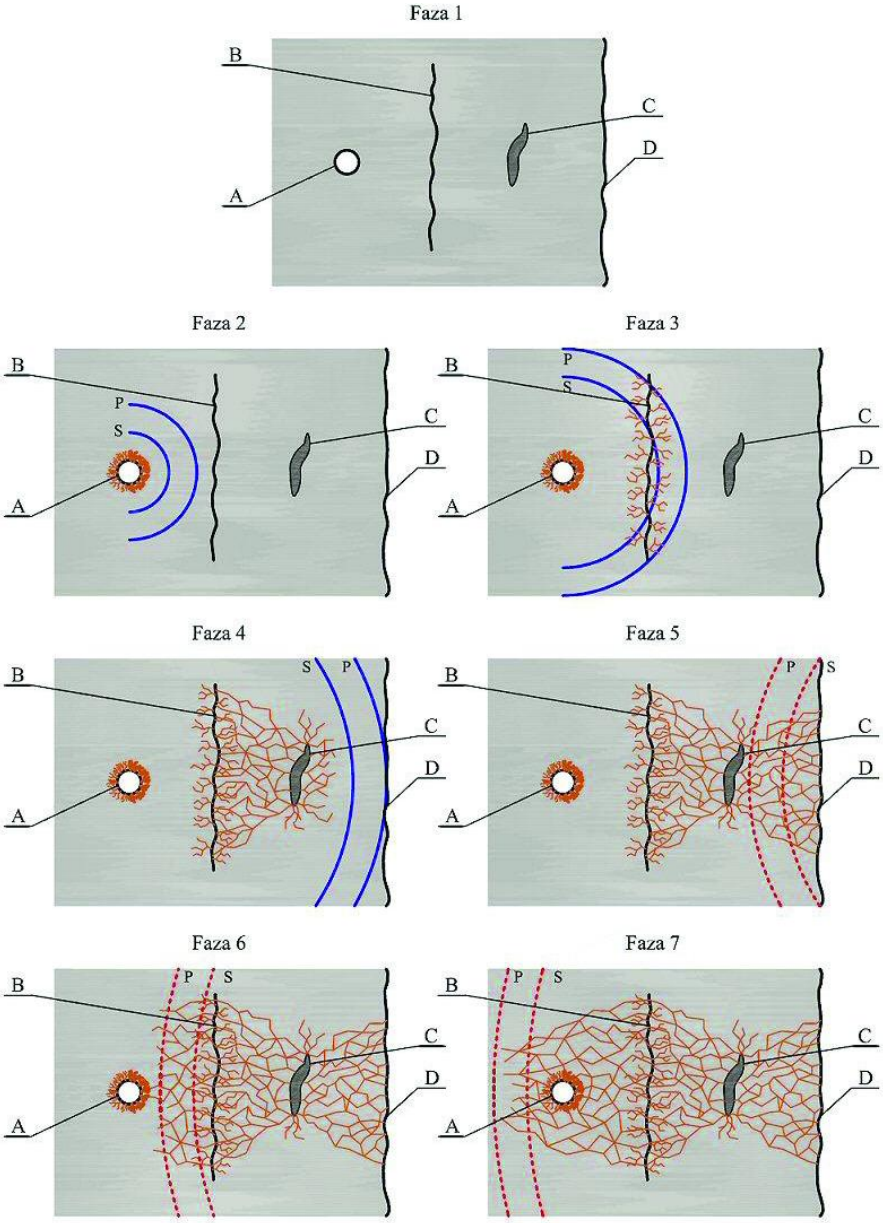
Tablica 4.1. *Grafički prikaz faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

1. FAZA	2. FAZA	3. FAZA
		
A – minska bušotina B – zdrobljena zona C – radijalne pukotine D – slobodna površina E – tangencijalna naprez. F – fronte tlačnih valova G – tlačni udarni valovi	A – minska bušotina B – proširenje zdrobljene z. C – proširenje rad. pukot. D – slobodna površina E – početak ljuštenja F – reflektirani vlačni valovi G – tlačni udarni valovi	A – minska bušotina B – proširenje radijalnih pukot. C – ekspanzija plinova D – slobodna površina E – odbacivanje materijala F – reflektirani vlačni valovi

Posljednja od poznatijih teorija temelji se na dva različita djelovanja tlaka nastalog detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine na stijensku masu, pri čemu je prvo djelovanje dinamičkog tlaka nastalog udarnim valovima, a drugo djelovanje statičkog tlaka ekspandirajućih plinova.

Iz svega navedenog u ovom poglavlju vidljivo je da su brojni autori razvijali teorije loma stijene eksplozivom, no ni jedna teorija nije opće prihvaćena jer ni jedna u potpunosti ne daje odgovor i objašnjenje što se događa u procesu razaranja stijene energijom eksploziva. Škrlec i suradnici (2014), na temelju prethodnih istraživanja, zaključuju kako se primarni mehanizmi loma na kojima se temelje teorije miniranja mogu izdvojiti sljedeća djelovanja: tlačne i vlačne

deformacijske (udarne) energije valova, refleksije udarnog vala na slobodnu površinu, ekspanzija plinova kroz stijensku masu, lom savijanjem, posmični valovi, rasterećenja stijenske mase, stvaranje i razvoj pukotina na diskontinuitetima.



Slika 4.7. *Shematski prikaz teorije jezgre ili valova naprezanja i pukotina: A – minska bušotina, B – vlačna pukotina, C – oštećenje, D – slobodna površina, P – longitudinalni val, S – transverzalni val (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

4.2.3. Značajke stijenske mase koje utječu na mogućnost primjene miniranja

Izrada bilo kojeg plana miniranja ovisi o dvije vrste varijabli. Prve su prirodno određene i njih je nemoguće kontrolirati (nekontrolabilne), a tu se ubrajaju varijable ili faktori kao što su geološki postanak, značajke stijenske mase, udaljenost do susjednih struktura itd. Varijable ili faktori koje je moguće kontrolirati (kontrolabilni) klasificiraju se u tri grupe: geometrija, fizikalno-kemijska svojstva eksploziva i vrijeme.

Iako se pokazalo kako su preliminarni projektni parametri miniranja ovisni o kombinaciji „stijenska masa – eksploziv – geometrija“ (slika 4.8), značajke stijenske mase često utječu na uspješnost miniranja i povoljnu fragmentaciju odminirane mase više od značajki eksploziva koji se koristi pri miniranju. Tako su npr. stijene veće gustoće u pravilu teže za miniranje, za razliku od stijena s manjom gustoćom. Terenska ispitivanja (Gazdek, 2003; Barton, 2006; Aki i Richards, 2009; Pasquet i sur., 2015) pokazala su da čvršće i kompaktnije stijene (veća gustoća) imaju veću brzinu širenja P i S-valova i bolje se drobe eksplozivima veće brzine detonacije, dok se lošije stijene mogu minirati eksplozivima manje brzine detonacije.

Slika 4.8. *Trokut miniranja*

Prirodne značajke koje utječu na podatljivost stijene bušenju su geološki uvjeti, stanje naprezanja i najviše unutarnja struktura stijene (vrsta, veličina i oblik zrna minerala te uzajamna veza i odnos minerala), koja određuje tvrdoću (otpor na prodiranje bušaćeg pribora), čvrstoću (otpor na statičko djelovanje bušaćeg pribora) i žilavost stijene (otpor na dinamičko djelovanje bušaćeg pribora). Dakle, sljedeće značajke određuju kako će se stijena ponašati kod bušenja:

a) Geološke značajke: litologija, mineralni sastav, vrsta stijene.

b) Značajke intaktne stijene: mehanička svojstva, mineraloška i fizikalna svojstva.

c) Strukturne značajke: prisutnost lomova, pukotina, bora i rasjeda.

d) Prisutnost vode: ovisno o izvoru i količini, to može biti nekontrolirani ili kontrolirani parametar.

Navedeni faktori, osim na bušenje, također utječu i na parametre miniranja i fragmentaciju odminirane stijene. S teoretskog gledišta, praktički svaki parametar koji se koristi za opisivanje stijenskog masiva ima određeni utjecaj na reakciju stijenske mase i djelovanje eksploziva. Međutim, s gledišta inženjera iz prakse, dostatno je poznavati parametre stijenske mase koji značajno utječu na uvjete miniranja. Na osnovi istraživanja Lilly (1986) naglašava utjecaj sljedećih parametara:

a) Strukturne značajke stijenske mase (npr. drobljiva, blokovita, masivna).
b) Slojevitost, razmak i orijentacija ploha koje pridonose slabljenju stijene kao što su diskontinuiteti, pukotine, škriljavost itd.
c) Gustoća i čvrstoća intaktne stijene.

Kako bi kvantificirao utjecaj svojstava stijene na fragmentaciju Cunningham (1987) uvodi faktor stijene *RF* (engl. *Rock Factor*), iskoristivši vezu s indeksom minirljivosti *BI* (engl. *Blasting Index*), koji dolazi iz koncepta Lillyja (1986). Faktor stijene ulazi u Kuz-Ramov model (Cunningham, 1983). Utvrđeno je kako kod procjene stijene za miniranje u obzir treba uzeti barem gustoću, mehaničku čvrstoću, elastična svojstva i raspucanost stijene pa je *RF* definiran izrazom 4.9, u kojem je:

a) *RMD* (engl. *Rock Mass Description*) – opisna vrijednost za stijensku masu (ako je izdrobljena *RMD = 10*, ako je blokovita *RMD = 30*, ako je masivna *RMD = 50*).
b) *JFa* (engl. *Joint Factor*) – ovisi o kutu nagiba slojeva i o vertikalnom razmaku, te je dan izrazom 27. Faktori *JCF* (engl. *Joint Condition Factor*), *JPS* (engl. *Joint Plane Spacing Factor*) i *JPA* (engl. *Joint Plane Angle Factor*) određuju se prema tablici 4.2.
c) *RDI* (engl. *Rock Density Influence*) – utjecaj gustoće stijenske mase.
d) *HF* (engl. *Hardness Factor*) – ako je Youngov modul elastičnosti $E_m < 50\ GPa$, onda je faktor tvrdoće $HF = E_m/3$, a ako je $E_m > 50\ GPa$, onda je $HF = \sigma_{ci}/5$.

$$RF = 0.06 \cdot (RMD + JFa + RDI + HF) \tag{4.9}$$

Određivanje faktora stijene *RF* je zahtjevan i vrlo važan dio procesa te je pri tome nemoguće zadovoljiti sve uvjete jednostavnim algoritmom prikazanim u izrazu 4.9. Često je vidljivo da je zapravo *RF* veći ili manji od onoga što se dobiva izrazom 4.9 pa umjesto da pokušava ugađati ulaz i tako vjerojatno gubi točan izlaz, Cunningham 2005. godine uvodi faktor korekcije *C(RF)*, koji obično ima vrijednost u rasponu 0,5 – 2,0. Konačni oblik za izračun je izraz 4.12.

Tablica 4.2. *Određivanje faktora pukotina JFa (Prema Cunningham, 1987; 2005)*

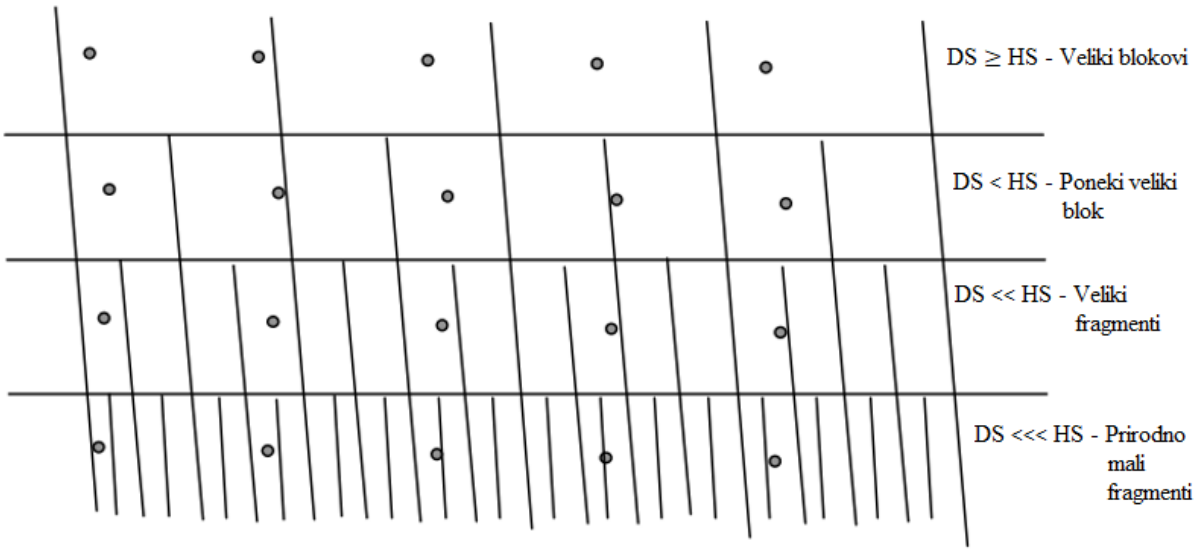
JFa = (JCF x JPS) + JPA (4.10)					
Stanje pukotina	JCF – Joint condition factor	Razmak između pukotina	JPS – Joint plane spacing factor	Orijentacija ploha diskontinuiteta (slika 4.10)	JPA – Joint plane angle factor
Zatvorene	1	< 0,1 m	10	Horizontalno	10
Otvorene	1,5	0,1 – 0,3 m	20	Pad od lica	20
S ispunom	2	0,3 m – 95 % R	80	Okomito na lice	30
		> R	50	Pad u lice	40

Kao što prikazuje slika 4.9, *JPS* djelomično je ovisan o apsolutnom razmaku između pukotina i djelomično o vrijednostima razmaka u rasporedu minskih bušotina, što se izražava kao reducirani raspored i označava simbolom R_d:

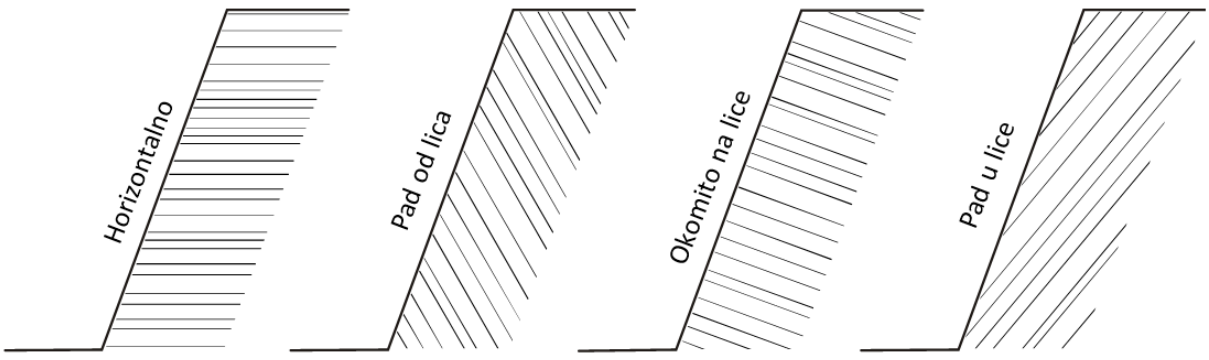
$$R_d = (w \cdot HS)^{0.5} \quad (4.11)$$

gdje su *w* i *HS* vrijednosti izbojnice i razmaka između minskih bušotina u metrima.

$$RF = 0.06 \cdot (RMD + JFa + RDI + HF) \cdot C(RF) \quad (4.12)$$



Slika 4.9. *Utjecaj omjera između razmaka pukotina DS i razmaka bušotina na fragmentaciju odminirane stijenske mase*



Slika 4.10. *Orijentacija ploha dominantnog seta diskontinuiteta*

4.2.4. Fragmentacija odminirane stijenske mase

S ciljem što nižih troškova otkopavanja stijenske mase tehnologijom miniranja, znanstvenici i istraživači razvili su različite inženjerske modele čiji je zadatak povezati distribuciju fragmenata odminiranog materijala s projektima i planovima miniranja. Od svih modela koji se koriste, najpopularniji je Kuz-Ramov model, iako i on ima svoje nedostatke kao i većina empirijskih modela.

Model u struci poznat kao Kuz-Ram je empirijski prikaz razdioba fragmenata odminirane stijenske mase, uz primjenu Rosin-Rammlerove funkcije (Rosin i Rammler, 1933) i teorije usitnjavanja miniranjem. Rosin-Rammlerovu funkciju (izraz 4.13) prvi je primijenio Kuznetsov (1973) kao analitički prikaz razdiobe veličine fragmenata nastale nakon miniranja, u obliku kako je to prikazano izrazom 4.14, gdje je V ukupni volumen minirane stijene, V_x je volumen svih frakcija čije su linearne dimenzije veće od x, dok su x_o i n parametri razdiobe. Kuznetsov izraz korišten je za prognoziranje razdiobe veličine fragmenata minirane stijene na osnovi uporabe TNT eksploziva. Novijim istraživanjima Cunningham (2005) razvija potpuniju jednadžbu, koja je prikladna i za druge komercijalne eksplozive (izraz 4.15). U Cunninghamovu izrazu R_x je udio materijala koji je ostao na situ, x je veličina otvora na situ, x_m je konstanta nazvana karakteristična veličina zrna, a n je indeks jednoličnosti.

$$y = 1 - e^{-bx^n} \tag{4.13}$$

$$R_x = \frac{V_x}{V} = exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n\right] \tag{4.14}$$

$$R_x = e^{-0.693\left(\frac{x}{x_m}\right)^n} \tag{4.15}$$

Ako se zahtijeva određena srednja fragmentacija ili karakteristična veličina zrna x_m, za primjenu je najbolji izraz 4.16, koji je ponudio Cunningham (2005) uzimajući u obzir utjecaj usporenja između minskih bušotina na fragmentaciju, kroz vremenski faktor A_t. U izrazu 4.16 koriste se i ostali faktori, poput faktora stijene *RF* (izraz 4.12), zatim odnosa između ukupne količine eksploziva po bušotini i ukupnog volumena odminirane stijenske mase *PF* (engl. *Powder factor*), količine (mase) eksploziva u bušotini *CW*, relativne potisne snage eksploziva *RWS* i korekcijskog faktora *C(RF)*.

$$x_m = RF \cdot A_t \cdot PF^{0.8} \cdot CW^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{RWS}\right)^{19/20} \cdot C(RF) \tag{4.16}$$

Više različitih oblika indeksa jednoličnosti *n* može se naći u literaturi, iz čega se može zaključiti kako postoje poteškoće kod obuhvaćanja svih parametara miniranja u jednu konstantu. Jednoličnost odminiranog materijala ovisi o:

a) distribuciji eksploziva kod miniranja (veličina izbojnice, omjer između izbojnice i razmaka između bušotina, promjer minske bušotine, preciznost bušenja, visina etaže…)
b) točnosti aktiviranja korištenih detonatora
c) usporenjima korištenih detonatora
d) prirodnoj fragmentaciji stijenske mase uzrokovanoj geološkim diskontinuitetima.

Cunningham (1983) je do indeksa jednoličnosti došao eksperimentalnim putem. Kod toga su u obzir uzeti sljedeći parametri: odnos izbojnice prema promjeru minske bušotine, shema bušenja, odnos razmaka bušotina prema izbojnici, preciznost bušenja te stupanj promjene duljine eksplozivnog punjenja prema visini etaže. Cunningham svoj konačni izraz za proračun iznosa indeksa jednoličnosti *n* postavlja 2005. godine preko izraza 4.17 (Cunningham, 2005), u kojem se koriste parametri poput promjera bušotine *d*, izbojnice *w*, standardne devijacije točnosti bušenja D_t, omjera razmaka minskih bušotina i izbojnice m_b, visine etaže H_b i duljine eksplozivnog punjenja iznad referentne razine l_{cb}. Osim toga, prisutan je korekcijski faktor *C(n)* koji se koristi za kalibraciju modela ako su dostupni izmjereni podaci, te faktor n_s koji u proračun uključuje raspršenje vremena usporenja kod miniranja. Faktor n_s izračunava se izrazom 4.18, gdje je R_s omjer raspršenja, a može se dobiti izrazom 4.19, u kojem su σ_t standardna devijacija inicirajućeg sustava i T_x željena vrijednost vremena usporenja između dvije bušotine. Vrijednost indeksa jednoličnosti u pravilu se kreće u granicama od 0,7 do 2 (Cunningham, 2005). Vrijednost *n* određuje oblik granulometrijske krivulje. Vrijednost 0,7 znači da je odminirani materijal nejednoličan (od praha do velikih fragmenata), dok vrijednost 2 predstavlja uniformnu distribuciju s većinom fragmenata blizu srednje vrijednosti.

$$n = n_s \cdot \sqrt{\left(2 - \frac{30B}{d}\right)} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{m_b}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{D_t}{B}\right) \cdot \left(\frac{l_{cb}}{H_b}\right)^{0.3} \cdot C(n) \qquad (4.17)$$

$$n_s = 0.206 + \left(1 - \frac{R_s}{4}\right)^{0.8} \qquad (4.18)$$

$$R_s = 6 \cdot \frac{\sigma_t}{T_x} \qquad (4.19)$$

4.3. Mehaničko otkopavanje stijenske mase

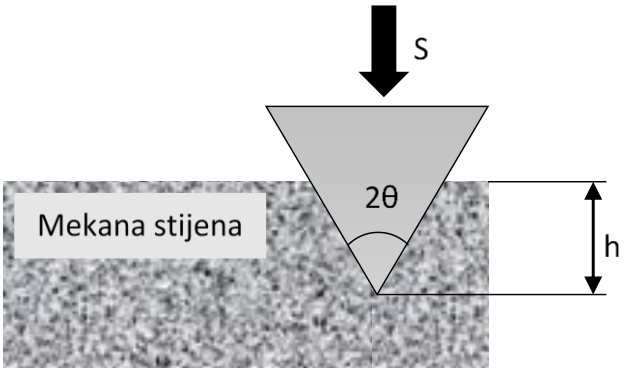
Kod mehaničkog otkopavanja stijenske mase važno je razlikovati tehnologije s obzirom na osnovni mehanizam odvajanja materijala iz stijenske mase, što nije uzimano u obzir kod dosadašnjih istraživanja. Najpoznatiji mehanizmi odvajanja komada stijene iz mase su:

a) kopanje (engl. *digging*) kod primjene bagera s lopatom
b) rijanje (engl. *ripping*) kod povlačenja dozerskog ili bagerskog rijača
c) razbijanje (engl. *breaking*) kod primjene hidrauličnog čekića
d) rezanje (engl. *cutting*) kod odvajanja materijala iz stijenske mase strojevima s rotirajućim reznim elementima.

Mehaničko otkopavanje je invazivno djelovanje nekog alata na materijal s ciljem loma i odvajanja komada/dijelova osnovne strukture. Mehanički lom stijene koristi se u procesima otkopavanja na način da se generira naprezanje u stijeni direktnim mehaničkim djelovanjem alata, s ciljem izazivanja lokalne fragmentacije stijene. Otpornost na lom u prvom redu je u funkciji svojstva materijala (npr. stijene) koji se kopa, ali ovisi i o alatu kojim se kopa, odnosno stroju koji mora biti sposoban izvoditi kopanje.

Osnovni mehanizam loma stijene alatom prikazan je na slici 4.11, gdje je prikazan klin (zub) koji prodire u polubeskonačnu stijensku masu. Evans i Murrel (1962) među prvima su proučavali spomenuti mehanizam te su zaključili kako sila potrebna za penetraciju jednog klina u mekanu stijenu (npr. ugljen) naglo raste s povećanjem kuta klizanja između stijene i klina, kao i kuta između ploha klina (kut θ na slici 4.11). Isti autori su predložili izraz 4.20 za proračun sile S, potrebne za penetraciju jednog klina u mekanu stijenu. U izrazu 4.20 b je duljina kontakta između stijene i klina, h je dubina penetracije klina, σ_{ci} tlačna čvrstoća intaktne stijene, a φ kut klizanja. Ova teorija predviđa vlačnu pukotinu za mekane stijene, dok u tvrdim stijenama inducirana izdrobljena formacija ovisi o promjenama na potezu od posmične pukotine u blizini zone drobljenja, do vlačne pukotine na površini stijene. U praksi ovaj osnovni mehanizam postaje mnogo kompleksniji, ako se u obzir uzme stupanj krtosti stijene i činjenica da alat za otkopavanje obično ima više zubi. Krtost stijene pod utjecajem je prirodnih tlakova koji djeluju pa se tako pri visokom tlaku javlja plastična deformacija, dok pri niskim tlakovima prevladava lomljenje stijene.

$$S = 2b \cdot h \cdot \sigma_{ci} \cdot (\varphi + \tan\theta) \tag{4.20}$$



Slika 4.11. *Shematski prikaz penetracije klina u mekanu stijenu (prema teoriji Evansa i Murrela, 1962)*

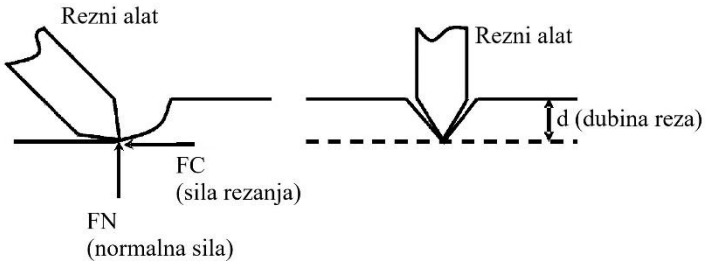
Jaeger i Cook (1979) predložili su da se *UCS* može koristiti za predviđanje približne veličine specifične energije potrebne za lomljenje stijene. Međutim, jasno je da takav pristup ima određena ograničenja zbog varijacija u prirodnoj raspucanosti stijena jednake čvrstoće, što se pripisuje mineraloškim i strukturnim značajkama stijene.

Osim već spomenutih, i brojni drugi istraživači proučavali su teoretske aspekte procesa mehaničkog kopanja stijene posljednjih 50 godina. No, među najprihvatljivijima je teorija koju su razvijali Evans i suradnici (1961, 1966, 1972, 1982, 1984). Evans je teoretski demonstrirao kako su vlačna i tlačna čvrstoća najdominantnije značajke stijene kod rezanja klinastim i konusnim alatima.

Kao primjer rezultata Evansovog istraživanja, u nastavku su prikazani izrazi 4.21 i 4.22, koji se koriste za proračun sile *FC* (slika 4.12) potrebne za rezanje stijene alatom klinastog (izraz 4.21) i šiljastog oblika (izraz 4.22). U navedenim izrazima *cd* je dubina reza, *c* je širina alata, λ je kut nagiba alata, σ_t je posmična čvrstoća stijene, σ_{ci} je tlačna čvrstoća stijene, a θ je kut nagiba vrha alata. Normalna sila (*FN* na slici 4.12) kontrolira dubinu reza i vrlo je važan faktor koji regulira učinkovitost procesa rezanja, budući da je učinkovitost rezanja izravno povezana s dubinom rezanja.

$$FC = \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot cd \cdot c \cdot \sin\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right)}{1 - \sin\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right)} \tag{4.21}$$

$$FC = \frac{16 \cdot \pi \cdot cd^2 \cdot {\sigma_t}^2}{\cos^2(\theta/2)\sigma_{ci}} \tag{4.22}$$



Slika 4.12. *Rezultantne sile rezanja stijene reznim alatom (Bilgin i sur., 2005)*

Teorije rezanja stijena mogu se primijeniti kako bi se protumačila aktivnost kopanja pomoću većine opreme za mehaničko otkopavanje (Hadjigeorgiou i Scoble, 1988). To se može postići idealiziranjem više različitih vrsta jednostavnih alata za kopanje: zuba (bager s lopatom), rijača (dozerski i bagerski), konusni elementi u obliku bradavice ili šiljaka (strojevi s rotirajućom reznom glavom) i rezni diskovi (tunelari, TBM).

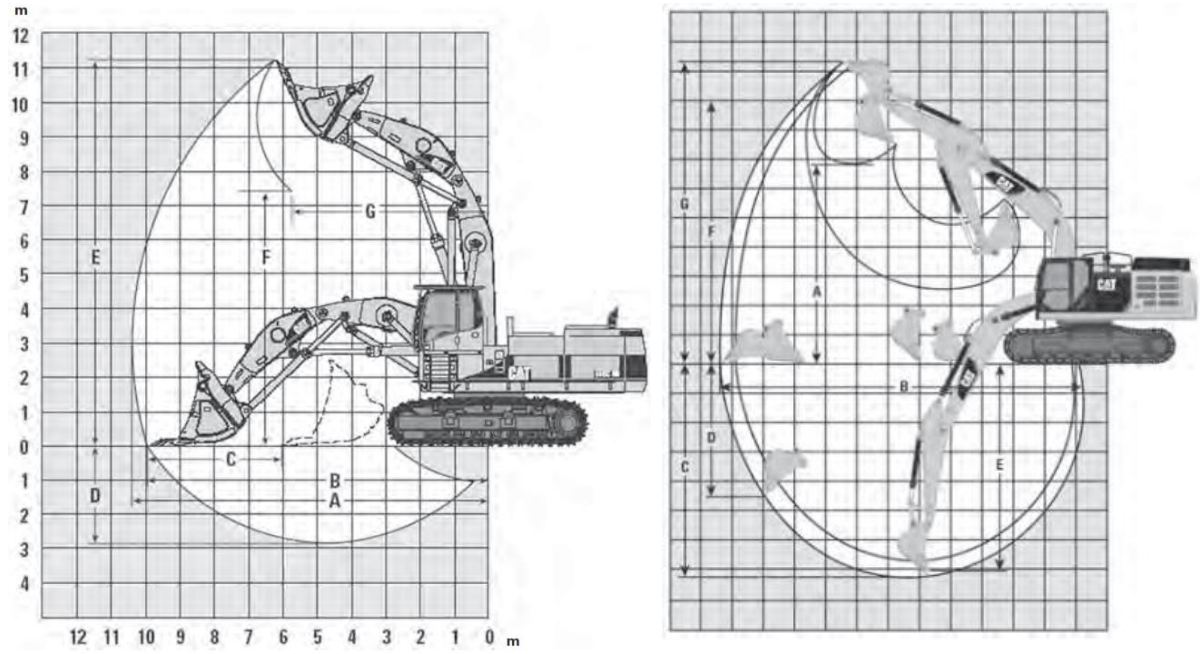
4.3.1. Kopanje

Kopanje (engl. *Digging*) pripada u grupu mehaničkog otkopavanja jer se mehanički prodire u stijensku masu s ciljem izdvajanja komada stijene iz prirodne formacije, a najčešće se izvodi bagerskom lopatom. Bageri se prema načinu rada mogu podijeliti na cikličke i kontinuirane. Oni cikličkog načina rada mogu kao radni element koristiti visinsku (slika 4.13.a) ili dubinsku lopatu (slika 4.13.b), skrepersku posudu ili grabilicu. Bageri kontinuiranog načina rada mogu biti rotorni ili vedričari, s obzirom na oblik radnog elementa.

Bageri se mogu kretati pomoću gusjenica, kotača, tračnica, a mogu biti i koračajući i plovni. Primarno ih mogu pokretati motori s unutarnjim izgaranjem ili elektromotori, dok se prijenos snage na pojedine bagerske elemente vrši hidraulički ili užetno.

Rotorni bageri kontinuiranog načina rada otkopavanje vrše pomoću lopata (vedrica) koje su raspoređene po obodu rotora, dok bageri vedričari umjesto rotora imaju beskonačni lanac smješten unutar odgovarajućeg okvira. Međutim, takvi bageri rijetko se primjenjuju za iskop tvrdih i čvrstih materijala (otkopavanje tehničko-građevnog kamena), ali su ekonomični pri otkopavanju velikih količina mekih (npr. glina) i srednje tvrdih materijala (npr. ugljen).

Za otkopavanje stijenskog materijala puno češće se koriste bageri cikličkog načina rada. Tu se misli na bagere lopatare (slika 4.13), s obzirom da su bageri dreglajni sa skreperskom posudom i grajferi s grabilicom u prvom redu namijenjeni za otkopavanje nevezanih sedimenata, kao što su šljunak i pijesak.

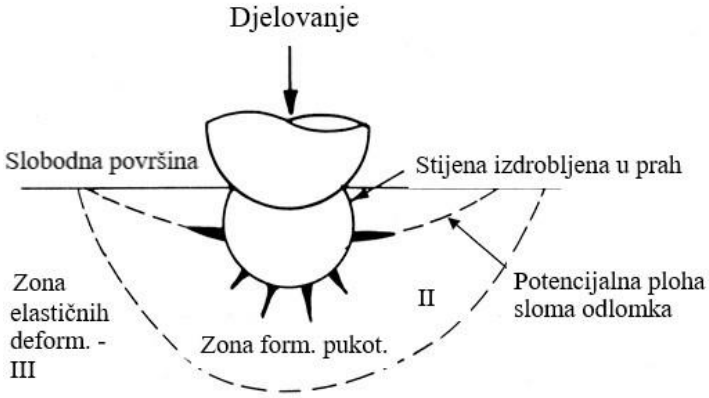


a) b)

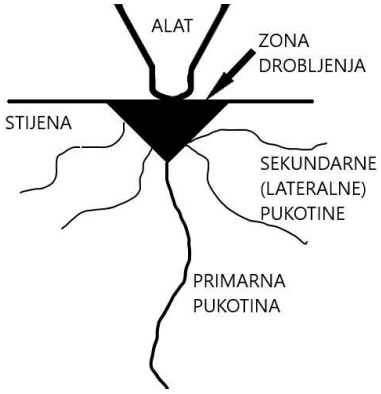
Slika 4.13. *Primjeri hidrauličnih bagera lopatara s prikazanim dimenzijama zona otkopavanja: a) bager CAT 385C s visinskom lopatom; b) bager CAT 349E s dubinskom lopatom (Caterpillar, 2015)*

Najčešće se na kopovima tehničko-građevnog kamena i na gradilištima primjenjuju hidraulični bageri s dubinskom lopatom. Razlog tome je svestranost takvog stroja koji se, osim za otkopavanje lopatom, može koristiti i za gravitacijski transport materijala, utovar u kamione i oplemenjivačka postrojenja.

Bagerska lopata na svojem prednjem kraju ima zube koji uvelike pomažu kod procesa otkopavanja. Kopanje stijene u pravilu počinje penetracijom alata, što je već djelomično opisano teorijom Evansa i Murrela (1962). Kada vrh alata počinje djelovati na površinu stijene, naprezanja rastu s povećanjem opterećenja, te se u stijeni javljaju elastične deformacije (zona III na slici 4.14). Na kontaktu između alata i površine stijene odmah se formiraju nepravilnosti, te se pod utjecajem utiskivanja razvija zona izdrobljene stijene koja sadrži brojne pukotine, tako da stijena može biti izdrobljena na vrlo male čestice veličine praha (slika 4.14). Iz izdrobljene zone se glavna komponenta sile dalje širi u stijenu te se počinje formirati primarna ili dominantna pukotina. Nakon prevladavanja energetske barijere slijedi spontano i brzo širenje (zona II na slici 4.14). Kada opterećenje dostigne dovoljnu razinu, stijena se lomi i nastaje jedan ili više odlomaka formiranih lateralnih pukotina koje se šire ispod vrha zuba prema površini (slika 4.15).



Slika 4.14. *Penetracija alata u stijenu i formiranje zona oštećenja (Sandvik Tamrock, 1999)*

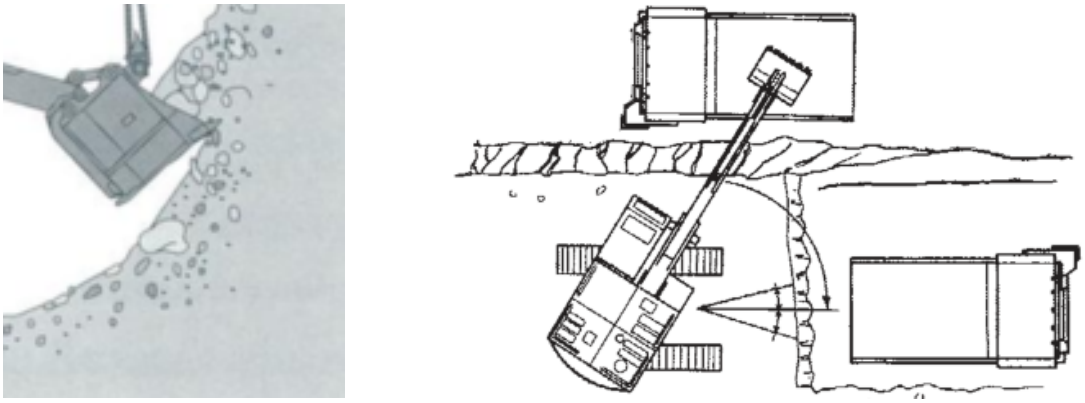


Slika 4.15. *Nastanak pukotina penetracijom alata u stijenu*

No, opisana penetracija zuba u stijenu samo je dio procesa, budući da slijedi ulazak cijele lopate u stijensku masu i punjenje iste otkopanom stijenom (slika 4.16.a). Otpor samoj mehaničkoj penetraciji alata uvelike je ovisan o značajkama stijenske mase, ali je otpor ukupnom otkopavanju dodatno ovisan i o značajkama bagera te drugim tehničkim uvjetima. Tako tehnologija rada bagera s dubinskom lopatom ovisi o različitim tehničkim uvjetima (npr. visina etaže, širina berme, maksimalni doseg bagera), no velika prednost primjene bagera je sposobnost prilagođavanja tehnologije otkopavanja promjenama značajki stijenske mase. Bager može kopati dubinski ili visinski, čeono (frontalno) ili u bloku, a po potrebi može se vršiti i selektivno otkopavanje. Slika 4.16.b prikazuje tehnologiju rada hidrauličnog bagera s dubinskom lopatom, koji vrši dubinsko otkopavanje u bloku s mogućnošću utovara u damper ispred bagera ili bočno od bagera.

Kopanje materijala bagerskom lopatom postiže se pomoću dvije sile. Jedna sila javlja se prilikom rotacije lopate (F_B), a druga prilikom povlačenja lopate (F_S) s ciljem punjenja materijalom. Te se sile mogu izračunati primjenom radnog hidrauličnog tlaka na cilindre koji osiguravaju sile kopanja. Caterpillar (2015) daje izraze za proračun navedenih sila. Tako se za

silu F_B koristi izraz 4.23, pri čemu su dimenzije *A, B, C* i *D* označene na slici 4.17. Sila koju proizvodi cilindar računa se kao umnožak tlaka i površine klipa cilindra. Sila F_S izračunava se na sličan način, pomoću izraza 4.24.

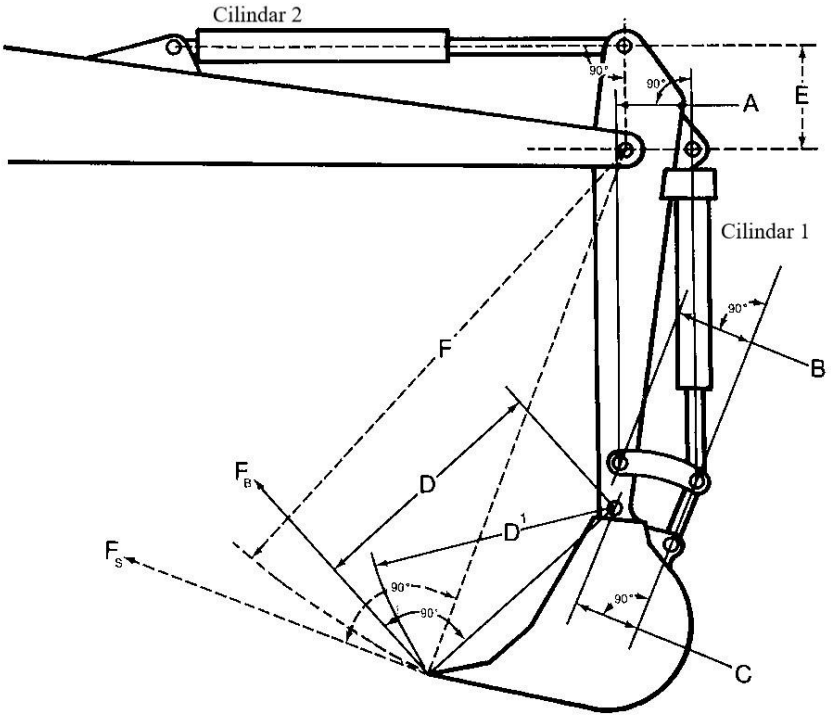


a) b)

Slika 4.16. *Tehnologija rada bagera lopatara: a) Punjenje visinske lopate stijenskim materijalom (Özdoğan i Özdoğan, 2016); b) Rad bagera s dubinskom lopatom na otkopavanju stijenske mase i utovaru u dampere* ***(****Caterpillar, 2015****)***

$$F_B = \frac{Sila\ cilindra\ 1}{D} \cdot \left(\frac{A \cdot C}{B}\right) \tag{4.23}$$

$$F_S = \frac{(Sila\ cilindra\ 2) \cdot E}{F} \tag{4.24}$$



Slika 4.17. *Dimenzije dubinske bagerske ruke s lopatom (Caterpillar, 2015)*

Maksimalna radijalna sila cilindra *1* (cilindar koji služi za rotaciju lopate) je sila kopanja koja dodiruje luk radijusa D^1 (slika 4.17). Lopata mora biti postavljena tako da se postigne maksimalni izlazni moment iz cilindra 1 i spojnih veza. Iz izraza 4.23 vidi se da je sila F_B maksimalna kada dio izraza *(A x C)/B* ima maksimalnu vrijednost. Prema Caterpillaru (2015) vrijednost sile F_B kreće se u granicama od *10 kN* (kod manjih modela bagera) do *85 kN* (kod najvećih modela hidrauličnih bagera s dubinskom lopatom).

Maksimalna radijalna sila cilindra *2* (cilindar koji služi za povlačenje lopate) je sila kopanja koja dodiruje luk radijusa *F* (slika 4.17). Međutim, vrijednost ove sile ovisi o duljini lopate (može biti kratka, srednja ili duga), budući da duljina lopate određuje dimenziju *F*. Prema Caterpillaru (2015) vrijednost sile F_S kreće se u granicama od *4.5 kN* (kod manjih modela bagera) do *60 kN* (kod najvećih modela hidrauličnih bagera s dubinskom lopatom). Navedeni podaci odnose se na duge modele lopata jer se one najviše koriste zbog većeg volumena punjenja.

Može se zaključiti kako je upravo kombinirano djelovanje sila F_B i F_S zaslužno za učinkovitiju silu prodiranja lopate u materijal koji se kopa, u odnosu na strojeve kao što su utovarivači. Također, veće sile omogućuju primjenu u čvršćim i tvrđim materijalima (stijenska masa) bez da se prethodno vrši miniranje ili rijanje, ali za takve materijale Caterpillar preporučuje primjenu užih i kraćih modela lopata.

Jasno je da pojavom dijelova stijenske mase velike čvrstoće neće biti kopanja s istovremenim punjenjem lopate, već će se vršiti samo razrušavanje zubima lopate. Zbog toga je za otkopavanje stijenske mase pomoću bagerske lopate sa zubima puno povoljnije da stijenska masa koja se otkopava bude lošije kvalitete, odnosno što više ispresijecana plohama oslabljenja (prirodne ili umjetne) pa se širenje postojećih pukotina koristi za lakšu penetraciju. Zato su plohe diskontinuiteta u stijenskoj masi vrlo važne za mogućnost kopanja. Empiričke klasifikacije (Weaver, 1975; Kirsten, 1982; Scoble i Muftuoglu, 1984; Singh i sur., 1987; Pettifer i Fookes, 1994; Tosun, 2014) pokazale su da su značajke intaktne stijene σ_{ci}, $I_{S(50)}$ i *Hd* te *DS*, *JP* i *JO* vrlo važne značajke stijenske mase za potrebe kopanja (prilog 1).

Nedostatak kopanja stijenske mase bagerom je to što nema posebne kontrole fragmentacije, budući da je ona uglavnom određena prirodnom fragmentacijom stijenske mase koja se otkopava. S obzirom na karakteristike stijenske mase koja se uopće može kopati, može se reći da je prisutnost izvangabaritnih blokova u otkopanom materijalu vrlo rijetka pa najčešće niti nema potrebe za dodatnim usitnjavanjem fragmenata stijene.

4.3.2. Rijanje

Rijanje (engl. *Ripping*) je metoda lomljenja i pomicanja dijelova stijenske mase pomoću čeličnih rijača pričvršćenih za stražnji dio dozera. Drugi dio procesa otkopavanja je guranje i transport izdrobljenog materijala dozerskim nožem, koji se može pomicati u više smjerova na hidraulični pogon. Tipična tehnologija rada dozera uključuje fazu iskopa dok se nož napuni, zatim transportiranja uz određene gubitke materijala ispred noža, te na kraju odlaganja i povratka praznog noža (Klanfar, 2014). Otkopavanje stijenske mase dozerskim nožem često se izvodi na etažama površinskih kopova, a budući da se radi o specifičnim uvjetima, dozer razrušava stijensku masu bočnim zahvatom noža, kosom putanjom u odnosu na bermu.

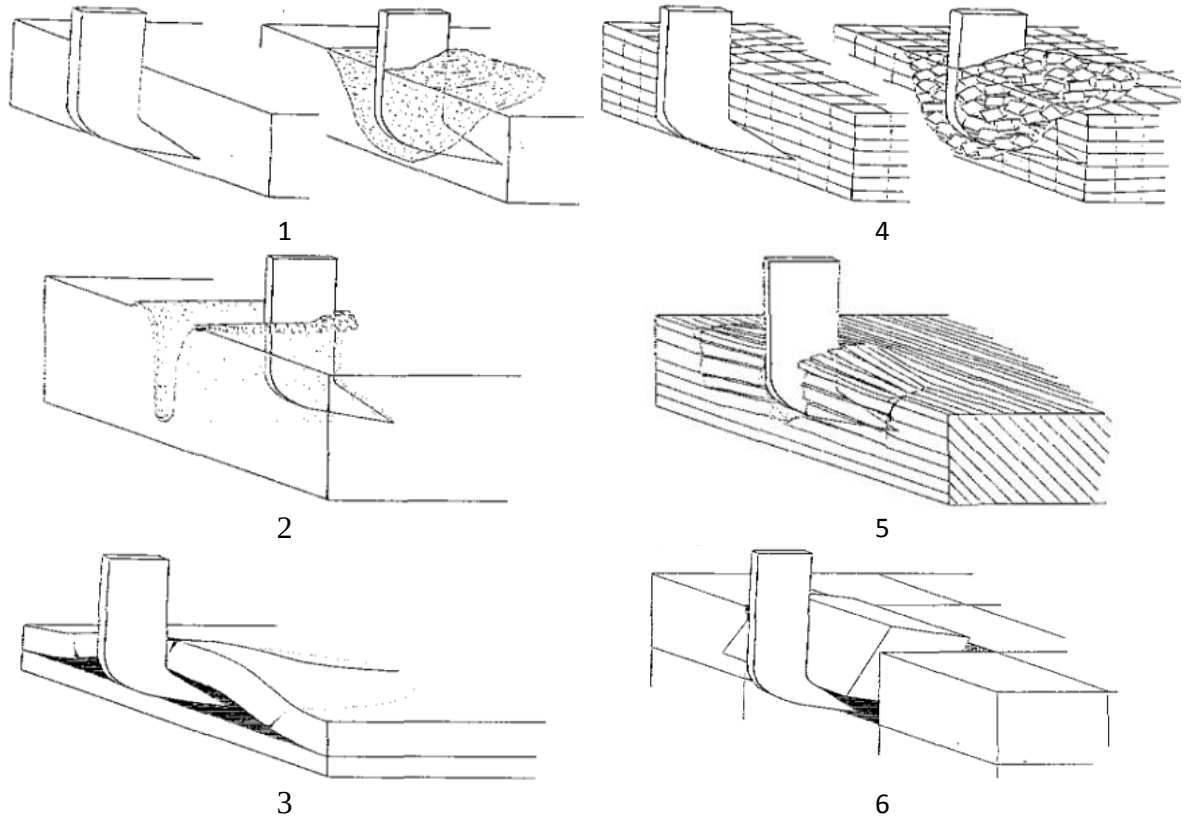
Postupak rijanja započinje penetracijom alata, kada se vrh rijača spušta i prodire u stijensku podlogu pomoću sile iz hidrauličkog cilindra. Kada koncentracija naprezanja uzrokovana inicijalnim prodorom rijača prelazi tlačnu čvrstoću stijene, dolazi do posmičnog lomljenja stijene, a proces je detaljno opisan u prethodnom poglavlju. Potom se dozer počinje kretati prema naprijed, a penetrirani rijač uzrokuje drobljenje stijene vlačnim naprezanjem.

Vrsta mehanizma koji prevladava u procesu rijanja stijenske mase ovisi prvenstveno o vrsti i značajkama stijene. U slučaju kompaktnijih stijenskih masa lomljenje se odvija zbog svladavanja kohezivnih sila koje prirodno djeluju između strukturnih blokova stijene. U slučaju prirodno diskontinuirane stijenske mase koristi se širenje postojećih pukotina za njeno lakše lomljenje.

MacGregor (1998) definira šest osnovnih mehanizama rijanja u stijenskoj masi, kako je prikazano na slici 4.18 i slijedi u nastavku:

a) oranje (engl. *Ploughing*) – izvodi se u vrlo trošnoj stijenskoj masi s ciljem dezintegracije prirodne strukture
b) drobljenje (engl. *Crushing*) – u gustoj strukturi, bez pukotina, izvodi se uska trasa uz istiskivanje male količine stijenskog materijala
c) razdvajanje i savijanje (engl. *Splitting and Flexing*) – u horizontalno uslojenoj stijenskoj masi pločasti komadi stijene se podižu rijačem, uz lomljenje vučenjem, savijanjem i smicanjem.
d) popušatnje (engl. *Loosening*) – izrazito raspucana stijenska masa (razmak pukotina 0,1 do 0,3 m) lako se drobi i dezintegrira.
e) kidanje (engl. *Tearing*) – u slučaju nagnute slojevitosti stijenske mase dolazi do savijanja i posmičnog kidanja dijelova stijene, lateralnim vučenjem rijača

f) vađenje blokova (engl. *Prying out*) – u slabije raspucanoj stijenskoj masi lateralnim vučenjem rijača vade se blokovi stijene, čiji su oblik i veličina definirani plohama diskontinuiteta.

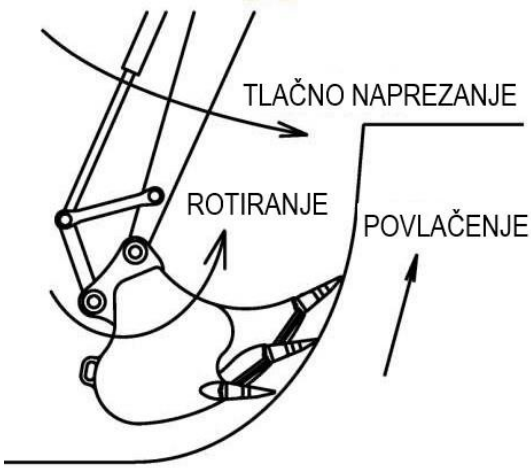


Slika 4.18. *Mehanizmi rijanja u stijenskoj masi: 1) Oranje; 2) Drobljenje; 3) Razdvajanje i savijanje; 4) Popuštanje; 5) Kidanje; 6) Vađenje blokova (MacGregor, 1998)*

Rijanje se može izvoditi i priključivanjem rijača na ruku hidrauličnog bagera, umjesto lopate. U početku taj rijač bio je samo čelični radni element koji je služio za čišćenje nestabilnih blokova stijene sa zidova i kosina nakon miniranja. Ti radni elementi u obliku zuba bili su različitih oblika i dimenzija, s ciljem što efikasnijeg izdvajanja blokova stijene iz stijenske mase. Kasnije je počelo njihovo korištenje u sedimentnim stijenama za otkopavanje površinskih slojeva, bez utjecaja na podinske slojeve. Vrh rijača smješta se u pukotinu te se uz pomoć hidraulike na bagerskoj ruci vrši izvrtanje komada stijene. U nekim slučajevima teško je tražiti pukotine kako bi ih se zahvatilo rijačem pa se često otkopavanje izvodi struganjem i povlačenjem oslabljenih komada stijene s trošne stijenske površine.

U novije vrijeme, neki proizvođači opreme za otkopavanje stijenske mase krenuli su s razvojem bagerskih rijača te su učinkovitost povećali spajanjem više zuba (u pravilu 3) na jedan radni element. Zubi su spojeni na način da lome stijensku masu po sekvencijalnom redoslijedu, što

znači da dva zuba nikad nisu međusobno poravnana pa se maksimalna sila s bagerskog hidrauličnog cilindra prenosi na svaki zub zasebno. Tako je rotiranjem rijača svakom sljedećem zubu olakšano rijanje, s obzirom na to da je prethodni zub već djelomično razdrobio stijenu. Kao rezultat nastaje rov relativno ravnog dna, budući da svi zubi rijača leže na neprekinutom radijusu s centrom rotacije koji je u blizini hidrauličnog bagera. Otkopavanje bagerskim rijačem vrši se rotiranjem i povlačenjem alata od dolje prema gore (slika 4.19) ili od gore prema dolje.



Slika 4.19. *Dubinski način otkopavanja rijačem s više zubi na hidrauličnom bageru (www.digrock.com)*

Prema dosadašnjim istraživanjima različitih autora (Franklin i sur., 1971; Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Weaver, 1975; Church, 1981; Kirsten, 1982; Abdullatif i Cruden, 1983; Smith, 1986; Singh i sur., 1987; Karpuz, 1990; MacGregor, 1994; Basarir i Karpuz, 2004; Tsiambaos i Saroglou, 2010; Tonnizam i sur., 2010; Moustafa, 2015; Gurocak i Yalcin, 2016), velik je broj faktora koji mogu biti uključeni u analizu mogućnosti primjene rijanja kao mehanizma otkopavanja. U prvom redu tu se misli na značajke stijenske mase, ali djelomičan utjecaj imaju i uvjeti, odnosno tehnika rijanja:

a) Brzina rijanja – pravilan stupanj prijenosa i brzina uvelike utječu na produktivnost rijanja. U prvom stupnju prijenosa s brzinom od 1,5 do 3 km/h dobiva se maksimalna sila povlačenja. Pri prevelikoj brzini dolazi do proklizavanja i pretjeranog trošenja rijača.
b) Dubina rijanja – ovo je faktor koji je najzanimljiviji za ovaj rad jer direktno ovisi o značajkama stijenske mase koja se rija. Tvrdoća stijenske mase, slojevitost i stupanj razlomljenosti najvažnije su značajke stijenske mase koje utječu na dubinu rijanja. Rijanje bi trebalo izvoditi na maksimalnoj dubini koju dozvoljava izvedba rijača, no kod

pojave izražene slojevitosti bolje je rijati na djelomičnoj dubini i uklanjati materijal po prirodnim slojnim plohama.

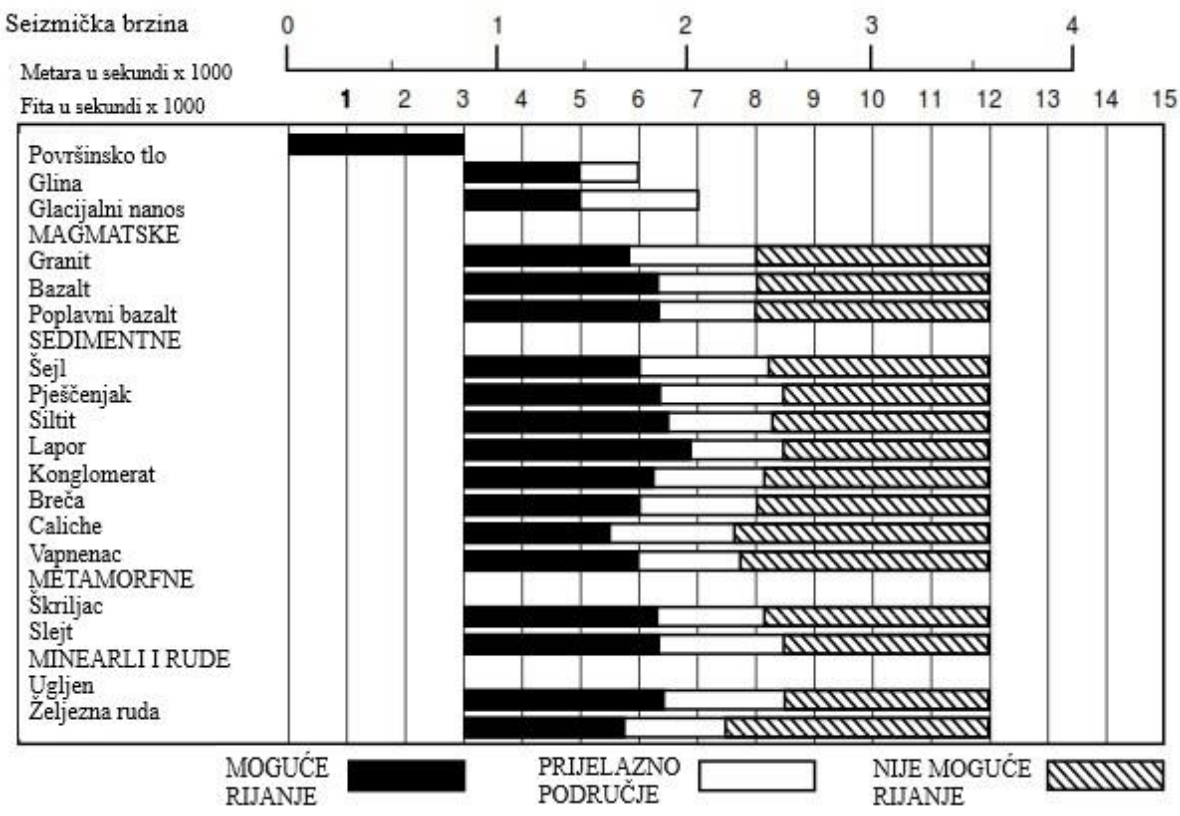
c) Razmak između prolaza (faza rijanja) – optimalan razmak između prolaza povećava produktivnost. Manji razmak rezultira manjim fragmentima otkopane stijene. Kada dođe do punog prodiranja rijača, prolazni razmak od polovice širine dozera omogućuje da se staza pomakne na materijal koji je razlomljen u prethodnom prolazu te se time poboljšava lomljenje stijenske mase u trenutnom prolazu.
d) Smjer rijanja – kod vertikalne slojevitosti i raspucanosti u stijenskoj masi, rijanje se izvodi poprijeko ili okomito na slojne plohe. Također, preferira se rijanje nizbrdo, kako bi se iskoristila prednost u težini i snazi dozera.

Mnogi autori smatraju da je brzina primarnih seizmičkih valova kroz stijensku masu dovoljan podatak za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja različitih vrsta stijena. Tako vodeći proizvođači strojeva i opreme Caterpillar Inc. i Komatsu već od 1980-ih godina daju dijagrame za procjenu mogućnosti rijanja stijenske mase dozerom, koja se temelji na brzini seizmičkih valova dobivenih terenskim istraživanjima u različitim vrstama stijena. Primjer takvog dijagrama prikazan je na slici 4.20, a dolazi iz najnovijeg priručnika Caterpillar Inc. (2015). Važno je napomenuti da kod dosadašnjih istraživanja nisu korišteni podaci o brzinama transverzalnih ili posmičnih S-valova za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja različitih vrsta stijena, za koje je dokazano da su za interpretaciju kvalitetniji od P-valova i na njih podzemna voda nema utjecaj. Tu je uviđeno kako postoji mogućnost poboljšanja metoda temeljenih na brzini seizmičkih valova.

Rijanjem se stijenska masa otkopava u građevinarstvu (trase prometnica, građevinske jame) i u rudarstvu kod eksploatacije mineralnih sirovina. Rijanje građevinskim dozerom i manjim bagerskim rijačem moguće je u trošnim, mekanijim stijenama male čvrstoće, s vrlo postojanim i otvorenim pukotinama na malom razmaku. Rijanje rudarskim dozerima, koji su vrlo velikih masa i snaga, te velikim bagerskim rijačima moguće je i u djelomično trošnim, srednje tvrdim do tvrdim stijenama srednje čvrstoće, s brzinama P-valova koje ne prelaze 2500 m/s. Naravno, i ovdje je poželjno da pukotine budu što postojanije, na što manjem razmaku (ne više od 3 m) s već postojećim zijevom.

U čvršćim i kompaktnijim stijenama rijanje je skuplje od miniranja, no u mekanijim, raspucanim i trošnim stijenama rijanje može imati prednost pred miniranjem. Rijanje svoje prednosti temelji upravo na nedostacima miniranja (tablica 4.3). Poznato je da se miniranjem utječe na okoliš (buka, podrhtavanje tla, razbacivanje odminiranih dijelova stijene, zagađenje

zraka), a zaštita okoliša u novije doba postala je vrlo važna. U mnogim državama svijeta usvojene su različite regulative, pravilnici i zakonske odredbe vezane za otkopavanje stijenske mase metodom miniranja. Istovremeno došlo je do razvoja metode rijanja i dozera velike snage, a s obzirom na to da rijanje nije u tolikoj mjeri štetno za okoliš kao miniranje, ono je postalo ozbiljan konkurent metodi otkopavanja stijene metodom bušenja i miniranja pa čak i u cijeni, a moguće ga je primjenjivati u urbanim sredinama. Uz već navedene prednosti, rijanjem je moguće vršiti kontrolu kvalitete jer nema miješanja ruda različitih kvaliteta.



Slika 4.20. *Dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase metodom rijanja dozerom Caterpillar D8R (Caterpillar, 2015)*

Nedostatak rijanja (kao i kopanja) pred miniranjem je nemogućnost kontrole fragmentacije otkopane stijenske mase. Razlog tome vjerojatno je u činjenici što ova tehnologija otkopavanja nema prevelike mogućnosti dodatnog usitnjavanja komada stijene, već je fragmentacija otkopanog materijala uglavnom određena prirodnom fragmentacijom stijenske mase, koju diktiraju značajke diskontinuiteta (*NJS*, *DS*, *JP*, *JO*, itd.).

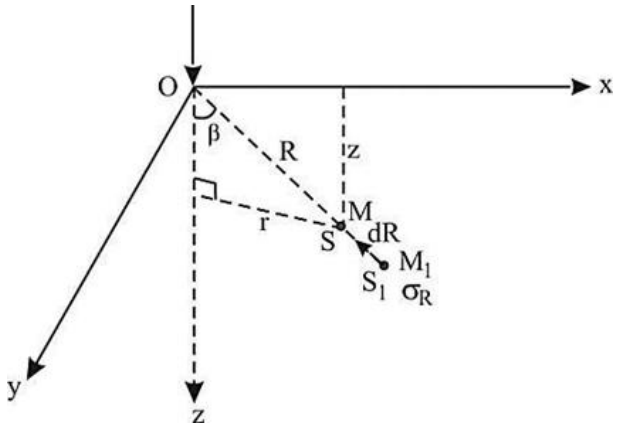
Tablica 4.3. *Prednosti otkopavanja stijenske mase rijanjem u odnosu na miniranje (Kramadibrata, 1996)*

PREDNOST	OPIS
Smanjenje vibracija tla	Prilikom miniranja javljaju se znatne vibracije tla koje su izrazito opasne u blizini ili u urbanim sredinama, jer vibracije uzrokuju pukotine u tlu i na građevinskim konstrukcijama.
Sigurnost	Prilikom miniranja postoji mogućnost da dođe do razbacivanja fragmenata odminirane stijenske mase u radijusu i od nekoliko stotina metara, što nije slučaj kod rijanja. Zato se otkopavanjem stijenske mase metodom rijanja povećava sigurnost za ljudske živote i smanjuje moguća materijalna šteta.
Smanjenje buke i zaprašenosti	Bušenjem minskih bušotina i aktiviranjem eksplozivnih naboja u njima razvija se buka (zračni udarni val) i širenje kamene prašine.
Stabilnost kosina	Seizmički valovi nastali miniranjem uzrokuju dinamička naprezanja u stijenskim kosinama, što može rezultirati nastankom pukotina i formiranjem kliznih ploha. S druge strane, rijanje je puno sigurnije za održavane stabilnosti kosina.
Kontrola kvalitete	Kod miniranja postoji mogućnost miješanja rude različite kvalitete, dok kod rijanja operater u dozeru lako može uočiti razliku između rude ili kvalitetne stijenske mase od jalovine ili stijene lošije kvalitete.
Zaštita okoliša	Rijanjem se smanjuju vibracije tla, buka i zaprašenost pa samim time i utjecaj te metode otkopavanja stijenske mase na okoliš.

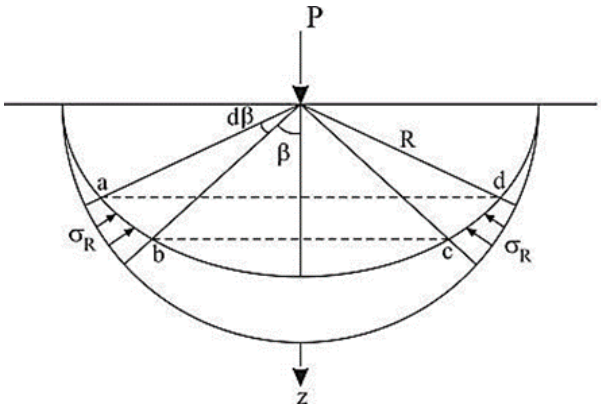
4.3.3. Razbijanje

Razbijanje (engl. *Breaking*) stijenske mase kao metode otkopavanja u rudarstvu i građevinarstvu počelo se intenzivnije koristiti s razvojem hidrauličnih sustava prijenosa energije na strojevima, primjenom hidrauličnih udarnih čekića. Iako se u kamenolomima i na gradilištima najčešće može vidjeti primjena hidrauličnog čekića za usitnjavanje izvangabaritnih blokova, oni nude alternativu miniranju jer omogućuju otkopavanje čvrste i vrlo čvrste stijenske mase na lokacijama gdje je miniranje nepoželjno, budući da se primjenom hidrauličnih čekića smanjuje podrhtavanje tla i zagađenje zraka te nema razbacivanja odminiranih dijelova stijene. Dok kod otkopavanja čvršće stijenske mase lopatom bager mora biti velike mase i snage kako bi mogao vršiti kopanje, hidraulični čekić ne zahtijeva veliku potisnu silu (masu bagera) za razrušavanje stijene, čime se povećava fleksibilnost i pokretljivost bagera i otvara mogućnost selektivnog otkopavanja uz iskorištavanje defekata u stijenskoj masi za povećanje učinkovitosti.

Mehanika loma stijene hidrauličnim čekićem može se objasniti primjenom Bousinessqovog matematičkog pristupa. Ako je uvjet $\sigma_n > [\sigma_k]$ zadovoljen, onda će se stijenski blok slomiti. Ispitivanjem bilo koje točke *M* u polju naprezanja koje je nastalo kao rezultat neke vanjske sile, može se odrediti vrijednost naprezanja (slike 4.21 i 4.22).



Slika 4.21. *Determinacija naprezanja u točki M nastalog vanjskom silom P, prema Bousinessqu (Nguyen i Bui, 2015)*



Slika 4.22. *Stabilno stanje naprezanja (Nguyen i Bui, 2015)*

Normalna naprezanja (σ_x je tlačno naprezanje, σ_y je vlačno naprezanje, σ_z je posmično naprezanje) računaju se pomoću izraza 4.25, 4.26 i 4.27. Tangencijalna naprezanja pak se određuju izrazima 4.28, 4.29 i 4.30.

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5} \tag{4.25}$$

$$\sigma_x = \frac{3P}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{z \cdot x^2}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \cdot \left[\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} \tag{4.26}$$

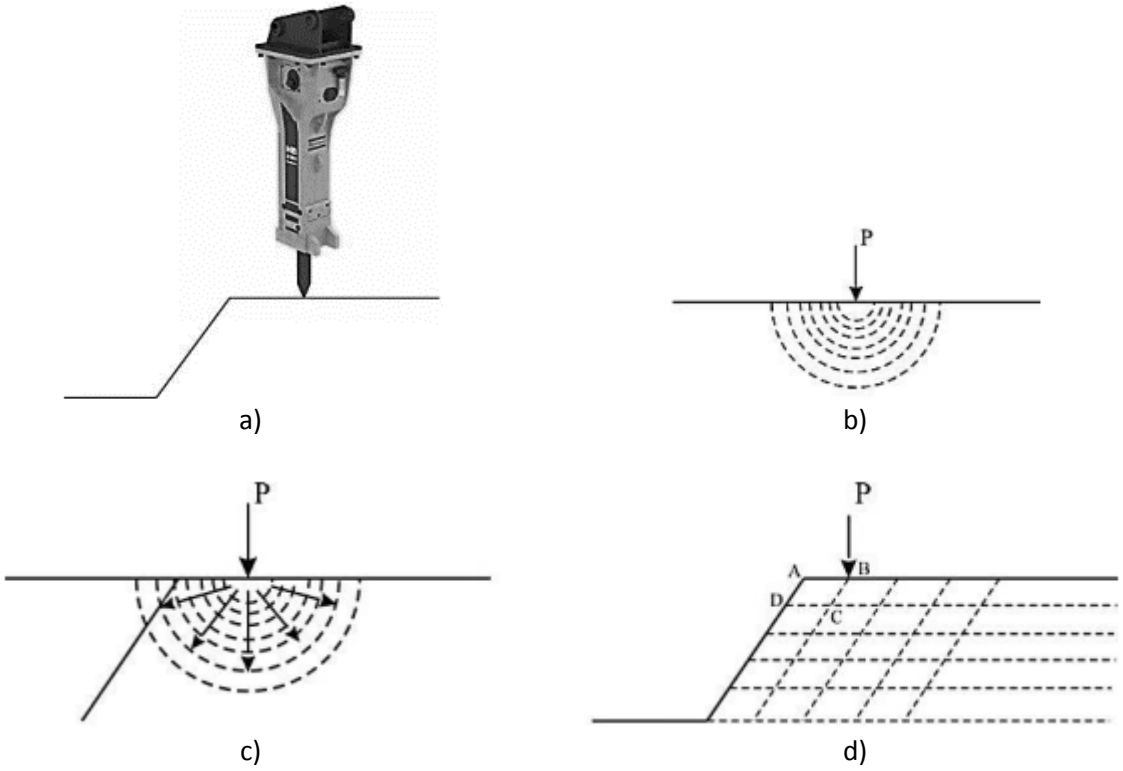
$$\sigma_y = \frac{3P}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{z \cdot y^2}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \cdot \left[\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} \tag{4.27}$$

$$\tau_{zy} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{yz^2}{R^5} \tag{4.28}$$

$$\tau_{zx} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{xz^2}{R^5} \tag{4.29}$$

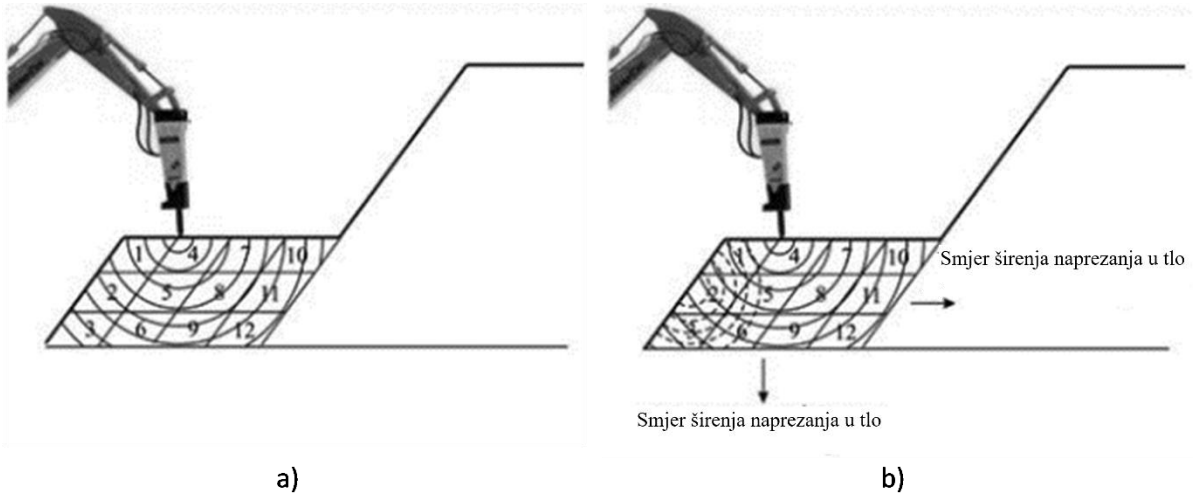
$$\tau_{xy} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \left[\frac{xyz}{R^5} - \frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \tag{4.30}$$

Udaranjem hidrauličnog čekića s ciljem loma i drobljenja prirodne stijenske mase nastaju naprezanja u njoj koja rezultiraju lomom stijene. Proces počinje djelovanjem hidrauličnog čekića na stijenu (slika 4.23.a), pri čemu dolazi do pojave dodatnih naprezanja u stijeni, kao rezultat širenja seizmičkih valova (slika 4.23.b). Slika 4.23.c prikazuje smjer širenja kompresijskih valova, čiji se intenzitet smanjuje s radijalnim povećanjem udaljenosti od mjesta djelovanja čekića. Ako se vanjsko djelovanje *P* koje djeluje u točki *B* bloka *ABCD* podijeli na cijeli blok, onda će najslabiji utjecaj imati na točku *D,* budući da je dužina *BD* najveći radijus u bloku (slika 4.23.d).



Slika 4.23. *Djelovanje hidrauličnog udarnog čekića na stijenu (Nguyen i Bui, 2015)*

Detaljniji prikaz širenja seizmičkih valova i njihovog djelovanja na stijenu prikazan je na slici 4.24. Prvim udarcem čekića počinje vanjsko djelovanje na stijenu određene čvrstoće, generiraju se kompresijski valovi koji prožimaju stijenu i putuju do prekida (pukotina, slobodnih površina) u stijenskoj masi (slika 4.24.a), gdje će se reflektirati. Međutim, nastala naprezanja od samo jednog udarca često su puno manja od čvrstoće stijene pa ako se prestane udarati čekićem, zahvaljujući načelima elastičnosti, stijena se može djelomično ili potpuno vratiti u izvorni oblik ili izvorno stanje, ovisno o mehaničkim svojstvima. No, ako se nastavi udarati čekićem, nastat će novi kompresijski valovi koji će se sudarati s reflektiranim valovima od prethodnih udaraca (slika 4.24.b), što je svakako pozitivno za proces otkopavanja stijenske mase.



Slika 4.24. *Nastanak reflektiranih valova i naprezanja kod rada hidrauličnog udarnog čekića na otkopavanju stijenske mase (Nguyen i Bui, 2015)*

Za potpuno razumijevanje djelovanja hidrauličnog čekića na stijenu, poželjno je poznavati vrste i način rada hidrauličkih čekića. Prema načinu na koji se ostvaruje udarno gibanje klipa unutar čekića, postoje tri tipa hidrauličnih čekića:

a) pomoću hidrauličnog ulja
b) pomoću plina
c) kombinacijom plina i hidrauličnog ulja.

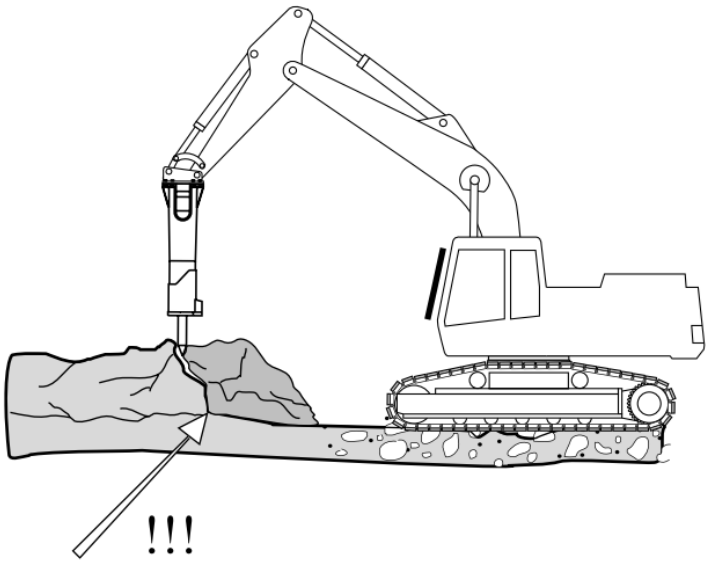
Svi tipovi imaju nekoliko zajedničkih komponenti, kao što su cilindar, klip i glavni razvodni ventil, koji služe za pretvaranje kinetičke energije u energiju udara. Prednji dio čekića (udarna glava) služi za spajanje radnog alata, a u stražnjem dijelu je komora s dušikom (akumulator) koji služi za sprečavanje udara tlaka na povratnom vodu.

Sam proces drobljenja stijene postiže se udaranjem klipa po radnom alatu u udarnoj glavi. Do udara dolazi djelovanjem hidrauličnog ulja ili plina pod visokim tlakom, a može i kombiniranim djelovanjem plina i ulja. Za preusmjeravanje medija pod tlakom zadužen je glavni razvodni ventil.

Odabir alata važan je čimbenik produktivnosti kod primarnog otkopavanja stijenske mase hidrauličnim čekićem. Radni alat može imati oštri vrh u obliku špice (engl. *Moil*), tupi vrh (engl. *Blunt*) ili u obliku dlijeta (engl. *Chisel*). Ako se hidraulični čekić koristi za usitnjavanje izvangabaritnih blokova, preporučuje se oštri ili tupi vrh alata. Oštri alat posebno se preporučuje u abrazivnim stijenama jer se udarna energija špice usmjerava u jednu točku, a omogućuje i kontrolu fragmentacije razbijenih komada. Tupi alat postiže najučinkovitiji prijenos udarne energije čekića na stijenu, ali kontrola fragmentacije nije moguća. Za primarno otkopavanje

stijenske mase kao najučinkovitiji pokazao se alat u obliku dlijeta (klina), jer se stijena najlakše otkopava zabijanjem dlijeta u postojeće pukotine u stijenskoj masi.

Najčešća metoda rada kod otkopavanja stijenske mase hidrauličnim čekićem izvodi se smještanjem bagera ispred/ispod etaže (slika 4.25), s obzirom na to da je rad na vrhu visokih etaža opasan zbog mogućnosti urušavanja. Visina etaže trebala bi biti 3-5 m, kako bi se cijela visina mogla otkopati u jednoj fazi otkopavanja. Preniske etaže (< 1 m) nisu pogodne za rad, a najteže područje za otkopavanje je u krajnjem donjem dijelu etaže (označeno strelicom na slici 4.25). Selektivnim otkopavanjem, koje omogućuje primjena hidrauličnog čekića, izbjegava se miješanje otkrivke i kvalitetne stijene tijekom primarnog drobljenja.



Slika 4.25. *Najčešća metoda otkopavanja stijenske mase hidrauličnim čekićem, s prikazom područja najvećeg ukliještenja (Sandvik Tamrock, 1999)*

Iako utjecaj tehničkih karakteristika i metodologije pirmjene hidrauličnog čekića kod uspješnosti razbijanja stijene nikako nije zanemariv, puno su utjecajnije značajke stijenske mase koja se otkopava. Jasno je da primarno otkopavanje stijenske mase hidrauličnim čekićem podrazumijeva drobljenje blokova stijene, pri čemu su tlačna čvrstoća i tvrdoća vrlo važne karakteristike intaktne stijene koja se otkopava. U ovom slučaju navedene značajke poželjno je ispitivati Schmidtovim čekićem. Objašnjenje je u činjenici da se kod takvog ispitivanja koristi udar na klip, isto kao i kod hidrauličnog čekića pa su zbog kompatibilnosti rezultati najtočniji. Još jedna značajka stijene može biti važna za predmetnu tehnologiju otkopavanja, koja do sada nije spominjana kod drugih tehnologija otkopavanja, a radi se o žilavosti. Ova značajka često utječe na učinkovitost hidrauličnog čekića pa je vrlo važno frekvenciju i energiju udara čekića prilagoditi lomnoj žilavosti stijene koja se otkopava. Frekvencija udara je broj ponavljanja

udara klipa hidrauličnog čekića u jedinici vremena. Zbog neprestanog djelovanja čekića na stijenu, ona će se slomiti kao posljedica zamora materijala stijene. Prilagođavanjem frekvencije moguće je značajno skratiti vrijeme potrebno za postizanje zamora materijala, što onda daje pozitivan efekt na učinkovitost hidrauličnih čekića, koja je općenito proporcionalna snazi čekića, a obrnuto proporcionalna tlačnoj čvrstoći stijene.

Kao tehnologija otkopavanja razbijanje se često smješta negdje između rijanja i miniranja. To znači da je razbijanjem moguće otkopavanje tvrdih, čvrstih, slabo raspucanih stijena, koje se realno ne mogu otkopavati dozerskim rijačima, a miniranje nije moguće primijeniti zbog njegovih nepovoljnih karakteristika. Dakle, primjena hidrauličnih čekića moguća je alternativa miniranju, pri čemu se smanjuje podrhtavanje tla i zagađenje zraka te nema razbacivanja komada stijene.

4.3.4. Rezanje

Primjena rezanja (engl. *Cutting*) za potrebe otkopavanja stijenske mase počela je krajem 19. stoljeća u površinskoj i podzemnoj eksploataciji ugljena i škriljevca, razvojem strojeva koji se u literaturi nazivaju strojevi s rotirajućom reznom glavom (engl. *Cutting head machines*). Prvi takav stroj imao je dvije rotirajuće glave, a svaka je na prednjem rubu imala rezne elemente (bradavice, šiljci, zubi, diskovi). Početkom 20. stoljeća razvoj strojeva s rotirajućim reznim elementima usmjeren je na punoprofilno otkopavanje, gdje se izdvajanje materijala iz stijenskog sklopa temelji na principu bušenja. Namjena takvih strojeva prvotno je bila za izradu pripremnih hodnika u rudnicima, a kasnije je ista tehnologija iskorištena za razvoj strojeva („krtica“ ili tunelar) za punoprofilni iskop tunela (engl. *Tunnel Boring Machine*, TBM). Radni element tunelara rotira prilikom rada, uz hidraulično potiskivanje u čelo tunela ostvarujući potrebni pritisak za razrušavanje, odnosno rezanje i glodanje stijene. Osnovne prednosti izvedbe tunela takvim strojevima, u odnosu na klasičnu izvedbu bušačko-minerskim radovima, jesu mogućnost izrade tunela ispod gradskih područja gdje je podrhtavanje tla nepoželjno, veća učinkovitost i kontinuiran način rada. Istovremeno uz razvoj tunelara razvijani su i strojevi na daljinsko upravljanje, za primjenu kod punoprofilnog otkopavanja u podzemnim kopovima.

Strojevi s rotirajućom reznom glavom, koja je centralno smještena na hidraulično pokretanoj konzoli s prednje strane stroja, konstruirani su za potrebe sukcesivnog otkopavanja. Takvi strojevi dijele se na dva osnovna tipa: one s longitudinalno rotirajućom glavom koja se vrti paralelno s osi konzole (slika 4.26.a) i one s transverzalno rotirajućom glavom koja se vrti okomito na os konzole (slika 4.26.b).

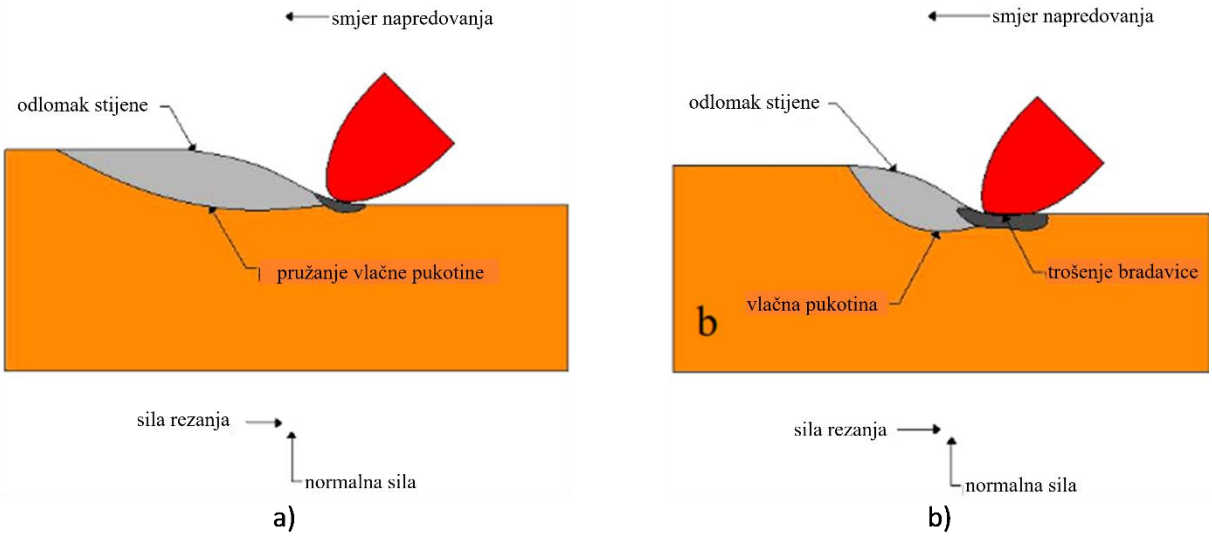
Slika 4.26. *Tipovi rotirajuće glave: a) longitudinalna; b) transverzalna (Sandvik Tamrock, 1999)*

Krajem 20. stoljeća pojavili su se strojevi za kontinuirani iskop mineralne sirovine na površinskim kopovima. Princip otkopavanja temeljio se na sličnoj tehnici koju su koristili već spomenuti strojevi s rotirajućim bubnjem za glodanje, samo što je kod ovih površinskih strojeva bubanj smješten centralno ispod stroja, a ne na konzolnoj ruci ispred stroja. Rotacijom bubnja, osim primarnog otkopavanja stijenske mase, vrši se i usitnjavanje na granulaciju prikladnu za transport gumenim trakama. Posljednjih godina sve je veća sposobnost strojeva za učinkovito rezanje i iskop tvrde i čvrste stijene, te imaju odličan potencijal za sve masovniju primjenu.

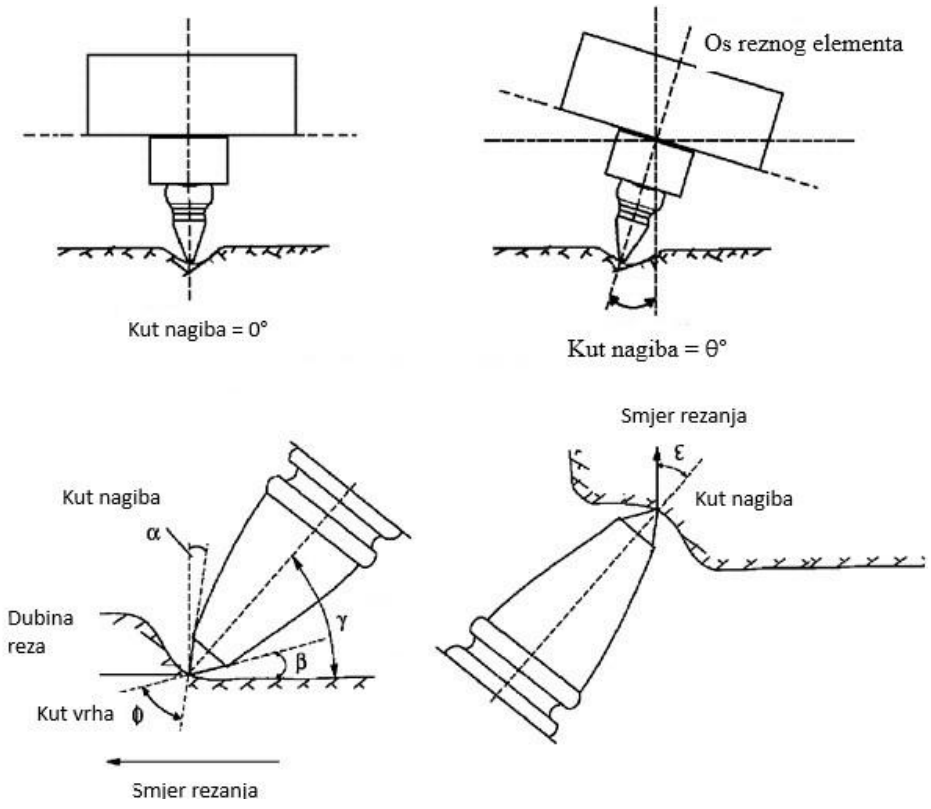
Osnovna pretpostavka otkopavanja stijene rezanjem je savladavanje intergranularnih veza između zrna intaktne stijene i u konačnici dezintegracija stijene. Da bi do toga došlo, potrebno je unijeti dodatna naprezanja u stijenski medij preko reznih elemenata s ciljem svladavanja čvrstoće stijene i nastanka pukotina i odlomaka. Rezni elementi mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe, iako je mehanizam loma za obje grupe alata zapravo nastanak vlačne pukotine:

a) konusi, bradavice i šiljci, koji se vuku po površini stijene s ciljem rezanja, struganja i glodanja stijene, uz primjenu sile u smjeru koji je uglavnom paralelan s površinom stijene određenoj dubini penetracije (slika 4.27.a)
b) diskovi, koji ulaze (urezuju se) u stijenu i lome ju primjenom sile čija je glavna komponenta okomita na površinu stijene.

Kod oštrih bradavica osnovna komponenta sile djeluje u smjeru kretanja i naziva se vučna sila. Obično je normalna sila ili potisna sila na stijensku površinu manja od vučne sile. No, kada bradavica postane tupa, potisna sila naglo raste i mijenja se djelovanje bradavice na stijenu (slika 4.27.b). Sile koje djeluju na alat stalno se mijenjaju za vrijeme rezanja, uslijed usitnjavanja i prirodne krtosti stijene. Kako spomenute sile ne bi dovodile do oštećenja stroja s rotirajućom reznom glavom, konusni elementi na glavu moraju biti pričvršćeni pod određenim kutom nagiba (slika 4.28).



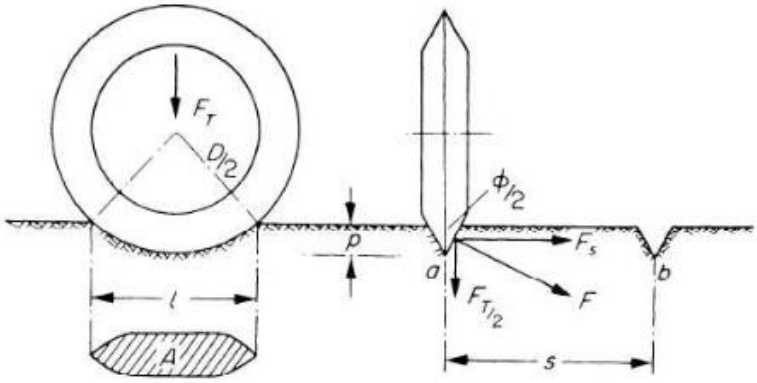
Slika 4.27. *Glodanje stijene bradavičastim alatom: a) oštra bradavica; b) tupa bradavica (Ramenzahzadeh i Hood, 2010)*



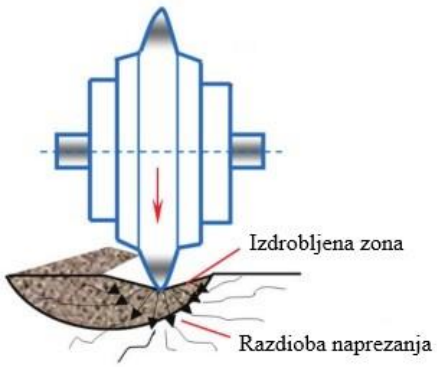
Slika 4.28. *Utjecaj tehničkih parametara na učinkovitost strojeva s rotirajućom reznom glavom (Bilgin i sur., 2006)*

U drugom slučaju mogu se koristiti alati koji drobe stijenu samo potisnom silom, na način kako je to prikazano na slici 4.15, a takav princip koristi se kod primjene rotirajućih diskova kao

reznih elemenata. Na slici 4.29 vidljivo je kako disk koji se rotira na ležaju izaziva normalno i posmično naprezanje na površinu stijene. Tlačne sile djeluju na glavu za rezanje i guraju disk u stijenu, stvarajući naprezanja koja uzrokuju lokalno oštećenje stijene (slika 4.30).

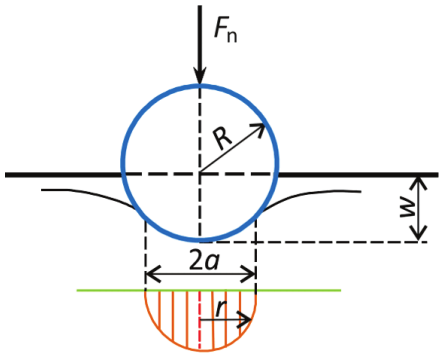


Slika 4.29. *Model rezanja stijene diskom (Roxborough i Philips, 1975)*



Slika 4.30. *Proces loma stijene kao rezultat djelovanja diska (Lida Zhu i sur., 2016)*

Nastalo naprezanje stijene u vezi je s oblikom vrha diska. Ako je na primjer vrh sferičnog oblika (slika 4.31) pa se radijalno naprezanje izračunava pomoću izraza 4.31 (Wei, 2013), u kojem je *G* modul posmika, *v* je Poissonov koeficijent, *R* je radijus kružnice, a *r* zona loma. Maksimalno radijalno naprezanje može se izračunati pomoću izraza 4.32.

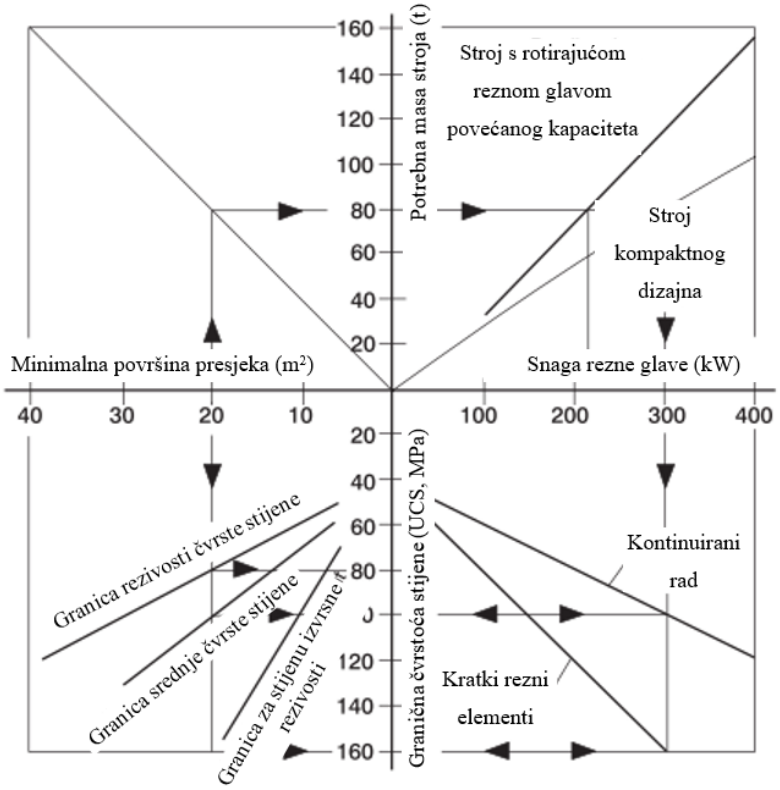


Slika 4.31. *Distribucija naprezanja u stijeni ispod diska s vrha sferičnog oblika (Lida Zhu i sur., 2016)*

$$p(r) = \frac{4G\sqrt{a^2 - r^2}}{\pi(1-\nu)R} \tag{4.31}$$

$$p_{max} = \frac{3F_n}{2\pi a^2} \tag{4.32}$$

Mogućnost primjene i učinkovitost strojeva s rotirajućim reznim elementima na poslovima otkopavanja stijenske mase rezanjem najčešće se dovodi u vezu s čvrstoćom intaktne stijene. Sandvik Tamrock Incorporation (1999) u svojem priručniku za otkopavanje stijenske mase daje dijagram za odabir stroja s rotirajućom glavom. Pomoću tog indikativnog dijagrama (slika 4.32), na temelju veličine *UCS*, može se odabrati masa i snaga potrebnog stroja te procijeniti učinkovitost stroja odabranih performansi.



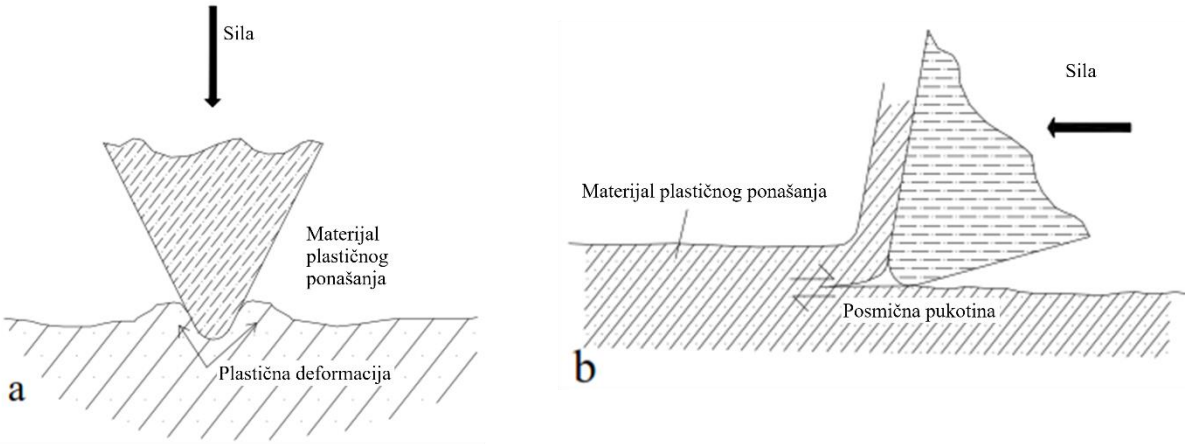
Slika 4.32. *Indikativni dijagram za odabir strojeva s rotirajućom glavom (Sandvik Tamrock, 1999)*

Istraživanja (Bilgin i sur., 2006) su pokazala kako je *UCS* stijene u najboljoj vezi s performansama spomenutih strojeva. Također je primijećeno kako su posmična čvrstoća stijene, vrijednosti odskoka Schmidtova čekića, statički i dinamički moduli isto vrlo važne značajke stijene koje utječu na primjenjivost i učinkovitost strojeva s rotirajućom reznim elementima. Međutim, vidljivo je da su ovdje navedene samo značajke intaktne stijene, bez uzimanja u obzir efekta diskontinuiranosti stijenske mase. Zato Bilgin i sur. (2002) uvode

indeks rezivosti stijenske mase *RMCI* (engl. *Rock Mass Cuttability Index*) [MPa]. *RMCI* izračunava se pomoću izraza 4.33, a ovisi o veličini σ_{ci} i *RQD*.

$$RMCI = \sigma_{ci} \cdot (RQD/100)^{2/3} \tag{4.33}$$

Nedostatak tehnologije otkopavanja stijene rezanjem je nemogućnost primjene u materijalima plastičnog ponašanja. Tlačnim djelovanjem na takav materijal dolazi samo do plastičnih deformacija, bez nastanka pukotina (slika 4.33.a). Svojstvo materijala koje određuje plastičnost je žilavost, odnosno krhkost. Plastično ponašanje materijala je potpuna suprotnost krhkom ponašanju materijala, jer će se plastični materijal pod djelovanjem opterećenja deformirati i neće doći do loma. Utjecaj ovog nedostatka moguće je djelomično umanjiti djelovanjem posmične sile, budući da su plastični materijali osjetljivi na posmično naprezanje (slika 4.33.b). Povećana abrazivnost stijene ima značajan negativan utjecaj na ekonomičnost primjene tehnologije rezanja pri otkopavanju, s obzirom na ubrzano trošenje reznog alata.



Slika 4.33. *Rezanje plastičnog materijala: a) tlačnom silom; b) posmičnom silom (Ramenzahzadeh i Hood, 2010)*

S druge strane, prednost tehnologije rezanja pri otkopavanju je moguća primjena i u kvalitetnijim stijenama, srednje tvrdim do tvrdim, srednje čvrstim do čvrstim. Definiranjem tehničkih karakteristika (veličina tlačne i vlačne sile, vrsta i oblik reznog alata, dubina i kut penetracije itd.) pri rezanju moguće je kontrolirati fragmentaciju otkopanog materijala, kako bi bio prikladan za transport i oplemenjivačke postupke. Na lokacijama s nepoželjnim negativnim utjecajem vibracija na okoliš, u odnosu na klasičnu tehnologiju otkopavanja bušačko-minerskim radovima, prednost ima predmetna tehnologija i mehanizam otkopavanja. Često se tuneli izvode ispod gradskih područja (npr. podzemna željeznica), gdje je podrhtavanje tla vrlo nepoželjno.

4.4. Ovisnost primjenjivosti tehnologija otkopavanja o značajkama stijene

Opisane tehnologije otkopavanja stijenske mase u nastavku su direktno povezane sa značajkama stijenske mase (poglavlje 2) koje utječu na njihovu primjenu. Povezivanjem saznanja iz prethodnih istraživanja (poglavlje 3) s karakteristikama tehnologija otkopavanja nastala je tablica 4.4, koja prikazuje kako su za opis i klasifikaciju stijenske mase u svrhu otkopavanja važne značajke intaktnog materijala (npr. čvrstoća i tvrdoća intaktne stijene), ali i strukturne značajke stijenske mase (npr. razmak pukotina i njihova orijentacija).

Tablica 4.4. *Analiza utjecaja različitih značajki stijenske mase na tehnologije otkopavanja*

Tehnologija otkopavanja		Značajke intaktne stijene				Značajke strukturnog sklopa stijenske mase					
		UCS	Hd	FT	Ab	DS	JO	JP	JS	RMW	V_P
Miniranje		+	-	-	-	+	+	-	+	-	-
Mehaničko otkopavanje	Kopanje	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-
	Rijanje	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	Razbijanje	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-
	Rezanje	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Ukupno tehnologija koje su ovisne o značajki stijenske mase		5	4	2	2	5	4	2	2	1	1

5. ISTRAŽIVANJA PRIMJENJIVOSTI POVRŠINSKIH TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA STIJENSKE MASE

5.1. Uvod

U prethodnim istraživanjima (poglavlje 3) prikazane su različite postojeće klasifikacije za procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju, a većina tih klasifikacijskih metoda kao ulazne podatke traži kombinaciju rezultata geološkog istraživanja, istražnog bušenja i laboratorijskog ispitivanja intaktnih uzoraka stijene (Kirsten, 1982; Singh i sur., 1987; Karpuz, 1990; Basarir i Karpuz, 2004; Khamechiyan i sur., 2014). Zbog toga primjena takvih metoda može značajno produžiti vrijeme istraživanja i povećati troškove. Dugoročna i skupa istraživanja često nisu prihvatljiva investitorima, pogotovo pri manjim građevinskim iskopima. Metode koje koriste brzine seizmičkih valova za procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju (Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Church, 1981; Caterpillar, 2015) su prihvatljivije jer su neinvazivne, brže i jeftinije (Setchell i sur., 2016; Soupios i Kokinou, 2016).

Mogućnost otkopavanja stijenske mase ne ovisi samo o karakteristikama intaktne stijene, već primarno o strukturnim svojstvima stijenske mase (Bieniawski, 1989). Što je više stijenska masa prožeta diskontinuitetima, lakše će se otkopavati. Diskontinuiranost je dobro poznata karakteristika stijenskih masa, pogotovo sedimentnih, a ta se značajka vrlo uspješno istražuje korištenjem seizmičkih geofizičkih metoda. Stanje raspucanosti utječe na brzine prolaska seizmičkih valova kroz stijensku masu. Seizmičke metode počele su se koristiti kod istraživanja naftnih ležišta i mogućnosti otkopavanja stijene 1920-ih (Liang i sur., 2017). Za plitka geološka istraživanja i procjenu primjenjivosti rijanja do sada je najčešće korištena plitka refrakcijska seizmika (engl. *Shallow Refraction Seismic,* SRS). Interpretacija SRS istraživanja je model ispodpovršinskih struktura, posredstvom brzina P-valova.

Međutim, primjena postojećih seizmičkih metoda i klasifikacija za procjenu podatljivosti stijena otkopavanju može dovesti do loših procjena (npr. može li se neka stijena rijati ili ne). Naime, pomna ispitivanja osnova SRS metode otkrivaju veliko ograničenje u pogledu njezine kvalitete i točnosti rezultata kod površinskih ispitivanja. Refrakcijska seizmika učinkovita je samo ako brzina valova kroz geomedij raste s dubinom. Gotovo je nemoguće otkriti sloj manje brzine ispod sloja veće brzine, posebno onaj s debljinom manjom od jedne trećine gornjeg sloja (Whiteley i Greenhalgh, 1979; Kalachand Sain i Kaila, 1996; Barton, 2006).

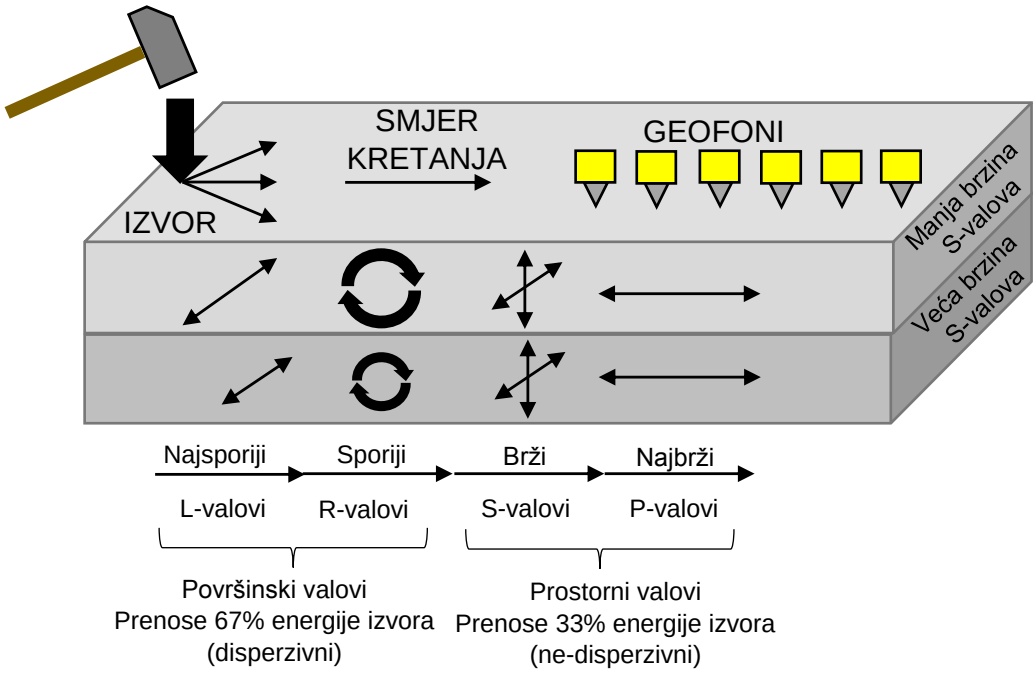
Zbog toga se u sklopu ovog rada predlaže novi pristup u primjeni seizmičkih metoda za procjenu mogućnosti površinskog otkopavanja stijenske mase, naročito kod manjih iskopa. U

vezi s time provedena su opsežna istraživanja na osam lokacija, prije izvedbe građevinskih iskopa. Odabirom lokacija obuhvaćena je sedimentna stijenska masa širokog područja stanja trošnosti i čvrstoće na području hrvatskog krša (Dalmacija, Istra i Gorski kotar) koje je dakle izgrađeno od karbonatnih stijena (slika 5.11). Istraživanja su obuhvatila parametre intaktne stijene, kao što su tlačna čvrstoća i čvrstoća opterećenjem u jednoj točki, ali i parametre stijenske mase u vidu brzina P i S-valova, geološkog indeksa čvrstoće, razmaka diskontinuiteta i indeksa kvalitete jezgre iz istražnih bušotina.

5.2. Osnovne značajke geofizičkih seizmičkih metoda

Seizmička energija širi se od seizmičkog izvora u svim smjerovima, u obliku seizmičkih valova. Četiri su glavna tipa seizmičkih valova, a svaki je okarakteriziran specifičnim gibanjem čestica (slika 5.1). U prostorne valove spadaju P i S-valovi, dok se u površinske valove ubrajaju Loveovi i Rayleghjevi valovi (L-valovi i R-valovi).

Seizmička refleksija i refrakcija osnovne su geofizičke istražne metode, koje koriste P i S-valove za seizmičku refleksiju i refrakciju kod profiliranja i tomografije. MASW (engl. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) najnovija je i u posljednje vrijeme najčešće primjenjivana seizmička tehnika za kartiranje podzemlja, uz primjenu Rayleghjevih valova za determinaciju profila S-valova (Park i sur., 1998, 1999; Foti i sur., 2000; Strelec i sur., 2017).



Slika 5.1. *Prostorni i površinski seizmički valovi generirani udarom čekića i primljeni geofonima. Smjerovi kretanja čestica u tlu prikazani su u pojednostavljeno. (Jug i sur., 2020)*

5.2.1. Prostorni seizmički valovi

Primarni ili P-valovi poznati su i kao longitudinalni ili kompresijski valovi jer kod njih čestice vibriraju u smjeru kretanja vala (slika 5.1). Oni su najbrži seizmički valovi jer čine prve ili primarne nailaske seizmičkog vala do točke opažanja ili geofona (slika 5.1). P-valovi manifestiraju se kao promjena volumena medija. Kako volumen mogu mijenjati čvrsta tijela, tekućine i plinovi, longitudinalni se valovi šire kroz medije svih agregatnih stanja. Tako se mogu kretati kroz čvrste dijelove stijenske mase, ali i kroz fluide u pukotinama. Upravo ta karakteristika veliki je nedostatak primjene P-valova kod seizmičkih istraživanja. V_P je veća u vodom saturiranoj stijenskoj masi u odnosu na suhu stijensku masu (Barton, 2006; Pasquet i sur., 2015). U takvom slučaju veće vrijednosti V_P ukazuju na stijensku masu bolje kvalitete i manje raspucanosti, a zapravo je riječ o utjecaju podzemne vode na V_P. Kako su pukotine u stijenskoj masi često ispunjene vodom, velika je mogućnost pogreške i krive procjene ako se za istraživanje primjenjuju P-valovi.

Sekundarni ili S-valovi poznati su i kao transverzalni ili posmični valovi jer kod njih čestice titraju poprečno na smjer kretanja vala (slika 5.1). Oni su sporiji od P-valova, zbog čega čine druge ili sekundarne nailaske do geofona (slika 5.1). S-valovi kreću se samo kroz čvrste materijale koji imaju posmičnu čvrstoću, kao što je čvrsta stijena pa na njihovu brzinu ne utječe prisutnost tekućeg medija. Zato je puno prikladnija primjena S-valova umjesto P-valova kod istraživanja stijenske mase, posebno ako postoji mogućnost da je saturirana vodom (Aki i Richards, 2009).

5.2.2. Površinski seizmički valovi

Kada se medij ne prostire homogeno i izotropno u beskonačnost u svim smjerovima, osim prostornih valova mogu se izazvati i druge vrste valova. Ti se valovi nazivaju površinski valovi jer se šire po površini zemlje (ili u neposrednoj blizini površine), bez disipacije ili širenja energije u unutrašnjost geomedija. Općenito, površinski valovi mogu nastati jedino u mediju sa slobodnom površinom.

Energiju generiranu iz vertikalnih izvora u najvećoj mjeri preuzimaju površinski valovi i to više od 2/3 energije (67 %). U odnosu na ostale vrste seizmičkih valova, generiranje i snimanje površinskih valova je najlakše. Ostale važne karakteristike površinskih valova su:

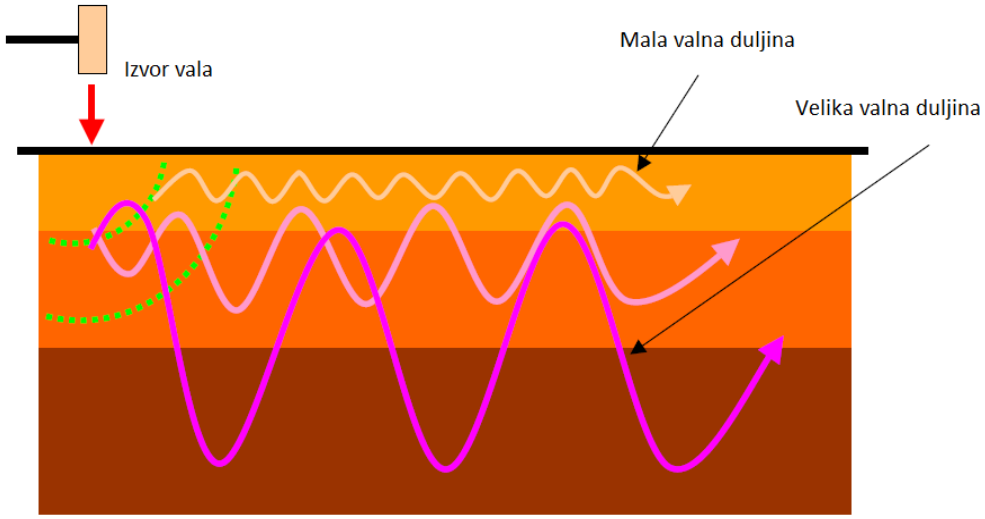
a) fazna brzina je ovisna o brzini S-valova (0,88 – 0,95 brzine S-valova)

b) razlika u valnoj duljini uzrokuje različitu dubinu promatranja.

c) povećana učinkovitost energije izvora (površinski valovi 67 %, S-valovi 26 %, P-valovi 7 %)

d) moguće je promatrati sloj niže brzine ispod sloja veće brzine.

Najvažnije svojstvo koje imaju površinski valovi naziva se disperzija. Disperzija znači da valovi različite valne duljine imaju različitu dubinu prodiranja i prema tome različitu brzinu širenja (slika 5.2). Brzina pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina. Valovi velike valne duljine (male frekvencije) šire se brže, a valovi male valne duljine (velike frekvencije) šire se sporije. Krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja. Prostorni valovi nemaju ovo svojstvo (slika 5.1).

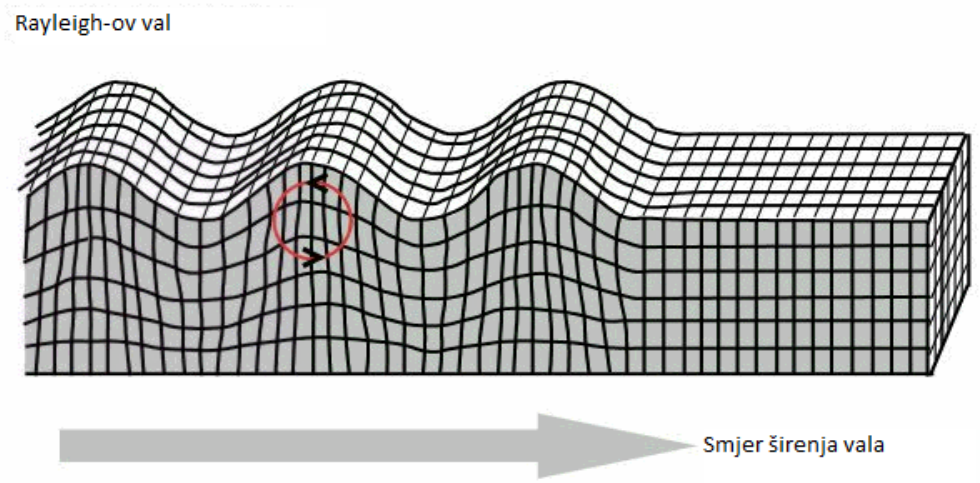


Slika 5.2. *Disperzija površinskih valova (prerađeno prema Hayashi, 2003)*

Ako se za izazivanje seizmičkih valova koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega (engl. *drop-weight*), nastaje vrsta površinskih valova koji se nazivaju Rayleighjevi valovi. Oni se često nazivaju i valjanje tla (engl. *ground roll*) zbog geometrije njihova kretanja. Kretanje Rayleighjevih valova sastoji se od longitudinalnog i transverzalnog kretanja s međusobnim odnosom u fazi. Kretanje čestica je ograničeno na vertikalnu os, koja uključuje smjer širenja vala. Tijekom prolaska vala, čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna (kada je val blizu površine). Smjer kretanja čestica po elipsi naziva se retrogradan jer je suprotan kretanju čestica na površini vode (slika 5.3).

Brzina širenja R-valova V_R, ili fazna brzina, najviše ovisi o brzini V_S posmičnih valova u mediju, a u skoro neznatnoj mjeri o brzini V_P, gustoći medija ρ i Poissonovom koeficijentu v. Prema tome, brzina širenja Rayleighjevih valova dobar je pokazatelj brzine posmičnih valova. Brzina V_R nešto je manja od V_S, a njihov odnos ovisi o v. Za v = 0,25 pretpostavlja se da V_R iznosi 0,92 V_S ili 92 % brzine posmičnih valova (Stokoe i sur., 1994), a za cijeli raspon Poissonovog

koeficijenta (0 – 0,5) taj odnos se mijenja od 0,88 do 0,95 (Aki i Richards, 2009). Upotreba Loveovih L-valova, kao druge vrste površinskih seizmičkih valova, puno je rjeđa s obzirom na mogućnost generiranja i snimanja.



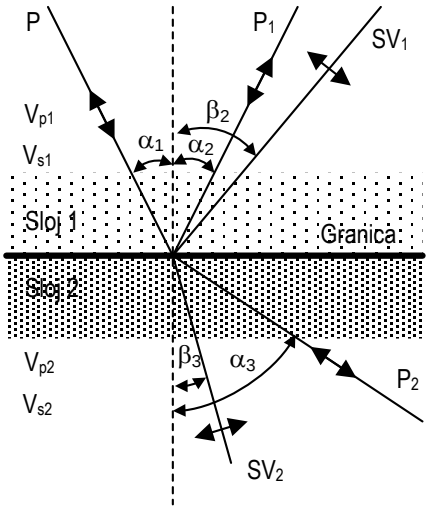
Slika 5.3. *Širenje Rayleighjevog vala (prerađeno prema Bolt, 2003)*

5.2.3. Plitka seizmička refrakcija

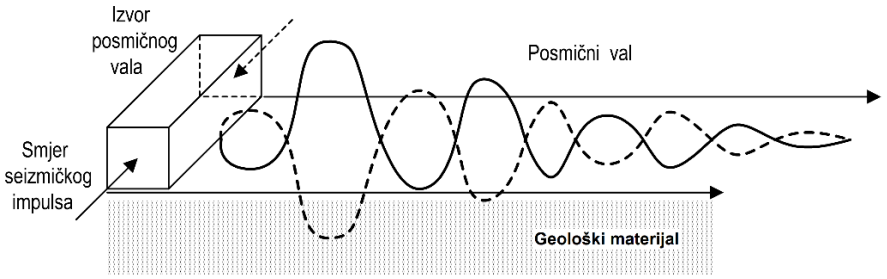
Plitka seizmička refrakcija ili SRS metoda je geofizička metoda koja omogućuje određivanje brzina elastičnih valova u uslojenom tlu kao funkcije dubine. Naime, seizmički valovi se šire od izvora koji se nalazi na površini, zatim se refraktiraju na granicama slojeva različitih seizmičkih brzina (slika 5.4) i vraćaju se na površinu do niza geofona, koji su raspoređeni na određenim razmacima duž orijentiranog pravca – refrakcijskog profila. Postoji nekoliko tipova seizmičke refrakcije, a koji će se tip primijeniti, ovisi o ciljevima istraživanja. Najčešće korišteni tip zasniva se na prvim nailascima P-valova. Međutim, mogu se analizirati i prvi nailasci S-valova. U tu se svrhu provode istraživanja generiranjem posmičnih valova s površine i mjerenjem vremena nailaska S-valova do horizontalnih geofona (slika 5.5). Detekcija nailazaka prvih poremećaja na nizu postavljenih geofona uvijek se odnosi na direktan val ili na refraktirani val. Ta činjenica usmjerava pažnju istraživanja samo na zapažanje prvih nailazaka seizmičke energije pa se odnos udaljenosti od izvora do geofona i vremena nailazaka može iskoristiti za interpretaciju dubine refraktorskih slojeva (slika 5.6).

Vremena prvih nailazaka očitavaju se sa snimljenih seizmograma. Prvi se nailasci odnose na uzdužne P ili poprečne S-valove, što već ovisi o načinu generiranja seizmičkog poremećaja. „Pikiranje“ i korespondencija vremena odgovarajućim refraktorima najosjetljiviji je korak interpretacije. Kao ogledni primjer na slici 5.7 prikazan je postupak pikiranja, slika 5.8

prikazuje graf „vrijeme – brzina“ dobiven na temelju postupka prikazanog na slici 5.7. Krajnji rezultat je 2D interpretirani profil brzina P-valova, prikazan na slici 5.9, a prikazani postupak interpretacije odnosi se na SRS istraživanja izvedena u kamenolomu Hruškovec.



Slika 5.4. *P-valovi na granici dvaju medija (Das, 1983)*

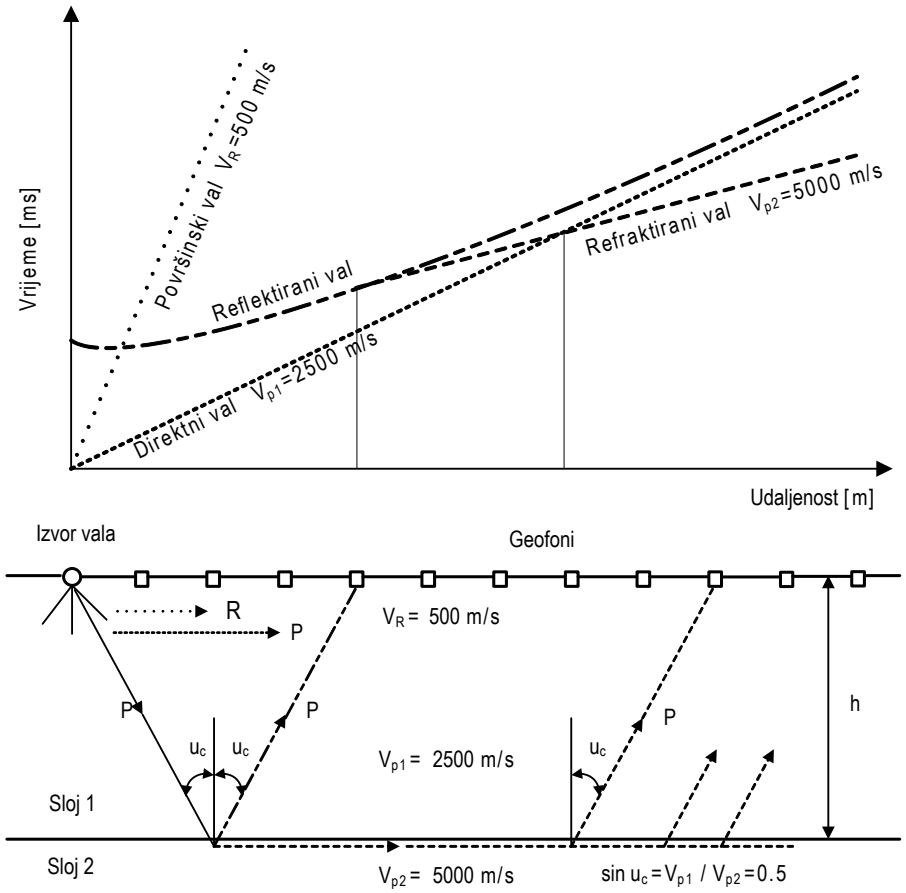


Slika 5.5. *Princip terenskog mjerenja brzina posmičnih seizmičkih valova seizmičkom refrakcijom (Gazdek, 2003)*

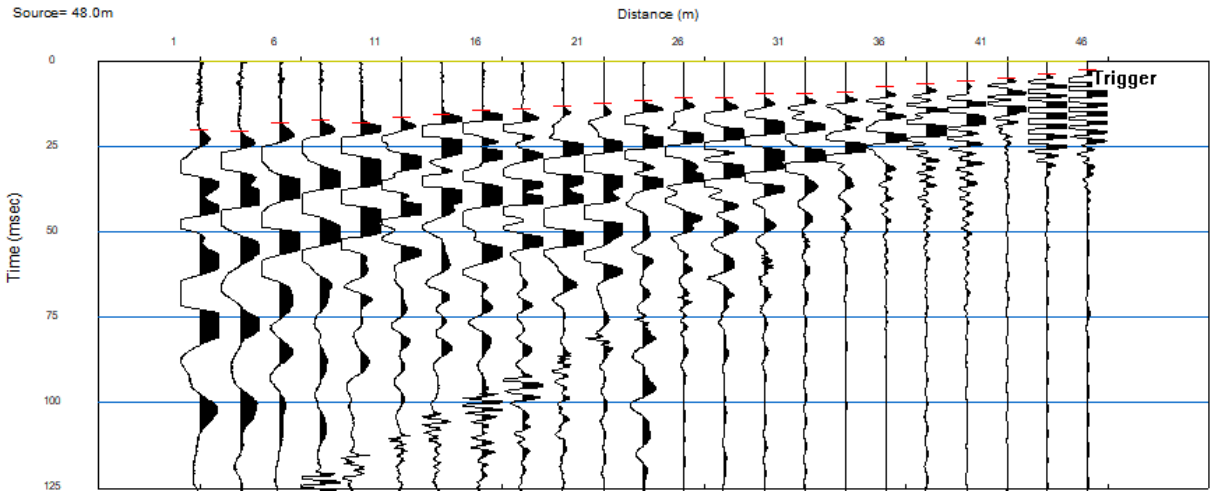
Kao rezultat istraživanja SRS metodom determinira se litologija, čvrstoća stijene, gustoća pukotina, stupanj trošenja ili metamorfoze i lokacije raspucanih zona. Primjenjiva je u području inženjerske geologije, geotehničkog inženjerstva i istraživačke geofizike (Kovačević i sur., 2013). Prethodna istraživanja iz poglavlja 3 ovog rada pokazuju kako je SRS metoda primjenjiva kod procjene mogućnosti rijanja stijenske mase prije iskopa (Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Church, 1981; MacGregor i sur., 1994; Tonnizam i sur., 2010; Moustafa 2015).

Međutim, u primijenjenoj geofizici dobro je poznato kako SRS metoda ima određena ograničenja koja mogu dovesti do pogrešaka i loših procjena. Seizmička refrakcija primjenjuje se kod istraživanja lokacija na kojima brzina P-valova raste s dubinom, odnosno lokacije na kojima geološka situacija nije kompleksna i izražena je horizontalna uslojenost. Metoda nije primjenjiva u slučaju pojave inverzije brzine (brzina P-valova pada s dubinom) ili ako su na

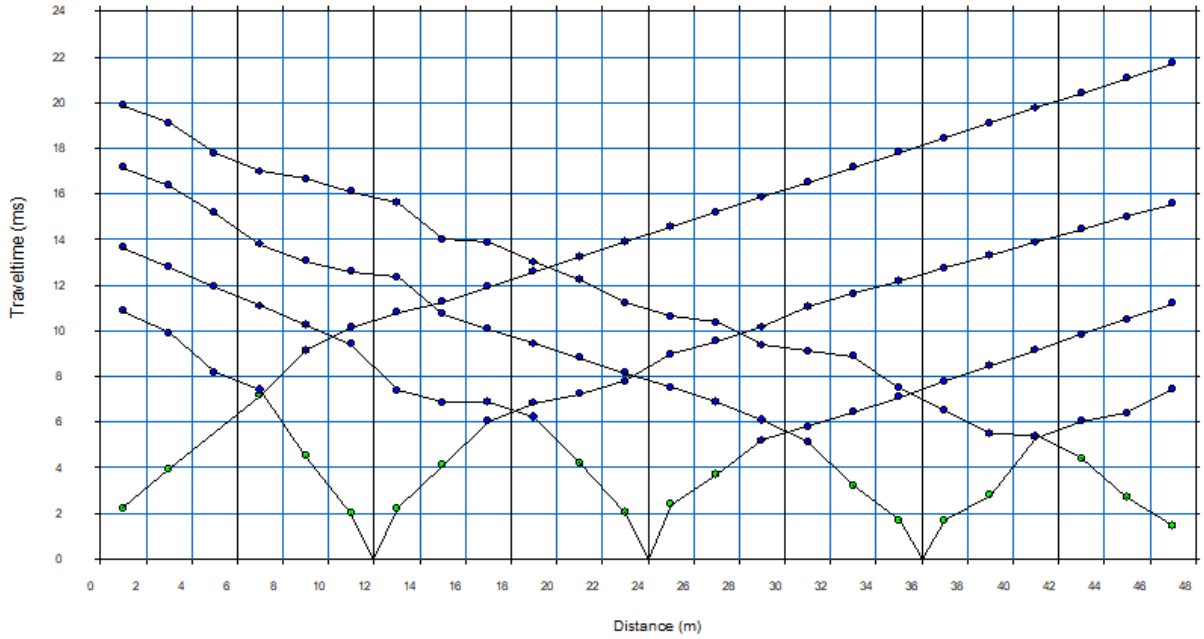
lokaciji prisutni slojevi vrlo male debljine (skriveni slojevi). Sloj manje brzine ispod sloja veće brzine neće biti prepoznat, a doći će i do pogreške u proračunu dubina.



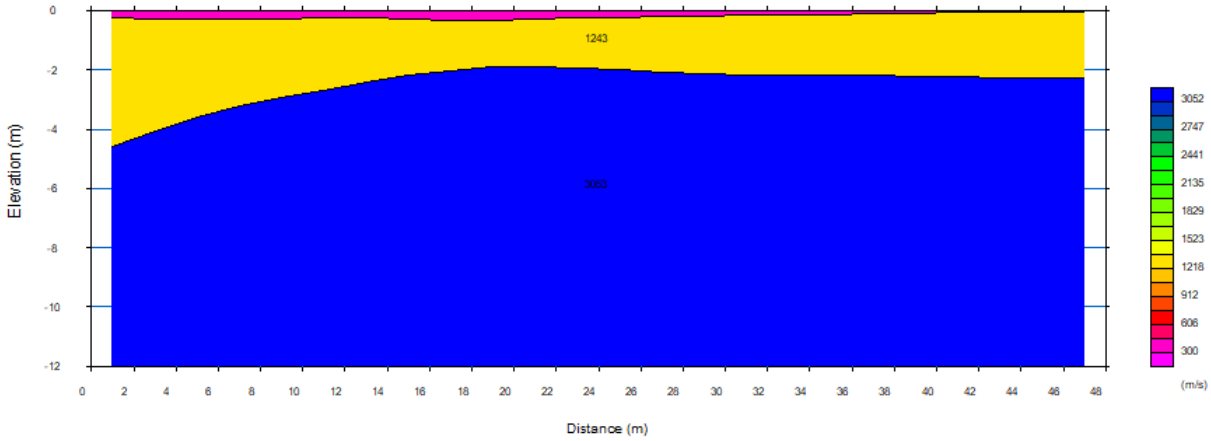
Slika 5.6. *Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek, 2003)*



Slika 5.7. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Hruškovec*



Slika 5.8. *Graf „vrijeme – brzina“ dobiven pikiranjem prvih nailazaka (SRS-Hruškovec)*



Slika 5.9. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Hruškovec)*

5.2.4. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

MASW (engl. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) ili višekanalna analiza površinskih valova najnovija je i u posljednje vrijeme najčešće primjenjivana tehnika za kartiranje podzemlja, korištenjem karakteristika Rayleighjevih valova za determinaciju profila S-valova. Termin „višekanalna“ pokazuje da se set seizmičkih podataka prikuplja seizmografom s više kanala. Kod podpovršinskih istraživanja, koncept većeg broja kanala ima sličnu ulogu kao koncept bita i piksela u tehnologiji digitalnog snimanja i obrade slike.

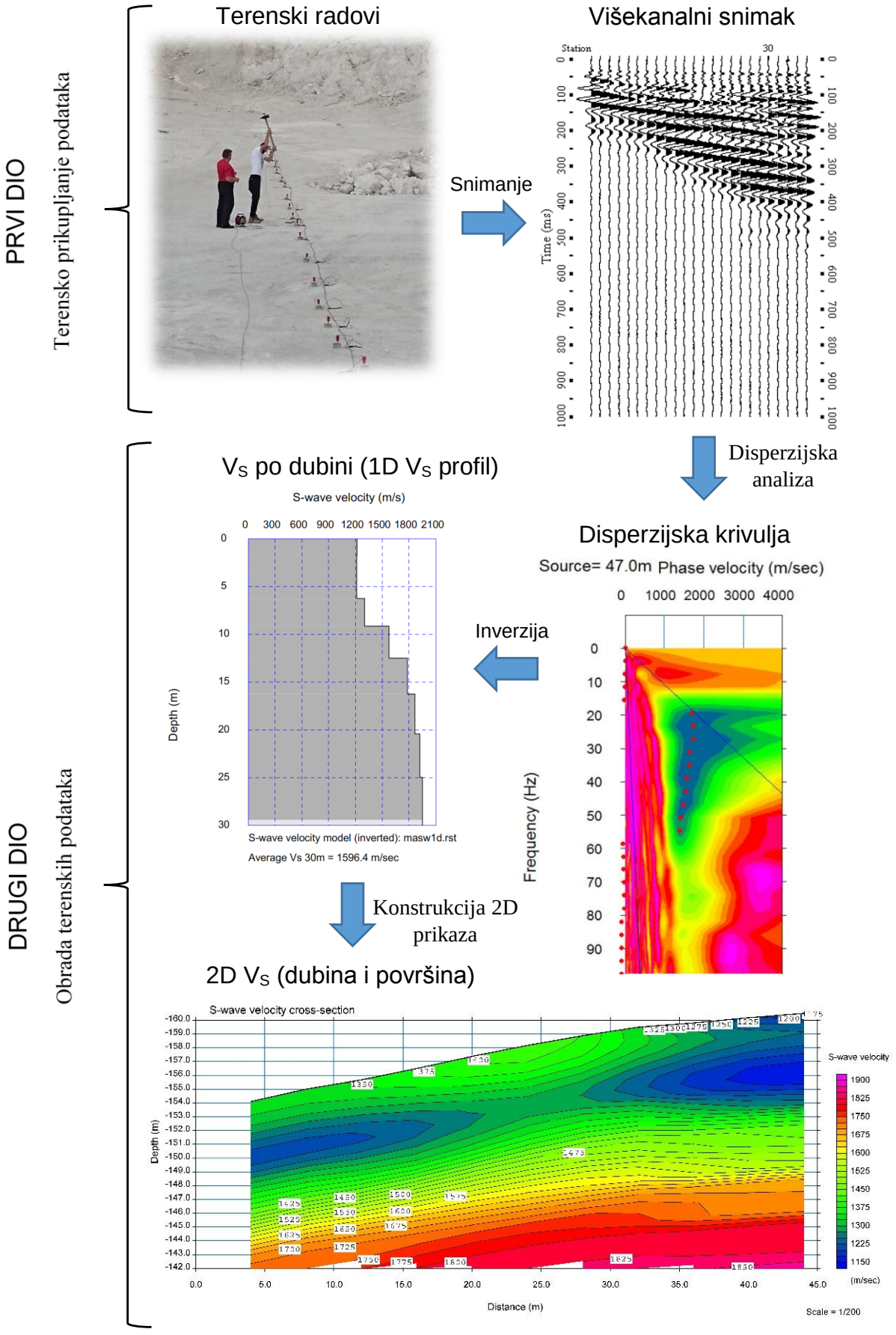
MASW metoda temelji se na spektralnoj analizi površinskih R-valova i aktivno se koristi od kasnih 1990-ih i ranih 2000-ih godina, za rješavanje problema u inženjerskoj geofizici (Park i sur., 1998; 1999; Foti i sur., 2000; 2011). R-valovi i njihova disperzivna svojstva (disperzija

frekvencija brzina R-valova) direktno nude važne informacije o V_S brzinama u tlu, do dubina 30 m aktivnom MASW metodom i do 100 m dubine primjenom pasivnog MASW-a i niskofrekventnih izvora (Louie, 2001). Pasivni površinski valovi nastaju od prirodnih (npr. plima i oseka) i umjetnih (npr. promet) izvora uglavnom niskih frekvencija (1 – 30 Hz).

Aktivni MASW (Park i sur., 2007) je najčešći tip MASW istraživanja koje daje 2D V_S profile. Usvaja konvencionalni način istraživanja pomoću aktivnog seizmičkog izvora (npr. ručni čekić ili čekić na vodilici) i polja linearnih prijemnika (geofona), prikupljajući tako podatke u „roll-along“ modu. R-valovi horizontalno se šire po površini mjerenja, izravno od izvora do prijemnika.

Procedura provođenja MASW istraživanja može se podijeliti na dva glavna dijela (slika 5.10). Prvi dio je terensko prikupljanje podataka, odnosno višekanalnih seizmičkih snimaka. Drugi dio odnosi se na obradu i interpretaciju terenskih podataka, a može se podijeliti u tri koraka. Prvi korak obrade podataka je disperzijska analiza, kojom se za svaku terensku snimku dobiva disperzijska krivulja. Disperzijska krivulja ili krivulja fazne brzine prezentira odnos između fazne brzine i frekvencije, gdje je fazna brzina zapravo brzina širenja R-valova na svakoj pojedinoj frekvenciji. Drugi korak obrade podataka je inverzija ili povratna analiza, kojom se dobivaju varijacije V_S brzine po dubini (1D V_S profili), a to su zapravo teorijske disperzijske krivulje najbliže izmjerenim krivuljama. 2D (dubina i površina) prikazi V_S konstruiraju se interpolacijom između 1D profila, koji su na istraživanoj površini smješteni na sredine geofonskih rasporeda.

U odnosu na SRS metodu, MASW se može koristiti za traženje šupljina i krških oblika u stijenskoj masi, a također ne postoji ograničenje kod istraživanja slojeva manje brzine ispod onih veće brzine (Williams i sur., 2003; Foti i sur., 2011; Kesarwani i sur., 2012).



Slika 5.10. *MASW – terensko snimanje i obrada snimljenih podataka (Jug i sur., 2020)*

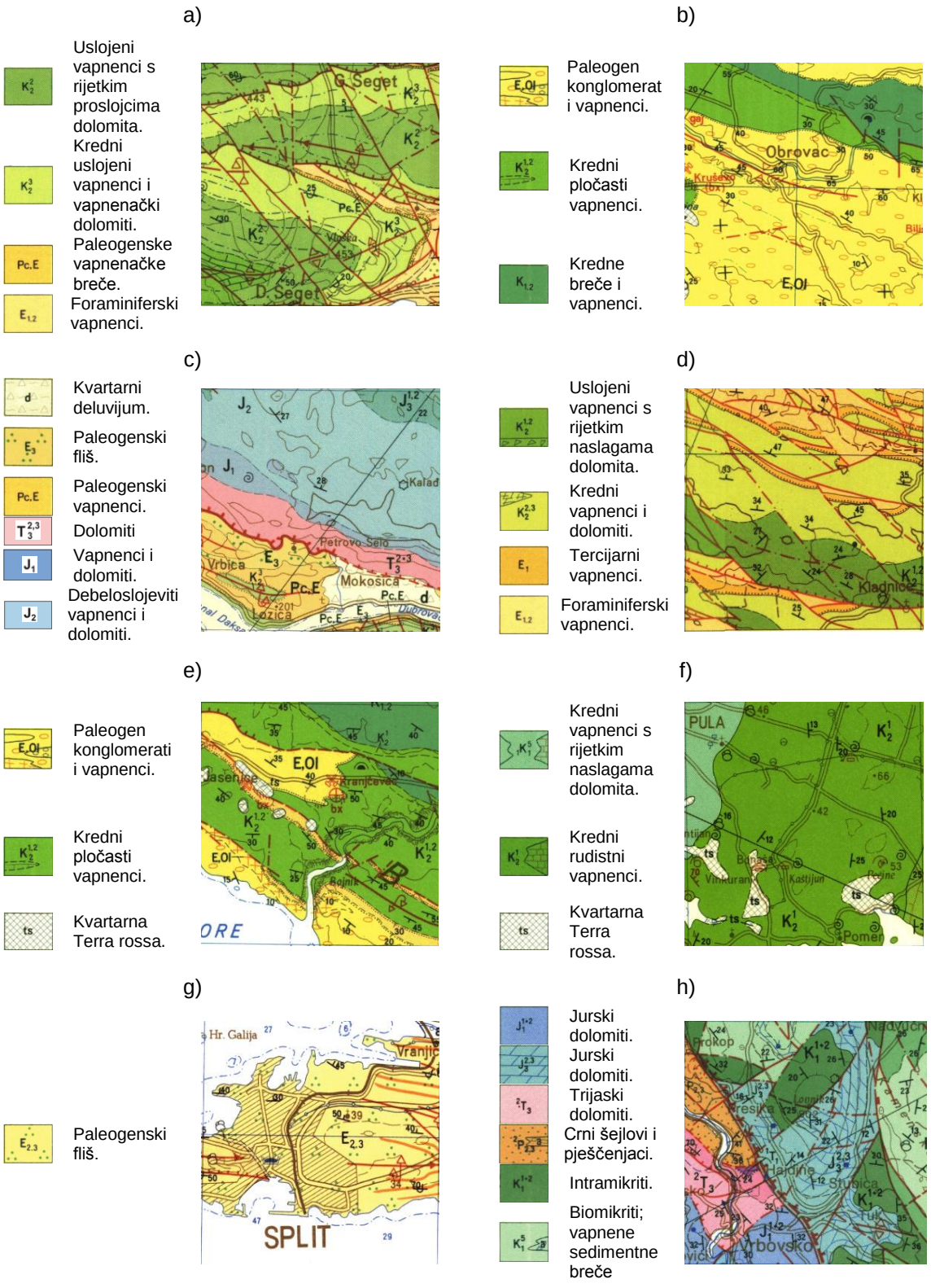
5.3. Provedena istraživanja

5.3.1. Geološke značajke istražnih lokacija

Terenska istraživanja provedena su na području Dalmacije (šest lokacija), Istre (jedna lokacija) i Gorskog kotara (jedna lokacija), što je grafički prikazano na slici 5.11. U nastavku teksta navedene su osnovne značajke lokalne geologije istražnih lokacija, prema osnovnoj geološkoj karti Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije (OGK SFRJ).

Slika 5.11. *Lokacije terenskih istraživanja na karti osnovnih geoloških regija Hrvatske (prerađeno prema Borović i sur., 2019)*

1) Seget Donji (slika 5.12.a) – prema OGK SFRJ list Split K33-21 (Marinčić i sur., 1971), istražno područje je građeno od masivnih krednih depozita, koji odgovaraju uslojenim vapnencima i vapnencima s rijetkim proslojcima dolomita.
2) Obrovac (slika 5.12.b) – prema OGK SFRJ list Obrovac K33-140 (Ivanović i sur., 1973), stijene na lokaciji su građene od paleogenskih sedimenata (eocen i oligocen). Najraširenij sedimenti su konglomerati.
3) Mokošica, Dubrovnik (slika 5.12.c) – prema OGK SFRJ list Trebinje K34-37 (Natević i Petrović, 1967), lokacija je smještena na masivnim kvartarnim i paleogenskim naslagama. Najraširenij sedimenti su fliš-pješečenjaci i lapori.
4) Kladnice (slika 5.12.d) – prema OGK SFRJ list Drniš K33-9 (Ivanović i sur., 1977), istražna lokacija je građena od vapnenaca i dolomita kvartarne starosti.
5) Jasenice (slika 5.12.e) – prema OGK SFRJ list Obrovac K33-140 (Ivanović i sur., 1973), lokacija je smještena u karbonatnim stijenskim formacijama građenim od kristaličnih vapnenaca iz donje krede i paleogenskih breča.
6) Pula (slika 5.12.f) – prema OGK SFRJ list Pula K33-112 (Polšak, 1967), istražno područje je građeno od masivnih krednih naslaga, koje odgovaraju tankim stratificiranim vapnencima s rijetkim naslagama dolomita, lapora i breče.
7) Split (slika 5.12.g) – prema OGK SFRJ list Split K33-21 (Marinčić i sur., 1971), ovo područje građeno je od masivnih naslaga paleogenskog fliša.
8) Vrbovsko (slika 5.12.h) – prema OGK SFRJ list Črnomelj K33-91 (Bukovac i sur., 1984), masivni trijaski i jurski sedimenti, koji odgovaraju dolomitima, grade ovu istražnu lokaciju.

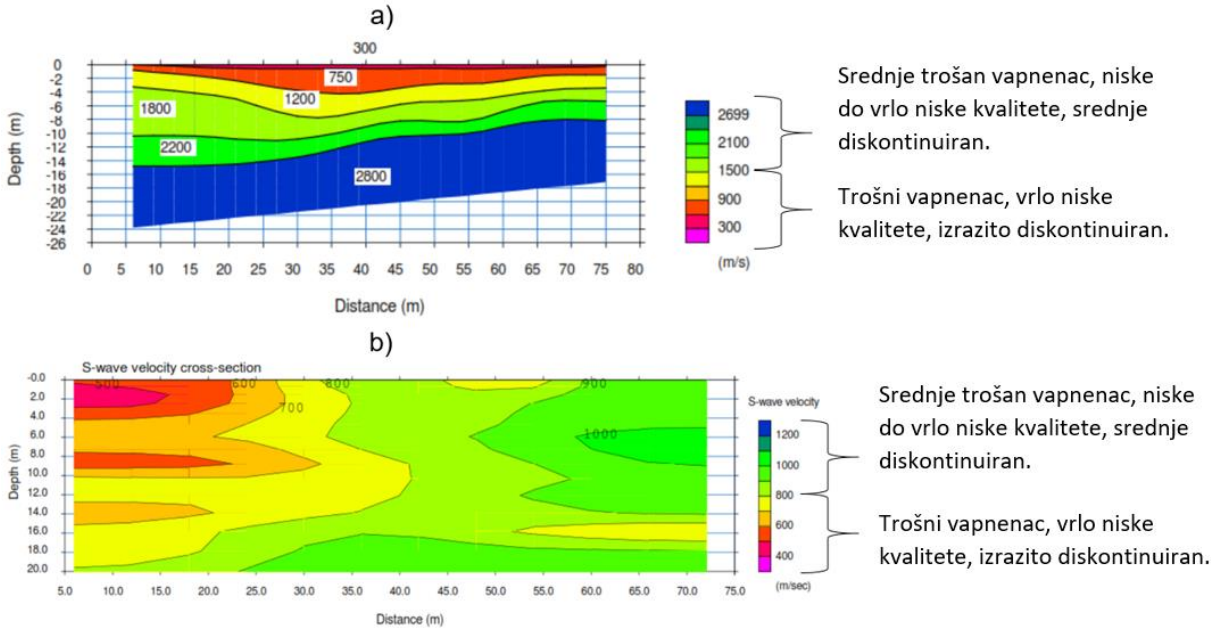


Slika 5.12. *Osnovne geološke značajke istražnih lokacija, prema osnovnoj geološkoj karti područja Hrvatske: a) Seget Donji; b) Obrovac; c) Mokošica; d) Kladnice; e) Jasenice; f) Pula; g) Split; h) Vrbovsko*

5.3.2. Rezultati terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja

Sva istraživanja provedena su u skladu s preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM), odnosno na način kako je to opisano u poglavlju 2. Terenska istraživanja uključivala su primjenu seizmičkih geofizičkih metoda (SRS i MASW), inženjersko-geološko kartiranje i istražno bušenje, dok je u laboratoriju za mehaniku stijena ispitivana tlačna čvrstoća na uzorcima intaktne stijene iz istražnih bušotina.

Raspored prijemnika kod SRS i MASW profila sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, s međusobnim razmakom od 3 metra. Analiza na terenu snimljenih seizmograma temeljila se na prepoznavanju direktno refraktiranih seizmičkih valova, kako bi se konstruirali grafovi odnosa vremena i brzine, dobiveni pikiranjem prvih nailazaka. Konačni profili brzina valova generirani su metodom inverzije uz pomoć računalnog programa SeisImager/2D version 3.3 (Geometrics i OYO, 2009). Detaljan opis postupka analize i interpretacije seizmičkih geofizičkih istraživanja izradio je Sheehan sa svojim suradnicima (2005). Kao primjer rezultata geofizičkih terenskih istraživanja, na slici 5.13 prikazana je usporedba SRS i MASW metode. Slika 5.13.a prikazuje 2D V_P model dobiven SRS metodom, a slika 5.13.b 2D V_S model stijenske mase dobiven MASW metodom na istom presjeku na istražnoj lokaciji u Puli. Usporedbom ta dva modela vidljivo je da V_S model daje puno detaljnije prikaze i prikazuje slojeve manje brzine ispod onih veće brzine, za razliku od V_P modela.



Slika 5.13. *Rezultati geofizičkih seizmičkih istraživanja u Puli: a) 2D V_P model dobiven SRS metodom; b) 2D V_S model dobiven MASW metodom (Jug i sur., 2020)*

Istražno bušenje, jezgrovanje i uzorkovanje provedeno je na svim istražnim lokacijama. Za potrebe bušenja korištena je oprema za hvatanje jezgre na sajli (engl. *wireline system*) i dvostruka jezgrena cijev, kako bi se osigurala kvalitetnija jezgra njezinim izoliranjem od kontakta s isplakom za bušenje (Mayne i sur., 2001). Oprema za *wireline* omogućava da se unutarnja cijev odvaja od vanjske cijevi i podiže na površinu uz pomoć čelične sajle. Kao isplaka za bušenje korištena je čista voda, bez ikakvih dodataka. Kao primjer fotodokumentacije na slici 5.14. prikazana je nabušena jezgra iz istražne bušotine izvedene na lokaciji u Obrovcu.

Cjelokupna terenska karakterizacija stijenske mase, u vidu njezine kvalitete, sastoji se od više parametara – spomenutih brzina V_P i V_S iz geofizičkih istraživanja, indeksa kvalitete jezgre (*RQD*) kao rezultata istražnog bušenja, dok su inženjerskogeološkim (IG) istraživanjem procijenjeni geološki indeksi čvrstoće (*GSI*) stijenske mase, razmaci diskontinuiteta (*DS*) i terenski indeksi čvrstoće (*R*) prema prijedlogu Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1981). Karakteristični geotehnički presjek konstruiran na temelju rezultata istraživanja na lokaciji u Segetu Donjem prikazan je u prilogu 2, dok su rezultati terenskih istraživanja sa svih istražnih lokacija sažeti u tablici 5.1.

Laboratorijska ispitivanja uzoraka intaktne stijene iz istražnih bušotina obuhvaćala su ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (σ_{ci}) i indeksa čvrstoće opterećenjem u točki iz PLT ispitivanja (I_{s50}). Ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće izvedena su u hidrauličkoj preši na pripremljenim uzorcima jezgre iz istražnih bušotina, propisane geometrije (ISRM, 1981; 2007). σ_{ci} izračunana je dijeljenjem maksimalnog opterećenja na uzorak tijekom ispitivanja s površinom poprečnog presjeka uzorka. PLT ispitivanje, poznato i kao Franklinov test (Broch i Franklin, 1972), izvedeno je na pravilnim i nepravilnim cilindričnim uzorcima, također iz istražnih bušotina. Nakon toga su rezultati normalizirani na cilindrične uzorke promjera 50 mm te je tako dobiven I_{s50}. Rezultati lab. ispitivanja svih uzoraka prikazani su u tablici 5.2.

Slika 5.14. *Fotografija jezgre iz istražne bušotine izvedene u Obrovcu*

5.4. Razvoj metode klasifikacije

Temeljem izvedenih istražnih radova, nastavak istraživanja predvidio je testiranje svih dostupnih površinskih tehnologija otkopavanja u izvedbenoj fazi građevinskih iskopa na istražnim lokacijama, ovisno o mogućnosti primjene. Trošna stijenska masa, izrazito loše kvalitete, kopana je hidrauličnim bagerom s dubinskom lopatom (slika 5.15.a). Djelomično trošna stijenska masa, loše do zadovoljavajuće kvalitete, rijana je dozerom s rijačima (slika 5.15.b) ili razbijana hidrauličnim čekićem (slika 5.15.c). Svježa i blokovita stijenska masa, vrlo dobre do odlične kvalitete, minirana je primjenom eksploziva, koji je smještan u minske bušotine (slika 5.15.d). U većini slučajeva kombinirano je više metoda, ako su potrebni strojevi bili dostupni na radilištu (npr. u Segetu dozer nije bio dostupan). Primijenjene metode otkopavanja na svakoj individualnoj lokaciji prikazane su u posljednjem stupcu tablice 5.1.

Tablica 5.1. *Rezultati terenskih istraživanja i probnih iskopa (Jug i sur., 2020)*

Lokacija	Vrsta stijene	Oznaka	R (ISRM, 1981)	V_S (m/s) raspon	V_P (m/s) raspon	GSI raspon	RQD raspon	DS (cm) raspon	Metoda iskopa
Seget Donji	Vapnenac	SD1	R2	450-600	800-1300	15-25	10-20	1-10	Kopanje
		SD2	R3	600-800	1200-1600	20-30	25-40	12-25	Razbijanje
		SD3	R3-R4	800-1000	1600-2400	30-45	40-60	25-50	Razbijanje
		SD4	R4	1000-1200	2200-2600	50-60	60-75	50-80	Razbijanje
		SD5	R4-R5	1200-1500	2600-3400	60-80	75-90	80-150	Miniranje
Obrovac	Konglomerat	O1	R1	400-550	800-1200	5-15	0	1-4	Kopanje
		O2	R2-R3	600-800	880-1700	15-25	15-30	6-15	Rijanje
		O3	R4	800-1200	1760-2600	30-40	35-60	18-25	Rijanje
		O4	R4-R5	1200-2000	2600-4400	40-50	70-90	30-45	Miniranje
Mokosica	Fliš Pješčenjak	M1	R2-R3	250-350	750-1200	20-35	15-30	1-15	Kopanje
		M2	R3	350-600	1600-2200	40-60	35-70	20-50	Kopanje
Kladnice	Vapnenac Dolomit	K1	R2	400-600	900-1400	15-25	10-20	1-5	Kopanje
		K2	R3	800-1200	1200-2400	35-45	35-60	5-20	Razbijanje
		K3	R4	1200-1800	2500-4200	60-70	75-85	20-80	Miniranje
Jasenice	Breča Vapnenac	J1	R5	1000-1400	1800-3500	45-50	35-65	5-20	Miniranje
		J2	R5	1400-2100	3500-5100	60-65	70-90	30-45	Miniranje
Pula	Vapnenac	P1	R2	400-700	750-1600	15-25	10-20	1-10	Kopanje
		P2	R3-R4	800-1000	1800-2500	35-45	30-60	10-30	Rijanje
Split	Fliš	S1	R1	200-250	300-500	5-10	0	<3	Kopanje
		S2	R2	300-500	500-1000	15-25	15-30	1-10	Kopanje
		S3	R3	600-900	1300-1700	40-45	50-70	5-40	Kopanje
Vrbovsko	Dolomit	V1	R3	450-600	1000-1400	20-25	30-40	5-15	Kopanje
		V2	R4	700-1000	1500-2300	30-35	40-60	10-50	Rijanje

Tablica 5.2. *Rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka intaktne stijene iz istražnih bušotina*

Lokacija	Vrsta stijene	Oznaka	σ_{ci} (MPa) raspon	σ_{ci} (MPa) srednja vrij.	Is_{50} (MPa) raspon	Is_{50} (MPa) srednja vrij.
Seget Donji	Vapnenac	SD1	10 – 25	22,5	0,44 – 1,08	0,76
		SD2	25 – 40	32,5	0,96 – 1,81	1,38
		SD3	40 – 55	47,5	1,72 – 2,11	1,91
		SD4	55 – 70	62,5	2,45 – 2,83	2,64
		SD5	70 – 115	92,5	2,91 – 4,57	3,74
Obrovac	Konglomerat	O1	–	–	–	–
		O2	22 – 54	38	0,54 – 1,67	1,11
		O3	60 – 72	66	2,42 – 2,88	2,65
		O4	81 – 116	98,5	2,96 – 3,31	3,14
Mokošica, Dubrovnik	Fliš Pješčenjak	M1	22 – 39	30,5	1,10 – 1,63	1,36
		M2	37 – 54	45,5	1,87 – 2,25	2,06
Kladnice	Vapnenac Dolomit	K1	10 – 25	17,5	0,38 – 0,96	0,67
		K2	25 – 50	37,5	0,98 – 2,26	1,62
		K3	50 – 90	70	2,17 – 3,91	3,04
Jasenice	Breča Vapnenac	J1	114 – 154	134	5,20 – 7,14	6,17
		J2	173 – 204	188,5	7,92 – 9,35	8,64
Pula	Vapnenac	P1	6 – 17	11,5	0,32 – 0,95	0,64
		P2	23 – 48	35,5	1,22 – 2,56	1,85
Split	Fliš	S1	–	–	–	–
		S2	10 – 22	16	0,48 – 1,94	1,21
		S3	28 – 54	41	2,21 – 5,91	4,06
Vrbovsko	Dolomit	V1	36 – 48	42	1,63 – 2,18	1,91
		V2	67 – 82	74,5	3,04 – 3,73	3,39

Nova klasifikacijska metoda koja se predlaže u nastavku prati osnovni princip postojećih klasifikacijskih metoda koje koriste brzine seizmičkih P-valova za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase, ali se temelji na brzinama S-valova. U suštini, manje brzine ukazuju na vrlo razdrobljenu stijensku masu koju je lako otkopavati, dok velike brzine ukazuju na kompaktnu stijensku masu koju je teško otkopavati (Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Weaver, 1975; Church, 1981; Komatsu, 2013; Caterpillar, 2015; Moustafa, 2015). Međutim, novim pristupom uvode se drugačija terenska mjerenja, odnosno uvodi se drugi tip podataka, a zadržavaju pozitivne karakteristike postojećih metoda (brzina, relativna jednostavnost i niski troškovi istraživanja).

Dosadašnja terenska istraživanja koristila su SRS metodu i njezine nedostatke, koji su već opisani u ovom poglavlju. Novi pristup predlaže primjenu MASW metode za terenska istraživanja, budući da ta metoda ima cijeli niz prednosti u odnosu na konvencionalne seizmičke metode (npr. SRS), od kojih su najvažnije:

a) suvremenija seizmička tehnika za kartiranje podzemlja
b) daje vrlo detaljne prikaze (slike 5.12; 5.15) jer koristi višekanalni pristup pri mjerenju
c) prepoznaje slojeve manje brzine ispod onih većih brzina (slika 5.12)
d) koristi disperzijska svojstva R-valova, koji prenose najveću količinu energije.

a) b)

c) d)

Slika 5.15. *Probna otkopavanja: a) kopanje u Splitu; b) rijanje u Vrbovskom; c) razbijanje u Segetu Donjem; d) priprema minskog polja u Kladnicama (Jug i sur., 2020)*

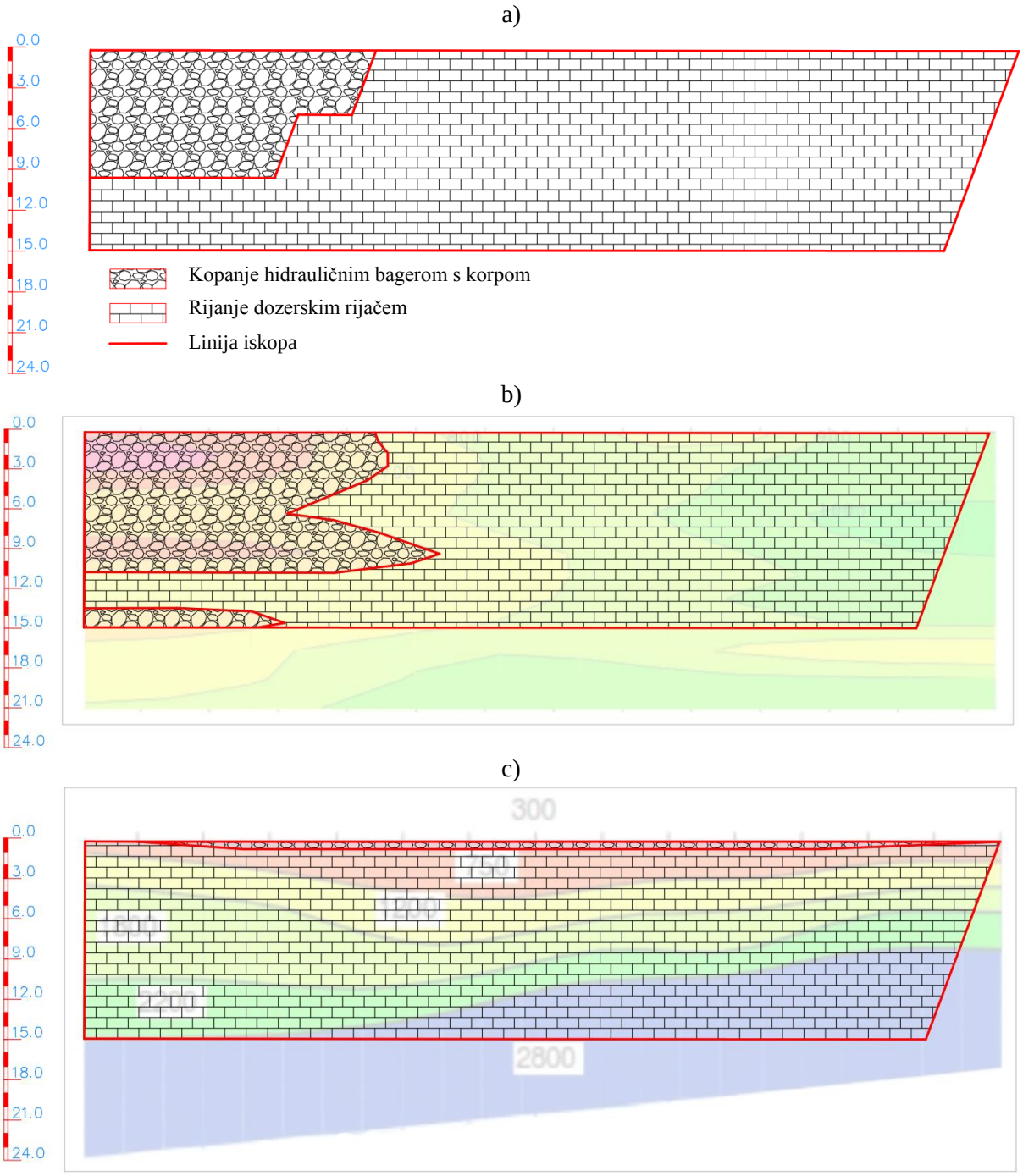
Rayleighjevi površinski valovi direktno pružaju vrlo važnu informaciju o V_S u površinskim stijenama. S-valovi, za razliku od P-valova korištenih u prethodnim istraživanjima, kreću se samo kroz čvrste dijelove stijenske mase, ne i kroz tekuće medije. To je vrlo važno s obzirom na to da podzemna voda može značajno utjecati na širenje P-valova kroz podzemlje i povećati izmjerene vrijednosti V_P u površinskim stijenama. Primjenom S-valova umjesto P-valova izbjegava se mogućnost pogreške zbog prisutnosti vode u stijenskoj masi.

Temeljem rezultata istraživanja i probnih iskapanja (tablica 5.1) na osam lokacija izgrađenih od karbonatnih stijena, u tablici 5.3 predložena je nova klasifikacija za procjenu mogućnosti otkopavanja sedimentnih stijena na površinskim kopovima. Predložena klasifikacija razlikuje četiri klase ili kategorije kvalitete stijenske mase za četiri metode otkopavanja koje se najčešće koriste, u ovisnosti o izmjerenim brzinama S-valova primjenom MASW metode.

Tablica 5.3. *Predložena klasifikacija sedimentne stijenske mase za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja kod površinskih iskopa (Jug i sur., 2020)*

KATEGORIJA SEDIMENTNE STIJENSKE MASE	IZMJERENA V_S (m/s)	PRIKLADNA METODA OTKOPAVANJA
I	> 1200	Miniranje (minske bušotine i eksploziv)
II	1000 – 1200	Razbijanje (hidraulični čekić)
III	600 – 1000	Rijanje (dozerski rijač)
IV	< 600	Kopanje (bager s korpom)

Slika 5.16 je vizualizacija poboljšanja koje donosi novi pristup. Na slici su prikazani stvarni profili iskopa stijenske mase i prognozni profili iskopa temeljeni na geofizičkim presjecima izmjerenih V_P i V_S (isti geofizički presjeci već su prikazani na slici 5.13). Slika 5.16.a prikazuje presjek na kojem je prikazan način stvarno izvedenog otkopavanja kod probnog iskopa. Nadalje, slika 5.16.b prikazuje procjenu otkopavanja prema novopredloženoj seizmičkoj metodi koja se temelji na brzinama S-valova, dok slika 5.16.c pokazuje procjenu primjenjivosti rijanja prema metodi predloženoj od strane Caterpillar Inc. za dozer Cat D8R (Caterpillar, 2015), na temelju izmjerenih V_P. Primjenom V_P profila i Caterpillarove klasifikacije, moguće je predvidjeti kopanje samo u plitkom površinskom sloju (slika 5.16.c). Primjenom nove seizmičke klasifikacije predložene u ovom radu, moguće je predvidjeti kopanje na lijevom dijelu V_S profila (slika 5.16.b), što se zapravo vrlo dobro poklapa s načinom stvarno izvedenog iskopa (slika 5.16.a). Prilikom probnog iskopa većina radova izvedena je rijanjem, ali dio je obavljen kopanjem, kao što je predvidjela predložena klasifikacija. Za potrebe iskopa formirane su dvije etaže visine 5 m (slika 5.16.a), dok je kopanje izvedeno primjenom hidrauličnog bagera CAT320.

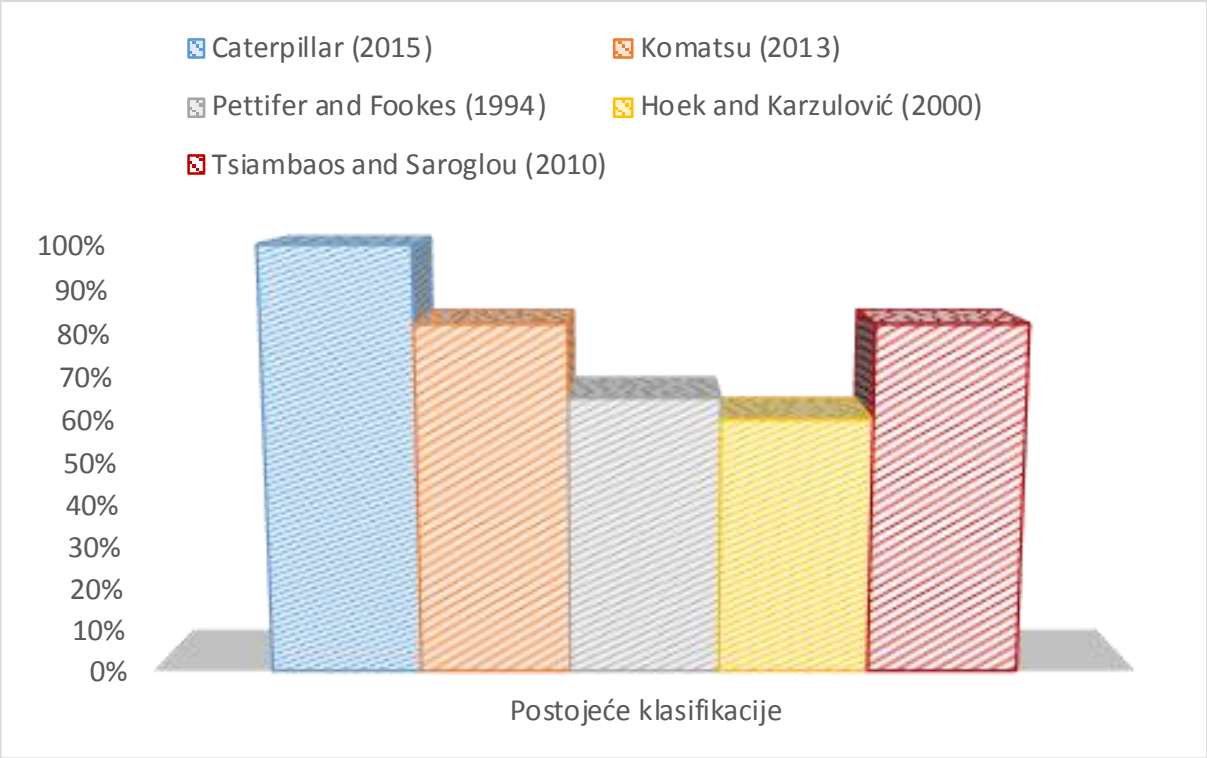


Slika 5.16. *Profili otkopavanja s lokacije u Puli: a) probno otkopavanje; b) procjena otkopavanja prema novopredloženoj seizmičkoj metodi i izmjerenim V_S; c) procjena otkopavanja prema metodi predloženoj od Caterpillar Inc. za dozer Cat D8R (Caterpillar 2015) i izmjerenim V_P (Jug i sur., 2020)*

5.5. Verifikacija metode

Prikladne postojeće metode za procjenu podatljivosti stijene otkopavanju, s obzirom na dostupne podatke, korištene su za potvrdu novopredložene klasifikacije. Tablica 5.4 prikazuje

usporedbu procjena predložene klasifikacije s nekoliko postojećih, najčešće korištenih metoda. Postotno poklapanje procjena grafički je prikazano dijagramom na slici 5.17.



Slika 5.17. *Postotno poklapanje procjena predložene klasifikacije s procjenama postojećih klasifikacija (Jug i sur., 2020)*

Metode predložene od strane Caterpillar Inc. za dozer Cat D8R (Caterpillar, 2015) i Komatsu Ltd. za dozer D375A (Komatsu, 2013) razlikuju samo tri kategorije stijenske mase: a) moguće rijati, b) granično i c) nije moguće rijati. Zbog toga su za verifikaciju uvedene sljedeće pretpostavke: a) stijenu koju je moguće rijati eventualno je moguće i kopati, b) graničnu kategoriju moguće je sigurno razbijati hidrauličnim čekićem i c) stijena koju nije moguće rijati mora se minirati. Uspoređujući predloženu metodu s Caterpillarovom metodom, na slici 5.17, plavi stupac, vidljivo je odlično podudaranje (100 %), a poklapanje je vrlo dobro (preko 80 %) i u usporedbi s metodom Komatsua (slika 5.17, narančasti stupac).

Usporedba je napravljena s dijagramom (slika 3.3) koji predlažu Pettifer i Fookes (1994), a poklapanje od 65 % je prilično dobro (slika 5.17, sivi stupac). Međutim, pokazuje se da su podaci o stijenskoj masi u toj studiji podcijenjeni, kao što su to utvrdili i Tsiambaos i Saroglou (2010). Zbog tog razloga vidljivo je u tablici 5.4 da je u tri slučaja bilo potrebno stijenu razbijati, a dijagram koji predlažu Pettifer i Fookes (1994) predviđa mogućnost rijanja.

Tablica 5.4. *Usporedba predložene klasifikacije s rezultatima provedenih iskopa i odabranih postojećih metoda (Jug i sur., 2020)*

Lokacija	Oznaka	Metoda iskopa	Nova klasifikac. (V_S) metoda	Caterpillar (2015) CAT D8R	Komatsu (2013) D375A	Pettifer i Fookes (1994)	Hoek i Karzulović (2000)	Tsiambaos i Saroglou (2010)
Seget Donji	SD1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Hard Digging	Dig	Digging
	SD2	Razbijanje	Rijanje	Rippable	Rippable	Easy Ripping	Dig	Digging-Ripping
	SD3	Razbijanje	Rijanje	Rippable-Marginal	Rippable	Hard Ripping	Rip	Ripping
	SD4	Razbijanje	Razbijanje	Non-rippable	Rippable	Very Hard Ripping	Rip	Hammer (and blast.)
	SD5	Miniranje	Miniranje	Non-rippable	Marginal	Blasting Required	Blast	Blasting
Obrovac	O1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Easy Digging	Dig	Digging
	O2	Rijanje	Rijanje	Rippable	Rippable	Easy Ripping	Dig	Digging
	O3	Rijanje	Rijanje - razbijanje	Marginal-Non-rippable	Rippable	Hard Ripping	Dig	Ripping
	O4	Miniranje	Miniranje	Non-rippable	Marginal	Hard Ripping	Rip	Ripping
Mokosica	M1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Hard Digging	Dig	Digging
	M2	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Hard Ripping	Rip	Ripping
Kladnice	K1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Hard Digging	Dig	Digging
	K2	Razbijanje	Rijanje - razbijanje	Rippable-Marginal	Rippable	Easy Ripping	Rip	Ripping
	K3	Miniranje	Miniranje	Non-rippable	Marginal	Very Hard Ripping	Rip	Hammer (and blast.)
Jasenice	J1	Miniranje	Razbijanje-miniranje	Marginal-Non-rippable	Marginal	Hard Ripping	Rip	Hammer (and blast.)
	J2	Miniranje	Miniranje	Non-rippable	No data	Extr. Hard Ripping or Breaking	Blast	Hammer (and blasting)
Pula	P1	Kopanje	Kopanje - rijanje	Rippable	Rippable	Hard Digging	Dig	Digging
	P2	Rijanje	Rijanje	Marginal-Non-rippable	Rippable	Easy Ripping	Rip	Ripping
Split	S1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Easy Digging	Dig	Digging
	S2	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Hard Digging	Dig	Digging
	S3	Kopanje	Rijanje	Rippable	Rippable	Hard Ripping	Rip	Ripping
Vrbovsko	V1	Kopanje	Kopanje	Rippable	Rippable	Easy Ripping	Dig	Digging
	V2	Rijanje	Rijanje	Rippable-Marginal	Rippable	Hard Ripping	Rip	Ripping

Objašnjenje izraza i kratica na engleskom jeziku: Non-Rippable – nije moguće rijanje, Rippable – moguće rijanje, Marginal – granična mogućnost rijanja, Easy Ripping – lako rijanje, Hard Ripping – teško rijanje, Very Hard Ripping – vrlo teško rijanje, Extr. Hard Ripping or Breaking – ekstremno teško rijanje ili razbijanje, Easy Digging – lako kopanje, Hard Digging – teško kopanje, Digging (Dig) – kopanje, Ripping (Rip) – rijanje, Blasting (Blast) – miniranje, Hammer – razbijanje hidr. Čekićem.

Klasifikacija koju su predložili Hoek i Karzulović (2000) koristi tlačnu čvrstoću stijenske mase (σ_{cm}) i vrijednost *GSI* za procjenu podatljivosti stijena otkopavanju (slika 3.6). Za potrebe ovog rada čvrstoća stijenske mase procijenjena je na temelju drugih istraživanjem dobivenih rezultata (σ_{ci} i *GSI*), a σ_{cm} nije lagano procijeniti. U nastavku je primjer koji pokazuje kako Hoek i Karzulović određuju σ_{cm}: „Na primjeru 15 m visoke kosine u slabom pješčenjaku, tlačna čvrstoća intaktne stijene je σ_{ci} = 10 MPa, Hoek-Brown konstanta m_i = 17 i *GSI* = 60. Te vrijednosti stijenskoj masi daju čvrstoću σ_{cm} = 1.4 MPa, što je reducirano za 0,7 smanjenjem *GSI* na 40.“ Tako da je očito loša procjena čvrstoće stijenske mase u ovom istraživanju rezultirala poklapanjem od samo 60 % (slika 5.17, žuti stupac). Primijećen je još jedan veliki nedostatak Hoekove i Karzulovićeve klasifikacije, a tiče se činjenice da ta metoda ne prepoznaje razbijanje hidrauličnim čekićem kao metodu otkopavanja stijenske mase.

Konačno, posljednja metoda koja je korištena za usporedbu i verifikaciju je metoda koju su predložili Tsiambaos i Saroglou (2010). Njihova klasifikacijska metoda u obzir uzima PLTi intaktne stijene i strukturne karakteristike stijenske mase kroz GSI. Dva GSI dijagrama su korištena, prvi za stijensku masu s $Is_{50} \leq 3$ MPa (slika 3.9) i drugi za stijensku masu s $Is_{50} \geq 3$ MPa (slika 3.10). Uspoređujući procjene te klasifikacije u odnosu na predloženu klasifikaciju, dobiva se vrlo dobro poklapanje od 82 % (slika 5.17, crveni stupac).

6. MODEL ZA PROCJENU PRIMJENJIVOSTI TEHNOLOGIJA OTKOPAVANJA U ODNOSU NA ZNAČAJKE STIJENSKE MASE

6.1. Uvod

Rezultati istraživanja provedenih u poglavlju 5 pokazali su kako je korištenje brzine seizmičkih valova za procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju prihvatljivo u slučaju manjih građevinskih iskopa. Predloženi novi pristup istraživanju, koji podrazumijeva primjenu MASW seizmičke istraživačke metode čiji su rezultat profili brzina S-valova, vrlo je koristan za preliminarnu procjenu podatljivosti stijena otkopavanju. No, pri planiranju rudarskih površinskih kopova razina preliminarne procjene nije zadovoljavajuća, a da bi se postigla točnija procjena, svakako je u razmatranje potrebno uključiti više kriterija. To potvrđuje potreba za uključivanjem značajki intaktne stijene (σ_{ci} i I_{s50}) i stijenske mase (*DS*, *RQD*, *GSI*, V_P i V_S) u istraživanje prikazano u poglavlju 5. Osim spomenutih kriterija koji su kontrolirani značajkama materijala, u razmatranja se mogu uključiti i dodatni uvjeti otkopavanja. Na primjeru istraživanja iz prethodnog poglavlja, uočena je ograničena primjena miniranja u urbanim sredinama zbog negativnih efekata te potreba za korištenjem otkopanog stijenskog materijala na samom gradilištu. U tom slučaju iskopani materijal mora biti odgovarajuće fragmentacije, sastava i kvalitete, što je moguće ostvariti samo uz primjenu tehnologije koja omogućuje zadovoljavanje tih dodatnih uvjeta otkopavanja.

Zato je cilj ovog doktorskog istraživanja bio razviti općeniti model koji će omogućiti procjenu najprimjenjivije od svih dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na kvalitativne značajke intaktnog stijenskog materijala, strukturne značajke i značajke stijenske mase koja se planira otkopavati te postavljene uvjete otkopavanja. Analizom dostupnih metodologija za rješavanje sličnih inženjerskih problema i razvoj modela, imajući u vidu kako model treba uključivati više različitih kriterija, zaključeno je kako bi najprikladnija bila upravo metoda višekriterijske analize (engl. *Multi-criteria analysis*) (Roy, 1996).

Višekriterijska analiza je matematički alat donošenja odluka koji omogućuje usporedbu različitih alternativa ili scenarija prema različitim kriterijima, koji donositelja odluke usmjeravaju prema ispravnom odabiru odluke. Višekriterijska analiza provodi se korištenjem višekriterijskih metoda (Roy, 1996), koje omogućavaju postavljanje različitih opcija i definiranje njihovog odnosa s različitim kriterijima. Glavni zadatak višekriterijskih metoda je rješavanje problema koji donositelji odluka imaju kod obrade velike količine složenih informacija, a rezultat je najčešće određivanje pojedinačne željene opcije, rangiranje opcija,

smanjenje broja opcija za naknadne analize, odnosno za razlikovanje prihvatljivog rješenja od neprihvatljivog. Višekriterijske metode međusobno se razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka, a najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije.

Sve karakteristike višekriterijske analize mogu naći adekvatnu primjenu u procesima odlučivanja u rudarstvu. Tako su Mahase i suradnici (2016) izradili pregled primjena metoda višekriterijskog odlučivanja u planiranju rudarskih radova. Prije toga Karadogan i suradnici (2008) iste metode koriste pri odabiru najprikladnije metode podzemne eksploatacije, a Hamidi i suradnici (2009) kod ilustracije indeksa koji opisuje mogućnost otkopavanja stijenske mase.

U ovom poglavlju prikazana je upotreba višekriterijske analize za rangiranje primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase. Za analizu korištena je metoda PROMETHEE (Preferance ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations), koja pripada u skupinu metoda „višeg ranga" jer princip višeg ranga koristi u svrhu rangiranja opcija u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenjem složenosti. Drugim riječima, izvršena je paralelna usporedba opcija (tehnologije otkopavanja) u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na kriterije (značajke stijenske mase). Opravdanost metode PROMETHEE vidljiva je u prikladnosti i prilagodljivosti primjene na predmetnu problematiku, imajući u vidu korištenje programskog paketa Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4. (Mareschal, 2014).

6.2. Razvoj modela za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase

Za razvoj modela iz ovog doktorskog istraživanja važno je poznavanje teorijskih osnova višekriterijske analize te metoda PROMETHEE i GAIA, kao i programskog paketa Visual PROMETHEE, pomoću kojeg je kreiran i postavljen model. U nastavku ovog poglavlja najprije slijedi niz potpoglavlja s opisima spomenutih pojmova, a kasnije i detaljan opis razvoja modela.

6.2.1. Višekriterijska analiza

Višekriterijska analiza je alat donošenja odluka koji zahtijeva postavljanje različitih opcija, alternativa ili scenarija te definiranje njihovog odnosa s različitim kriterijima. Takav postupak u konačnici zahtijeva određenu procjenu. Višekriterijske analize provode se primjenom višekriterijskih metoda, koje se međusobno razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka. Najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije. Glavni zadatak višekriterijskih metoda je rješavanje problema koje donositelji odluka imaju kod obrade velike količine složenih informacija s težnjom dosljednosti i sistematičnosti. Višekriterijske metode

primjenjuju se kod određivanja pojedinačne željene opcije, kod rangiranja opcija, kod smanjenja broja opcija za naknadne analize, odnosno za razlikovanje prihvatljivog rješenja od neprihvatljivog.

Strukturiranost ili definiranost problema predstavlja najvažniju karakteristiku s obzirom na moguće metode i postupke podrške odlučivanju o tom konkretnom problemu. Dobro (potpuno) strukturirani problem mora imati poznate sve komponente rješenja (Simon, 1960), tj. točno određen sam problem, precizno definirane ulazne podatke, alternative ili strategije mogućih rješenja te postupak analize i izbora konačnog rješenja. Dobro strukturirani problemi se vrlo uspješno rješavaju metodama i tehnikama optimizacije, međutim za djelomično ili nedovoljno strukturirane probleme potrebno je primijeniti novu generaciju matematičkih modela, koji omogućuju među ostalim i višekriterijski pristup u rješavanju problema. Upravo analiza problema u rudarstvu, posebno u segmentu izvođenja radova, pokazuje da s aspekta sustavne analize po svojim karakteristikama spadaju u tzv. loše strukturirane probleme (engl. *Unstructured problems*) te je potreban višekriterijski pristup u njihovu rješavanju. Sve osobine višekriterijske analize, kao što su veći broj kriterija, neslaganja među kriterijima, neusporedive jedinice mjera kriterija, izbor najbolje alternative (rješenja) ili rangiranje alternativa, mogu naći adekvatnu primjenu u procesima odlučivanja u rudarstvu.

Postoje različite podjele višekriterijskih metoda. Uzevši u obzir problematiku analiziranu u ovom radu, u nastavku je podjela koju su predložili Lai i suradnici (2008):

a) elementarne metode
b) pojedinačni kriterijski pristup
c) metode „višeg ranga“
d) metoda cilja ili referentne točke
e) teorija „Fuzzy“ skupa.

Zapažena je tendencija da metode „višeg ranga“ izbijaju u prvi plan, kako zbog svoje prilagodljivosti realnim problemima (koji su u načelu slabo strukturirani), tako i zbog činjenice da su u usporedbi sa sličnim metodama vrlo razumljive „donosiocu odluka“. Pregledom literature može se uočiti da je u svijetu dominacija triju metoda višekriterijske analize, i to:

a) metoda ELECTRE (Roy, 1968)
b) metoda Analytic Hierarchy Processing – AHP (Saaty, 1980)
c) metoda Preferance Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations – PROMETHEE (Brans i Vincke, 1985).

Metoda PROMETHEE vrlo se ističe. S jedne strane zato što koristi princip „višeg ranga“ u svrhu rangiranja alternativa u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenja složenosti, odnosno izvršava se paralelna usporedba alternativa u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na broj kriterija (Lai i sur., 2008). S druge strane zato što ima dobru programsku podršku i koncepciju blisku sustavima za podršku odlučivanju. Za numeričku obradu problema višekriterijske analize metodom PROMETHEE vrlo je prihvatljiva programska podrška „Visual PROMETHEE“.

6.2.1.1. Metoda PROMETHEE

Međusobno uspoređivanje relevantnih ekonomskih i tehničko-tehnoloških parametara praktično je nezamislivo bez pomoći višekriterijskih tehnika i metoda odlučivanja. U najopćenitijem slučaju, promatra se jednokriterijski problem prikazan izrazom 6.1, u kojem je A skup mogućih akcija (alternativa), dok je f:A→R_1 kriterij koji razlikuje te akcije. Rješenje ovog problema je totalni poredak u skupu A (Mladineo, 2009).

$$Max\{f(a)|a \in A\} \tag{6.1}$$

Višekriterijski problem definira se prema izrazu 6.2, pri čemu je $f_j(a),\ j = 1, 2, \dots, k$, gdje je k broj kriterija. U ovom slučaju ne može se dobiti rješenje u obliku totalnog poretka u skupu A. Međutim, ovakvi (višekriterijski) problemi mogu se riješiti. Neka su a i b dvije akcije iz skupa A tako da vrijedi $f_j(a) \geq f_j(b),\ \forall j \in (1,2,\dots, k)$, pri čemu je barem jedna nejednakost stroga. Tada vrijedi da a dominira nad b. Na taj se način dobiva parcijalni poredak u A (tranzitivna relacija) koji se zove poredak dominacije. Pretpostavi se da su akcije iz A ponovo čvorovi grafa, luk (ab) postoji ako a dominira nad b, te tako dobivamo graf dominacije (usmjeren graf). Poredak dominacije je općenito vrlo siromašan, čak i ako problem sadrži samo nekoliko kriterija, tako da graf dominacije nema mnogo grana. Često se događa da je poredak dominacije prazan.

$$Max\{f_l(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a)|a \in A\} \tag{6.2}$$

Za metodu PROMETHEE karakteristična su sljedeća tri segmenta:

1) Obuhvat kriterija – oblikovanje preferencija donositelja odluke modificira se na način da se za svaki kriterij promatra šest mogućih obuhvata (funkcija preferencije) zasnovanih na intenzitetu preferencije. Neke od njih dopuštaju netranzitivnost indiferencije, dok druge nude blagi prijelaz iz indiferencije u strogu preferenciju.

2) Procijenjena relacija „višeg ranga„ – upotreba kriterija definiranih na način kao što je definirano u prethodnoj točki dozvoljava konstrukciju procijenjene relacije „višeg

ranga“. Ova relacija je manje osjetljiva na male promjene parametara i njena interpretacija je jednostavna.

3) Korištenje relacije „višeg ranga“ – pod ovim pojmom razmatra se specifično korištenje procijenjene relacije višeg ranga, naročito u slučaju kada akcije moraju biti rangirane od najbolje do najgore. Metoda PROMETHEE I omogućava djelomično rangiranje akcija. Potpuno rangiranje dobije se pomoću metode PROMETHEE II.

Obuhvat kriterija temelji se na uvođenju funkcije preferencije, koja daje preferenciju donositelja odluke za akciju *a* u odnosu na akciju *b*. Ova će funkcija biti definirana za svaki kriterij posebno, a njezina će se vrijednost kretati između 0 i 1. Što je manja vrijednost funkcije, veća je indiferencija donositelja odluke. Što je ta vrijednost bliže 1, veća je njegova preferencija. U slučaju stroge preferencije, vrijednost funkcije preferencije bit će jednaka 1 (Mladineo, 2009).

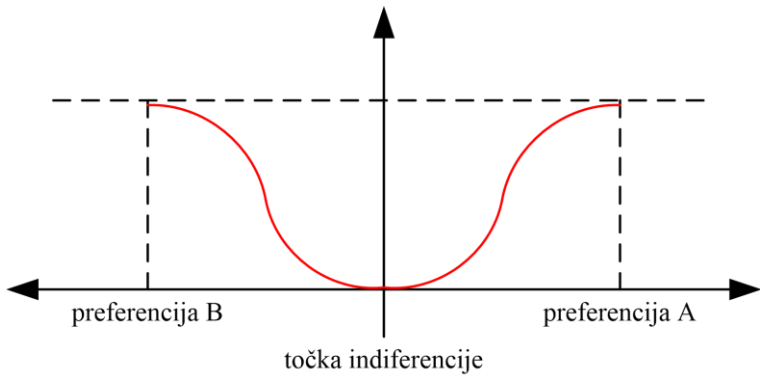
Neka je *f* određeni kriterij, dok su *a* i *b* dvije akcije (alternative) iz skupa akcija *A*. Pridružena funkcija preferencije *P(a,b)* od *a* u odnosu na *b* bit će definirana kao u izrazu 6.3. Za konkretne slučajeve potrebno je izabrati funkcije *p* tipa (izraz 6.4), kod kojih je *p* u ovisnosti o razlici između vrijednosti *f(a)* i *f(b)*. Područja indiferencije *d* u okolini *f(b)* definira se preko izraza 6.5, koji pak predočava funkciju *H(d)* (izraz 6.6) prikazanu na slici 6.1.

$$P(a,b) = \begin{bmatrix} 0 & ako\ je f(a) \le f(b) \\ p[f(a), f(b)] & ako\ je f(a) > f(b) \end{bmatrix} \tag{6.3}$$

$$p[f(a), f(b)] = p[f(a) - f(b)] \tag{6.4}$$

$$d = f(a) - f(b) \tag{6.5}$$

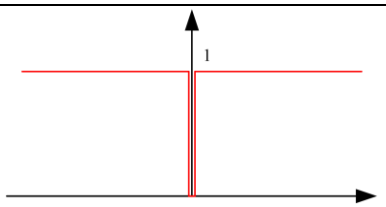
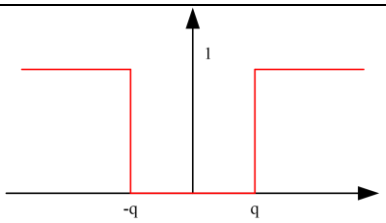
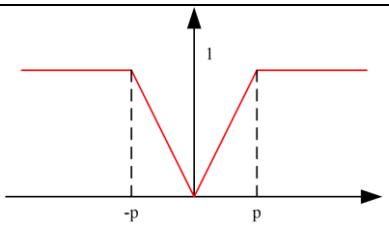
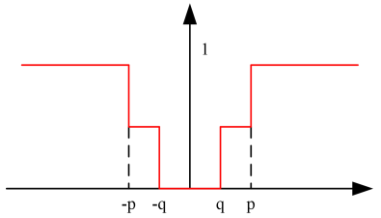
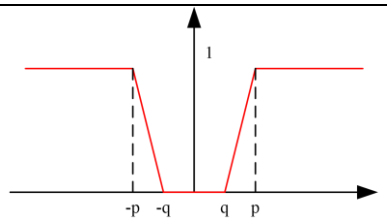
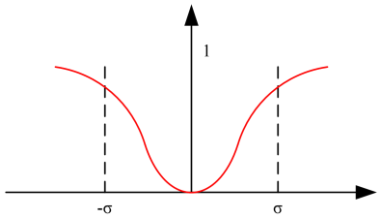
$$H(d) = \begin{bmatrix} P(a,b) ako\ je\ d \ge 0 \\ P(a,b)\ ako\ je\ d \le 0 \end{bmatrix} \tag{6.6}$$



Slika 6.1. *Prikaz funkcije H(d) (Mladineo, 2009)*

Istraživanja (Brans i sur., 1986; Mareschal, 2012) su pokazala da šest tipova funkcije preferencije obuhvaćaju većinu slučajeva koji se pojavljuju u praktičnoj primjeni, a za koje donositelj odluke mora definirati najviše dva parametra. To je jednostavan zadatak s obzirom na činjenicu da svaki parametar ima stvarno značenje. Tipovi kriterija prikazani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. *Tipovi kriterija preferencije s analitičkim definicijama i grafičkim prikazima*

TIP KRITERIJA	ANALITIČKA DEFINICIJA	GRAF	PARAMETRI ZA ODREĐIVANJE
Običan kriterij	$p(d) = \begin{cases} 0, d = 0 \\ 1, d \neq 1 \end{cases}$		-
Kvazikriterij	$p(d) = \begin{cases} 0, \lvert d \rvert < q \\ 1, \lvert d \rvert \geq q \end{cases}$		q
Kriterij s linearnom preferencijom	$p(d) = \begin{cases} \frac{\lvert d \rvert}{p}, \lvert d \rvert < q \\ 1, \lvert d \rvert \geq q \end{cases}$		p
Kriterij razina	$p(d) = \begin{cases} 0, \lvert d \rvert < q \\ 0.5, q < \lvert d \rvert < p \\ 1, \lvert d \rvert > q \end{cases}$		q, p
Kriterij s linearnom funkcijom preferencije i područjem indiferencije	$p(d) = \begin{cases} 0, \lvert d \rvert < q \\ \frac{\lvert d \rvert - q}{p - q}, q < \lvert d \rvert < p \\ 1, \lvert d \rvert > q \end{cases}$		q, p
Gaussov kriterij	$p(d) = 1 - e^{\frac{d^2}{2a^2}}$		σ

Kod običnog kriterija nema praga (parametra) za donošenje odluke. Ovaj kriterij ekvivalentan je postupku optimizacije (što je veća vrijednost, to je bolje za odabir pripadne varijante). Navedeni postupak je mjerodavan kod kriterija s malo različitih procjena. Ovo je čest slučaj kod kvalitativnih kriterija.

Kod kvazikriterija („U„ oblik funkcije preferencije *p*) prag (parametar) za donošenje odluke je *q*. Kod ovog kriterija uvodi se značaj praga (parametra) ili točke indiferencije.

Kod kriterija s linearnom preferencijom („V“ oblik funkcije preferencije *p*) prag (parametar) za donošenje odluke je *p*. „V“ oblik funkcije preferencije je poseban slučaj kriterija s linearnom funkcijom preferencije i područjem indiferencije gdje je $q = 0$. Ovaj kriterij pogodan je u onim slučajevima gdje je potrebno uzeti u obzir i najmanje odstupanje.

Kod kriterija razina pragovi (parametri) za donošenje odluke su *p* i *q*. Ova funkcija preferencije pogodnija je kod kvalitativnih kriterija gdje donositelj odluke želi postaviti stupanj preferencije u odnosu na odstupanje između razina usvajanja.

Kod već spomenutog kriterija s linearnom funkcijom preferencije i područjem indiferencije pragovi (parametri) za donošenje odluke su *p* i *q*. Linearna funkcija preferencije je najbolji slučaj za kvantitativni kriterij gdje je *q* u skladu s preferencijama (željama).

Kod Gaussovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je σ. Gaussova funkcija preferencije je zamjena za linearnu funkciju (prethodni kriterij). Ova funkcija ima zaglađeniji oblik, no u ovom slučaju teže ju je postaviti budući da se Gaussova funkcija oslanja na σ koja se nalazi između *q* i *p* i koja ima manje očitiju (vidljiviju) interpretaciju. Ova funkcija rijetko se koristi.

Drugi karakterističan segment za metodu PROMETHEE je procjena relacije „višeg ranga“. Za svaki par akcija $a,b \in A$, prvo se definira višekriterijski indeks preferencije za *a* u odnosu na *b*, za sve kriterije. Pretpostavlja se da je svaki kriterij identificiran kao jedan od razmotrenih tipova kriterija, tako da su funkcije preferencije $P_j(a, b)$ definirane za svaki $j = 1, 2,..., k$. Višekriterijski indeks preferencije $\Pi(a,b)$ definiran je izrazom 6.7, u kojem je *k* broj kriterija.

$$\Pi(a, b) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} P_j(a, b) \tag{6.7}$$

Ako se pretpostavi da se funkcije preferencije $P_j(a, b)$ i ponderi (težine) kriterija W_j specificiraju za svaki kriterij $j=1,..., k$, tada se za $\forall a, b \in A$ višekriterijski indeks preferencije $\Pi(a, b)$ definira prema izrazu 6.8, u kojem je W_i ponder (težina) kriterija.

$$\Pi(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^{k} W_j P_j(a,b)}{\sum_{j=1}^{k} W_j} \tag{6.8}$$

Kada se dobije procijenjena relacija „višeg ranga“ donositelj odluke ju može koristiti u sklopu trećeg karakterističnog segmenta metode PROMETHEE. Ako donositelj odluke želi rangirati akcije iz *A* od najbolje do najlošije, to je onda problem rangiranja. Ako donositelj odluke mora izabrati najbolje akcije iz *A*, govori se o problemu izbora. Budući da kod višekriterijskog problema općenito nema najboljeg rješenja, problem će se sastojati od određivanja skupa dobrih akcija iz *A*. U tu svrhu upotrebljavaju se dvije tehnike rješavanja problema rangiranja, pri čemu se rangiranjem može dobiti i skup dobrih akcija kao rješenje problema izbora. To su metode PROMETHEE I i PROMETHEE II.

Kod metode PROMETHEE I radi se o rangiranju akcija djelomičnim poretkom. Ako se definira procijenjena relacija „višeg ranga“ za svaki čvor *a*, na osnovi višekriterijskog indeksa preferencije za svaki $a \in A$ dobivaju se izlazni tok (izraz 6.9) i ulazni tok (izraz 6.10). Što je veći izlazni tok, to *a* više dominira nad ostalim akcijama iz *A*. Što je manji ulazni tok, to manje akcija dominira nad *a*. Neke akcije će biti usporedive, a neke neusporedive, tako da metoda PROMETHEE I daje djelomične relacije odnosno procijenjenu relaciju „višeg ranga„ koji donositelju odluke daje značajne informacije o odnosima među akcijama.

$$\Phi^{+}(a,b) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \in A} \Pi(a,x) \tag{6.9}$$

$$\Phi^{-}(a,b) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \in A} \Pi(x,a) \tag{6.10}$$

Kod metode PROMETHEE II radi se o rangiranju akcija potpunim poretkom (potpuno rangiranje bez neusporedivosti). Za svaku akciju $a \in A$ promatra se rezultirajući (netto) tok prema izrazu 6.11, koji se koristi u rangiranju akcija:

1) *a* ima viši rang od *b (aP(2)b)* ako i samo ako *Φ(a) > Φ(b)*
2) *a* je indiferentno *b (aI(2)b)* ako i samo ako *Φ(a) = Φ(b)*.

$$\Phi(a) = \Phi^{+}(a) - \Phi^{-}(a) \tag{6.11}$$

U metodi PROMETHEE II definirana je potpuna relacija kod koje su sve akcije iz *A* potpuno rangirane, uz napomenu da se kod ove relacije gubi dio informacija zbog balansirajućih efekata između izlaznog i ulaznog toka, što rezultira većim stupnjem apstrakcije (Mladineo, 2009).

6.2.1.2. Metoda GAIA

Pri korištenju metode PROMETHEE, za rješavanje problema višekriterijske analize, dva temeljna rezultata su:

1) parcijalni uređaj akcija, koji prikazuje odnose stroge dominacije među akcijama, ali ostavlja neke akcije međusobno neusporedivima
2) potpuni uređaj akcija (rangiranje svih akcija).

Međutim, postoje akcije koje se međusobno ne mogu usporediti (tj. od kojih se ne može strogo odabrati „bolja„ i „lošija„). Također postoji mogućnost da pri rangiranju akcija u potpuni uređaj razlike ukupnog toka među nekim akcijama budu vrlo male, što uvjetuje izvjesnu nepouzdanost potpunog rangiranja.

Zato se javlja potreba za dodatnom informacijom o „ponašanju“ akcija prema pojedinim kriterijima. Ovakva informacija omogućava donositelju odluke potpuniji uvid u odnos akcija prema kriterijima, olakšava predviđanja „što ako“ situacija i omogućava razumljivu i efektnu prezentaciju rezultata dobivenih korištenjem metode PROMETHEE.

Metoda GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) daje geometrijsku prezentaciju rezultata metode PROMETHEE, odnosno metoda PROMETHEE I i PROMETHEE II. Ideja na kojoj se zasniva program je svođenje višedimenzionalnog problema na dvodimenzionalni, kako bi se omogućila ravninska prezentacija.

Dimenzija višekriterijske analize određena je brojem kriterija (svaki kriterij određuje jedan vektor u takvom prostoru) i ako se želi vjerodostojna geometrijska prezentacija, problem je potrebno svesti u dvodimenzionalni prikaz (eventualni trodimenzionalni prikaz bio bi nepregledan). Pri ovom smanjivanju dimenzije nužan je izvjestan gubitak informacija o samom problemu. Da bi ovaj gubitak bio što manji, ravnina u kojoj se daje geometrijska prezentacija određena je dvama najvećim svojstvenim vrijednostima kovarijacijske matrice. Pri tome program daje podatak o postotku informacije koji takav prikaz daje. Osim pri izuzetno nepovoljnoj strukturi problema, geometrijska prezentacija daje dovoljno visok postotak informacija za analiziranje problema.

Također je moguće povezati metodu GAIA s metodom PROMETHEE II, koja zahtijeva da se svakom kriteriju pridruži određeni ponder (težina) W_j i definira kompletni poredak u skupu A. Ponderi (težine) također se mogu prikazati u (u,v) ravnini pomoću tzv. vektora odluke, koji su usmjereni u smjeru najbolje rangiranih aktivnosti. Na taj je način moguće interaktivnim mijenjanjem pondera promatrati promjene ranga dobivene metodom PROMETHEE II.

Opisanim načinom izbora ravnine za geometrijsku prezentaciju višekriterijskog problema postiže se minimalni gubitak informacije (u smislu metode najmanjih kvadrata), što znači da se (uz nužne izvjesne gubitke pri smanjenju dimenzije problema) čuvaju i „međusobni odnosi“ kriterija, kao i značaj svakog kriterija u odnosu na ostale. Konfliktni kriteriji će u ovakvoj prezentaciji imati bitno različit smjer (mala kovarijanca među kriterijima uzrokuje i malu vrijednost skalarnog produkta vektora koji ih prezentiraju), a međusobno suglasni kriteriji prezentirani su vektorima bliskog smjera.

Značaj kriterija za donošenje odluke geometrijski je reprezentiran duljinom vektora, tako da dominirajućim kriterijima odgovaraju i vektori veće apsolutne vrijednosti. Zbrajanjem vektora koji prezentiraju kriterije dolazi se do sumarnog vektora čiji smjer i iznos opisuju rezultantno djelovanje kriterija. Ako je sumarni vektor kriterija male apsolutne vrijednosti u odnosu na sumarni vektor drugog pojedinog kriterija, navedeno upućuje na zaključak o konfliktnosti kriterija.

6.2.2. Programski paket Visual PROMETHEE

Visual PROMETHE (VP) je jedan od najnovijih i najkompletnijih računalnih programa za implementaciju PROMETHEE i GAIA metoda za višekriterijsko odlučivanje. Razvoj je počeo 2010. godine u uredima VPSolutionsa, a razvoj je nadzirao profesor Bertrand Mareschal sa Sveučilišta u Bruxellesu. Većina razvoja obavljena je tijekom 2011. i 2012. godine. Snažan naglasak usmjeren je kvaliteti i dosljednosti korisničkog sučelja, vizualnim aspektima i jednostavnosti korištenja programa, uz primjenu najnovijih i najnaprednijih dostignuća iz područja višekriterijskih potpora odlučivanju. VP je jedini softver temeljen na PROMETHEE metodi koji podržavaju autori metodologije: prof. Jean-Pierre Brans i prof. Bertrand Mareschal.

VP je dostupan u 4 različita izdanja (razina licence): demo, akademsko, poslovno i *online*. Akademsko izdanje namijenjeno je za pomoć pri izradi doktorskih disertacija i neprofitni istraživački rad u akademskim institucijama i istraživačkim centrima pa je zato u ovom radu kao alat korišten programski paket Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4. (Mareschal, 2014).

U svrhu jednostavnijeg praćenja opisa programa VP, u nastavku je popis terminologije koja će se koristiti:

- Akcija (engl. *Action*) koristi se za označavanje moguće odluke ili stavke koju treba ocijeniti.

- Kategorija (engl. *Category*) akcije definira podskup radnji koje u analizi imaju isti simbol i boje.
- Klase (engl. *Classes*) predstavljaju vrste radnji (profila) u kontekstu razvrstavanja. Cilj je dodijeliti svaku radnju jednoj klasi.
- Klaster (engl. *Cluster*) definira podskup kriterija unutar jedne ili nekoliko skupina kriterija. To je najviša razina hijerarhije unutar Visual PROMETHEE.
- Koalicija (engl. *Coalition*) je skupina donositelja odluka. Scenariji u istoj koaliciji dijele istu boju, boju ispune i oblik za lakšu identifikaciju u PROMETHEE i GAIA analizama.
- Kriterij (engl. *Criterion*) je atribut povezan sa svakom akcijom, a omogućava usporedbu akcija i određivanje najboljih. Može biti kvantitativan (broj povezan sa svakom radnjom, poput cijene predmeta) ili kvalitativan (u ovom slučaju kvalitativna ljestvica mora biti definirana s više razina, kao što su npr. vrlo loše, loše, prosječno, dobro, vrlo dobro).
- Donositelj odluke (engl. *Decission-Maker*) je osoba ili organizacija koja je odgovorna za odluku ili sudjeluje u procesu odlučivanja.
- Grupa (engl. Group) kriterija definira podskup kriterija koji dijele istu boju obruba unutar skupine u analizi. Kriterijska skupina također se može „grupirati„ radi pojednostavljenja analize i olakšavanja analize osjetljivosti.
- Hijerarhija (engl. *Hierarchy*) u VP ima tri razine. Na vrhu su klasteri, u sredini grupe kriterija, a na dnu individualni kriteriji.
- Funkcija preferencije (engl. *Preference Function*) definira kako se razlike ocjenjivanja u parovima prevode u stupnjeve sklonosti, odnosno ona odražava percepciju kriterija ljestvice od strane donositelja odluka. U VP-u dostupno je šest različitih oblika preferencijalnih funkcija za prilagodbu većine praktičnih situacija (tablica 6.1). Unutar VP-a dostupan je pomoćnik za preferencijalne funkcije (engl. *Preference Function Assistant*) za pomoć u odabiru ispravne funkcije preferencija.
- Kvalitativni kriteriji (engl. *Qualitative criteria*) ocjenjuju se na kvalitativnoj ljestvici, a ne brojevima. U VP-u kvalitativna ljestvica je definirana razinama (od najgoreg do najboljeg) ili numeričkim vrijednostima povezanima s tim razinama, a te numeričke vrijednosti trebaju minimizirati ili maksimizirati (orijentacija na skali).
- Scenarij (engl. *Scenario*) je skup evaluacijskih i preferencijalnih parametara koji su definirani za problem s odlukom. Scenariji mogu predstavljati gledišta različitih donositelja odluka ili različite hipoteze.

- Težina ili ponder (engl. *Weight*) kriterija je pozitivan broj koji predstavlja relativnu važnost kriterija. Težine se također mogu rasporediti na scenarije, na primjer, kako bi prikazali različite razine odlučivanja u problemu grupne odluke. U VP težine se uvijek automatski normaliziraju tako da njihov zbroj bude jednak 1 (100 %), a korisnik može kao težinu unijeti bilo koji pozitivni broj.

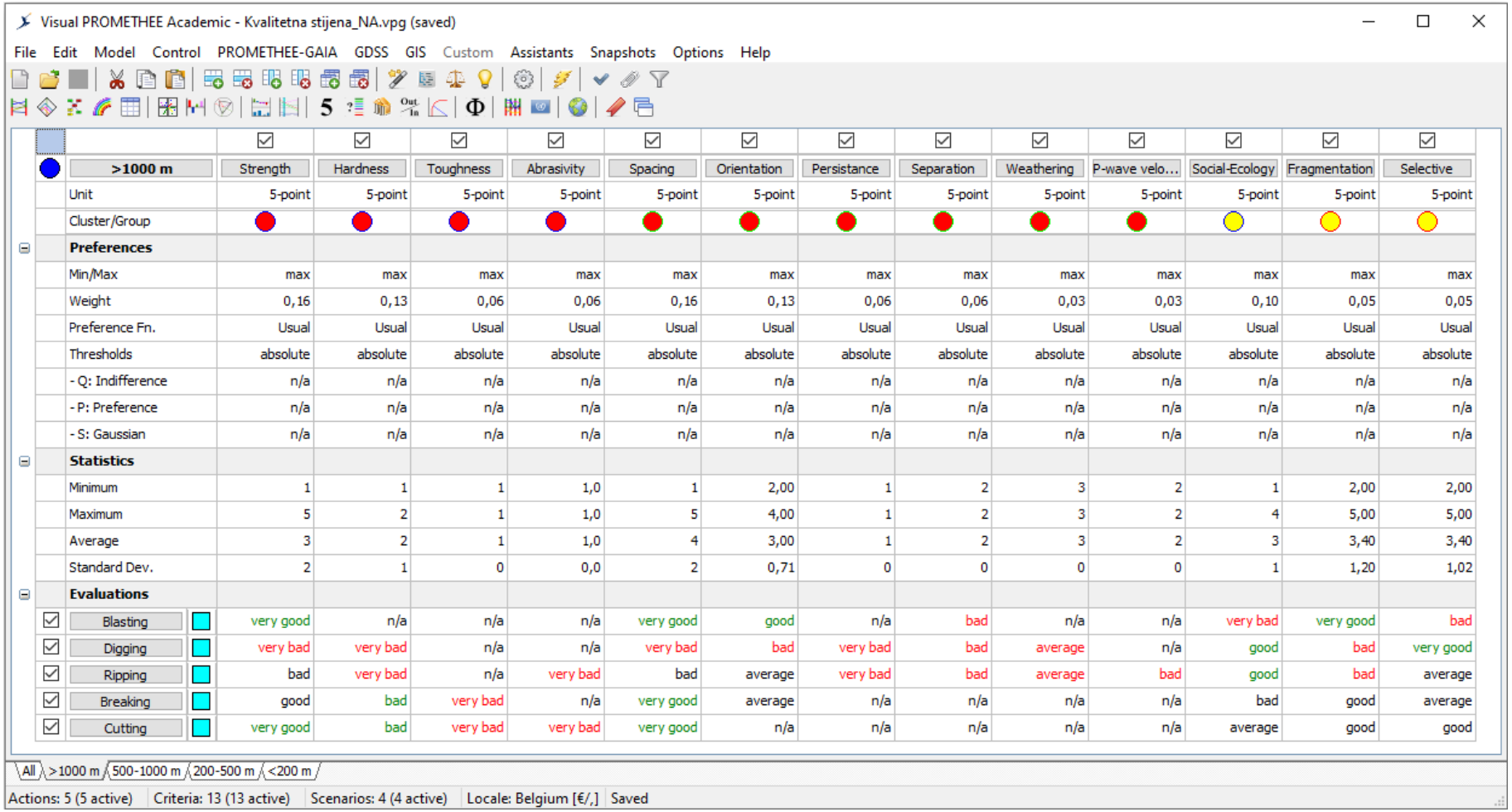
6.2.2.1. Glavni prozor

Na slici 6.2 glavni je prozor (engl. *Main Window*) računalnog programa Visual PROMETHEE, a organiziran je kako slijedi, od vrha do dna:

- Glavni izbornik (engl. *Main Menu*) prikazan je na vrhu prozora.
- Potom su dvije alatne trake (engl. *Toolbars*) s važnim komandama:
  - upravljanje podacima u gornjem retku
  - upravljanje analizama u donjem retku.
- Najvažniji dio prozora je proračunska tablica (engl. *Spredsheet*):
  - prikazana je većina podataka koji se mogu uređivati u tablici;
  - na vrhu sekcije ime je trenutnog scenarija koji se korsti (> 1000 m, na slici 6.2), imenima kriterija, kontrolnim kućicama aktiviranosti kriterija, jedinicama i klasterima/grupama
  - proračunska tablica sadrži tri odjeljka: postavke (engl. *Preferences*), statistika (engl. *Statistics*) i evaluacije (engl. *Evaluations*).
- Na dnu proračunske tablice nalaze se kartice scenarija.
- Na dnu glavnog prozora prikazana je statusna traka s općenitim podacima koji se odnose na trenutni problem (dimenzije, lokalitet i status spremanja).

Visual PROMETHEE glavni izbornik ima standardnu organizaciju, a sastoji se od sljedećih kartica:

- Datoteka (engl. *File*) omogućuje kreiranje novih projekata (engl. *New*), otvaranje postojećih VP datoteka (engl. *Open*), spremanje datoteka (engl. *Save/Save as*), uvoz (engl. *Import*) i izvoz (engl. *Export*) podataka i sl.
- Uređivanje (engl. *Edit*) je standardni uređivački izbornik koji obuhvaća rezanje (engl. *Cut*), kopiranje (engl. *Copy*), lijepljenje (engl. *Paste*), odabir (engl. *Select*), dupliciranje (engl. *Duplicate*).
- Model (engl. *Model*) omogućava pristup različitim komponentama trenutnog problema. Odavde se može uređivati većina podataka, poput informacija, akcija, kriterija, scenarija, klasa, hijerarhije, težina, kategorija, grupa, klastera i koalicija.



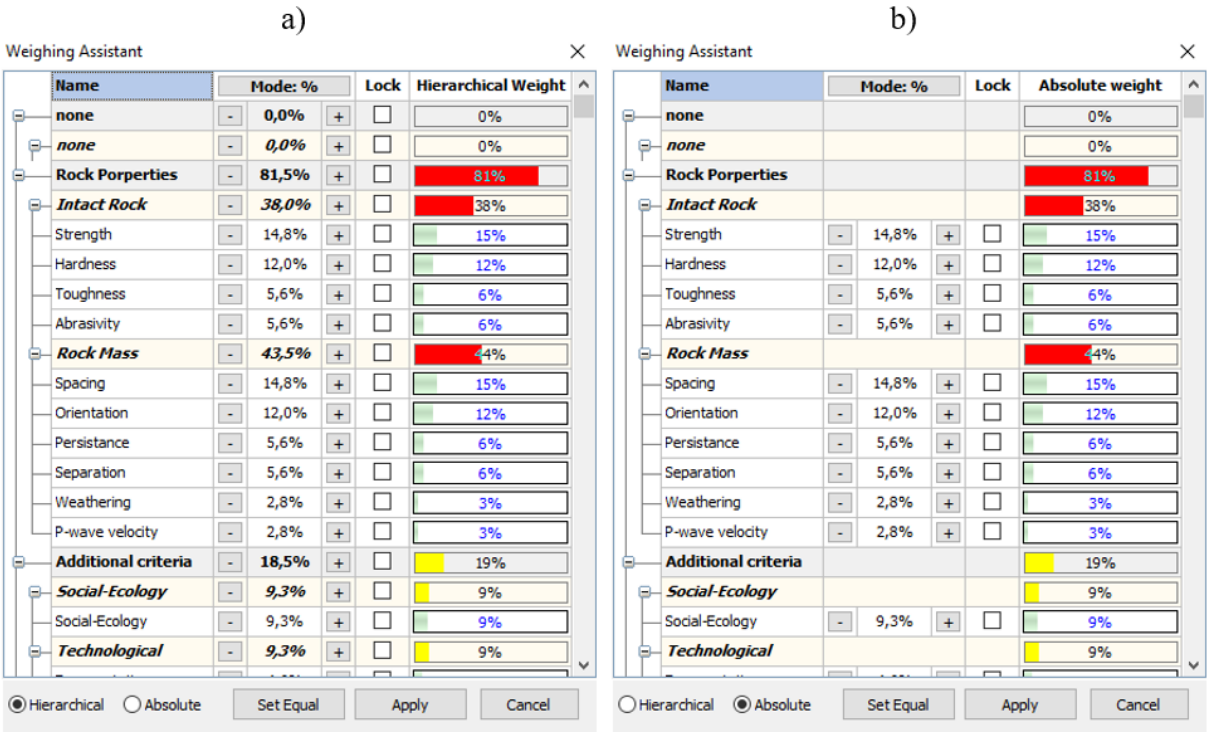
Slika 6.2. *Glavni je prozor (engl. Main Window) računalnog programa Visual PROMETHEE s primjerom seta podataka za odluku o primjenjivosti tehnologija otkopavanja stijenske mase*

- Kontrola (engl. *Control*) omogućava otvaranje centra aktivnosti, prozora za grupiranje, filtriranje (aktiviranje/deaktiviranje) akcija prema vrijednostima kriterija, sortiranje akcija, kriterija i dr.
- Izbornik PROMETHEE-GAIA omogućava pristup svim rezultatima analiza, o čemu će više podataka biti u nastavku.
- GDSS (engl. *Group Decision Support System*) je specijalizirani izbornik koji omogućava usporedbu rezultata različitih scenarija i davanje težina različitim scenarijima.
- GIS (engl. *Geographical Information System*) je specijalizirani izbornik koji omogućava integraciju PROMETHEE-GAIA analiza s Google kartama.
- U izborniku *prilagodba* (engl. *Custom*) nalaze se prilagođene funkcije dostupne u specijaliziranim verzijama Visual PROMETHEE.
- Asistenti (engl. *Assistants*) pomažu kod kreiranja novih problema odluke, organizacije hijerarhije, dodjeljivanja težina kriterijima, boljeg razumijevanja rezultata analiza.
- Snimke (engl. *Snapshots*) omogućuju spremanje do pet različitih raspodjela težina za jednostavniju usporedbu te do pet različitih izgleda prozora za različite vrste analiza.
- Postavkama (engl. *Options*) određuje se jezik sustava, mjerne jedinice, broj decimalnih mjesta, mjesto pohrane na disku računala i sl.
- Pomoć (engl. *Help*) nudi korisnički priručnik te poveznice s *web*-stranicama proizvođača, registracija programa itd.

6.2.2.2. Alatne trake

Već je rečeno kako VP ima dvije alatne trake (engl. *Toolbars*) s važnim naredbama. Gornja alatna traka nudi direktne poveznice na tipične opcije za upravljanje pa tako omogućuje kreiranje novih problema (engl. *New*), otvaranje postojećih VP datoteka (engl. *Open*), spremanje datoteka (engl. *Save*), kopiranje (engl. *Copy*), lijepljenje (engl. *Paste*), dodavanje i brisanje akcija (engl. *Ad/Delete Action*), dodavanje i brisanje kriterija (engl. *Ad/Delete Criterion*), dodavanje i brisanje scenarija (engl. *Ad/Delete Scenario*), grupiranje i filtriranje (engl. *Grouping/Filter*) akcija/kriterija/scenarija te pristup asistentima. Asistent za kreiranje hijerarhije kriterija (engl. *Criteria Hierarchy Assistant*) pomaže kod kreiranja klastera i grupa kriterija. Asistent za kreiranje težina ili pondera (engl. *Weighing Assistant*) pomaže „vagati“ kriterije unutar hijerarhije kriterija, a može raditi na dva načina. Prvi je hijerarhijski način (engl. *Hierarchical mode*), kada se težine unose na svim razinama hijerarhije, a rezultirajući apsolutni

ponderi kriterija automatski se izračunavaju (slika 6.3.a). Drugi je apsolutni način (engl. *Absolute mode*), kada se težine unose samo na razini pojedinačnih kriterija, a rezultat ponderiranja skupina kriterija i grupa se automatski izračunava (slika 6.3.b).



Slika 6.3. *Asistent za kreiranje težina ili pondera: a) hijerarhijski način, b) apsolutni način*

Donja alatna traka uglavnom je zadužena za pristup upravljanju analizama, pristup svim rezultatima analiza. U ponudi je cijeli niz prikaza rezultata PROMETHEE analize (Rankings, Diamond, Network, Rainbow, Table), GAIA analize (Action Profiles, Walking Weights, Visual Stability Intervals) PROMETHEE V Selection, PROMETHEE Sort, Performance Analysis, Efficient Frontier, Preference Flows,… Međutim, nisu svi prikazi prikladni za sve vrste analiza. Tako je za prikazivanje rezultata analiza iz predmetne problematike odabrano nekoliko načina prikaza, a detaljnije su opisani u poglavlju 6.2.2.4.

6.2.2.3. Evaluacija kriterija unutar Visual PROMETHEE-a

Već je rečeno kako su kriteriji zapravo atributi povezani sa svakom akcijom, a omogućuju usporedbu i rangiranje akcija te određivanje najboljih. Tako kriterij može biti kvantitativan ili kvalitativan. Kvantitativni kriteriji vezani su za konkretne brojke. Takvi kriteriji mogu se koristiti npr. kod usporedbe 2 ili više hidrauličnih bagera. U tom slučaju kriteriji mogu biti npr. snaga motora i cijena stroja. Snaga se izražava konkretnom brojkom uz jednicu kW, a cijena je brojka vezana za neku valutu (engl. *Currency*), npr. euro ili kuna.

Međutim, kod uspoređivanja tehnologija otkopavanja stijenske mase (akcije) u odnosu na zančajke stijenske mase (kriteriji) puno je prihvatljivija kvalitativna evaluacija kriterija. Postoje četiri standardne kvalitativne ljestvice koje su unaprijed definirane unutar VP-a, a to su:

1) DA/NE jednostavna ljestvica s dvije razine.
2) Ljestvica utjecaja (engl. *impact*) – ljestvica s 5 razina koja se kreće od „vrlo niska“ (najbolja) do „vrlo visoka“ (najgora), a primjerena je npr. za okolišne ili društvene utjecaje.
3) 5-bodova je klasična skala od 5 razina, pri čemu se utjecaj kriterija na akciju ocjenjuje ocjenama od 1 do 5. 5 je „vrlo dobro/very good„, 4 „dobro/good„, 3 „srednje/average„, 2 „loše/bad“ i 1 „vrlo loše/very bad“.
4) 9-bodova je proširena skala 5-bodova, na način da su dodane međurazine.

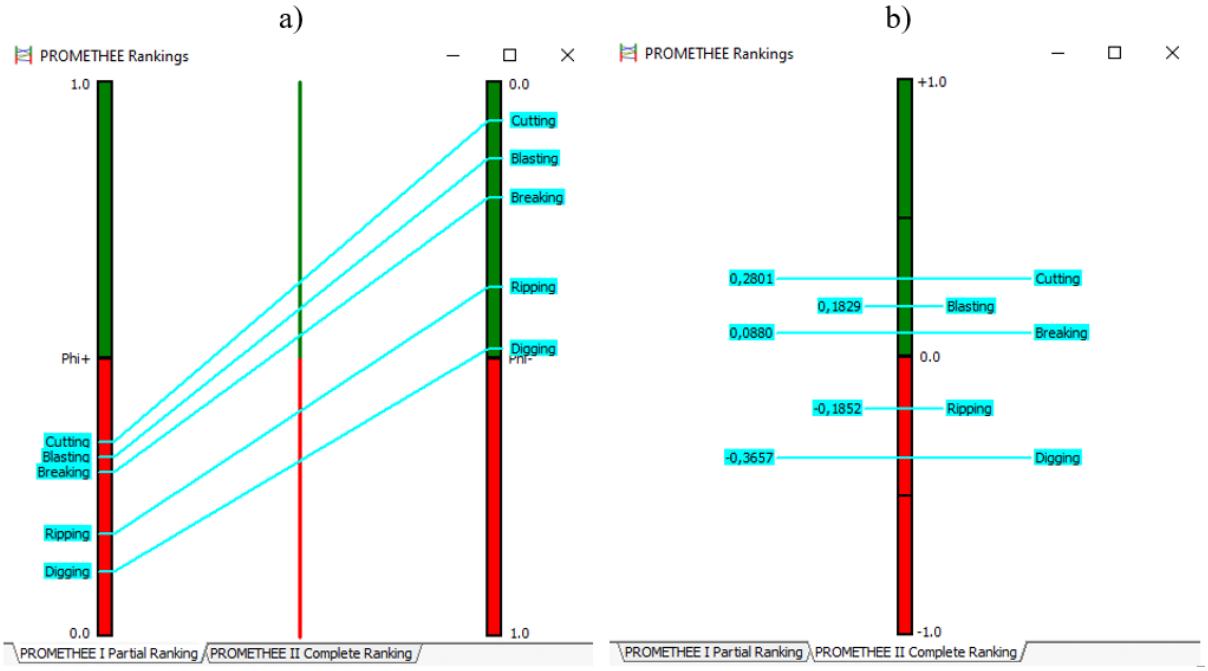
6.2.2.4. Prikaz rezultata PROMETHEE-GAIA analiza

Metoda PROMETHEE rangiranjem daje skup dobrih akcija kao rješenje problema izbora. Kod metode PROMETHEE I radi se o rangiranju akcija djelomičnim poretkom, a kod metode PROMETHEE II radi se o rangiranju akcija potpunim poretkom (potpuno rangiranje bez neusporedivosti). Na osnovi višekriterijskog indeksa preferencije računaju se preferencijalni tokovi, radi konsolidacije rezultata parova akcija koje se uspoređuju i rangiranja svih akcija od najboljih do najgorih. Tri su različita preferencijalna toka (poglavlje 6.2.1.1.):

1) *Phi*+ (Φ^+) je pozitivni ili izlazni tok (izraz 6.9). Što je *Phi*+ veći, to je akcija bolja.
2) *Phi*- (Φ^-) je negativni ili ulazni tok (izraz 6.10). Što je *Phi*- manji, to je akcija bolja.
3) *Phi* (Φ) je neto tok, odnosno ravnoteža između pozitivnih i negativnih tokova (izraz 6.11). Što je *Phi* veći, to je akcija bolja.

PROMETHEE Rankings prikazuje PROMETHEE I i II ljestvice na dvije odvojene kartice. Djelomični poredak PROMETHEE I temelji se na usporedbi izlaznog (*Phi*+) i ulaznog toka (*Phi*-). Na slici 6.4.a lijevi stupac odgovara *Phi*+ rezultatima, a desni stupac *Phi*- rezultatima. Usmjereni su tako da su najbolji rezultati gore. Na taj način srednji stupac odgovara neto protoku (Φ). Za svaku akciju crta se linija od njezinog *Phi*+ rezultata do *Phi*- rezultata. Kad je neka linija iznad druge, to znači da je odgovarajuća akcija bolja. Stoga je ova akcija poželjnija u odnosu na drugu. Na primjer, u ovdje prikazanom primjeru na slici 6.4.a, akcija „Cutting“ je preferirana pred svim ostalim akcijama. Ako se dvije linije presijecaju, rangovi su različiti, a dvije akcije su neusporedive (nije dobra karakteristika modela).

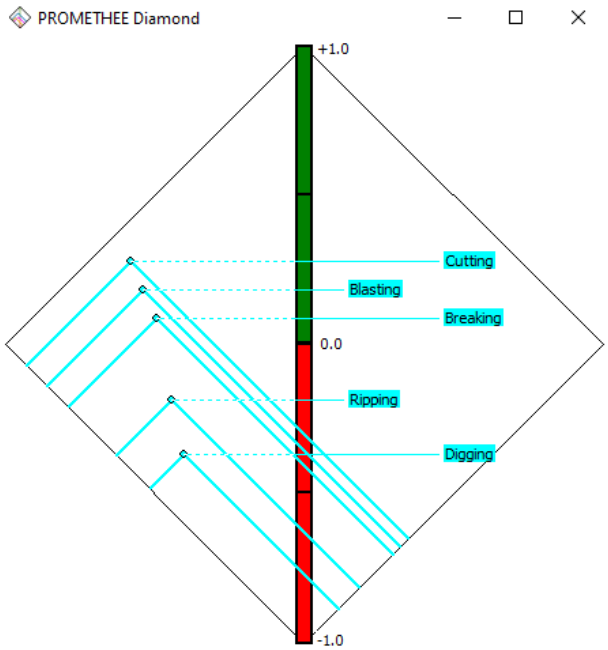
Kompletni poredak PROMETHEE II temelji se na neto protoku *Phi*. Na slici 6.4.b gornja polovica skale (u zelenoj boji) odgovara pozitivnim rezultatima, a donja polovica (crveno) negativnim rezultatima. Na primjeru prikazanom na slici 6.4.b ističu se dvije grupe akcija. U zelenom (pozitivnom) području su „Cutting“, „Blasting“ i „Breaking“ što znači da su te akcije prihvatljive za postavljene kriterije, a preferencija je na „Cutting“. Druga grupa („Ripping“ i „Digging“) je u crvenom (negativnom) području što znači da su te akcije neprihvatljive za postavljene kriterije, a najlošija akcija je „Digging“.



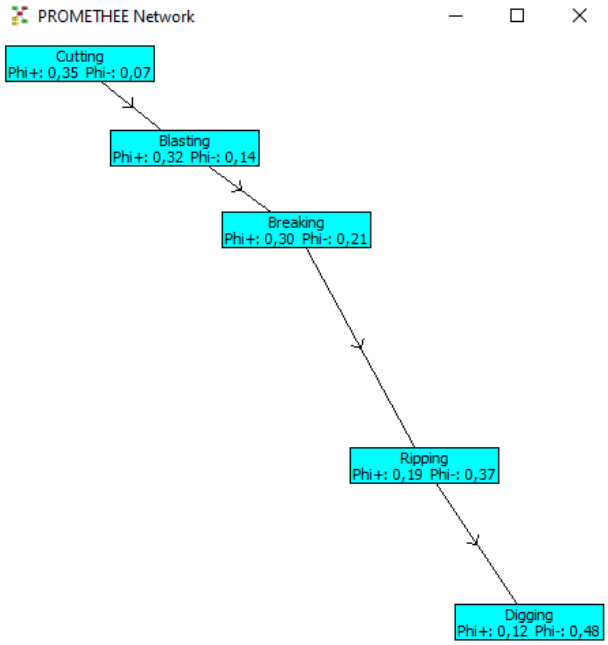
Slika 6.4. *Prikaz rezultata PROMETHEE analize: a) PROMETHEE I djelomični poredak; b) PROMETHEE II kompletni poredak*

PROMETHEE Diamond je alternativni prikaz PROMETHEE I i II poredaka. Prikazuje oba poretka u jednom dvodimenzionalnom prikazu. Svaka akcija predstavljena je kao točka u (Phi+, Phi-) ravnini, koja je pod kutom od 45°, tako da vertikalna dimenzija (zeleno-crvena os) odgovara *Phi* neto toku (slika 6.5).

PROMETHEE Network je alternativni prikaz rangiranja PROMETHEE I. U tom prikazu svaka je akcija predstavljena kao čvor, a preferencije su strelice. Čvorovi su smješteni u relativnim položajima koji odgovaraju prikazu PROMETHEE Diamond, tako da se udaljenosti između vrijednosti toka jasno pojavljuju (slika 6.6). PROMETHEE Table je tablica u kojoj su akcije rangirane prema PROMETHEE II kompletnoj ocjeni. Prikazani su rezultati *Phi*, *Phi*+ i *Phi*- (slika 6.7).



Slika 6.5. *PROMETHEE Diamond prikaz rezultata PROMETHEE I i II analize*



Slika 6.6. *PROMETHEE Network prikaz rezultata PROMETHEE I analize*

Prozor GAIA prikazuje rezultate GAIA analize (slike 6.8 i 6.9). Prozor nudi brojne opcije, a važnije su:

- Tipke na vrhu – A kontrolira prikaz akcija, C kontrolira prikaz kriterija, Pl kontrolira prikaz osi odluke, 3D kontrolira prikaz (2D ili 3D), a tu je i približavanje i udaljavanje pogleda
- u, v, w padajuće liste kontroliraju prikazane osi

- 2D views za kontrolu 2D prikaza (slika 6.8)
- 3D kontrole koriste se za promjenu orijentacije 3D prikaza (slika 6.9).

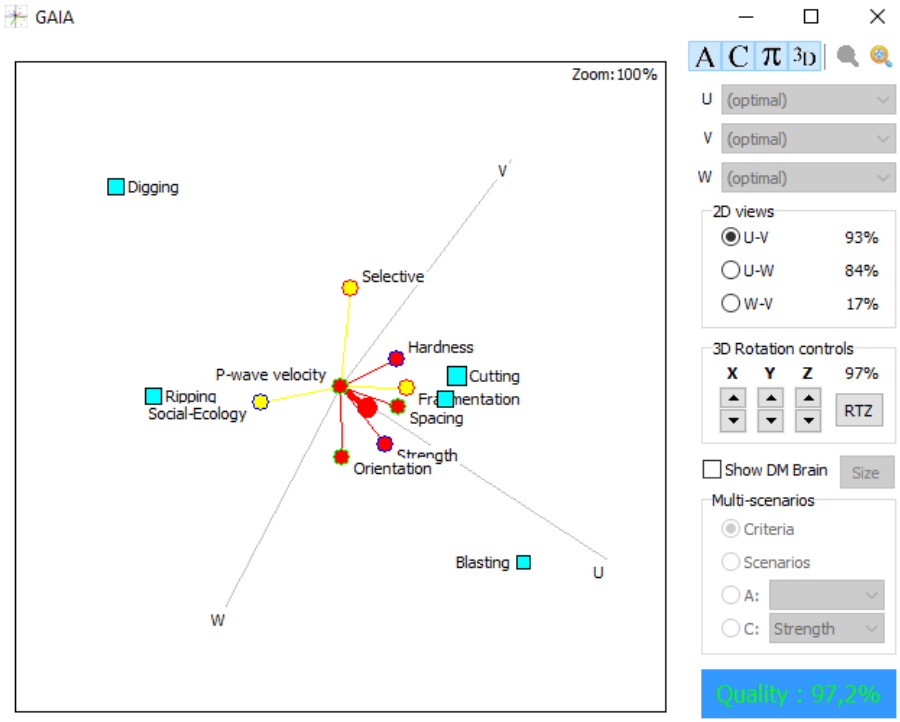
U donjem desnom dijelu prozora prikazan je postotak kvalitete GAIA analize (slike 6.8 i 6.9). Zelena boja označava zadovoljavajuću razinu kvalitete, dok crvena odgovara preniskoj razini.

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Cutting	0,2801	0,3495	0,0694
2	Blasting	0,1829	0,3218	0,1389
3	Breaking	0,0880	0,2963	0,2083
4	Ripping	-0,1852	0,1852	0,3704
5	Digging	-0,3657	0,1157	0,4815

Slika 6.7. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize*

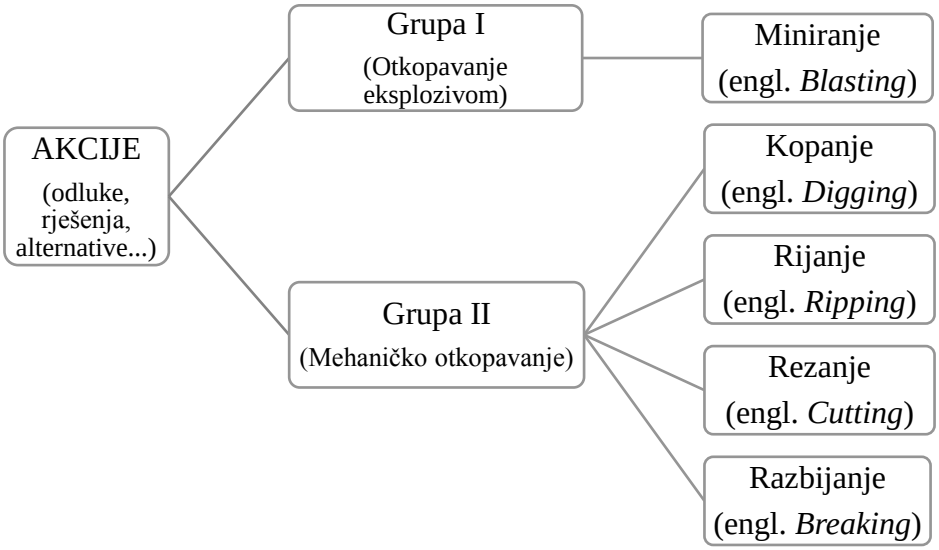
Slika 6.8. *2D prikaz rezultata GAIA analize, u ravnini u-v*



Slika 6.9. *3D prikaz rezultata GAIA analize*

6.2.3. Akcije za razvoj modela

Primjenom metode višekriterijske analize razvijen je model koji omogućuje rangiranje te procjenu primjenjivih i najprimjenjivije od svih dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na kvalitativne značajke intaktnog stijenskog materijala, strukturne značajke i značajke stijenske mase koja se planira otkopavati te postavljene uvjete otkopavanja. Tehnologije površinskog otkopavanja postaju akcije unutar višekriterijske analize. Akcije su podijeljene u dvije grupe, kako je prikazano na slici 6.10.

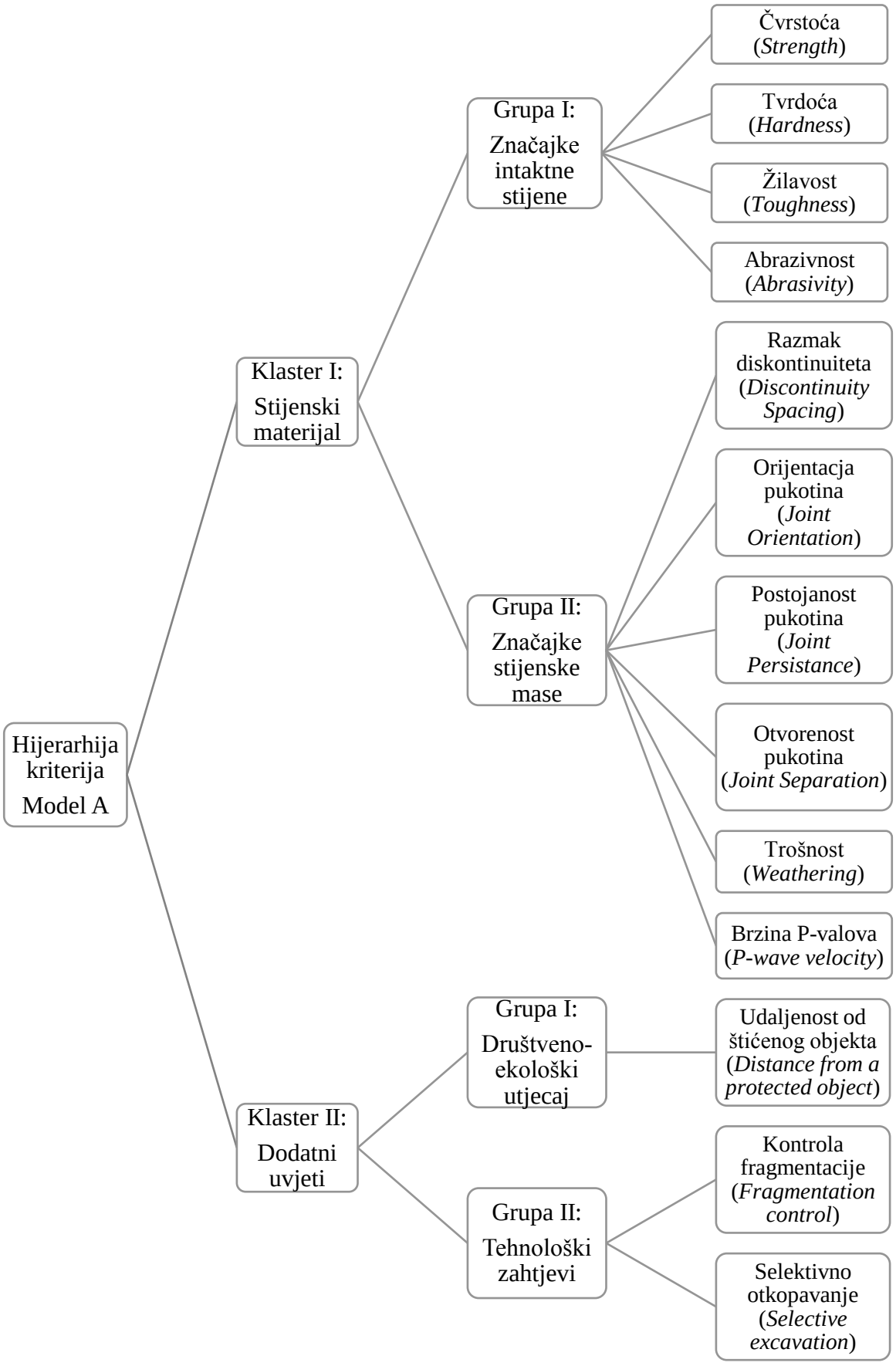


Slika 6.10. *Organizacija akcija u vidu tehnologija otkopavanja za višekriterijsku analizu*

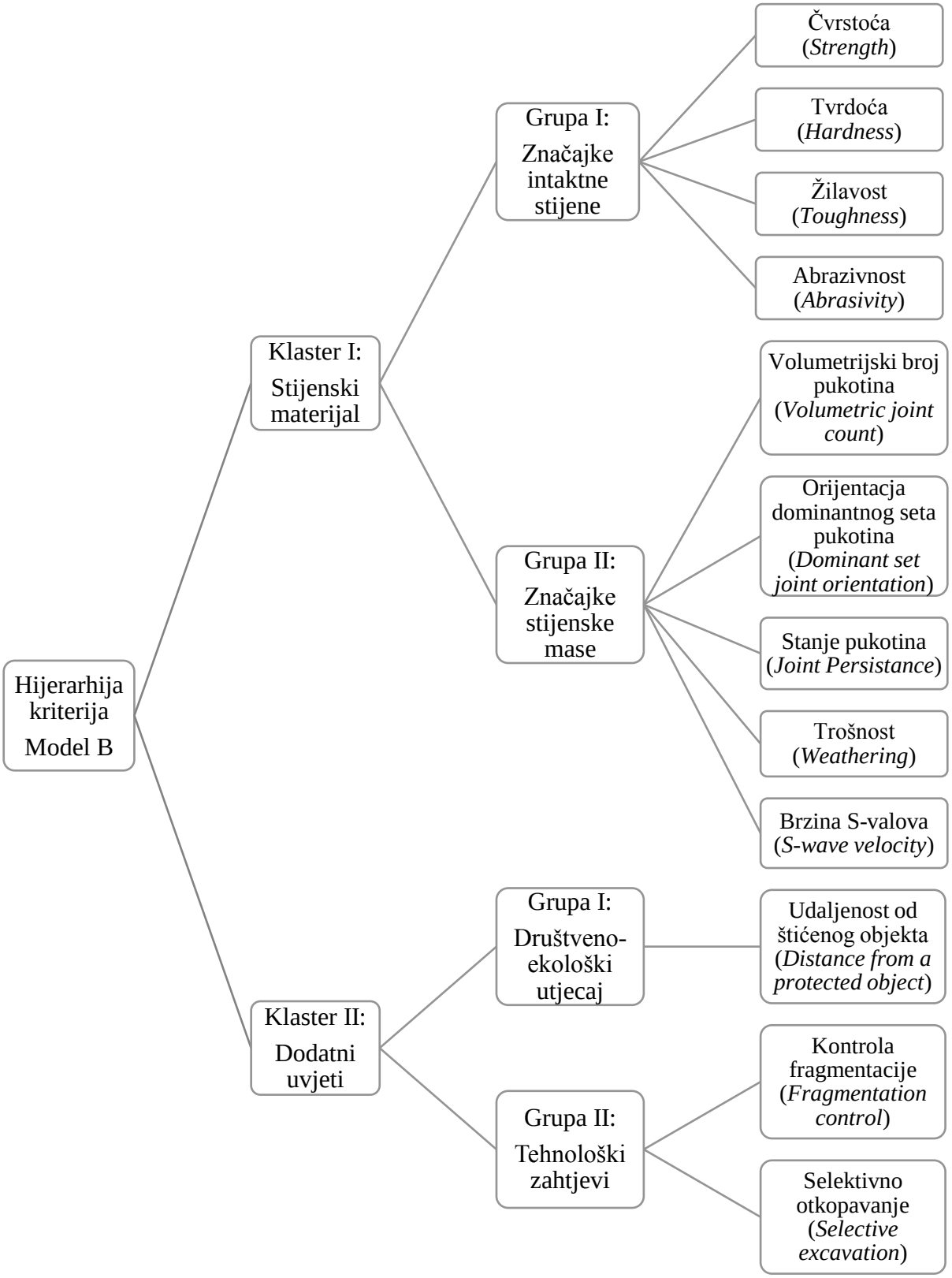
6.2.4. Kriteriji i scenariji modela

Značajke intaktnog stijenskog materijala, strukturne značajke i značajke stijenske mase te dodatni uvjeti koji utječu na otkopavanje (utjecaj na okoliš, tehnološki zahtjevi) su u ovom slučaju kriteriji koji će omogućiti usporedbu i rangiranje akcija. Po hijerarhiji su kriteriji podijeljeni u dva klastera, pri čemu se svaki klaster dijeli u dvije grupe. Što se tiče jedne grupe kriterija koji opisuju strukturne značajke i značajke stijenske mase unutar prvog klastera, kreirana su dva modela. U modelu A stijenska masa karakterizira se parametrima koji su izdvojeni na temelju dosadašnjih istraživanja (tablica 4.4.). U modelu B za karakterizaciju stijenske mase predlažu se izmjene parametara, kao rezultat zapažanja nastalih ovim doktorskim istraživanjem. Hijerarhija kriterija za model A prikazana je na slici 6.11, a za model B na slici 6.12.

Sukladno zapažanjima iz istraživanja prikazanih u poglavlju 5, predlaže se ažuriranje parametara koji opisuju strukturu i značajke stijenske mase (slika 6.12). U dosadašnjim istraživanjima o podatljivsti stijenske mase otkopavanju najčešće je u obzir uzimano šest parametara (tablica 4.4). Međutim, smatra se da je veličina blokova izuzetno važan indikator podatljivosti stijenske mase otkopavanju. Zato se umjesto razmaka pukotina uvodi volumetrijski broj pukotina J_v, koji objedinjuje tri parametra (DS, JP i NJS). Parametar orijentacije pukotina potrebno je dodatno konkretizirati, na način da se promatra orijentacija dominantnog seta diskontinuiteta. Takav set je u ovom slučaju onaj koji ima najveći odnos između postojanosti i razmaka pukotina. Rezultat velike postojanosti pukotina na malom razmaku je izrazito raspucana stijenska masa koju je lako otkopavati. Samo otvorenost pukotina nije dovoljan parametar za determinaciju utjecaja pukotina na ponašanje stijenske mase kod otkopavanja. Zato se predlaže određivanje stanja pukotina kako propisuje RMR klasifikacija (Bieniawski, 1989), gdje se boduje pet parametara (JP, JS, JRC, JF i JW) čiji zbroj daje konačnu ocjenu stanja diskontinuiteta. Umjesto P-valova predlaže se korištenje S-valova, što je već detaljno objašnjeno u poglavlju 5.



Slika 6.11. *Hijerarhija kriterija za Model A, sukladno prethodnim istraživanjima*



Slika 6.12. *Hijerarhija kriterija za Model B, sukladno novim istraživanjima*

Tablica 6.2 sadrži popis parametara, odnosno kriterija koji se koriste u modelu za višekriterijske analize, a opisuju značajke intaktnog stijenskog materijala, strukturne značajke i značajke stijenske mase. Svaki je parametar podijeljen u četiri kategorije, prema područjima vrijednosti.

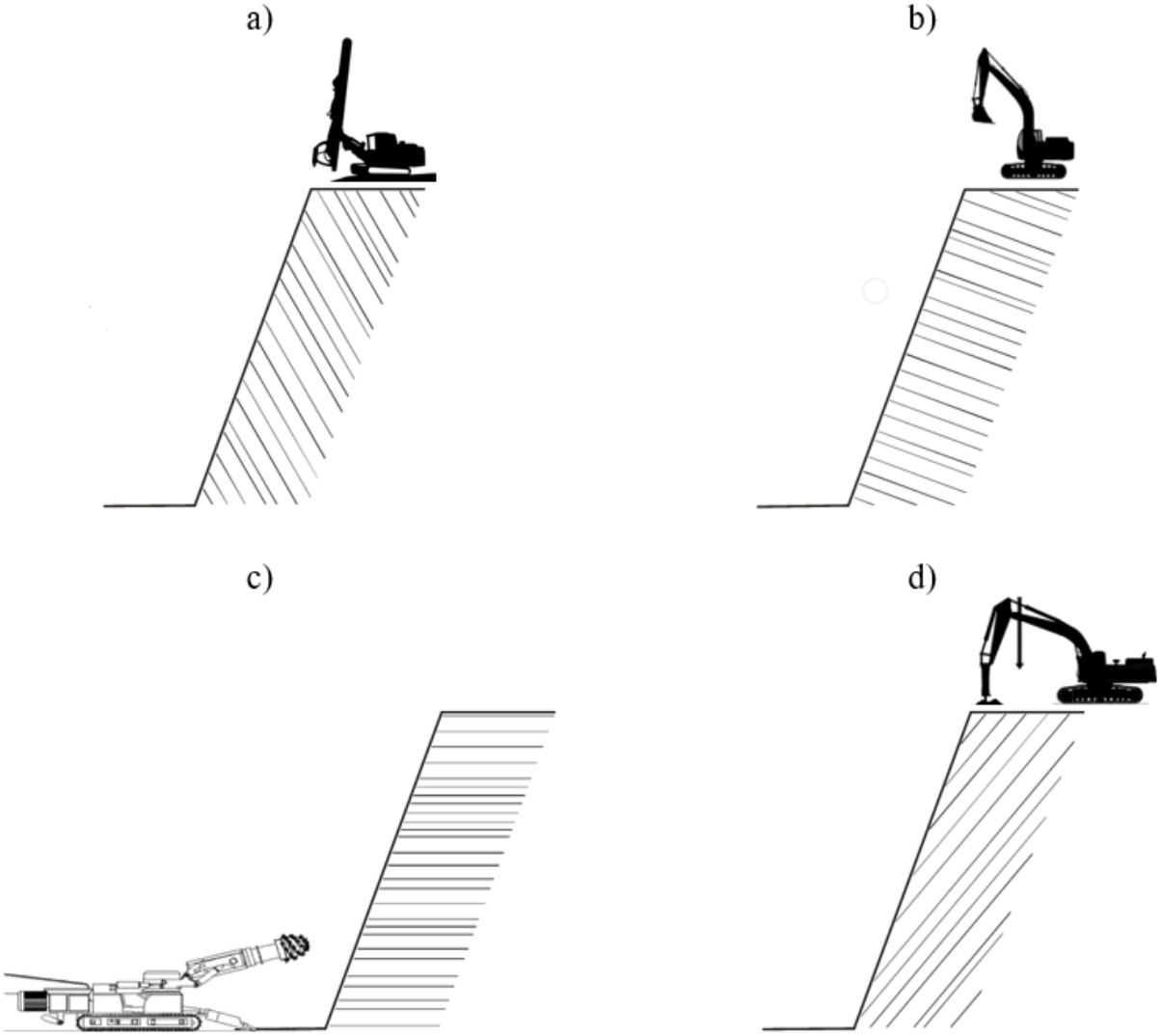
Tablica 6.2. *Popis kriterija za PROMETHEE analizu s kategorizacijom i vrijednostima*

Parametar za ocjenu podatljivosti stijene otkopavanju		Kategorizacija s područjima vrijednosti			
		Kategorija I	Kategorija II	Kategorija III	Kategorija IV
Intaktna stijena	Tlačna čvrstoća – σ_{ci} [MPa]	> 75	50 – 75	25 – 50	< 25
	Tvrdoća – odskok Schmidtovog čekića *H*	> 50	35 – 50	20 – 35	< 20
	Lomna žilavost – K_{IC} [MPa $m^{1/2}$]	> 3	2 – 3	1 – 2	< 1
	Abrazivnost – indeks abrazivnosti	> 65	30 – 65	10 – 30	< 10
Stijenska masa	Razmak pukotina – DS [m]	> 2	0,6 – 2	0,2 – 0,6	< 0,2
	Orijentacija pukotina – JO (dominantnog seta pukotina)	Izrazito nepovoljna	Nepovoljna	Srednje povoljna	Povoljna
	Postojanost pukotina – JP [m]	< 1	1 – 3	3 – 10	> 10
	Otvorenost pukotina – JS [m]	< 0,005	0,005 – 0,01	0,01 – 0,1	> 0,1
	Volumetrijski broj pukotina – J_v [pukotina/m^3]	< 3	3 – 10	10 – 30	>30
	Stanje pukotina prema RMR-u	> 24	16 – 24	8 – 16	< 8
	Stupanj trošnosti	Svježa (I)	Malo rastrošena (II)	Umjereno rastrošena (III)	Jako rastrošena (IV)
	Brzina P-valova kroz stijensku masu – V_P [m/s]	> 2500	2000 – 2500	1400 – 2000	< 1400
	Brzina S-valova kroz stijensku masu – V_S [m/s]	>1200	1000 – 1200	600 – 1000	< 600

Kategorizacija svih parametara, osim orijentacije pukotina, vrlo je jednostavna jer je riječ o brojčanim vrijednostima. Kategorizacija orijentacije je nešto zahtjevnija, budući da je potrebno detaljnije ući u problematiku načina primjene tehnologije otkopavanja, odnosno smjera napredovanja. Otkopavanje stijenske mase uglavnom se vrši formiranjem etaža pa općenito vrijedi:

- pad slojeva od etažne kosine izrazito je nepovoljna orijentacija (slika 6.13.a)

- pad slojeva okomito na etažnu kosinu nepovoljna je orijentacija pukotina (slika 6.13.b)
- horizontalne pukotine srednje su povoljne za potrebe otkopavanja (slika 6.13.c)
- pad slojeva prema etažnoj kosini najpovoljnija je orijentacija (slika 6.13.d).



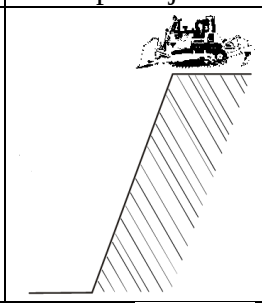
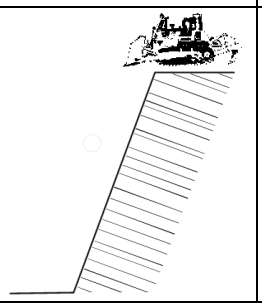
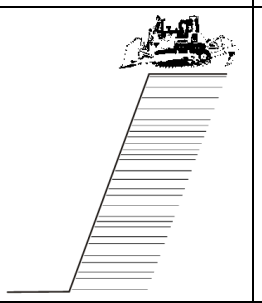
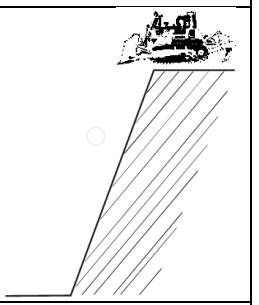
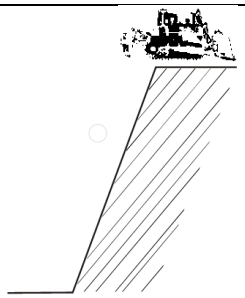
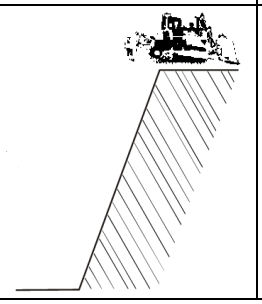
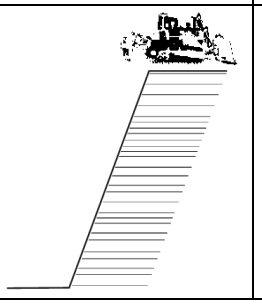
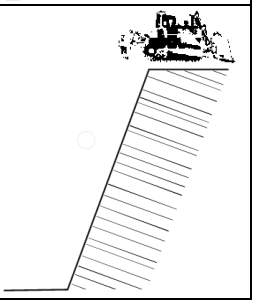
Slika 6.13. *Utjecaj orijentacije dominantnog seta pukotina na podatljivost stijenske mase otkopavanju: a) Izrazito nepovoljna; b) Nepovoljna; c) Srednje povoljna; d) Povoljna*

No, prilikom kategorizacije stijenske mase s obzirom na orijentaciju pukotina potrebna je velika opreznost. Primjerom u tablici 6.3 grafički je prikazano kako promjenom smjera rijanja izrazito nepovoljna orijentacija postaje povoljna, i obrnuto.

Dodatni kriteriji kreirani su kroz mogući društveno-ekološki utjecaj svake pojedine tehnologije otkopavanja te tehnološke zahtjeve otkopavanja. Tehnološki zahtjevi odnose se na kvalitetu kontrole fragmentacije i mogućnost selektivnog otkopavanja pojedine tehnologije. S druge strane, svaka tehnologija ima određenu razinu nepovoljnog utjecaja na okoliš, a tu prednjači miniranje pa se ocjenjuje i taj utjecaj. Što je mjesto otkopavanja radijusom dalje od nekog

štićenog objekta, to je manji nepovoljni utjecaj. Iz tog razloga su kreirana četiri moguća scenarija. U prvom scenariju štićeni objekt je više od 1000 m od mjesta otkopavanja, u drugom je objekt na radijusu 500 – 1000 m od mjesta otkopavanja, u trećem 200 – 500 m, a u četvrtom scenariju mjesto otkopavanja je na udaljenosti manjoj od 200 m.

Tablica 6.3. *Međuovisnost smjera otkopavanja i orijentacije pukotina na primjeru rijanja*

Smjer otkopavanja	Orijentacija pukotina			
	Izrazito nepovoljna	Nepovoljna	Srednje povoljna	Povoljna
←				
→				

6.2.5. Evaluacija kriterija u modelu

Usporedba i rangiranje akcija te određivanje najboljih omogućeni su pomoću kriterija. Kod uspoređivanja tehnologija otkopavanja stijenske mase (akcije) u odnosu na značajke stijenske mase (kriteriji) korištena je „kvalitativna“ evaluacija kriterija, budući da je cilj doktorskog istraživanja bio razviti općeniti model koji će omogućiti „kvalitativnu“ procjenu primjenjivosti dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na značajke čvrste stijenske mase koja se planira otkopavati. Pritom je korištena klasična kvalitativna skala od 5 razina, odnosno 5 bodova (poglavlje 6.2.2.3). Kvalitativna evaluacija kriterija koji opisuju značajke stijenske mase prikazana je u prilogu 3, a nastala je na temelju zapažanja iz prethodnih istraživanja (poglavlje 3), specifičnosti tehnologija otkopavanja (poglavlje 4) i provedenih istraživanja (poglavlje 5). Pogledom u tablicu 4.4 vidljivo je kako neke akcije nisu u odnosu s pojedinim kriterijima, odnosno ne djeluju pa su takve veze označene kao „n/a“ (engl. *not acting*), zbog čega je to uzeto u obzir kod evaluacije kriterija za model A. U modelu B za karakterizaciju stijenske mase predložene su izmjene parametara te se predloženi kriteriji svi evaluiraju,

odnosno dovode u vezu sa svim akcijama. Za brži postupak unutar MS Excel programa izrađena je aplikacija za automatsku evaluaciju na temelju unesenih vrijednosti kriterija pomoću „IF“ funkcije koja omogućuje logičko uspoređivanje između vrijednosti i očekivane vrijednosti (tablice 6.4 i 6.5).

Tablica 6.4. *Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija izrađenu unutar MS Excel programa:*

Evaluacija kriterija Modela A

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	Vrijednost (Value)	Jedinica (Unit)	Miniranje (Blasting)	Kopanje (Digging)	Rijanje (Ripping)	Rezanje (Cutting)	Razbijanje (Breaking)	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	80,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,13 (13%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	52,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,11 (11%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{Ic}) (Toughness)	1,60	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,05 (5%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	24,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,05 (5%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	1,20	m	very good	bad	average	very good	very good	0,10 (10%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	AVERAGE	1	very good	average	good	n/a	good	0,11 (11%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	2,50	m	n/a	bad	bad	n/a	n/a	0,05 (5%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,02	m	very good	n/a	very good	n/a	n/a	0,05 (5%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,03 (3%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	2500	m/s	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,03 (3%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	450	m	very bad	good	good	average	bad	0,2 (20%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

Tablica 6.5. *Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija izrađenu unutar MS Excel programa:*

Evaluacija kriterija Modela B

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	20,00	MPa	bad	very good	very good	average	bad	0,10 (10%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	21,00	1	n/a	average	average	good	good	0,08 (8%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	0,84	MPa m½	n/a	n/a	n/a	good	good	0,04 (4%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	3,00	1	n/a	n/a	good	good	n/a	0,04 (4%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	15	pukotina/ m^3	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	BAD	1	good	bad	average	average	average	0,10 (10%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	15	m	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	good	bad	average	good	average	0,10 (10%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_s)	1150	m/s	good	bad	average	good	very good	0,10 (10%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	250	m	very bad	good	good	average	bad	0,2 (20%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

Za evaluaciju dodatnih kriterija također je korištena klasična kvalitativna skala od 5 razina. S obzirom na mogući utjecaj tehnologija otkopavanja na kriterij društveno-ekološkog utjecaja veza s miniranjem ocijenjena je kao „vrlo loša (engl. *very bad*)“ kombinacija, razbijanje kao „loša (engl. *bad*)“, rezanje kao „srednje dobra (engl. *average*)“, a kopanje i rijanje kao „dobro (engl. *good*)“. Jasno je da primjena bilo koje tehnologije ima određeni utjecaj na okoliš pa se zato najbolja ocjena „vrlo dobro (engl. *very good*)“ ne pojavljuje. Tehnološke zahtjeve vezane uz kvalitetu kontrole fragmentacije najbolje zadovoljava miniranje pa je odnos te akcije s predmetnim kriterijem ocijenjen kao „vrlo dobar (engl. *very good*)“. Razbijanje i rezanje je „dobro (engl. *average*)“, a kopanje i rijanje „loše (engl. *bad*)“. S druge strane, odnos kopanja i dodatnog kriterija vezanog za mogućnost selektivnog otkopavanja ocijenjen je kao „vrlo dobar“, uz rezanje ide ocjena „dobro“, uz rijanje i razbijanje stoji ocjena „srednje dobro“, dok je najlošije ocijenjena kombinacija miniranje – selektivno otkopavanje, i to ocjenom „loše“. Evalucija dodatnih kriterija obuhvaćena je spomenutom aplikacijom za automatsku evaluaciju kriterija (donji dio tablica 6.4 i 6.5).

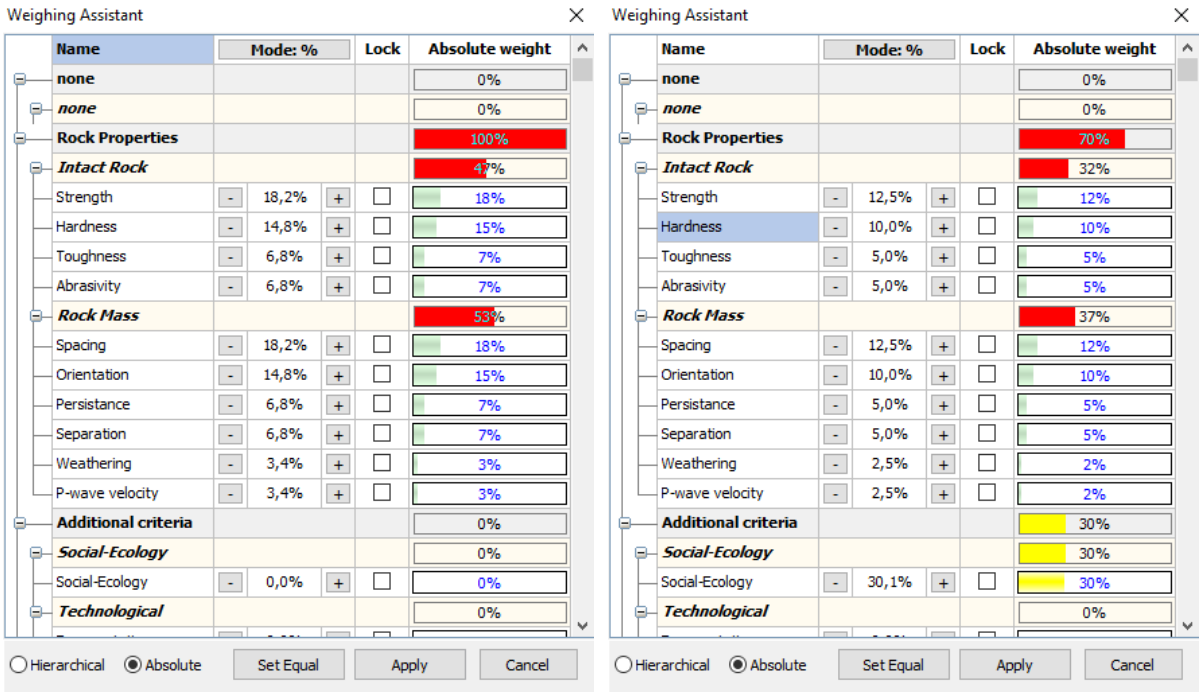
6.2.6. Težinski faktori kriterija i ostale postavke modela

Za kreiranje težina ili pondera kriterija unutar hijerarhije korišten je apsolutni način (engl. *Absolute mode*), jer su težine unesene na razini pojedinačnih kriterija, a rezultat ponderiranja skupina kriterija i grupa je automatski izračunavan.

Krenuvši od činjenice da je utjecaj na okoliš nekog zahvata sve značajniji problem modernog svijeta, najprije je razmatrano ponderiranje društveno-ekološkog (engl. *Social-ecology*) kriterija, na temelju kojeg su kreirana četiri moguća scenarija. U prvom scenariju štićeni objekt (umjetni ili prirodni, npr. stambena zgrada ili špilja) je više od 1000 m od mjesta otkopavanja pa je iskustveno procijenjeno kako nema opasnosti od značajnijeg utjecaja otkopavanja na okoliš, te se u takvom slučaju predmetni kriterij ponderira s 0 % (0,0), odnosno nema nikakvu težinu. U drugom scenariju objekt je na radijusu 500 – 1000 m od mjesta otkopavanja pa se društveno-ekološki kriterij ponderira s do 10 % (0,1). U trećem scenariju štićeni objekt je na udaljenosti 200 – 500 m pa je težinski faktor povećan na 20 % (0,2). U četvrtom scenariju mjesto otkopavanja je na udaljenosti manjoj od 200 m, što predstavlja prilično veliku opasnost za štićeni objekt te ponder u takvom slučaju može imati vrijednost do 30 % (0,3).

„Vaganje“ kriterija značajki stijenske mase je onda ovisno o udaljenosti između lokacije otkopavanja i štićenog objekta. Tako ukupan zbroj težina kriterija značajki stijenske mase može biti 100 % (slika 6.14.a) u slučaju prvog scenarija (udaljenost > 1000 m), ali i 70 % u slučaju četvrtog scenarija (udaljenost < 200 m), jer društveno-ekološkom pripada 30 % (slika 6.14.b).

a) b)



Slika 6.14. *Prozor asistenta za pomoć pri ponderiranju kriterija unutar Visual PROMETHEE-a: a) Scenarij 1; b) Scenarij 4*

Ponderiranje pojedinačnih kriterija za model A unutar grupa „Intaktna stijena“ i „Stijenska masa“ potom je izvršeno na temelju rezultata analiza prethodnih istraživanja, odnosno na temelju tablice 4.4, koja prikazuje koje su najčešće značajke stijenske mase koristili istraživači u svojim klasifikacijama i modelima za procjenu mogućnosti korištenja različitih tehnologija otkopavanja i njihove učinkovitosti. Iz zadnjeg retka tablice 4.4 vidljivo je kako su neki kriteriji zastupljeniji od drugih pa imaju i veću „težinu“. Tako su čvrstoća intaktne stijene i razmak diskontinuiteta u stijenskoj masi značajke koje su istraživači povezivali sa svim tehnologijama otkopavanja pa su ti paramteri najbolje ponderirani kao kriteriji (slika 6.14). S druge strane, trošnost stijenske mase i brzina seizmičkih valova u istraživanjima bili su slabije zastupljeni parametri kod procjene podatljivosti stijene otkopavanju, zbog čega je njihova težina najmanja (slika 6.14).

Unutar Modela B predloženi su zamjenski kriteriji unutar grupe „Stijenska masa“. Svim tim kriterijima dodijeljena je jednaka važnost, odnosno svi predloženi kriteriji jednako se ponderiraju.

U posljednjem stupcu proračunskih tablica 6.4 i 6.5 vidljivo je kako Excel aplikacija za automatsku evaluaciju kriterija omogućuje i ponderiranje pojedinačnih kriterija, nakon upisane vrijednosti udaljenosti iskopa od štićenog objekta. Težinski faktori obično imaju više decimala,

no unutar proračunske tablice vrši se zaokruživanje na dvije decimale, pošto VP zahtijeva ulazni podatak takvog oblika. Kao rezultat zokruživanja ukupan zbroj neće uvijek biti 1, odnosno 100 %. Međutim, takva pogreška je prihvatljiva jer se ispravlja automatski posredstvom asistenta za kreiranje težina ili pondera unutar VP-a.

Osim „vaganja“ prozor postavki (engl. *Preferences*) unutar VP-a zahtijeva i druga postavljanja, poput tipa funkcije preferencije (engl. *Preference Function*), za što je odabrana obična funkcija jer je najprimjerenija za kvalitativne kriterije (poglavlje 6.2.1.1). Pragovi (engl. *Tresholds*) omogućuju apsolutni (pragovi izraženi na mjernoj skali mjerenja) ili postotni (pragovi izraženi u postocima) prikaz kriterija. Za ocjenu kriterija u retku „Min/Max“, odabrano je „Max“ jer su kvalitativne ljestvice (koje se koriste u ovom slučaju) postavljene tako da ih treba maksimizirati. Suprotan slučaj bi bio da je riječ o nekom kriteriju koji izražava npr. cijenu.

6.3. Validacija modela

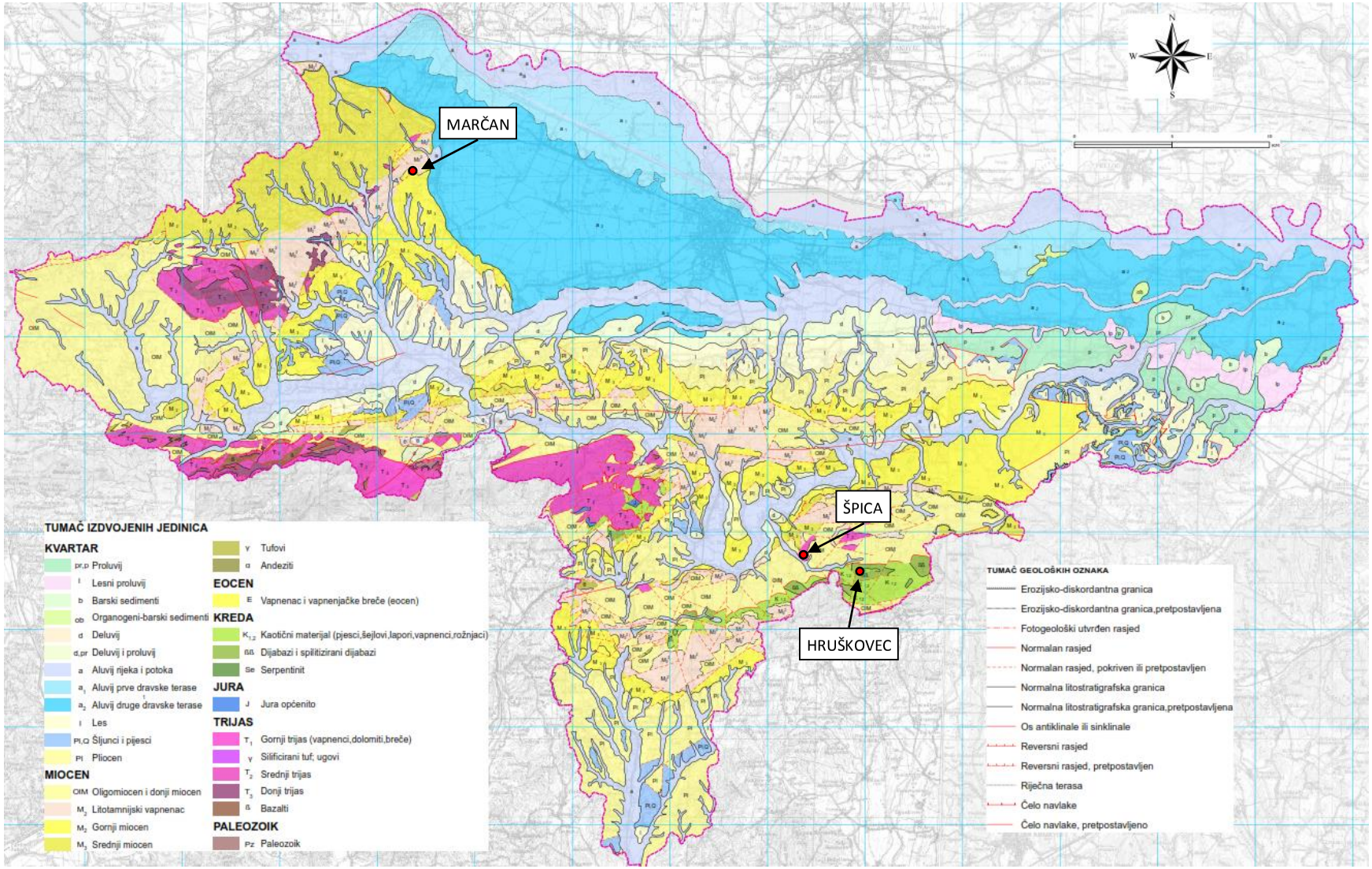
Nakon postavljanja provedena je validacija kreiranog modela za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja. S obzirom na mogućnosti i susretljivost gospodarskih subjekata, odabrane su tri prikladne lokacije kamenoloma na području sjeverozapadne Hrvatske. Pri odabiru kamenoloma vodilo se računa da se obuhvati što više vrsta čvrste stijenske mase tipičnih za područje Republike Hrvatske te da u istim kamenolomima postoje podaci o primjeni različitih tehnologija otkopavanja.

Na odabranim lokacijama provedena su inženjersko-geološka, geofizička i geomehanička istraživanja u svrhu karakterizacije i ocjene stijenske mase. Značajke dobivene na terenu korištene su kao ulazni podaci (kriteriji) za model, a rezultati višekriterijske analize (rang lista akcija) uspoređeni su sa stvarno pirmjenjivim tehnologijama otkopavanja.

6.3.1. Kamenolom „Marčan“

Kamenolom „Marčan“ smješten je na udaljenosti oko 14 km zapadno od Varaždina (slika 6.15), na padinama brežuljaka Viničkog gorja. Neposredno uz kamenolom nalaze se naselja Marčan i Vinica. Najbliže vikendice na udaljenosti su oko 250 m, a stambene kuće oko 400 m od eksploatacijskog polja.

Šire područje Marčana izgrađeno je od naslaga trijaske, miocenske i kvartarne starosti. Od naslaga trijaske starosti, prema geološkoj karti na slici 6.15, prevladavaju vapnenci, dolomiti i dolomitne breče. Litotamnijski vapnenci su najzastupljenije naslage miocenske starosti dok u naslagama kvartarne starosti prevladavaju šljunkovito-pjeskoviti sedimenti.



Slika 6.15. *Geološka karta Varaždinske županije s označenim lokacijama kamenoloma koji su odabrani za validaciju modela (Miko i sur., 2014)*

Samo ležište izgrađeno je od vapnenog pješčenjaka vinicita i popratnih karbonatnih sedimenata. Vinicit je kao građevni materijal dobar samo za unutrašnja i vanjska vertikalna oblaganja pa se zato uglavnom koristi samljeven. Veći dio proizvodnje namijenjen je kao dodatak stočnoj hrani, a ostatak kao materijal za kalcifikaciju kiselih tala.

Eksploatacija i prerada vapnenca na lokalitetu Marčan započela je tijekom 1968. godine, no tek 1995. godine službeno je odobreno eksploatacijsko polje. Pranjić i suradnici (1999) navode da prema Glavnom rudarskom projektu iz tog vremena otkopavanje stijenske mase bazira se na miniranju. No, tijekom izvođenja rudarskih radova javljale su se poteškoće kod bušenja minskih bušotina (zaglave). S napredovanjem rudarskih radova u smjeru zapada, a prema vodospremniku i precrpnoj stanici, javila se potreba za smanjenjem količine eksploziva po stupnju paljenja. Pritužbe vlasnika okolnih građevina bile su brojne, a sve je kulminiralo nakon miniranja 2017. godine. Tada se tridesetak mještana Marčana i Vinice požalilo da su miniranja nekontrolirana te da takvi događaji kod njih izazivaju osjećaje uznemirenosti, nelagode i straha. Zbog navedenih razloga privremeno je otkopavanje vršeno primjenom hidrauličnog čekića, a 2019. godine pokrenut je postupak dorade rudarskog projekta s ciljem prilagodbe tehnologije bušenja i miniranja višim sigurnosnim zahtjevima.

Terenska istraživanja za potrebe ovog rada provedena su tijekom listopada 2019. godine. Na temelju rezultata inženjerskogeološka istraživanja može se generalno reći da je vapnenac iz ležišta vrlo porozan i šupljikav, umjereno je trošan, svijetle žutosive boje, lako se lomi i obrađuje (Pranjić i sur., 1999). Značajke intaktne stijene preuzete su iz rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka (Pranjić i sur., 1999) te su prikazane u tablici 6.6. Čvrstoća i tvrdoća je dodatno određivana prilikom terenskih istraživanja primjenom Schmidtovog čekića, kako je prikazano u poglavljima 2.1.1 i 2.1.4. Prema srednjim vrijednostima čvrstoće, tvrdoće, lomne žilavosti i abrazivnosti vapnenac iz Marčana pripada u stijene relativno niske kvalitete. Kod karakterizacije strukturnog sklopa i diskontinuiranosti stijenske mase determinirana je vrlo izražena slojevitost, a izdvojena su četiri bloka (prilog 4, list 1). Debljina slojeva, odnosno razmak diskontinuiteta, varira od nekoliko centimetara (5 cm) pa do nekoliko metara (3 m). Postojanost pukotina nešto je manja u bloku II i III (3 – 10 m), a najveća u bloku IV (> 20 m). Otvorenost pukotina je mala (0,1 – 1 cm), a ispune nema.

Rezultati mjerenja orijentacije pukotina (prilog 4, list 1) geološkim kompasom (poglavlje 2.2.3) povoljni su s gledišta stabilnosti etažnih kosina, no relativno nepovoljni za otkopavanje stijenske mase, jer su slojne plohe blago nagnute od etažnih kosina prema stijenskom masivu. Ova umjereno rastrošena stijenska masa pripada u kategoriju III, prema tablici 6.2. Bodovanjem

parametara kojima se ocjenjuje stanje pukotina prema RMR-u dolazi se do vrijednosti koje variraju između 12 i 16 bodova. Brojanjem i mjerenjem pukotina zaključeno je kako u stijenskoj masi prevladavaju mali blokovi (J_v = 10-30 pukotina/m^3), iako ima i blokova srednje veličine.

Tablica 6.6. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Marčan*

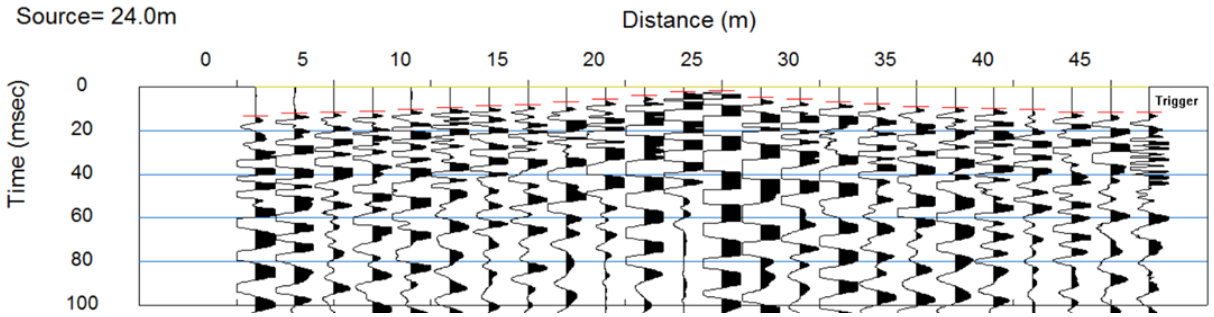
PARAMETAR	RASPON	SREDNJA VRIJEDNOST
Tlačna čvrstoća – σ_{ci} [MPa]	18 – 22	20
Tvrdoća – odskok Schmidtovog čekića *H*	16 – 26	21
Lomna žilavost – K_{IC} [MPa m$^{1/2}$]	0,82 – 0,86	0,84
Abrazivnost – indeks abrazivnosti	1 – 5	3

U sklopu geofizičkih terenskih istraživanja mjerene su brzine prolaza P i S-valova kroz vapnenačku stijenu, primjenom plitke seizmičke refrakcije (poglavlje 5.1.3) i višekanalne analize površinskih valova (poglavlje 5.1.4). Raspored prijemnika kod SRS i MASW profila sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, s međusobnim razmakom od 2 metra (slika 6.16).

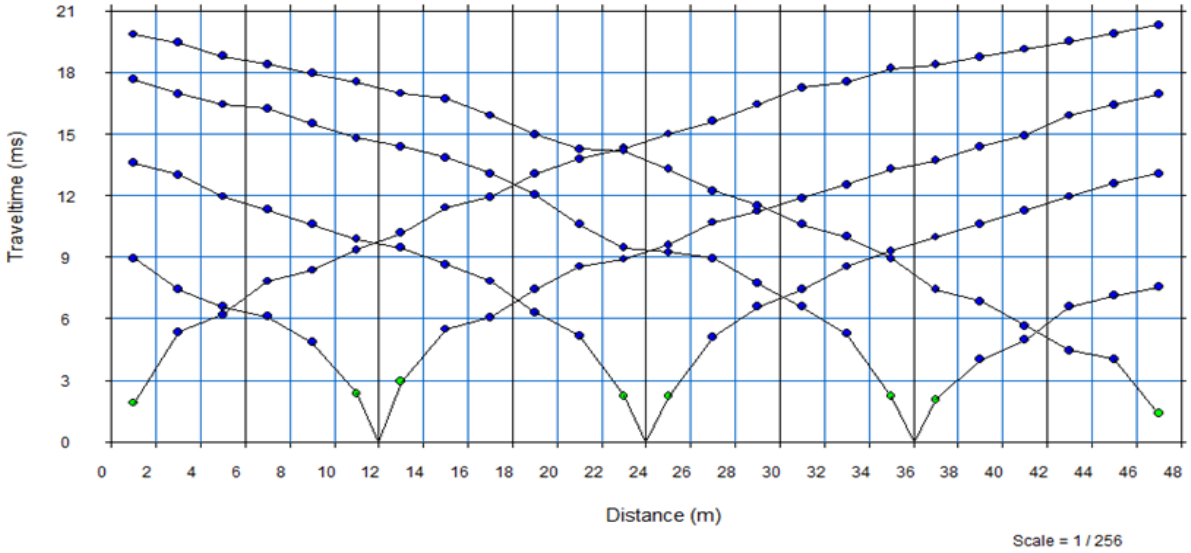
Slika 6.16. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na 1. etaži kamenoloma Marčan, priprema za generiranje seizmičkih valova čekićem mase 10 kg*

Analiza na terenu snimljenih seizmograma temeljila se na prepoznavanju direktno refraktiranih seizmičkih valova, na kojima su se pikirali prvi nailasci (slika 6.17), kako bi se konstruirao graf odnosa vremena i brzine (slika 6.18). Konačni profil brzina valova (slika 6.19) generiran je

metodom inverzije uz pomoć računalnog programa SeisImager/2D version 3.3 (Geometrics i OYO, 2009).

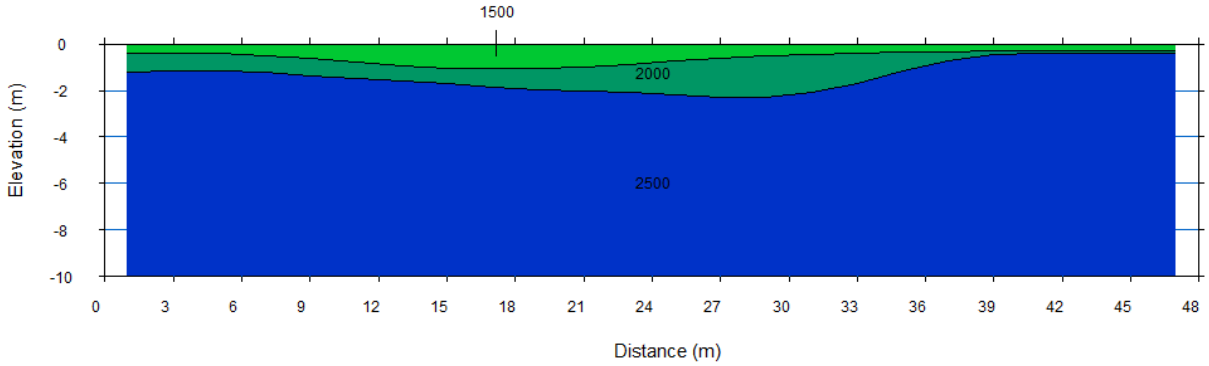


Slika 6.17. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Marčan, točka paljenja na sredini profila (24 m od početka)*

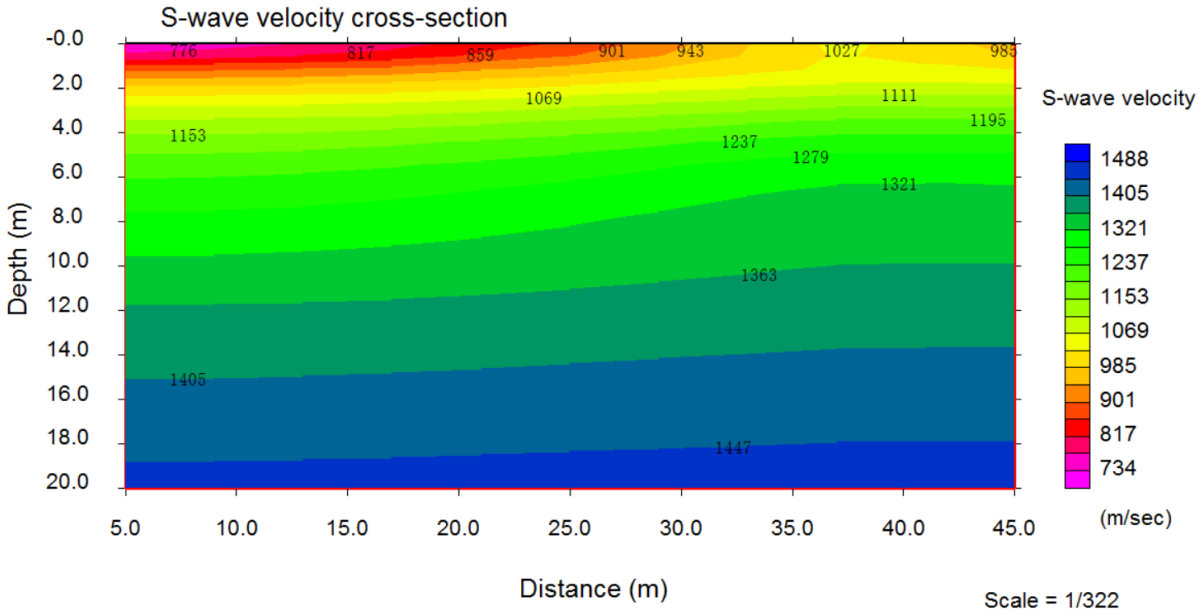


Slika 6.18. *Graf „vrijeme – brzina“ dobiven pikiranjem prvih nailazaka snimljenih u kamenolomu Marčan*

Zabilježene brzine P-valova kreću se u rasponu 1500 – 2000 m/s (slika 6.19), što prema slici 4.20 spada u granično područje s obzirom na mogućnost rijanja dozerom Caterpillar D8R. Međutim, dozeri modela D10 i više već bi zadovoljili zadane uvjete. V_S brzine kreću se u rasponu od 750 do 1450 m/s (slika 6.20), no do dubine 10 m (visina 1. etaže u Marčanu) brzine ne prelaze 1200 m/s. Prema tome tablica 5.3 pokazuje da se takva stijenska masa može kopati razbijanjem hidrauličnim čekićem, što je i dokazano tijekom 2017. godine kada je u kamenolomu Marčan privremeno otkopavanje vršeno primjenom hidrauličnog čekića.



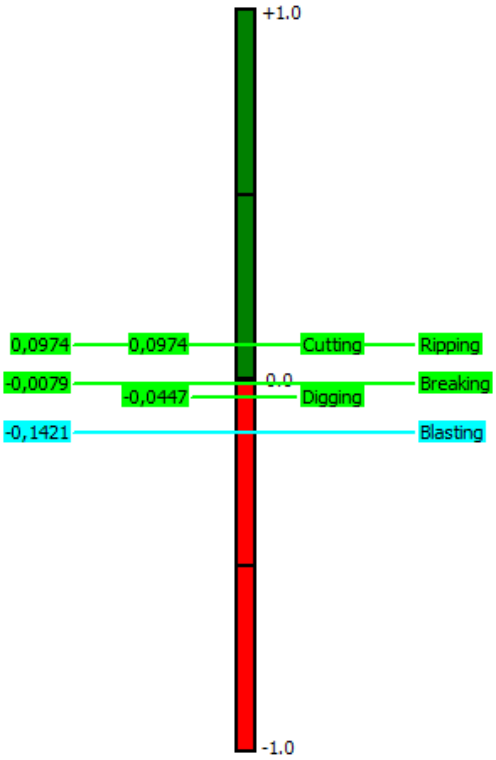
Slika 6.19. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Marčan)*



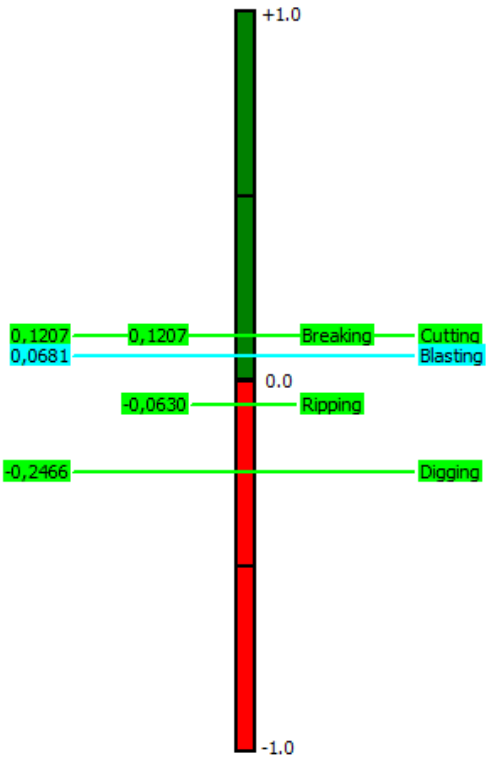
Slika 6.20. *2D interpretirani profil brzina S-valova (MASW-Marčan)*

Rezultati dobiveni istraživanjem iskorišteni su kao ulazni podaci za višekriterijsku analizu unutar modela opisanih u poglavlju 6.2. Kontrola fragmentacije otkopanog materijala važna je za proizvodnju u kamenolomu Marčan, kako bi bilo što manje vangabaritnih blokova na ulazu u primarnu drobilicu pa je taj dodatni kriterij uključen u analizu i ponderiran je s 5 %. S obzirom na to da se najbliži štićeni objekti nalaze na udaljenosti od oko 250 m od mjesta otkopavanja, analizirana su dva slučaja. U prvom je u analizu uključen društveno-ekološki utjecaj te je odabran treći scenarij (štićeni objekt na udaljenosti 200 – 500 m od mjesta otkopavanja), s ponderiranjem 20 %. U drugom slučaju društveno-ekološki utjecaj nije uključen u analizu. U prilogu 5 prikazane su proračunske tablice aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za kamenolom Marčan te prozori Visual PROMETHEE računalnog programa, s prebačenim ocjenama i ponderima. Rezultati analize za model A prikazani su na slikama 6.21 i 6.22, a za model B na slikama 6.23 i 6.24.

a)



b)



Slika 6.21. *PROMETHEE II kompletni poredak za model A, „Marčan“: a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

a)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Ripping	0,0974	0,3105	0,2132
1	Cutting	0,0974	0,2789	0,1816
3	Breaking	-0,0079	0,2526	0,2605
4	Digging	-0,0447	0,2526	0,2974
5	Blasting	-0,1421	0,1947	0,3368

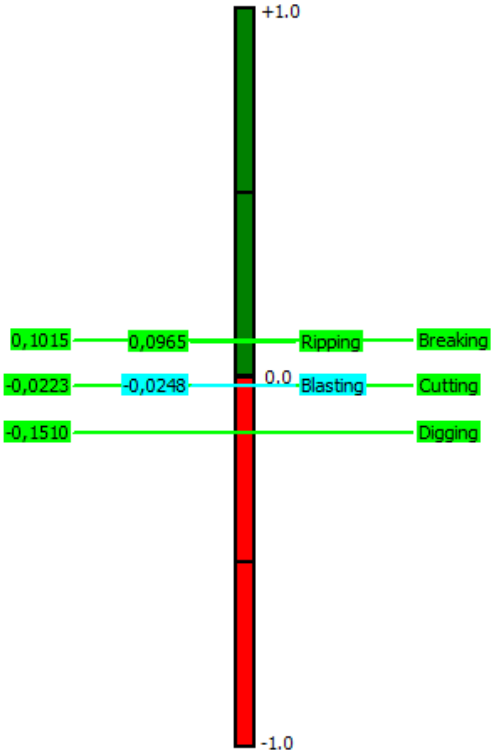
b)

PROMETHEE Flow Table

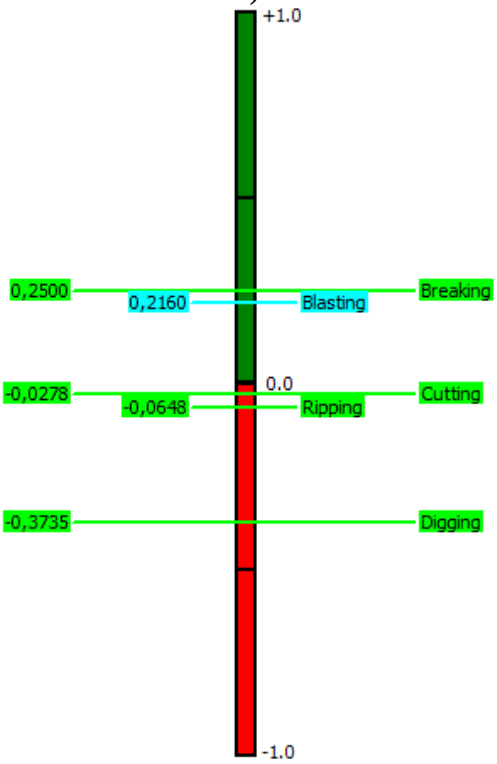
Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Cutting	0,1207	0,2143	0,0936
1	Breaking	0,1207	0,2483	0,1275
3	Blasting	0,0681	0,2313	0,1632
4	Ripping	-0,0630	0,1972	0,2602
5	Digging	-0,2466	0,1224	0,3690

Slika 6.22. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model A, „Marčan“: a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

a)



b)



Slika 6.23. *PROMETHEE II kompletni poredak za model B, „Marčan“: a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

a)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Breaking	0,1015	0,3366	0,2351
2	Ripping	0,0965	0,2970	0,2005
3	Cutting	-0,0223	0,2624	0,2847
4	Blasting	-0,0248	0,2970	0,3218
5	Digging	-0,1510	0,2228	0,3738

b)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Breaking	0,2500	0,3580	0,1080
2	Blasting	0,2160	0,3704	0,1543
3	Cutting	-0,0278	0,2037	0,2315
4	Ripping	-0,0648	0,1852	0,2500
5	Digging	-0,3735	0,0926	0,4660

Slika 6.24. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model B, „Marčan“: a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Prema rezultatima višekriterijske analize za kamenolom Marčan, kopanje je potpuno neprihvatljiva i neprimjenjiva tehnologija otkopavanja, u bilo kojim uvjetima. Model B za slučaj bez društveno-ekološkog utjecaja (slike 6.23.b i 6.24.b) ističe razbijanje i miniranje kao primjenjive metode otkopavanja. Model A u istoj situaciji, uz razbijanje i miniranje, kao primjenjivu metodu otkopavanja daje rezanje (slike 6.21.b i 6.22.b). Ako bi se metoda otkopavanja išla prilagođavati što manjem utjecaju na okoliš, oba modela preporučuju rijanje, dok model B razbijanje ostavlja kao vrlo primjenjivu tehnologiju otkopavanja (slike 6.23.a i 6.24.a). Može se zaključiti kako model B pokazuje realnije rezultate (poklapanje sa stvarno primjenjivanim metodama otkopavanja u kamenolomu Marčan). Prema modelu B miniranje i razbijanje primjenjive su tehnologije otkopavanja, dok bi rijanje bilo prihvatljivo u slučaju da se ne minira zbog društveno-ekološkog utjecaja. To bi realno bilo moguće uz primjenu dozera CAT D10 i drugih dozera sličnih tehničkih karakteristika. To je već zaključeno s obzirom na izmjerene brzine P-valova.

6.3.2. Kamenolom „Špica“

Eksploatacijsko polje „Špica“ nalazi se na području općine Ljubeščica, sjeverno od ceste Ljubešćica – Ljubelj (LC 25148), Kalničkog gorja i potoka Ljuba voda, a udaljen je od središta Ljubešćice cca. 2 km. Ležište je povezano s cestom Novi Marof – Varaždinske Toplice (D24) i autocestom (A4) Zagreb – Goričan, a preko ove s glavnim potrošačkim centrima što omogućava plasman gotovih proizvoda u svim pravcima.

Eksploatacijsko polje „Špica“ otvoreno je 1959. godine, a potražnja za potrebe građevinarstva i cestogradnje uvjetovala je intenziviranje eksploatacije 1976. godine. Dosadašnjom eksploatacijom formiran je prostrani osnovni plato na koti 213 – 216 m. U smjeru sjeveroistoka zasječeno je 5 etaža amfiteatralnog oblika, pojedinačnih visina 25 – 30 m, s bermama širine 10 – 30 m. Otkopavanje stijenske mase provodi se masovnim miniranjima, dok se pomoćne radnje (poput proboja puteva, usitnjavanja vangabaritnih blokova i sl.) provode primjenom hidrauličnog čekića.

Rudarskim radovima zahvaćen je veći dio naslaga ležišta tehničko-građevnog kamena, izgrađenog od srednje i gornjotrijaskih vapnenaca i dolomita (slika 6.15), s time da centralni dio uglavnom izgrađuju vapnenci, a dolomitizirani vapnenci i dolomiti manje su zastupljeni. Površinu zapadnog, sjevernog i istočnog rubnog dijela eksploatacijskog polja izgrađuju naslage miocenske starosti (vapnenac tortonske starosti, prašinasta glina, kvarcni siltit i pješčenjak).

Vapnenac iz ležišta Špica ima vrlo široku primjenu u niskogradnji i visokogradnji. Npr. koristi se za proizvodnju kamene sitneži (za izradu asfaltnih mješavina, tamponskih mješavina i betona) te za proizvodnju lomljenog kamena (za zidanje potpornih zidova i obaloutvrda). Zbog povoljnog mineralnog sastava primjenjuje se u poljoprivredi za kalcitizaciju kiselih tala te u industriji za proizvodnju stočne hrane.

Terenska istraživanja za potrebe ovog rada provedena su tijekom listopada 2019. godine. Na temelju rezultata inženjerskogeoloških kartiranja može se generalno reći da su vapnenci dobro uslojeni, a slojevi su pada 45° - 70° prema jug-jugoistoku. Boje su svijetlo do tamnije sive i sivosmeđe. Rasjedi i pukotinski sistemi najjasnije se mogu pratiti na kosinama radnih etaža (prilog 4, list 2). Rasjedne zone imaju gustoću pojavljivanja od po 3 do 5 m. Ovi rasjedi su položeni u brdo ili obrnuto od nagiba kosina radnih etaža. To je relativno povoljno za stabilnost kosina visine 30 m, ali nepovoljno za otkopavanje.

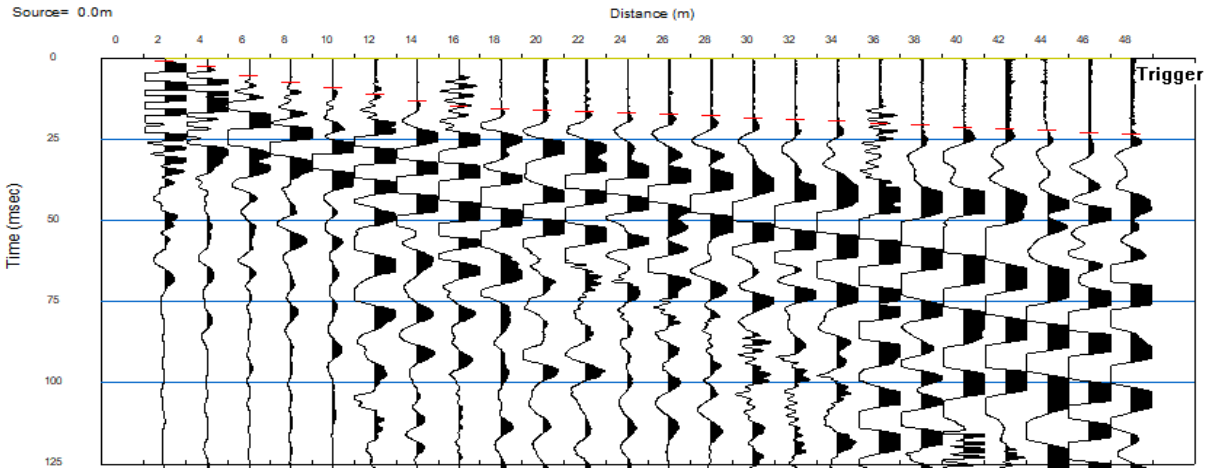
Izdvojeno je 5 blokova stijenske mase. U blokovima I i V stijenska masa je gromadasta i jako rastrošena pa parametri za opis diskontinuiteta nisu vidljivi. U blokovima II, III i IV stijenska masa je umjereno rastrošena, pripada u kategoriju III, prema tablici 6.2. Debljina slojeva, odnosno razmak diskontinuiteta, varira od 5 cm do 2 m, a prevladavaju slojevi debljine oko 0,35 metara. Postojanost pukotina nešto je manja u bloku II (2 – 8 m), a najveća u bloku IV (5 – 40 m). Prosječna vrijednost postojanosti je oko 20 m. Otvorenost pukotina je mala (0,1 – 1 cm), a ispune nema. Bodovanjem parametara kojima se ocjenjuje stanje pukotina prema RMR-u dolazi se do vrijednosti koje variraju između 14 i 18 bodova. Brojanjem i mjerenjem pukotina zaključeno je kako u stijenskoj masi prevladavaju mali blokovi (J_v = 10-30 pukotina/m^3), iako ima i blokova srednje veličine. Značajke intaktne stijene preuzete su iz rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka stijene izvedenih za potrebe izrade Elaborata o rezervama mineralnih sirovina (Calx, 2018), koje su prikazane u tablici 6.7.

Tablica 6.7. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Špica*

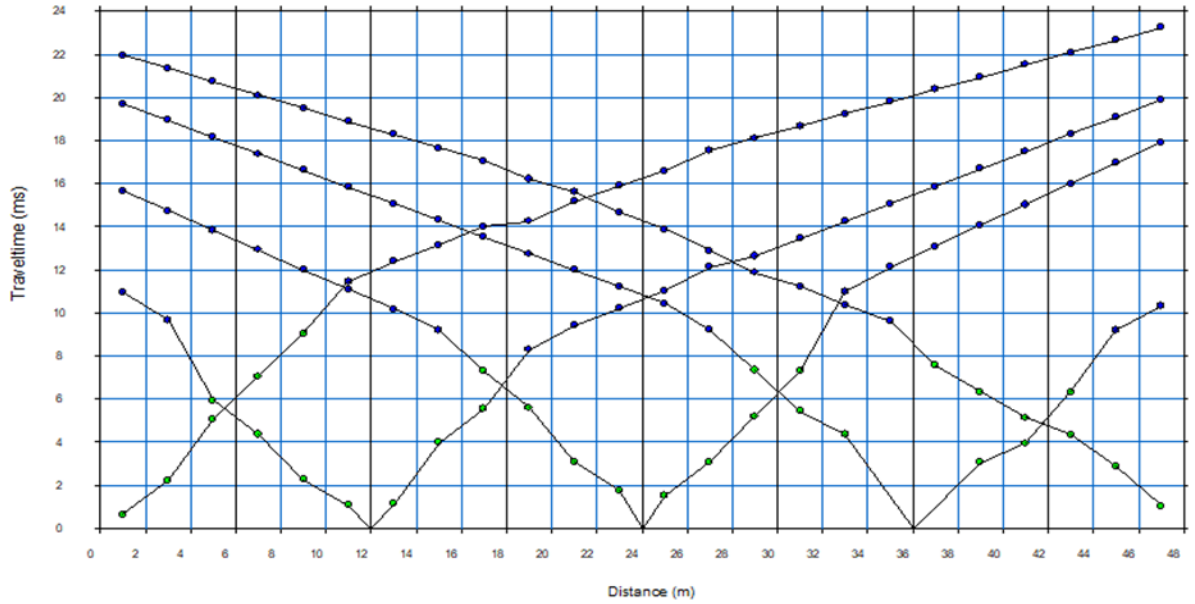
PARAMETAR	RASPON	SREDNJA VRIJEDNOST
Tlačna čvrstoća – σ_{ci} [MPa]	56 – 122	89
Tvrdoća – odskok Schmidtovog čekića *H*	47 – 57	52
Lomna žilavost – K_{IC} [MPa m$^{1/2}$]	0,96 – 1,18	1,07
Abrazivnost – indeks abrazivnosti	8 – 16	12

Geofizička terenska istraživanja izvedena su istim metodama i postavkama kao i u kamenolomu Marčan. Raspored prijemnika kod SRS i MASW profila sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, s međusobnim razmakom od 2 metra (slika 6.25). Pikiranje prvih nailazaka prikazano je na slici 6.26, a konstruirani grafovi odnosa vremena i brzine na slici 6.27. Konačni 2D profil brzina seizmičkih P-valova nalazi se na slici 6.28. Zabilježene brzine P-valova kreću se u rasponu 1500 – 3500 m/s (slika 6.28), što prema slici 4.20 većim dijelom spada u područje vapnenačke stijene koju nije moguće rijati dozerom Caterpillar D8R. V_S brzine ispod površinske trošne zone dubine 4 m kreću se u rasponu 900 – 1400 m/s (slika 6.29). Prema tome tablica 5.3 pokazuje da se takva stijenska masa uglavnom mora otkopavati primjenom miniranja, eventualno razbijanjem hidrauličnim čekićem, što odgovora stvarnoj situaciji u kamenolomu Špica.

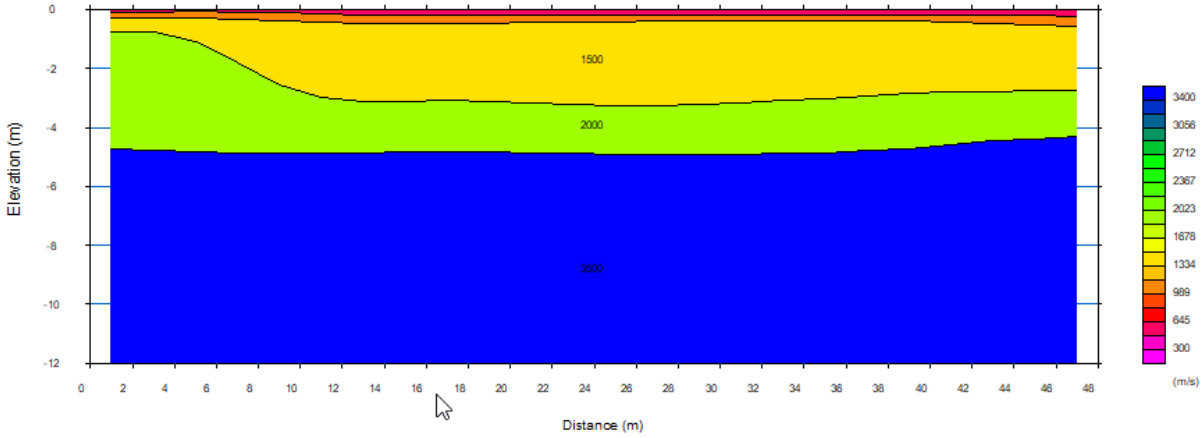
Slika 6.25. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na platou kamenoloma Špica*



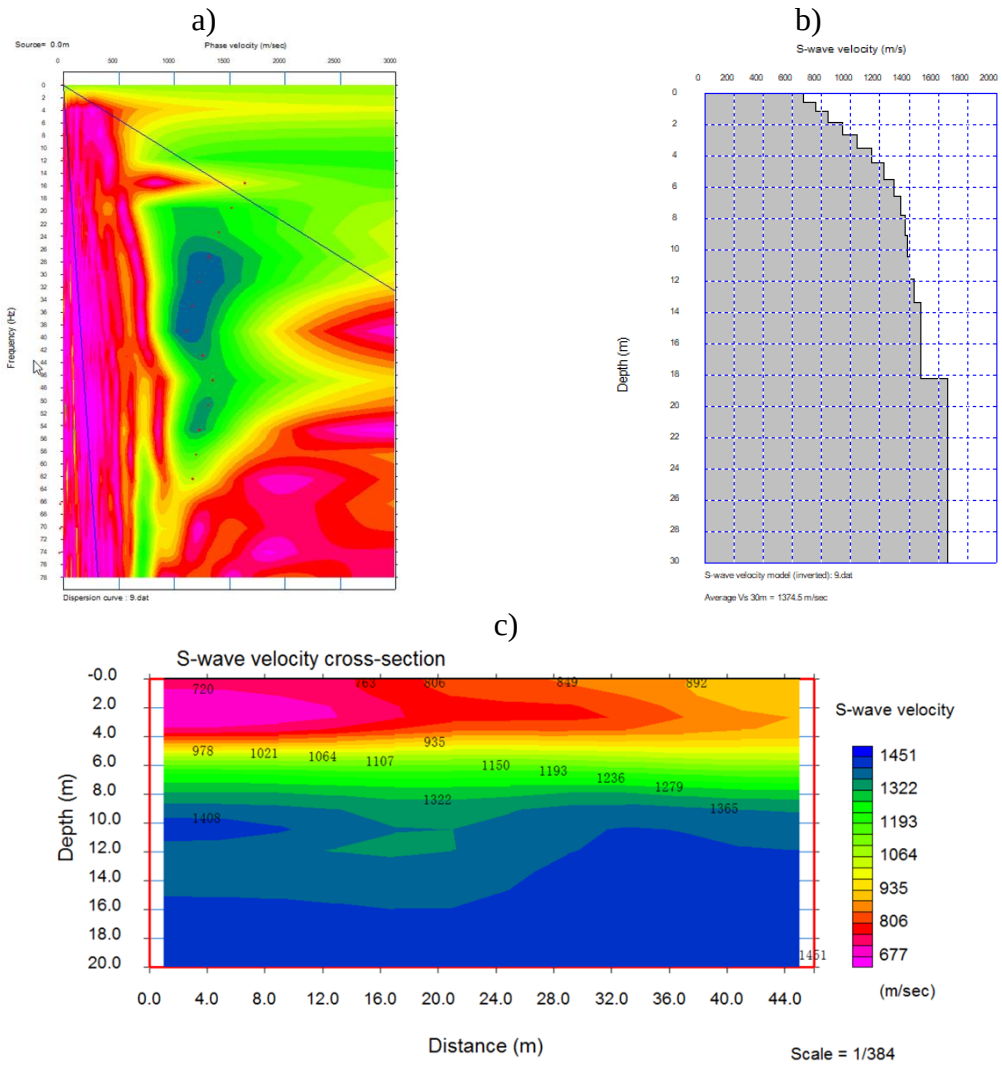
Slika 6.26. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Špica, točka paljenja na početku profila (0 m)*



Slika 6.27. *Graf „vrijeme – brzina“ dobiven pikiranjem prvih nailazaka snimljenih u kamenolomu Špica*

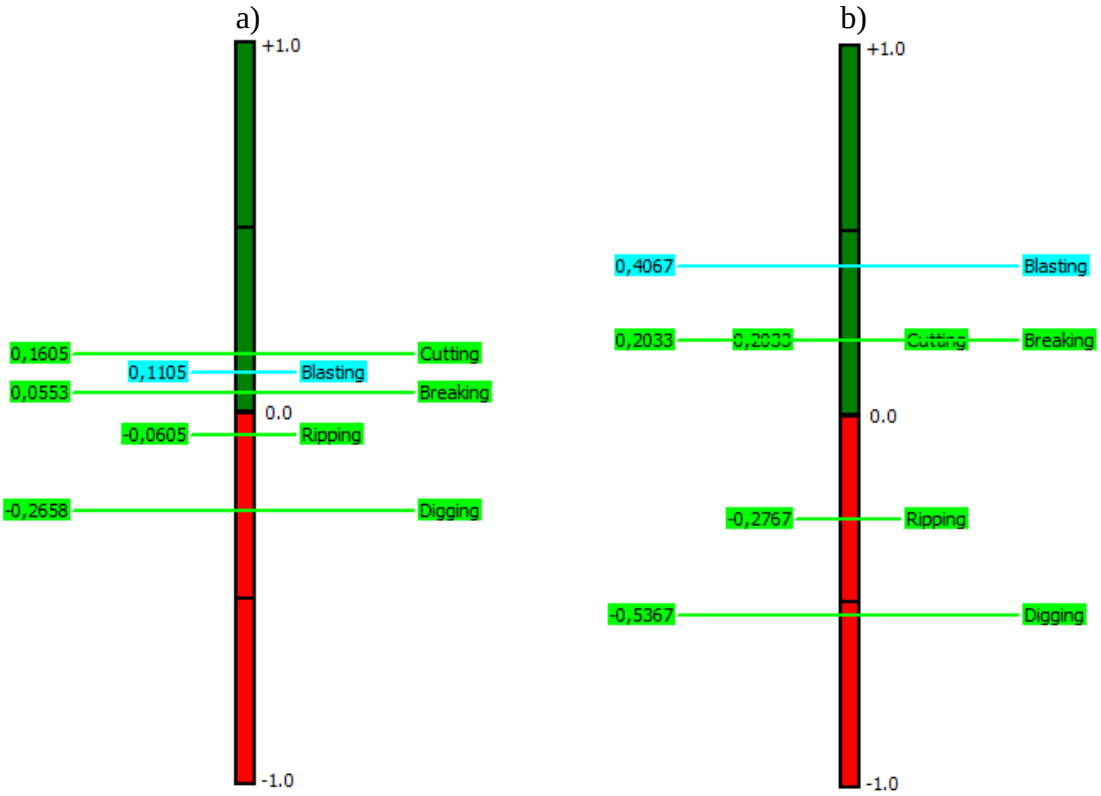


Slika 6.28. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Špica)*



Slika 6.29. *Interpretacija MASW istraživanja u kamenolomu Špica: a) Disperzijska krivulja; b) 1D profil brzina S-valova; c) 2D profil brzina S-valova*

Rezultati dobiveni istraživanjem iskorišteni su kao ulazni podaci za višekriterijsku analizu unutar modela opisanih u poglavlju 6.2. Kontrola fragmentacije otkopanog materijala važna je za proizvodnju u kamenolomu Špica pa je taj dodatni kriterij uključen u analizu i ponderiran je s 5 %. S obzirom na to da se najbliži štićeni objekti nalaze u prosjeku na udaljenosti od oko 350 m od mjesta otkopavanja, analizirana su dva slučaja. U prvom je u analizu uključen društveno-ekološki utjecaj, zbog čega je odabran treći scenarij (štićeni objekt na udaljenosti 200 – 500 m od mjesta otkopavanja), s ponderom 20 %. U drugom slučaju društveno-ekološki utjecaj nije uključen u analizu. U prilogu 6 prikazane su proračunske tablice aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za kamenolom Špica te prozori Visual PROMETHEE računalnog programa s prebačenim ocjenama i ponderima. Rezultati analize za model A prikazani su na slikama 6.30 i 6.31, a za model B na slikama 6.32 i 6.33.



Slika 6.30. *PROMETHEE II kompletni poredak za model A, „Špica“: a) uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja*

a)

PROMETHEE Flow Table

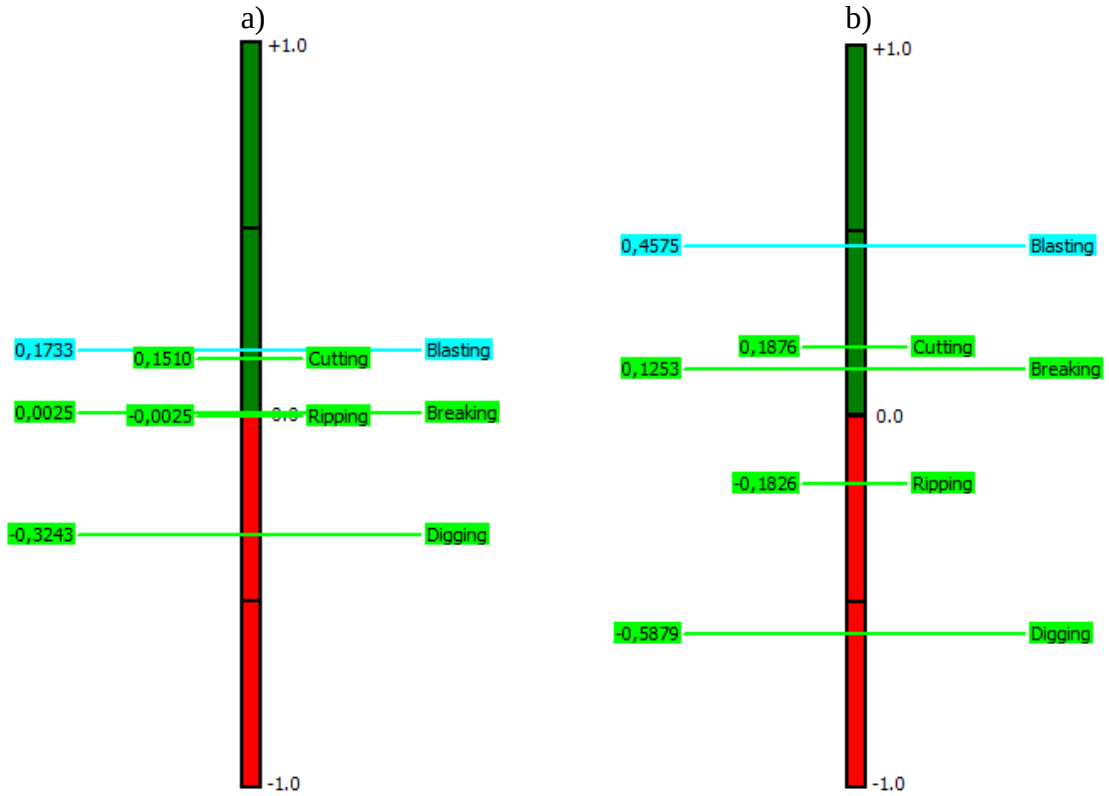
Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Cutting	0,1605	0,3105	0,1500
2	Blasting	0,1105	0,3211	0,2105
3	Breaking	0,0553	0,2842	0,2289
4	Ripping	-0,0605	0,2474	0,3079
5	Digging	-0,2658	0,1579	0,4237

b)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Blasting	0,4067	0,4067	0,0000
2	Cutting	0,2033	0,2600	0,0567
2	Breaking	0,2033	0,2933	0,0900
4	Ripping	-0,2767	0,1133	0,3900
5	Digging	-0,5367	0,0000	0,5367

Slika 6.31. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model A, „Špica“: a) uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja*



Slika 6.32. *PROMETHEE II kompletni poredak za model B, „Špica“: a) uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja*

a)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Blasting	0,1733	0,3960	0,2228
2	Cutting	0,1510	0,3614	0,2104
3	Breaking	0,0025	0,2871	0,2847
4	Ripping	-0,0025	0,3218	0,3243
5	Digging	-0,3243	0,1485	0,4728

b)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Blasting	0,4575	0,4887	0,0312
2	Cutting	0,1876	0,3254	0,1378
3	Breaking	0,1253	0,2942	0,1689
4	Ripping	-0,1826	0,2182	0,4008
5	Digging	-0,5879	0,0000	0,5879

Slika 6.33. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model B, „Špica“: a) uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja*

Prema rezultatima višekriterijske analize za kamenolom Špica, kopanje i rijanje su potpuno neprihvatljive i neprimjenjive tehnologije otkopavanja, u bilo kojim uvjetima. Rezultati analize oba modela pokazuju kako su miniranje, rezanje i razbijanje primjenjive metode otkopavanja, a poredak ovisi o zadanom scenariju. Model B za slučaj bez društveno-ekološkog utjecaja (slike 6.32.b i 6.33.b) ističe miniranje kao daleko najprimjenjiviju metodu otkopavanja, dok bi rezanje i razbijanje bile prihvatljive tehnologije. Za slučaj s uključenim mogućim društveno-ekološkim utjecajem poredak je isti, no prednost miniranja nad ostalim metodama je puno manja (slike 6.32.a i 6.33.a). Model A u istoj situaciji, uz razbijanje i miniranje, kao najprimjenjiviju metodu otkopavanja daje rezanje (slike 6.30.a i 6.31.a). Rezultati analize po modelu A za slučaj bez društveno-ekološkog utjecaja (slike 6.30.b i 6.31.b), vrlo su slični rezultatima analize po modelu B za isti slučaj. No, model B uvijek daje veći neto protok miniranju, koje se stvarno primjenjuje kao metoda otkopavanja u kamenolomu Špica. Prema tome, može se reći da su rezultati modela B realniji. Specifičnost rezultata višekriterijskih analiza iz primjera kamenoloma Špica je svakako prikaz rezanja kao jedne od primjenjivih tehnologija otkopavanja. No, rezanje za sada nema primjenu kod površinskog otkopavanja stijenske mase na području Hrvatske. Zato bi to mogao biti poticaj proizvođačima strojeva koji sudjeluju u operacijama otkopavanja rezanjem da intenziviraju istraživanja oko mogućnosti primjene svojih strojeva na hrvatskim površinskim kopovima stijenske mase.

6.3.3. Kamenolom „Hruškovec“

Ležište i eksploatacijsko polje Hruškovec nalazi se na zapadnim padinama Kalničkog gorja, obuhvaća dolinu potoka Hruškovec i administrativno pripada Varaždinskoj županiji. Pristupni put prema površinskom kopu je makadamski, a udaljenost od radnog platoa i asfaltirane ceste koja vodi prema Ljubešćici je oko 1,2 km. Najbliže naselje je Kalnički Ljubelj, a udaljenost do prvih štićenih objekata veća je od 1000 m.

U ležištu Hruškovec zastupljene su naslage tzv. vulkanogeno-sedimentnog kompleksa, koje karakterizira česta nepravilna vertikalna i lateralna izmjena pjeskovitih glina, šejlova, slejtova, pješčenjaka, vapnenaca i tufova u kojima se nalaze višekratne intruzije dijabaza. Pojava eruptivnih stijena vezana je za bazični inicijalni magmatizam koji se odvijao početkom krede. Ležišta dijabaza na ovom se području nalaze u krednim kaotičnim naslagama heterogenog petrografskog sastava i složene građe. Eruptivna masa utiskivana je u okolne stijene tijekom sedimentacije, tvoreći tanja i deblja eruptivna tijela. U ovisnosti o nivou i brzini očvršćivanja eruptivne mase nastali su sitnozrni dijabazi, stijene tipa bazalta, bazaltna i vulkanska stakla.

Magmatsko tijelo ležišta „Hruškovec“ nije cjelovito, već je rezultat procesa tijekom geneze, ali i tektonskih zbivanja u vidu nekoliko uzastopnih izljeva i ekstruzija magme. Istražnim bušotinama nabušena je uglavnom stijena bazaltnog izgleda, devitrificirano i alterirano bazaltno i vulkansko staklo te mjestimično vulkanska breča i aglomerati. Navedeno ukazuje da se ne radi o dijabaznoj gredi ili masivu, već na činjenicu da ležište Hruškovec izgrađuju nepravilna, klinasta, piramidalna i pločasta magmatska tijela, koja su nastala tijekom nekoliko ekstruzija i efuzija, a tvore prividnu cjelinu.

Površinski kop je formiran u sjeverozapadnom, sjevernom, centralnom i istočnom dijelu odobrenog eksploatacijskog polja, a razvrstan je u brdske, plitke i male površinske kopove. Zapadno od potoka Hruškovec, dijabaz se eksploatira na dva odvojena radilišta. Na zapadnom radilištu radni plato se nalazi na visini cca 280 m i prema zapadu i sjeverozapadu je otkopna fronta dijelom formirana u dvije etaže, s bermom na visini cca 305 m nadmorske visine. U sjeverozapadnom dijelu kopa je radni plato formiran na visini 255 m, a tri etaže usječene su u pravcu sjeverozapada, zapada i jugozapada. U središnjem dijelu eksploatacijskog polja deponirana je veća količina jalovine. Za napredovanje rudarskih radova, odnosno otkopavanje stijenske mase, primjenjuje se miniranje. Dijabaz iz ležišta Hruškovec koristi se u cestogradnji, vodogradnji i industriji (proizvodnja mineralne kamene vune i drugo).

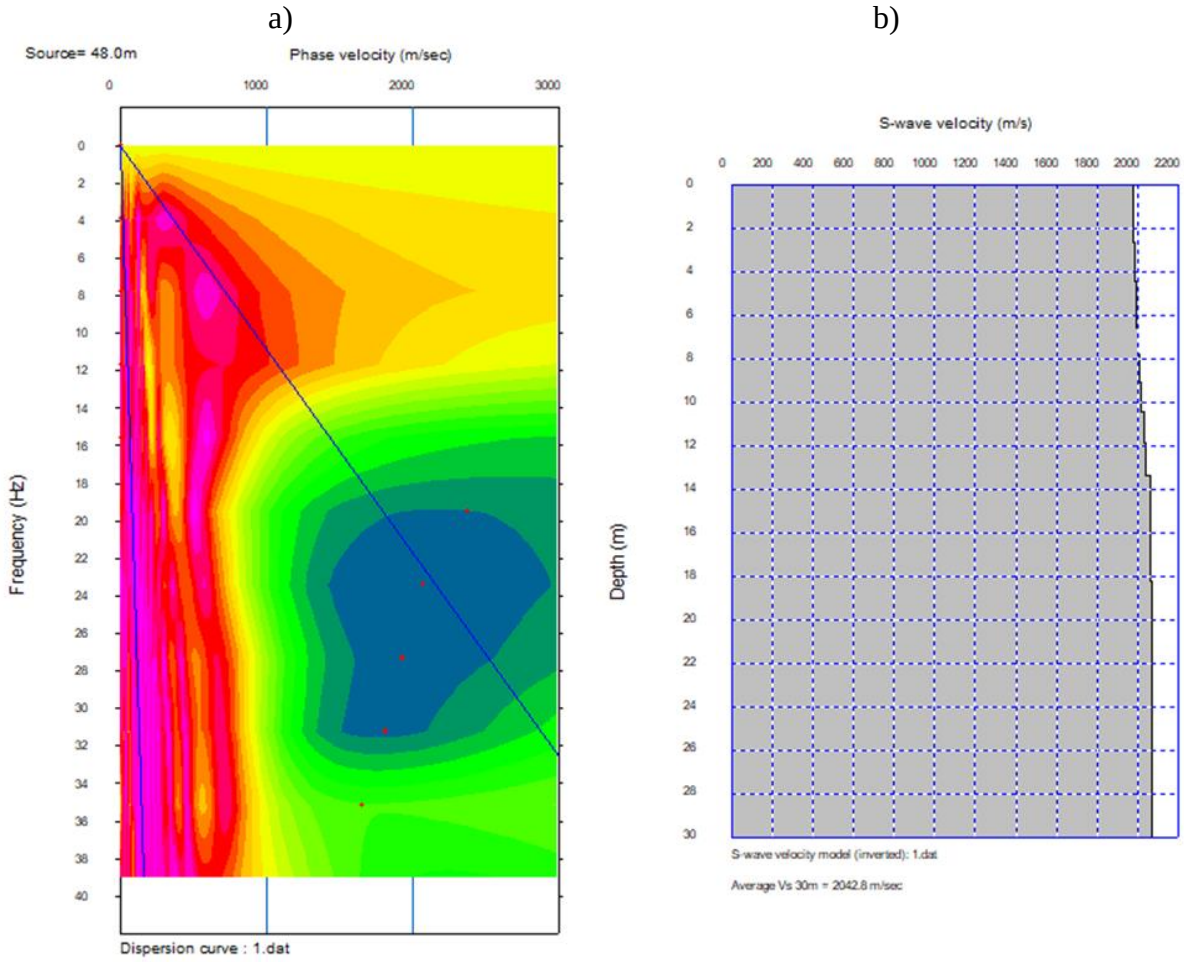
Terenska istraživanja za potrebe ovog rada provedena su tijekom listopada 2019. godine. Izdvojeno je 5 blokova stijenske mase (prilog 4, list 3). U blokovima I i V stijenska masa je trošna pa parametri za opis diskontinuiteta nisu vidljivi. Riječ je o zonama trošnog dijabaza i bazalta slabijih inženjersko-geoloških karakteristika zbog povećanog sadržaja minerala glina. U blokovima II, III i IV stijenska masa je umjereno rastrošena i pripada u kategoriju III, prema tablici 6.2. Debljina slojeva, odnosno razmak diskontinuiteta, varira od 10 cm do 1 m, a prevladavaju slojevi debljine oko 0,4 metra. Postojanost pukotina nešto je manja u blokovima II i III (2 – 8 m), a najveća u bloku IV (5 – 40 m). Prosječna vrijednost postojanosti je oko 25 m. Otvorenost pukotina je prilično velika (1 – 5 cm), s prisutnom ispunom. Bodovanjem parametara kojima se ocjenjuje stanje pukotina prema RMR-u dolazi se do vrijednosti koje variraju između 10 i 12 bodova. Brojanjem i mjerenjem pukotina zaključeno je kako u stijenskoj masi prevladavaju blokovi srednje veličine (J_v = 3-10 pukotina/m^3). Orijentacija pukotina generalno je ocijenjena kao srednje povoljna što se tiče otkopavanja, iako je ponegdje utvrđen povoljni položaj u odnosu na otkopne fronte kosina. Značajke intaktne stijene preuzete su iz rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka stijene izvedenih za potrebe izrade Elaborata o rezervama mineralnih sirovina (Calx, 2019), koje su prikazane u tablici 6.8.

Tablica 6.8. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Hruškovec*

PARAMETAR	RASPON	SREDNJA VRIJEDNOST
Tlačna čvrstoća – σ_{ci} [MPa]	54 – 140	124
Tvrdoća – odskok Schmidtovog čekića *H*	50 – 60	55
Lomna žilavost – K_{IC} [MPa $m^{1/2}$]	1,06 – 1,34	1,20
Abrazivnost – indeks abrazivnosti	18 – 34	26

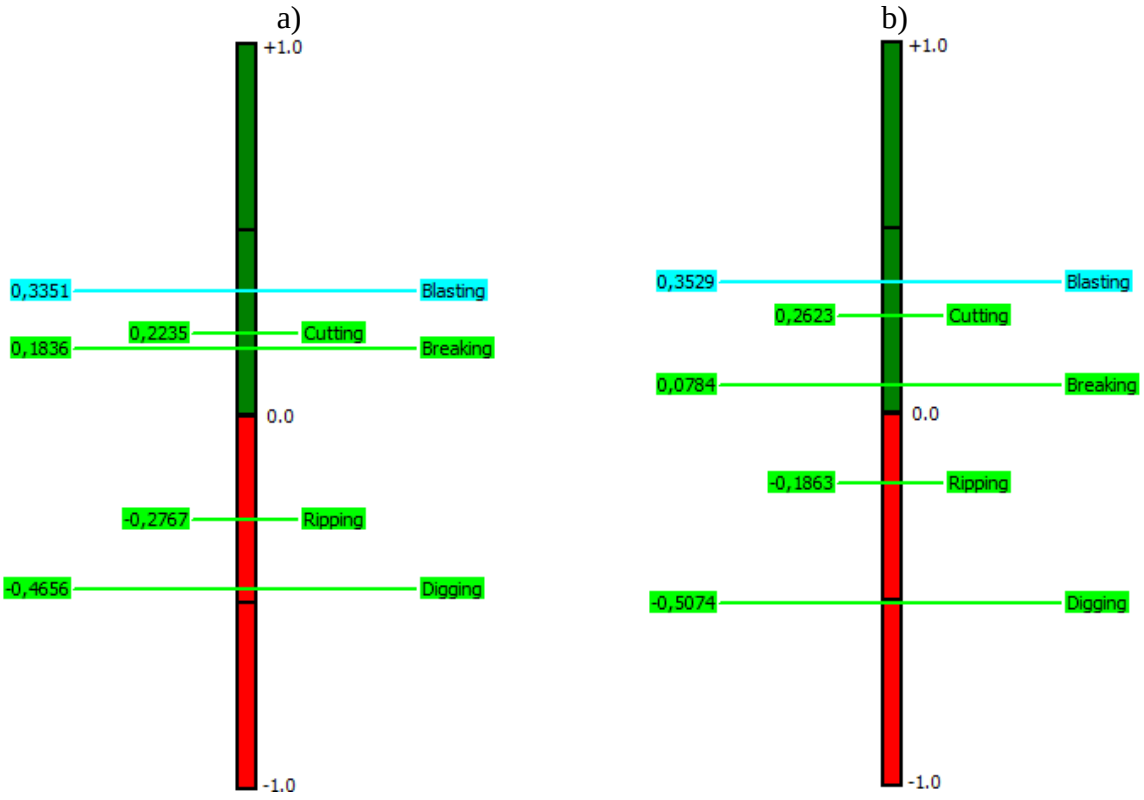
Geofizička terenska istraživanja u kamenolomu Hruškovec (slika 6.34) izvedena su istim metodama i na isti način kao i u prethodna dva kamenoloma. Grafički prikazi pikiranja prvih nailazaka, konstruirani graf odnosa vremena i brzine, konačni 2D profil brzina seizmičkih P-valova navedeni su u poglavlju 5 kao primjeri (slike 5.7, 5.8 i 5.9). Interpretirani rezultati MASW istraživanja prikazani su na slici 6.35. V_S brzine po cijeloj dubini profila vrijednosti su oko 2000 m/s. Zabilježene brzine P-valova kreću se u rasponu 1200 – 3000 m/s (slika 5.9). Prema tablici 5.3 ova se stijenska masa može otkopavati samo primjenom miniranja. U ovom slučaju ponovno se potvrđuju prednosti primjene S-valova i MASW metode nasuprot primjeni P-valova i SRS metode, što je već detaljno opisano u poglavlju 5. Naime, zabilježene V_P pokazuju stijenu puno manje kvalitete, pogotovo u površinskim slojevima, nego što to zaista jest. S druge strane, brzine S-valova ukazuju na vrlo kvalitetnu stijenu po cijeloj dubini profila.

Slika 6.34. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na 1. etaži kamenoloma Hruškovec*



Slika 6.35. *Interpretacija MASW istraživanja u kamenolomu Hruškovec: a) Disperzijska krivulja; b) 1D profil brzina S-valova*

I u ovom slučaju rezultati dobiveni istraživanjem iskorišteni su kao ulazni podaci za višekriterijske analize. S obzirom na to da se u Hruškovcu najbliži štićeni objekti nalaze na udaljenosti većoj od 1000 m od mjesta otkopavanja, razmatran je samo scenarij bez društveno-ekološkog utjecaja. S obzirom na to da su istraživanjima determinirane zone trošnog dijabaza i bazalta slabijih inženjersko-geoloških karakteristika zbog povećanog sadržaja minerala glina, selektivno otkopavanje, uz kontrolu fragmentacije, korisni su dodatni tehnološki kriteriji u kamenolomu Hruškovec (osobna komunikacija). Oba kriterija u analizama su uzeta u obzir te ponderirana s po 5 %. U prilogu 7 prikazane su proračunske tablice aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za kamenolom Hruškovec te prozori Visual PROMETHEE računalnog programa, s prebačenim ocjenama i ponderima. Kompletni poredci PROMETHEE II analize za oba modela prikazani su na slici 6.36, dok su na slici 6.37 tablice za prikaz PROMETHEE II analize, također za model A i model B.



Slika 6.36. *PROMETHEE II kompletni poredak za kamenolom „Hruškovec“: a) model A; b) model B*

a)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Blasting	0,3351	0,3883	0,0532
2	Cutting	0,2234	0,2899	0,0665
3	Breaking	0,1835	0,2952	0,1117
4	Ripping	-0,2766	0,1250	0,4016
5	Digging	-0,4654	0,0532	0,5186

b)

PROMETHEE Flow Table

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Blasting	0,3529	0,4314	0,0784
2	Cutting	0,2623	0,3750	0,1127
3	Breaking	0,0784	0,2917	0,2132
4	Ripping	-0,1863	0,2181	0,4044
5	Digging	-0,5074	0,0490	0,5564

Slika 6.37. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za kamenolom „Hruškovec“: a) model A; b) model B*

Prema rezultatima višekriterijske analize za kamenolom Hruškovec, kopanje i rijanje su potpuno neprihvatljive i neprimjenjive tehnologije otkopavanja, bez obzira na to što kopanje nudi mogućnost selektivnog otkopavanja. Rezultati analize oba modela pokazuju kako je miniranje daleko najprimjenjivija metoda otkopavanja u kamenolomu Hruškovec. Kao drugi izbor tu je rezanje, kao i u kamenolomu Špica pa se ova metoda otkopavanja još jednom nameće kao moguća alternativa miniranju kod otkopavanja čvršće i kvalitetnije stijenske mase. Razbijanje je prema poretku treći izbor, no s obzirom na vrlo niski neto protok (*Phi* = 0,0784), ta metoda može imati prihvatljivu primjenjivost eventualno u zonama trošnijeg dijabaza. Miniranju, koje se koristi u kamenolomu Hruškovec kao metoda otkopavanja stijenske mase, model B daje veći neto protok (*Phi* = 0,3529) nego model A (*Phi* = 0,3351). Time se ponovno potvrđuje kako model B daje bolje i realnije rezultate te je time zadovoljena opravdanost uvođenja novih parametara opisa stijenske mase, u odnosu na dosadašnja istraživanja koja su sadržana u modelu A.

6.4. Diskusija rezultata dobivenih modelom

Rezultati višekriterijskih analiza sažeti su i prikazani u tablici 6.9. Dobivene rang-liste akcija uspoređene su sa stvarno pirmjenjivim tehnologijama otkopavanja na tri analizirana kamenoloma s područja sjeverozapadne Hrvatske. Uzimajući u obzir da je prilikom projektiranja eksploatacije u kamenolomima Marčan i Špica za otkopavanje namijenjena tehnologija miniranja, za usporedbu se mogu koristiti donji redci bez uključenog dodatnog društveno-ekološkog kriterija. Društveno-ekološki utjecaj za sada je u obzir uzet samo kroz pravilno projektirano miniranje. Zbog toga gornji redak može poslužiti za procjenu, ako bi se miniranju tražila alternativna tehnologija otkopavanja, s ciljem što manjeg utjecaja na okoliš. Uspoređivanjem tehnologija koje se stvarno primjenjuju u kamenolomima s procijenjenim primjenjivim tehnologijama iz analiza, može se zaključiti kako su oba modela prilično uspješna. U gotovo svim slučajevima tehnologije koje se stvarno primjenjuju zapravo su najbolje rangirane tehnologije prema rezultatima analiza. Uspoređujući modele A i B, može se reći kako je model B nešto uspješniji. Naime, neto protok Φ kod prvorangiranih tehnologija unutar modela B je uvijek veći od neto protoka prvorangiranih tehnologija unutar modela A. Time je zadovoljena opravdanost uvođenja novih parametara opisa stijenske mase unutar modela B, u odnosu na dosadašnja istraživanja koja su sadržana u modelu A. Takvi rezultati potvrda su pomoćne hipoteze istraživanja, kojom je pretpostavljeno da su veličina i oblik blokova (karakterizirani kroz volumetrijski broj pukotina i orijentaciju dominantnog seta pukotina) presudne strukturne značajke stijenske mase kod odabira tehnologije otkopavanja.

Tablica 6.9. *Rezultati validacije modela*

Lokacija	**Tehnologija otkopavanja**	**Dodatni kriterij**	**Rangirane primjenjive tehnologije prema rezultatima analiza**	
			Model A	**Model B**
Marčan	Razbijanje + Miniranje	Društveno-ekološki + Kontrola fragmentacije	1. Rijanje (Φ = 0,09) 2. Rezanje (Φ = 0,09)	1. Razbijanje (Φ = 0,12) 2. Rijanje (Φ = 0,09)
		Kontrola fragmentacije	1. Rezanje (Φ = 0,12) 2. Razbijanje (Φ = 0,12) 3. Miniranje (Φ = 0,06)	1. Razbijanje (Φ = 0,25) 2. Miniranje (Φ = 0,21)
Špica	Miniranje + Razbijanje za pomoćne radnje	Društveno-ekološki + Kontrola fragmentacije	1. Rezanje (Φ = 0,16) 2. Miniranje (Φ = 0,11) 3. Razbijanje (Φ = 0,05)	1. Miniranje (Φ = 0,17) 2. Rezanje (Φ = 0,15) 3. Razbijanje (Φ = 0,02)
		Kontrola fragmentacije	1. Miniranje (Φ = 0,40) 2. Rezanje (Φ = 0,20) 3. Razbijanje (Φ = 0,20)	1. Miniranje (Φ = 0,45) 2. Rezanje (Φ = 0,18) 3. Razbijanje (Φ = 0,12)
Hruškovec	Miniranje	Kontrola fragmentacije + Selektivno otkopavanje	1. Miniranje (Φ = 0,33) 2. Rezanje (Φ = 0,22) 3. Razbijanje (Φ = 0,18)	1. Miniranje (Φ = 0,35) 2. Rezanje (Φ = 0,26) 3. Razbijanje (Φ = 0,07)

7. ZAKLJUČAK

Odabir najprikladnije tehnologije otkopavanja stijenske mase uvelike ovisi o značajkama stijenske mase koju se planira kopati, a one se mogu podijeliti u 3 glavne grupe:

1) značajke intaktne stijene
2) značajke diskontinuiteta
3) značajke stijenske mase.

Iz tablice u prilogu 1 vidljivo je da su kod dosadašnjih istraživanja za procjenu mogućnosti primjene tehnologija otkopavanja u obzir uzimane različite značajke stijenske mase (više od 15 geomehaničkih parametara), u različitim kombinacijama. No, uočena su dva velika nedostatka postojećih metoda:

1) Većina metoda primjenjiva je samo na određene tehnologije otkopavanja, a rijetke povezuju više različitih tehnologija.
2) Ne postoji jedinstvena i općenito prihvatljiva metoda za definiranje podatljivosti stijene otkopavanju.

Zato je cilj ovog doktorskog istraživanja bio razviti općeniti model koji će omogućiti kvalitativnu procjenu primjenjivosti dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na značajke čvrste stijenske mase koju se planira otkopavati.

Tehnologije otkopavanja, prema glavnom mehanizmu rada, dijele se u dvije osnovne grupe: 1) Miniranje i 2) Mehaničko otkopavanje. Miniranje podrazumijeva detonaciju eksplozivnog naboja u bušotini, nakon čega se kroz stijensku masu šire tlačni i vlačni udarni val te tlak plinovitih tvari, dovodeći stijenu u stanje tlačnog i vlačnog naprezanja. Dva su osnovna načina mehaničkog fragmentiranja stijene s različitim alatima: 1) cijepanje kombinacijom potisne sile i gibanja alata okomito na površinu stijene ili 2) rezanje kretanjem alata paralelno na površinu, također uz potisnu silu. Moguće su i kombinacije dva osnovna načina mehaničkog fragmentiranja stijene. S obzirom na navedeno, predložena je sljedeća klasifikacija mehaničkih tehnologija otkopavanja prema osnovnom mehanizmu izdvajanja komada stijene iz stijenske mase:

1) kopanje (engl. *digging*) kod primjene bagera s lopatom
2) rijanje (engl. *ripping*) kod povlačenja dozerskog ili bagerskog rijača
3) razbijanje (engl. *breaking*) kod primjene hidrauličnog čekića
4) rezanje (engl. *cutting*) kod odvajanja materijala iz stijenske mase strojevima s rotirajućim reznim elementima.

Za primjenjivost tehnologija otkopavanja vrlo su važne njihove specifičnosti. Miniranje je visoko učinkovito, nudi mogućnost kontrole fragmentacije otkopanog materijala i jedina je primjenjiva tehnologija otkopavanja u čvrstim i vrlo čvrstim, blokovitim stijenama. Međutim, ima veliki nedostatak u vidu nepoželjnih efekata (vibracije, buka, razbacivanje fragmenata, zaprašenost). Primjenom mehaničkog otkopavanja utjecaji vibracije, buke i zaprašenosti su minimalni, a sigurnije je za ljudske živote, imovinu i stabilnost kosina. Kopanje, rijanje i razbijanje vrlo su prihvatljive metode otkopavanja u građevinarstvu i rudarstvu, nude mogućnost selektivnog otkopavanja, razbijanje i djelomičnu kontrolu fragmentacije, ali imaju i nedostatke. Kopanje je primjenjivo samo u stijenama loše i vrlo loše kvalitete. Rijanje je u čvršćim i kompaktnijim stijenama često skuplje od miniranja. Lomna žilavost stijene može utjecati na učinkovitost hidrauličnog čekića, zbog čega je vrlo važno frekvenciju i energiju udara čekića prilagoditi lomnoj žilavosti stijene koja se otkopava. Rezanje može biti visoko učinkovito zbog kontinuiranog načina rada, omogućuje kontrolu fragmentacije otkopanog materijala i primjenjivo je na lokacijama s nepoželjnim negativnim utjecajem vibracija na okoliš. S druge strane, stijene s izraženim plastičnim ponašanjem nisu pogodne za rezanje tlačnim djelovanjem rotirajućim diskovima, dok abrazivnost stijene ima značajan utjecaj na ekonomičnost primjene tehnologije.

Povezivanjem saznanja iz prethodnih istraživanja te informacija o karakteristikama i specifičnostima tehnologija otkopavanja sa značajkama stijenske mase, zaključeno je kako su za opis i klasifikaciju stijenske mase u svrhu otkopavanja važne značajke intaktnog materijala (čvrstoća, tvrdoća, abrazivnost i lomna žilavost intaktne stijene), ali i strukturne značajke stijenske mase (razmak pukotina, njihova orijentacija, postojanost, otvorenost, stupanj trošnosti i brzina P-valova kroz stijensku masu).

Dugoročna i skupa istraživanja za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja često nisu prihvatljiva investitorima, pogotovo pri manjim građevinskim iskopima. Zato su u takvim slučajevima metode koje koriste brzine seizmičkih valova za procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju prihvatljivije, jer su neinvazivne, brže i jeftinije. Međutim, primjena postojećih seizmičkih metoda i klasifikacija za procjenu podatljivosti stijena otkopavanju može dovesti do loših procjena zbog nedostataka i ograničenja kod primjene seizmičke refrakcijske metode i P-valova. Zbog toga je u sklopu ovog rada predložen novi pristup u primjeni seizmičkih metoda za preliminarnu procjenu mogućnosti površinskog otkopavanja sedimentnih stijena, koristeći prednosti koje donosi primjena MASW seizmičke istraživačke metode čiji su rezultat profili brzina S-valova.

Na temelju opsežnih istraživanja, dobivenih podataka i usporedbe s postojećim klasifikacijskim metodama za procjenu mogućnosti otkopavanja, određeno je i predloženo da je potrebno minirati sedimentnu stijensku masu ako su izmjerene brzine V_S veće od 1200 m/s, budući da je miniranje uglavnom potrebno u masivnim i vrlo blokovitim stijenskim masama, vrlo dobre do izvrsne kvalitete s obzirom na raspucanost. Za otkopavanje stijene s V_S brzinama između 1000 i 1200 m/s (prijelazna zona između miniranja i rijanja), predložena je primjena hidrauličnog čekića. Utvrđeno je kako je rijanje uglavnom uspješno u stijenama s V_S brzinama između 600 i 1000 m/s, dok se sedimentna stijenska masa V_S brzine ispod 600 m/s može kopati bagerom s korpom.

U poglavlju 6 prikazana je upotreba višekriterijske analize za razvijanje detaljnog modela za procjenu i rangiranje primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase te dodatne uvjete. Time je potvrđena glavna hipoteza doktorskog istraživanja kojom je bilo pretpostavljeno da je moguće razviti jedinstveni model za procjenu najprimjenjivije tehnologije površinskog otkopavanja čvrstih stijenskih masa na temelju značajki intaktnog stijenskog materijala, strukture i značajki stijenske mase te postavljenih uvjeta otkopavanja. Za analizu je korištena metoda PROMETHEE uz programski paket Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.

Tehnologije površinskog otkopavanja postale su akcije unutar višekriterijske analize, a podijeljene su u dvije grupe: 1) Miniranje i 2) Mehaničko otkopavanje. Po hijerarhiji su kriteriji podijeljeni u dva klastera (1. Stijenski materijal i 2. Dodatni uvjeti), pri čemu se svaki klaster dijeli u dvije grupe (1. klaster na Značajke intaktne stijene i Značajke stijenske mase, a 2. klaster na Društveno-ekološki utjecaj i Tehnološki zahtjevi).

U grupu kriterija koji opisuju značajke intaktne stijene uključene su čvrstoća, tvrdoća, žilavost i abrazivnost intaktne stijene pa je time zadovoljena jedna od pomoćnih hipoteza istraživanja, kojom je bilo pretpostavljeno da su čvrstoća, tvrdoća i žilavost presudne značajke intaktnog stijenskog materijala kod odabira odgovarajućeg mehanizma loma. Što se tiče grupe kriterija koji opisuju strukturu i značajke stijenske mase, kreirana su dva modela. U modelu A stijenska masa karakterizira se parametrima koji su izdvojeni na temelju dosadašnjih istraživanja drugih autora, dok su u modelu B za karakterizaciju stijenske mase predloženi novi parametri. Tako su umjesto razmaka diskontinuiteta, orijentacije, postojanosti i otvorenosti pukotina, trošnosti i brzina P-valova stijenske mase predloženi volumetrijski broj pukotina, orijentacija dominantnog seta pukotina, stanje pukotina, trošnost i brzina S-valova stijenske mase, kao rezultat zapažanja nastalih doktorskim istraživanjem.

Kod uspoređivanja tehnologija otkopavanja stijenske mase (akcije) u odnosu na značajke stijenske mase (kriteriji) korištena je „kvalitativna“ evaluacija kriterija, budući da je cilj doktorskog istraživanja bio razviti općeniti model koji će omogućiti „kvalitativnu“ procjenu primjenjivosti dostupnih tehnologija površinskog otkopavanja u odnosu na značajke čvrste stijenske mase koja se planira otkopavati. Unutar modela A evaluirani su kriteriji dovedeni u vezu s akcijama tijekom prethodnih istraživanja, u modelu B su evaluirani svi novopredloženi kriteriji te je pritom korištena klasična kvalitativna ljestvica od 5 razina.

Ponderiranje kriterija značajki stijenske mase unutar predloženih modela uvelike je ovisno o udaljenosti između lokacije otkopavanja i štićenog objekta (društveno-ekološki kriterij). Što je lokacija otkopavanja bliže štićenom objektu, to je veća težina društveno-ekološkog kriterija (do maks. 30 %). Ponderiranje pojedinačnih kriterija za model A unutar grupa „Intaktna stijena“ i „Stijenska masa“ provedeno je na temelju rezultata analiza prethodnih istraživanja. Unutar Modela B svi novopredloženi kriteriji unutar grupe „Stijenska masa“ jednako su ponderirani, odnosno svim tim kriterijima dodijeljena je jednaka važnost.

Za brži postupak evaluacije i ponderiranja kriterija pomoću MS Excel programa izrađena je aplikacija koja na temelju unesenih vrijednosti kriterija pomoću „IF“ funkcije omogućuje logičko uspoređivanje između vrijednosti i očekivane vrijednosti.

Validacija razvijenih modela provedena je temeljem istraživanja u tri kamenoloma na području sjeverozapadne Hrvatske (Marčan, Špica i Hruškovec), čime se obuhvatilo više vrsta čvrste stijenske mase tipičnih za područje Republike Hrvatske. Značajke dobivene na terenu korištene su kao ulazni podaci (kriteriji) za modele, a rezultati višekriterijskih analiza (rang-liste akcija) uspoređeni su sa stvarno pirmjenjivim tehnologijama otkopavanja i prikazani u tablici 6.7.

Spomenuti rezultati pokazuju kako je model B, kojim su za karakterizaciju stijenske mase za potrebe otkopavanja predloženi novi parametri, u procjeni nešto uspješniji od modela A. Time je potvrđena i druga pomoćna hipoteza istraživanja kojom je pretpostavljeno da su veličina i oblik blokova (karakterizirani kroz volumetrijski broj pukotina i orijentaciju dominantnog seta pukotina) presudne strukturne značajke stijenske mase kod odabira tehnologije otkopavanja.

Specifičnost rezultata višekriterijskih analiza iz primjera kamenoloma Špica i Hruškovec je svakako prikaz rezanja kao jedne od primjenjivih tehnologija otkopavanja. No, rezanje za sada nema primjenu kod površinskog otkopavanja stijenske mase na području Hrvatske. Zato bi to mogao biti poticaj proizvođačima strojeva koji sudjeluju u operacijama otkopavanja rezanjem

da intenziviraju istraživanja oko mogućnosti primjene svojih strojeva na hrvatskim površinskim kopovima stijenske mase.

Konačno, zaključuje se kako su ispunjeni svi očekivani znanstveni doprinosi ovog istraživanja:

1) Predložena je metoda i izrađen je model za procjenu mogućnosti primjene tehnologija otkopavanja s obzirom na značajke stijenske mase, koji se mogu koristiti u projektnoj fazi bilo kakve vrste površinskoga iskopa u stijenskoj masi (seizmička metoda za manje iskope te model višekriterijske analize za veće iskope), proizvodnji strojeva koji sudjeluju u operacijama otkopavanja (perspektivnost rezanja kao tehnologije otkopavanja na površinskim kopovima), ali i kao temelj za dodatna znanstvena istraživanja te poboljšanje i proširenje osnovnog modela (uključiti u model kriterije učinkovitosti tehnologija otkopavanja i ekonomske kriterije). Novim pristupom koji podrazumijeva promatranje osnovnih mehanizama izdvajanja komada stijene iz stijenske mase, predložena je podjela mehaničkih tehnologija otkopavanja na kopanje, rijanje, rezanje i razbijanje.
2) Identificirane su značajke stijenske mase koje najznačajnije utječu na mogućnost primjene određene tehnologije otkopavanja. Čvrstoća, tvrdoća, žilavost i abrazivnost presudne su značajke intaktnog stijenskog materijala kod odabira odgovarajućeg mehanizma loma. Veličina i oblik blokova u stijenskoj masi, karakterizirani kroz volumetrijski broj pukotina i orijentaciju dominantnog seta pukotina, presudne su strukturne značajke stijenske mase kod odabira tehnologije otkopavanja.

LITERATURA

Abdullatif, O.M. and Cruden, D.M. (1983). The relationship between rock mass quality and ease of excavation. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, 28, 183–187.

Aki, K., Richards, P.G. (2009). Quantitative seismology. 2nd edition, University Science Books. Doi:10.1016/S0065-230X(09)04001-9.

Antičević, H. (2011). Određivanje zone oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem. Thesis (PhD). Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb.

Atkinson, T. (1971). Selection of open pit excavating and loading equipment. *Trans. Institution of Mining and Metallurgy*, 80, A101–A129.

Bailey, A.D. (1975). Rock types and seismic velocity versus rippability. *Highway Geology Symposium Proceeding*, 26, 135–142.

Basarir, H. and Karpuz, C. (2004). A rippability classification system for marls in lignite mines. *Engineering Geology*, 74, 303–318.

Baron, L.I. and Kuznetsov, A. V. (1961). Rock Abrasivity When Extracted [in Russian], AN SSSR, Moscow.

Barton, N.R. (2006). Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. 1st Edition, CRC Press, 2006, ISBN 9780415394413, p 756.

Barton, N.R. and Choubey V. (1977). The shear strenth of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54.

Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6/4, 189–236.

Bhandari, S. (1997). Engineering Rock Blasting Operations. Rotterdam: A.A. Balkema.

Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (Edited by Bieniawski Z.T.), Cape Town, Balkema, 1, 97-106.

Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability: Experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 15.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons Inc. A Wiley-Interscience publication, New York, U.S.A., p. 251.

Bilgin, N., Dincer, T. and Copur, H. (2002). The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 237–247.

Bilgin, N., Tumac, D., Feridunoglu, C., Karakas, A.R. and Akgul, M. (2005). The performance of a roadheader in high strength rock formations in Küçüksu tunnel. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak. Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 452 9, DOI: 10.1201/NOE0415374521.ch121.

Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H. and Akcin, N. (2006). Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 139–156.

Bollinger, G.A. (1972). Historical and recent seismic activity in South Carolina. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(3), 851-864.

Bolt, B.A. (2003). Earthquakes (5th Edition). Published by W.H. Freeman & Company (first published 1978), p. 378.

Borović, S., Terzić, J. and Urumović, K. (2019). Conditions for shallow geothermal energy utilization in Dinaric karst terrains in Croatia. *Environ Earth Sci*. 78, 245.

Brans, J.P. and Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science,* 31(6), 647-656.

Brans, J.P., Vincke, P. and Mareschal B. (1986). How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. *European Journal of Operations Research*, 24(2), 228-238.

Broch, E. and Franklin. J.A. (1972). The Point Load Strength Test. *Int. Journal Rock Mech. Min. Sci*, 9, 669-697.

BS 5930 (1981). Code of Practice for Site Investigations. British Standards Institution (BSI), London, p. 147.

Brinkman, J.R. (1987). Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms. Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, 6-15.

Britton, R.R, Konya, C.J. and Skidmore, D.R. (1984). Primary Mechanism for Breaking Rock with Explosives, 942-948.

Brown, E.T. (Ed). (1981). Rock characterization, testing and monitoring – ISRM suggested methods. Oxford, Pergamon. 171-183.

Bukovac, J., Šušnjar, M., Poljak, M. and Čakalo, M. (1984). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Črnomelj K33-91, Geološki zavod, Zagreb; Geološki zavod, Ljubljana (1972-1983), Savezni geološki institut, Beograd.

Calx; Grupa autora, (2018). Elaborat o rezervama za eksploatacijsko polje „Špica" – V. obnova proračuna, Calx d.o.o., Zagreb.

Calx; Grupa autora, (2019). Elaborat o rezervama za eksploatacijsko polje „Hruškovec" – VI. obnova proračuna, Calx d.o.o., Zagreb.

Caterpillar Inc. (1988). Caterpillar performance handbook. Edition 19, Caterpillar Inc., Preoria, Illinois, U.S.A.

Caterpillar Inc. (2001). Caterpillar performance handbook. Edition 32, Caterpillar Inc., Preoria, Illinois, U.S.A.

Caterpillar Inc. (2015). Caterpillar performance handbook. Edition 45, Caterpillar Inc., Preoria, Illinois, U.S.A., p. 2264.

Church, H.K. (1981). Excavation handbook. McGraw-Hill Inc., New York, 1024 p.

Coursen, D.L. (1980). A Gas Penetrtion Model of Fragmentation. *Proc.Soc.Experimental Stress Analysis*, Fall meeting, 24-29.

Cunningham C. V. B. (1983). The Kuz-Ram Model for the Prediction of Fragmentation from Blasting, Proceedings of the International Symposium on Rock Fragmentation and Blasting, Lulea, 439-454.

Cunningham C. V. B. (1987). Fragmentation Estimations and the Kuz-Ram Model – Four Years on, Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, 475-487.

Cunningham C. V. B. (2005). The Kuz-Ram Model-20 years on, Brighton Conference Proceedings, 201-210.

Das, B.M. (1983). Fundamentals of soil dynamic, Elsevier Science Publishing Co., 90-91.

Deere, D.U. (1968). Geological Considerations Rock Mechanics in Engineering Practice, ed. R.G. Stage and D.C. Zienkiewicz, Wiely. NewYork, p.1-20.

Dessureault, S. (2004). Rock excavation course notes: spring 2003. University of Arizona, Mining and geological engineering.

Djordjevic, N. (1999). Two-component of blast fragmentation. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast 1999*, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa. p. 213–219.

Dimitrijević, M. (1964). Strukturna geologija. Rudarsko-geološki fakultet, Laboratorija za metode geološkog kartiranja, p. 169.

Dobrilović, M. and Bohanek, V. (2013). Utjecaj miniranja u cestogradnji na okolne prometnice. Dani prometnica 2013 – Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 313-347.

Dowding, C.H. and Aimone, C.T. (1992). Rock Breakage: Explosives. Mining Engineering Handbook. Sacramento: CO:Society Mining, Metallurgy and Exploration, 722-760.

Duncan, C. W. (1999). Foundations on Rock. Second Edition. E. & F.N. Spon.

Duncan, N. (1969). Engineering geology and rock mechanics, vol 2. Leonard Hill, London.

Ester, Z. (1996). Utjecaj zaloma na rezultate miniranja podzemnih prostorija. Thesis (PhD). Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb.

Evans, I. (1961). A theory of the basic mechanics of coal ploughing. In: Clark GB, editor. Proceedings of the international symposium on mining research, Vol. 2. University of Missouri, Oxford: Pergamon Press, p. 761–768.

Evans, I. (1972). Line spacing of picks for efficient cutting. *Int J Rock Mech Min Sci*. 9, 355–359.

Evans, I. (1982). Optimum line spacing for cutting picks. *Min Eng*, 433–4.

Evans, I. (1984). A theory of the cutting force for point attack picks. *Int J Min Eng,* 2, 63–71.

Evans, I. and Murrel, S.A.F. (1962). Wedge penetration into coal. *Colliecy Engng* 39, 455, 11.

Evans, I. and Pomeroy, C.D. (1966). The strength, fracture and workability of coal. Oxford: Pergamon Press; Library of Congress Catalog Card No. 66-14657.

Farmer, I.W. (1968). Engineering properties of rocks. Spon Ltd., London.

Foti, S. (2000). Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves. Thesis (PhD), Politecnico di Torino, Italy, p 229.

Foti, S., Parolai, S., Albarello, D. and Picozzi, M. (2011). Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization. *Surveys in Geophysics*, 32/6, 777–825.

Franklin, J.A., Broch, E., Walton, G. (1971). Logging the mechanical character of rock. *Trans. Institution of Mining and Metallurgy*, 80, A1–A9.

Gazdek, M. (2003). Primjena seizmičkih metoda u gotehnici. Master Thesis, University of Zagreb, Facuty of Civil Engineering.

Geometrics Inc, OYO Inc (2003). SeisImager/2D manual. Version 3.3, p 257.

GN 200 (1978.) Prosječne norme u građevinarstvu II. dio, niskogradnja. Građevinska knjiga, Beograd.

Goktan, R.M. and Gunes, N. (2005). A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, 466–472.

Gurocak, Z. and Yalcin, E. (2016). Excavatability and the effect of weathering degree on the excavatability of rock masses: An example from Eastern Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 118, 1-11.

Hadjigeorgiou, J. and Poulin, R., (1998). Assessment of ease of excavation of surface mines. *Journal of Terramechanics*, 35, 137–153.

Hadjigeorgiou, J. and Scoble, M.J. (1988). Prediction of digging performance in mining. *International Journal of Surface Mining*, 2, 237–244.

Hadjigeorgiou, J. and Poulin, R., (1998). Assessment of ease of excavation of surface coal mines. J. Terramech. 35, 137– 153.

Hamidi, J.K., Rezai, B. and Bejari, H. (2009). Applicaton of Fuzzy Set Theory to Rock Engineering Classification Systems: An Illustration of the Rock Mass Excavability Index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 43, pp 335-350.

Hayashi, K. (2003). Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods. *Proceedings of the SAGEEP 2003*, San Antonio, Texas, SUR08.

Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses. 23rd Rankine Lecture. Géotechnique 33(3), 187-223.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2), 4-16.

Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). Underground excavations in rock. Instn. Min. Metall., London, p 527.

Hoek E. and Brown E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. In Rock Engineering for Underground Excavations, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (Edited by Curran J.C.), 31-38.

Hoek, E. and Brown, E.T. (1997). Practical estimates or rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 34(8), 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 1, 267–273.

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

Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995). Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema. p 215.

Hoek, E. and Karzulovic, A. (2000). Rock mass properties for surface mines. *In*: W.A. Hustralid, M.K. McCarter and D.J.A. van Zyl, eds. *Slope Stability in Surface Mining*. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), 59–70.

Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Geol. Env.* 57(2), 151-160.

Hoek, E., Wood, D. and Shah, S. (1992). A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *Proceedings of Rock Characterization, Symposium of the International Society of Rock Mechanics*: *Eurock '92*, 14–17 September, London. Chester: Thomas Telford, 209–214.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Mikaiel, R. (2012). Comparison of Some Rock Hardness Scales Applied in Drillability Studies. Arab J Sci Eng 37:1451–1458.

Hrženjak, P. (2004). Određivanje složenih kliznih ploha i postupaka proračuna stabilnosti stijenskih kosina. Thesis (PhD). Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb.

Hudson, J.A. (1989). Rock mechanics principles in engineering practice. Butterworths. CIRIA, London, p. 72.

Hustrulid, W. (1999): Blasting Principles for Open Pit Mining: Theoretical Foundations. Volume 2, Balkema, Rotterdam, 980-998.

IGH (2001). Opći tehnički uvjeti za radove na cestama (knjiga 1 i 2). Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

ISRM (1981). Rock characterization, testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Suggested methods. Editor: Brown, E.T. Commission on testing and monitoring, ISRM. Pergamon Press. p. 211.

ISRM (1985). Point load test, suggested method for determining point load strength. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 22, 51–60.

ISRM (1988). Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. (F. Ouchterlony coordinator), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, 71- 96.

ISRM (2007). The Blue Book: "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006", Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson.

Ivanović, A., Sakač, K., Marković, S., Sokač, B., Šušnjar, M., Nikler, I. and Šušnjara A. (1973). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Obrovac K33-140, lnstitut za geološka istraživanja, Zagreb (1962-1967), Savezni geološki institut, Beograd.

Ivanović, A., Sikirica, V., Marković, S. and Sakač, K. (1977). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Drniš K33-9, lnstitut za geološka istraživanja, Zagreb (1967-1972), Savezni geološki institut, Beograd.

Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1979). Fundamentals of Rock Mechanics. Third Edn., Chapman and Hall, p. 593.

Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, F.J.A. (1995). Drilling and Blasting of Rocks, 1st edn. Balkema, Rotterdam.

Jovanovski, M., Žileska Pančovska, V. and Peshevski, I. (2011). ERMR System – an Useful Tool In Defining of Technology for Excavation. *Organization, Technology and Management in Construction – an International Journal*, 3(2), 302-307.

Jug, J., Stanko, D., Grabar, K. and Hrženjak, P. (2020). New approach in the application of seismic methods for assessing surface excavatability of sedimentary rocks. *Bull Eng Geol Environ* 79(4), p. 17, https://doi.org/10.1007/s10064-020-01802-1.

Kaile, W., Guoping, Y., Kaijun, H., Kai, W. and Guojun, C. (2014). The application status and prospects of vibro ripper. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 3(3), 158-161.

Kalachand, S. and Kaila, K.L. (1996). Ambiguity in the solution to the velocity inversion problem and a solution by joint inversion of seismic refraction and wide-angle reflection times. *Geophys. J. Int.*,124, 215-227.

Kanchibotla, S.S., Valery, W. and Morrell, S. (1999). Modelling fines in blast fragmentation andits impact on crushing andgrinding. *Proceedings of Explo'99 - A Conference on Rock Breaking*. The Australasian Institute of Mining andMetallurgy, Kalgoorlie, Australia, 137–44.

Karadogan, A., Karhiman, A. and Ozer, U. (2008). Application of fuzzy set theory in the selection of an underground mining method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 108, no. 2.

Karpuz, C. (1990). A classification system for excavation of surface Coal Measures. *Mining Science Technology*, 11, 157–163.

Kesarwani, A., Sharma, A. and Jain, C. (2012). MASW versus Refraction Seismic Method in terms of acquisition and processing of data and the accuracy of estimation of velocity profiles. *9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*, Hyderabad 2012, P-320, p 5.

Khamehchiyan, M., Dizadji, M. R., Esmaeili M. (2014). Application of rock mass index (RMi) to the rock mass excavatability assessment in open face excavations. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, Vol. 9, No. 1, 63–71.

Kirsten, H.A.D. (1982). A classification system for excavation in natural materials. *Civil Engineering in South Africa = Siviele Ingenieurswese* 24/7, 293-308.

Klanfar, M. (2014). Optimization of diabase quarrying in complex deposits. Thesis (PhD). Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb.

Kobayashi, A.S. (1973). Experimental techniques in fracture machanics. The Iowa University Press and Society for experimental stress analysis, Connecticut, Westport.

Komatsu (2013). Specifications and application handbook, Edition 31. Tokyo, Japan: Komatsu Ltd., p 958.

Kovačević, M.S., Marčić, D. and Gazdek, M. (2013). Application of geophysical investigations in underground engineering. *Technical Gazette*, 20/6, 1111-1117.

Kramadibrata, S. (1996). The influence of rock mass and intact rock properties on the design of surface mines with particular reference to the excavatability of rock. Thesis (PhD). Curtin University of Technology.

Kujundžić, T. (2002). Impact Values upon Rock Excavation by Hydraulic Hammer. Thesis (PhD). Zagreb, Faculty of Geology, Mining and Petroleum Engineering.

Kujundžić, T., Bedeković, G., Kuhinek, D. and Korman, T. (2008). Utjecaj tvrdoće stijene na usitnjavanje hidrauličnim čekićem i na drobljenje u čeljusnoj drobilici. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 20, 83-90.

Kuznetsov, V. M. (1973). The Mean Diameter of the Fragments Formed by Blasting Rock. *Soviet Mining Science*, 9, 144 148.

Lai, E., Lundie, S. and Ashbolt, N.J. (2008). Review of multi-criteria decision-aid for integrated sustainability assessment of urban water systems. *Urban Water Journal*, 5(4), 315-327.

Liang, M,, Mohamad, E.T., Komoo, I., Chau-Khun, Ma (2017). Performance evaluation of existing surface excavation assessment methods on weathered sedimentary rock. *Bull Eng Geol Environ*, 76, 205–218.

Li Chun-rui, Kang Li-jun, Qi Qing-xing, Mao De-bing, Liu Quan-ming and Xu Gang (2009). The Numerical Analysis of Borehole Blasting and Application in Coal Mine RoofWeaken. The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science 1, 451-459, Beijing, China.

Lida Zhu, Tianhua Wei, Baoguang Liu, Tianbiao Yu (2016). Simulation analysis of rock braking mechanism of tunnel boring machine. Tehnički vjesnik 23, 6,1585-1590

Lilly P. A. (1986). An empirical method of assessing rock mass blastability, The Aus. IMM/IE Aust Newman Combine group, Large Open Pit Mining Conference.

Louie, J.N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91/2, 347–364.

Lukić, D.Č., Anagnosti P.V., (2010). Geotehnika saobraćajnica. Građevinski fakultet, Subotica.

MacGregor, F. (1998). The rippability of rock. Thesis (PhD). School of Civil Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia

MacGregor, F., Fell, R., Mostyn, G.R., Hocking, G. and Nally, G. (1994). The estimation of rock rippability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27, 123–144.

Mahase, M.J., Musingwini, C. and Nhleko, A.S. (2016). A surwvey of applications of multi-criteria decision anlysis methods in mine planning and related case studies. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116, pp 1051-1056.

Mareschal, B. (2012). Visual PROMETHEE 1.0 Manual, Bruxelles, Belgija.

Marinčić, S., Magaš, N. and Borović, I. (1971). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Split K33-21, lnstitut za geološka istraživanja, Zagreb (1968-1969), Savezni geoloski institut, Beograd.

Marinos. P and Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of GeoEng 2000 Conference, Melbourne, 1:1422–1446.

Marinos, P. and Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Enginng Geol. & the Environment (IAEG)*, 60, 85-92.

Martin, R. P. and Hencher, S. R. (1986). Principles for Description and Classification of Weathered Rock for Engineering purposes. Engineering Geology Special Publications, Geological Society, London, 2, 299-308.

Mayne, P.W., Christopher, B.R. and DeJong, J. (2001). Manual on Subsurface Investigations. National Highway Institute, Publication No. FHWA NHI-01-031, Washington, USA.

McLean, A.C., Gribble, C.D. (1985). Geology for Civil Engineers, Second Edition. University of Glasgow, p 334.

Miko, S., Kastmuller, Ž., Kruk, B., Dedić, Ž., Crnogaj, S., Pencinger, Ž., Hasan, O., Kruk, Lj. (2014). Studija potencijala i osnove gospodarenja mineralnim sirovinama na području Varaždinske županije. HGI (Hrvatski geološki institut), Zagreb.

Miller, R.P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. Thesis (PhD). University of Illinois.

Minty, E.J. and Kearns, G.K. (1983). Rock mass workabilitiy in collected case studies in Engineering Geology, Hydrogeology and Environmental Geology. *Geological Society of Australia*, 59-81.

Mladineo, N. (2009). Podrška izvođenju i odlučivanju u graditeljstvu (manuskript za internu uporabu). Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska.

Moustafa Sayed, S.R. (2015). Assessment of Excavatability in Sedimentary Rocks Using Shallow Seismic Refraction Method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20 (4), 1373-1382.

Muskhelishvili, N.I. (1953). Some basic Problems of the mathematical theory of elasticity.Ttranslated by J.R.M. Radok, Nordhoff.

Natević, Lj. and Petrović, N. (1967). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Trebinje K34-37, Geološki zavod Sarajevo (1963), Savezni geološki institut, Beograd.

Nguyen, H. and Bui, X.N. (2015). Simulation of the breaking rock processing by hydraulic breaker in surface mines according to the results of Bousinessq mathematical. Inetrnational Workshop on Advances in Surface Mining for Environmental Protection and Sustainable Development At: Hanoi, Vietnam, 107-112.

Özdoğan, M. and Özdoğan, H (2016): Digging forces of electric rope shovel (ers) and adjustments made for a better digging shovel having optimum dipper rake and tooth angles. International Black Sea Mining & Tunnelling Symposium, 2-4 November 2016/Trabzon-Turkey.

Ozkahraman, H. T. (2008). Breakage Mechanisms and an Encouraging Correlation Between the Bond Parameters and the Friability Value. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 153-159.

Palmström, A. (1995). RMi – A rock mass characterization system for rock engineering purpose. Thesis (PhD). University of Oslo, Norway, p. 400.

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

Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp 1377-1380.

Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, Canada, 64, 800-808.

Park, C.B., Miller, R.D., Ryden, N., Xia, J. and Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. The Leading Edge, 26/1, pp 60-64.

Pasquet, S., Bodet, L., Dhemaied, A., Mouhri, A. and Vitale, Q. (2015). Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys: Insights from VP/VS or Poisson's ratios. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, 113, 38-50.

Polšak, A. (1967). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List Pula K34-112, lnstitut za geološka istraživanja, Zagreb (1963), Savezni geološki institut, Beograd.

Patton, F.D. (1966). Multiple modes of share failure in rock. *Proceedings of 1st Congress on Rock Mechanics*, ISRM, Lisbon, 1, 509-513.

Pettifer, G.S. and Fookes, P.G. (1994). A revision of the graphical method for assessing the excavability of rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27, 145–164.

Pranjić, J., Krklec, N. and Premur, V. (1999). Pridobivanje i zaštita okoliša na kamenolomu „Marčan". *Croatian Geotechnical Journal*, 7, 13-14, 29-43.

Rahn, P.H. (1986). Engineering geology. An environmental aprouch. Elsevier.

Raza, M.A. and Frimpong, S. (2013). Cable Shovel Stress & Fatigue Failure Modeling - Causes and Solution Strategies Review. *J Powder Metall. Min.* S1: 003. doi:10.4172/2168-9806.S1-003.

Redpath, B.B. (1973). Seismic refraction exploration for engineering site investigations. United States, DOI:10.2172/4409605.

Rosin, P. and Rammler, E. (1933). The laws governing the fineness of powdered coal, *J. Inst. Fuel*, 7, 29-36.

Rossmanith, H.P. (1983). Rock fracture mechanics. International centre for mechanical sciences. Technical University of Vienna. Springer-Verlag, Wien.

Rossmanith, H.P. (2002). Advanced Blasting in Jointed and Faulted Rock. *Naturwissenschaftlicher Verein für Steiermark*, Graz, 39-42.

Roxborough, F.F. and Phillips, H.R. (1975). Rock excavation by disc cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*s, 12, 12, 361-366.

Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationelle (RIRO)*, 8, 57–75.

Roy, B. (1996). Multicriteria methodology for decision aiding. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nizozemska. 1996.

Sandvik Tamrock Corporation (1999). Rock excavation handbook. Editor in chief: Matti Heiniö. Sweden, p. 183.

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.

Scoble, M.J. and Muftuoglu, Y.V. (1984). Derivation of a diggability indeks for surface mine equipment selection. *Mining Science and Technology*, 1, 305–322.

Scoble, M.J., Hadjigeorgiou, J., Nenonen, L. (1987). Development of an excavating equipment selection expert system, based on geotechnical considerations. *Proceedings of the 40th Canadian Geotechnical Conference, 1987; Regina*, 67-78.

Sefarim, J.L. and Pereira, J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions*, Lisbon, Portugal, 1.

Setchell, S., Azrief bin Azahar, M., Noor bin Rusli, Q. and Lowe, N. (2016). The use of Non-Invasive Geophysical Techniques to build 3-Dimensional ground models and reduce the cost and risk of site investigation. 19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference (19SEAGC & 2AGSSEA), Kuala Lumpur, p 5.

Sheehan, J.R., Doll, W.E. and Mandell, W.A. (2005). An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10, 1, 21-34.

Singh, R.N., Denby, B. and Egretli, I. (1987). Development of new rippability index for coal measures excavation, *Proceedings of the 28th US Symposium on Rock Mechanics*, 29 June–1 July, Tucson. Rotterdam: A.A. Balkema, 935–945.

Simon, H. A. (1960). The new science of management decision. New York, NY, US: Harper & Brothers.

Smith, H.J. (1986). Estimating rippability by rock mass classification. *Proceedings of the 27th US Symposium on Rock Mechanics*, University of Alabama. 443–448.

Soupios, P. and Kokinou, E. (2016). Environmental geophysics: Techniques, advantages and limitations. In book Geophysics: Principles, Applications and Emerging Technologies, Ed. Gemma Aiello, Nova Publisher, USA, pp 13-47.

Stokoe, K.H., Wright, S.G,. Bay, J.A. and Roesset, J.M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites. ISSMFE Technical Committee #10, edited by R.D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.

Strelec, S., Mesec, J., Grabar, K. and Jug, J. (2017). Implementation of in-situ and geophysical investigation methods (ERT & MASW) with the purpose to determine 2D profile of landslide. *Acta Montanistica Slovaca*, 22, 345-358.

Thuro, K. and Plinninger, R.J. (1999). Roadheader Excavation Performance – Geological and Geotechnical Influences. 9th ISRM Congress Paris, Theme 3: Rock Dynamics and Tectonophysics/Rock Cutting and Drilling, 1241-1244.

Thuro, K., Plinninger, R.J. and Spaun, G. (2002). Drilling, blasting and cutting - Is it possible to quantify geological parameters relating to excavatability? *Proceedings of the 9 Congress of the IAEG*, Durban, South Africa. Engineering Geology for Developing Countries, 16–20 September. Rotterdam: A.A. Balkema, 2853–2862.

Tonnizam, M. E., Rosli, S., Muhazian, M., & Fauzi, M. (2010). Assessment on Excavatability in Weathered Sedimentary Rock Mass Using Seismic Velocity Method. *Journal of Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 1*(2), 258-263.

Tosun, A. (2014). Determination of Excavator Type According to Rock and Excavator Characteristics in Soft Formations That Can Be Excavated Directly. Journal of Mining Science, 50/2, 349–361.

Tsiambaos, G. and Saroglou, H. (2010). Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69, 13–27.

Walthan, A.C. (1999). Foundations of engineering geology. E. & F.N. Spon.

Weaver, J.M. (1975). Geological factors significant in the assesment of ripability. *The Civil Engineer in South Africa*, 17/12, 313-316.

Westergaard, H.M. (1939). Bearing pressures and cracks. Transactions of ASME, *J. Appl. Mech.*, 6, 49-53.

Whittaker, B.N., Singh, R.N., Sun, G. (1992). Rock fracture mechanics: principles, design and applications. Amsterdam: Elsevier.

Whiteley, R.J. and Greenhalgh, S.A. (1979). Velocity inversion and the shallow seismic refraction method. *Geoexploration*, 17, 125-141.

Williams, R.A., Stephenson, W.J., Odum, J.K. and Worley, D.M. (2003). Comparison of P- and S-wave velocity profiles from surface seismic refraction/reflection and downhole data. *Tectonophysics*, 368, 71–88.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. *Dijagram za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće stijene na temelju vrijednosti odskoka Schmidtova čekića (Miller, 1965)*

Slika 2.2. *Geometrijska svojstva diskontinuiteta (Hudson, 1989)*

Slika 2.3. *Mjerenje razmaka diskontinuiteta opažanjem izdanaka stijena na površini (ISRM, 1981)*

Slika 2.4. *Različiti modeli postojanosti za različite setove diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

Slika 2.5. *Parametri orijentacije diskontinuiteta*

Slika 2.6. *Dvije metode prikazivanja podataka orijentacije na rozetnom dijagramu (ISRM, 1981)*

Slika 2.7. *Standardni profili za određivanje JRC-a pomoću Bartonovog profilometra (Barton and Choubey, 1977)*

Slika 2.8. *Blok dijagrami s prikazom setova diskontinuit (Gonzalez de Vallejo and Ferrer, 2011)*

Slika 2.9. *Postupak mjerenja duljine bušotinske jezgre za proračun RQD indeksa*

Slika 2.10. *Princip terenskog mjerenja brzina posmičnih valova seizmičkom refrakcijom*

Slika 2.11. *Trošenje karbonatnih stijenskih masa*

Slika 2.12. *GSI klasifikacija razlomljenih stijenskih masa (Marinos i Hoek, 2000)*

Slika 2.13. *Dijagram odnosa između modula deformacije i geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase (Hoek and Karzulović, 2000)*

Slika 3.1. *Dijagram za grafičku procjenu mogućnosti otkopavanja na temelju čvrstoće stijene i I_f u stijenskoj masi (Franklin et al., 1971)*

Slika 3.2. *Dijagram odnosa RMR i Q indeksa kojim se klasificira stijenska masa za potrebe odabira metode otkopavanja (Abdullatif and Cruden, 1983)*

Slika 3.3. *Dijagram za grafičku procjenu mogućnosti otkopavanja na temelju čvrstoće stijene PLTi i veličine blokova stijene u stijenskoj masi (Pettifer i Fookes, 1994)*

Slika 3.4. *Dijagram za procjenu učinkovitosti stroja za otkopavanje stijenske mase s rotirajućom glavom na temelju jednoosne tlačne čvrstoće (Thuro and Plinninger, 1999)*

Slika 3.5. *Dijagram za procjenu učinkovitosti stroja za otkopavanje stijenske mase s rotirajućom glavom na temelju razmaka pukotina (Thuro and Plinninger, 1999*

Slika 3.6. *Dijagram odnosa između čvrstoće stijenske mase i GSI-a za različite tehnologije otkopavanja (Hoek and Karzulović, 2000)*

Slika 3.7. *Statistička zavisnost između IBR-a* i σ_{ci}*, za date vrijednosti RQD-a i P hidrauličnog čekića (Bilgin et al., 2002)*

Slika 3.8. *Korelacija između r i U za Atlas Copco ET 120 (Goktan and Gunes, 2005)*

Slika 3.9. *Predloženi GSI dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase PLT čvrstoće <3 MPa (Tsiambaos and Saroglou, 2010)*

Slika 3.10. *Predloženi GSI dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase PLT čvrstoće ≥3 MPa (Tsiambaos and Saroglou, 2010)*

Slika 4.1. *Sistem naprezanja na pukotinu*

Slika 4.2. *Tri osnovna načina širenja pukotina*

Slika 4.3. *Prvi način deformiranja pukotine (otvaranje), okomito na ravninu pukotine*

Slika 4.4. *Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine: 1 - minska bušotina, 2 - područje drobljenja, 3 - frakturirano područje, 4 - malo frakturirano područje i 5 - neporemećena stijena (Dobrilović and Bohanek, 2013)*

Slika 4.5. *Osnovni koncept teorije refleksije: A - minska bušotina, B - zona drobljenja, C - širenje tlačnog vala, D - slobodna površina, E - reflektirani (vlačni) val, F - odlomak dijela stijene na slobodnoj površini (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

Slika 4.6. *Međudjelovanje radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala: A - minska bušotina, B - radijalne pukotine, C - vlačni val reflektiran od slobodne površine, D - slobodna površina, E* - vlačna naprezanja *(Ester, 1996)*

Slika 4.7. *Shematski prikaz teorije jezgre ili valova naprezanja i pukotina: A - minska bušotina, B - vlačna pukotina, C - oštećenje, D - slobodna površina, P - longitudinalni val, S - transverzalni val (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

Slika 4.8. *Trokut miniranja*

Slika 4.9. *Utjecaj omjera između razmaka pukotina DS i razmaka bušotina na fragmentaciju odminirane stijenske mase*

Slika 4.10. *Orijentacija ploha dominantnog seta diskontinuiteta*

Slika 4.11. *Shematski prikaz penetracije klina u mekanu stijenu (Prema teoriji Evansa i Murrela, 1962)*

Slika 4.12. *Rezultantne sile rezanja stijene reznim alatom (Bilgin et al., 2005)*

Slika 4.13. *Primjeri hidrauličnih bagera lopatara s prikazanim dimenzijama zona otkopavanja: a) bager CAT 385C s visinskom lopatom; b) bager CAT 349E s dubinskom lopatom (Caterpillar, 2015)*

Slika 4.14. *Penetracija alata u stijenu i formiranje zona oštećenja (Sandvik Tamrock, 1999)*

Slika 4.15. *Nastanak pukotina penetracijom alata u stijenu*

Slika 4.16. *Tehnologija rada bagera lopatara: a) Punjenje visinske lopate stijenskim materijalom (Özdoğan and Özdoğan, 2016; b) Rad bagera s dubinskom lopatom na otkopavanju stijenske mase i utovaru u dampere* ***(****Caterpillar, 2015****)***

Slika 4.17. *Dimenzije dubinske bagerske ruke s lopatom (Caterpillar, 2015)*

Slika 4.18. *Mehanizmi rijanja u stijenskoj masi: 1) Oranje; 2) Drobljenje; 3) Razdvajanje i savijanje; 4) Popuštanje; 5) Kidanje; 6) Vađenje blokova (MacGregor, 1998)*

Slika 4.19. *Dubinski način otkopavanja rijačem s više zubi na hidrauličnom bageru (www.digrock.com)*

Slika 4.20. *Dijagram za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase metodom rijanja dozerom Caterpillar D8R (Caterpillar, 2015)*

Slika 4.21. *Determinacija naprezanja u točci M nastalog vanjskom silom P, prema* Bousinessqu *(Nguyen and Bui, 2015)*

Slika 4.22. *Stabilno stanje naprezanja (Nguyen and Bui, 2015)*

Slika 4.23. *Djelovanje hidrauličnog udarnog čekića na stijenu (Nguyen and Bui, 2015)*

Slika 4.24. *Nastanak reflektiranih valova i naprezanja kod rada hidrauličnog udarnog čekića na otkopavanju stijenske mase (Nguyen and Bui, 2015)*

Slika 4.25. *Najčešća metoda otkopavanja stijenske mase hidrauličnim čekićem, s prikazom područja najvećeg ukliještenja (Sandvik Tamrock, 1999)*

Slika 4.26. *Tipovi rotirajuće glave: a) longitudinalna; b) transverzalna (Sandvik Tamrock, 1999)*

Slika 4.27. *Glodanje stijene bradavičastim alatom: a) oštra bradavica; b) tupa bradavica (Ramenzahzadeh and Hood, 2010)*

Slika 4.28. *Utjecaj tehničkih parametara na učinkovitost strojeva s rotirajućom reznom glavom (Bilgin et al., 2006)*

Slika 4.29. *Model rezanja stijene diskom (Roxborough and Philips, 1975)*

Slika 4.30. *Proces loma stijene kao rezultat djelovanja diska (Lida Zhu et al., 2016)*

Slika 4.31. *Distribucija naprezanja u stijeni ispod diska s vrha sferičnog oblika*

Slika 4.32. *Indikativni dijagram za odabir strojeva sa rotirajućim glavom (Sandvik Tamrock, 1999)*

Slika 4.33. *Rezanje plastičnog materijala: a) tlačnom silom; b) posmičnom silom (Ramenzahzadeh and Hood, 2010)*

Slika 5.1. *Prostorni i površinski seizmički valovi generirani udarom čekića i primljeni geofonima. Smjerovi kretanja čestica u tlu prikazani su u pojednostavljeno. (Jug i sur., 2020)*

Slika 5.2. *Disperzija površinskih valova (Prerađeno prema Hayashi, 2003)*

Slika 5.3. *Širenje Rayleigh-evog vala (prerađeno prema Bolt, 2003)*

Slika 5.4. *P-valovi na granici dvaju medija (Das, 1983)*

Slika 5.5. *Princip terenskog mjerenja brzina posmičnih seizmičkih valova seizmičkom refrakcijom (Gazdek, 2003)*

Slika 5.6. *Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek, 2003)*

Slika 5.7. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Hruškovec*

Slika 5.8. *Graf vrijeme-brzina dobiven pikiranjem prvih nailazaka (SRS-Hruškovec)*

Slika 5.9. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Hruškovec)*

Slika 5.10. *MASW – terensko snimanje i obrada snimljenih podataka (Jug i sur., 2020)*

Slika 5.11. *Lokacije terenskih istraživanja na karti osnovnih geoloških regija Hrvatske (Prerađeno prema Borović et al., 2019)*

Slika 5.12. *Osnovna geologija istrašnih lokacija, prema osnovnoj geološkoj karti Hrvatske: a) Seget Donji; b) Obrovac; c) Mokošica; d) Kladnice; e) Jasenice; f) Pula; g) Split; h) Vrbovsko*

Slika 5.13. *Rezultati geofizički seizmičkih istraživanja u Puli: a) 2D V_P model dobiven SRS metodom; b) 2D V_S model dobiven MASW metodom (Jug i sur., 2020)*

Slika 5.14. *Fotografija jezgre iz istražne bušotine izvedene u Obrovcu*

Slika 5.15. *Probna otkopavanja: a) kopanje u Splitu; b) rijanje u Vrbovskom; c) razbijanje u Segetu Donjem; d) priprema minskog polja u Kladnicama (Jug i sur., 2020)*

Slika 5.16. *Profili otkopavanja s lokacije u Puli: a) probno otkopavanje; b) procjena otkopavanja prema novopredloženoj seizmičkoj metodi i izmjerenim V_S; c) procjena otkopavanja prema metodi predloženoj od Caterpillar Inc. za dozer Cat D8R (Caterpillar 2015) i izmjerenim V_P (Jug i sur., 2020)*

Slika 5.17. *Postotno poklapanje procjena novopredložene klasifikacije s procjenama postojećih klasifikacija (Jug i sur., 2020)*

Slika 6.1. *Prikaz funkcije H(d) (Mladineo, 2009)*

Slika 6.2. *Glavni je prozor (engl. Main Window) računalnog programa Visual PROMETHEE s primjerom seta podataka za odluku o primjenjivosti tehnologija otkopavanja stijenske*

Slika 6.3. *Asistent za kreiranje težina ili pondera: a) hijerarhijski način, b) apsolutni način*

Slika 6.4. *Prikaz rezultata PROMETHEE analize: a) PROMETHEE I djelomični poredak; b) PROMETHEE II kompletni poredak*

Slika 6.5. *PROMETHEE Diamond prikaz rezultata PROMETHEE I i II analize*

Slika 6.6. *PROMETHEE Network prikaz rezultata PROMETHEE I analize*

Slika 6.7. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize*

Slika 6.8. *2D prikaz rezultata GAIA analize, u ravnini u-v*

Slika 6.9. *3D prikaz rezultata GAIA analize*

Slika 6.10. *Organizacija akcija u vidu tehnologija otkopavanja za višekriterijsku analizu*

Slika 6.11. *Hijerarhija kriterija za Model A, sukladno prethodnim istraživanjima*

Slika 6.12. *Hijerarhija kriterija za Model B, sukladno novim istraživanjima*

Slika 6.13. *Utjecaj orijentacije dominantnog seta pukotina na podatljivost stijenske mase otkopavanju: a) Izrazito nepovoljna; b) Nepovoljna; c) Srednje povoljna; d) Povoljna*

Slika 6.14. *Prozor asistenta za pomoć pri ponderiranju kriterija unutar Visual PROMETHEE-a: a) Scenarij 1; b) Scenarij 4*

Slika 6.15. *Geološka karta Varaždinske županije s označenim lokacijama kamenoloma koji su odabrani za validaciju modela (HGI, 2014)*

Slika 6.16. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na 1. etaži kamenoloma Marčan, priprema za generiranje seizmičkih valova čekićem mase 10 kg*

Slika 6.17. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Marčan, točka paljenja na sredini profila (24 m od početka)*

Slika 6.18. *Graf vrijeme-brzina dobiven pikiranjem prvih nailazaka snimljenih u kamenolomu Marčan*

Slika 6.19. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Marčan)*

Slika 6.20. *2D interpretirani profil brzina S-valova (MASW-Marčan)*

Slika 6.21. *PROMETHEE II kompletni poredak za model A, "Marčan": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.22. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model A, "Marčan": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.23. *PROMETHEE II kompletni poredak za model B, "Marčan": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.24. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model B, "Marčan": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.25. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na platou kamenoloma Špica*

Slika 6.26. *Postupak pikiranja na seizmogramu dobivenom u kamenolomu Špica, točka paljenja na početku profila (0 m)*

Slika 6.27. *Graf vrijeme-brzina dobiven pikiranjem prvih nailazaka snimljenih u kamenolomu Špica*

Slika 6.28. *2D interpretirani profil brzina P-valova (SRS-Špica)*

Slika 6.29. *Interpretacija MASW istraživanja u kamenolomu Špica: a) Disperzijska krivulja; b) 1D profil brzina S-valova; c) 2D profil brzina S-valova*

Slika 6.30. *PROMETHEE II kompletni poredak za model A, "Špica": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.31. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model A, "Špica": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.32. *PROMETHEE II kompletni poredak za model B, "Špica": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.33. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za model B, "Špica": a)* uključen društveno-ekološki utjecaj; b) bez društveno-ekološkog utjecaja

Slika 6.34. *Provođenje terenskih geofizičkih ispitivanja na 1. etaži kamenoloma Hruškovec*

Slika 6.35. *Interpretacija MASW istraživanja u kamenolomu Hruškovec: a) Disperzijska krivulja; b) 1D profil brzina S-valova*

Slika 6.36. *PROMETHEE II kompletni poredak za kamenolom "Hruškovec": a) model A; b) model B*

Slika 6.37. *PROMETHEE Table prikaz rezultata PROMETHEE II analize za kamenolom "Hruškovec": a) model A; b) model B*

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. *Klasifikacija stijena obzirom na njihovu tvrdoću (Jimeno et al., 1995)*

Tablica 2.2. *Klasifikacija stijena po abrazivnosti (Baron and Kuznetsov, 1961)*

Tablica 2.3. *Područje vrijednosti lomne žilavosti za neke vrste stijena (Whittaker et al., 1992)*

Tablica 2.4. *Vrijednosti čvrstoće intaktnih stijena (Walthan, 1999; Rahn, 1986; Farmer, 1968)*

Tablica 2.5. *Iskustvene vrijednosti brzina širenja P-valova u intaktnoj stijeni (Gonzalez de Vallejo i Ferrer, 2011)*

Tablica 2.6. *Opis stupnja trošnosti intaktne stijene (ISRM, 1981)*

Tablica 2.7. *Opis razmaka diskontinuiteta*

Tablica 2.8. *Opis postojanosti diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

Tablica 2.9. *Ocjena stupnja rastrošenosti stjenke diskontinuiteta i stijenske mase*

Tablica 2.10. *Opis zijeva diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

Tablica 2.11. *Opis procjeđivanja u diskontinuitetima (ISRM, 1981)*

Tablica 2.12. *Klasifikacija stijenske mase prema broju setova diskontinuiteta (ISRM, 1981)*

Tablica 2.13. *Opis veličine bloka na temelju volumetrijskog broja pukotina (ISRM, 1981)*

Tablica 2.14. *Opis kvalitete stijenske mase prema RQD indeksu (Deere, 1968)*

Tablica 2.15. *Prosječne vrijednosti brzina P i S-valova i prosječne gustoće ρ za neke stijene (Bolllinger, 1971; Redpath, 1973)*

Tablica 2.16. *Klasifikacija stijenske mase obzirom na stupanj trošnosti*

Tablica 2.17. *Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće (Brown, 1981)*

Tablica 2.18. *Procjena veličine konstante m_i za intaktnu stijenu, ovisno o vrsti stijene*

Tablica 2.19. *Upute za procjenu faktora poremećenosti D (Hoek et al., 2002)*

Tablica 3.1. *Metode korištene za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase*

Tablica 3.2. *Sustav bodovanja značajki stijenske mase za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja različitih vrsta stijena rijanjem dozerom (Weaver, 1975)*

Tablica 3.3. *Analiza metoda bodovanja stijenske mase za procjene mogućnosti otkopavanja rijanjem*

Tablica 3.4. *Klasifikacija tla prema načinu iskopa (GN 200, 1978)*

Tablica 3.5. *Klasifikacija tla kategorije od IV do VII temeljem mogućnosti strojnog iskopa bez eksploziva (Lukić and Anagnosti, 2010)*

Tablica 3.6. *Kategorizacija materijala za iskop pri zemljanim radovima na cestama (IGH, 2001)*

Tablica 4.1. *Grafički prikaz faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Ester, 1996; Antičević, 2011)*

Tablica 4.2. *Određivanje faktora pukotina JFa (Prema Cunningham, 1987; 2005)*

Tablica 4.3. *Prednosti otkopavanja stijenske mase rijanjem u odnosu na miniranje*

Tablica 4.4. *Analiza utjecaja različitih značajki stijenske mase na tehnologije otkopavanja*

Tablica 5.1. *Rezultati terenskih istraživanja i probnih iskopa (Jug i sur., 2020)*

Tablica 5.2. *Rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka intaktne stijene iz istražnih bušotina*

Tablica 5.3. *Novopredložena klasifikacija sedimentne stijenske mase za potrebe procjene mogućnosti otkopavanja kod površinskih iskopa (Jug i sur., 2020)*

Tablica 5.4. *Usporedba novopredložene klasifikacije s rezultatima provedenih iskopa i odabranih postojećih metoda (Jug i sur., 2020)*

Tablica 6.1. *Tipovi kriterija preferencije s analitičkim definicijama i grafičkim prikazima*

Tablica 6.2. *Popis kriterija za PROMETHEE analizu s kategorizacijom i vrijednostima*

Tablica 6.3. *Međuovisnost smjera otkopavanja i orijentacije pukotina na primjeru rijanja*

Tablica 6.4. *Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija izrađenu unutar MS Excel programa: Evaluacija kriterija Modela A*

Tablica 6.5. *Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija izrađenu unutar MS Excel programa: Evaluacija kriterija Modela B*

Tablica 6.6. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Marčan*

Tablica 6.7. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Špica*

Tablica 6.8. *Značajke intaktne stijene za lokaciju kamenoloma Hruškovec*

Tablica 6.9. *Rezultati validacije modela*

POPIS SIMBOLA

SIMBOL	JEDINICA	OPIS
X	[%]	Udio nekog minerala u sastavu stijene
H	[1]	Mohsova tvrdoća
N	[1]	Broj minerala u sastavu stijene
LA	[1]	Los Angeles koeficijent za determinaciju otpornosti stijene na abraziju
K_{IC}	[MPa $m^{1/2}$]	Lomna žilavost stijene
σ_{ci}	[MPa]	Tlačna čvrstoća intaktne stijene
σ_{cm}	[MPa]	Tlačna čvrstoća stijenske mase
σ_t	[MPa]	Vlačna čvrstoća stijene
F_c	[N]	Tlačna sila
F_t	[N]	Vlačna sila
A	[m^2]	Ispitivana površina uzorka
$I_{S(50)}$	[MPa]	Indeks čvrstoće opterećenjem u točki iz PLT ispitivanja
F	[1]	Korekcijski faktor kod PLT ispitivanja
P	[N]	Veličina sile sloma uzorka kod PLT ispitivanja
D_e	[m]	Efektivni promjer uzorka kod PLT ispitivanja
W	[m]	Prosječna širina uzorka kod PLT ispitivanja
D	[m]	Razmak između točaka opterećenja, odnosno debljina uzorka na mjestu PLT ispitivanja
f	[1]	Faktor konverzije kod PLT ispitivanja
V_P	[m/s]	Brzina seizmičkih P-valova
V_S	[m/s]	Brzina seizmičkih S-valova
V_R	[m/s]	Brzina seizmičkih R-valova
t_P	[s]	Vrijeme prolaska P-vala kroz uzorka stijene
l	[m]	Duljina uzorka stijene
DS_{min}	[m]	Minimalni razmak diskontinuiteta
DS	[m]	Srednji razmak diskontinuiteta
DS_{max}	[m]	Maksimalni razmak diskontinuiteta
α	[°]	Smjer nagiba (azimut) diskontinuiteta (engl. dip direction)
β	[°]	Nagib ravnine diskontinuiteta (engl. dip)
δ	[°]	Pružanje ravnine diskontinuiteta
i	[°]	Kut hrapavosti diskontinuiteta
Φ_B	[°]	Osnovni kut trenja diskontinuiteta
Φ_P	[°]	Konačni kut trenja diskontinuiteta
Φ_r	[°]	Rezidualni kut trenja diskontinuiteta
σ	[MPa]	Normalno naprezanje
σ_n	[MPa]	Normalno efektivno naprezanje na plohi diskontinuiteta
τ	[MPa]	Posmično efektivno naprezanje na plohi diskontinuiteta
ε	[1]	Deformacija
JRC	[1]	Koeficijent hrapavosti diskontinuiteta
JCS	[MPa]	Tlačna čvrstoća stjenki diskontinuiteta
γ	[kN/m^3]	Jedinična težina stijene
ρ	[g/cm^3]	Gustoća stijene
r	[1]	Vrijednost odskoka Schmidtovog čekića
I_b	[1]	Indeks veličine bloka

J_v	[pukotina/m^3]	Volumetrijski broj pukotina
RQD	[%]	Indeks kvalitete jezgre stijene
σ_1 i σ_3	[MPa]	Najveće i najmanje efektivno naprezanje prilikom sloma
m_i	[1]	Konstanta materijala za intaktnu stijenu
m	[1]	Vrijednost Hoek-Brown konstante m_i za stijensku masu
s i *a*	[1]	Konstante koje ovise o karakteristikama stijenske mase
GSI	[1]	Geološki indeks čvrstoće stijenske mase
D	[1]	Faktor koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase
RMR	[1]	Indeks kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1976)
RMR_{89}	[1]	Indeks kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1989)
E	[GPa]	Modul deformacije
E_m	[GPa]	Youngov modul elastičnosti
E_i	[GPa]	Modul deformacije intaktne stijene
G	[GPa]	Modul posmika
v	[1]	Poissonov koeficijent
I_f	[1]	Indeks razmaka pukotina u stijenskoj masi
J_a	[1]	Indeks alteracije pukotina u stijenskoj masi
RMi	[1]	Indeks kvalitete stijenske mase (Palmström, 1995)
Q	[1]	Indeks kvalitete stijenske mase (Barton et al., 1974)
IBR	[m^3/h]	Otkopni učinak hidrauličnog čekića
P	[HP]	Snaga hidrauličnog čekića
RMCI	[MPa]	Indeks rezivosti stijenske mase
U	[m^3/h]	Otkopni učinak stroja s rotirajućom reznom glavom
K	[1]	Faktor veličine naprezanja (engl. Stress Intensity Factor)
RF	[1]	Faktor stijene (Cunningham, 1987)
BI	[1]	Indeks minirljivosti stijene (Lilly, 1986)
C(RF)	[1]	Faktor korekcije pri izračunu *RF* (Cunningham, 2005)
R_d	[m^2]	Reducirani raspored minskih bušotina
w	[m]	Izbojnica
HS	[m]	Razmak između minskih bušotina
V	[m^3]	Ukupni volumen minirane stijene
V_x	[m^3]	Volumen svih frakcija čije su linearne dimenzije veće od *x*
x_o i *n*	[1]	Parametri razdiobe (Kuznetsov, 1973)
R_x	[%]	Udio materijala koji ostaje na situ
x	[mm]	Veličina otvora sita
x_m	[1]	Konstanta nazvana karakteristična veličina zrna
n	[1]	Indeks jednoličnosti
A_t	[1]	Vremenski faktor
PF	[kg/m^3]	Odnos između ukupne količine eksploziva po bušotini i ukupnog volumena odminirane stijenske mase (engl. Powder factor)
CW	[kg]	Količina (masa) eksploziva u bušotini (engl. Charge Weight)
d	[mm]	Promjer bušotine
D_t	[1]	Standardna devijacija točnosti bušenja
m_b	[1]	Omjer razmaka minskih bušotina i izbojnice
H_b	[m]	Visina etaže
l_{cb}	[m]	Duljina eksplozivnog punjenja iznad referentne razine
C(n)	[1]	Korekcijski faktor za kalibraciju modela

n_s	[1]	Faktor koji u proračun uključuje raspršenje vremena usporenja kod miniranja
R_s	[1]	Omjer raspršenja
σ_t	[1]	Standardna devijacija inicirajućeg sustava
T_x	[ms]	Vrijednost vremena usporenja između dvije bušotine
S	[N]	Sila potrebna za penetraciju jednog klina u mekanu stijenu
θ	[°]	Kut između ploha klina
b	[mm]	Duljina kontakta između stijene i klina
h	[mm]	Dubina penetracije klina
φ	[°]	Kut klizanja
FC	[N]	Sila rezanja stijene alatom
FN	[N]	Normalna sila pri rezanju stijene alatom
cd	[mm]	Dubina rezanja
c	[mm]	Širina alata
λ	[°]	Kut nagiba alata pri rezanju stijene
R	[1]	Terenski indeksi čvrstoće stijene prema ISRM (1981)
$Phi+ (\Phi^+)$	[1]	Pozitivni ili izlazni tok
$Phi- (\Phi^-)$	[1]	Negativni ili ulazni tok
$Phi (\Phi)$	[1]	Neto tok, odnosno ravnoteža između pozitivnih i negativnih tokova

POPIS KRATICA

ISRM - International Society for Rock Mechanics (Međunarodno društvo za mehaniku stijena)

Hd - Hardness (Tvrdoća)

Ab - Abrasivity (Abrazivnost)

FT - Fracture Toughness (Lomna žilavost)

IHI - Indentation Hardness Index (Indeks tvrdoće intaktne stijene)

UCS - Uniaxial compressive strength (Jednoosna tlačna čvrstoća)

PLT - Point Load Test (Ispitivanje opterećenjem u točki)

PLTi - Point Load Test Index (Indeks čvrstoće opterećenjem u točki)

P-val - longitudinalni ili kompresijski ili primarni seizmički val

S-val - transverzalni ili posmični ili sekundarni seizmički val

R-val - Raylegh-ev površinski val

L-val - Love-ov površinski val

DS - Discontinuity spacing (Razmak diskontinuiteta)

JP - Joint persistance (Postojanost pukotine)

JO - Joint orientation (Orijentacija pukotine)

JRC - Joint Roughness Coefficient (Koeficijent hrapavosti stjenki diskontinuiteta)

JCS - Joint wall Compresion Strength (Tlačna čvrstoća stjenki diskontinuiteta)

JS - Joint Separation (Otvor ili zijev diskontinuiteta)

JF - Joint Filling (Ispuna diskontinuiteta)

NJS - Number of Joint Sets (Broj setova diskontinuiteta)

RQD - Rock Quality Designation Index (Indeks kvalitete jezgre stijene)

IRW – Intact Rock Weathering (Stupanj trošnosti intaktne stijene)

RMW - Rock Mass Weathering (Stupanj trošnosti stijenske mase)

GSI - Geological Strength Index (Geološki indeks čvrstoće stijenske mase)

RMR - Rock Mass Rating (Geomehanička klasifikacija za ocjenu kvalitete stijenske mase)

RMi - Rock Mass Index (Indeks kvalitete stijenske mase)

Q - Quality Index (Indeks kvalitete stijenske mase)

RMCI - Rock Mass Cutting Index (Indeks rezivosti stijenske mase)

LEFM - Linear Elastic Fracture Mechanics (Linearna elastična mehanika loma)

RF - Rock Factor (faktor stijene)

BI - Blasting Index (indeks minirljivosti)

RMD - Rock Mass Description (Opisna vrijednost za stijensku masu)

JFa - Joint Factor (Faktor pukotine)

JCF - Joint Condition Factor (Faktor stanja pukotine)

JPS - Joint Plane Spacing Factor (Faktor razmaka pukotina)

JPA - Joint Plane Angle Factor (Faktor orijentacije pukotina)

RDI - Rock Density Influence (Utjecaj gustoće stijenske mase)

HF - Hardness Factor (Faktor tvrdoće stijene)

RMD - Rock Mass Description (Opisna vrijednost za stijensku masu)

JFa - Joint Factor (Faktor pukotine)

JCF - Joint Condition Factor (Faktor stanja pukotina)

JPS - Joint Plane Spacing Factor (Faktor razmaka stjenki pukotina)

JPA - Joint Plane Angle Factor (Faktor kuta nagiba ploha pukotina)

RDI - Rock Density Influence (Utjecaj gustoće stijenske mase)

HF - Hardness Factor (Faktor tvrdoće)

RMCI - Rock Mass Cuttability Index (Indeks rezivosti stijenske mase)

SRS - Shallow Refraction Seismic (Plitka seizmička refrakcija)

MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves (Višekanalna analiza površinskih valova)

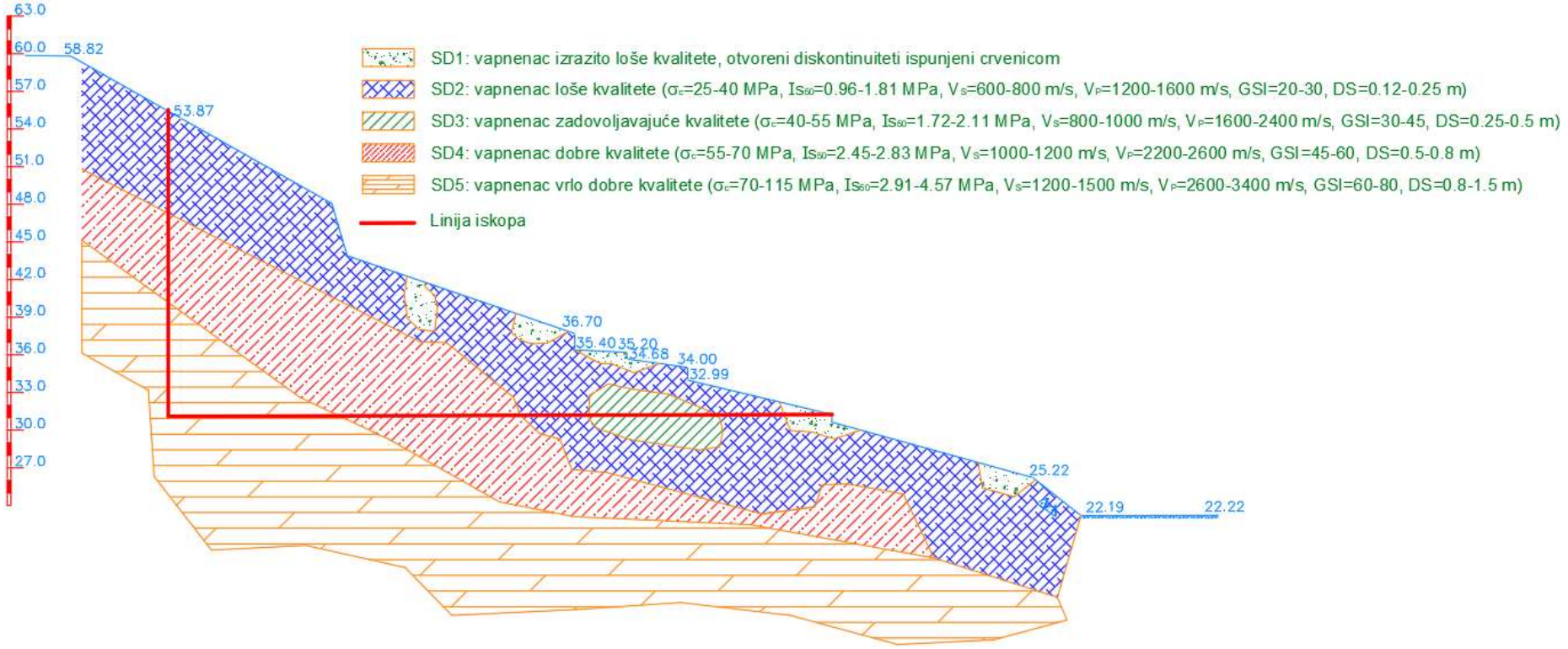
PROMETHEE - Preferance ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations

GAIA - Geometrical Analysis for Interactive Aid

PRILOG 1. Sažetak prethodnih istraživanja - značajke korištene kod procjene mogućnosti otkopavanja stijenske mase

AUTORI/ISTRAŽIVAČI	GEOMEHANIČKI PARAMETRI															
	V_P	σ_{ci}	σ_t	RQD	PLTi	Hd	Ab	NJS	RMW	Ja	JRC	DS	JP	JS	JO	JF
Franklin et al. (1971)	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-
Atkinson (1971)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bailey (1975)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weaver (1975)	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+
Church (1981)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kirsten (1982)	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-
Minty i Kearns (1983)	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Abdullatif i Cruden (1983)	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Scoble i Muftuoglu (1984)	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
McLean i Gribble (1985)	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smith (1986)	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Singh et al. (1987)	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Scoble et al. (1987)	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Hadjigeorgiou i Scoble (1988)	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Karpuz (1990)	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Pettifer i Fookes (1994)	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
MacGregor et al. (1994)	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-
Kramadibrata (1996)	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Hadjigeorgiou i Poulin (1998)	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Caterpillar (2015)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Basarir i Karpuz (2004)	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Tsiambaos i Saroglou (2010)	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-
Jovanovski et al. (2011)	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+
Tonnizam et al. (2010)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Komatsu (2013)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Khamechiyan et al. (2014)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+
Moustafa (2015)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gurocak and Yalcin (2016)	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+
Broj autora koji su korsitili parametar	14	11	1	2	13	5	1	4	14	3	6	18	7	6	7	4

PRILOG 2. Karakteristični IG profil istražne lokacije u Segetu Donjem



PRILOG 3. Kvalitativne ocjene kriterija (značajki stijenske mase) u vidu utjecaja na akcije (tehnologije otkopavanja)

INTAKTNA STIJENA	Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene, σ_{ci} [MPa]			
	<25	25-50	50-75	>75
Miniranje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Kopanje	5 – very good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	3 – average	4 – good	5 – very good	5 – very good
Razbijanje	3 – average	4 – good	5 – very good	4 – good

INTAKTNA STIJENA	Tvrdoća intaktne stijene – odskok Schmidtovog čekića H			
	<20	20-35	35-50	>50
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rezanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Razbijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad

INTAKTNA STIJENA	Lomna žilavost intaktne stijene – K_{IC} [MPa $m^{1/2}$]			
	<1	1-2	2-3	>3
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Rijanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Rezanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Razbijanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad

INTAKTNA STIJENA	Abrazivnost intaktne stijene – Indeks abrazivnosti			
	<10	10-30	30-65	>65
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Rijanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rezanje	4 – good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Razmak pukotina u stijenskoj masi [m]			
	<0.2	0.2-0.6	0.6-2	>2
Miniranje	5 – very good	5 – very good	5 – very good	5 – very good
Kopanje	5 – very good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Orijentacija pukotina u stijenskoj masi			
	Povoljna	Srednje povoljna	Nepovoljna	Izrazito nepovoljna
Miniranje	5 – very good	5 – very good	4 – good	3 – average
Kopanje	5 – very good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad

STIJENSKA MASA	Orijentacija dominantnog seta pukotina			
	Povoljna	Srednje povoljna	Nepovoljna	Izrazito nepovoljna
Miniranje	5 – very good	5 – very good	4 – good	3 – average
Kopanje	5 – very good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	4 – good	4 – good	3 – average	3 – average
Razbijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad

STIJENSKA MASA	Postojanost pukotina u stijenskoj masi [m]			
	<1	1-3	3-10	>10
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	1 – very bad	2 – bad	3 – average	4 – good
Rijanje	1 – very bad	2 – bad	3 – average	4 – good
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Otvorenost pukotina u stijenskoj masi [m]			
	<0.005	0.005-0.01	0.01-0.1	>0.1
Miniranje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Kopanje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Rijanje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Volumetrijski broj pukotina – J_v [pukotina/m^3]			
	>30	10-30	3-10	<3
Miniranje	3 – average	4 – good	5 – very good	5 – very good
Kopanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	4 – good	4 – good	5 – very good	5 – very good
Razbijanje	3 – average	4 – good	5 – very good	3 – average

STIJENSKA MASA	Stanje pukotina - ocjena prema RMR-u			
	<8	8-16	16-24	>30
Miniranje	3 – average	4 – good	5 – very good	5 – very good
Kopanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	4 – good	4 – good	5 – very good	5 – very good
Razbijanje	3 – average	4 – good	5 – very good	3 – average

STIJENSKA MASA	Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti za MODEL A			
	1	2	3	4
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Rijanje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti za MODEL B			
	1	2	3	4
Miniranje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Kopanje	1 – very bad	2 – bad	3 – average	5 – very good
Rijanje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Rezanje	4 – good	4 – good	3 – average	3 – average
Razbijanje	4 – good	3 – average	3 – average	2 – bad

STIJENSKA MASA	Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu [m/s]			
	<1400	1400-2000	2000-2500	>2500
Miniranje	n/a	n/a	n/a	n/a
Kopanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	n/a	n/a	n/a	n/a
Razbijanje	n/a	n/a	n/a	n/a

STIJENSKA MASA	Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu [m/s]			
	<600	600-1000	1000-1200	>1200
Miniranje	2 – bad	3 – average	4 – good	5 – very good
Kopanje	5 – very good	3 – average	2 – bad	1 – very bad
Rijanje	5 – very good	4 – good	3 – average	2 – bad
Rezanje	3 – average	4 – good	4 – good	4 – good
Razbijanje	3 – average	4 – good	5 – very good	3 – average

PRILOG 4. Rezultati inženjerskogeoloških istraživanja u kamenolomima

List 1. Kamenolom Marčan

VRSTA DISKONTINUITETA	BLOK I	BLOK II	BLOK III	BLOK IV
SLOJEVITOST (SS)	210/35	270/30	260/15	240/40
OSNE - AKSIJALNE RAVNINE (AR)	30/55	90/60	80/75	60/50
OKOMICA NA STR. OS b (⎯ b)	300/85	180/80	170/80	150/84
RAZMAK (cm)	10, 30. 70	5, 10, 300	10, 15, 250	10, 20, 280
POSTOJANOST/ m	10 - 20	3 -10	3 -10	> 20
OTVORENOST (cm)	0,1-1	0,1-1	0,1-1	0,1-1
ISPUNA	Bez ispune	Bez ispune	Bez ispune	Bez ispune
TROŠNOST	Umjerena	Umjerena	Umjerena	Umjerena
STANJE (RMR)	14	15	15	13

List 2. Kamenolom Špica

VRSTA DISKONTINUITETA	BLOK I	BLOK II	BLOK III	BLOK IV	BLOK V	SREDNJA VRIJEDNOST
SLOJEVITOST (SS)	GROMADASTI	130/30	145/60	140/60	GROMADASTI	140/40
OSNE - AKSIJALNE RAVNINE (AR)	----	310/60	325/30	320/80	----	320/60
OKOMICA NA STR. OS b (⎯ b)	----	210/80	235/80	235/80	----	220/80
RAZMAK (cm)	----	5, 10, 25, 50	10, 18, 20, 25,	10, 30, 50, 75	----	35
POSTOJANOST/ m	----	3 -10	2 - 8	5 - 40	----	20
OTVORENOST (cm)	----	0,1-1	0,1-1	0,1-1	----	0,1-1
ISPUNA	----	Bez ispune	Bez ispune	Bez ispune	----	Bez ispune
TROŠNOST	Znatna	Umjerena	Umjerena	Umjerena	Znatna	Znatna
STANJE (RMR)		17	17	16		16

List 3. Kamenolom Hruškovec

VRSTA DISKONTINUITETA	BLOK I	BLOK II	BLOK III	BLOK IV	BLOK V	SREDNJA VRIJEDNOST
SUSTAV I	TROŠNA STIJENA	240/10	260/22	215/30	TROŠNA STIJENA	237/20
SUSTAV II	----	40/10	55/30	35/50	----	43/30
SUSTAV III	----	348/15	300/30	285/25	----	311/23
RAZMAK (cm)	----	10, 20, 50, 100	10, 18, 20, 25,	10, 30, 50, 75	----	40
POSTOJANOST/ m	----	2 - 5	2 - 8	5 - 40	----	25
OTVORENOST (cm)	----	1 - 5	1 - 5	1 - 5	----	1 - 5
ISPUNA	----	< 5	< 5	< 5	----	< 5
TROŠNOST	Znatna	Umjerena	Umjerena	Umjerena	Znatna	Znatna
STANJE (RMR)		12	12	11		11

PRILOG 5. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Marčan

List 1. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model A, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

Lokacija (Site):	Marčan, Vinica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac VINICIT

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	Vrijednost (Value)	Jedinica (Unit)	Miniranje (Blasting)	Kopanje (Digging)	Rijanje (Ripping)	Rezanje (Cutting)	Razbijanje (Breaking)	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	20,00	MPa	bad	very good	very good	average	bad	0,11 (11%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	21,00	1	n/a	average	average	good	good	0,09 (9%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	0,84	MPa m½	n/a	n/a	n/a	good	good	0,04 (4%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	3,00	1	n/a	n/a	good	good	n/a	0,04 (4%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	0,50	m	very good	average	good	very good	very good	0,08 (8%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	BAD	1	good	bad	average	n/a	avergae	0,09 (9%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	10,00	m	n/a	average	average	n/a	n/a	0,04 (4%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,001	m	bad	n/a	bad	n/a	n/a	0,04 (4%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,02 (2%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	2000	m/s	n/a	n/a	good	n/a	n/a	0,02 (2%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	190	m	very bad	good	good	average	bad	0,3 (30%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 2. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model A, bez društveno-ekolokškog utjecaja

Lokacija (Site):	Marčan, Vinica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac VINICIT

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	20,00	MPa	bad	very good	very good	average	bad	0,17 (17%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	21,00	1	n/a	average	average	good	good	0,14 (14%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{ic}) (Toughness)	0,84	MPa m½	n/a	n/a	n/a	good	good	0,06 (6%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	3,00	1	n/a	n/a	good	good	n/a	0,06 (6%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	0,50	m	very good	average	good	very good	very good	0,17 (17%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	BAD	1	good	bad	average	n/a	avergae	0,14 (14%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	10,00	m	n/a	average	average	n/a	n/a	0,06 (6%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,001	m	bad	n/a	bad	n/a	n/a	0,06 (6%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	n/a	n/a	bad	n/a	n/a	0,03 (3%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	2100	m/s	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,03 (3%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1500	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 3. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model B, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

Lokacija (Site):	Marčan, Vinica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac VINICIT

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	20,00	MPa	bad	very good	very good	average	bad	0,10 (10%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	21,00	1	n/a	average	average	good	good	0,08 (8%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	0,84	MPa m½	n/a	n/a	n/a	good	good	0,04 (4%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	3,00	1	n/a	n/a	good	good	n/a	0,04 (4%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	15	pukotina/m^3	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	BAD	1	good	bad	average	average	average	0,10 (10%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	15	m	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	good	bad	average	good	average	0,10 (10%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_s)	1150	m/s	good	bad	average	good	very good	0,10 (10%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	250	m	very bad	good	good	average	bad	0,2 (20%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 4. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model B, bez društveno-ekolokškog utjecaja

Lokacija (Site):	Marčan, Vinica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac VINICIT

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	20,00	MPa	bad	very good	very good	average	bad	0,13 (13%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	21,00	1	n/a	average	average	good	good	0,11 (11%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	0,84	MPa m½	n/a	n/a	n/a	good	good	0,05 (5%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	3,00	1	n/a	n/a	good	good	n/a	0,05 (5%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	15	pukotina/m^3	good	good	good	good	good	0,13 (13%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	BAD	1	good	bad	average	average	average	0,13 (13%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	15	m	good	good	good	good	good	0,13 (13%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	2	°	good	bad	average	good	average	0,13 (13%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_S)	1150	m/s	good	bad	average	good	very good	0,13 (13%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1500	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 5. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model A, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Spacing	Orientation	Persistance	Separation	Weathering	P-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group													
	Preferences													
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	0,12	0,10	0,05	0,05	0,12	0,10	0,05	0,05	0,03	0,03	0,20	0,05	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics													
	Minimum	2	3	4	4,0	3	2,00	3	2	2	3	1	2,00	n/a
	Maximum	5	4	4	4,0	5	4,00	3	2	2	3	4	5,00	n/a
	Average	4	4	4	4,0	4	3,00	3	2	2	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,71	0	0	0	0	1	1,20	n/a
	Evaluations													
☑	Blasting	bad	n/a	n/a	n/a	very good	good	n/a	bad	n/a	n/a	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very good	average	n/a	n/a	average	bad	average	n/a	n/a	n/a	good	bad	n/a
☑	Ripping	very good	average	n/a	good	good	average	average	bad	bad	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	average	good	good	good	very good	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	average	good	n/a
☑	Breaking	average	good	good	n/a	very good	average	n/a	n/a	n/a	n/a	bad	good	n/a

List 6. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model A, bez društveno-ekolokškog utjecaja

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Spacing	Orientation	Persistance	Separation	Weathering	P-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group													
	Preferences													
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	16,32	13,59	6,81	6,81	16,32	13,59	6,81	6,81	4,08	4,08	0,00	4,78	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics													
	Minimum	2	3	4	4,0	3	2,00	3	2	2	3	1	2,00	n/a
	Maximum	5	4	4	4,0	5	4,00	3	2	2	3	4	5,00	n/a
	Average	4	4	4	4,0	4	3,00	3	2	2	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,71	0	0	0	0	1	1,20	n/a
	Evaluations													
☑	Blasting	bad	n/a	n/a	n/a	very good	good	n/a	bad	n/a	n/a	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very good	average	n/a	n/a	average	bad	average	n/a	n/a	n/a	good	bad	n/a
☑	Ripping	very good	average	n/a	good	good	average	average	bad	bad	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	average	good	good	good	very good	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	average	good	n/a
☑	Breaking	average	good	good	n/a	very good	average	n/a	n/a	n/a	n/a	bad	good	n/a

List 7. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model B, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Vol. Joint Co...	Orientation	Joint Condition	Weathering	S-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group												
	Preferences												
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	0,10	0,08	0,04	0,04	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,05	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics												
	Minimum	2	3	4	4,0	4	2,00	4	2	2	1	2,00	n/a
	Maximum	5	4	4	4,0	4	4,00	4	4	5	4	5,00	n/a
	Average	4	4	4	4,0	4	3,00	4	3	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	0	0,63	0	1	1	1	1,20	n/a
	Evaluations												
☑	Blasting	bad	n/a	n/a	n/a	good	good	good	good	good	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very good	average	n/a	n/a	good	bad	good	bad	bad	good	bad	n/a
☑	Ripping	very good	average	n/a	good	good	average	good	average	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	average	good	good	good	good	average	good	average	average	average	good	n/a
☑	Breaking	average	good	good	n/a	good	average	good	good	very good	bad	good	n/a

List 8. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model B, bez društveno-ekolokškog utjecaja

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Vol. Joint Co...	Orientation	Joint Condition	Weathering	S-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group												
	Preferences												
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	12,47	9,98	4,99	4,99	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	0,00	5,22	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics												
	Minimum	2	3	4	4,0	4	2,00	4	2	2	1	2,00	n/a
	Maximum	5	4	4	4,0	4	4,00	4	4	5	4	5,00	n/a
	Average	4	4	4	4,0	4	3,00	4	3	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	0	0,63	0	1	1	1	1,20	n/a
	Evaluations												
☑	Blasting	bad	n/a	n/a	n/a	good	good	good	good	good	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very good	average	n/a	n/a	good	bad	good	bad	bad	good	bad	n/a
☑	Ripping	very good	average	n/a	good	good	average	good	average	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	average	good	good	good	good	average	good	average	average	average	good	n/a
☑	Breaking	average	good	good	n/a	good	average	good	good	very good	bad	good	n/a

PRILOG 6. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Špica

List 1. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model A, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

Lokacija (Site):	Špica, Ljubeščica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac Dolomit

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	Vrijednost (Value)	Jedinica (Unit)	Miniranje (Blasting)	Kopanje (Digging)	Rijanje (Ripping)	Rezanje (Cutting)	Razbijanje (Breaking)	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	89,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,13 (13%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	52,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,11 (11%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,07	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,05 (5%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	12,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,05 (5%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	0,35	m	very good	average	good	very good	very good	0,13 (13%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	BAD	1	good	bad	average	n/a	avergae	0,11 (11%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	20,00	m	n/a	good	good	n/a	n/a	0,05 (5%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,001	m	bad	n/a	bad	n/a	n/a	0,05 (5%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	n/a	n/a	good	n/a	n/a	0,03 (3%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	2500	m/s	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,03 (3%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	350	m	very bad	good	good	average	bad	0,2 (20%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 2. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model A, bez društveno-ekolokškog utjecaja

Lokacija (Site):	Špica, Ljubeščica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac Dolomit

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	89,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,17 (17%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	52,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,14 (14%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,07	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,06 (6%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	12,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,06 (6%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	0,35	m	very good	average	good	very good	very good	0,17 (17%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	BAD	1	good	bad	average	n/a	avergae	0,14 (14%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	20,00	m	n/a	good	good	n/a	n/a	0,06 (6%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,001	m	bad	n/a	bad	n/a	n/a	0,06 (6%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	n/a	n/a	good	n/a	n/a	0,03 (3%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	2500	m/s	n/a	n/a	average	n/a	n/a	0,03 (3%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1500	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 3. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model B, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

Lokacija (Site):	Špica, Ljubeščica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac Dolomit

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	89,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,10 (10%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	52,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,08 (8%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,07	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,04 (4%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	12,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,04 (4%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	15	pukotina/ m^3	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	BAD	1	good	bad	average	average	average	0,10 (10%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	16	bodova	good	good	good	good	good	0,10 (10%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	average	average	good	average	average	0,10 (10%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_s)	1300	m/s	very good	very bad	bad	good	average	0,10 (10%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	350	m	very bad	good	good	average	bad	0,2 (20%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 4. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model B, bez društveno-ekolokškog utjecaja

Lokacija (Site):	Špica, Ljubeščica
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Vapnenac Dolomit

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	89,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,13 (13%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	52,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,11 (11%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,07	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,05 (5%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	12,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,05 (5%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	15	pukotina/ m^3	good	good	good	good	good	0,13 (13%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	BAD	1	good	bad	average	average	average	0,13 (13%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	16	bodova	good	good	good	good	good	0,13 (13%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	average	average	good	average	average	0,13 (13%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_s)	1300	m/s	very good	very bad	bad	good	average	0,13 (13%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1500	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	NO	1	bad	very good	average	good	average	0,0 (0%)

List 5. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model A, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Spacing	Orientation	Persistance	Separation	Weathering	P-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group													
	Preferences													
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	12,63	10,53	5,26	5,26	12,63	10,53	5,26	5,26	3,16	3,16	21,05	5,26	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics													
	Minimum	1	1	3	3,0	3	2,00	4	2	4	3	1	2,00	n/a
	Maximum	5	2	3	3,0	5	4,00	4	2	4	3	4	5,00	n/a
	Average	3	2	3	3,0	4	3,00	4	2	4	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,71	0	0	0	0	1	1,20	n/a
	Evaluations													
☑	Blasting	very good	n/a	n/a	n/a	very good	good	n/a	bad	n/a	n/a	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very bad	very bad	n/a	n/a	average	bad	good	n/a	n/a	n/a	good	bad	n/a
☑	Ripping	bad	very bad	n/a	average	good	average	good	bad	good	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	good	bad	average	average	very good	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	average	good	n/a
☑	Breaking	good	bad	average	n/a	very good	average	n/a	n/a	n/a	n/a	bad	good	n/a

List 6. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model A, bez društveno-ekolokškog utjecaja

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Spacing	Orientation	Persistance	Separation	Weathering	P-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group													
	Preferences													
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	16,32	13,59	6,81	6,81	16,32	13,59	6,81	6,81	4,08	4,08	0,00	4,78	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics													
	Minimum	2	3	4	4,0	3	2,00	3	2	2	3	1	2,00	n/a
	Maximum	5	4	4	4,0	5	4,00	3	2	2	3	4	5,00	n/a
	Average	4	4	4	4,0	4	3,00	3	2	2	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,71	0	0	0	0	1	1,20	n/a
	Evaluations													
☑	Blasting	bad	n/a	n/a	n/a	very good	good	n/a	bad	n/a	n/a	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very good	average	n/a	n/a	average	bad	average	n/a	n/a	n/a	good	bad	n/a
☑	Ripping	very good	average	n/a	good	good	average	average	bad	bad	average	good	bad	n/a
☑	Cutting	average	good	good	good	very good	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	average	good	n/a
☑	Breaking	average	good	good	n/a	very good	average	n/a	n/a	n/a	n/a	bad	good	n/a

List 7. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model B, s uključenim društveno-ekolokškim utjecajem

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Vol. Joint Co...	Orientation	Joint Condition	Weathering	S-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group												
	Preferences												
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	0,10	0,08	0,04	0,04	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,05	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics												
	Minimum	1	1	3	3,0	3	2,00	4	3	1	1	2,00	n/a
	Maximum	5	2	3	3,0	5	4,00	4	4	5	4	5,00	n/a
	Average	3	2	3	3,0	4	3,00	4	3	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,63	0	0	1	1	1,20	n/a
	Evaluations												
☑	Blasting	very good	n/a	n/a	n/a	very good	good	good	average	very good	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very bad	very bad	n/a	n/a	average	bad	good	average	very bad	good	bad	n/a
☑	Ripping	bad	very bad	n/a	average	average	average	good	good	bad	good	bad	n/a
☑	Cutting	good	bad	average	average	very good	average	good	average	good	average	good	n/a
☑	Breaking	good	bad	average	n/a	very good	average	good	average	average	bad	good	n/a

List 8. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model B, bez društveno-ekolokškog utjecaja

	200-500 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Vol. Joint Co...	Orientation	Joint Condition	Weathering	S-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group												
	Preferences												
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	12,47	9,98	4,99	4,99	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	0,00	5,21	0,00
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics												
	Minimum	1	1	3	3,0	3	2,00	4	3	1	1	2,00	n/a
	Maximum	5	2	3	3,0	5	4,00	4	4	5	4	5,00	n/a
	Average	3	2	3	3,0	4	3,00	4	3	3	3	3,40	n/a
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,63	0	0	1	1	1,20	n/a
	Evaluations												
☑	Blasting	very good	n/a	n/a	n/a	very good	good	good	average	very good	very bad	very good	n/a
☑	Digging	very bad	very bad	n/a	n/a	average	bad	good	average	very bad	good	bad	n/a
☑	Ripping	bad	very bad	n/a	average	average	average	good	good	bad	good	bad	n/a
☑	Cutting	good	bad	average	average	very good	average	good	average	good	average	good	n/a
☑	Breaking	good	bad	average	n/a	very good	average	good	average	average	bad	good	n/a

PRILOG 7. Ulazni podaci višekriterijske analize za kamenolom Hruškovec

List 1. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model A

Lokacija (Site):	Hruškovec K. Ljubelj
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Dijabaz Bazalt

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	124,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,15 (15%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	55,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,12 (12%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,20	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,06 (6%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	26,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,06 (6%)
Razmak pukotina u stijenskoj masi (Discontinuity Spacing, DS)	0,40	m	very good	average	good	very good	very good	0,15 (15%)
Orijentacija pukotina u stijenskoj masi (Joint Orientation, JO)	AVERAGE	1	very good	average	good	n/a	good	0,12 (12%)
Postojanost pukotina u stijenskoj masi (Joint Persistance, JP)	25,00	m	n/a	good	good	n/a	n/a	0,06 (6%)
Otvorenost pukotina u stijenskoj masi (Joint Separation, JS)	0,030	m	very good	n/a	very good	n/a	n/a	0,06 (6%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	n/a	n/a	good	n/a	n/a	0,03 (3%)
Brzina širenja seizmičkih P-valova kroz stijensku masu (P-wave velocity, V_P)	3000	m/s	n/a	n/a	bad	n/a	n/a	0,03 (3%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1100	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	Yes	1	bad	very good	average	good	average	0,05 (5%)

List 2. Proračunska tablica aplikacije za automatsku evaluaciju kriterija i generiranje težinskih faktora s ulaznim podacima za Model B

Lokacija (Site):	Hruškovec K. Ljubelj
Geološka klasifikacija stijene (Geological rock classification):	Dijabaz Bazalt

KRITERIJI (CRITERIA)			AKCIJE (ACTIONS)					Težinski faktori (Weighing)
Značajke stijene (Rock properties)	**Vrijednost (Value)**	**Jedinica (Unit)**	**Miniranje (Blasting)**	**Kopanje (Digging)**	**Rijanje (Ripping)**	**Rezanje (Cutting)**	**Razbijanje (Breaking)**	
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (σ_c) (Uniaxial Compressive Strength, UCS)	124,00	MPa	very good	very bad	bad	good	good	0,12 (12%)
Tvrdoća intaktne stijene – odskok Scmidtovog čekića (H) (Hardness, Hd)	55,00	1	n/a	very bad	very bad	bad	bad	0,10 (10%)
Lomna žilavost intaktne stijene (K_{IC}) (Toughness)	1,20	MPa m½	n/a	n/a	n/a	average	average	0,05 (5%)
Abrazivnost intaktne stijene (Ab) – Indeks abrazivnosti (Rock Abrasivity)	26,00	1	n/a	n/a	average	average	n/a	0,05 (5%)
Volumetrijski broj pukotina (J_v) (Volumetric joint count)	10	pukotina/ m^3	very good	average	average	very good	very good	0,12 (12%)
Orijentacija dominantnog seta pukotina (Dominant Joint Set Orientation)	AVERAGE	1	very good	average	good	good	good	0,12 (12%)
Stanje pukotina u stijenskoj masi (Joint Condition)	11	bodova	good	good	good	good	good	0,12 (12%)
Trošnost stijenske mase – stupanj trošnosti (Weathering, Wea)	3	°	average	average	good	average	average	0,12 (12%)
Brzina širenja seizmičkih S-valova kroz stijensku masu (S-wave velocity, V_s)	2000	m/s	very good	very bad	bad	good	average	0,12 (12%)
Društveno-ekološko-tehnološki kriteriji (Social-ecological-technological criteria)								
Udaljenost iskopa od štićenog objekta (Distance of excavation from a protected object)	1100	m	very bad	good	good	average	bad	0 (0%)
Kontrola fragmentacije otkopane stijene (Control of the excavated rock fragmentation)	YES	1	very good	bad	bad	good	good	0,05 (5%)
Selektivno otkopavanje (Selective excavation)	YES	1	bad	very good	average	good	average	0,05 (5%)

List 3. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model A

	>1000 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Spacing	Orientation	Persistance	Separation	Weathering	P-wave velo...	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group													
	Preferences													
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	0,15	0,12	0,06	0,06	0,15	0,12	0,06	0,06	0,03	0,03	0,00	0,05	0,05
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics													
	Minimum	1	1	3	3,0	3	3,00	4	5	4	2	1	2,00	2,00
	Maximum	5	2	3	3,0	5	5,00	4	5	4	2	4	5,00	5,00
	Average	3	2	3	3,0	4	4,00	4	5	4	2	3	3,40	3,40
	Standard Dev.	1	1	0	0,0	1	0,71	0	0	0	0	1	1,20	1,02
	Evaluations													
☑	Blasting	very good	n/a	n/a	n/a	very good	very good	n/a	very good	n/a	n/a	very bad	very good	bad
☑	Digging	very bad	very bad	n/a	n/a	average	average	good	n/a	n/a	n/a	good	bad	very good
☑	Ripping	bad	very bad	n/a	average	good	good	good	very good	good	bad	good	bad	average
☑	Cutting	good	bad	average	average	very good	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	average	good	good
☑	Breaking	good	bad	average	n/a	very good	good	n/a	n/a	n/a	n/a	bad	good	average

List 4. Glavni prozor programa Visual PROMETHEE sa svim podacima i postavkama za Model B

	>1000 m	Strength	Hardness	Toughness	Abrasivity	Vol. Joint Co…	Orientation	Joint Condition	Weathering	S-wave velo…	Social-Ecology	Fragmentation	Selective
	Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
	Cluster/Group												
	Preferences												
	Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	Weight	0,12	0,10	0,05	0,05	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,00	0,05	0,05
	Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
	Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Statistics												
	Minimum	1	1	3	3,0	3	3,00	4	3	1	1	2,00	2,00
	Maximum	5	2	3	3,0	5	5,00	4	4	5	4	5,00	5,00
	Average	3	2	3	3,0	4	4,00	4	3	3	3	3,40	3,40
	Standard Dev.	2	1	0	0,0	1	0,63	0	0	1	1	1,20	1,02
	Evaluations												
☑	Blasting	very good	n/a	n/a	n/a	very good	very good	good	average	very good	very bad	very good	bad
☑	Digging	very bad	very bad	n/a	n/a	average	average	good	average	very bad	good	bad	very good
☑	Ripping	bad	very bad	n/a	average	average	good	good	good	bad	good	bad	average
☑	Cutting	very good	bad	average	average	very good	good	good	average	good	average	good	good
☑	Breaking	good	bad	average	n/a	very good	good	good	average	average	bad	good	average

ŽIVOTOPIS

Jasmin Jug rođen je 3. svibnja 1986. godine u Varaždinu. Osnovnu školu završio je u Ivancu, a srednju rudarsku školu u Varaždinu. Studij geoinženjerstva upisao je 2005. godine na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu, gdje je 2008. godine završio preddiplomski studij obranom završnog rada pod naslovom: „Brzina bušenja u ovisnosti geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase“. Na istom fakultetu diplomirao je 2010. godine na temi pod naslovom: „Sanacija kamenoloma Sveti Mikula – Rakalj“ i stekao akademski naziv magistra inženjera geoinženjerstva. Od rujna 2011. godine zaposlen je kao stručni suradnik u Zavodu za geotehniku na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu, a u srpnju 2014. godine izabran je na radno mjesto asistenta. U listopadu iste godine upisao je poslijediplomski doktorski studij „Primjenjene geoznanosti, rudarsko i naftno inženjerstvo - smjer rudarstvo“ na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu.

Kao asistent i doktorand sudjelovao je na pet znanstveno-istraživačkih projekata, izvodio vježbe iz devet kolegija na studiju „Inženjerstvo okoliša“, te je bio neposredni voditelj dva završna rada. U koautorstvu ima objavljenih šest znanstvenih i sedam stručnih radova u časopisima, te šesnaest cjelovitih radova i dva sažetka u zbornicima s međunarodnih znanstvenih skupova. Kontinuirano se bavi i stručnim radom, pa je sudjelovao u istraživanjima i izradi preko stotinjak stručnih izvješća, elaborata, studija i projekata iz područja geotehnike, geofizike i rudarstva. Član je Hrvatskog geotehničkog društva i Međunarodnog društva za mehaniku stijena.

POPIS RADOVA

Znanstveni rad prihvaćen za objavu u znanstvenom časopisu s međunarodnom recenzijom:

1. Jug, J., Grabar, K. (2020). Methods for reducing the environmental impact of rock mass excavation. *Environmental Engineering – Inženjerstvo okoliša*, Vol. 7, No.1.

Popis objavljenih znanstvenih radova u časopisima:

1. Jug, J., Stanko, D., Grabar, K., Hrženjak, P. (2020). New approach in the application of seismic methods for assessing surface excavatability of sedimentary rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 79, Issue 3, doi: 10.1007/s10064-020-01802-1.
2. Jug, J., Grabar, K., Strelec, S., Dodigović, F. (2020). Investigation of Dimension Stone on the Island Brač - Geophysical Approach to Rock Mass Quality Assessment. *Geosciences,* 10/3; 112, 15, doi:10.3390/geosciences10030112.
3. Mesec, J., Težak, D., Jug, J. (2018). Reducing the adverse effects of blasting on the cave ecosystem near the future exploitation field Gradusa. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik,* 33/4, 45-54, doi:10.17794/rgn.2018.4.4.
4. Strelec, S., Mesec, J., Grabar, K., Jug, J. (2017). Implementation of in-situ and geophysical investigation methods (ERT & MASW) with the purpose to determine 2D profile of landslide. *Acta Montanistica Slovaca,* 22/4, 345-358.
5. Jug, J., Špiranec, M., Strelec, S. (2017). Analiza stabilnosti sidrenih stijenskih kosina prema EUROKODU 7. *Inženjerstvo okoliša,* 4/1, 51-58.
6. Hlevnjak, B., Strelec, S., Jug, J. (2015). Hidrogeološki uvjeti pojave glinenog proslojka unutar varaždinskog vodonosnika. *Inženjerstvo okoliša,* 2/2, 73-81.

Popis objavljenih stručnih radova u časopisima:

1. Bradaš, M., Jug, J., Strelec, S. (2017). Geotehnička i geofizička istraživanja za potrebe izgradnje proizvodnog pogona cementa u Obrovcu. *Inženjerstvo okoliša*, 4/2, 143-157.
2. Strelec, S., Grabar, K., Miklin, Ž., Jug, J. (2015). Geotehnička istraživanja i opažanja za potrebe sanacije cestovnog klizišta. *Inženjerstvo okoliša,* 2/2, 111-117.
3. Strelec, S., Grabar, K., Gazdek, M., Špiranec, M., Stanko, D., Jug, J. (2014). Geofizičko - geotehničko istraživanje odlagališta otpada. *Inženjerstvo okoliša,* 1/2; 103-112.

4. Strelec, S., Jug, J., Stanko, D. (2014). Određivanje projektnih vrijednosti maksimalnog potresa (EUROCODE 8) primjenom višekanalne analize površinskih valova (MASW). *Mineral*, 3, 24-30.
5. Strelec, S., Grabar, K., Jug, J. (2012). Geofizička istraživanja za potrebe temeljenja vjetrogeneratora VG1/I u vjetroparku Jasenice. *Tehnoeko*, 3, 40-45.
6. Jug, J., Smrečki, D., Strelec, S. (2011). Pregled nedestruktivnih metoda za ispitivanje integriteta i dubine pilota. *Mineral*, 81/5, 16-20.
7. Jug, J., Strelec, S. (2008). Brzina bušenja u ovisnosti geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase. *Mineral*, 6, 16-20.

Popis objavljenih radova u zbornicima s međunarodnih znanstvenih skupova

1. Grabar, K., Jug, J., Strelec, S., Filipović, A. (2019). Determinacija procjednih zona u nasipu primjenom in-situ istraživanja. *Naučno-stručni simpozijum GEO-EXPO 2019*, Zekan, S. (ur.). Sarajevo, BiH: Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 1-8 doi:10.35123/GEO-EXPO_2019_1.
2. Grabar, K., Strelec, S., Jug, J., Stanko, D. (2019). Workflow for the geotechnical landslide model - case study from north Croatia. Conference Proceedings Volume 19, Science and Technologies in Geology, Exploration an Mining Issue: 1.2 Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics, Oil amd Gas Exploration. Sofia, Bulgaria: International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM Secretariat Bureau, 587-594, doi:10.5593/sgem2019/1.2.
3. Strelec, S., Dodigović, F., Kavur, B., Jug, J. (2019). Primjer geofizičkih istraživanja za potrebe projektiranja temelja vjetroelekrana u karbonatnim stijenama. *8. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva - Geotehnički izazovi u kršu.* Sokolić, I., Miščević, P., Štambuk Cvitanović, N., Vlastelica, G. (ur.). Split: Hrvatsko geotehničko društvo, 371-376.
4. Jug, J., Strelec, S., Ivandić, K., Dodigović, F. (2019). Geotehničko-geofizički istražni radovi za potrebe temeljenja građevina na flišnim naslagama na području Mokošica-Dubrovnik. *8. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva - Geotehnički izazovi u kršu.* Sokolić, I., Miščević, P., Štambuk Cvitanović, N., Vlastelica, G. (ur.). Split: Hrvatsko geotehničko društvo, 235-240.
5. Strelec, S., Jug, J., Težak, D., Mesec, J. (2019). Improving rigidity of clay by using explosives and proofing by multichannel analysis of surface waves (MASW). *IOP*

Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 221, Number 1. Prag, Češka: IOP Publishing Ltd, 012056, 8 ,doi:10.1088/1755-1315/221/1/012056.

6. Kavur, B., Dodigović, F., Jug, J., Strelec, S. (2019). The interpretation of CPTu, PMT, SPT and Cross-Hole tests in stiff clay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 221, conference 1. Prag, Češka: IOP Publishing Ltd, 012009, 11 doi:10.1088/1755-1315/221/1/012009.
7. Strelec, S., Ivandić, K., Jug, J., Dodigović, F. (2018). Geophysical testing of municipal waste landfills in northwestern Croatia. 18th International Multidisciplinary Science Geoconference SGEM 2018, Conference Proceedings, Volume 18, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Issue: 1.1, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 841-854 doi:10.5593/sgem2018/1.1.
8. Jug, J., Strelec, S. (2017). Planiranje sigurnih miniranja u urbanim sredinama. *Geo Expo 2017 Geotehnika, saobraćajnice, rudnici i zaštita okoline*. Zekan, S., Ilić, D. (ur.). Tuzla: Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 72-79.
9. Jug, J., Strelec, S., Gazdek, M., Kavur, B. (2017). Fragment Size Distribution of Blasted Rock Mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Prag, Češka: Institute of Physics, 042013, 9, doi:10.1088/1755-1315/95/4/042013.
10. Jug, J., Mikec, M., Golub, I., Filipović, A. (2016). Geotehnički aspekti izgradnje šetnice na prirodnoj kosini od lesnog tla u Vukovaru. *Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama, Zbornik radova 7. savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva, s međunarodnim sudjelovanjem*. Sokolić, I., Zlatović, S. (ur.). Zagreb: Hrvatsko geotehničko društvo, 259-264.
11. Strelec, S., Gazdek, M., Mesec, J., Jug, J., Stanko, D. (2016). Primjena in situ i geofizičkih metoda u istraživanju cestovnog klizišta. *Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama, Zbornik radova 7. savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva, s međunarodnim sudjelovanjem*. Sokolić, I., Zlatović, S. (ur.). Zagreb: Hrvatsko geotehničko društvo, 179-184.
12. Đurin, B., Jug, J., Strelec, S. (2016). Primjena višekriterijskih metoda u geofizičkim istraživanjima. *Zbornik radova: Naučno-stručni simpozijum GEO-EXPO 2016, Geotehnika, ekološki inženjering i održivi razvoj*. Zekan, S. (ur.). Banja Luka: Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 63-70.
13. Strelec, S., Jug, J., Stanko, D., Gazdek, M., Anić Vučinić, A. (2016). Geophysical investigations at municipal solid waste landfill Jakuševac. ISWA World Congress 2016 Uniting Ideas for Successful Waste Management. Stanisavljević, N., Fellner, J., Hossain,

S., Levis, J.W. (ur.). Novi Sad: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 1379-1389.

14. Strelec, S., Grabar, K., Miklin, Ž., Jug, J. (2015). Geotehnički istražni radovi i monitoring za potrebe sanacije klizišta na cesti Bastajski Brđani – Veliki Miletinac. 5. Hrvatski geološki kongres (s međunarodnim sudjelovanjem). Horvat, M., Wacha, L. (ur.). Zagreb: Hrvatski geološki institut – Croatian Geological Survey, 238-239.
15. Strelec, S., Gazdek, M., Grabar, K., Špiranec, M., Stanko, D., Jug, J. (2014). Geofizičko-geotehničko istraživanje odlagališta otpada. *XIII. Međunarodni simpozij gospodarenja otpadom Zagreb 2014*. Anić Vučinić, A. (ur.). Zagreb: Geotehnički fakultet, 34-35.
16. Strelec, S.; Grabar, K.; Jug, J. (2013). Ispitivanje poboljšanja tla MASW metodom u terminalu za rasuti teret Luke Ploče. *Naučno-stručni simpozijum GEO-EXPO 2013*. Zekan, S. (ur.). Tuzla: Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 308-318.
17. Strelec, S., Smrečki, D., Jug, J., Težak, D. (2012). Utjecaj istražnih radova i faza građenja na horizontalne deformacije. *Drugi međunarodni naučni skup: stanje i pravci razvoja građevinarstva - GTZ i drugo savjetovanje GEO-EXPO 2012*. Ibrahimović, A., Zenunović, D. (ur.). Tuzla: Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla, 707-714.
18. Mesec, J., Strelec, S., Jug, J. (2012). Ovisnost intenziteta oscilacija tla prilikom miniranja o koeficijentu svojstava stijene i načina miniranja K, i koeficijentu prigušenja n. *Drugi međunarodni naučni skup: stanje i pravci razvoja građevinarstva - GTZ i drugo savjetovanje GEO-EXPO 2012*. Ibrahimović, A., Zenunović, D. (ur.). Tuzla: Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla, 599-606.