Optimizacija eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena u ovisnosti o tehno-ekonomskim faktorima

Farkaš, Branimir

Doctoral thesis / Disertacija

2017

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:169:492009

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-27**

Repository / Repozitorij:

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

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Branimir Farkaš

OPTIMIZACIJA EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOGA KAMENA U OVISNOSTI O TEHNO-EKONOMSKIM FAKTORIMA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Branimir Farkaš

OPTIMIZACIJA EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOGA KAMENA U OVISNOSTI O TEHNO-EKONOMSKIM FAKTORIMA

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivo Galić

Zagreb, 2017.

University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Branimir Farkaš

OPTIMIZATION OF DIMENSION STONE DEPOSIT EXPLOITATION IN RELATION TO TECHNO-ECONOMIC FACTORS

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Assoc. prof. PhD Ivo Galić

Zagreb, 2017.

PODACI O MENTORU:

Dr. sc. Ivo Galić, izvanredni profesor

Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SAŽETAK

Određivanje optimalne konture kopa napravljeno je na trodimenzionalnom modelu područja istraživanja arhitektonsko-građevnog kamena koje se nalazi na lokaciji Crvene stijene u Bosni i Hercegovini. Istraživanje je provedeno na dijelu ležišta na kojem su napravljeni modeli površinske i podzemne eksploatacije. Analizirana su 24 trodimenzionalna modela završnih kontura površinske i podzemne eksploatacije korištenjem poprečnih presjeka i izračunom površina presjeka te volumena arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine. Određeni su troškovi svakog od načina eksploatacije, a podijeljeni su u četiri grupe tako da prva grupa objedinjuje troškove pridobivanja blokova arhitektonsko-građevnog kamena, druga grupa objedinjuje troškove uklanjanja jalovine, treća grupa objedinjuje troškove mehanizacije, opreme i održavanja, a posljednja grupa objedinjuje sve ostale troškove. Određena je prodajna cijena blokova arhitektonsko-građevnog kamena za izračun dobiti svakog načina eksploatacije. Troškovi površinske eksploatacije eksponencijalno rastu te su veći u odnosu na troškove podzemne eksploatacije koji imaju linearan rast. Razlika troškova površinske i podzemne eksploatacije od bloka 1 do 12 povećana je za više od 38 puta. Prihodi podzemne eksploatacije rastu linearno s manjim nagibom u odnosu na prihode površinske eksploatacije koji se za početne blokove povećavaju te se počinju uočavati znakovi stagnacije i smanjenja kod zadnjih blokova optimizacije eksploatacije. Razlika prihoda uvećana je za približno 9 puta od bloka 1 do 12. Jedinična cijena pridobivanja blokova arhitektonsko-građevnog kamena raste od bloka 1 do 12 s time da pri podzemnoj eksploataciji raste sporije u odnosu na površinsku eksploataciju. Tako je cijena za površinsku eksploataciju povećana 3,5 puta, a za podzemnu eksploataciju 1,9 puta od bloka 1 do 12.

Dobit podzemne eksploatacije od bloka 1 do 12 raste s time da se uočava sporiji porast dobiti kod zadnjih blokova optimizacije eksploatacije te se uočava period stagnacije. Dobit površinske eksploatacije nakon početnog rasta stagnira te kreće k negativnom trendu i na kraju završava kao gubitak. Mjesto na kojem se krivulje dobiti površinske i podzemne eksploatacije presijecaju predstavlja optimalnu konturu eksploatacije kopa – poziciju prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju.

Ključne riječi: površinska eksploatacija, podzemna eksploatacija, arhitektonsko-građevni kamen, optimizacija eksploatacije, optimalna kontura kopa

SUMMARY

In the exploitation of the dimension stone techno-economic factors (natural, technological, economic and ecological) have dominant influence on the optimal exploitation contour and the optimum way of dimension stone deposit exploitation depends on influence of techno-economic factors on the position of mining works. Optimal exploitation contour is defining the spatial limitation of the part of the deposit that will be exploited by surface, underground or with combination of the mining methods while respecting defined boundary conditions so it is representing boundary contour, the final shape of mining works, whether it is surface or underground or boundary between the surface and underground exploitation contour. Therefore, the aim or the necessity is to determine the optimal way of exploiting the dimension stone deposit in relation to the location of mining works i.e. to determine the optimal contour of the transition from surface to underground dimension stone exploitation depending on the quantitative share of the influence of individual factors. By valorising techno-economic factors it is possible to determine spatial position of optimal dimension stone exploitation contour with regard that the influence of the techno-economic factors on the position of optimal exploitation contour is variable in time and space.

Determination of the optimum exploitation contour was done on the three-dimensional model of the research area located at Crvene stijene in Bosnia and Herzegovina. Three-dimensional models of deposit and terrain ware created using available data from exploration drilling, data of geological characteristics of the deposit and geodetic terrain data. Part of the deposit was determined for underground and surface exploitation whereby the same is divided into 12 blocks of exploitation optimization so on the same part of the deposit i.e. block both methods of exploitation will be applied. Analysis of the final exploitation contour was made on 24 three-dimensional surface and underground exploitation models – final mine contours. Every final surface and underground mine contour was analysed by placing cross-sections and calculating the cross-section areas and volumes of dimension stone and waste rock. Costs ware determined for each exploitation method and divided into four groups so that the first group combines dimension stone exploitation costs, second group combines the costs of removing the waste rock, the third group combines the cost of mechanization, equipment and maintenance, and the last group unites all other costs. The costs of surface exploitation exponentially increase and are higher than the costs of underground exploitation that have linear growth. The difference in the cost of surface and underground exploitation from block 1 to 12 has been increased by more than 38 times. The underground exploitation revenue

increases linearly with a smaller inclination in relation to the surface exploitation revenue that are increasing for the initial optimisation blocks but signs of stagnation and decrease are noticeable in the last blocks of exploitation optimization. Revenue difference increased by approximately 9 times from block 1 to 12. The unit dimension stone blocks exploitation price grows from block 1 to 12 but for the underground exploitation is growing slower than surface exploitation. Unit dimension stone blocks exploitation price for surface exploitation increased 3,5 times, and for underground exploitation 1,9 times from block 1 to 12.

The profit of underground exploitation from block 1 to 12 is growing with a slower growth in profit in the last exploitation optimization blocks and the period of stagnation is noticed. The profit of surface exploitation after initial growth stagnates and moves to negative trend and finally ends as a loss. The point in which surface and underground exploitation profit curves crosses represents the position of optimal exploitation contour – the position of transition from surface to underground exploitation.

Key words: surface exploitation, underground exploitation, dimension stone, exploitation optimization, optimal exploitation contour, transition

ZAHVALE

Loreni i Karlu

Posebno bih želio zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr. sc. ***Ivi Galiću*** *na svim provedenim satima mentorstva, na velikom strpljenju tijekom svih konzultacija te na iznimnoj podršci i pomoći tijekom izrade ovog doktorskog rada što mi je uvelike pomoglo pri shvaćanju cijele problematike te u konačnici pridonijelo većoj kvaliteti rada.*

Želim zahvaliti prof. dr. sc. ***Ivanu Dragičeviću*** *na svim mi danim savjetima koji su me usmjerili i potaknuli moje shvaćanje znanstvenog pristupa te na svim savjetima koji su ovaj doktorski rad učinili boljim.*

Prof. dr. sc. ***Tihomiru Knežičeku*** *zahvaljujem na vremenu i savjetima koji su mi dani tijekom izrade ovog doktorskog rada.*

Žalim zahvaliti Rudnicima boksita Jajce d.d., posebno gospođi ***Gordani Deljak*** *na vremenu utrošenom prilikom prikupljanja podataka za izradu doktorske disertacije.*

Svim svojim ***prijateljima*** *koji su prolazili svakakve situacije sa mnom tijekom pisanja ove disertacije, no nikada mi nisu okrenuli leđa želim reći jedno veliko hvala.*

Zahvalan sam svojoj ***obitelji*** *na strpljenju i podršci tijekom izrade ovog doktorskog rada bez čije snage i vjere u mene sve ovo ne bi bilo moguće.*

SADRŽAJ

Popis slika u tekstu VII

Popis tablica u tekstu XI

Popis priloga XIV

Popis skraćenica u tekstu XVI

Popis oznaka i jedinica u tekstu XVII

1. Uvod 1

2. Osnovna načela eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena 7

2.1. Podjela kopova arhitektonsko-građevnog kamena 7

2.2. Volumen arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine 8

2.3. Otvaranje i razrada ležišta arhitektonsko-građevnog kamena 9

2.3.1. Površinska eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena 9

2.3.2. Podzemna eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena 10

2.3.2.1. Komorno-stupna metoda eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena 11

2.3.2.2. Pridobivanje blokova arhitektonsko-građevnog kamena piljenjem pozadinskog reza dijamantnom žicom 13

2.3.2.3. Pridobivanje blokova arhitektonsko-građevnog kamena direktnim cijepanjem/odlamanjem zadnje stranice 13

2.3.2.4. Ventilacija podzemnog kopa arhitektonsko-građevnog kamena 15

3. Prikaz dosadašnjih istraživanja optimizacije eksploatacije ležišta 16

4. Opis područja istraživanja 21

4.1. Geografski položaj eksploatacijskog polja Crvene stijene 21

4.2. Geološke karakteristike ležišta 22

4.2.1. Opis ležišta 25

4.2.1.1. I. produktivni sloj 25

4.2.1.2. II. produktivni sloj 26

4.2.1.3. III. uvjetno produktivni sloj 26

4.2.2. Tektonika ležišta 27
4.2.3. Hidrogeološke karakteristike ležišta 28
4.2.4. Inženjersko-geološke karakteristike ležišta 29
5. Metodologija optimizacije eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena 30
5.1. Definiranje područja istraživanja 32
5.2. Izrada modela terena 33
5.3. Baza podataka istražnih bušotina 36
5.4. Izrada trodimenzionalnog geološkog modela ležišta 39
5.4.1. Unos istražnih bušotina u trodimenzionalni model 40
5.4.2. Unos geoloških profila i obračunskih presjeka u trodimenzionalno okruženje ..
..... 42
5.4.3. Modeliranje ploha rasjeda 46
5.4.4. Modeliranje produktivnih slojeva ležišta arhitektonsko-građevnog kamena crvene stijene 48
5.4.5. Modeliranje krovine, podine i prateće stijene 53
5.5. Analiza modela ležišta i definiranje dijela najpogodnijeg za optimizaciju eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena 55
5.6. Definiranje blokova u modelu optimizacije eksploatacije 56
5.7. Određivanje projektnih parametara površinskog i podzemnog kopa 57
5.7.1. Određivanje projektnih parametara površinskog kopa 57
5.7.1.1. Projektni parametri površinskog kopa 58
5.7.1.2. Provjera projektnih parametara površinskog kopa 59
5.7.2. Određivanje projektnih parametara podzemnog kopa 61
5.7.2.1. Projektni parametri podzemnog kopa 63
5.7.2.2. Provjera projektnih parametara podzemnog kopa 65
5.7.2.2.1. Vertikalna komponenta normalnog opterećenja 67
5.7.2.2.2. Prosječno naprezanje u potpornim stupovima 67
5.7.2.2.3. Tlačna čvrstoća potpornog stupa 69
5.7.2.2.4. Parametar čvrstoće potpornog stupa 69

5.7.2.2.5. Utjecaj diskontinuiteta na čvrstoću potpornog stupa 70
5.7.2.2.6. Prosječan broj velikih diskontinuiteta po potpornom stupu (DPS) 70
5.7.2.2.7. Faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta (FFD) 71
5.7.2.2.8. Faktor nagiba diskontinuiteta (FND) 71
5.7.2.2.9. Faktor sigurnosti potpornih stupova 72
5.8. Modeliranje trodimenzionalnih modela kopova 72
5.8.1. Modeliranje površinskih kopova 72
5.8.2. Modeliranje podzemnih kopova 75
5.9. Analiza vrijednosti površina i volumena kopova 77
5.9.1. Analiza vrijednosti površina površinskih kopova 78
5.9.2. Analiza vrijednosti volumena otkopane stijene površinskih kopova 80
5.9.3. Volumen komercijalnih blokova arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine produktivnih slojeva površinske eksploatacije 82
5.9.4. Ukupan volumen komercijalnih blokova arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine površinske eksploatacije 84
5.9.5. Analiza vrijednosti površina podzemnih kopova 87
5.9.6. Analiza vrijednosti volumena otkopane stijene podzemnih kopova 88
5.9.7. Volumen komercijalnih blokova arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine produktivnih slojeva podzemne eksploatacije 91
5.9.8. Ukupan volumen komercijalnih blokova arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine podzemne eksploatacije 92
6. Ekonomska analiza kopova 96
6.1. Osnovne pretpostavke ekonomskih modela kopova 97
6.1.1. Površinski kop (1. kop) 97
6.1.1.1. Dobit 97
6.1.1.2. Ekvivalent 98
6.1.1.3. Trošak površinske eksploatacije 98
6.1.1.4. Uklanjanje otkrivke bagerom 101
6.1.1.5. Izrada usjeka 103

6.1.1.6. Dobivanje završnih blokova iz trapeznog usjeka 105
6.1.1.7. Dobivanje osnovnih blokova na razvijenoj etaži.....108
6.1.1.8. Dobivanje završnih blokova na razvijenoj etaži.....109
6.1.1.9. Obaranje blokova.....110
6.1.2. Podzemni kop (2. kop).....111
6.1.2.1. Dobit.....111
6.1.2.2. Ekvivalent.....111
6.1.2.3. Trošak podzemne eksploatacije 112
6.1.2.4. Dimenzije blokova i površine rezanja.....114
6.1.2.5. Odlamanje (kalanje) zadnje stranice blokova 115
6.1.2.6. Vjetrenje podzemnog kopa 115
6.1.2.6.1. Volumen zraka potreban za razblaživanje ispušnih plinova 117
6.1.2.6.2. Volumen zraka koji je potrebno dovesti za mehanizaciju.....119
6.1.2.6.3. Volumen zraka za radnike 120
6.1.2.6.4. Ukupan volumen zraka koji je potrebno uvesti u podzemni kop 120
6.1.2.6.5. Proračun volumena zraka uslijed gubitaka protoka 121
6.1.2.6.6. Postupak odabira ventilatora 122
6.1.2.6.7. Utrošak električne energije za rad ventilatora.....123
6.1.3. Prosječna prodajna cijena blokova arhitektonsko-građevnog kamena 124
6.1.4. Mehanizacija i naknade 124
6.1.5. Energenti i potrošni materijal 127
6.1.6. Izračun normativa eksploatacije.....127
6.1.7. Strojevi za pridobivanje blokova arhitektonsko-građevnog kamena.....130
6.1.7.1. Bušilica.....130
6.1.7.2. Dijamantna žična pila 130
6.1.7.3. Lančana sjekačica.....131
6.1.8. Utovar.....131
6.1.8.1. Utovar čvrstog materijala – blokova arhitektonsko-građevnog kamena.132

6.1.8.2. Utovar rasutog materijala – jalovine 133
6.1.9. Transport 134
6.2. Ekonomski modeli kopova – numerička analiza 137
6.2.1. Ekonomski modeli površinske eksploatacije 138
6.2.1.1. Proračun troškova površinske eksploatacije 138
6.2.1.1.1. Uklanjanje otkrivke bagerom 138
6.2.1.1.2. Utovar otkrivke bagerom 138
6.2.1.1.3. Transport otkrivke kamionom 139
6.2.1.1.4. Bušenje bušotina bušilicom 139
6.2.1.1.5. Rezanje dijamantnom žičnom pilom 140
6.2.1.1.6. Rezanje lančanom sjekačicom 141
6.2.1.1.7. Utovar blokova arhitektonsko-građevnog kamena utovarivačem 142
6.2.1.1.8. Utovar jalovine iz sloja arhitektonsko-građevnog kamena i podine bagerom 143
6.2.1.1.9. Transport blokova arhitektonsko-građevnog kamena kamionom 143
6.2.1.1.10. Transport jalovine iz sloja arhitektonsko-građevnog kamena i podine kamionom 143
6.2.1.1.11. Rad zaposlenika (nadnice) 144
6.2.1.1.12. Mehanizacija, oprema i održavanje 144
6.2.1.1.13. Investicijski i završni radovi 145
6.2.1.1.14. Državne naknade 145
6.2.1.2. Analiza troškova površinske eksploatacije 145
6.2.1.3. Prihod i dobit površinske eksploatacije 157
6.2.2. Ekonomski modeli podzemne eksploatacije 159
6.2.2.1. Proračun troškova podzemne eksploatacije 159
6.2.2.1.1. Rezanje lančanom sjekačicom 159
6.2.2.1.2. Utovar blokova arhitektonsko-građevnog kamena utovarivačem 159
6.2.2.1.3. Utovar jalovine utovarivačem 160
6.2.2.1.4. Transport blokova arhitektonsko-građevnog kamena kamionom 160

6.2.2.1.5. Transport jalovine kamionom 160
6.2.2.1.6. Rad zaposlenika (nadnice) 161
6.2.2.1.7. Mehanizacija, oprema i održavanje 161
6.2.2.1.8. Investicijski i završni radovi 161
6.2.2.1.9. Državne naknade 162
6.2.2.1.10. Vjetrenje ventilatorom 162
6.2.2.1.11. Odlamanje (kalanje) blokova 162
6.2.2.2. Analiza troškova podzemne eksploatacije 163
6.2.2.3. Prihod i dobit podzemne eksploatacije 172
7. Diskusija rezultata modela kopova 175
7.1. Analiza volumena blokova arhitektonsko-građevnog kamena 175
7.2. Analiza troškova površinske i podzemne eksploatacije 178
7.3. Analiza prihoda površinske i podzemne eksploatacije 180
7.4. Analiza jedinične cijene pridobivanja blokova arhitektonsko-građevnog kamena površinske i podzemne eksploatacije 182
7.5. Analiza dobiti površinske i podzemne eksploatacije 185
8. Zaključak 188
9. Literatura 193
10. Životopis 199

POPIS SLIKA U TEKSTU

Slika 1 – Komorno-stupna metoda 12
Slika 2 – Izrada horizontalnih rezova lančanom sjekačicom 14
Slika 3 – Izrada vertikalnih rezova lančanom sjekačicom 14
Slika 4 – Cijepanje pomoću vodenog jastuka 14
Slika 5 – Piljenje stražnjeg reza dijamantnom žičnom pilom 14
Slika 6 – Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja Crvene stijene i područja istraživanja (M1 : 75 000) 22
Slika 7 – Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene 23
Slika 8 – Krovinske naslage produktivnih slojeva ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene 23
Slika 9 – Shematski litostratigrafski stup područja Crvenih stijena 24
Slika 10 – Algoritam odabira površinskog, podzemnog ili kombiniranog načina eksploatacije 31
Slika 11 – Granice modela istraživanja s prikazom istražnih bušotina 32
Slika 12 – Primjer triangulacije terena bez ušća bušotina 33
Slika 13 – Alat Element Information 34
Slika 14 – Alat Set Elevation 34
Slika 15 – Pozicionirano ušće bušotine 281 na ispravnoj X-Y-Z poziciji 34
Slika 16 – Kreiranje nove prazne površine 35
Slika 17 – Učitavanje prostornih podataka u novu površinu Situacija 35
Slika 18 – Digitalni elevacijski model terena s prikazom granica modela istraživanja 36
Slika 19 – Sučelje baze podataka gINT 37
Slika 20 – Detalj unosa litoloških jedinica u bazu podataka 38
Slika 21 – Sučelje programa gINT Civil Tools 40
Slika 22 – Istražne bušotine s granicama modela istraživanja 41
Slika 23 – Izdvojeni litološki članovi istražnih bušotina 41
Slika 24 – Priprema detaljnog geološkog profila A-B 42
Slika 25 – Detalj pripreme geološkog profila A-B s iscrtanim plohama produktivnih slojeva 43

Slika 26 – Prostorni odnos pripremljenih detaljnih geoloških profila i istražnih bušotina unutar modela istraživanja 44
Slika 27 – Pripremljeni obračunski presjek 6 – 6' s iscrtanim plohama produktivnih slojeva 45
Slika 28 – Prostorni odnos detaljnih geoloških profila i obračunskih presjeka unutar modela istraživanja.....45
Slika 29 – Alat B-spline by Points 46
Slika 30 – Alat Swept Surface along Curves.....46
Slika 31 – Alat Drape Surface.....47
Slika 32 – Elementi korišteni prilikom modeliranja ploha rasjeda 47
Slika 33 – Modelirane plohe rasjeda modela istraživanja 48
Slika 34 – Izdvojeni elementi korišteni pri modeliranju produktivnih slojeva 49
Slika 35 – Alat Loft Surface 50
Slika 36 – Modelirane plohe krovine i podine dijela produktivnih slojeva 50
Slika 37 – Modelirani produktivni slojevi između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'.....51
Slika 38 – Modelirani produktivni slojevi ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene.....52
Slika 39 – Modelirani produktivni slojevi arhitektonsko-građevnog amena s prikazom bušotina i rasjeda 52
Slika 40 – Modelirani dijelovi ležišta između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'.....54
Slika 41 – Trodimenzionalni model ležišta Crvene stijene s granicama modela istraživanja 54
Slika 42 – Izdvojeni dio modela istraživanja za primjenu metode optimizacije 56
Slika 43 – Blokovi modela optimizacije eksploatacije.....57
Slika 44 – Prikaz projektnih parametara površinskog kopa na presjeku 8 – 8'.....58
Slika 45 – Geometrija stupova i komora za analizu teorije pripadnih površina opterećenja.62
Slika 46 – Pripremljena podloga za projektiranje površinskog kopa za blok 1 73
Slika 47 – Presjek 12 – 17 površinske eksploatacije 79
Slika 48 – Odnos volumena otkopane stijenske mase slojeva površinskih kopova 81
Slika 49 – Odnos ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk površinskih kopova 85

Slika 50 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa .86
Slika 51 – Presjek 12 – 13 podzemne eksploatacije 88
Slika 52 – Odnos volumena otkopane stijenske mase slojeva podzemnih kopova 90
Slika 53 – Odnos ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk podzemnih kopova 93
Slika 54 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi podzemnog kopa ..95
Slika 55 – Shematski prikaz trapeznih usjeka po bloku optimizacije eksploatacije 104
Slika 56 – Shematski prikaz izrade trapeznog usjeka.....105
Slika 57 – Shema dobivanja i raspilavanja prvog osnovnog bloka iz trapeznog usjeka 107
Slika 58 – Shema dobivanja i raspilavanja drugog osnovnog bloka iz trapeznog usjeka ...107
Slika 59 – Shematski prikaz dobivanja osnovnog bloka s razvijene etaže 108
Slika 60 – Shematski prikaz dobivanja završnih blokova iz osnovnog bloka na etaži.....110
Slika 61 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja bloka a-gk po završnoj konturi površinskog kopa 148
Slika 62 – Kumulativno opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije 149
Slika 63 – Grupirani troškovi površinske eksploatacije 152
Slika 64 – Iznos prosječnih troškova završnih kontura površinske eksploatacije 153
Slika 65 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima površinske eksploatacije 155
Slika 66 – Udio prosječnih troškova završnih kontura površinske eksploatacije.....156
Slika 67 – Troškovi, prihod i dobit površinske eksploatacije 158
Slika 68 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja bloka a-gk po završnoj konturi podzemnog kopa 165
Slika 69 – Kumulativno opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije 166
Slika 70 – Grupirani troškovi podzemne eksploatacije 168
Slika 71 – Iznos prosječnih troškova završnih kontura podzemne eksploatacije.....170
Slika 72 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima podzemne eksploatacije 171
Slika 73 – Udio prosječnih troškova završnih kontura podzemne eksploatacije 172
Slika 74 – Troškovi, prihod i dobit podzemne eksploatacije.....174

Slika 75 – Kvantitativni odnos volumena blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije 176
Slika 76 – Kvantitativni odnos volumena blokova površinske i podzemne eksploatacije ..177
Slika 77 – Ukupni troškovi površinske i podzemne eksploatacije.....178
Slika 78 – Razlika i odnosi troškova površinske i podzemne eksploatacije 180
Slika 79 – Prihod od prodaje blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije.....180
Slika 80 – Razlika i omjer prihoda površinske i podzemne eksploatacije 182
Slika 81 – Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk 183
Slika 82 – Razlika i odnos jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinskih i podzemnih kopova.....184
Slika 83 – Dobit od prodaje blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije 185
Slika 84 – Razlika i omjer dobiti površinske i podzemne eksploatacije.....187

POPIS TABLICA U TEKSTU

Tablica 1 – Tipovi kopova ovisno o obliku i geomorfološkim karakteristikama ležišta 7

Tablica 2 – Dimenzija potpornih stupova i komora nekih postojećih podzemnih kopova kamena 12

Tablica 3 – gINT oznake litoloških jedinica 39

Tablica 4 – Projektni parametri površinske eksploatacije za primjenu metode optimizacije 58

Tablica 5 – Parametri stijenskog masiva 59

Tablica 6 – Izračun koeficijenta sigurnosti 60

Tablica 7 – Koeficijent sigurnosti za površinski kop 61

Tablica 8 – Ograničenja mehanizacije podzemnog kopa 62

Tablica 9 – Ograničenja projektnih parametara podzemnog kopa 65

Tablica 10 – Analiza vrijednosti dimenzija komora i stupova 66

Tablica 11 – Projektni parametri podzemnog kopa za primjenu metode optimizacije 67

Tablica 12 – Označavanje površina presjeka površinske eksploatacije 79

Tablica 13 – Rezultati proračuna ukupnog volumena otkopanih slojeva površinskih kopova 80

Tablica 14 – Koeficijent iskorištenja I. i II. produktivnog sloja a-gk 82

Tablica 15 – Volumen blokova a-gk i jalovine za I. produktivni sloj površinske eksploatacije 83

Tablica 16 – Volumen blokova a-gk i jalovine za II. produktivni sloj površinske eksploatacije 83

Tablica 17 – Ukupan volumen blokova a-gk i jalovine površinske eksploatacije 84

Tablica 18 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa 86

Tablica 19 – Označavanje površina presjeka podzemne eksploatacije 87

Tablica 20 – Rezultati proračuna ukupnog volumena otkopanih slojeva podzemnih kopova 89

Tablica 21 – Volumen blokova a-gk i jalovine za I. produktivni sloj podzemne eksploatacije 91

Tablica 22 – Volumen blokova a-gk i jalovine za II. produktivni sloj podzemne eksploatacije 92
Tablica 23 – Ukupan volumen blokova a-gk i jalovine podzemne eksploatacije 93
Tablica 24 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi podzemnog kopa 94
Tablica 25 – Dimenzije trapeznog usjeka 103
Tablica 26 – Površine dobivanja manjih i završnih blokova iz trapeznog usjeka 106
Tablica 27 – Dimenzije osnovnog bloka 108
Tablica 28 – Maksimalne dimenzije završnih blokova.....109
Tablica 29 – Površine dobivanja manjih i završnih blokova s razvijene etaže 109
Tablica 30 – Površine rezanja pri direktnom pridobivanju blokova podzemne eksploatacije 115
Tablica 31 – Neprekidna brzina strujanja zraka u podzemnim prostorijama 116
Tablica 32 – GVI štetnih plinova 116
Tablica 33 – Standardi emisije za necestovne EU stupanj IV. dizelske motore 116
Tablica 34 – Značajke standardnog dizelskog goriva.....118
Tablica 35 – Volumen zraka potrebnog za provjetravanje podzemnog kopa a-gk 120
Tablica 36 – Postotni gubici zraka u vjetrenim cijevima.....121
Tablica 37 – Potreban volumen zraka na čelu radilišta 122
Tablica 38 – Radni sati strojeva i opreme 124
Tablica 39 – Korištena mehanizacija i oprema pri površinskoj eksploataciji 125
Tablica 40 – Korištena mehanizacija i oprema pri podzemnoj eksploataciji 126
Tablica 41 – Naknade korištene tijekom izračuna ekonomskih modela kopova.....126
Tablica 42 – Vrijednosti energenata i potrošnog materijala 127
Tablica 43 – Transportne udaljenosti i kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine 136
Tablica 44 – Transportne udaljenosti i kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk.....137
Tablica 45 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije 147

Tablica 46 – Podjela troškova površinske eksploatacije 150
Tablica 47 – Vrijednosti grupiranih troškova površinske eksploatacije 151
Tablica 48 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima površinske eksploatacije.155
Tablica 49 – Prihod i dobit površinske eksploatacije 157
Tablica 50 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije 164
Tablica 51 – Podjela troškova podzemne eksploatacije 167
Tablica 52 – Vrijednosti grupiranih troškova podzemne eksploatacije 168
Tablica 53 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima podzemne eksploatacije..170
Tablica 54 – Prihod i dobit podzemne eksploatacije 173
Tablica 55 – Kvantitativni odnos volumena blokova površinske i podzemne eksploatacije 177
Tablica 56 – Razlika i omjer troškova površinske i podzemne eksploatacije 179
Tablica 57 – Razlika i omjer prihoda površinske i podzemne eksploatacije 181
Tablica 58 – Odnos i omjer jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije 184
Tablica 59 – Razlika i omjer dobiti površinske i podzemne eksploatacije 186

POPIS PRILOGA

Printani prilozi (na kraju doktorata)

Prilog 1 – Situacijska karta lokacije Crvene stijene

Prilog 2 – Detaljna geološka karta lokacije Crvene stijene

Prilog 3 – Detaljni geološki profili (A-B, C-D i E-F)

Prilog 4 – Detaljni geološki profili (G-H, I-J i K-L)

Prilog 6 – Obračunski presjeci

Prilog 7 – Završne konture površinskog kopa 1

Prilog 8 – Završne konture površinskog kopa 2

Prilog 9 – Završne konture površinskog kopa 3

Prilog 10 – Završne konture površinskog kopa 4

Prilog 11 – Završne konture površinskog kopa 5

Prilog 12 – Završne konture površinskog kopa 6

Prilog 13 – Završne konture površinskog kopa 7

Prilog 14 – Završne konture površinskog kopa 8

Prilog 15 – Završne konture površinskog kopa 9

Prilog 16 – Završne konture površinskog kopa 10

Prilog 17 – Završne konture površinskog kopa 11

Prilog 18 – Završne konture površinskog kopa 12

Prilog 19 – Završne konture podzemnog kopa 1

Prilog 20 – Završne konture podzemnog kopa 2

Prilog 21 – Završne konture podzemnog kopa 3

Prilog 22 – Završne konture podzemnog kopa 4

Prilog 23 – Završne konture podzemnog kopa 5

Prilog 24 – Završne konture podzemnog kopa 6

Prilog 25 – Završne konture podzemnog kopa 7

Prilog 26 – Završne konture podzemnog kopa 8

Prilog 27 – Završne konture podzemnog kopa 9

Prilog 28 – Završne konture podzemnog kopa 10

Prilog 29 – Završne konture podzemnog kopa 11

Prilog 30 – Završne konture podzemnog kopa 12

Digitalni prilozi (na CD-u na zadnjoj korici doktorata)

Prilog 5 – Istražne bušotine modela istraživanja

Prilog 31 – Poprečni presjeci površinske eksploatacije

Prilog 32 – Poprečni presjeci podzemne eksploatacije

Prilog 33 – Površine površinskih kopova

Prilog 34 – Površine podzemnih kopova

Prilog 35 – Proračun volumena površinskih kopova

Prilog 36 – Proračun volumena podzemnih kopova

Prilog 37 – Proračun površinskih kopova – uklanjanje otkrivke bagerom

Prilog 38 – Proračun površinskih kopova – utovar otkrivke bagerom

Prilog 39 – Proračun površinskih kopova – transport otkrivke kamionom

Prilog 40 – Proračun površinskih kopova – bušenje bušotina bušilicom

Prilog 41 – Proračun površinskih kopova – rezanje dijamantnom žičnom pilom

Prilog 42 – Proračun površinskih kopova – rezanje lančanom sjekačicom

Prilog 43 – Proračun površinskih kopova – utovar blokova a-gk utovarivačem

Prilog 44 – Proračun površinskih kopova – utovar jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom

Prilog 45 – Proračun površinskih kopova – transport blokova a-gk kamionom

Prilog 46 – Proračun površinskih kopova – transport jalovine iz sloja a-gk i podine kamionom

Prilog 47 – Proračun površinskih kopova – rad zaposlenika (nadnice)

Prilog 48 – Proračun površinskih kopova – mehanizacija, oprema i održavanje

Prilog 49 – Proračun površinskih kopova – investicijski i završni radovi

Prilog 50 – Proračun površinskih kopova – državne naknade

Prilog 51 – Proračun podzemnih kopova – rezanje lančanom sjekačicom

Prilog 52 – Proračun podzemnih kopova – utovar blokova a-gk utovarivačem

Prilog 53 – Proračun podzemnih kopova – utovar jalovine utovarivačem

Prilog 54 – Proračun podzemnih kopova – transport blokova a-gk kamionom

Prilog 55 – Proračun podzemnih kopova – transport jalovine kamionom

Prilog 56 – Proračun podzemnih kopova – rad zaposlenika (nadnice)

Prilog 57 – Proračun podzemnih kopova – nabava mehanizacije i opreme te održavanje

Prilog 58 – Proračun podzemnih kopova – investicijski i završni radovi

Prilog 59 – Proračun podzemnih kopova – državne naknade

Prilog 60 – Proračun podzemnih kopova – vjetrenje ventilatorom

Prilog 61 – Proračun podzemnih kopova – odlamanje (kalanje) blokova

POPIS SKRAĆENICA U TEKSTU

a-gk	arhitektonsko-građevni kamen
OKP	optimalna kontura prelaska
NSV	neto sadašnja vrijednost
m n.v.	metar nadmorske visine
DEM	digitalni elevacijski model terena
FVD	faktor velikog diskontinuiteta (engl. *large discontinuity factor – LDF*)
FND	faktor nagiba diskontinuiteta (engl. *discontinuity dip factor* – DDF)
FFD	faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta (engl. *frequency factor – FF*)
DPS	prosječan broj velikih diskontinuiteta po potpornom stupu
FFD	faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta
Et.	etaža
K1, K2…	komora 1, komora 2…
H1, H2…	hodnik 1, hodnik 2…
S1, S2…	potporni stup 1, potporni stup 2…
AA-B-C	oznaka sloja – oznaka bloka optimizacije ležišta – oznaka presjeka površinske eksploatacije
OT	otkrivka
S1	I. produktivni sloj
S2	II. produktivni sloj
PO	podina
AA-B-C-D	oznaka sloja – oznaka bloka optimizacije ležišta – oznaka presjeka podzemne eksploatacije – oznaka stupca
KR	krovina
GVI	granične vrijednosti izloženosti
L.S.	lančana sjekačica
D.Ž.P.	dijamantna žična pila
god.	godina
kom.	komada

POPIS OZNAKA I JEDINICA U TEKSTU

M1 : 75 000	oznaka mjerila slike ili priloga
solid element	volumno ispunjeni trodimenzionalni elementi
α_z	kut nagiba završne kosine kopa, °
h_e	visina etaže, m
B_z	širina završne etaže, m
α_e	kut nagiba etažne kosine, °
K_s	koeficijent sigurnosti
φ	kut unutarnjeg trenja, °
c	kohezija, Pa
K	koeficijent seizmičnosti
H_{POV}	visina površinskog kopa, m
H_{POD}	visina krovine podzemnog kopa, m
ρ	prostorna masa, kg/m^3
a	širina potpornog stupa, m
b	duljina potpornog stupa, m
c	raspon (širina) komore, m
d	visina potpornog stupa, m
r	odnos širine i visine stupa
g	ubrzanje uslijed gravitacije, m/s^2
p_z	vertikalna komponenta normalnog opterećenja, N/m^3
σ_p	naprezanje kojem je potporni stup izložen, MPa ili N/m^2
A	površina potpornog stupa, m^2
S	prosječna tlačna čvrstoća potpornog stupa, MPa
k	parametar čvrstoće potpornog stupa, MPa
σ_1	jednoosna tlačna čvrstoća, MPa
d_D	prosječna udaljenost između diskontinuiteta, m
α_D	prosječan nagib diskontinuiteta, °
F_s	faktor sigurnosti
mesh element	element sastavljen od trokuta koji zajedno spojeni predstavljaju površinu u prostoru
V	volumen stijenske mase između dva susjedna presjeka, m^3
L	udaljenost između presjeka, m
P_i	površina i-tog presjeka, m^2
P_{i+1}	površina susjednog i-tog presjeka, m^2
k_i	koeficijent iskorištenja
T_{PodE}	troškovi podzemne eksploatacije a-gk, MJ
T_{PovE}	troškovi površinske eksploatacije a-gk, MJ
T_j	troškovi površinske jalovine, MJ
T_r	troškovi rekultivacije terena, MJ

MJ	monetarna jedinica
€	euro, valuta zemalja Europske unije
D	dobit kopa, MJ
E	ukupan volumen blokova a-gk – ekvivalent, m^3
C_T	tržišna/prodajna cijena korisne mineralne sirovine, MJ/m^3
C_E	prosječni trošak eksploatacije, MJ/m^3
P	prihod, MJ
T	trošak, MJ
D_1	dobit (profit) 1. kopa, MJ
E_1	ekvivalent 1. kopa (ukupan neto volumen a-gk), m^3
C_T	tržišna cijena bloka, MJ/m^3
T_1	prosječan trošak eksploatacije 1. kopa, MJ
S_{1-1}	površina I. produktivnog sloja površinske eksploatacije, m^2
S_{2-1}	površina II. produktivnog sloja površinske eksploatacije, m^2
k_{i-s1}	koeficijent iskorištenja I. produktivnog sloja
k_{i-s2}	koeficijent iskorištenja II. produktivnog sloja
T_{e-1}	trošak površinske eksploatacije 1. kopa (MJ)
T_{s-1}	trošak površinske eksploatacije produktivnih slojeva a-gk, MJ
T_{j-1}	trošak uklanjanja jalovine, MJ
T_{r-1}	trošak rekultivacije terena, MJ
T_{s1-1}	trošak površinske eksploatacije I. produktivnog sloja, MJ
T_{s2-1}	trošak površinske eksploatacije II. produktivnog sloja, MJ
C_{s-1}	jedinična cijena eksploatacije sloja za površinsku eksploataciju, MJ/m^3
V_{s1-1}	volumen I. produktivnog sloja 1. kop, m^3
V_{s2-1}	volumen II. produktivnog sloja 1. kop, m^3
T_{ot-1}	trošak uklanjanja otkrivke za 1. kop, MJ
C_{ot-1}	cijena površinskog uklanjanja otkrivke, MJ/m^3
V_{ot-1}	volumen otkrivke, m^3
OT_1	površina otkrivke, m^2
T_{po-1}	trošak uklanjanja podine za 1. kop, MJ
C_{po-1}	cijena površinskog uklanjanja podine, MJ/m^3
V_{po-1}	volumen podine, m^3
PO_1	površina podine za 1. kop, m^2
T_{js-1}	trošak uklanjanja jalovine iz produktivnih slojeva a-gk za 1. kop (MJ)
C_{js-1}	cijena uklanjanja jalovine iz slojeva a-gk, MJ/m^3
V_{js-1}	volumen jalovine iz slojeva a-gk, m^3
T_{r-1}	trošak rekultivacije terena za 1. kop, MJ
C_{r-1}	cijena rekultivacije terena, MJ/m^3 ili MJ/m^2
P_1	površina zauzeta rudarskim radovima, m^2
$Q_{Č}$	kapacitet bagera s hidrauličkim čekićem

$t_{cč}$	stvarno vrijeme ciklusa odlamanja komada stijene, s
n_u	potreban broj udaraca klipa za odvaljivanje
P_g	prosječna tlačna čvrstoća kamena, MPa
$P_č$	tlak koji proizvodi masa hidrauličkog čekića, MPa
m	masa čekića, kg
g	gravitacija, m/s^2
A	površina koju tlači vrh hidrauličkog čekića, m^2
d	promjer vrha hidrauličkog čekića, m
t_{min}	broj udaraca klipa u minuti, n/min
t_p	vrijeme potrebno za postavljanje čekića u početni položaj, s
O_k	volumen jednog komada stijene koji čekić odlomi u jednom ciklusu, m^3
$š_k$	širina/dubina pojasa, m
l_k	dužina komada, m
h_k	visina komada, m
k_{pb}	koeficijent gubitka vremena zbog premještanja bagera
k_i	koeficijent iskorištenja ukupnog radnog vremena
D_2	dobit (profit) 2. kopa, MJ
E_2	ekvivalent 2. kopa (ukupan neto volumen a-gk), m^3
T_2	prosječan trošak eksploatacije 2. kopa, MJ
S_{1-2}	površina I. produktivnog sloja podzemne eksploatacije, m^2
S_{2-2}	površina II. produktivnog sloja podzemne eksploatacije, m^2
T_{e-2}	trošak eksploatacije za 2. kop, MJ
T_{s-2}	trošak podzemne eksploatacije sloja, MJ
T_{j-2}	trošak podzemnog uklanjanja jalovine, MJ
T_{s-2}	trošak eksploatacije sloja za 2. kop, MJ
T_{s1-2}	trošak podzemne eksploatacije I. produktivnog sloja, MJ
T_{s2-2}	trošak podzemne eksploatacije II. produktivnog sloja, MJ
C_{s-2}	jedinični trošak eksploatacije sloja za 2. kop, MJ/m^3
V_{s1-2}	volumen I. produktivnog sloja 2. kop, m^3
V_{s2-2}	volumen II. produktivnog sloja 2. kop, m^3
C_{j-2}	jedinični trošak uklanjanja jalovine za 2. kop, MJ/m^3
V_{j-2}	volumen jalovine za 2. kop, m^3
V_{kr-2}	volumen krovine za 2. kop, m^3
V_{po-2}	volumen podine za 2. kop, m^3
V_{js-2}	volumen jalovine iz produktivnih slojeva za 2. kop, m^3
KR_2	površina krovine, m^2
PO_2	površina podine za 2. kop, m^2
CO	ugljični monoksid
CO_2	ugljični dioksid

NO	dušikov monoksid
NO_2	dušikov dioksid
SO_2	sumporov dioksid
HC	ugljikovodici
NOx	dušikovi oksidi
PT	onečišćujuće tvari u obliku čestica
Q_{pl}	potreban volumen zraka za razblaživanje ispušnih plinova, m^3/min
V_{gs}	ukupni volumen suhih produkata sagorijevanja ispušnih plinova dizelskih motora, m^3/min
n	koncentracija opasnih plinova u ispušnim plinovima dizelskog stroja, ppm
C	maksimalno dopuštena koncentracija opasnih plinova u jamskom zraku, ppm
m_C, m_S	maseni udjeli, kg/kg ili m^3/kg
V_Z	volumen dovedenog zraka, tj. stvaran volumen zraka za izgaranje, m^3
λ	pretičak zraka
V_{Zmin}	volumen teoretski potrebnog zraka za izgaranje, m^3
Q_m	volumen zraka potreban za razblaživanje ispušnih plinova, m^3/s
Q_{ut}	potreban volumen zraka za utovarivač, m^3/min,
N_{ut}	snaga utovarivača, kW
Q_p	minimalan volumen svježega zraka, m^3/kW/min
Q_r	volumen zraka potreban za radnike, m^3/min
n	broj radnika zaposlenih u podzemnom kopu
q_r	volumen zraka propisan Pravilnikom, m^3/min/zaposlenik
Q_z	ukupan volumen zraka koji je potrebno uvesti u podzemni kop, m^3
Q_v	ukupan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta uslijed gubitaka uzduž ventilacijske cijevi, m^3/s
Q_0	ukupan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta, m^3/s
m	postotni gubitak zraka u ventilacijskim cijevima, %
L_c	dužina ventilacijske cijevi, m
P_i	instalirana snaga elektromotora ventilatora, kW
Q_u	potreban volumen zraka, m^3/s
h_v	depresija ventilatora, mm H_2O
η	stupanj korisnog djelovanja
E_g	potrošnja električne energije uslijed rada ventilatora, kWh
P_a	angažirana snaga ventilatora, kW
P_i	snaga elektromotora odabranog ventilatora, kW
f_o	faktor opterećenja
f_i	faktor istodobnosti potrošača
η	koeficijent djelotvornosti elektromotora ventilatora
T_v	vrijeme rada ventilatora, h

$T_{meh.}$	ukupno vrijeme rada mehanizacije na volumenu stijene kopa, h
$V_{stijene}$	volumen stijene na kojem mehanizacija radi, m^3
$Q_{meh.}$	kapacitet odabrane mehanizacije za stijenu u kojoj radi, m^3/h
$M_{meh.}$	ukupni utrošak materijala pri radu mehanizacije, j.m.
$M'_{meh.}$	jedinični utrošak materijala pri radu mehanizacije, j.m./h
N_{a-gk}	normativ utroška po bloku a-gk, $j.m./m^3$
T_{uk}	ukupni utrošak materijala, nadnica, naknada itd., j.m.
C'_e	opterećenje jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk, MJ/m^3
$C_{jed.}$	vrijednosti jediničnih mjera, MJ/j.m
i, n	pojedinačno opterećenje jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk uslijed rada mehanizacije, nadnica, naknada itd., MJ/m^3
$v_{buš.}$	efektivna brzina bušenja bušilice, m/h
v	najmanja teoretska brzina bušenja, m/h
k_z	koeficijent gubitka vremena uslijed zastoja u radu
$v_{D.Ž.P.}$	efektivna brzina rezanja dijamantne žične pile, m^2/h
v	najmanja teoretska brzina rezanja, m^2/h
$v_{L.S.-pov.}$	efektivna brzina rezanja lančane sjekačice, m^2/h
Q_{UT}	kapacitet utovarivača korištenog za utovar blokova a-gk, m^3/h
E_{UL}	volumen utovarne lopate, m^3
t_{cu}	stvarno vrijeme ciklusa utovara, s
t_p	vrijeme punjenja utovarne lopate, s
t_t	vrijeme okretanja u položaj za utovar, s
t_{is}	vrijeme istresanja tereta, s
t_o	vrijeme okretanja u položaj za povratak, s
k_p	koeficijent punjenja utovarne lopate
k_i	koeficijent iskorištenja vremena
Q_B	kapacitet bagera korištenog na utovaru rasutog materijala, m^3/h
E_{BO}	volumen obrnute utovarne lopate, m^3
t_p	vrijeme punjenja obrnute utovarne lopate, s
k_p	koeficijent punjenja obrnute utovarne lopate
$Q_{T(jal.)}$	kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala, m^3/h
t_{cJ}	stvarno vrijeme ciklusa transporta rasutog materijala, s
t_{ut}	vrijeme utovara kamiona, s
t_{pu}	vrijeme vožnje punog kamiona, s
t_{pr}	vrijeme vožnje praznog kamiona, s
v_1	brzina vožnje punog kamiona, km/h
v_2	brzina vožnje praznog kamiona, km/h
X_J	transportna udaljenost rasutog materijala, m
t_{is}	vrijeme istovara kamiona, s
E_O	volumen sanduka, m^3

k_p	koeficijent punjenja utovarne lopate rasutim materijalom
$Q_{T(a-gk)}$	kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala, m^3/h
t_{cB}	stvarno vrijeme ciklusa transporta čvrstog materijala, s
X_B	transportna udaljenost čvrstog materijala, m
E_B	prosječan volumen bloka a-gk koji se transportira, m^3
$Ø$	oznaka promjera, mm
m_N^3	1 m^3 zraka
kg_G	1 kg goriva

1. UVOD

Osnovna načela u rudarstvu racionalnost, sigurnost i zaštita okoliša predstavljaju ishodište iz kojih proizlaze sve druge zakonitosti u rudarstvu.

Eksploatacija mineralnih sirovina izvodi se površinskim, podzemnim i/ili kombiniranim načinom, ovisno o prirodnim, tehnološkim, ekološkim i ekonomskim faktorima.

Na odabir metode eksploatacije (površinska ili podzemna) ležišta utječu brojni faktori kao što su: veličina, oblik i zalijeganje ležišta, fizikalno-mehaničke karakteristike stijena, stupanj iskorištenja ležišta, eksploatacijski kapaciteti, koeficijent otkrivke, mogućnosti i kapacitet mehanizacije, diskontna stopa, sigurnost na radu, ekološki aspekti, investicijska ulaganja, troškovi eksploatacije, amortizacija, dobit, psihološki i mentalni faktori te klimatske prilike lokacije i dr. (Galić, 2001; Galić et al., 2009; Hartman et al., 1997; Nilsson, 1997; Shahriar et al., 2007; Vidić et al., 2012). Odabir načina eksploatacije jedna je od najvažnijih odluka koje je potrebno donijeti prilikom projektiranja kopa (Camus, 1992).

Pri odabiru načina eksploatacije postavlja se cilj pronalaženja najpovoljnije konture kopa u kojoj će se uvažiti osnovna načela u rudarstvu, što znači dobiti ekonomski optimalnu konturu kopa uz zadovoljene uvjete sigurnosti i okoliša. U stručnoj literaturi navodi se granična dubina i završna kontura površinskog kopa (Popović, 1984) kao granica prostora unutar kojeg je tehnološki, ekološki i ekonomski prihvatljiva (isplativa) eksploatacija. No, treba imati na umu da većina kopova arhitektonsko-građevnog kamena (a-gk) ne prepoznaje pojam granične dubine jer se eksploatacija uglavnom izvodi iznad osnovne razine terena. Pored toga granična dubina odnosi se na jednodimenzionalno polje, a završna kontura označava vremensku dimenziju, obično stanje eksploatacije nekog ležišta. Stoga se ovdje uvodi pojam "optimalna kontura kopa" koji u potpunosti definira prostorno ograničenje dijela ležišta koji će se eksploatirati površinski, podzemno ili kombinirano. Optimalna kontura kopa predstavlja ekonomski najpovoljniju konturu, tj. završni oblik kopa bilo da se radi o površinskoj ili podzemnoj eksploataciji ili pak o granici između površinske i podzemne konture kopa. Pri tome se postavljaju rubni uvjeti prema kojima će se postići određen cilj kao što je optimalna (najpovoljnija) kontura na kojoj će se prijeći na podzemnu eksploataciju ležišta a-gk.

Pri površinskoj eksploataciji a-gk dominantan utjecaj na optimalnu konturu predstavljaju faktori:

- prirodni (geološka građa ležišta, hidrogeološke karakteristike ležišta, morfologija ležišta, kvaliteta a-gk i dr.),

- tehnološki (mogućnosti eksploatacije: kapaciteti i vrijeme/vijek eksploatacije, sigurnost/stabilnost završne kosine i dr.),
- ekološki (utjecaji eksploatacije na okoliš, mjere rekultivacije i dr.) i
- ekonomski (vrjednovanje cijelog ležišta – integralni pristup, troškovi i cijena eksploatacije, dobit i dr.).

Pri podzemnoj eksploataciji a-gk dominantan utjecaj na optimalnu konturu predstavljaju faktori:

- prirodni (geološka građa ležišta, hidrogeološke karakteristike ležišta, morfologija ležišta, kvaliteta a-gk i dr.),
- tehnološki (mogućnosti eksploatacije: kapaciteti i vrijeme/vijek eksploatacije, sigurnost/stabilnost krovine i zaštitnih stupova i dr.),
- ekološki (utjecaji eksploatacije na okoliš) i
- ekonomski (vrjednovanje dijela ležišta – parcijalni pristup, troškovi i cijena eksploatacije, dobit i dr.).

Smatra se da površinska eksploatacija ima više prednosti u odnosu na podzemnu eksploataciju gledajući faktore poput mogućnosti rekultivacije zauzetog prostora, kontrole kvalitete mineralne sirovine, ekonomskih vrijednosti, fleksibilnosti rudarskih radova, sigurnosti i radne okoline (Bakhtavar & Shahriar, 2007), manjeg utjecaja na okoliš koji se u današnje vrijeme gotovo može smatrati i najvažnijom prednosti te mogućnost selektivne eksploatacije (Alejano et al., 2012; Arvantides & Heldal, 2015). Iznimno je važno odrediti optimalan oblik završne konture površinskog ili podzemnog ili kombiniranog kopa kako bi financijska ulaganja u razvoj kopa bila što manja (Howie & Eggert, 2001).

Potrebno je razmotriti pet osnovnih elemenata prije donošenja odluke o prelasku iz površinske u podzemnu eksploataciju:

1) strukturno stanje stijene (uglavnom je ovaj element u eksploataciji a-gk zadovoljen iako se zna javiti slučaj, npr. proslojka gline u slojevitim ležištima),
2) tehnologija eksploatacije (uglavnom se koristi mehaničko rezanje stijene pri pridobivanju blokova kamena),
3) dekorativne karakteristike kamena (boja te veličina zrna mogu varirati zbog nehomogenosti ležišta, odnosno postoji više inačica kamena),

4) ekonomska isplativost podzemne eksploatacije u odnosu na površinsku eksploataciju uzimajući u obzir vjerojatno manje iskorištenje ležišta zbog ostavljanja mineralne sirovine u zaštitnim stupovima ali i manje troškove uklanjanja otkrivke, provedbe mjera zaštite i sanacije kopa,
5) sigurnost i rekultivacija površinskog kopa (Careddu et al., 2010; Oggeri et al., 2001).

U sklopu doktorskog istraživanja postavljene su sljedeće hipoteze:

- optimalan način eksploatacije ležišta arhitektonsko-građevnog kamena ovisi o utjecaju tehno-ekonomskih faktora na mjesto izvođenja rudarskih radova
- valorizacijom tehno-ekonomskih faktora moguće je odrediti prostorni položaj optimalne konture eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena
- utjecaj tehno-ekonomskih faktora na položaj optimalne konture promjenjiv je u vremenu i prostoru.

Kako bi se dokazale ili opovrgnule postavljene hipoteze, razvijena je i primijenjena metodologija kojom je moguće matematički prikazati kretanje odnosno položaj optimalne konture kopa ovisno o tehno-ekonomskim faktorima. Metodologija obuhvaća izradu trodimenzionalnog modela ležišta i završnih kontura kopova te primjenu matematičkog modeliranja utjecaja tehno-ekonomskih faktora na položaj optimalne konture kopa. Cilj je kvantitativno odrediti udio utjecaja pojedinih faktora na optimalnu konturu prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena. Trodimenzionalni i matematički model razvijeni su na realnim podacima ležišta Crvene stijene.

Dosadašnja istraživanja usmjerena su na kreiranje metode kojom bi se dalo cjelovito rješenje kada je potrebno prijeći iz površinske u podzemnu eksploataciju, ali važno je napomenuti da su metode ili skupina metoda riješile dio problematike, no razvijene su za neslojevita ležišta. Tako su Soderberg i Rausch (1968) razvili metodu temeljenu na graničnom koeficijentu otkrivke (Soderberg & Rausch, 1968) dok je Nilsson (1982, 1992, 1997) razvijao metodu temeljenu na tijeku novca, neto sadašnjoj vrijednosti i diskontnoj stopi (Nilsson, 1982, 1992, 1997). Galić (2001) razvija metodu pomičnih kosina prvenstveno za površinsku eksploataciju uslojenih ležišta mineralnih sirovina. Metoda razrađuje ležište podjelom na blokove istih

dimenzija te se svakom bloku određuju parametri: tržišna vrijednost i trošak pridobivanja bloka (Galić, 2001). Bastante, Tabaoda i Ordonez (2004) optimiziraju eksploataciju a-gk analizom bloka i financijskog modela ležišta (Bastante et al., 2004). Bakhtavar i Shahriar (2007) heurističkim algoritmom na ekonomskom blok-modelu ležišta određuju točku odnosno dubinu prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju (Bakhtavar & Shahriar, 2007). Abdollahisharif, Bakhtavar i Shahriar (2008) smatraju da je potrebno uzeti u obzir debljinu zaštitne grede pri određivanju točke prelaska (Abdollahisharif et al., 2008). Bakhtavar, Shahriar i Kazem (2009) uspoređuju diskontirane neto sadašnje vrijednosti više teoretskih modela površinskog, podzemnog ili kombiniranog načina pridobivanja (Bakhtavar et al., 2009a). Finch i Deeper (2012) analiziraju i uspoređuju vremenske rasporede više modela podzemne i površinske eksploatacije te određuju neto sadašnju vrijednost svakog modela eksploatacije pri određivanju točke prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju (Finch & Deeper, 2012). Bakhtavar, Shahriar i Mirhassani (2012) uvode metodologiju temeljenu na matematičkom programiranju tako što ekonomski blok-model ležišta površinskog i podzemnog načina eksploatacije uvode u tranzicijski model pri određivanju optimalne točke prelaska (Bakhtavar et al., 2012). Opoku i Musingwini (2013) problemu prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju pristupaju stohastički na nekoliko modela eksploatacije (površinski, podzemni i kombinirani način eksploatacije) istog ležišta uz razmatranje prodajne cijene i kvalitete mineralne sirovine na otvorenom tržištu (Opoku & Musingwini, 2013). Roberts et al. (2013) koriste iterativan postupak, a metodologija se temelji na pretpostavci da je površinska eksploatacija fiksna te da je potrebno optimizirati podzemnu eksploataciju (Roberts et al., 2013). MacNeil i Dimitrakopoulos (2014) vrijednosti više modela optimalne dubine prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju analiziraju optimizirajući vremenski plan svakog od načina eksploatacije (MacNeil & Dimitrakopoulos, 2014). Carli i Lemons (2015) analiziraju optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju usporedbom nekoliko različitih scenarija kombiniranog načina eksploatacije ali i svakog od načina zasebno, tražeći maksimalnu neto sadašnju vrijednost projekta i volumena pridobivene mineralne sirovine (Carli & Lemos, 2015).

U svrhu dokazivanja postavljenih hipoteza napravljen je trodimenzionalan model ležišta te je određivanjem 12 blokova ležišta definirana osnova odnosno dijelovi ležišta koji će se eksploatirati površinskim i podzemnim načinom eksploatacije. Za svaki od 12 blokova izrađen je trodimenzionalan model površinske i podzemne eksploatacije, tj. izrađeni su

trodimenzionalni modeli završnih kontura kopova. Korištenjem metode paralelnih presjeka analizirane su površine svih završnih kontura kopova s ciljem izračuna ukupnog volumena arhitektonsko-građevnog kamena i jalovine zahvaćene rudarskim radovima te određivanja postotnih udjela volumena jalovine i arhitektonsko-građevnog kamena po konturi kopa.

Za svaki od načina eksploatacije (površinski i podzemni) utvrđeni su troškovi eksploatacije koji proizlaze iz specifičnosti načina eksploatacije kako bi se mogao analizirati utjecaj svakog definiranog troška na ukupne troškove eksploatacije. Troškovi površinske eksploatacije sastoje se od troškova uklanjanja otkrivke, eksploatacije sloja arhitektonsko-građevnog kamena i rekultivacije terena dok se troškovi podzemne eksploatacije očituju u troškovima eksploatacije sloja.

Analizom ekonomskih vrijednosti troškova, prihoda i dobiti modela površinske i podzemne eksploatacije za svaki blok ležišta utvrđeno je kada je eksploatacija profitabilna, a kada kop radi s gubitkom te su utvrđene jedinične cijene pridobivanja blokova arhitektonsko-građevnog kamena. Komparativnom analizom rezultata dobiti površinske i podzemne eksploatacije ustanovljen je položaj optimalne konture kopa, odnosno kada je potrebno prijeći iz jednog u drugi način eksploatacije.

Doktorski rad strukturiran je tako da nakon poglavlja 1 *Uvod* slijedi poglavlje 2 *Osnovna načela eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena* u kojem su obrazloženi osnovni pojmovi površinske i podzemne eksploatacije.

U poglavlju 3 *Prikaz dosadašnjih istraživanja optimizacije eksploatacije ležišta* prikazan je kratki pregled dosadašnjih istraživanja koja su provedena na određivanju optimalne dubine/točke prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju odnosno optimalne konture eksploatacije.

U poglavlju 4 *Opis područja istraživanja* opisana je odabrana lokacija na kojoj će se primijeniti metoda određivanja optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju. Opisan je geografski položaj lokacije te geološke karakteristike ležišta.

U poglavlju 5 *Metodologija optimizacije eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena* detaljno je opisana metodologija određivanja optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju. Opisan je postupak modeliranja ležišta, analize površina i proračuna volumena jalovine i blokova arhitektonsko-građevnog kamena. Definirani su blokovi optimizacije eksploatacije te su određeni projektni parametri površinskog i podzemnog kopa.

U poglavlju 6 *Ekonomska analiza kopova* definirani su proračuni troškova, prihoda i dobiti površinske i podzemne eksploatacije. Temeljem ekonomskih modela površinske i podzemne eksploatacije utvrđeni su troškovi, prihod, dobit i jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk na oba načina eksploatacije te je napravljena i njihova analiza.

U poglavlju 7 *Diskusija rezultata modela kopova* napravljena je komparativna analiza rezultata ekonomskih vrijednosti kopova za određivanje optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju.

U poglavlju 8 *Zaključak* iznesena su zaključna razmišljanja te preporuke za daljnje istraživanje.

2. OSNOVNA NAČELA EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

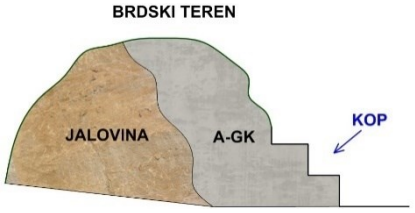
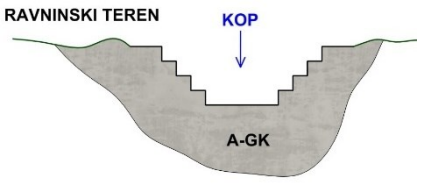
2.1. PODJELA KOPOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

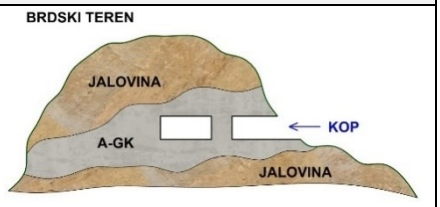
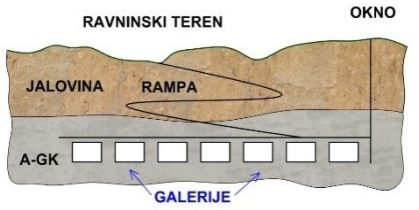
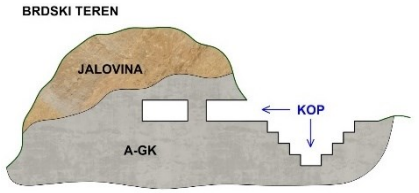
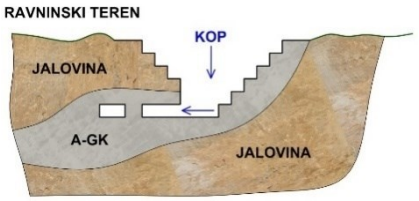
Postoji više tipova kopova a-gk, a oblik im je definiran položajem mineralne sirovine u odnosu na površinu terena te samim oblikom terena (Tablica 1).

Dunda et al. (2003) s obzirom na položaj odnosno na otvaranje i razradu ležišta kopove a-gk dijele u dvije glavne grupe:

- kopovi a-gk s površinskim načinom eksploatacije
    - površinski brdski ili visinski kopovi
    - površinski nizinski kopovi
        - plitki (najčešće jednoetažni kopovi)
        - dubinski (višeetažni kopovi)
- kopovi a-gk s podzemnim načinom eksploatacije (podjela prema načinu eksploatacije)
    - komorno-stupna metoda eksploatacije
        - pravilan raspored stupova
        - nepravilan raspored stupova
    - eksploatacija hodnicima (Dunda et al., 2003).

Tablica 1 – Tipovi kopova ovisno o obliku i geomorfološkim karakteristikama ležišta

Tipovi kopova	Varijante	Opis	Ilustracija
Površinski kop	Brdski ili visinski	Eksploatacija počinje u visinskom dijelu brda ili planine te se razvija prema vrhu ili dnu stijene.	
	Nizinski	Eksploatacija počinje na površini terena te se nastavlja u dubljim dijelovima ležišta u obliku etaža.	

Tipovi kopova	Varijante	Opis	Ilustracija
Podzemni kop	Brdski	Eksploatacija počinje otvaranjem komora u brdskom dijelu ležišta te se razvija otvaranjem novih komora i ostavljanjem potpornih stupova.	
	Dubinski	Pristup ležištu omogućen je vertikalnim oknom ili spiralnom rampom, a eksplotacija se odvija izradom komora.	
Kombinirani kop	Nizinsko-brdski	Eksploatacija se radi površinski u nizinskom dijelu, a nastavlja se podzemnim načinom na brdskom dijelu ležišta najčešće zbog loših ležišnih uvjeta.	
	Nizinsko-dubinski	Površinska eksploatacija nastavlja se podzemnim putem izradom komora kao nastavak dubinskog dijela kopa.	

Izvor: modificirano prema (Guerreiro, 2000)

2.2. VOLUMEN ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA I JALOVINE

Jedan od vrlo važnih faktora koje je potrebno sagledati odnos je volumena jalovine koju je potrebno iskopati kako bi se dobio određeni volumen a-gk. Jalovina se primarno javlja kod površinskih kopova a-gk u obliku stijenskog materijala koji se nalazi iznad utvrđenih rezervi a-gk te ju je potrebno ukloniti kako bi se ležišta moglo eksploatirati. Jalovina se isto tako može javiti unutar a-gk, npr. u obliku proslojaka te se otkopava tijekom eksploatacije a-gk, ali predstavlja trošak eksploatacije. Kod podzemnih kopova a-gk jalovina se javlja u manjem obujmu u odnosu na površinsku eksploataciju, no ipak postoji te isto tako predstavlja trošak podzemne eksploatacije. Trošak podzemne eksploatacije predstavlja i mineralna sirovina koja ostaje u potpornim stupovima kod podzemne eksploatacije a-gk te se na taj način pridobiva manje a-gk što za posljedicu ima da je odnos pridobivenog volumena a-gk i jalovine isto tako važno razmotriti prilikom određivanja ekonomske isplativosti eksploatacije.

Pri izračunu volumena a-gk potrebno je u obzir uzeti više faktora: prirodne diskontinuitete u stijeni koji se prikazuju kroz popravni koeficijent i eksploatacijske gubitke koji se prikazuju kroz koeficijent eksploatacijskih gubitaka. Svi gubici mogu se prikazati kroz koeficijent iskorištenja ležišta a-gk (k_i) koji predstavlja odnos volumena komercijalnih blokova i ukupnog volumena stijenske mase koju je potrebno izvaditi kako bi se dobio volumen komercijalnih blokova. Dakle, koeficijent iskorištenja sadrži koeficijent eksploatacijskih gubitaka i popravni koeficijent (Galić et al., 2015; Vidić et al., 2012).

Nakon sagledavanja spomenutih faktora slijedi izračun volumena stijene koju je moguće pridobiti iz ležišta podjelom ležišta u blokove te pridodavanjem ekonomske vrijednosti svakom pojedinom bloku a-gk (Bastante et al., 2004; Smith, 1999).

Nakon utvrđivanja rezervi a-gk slijedi određivanje metode eksploatacije temeljene na prostornom položaju različitih vrijednosti blokova mineralne sirovine i na zahtjevima tržišta za određenim proizvodom (Abdollahisharif et al., 2012; Smith, 1999).

2.3. OTVARANJE I RAZRADA LEŽIŠTA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Sve veća svijest ljudi o okolišu u kojem žive te sve veći broj zakonskih odredbi o zaštiti okoliša dovelo je do razmatranja prelaska površinske eksploatacije u podzemnu. Dodatno, može se javiti i veliki volumen otkrivke koju je potrebno otkopati kako bi se došlo do mineralne sirovine što predstavlja ekonomsko opterećenje pridobivanja a-gk i upitnost eksploatacije odnosno cijelog projekta.

2.3.1. POVRŠINSKA EKSPLOATACIJA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Najpovoljniji je oblik (tip, varijanta…) površinske eksploatacije takav da se omogući razvoj rudarskih radova po površini i po visini cijelog ležišta tako da se maksimalno iskoriste prostorne veličine i tehnološka rješenja. U mnogo slučajeva ležišta su uska, zaliježu pod kutom te se nalaze ispod neprofitabilne jalovine ili stijene koja nije pogodna za eksploataciju. Svi navedeni faktori mogu utjecati na produktivnost kopa, a struktura stijene (npr. kut rezanja) predstavlja jedan od presudnih faktora (Arvantides & Heldal, 2015).

Dunda (2003) definira tehnološki ciklus otkopavanja površinskog kopa koji se sastoji od nekoliko faza:

- uklanjanje otkrivke
- otvaranje ležišta izradom usjeka
- odvajanje primarnih blokova iz stijenske mase
- obaranje primarnih blokova na radni plato etaže
- rezanje primarnih blokova u komercijalne blokove.

Eksploatacija (pridobivanje) blokova kamena

Prema Dunda et al. (2003) pridobivanje a-gk uglavnom započinje izradom usjeka. Otvaranje usjeka bio je i ostao imperativ pravodobne i svrhovite pripreme i otvaranja kopa jer se njegovom izradom otvaraju dva odvojena "banka". Nakon toga slijedi dobivanje primarnog bloka s čela radilišta izradom reza u donjoj, stražnjoj i dvjema bočnim stranicama s obzirom na to da je gornja stranica uglavnom slobodna uslijed uklanjanja otkrivke.

Ako ne postoje druga ograničenja izvan diskontinuiteta koji su znatno razmaknuti, visina primarnog bloka, odnosno etaže, određuje se ovisno o tehnološkim mogućnostima mehanizacije koja se koristi za pridobivanje blokova a-gk ali i o fizikalno-mehaničkim karakteristikama stijenske mase. U suprotnom, visina etaže bit će prilagođena visini produktivnog sloja, tj. prirodnim ograničenjima ležišta (proslojci i drugi diskontinuiteti). Radna fronta uglavnom se orijentira tako da se dobiju što veći blokovi odnosno što veće iskorištenje ležišta, tj. radna se fronta uvijek orijentira ovisno o uvjetima koji vladaju u ležištu (npr. paralelna je sa smjerom glavnih vertikalnih diskontinuiteta) (Smith, 1999).

2.3.2. PODZEMNA EKSPLOATACIJA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Podzemna eksploatacija a-gk proces je koji zahtijeva pomno planiranje otvaranja i razvoja podzemnog kopa. U cilju dobivanja projektnih parametara podzemnog kopa potrebno je detaljno razraditi svaku od faza pripremi i probne eksploatacije podzemnog kopa (Cotman, 1996).

Dunda et al. (2003) definiraju tehnološki ciklus podzemne eksploatacije (otkopavanja) kopa a-gk koji se sastoji od nekoliko faza:

- otvaranje podzemnih ulaza na jednoj ili više razina,
- izrada hodnika i dobivanje blokova iz njih,
- ostavljanje zaštitnih stupova u materijalu lošijih fizikalno-mehaničkih i geotehničkih karakteristika,
- izrada komora u kojima se dobivaju blokovi uobičajenim površinskim tehnikama.

Tehnike pridobivanja blokova kamena podzemnim putem iste su kao i kod površinskog načina eksploatacije s time da se ne dobiva primarni blok, koji se obara na radni plato, već se vade blokovi kojima je veličina ograničena radnim parametrima mehanizacije na pridobivanju (najčešće lančana sjekačica i utovarivač) ali i dimenzijama podzemne prostorije.

2.3.2.1. Komorno-stupna metoda eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena

Često je korištena metoda eksploatacije a-gk podzemnim načinom komorno-stupna metoda (engl. *room and pillar*) (Slika 1). Metoda se sastoji od ostavljanja potpornih stupova u mineralnoj sirovini između kojih se nalaze komore dobivene eksploatacijom (vađenjem) a-gk.

Dimenzije komora i potpornih stupova dva su ključna preduvjeta za siguran rad komorno-stupne metode s obzirom na to da s nepravilno dimenzioniranih (nestabilnih) potpornih stupova mogu početi otpadati dijelovi stupa. U konačnici može doći do sloma stropa komore ako dođe do sloma jednog ili više potpornih stupova. Isto tako raspon komora mora biti takav da osigura nesmetan pristup čelu radilišta.

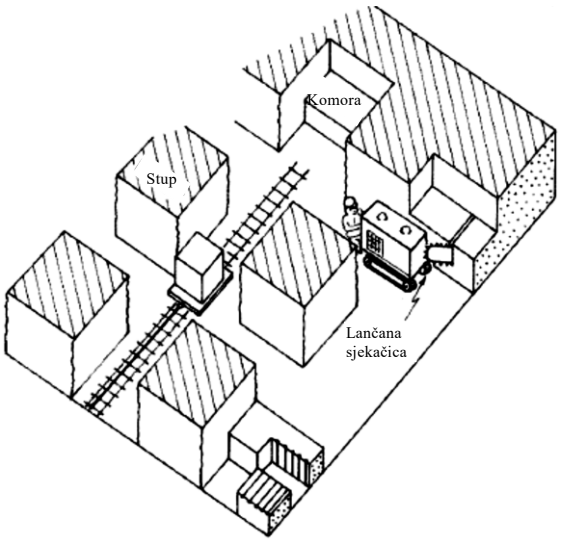
Tijekom analize 34 različita podzemna kopa kamena u srednjozapadnom i istočnom dijelu Amerike te 91 rasporeda i dimenzija potpornih stupova i komora, napravljena je analiza prikupljenih podataka (Tablica 2) prilikom koje su ustanovljene minimalne, maksimalne i prosječne dimenzije komora i potpornih stupova (Esterhuizen et al., 2011a).

Tablica 2 – Dimenzija potpornih stupova i komora nekih postojećih podzemnih kopova kamena

Dimenzije	Prosjek	Minimum	Maksimum
Širina stupa (m)	13,1	4,6	21,5
Visina stupa (m)	11,1	4,8	38,0
Odnos širine i visine stupa	1,41	0,29	3,52
Širina komore (m)	13,5	9,1	16,8
Dijagonala komore (m)	21,7	16,1	29,6
Debljina krovine (m)	117	22,8	670

Izvor: (Esterhuizen et al., 2011a).

Dimenzije stupova i komora određuju se analitički i numerički te se vrijednosti dodatno provjeravaju *in situ* mjerenjima (Alejano et al., 2012; Kortnik, 2015). Dimenzioniranje potpornih stupova najčešće se radi tako da se prvo odredi tlačna čvrstoća stupa i naprezanje kojem je stup izložen te se potom određuju dimenzije potpornih stupova tako da postoji određena margina između čvrstoće stupa i naprezanja kojem je stup izložen.



Izvor: (Smith, 1999)

Slika 1 – Komorno-stupna metoda

Raspored stupova može biti pravilan i nepravilan te se može eksploatirati hodnicima. Pravilan raspored stupova i komora u obliku "šahovskog polja" dovodi do slabijeg iskorištenja ležišta,

ali sa stajališta sigurnosti više je prihvatljiv s obzirom na to da dolazi do pravilnog rasporeda sekundarnih naprezanja u stupovima (González-Nicieza et al., 2006). Potporni stupovi dodatno osiguravaju da ne dođe do slijeganja tla iznad podzemnog kopa što je osobito važno s obzirom na relativno malu dubinu podzemnih kopova a-gk (Esterhuizen et al., 2011a; Smith, 1999). Potporni stupovi moraju osigurati sigurnu radnu okolinu tako da ne dođe do "ljuštenja" stupa te u konačnici sloma stupa ili eventualno otpadanja dijelova stropa komora (Esterhuizen et al., 2010, 2011b).

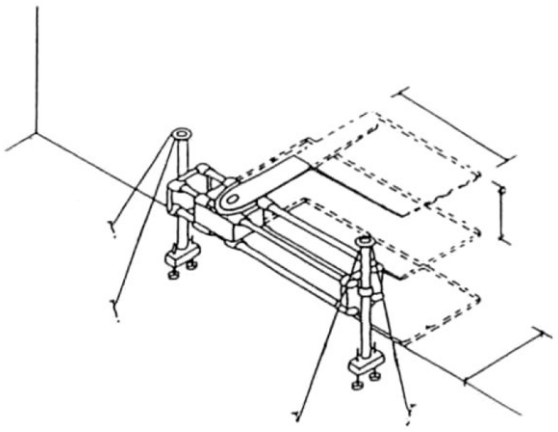
2.3.2.2. Pridobivanje blokova arhitektonsko-građevnog kamena piljenjem pozadinskog reza dijamantnom žicom

Prema Cotman (1996) eksploatacija započinje piljenjem vertikalnih i horizontalnih rezova lančanom sjekačicom (Slika 2 i Slika 3). Radi kasnijeg postavljanja kolona za dijamantnu žicu potrebno je vertikalne rezove izvesti tako da na jednom kraju zahvata omogućimo izradu usjeka širine oko 60 cm. Kada se ispile svi vertikalni i horizontalni rezovi, pristupa se cijepanju blokova iz usjeka pomoću vodenog jastuka (Slika 4). Nakon cijepanja komada i njihova vađenja iz usjeka, u usjek se postavlja kolona s kotačima za dijamantnu žicu koja se povlači kroz vertikalni rez te se pili pozadinska stranica blokova (Slika 5). Kada je ovo ispiljeno, pristupa se piljenju drugog vertikalnog reza tako da se praktički dobivena dužina blokova dijeli na dva dijela. Prije piljenja dijamantnom žicom u horizontalne rezove lančane sjekačice potrebno je umetnuti čelične umetke da eventualno popuštanje gornjeg bloka ne razbije ostale te da se može poslije ponovno provući žica. Nakon što je ispiljen drugi vertikalni rez, pristupa se piljenju trećeg vertikalnog reza te se time dobiju definitivni oblici blokova.

2.3.2.3. Pridobivanje blokova arhitektonsko-građevnog kamena direktnim cijepanjem/odlamanjem zadnje stranice

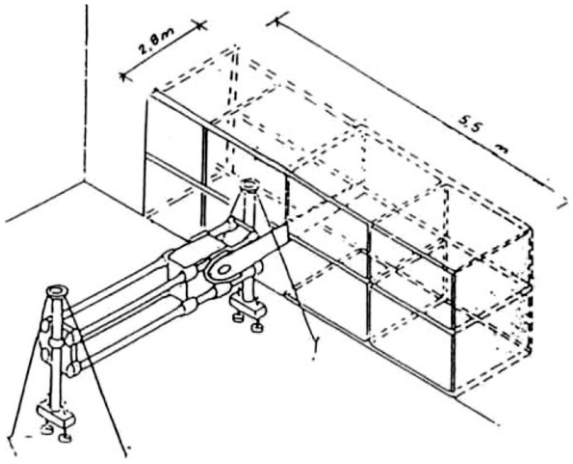
Prema Cotman (1996) blokovi se dobivaju tako da im se uz pomoću vertikalnih i horizontalnih rezova izrađuju "bočne stranice" (Slika 2 i Slika 3), s tim da je debljina bloka jednaka dužini mača kojim se reže. Nakon tako izrađenih rezova bloku je potrebno odlomiti (otkalati) zadnju stranicu te ga izvaditi. To se postiže tako da se u međuprostore horizontalnih rezova postave čelični podmetači koji sprečavaju da gornji blok lupi i nalegne na niži blok te

se u rez uvuku i limeni jastuci za cijepanje (Slika 4). U jastuke se utiskuje voda pod pritiskom te se vrši odlamanje (kalanje) zadnje stranice bloka. Kada su blokovi potpuno odvojeni, u podzemnu prostoriju ulazi utovarivač, uvlači rub radnog elementa (najčešće vilice) u djelomično otvoren rez i izvlači blok iz ležišta. Utovarivač iznosi izvađeni blok i odlaže ga na skladište blokova izvan podzemnog kopa. Velika je prednost ovog načina da se praktički ne troši voda te da je vrlo brz.



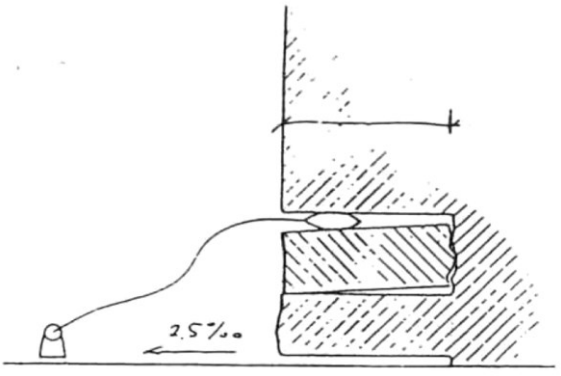
Izvor: (Cotman, 1996)

Slika 2 – Izrada horizontalnih rezova lančanom sjekačicom



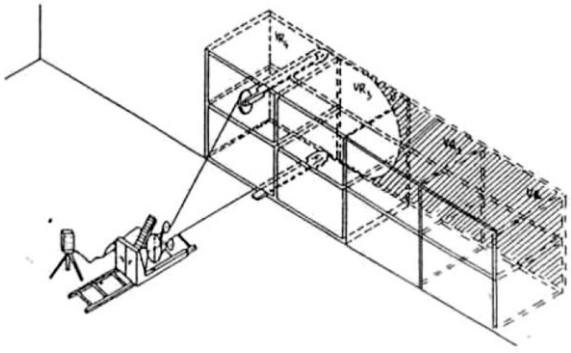
Izvor: (Cotman, 1996)

Slika 3 – Izrada vertikalnih rezova lančanom sjekačicom



Izvor: (Cotman, 1996)

Slika 4 – Cijepanje pomoću vodenog jastuka



Izvor: (Cotman, 1996)

Slika 5 – Piljenje stražnjeg reza dijamantnom žičnom pilom

2.3.2.4. Ventilacija podzemnog kopa arhitektonsko-građevnog kamena

Podzemni kop bio bi izuzetno neprijateljski okoliš za ljude, stoga ventilacija predstavlja vitalnu ulogu u svakodnevnim rudarskim radovima. Važnost uloge ventilacije podzemnog kopa kao dijela rudarskih radova prepoznata je još u ranoj povijesti rudarenja te seže sve do prvog tisućljeća prije Krista (Darling, 2011; Hartman et al., 1997).

Povijesno gledano ventilacija podzemnog kopa imala je ulogu osigurati dovoljan volumen svježe zračne struje da zamijeni kisik koji su konzumirali radnici (rudari) u procesu disanja (de la Vergne, 2014).

Rudarskom inženjeru ventilacija predstavlja najsvestraniji alat za kontrolu atmosfere podzemnog kopa s obzirom na to da je to proces kojim se najviše može kontrolirati radni okoliš podzemnog kopa. Ventilacija podzemnog kopa je ništa drugo doli primjena principa mehanike fluida na strujanje zraka kroz rudarske prostorije. Ventilacija je primarno sredstvo kontrole volumena protoka zraka kroz podzemne prostorije te se ventilacijom ujedno regulira volumen i smjer protoka zraka (ASHRAE, 1993).

Danas se ventilacija podzemnog kopa smatra umjetnošću u rudarstvu i koristi se za kontrolu temperature zraka podzemnog kopa, vlage i količine čestica u zraku kao i za smanjenje koncentracije štetnih plinova nastalih kao produkti izgaranja dizelskog goriva u motorima rudarske mehanizacije i miniranja. Danas je osiguranje dovoljnog volumena zraka za rudare u podzemnom kopu i dalje ostao primarni zahtjev vjetrenja, no valja napomenuti da je volumen zraka potreban za smanjenje koncentracije štetnih plinova ili za smanjenje temperature zraka znatno veći u odnosu na volumen zraka potreban za zamjenu kisika nužnog pri disanju rudara (Pareja, 2000).

3. PRIKAZ DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA OPTIMIZACIJE EKSPLOATACIJE LEŽIŠTA

U literaturi se navode dva pojma: optimalna dubina prelaska i optimalna točka prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju. U ovom doktorskom radu uvodi se pojam "**optimalna kontura prelaska**" (OKP) iz površinske u podzemnu eksploataciju s obzirom na to da se istražuje više kontura kako površinskog tako i podzemnog kopa temeljem kojih je napravljena analiza optimizacije eksploatacije.

Do danas je bilo više pokušaja kreiranja metode koja daje cjelovito rješenje kada je potrebno prijeći iz površinske u podzemnu eksploataciju. Neke od metoda ili kombinacija metoda uspjele su riješiti dio te problematike za potrebe velikih ležišta ruda metala. Dosadašnje metode nisu bez prilagođavanja primjenjive na ležišta nemetalnih mineralnih sirovina s obzirom na to da se kod ležišta a-gk broj nepoznanica smanjuje u odnosu na kompleksna ležišta, npr. metala, te se eksploatacija izvodi najčešće iznad osnovne razine terena. Razlog tome je što ležišta metala često variraju oblikom i veličinom te prostornim rasporedom mineralne sirovine što zahtijeva kompleksne rudarske radove. Problematika određivanja prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju za ležišta a-gk gotovo se ne spominje.

Metoda temeljena na graničnom koeficijentu otkrivke u obzir uzima razliku troškova pridobivanja jedne tone mineralne sirovine podzemnim i površinskim načinom eksploatacije u odnosu na trošak jedne tone uklanjanja jalovine površinskim putem (Soderberg & Rausch, 1968).

Algoritam temeljen na tijeku novca i neto sadašnjoj vrijednosti (NSV) prezentirao je Nilsson 1982. godine (Nilsson, 1982). Isti je algoritam Nilsson revidirao naglašavajući važnost točke prelaska u korištenju kombiniranog načina eksploatacije (Nilsson, 1992). Nilsson je 1997. godine dodatno istaknuo diskontnu stopu kao važan faktor u određivanju točke prelaska iz površinskog u podzemni način eksploatacije (Nilsson, 1997).

Galić (2001) razvija metodu pomičnih kosina prvenstveno za površinsku eksploataciju uslojenih ležišta mineralnih sirovina te ističe da bi ista mogla biti primijenjena i na ležištima a-gk. Metoda razrađuje ležište podjelom na blokove istih dimenzija te se svakom bloku određuju parametri: tržišna vrijednost i trošak pridobivanja bloka.

Chen i grupa autora (2003) razvili su matematički model za određivanje granica kopa u kombiniranom načinu eksploatacije uzduž horizontalnog prostiranja ležišta. Metoda stavlja u

odnos neto sadašnju vrijednost podzemne i površinske eksploatacije te vrijednosti ako se cijelo ležište eksploatira isključivo površinskim ili podzemnim načinom eksploatacije.

Bastante, Tabaoda i Ordonez (2004) po prvi put koriste metode optimizacije eksploatacije ležišta a-gk upotrebom algoritama za projektiranje, planiranje i vremenski slijed faza eksploatacije koje su dotada bile primjenjivane isključivo u eksploataciji drugih metalnih i nemetalnih sirovina. Napravljen je model ležišta koji je uključivao blok-model ležišta te financijski model ležišta. Blok-model ležišta sastoji se od vrijednosti iskoristivih blokova, tj. ploča kamena, dok financijski model uvodi odnos koeficijenta otkrivke i ploče kamena.

Visser i Ding (2007) programiraju računalni program baziran na heurističkom algoritmu za određivanje optimalne dubine prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju odnosno određivanje točke prelaska.

Heuristički algoritam temeljen na ekonomskom blok-modelu uspoređuje vrijednosti blokova površinskog i podzemnog načina eksploatacije svakog horizonta te određivanjem prvih pozitivnih blokova podzemne eksploatacije pojedinog horizonta određuje se točka prelaska, tj. dubina na kojoj završava površinska i počinje podzemna eksploatacija (Bakhtavar & Shahriar, 2007).

Abdollahisharif, Bakhtavar i Shahriar (2008) modificiraju Nilssonov algoritam (Nilsson, 1982, 1992, 1997) uzimajući u obzir debljinu zaštitne grede između površinske i podzemne eksploatacije te dodatno uvode diskontnu stopu pri ocjeni ležišta kroz NSV. Autori uspoređuju nekoliko modela kombiniranog načina eksploatacije u kojima se dio ležišta bliže površini terena eksploatira površinskim načinom eksploatacije, a donji dio ležišta podzemnim načinom eksploatacije uz ostavljanje zaštitne ploče kako bi odredili optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju. Ležište dijele na horizonte i blokove te svakom bloku pridodaju ekonomsku vrijednost za površinsku i podzemnu eksploataciju. Optimalna točka prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju određuje se usporedbom ekonomskih diskontiranih vrijednosti dobivenih za svaki razmatrani model eksploatacije.

Metoda temeljena na analitičkom pristupu uz primjenu graničnog koeficijenta otkrivke pri određivanju točke prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju temelji se na usporedbi ekonomske efikasnosti obiju metoda uz izuzetak kada su prednosti jedne od metoda potpuno očite. Glavna je karakteristika, koja se razmatra prilikom usporedbe ekonomske efikasnosti površinske eksploatacije, koeficijent otkrivke kojim se iskazuje odnos ukupno iskopane

jalovine i ukupni volumen korisne mineralne sirovine u m^3/m^3 ili m^3/t (Bakhtavar et al., 2008a).

Bakhtavar, Shahriar i Oraee (2008) primjenom algoritma određuju optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju na hipotetskom modelu koji dijele na blokove dimenzija 50 x 50 m te uspoređuju ekonomske vrijednosti svakog bloka dobivene površinskim i podzemnim načinom eksploatacije. Horizont, odnosno blokovi koji su determinirani kao blokovi u kojima prestaje površinska, a počinje podzemna eksploatacija, dodatno se dijele na blokove 12,5 x 12,5 m kako bi se točnije odredila točka prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju s time da uzimaju u obzir i debljinu zaštitne ploče između površinske i podzemne eksploatacije.

Bakhtavar, Shahriar i Oraee (2008) optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju određuju preko koeficijenta otkrivke. Autori na nekoliko hipotetskih modela uvode metodu temeljenu na analitičkom postupku uz usporedbu dopuštenog koeficijenta otkrivke kako bi odredili optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju neslojevitog ležišta.

Bakhtavar, Shahriar, i Kazem (2009) modificiraju postojeći Nilssonov algoritam (Nilsson, 1982) uvodeći nekoliko faktora pri određivanju optimalne dubine prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju. Nilssonov algoritam autori proširuju uvođenjem pojmova poput zaštitne ploče između površinske i podzemne eksploatacije te algoritme za optimizaciju podzemne eksploatacije ležišta. Glavni je cilj usporedba diskontiranih neto sadašnjih vrijednosti više teoretskih modela za površinsku, podzemnu ili eksploataciju s kombiniranim načinom pridobivanja.

Bakhtavar, Shahriar i Oraee (2009) iznose metodologiju kojoj je osnova heuristički algoritam temeljen na ekonomskom blok-modelu ležišta odnosno na ekonomskom blok-modelu površinske i podzemne metode eksploatacije ležišta. Vrednovanje ekonomskih vrijednosti temelji se na diskontnoj stopi i neto sadašnjoj vrijednosti dobivenih površinskom i podzemnom eksploatacijom.

Bakhtavar, Shahriar, Oraee i Flett (2010) određuju optimalnu granicu prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju preko izvedene ekonomsko-matematičke formule. Metoda je temeljena na ekonomski opravdanom ukupnom koeficijentu otkrivke i dopuštenom koeficijentu otkrivke. Metodologija je primjenjiva na ležištima koja zaliježu od površine u dubinu.

Finch i Deeper (2012) smatraju da je potrebno napraviti vremenske rasporede više modela podzemne i površinske eksploatacije te odrediti NSV svakog modela eksploatacije. Tek nakon analize i usporedbe svih mogućih scenarija eksploatacije moguće je odrediti točku kada je ekonomski najprihvatljivije prijeći iz površinskog u podzemni način eksploatacije. Važno je napomenuti da je za razradu svakog od modela eksploatacije potrebno utrošiti znatno vrijeme kreiranja modela ali i vremenskog rasporeda eksploatacije što je moguće jedino upotrebom specijaliziranih rudarskih softverskih paketa. Drugim riječima, izrada većeg broja modela i vremenskog rasporeda eksploatacije te određivanje NSV-a često u praksi nije moguće.

Bakhtavar, Shahriar i Mirhassani (2012) uvode metodologiju temeljenu na matematičkom programiranju kako bi riješili optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemni način eksploatacije te koriste linearno programiranje cjelovitih brojeva (0 – 1) uz maksimiziranje dobiti površinske i podzemne eksploatacije. Autori ekonomski blok-model ležišta površinskog i podzemnog načina eksploatacije uvode u tranzicijski model pri određivanju optimalne točke prelaska iz površinskog u podzemni način eksploatacije. Problem optimizacije rađen je na dvodimenzionalnom modelu ležišta, no ako se točka prelaska pokuša pronaći u trodimenzionalnom modelu, cijela se stvar znatno komplicira s obzirom na to da se javlja veliki broj varijabli i mogućih modela.

Opoku i Musingwini (2013) smatraju da je trenutni način određivanja optimalne točke prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju nedovoljno točan jer je temeljen na statičkim modelima koji ne razmatraju promjene u životnom vijeku kopa. Autori smatraju da je problemu potrebno pristupiti stohastički te rade nekoliko modela eksploatacije (površinski, podzemni i kombinirani način eksploatacije) istog ležišta. Naglašavaju da je potrebno uzeti u obzir prodajnu cijenu, kvalitetu mineralne sirovine te tržišna kretanja uz mnoge druge faktore. Autori uvode vremenski promjenjiv pojam "točka prelaska" iz površinske u podzemnu eksploataciju.

Roberts, Elkington, van Olden, i Maulen (2013) optimiziraju eksploataciju koristeći iterativan postupak s obzirom na to da ne postoji metoda koja istodobno optimizira i površinski i podzemni način eksploatacije. Metodologija se temelji na pretpostavci da je površinska eksploatacija fiksna te da je potrebno optimizirati podzemnu eksploataciju u odnosu na površinsku eksploataciju. Autori smatraju da je najveći problem odrediti dijelove ležišta koje je potrebno eksploatirati podzemnim načinom eksploatacije prije napredovanja površinske eksploatacije te tako pridodati tu vrijednost kombiniranom načinu eksploatacije. Pretpostavlja

se da je vrijednost cijelog projekta jednaka vrijednostima površinske eksploatacije kao jedinom načinu eksploatacije te da se vrijednosti projekta dodaju vrijednosti podzemnog načina eksploatacije minus vrijednosti površinske eksploatacije pridobivene podzemnim načinom eksploatacije. Što se blok (dio ležišta) kasnije odredi za podzemni način eksploatacije, to će njegova vrijednost biti manja zbog diskontiranja vrijednosti s time da je pretpostavka da su vrijednosti prodajne cijene i cijene pridobivanja konstantne tijekom cijelog trajanja projekta.

MacNeil i Dimitrakopoulos (2014) pristupaju problemu određivanja prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju stohastičkim cjelobrojnim programiranjem (softverskim rješenjem) u trodimenzionalnom okruženju uz faktor geološke nesigurnosti ležišta. Autori vrijednosti više modela optimalne dubine prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju analiziraju tako što optimiziraju vremenski plan svakog od načina eksploatacije (površinskog i podzemnog). Zbrajanjem neto sadašnjih vrijednosti svakog dijela (površinskog i podzemnog načina eksploatacije) unutar određenog modela te troška prelaska iz jednog u drugi način eksploatacije, određuju optimalnu dubinu prelaska iz površinskog u podzemni način eksploatacije.

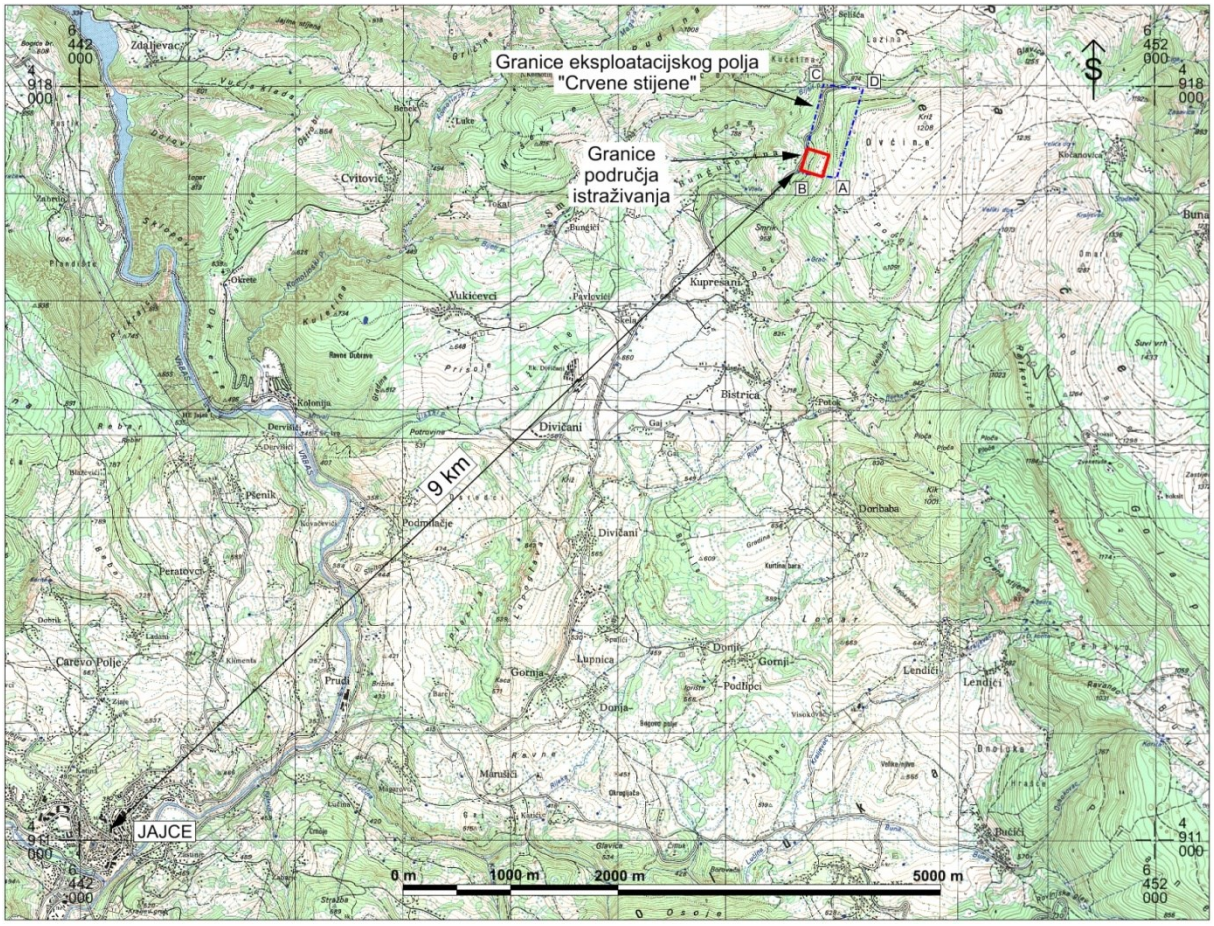
Carli i Lemons (2015) analiziraju optimalnu točku prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju na primjeru ležišta zlata, uspoređujući nekoliko različitih scenarija kombiniranog načina eksploatacije ali i svakog od načina zasebno, tražeći maksimalnu neto sadašnju vrijednost projekta i volumen pridobivene mineralne sirovine. Autori ističu da je određivanje optimalne točke prelaska ključno za nastavak eksploatacije s obzirom na to da krivo definirani trenutak prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju može dovesti do neprofitabilne podzemne eksploatacije uslijed nedovoljnog volumena mineralne sirovine za eksploataciju te prekida projekta.

4. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe izrade poglavlja 4. *Opis područja istraživanja*, korištena je stručna dokumentacija izrađena za potrebe Rudnika boksita Jajce d.d. koji namjerava eksploatirati a-gk na lokaciji Crvene stijene. Istraživanje optimizacije eksploatacije a-gk provedeno je na dijelu postojećeg eksploatacijskog polja Crvene stijene koji je ocijenjen kao najpovoljniji za primjenu utvrđene metode optimizacije, što je detaljno opisano u poglavlju 5. *Metodologija optimizacije eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena*.

4.1. GEOGRAFSKI POLOŽAJ EKSPLOATACIJSKOG POLJA CRVENE STIJENE

Eksploatacijsko polje Crvene stijene nalazi se na udaljenosti od oko 9 km sjeveroistočno od Jajca na jugozapadnim padinama planine Ranče, odnosno užeg lokaliteta Ovčine, uz asfaltni put koji od Jajca vodi prema Bešpelju, poznatom boksitonosnom lokalitetu (Slika 6). Veća su naselja, uglavnom sela: Podmilačje, Divičani, Kuprešani, Podlipci, Doribaba, Bistrica, Vukićevci i Bešpelj. U morfološkom pogledu, područje eksploatacijskog polja je brdovito, s kotama između 890 i 1090 m n.v. (Prilog 1). Područje eksploatacijskog polja djelomično je pod šumom, sitnom šumom i travnatim padinama – livadama, a mjestimično se nalaze izdanci stijena (Dragičević et al., 2015).



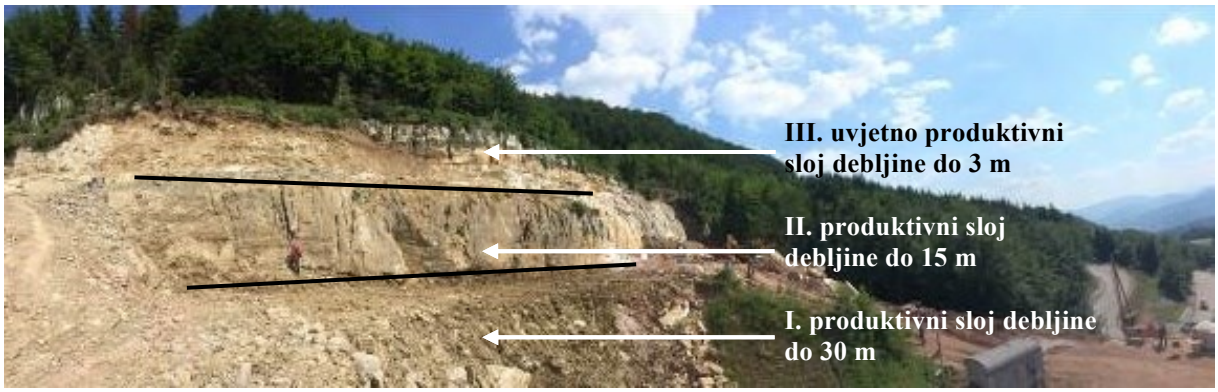
Slika 6 – Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja Crvene stijene i područja istraživanja (M1 : 75 000)

4.2. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA

Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene smješteno je u bazalnom dijelu transgresivne serije sedimenata senonske starosti. Oni su transgresivni i blago diskordantni preko plitkomorskih vapnenaca najmlađe donje krede. Diskordancija predstavlja stratigrafsku prazninu, odnosno kopnenu fazu za vrijeme koje su nastala brojna ležišta visokokvalitetnih bemitskih boksita. Vapnenci u podini ležišta boksita predstavljaju najmlađe taložne sekvence koje su nataložene na sjevernom rubu prostrane Jadranske karbonatne platforme Dinarida (Prilog 2) (Dragičević et al., 2015).

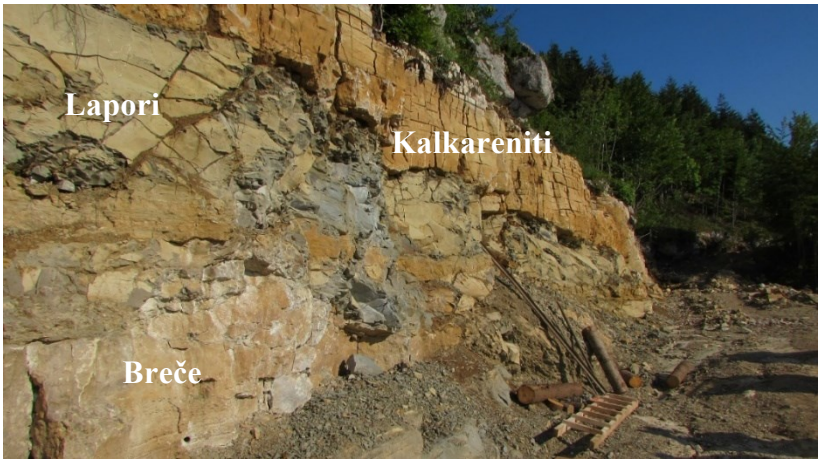
Transgresivni slijed sedimenata senonske starosti započinje bazalnim karbonatnim brečama koje dolaze u obliku masivnog sloja debljine i do 30-ak metara. Nadalje, u sedimentacijskom nizu slijede krupnozrnate karbonatne breče, odnosno konglobreče karbonatnog sastava čija debljina dosiže i do 15 metara. Upravo ova dva litološka člana čine ležište arhitektonsko-

građevnog kamena (Slika 7). Debljina ova dva litološka člana mijenja se i po pružanju i po zalijeganju, ali nikada u tolikoj mjeri da bi zbog smanjenja debljine bilo upitno postojanje ležišta a-gk (Dragičević et al., 2015).



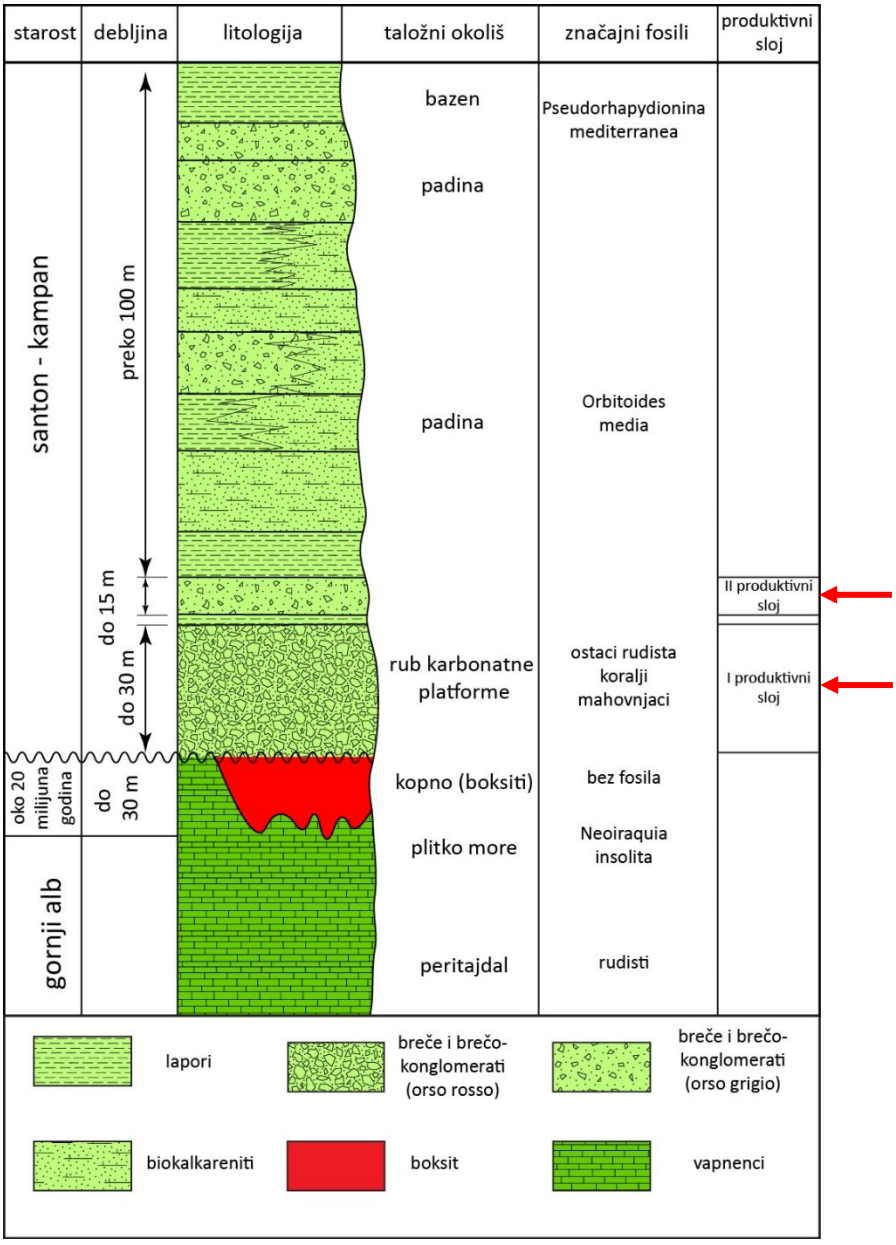
Slika 7 – Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene

U slijedu sedimenata iznad dva produktivna sloja nalazimo izmjenu kalkarenita, lapora, kalcitičnih lapora i vapnenačkih breča (Slika 8). Izmjena ovih litotipova brza je i česta kako vertikalno tako i horizontalno. Slojevi breča obično su deblji i markantniji (nerijetko i preko 2 metra). U takvim slučajevima oni mogu biti interesantni i kao a-gk te su ponekad označeni kao treći produktivni sloj. Ovakvi litološki odnosi ustanovljeni su u cijelom području ležišta, ali i mnogo šire, odnosno u cijelom boksitonosnom području Crvenih stijena (na površini od oko 1 km²) (Dragičević et al., 2015).



Slika 8 – Krovinske naslage produktivnih slojeva ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene

Najznačajnije karakteristike geološke građe ležišta a-gk na Crvenim stijenama, kao što su litologija, starost, taložni okoliši, debljina, znatan fosilni sadržaj i izdvojeni produktivni slojevi prikazani su na shematskom litostratigrafskom stupu područja Crvenih stijena (Slika 9).



Izvor: (Dragičević et al., 2015)

Slika 9 – Shematski litostratigrafski stup područja Crvenih stijena

4.2.1. OPIS LEŽIŠTA

Ležište a-gk Crvene stijene predstavljeno je bazalnim slojevima karbonatnih klastita senonske starosti koji su poznati pod nazivom "fliš". Pružanje slojeva u ležištu približno je sjever-jug što odudara od uobičajenog dinaridskog pružanja. Nagibi slojeva kreću se u rasponu od 5 do 15 stupnjeva generalno prema istoku. Ustanovljena su dva glavna produktivna sloja koji će se eksploatirati kao a-gk ali i jedan uvjetno produktivan sloj (Dragičević et al., 2015).

4.2.1.1. I. produktivni sloj

Prvi produktivni sloj predstavljen je krupnozrnastim karbonatnim brečama i hipsometrijski i stratigrafski najniže je položen. U petrografskom smislu izgrađuju ga monomiktne karbonatne breče, svijetlocrvenkaste do roza boje. Klasti breča gotovo su isključivo od podinskih vapnenaca stratigrafskog raspona prijelaza iz donjeg u gornji alb. Uz njih rjeđe dolaze fragmenti školjkaša-rudista koji vode podrijetlo s rudistnih biohermi. Veličina klasta vapnenaca varira od cm do m dimenzija. Pretežno su uglati ili tek neznatno zaobljeni što svjedoči o vrlo kratkom ili nikakvom transportu (moguće je da je barem dio ovih karbonatnih breča nastao *in situ*, dakle bez transporta). Vezivo je karbonatno, najčešće veličine pijeska do mulja i vrlo dobro ispunjava međuprostore između fragmenata vapnenaca. Naknadni procesi cementacije i dijageneze uzrokovali su nastanak vrlo čvrste i homogene stijene masivnog habitusa. Relativno jednostavni strukturni odnosi u području Crvenih stijena upućuju na dobru strukturnu očuvanost i mogućnost pridobivanja blokova arhitektonskog kamena. Uglavnom se radi o jednom sloju koji može biti debeo i do tridesetak metara. Debljina mu se mijenja po pružanju i zalijeganju što je rezultat mehanizama njegovog taloženja i oblika dna akomodacijskog prostora za vrijeme taloženja. Prisutan je u cijelom ležištu. Podinu I. produktivnog sloja u nematerijalnom smislu obilježava tektonsko-erozijska diskordancija, a u materijalnom smislu to su plitkovodni dobro uslojeni vapnenci alba, a vrlo su često to i ležišta boksita. Kutna diskordancija nije znatna, a ponekad i nedostaje što snažno ovisi o paleoreljefu vapnenaca na koji su transgredirali produktivni karbonatni klastiti (Dragičević et al., 2015).

4.2.1.2. II. produktivni sloj

Drugi produktivni sloj predstavljen je krupnozrnastim karbonatnim klastitima. To su karbonatne breče i karbonatni brečokonglomerati. Od I. produktivnog sloja odvojen je do 50 cm debelim slojem glinovito laporovitog konglomerata često s boksitičnim vezivom crvenkaste boje. Ovaj granični sloj prepoznat je kako na izdancima tako i u jezgrama bušotina te predstavlja pouzdan reper koji pratimo u cijelom ležištu. U petrografskom smislu izgrađuju ga pretežno monomiktne karbonatne breče do konglobreče, ponekad polimiktne (osim klasta neposredne podine prisutni su i klasti drugih starijih vapnenaca). Uz njih rjeđe dolaze fragmenti školjkaša-rudista koji potječu s rudistnih biohermi. Boja ovog produktivnog sloja uglavnom je u različitim nijansama sive. Veličina klasta vapnenaca najčešće varira od cm do dm dimenzija. Ima ih uglatih, tek neznatno zaobljenih do zaobljenih što svjedoči o vrlo kratkom do značajnom transportu prije konačne sedimentacije. Bitno je napomenuti da se veličina klasta mijenja kako horizontalno tako i vertikalno. Tako su nerijetko ustanovljeni prijelazi iz sitnozrnatih breča u krupnozrnate kalkarenite. Vezivo je karbonatno, najčešće veličine pijeska do mulja i vrlo dobro ispunjava međuprostore između fragmenata i valutica vapnenaca. Ono je nekada obilno pa klasti plivaju u vezivu, a ponekad je siromašno pa se klasti međusobno i dodiruju. Naknadni procesi cementacije i dijageneze uzrokovali su nastanak vrlo čvrste i homogene stijene masivnog habitusa (Dragičević et al., 2015).

4.2.1.3. III. uvjetno produktivni sloj

Treći produktivni sloj (uvjetno nazvan produktivni) predstavljen je krupnozrnastim karbonatnim klastitima, odnosno brečama i konglobrečama. Petrografska su mu obilježja vrlo slična onima iz II. produktivnog sloja. Debljina mu dosiže i preko 3 metra. Boja mu varira od različitih tonova sive do svijetlosmeđe boje. Temeljni problem zašto nije sa sigurnošću uvršten u produktivni sloj njegov je superpozicijski položaj u odnosu na II. produktivni sloj. Naime, on se javlja u vrlo različitim hipsometrijskim položajima i vrlo je često njegova horizontalna i vertikalna korelacija upitna. Gledajući sa stajališta eksploatacije on je inkorporiran u jalovinske krovinske naslage. Iz bogatog veziva sva tri opisana krupnoklastična sloja mikropaleontološkim istraživanjima određena je vrlo bogata i raznovrsna zajednica mikrofosila (foraminifera) u kojoj su taksoni poredani prema provodnosti te u svima izbruscima neodredive mnogobrojne miliolide i rotalide, rjeđe nezazatide, ciklaminide, orbitolinide i dr. Sastav ove bogate foraminiferske zajednice

određuje njezin stratigrafski raspon na mlađi santon i kampan. S obzirom na provodnost pojedinih vrsta moglo bi se raspravljati o tome da su ove naslage i nešto mlađe. Na to ukazuje prisutnost vrste *Calveziconus lecalvezae* koja je dosada bila poznata iz mlađega kampana. Međutim, to je čisto paleontološko-biostratigrafsko pitanje i izlazi iz okvira ovih istraživanja. Prema tome, starost produktivnih naslaga i njihove bliže krovine je gornji santon – donji kampan (Dragičević et al., 2015).

4.2.2. TEKTONIKA LEŽIŠTA

Temeljno strukturno obilježje u samom ležištu i njegovom neposrednom okruženju daju rasjedi. Ustanovljeno je 5 glavnih rasjeda različitog karaktera koji su bitni za strukturne odnose u ležištu. To su međusobno približno paralelni rasjedi pružanja sjever-sjeveroistok – jug-jugozapad. Idući generalno od zapada prema istoku prva su tri rasjeda reversna, četvrti je normalni, dok peti, dakle najistočnije položeni rasjed po pružanju, mijenja karakter pa u većem sjevernom dijelu pružanja ima reversni karakter dok u južnom dijelu, dakle po pružanju poprima normalni karakter. Ovakve promjene karaktera rasjeda po pružanju rezultat su rotacije, odnosno škarastog kretanja krila rasjeda. Ovakva su kretanja vrlo izvjesna i uz druge rasjede o čemu treba voditi računa kod planiranja eksploatacije. Uz drugi rasjed, u zoni probne eksploatacije, uočen je lijevi tektonski transport po pružanju. Iznose kretanja po pružanju nije bilo moguće kvantificirati u ovoj fazi otkrivenosti terena. Najzapadniji reversni rasjed ujedno je i najznačajniji rasjed koji ujedno predstavlja zapadnu granicu ležišta i jasno razdvaja relativno mirnu strukturu Crvenih stijena na istoku od vrlo poremećene strukture na zapadu. To je prikazano na detaljnim geološkim poprečnim profilima (Prilog 3 i Prilog 4). Pomaci uz paraklazu u vertikalnom kretanju iznose i do 60-ak metara. I uz drugi reversni rasjed ostvareni su vertikalni pomaci, npr. na profilu A-B i do 14 metara te na profilu E-F do 7 metara (Prilog 3). Ove pomake treba uzeti u obzir kod projektiranja eksploatacije. Kretanja odnosno pomaci uz druge rasjede bitno su manji, ali ih treba uzeti u obzir kod daljnjih radova. Promjene debljina produktivnih slojeva, posebno uz rasjede koji su najvjerojatnije singenetski (sinsedimentacijski), mogu uzrokovati prividne pomake krila rasjeda. Što se tiče nagiba paraklaza, oni su strmi, a kod normalnih rasjeda i uspravni. Mjereni podaci o položajima slojeva u području ležišta pokazuju da su oni nagnuti generalno prema istoku pod kutovima od 5 do maksimalno 15 stupnjeva. Zapadno od zapadne granice ležišta slojevi su ustrmljeni (do 55 stupnjeva) i intenzivno borani. Pukotinski sustavi prisutni su i prikazani na geološkoj

karti (Prilog 2). U ovoj fazi otkrivenosti ležišta uočava se maksimalan regionalni stres pružanja približno okomito na pružanje slojeva i rasjeda, dakle približno jugoistok-sjeverozapad, a tako su, dakle paralelno s njim orijentirane i glavne pukotine. Uočene su i relaksirajuće pukotine i to u produktivnim slojevima, a najbolje su vidljive u vršnim dijelovima krovinskih krila reversnih rasjeda (Dragičević et al., 2015).

4.2.3. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA

Hidrogeološki odnosi u području ležišta i neposrednog okruženja proizlaze iz geološke građe područja, odnosno oni su rezultat odnosa fizikalnih karakteristika stijena i njihovog strukturnog položaja. Glavninu terena na površini izgrađuju karbonatni klastiti, a u podzemlju se javljaju vapnenci kao podina produktivnim slojevima. U normalnom slijedu naslaga vapnenci predstavljaju podinu karbonatnim klastitima-brečama koji će se eksploatirati kao a-gk. Debljina je vapnenaca više stotina metara. Pretežno su ispucali i okršeni. U njima je prisutna u najvećoj mjeri sekundarna poroznost. Prevladava pukotinska i disolucijska. Bušenjem su u podzemlju, prilikom istraživanja ležišta boksita, u njima ustanovljene brojne kaverne različitih dimenzija (mogu se očekivati i pećinski prostori). Padalinske vode, koje samo manjim dijelom dođu s površine terena izgrađenog od karbonatnih klastita koji su u cjelini nepropusni, mogu u podzemlje izgrađeno od vapnenaca doći posredstvom pukotina i rasjeda kroz koje brzo poniru, a još brže nastavljaju kroz krško podzemlje i spuštaju se duboko prema rijeci Vrbas koji je glavni recipijent voda u ovom području. Rijeka Vrbas je i erozijska baza u ovom području pa u nju u obliku baznih dotoka dotječe i većina padalinskih voda koje dospiju u podzemlje. Zbog toga u vapnencima, koji se nalaze u podini karbonatnih breča, ne treba očekivati podzemnu vodu, a pogotovo ne u području karbonatnih breča čiji slojevi leže konkordantno i neposredno preko podinskih vapnenaca. Dakle, u ležišnim karbonatnim brečama, brečokonglomeratima i kalkarenitima čija je debljina promjenjiva, ali može dosegnuti i do 40-ak pa i više metara, u hidrogeološkom smislu oni imaju jako slične hidrogeološke karakteristike kao i podinski vapnenci i s njima čine jedinstvenu hidrogeološku cjelinu. U njima je razvijena pretežno sekundarna poroznost – pukotinska i disolucijska ali i dijelom primarna poroznost. Zbog toga su oni dobro vodopropusni, a sudbina podzemnih voda u njima ista je kao i onih u podinskim vapnencima. Zbog svega navedenog ne treba očekivati probleme s podzemnom vodom prilikom eksploatacije (Dragičević et al., 2015).

4.2.4. INŽENJERSKO-GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA

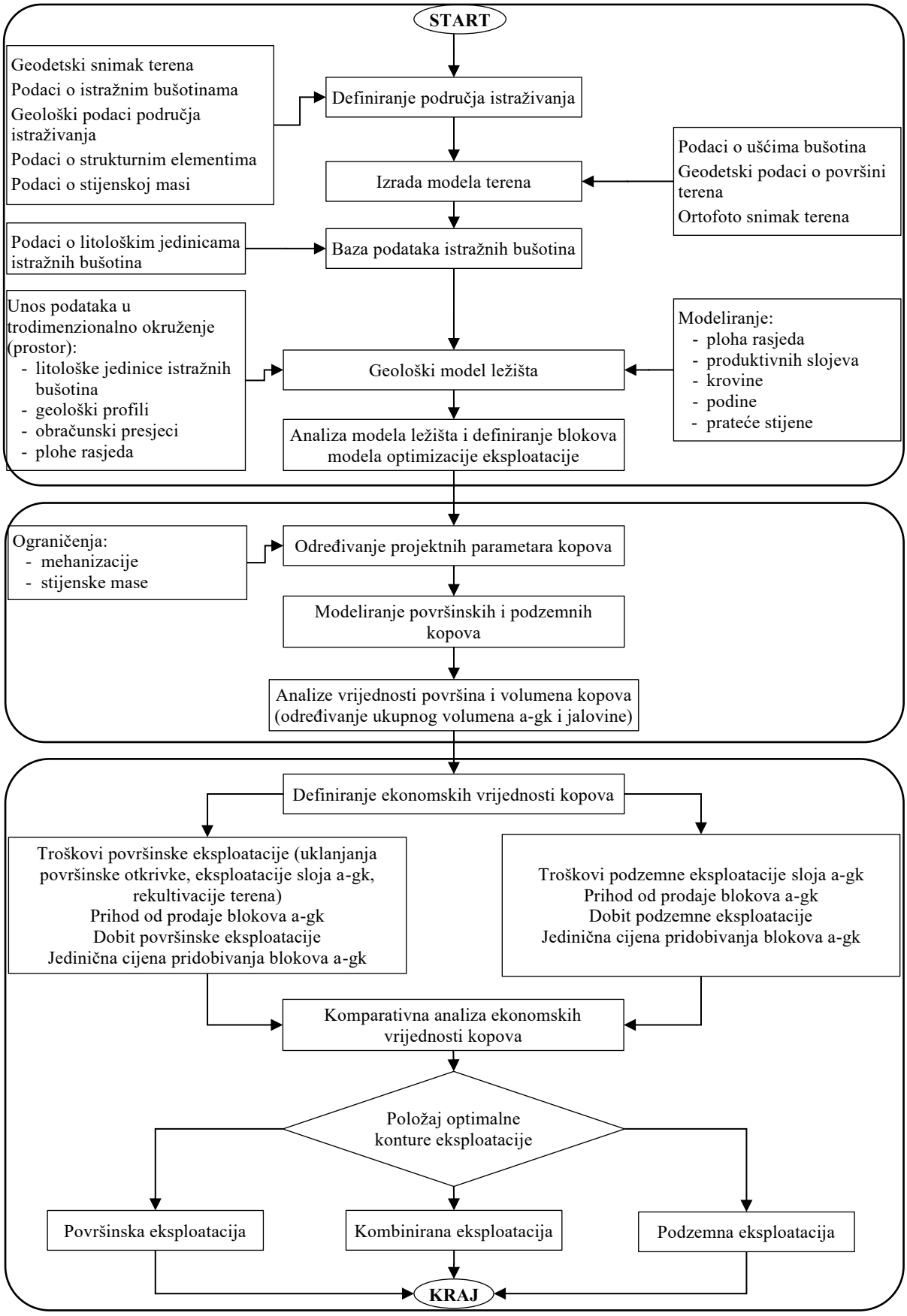
U inženjersko-geološkom pogledu ležište a-gk Crvene stijene izgrađeno je od tri osnovne grupe stijena koje se razlikuju po inženjersko-geološkim karakteristikama. U podinskom dijelu produktivnih slojeva, krupnozrnastih karbonatnih klastita (breča i brečokonglomerata nalaze se čvrsti kompaktni dobro uslojeni vapnenci albske starosti, koji predstavljaju vrlo solidnu osnovu ako se u njima uopće budu trebali izvoditi rudarski radovi. Produktivni slojevi (I. i II.) vrlo su masivne i čvrste stijene, uslojene s vrlo debelim slojevima. I. produktivni sloj može biti debeo i do 30 metara, a II. produktivni sloj i do 15 metara. Oni su međusobno konkordantni, dakle paralelni. Razdvojeni su do 50 cm debelim proslojkom zaglinjenog konglomerata. Debljina produktivnih slojeva, a i proslojka može se mijenjati po pružanju i zalijeganju, ali prisutni su i prepoznatljivi u cijelom ležištu. Krovinske stijene produktivnim slojevima predstavljene su izmjenom lapora, kalcitičnih lapora, kalkarenita i karbonatnih breča. Ovi se slojevi vrlo različitih debljina (mm do m dimenzija) učestalo izmjenjuju. Uočeno je miješanje osnovnih litotipova kako horizontalno tako i vertikalno. Nagibi svih vrsta stijena, odnosno slojeva koji one čine generalno je prema istoku od 5 do 15°, čime je ostvarena i prirodna stabilnost padine. Produktivni slojevi imaju vrlo dobre geomehaničke i geotehničke karakteristike te će biti vrlo pogodni za eksploataciju (Dragičević et al., 2015).

5. METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Cijeli postupak određivanja načina eksploatacije ležišta a-gk, odnosno određivanja optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju, sastoji se od nekoliko osnovnih cjelina:

- Prva cjelina odnosi se na određivanje područja odnosno dijela ležišta koje će se analizirati te karakteristika vezanih za odabrano područje. U ovoj se cjelini obrađuju svi dostupni podaci o odabranoj lokaciji te se izrađuju trodimenzionalni modeli ležišta i površine terena. Trodimenzionalni modeli predstavljaju pojednostavljenu verziju stvarnog fizičkog sustava koji je prekompleksan da bi se analizirao i prikazao u cijelosti sa svim detaljima (Young et al., 2012). Dodatno se određuje i dio ležišta, tj. blokovi modela optimizacije eksploatacije.
- Druga cjelina odnosi se na modele površinskih i podzemnih kopova odnosno završnih kontura dobivenih optimizacijom eksploatacije blokova te volumena a-gk i jalovine. Završne konture kopova dobivene su temeljem projektnih parametara, a vrijednosti volumena kopova dobivene su metodom paralelnih presjeka računalnom obradom iz trodimenzionalnih elemenata.
- Treća cjelina obuhvaća određivanje ekonomskih vrijednosti kopova, odnosno definiranje i analizu troškova, prihoda, dobiti i jediničnе cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije. Položaj optimalne konture određuje se temeljem komparativne analize ekonomskih vrijednosti kopova, tj. određuje se koji će se način eksploatacije primijeniti.

U cilju određivanja optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju napravljen je algoritam odabira površinskog, podzemnog ili kombiniranog načina eksploatacije (Slika 10).

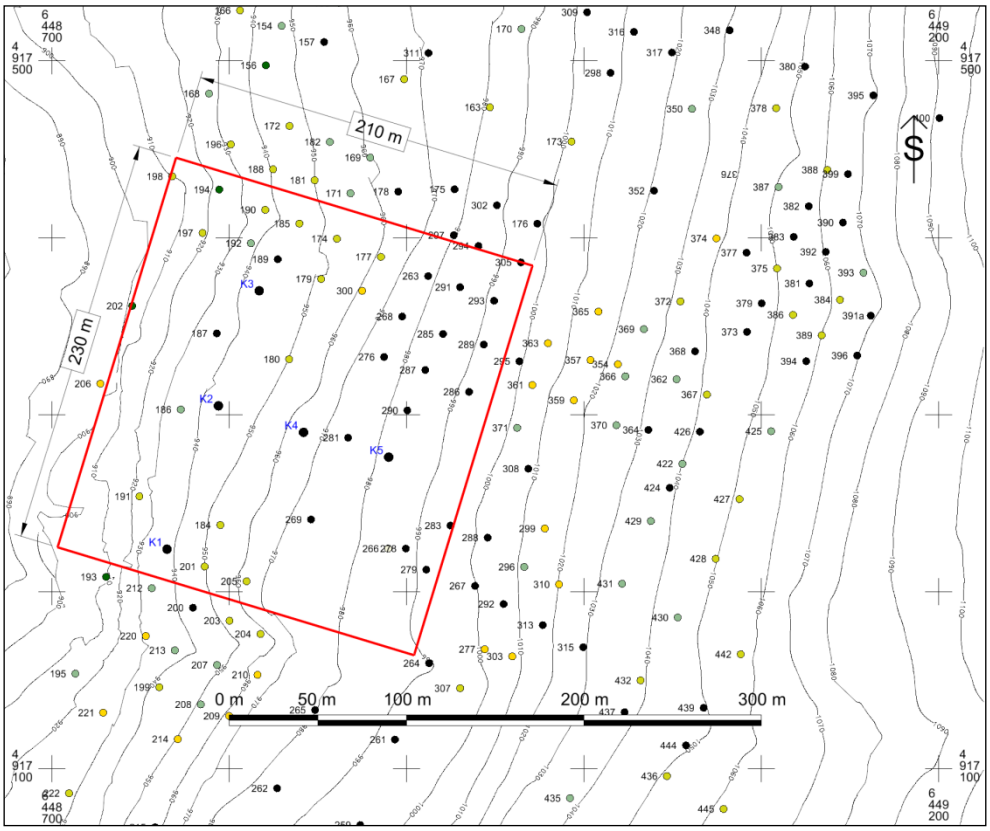


Slika 10 – Algoritam odabira površinskog, podzemnog ili kombiniranog načina eksploatacije

5.1. DEFINIRANJE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

S obzirom na veliko područje prethodnih istraživanja, za potrebe ovog doktorskog rada ograničeno je područje istraživanja temeljem sljedećih uvjeta:

- dostupnost geodetskih podataka o površini terena
- najveći broj podataka o istražnim bušotinama (prednost se daje području s novim istražnim bušotinama)
- dostupnost podataka o geologiji područja istraživanja (prednost se daje dijelovima s postojećim geološkim profilima)
- dostupnost podataka o strukturnim elementima (rasjedima, pukotinama…)
- dostupnost podataka o stijenskoj masi (probna eksploatacija, tehnološke probe laboratorijska ispitivanja, obračunski presjeci…)
- mogućnosti korištenja ortofoto snimaka terena.



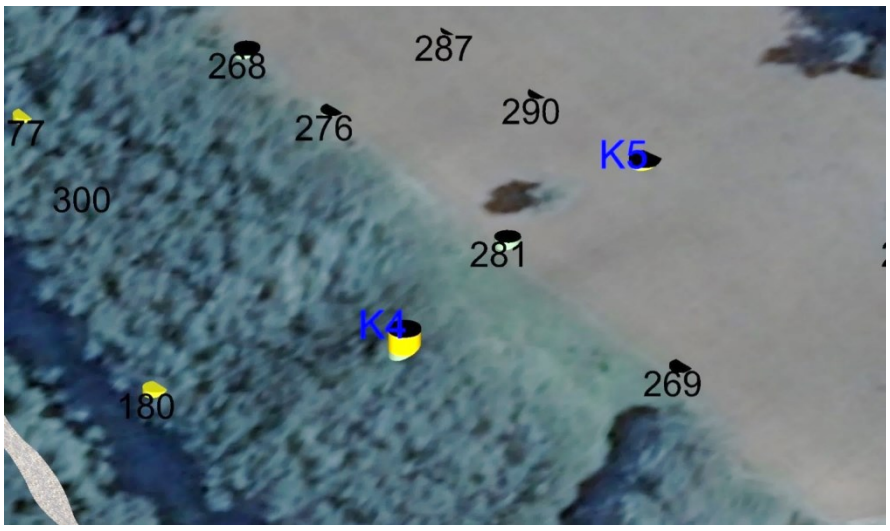
Slika 11 – Granice modela istraživanja s prikazom istražnih bušotina

Granice istraživanja odnosno modela unutar kojih će se provoditi daljnje istraživanje dimenzija je 230 x 210 metara, ukupne površine 48 300 m^2 (Slika 11 i Prilog 1). Unutar granica istraživanja nalazi se ukupno 35 istražnih bušotina bušenih pri istraživanju boksita (198, 194, 190, 185, 197, 174, 192, 177, 189, 305, 263, 179, 291, 300, 293, 202, 268, 187, 285, 289, 276, 180, 287, 286, 186, 290, 281, 191, 269, 184, 283, 266, 278, 201, 279, 205) te 5 novih istražnih bušotina bušenih pri istraživanju a-gk (K1, K2, K3, K4 i K5). Uz bušotine koje se nalaze unutar granica istraživanja korištene su i bušotine izvan granica istraživanja kako bi se dobila cjelovita slika proučavanog područja (Slika 11).

5.2. IZRADA MODELA TERENA

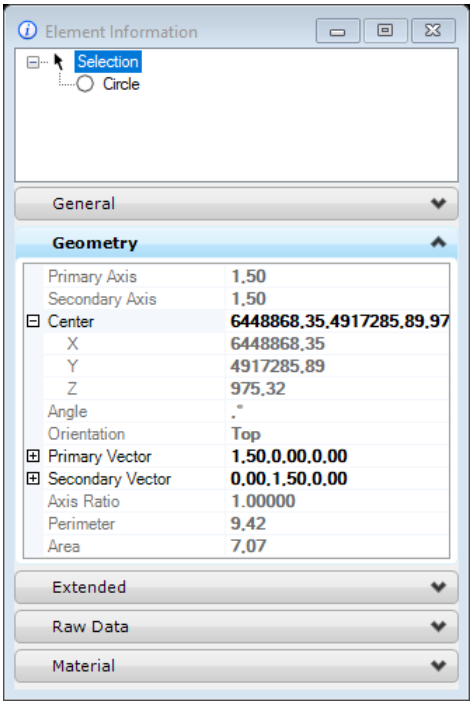
Digitalni elevacijski model (DEM) terena izrađen je temeljem dostupnih podataka o ušćima bušotina, dostupnih geodetskih izmjera, situacije postojećeg stanja i okolnog terena koje su napravljene na lokaciji za potrebe izrade Elaborata o rezervama (Dragičević et al., 2015). Dodatno su korišteni i podaci iz digitalnog elevacijskog modela terena Google Earth, tj. preuzeta je ortofoto snimka lokacije (Google, 2016).

S obzirom na to da je snimka terena sadržavala podatke (geodetske točke i slojnice koje su interpolirane iz geodetskih točaka), bilo je potrebno postojećim podacima dodati i podatke o ušćima bušotina kako bi se dijelovi terena na kojima će kasnije biti pozicionirane istražne bušotine poklapali s podacima o ušćima bušotina. U suprotnom, mogu se dogoditi situacije u kojima bušotine "strše" izvan digitalnog elevacijskog modela terena (Slika 12).

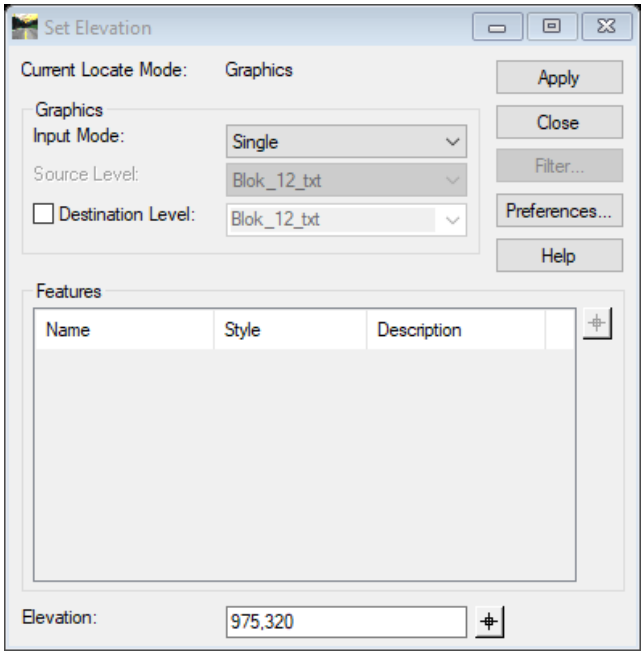


Slika 12 – Primjer triangulacije terena bez ušća bušotina

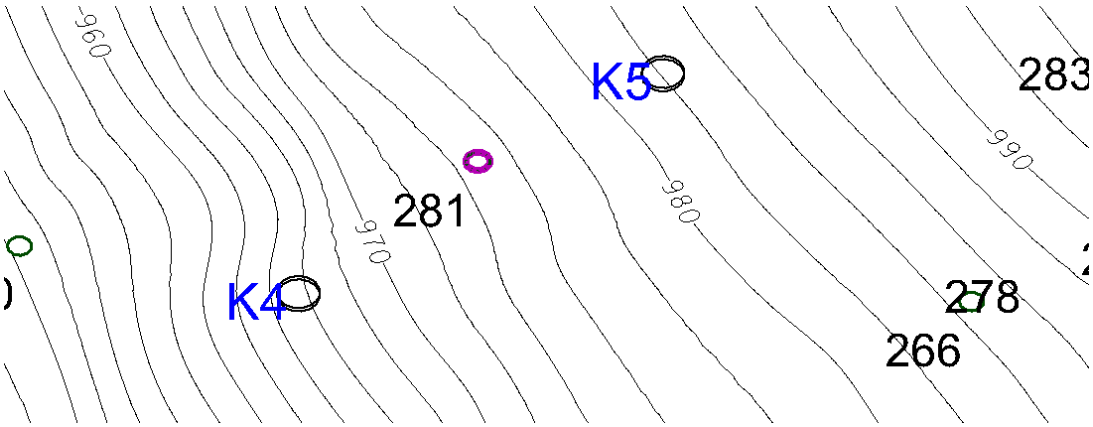
Prvo su ušća korištenih bušotina (Prilog 5) pozicionirana na ispravnu prostornu poziciju određivanjem "X" i "Y" vrijednosti svake bušotine korištenjem alata Element Information (Slika 13) te je svakom ušću bušotine dodana i vrijednost nadmorske visine određivanjem vrijednosti "Z" svakog ušća bušotine korištenjem alata *Surface / Design Surface / Set Elevation* unutar programa Bentley Power Inroads (Bentley Systems Inc., 2016a) (Slika 14). Podaci o prostornom položaju preuzeti su iz litoloških stupova istražnih bušotina (Prilog 5). Ušća bušotina predstavljaju, uz već postojeće podatke o površini terena, dodatne točke triangulacije kako bi teren upravo u tim točkama bio na točnoj nadmorskoj visini (Slika 15).



Slika 13 – Alat Element Information

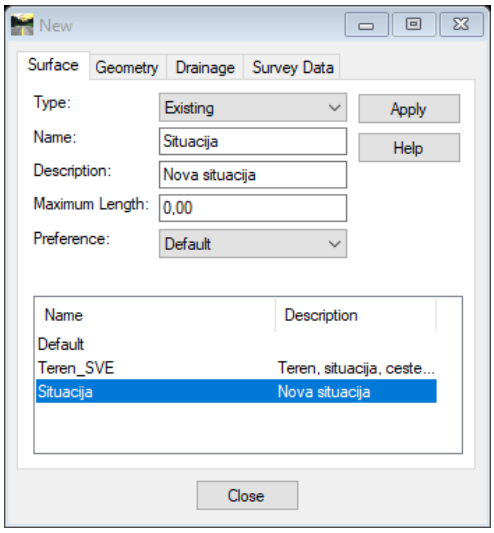


Slika 14 – Alat Set Elevation

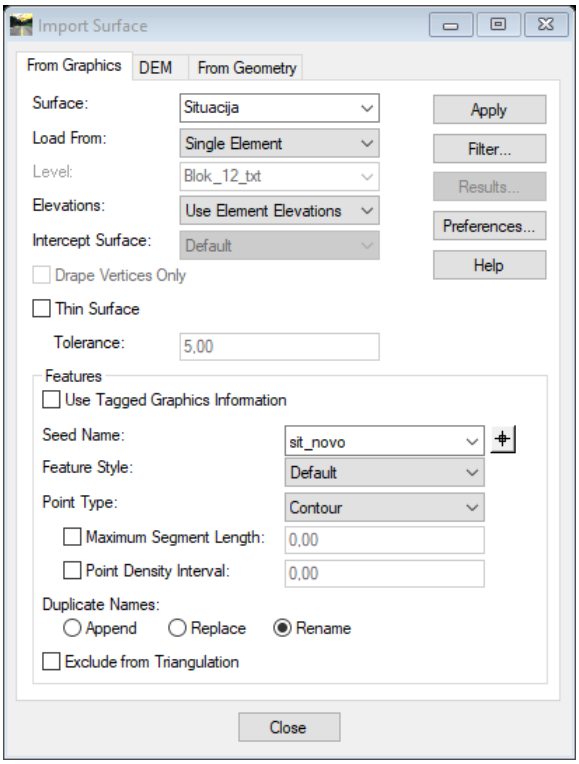


Slika 15 – Pozicionirano ušće bušotine 281 na ispravnoj X-Y-Z poziciji

Sljedeći korak izrade digitalnog elevacijskog modela terena (DEM) u programu Bentley Power InRoads (Bentley Systems Inc., 2016a) izrada je nove prazne površine (engl. *surface*) korištenjem naredbi *File / Power Inroads File / New* te određivanje naziva nove prazne površine (odabrano *Situacija – Nova situacija*) (Slika 16). Nakon kreiranja prazne površine slijedi učitavanje svih podataka o lokaciji (Slika 11 i Prilog 1) u praznu površinu Situacija korištenjem naredbe *File / Power Inroads Import / Surface* (Slika 17).



Slika 16 – Kreiranje nove prazne površine



Slika 17 – Učitavanje prostornih podataka u novu površinu Situacija

Nakon učitavanja dostupnih podataka o površini terena napravljena je nova triangulacija površine terena te je dobiven novi triangulirani digitalni elevacijski model terena. Dobiveni DEM u trenutnoj formi nema teksture te je bilo potrebno preuzeti i ortofoto snimak terena. Za preuzimanje ortofoto snimke terena korišten je program Google Earth Pro kako bi se dobila što kvalitetnija slika terena (Google, 2016). Prvo je napravljena sinkronizacija lokacije programa Google Earth Pro korištenjem naredbe *Tools / Geographic / Synchronize Google Earth Pro* unutar programa Power Inroads te se na taj način sinkroniziraju oba programa tako da prikazuju istu lokaciju na Zemlji. Ortofoto snimak terena preuzima se korištenjem naredbe *File / Save / Save Image* unutar programa Google Earth Pro.

Preuzeti ortofoto snimak terena prikazan je na DEM-u, a za dijelove terena koji predstavljaju izdanke stijena, puteve i probnu eksploataciju napravljene su nove teksture kako bi se ti dijelovi što realnije prikazali u završnom renderiranom digitalnom elevacijskom modelu terena (Slika 18).

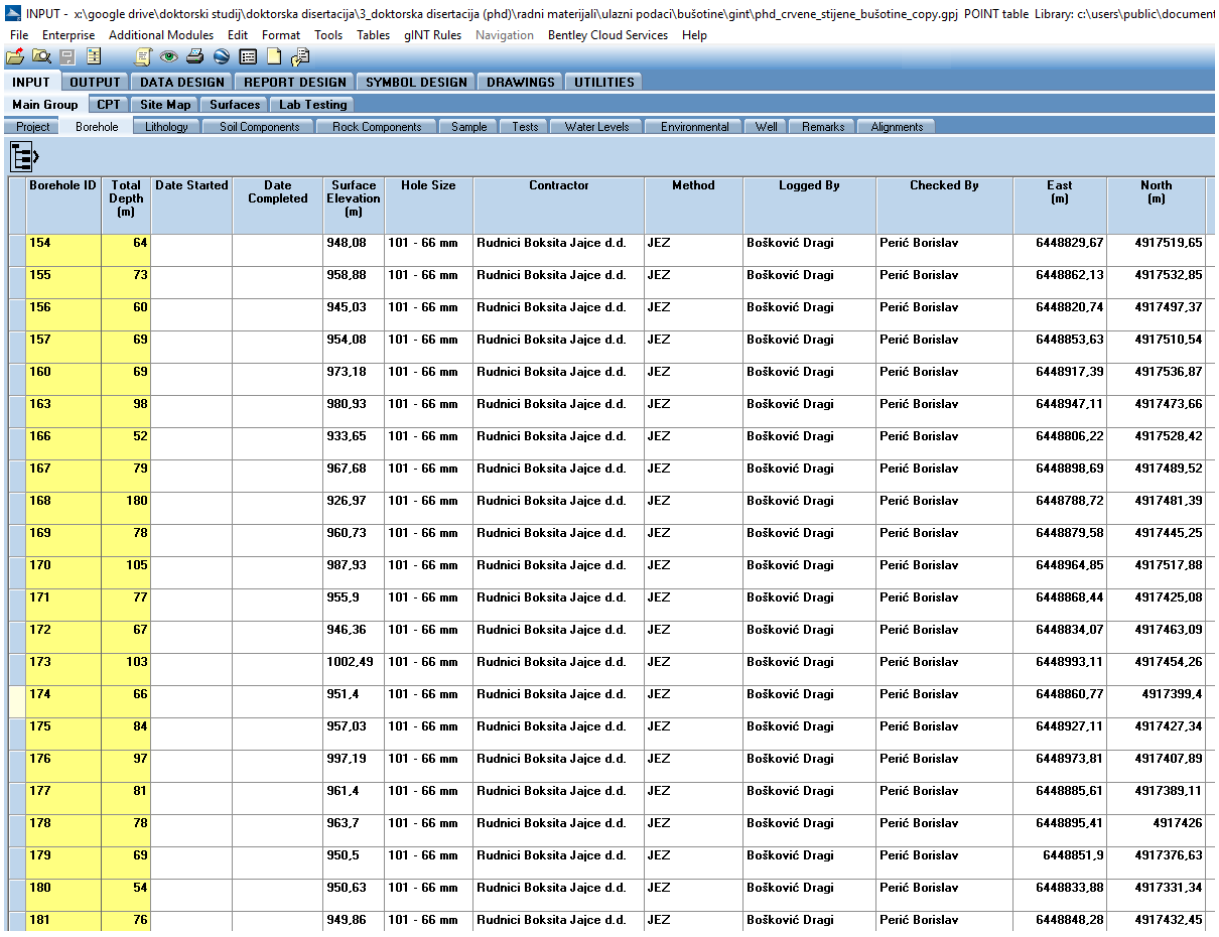
Slika 18 – Digitalni elevacijski model terena s prikazom granica modela istraživanja

5.3. BAZA PODATAKA ISTRAŽNIH BUŠOTINA

S obzirom na veliku količinu podataka (istražnih bušotina) korištena je baza podataka u kojoj će svi podaci o litološkim jedinicama biti jednoobrazno prikazani te će se moći jednostavno obrađivati. Odabrana je baza podataka istražnih radova gINT tvrtke Bentley (Bentley Systems Inc., 2016b) (Slika 19). Za svaku istražnu bušotinu potrebno je unijeti podatke o litološkim članovima. Baza podataka gINT pruža i mogućnost unosa velikog broja drugih podataka o istraživanju poput geofizičkih istraživanja, kemijskog sastava pojedinih litoloških članova, čvrstoću stijene itd.

Kako bi se bušotine unijele u bazu podataka, svakoj bušotini prvo je potrebno dodijeliti oznaku, tj. naziv bušotine i ukupnu duljinu bušenja. Naziv bušotine i dubina bušenja dva su minimalno neophodna podatka prilikom unosa istražnih bušotina bez kojih baza podataka ne

može raditi (Slika 19). Na raspolaganju je unos podataka ili u već predefinirane stupce iz baze podataka ili je moguć unos novih vrijednosti definiranjem novih stupaca za unos podataka. S litoloških stupova preuzeti su svi dostupni podaci za svaku bušotinu te su tako u bazu podataka uneseni podaci o početku bušenja (*Date Started*), završetku bušenja (*Date Completed*), površini terena odnosno ušća bušotina (*Surface Elevation, m*), promjer bušaćih kruna (*Hole Size*), izvođač radova (*Contractor*), metoda bušenja (*Method*), tko je kartirao bušotinu (*Logged By*) i tko je napravio provjeru kartiranja (*Checked By*) te prostorne koordinate svake istražne bušotine (*East (m)* odgovara poziciji "X", a *North (m)* poziciji "Y").

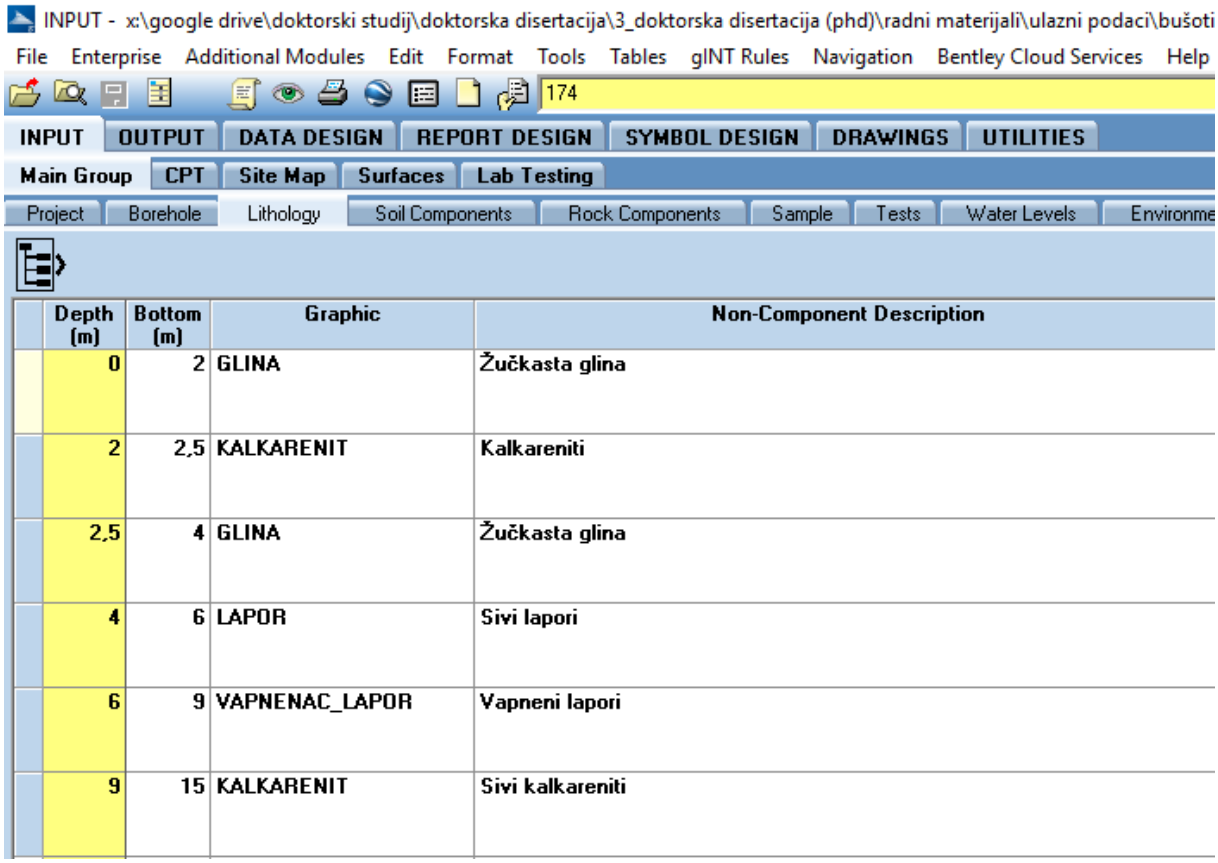


Borehole ID	Total Depth (m)	Date Started	Date Completed	Surface Elevation (m)	Hole Size	Contractor	Method	Logged By	Checked By	East (m)	North (m)
154	64			948,08	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448829,67	4917519,65
155	73			958,88	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448862,13	4917532,85
156	60			945,03	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448820,74	4917497,37
157	69			954,08	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448853,63	4917510,54
160	69			973,18	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448917,39	4917536,87
163	98			980,93	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448947,11	4917473,66
166	52			933,65	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448806,22	4917528,42
167	79			967,68	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448898,69	4917489,52
168	180			926,97	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448788,72	4917481,39
169	78			960,73	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448879,58	4917445,25
170	105			987,93	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448964,85	4917517,88
171	77			955,9	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448868,44	4917425,08
172	67			946,36	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448834,07	4917463,09
173	103			1002,49	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448993,11	4917454,26
174	66			951,4	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448860,77	4917399,4
175	84			957,03	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448927,11	4917427,34
176	97			997,19	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448973,81	4917407,89
177	81			961,4	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448885,61	4917389,11
178	78			963,7	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448895,41	4917426
179	69			950,5	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448851,9	4917376,63
180	54			950,63	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448833,88	4917331,34
181	76			949,86	101 - 66 mm	Rudnici Boksita Jajce d.d.	JEZ	Bošković Dragi	Perić Borislav	6448848,28	4917432,45

Slika 19 – Sučelje baze podataka gINT

Sljedeći je korak unos, za svaku bušotinu pojedinačno, oznaka i opisa litoloških jedinica s pripadajućim dubinama (Slika 20). Podaci o litološkim jedinicama istražnih bušotina preuzeti su iz dostupnih listova o istražnom bušenju za svaku bušotinu (Prilog 5). Korišteni su podaci o dubini početka litološke jedinice (*Depth*), dubini završetka litološke jedinice (*Bottom*),

grafička oznaka litološke jedinice (*Graphic*) te opis litološke jedinice (*Non-Component Description*). Grafičke oznake litoloških jedinica pridružene su iz ranije definirane liste oznaka gINT baze podataka (Tablica 3). Grafičko označavanje litoloških jedinica važno je kako bi se poslije jednostavno prepoznale te kako bi se njima unutar programa Power InRoads lakše moglo manipulirati.



Depth (m)	Bottom (m)	Graphic	Non-Component Description
0	2	GLINA	Žučkasta glina
2	2,5	KALKARENIT	Kalkareniti
2,5	4	GLINA	Žučkasta glina
4	6	LAPOR	Sivi lapori
6	9	VAPNENAC_LAPOR	Vapneni lapori
9	15	KALKARENIT	Sivi kalkareniti

Slika 20 – Detalj unosa litoloških jedinica u bazu podataka

Tablica 3 – gINT oznake litoloških jedinica

gINT oznaka litološke jedinice	Boja korištena u programu Power InRoads	Opis litološke jedinice iz litoloških stupova o istražnom bušenju
BOKSIT	BOKSIT	Boksit
BREČA	BREČA	Breče
BREČA_BOKSIT		Breča uprskana boksitom Vapnena breča sa zrncima boksita
BREČA_LAPOR		Breče s vapneno laporovitom vezom
VAPNENAC_BREČA		Vapnene breče
GLINA	GLINA	Glina
GLINA_LAPOR		Glinoviti laporoviti materijal
GLINA_PRIMJESE		Ilovača s komadima kalkarenita ili glinovito pjeskoviti materijal s komadima kalkarenita
LAPOR		Lapor
LAPOR_VAPNENAC		Laporoviti vapnenac
VAPNENAC_LAPOR		Vapneni lapor
HUMUS	HUMUS	Humus
HUMUS_KALKARENIT		Humus s komadima kalkarenita
HUMUS_ŠLJUNAK		Humus onečišćen šljunkom
KALKARENIT	KALKARENIT	Kalkareniti
KALKARENIT_BREČA		Kalkareniti i breče u izmjeni
KALKARENIT_VAPNENAC		Kalkarenitični vapnenci
KAVERNA	KAVERNA	Kaverna
SEDRA	SEDRA	Sedra
VAPNENAC	VAPNENAC	Vapnenac
BREČA_VAPNENAC		Brečoliki vapnenac

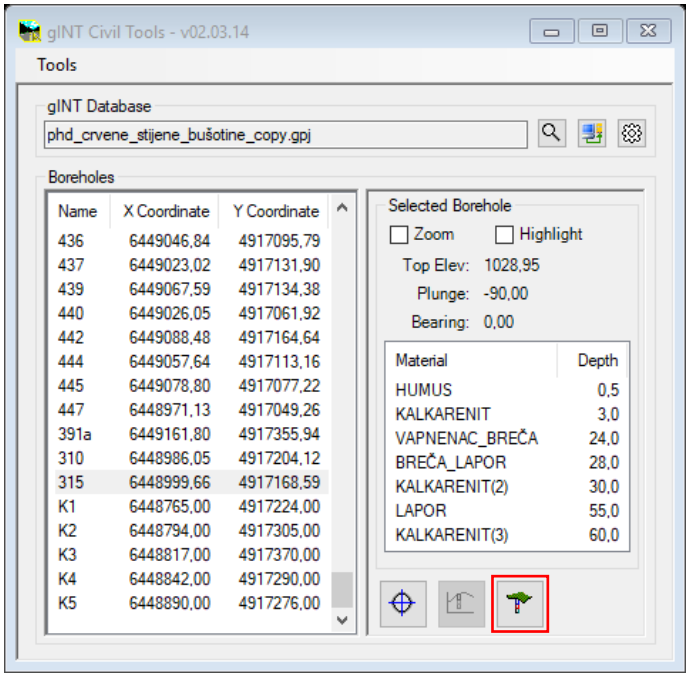
5.4. IZRADA TRODIMENZIONALNOG GEOLOŠKOG MODELA LEŽIŠTA

Da bi se rudarski radovi mogli optimizirati u trodimenzionalnom prostoru, potrebno je prvo napraviti trodimenzionalni geološki model ležišta a-gk Crvene stijene s ciljem dobivanja cjelovite prostorne slike ležišta. Važnost trodimenzionalnog modela ležišta nije samo u prostornom razumijevanju ležišnih uvjeta, već će se tijekom istraživanja na njemu prikazati nekoliko metoda eksploatacije. Prednost je trodimenzionalnog modela i u tome što će se sve vrijednosti dobivene dvodimenzionalnim računskim modelima (izračuni površina i volumena) moći provjeriti izračunom volumena stijene koja će biti iskopana ili ostavljena u

ležištu korištenjem Power Inroads alata za izračun volumena trodimenzionalnih elemenata (*Tools / Measure / Measure Volume*).

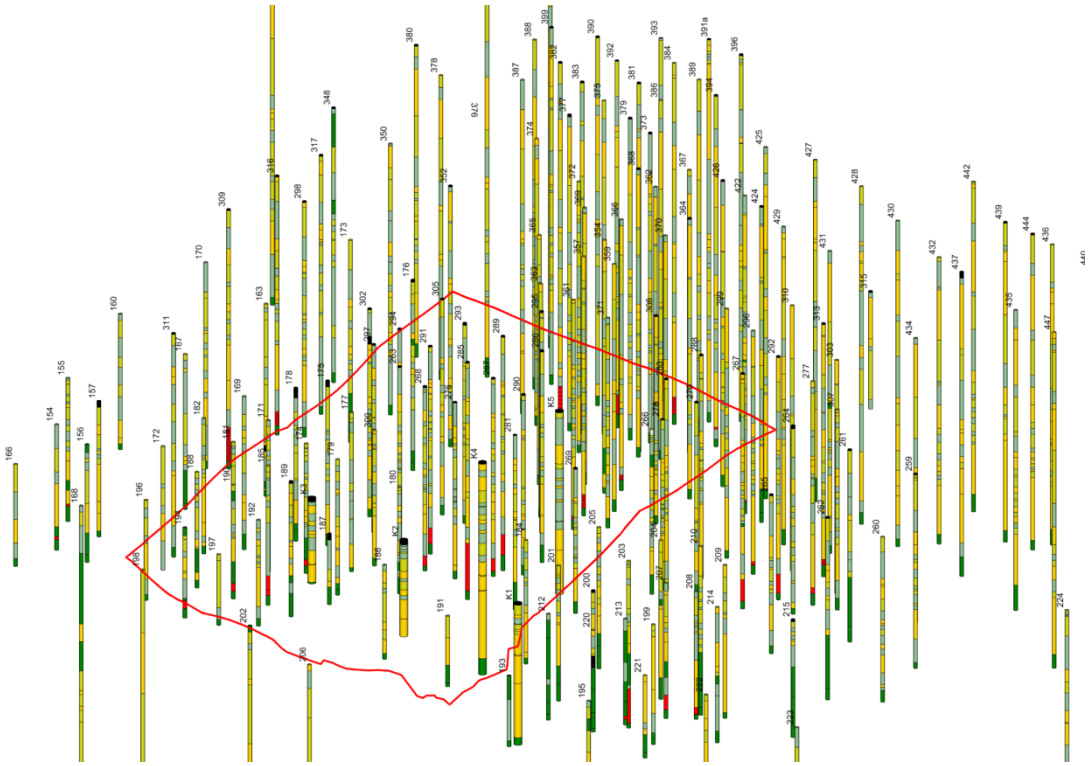
5.4.1. UNOS ISTRAŽNIH BUŠOTINA U TRODIMENZIONALNI MODEL

Prvi je korak u izradi trodimenzionalnog modela ležišta prikaz podataka o istražnom bušenju, iz baze podataka gINT, za sve unesene istražne bušotine. Za učitavanje istražnih bušotina iz baze podataka gINT u Power Inroadsu korišten je program gINT Civil Tools v02.03.14 (Bentley Systems Inc., 2016c) koji se učitava kao potprogram programa Power Inroads (Slika 21).



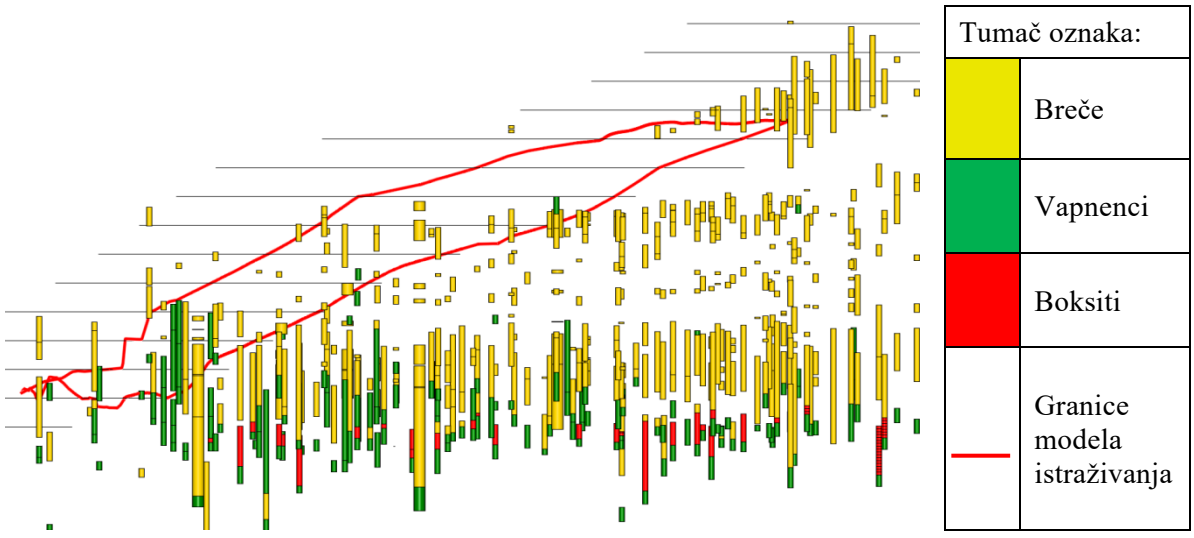
Slika 21 – Sučelje programa gINT Civil Tools

Unutar programa gINT Civil Tools odabrana je baza podataka istražnih bušotina Crvene stijene te su one učitane alatom Draw Boreholes in 3D (Slika 21 – alat označen crvenim kvadratićem) u trodimenzionalni model programa Power Inroads s time da su za svaku istražnu bušotinu prikazani svi litološki članovi. S obzirom na to da je svakoj litološkoj jedinici tijekom unosa u bazu podataka dodijeljena oznaka litološke jedinice (Tablica 3), litološke jedinice prikazane su sukladno bojama za svaku oznaku (Slika 22).



Slika 22 – Istražne bušotine s granicama modela istraživanja

Nakon prikaza istražnih bušotina (litoloških jedinica) dobila se prva naznaka modela istraživanja prikazivanjem litoloških članova breča, vapnenaca i boksita (Slika 23). Spajanjem istih litoloških jedinica iz istražnih bušotina dobit će se produktivni slojevi ležišta a-gk Crvene stijene.



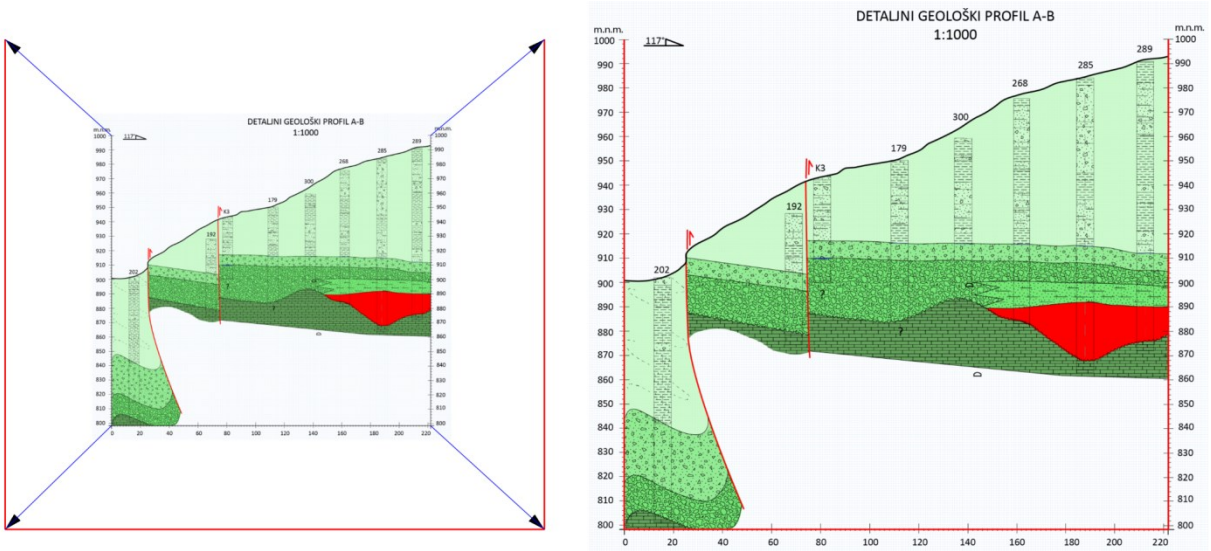
Slika 23 – Izdvojeni litološki članovi istražnih bušotina

5.4.2. UNOS GEOLOŠKIH PROFILA I OBRAČUNSKIH PRESJEKA U TRODIMENZIONALNO OKRUŽENJE

Tijekom izrade Elaborata o rezervama arhitektonsko-građevnog kamena u istražnom prostoru Crvene stijene napravljena je detaljna geološka analiza promatranog ležišta u sklopu koje je napravljena detaljna geološka karta u mjerilu 1 : 1000 (Prilog 2). U sklopu Elaborata napravljena su tri poprečna geološka profila A-B, C-D i E-F (Prilog 3) i tri uzdužna geološka profila G-H, I-J i K-L (Prilog 4).

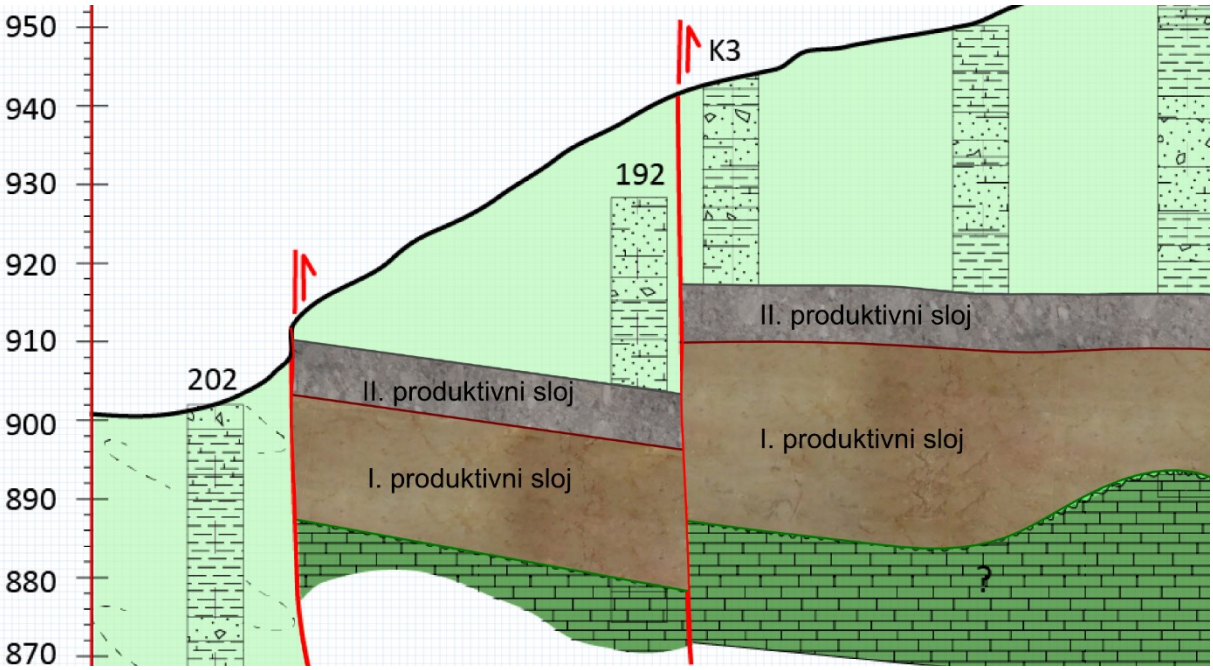
Kako bi se geološki profili mogli koristiti prilikom modeliranja geološkog modela ležišta, prvo je bilo potrebno sve profile učitati u novu datoteku unutar programa Power Inroads te rastere profila prikazati u dvodimenzionalnom polju kako bi se mogli pripremiti za postavljanje u trodimenzionalno okruženje. Priprema se sastojala od iscrtavanja elemenata istih dimenzija kao što su i osi geoloških profila kako bi se rasteri mogli prikazati u stvarnoj veličini i odnosu tj. u mjerilu 1 : 1 (Slika 24). Sljedeći je korak iscrtavanje ploha produktivnih slojeva te pridodavanja tekstura napravljenim plohama (Slika 25).

Napomena: termin geološki profil je dijagram ili crtež koji prikazuje položaj formacija i strukturu u presjeku nekom ravninom, osobito vertikalni presjek izveden pod pravim kutom na dulju os geološke strukture, na primjer presjek okomit na pružanje sloja (Perić, 2007), a termin presjek obično se koristi za prikaz znakovitih projektnih parametara (kosina, stupova, etaža i sličnih rudarskih radova) te pri proračunu volumena mineralne sirovine ili jalovine.



Izvor: (Dragičević et al., 2015)

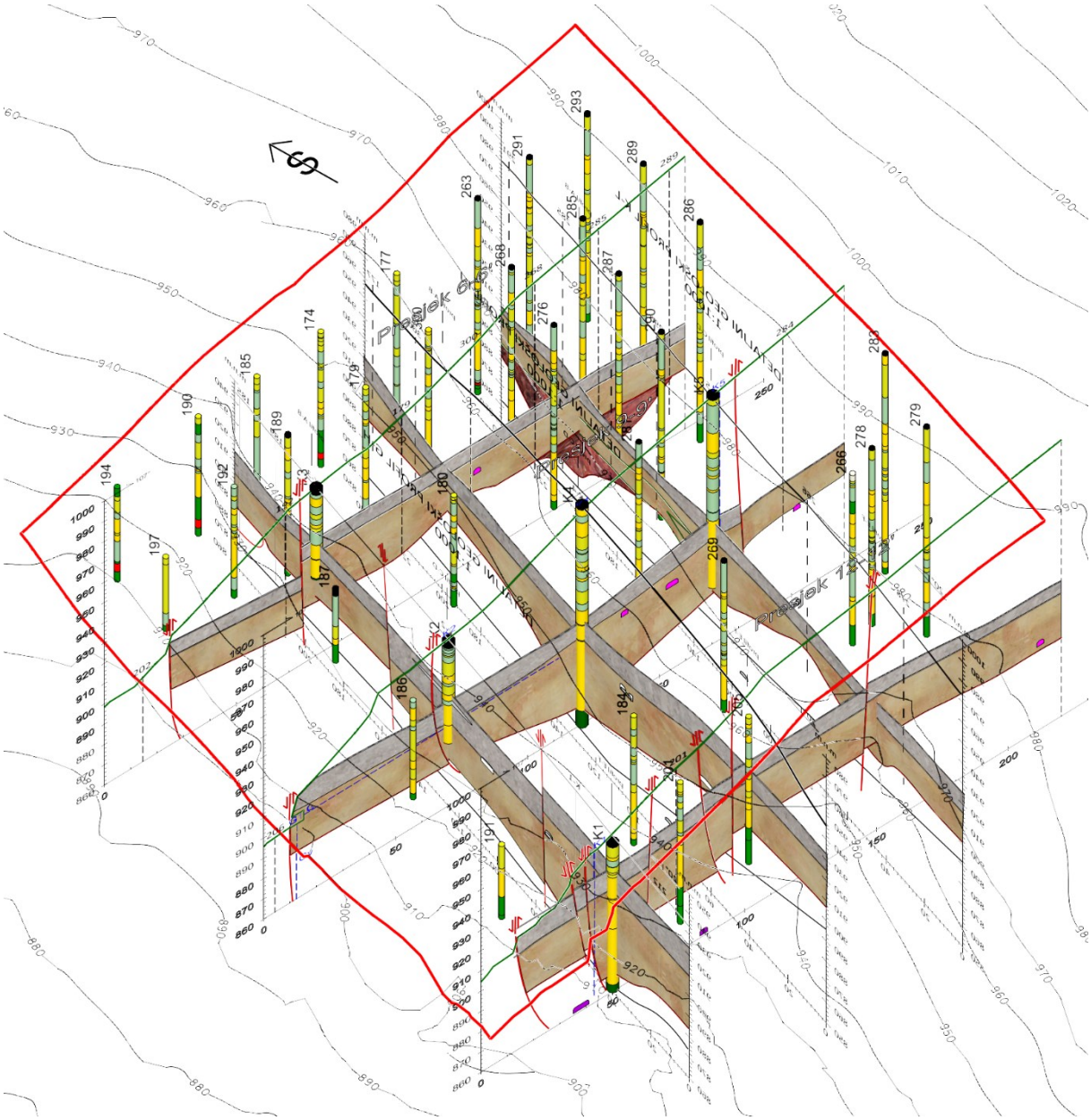
Slika 24 – Priprema detaljnog geološkog profila A-B



Izvor: modificirano prema (Dragičević et al., 2015)

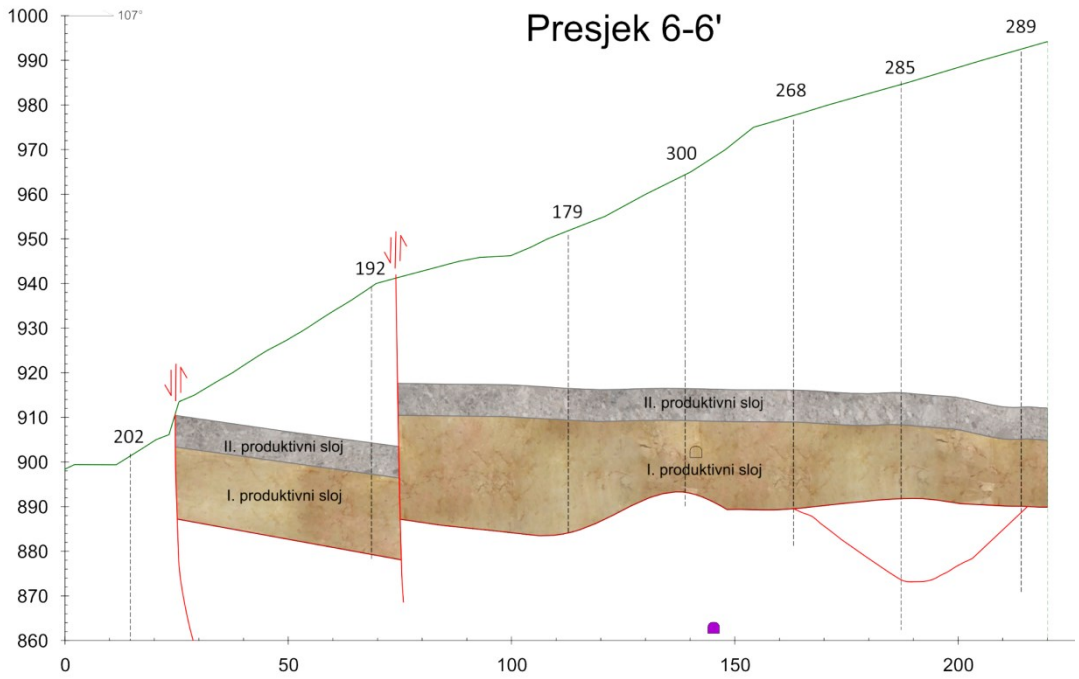
Slika 25 – Detalj pripreme geološkog profila A-B s iscrtanim plohama produktivnih slojeva

Pripremljeni detaljni geološki profili geokodirani su, unutar nove datoteke u trodimenzionalnom modelu, na pozicije linija geoloških profila (Prilog 2). Svaki detaljni geološki profil pozicioniran je na liniju geološkog profila sukladno oznakama profila i linije (detaljni geološki profil A-B pozicioniran je na liniju A-B itd.) Nakon georeferenciranja profili su postavljeni na odgovarajuću nadmorsku visinu (Slika 26).

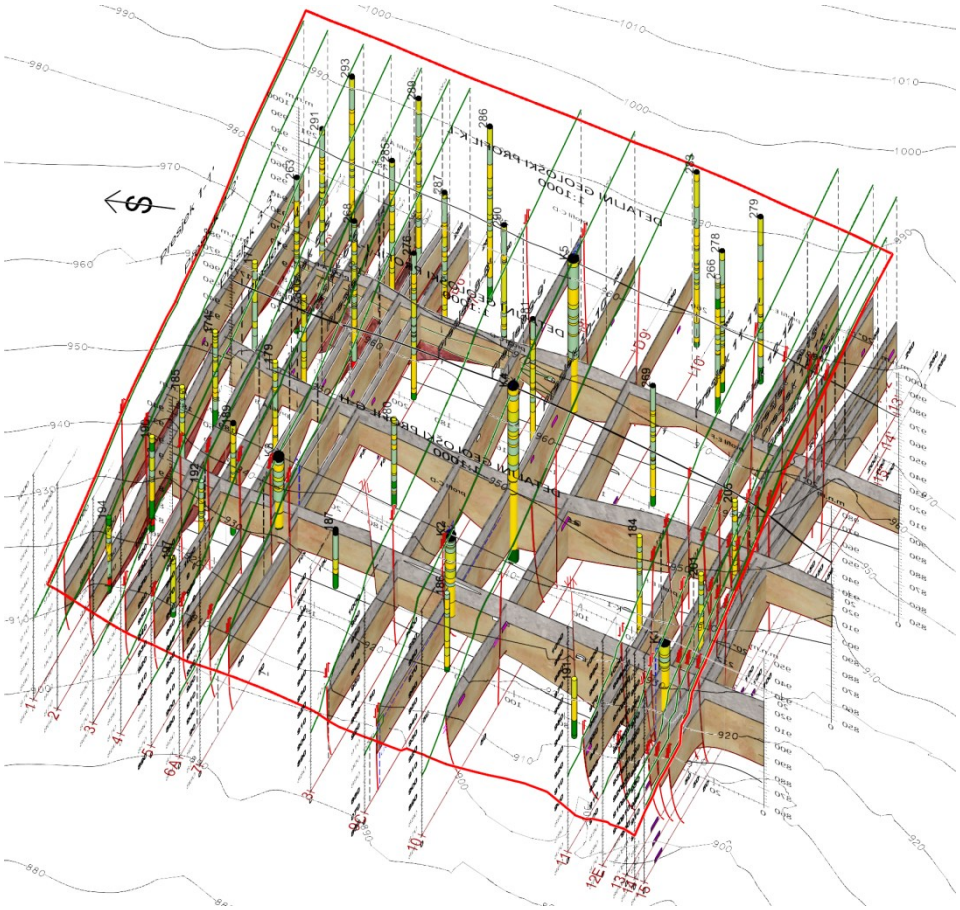


Slika 26 – Prostorni odnos pripremljenih detaljnih geoloških profila i istražnih bušotina unutar modela istraživanja

Sljedeći je korak postavljanje obračunskih presjeka (Prilog 6) u trodimenzionalno okruženje. Metodologija postavljanja obračunskih presjeka ista je kao i za postavljanje detaljnih geoloških profila u trodimenzionalno okruženje. Slika 27 prikazuje pripremljeni obračunski presjek 6 – 6' prije pozicioniranja u trodimenzionalno okruženje.



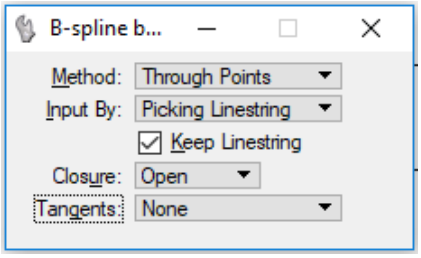
Slika 27 – Pripremljeni obračunski presjek 6 – 6' s iscrtanim plohama produktivnih slojeva



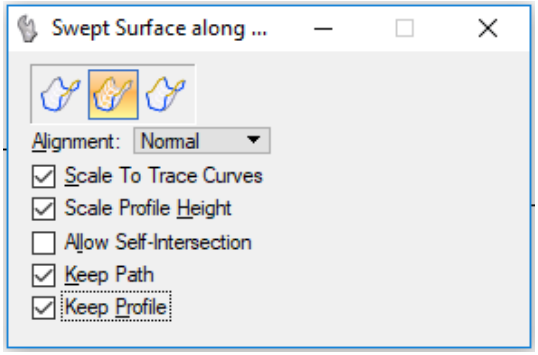
Slika 28 – Prostorni odnos detaljnih geoloških profila i obračunskih presjeka unutar modela istraživanja

5.4.3. MODELIRANJE PLOHA RASJEDA

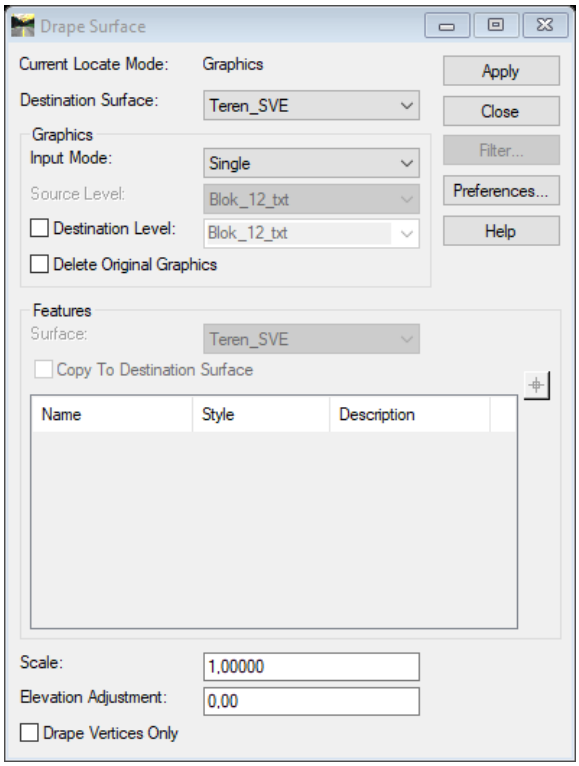
Sljedeći je korak u izradi trodimenzionalnog geološkog modela ležišta modeliranje ploha rasjeda. Za modeliranje ploha rasjeda korištena je detaljna geološka karta (Prilog 2) promatranog područja koja je prvo geokodirana u novoj datoteci u trodimenzionalnom radnom okruženju programa Power InRoads (Bentley Systems Inc., 2016a). Nakon geokodiranja iscrtane su crte rasjeda alatom za krivulje *Tools / Curves / Create Curves / B-spline by Points* (Slika 29) kako bi plohe rasjeda imale što manje prijelomnih dijelova koji mogu prouzročiti nepravilnosti prilikom njihovog kreiranja. Rasjedi sežu sve do površina terena (Prilog 3, Prilog 4 i Prilog 6). Tako su prvo položeni na površinu terena korištenjem alata *Surface / Design Surface / Drape Surface* (Slika 31). Pri modeliranju ploha rasjeda korišteni su i podaci o rasjedima iz detaljnih geoloških profila (Prilog 3 i Prilog 4) i obračunskih presjeka (Prilog 6). Slika 32 prikazuje izdvojene elemente korištene pri modeliranju ploha rasjeda. Plohe rasjeda modelirane su korištenjem alata za izradu površina *Tools / Surfaces / Create Freeform Surfaces / Swept Surface along Curves* (Slika 30). Slika 33 prikazuje modelirane plohe rasjeda na modelu istraživanja.



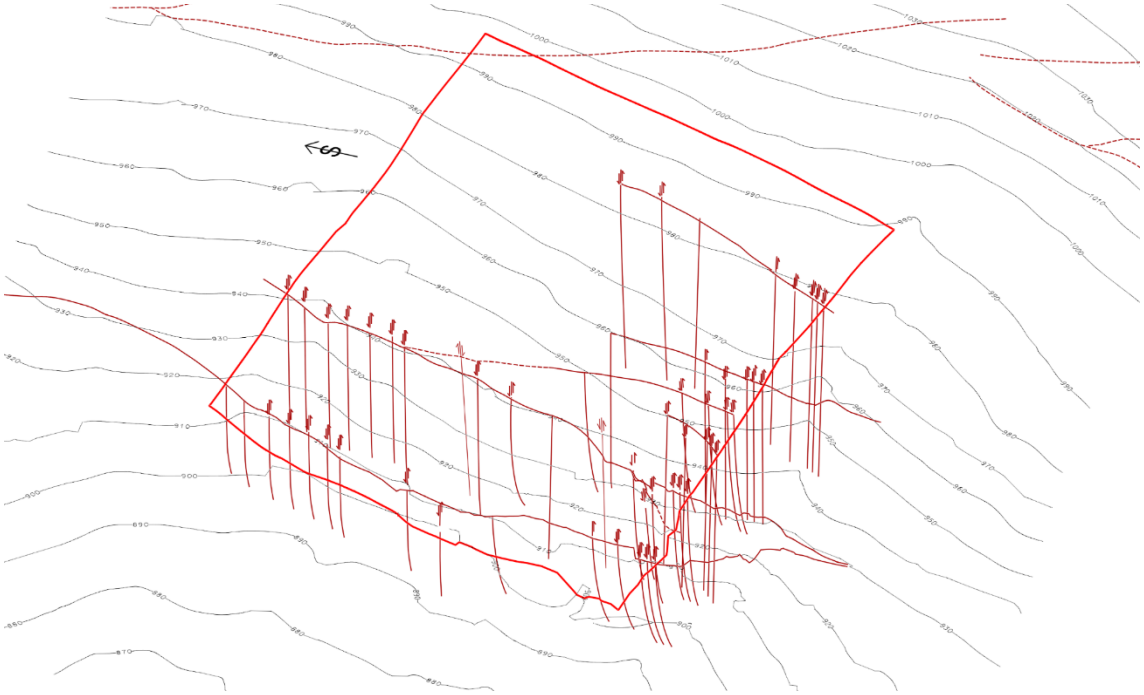
Slika 29 – Alat B-spline by Points



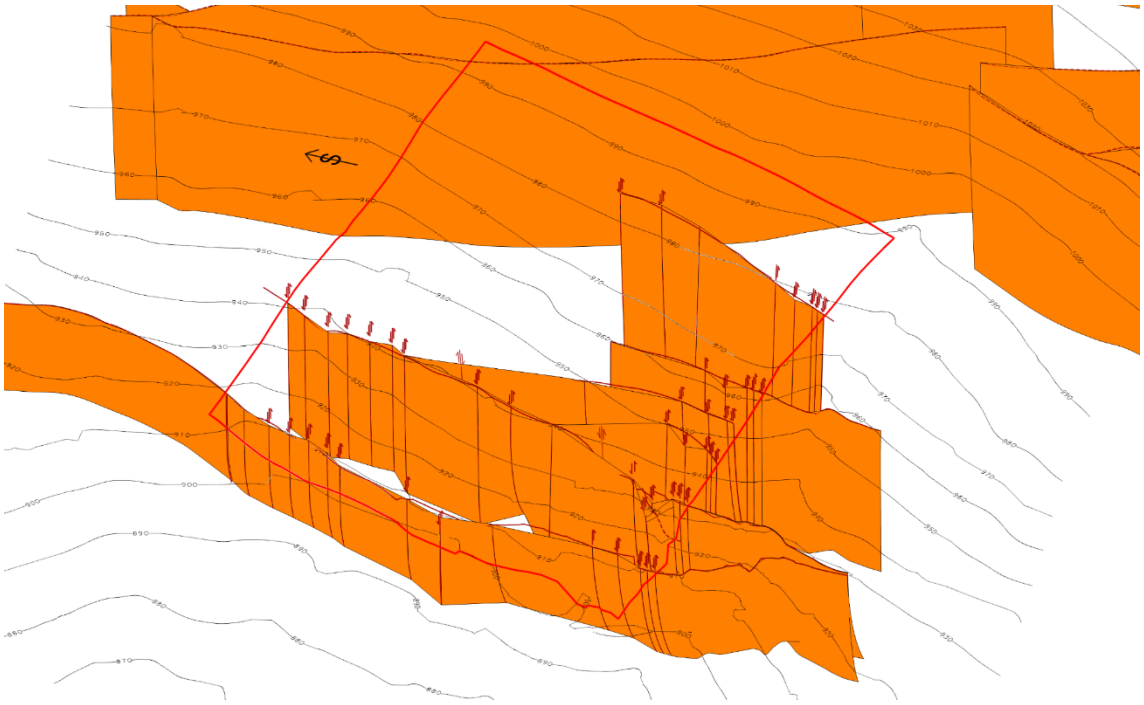
Slika 30 – Alat Swept Surface along Curves



Slika 31 – Alat Drape Surface



Slika 32 – Elementi korišteni prilikom modeliranja ploha rasjeda



Slika 33 – Modelirane plohe rasjeda modela istraživanja

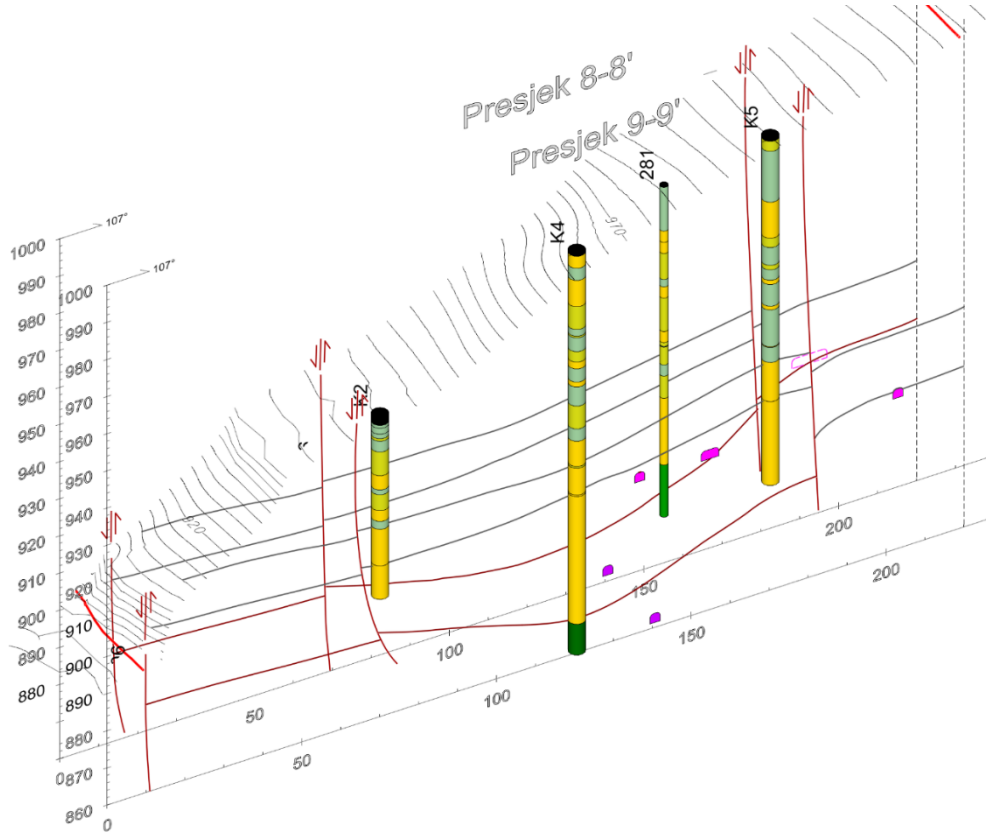
5.4.4. MODELIRANJE PRODUKTIVNIH SLOJEVA LEŽIŠTA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA CRVENE STIJENE

Za modeliranje produktivnih slojeva ležišta a-gk Crvene stijene korišteni su sljedeći elementi:

- površina terena (Slika 18) do koje će produktivni slojevi doći u obliku izdanaka
- istražne bušotine (Slika 22, Slika 23 i Prilog 5) u kojima su prostorno definirane litološke jedinice izdvojene kao a-gk
- geološki profili (Prilog 3 i Prilog 4) dobiveni na temelju geološke analize lokacije
- obračunski presjeci (Prilog 6) korišteni pri izračunu rezervi u sklopu Elaborata o rezervama arhitektonsko-građevnog kamena u istražnom prostoru Crvene stijene
- rasjedi promatranog područja (Prilog 2 i Slika 33) koji produktivne slojeve presijecaju u nepravilnim razmacima te tako određuju diskontinuitete u modelu.

Postupak izrade produktivnih slojeva ležišta a-gk započet je određivanjem elemenata krovine i podine svakog od produktivnih slojeva:

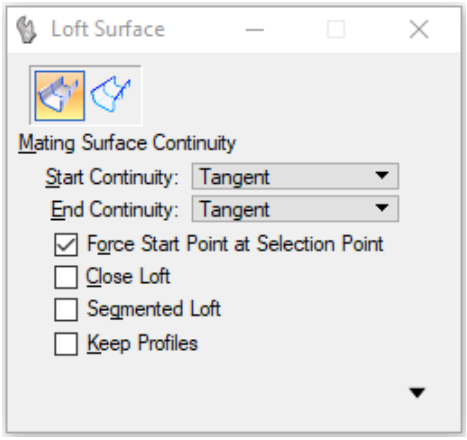
- izdvojene su krivulje svakog od produktivnih slojeva na svim geološkim profilima i obračunskim presjecima te su samo iste prikazane u trodimenzionalnom okruženju,
- određene su nadmorske visine litoloških jedinica u istražnim bušotinama koje se odnose na produktivne slojeve,
- određena je krivulja na svim rasjedima do koje će produktivni sloj biti modeliran, tj. krivulja koja će predstavljati diskontinuitet u produktivnim slojevima a-gk (Slika 34).



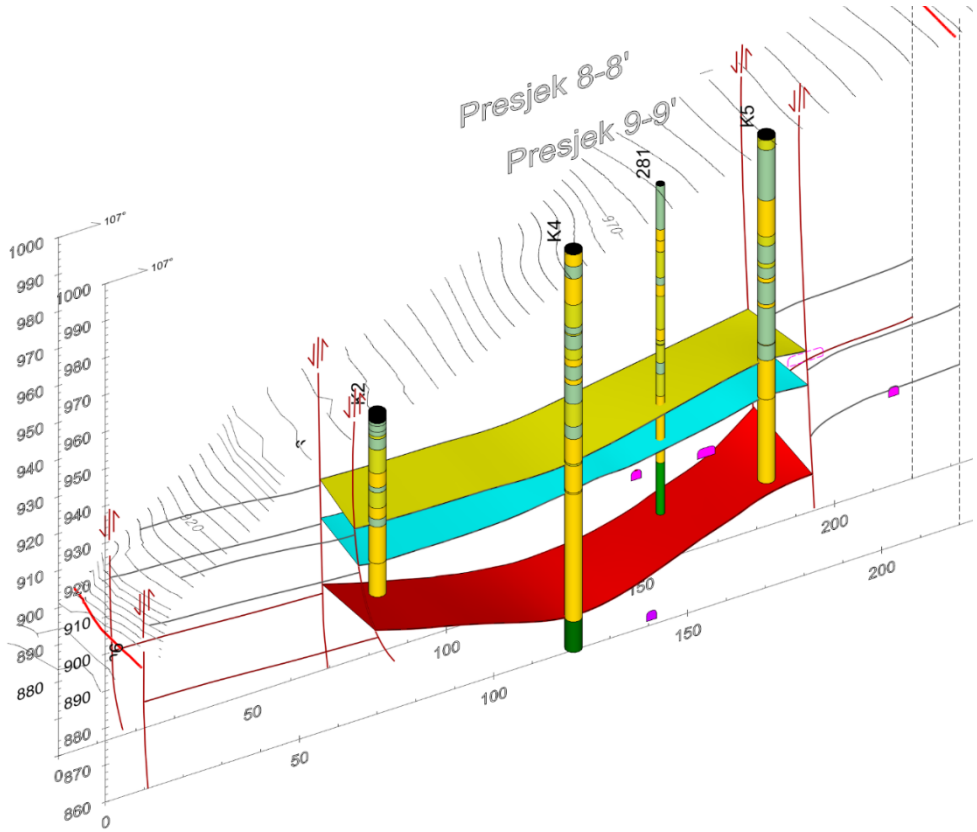
Slika 34 – Izdvojeni elementi korišteni pri modeliranju produktivnih slojeva

Nakon određivanja odnosno izdvajanja osnovnih elemenata produktivnih slojeva koji će biti korišteni za modeliranje svakog od dijela produktivnog sloja izrađene su plohe između susjednih elemenata korištenjem alata *Tools / Surfaces / Create Freeform Surfaces / Loft Surface* programa Power Inroads kako bi se dobile pravilne plohe koje predstavljaju krovinu i podinu slojeva (Slika 35). Prilikom modeliranja korištene su vrijednosti nadmorskih visina litoloških članova za svaki produktivni sloj kako bi površine produktivnih slojeva odgovarale

postojećem stanju. Krivulje položaja rasjeda korištene su kako bi se odvojile plohe produktivnih slojeva.



Slika 35 – Alat Loft Surface

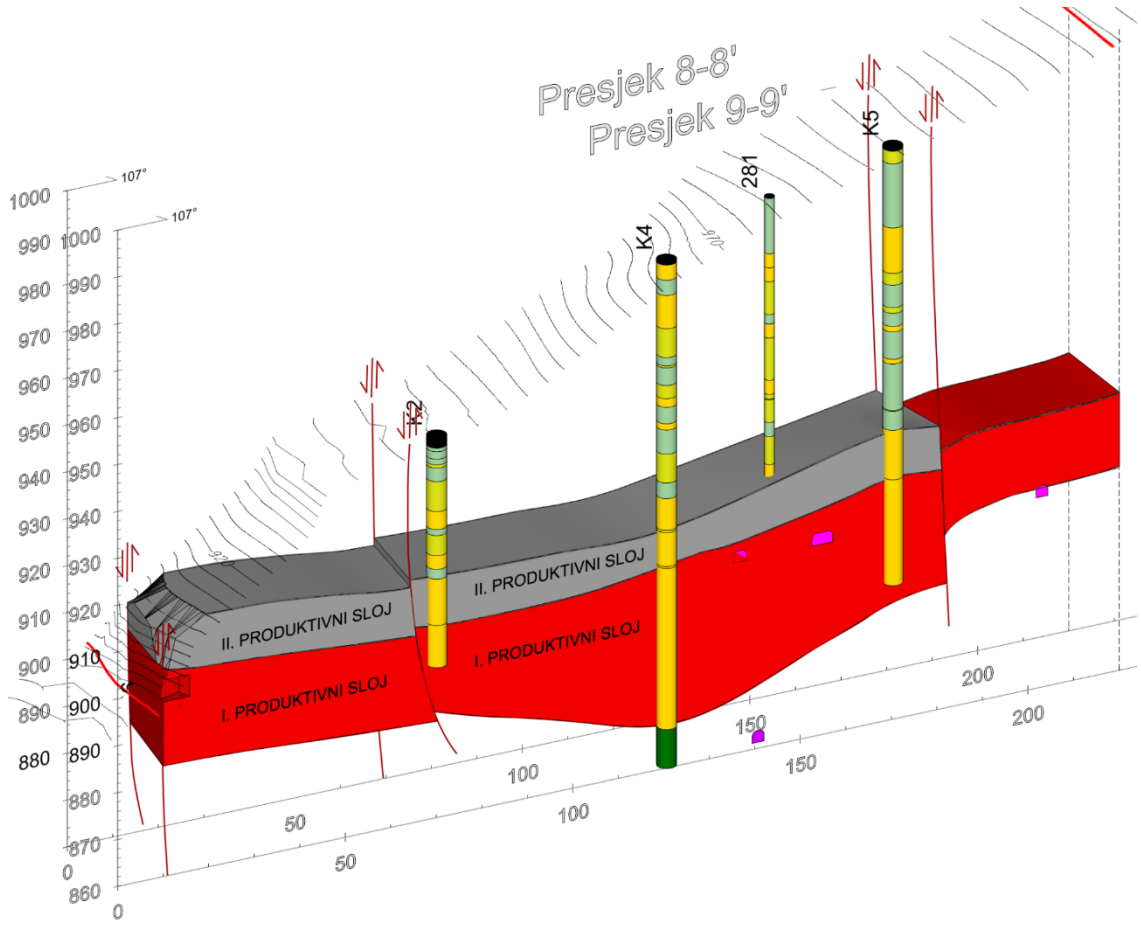


Tumač oznaka:

	Krovina II. produktivnog sloja		Podina II. i krovina I. produktivnog sloja		Podina I. produktivnog sloja

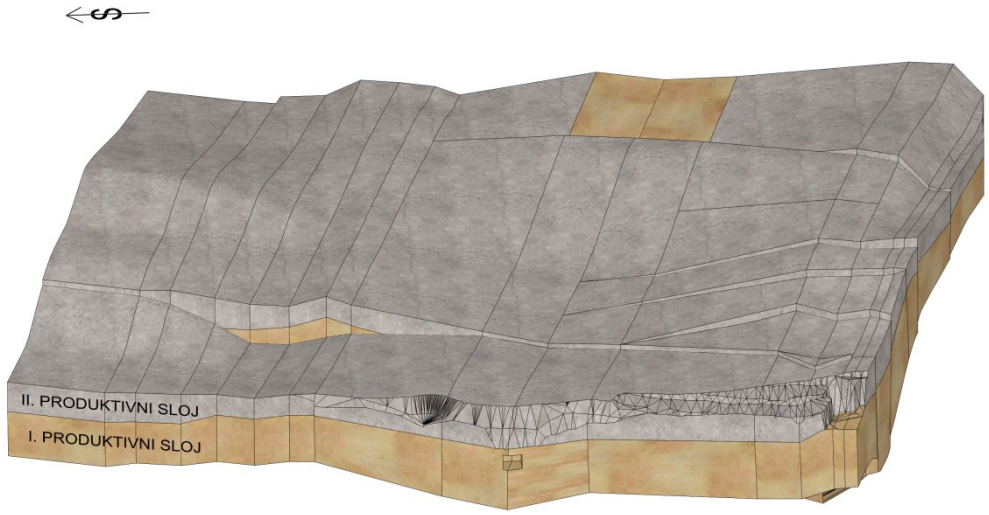
Slika 36 – Modelirane plohe krovine i podine dijela produktivnih slojeva

Modelirane plohe krovine i podine produktivnih slojeva potrebno je dodatno spojiti kako bi se dobio volumno ispunjeni trodimenzionalni element (engl. s*olids*). S obzirom na to da je potrebno dobiti ukupno šest ploha koje zatvaraju volumen produktivnog sloja, modelirane su i dodatne okomite plohe. Svih šest ploha krovine i podine spajane su naredbom *Tools / Surfaces / Modify Surfaces / Stitch Surface* u jedan cjeloviti *solid* element (Slika 37).

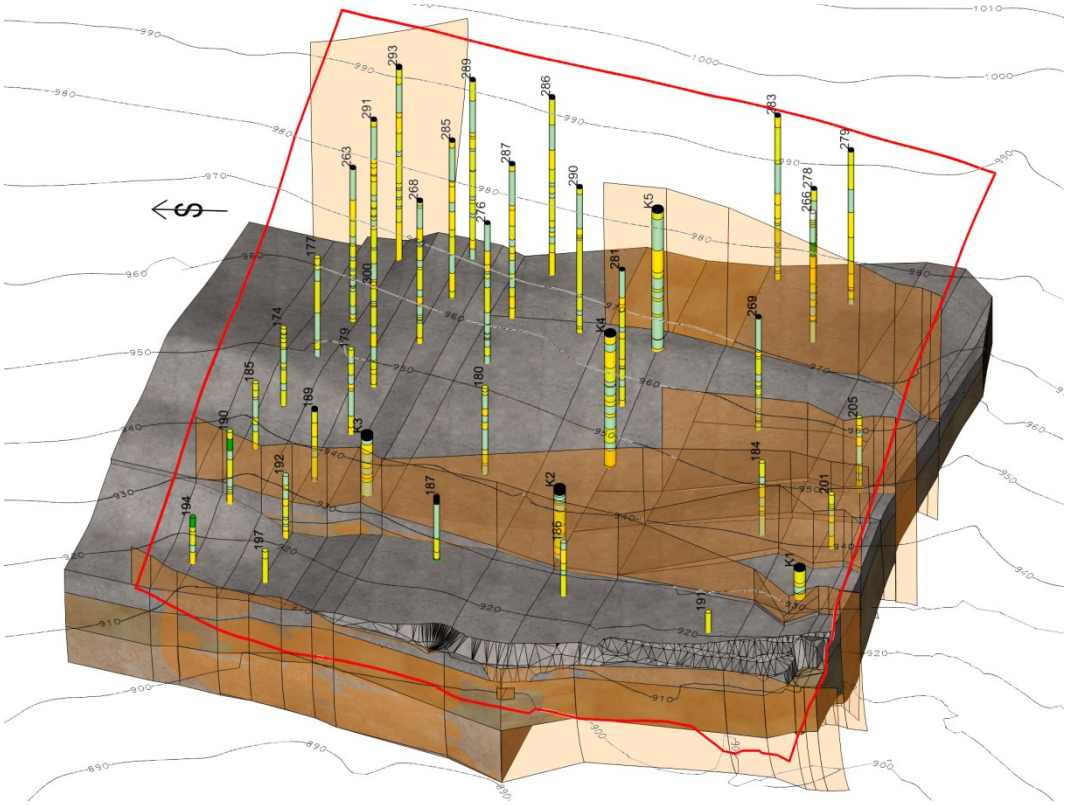


Slika 37 – Modelirani produktivni slojevi između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'

Istom metodologijom modelirani su svi ostali dijelovi produktivnih slojeva. Nakon što su svi dijelovi produktivnih slojeva modelirani te su dobiveni *solid* elementi, na sve elemente produktivnih slojeva pridružena je tekstura (za svaki posebno) za što realniji prikaz stvarnog stanja produktivnih slojeva u ležišnim uvjetima (Slika 38 i Slika 39).



Slika 38 – Modelirani produktivni slojevi ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene



Slika 39 – Modelirani produktivni slojevi arhitektonsko-građevnog amena s prikazom bušotina i rasjeda

5.4.5. MODELIRANJE KROVINE, PODINE I PRATEĆE STIJENE

Metodologija koja je korištena za modeliranje produktivnih slojeva korištena je i za modeliranje krovine, podine i pratećih stijena (vidi poglavlje: 5.4.4. Modeliranje produktivnih slojeva ležišta arhitektonsko-građevnog kamena crvene stijene).

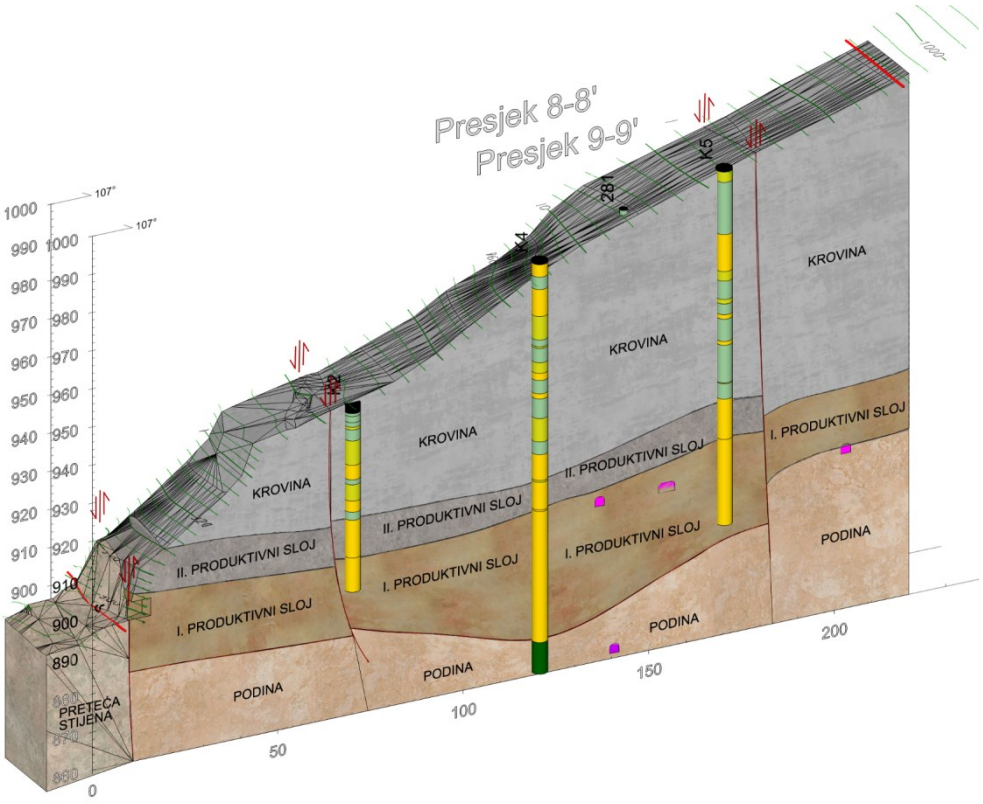
Prilikom modeliranja krovine korišteni su podaci krovine I. produktivnog sloja te površine terena kako bi se dobili *solid* elementi koji predstavljaju krovinske naslage. S obzirom na složenu geološku građu krovinskih naslaga nisu modelirani pojedinačni slojevi kalkarenita, lapora i breča (Slika 8) jer se smatraju jalovinskim materijalom. Treći uvjetno produktivni sloj (breče) nije detaljno definiran tijekom geološke analize ležišta (Dragičević et al., 2015) te se pretpostavlja da je dio krovinskih naslaga.

Za modeliranje podinskih naslaga korišteni su podaci o podini II. produktivnog sloja te su kopirani od 10 do 20 metara niže od podataka podine II. produktivnog sloja.

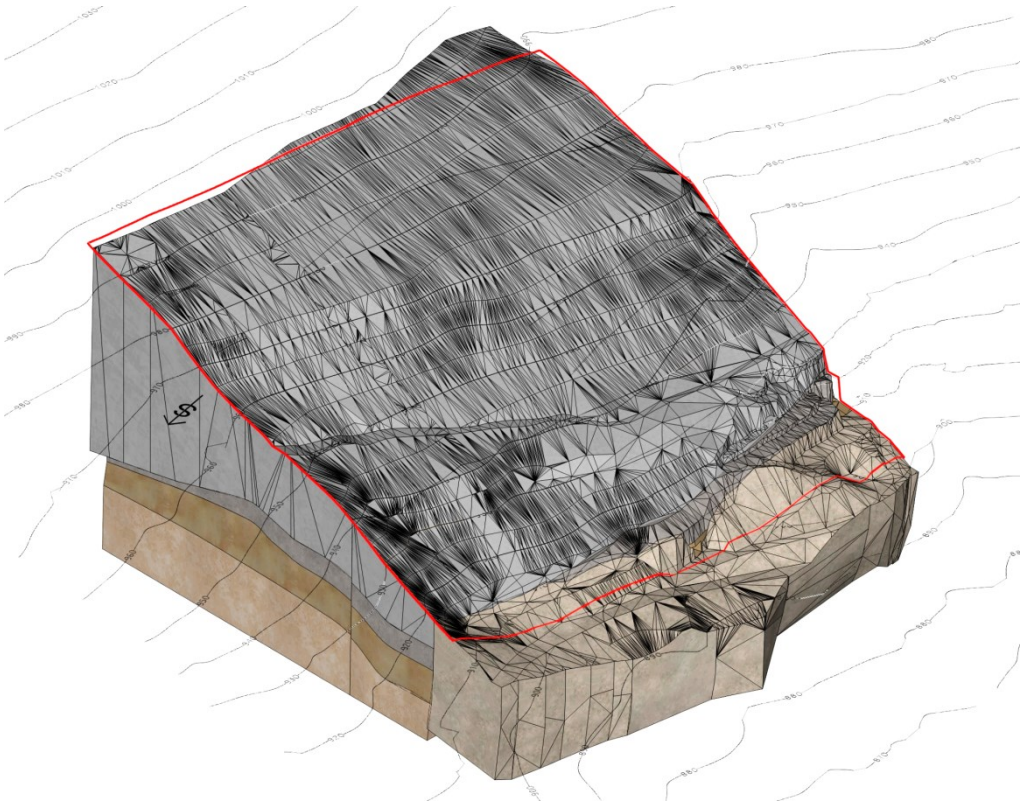
Za modeliranje prateće stijene korišteni su podaci površine terena te krivulje ploha rasjeda naznačenih na detaljnim geoloških profilima (Prilog 3 i Prilog 4) i obračunskim presjecima (Prilog 6).

Slika 40 prikazuje modelirane produktivne slojeve a-gk (I. i II. produktivni sloj), krovinske i podinske naslage te prateću stijenu u trodimenzionalnom okruženju između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'.

Ostali dijelovi ležišta, između ostalih presjeka, modelirani su sukladno metodi modeliranja dijelova ležišta između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'. Slika 41 prikazuje trodimenzionalni model ležišta Crvene stijene s prikazom produktivnih slojeva, krovine, podine i prateće stijene te granicama modela istraživanja.



Slika 40 – Modelirani dijelovi ležišta između presjeka 8 – 8' i 9 – 9'



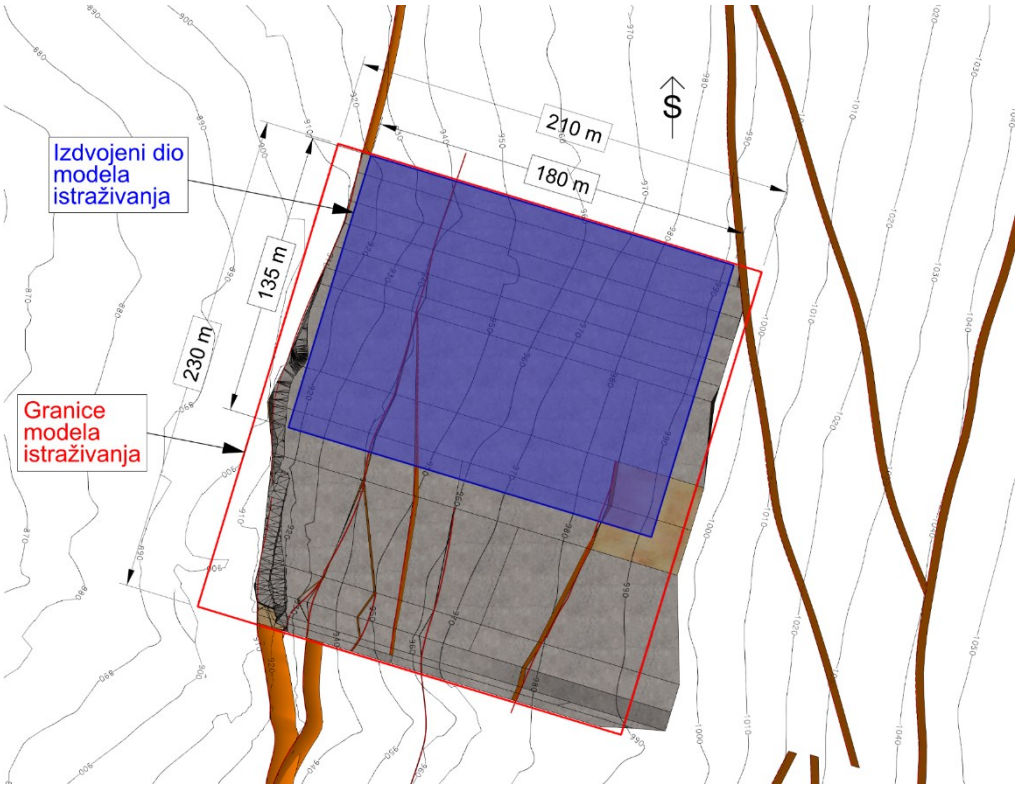
Slika 41 – Trodimenzionalni model ležišta Crvene stijene s granicama modela istraživanja

5.5. ANALIZA MODELA LEŽIŠTA I DEFINIRANJE DIJELA NAJPOGODNIJEG ZA OPTIMIZACIJU EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Analiza modela ležišta bit će napravljena temeljem izrađenog trodimenzionalnog modela ležišta i modeliranih ploha rasjeda. Postavljeni su uvjeti koje mora zadovoljiti dio ležišta za primjenu metode optimizacije, stoga odabrani dio ležišta mora biti:

- što manje poremećen, mora biti sa što manje tektonskih elemenata (rasjedi, pukotine…), odnosno dio u kojem se može očekivati najveće iskorištenje ležišta, tj. dobivanje blokova a-gk najvećih kategorija,
- sa što pravilnijim produktivnim slojevima odnosno da su produktivni slojevi sa što ujednačenijom debljinom i da su što više horizontalni kako bi se prilikom eksploatacije otkopavali dijelovi ležišta s minimalnim udjelom jalovog materijala.

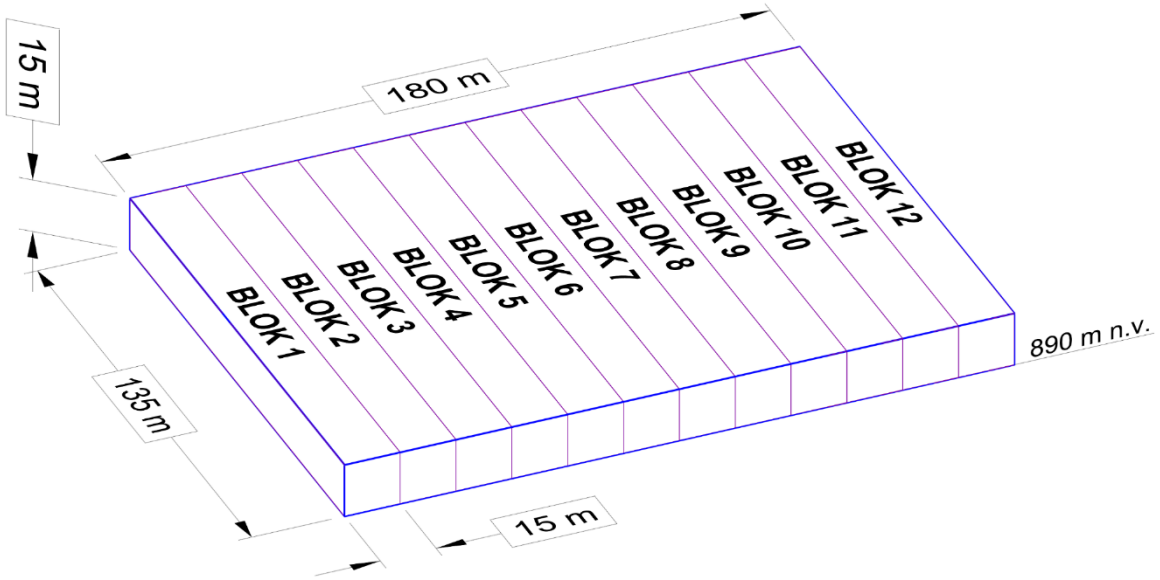
Sukladno postavljenim uvjetima primjene metode optimizacije određen je dio ležišta, unutar granica modela istraživanja, na kojem će biti provedeno istraživanje, odnosno bit će primijenjena metoda optimizacije. Izdvojeni dio modela istraživanja dimenzija je 180 x 135 metara površine 24 300 m^2 te se nalazi unutar granica modela istraživanja (Slika 42). S obzirom na cijelo promatrano područje modela istraživanja, izdvojeni dio ima najmanje rasjeda odnosno može se uočiti jedan dominantan rasjed u smjeru sjever-sjeveroistok – jug-jugozapad te dva manja rasjeda. Dodatno, slojevi u izdvojenom dijelu modela istraživanja položeni su relativno blago (Slika 41 i Prilog 2).



Slika 42 – Izdvojeni dio modela istraživanja za primjenu metode optimizacije

5.6. DEFINIRANJE BLOKOVA U MODELU OPTIMIZACIJE EKSPLOATACIJE

Metoda optimizacije eksploatacije provodit će se unutar granica izdvojenog dijela modela istraživanja. Metoda optimizacije provodit će se segmentno, odnosno definirani su dijelovi ležišta – blokovi unutar izdvojenih granica koji će se eksploatirati površinskim i podzemnim načinom eksploatacije. Dimenzije izdvojenog dijela modela su 135 m širina i 180 m duljina te je tako izdvojeni dio podijeljen na blokove širine 15 metara. Podjelom na blokove širine 15 metara dobilo se ukupno 12 blokova (dijelova ležišta) koji će biti eksploatirani površinskim i podzemnim načinom eksploatacije (Slika 43). Nakon određivanja širine i duljine blokova određena je i visina blokova te ona iznosi 15 metara. Time je određen dio ležišta koji će se eksploatirati površinskim i podzemnim načinom eksploatacije odnosno model optimizacije eksploatacije na kojem će biti primijenjena metoda optimizacije eksploatacije.



Slika 43 – Blokovi modela optimizacije eksploatacije

Analizom trodimenzionalnog modela ležišta (Slika 41) određeno je da će osnovna razina za površinsku i podzemnu eksploataciju biti 890 m n.v. te je to ujedno i razina na kojoj se nalazi model optimizacije ležišta. Početak bloka 1 ujedno se smatra početnom granicom modela optimizacije te sve radnje koje su potrebne kako bi se započelo s površinskom ili podzemnom eksploatacijom od bloka 1 smatraju se pripremom te se neće valorizirati tijekom analize modela eksploatacije.

5.7. ODREĐIVANJE PROJEKTNIH PARAMETARA POVRŠINSKOG I PODZEMNOG KOPA

5.7.1. ODREĐIVANJE PROJEKTNIH PARAMETARA POVRŠINSKOG KOPA

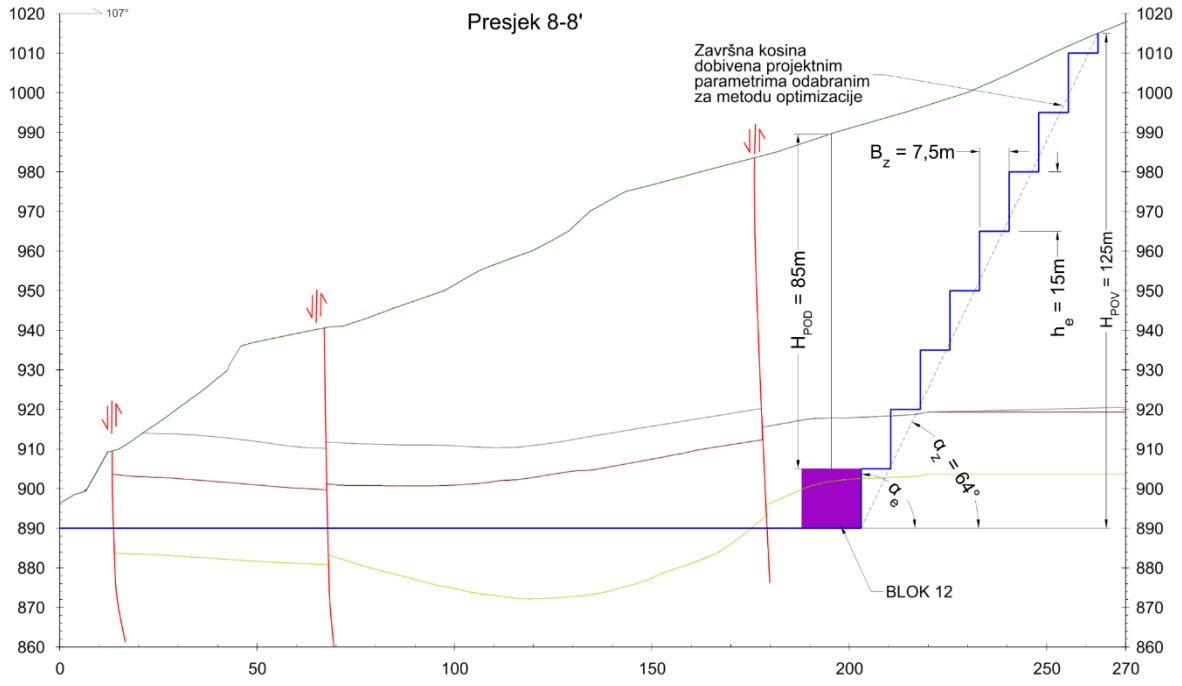
U sklopu Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene određeni su projektni parametri površinskog kopa te je kut nagiba završne kosine kopa (α_z) utvrđen u iznosu od ≤ 65° (Bojčetić et al., 2016). On se usvaja kao maksimalna vrijednost kuta nagiba završne kosine kopa kod svih modela kopova površinske eksploatacije.

5.7.1.1. Projektni parametri površinskog kopa

U sklopu ovog doktorata usvojeni su projektni parametri koji će se koristiti pri projektiranju modela površinske eksploatacije (Tablica 4) te predstavljaju osnovu za primjenu metode optimizacije.

Tablica 4 – Projektni parametri površinske eksploatacije za primjenu metode optimizacije

Parametar	Iznos	Jedinica
Visina etaže u otkrivci, I. i II. produktivnom sloju (h_e)	15	m
Širina završne etaže u otkrivci i produktivnim slojevima (B_z)	7,5	m
Kut nagiba etažne kosine u otkrivci i produktivnim slojevima (α_e)	90	°



Slika 44 – Prikaz projektnih parametara površinskog kopa na presjeku 8 – 8'

Grafičkom analizom projektnih parametara na presjeku 8 – 8' (Slika 44) utvrđeno je sljedeće:

- visina kopa iznosi $H_{POV} = 125\ m$
- kut nagiba završne kosine $\alpha_z = 64^{\circ}$.

5.7.1.2. Provjera projektnih parametara površinskog kopa

Iz Glavnog rudarskog projekta (Bojčetić et al., 2016) preuzeti su parametri stijenskog masiva (Tablica 5) za izračun koeficijenta sigurnosti (K_s) odnosno provjere projektnih parametara površinskog kopa (Tablica 6).

Tablica 5 – Parametri stijenskog masiva

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Za produktivne slojeve			
Kut unutarnjeg trenja	φ	45	°
Kohezija	c	500 000	Pa
Za krovinske naslage			
Kut unutarnjeg trenja	φ	40	°
Kohezija	c	400 000	Pa

Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Ulazni podaci za provjeru koeficijenta sigurnosti površinskog kopa za blok 12:

- visina kopa (H_{POV}) i kut nagiba završne kosine kopa (α_z) dobiveni su grafičkom analizom projektnih parametara površinskog kopa (Slika 44)
- prostorna masa $\left(\rho = 2\,680\ {}^{kg}/_{m^3}\right)$ preuzeta je iz Izvještaja o određivanju kvalitete arhitektonsko-građevnog kamena (Mašić, 2015a, 2015b)
- za kut unutarnjeg trenja $\left(\varphi = \frac{45+40}{2} = 42{,}5\right)$ uzeta je srednja vrijednost usvojenih vrijednosti (Tablica 5)
- za koheziju $\left(c = \frac{400\,000+500\,000}{2} = 450\,000\ Pa\right)$ uzeta je srednja vrijednost usvojenih vrijednosti (Tablica 5).

Izračun koeficijenta sigurnosti napravljen je u računalnom programu Microsoft Excel korištenjem izračuna faktora sigurnosti iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016) s novim ulaznim podacima te su rezultati proračuna prikazani tablično (Tablica 6).

Tablica 6 – Izračun koeficijenta sigurnosti

Karakteristike	**Jedinica**	**Završna kosina površinskog kopa**
Visina kopa H_{POV}	m	125
Jedinični tlak stijene (srednji) σ_s $\sigma_s = \rho \cdot g \cdot h$	Pa	26 291
Kut unutarnjeg trenja φ	°	42,5
Kohezija c	Pa	450 000
Koeficijent seizmičnosti K		0,1
Kut nagiba kosine α_z	°	64
Nagib kritične klizne plohe α_k $\alpha_k = \frac{1}{2}(\alpha + \varphi)$	°	53
Dubina vlačne pukotine Z $Z = H \cdot \left(1 - \sqrt{\operatorname{ctg}\alpha \cdot \tan\alpha_k}\right)$	m	24,0
Dužina klizne ravnine A $A = \frac{H - Z}{\sin\alpha_k}$	m	126,1
Kohezija – reducirana c_r $c_r = \frac{c}{1 + K \cdot \ln\frac{H}{b}}$	Pa	428 367
Sila uzgona u plohi U $U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_w \cdot Z \cdot A$	N	14 828 349
Sila hidrostatskog tlaka u vlačnoj pukotini V $V = \frac{1}{2} \cdot \sigma_w \cdot Z^2$	N	2 820 017
Sila potencijalno nestabilne stijene, W_s $W_s = \frac{1}{2} \cdot \sigma_s \cdot H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{Z}{H}\right)^2\right) \cdot \operatorname{ctg}\alpha_k - \operatorname{ctg}\alpha\right]$	N	47 554 810
Koeficijent sigurnosti, K_s $K_s = \frac{c_r \cdot A \cdot L_j + [W \cdot (\cos\alpha_k - K \cdot \sin\alpha_k) - U - V \cdot \sin\alpha_k] \cdot \tan\varphi}{W \cdot (\sin\alpha_k - K \cdot \cos\alpha_k) + V \cdot \cos\alpha_k}$		1,4

Nakon provedene analize projektnih parametara površinskog kopa ustanovljeno je da koeficijent sigurnosti završne kosine površinskog kopa iznosi 1,4. U članku 61. Pravilnika o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina određeni su koeficijenti sigurnosti površinskih kopova (Tablica 7). Izračunati koeficijent sigurnosti nalazi se unutar granica koeficijenta sigurnosti određenog za završne kosine kopa.

Tablica 7 – Koeficijent sigurnosti za površinski kop

Pokazatelji	Koeficijent sigurnosti Ks
Radne kosine parcijalnih etaža	Ks = 1,00 do 1,05
Radne kosine sistema etaža	Ks = 1,05 do 1,10
Sistem radnih etaža s transportnim putovima	Ks = 1,15 do 1,20
Završne kosine kopa	Ks = 1,30 do 1,50

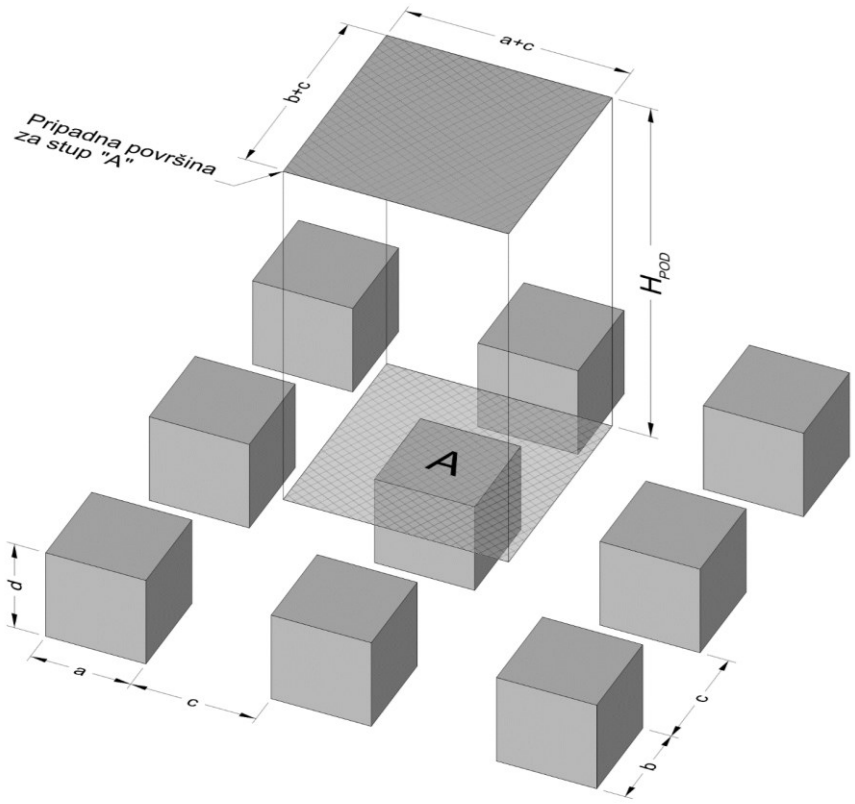
Izvor: (SL, 1986)

Proračun koeficijenta sigurnosti (Tablica 6) u ovom doktorskom radu napravljen je za jedan površinski kop odnosno završnu kosinu dobivenu grafičkom analizom pretpostavljenih parametara površinskog kopa (Slika 44). Predmet ovog doktorskog rada nije geomehanička analiza stabilnosti kosina površinskog kopa te je tako potrebno provjeriti i vrijednosti koeficijenata sigurnosti etažnih kosina. Provjeru je potrebno napraviti i za sve modele površinske eksploatacije analizom stabilnosti kosina ako se žele koristiti pri eksploataciji a-gk Crvene stijene.

5.7.2. ODREĐIVANJE PROJEKTNIH PARAMETARA PODZEMNOG KOPA

Projektni parametri podzemnog kopa Crvene stijene bit će određeni temeljem prijašnjih pozitivnih primjera dimenzioniranja potpornih stupova i komora u sličnim uvjetima radne sredine s obzirom na to da dimenzioniranje potpornih stupova i komora nije predmet ovog doktorskog rada. Ako se želi nastaviti s eksploatacijom u realnim uvjetima, bit će potrebno napraviti detaljnu ekspertnu analizu stijenske mase te pretpostavljenih projektnih parametara.

Pretpostavljene dimenzije potpornih stupova i komora bit će preliminarno analizirane metodom pripadnih površina (engl. *tributary area*) (Slika 45) kao prva analiza stabilnosti potpornih stupova.



Širina potpornog stupa (a)

Duljina potpornog stupa (b)

Raspon (širina) komore (c)

Visina potpornog stupa (d)

Visina krovine (H_{POD})

$C_1 = a + c$ uzdužna vrijednost dijela krovine, m

$C_2 = b + c$ poprečna vrijednost dijela krovine, m

Izvor: modificirano prema (Brady & Brown, 2005)

Slika 45 – Geometrija stupova i komora za analizu teorije pripadnih površina opterećenja

Uz ograničenja radne sredine (stanje stijenske mase) uvode se ograničenja mehanizacije koja proizlaze kao posljedica tehničkih mogućnosti mehanizacije primijenjene u metodi optimizacije, tj. na eksploataciji blokova a-gk podzemnog kopa. Ograničenja tehničkih mogućnosti mehanizacije, koja će biti korištena za pridobivanje blokova a-gk podzemnog kopa, prikazana su tablično (Tablica 8).

Tablica 8 – Ograničenja mehanizacije podzemnog kopa

Tip mehanizacije	**Dimenzije**	
Lančana sjekačica	Visina stroja	5550 mm
	Širina stroja	2624 mm
	Duljina reza	3000 mm
Utovarivač	Visina stroja	4221 mm
	Širina stroja	4020 mm

Izvor: (Caterpillar, 2014; Fantini, 2016)

5.7.2.1. Projektni parametri podzemnog kopa

Kako bi se odredile dimenzije potpornih stupova, potrebno je uzeti u obzir više faktora poput rasporeda i brojnosti pukotina i rasjeda te geomehaničkih parametara stijena. Projektirane vrijednosti parametara potpornih stupova potrebno je potvrditi tako što se uz dimenzioniranje izvode ispitivanja naprezanja *in situ* i laboratorijska ispitivanja stijenske mase te se radi komparativna analiza rezultata. Problemi koji se mogu javiti uslijed krivo projektiranih parametara potpornih stupova i komora očituju se kao ispadanje komada stijene te slom potpornih stupova i krovine (Esterhuizen et al., 2011a; Marchetti et al., 2012). Projektni parametri bit će određeni temeljem ograničenja mehanizacije, radne sredine i stijenske mase, a sukladno prijašnjim istraživanjima (Esterhuizen et al., 2008, 2011a, 2011c).

Širina potpornog stupa (a)

Minimalna širina potpornog stupa pretpostavljena je u iznosu od 6 metara te će se inkrementalno povećavati za iznos od 3 metra kako bi se analizom dobile vrijednosti koje će ovisno o svim dimenzijama stupa i komore davati najpovoljnije uvjete eksploatacije.

Duljina potpornog stupa (b)

Duljina potpornog stupa određena je istom metodologijom kao i širina potpornog stupa te će se prilagođavati s ciljem dobivanja optimalnih uvjeta eksploatacije. Usvojena je minimalna duljina potpornih stupova u iznosu od 6 m.

Raspon (širina) komore (c)

Širina komore mora biti tako projektirana da osigura stabilnost svoda komore (Segalini et al., 2006) tijekom svih rudarskih radova (transporta materijala, dolazak radnika na radilište itd.). Raspon komora odnosno razmak između potpornih stupova određen je prvenstveno tehničkim parametrima rudarske mehanizacije te je s obzirom na mehanizaciju koja će se koristiti za pridobivanje blokova a-gk (Tablica 8), utvrđena minimalna širina komore u iznosu od 9 metara. Širina će se komore inkrementalno povećavati za iznos od 3 metra prilikom analize projektnih dimenzija podzemnog kopa kako bi se dobili optimalni projektni parametri.

Ako se poveća raspon komora preko 16,8 m, bit će najvjerojatnije potrebno koristiti dodatno osiguranje stropa komore što će zahtijevati financijska ulaganja u podgradne sustave (Esterhuizen et al., 2010, 2011a).

Visina potpornog stupa (d)

Minimalna visina potpornog stupa određena je minimalnim tehničkim parametrima rudarske mehanizacije (Cotman & Vujec, 1998) koja će se koristiti za pridobivanje blokova a-gk (Tablica 8). Tako početna usvojena minimalna visina komore (potpornog stupa) za rad mehanizacije iznosi 6 metara. Visina potpornog stupa inkrementalno će se povećavati kako bi se dobio optimalan omjer širine i visine stupa s time da ista visina potpornog stupa ne smije biti viša od ukupne visine izdvojenih blokova a-gk, tj. maksimalno 15 metara.

Odnos širine i visine stupa (r)

Slom stupova događa se pri malom odnosu širine i visine stupa te se može dogoditi i pri relativno malom naprezanju, a prosječna čvrstoća stupa vrlo se malo mijenja ako je odnos širine i visine stupa ispod 1,0 (Esterhuizen, 2006). S obzirom na to da je odnos visine i širine stupa jedan od faktora koji bitno utječe na stabilnost potpornih stupova te s obzirom na to da čvrstoća stupa rapidno raste ako je odnos širine i visine stupa veći od 1,0 (Esterhuizen et al., 2011a; Lunder, 1994), usvojen je minimalni odnos visine i širine stupa u iznosu od 1,0.

Oblik baze potpornog stupa

Oblik baze potpornih stupova može biti različit te imamo kvadratni, pravokutni, trakasti ili nepravilni oblik baze. Kvadratni oblik baze potpornog stupa najviše se koristi u podzemnim kopovima kamena dok se pravokutni oblik baze koristi u situacijama kada se javljaju horizontalna (bočna) naprezanja kako bi se smanjila površina stropa na koju djeluju bočna naprezanja (Iannacchione et al., 2003). Kvadratni oblik baze potpornog stupa pozitivno utječe na efikasnost ventilacije podzemnog kopa te se smanjuje potreba za ventilacijskim pregradama (Grau et al., 2006). Kvadratni oblik baze potpornog stupa najjednostavniji je oblik potpornog stupa pri izračunu opterećenja i rasporeda stupova (Esterhuizen et al., 2011a).

Usvojen je kvadratni oblik baze potpornog stupa.

Raspored potpornih stupova

Raspored stupova može biti pravilan i nepravilan te se može eksploatirati hodnicima. Pravilan raspored stupova i komora u obliku "šahovskog polja" dovodi do slabijeg iskorištenja ležišta ali sa stajališta sigurnosti više je prihvatljiv s obzirom na to da dolazi do pravilnog rasporeda sekundarnih naprezanja u stupovima i ravnomjernu distribuciju opterećenja uslijed krovinskih naslaga (Esterhuizen et al., 2011a; González-Nicieza et al., 2006).

Usvojen je pravilan raspored potpornih stupova.

Usvojena su ograničenja (Tablica 9) koja je potrebno uvažiti prilikom određivanja projektnih parametara podzemnog kopa.

Tablica 9 – Ograničenja projektnih parametara podzemnog kopa

Vrijednost	Uvjet	Iznos	Jedinica
Širina potpornog stupa (a)	≥	6	m
Duljina potpornog stupa (b)	≥	6	m
Raspon (širina) komore (c)	≥	9	m
	≤	16,8	m
Visina potpornog stupa (d)	≥	6	m
	≤	15	m
Odnos širine i visine stupa (r)	≥	1,0	-
Oblik baze potpornog stupa	kvadratni		
Raspored potpornih stupova	pravilan		

5.7.2.2. Provjera projektnih parametara podzemnog kopa

Kako bi se odredile optimalne dimenzije potpornih stupova te raspon komora napravljena je analiza pretpostavljenih projektnih parametara podzemnog kopa ovisno o strukturnom sklopu ležišta i mehanizacije koja će se koristiti (Tablica 10). Isto tako analizirane su vrijednosti omjera pripadnih površina potpornih stupova metodom pripadnih površina (engl. *Tributary Area*) kako bi se dobio najpovoljniji odnos, odnosno optimalan omjer pripadnih površina po stupu u odnosu na površinu baze stupa. Dodatno je napravljena analiza odnosa širine i visine potpornog stupa kako bi se utvrdili najpovoljniji odnosi pretpostavljenih parametara.

Tablica 10 – Analiza vrijednosti dimenzija komora i stupova

Širina (a)	**Duljina (b)**	**Raspon komore (c)**	**Površina baze stupa ($a \cdot b$)**	**Površina opterećenja ($C_1 \cdot C_2$)**	**Omjer pripadnih površina**	**Odnos širine i visine stupa (r)**			
						Visina stupa (h) (m)			
m	**m**	**m**	**m²**	**m²**		**6**	**9**	**12**	**15**
6,00	6,00	9,00	36,00	189,00	1 : 5,3	1,00	0,67	0,50	0,40
9,00	6,00	9,00	54,00	216,00	1 : 4,0	1,00	0,67	0,50	0,40
9,00	9,00	9,00	81,00	243,00	1 : 3,0	1,50	1,00	0,75	0,60
9,00	9,00	12,00	81,00	360,00	1 : 4,4	1,50	1,00	0,75	0,60
12,00	9,00	12,00	108,00	396,00	1 : 3,7	1,50	1,00	0,75	0,60
12,00	12,00	12,00	144,00	432,00	1 : 3,0	2,00	1,33	1,00	0,80
12,00	12,00	15,00	144,00	585,00	1 : 4,1	2,00	1,33	1,00	0,80
15,00	12,00	15,00	180,00	630,00	1 : 3,5	2,00	1,33	1,00	0,80
15,00	**15,00**	**15,00**	**225,00**	**675,00**	**1 : 3,0**	**2,50**	**1,67**	**1,25**	**1,00**
15,00	15,00	18,00	225,00	864,00	1 : 3,8	2,50	1,67	1,25	1,00
18,00	15,00	18,00	270,00	918,00	1 : 3,4	2,50	1,67	1,25	1,00
18,00	18,00	18,00	324,00	972,00	1 : 3,0	3,00	2,00	1,50	1,20

Analizom vrijednosti dimenzija komora i stupova (Tablica 10) ustanovljeno je da najveći omjer prinosa površine ima omjer stupova 6,00 x 6,00 m s rasponom komora 9,00 m te iznosi 1 : 5,3. Kako model ležišta koji se eksploatira (Slika 43) ima ukupnu visinu od 15 m, tako navedene dimenzije stupova nisu odabrane jer im omjer širine i visine stupa za visinu od 15 m iznosi 0,4 što je znatno ispod minimalne usvojene vrijednosti odnosa visine i širine stupa koji iznosi 1,0. Za visinu modela eksploatacije od 15 m prvi omjer visine i širine stupa koji je jednak ili veći od minimalno usvojenog iznosa 1,0 daju stupovi dimenzija 15,0 x 15,0 m s rasponom stupova odnosno širinom komore od 15 m. Baza stupa (15,0 x 15,0 m) iznosi 225 m^2, a površina koju stup nosi iznosi 675,0 m^2. Omjer pripadnih površina za dimenzije stupova (15,0 x 15,0 m) iznosi 1 : 3,0.

Nakon analize pretpostavljanih vrijednosti dimenzija komora i stupova usvojene su vrijednosti dimenzija potpornih stupova i raspona komora (Tablica 11) koje ulaze unutar definiranih ograničenja projektnih parametara (Tablica 9).

Tablica 11 – Projektni parametri podzemnog kopa za primjenu metode optimizacije

Parametar	Iznos	Jedinica
Širina potpornog stupa (a)	15	m
Duljina potpornog stupa (b)	15	m
Raspon (širina) komore (c)	15	m
Visina potpornog stupa (d)	15	m
Oblik baze potpornog stupa	kvadratni	
Raspored potpornih stupova	pravilan	

5.7.2.2.1. Vertikalna komponenta normalnog opterećenja

$$p_z = \rho \cdot g \cdot H_{POD} = 2\,680 \cdot 9{,}81 \cdot 85 = 2\,234\,718\ {}^{N}/_{m^2}$$

Pri čemu je:

ρ = 2 680 kg/m^3, gustoća naslaga iznad potpornog stupa (Mašić, 2015b),

g = 9,81 m/s^2, ubrzanje uslijed gravitacije,

H_{POD} = 85 m, maksimalna debljina krovine (Slika 44).

Model optimizacije eksploatacije (Slika 43) nalazi se na 890 m n.v. te je upravo do te razine i planirana podzemna eksploatacija a-gk. Analizom presjeka ležišta (Slika 44) ustanovljeno je da je maksimalna visina od modela optimizacije eksploatacije, tj. blok 12 do površine terena $H_{POD} = 85\ m$ (Slika 43).

5.7.2.2.2. Prosječno naprezanje u potpornim stupovima

Prosječno naprezanje u potpornim stupovima sličnih dimenzija i pravilno raspoređenih može se odrediti pomoću teorije pripadnih površina opterećenja (engl. *tributary area*) pri čemu se težina krovine smatra ravnomjerno raspoređenom između svih potpornih stupova koji su pravilno raspoređeni (Brady & Brown, 2005).

Tako se naprezanje kojem je potporni stup izložen može prikazati izrazom (1)

$$\sigma_p = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{(a+c)\cdot(b+c)}{(a\cdot b)} \left[N/m^2\right]$$
$$\sigma_p = p_z \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{A} = 2\,234\,718{,}0 \cdot \frac{30 \cdot 30}{225} = 8{,}9\ MPa \quad (1)$$

Izvor: modificirano prema (Brady & Brown, 2005; Esterhuizen et al., 2011b)

pri čemu je:

σ_p = naprezanje kojem je potporni stup izložen, MPa ili N/m^2,

ρ = gustoća naslaga iznad potpornog stupa, kg/m^3,

g = ubrzanje uslijed gravitacije, m/s^2,

H = debljina krovine, m,

a = širina potpornog stupa, m,

b = duljina potpornog stupa, m,

c = udaljenost između potpornih stupova – širina komore, m,

$C_1 = (a + c)$ = uzdužna vrijednost dijela krovine koji se uzima u obzir za proračun pripadnih površina, m,

$C_2 = (b + c)$ = poprečna vrijednost dijela krovine koji se uzima u obzir za proračun pripadnih površina, m,

A = površina potpornog stupa, m^2,

p_z = vertikalna komponenta opterećenja uslijed naslaga materijala iznad potpornog stupa (MPa) (Brady & Brown, 2005; Esterhuizen et al., 2011b).

Naprezanje koje je dobiveno izrazom (1) generalno predstavlja gornju granicu prosječnog jednoosnog tlačnog naprezanja kojem je potporni stup izložen.

U uvjetima u kojima nije moguće koristiti metodu prinosa površine, poput nepravilnog rasporeda stupova, velike otkrivke ili promjenjive debljine krovine, potrebno je koristiti numeričke metode za izračun prosječnog jednoosnog tlačnog naprezanja kojem je potporni stup izložen (Esterhuizen et al., 2011a).

5.7.2.2.3. Tlačna čvrstoća potpornog stupa

Tlačna čvrstoća potpornog stupa može se definirati kao maksimalan otpor stupa jednoosnom tlačnom naprezanju. Čvrstoća potpornog stupa može se prikazati korištenjem izraza (2) (Esterhuizen et al., 2011a)

$$S = k \cdot \frac{a^{0,30}}{d^{0,59}} \ [MPa] \tag{2}$$

pri čemu je:

S = prosječna tlačna čvrstoća potpornog stupa, MPa,

k = parametar čvrstoća potpornog stupa, MPa,

d = visina potpornog stupa, m,

$0,30\ i\ 0,59$ = eksponenti za određivanje čvrstoće potpornog stupa temeljem volumena i oblika stupa (Esterhuizen et al., 2011a, 2011b).

5.7.2.2.4. Parametar čvrstoće potpornog stupa

Parametar čvrstoće potpornog stupa k može se izraziti preko odnosa jednoosne tlačne čvrstoće stupa korištenjem izraza (3) (Esterhuizen et al., 2011a, 2011b)

$$k = 0,65 \cdot \sigma_1 = 0,65 \cdot 96,1 = 62,5\ MPa \tag{3}$$

Jednoosna tlačna čvrstoća utvrđena je ispitivanjem te iznosi $\sigma_1 = 96,1\ MPa$ (Mašić, 2015b) pri čemu je:

σ_1 = jednoosna tlačna čvrstoća stijene potpornog stupa, MPa,

$0,65$ = koeficijent pri određivanju parametra potpornog stupa (Esterhuizen et al., 2011a, 2011b).

5.7.2.2.5. Utjecaj diskontinuiteta na čvrstoću potpornog stupa

Utjecaj diskontinuiteta na čvrstoću potpornog stupa očitava se u smanjenju čvrstoće stupa te ovisi o broju i nagibu diskontinuiteta koji presijeca potporni stup. Prosječan utjecaj velikih diskontinuiteta na čvrstoću potpornih stupova naziva se faktor velikog diskontinuiteta (FVD) (engl. *large discontinuity factor – LDF*) te se može prikazati izrazom (4) (Esterhuizen et al., 2011a)

$$FVD = 1 - FND \cdot FFD \tag{4}$$

pri čemu je:

FVD = faktor velikog diskontinuiteta,

FND = faktor nagiba diskontinuiteta (engl. *discontinuity dip factor – DDF*),

FFD = faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta (engl. *frequency factor – FF*), ovisan o frekvenciji pojavljivanja velikih diskontinuiteta po potpornom stupu (Esterhuizen et al., 2011a).

5.7.2.2.6. Prosječan broj velikih diskontinuiteta po potpornom stupu (DPS)

Temeljem analize prostornih odnosa rasporeda diskontinuiteta (Prilog 2) utvrđeno je da se diskontinuiteti nalaze na prosječnoj udaljenosti od $d_D = 15\,m$ unutar granica modela istraživanja. Prosječan broj velikih diskontinuiteta po potpornom stupu (DPS) može se prikazati izrazom (5) (Esterhuizen et al., 2011a)

$$DPS = \frac{a}{d_D} = \frac{15}{15} = 1{,}0 \tag{5}$$

pri čemu je:

d_D = prosječna udaljenost između diskontinuiteta, m.

5.7.2.2.7. Faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta (FFD)

Sukladno izračunatom prosječenom broju velikih diskontinuiteta po potpornom stupu (DPS) određuje se faktor frekvencije pojavljivanja diskontinuiteta (FFD) korištenjem vrijednosti iz *Table 6* (Esterhuizen et al., 2011a).

$$FFD = 0{,}63$$

5.7.2.2.8. Faktor nagiba diskontinuiteta (FND)

Faktor nagiba diskontinuiteta (FND) određuje se temeljem utvrđenog prosječnog nagiba diskontinuiteta (α_D) i odnosa širine i visine potpornog stupa (r) korištenjem vrijednosti iz *Table 5* (Esterhuizen et al., 2011a). Prosječan nagib diskontinuiteta promatranog područja kreće se u približnom iznosu $\alpha_D = 85^\circ - 90^\circ$ (Dragičević et al., 2015) što je i prikazano na grafičkim prilozima presjeka ležišta (Prilog 3 i Prilog 4). Usvojene vrijednosti korištene pri određivanju FND iz *Table 5* za nagib diskontinuiteta iznose $\alpha_D = 90^\circ$, a za odnos širine i visine potpornog stupa $r = 1$.

$$FND = 0{,}16$$

Sukladno utvrđenim vrijednostima proizlazi da je utjecaj diskontinuiteta na čvrstoću potpornog stupa (FVD) jednak

$$FVD = 1 - 0{,}16 \cdot 0{,}63 = 0{,}90.$$

Utjecaj diskontinuiteta na čvrstoću stupa iznosi 10 %, odnosno veliki diskontinuiteti umanjuju čvrstoću potpornog stupa za 10 %.

Izraz (2), za izračun tlačne čvrstoće potpornog stupa (S), modificira se uslijed utjecaja velikih diskontinuiteta te postaje izraz (6).

$$S = k \cdot FVD \cdot \frac{a^{0,30}}{d^{0,59}} = 62{,}5 \cdot 0{,}90 \cdot \frac{15^{0,30}}{15^{0,59}} = 25{,}6\ MPa \qquad (6)$$

5.7.2.2.9. Faktor sigurnosti potpornih stupova

Faktor sigurnosti (F_s) predstavlja granicu sigurnosti kojom se kvantificiraju utjecaji poput sila u stijenskoj masi koje djeluju na zaštitne stupove ili svod komore te predstavlja omjer prosječnog naprezanja kojem je stup izložen u odnosu na tlačnu čvrstoću stupa. Ako je zadani faktor sigurnosti veći, postoji više nepoznanica, tj. kada su nepoznati tlakovi, kada je čvrstoća stijene promjenjiva itd. (Beall, 1990). Praktično gledano, ako se dogodi slom u jednom ili više potpornih stupova, to znači da su naprezanja u stupu približna ili veća od čvrstoće stupa (Esterhuizen et al., 2010, 2011b).

Faktor sigurnosti (F_s) može se prikazati izrazom (7) (Esterhuizen et al., 2008, 2011b).

$$F_s = \frac{S}{\sigma_p} = \frac{25{,}6}{8{,}9} = 2{,}9 \tag{7}$$

Izračunati faktor sigurnosti $F_s = 2{,}9$ prelazi preporučeni faktor sigurnosti za podzemne kopove kamena od 1,8 (Esterhuizen et al., 2011a) te se može smatrati da utvrđeni projektni parametri predstavljaju osnovu za projektiranje podzemnog kopa a-gk te u konačnici analizu podzemne eksploatacije.

Projektni parametri i faktor sigurnosti utvrđeni su analitičkim metodama te predstavljaju osnovu za izradu analize podzemne eksploatacije, a nikako projektne parametre za nastavak eksploatacije. Ako se utvrđeni projektni parametri žele primijeniti u realnim uvjetima, mora se napraviti njihova verifikacija te izrada detaljne ekspertne analize numeričkim metodama i *in situ* mjerenjima.

5.8. MODELIRANJE TRODIMENZIONALNIH MODELA KOPOVA

5.8.1. MODELIRANJE POVRŠINSKIH KOPOVA

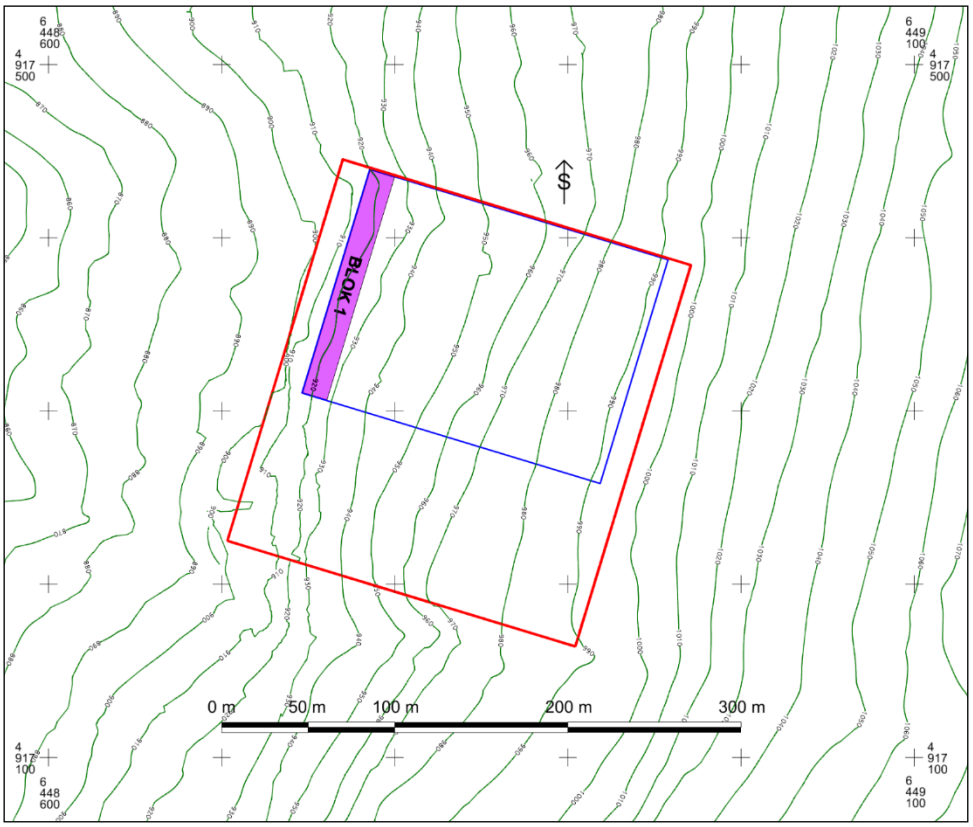
Površinski kopovi bit će modelirani temeljem usvojenih vrijednosti projektnih parametara površinskih kopova (Tablica 4) s time da će se za svaki blok model optimizacije eksploatacije (Slika 43) projektirati novi površinski kop odnosno završna kontura površinskog kopa kako bi se u potpunosti eksploatirao cijeli blok.

Projektiranju se pristupilo u trodimenzionalnom okruženju s obzirom na to da će se na taj način odmah stvarati trodimenzionalni modeli završnih kontura površinskih kopova kako bi

se poslije mogli raditi poprečni presjeci površinskih kopova (vidi poglavlje 5.9. Analiza vrijednosti površina i volumena kopova) te su trodimenzionalni modeli osnova izrade presjeka za odabranu metodu izrade presjeka u programu Power Inroads.

Metodologija projektiranja površinskih kopova:

- kreirati novu trodimenzionalnu datoteku u programu Power Inroads,
- priložiti u novu datoteku površinu terena (Slika 18)
- priložiti u novu datoteku blokove modela optimizacije eksploatacije (Slika 43)
- priložiti u novu datoteku granice modela istraživanja i granice izdvojenog dijela modela istraživanja (Slika 42)
- projektirati model površinskog kopa za promatrani blok u trodimenzionalnom modelu korištenjem alata programa Power Inroads.



Slika 46 – Pripremljena podloga za projektiranje površinskog kopa za blok 1

Nakon pripreme nove datoteke projektirane su završne konture površinskog kopa kao *mesh* elementi prema projektnim parametrima za površinsku eksploataciju (Tablica 4), a dio koji

izlazi iz granica modela optimizacije smatra se pripremom. Pretpostavlja se da je priprema za svaki površinski i podzemni kop ista te neće ulaziti u proračun. Modeli završnih kontura površinskih kopova za blokove 1 do 12 prikazani su na prilozima (Prilog 7 do Prilog 18). Površina zahvaćena radovima pripreme za sve završne konture iznosi 7 757 m^2.
Završne konture površinskog kopa za blok 1 (Prilog 7) razvijene su prvo izradom dijela koji se smatra pripremom (siva boja) koja će biti ista za sve završne konture površinskih kopova tj. za sve blokove (blok 1 do 12). Nakon dijela pripreme razvijena je etaža Et. 890 m n.v. – osnovni plato te dvije visinske etaže Et. 905 i Et. 920. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 4 895 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 114 816 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 2 (Prilog 8) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i tri visinske etaže Et. 905, 920 i 935. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 9 129 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 233 974 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 3 (Prilog 9) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i tri visinske etaže Et. 905, 920 i 935. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 11 751 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 371 862 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 4 (Prilog 10) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i četiri visinske etaže Et. 905, 920, 935 i 950. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 16 311 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 531 861 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 5 (Prilog 11) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i četiri visinske etaže Et. 905, 920, 935 i 950. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 19 136 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 705 125 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 6 (Prilog 12) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i pet visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950 i 965. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 23 984 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 923 297 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 7 (Prilog 13) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i pet visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950 i 965.

Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 27 070 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 1 145 251 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 8 (Prilog 14) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i šest visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950, 965 i 890. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 32 157 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 1 402 951 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 9 (Prilog 15) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i šest visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950, 965 i 980. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 35 517 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 1 669 122 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 10 (Prilog 16) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i sedam visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950, 965, 980 i 995. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 40 803 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 1 968 092 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 11 (Prilog 17) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i sedam visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950, 965, 980 i 995. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 44 473 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 2 281 411 m^3.

Završne konture površinskog kopa za blok 12 (Prilog 18) razvijene su nakon dijela pripreme te su razvijene osnovna etaža Et. 890 i osam visinskih etaža Et. 905, 920, 935, 950, 965, 980, 995 i 1010. Površina zahvaćena površinskim rudarskim radovima iznosi 49 812 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene iznosi 2 632 752 m^3.

5.8.2. MODELIRANJE PODZEMNIH KOPOVA

Modeliranju podzemnih kopova pristupilo se istom metodologijom kao i za površinske kopove u trodimenzionalnom prostoru kako bi se usporedno s projektiranjem kreirali trodimenzionalni modeli podzemne eksploatacije korištenjem projektnih parametara podzemne eksploatacije (Tablica 11). Svaki podzemni kop projektiran je u završnoj fazi eksploatacije (Prilog 19 do Prilog 30) nakon dijela koji se smatra pripremom.

Završne konture podzemnog kopa za blok 1 (Prilog 19) razvijene su izradom pet komora (K1, K2, K3, K4 i K5) i četiri potporna stupa (S1, S2, S3 i S4). Površina zahvaćena podzemnim

rudarskim radovima iznosi 1 125 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 16 797 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 2 (Prilog 20) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1 s time da je razvijena jedna kolona (H1) kojom se u potpunosti eksploatirao blok 2. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 3 150 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 47 044 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 3 (Prilog 21) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1 i 2, a blok 3 eksploatiran je razvojem pet komora (K6, K7, K8, K9 i K10) i četiri potporna stupa (S6, S7, S8 i S9). Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 4 275 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 63 046 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 4 (Prilog 22) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2 i 3 s time da je razvijena jedna kolona (H2) kojom se u potpunosti eksploatirao blok 4. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 6 300 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 93 363 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 5 (Prilog 23) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3 i 4, a blok 5 eksploatiran je razvojem pet komora (K11, K12, K13, K14 i K15) i četiri potporna stupa (S11, S12, S13 i S14). Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 7 425 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 110 245 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 6 (Prilog 24) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4 i 5 s time da je razvijena jedna kolona (H3) kojom se u potpunosti eksploatirao blok 6. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 9 450 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 138 679 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 7 (Prilog 25) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5 i 6, a blok 7 eksploatiran je razvojem pet komora (K16, K17, K18, K19 i K20) i četiri potporna stupa (S16, S17, S18 i S19). Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 10 575 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 155 391 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 8 (Prilog 26) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5, 6 i 7 s time da je razvijena jedna kolona (H4) kojom se u

potpunosti eksploatirao blok 8. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 12 600 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 185 639 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 9 (Prilog 27) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8, a blok 9 eksploatiran je razvojem pet komora (K21, K22, K23, K24 i K25) i četiri potporna stupa (S21, S22, S23 i S24). Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 13 725 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 202 426 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 10 (Prilog 28) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9 s time da je razvijena jedna kolona (H5) kojom se u potpunosti eksploatirao blok 10. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 15 750 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 232 626 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 11 (Prilog 29) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10, a blok 11 eksploatiran je razvojem pet komora (K26, K27, K28, K29 i K30) i četiri potporna stupa (S26, S27, S28 i S29). Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 16 875 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 248 543 m^3.

Završne konture podzemnog kopa za blok 12 (Prilog 30) razvijene su izradom istih podzemnih prostorija kao za blok 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 i 11 s time da je razvijena jedna kolona (H6) kojom se u potpunosti eksploatirao blok 12. Površina zahvaćena podzemnim rudarskim radovima iznosi 18 900 m^2, a ukupno otkopana bruto masa stijene podzemnim rudarskim radovima iznosi 278 495 m^3.

5.9. ANALIZA VRIJEDNOSTI POVRŠINA I VOLUMENA KOPOVA

Analiza vrijednosti volumena stijenske mase površinskih i podzemnih kopova napravljena je metodom paralelnih presjeka (Popović, 1984) uz digitalnu obradu i evaluaciju trodimenzionalnih modela ležišta.

Opis metodologije paralelnih presjeka:

- postaviti obračunske presjeke po cijeloj površini promatranog područja, tj. površini kopa koji se analizira
- na nacrtanim presjecima izračunati površine za svaku izdvojenu površinu ležišta zasebno
- volumen stijenske mase, između dva susjedna presjeka, računa se ovisno o razlici površina kako slijedi:
    - površine susjednih presjeka razlikuju se za manje od 40%

$$V = \frac{L}{2} \cdot (P_i + P_{i+1})$$

    - površine susjednih presjeka razlikuju se za više od 40%

$$V = \frac{L}{3} \cdot \left(P_i + P_{i+1} + \sqrt{P_i \cdot P_{i+1}}\right)$$

pri čemu je:

V – volumen stijenske mase između dva susjedna presjeka, m^3,

L – udaljenost između presjeka, m,

P_i – površina i-tog presjeka, m^2,

P_{i+1} – površina susjednog i-tog presjeka, m^2 (Popović, 1984).

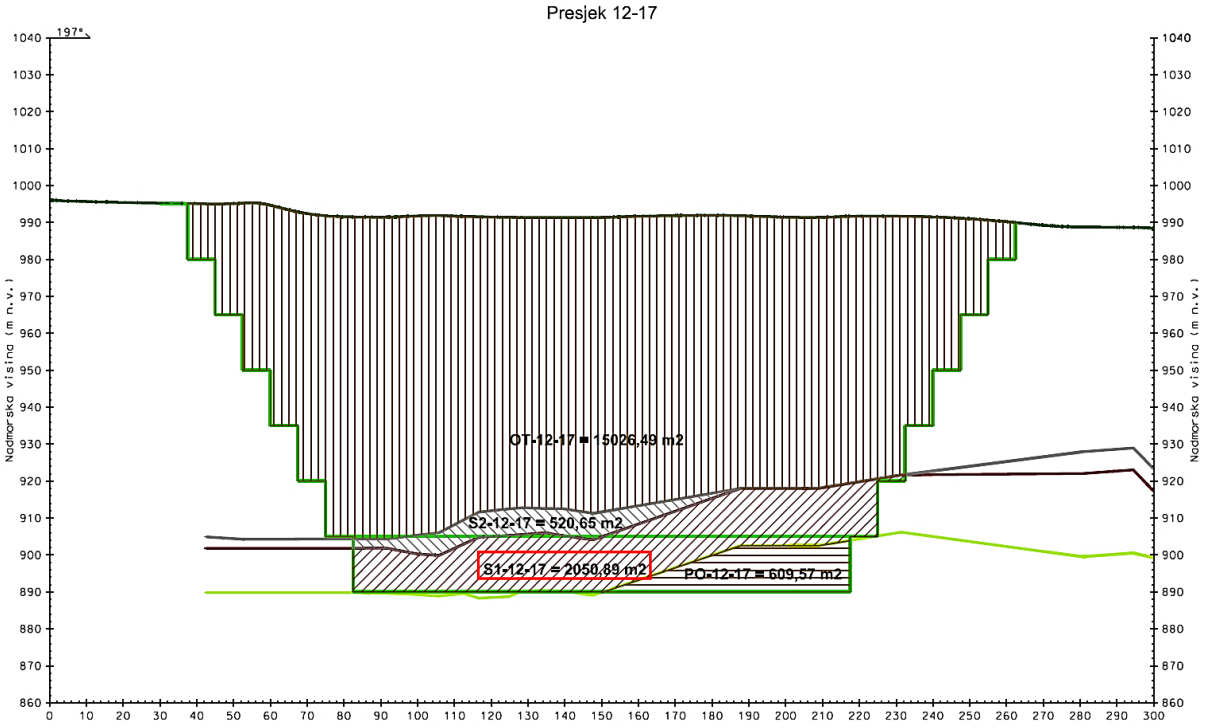
5.9.1. ANALIZA VRIJEDNOSTI POVRŠINA POVRŠINSKIH KOPOVA

Na izrađene modele površinskih kopova postavljene su pozicije poprečnih presjeka (Prilog 7 do Prilog 18) za analizu površina. Analiza vrijednosti površina površinskih kopova napravljena je temeljem izrađenih poprečnih presjeka za svaki površinski kop (Prilog 31). Površine su na presjecima označavane u formatu "AA-B-C" (Tablica 12) kako bi se lakše obrađivale tijekom proračuna volumena stijenske mase u programu Microsoft Excel.

Tablica 12 – Označavanje površina presjeka površinske eksploatacije

AA	-	B	-	C
OT – Otkrivka S1 – I. produktivni sloj S2 – II. produktivni sloj PO – Podina	-	Oznaka bloka optimizacije ležišta	-	Oznaka presjeka

Slika 47 prikazuje Presjek 12 – 17 površinske eksploatacije na kojem se vide izdvojene i označene površine nakon grafičke analize izdvojenih dijelova ležišta. Primjer označavanja površine: S1-12-17 označava površinu I. produktivnog sloja za blok 12 na presjeku 17.



Slika 47 – Presjek 12 – 17 površinske eksploatacije

5.9.2. ANALIZA VRIJEDNOSTI VOLUMENA OTKOPANE STIJENE POVRŠINSKIH KOPOVA

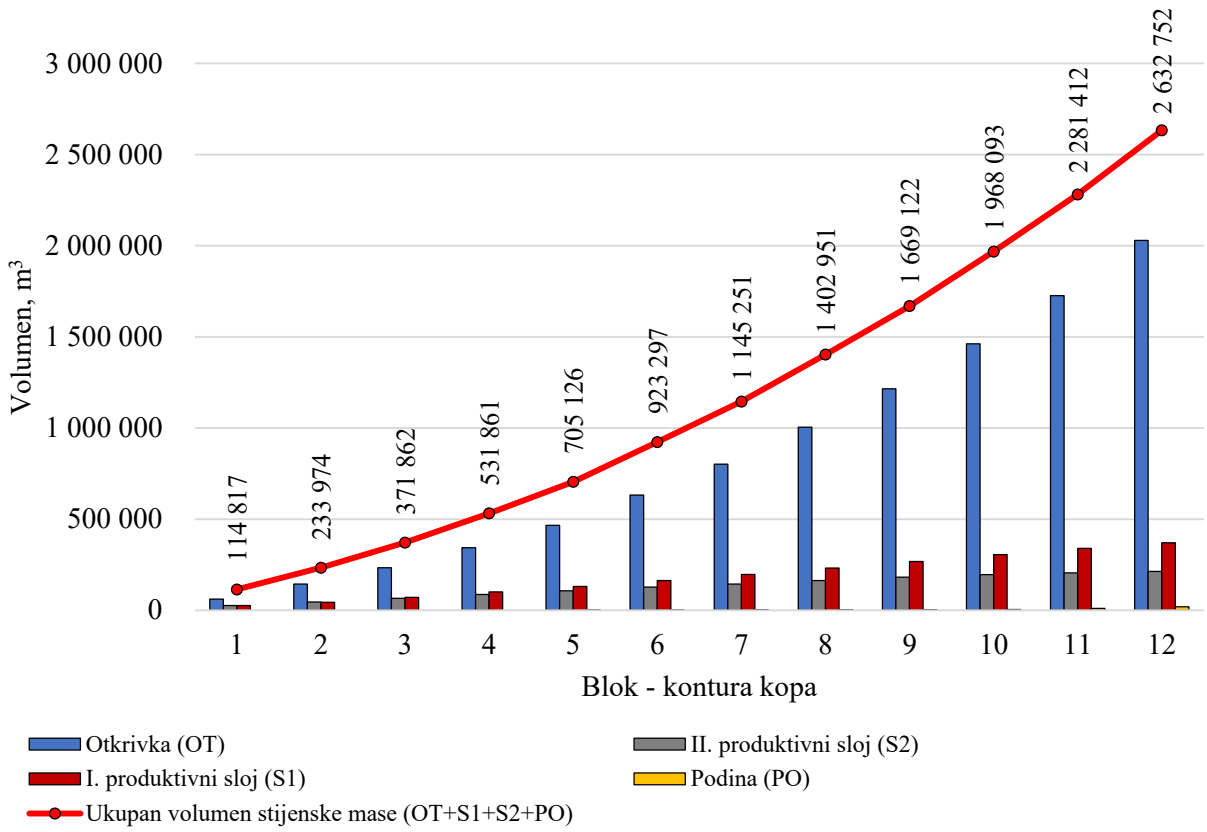
Izračun volumena površinskih kopova napravljen je korištenjem analiziranih površina izdvojenih dijelova površinskog kopa (Prilog 33) pomoću programa Excel (Microsoft, 2016) metodom paralelnih presjeka za sve blokove (blok 1 do 12).

Tablica 13 prikazuje rezultate proračuna volumena analiziranih površinskih kopova (Prilog 35). Za svaki blok odnosno konturu površinskog kopa prikazan je volumen stijene za slojeve otkrivka (OT), II. produktivni sloj (S2), I. produktivni sloj (S1) i podina (PO). Ukupni volumen stijenske mase za svaki od površinskih kopova dobiven je zbrajanjem vrijednosti (OT), (S2), (S1) i (PO).

Tablica 13 – Rezultati proračuna ukupnog volumena otkopanih slojeva površinskih kopova

Blok – kontura kopa	**Otkrivka (OT), m^3**	**II. produktivni sloj (S2), m^3**	**I. produktivni sloj (S1), m^3**	**Podina (PO), m^3**	**Sloj a-gk (S1 + S2 + PO), m^3**	**Ukupno (OT + S2 +S1 +PO), m^3**
1	61 931	26 284	26 601	0	52 885	114 817
2	144 163	45 909	43 902	0	89 811	233 974
3	234 044	66 533	71 285	0	137 818	371 862
4	343 418	87 140	101 303	0	188 443	531 861
5	466 361	107 263	131 478	25	238 765	705 126
6	632 208	127 534	163 363	192	291 089	923 297
7	802 143	144 629	196 548	1 931	343 108	1 145 251
8	1 004 628	163 717	231 708	2 898	398 323	1 402 951
9	1 215 269	181 863	268 416	3 574	453 853	1 669 122
10	1 462 325	195 683	305 781	4 304	505 768	1 968 093
11	1 725 856	205 274	339 786	10 495	555 556	2 281 412
12	2 028 788	213 541	370 971	19 453	603 965	2 632 752

Vrijednosti proračuna volumena otkopanih slojeva površinskih kopova (Tablica 13) prikazane su grafički (Slika 48) te se može vidjeti odnos volumena stijenske mase slojeva površinskih kopova i ukupnog volumena otkopane stijenske mase.



Slika 48 – Odnos volumena otkopane stijenske mase slojeva površinskih kopova

Iz grafičkog prikaza odnosa volumena stijenske mase slojeva površinskih kopova (Slika 48) vidljivo je da je volumen sloja otkrivke (OT) za svaki površinski kop znatno veći u odnosu na volumen II. produktivnog sloja (S2), I. produktivnog sloja (S1) i sloja podine (PO). Isto tako volumen sloja otkrivke (OT) povećava se kako napreduje eksploatacija odnosno kako se otkopavaju sve veće vrijednosti blokova.

Volumen sloja podine (PO) neznatno se povećava s otkopavanjem blokova većih vrijednosti odnosno s napretkom eksploatacije, a ista nije zahvaćena eksploatacijom blokova 1, 2, 3 i 4.

Volumen otkopane stijene I. i II. produktivnog sloja kod eksploatacije bloka 1 gotovo je identična. S otkopavanjem blokova većih oznaka, tj. napretkom eksploatacije povećava se volumen stijene I. i II. produktivnog sloja, no valja istaknuti da se volumen stijene I. produktivnog sloja više povećava u odnosu na volumen stijene II. produktivnog sloja.

Ukupan volumen stijene, koja će biti eksploatirana blokovima optimizacije eksploatacije, pokazuje konstantan, gotovo eksponencijalan rast najviše zbog volumena stijene koja će se otkopati iz sloja otkrivke.

Slojevi otkrivke (OT) i podine (PO) smatraju se jalovinom te će se prikazati kao trošak pri izradi ekonomske analize eksploatacije površinskih kopova. Iz ukupnog volumena stijenske mase I. i II. produktivnog sloja (S1 i S2) izračunat će se volumen blokova a-gk koji će se tijekom ekonomske nalaze kopova prikazati kako vrijedna mineralna sirovina, a dio koji ostaje prikazat će se kao jalovina te će se pribrojiti ukupnoj jalovini.

5.9.3. VOLUMEN KOMERCIJALNIH BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA I JALOVINE PRODUKTIVNIH SLOJEVA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

Volumen blokova a-gk koji se može dobiti površinskom eksploatacijom I. produktivnog sloja (Tablica 15) i II. produktivnog sloja (Tablica 16) izrazit će se korištenjem koeficijenta iskorištenja (k_i) izraženog za I. i II. produktivni sloj (Tablica 14). Volumen stijene dobiven za I. i II. produktivni sloj množi se s koeficijentom iskorištenja kako bi se dobio volumen komercijalnih blokova a-gk. Razlika ukupnog volumena stijenske mase i komercijalnih blokova I. i II. produktivnog sloja predstavlja jalovinu koja se nalazi u produktivnim slojevima (Tablica 15 i Tablica 16).

Tablica 14 – Koeficijent iskorištenja I. i II. produktivnog sloja a-gk

Vrsta stijene (sloj)	**Koeficijent iskorištenja**	
	Oznaka	**Vrijednost**
I. produktivni sloj	k_{i-1}	0,31
II. produktivni sloj	k_{i-2}	0,57

Izvor: (Dragičević et al., 2015)

Tablica 15 – Volumen blokova a-gk i jalovine za I. produktivni sloj površinske eksploatacije

Blok – kontura kopa	I. produktivni sloj (S1), m^3	Koeficijent iskorištenja za S1, ki-1	Volumen blokova a-gk za S1, m^3	Volumen jalovine za S1, m^3
1	26 601	0,31	8 246	18 355
2	43 902	0,31	13 610	30 293
3	71 285	0,31	22 098	49 187
4	101 303	0,31	31 404	69 899
5	131 478	0,31	40 758	90 720
6	163 363	0,31	50 643	112 720
7	196 548	0,31	60 930	135 618
8	231 708	0,31	71 830	159 879
9	268 416	0,31	83 209	185 207
10	305 781	0,31	94 792	210 989
11	339 786	0,31	105 334	234 453
12	370 971	0,31	115 001	255 970

Tablica 16 – Volumen blokova a-gk i jalovine za II. produktivni sloj površinske eksploatacije

Blok – kontura kopa	II. produktivni sloj (S2), m^3	Koeficijent iskorištenja za S2, ki-2	Volumen blokova a-gk za S2, m^3	Volumen jalovine za S2, m^3
1	26 284	0,57	14 982	11 302
2	45 909	0,57	26 168	19 741
3	66 533	0,57	37 924	28 609
4	87 140	0,57	49 670	37 470
5	107 263	0,57	61 140	46 123
6	127 534	0,57	72 694	54 839
7	144 629	0,57	82 439	62 191
8	163 717	0,57	93 319	70 398
9	181 863	0,57	103 662	78 201
10	195 683	0,57	111 539	84 144
11	205 274	0,57	117 006	88 268
12	213 541	0,57	121 719	91 823

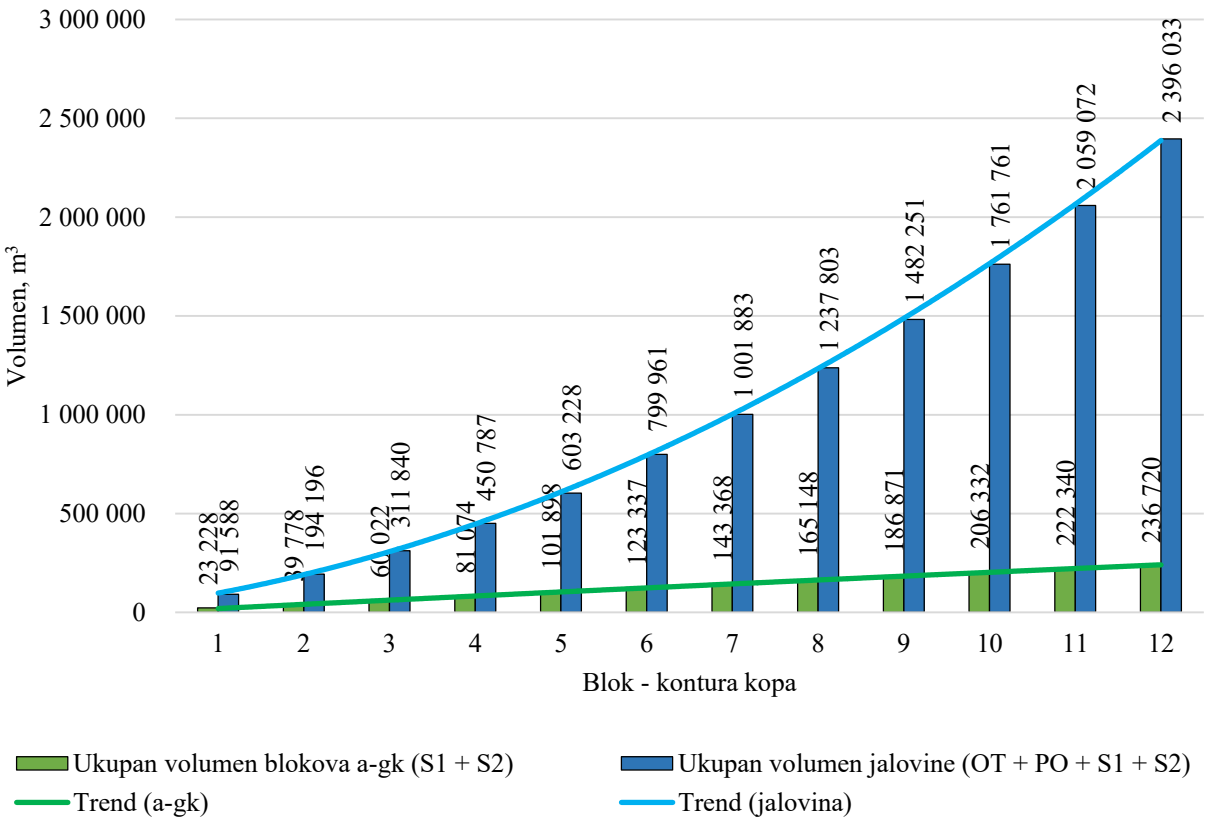
5.9.4. UKUPAN VOLUMEN KOMERCIJALNIH BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA I JALOVINE POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

Ukupan volumen komercijalnih blokova a-gk predstavlja zbroj vrijednosti volumena komercijalnih blokova za I. i II. produktivni sloj, a ukupan volumen jalovine predstavlja zbroj volumena slojeva otkrivke (OT) i podine (PO) te jalovine u produktivnim slojevima (S1 i S2) (Tablica 17).

Tablica 17 – Ukupan volumen blokova a-gk i jalovine površinske eksploatacije

Blok – kontura kopa	**Ukupan volumen blokova a-gk (S1 + S2), m^3**	**Ukupan volumen jalovine (OT + PO + S1 + S2), m^3**
1	23 228	91 588
2	39 778	194 196
3	60 022	311 840
4	81 074	450 787
5	101 898	603 228
6	123 337	799 961
7	143 368	1 001 883
8	165 148	1 237 803
9	186 871	1 482 251
10	206 332	1 761 761
11	222 340	2 059 072
12	236 720	2 396 033

Grafički prikaz odnosa volumena jalovine i blokova a-gk površinskih kopova dan je u nastavku (Slika 49).



Slika 49 – Odnos ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk površinskih kopova

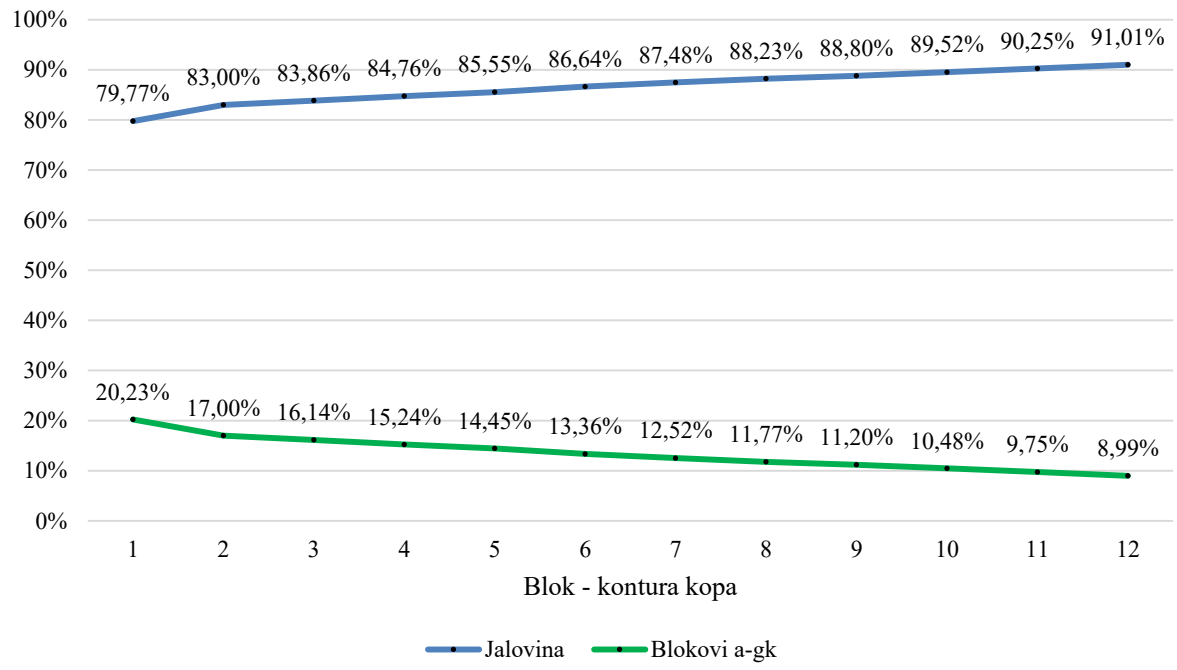
Ukupan volumen blokova a-gk za blok 1 (površinski kop 1) više je od tri puta manja u odnosu na ukupan volumen jalovine za isti blok, a razlika odnosa postaje sve veća kako se otkopavaju naredni blokovi (blok 2 do 12). Trend krivulja volumena jalovine pokazuje znatan uspon u odnosu na trend krivulju blokova a-gk te je tako za blok 12 odnosno površinski kop 12 razlika znatna i iznosi više od deset puta. Razlog tome je znatno zadebljanje naslaga krovine iznad produktivnih slojeva u odnosu na položaj produktivnih slojeva koji s napretkom otkopavanja poniru u odnosu na konfiguraciju terena (Slika 41 i Prilog 7 do Prilog 18).

Postotni odnosi volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa izračunati su stavljanjem ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk u odnos s ukupnim volumenom stijene (Tablica 13) te je izračunata i razlika postotnih udjela (Tablica 18).

Tablica 18 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa

Blok – kontura kopa	Jalovina, %	Blokovi a-gk, %
1	79,77	20,23
2	83,00	17,00
3	83,86	16,14
4	84,76	15,24
5	85,55	14,45
6	86,64	13,36
7	87,48	12,52
8	88,23	11,77
9	88,80	11,20
10	89,52	10,48
11	90,25	9,75
12	91,01	8,99

Temeljem izračunatih postotnih odnosa volumena jalovine i blokova a-gk napravljen je njihov grafički prikaz (Slika 50).



Slika 50 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa

Analiza postotnih odnosa volumena jalovine i blokova a-gk po konturi površinskog kopa pokazuje da je za blok 1 situacija najpovoljnija te je tako volumen blokova a-gk zastupljena u iznosu od 20,23 % dok je jalovina zastupljena u iznosu od 79,77 % (Slika 50). Napretkom eksploatacije narednih blokova optimizacije eksploatacije sve se više povećava razlika postotnih udjela volumena između blokova a-gk i jalovine. Tako su u ukupnom volumenu stijenske mase otkopane za blok 12 blokovi a-gk zastupljeni u iznosu od 9 %, a preostali dio od 91 % čini jalovina koju je potrebno otkopati kako bi se dobili blokovi a-gk. Udio blokova a-gk u ukupnom volumenu otkopane stijene za sve blokove optimizacije eksploatacije kreće se u rasponu od 8,99 % do 20,23 % te prosječno iznosi 13,43 % dok se udio jalovine kreće u rasponu od 79,77 % do 91,01 % te prosječno iznosi 86,57 %.

5.9.5. ANALIZA VRIJEDNOSTI POVRŠINA PODZEMNIH KOPOVA

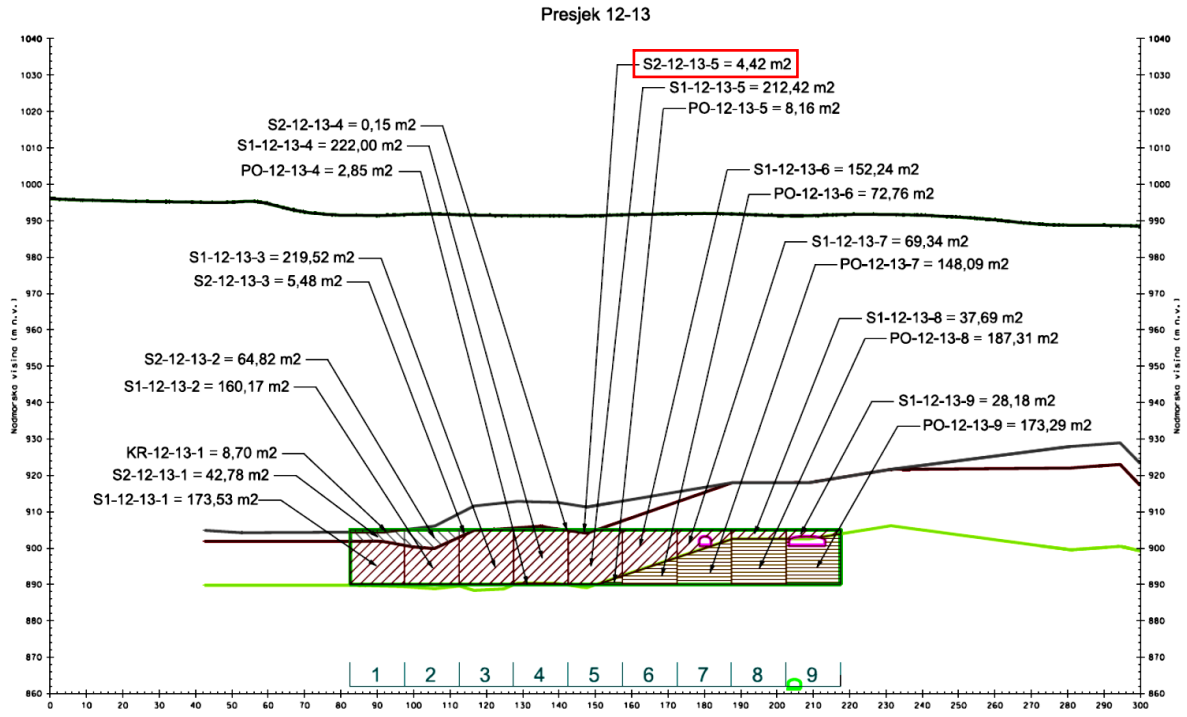
Analiza vrijednosti poprečnih presjeka kopova podzemne eksploatacije (Prilog 19 do Prilog 30) rađena je istom metodologijom kao i za presjeke površinske eksploatacije. S obzirom na to da se pri podzemnoj eksploataciji rudarski radovi odvijaju selektivno i nastavljaju se na prethodni blok optimizacije eksploatacije te se ne uklanja površinska otkrivka, dijelovi ležišta odnosno otkopani blokovi optimizacije neće se ponovno prikazivati na zasebnim presjecima za svaku konturu podzemnog kopa. Iz navedenog razloga napravljena je analiza površina za svaki blok modela optimizacije (Prilog 32) te se napretkom eksploatacije odnosno analize narednog bloka pribrajaju vrijednosti prethodnih blokova. Površine su na presjecima označavane u formatu "AA-B-C-D" (Tablica 19).

Tablica 19 – Označavanje površina presjeka podzemne eksploatacije

AA	**-**	**B**	**-**	**C**	**-**	**D**
KR – Krovina S1 – I. produktivni sloj S2 – II. produktivni sloj PO – Podina	-	Oznaka bloka optimizacije ležišta	-	Oznaka presjeka	-	Oznaka stupca

Slika 51 prikazuje Presjek 12 – 13 podzemne eksploatacije na kojem se vide izdvojene i označene površine nakon grafičke analize izdvojenih dijelova ležišta. Primjer označavanja

površine: S2-12-13-5 označava površinu II. produktivnog sloja za blok 12 na presjeku 13 u stupcu 5.



Slika 51 – Presjek 12 – 13 podzemne eksploatacije

5.9.6. ANALIZA VRIJEDNOSTI VOLUMENA OTKOPANE STIJENE PODZEMNIH KOPOVA

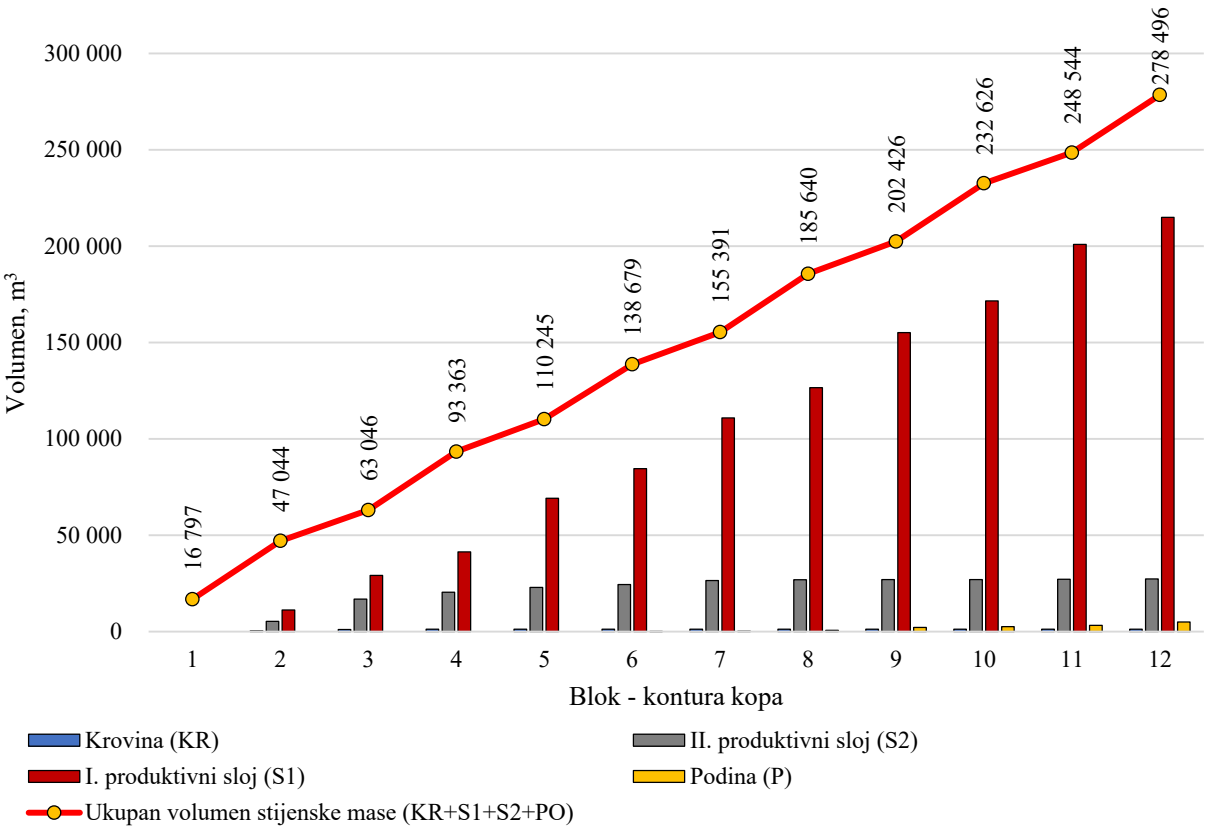
Izračun volumena podzemnih kopova napravljen je istom metodologijom kao i proračun volumena za površinske kopove korištenjem vrijednosti proračuna za podzemne kopove (Prilog 34).

Tablica 20 prikazuje rezultate proračuna volumena analiziranih podzemnih kopova (Prilog 36). Za svaki blok odnosno konturu podzemnog kopa prikazan je volumen stijene za krovinu (KR), II. produktivni sloj (S2), I. produktivni sloj (S1) i podinu (PO), a ukupni volumen stijenske mase za svaki od podzemnih kopova dobiven je zbrajanjem vrijednosti volumena (KR), (S2), (S1) i (PO).

Tablica 20 – Rezultati proračuna ukupnog volumena otkopanih slojeva podzemnih kopova

Blok – kontura kopa	**Krovina (KR), m^3**	**II. produktivni sloj (S2), m^3**	**I. produktivni sloj (S1), m^3**	**Podina (PO), m^3**	**Ukupno (KR + S2 +S1 +PO), m^3**
1	274	5 297	11 227	0	16 797
2	1 050	16 853	29 141	0	47 044
3	1 260	20 412	41 374	0	63 046
4	1 260	22 900	69 203	0	93 363
5	1 260	24 415	84 538	32	110 245
6	1 260	26 439	110 844	136	138 679
7	1 260	26 912	126 553	667	155 391
8	1 260	27 018	155 190	2 172	185 640
9	1 260	27 018	171 576	2 572	202 426
10	1 260	27 177	200 935	3 255	232 626
11	1 260	27 283	214 997	5 004	248 544
12	1 303	28 589	235 121	13 482	278 496

Vrijednosti proračuna volumena podzemnih kopova (Tablica 20) prikazane su grafički (Slika 52) te se iz grafičkog prikaza može vidjeti odnos volumena stijenske mase podzemnih kopova i ukupnog volumena otkopane stijenske mase.



Slika 52 – Odnos volumena otkopane stijenske mase slojeva podzemnih kopova

Iz grafičkog odnosa volumena stijenske mase podzemnih kopova (Slika 52) može se zaključiti da je volumen stijene I. produktivnog sloja (S1) znatno veći u odnosu na ukupni volumen II. produktivnog sloja (S2), sloja krovine (KR) i sloja podine (PO). S napretkom eksploatacije blokova optimizacije (blok 1 do 12) gotovo se linearno povećava volumen stijene I. produktivnog sloja (S1).

Volumen stijenske mase II. produktivnog sloja (S2) povećava se do bloka 8 te između blokova 8 i 9 nema promjene volumena, a nakon bloka 9 ponovno dolazi do promjena volumena II. produktivnog sloja (S1).

Između bloka optimizacije eksploatacije 1 i 4 podina (PO) nije zahvaćena rudarskim radovima te se eksploatira tek od bloka 5 nakon kojeg se javlja povećanje volumena zahvaćene podine.

Volumen krovine (KR) zahvaćene eksploatacijom nalazi se na blokovima 1, 2, 3 i 12 te tako nema promjene volumena otkrivke od bloka 4 do 11.

Ukupan volumen stijene eksploatirane tijekom otkopavanja blokova optimizacije eksploatacije pokazuje relativno linearan rast. Nelinearnost u ukupnom volumenu otkopane stijenske mase javlja se zbog ostavljanja potpornih stupova tijekom eksploatacije blokova 1, 3, 5, 7, 9 i 11.

5.9.7. VOLUMEN KOMERCIJALNIH BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA I JALOVINE PRODUKTIVNIH SLOJEVA PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Za razliku od površinske, u podzemnoj eksploataciji a-gk koristi se selektivni pristup, uz naglasak na sigurnost, otkopavaju se najvrjedniji dijelovi ležišta uz ostavljanje manje vrijednih dijelova u zaštitnim stupovima te u potpunosti izostaje površinsko otkopavanje otkrivke.

Analogno izračunu volumena blokova a-gk koji se može dobiti površinskom eksploatacijom za I. i II. produktivni sloj izražen je ukupan volumen blokova a-gk koji se može dobiti podzemnom eksploatacijom za I. produktivni sloj (Tablica 21) i II. produktivni sloj (Tablica 22) korištenjem koeficijenata iskorištenja (k_i) (Tablica 14).

Tablica 21 – Volumen blokova a-gk i jalovine za I. produktivni sloj podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	**I. produktivni sloj (S1), m^3**	**Koeficijent iskorištenja za S1, ki-1**	**Volumen blokova a-gk za S1, m^3**	**Volumen jalovine za S1, m^3**
1	11 227	0,31	3 480	7 746
2	29 141	0,31	9 034	20 107
3	41 374	0,31	12 826	28 548
4	69 203	0,31	21 453	47 750
5	84 538	0,31	26 207	58 331
6	110 844	0,31	34 362	76 482
7	126 553	0,31	39 231	87 321
8	155 190	0,31	48 109	107 081
9	171 576	0,31	53 189	118 388
10	200 935	0,31	62 290	138 645
11	214 997	0,31	66 649	148 348
12	235 121	0,31	72 888	162 234

Tablica 22 – Volumen blokova a-gk i jalovine za II. produktivni sloj podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	II. produktivni sloj (S2), m^3	Koeficijent iskorištenja za S2, ki-2	Volumen blokova a-gk za S2, m^3	Volumen jalovine za S2, m^3
1	5 297	0,57	3 019	2 277
2	16 853	0,57	9 606	7 247
3	20 412	0,57	11 635	8 777
4	22 900	0,57	13 053	9 847
5	24 415	0,57	13 917	10 498
6	26 439	0,57	15 070	11 369
7	26 912	0,57	15 340	11 572
8	27 018	0,57	15 400	11 618
9	27 018	0,57	15 400	11 618
10	27 177	0,57	15 491	11 686
11	27 283	0,57	15 551	11 732
12	28 589	0,57	16 296	12 293

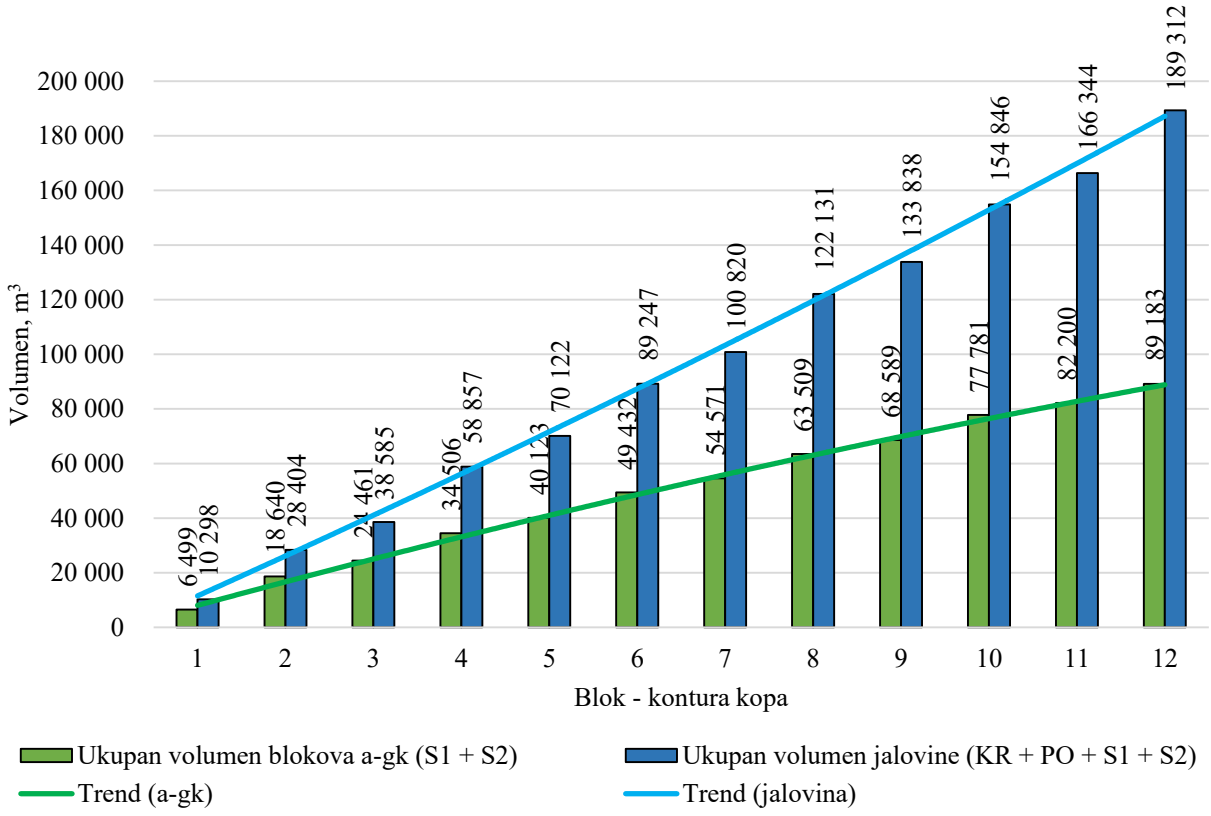
5.9.8. UKUPAN VOLUMEN KOMERCIJALNIH BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA I JALOVINE PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Kao i kod površinske eksploatacije, ukupan volumen komercijalnih blokova dobiva se zbrajanjem vrijednosti volumena komercijalnih blokova za I. i II. produktivni sloj, a ukupan volumen jalovine predstavlja zbroj volumena slojeva krovine (KR) i podine (PO) te jalovine u produktivnim slojevima (S1 i S2) (Tablica 23).

Tablica 23 – Ukupan volumen blokova a-gk i jalovine podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	Ukupan volumen blokova a-gk (S1 + S2), m^3	Ukupan volumen jalovine (KR + PO + S1 + S2), m^3
1	6 499	10 298
2	18 640	28 404
3	24 461	38 585
4	34 506	58 857
5	40 123	70 122
6	49 432	89 247
7	54 571	100 820
8	63 509	122 131
9	68 589	133 838
10	77 781	154 846
11	82 200	166 344
12	89 183	189 312

Slika 53 grafički prikazuje odnos ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk podzemnih kopova.



Slika 53 – Odnos ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk podzemnih kopova

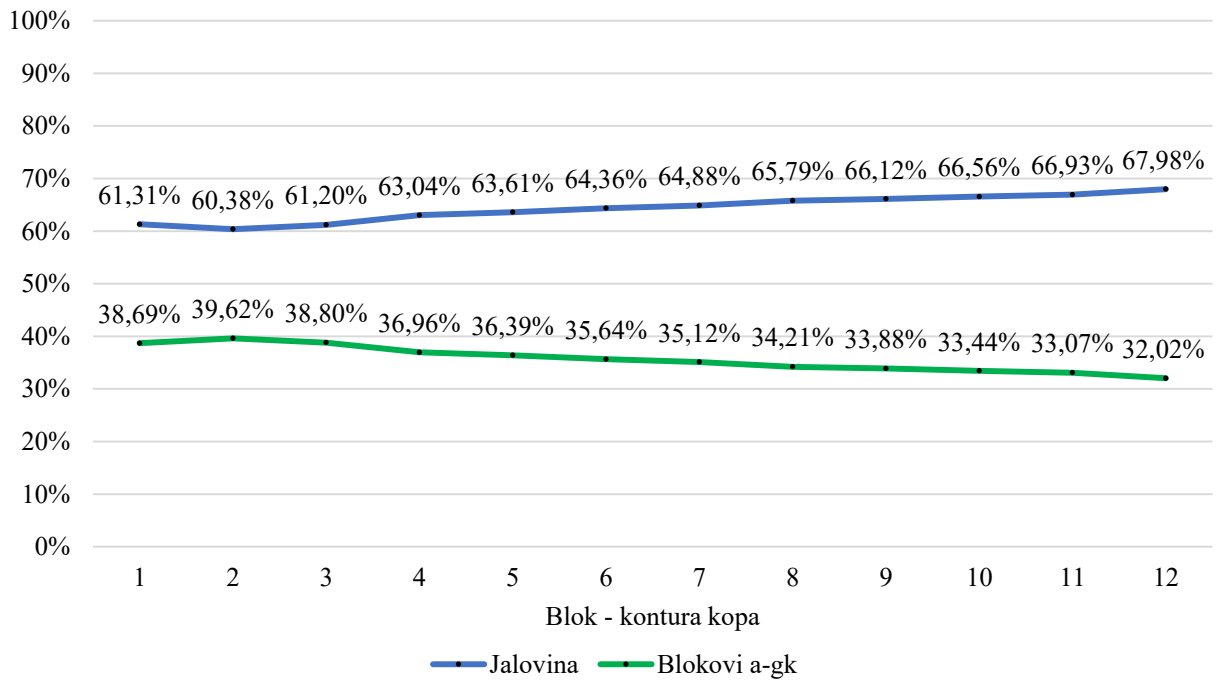
Iz grafičkog prikaza odnosa ukupnog volumena jalovine i blokova a-gk podzemnih kopova vidljivo je da je volumen jalovine u odnosu na volumen blokova a-gk veći za sve završne konture podzemnih kopova. Povećanje volumena blokova a-gk od bloka 1 do 12 pokazuje linearan rast što je i slučaj s jalovinom s time da se volumen jalovine znatnije/strmije povećava u odnosu na volumen blokova a-gk. Volumen jalovine u odnosu na volumen blokova a-gk za blok 1 je 1,5 puta veći dok je za blok 12 taj odnos neznatno uvećan te približno iznosi 2 puta. Trend linija ukupnog volumena jalovine iz navedenog je razloga strmija u odnosu na trend liniju blokova a-gk s time da obje trend linije rastu linearno.

Stavljanjem postotnih odnosa volumena jalovine i blokova a-gk dobio se odnos volumena po bloku odnosno završnoj konturi podzemnog kopa (Tablica 24).

Tablica 24 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi podzemnog kopa

Blok – kontura kopa	**Jalovina, %**	**Blokovi a-gk, %**
1	61,31	38,69
2	60,38	39,62
3	61,20	38,80
4	63,04	36,96
5	63,61	36,39
6	64,36	35,64
7	64,88	35,12
8	65,79	34,21
9	66,12	33,88
10	66,56	33,44
11	66,93	33,07
12	67,98	32,02

Temeljem izračunatih postotnih odnosa jalovine i blokova a-gk napravljen je njihov grafički prikaz (Slika 54).



Slika 54 – Postotni odnos volumena jalovine i blokova a-gk po konturi podzemnog kopa

Volumen blokova a-gk u odnosu na volumen jalovine od bloka 1 do 2 pokazuje blagi porast u iznosu od oko 1 % odnosno s 38,69 % na 39,62 % (Slika 54). Nakon bloka 2 udio blokova a-gk u ukupnom otkopanom volumenu stijenske mase pokazuje konstantan blagi pad udjela koji prosječno iznosi oko 1 %. Udio blokova a-gk u ukupnom volumenu otkopane stijene za sve blokove optimizacije eksploatacije kreće se u rasponu od 32,02 % do 38,69 % te prosječno iznosi 35,65 %. Sukladno volumenu blokova a-gk volumen jalovine od bloka 1 do 2 smanjuju se sa 61,31 % na 60,38 % te se od bloka 2 do 12 konstantno povećavaju u prosječnom iznosu od 1 %. Udio jalovine u ukupnom volumenu otkopane stijene za sve blokove optimizacije eksploatacije kreće se u rasponu od 61,31 % do 67,98 % te prosječno iznosi 64,35 %.

6. EKONOMSKA ANALIZA KOPOVA

Podzemna eksploatacija a-gk bit će ekonomski opravdana u odnosu na površinsku eksploataciju a-gk ukoliko su ukupni troškovi podzemne eksploatacije manji u odnosu na ukupne troškove površinske eksploatacije a-gk što se može prikazati pojednostavljeno izrazom (8)

$$T_{PodE} < (T_{PovE} + T_o + T_r) \tag{8}$$

pri čemu je:

T_{PodE} = troškovi podzemne eksploatacije a-gk, MJ,

T_{PovE} = troškovi površinske eksploatacije a-gk, MJ,

T_o = troškovi površinske otkrivke, MJ,

T_r = troškovi rekultivacije terena, MJ.

Napomena: proračun je prikazan u monetarnim jedinicama (MJ) s time da 1 MJ odgovara vrijednosti od 1 €.

Kako bi se odredila profitabilnost eksploatacije, tj. granična kontura pri kojoj je eksploatacija ekonomski opravdana, potrebno je odrediti ekonomske odnosno tržišne vrijednosti koje se mogu ostvariti prodajom mineralne sirovine te iznos ukupnih troškova pridobivanja mineralne sirovine što se najčešće radi na samom početku projekta tj. prije početka radova kroz preliminarne studije, predinvesticijske i investicijske studije (Tatiya, 2013).

Prema Galić (2001) neto vrijednost kopa može se odrediti korištenjem izraza (9)

$$D = E \cdot (C_T - C_E) \tag{9}$$

pri čemu je:

D – dobit kopa, MJ,

E – ukupan volumen blokova a-gk – ekvivalent, m^3,

C_T – tržišna/prodajna cijena korisne mineralne sirovine, MJ/m^3,

C_E – prosječni trošak eksploatacije, MJ/m^3.

Sukladno izrazu (9) može se izraziti prihod (P) za svaki od promatranih kopova korištenjem izraza (10).

$$P = E \cdot C_T \tag{10}$$

Ukupni trošak eksploatacije (T) predstavljen je izrazom (11).

$$T = E \cdot C_E \tag{11}$$

Modificiranjem izraza (11) dobiva se izraz (12) kojim je prikazana cijena eksploatacije neto bloka.

$$C_E = \frac{T}{E_t} \tag{12}$$

6.1. OSNOVNE PRETPOSTAVKE EKONOMSKIH MODELA KOPOVA

6.1.1. POVRŠINSKI KOP (1. KOP)

6.1.1.1. Dobit

Dobit (profit) 1. kopa, odnosno prvog dijela eksploatacije a-gk koji se izvodi površinskim putem, može se prikazati izrazom (13)

$$D_1 = E_1 \cdot C_T - T_1 \tag{13}$$

pri čemu je:

D_1 – dobit (profit) 1. kopa, MJ,

E_1 – ekvivalent 1. kopa (ukupan neto volumen a-gk), m^3,

C_T – tržišna cijena bloka, MJ/m^3,

T_1 – prosječan trošak eksploatacije 1. kopa, MJ.

6.1.1.2. Ekvivalent

Ekvivalent 1. kopa predstavlja ukupan neto volumen blokova a-gk koji se može prikazati izrazom (14)

$$E_1 = (S_{1-1} \cdot k_{i-s1} + S_{2-1} \cdot k_{i-s2}) \cdot L \tag{14}$$

pri čemu je:

S_{1-1} – površina I. produktivnog sloja površinske eksploatacije, m^2,

S_{2-1} – površina II. produktivnog sloja površinske eksploatacije, m^2,

k_{i-s1} – koeficijent iskorištenja I. produktivnog sloja,

k_{i-s2} – koeficijent iskorištenja II. produktivnog sloja.

6.1.1.3. Trošak površinske eksploatacije

Za 1. kop trošak eksploatacije (T_{e-1}) predstavlja trošak eksploatacije produktivnih slojeva a-gk i trošak uklanjanja jalovine koja kod 1. kopa predstavlja otkrivku, podinu i jalovinu u produktivnim slojevima te trošak rekultivacije terena, a može se prikazati izrazom (15)

$$T_{e-1} = T_{s-1} + T_{j-1} + T_{r-1} \tag{15}$$

pri čemu je:

T_{s-1} – trošak površinske eksploatacije produktivnih slojeva a-gk, MJ,

T_{j-1} – trošak uklanjanja jalovine, MJ,

T_{r-1} – trošak rekultivacije terena, MJ.

Trošak eksploatacije slojeva (T_{s-1}) za 1. kop ležišta a-gk sastoji se od troška eksploatacije I. i II. produktivnog sloja, a može se prikazati izrazom (16)

$$T_{s-1} = T_{s1-1} + T_{s2-1} \tag{16}$$

pri čemu je:

T_{s1-1} – trošak površinske eksploatacije I. produktivnog sloja, MJ,

T_{s2-1} – trošak površinske eksploatacije II. produktivnog sloja, MJ.

Trošak eksploatacije I. produktivnog sloja (T_{s1-1}) prikazan je izrazom (17)

$$T_{s1-1} = C_{s-1} \cdot V_{s1-1} \tag{17}$$

pri čemu je:

C_{s-1} – jedinična cijena eksploatacije sloja za površinsku eksploataciju, MJ/m^3,

V_{s1-1} – volumen I. produktivnog sloja 1. kop, m^3.

Trošak eksploatacije II. produktivnog sloja (T_{s2-1}) prikazan je izrazom (18)

$$T_{s2-1} = C_{s-1} \cdot V_{s2-1} \tag{18}$$

pri čemu je:

V_{s2-1} – volumen II. produktivnog sloja, m^3.

Volumen I. produktivnog sloja 1. kopa (V_{s1-1}) prikazan je izrazom (19).

$$V_{s1-1} = S_{1-1} \cdot L \tag{19}$$

Volumen II. produktivnog sloja (V_{s2-1}) prikazan je izrazom (20).

$$V_{s2-1} = S_{2-1} \cdot L \tag{20}$$

Ako se u izraz (16) za trošak eksploatacije slojeva uvrste izrazi (17) i (18) za jediničnu cijenu eksploatacije I. i II. sloja, dobiva se izraz za trošak eksploatacije obaju produktivnih slojeva prikazan izrazom (21).

$$T_{s1} = C_{s-1} \cdot (V_{s1-1} + V_{s2-1}) \tag{21}$$

Trošak uklanjanja otkrivke za 1. kop (T_{ot-1}) predstavlja troškove koji su vezani za uklanjanje otkrivke iznad produktivnih slojeva, a može se prikazati izrazom (22)

$$T_{ot-1} = C_{ot-1} \cdot V_{ot-1} \tag{22}$$

pri čemu je:

C_{ot-1} – cijena površinskog uklanjanja otkrivke, MJ/m^3,

V_{ot-1} – volumen otkrivke, m^3.

Volumen otkrivke za 1. kop može se prikazati izrazom (23)

$$V_{ot-1} = OT_1 \cdot L \tag{23}$$

pri čemu je:

OT_1 – površina otkrivke, m^2.

Trošak uklanjanja podine za 1. kop (T_{po-1}) predstavlja troškove koji su vezani za uklanjanje podine, odnosno stijenske mase koja se nalazi u ležištu (npr. između produktivnih slojeva ležišta a-gk ili direktno ispod njih). S obzirom na to da je nekada nužno ukloniti podinu kako bi se mogla dobiti kontura površinskog kopa prema projektnim parametrima, trošak uklanjanja podine može se prikazati izrazom (24)

$$T_{po-1} = C_{po-1} \cdot V_{po-1} \tag{24}$$

pri čemu je:

C_{po-1} – cijena površinskog uklanjanja podine, MJ/m^3,

V_{po-1} – volumen podine, m^3.

Volumen podine za 1. kop može se prikazati izrazom (25)

$$V_{po-1} = PO_1 \cdot L \tag{25}$$

pri čemu je:

PO_1 – površina podine za 1. kop, m^2.

Trošak uklanjanja jalovine iz produktivnih slojeva a-gk za 1. kop (T_{js-1}) predstavlja troškove koji su vezani za uklanjanje jalovine koja se nalazi u produktivnim slojevima a-gk, a može se prikazati izrazom (26)

$$T_{js-1} = C_{js-1} \cdot V_{js-1} \tag{26}$$

pri čemu je:

C_{js-1} – cijena uklanjanja jalovine iz slojeva a-gk, MJ/m^3,

V_{js-1} – volumen jalovine iz slojeva a-gk, m^3.

Trošak rekultivacije terena za 1. kop (T_{r-1}) predstavlja troškove koji su vezani za vraćanje rudarskim radovima zauzetog prostora u prirodno stanje odnosno prije rudarskih radova. Troškovi rekultivacije terena iskazuju se po m^3 mineralne sirovine (a-gk) ili po m^2 rudarskim radovima zauzetog prostora (Bojčetić et al., 2016). Troškovi rekultivacije mogu se prikazati izrazom (27)

$$\begin{aligned} T_{r-1} &= C_{r-1} \cdot E_1 \\ T_{r-1} &= C_{r-1} \cdot P_1 \end{aligned} \tag{27}$$

pri čemu je:

C_{r-1} – cijena rekultivacije terena, MJ/m^3 ili MJ/m^2,

P_1 – površina zauzeta rudarskim radovima, m^2.

6.1.1.4. Uklanjanje otkrivke bagerom

Za potrebe proračuna uklanjanja otkrivke bagerom korišten je bager s hidrauličkim čekićem, a osnovne karakteristike bagera i hidrauličkog čekića prikazane su tablično (Tablica 39).

Proračun kapaciteta bagera s hidrauličkim čekićem ($Q_{\check{C}}$) napravljen je temeljem proračuna iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016) korištenjem izraza (28)

$$Q_{\check{C}} = \frac{3\,600}{t_{c\check{c}}} \cdot O_k \cdot k_{pb} \cdot k_i = \frac{3\,600}{17} \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 16{,}3\ {}^{m^3}/_{h} \tag{28}$$

pri čemu je:

$t_{c\check{c}}$ – stvarno vrijeme ciklusa odlamanja komada stijene, s,

$$t_{c\check{c}} = \frac{n_u \cdot 60}{t_{min}} + t_p = \frac{29{,}7 \cdot 60}{250} + 10 = 17\ s,$$

n_u – potreban broj udaraca klipa za odvaljivanje,

$$n_u = \frac{P_g}{P_{\check{C}}} + 1 = \frac{120}{4{,}04} + 1 = 29{,}7,$$

P_g – prosječna tlačna čvrstoća kamena, 120 MPa,

$P_{\check{C}}$ – tlak koji proizvodi masa hidrauličkog čekića, MPa,

$$P_{\check{C}} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{4\,120 \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-6}}{0{,}01} = 4{,}04\ MPa,$$

m – masa čekića, kg,

g – gravitacija = 9,81 m/s^2,

A – površina koju tlači vrh hidrauličkog čekića, m^2,

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0{,}114^2 \cdot 3{,}14}{4} = 0{,}01\ m^2,$$

d – promjer vrha hidrauličkog čekića, m,

t_{min} – broj udaraca klipa u minuti, n/min,

t_p – vrijeme potrebno za postavljanje čekića u početni položaj, 10 s,

O_k – volumen jednog komada stijene koji čekić odlomi u jednom ciklusu, m^3,

$$O_k = \check{s}_k \cdot l_k \cdot h_k = 0{,}4 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}6 = 0{,}12\ m^3,$$

$\check{s}_k$ – širina/dubina pojasa, 0,4 m,

l_k – dužina komada, 0,5 m,

h_k – visina komada, 0,6 m,

k_{pb} – koeficijent gubitka vremena zbog premještanja bagera, 0,8,

k_i – koeficijent iskorištenja ukupnog radnog vremena, 0,8.

6.1.1.5. Izrada usjeka

Prije početka ali i tijekom površinske eksploatacije potrebno je izraditi usjek (odabran je trapezni oblik usjeka) kojim će se započeti eksploatacija. Izradom usjeka pripremit će se etaža za razvoj rudarskih radova stvaranjem slobodnih površina koje omogućuju pridobivanje osnovnih blokova projektiranih dimenzija (Slika 56). Usjek će se izrađivati na središnjem dijelu etaže kombiniranim rezanjem s time da će:

- lančana sjekačica rezati horizontalne rezove, a
- dijamantna žična pila rezat će vertikalne rezove.

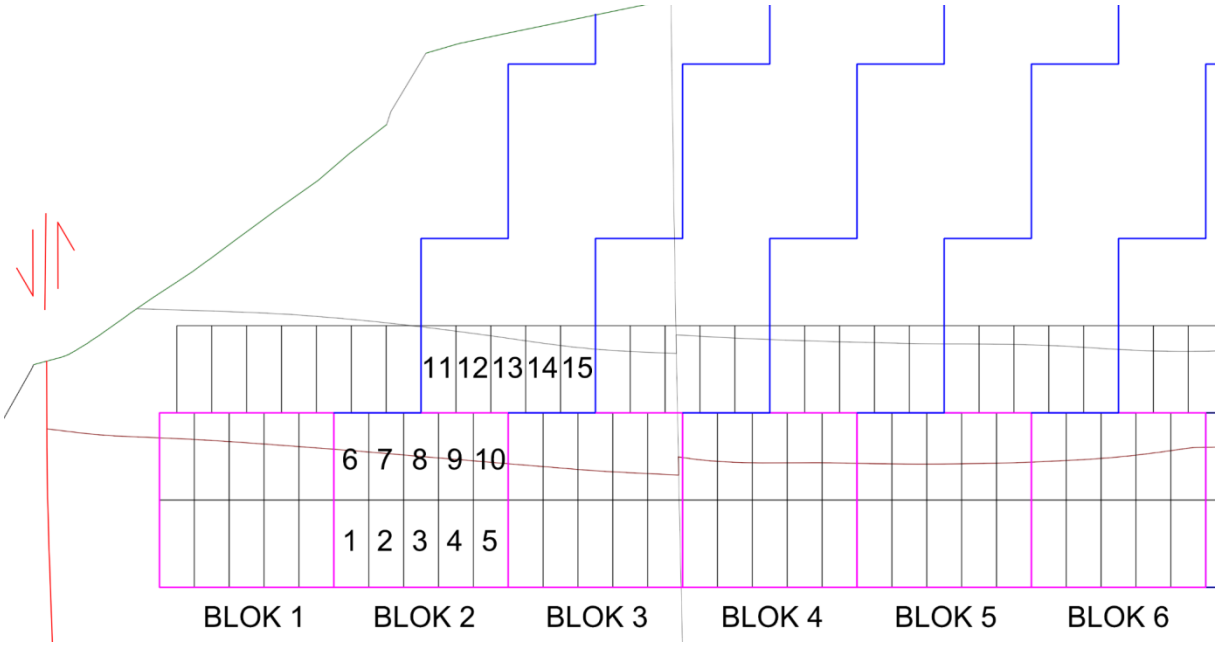
Trapezni usjek formirat će se u dva zahvata, odnosno formirat će se dva osnovna bloka s time da će razina narednog horizontalnog reza biti viša od prethodnog za debljinu mača lančane sjekačice. Dimenzije trapeznog usjeka prikazane su tablično (Tablica 25).

Tablica 25 – Dimenzije trapeznog usjeka

Dimenzije	Iznos
Dubina usjeka	3,0 m
Širina usjeka (čela)	11 m
Dubina usjeka (dva bloka širine 1,5 m)	3,0 m
Visina usjeka	≤ 7,5 m (u proračunu 7,0 m)
Kut između vertikalnih rezova	100°
Volumen osnovnog bloka	105 m^3
Ukupan volumen trapeznog usjeka	220,5 m^3

Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Prosječan broj trapeznih usjeka za svaki blok optimizacije eksploatacije odnosno završnu konturu površinskog kopa, korišten pri izračunu površina rezanja lančane sjekačice i dijamantne žične pile, usvojen je u iznosu od 15 trapeznih usjeka (Slika 55).

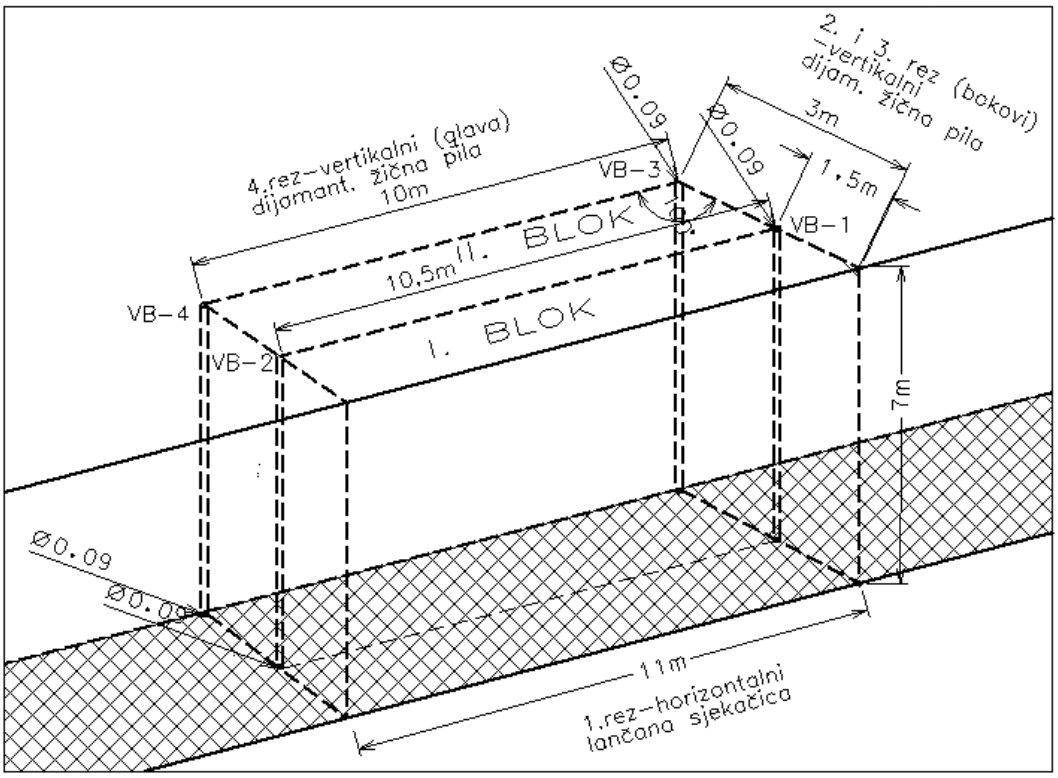


Slika 55 – Shematski prikaz trapeznih usjeka po bloku optimizacije eksploatacije

Pri izradi jednog trapeznog usjeka potrebno je izraditi:

- 4 vertikalne bušotine duljine 7,2 m (probušenje 0,2 m), promjera Ø90 mm što ukupno iznosi 28,8 m bušotina za provlačenje dijamantne žice,
- horizontalne rezove lančanom sjekačicom u ukupnom iznosu od 31,5 m^2,
- vertikalne rezove dijamantnom žičnom pilom u ukupnom iznosu od 185,5 m^2.

Ukupna površina rezanja pri izradi trapeznog usjeka za dobivanje osnovnih blokova dimenzija 11,0…10,5 x 7,0 x 1,5 i 10,5…10,0 x 7,0 x 1,5 m iznosi 217 m^2.



Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Slika 56 – Shematski prikaz izrade trapeznog usjeka

6.1.1.6. Dobivanje završnih blokova iz trapeznog usjeka

Trapezni usjek ima volumen od 220,5 m^3 (31,5 m^2 površine x 7 m visine) od čega će se dobiti dva osnovna bloka trapezoidnog oblika. U nastavku su prikazane površine rezanja kako bi se iz osnovnih blokova dobili manji blokovi iz kojih se dobivaju završni blokovi (Tablica 26).

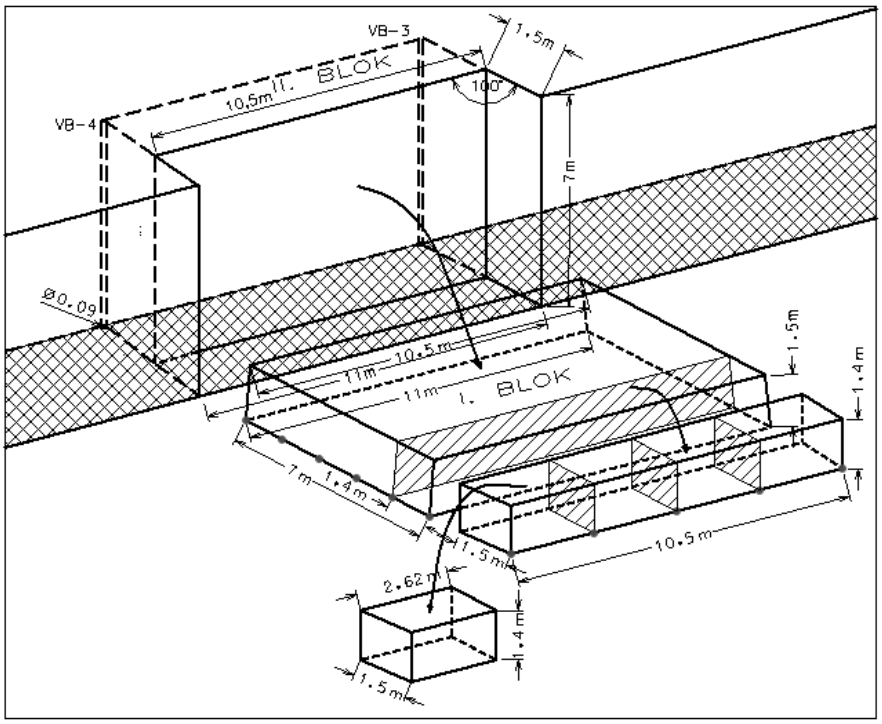
Tablica 26 – Površine dobivanja manjih i završnih blokova iz trapeznog usjeka

	I. osnovni blok		**II. osnovni blok**	
Površina rezanja osnovnog bloka za manje blokove (11+10,5) x 1,5/2	16,125	m^2	15,375	m^2
Broj rezova	4	-	4	-
Površina vertikalnih rezova za dobivanje manjih blokova iz osnovnog bloka	**64,5**	**m^2**	**61,5**	**m^2**
Površina rezanja manjih blokova na završne blokove (1,5 x 1,4)	2,1	m^2	2,1	m^2
Broj rezova	3	-	3	-
Površina rezanja za dobivanje završnih blokova iz jednog manjeg bloka	6,3	m^2	6,3	m^2
Broj manjih blokova	5	-	5	-
Površina vertikalnih rezova za dobivanje završnih blokova iz manjih blokova	**31,5**	**m^2**	**31,5**	**m^2**

Da bi se iz trapeznog usjeka dobili završni blokovi, potrebno je ispiliti sljedeće površine za dobivanje:

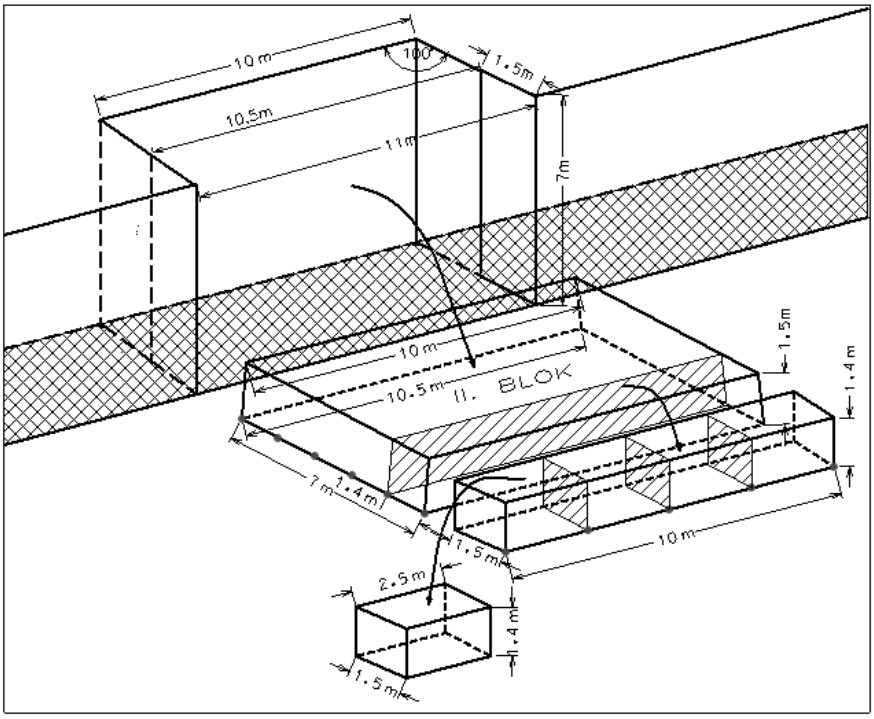
- dva osnovna bloka 217 m^2,
- manjih blokova iz osnovnih blokova 126 m^2,
- završnih blokova iz manjih blokova 63 m^2.

Ukupna površina rezanja pri izradi trapeznog usjeka za dobivanje završnih blokova dimenzija 2,0…3,0 x 1,5 x 1,2…1,4 m iznosi 406 m^2 od čega će se 374,5 m^2 površine rezati dijamantnom žičnom pilom (vertikalne površine), a 31,5 m^2 površine lančanom sjekačicom (horizontalne površine).



Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Slika 57 – Shema dobivanja i raspilavanja prvog osnovnog bloka iz trapeznog usjeka



Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

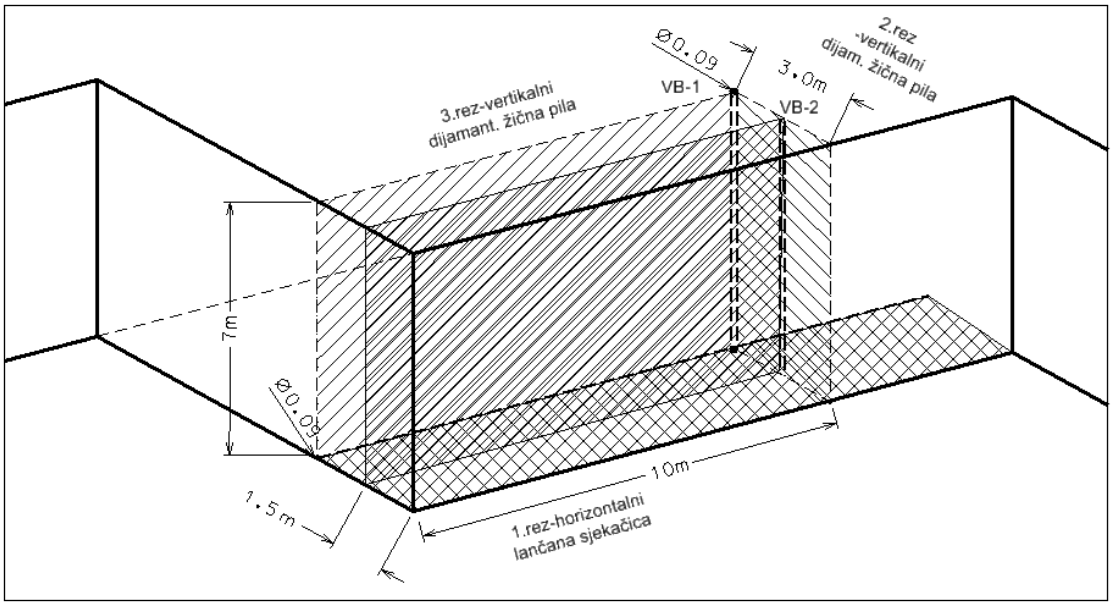
Slika 58 – Shema dobivanja i raspilavanja drugog osnovnog bloka iz trapeznog usjeka

6.1.1.7. Dobivanje osnovnih blokova na razvijenoj etaži

Za dobivanje osnovnih blokova (Tablica 27) na razvijenim etažama koristit će se kombinacija lančane sjekačice i dijamantne žične pile uz bušenje vertikalnih bušotina za provlačenje dijamantne žice (Slika 59).

Tablica 27 – Dimenzije osnovnog bloka

Dimenzije	Iznos
Širina osnovnog bloka	10,0 m
Visina osnovnog bloka (visina etaže)	7,0 m
Dubina osnovnog bloka	1,5 m
Ukupan volumen osnovnog bloka	105,0 m^3



Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Slika 59 – Shematski prikaz dobivanja osnovnog bloka s razvijene etaže

Za dobivanje osnovnih blokova a-gk s razvijene etaže potrebno je izraditi:

- 1 vertikalnu bušotinu duljine 7,2 m (probušenje 0,2 m) promjera Ø90 mm,
- horizontalni rez lančanom sjekačicom u iznosu od 15,0 m^2,
- vertikalne rezove dijamantnom žičnom pilom u ukupnom iznosu od 80,5 m^2.

Ukupna površina rezanja za dobivanje osnovnih blokova na razvijenoj etaži iznosi 95,5 m^2.

6.1.1.8. Dobivanje završnih blokova na razvijenoj etaži

Maksimalne dimenzije završnih blokova (Tablica 28) preuzete su iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016).

Tablica 28 – Maksimalne dimenzije završnih blokova

Oznaka	Uvjet	Iznos	Jedinica
Visina bloka	≤	1,20	m
Širina bloka	≤	1,50	m
Dužina bloka	≤	3,00	m
Volumen bloka	-	5,40	m^3
Masa bloka	-	14,5	t

U nastavku su prikazane površine rezanja koje je potrebno odrezati kako bi se iz osnovnog bloka dobili manji blokovi iz kojih se dobivaju završni blokovi (Tablica 29).

Tablica 29 – Površine dobivanja manjih i završnih blokova s razvijene etaže

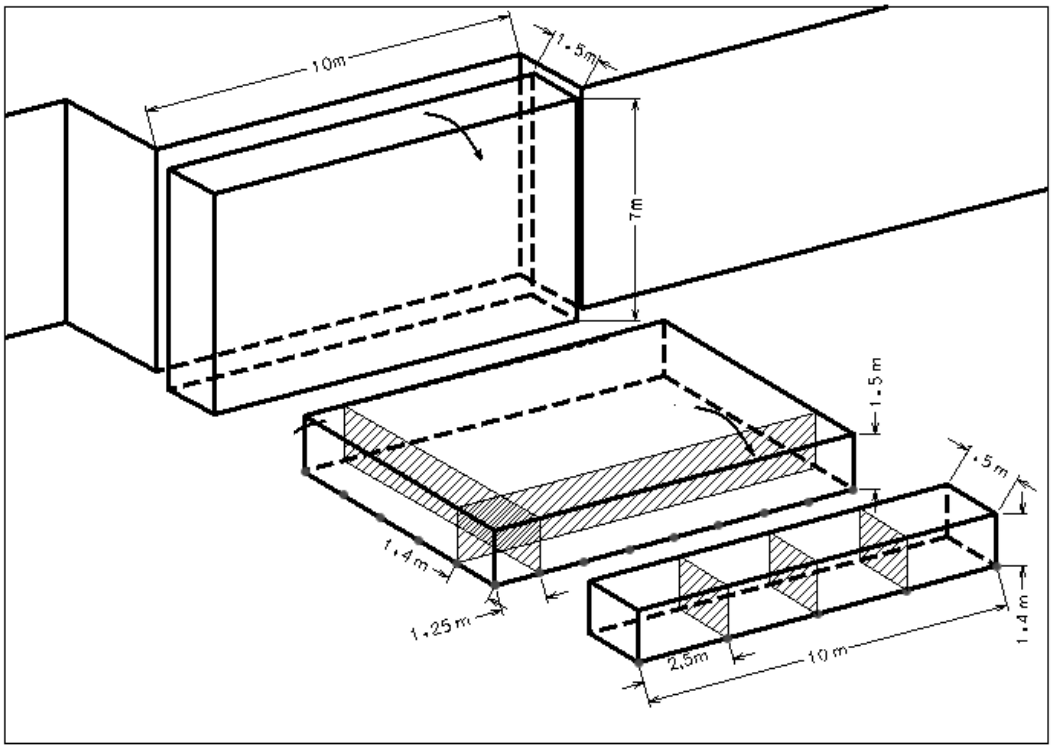
	I. osnovni blok	
Površina rezanja osnovnog bloka za manje blokove (10,0 x 1,5)	15	m^2
Broj rezova	4	-
Površina vertikalnih rezova za dobivanje manjih blokova iz osnovnog bloka	**60**	**m^2**
Površina rezanja manjih blokova na završne blokove (1,5 x 1,4)	2,1	m^2
Broj rezova	3	-
Površina rezanja za dobivanje završnih blokova iz jednog manjeg bloka	6,3	m^2
Broj manjih blokova	5	-
Površina vertikalnih rezova za dobivanje završnih blokova iz manjih blokova	**31,5**	**m^2**

Za dobivanje završnih blokova s razvijene etaže potrebno je izraditi reznih površina:

- osnovnog bloka 95,5 m^2

- manjih blokova iz osnovnih blokova 60 m^2
- završnih blokova iz manjih blokova 31,5 m^2.

Ukupna površina rezanja za dobivanje završnih blokova s razvijene etaže iznosi 187,0 m^2 od čega će 172,0 m^2 površina biti piljeno dijamantnom žičnom pilom (vertikalne površine), a 15,0 m^2 površina lančanom sjekačicom (horizontalne površine).



Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Slika 60 – Shematski prikaz dobivanja završnih blokova iz osnovnog bloka na etaži

6.1.1.9. Obaranje blokova

Osnovni blokovi koji će se formirati tijekom izrade trapeznog usjeka i s razvijenih etaža moraju se oboriti na osnovni plato kako bi se iz njih mogli dobiti završni blokovi, a obaranje će se izvoditi kombinacijom bagera i utovarivača. Blokovi će se obarati na prednju plohu (čelo) čije će dimenzije biti 11,0 x 7,0 do 10,0 x 7,0 m.

Na mjestu na kojem se očekuje da će osnovni blok pasti, potrebno je napraviti posteljicu od sipkog materijala kako ne bi prilikom pada puknuo te se time javili gubici u obliku manjeg iskorištenja stijenske mase.

6.1.2. PODZEMNI KOP (2. KOP)

6.1.2.1. Dobit

Dobit (profit) za 2. kop može se izraziti modificiranjem izraza (13) tako da se koriste vrijednosti za podzemnu eksploataciju, što je prikazano izrazom (29)

$$D_2 = E_2 \cdot C_T - T_2 \tag{29}$$

pri čemu je:

D_2 – dobit (profit) 2. kopa, MJ,

E_2 – ekvivalent 2. kopa (ukupan neto volumen a-gk), m^3,

T_2 – prosječan trošak eksploatacije 2. kopa, MJ.

6.1.2.2. Ekvivalent

Ekvivalent 2. kopa može se prikazati modificiranjem izraza (14) uvrštavanjem vrijednosti za podzemnu eksploataciju te ga prikazati izrazom (30)

$$E_2 = (S_{1-2} \cdot k_{i-s1} + S_{2-2} \cdot k_{i-s2}) \cdot L \tag{30}$$

pri čemu je:

S_{1-2} – površina I. produktivnog sloja podzemne eksploatacije, m^2,

S_{2-2} – površina II. produktivnog sloja podzemne eksploatacije, m^2.

6.1.2.3. Trošak podzemne eksploatacije

Za 2. kop trošak eksploatacije predstavlja trošak eksploatacije sloja i trošak uklanjanja jalovine koja kod 2. kopa predstavlja krovinu, podinu i jalovinu u produktivnim slojevima, a može se prikazati izrazom (31)

$$T_{e-2} = T_{s-2} + T_{j-2} \tag{31}$$

pri čemu je:

T_{e-2} – trošak eksploatacije za 2. kop, MJ,

T_{s-2} – trošak podzemne eksploatacije sloja, MJ,

T_{j-2} – trošak podzemnog uklanjanja jalovine, MJ.

Trošak eksploatacije sloja za 2. kop ležišta sastoji se od troška podzemne eksploatacije I. i II. produktivnog sloja, a može se prikazati izrazom (32)

$$T_{s-2} = T_{s1-2} + T_{s2-2} \tag{32}$$

pri čemu je:

T_{s-2} – trošak eksploatacije sloja za 2. kop, MJ,

T_{s1-2} – trošak podzemne eksploatacije I. produktivnog sloja, MJ,

T_{s2-2} – trošak podzemne eksploatacije II. produktivnog sloja, MJ.

Trošak podzemne eksploatacije I. produktivnog sloja prikazan je izrazom (33)

$$T_{s1-2} = C_{s-2} \cdot V_{s1-2} \tag{33}$$

pri čemu je:

T_{s1-2} – trošak podzemne eksploatacije I. produktivnog sloja, MJ,

C_{s-2} – jedinični trošak eksploatacije sloja za 2. kop, MJ/m^3,

V_{s1-2} – volumen I. produktivnog sloja 2. kop, m^3.

Trošak podzemne eksploatacije II. produktivnog sloja prikazan je izrazom (34)

$$T_{s2-2} = C_{s-2} \cdot V_{s2-2} \tag{34}$$

pri čemu je:

V_{s2-2} – volumen II. produktivnog sloja, m^3.

Volumen I. produktivnog sloja 2. kop (V_{s1-2}) prikazan je izrazom (35).

$$V_{s1-2} = S_{1-2} \cdot L \tag{35}$$

Volumen II. produktivnog sloja (V_{s2-2}) prikazan je izrazom (36).

$$V_{s2-2} = S_{2-2} \cdot L \tag{36}$$

Ako se u izraz (32) za trošak eksploatacije sloja uvrste izrazi (33) i (34) za trošak eksploatacije I. i II. sloja, dobiva se izraz za trošak eksploatacije obaju slojeva, prikazan izrazom (37).

$$T_{s2} = C_{s-2} \cdot (V_{s1-2} + V_{s2-2}) \tag{37}$$

Trošak uklanjanja jalovine za 2. kop predstavlja troškove koji proizlaze kao trošak uklanjanja krovine, podine i jalovine iz produktivnih slojeva, a može se prikazati izrazom (38)

$$T_{j-2} = C_{j-2} \cdot V_{j-2} \tag{38}$$

pri čemu je:

C_{j-2} – jedinični trošak uklanjanja jalovine za 2. kop, MJ/m^3,

V_{j-2} – volumen jalovine za 2. kop, m^3.

Volumen jalovine za 2. kop može se prikazati izrazom (39)

$$V_{j-2} = V_{kr-2} + V_{po-2} + V_{js-2} \tag{39}$$

pri čemu je:

V_{kr-2} – volumen krovine za 2. kop, m^3,

V_{po-2} – volumen podine za 2. kop, m^3,

V_{js-2} – volumen jalovine iz produktivnih slojeva za 2. kop, m^3.

Volumen krovine za 2. kop može se prikazati izrazom (40)

$$V_{kr-2} = KR_2 \cdot L \tag{40}$$

pri čemu je:

KR_2 – površina krovine, m^2.

Volumen podine za 2. kop može se prikazati izrazom (41)

$$V_{po-2} = PO_2 \cdot L \tag{41}$$

pri čemu je:

PO_2 – površina podine za 2. kop, m^2.

Volumen jalovine iz produktivnih slojeva a-gk za 2. kop može se prikazati izrazom (42).

$$V_{js-2} = (V_{s1-2} + V_{s2-2}) - E_2 \tag{42}$$

6.1.2.4. Dimenzije blokova i površine rezanja

Maksimalne dimenzije blokova koje će se dobivati direktnim rezanjem iz stijenske mase bit će istih dimenzija kao i pri površinskoj eksploataciji (Tablica 28).

Pri direktnom rezanju blokova potrebno je odrezati dio vertikalnih i dio horizontalnih površina u stijenskoj masi kako bi se dobili blokovi pretpostavljenih dimenzija (Tablica 30).

Tablica 30 – Površine rezanja pri direktnom pridobivanju blokova podzemne eksploatacije

Vrsta reza	Iznos površine rezanja	Oznaka
Horizontalni rez (1,5 x 3,0 x 2)	9,00	m^2
Vertikalni rez (1,2 x 3,0 x 2)	7,20	m^2
Ukupna površina rezanja za jedan blok	16,20	m^2

6.1.2.5. Odlamanje (kalanje) zadnje stranice blokova

Odlamanje zadnje stranice bit će izvedeno vodenim jastucima dimenzija 1000 x 1000 mm koji mogu podnijeti maksimalni pritisak od 100 bara utisnute vode. Vodeni se jastuk ubacuje u najviši rez, a lom zadnje stranice bloka događa se u nekoliko navrata s obzirom na to da se često događa da nakon što se odlomi zadnja stranica gornjeg bloka, on pada na niži blok te se uslijed težine gornjeg bloka događa odlamanje zadnjih stranica nižih blokova u drugom i trećem redu (Cotman, 2001). Drugim riječima, jednim vodenim jastukom moguće je odlomiti tri bloka.

6.1.2.6. Vjetrenje podzemnog kopa

Ukoliko se u podzemnom kopu upotrebljava oprema s dizelskim motorima, mora biti uspostavljeno mehaničko provjetravanje pomoću ventilatora, a slijepe prostorije moraju biti provjetravane kompresijskim ili kombiniranim načinom provjetravanja s time da sadržaj kisika u zraku na radilištu ne smije biti ispod 19 % (SL, 1978).

Volumen zraka za provjetravanje radilišta ovisna je o volumenu plina koji se oslobađa iz rude i okolnih stijena, volumenu plinova nakon miniranja, volumenu plinova i krutih čestica izgaranja motora s unutarnjim izgaranjem, minimalno potrebnoj brzini strujanja zraka, zaprašenosti i broju radnika. Volumen zraka potreban za provjetravanje prostorija, ovisno o prirodnim uvjetima i primijenjenoj tehnologiji, mora se određivati na temelju plinova i čađe od motora s unutarnjim izgaranjem pri čemu minimalan volumen svježega zraka ne smije biti manji od 4 m^3/kW/min. Ovisno o broju radnika na čelu radilišta potrebno je dovoditi minimalno 3 m^3/min/radniku, a u jamama dubljim od 400 metara ne smije volumen zraka biti manji od 4 m^3/min/radniku (SL, 1991).

Tablica 31 prikazuje neprekidne brzine strujanja zraka ovisno o tipu i namjeni podzemne prostorije.

Tablica 31 – Neprekidna brzina strujanja zraka u podzemnim prostorijama

Tip podzemne prostorije	Maksimalno (m/s)	Minimalno (m/s)
Na radilištima	4,0	0,25
U prostorijama za transport i redovni prolaz	8,0	0,25
U ventilacijskim prostorijama bez obzira na povremeni prolaz	10,0	-

Izvor: (SL, 1991)

Granične vrijednosti izloženosti (GVI) opasnim tvarima pri radu koje mogu biti prisutne u radnom okolišu određene su legislativom (NN, 2009). Tablica 32 prikazuje dopuštene koncentracije plinova radne atmosfere za 8-satno radno vrijeme.

Tablica 32 – GVI štetnih plinova

Plin	CO	CO_2	NO	NO_2	SO_2	Formaldehidi
GVI	30 ppm	5000 ppm	25 ppm	3 ppm	2 ppm	2 ppm

Izvor: (NN, 2009)

Standardne emisije ugljičnog monoksida (CO), emisije ugljikovodika (HC) i dušikovih oksida (NOx) te emisije onečišćujućih tvari u obliku čestica (PT) za EU stupanj IV. motore definirane su legislativom te su navedene tablično u nastavku (Tablica 33).

Tablica 33 – Standardi emisije za necestovne EU stupanj IV. dizelske motore

Kategorija	Neto snaga (kW)	Datum proizvodnje motora	Emisija (g/kWh)			
			CO	HC	NOx	PT
Q	$130 \leq P \leq 560$	2014.01	3,5	0,19	0,4	0,025

Izvor: (NN, 2015)

Proračun potrebnog volumena zraka za podzemnu eksploataciju a-gk računa se za sljedeće uvjete:

- volumen zraka potreban za razblaživanje ispušnih plinova
- volumen zraka koji je potrebno dovesti za mehanizaciju
- volumen zraka za radnike.

6.1.2.6.1. Volumen zraka potreban za razblaživanje ispušnih plinova

Proračun potrebnog volumena zraka za razblaživanje ispušnih plinova dizelske mehanizacije na GVI napravljen je prema proračunu preuzetog iz javnog seminara Proračun potrebnih količina zraka pri vjetrenju podzemnog kopa arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene (Farkaš, 2016), a izračunat je prema izrazu (43)

$$Q_{pl} = V_{gs} \cdot \frac{n}{C} \left({}^{m^3}/_{min} \right) \tag{43}$$

pri čemu je:

Q_{pl} – potreban volumen zraka za razblaživanje ispušnih plinova, m^3/min,

V_{gs} – ukupni volumen suhih produkata sagorijevanja ispušnih plinova dizelskih motora, m^3/min,

n – koncentracija opasnih plinova u ispušnim plinovima dizelskog stroja, ppm,

C – maksimalno dopuštena koncentracija opasnih plinova u jamskom zraku (Tablica 32), ppm.

Ukupni volumen suhih produkata sagorijevanja ispušnih plinova čini suma volumena pojedinačnih plinova te se računa prema relaciji (44) (Prelec, 2009)

$$V_{gs} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} = 1{,}867 \cdot m_c + 0{,}7 \cdot m_s + 0{,}79 \cdot V_Z \left[{}^{m_N^3}/_{kg_G} \right] \tag{44}$$

pri čemu je:

m_C, m_S – maseni udjeli, kg/kg ili m^3/kg,

V_Z – volumen dovedenog zraka, tj. stvaran volumen zraka za izgaranje, m^3.

Značajke standardnog dizelskog goriva prikazane su tablično (Tablica 34).

Tablica 34 – Značajke standardnog dizelskog goriva

Veličina	Jedinica	Dizel
Molekularna masa	g/mol	120 – 320
Sadržaj ugljika (C)	% mase	86,5
Sadržaj vodika (H)	% mase	13
Sadržaj kisika (O_2)	% mase	0
Sadržaj sumpora (S)	% mase	0,14
Sadržaj dušika (N)	% mase	0,015
Sadržaj pepela	% mase	0,01
Stehiometrijski volumen zraka	kg zraka / kg goriva	14,4
Gustoća (pri 15°C)	kg/m^3	835

Izvor: (Voća, 2002)

U stvarnosti nije realno očekivati da svaka čestica goriva dođe u kontakt s odgovarajućom česticom kisika (miješanje goriva i zraka nije idealno). Zbog toga je potrebno u pravilu dovoditi veći volumen zraka od teoretski potrebnog (Tomšić, 2014). Omjer dovedenog i teoretski potrebnog zraka naziva se koeficijent pretička (viška) zraka te se računa prema relaciji (45)

$$\lambda = \frac{V_Z}{V_{Zmin}} \tag{45}$$

pri čemu je:

λ – pretičak zraka,

V_{Zmin} – volumen teoretski potrebnog zraka za izgaranje, m^3.

Vrijednost koeficijenta pretička zraka ovisi o vrsti goriva, plameniku i ložištu u kojemu se vrši izgaranje. Aproksimativne vrijednosti koeficijenta pretička (viška) zraka za tekuća goriva iznose λ = 1,03 - 1,2.

$$V_Z = \lambda \cdot V_{Zmin} = 1{,}2 \cdot 14{,}4 = 17{,}28\ m^3$$

$$V_{gs} = 1{,}867 \cdot 0{,}865 + 0{,}7 \cdot 0{,}0014 + 0{,}79 \cdot 17{,}28 = 15{,}27\ {}^{m_N^3}/_{kg_G}.$$

Standardne emisije opasnih plinova u ispuhu dizelskog stroja (Tablica 33) moraju biti u granicama koje su propisane legislativom (NN, 2015) te je za razblaživanje pojedinih opasnih plinova na GVI-u potrebno dovesti, sukladno izrazu (43), sljedeći volumen zraka:

$$Q_m = Q_{CO} + Q_{CO_2} + Q_{NO_x}\left[{}^{m^3}/_{min}\right]$$

$$Q_{CO} = V_{gs} \cdot \frac{n_{CO}}{C_{CO}} = 15{,}25 \cdot \frac{3{,}5 \cdot 180}{30} = 320{,}61\ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_{CO_2} = V_{gs} \cdot \frac{n_{CO_2}}{C_{CO_2}} = 15{,}25 \cdot \frac{0{,}19 \cdot 180}{5000} = 0{,}10\ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_{NO_x} = V_{gs} \cdot \frac{n_{NO_x}}{C_{NO_x}} = 15{,}25 \cdot \frac{0{,}4 \cdot 180}{30} = 43{,}97\ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_m = 320{,}61 + 0{,}10 + 43{,}97 = 364{,}68\ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_m = 6{,}08\ {}^{m^3}/_{s}.$$

6.1.2.6.2. Volumen zraka koji je potrebno dovesti za mehanizaciju

Potreban volumen zraka za mehanizaciju – utovarivač (Tablica 39) može se izračunati prema izrazu (46) sukladno Pravilniku (SL, 1991)

$$Q_{ut} = N_{ut} \cdot Q_p\left({}^{m^3}/_{s}\right) \tag{46}$$

$$Q_{ut} = 180\ kW \cdot 4{,}0\ m^3/kW/min\ = 720\ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_{ut} = 12{,}0\ {}^{m^3}/_{s}$$

pri čemu je:

Q_{ut} – potreban volumen zraka za utovarivač, m^3/min,

N_{ut} – snaga utovarivača, kW,

Q_p – minimalan volumen svježega zraka, m^3/kW/min.

6.1.2.6.3. Volumen zraka za radnike

Potreban volumen zraka za radnike može se izračunati prema izrazu (47) sukladno Pravilniku (SL, 1991)

$$Q_r = n \cdot q_z = 2 \cdot 3 = 6\,{}^{m^3}/_{min} \tag{47}$$

pri čemu je:

Q_r – volumen zraka potreban za radnike, m^3/min,

n – broj radnika zaposlenih u podzemnom kopu = 2 (rukovatelj utovarivača i rukovatelj lančane sjekačice),

q_r – volumen zraka propisan Pravilnikom (članak 250.) koji iznosi minimalno 3,0 m^3/min/zaposlenik (SL, 1991).

6.1.2.6.4. Ukupan volumen zraka koji je potrebno uvesti u podzemni kop

Ukupan volumen zraka koji je potrebno uvesti u podzemni kop odnosno do čela radilišta predstavlja zbroj volumena zraka za mehanizaciju i radnike. Tablica 35 prikazuje izračunate volumene zraka potrebnog za provjetravanje podzemnog kopa.

Tablica 35 – Volumen zraka potrebnog za provjetravanje podzemnog kopa a-gk

Uvjet	Izračunati volumen zraka	Jedinica
Volumen zraka potreban za razblaživanje ispušnih plinova	364,68	m^3/min
Volumen zraka za mehanizaciju	720,00	m^3/min
Volumen zraka za radnike	6,00	m^3/min

S obzirom na to da je za razblaživanje ispušnih plinova potrebno do čela radilišta dovesti 364,68 m^3/min te da je za mehanizaciju potrebno dovesti 720 m^3/min, odabire se veća vrijednost koja će osigurati dovoljan volumen zraka prema obama proračunima.

$$Q_z = Q_{ut} + Q_r = 720 + 6 = 726 \ {}^{m^3}/_{min}$$

$$Q_z = 12{,}10 \ {}^{m^3}/_{s}$$

6.1.2.6.5. Proračun volumena zraka uslijed gubitaka protoka

S obzirom na to da će se do radilišta zrak dovoditi korištenjem plastičnih cijevi promjera Ø800 mm, potrebno je proračunati gubitke zraka uslijed otpora plastičnih cijevi, a isti se mogu izračunati korištenjem izraza (48) (Teply, 1990)

$$Q_v = \frac{Q_0}{1 - m \cdot L_c \cdot 10^{-4}} \tag{48}$$

pri čemu je:

Q_v – ukupan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta uslijed gubitaka uzduž ventilacijske cijevi, m^3/s,

Q_0 – ukupan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta, m^3/s,

m – postotni gubitak zraka u ventilacijskim cijevima (%), usvojeno 2,2% (Tablica 36),

L_c – dužina ventilacijske cijevi, m.

Tablica 36 – Postotni gubici zraka u vjetrenim cijevima

Vrsta cijevi	**Postotni gubitak na 100 m cijevi**
	m (%)
Limene cijevi, nove, s kvalitetnim spojevima	1 do 2 %
Limene cijevi, više puta montirane	2 do 5 %
Limene cijevi, slabo očuvane	5 do 10 %
Plastične cijevi	2 do 2,4 %

Izvor: (Teply, 1990)

Uslijed eksploatacije blokova optimizacije eksploatacije povećavat će se udaljenost do koje je potrebno dovoditi svježi zrak te je usvojeno povećanje udaljenosti od 20 m uslijed napretka eksploatacije. Proračun volumena zraka koji je potrebno dovesti do radilišta za svaku završnu konturu podzemnog kopa prikazan je tablično (Tablica 37).

Tablica 37 – Potreban volumen zraka na čelu radilišta

Blok – optimizacija eksploatacije	**Dužina ventilacijske cijevi (m)**	**Gubitak po ukupnoj dužini vjetrene cijevi (m, %)**	**Ukupan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta uslijed gubitaka uzduž ventilacijske cijevi (m^3/s)**
1	0	0,00	12,10
2	20	0,44	12,11
3	40	0,88	12,14
4	60	1,32	12,20
5	80	1,76	12,27
6	100	2,20	12,37
7	120	2,64	12,50
8	140	3,08	12,65
9	160	3,52	12,82
10	180	3,96	13,03
11	200	4,40	13,27
12	220	4,84	13,54

6.1.2.6.6. Postupak odabira ventilatora

Maksimalan volumen zraka koji je potrebno dovesti do čela radilišta iznosi 13,54 m^3/s te je odabran ventilator koji svojim karakteristikama zadovoljava traženi uvjet (Tablica 39).

Snaga pogonskog motora ventilatora može se izračunati korištenjem izraza (49) (Teply, 1990)

$$P_i = \frac{Q_u \cdot h_v}{102 \cdot \eta} = \frac{13{,}54 \cdot 91{,}81}{102 \cdot 0{,}9} = 13{,}54\ kW \qquad (49)$$

pri čemu je:

P_i – instalirana snaga elektromotora ventilatora, kW,

Q_u – potreban volumen zraka, m^3/s,

h_v – depresija ventilatora, mm H_2O,

η – stupanj korisnog djelovanja, usvojeno 0,9.

Za odabrani ventilator (AL 8-150) i traženi volumen protoka zraka (Q_u) očitana je depresija ventilatora (h_v) u iznosu od 900,34 Pa (Korfmann Lufttechnik GmbH, 2013) što iznosi 91,81 mm H_2O.

6.1.2.6.7. Utrošak električne energije za rad ventilatora

Potrošnja električne energije ventilatora može se izračunati korištenjem izraza (50) (Teply, 1990)

$$E_g = P_a \cdot T_v \ (kWh) \tag{50}$$

pri čemu je:

E_g – potrošnja električne energije uslijed rada ventilatora, kWh,

P_a – angažirana snaga ventilatora, kW,

$$P_a = \frac{P_i \cdot f_o \cdot f_i}{\eta} = \frac{15 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}9}{0{,}77} = 14{,}03\ kW,$$

P_i – snaga elektromotora odabranog ventilatora, kW,

f_o – faktor opterećenja, usvojeno 0,8,

f_i – faktor istodobnosti potrošača, usvojeno 0,9,

η – koeficijent djelotvornosti elektromotora ventilatora, usvojeno 0,77,

T_v – vrijeme rada ventilatora, h.

6.1.3. PROSJEČNA PRODAJNA CIJENA BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Prosječna tržišna (prodajna) cijena (C_T) 1 m^3 bloka a-gk određena je u Glavnom rudarskom projektu eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene te iznosi 300 MJ/m^3 (Bojčetić et al., 2016).

6.1.4. MEHANIZACIJA I NAKNADE

Mehanizacija korištena u proračunu eksploatacije preuzeta je iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016) te je s pripadajućim karakteristikama i jediničnim vrijednostima prikazana tablično (Tablica 39). Karakteristike ventilatora s pripadajućim materijalom preuzete su iz kataloga tvrtke Korfmann Lufttechnik GmbH (Korfmann Lufttechnik GmbH, 2013).

Pretpostavljeno je da mehanizacija može raditi maksimalno 10 godina, a temeljem te pretpostavke izračunati su ukupni radni sati mehanizacije korištenjem ostalih usvojenih vremenskih okvira (Tablica 38).

Tablica 38 – Radni sati strojeva i opreme

Vremenski okvir	**Iznos**	**Jedinica**
Radni vijek trajanja strojeva i opreme	10	godina
Broj radnih sati u danu	8	h
Broj radnih dana u godini	250	dana
Broj radnih sati u jednoj godini	2 000	h
Ukupan broj radnih sati strojeva i opreme	20 000	h

Tablica 39 – Korištena mehanizacija i oprema pri površinskoj eksploataciji

Vrsta strojeva i opreme	Značajke	Pogonska energija	Jedinična vrijednost (MJ)
Dijamantna žična pila	50 kW, 7 m^2/sat	Električna energija	23 000
Lančana sjekačica	50 kW, 7 m^2/sat	Električna energija	60 000
Bušaća sonda	na zrak, 7 m'/sat	Komprimirani zrak	15 000
Kompresor	10 m^3/min	Dizel	20 000
Kamion	nosivost 20 t, snaga motora 180 kW, volumen sanduka 6 m^3	Dizel	100 000
Utovarivač	snaga motora 180 kW, masa stroja 25 t, nosivost 15 t, volumen utovarne lopate 6 m^3	Dizel	250 000
Bager s priključkom za hidraulički čekić	masa stroja 45 t, snaga motora 220 kW, volumen lopate 1,5 m^3	Dizel	300 000
Hidraulički čekić	masa 4 120 kg, maksimalan radni tlak 160 – 180 bar, promjer vrha čekića 0,114 m^2, broj udaraca klipa 250 / min	Hidraulična energija	40 000
Cisterna za vodu	20 000 l	-	3 000
Cisterna za gorivo	4 000 l	-	2 000
Crpka za vodu	5-stupanjske	Električna energija	1 000
Kontejner stambeni	6 x 2 m	-	3 000

Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

Tablica 40 – Korištena mehanizacija i oprema pri podzemnoj eksploataciji

Vrsta strojeva i opreme	Značajke	Pogonska energija	Jedinična vrijednost
			MJ
Lančana sjekačica	50 kW, 7 m^2/sat	Električna energija	130 000
Kamion	nosivost 20 t, snaga motora 180 kW, volumen sanduka 6 m^3	Dizel	100 000
Utovarivač	snaga motora 180 kW, masa stroja 25 t, nosivost 15 t, volumen utovarne lopate 6 m^3	Dizel	250 000
Ventilator	AL 8-150, Ø800 mm, snaga 15 kW, protok 10,0 – 15,8 m^3/s	Električna energija	30 000
Cisterna za vodu	20 000 l	-	3 000
Cisterna za gorivo	4 000 l	-	2 000
Crpka za vodu	5-stupanjske	Električna energija	1 000
Kontejner stambeni	6 x 2 m	-	3 000

Izvor: (Bojčetić et al., 2016; Korfmann Lufttechnik GmbH, 2013)

Tablica 41 – Naknade korištene tijekom izračuna ekonomskih modela kopova

Vrsta naknade	Iznos (MJ)	Jedinična mjera
Nadnice	60,00	MJ/nadnica
Istražni radovi	7,50	MJ/m^3 bloka a-gk
Izrada tehničke dokumentacije	3,00	MJ/m^3 bloka a-gk
Ishođenje dozvola i rješenja	1,50	MJ/m^3 bloka a-gk
Pripremni radovi za eksploataciju	3,00	MJ/m^3 bloka a-gk
Sanacija terena	7,50	MJ/m^2 površine rudarskih radova
Renta za lokalnu samoupravu	2,00	MJ/m^3 bloka a-gk
Naknada za korištenje šumskog zemljišta	4,00	MJ/m^3 bloka a-gk
Naknada za korištenje i održavanja voda	1,50	MJ/m^3 bloka a-gk
Naknada za zaštitu okoliša	1,50	MJ/m^3 bloka a-gk

Izvor: (Bojčetić et al., 2016)

6.1.5. ENERGENTI I POTROŠNI MATERIJAL

Vrijednost energenata i potrošnog materijala korištena pri izračunu troškova površinske i podzemne eksploatacije prikazana je u nastavku (Tablica 42).

Tablica 42 – Vrijednosti energenata i potrošnog materijala

Vrsta materijala	Vrijednost jediničnih mjera (MJ)	Jedinična mjera
Nafta	1,10	kg
Motorno ulje	5,00	kg
Diferencijalno ulje	7,00	kg
Ostala maziva	7,00	kg
Električna energija	0,10	kWh
Voda	1,00	m^3
Hidraulička crijeva	30,00	m'
Gume za kamion	1000,00	1 set/3 500 h
Gume za utovarivač	1500,00	1 set/1 600 h
Pločice tvrdog (vidia) metala	8,00	kom
Dlijeto	5000,00	1 kom / 2 000 h
Bušaće krune	1000,00	1 kom / 500 m
Bušaće šipke	450,00	1 kom / 855 m
Bušaći čekić	1000,00	1 kom / 5 000 m
Dijamantna žica	50,00	m'
Gumena obloga	100,00	kom
Pomoćno kolo	200,00	kom
Vodeni jastuci	50,00	kom
Gumene vjetrene cijevi	30,00	m'

Izvor: (Bojčetić et al., 2016; Korfmann Lufttechnik GmbH, 2013)

6.1.6. IZRAČUN NORMATIVA EKSPLOATACIJE

Pri izračunu normativa troškova rada mehanizacija s motorima s unutrašnjim izgaranjem pretpostavljaju se osnovne potrošnje:

- potrošnja dizelskog goriva = 0,20 (kg/kW) * snaga motora stroja (kW) * 0,8 (iskorištenje stroja – opterećenje),
- potrošnja motornog ulja = 2% od potrošnje dizelskog goriva,
- potrošnja diferencijalnog ulja = 0,5% od potrošnje dizelskog goriva,
- potrošnja ostalog maziva = 0,2 od potrošnje dizelskog goriva (Bojčetić et al., 2016).

Ukupno vrijeme rada mehanizacije kopa predstavlja omjer volumena sloja na kojem mehanizacija radi i kapaciteta odabrane mehanizacije za sloj/materijal na kojem mehanizacija radi, a može se prikazati izrazom (51)

$$T_{meh.} = \frac{V_{stijene}}{Q_{meh.}} \tag{51}$$

pri čemu je:

$T_{meh.}$ – ukupno vrijeme rada mehanizacije na volumenu stijene kopa, h,

$V_{stijene}$ – volumen stijene na kojem mehanizacija radi, m^3,

$Q_{meh.}$ – kapacitet odabrane mehanizacije za stijenu u kojoj radi, m^3/h.

Ukupni utrošak materijala rada mehanizacije predstavlja umnožak jediničnog utroška materijala izraženog po vremenu i ukupnog vremena rada mehanizacije na sloju/materijalu kopa, a može se izraziti izrazom (52)

$$M_{meh.} = M'_{meh.} \cdot T_{meh.} \tag{52}$$

pri čemu je:

$M_{meh.}$ – ukupni utrošak materijala pri radu mehanizacije, j.m.,

$M'_{meh.}$ – jedinični utrošak materijala pri radu mehanizacije, j.m./h.

Normativ utroška po bloku a-gk predstavlja omjer ukupnog utroška materijala, nadnica, naknada itd. naprema ukupnom volumenu blokova a-gk kopa, tj. završne konture, a može se izraziti izrazom (53)

$$N_{a-gk} = \frac{T_{uk}}{E} \tag{53}$$

pri čemu je:

N_{a-gk} – normativ utroška po bloku a-gk, j.m./m^3,

T_{uk} – ukupni utrošak materijala, nadnica, naknada itd., j.m.

Opterećenje jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk predstavlja umnožak normativa utroška po bloku a-gk i vrijednosti jediničnih mjera, a može se izraziti izrazom (54)

$$C'_e = N_{a-gk} \cdot C_{jed.} \tag{54}$$

pri čemu je:

C'_e – opterećenje jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk, MJ/m^3,

$C_{jed.}$ – vrijednosti jediničnih mjera, MJ/j.m.

Suma pojedinačnih opterećenja jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk predstavlja prosječnu cijenu eksploatacije blokova a-gk (C_e), a može se prikazati izrazom (55)

$$C_e = \sum_{n}^{i} C'_e \tag{55}$$

pri čemu je:

i, n – pojedinačno opterećenje jedinične cijene eksploatacije blokova a-gk uslijed rada mehanizacije, nadnica, naknada itd., MJ/m^3.

6.1.7. STROJEVI ZA PRIDOBIVANJE BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Proračun strojeva za pridobivanje blokova a-gk napravljen je temeljem proračuna iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016).

6.1.7.1. Bušilica

Bušilica se koristi za bušenje bušotina pri površinskoj eksploataciji za provlačenje dijamantne žice pri rezanju vertikalnih rezova, a bušotine se buše tijekom izrade trapeznog usjeka na početku razvoja etaže te tijekom pridobivanja osnovnih blokova s razvijene etaže. Preračun efektivne brzine bušenja bušilice može se izračunati korištenjem izraza (56) temeljem značajki stroja (Tablica 39)

$$v_{buš.} = v \cdot k_z = 7 \cdot 0{,}5 = 3{,}5 \ {}^{m}/_{h} \tag{56}$$

pri čemu je:

$v_{buš.}$ – efektivna brzina bušenja bušilice, m/h,

v – najmanja teoretska brzina bušenja, 7 m/h,

k_z – koeficijent gubitka vremena uslijed zastoja u radu, usvojeno 0,5.

6.1.7.2. Dijamantna žična pila

Dijamantna žična pila koristi se za rezanje vertikalnih rezova pri površinskoj eksploataciji kod izrade trapeznog usjeka i pri dobivanju osnovnih, manjih i završnih blokova. Proračun efektivne brzine rezanja dijamantne žične pile može se izračunati korištenjem izraza (57) temeljem značajki stroja (Tablica 39)

$$v_{D.Ž.P.} = v \cdot k_z = 7 \cdot 0{,}5 = 3{,}5 \ {}^{m^2}/_{h} \tag{57}$$

pri čemu je:

$v_{D.Ž.P.}$ – efektivna brzina rezanja dijamantne žične pile, m^2/h,

v – najmanja teoretska brzina rezanja, 7 m^2/h za 50 kW,

k_z – koeficijent gubitka vremena uslijed zastoja u radu, usvojeno 0,5.

6.1.7.3. Lančana sjekačica

Lančana sjekačica koristi se za izradu horizontalnih rezova pri izradi trapeznog usjeka te prilikom formiranja osnovnih blokova na razvijenim etažama kod površinske eksploatacije. U podzemnoj eksploataciji koristi se za pridobivanje završnih blokova direktno iz stijenske mase (s čela). Proračun efektivne brzine rezanja lančane sjekačice može se izračunati korištenjem izraza (58) temeljem značajki stroja (Tablica 39 i Tablica 40)

$$v_{L.S.-pov.} = v \cdot k_z = 7 \cdot 0{,}5 = 3{,}5 \ {}^{m^2}/_{h}$$
$$v_{L.S.-pod.} = v \cdot k_z = 7 \cdot 0{,}75 = 5{,}25 \ {}^{m^2}/_{h} \quad (58)$$

pri čemu je:

$v_{L.S.-pov.}$ – efektivna brzina rezanja lančane sjekačice, m^2/h,

v – najmanja teoretska brzina rezanja, 7 m^2/h za 50 kW,

k_z – koeficijent gubitka vremena uslijed zastoja u radu, usvojeno 0,5 za površinsku eksploataciju, a 0,75 za podzemnu eksploataciju.

6.1.8. UTOVAR

Proračun strojeva za utovar blokova a-gk i jalovine napravljen je temeljem proračuna iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016).

Tijekom površinske eksploatacije utovar rasutog stijenskog materijala – jalovine izvodit će se korištenjem bagera s obrnutom utovarnom lopatom, a utovar čvrstog materijala – blokova a-gk utovarivačem. Kod podzemne eksploatacije utovar rasutog stijenskog materijala – jalovine i čvrstog materijala – blokova a-gk izvodit će se utovarivačem. Koeficijent rasutosti materijala usvojen je u iznosu od 1,4 (Bojčetić et al., 2016) te se koristi tijekom površinske i podzemne eksploatacije. Tehničke značajke utovarivača i bagera korištenog u proračunu

površinske eksploatacije te utovarivača korištenog u proračunu podzemne eksploatacije prikazane su u poglavlju 6.1.4 (Tablica 39 i Tablica 40).

6.1.8.1. Utovar čvrstog materijala – blokova arhitektonsko-građevnog kamena

Pretpostavljene su maksimalne dimenzije završnih blokova koji će se utovarivati utovarivačem (Tablica 28) te je tako potrebno koristiti utovarivač koji svojim tehničkim značajkama odgovara navedenim uvjetima.

Kapacitet utovarivača korištenog za utovar blokova a-gk može se izračunati korištenjem izraza (59)

$$Q_{UT} = \frac{3\,600}{t_{cu}} \cdot E_{UT} \cdot k_p \cdot k_i = \frac{3\,600}{120} \cdot 4 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 76{,}8\ {}^{m^3}/_{h} \qquad (59)$$

pri čemu je:

Q_{UT} – kapacitet utovarivača korištenog za utovar blokova a-gk, m^3/h,

E_{UL} – volumen utovarne lopate, usvojeno 4 m^3 zbog srednje veličine blokova a-gk od 4 m^3,

t_{cu} – stvarno vrijeme ciklusa utovara, s,

$$t_{cu} = t_p + t_t + t_{is} + t_o = 60 + 30 + 20 + 10 = 120\ s,$$

t_p – vrijeme punjenja utovarne lopate, 60 s,

t_t – vrijeme okretanja u položaj za utovar, 30 s,

t_{is} – vrijeme istresanja tereta, 20 s,

t_o – vrijeme okretanja u položaj za povratak, 10 s,

k_p – koeficijent punjenja utovarne lopate, 0,8,

k_i – koeficijent iskorištenja vremena, 0,8.

6.1.8.2. Utovar rasutog materijala – jalovine

Za utovar rasutog materijala – jalovine kod površinske eksploatacije koristit će se isti bager s obrnutom utovarnom lopatom kao i za skidanje otkrivke.

Kapacitet bagera korištenog na utovaru jalovine površinske eksploatacije može se izračunati korištenjem izraza (60)

$$Q_B = \frac{3\,600}{t_{cu}} \cdot E_{BO} \cdot k_p \cdot k_i = \frac{3\,600}{120} \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}8 = 21{,}6\ {}^{m^3}/_{h} \tag{60}$$

pri čemu je:

Q_B – kapacitet bagera korištenog na utovaru rasutog materijala, m^3/h,

E_{BO} – volumen obrnute utovarne lopate, 1,5 m^3,

t_{cu} – stvarno vrijeme ciklusa utovara, s,

$$t_{cu} = t_p + t_t + t_{is} + t_o = 60 + 30 + 20 + 10 = 120\ s,$$

t_p – vrijeme punjenja obrnute utovarne lopate, 60 s,

k_p – koeficijent punjenja obrnute utovarne lopate, 0,6.

Kapacitet utovarivača korištenog za utovar jalovine podzemne eksploatacije može se izračunati korištenjem izraza (61)

$$Q_{UT} = \frac{3\,600}{t_{cu}} \cdot E_B \cdot k_p \cdot k_i = \frac{3\,600}{120} \cdot 6 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 115{,}2\ {}^{m^3}/_{h} \tag{61}$$

pri čemu je:

E_{UL} – volumen utovarne lopate, 6 m^3.

6.1.9. TRANSPORT

Proračun strojeva za transport blokova a-gk napravljen je temeljem proračuna iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016).

Kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine i čvrstog materijala – blokova a-gk izračunava se za svaku udaljenost transporta posebno s obzirom na to da će se udaljenost transporta povećavati s napretkom eksploatacije odnosno s otkopavanjem blokova optimizacije eksploatacije.

U Glavnom rudarskom projektu eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016) određene su udaljenosti od kopa do jalovišta na kojem će se odlagati jalovina (rasuti materijal) u iznosu od 1 000 m te mjesta odlaganja blokova a-gk u iznosu od 250 m. Navedene udaljenosti bit će osnovne udaljenosti od kojih će se krenuti s proračunom te će se one inkrementalno povećavati za vrijednost od 600 m kako bi se simulirali uvjeti napretka eksploatacije.

Za transport određen je kamion (Tablica 39 i Tablica 40) te su usvojena i određena ograničenja prilikom transporta:

- brzina vožnje punog kamiona (v_1) 10 km/h,
- brzina vožnje praznog kamiona (v_2) 20 km/h,
- prosječan volumen rasutog materijala pri transportu (jalovina) 6 m^3,
- prosječan volumen čvrstog materijala pri transportu (blokovi a-gk) 4 m^3.

Kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine može se izračunati prema izrazu (62)

$$Q_{T(jal.)} = \frac{3600}{t_{cJ}} \cdot E_O \cdot k_p \cdot t_i \qquad (62)$$

pri čemu je:

$Q_{T(jal.)}$ – kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine, m^3/h,

t_{cJ} – stvarno vrijeme ciklusa transporta rasutog materijala – jalovine, s,

$t_c = t_{ut} + t_{pu} + t_{pr} + t_{is}$,

t_{ut} – vrijeme utovara kamiona, 180 s,

t_{pu} – vrijeme vožnje punog kamiona, s,

$$t_{pu} = \frac{x_J}{v_1},$$

t_{pr} – vrijeme vožnje praznog kamiona, s,

$$t_{pr} = \frac{x_J}{v_2},$$

X_J – transportna udaljenost rasutog materijala – jalovine, m,

t_{is} – vrijeme istovara kamiona, 20 s,

E_O – volumen sanduka, m^3,

k_p – koeficijent punjenja utovarne lopate rasutim materijalom = 0,8.

Proračun kapaciteta transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine napravljen je korištenjem izraza (62) za svaku konturu površinske eksploatacije odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Tablica 43).

Tablica 43 – Transportne udaljenosti i kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine

Blok – optimizacija eksploatacije	Povećanje udaljenosti, m	Transportna udaljenost rasutog materijala – jalovine, m	Kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine, m^3/h
1	0	1000	18,68
2	600	1600	12,99
3	1200	2200	9,96
4	1800	2800	8,07
5	2400	3400	6,79
6	3000	4000	5,86
7	3600	4600	5,15
8	4200	5200	4,60
9	4800	5800	4,15
10	5400	6400	3,78
11	6000	7000	3,47
12	6600	7600	3,21

Kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk može se izračunati prema izrazu (63)

$$Q_{T(a-gk)} = \frac{3600}{t_{cB}} \cdot E_B \cdot t_i \tag{63}$$

pri čemu je:

$Q_{T(a-gk)}$ – kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk, m^3/h,

t_{cB} – stvarno vrijeme ciklusa transporta čvrstog materijala – blokova a-gk, s,

$$t_c = t_{ut} + t_{pu} + t_{pr} + t_{is},$$

t_{ut} – vrijeme utovara kamiona, 120 s,

t_{pu} – vrijeme vožnje punog kamiona, s,

$$t_{pu} = \frac{x_B}{v_1},$$

t_{pr} – vrijeme vožnje praznog kamiona, s,

$$t_{pr} = \frac{X_B}{v_2},$$

X_B – transportna udaljenost čvrstog materijala – blokova a-gk, m,

E_B – prosječan volumen bloka a-gk koji se transportira, m^3.

Proračun kapaciteta transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk napravljen je korištenjem izraza (63) za svaku konturu površinske eksploatacije odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Tablica 44).

Tablica 44 – Transportne udaljenosti i kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk

Blok – optimizacija eksploatacije	**Povećanje udaljenosti (m)**	**Transportna udaljenost čvrstog materijala – blokova a-gk (m)**	**Kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk (m^3/h)**
1	0	250	41,89
2	600	850	19,23
3	1200	1450	12,48
4	1800	2050	9,24
5	2400	2650	7,33
6	3000	3250	6,08
7	3600	3850	5,19
8	4200	4450	4,53
9	4800	5050	4,02
10	5400	5650	3,61
11	6000	6250	3,28
12	6600	6850	3,00

6.2. EKONOMSKI MODELI KOPOVA – NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza ekonomskih vrijednosti (troškova, prihoda i dobiti) kopova napravljena je za završne konture površinske i podzemne eksploatacije definiranjem i izračunom troškova

svakog od načina eksploatacije te izračunom prihoda i dobiti za svaku završnu konturu površinskog i podzemnog kopa.

6.2.1. EKONOMSKI MODELI POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

6.2.1.1. Proračun troškova površinske eksploatacije

6.2.1.1.1. Uklanjanje otkrivke bagerom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed uklanjanja otkrivke bagerom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 37).

Proračun normativa uklanjanja otkrivke bagerom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje i ostala maziva korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Izračun normativa za dlijeto, hidraulička crijeva i pločice tvrdog metala napravljen je korištenjem jediničnog utroška materijala preuzetog iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016). Vrijednosti jediničnih mjera korištenih u proračunu prikazane su u poglavlju 6.1.5, tablica 42.

Tablica 13 prikazuje volumen otkrivke koji je potrebno ukloniti bagerom s hidrauličkim čekićem za svaku konturu površinskog kopa.

6.2.1.1.2. Utovar otkrivke bagerom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara otkrivke bagerom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 38).

Kapacitet bagera za utovar jalovine određen je u poglavlju 6.1.8.2. te iznosi 21,6 m^3/h.

Izračun normativa utovara otkrivke bagerom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje i ostala maziva korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Izračun normativa za hidraulička crijeva i pločice tvrdog metala napravljen je korištenjem jediničnog utroška materijala preuzetog iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije

arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016). Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

Volumen otkrivke koji je potrebno utovariti dobiven je množenjem ukupnog volumena otkrivke pojedine završne konture kopa (Tablica 13) i koeficijenta rastresitosti (vidi poglavlje 6.1.8).

6.2.1.1.3. Transport otkrivke kamionom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed transporta otkrivke kamionom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 39).

Izračun normativa transporta otkrivke kamionom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje, ostala maziva i gume za kamion korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

Volumen otkrivke koji je potrebno prevesti dobiven je množenjem ukupnog volumena otkrivke pojedine završne konture kopa (Tablica 13) i koeficijenta rastresitosti (vidi poglavlje 6.1.8).

Za svaku konturu površinskog kopa određena je transportna udaljenost i kapacitet transportnog sredstva za transport rasutog materijala – jalovine (Tablica 43).

6.2.1.1.4. Bušenje bušotina bušilicom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed bušenja bušotina bušilicom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 40).

Ukupna duljina bušotina za izradu trapeznog usjeka dobivena je zbrajanjem duljina bušotina koje je potrebno izbušiti pri izradi jednog trapeznog usjeka (vidi poglavlje 6.1.1.5. i Slika 56) iznosi 28,8 m' bušotina.

Ukupna duljina bušotina za dobivanje osnovnog bloka (Slika 59) definirana je u poglavlju 6.1.1.7. te iznosi 7,2 m' bušotina.

Jedinična dužina bušotina pri izradi trapeznog usjeka iznosi 0,131 m'/m^3 trapeznog usjeka u sloju a-gk, a dobivena je dijeljenjem ukupne duljine bušotina za izradu trapeznog usjeka i volumena trapeznog usjeka. Jedinična duljina bušenja pri dobivanju osnovnih blokova s razvijene etaže iznosi 0,069 m'/m^3 sloja a-gk, a dobivena je dijeljenjem ukupne duljine bušotina za dobivanje osnovnog bloka i volumena osnovnog bloka.

Kapacitet bušilice određen je u poglavlju 6.1.7.1. te iznosi 3,5 m'/h.

Izračun normativa transporta otkrivke kamionom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje, ostala maziva, bušaće krune, bušaće šipke i bušaći čekić korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5 (Tablica 42).

Ukupna duljina bušotina pri izradi trapeznog usjeka dobiven je množenjem jedinične dužine bušotina pri izradi trapeznog usjeka i volumena sloja a-gk (Tablica 13).

Ukupna duljina bušenja pri dobivanju osnovnih blokova s razvijene etaže predstavlja umnožak jedinične dužine bušotina pri dobivanju osnovnih blokova s razvijene etaže i volumena sloja a-gk (Tablica 13).

Izračun normativa bušenja bušotina bušilicom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje, ostala maziva, bušaće krune, bušaće šipke i bušaći čekić korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5 (Tablica 42).

6.2.1.1.5. Rezanje dijamantnom žičnom pilom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed rezanja dijamantnom žičnom pilom (D.Ž.P.) napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 41).

Ukupna površina rezanja D.Ž.P. za dobivanje završnih blokova iz trapeznog usjeka određena je u poglavlju 6.1.1.6. te iznosi te iznosi 374,50 m^2.

Ukupna površina rezanja D.Ž.P. pri dobivanju završnih blokova iz primarnog bloka na razvijenoj etaži iznosi 172 m^2 (vidi poglavlje 6.1.1.8.).

Kapacitet D.Ž.P. određen je u poglavlju 6.1.7.2. te iznosi 3,5 m^2/h.

Jedinična površina rezanja D.Ž.P. pri izradi trapeznog usjeka iznosi 1,698 m^2/m^3 trapeznog usjeka u sloju a-gk, a predstavlja omjer ukupne površine rezanja D.Ž.P. za dobivanje završnih blokova iz trapeznog usjeka i volumena trapeznog usjeka.

Jedinična površina rezanja D.Ž.P. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže iznosi 1,638 m^2/m^3 sloja a-gk, a predstavlja omjer ukupne površine rezanja D.Ž.P. pri dobivanju završnih blokova iz primarnog bloka na razvijenoj etaži i volumena osnovnog bloka.

Izračun normativa rezanja dijamantnom žičnom pilom po bloku a-gk napravljen je za električnu energiju, vodu, dijamantnu žicu, gumenu oblogu i pomoćno kolo korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

Ukupna površina rezanja D.Ž.P. pri izradi trapeznog usjeka završne konture površinskog kopa predstavlja umnožak broja trapeznih usjeka, volumena trapeznog usjeka i jedinične površine rezanja D.Ž.P. pri izradi trapeznog usjeka.

Ukupna površina rezanja D.Ž.P. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže predstavlja umnožak jedinične površine rezanja D.Ž.P. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže i volumena sloja a-gk (Tablica 13) umanjenog za volumen izrađenih usjeka završne konture površinskog kopa (vidi poglavlje 6.1.1.5.).

6.2.1.1.6. Rezanje lančanom sjekačicom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed rezanja lančanom sjekačicom (L.S.) napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 42).

Ukupna površina rezanja L.S. na pridobivanju završnih blokova iz trapeznog usjeka određena je u poglavlju 6.1.1.6. te iznosi 31,50 m^2.

Ukupna površina rezanja L.S. pri dobivanju završnih blokova iz primarnog bloka na razvijenoj etaži određena je u poglavlju 6.1.1.8. te iznosi 15 m^2.

Kapacitet L.S. određen je u poglavlju 6.1.7.2. te iznosi 3,5 m^2/h za površinsku eksploataciju.

Jedinična površina rezanja L.S. pri izradi trapeznog usjeka iznosi 0,143 m^2/m^3 trapeznog usjeka u sloju a-gk, a predstavlja omjer ukupne površine rezanja L.S. za dobivanje završnih blokova iz trapeznog usjeka i volumena trapeznog usjeka.

Jedinična površina rezanja L.S. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže iznosi 0,143 m^2/m^3 sloja a-gk, a predstavlja omjer ukupne površine rezanja L.S. pri dobivanju završnih blokova iz primarnog bloka na razvijenoj etaži i volumena osnovnog bloka.

Izračun normativa rezanja L.S. po bloku a-gk napravljen je za električnu energiju, vodu i pločice tvrdog metala korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

Ukupna površina rezanja L.S. pri izradi trapeznog usjeka završne konture površinskog kopa predstavlja umnožak broja trapeznih usjeka, volumena trapeznog usjeka i jedinične površine rezanja L.S. pri izradi trapeznog usjeka.

Ukupna površina rezanja L.S. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže predstavlja umnožak jedinične površine rezanja L.S. pri dobivanju završnih blokova s razvijene etaže i volumena sloja a-gk (Tablica 13) umanjenog za volumen izrađenih usjeka završne konture površinskog kopa (vidi poglavlje 6.1.1.5.).

6.2.1.1.7. Utovar blokova arhitektonsko-građevnog kamena utovarivačem

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara blokova a-gk utovarivačem napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 43).

Kapacitet utovarivača za utovar blokova a-gk određen je u poglavlju 6.1.8.1. te iznosi 76,8 m^3/h.

Izračun normativa utovara utovarivača po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje i ostalih maziva korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Izračun normativa za gume za utovarivač napravljen je korištenjem jediničnog utroška materijala preuzetog iz Glavnog rudarskog projekta eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju Crvene stijene (Bojčetić et al., 2016). Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

6.2.1.1.8. Utovar jalovine iz sloja arhitektonsko-građevnog kamena i podine bagerom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 44).

Kapacitet bagera za utovar jalovine određen je u poglavlju 6.1.8.2. te iznosi 21,6 m^3/h.

Izračun normativa utovara jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom napravljen je isto kao i utovar otkrivke bagerom (vidi poglavlje 6.2.1.1.2).

6.2.1.1.9. Transport blokova arhitektonsko-građevnog kamena kamionom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed transporta blokova a-gk kamionom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 45).

Izračun normativa transporta blokova a-gk kamionom po bloku a-gk napravljen je za naftu, motorno ulje, diferencijalno ulje, ostala maziva i gume za kamion korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.5. (Tablica 42).

Za svaku konturu površinskog kopa određena je transportna udaljenost i kapacitet transportnog sredstva za transport čvrstog materijala – blokova a-gk (Tablica 44).

6.2.1.1.10. Transport jalovine iz sloja arhitektonsko-građevnog kamena i podine kamionom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 46).

Izračun normativa transporta jalovine iz sloja a-gk i podine kamionom po bloku a-gk napravljen je isto kao i transport otkrivke kamionom (vidi poglavlje 6.2.1.1.3.).

6.2.1.1.11. Rad zaposlenika (nadnice)

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed rada zaposlenika (nadnice) napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 47).

Određeno je da zaposlenici dnevno rade 8 sati što je jednako jednoj dnevnici, a ukupan broj zaposlenika koji rade na površinskom kopu jednak je broju angažiranih strojeva što iznosi 6. Vrijednost naknade po nadnici definirana je u poglavlju 6.1.4. (Tablica 41).

Izračun normativa rada zaposlenika (nadnica) po bloku a-gk napravljen je za sve radnje koje obavljaju angažirani strojevi (uklanjanje otkrivke, utovar otkrivke, utovar jalovine sloja a-gk i podine, bušenje bušotina, piljenje vertikalnih rezova, rezanje horizontalnih rezova, utovar blokova a-gk, transport otkrivke, transport blokova a-gk, transport jalovine sloja a-gk i podine) korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6.

Ukupan broj nadnica, za svaku radnju stroja, predstavlja omjer ukupnog broja sati i iznosa radnih sati koji čine jednu dnevnicu.

6.2.1.1.12. Mehanizacija, oprema i održavanje

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed troškova mehanizacije, opreme i održavanja napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 48).

Jedinične vrijednosti mehanizacije i opreme korištene pri površinskoj eksploataciji prikazane su za svaki stroj i opremu (Tablica 39).

Satni utrošak strojeva predstavlja omjer između jedinične cijene stroja i opreme te ukupnog broja radnih sati (Tablica 38).

Ukupan iznos sati rada mehanizacije i opreme na kopu izračunat je za svaki stroj ovisno o materijalu u kojem stroj radi (Prilog 37 do Prilog 46).

Efektivni trošak stroja predstavlja umnožak satnog utroška i ukupnog iznosa sati rada mehanizacije i opreme na kopu.

Efektivno opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed troškova mehanizacije i opreme te održavanja predstavlja omjer između efektivnih troškova i količine blokova kopa.

Količina strojeva predstavlja omjer između potrebnog broja radnih sati na kopu i maksimalnog broja radnih sati stroja i opreme.

Izračun ostalih vrijednosti u proračunu napravljen je korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6.

Rezervni dijelovi iznose 6 % od vrijednosti strojeva, a investicijsko i tekuće održavanje 3 % od vrijednosti strojeva i opreme.

6.2.1.1.13. Investicijski i završni radovi

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed investicijskih i završnih radova napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 49).

Izračun normativa investicijskih i završnih radova po bloku a-gk napravljen je za istražne radove, izradu tehničke dokumentacije, ishođenje dozvola i rješenja, pripremne radove za eksploataciju i sanaciju terena korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.4. (Tablica 41), a površine zauzete rudarskim radovima u poglavlju 5.8.1.

6.2.1.1.14. Državne naknade

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed državnih naknada napravljen je za svaku konturu površinskog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 50).

Izračun normativa državnih naknada po bloku a-gk napravljen je za rentu za lokalnu samoupravu, naknadu za korištenje šumskog zemljišta, naknadu za korištenje i održavanje voda i naknadu za zaštitu okoliša korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera prikazane su u poglavlju 6.1.4. (Tablica 41).

6.2.1.2. Analiza troškova površinske eksploatacije

Troškovi površinske eksploatacije mijenjaju se ovisno o završnoj konturi površinskog kopa s kojom se mijenja volumen otkrivke koju je potrebno ukloniti, površine horizontalnih i

vertikalnih rezova koje je potrebno odrezati, volumen blokova a-gk koji se mogu plasirati na tržište, volumen jalovine koju je potrebno utovariti i odvesti te broj nadnica, iznos investicijskih i završnih radova i državnih naknada.

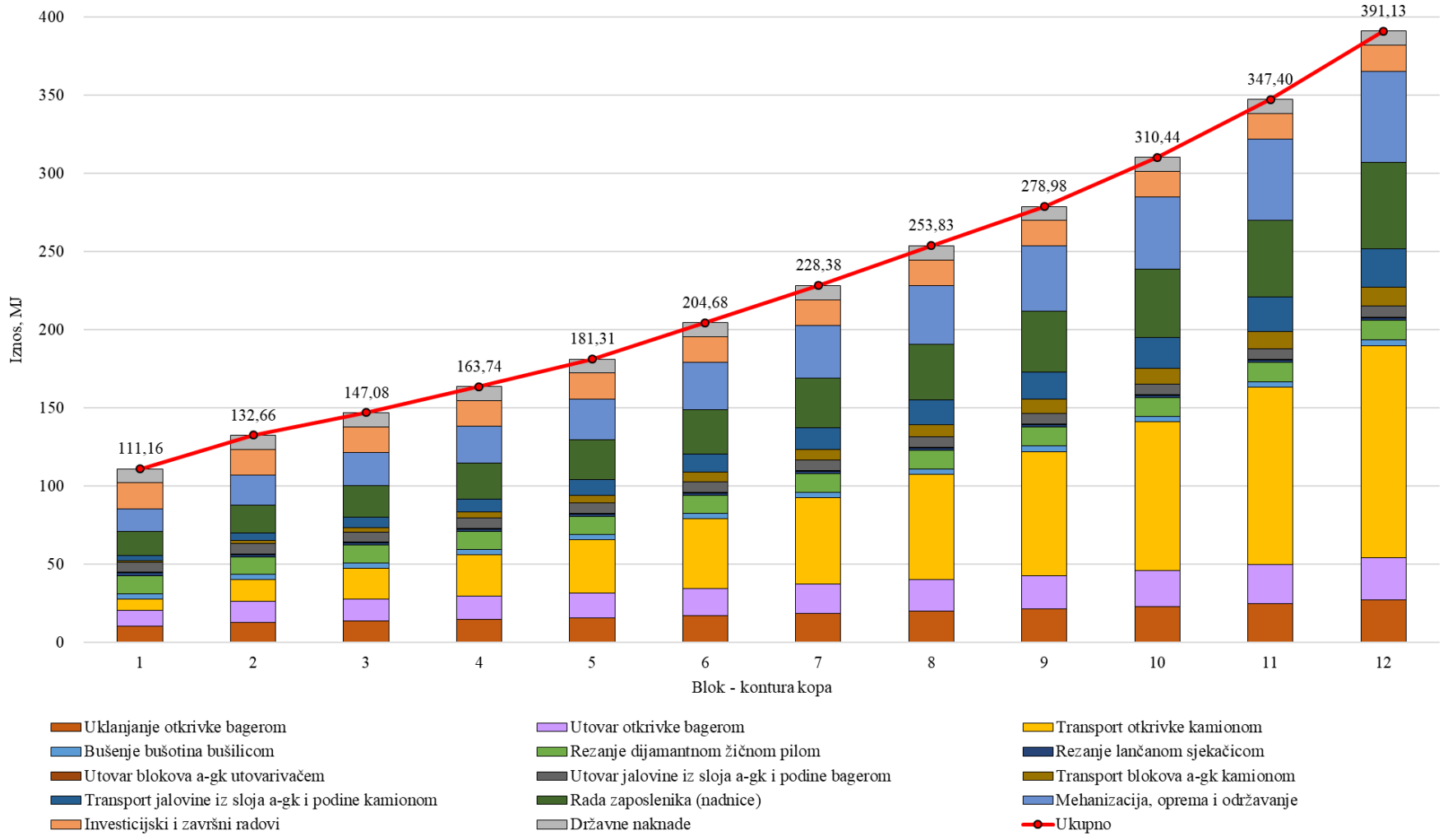
Tablica 45 prikazuje pojedinačne troškove pridobivanja blokova a-gk koji zbrajanjem daju opterećenje jedinične cijene blokova a-gk po konturi površinskog kopa. Kako bi se pojedinačni troškovi mogli lakše analizirati napravljen je i njihov grafički prikaz (Slika 61).

Ukupna jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk za prvi blok optimizacije eksploatacije odnosno prvu završnu konturu površinskog kopa iznosi 111,16 MJ/m^3 bloka a-gk. Nakon prve završne konture uočava se konstantno povećanje jedinične cijene sve do zadnje dvanaeste konture površinskog kopa za koju iznosi 391,13 MJ/m^3. Ukupna promjena jedinične cijene pridobivanja od prve do zadnje konture iznosi 279,97 MJ/m^3 bloka a-gk što približno iznosi 28 %.

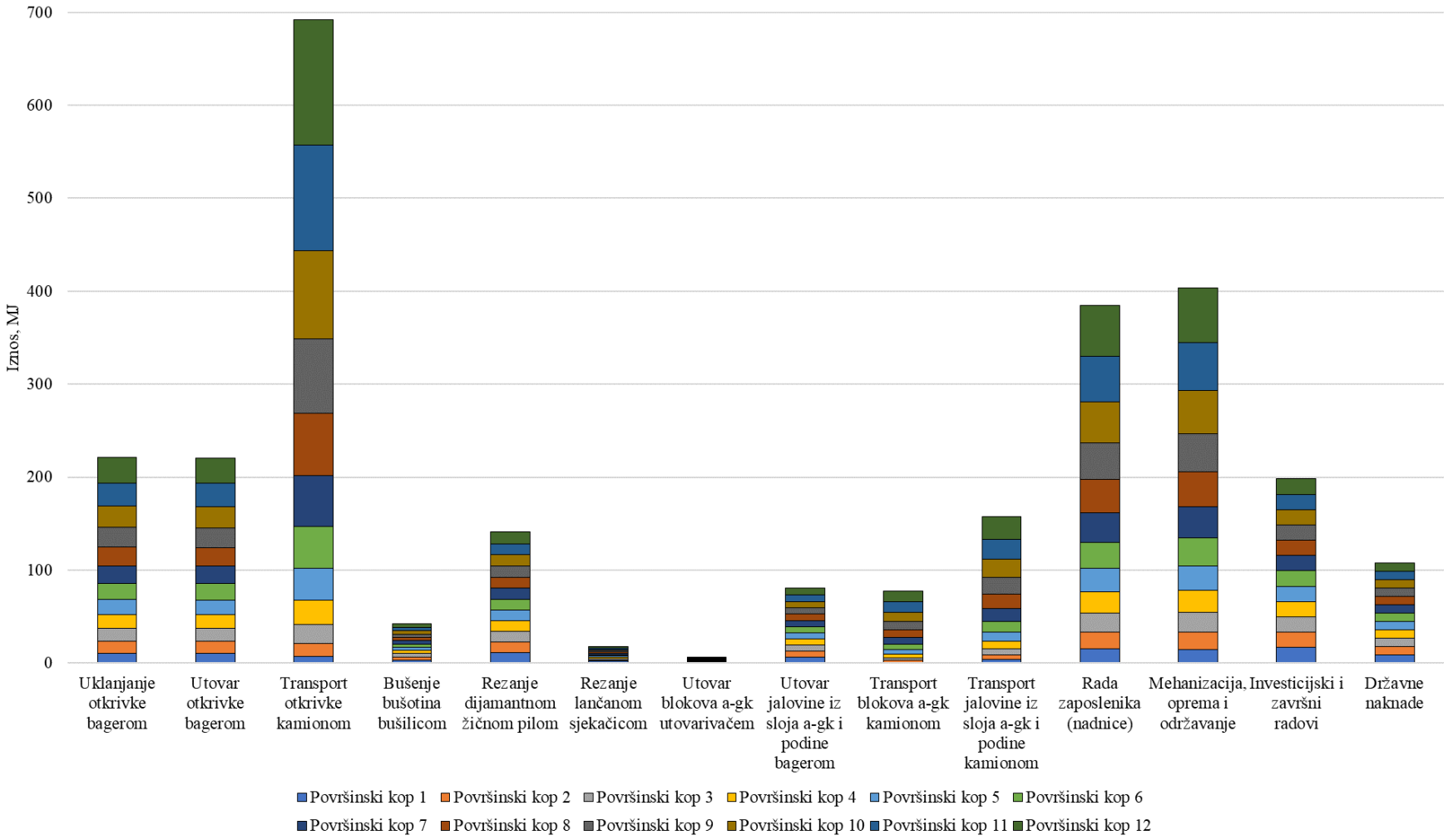
Ukoliko se pojedinačni troškovi površinske eksploatacije prikažu kumulativno, odredit će se koji pojedinačni troškovi najviše pridonose ukupnom opterećenju jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije (Slika 62). Iz analize kumulativnog opterećenja može se zaključiti da troškovi transporta otkrivke kamionom najviše opterećuju jediničnu cijenu pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije kako se otkopavaju blokovi optimizacije eksploatacije, a slijede ih troškovi mehanizacije, opreme i održavanja. Daljnjom analizom kumulativnog prikaza troškova zaključuje se da troškovi utovara blokova a-gk utovarivačem najmanje opterećuju jediničnu cijenu pridobivanja blokova a-gk, a slijede ih troškovi rezanja lančanom sjekačicom.

Tablica 45 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije

Površinski kop	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vrsta troška	**Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk (MJ/m3 bloka a-gk)**											
Uklanjanje otkrivke bagerom	10,38	13,12	13,91	14,87	15,84	17,41	18,75	20,15	21,35	23,01	24,94	27,25
Utovar otkrivke bagerom	10,36	13,09	13,88	14,84	15,81	17,37	18,71	20,10	21,30	22,96	24,89	27,19
Transport otkrivke kamionom	7,24	14,16	19,87	26,63	34,22	44,42	55,14	67,19	79,56	95,14	113,44	135,44
Bušenje bušotina bušilicom	3,36	3,33	3,39	3,43	3,46	3,48	3,53	3,56	3,58	3,62	3,69	3,77
Rezanje dijamantnom žičnom pilom	11,34	11,27	11,41	11,52	11,59	11,65	11,77	11,84	11,90	11,99	12,16	12,36
Rezanje lančanom sjekačicom	1,91	1,40	1,41	1,42	1,43	1,43	1,44	1,44	1,45	1,45	1,47	1,48
Utovar blokova a-gk utovarivačem	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Utovar jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom	6,40	6,35	6,46	6,54	6,59	6,64	6,74	6,79	6,84	6,90	7,04	7,19
Transport blokova a-gk kamionom	0,87	1,89	2,90	3,92	4,94	5,96	6,98	8,00	9,02	10,04	11,06	12,08
Transport jalovine iz sloja a-gk i podine kamionom	3,47	4,91	6,61	8,33	10,04	11,79	13,73	15,59	17,48	19,48	21,90	24,52
Rada zaposlenika (nadnice)	15,32	18,08	20,26	22,68	25,23	28,51	31,94	35,58	39,22	43,73	49,09	55,41
Mehanizacija, oprema i održavanje	14,44	18,84	21,02	23,58	26,28	30,08	33,75	37,65	41,37	46,15	51,75	58,39
Investicijski i završni radovi	16,58	16,72	16,47	16,51	16,41	16,46	16,42	16,46	16,43	16,48	16,50	16,58
Državne naknade	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Ukupno	**111,16**	**132,66**	**147,08**	**163,74**	**181,31**	**204,68**	**228,38**	**253,83**	**278,98**	**310,44**	**347,40**	**391,13**



Slika 61 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja bloka a-gk po završnoj konturi površinskog kopa



Slika 62 – Kumulativno opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije

Troškovi površinske eksploatacije blokova optimizacije eksploatacije mogu se generalno podijeliti u četiri osnovne grupe troškova:

- troškovi vezani za eksploataciju sloja a-gk – pridobivanje blokova a-gk
- troškovi vezani za uklanjanje jalovine
- troškovi vezani za mehanizaciju, opremu i održavanje te
- ostali troškovi u koje se ubrajaju troškovi investicijskih i završnih radova te državne naknade (Tablica 46).

Tablica 46 – Podjela troškova površinske eksploatacije

Troškovi pridobivanja blokova a-gk	**Troškovi uklanjanja jalovine**	**Troškovi mehanizacije**	**Ostali troškovi**
bušenje bušotina bušilicom	uklanjanje otkrivke bagerom	mehanizacija, oprema i održavanje	investicijski i završni radovi
rezanje dijamantnom žičnom pilom	utovar otkrivke bagerom	-	državne naknade
rezanje lančanom sjekačicom	transport otkrivke kamionom	-	-
utovar blokova a-gk utovarivačem	utovar jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom	-	-
transport blokova a-gk kamionom	transport jalovine iz sloja a-gk i podine kamionom	-	-
rad zaposlenika (nadnice) na pridobivanju blokova a-gk	rad zaposlenika (nadnice) na uklanjanju jalovine	-	-

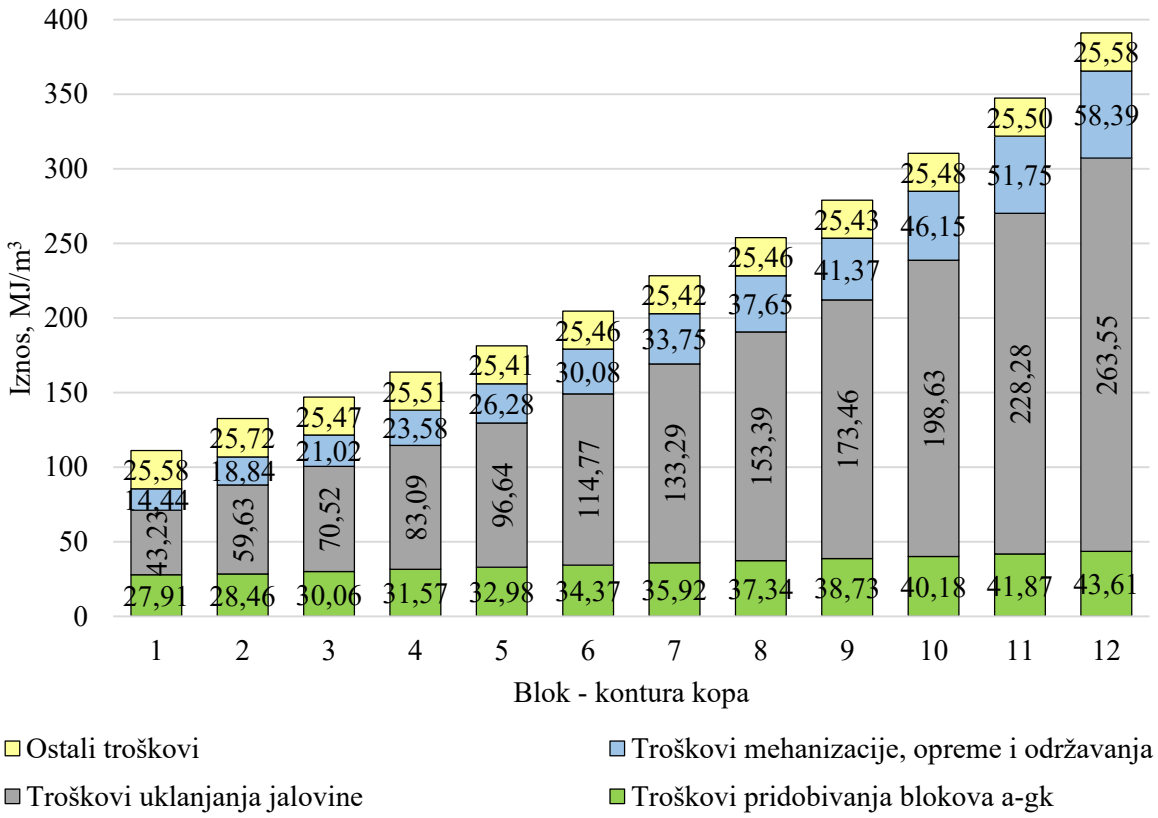
Grupiranjem troškova površinske eksploatacije prikazani su troškovi koji se odnose isključivo na troškove pridobivanja sloja a-gk, troškovi vezani za jalovinu koji uključuju uklanjanje, utovar i odvoz otkrivke i jalovine iz sloja a-gk. Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja predstavljaju troškove vezane isključivo za mehanizaciju, opremu, održavanje i rezervne

dijelove. Zadnja grupa troškova – ostali troškovi predstavljaju troškove koji se javljaju tijekom površinske eksploatacije a-gk, a vezani su za zakonske okvire, pripremne radove, istraživanje itd.

Iznosi grupiranih troškova površinske eksploatacije prikazani su tablično (Tablica 47), a kako bi se grupirani troškovi površinske eksploatacije mogli jednostavnije analizirati, napravljen je njihov grafički prikaz (Slika 63).

Tablica 47 – Vrijednosti grupiranih troškova površinske eksploatacije

Blok – kontura kopa	**Troškovi pridobivanja blokova a-gk, MJ/m^3**	**Troškovi uklanjanja jalovine, MJ/m^3**	**Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja, MJ/m^3**	**Ostali troškovi, MJ/m^3**	**UKUPNO, MJ/m^3**
1	27,91	43,23	14,44	25,58	111,16
2	28,46	59,63	18,84	25,72	132,66
3	30,06	70,52	21,02	25,47	147,08
4	31,57	83,09	23,58	25,51	163,74
5	32,98	96,64	26,28	25,41	181,31
6	34,37	114,77	30,08	25,46	204,68
7	35,92	133,29	33,75	25,42	228,38
8	37,34	153,39	37,65	25,46	253,83
9	38,73	173,46	41,37	25,43	278,98
10	40,18	198,63	46,15	25,48	310,44
11	41,87	228,28	51,75	25,50	347,40
12	43,61	263,55	58,39	25,58	391,13



Slika 63 – Grupirani troškovi površinske eksploatacije

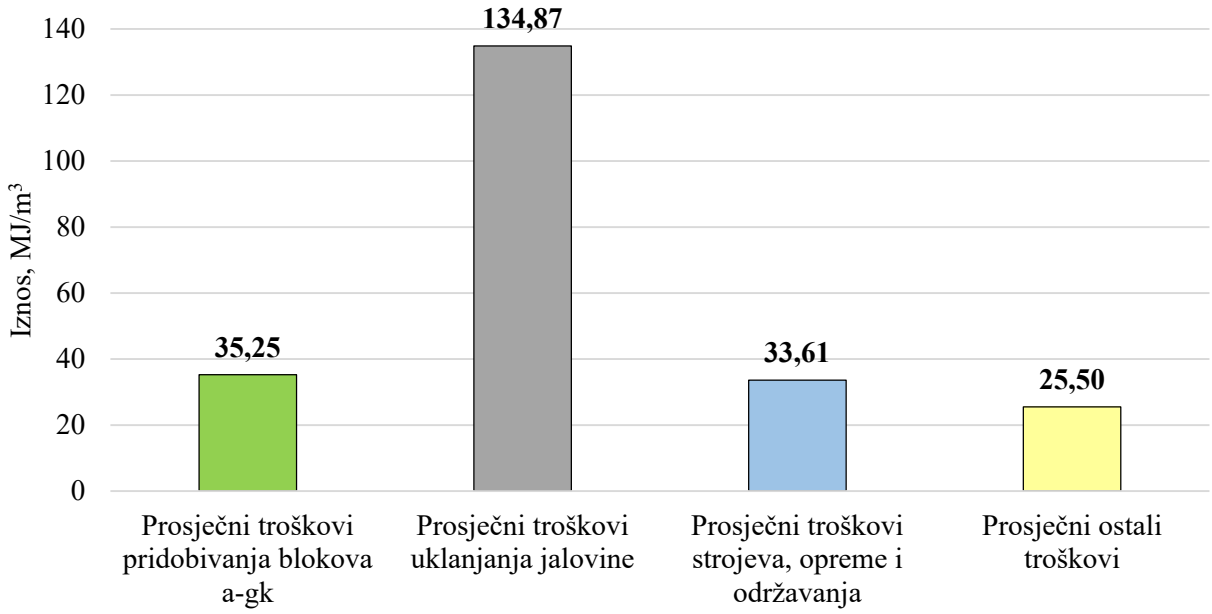
Analizom grupiranih troškova površinske eksploatacije uočava se da za blok, odnosno konturu 1 troškovi pridobivanja blokova a-gk za prvu konturu iznose 27,91 MJ/m^3. S razvojem ostalih završnih kontura površinske eksploatacije troškovi pridobivanja blokova a-gk povećavaju se u relativno malom iznosu te tako za dvanaestu konturu iznose 43,61 MJ/m^3 što predstavlja povećanje od 15,70 MJ/m^3.

Troškovi uklanjanja jalovine dominantni su troškovi za sve analizirane završne konture površinske eksploatacije te tako za prvu konturu iznose 43,23 MJ/m^3. S razvojem ostalih kontura površinske eksploatacije uočava se konstantno povećanje troškova uklanjanja jalovine koji za blok optimizacije 12 iznose 263,55 MJ/m^3 što predstavlja povećanje od 220,32 MJ/m^3 u odnosu na prvu završnu konturu površinske eksploatacije.

Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja za 1. konturu površinske eksploatacije iznose 14,44 MJ/m^3, a analizom svih ostalih završnih kontura površinske eksploatacije isti se konstantno povećavaju te tako za konturu 12 površinske eksploatacije iznose 58,39 MJ/m^3 što predstavlja povećanje u iznosu od 43,95 MJ/m^3.

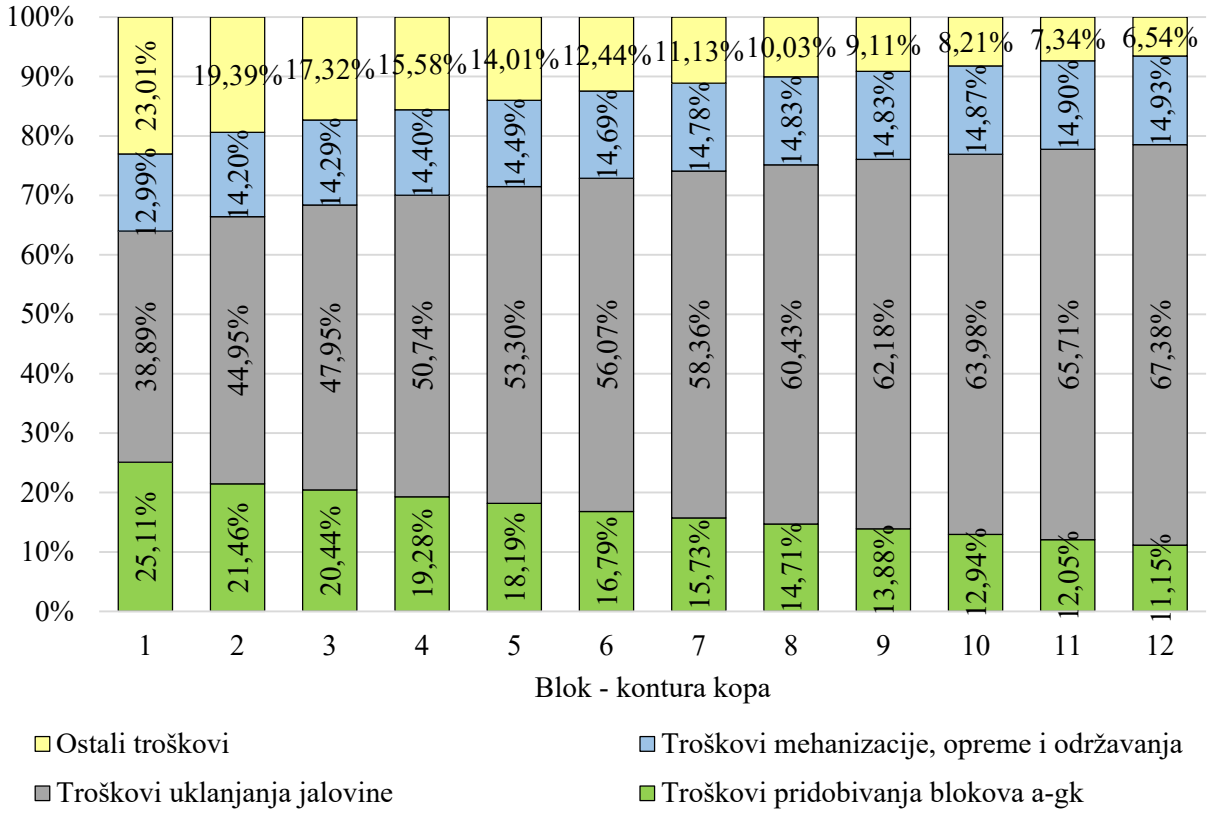
Ostali troškovi isti su za sve analizirane konture površinske eksploatacije te iznose 25,58 MJ/m^3.

Iznos troškova pridobivanja blokova a-gk za sve konture površinske eksploatacije prosječno iznosi 35,25 MJ/m^3 dok prosječan iznos troškova uklanjanja jalovine za sve konture iznosi 134,87 MJ/m^3, prosječan iznos troškova mehanizacije, opreme i održavanja za sve analizirane konture iznosi 33,61 MJ/m^3, a prosječan iznos ostalih troškova iznosi 25,50 MJ/m^3 (Slika 64).



Slika 64 – Iznos prosječnih troškova završnih kontura površinske eksploatacije

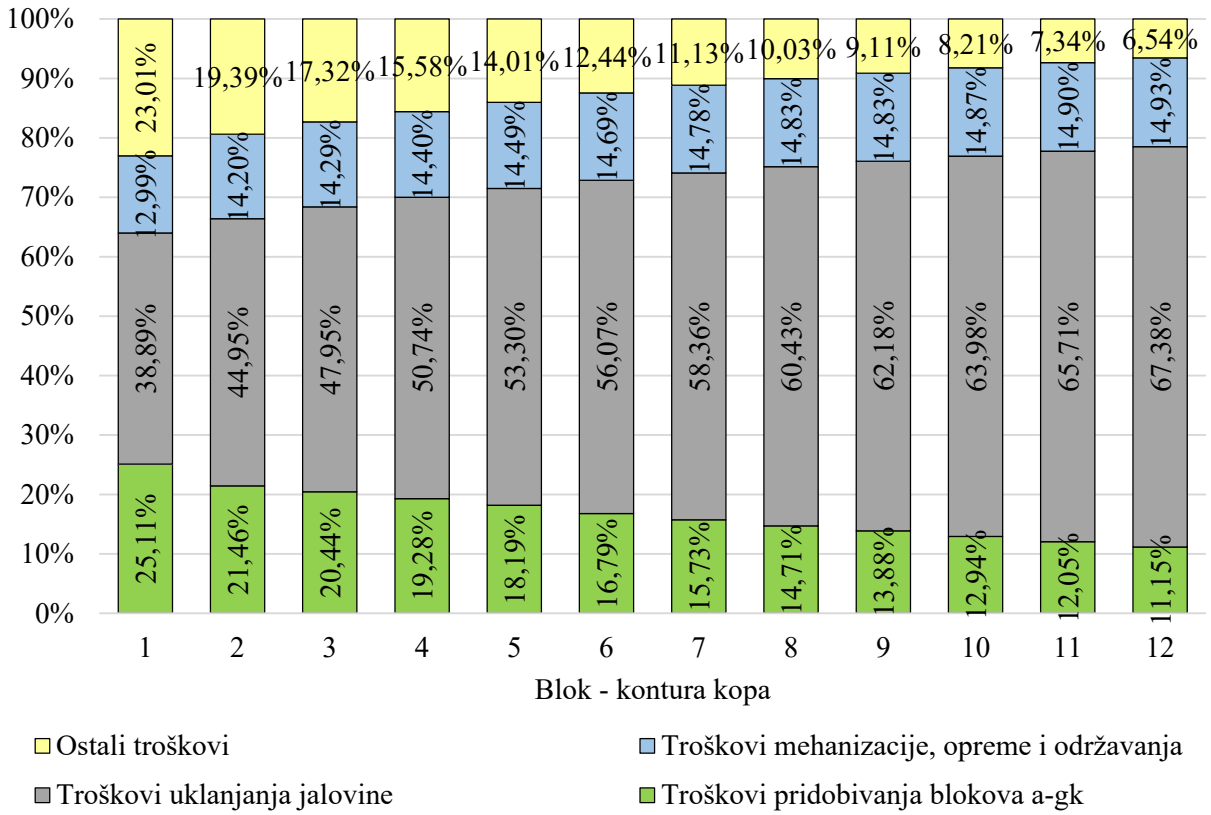
Dodatna analiza troškova površinske eksploatacije napravljena je analizirajući postotne udjele troškova (Tablica 48 i



Slika 65).

Tablica 48 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima površinske eksploatacije

Blok – kontura kopa	Troškovi pridobivanja blokova a-gk, MJ/m³	Troškovi uklanjanja jalovine, MJ/m³	Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja, MJ/m³	Ostali troškovi, MJ/m³
1	25,11 %	38,89 %	12,99 %	23,01 %
2	21,46 %	44,95 %	14,20 %	19,39 %
3	20,44 %	47,95 %	14,29 %	17,32 %
4	19,28 %	50,74 %	14,40 %	15,58 %
5	18,19 %	53,30 %	14,49 %	14,01 %
6	16,79 %	56,07%	14,69 %	12,44 %
7	15,73 %	58,36 %	14,78 %	11,13 %
8	14,71 %	60,43 %	14,83 %	10,03 %
9	13,88 %	62,18 %	14,83 %	9,11 %
10	12,94 %	63,98 %	14,87 %	8,21 %
11	12,05 %	65,71 %	14,90 %	7,34 %
12	11,15 %	67,38 %	14,93 %	6,54 %



Slika 65 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima površinske eksploatacije

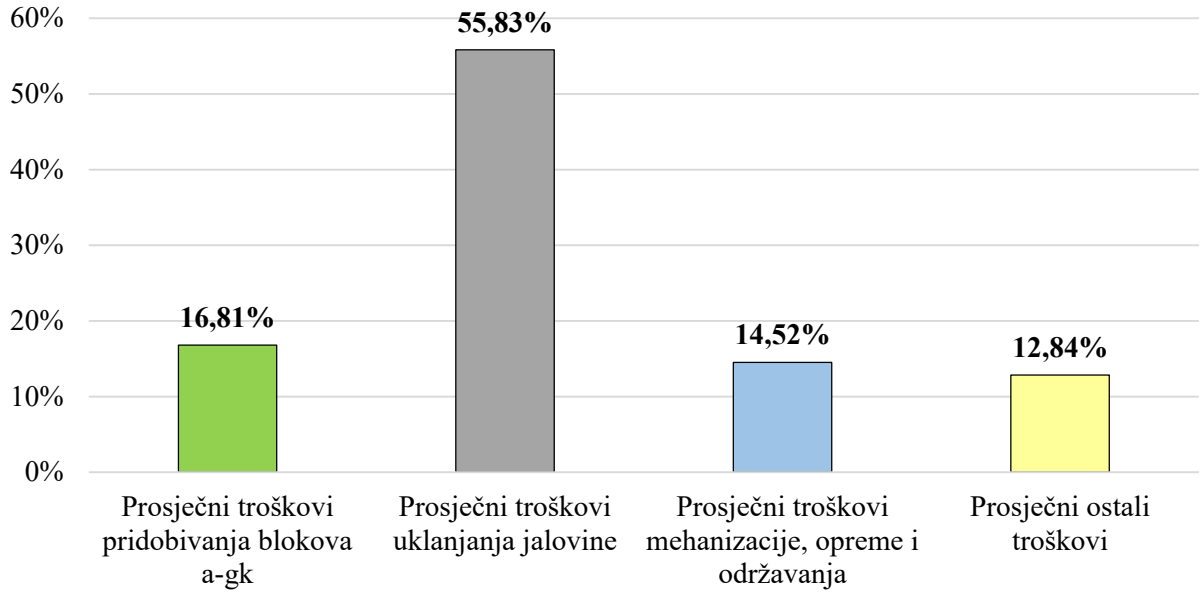
Iz analize postotnih udjela troškova površinske eksploatacije za prvu konturu površinske eksploatacije udio troškova pridobivanja blokova a-gk iznosi 25,11 %. Kako se razvijaju naredne konture površinske eksploatacije, tako se troškovi pridobivanja blokova a-gk kreću silaznom putanjom sve do dvanaeste konture površinske eksploatacije za koju u ukupnom udjelu troškova sudjeluju s 11,15 % što predstavlja ukupno smanjenje od 13,96 %.

Troškovi uklanjanja jalovine konstantno povećavaju svoj udio u ukupnim troškovima te tako za prvu konturu površinske eksploatacije iznose 38,89 % dok za dvanaestu konturu iznose 67,38 % što predstavlja promjenu od 28,49 %.

Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja konstantno povećavaju svoj postotni udio u ukupnim troškovima te tako za 1. konturu iznose 12,99 % ukupnih troškova, a za konturu 12 iznose 14,93 %. Promjena od 1. do 12. konture iznosi svega 1,9 %.

Ostali troškovi u ukupnim troškovima prve konture površinske eksploatacije sudjeluju u iznosu od 23,01 %, a razvojem ostalih kontura površinske eksploatacije uočava se konstantno smanjenje udjela ostalih troškova na iznos od 6,54 % za konturu 12 što predstavlja smanjenje od 16,47 %.

Generalno gledano prosječan udio troškova pridobivanja blokova a-gk za sve konture površinske eksploatacije iznosi 16,81 % dok prosječan udio troškova uklanjanja jalovine za sve konture iznosi 55,83 %, prosječan udio troškova mehanizacije, opreme i održavanja prosječno iznosi 14,52 %, a udio ostalih troškova iznosi 19,79 % u ukupnim troškovima (Slika 66).



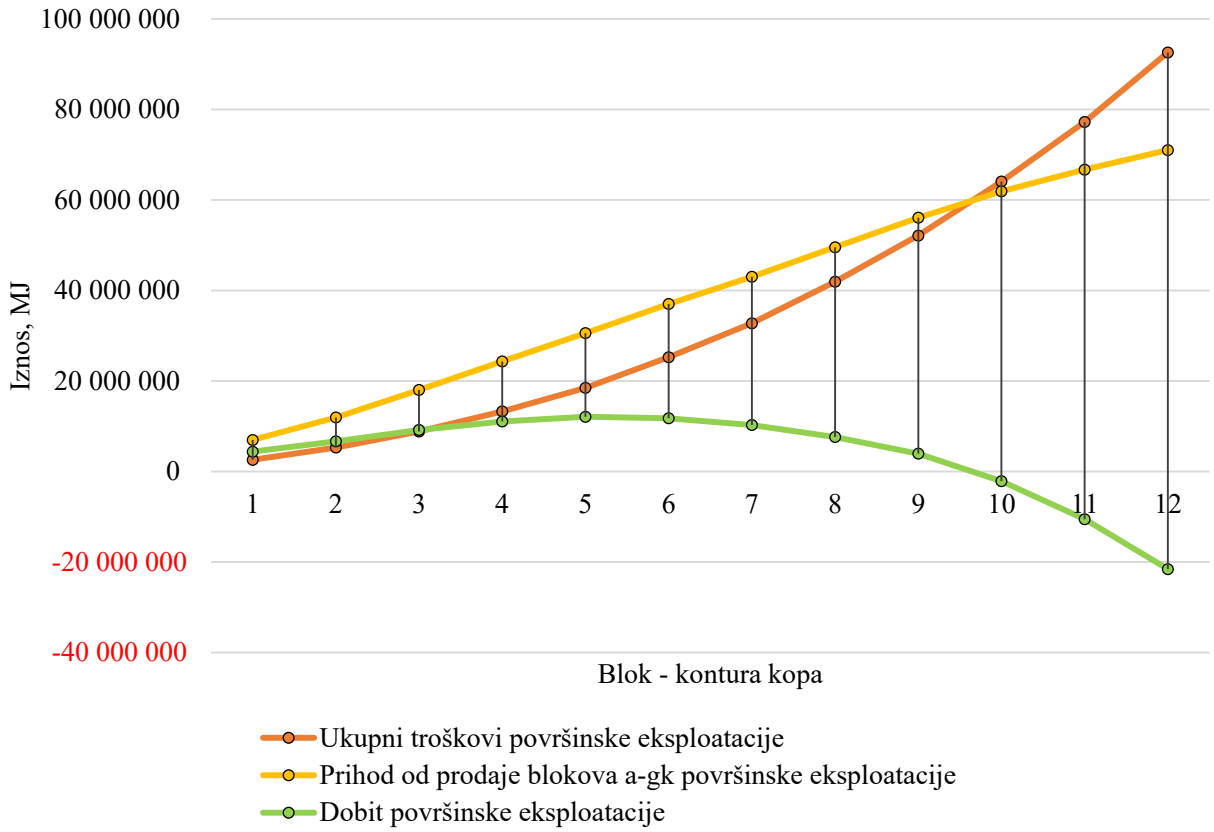
Slika 66 – Udio prosječnih troškova završnih kontura površinske eksploatacije

6.2.1.3. Prihod i dobit površinske eksploatacije

Analiza rezultata ekonomskih vrijednosti površinske eksploatacije napravljena je temeljem prihoda od prodaje blokova a-gk te ukupne dobiti površinske eksploatacije (Tablica 49 i Slika 67). Izračun ukupnog prihoda (P_1) površinske eksploatacije izračunat je korištenjem izraza (10), ukupni troškovi (T_1) dobiveni su korištenjem izraza (11), a ukupna dobit (profit) (D_1) površinske eksploatacije dobivena je korištenjem izraza (13).

Tablica 49 – Prihod i dobit površinske eksploatacije

Blok – kontura površinskog kopa	**Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk površinskom eksploatacijom**	**Ukupni troškovi površinske eksploatacije**	**Prihod od prodaje blokova a-gk površinske eksploatacije**	**Dobit površinske eksploatacije**
	(MJ/m^3)	**(MJ)**	**(MJ)**	**(MJ)**
	(C_e)	**(T) = (E) x (C_e)**	**(P) = (E) x (C_T)**	**(D) = (P) - (T)**
1	111,16	2 582 087	6 968 477	4 386 390
2	132,66	5 276 777	11 933 311	6 656 534
3	147,08	8 827 823	18 006 647	9 178 823
4	163,74	13 275 159	24 322 056	11 046 897
5	181,31	18 475 440	30 569 337	12 093 897
6	204,68	25 244 832	37 000 989	11 756 157
7	228,38	32 742 407	43 010 547	10 268 140
8	253,83	41 920 341	49 544 482	7 624 140
9	278,98	52 132 625	56 061 264	3 928 640
10	310,44	64 053 330	61 899 463	-2 153 867
11	347,40	77 240 592	66 702 018	-10 538 574
12	391,13	92 588 620	71 015 850	-21 572 770



Slika 67 – Troškovi, prihod i dobit površinske eksploatacije

Analizom ukupnih troškova, prihoda i dobiti površinske eksploatacije (Slika 67) vidljivo je da prihod od prodaje a-gk raste od bloka 1 do bloka 12. Iz nagiba krivulje prihoda može se pretpostaviti da će se dogoditi promjena uzlaznog trenda te da će se javiti negativni trend s obzirom na to da se javlja smanjenje razlike prihoda između konture 10, 11 i 12. S druge strane, krivulja ukupnih troškova površinske eksploatacije pokazuje gotovo eksponencijalan rast bez dijelova smanjivanja. Krivulje ukupnih troškova i prihoda površinske eksploatacije presijecaju se između blokova 9 i 10 što znači da kop u toj točki radi bez dobiti, tj. dobit je jednaka nuli. Krivulja dobiti površinske eksploatacije pokazuje blagi rast koji se zaustavlja kod bloka 5 te počinje imati silaznu putanju, odnosno dobit se počinje smanjivati te ide prema negativnim vrijednostima. Tako je dobit za površinske kopove 10, 11 i 12 negativna, odnosno stvara se gubitak poslovanja.

6.2.2. EKONOMSKI MODELI PODZEMNE EKSPLOATACIJE

U podzemnoj eksploataciji a-gk pridobivaju se blokovi stijene direktno iz stijenske mase te su troškovi isti neovisno o vrsti stijene koja se pridobiva (jalovina ili blokovi a-gk) te u potpunosti izostaju troškovi površinskog uklanjanja otkrivke i rekultivacije terena.

6.2.2.1. Proračun troškova podzemne eksploatacije

6.2.2.1.1. Rezanje lančanom sjekačicom

Za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije napravljen je proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed rezanja lančanom sjekačicom (L.S.) (Prilog 51).

Ukupna površina rezanja L.S. na pridobivanju blokova iz stijenske mase određena je u poglavlju 6.1.2.4. te iznosi 16,20 m^2.

Kapacitet L.S. određen je u poglavlju 6.1.7.2. te iznosi 5,25 m^2/h za podzemnu eksploataciju.

Jedinična površina rezanja L.S. pri izradi jednog bloka iznosi 3,0 m^2/m^3 stijenske mase, a predstavlja omjer ukupne površine rezanja L.S. za dobivanje blokova iz stijenske mase i volumena bloka koji se pili.

Proračun normativa rezanja lančane sjekačice podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.6.).

Ukupna površina rezanja L.S. pri dobivanju blokova iz stijenske mase predstavlja umnožak jedinične površine rezanja L.S. pri izradi jednog bloka iz stijenske mase i ukupnog volumena stijenske mase analizirane konture (Tablica 20).

6.2.2.1.2. Utovar blokova arhitektonsko-građevnog kamena utovarivačem

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara blokova a-gk utovarivačem napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 52).

Kapacitet utovarivača za utovar blokova a-gk određen je u poglavlju 6.1.8.1. te iznosi 76,8 m^3/h.

Izračun normativa utovara blokova a-gk utovarivačem podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.7.).

6.2.2.1.3. Utovar jalovine utovarivačem

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed utovara jalovine utovarivačem napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 53).

Kapacitet utovarivača za utovar jalovine određen je u poglavlju 6.1.8.2. te iznosi 115,2 m^3/h.

Izračun normativa utovara jalovine utovarivačem podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.7.).

6.2.2.1.4. Transport blokova arhitektonsko-građevnog kamena kamionom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed transporta blokova a-gk kamionom napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 54).

Izračun normativa transporta blokova a-gk kamionom podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.9.).

6.2.2.1.5. Transport jalovine kamionom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed transporta jalovine kamionom napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 55).

Izračun normativa transporta jalovine kamionom podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.3.).

6.2.2.1.6. Rad zaposlenika (nadnice)

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed rada zaposlenika (nadnice) napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 56).

Izračun normativa rada zaposlenika (nadnica) podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.11.).

6.2.2.1.7. Mehanizacija, oprema i održavanje

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed troškova mehanizacije, opreme i održavanja napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 57).

Izračun normativa mehanizacije, opreme i održavanja podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.12.), a razlike su prikazane u nastavku.

Jedinične vrijednosti mehanizacije i opreme korištene pri površinskoj eksploataciji prikazane su za svaki stroj i opremu (Tablica 40).

Ukupan iznos sati rada mehanizacije i opreme na kopu izračunat je za svaki stroj ovisno o materijalu u kojem stroj radi (Prilog 51 do Prilog 55).

Izračun ostalih vrijednosti u proračunu napravljen je korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6.

6.2.2.1.8. Investicijski i završni radovi

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed investicijskih i završnih radova napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 58).

Izračun normativa investicijskih i završnih radova podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.13.) s time da u potpunosti izostaju troškovi sanacije terena.

6.2.2.1.9. Državne naknade

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed državnih naknada napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 59).

Izračun normativa državnih naknada podzemne eksploatacije napravljen je pod istim pretpostavkama kao i proračun za površinsku eksploataciju (vidi poglavlje 6.2.1.1.14.).

6.2.2.1.10. Vjetrenje ventilatorom

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed vjetrenja ventilatorom napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 60).

Proračun normativa vjetrenja ventilatorom po bloku a-gk napravljen je za električnu energiju i gumene vjetrene cijevi korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera korištenih u proračunu prikazane su u poglavlju 6.1.5., tablica 42.

Ukupno vrijeme rada ventilatora (T_v) u izrazu (50) određeno je ukupnim vremenom rada lančane sjekačice i utovarivača s time da je dodatno određeno da će ventilator raditi 30 minuta prije i poslije svake smjene zbog dodatnog provjetravanja. Ukupan broj dodatnih sati uslijed smjenskog rada predstavlja zbroj ukupnih nadnica, rezanja horizontalnih i vertikalnih rezova lančane sjekačice te utovara blokova a-gk i jalovine utovarivačem. Pretpostavlja se da vjetrenje nije potrebno tijekom eksploatacije blokova za 1. konturu podzemnog kopa s obzirom na malu udaljenost od čela radilišta do svježeg zraka.

6.2.2.1.11. Odlamanje (kalanje) blokova

Proračun opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uslijed odlamanja (kalanja) blokova napravljen je za svaku konturu podzemnog kopa odnosno za svaki blok optimizacije eksploatacije (Prilog 61).

Broj potrebnih vodenih jastuka za odlamanje jednog bloka stijenske mase predstavlja omjer između broja vodenih jastuka i ukupnog broja blokova koji se odlome korištenjem jednog vodenog jastuka tako da jedinični broj vodenih jastuka po bloku iznosi 0,333333.

Broj vodenih jastuka po jediničnom volumenu stijenske mase predstavlja omjer jediničnog broja vodenih jastuka po bloku i volumena bloka koji se odlama (Tablica 28) te iznosi 0,061728 jastuka/m^3 stijenske mase.

Proračun normativa odlamanja (kalanja) blokova po bloku a-gk napravljen je za vodene jastuke korištenjem izraza definiranih u poglavlju 6.1.6. Vrijednosti jediničnih mjera korištenih u proračunu prikazane su u poglavlju 6.1.5., tablica 42.

6.2.2.2. Analiza troškova podzemne eksploatacije

Promjena troškova podzemne eksploatacije isto je ovisna poput površinske eksploatacije o promjeni omjera volumena stijenske mase koja se eksploatira, iskorištenju stijenske mase, broju rezova i volumenu komercijalnih blokova a-gk, vjetrenju podzemnih komora itd. Prednost je podzemne eksploatacije u selektivnom pristupu pridobivanja blokova a-gk i direktnoj eksploataciji sloja a-gk bez uklanjanja površinske otkrivke.

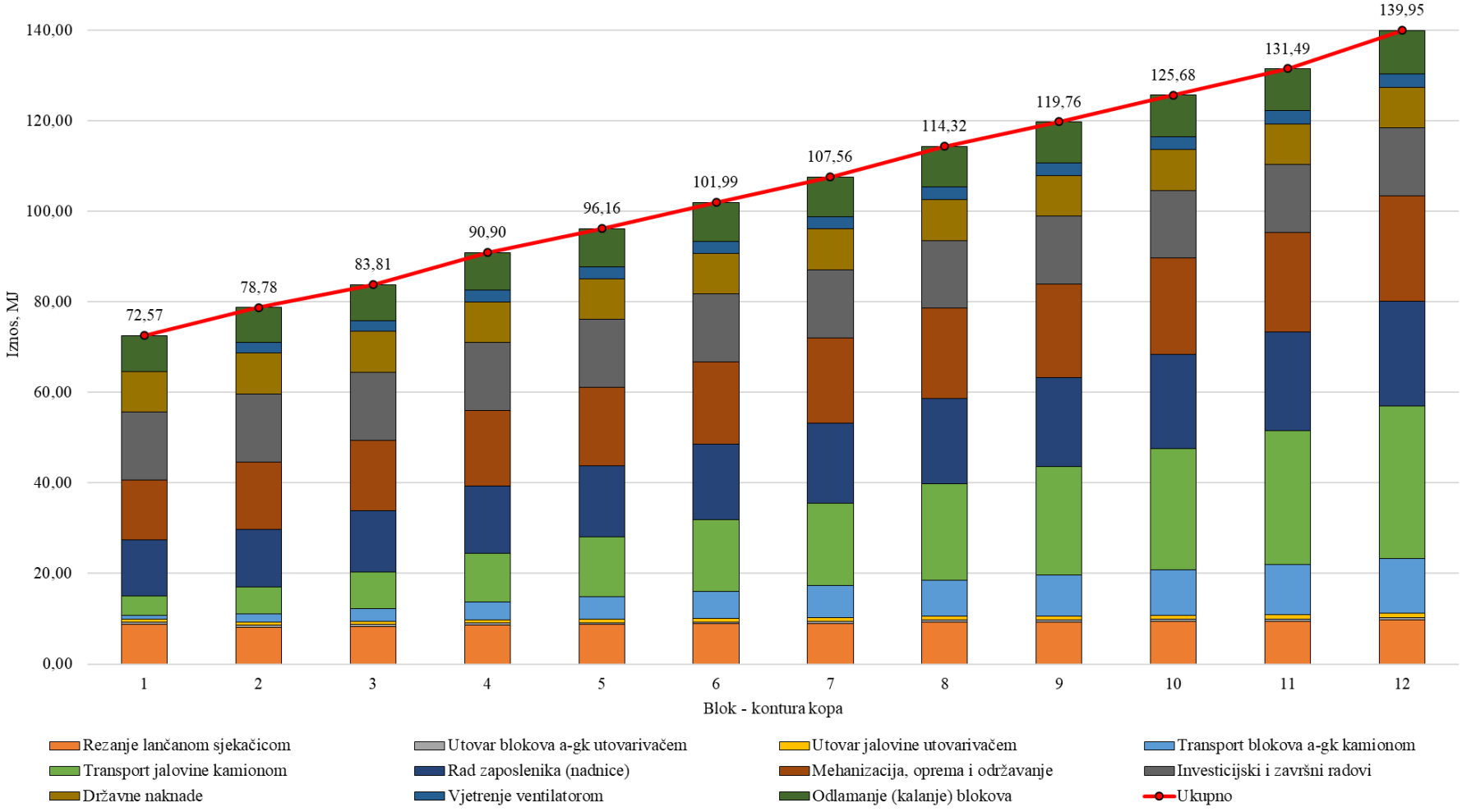
Zbrajanjem pojedinačnih opterećenja jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije dobivene su ukupne jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije (Tablica 54). Grafički prikaz pojedinačnog i ukupnog jediničnog opterećenja cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije prikazano je za svaku završnu konturu podzemne eksploatacije (Slika 68).

Ukupna jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk za prvi blok optimizacije podzemne eksploatacije iznosi 72,57 MJ/m^3 bloka a-gk što je ujedno i najniža jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije. Analizom svih ostalih kontura podzemne eksploatacije uočava se konstantan porast ukupne jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk te tako za konturu 12 iznosi 139,95 MJ/m^3. Promjena jedinične cijene pridobivanja od 1. do 12. konture iznosi 67,39 MJ/m^3 bloka a-gk što približno iznosi 48 %.

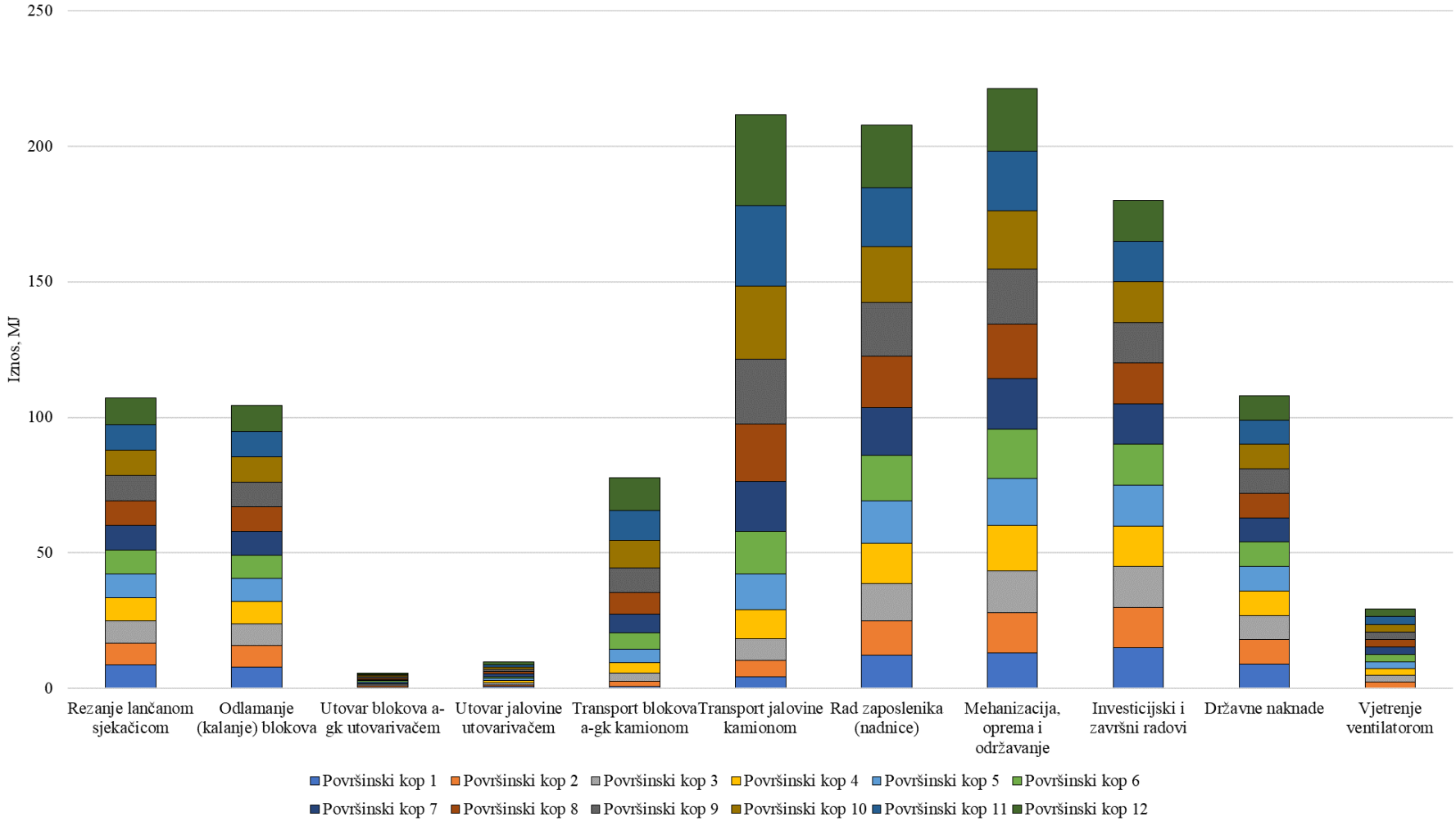
Kako bi se odredili pojedinačni troškovi koji najviše pridonose ukupnom opterećenju jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije, analizirani su kumulativno (Slika 69). Analizom kumulativnog prikaza pojedinačnih troškova zaključuje se da su troškovi mehanizacije, opreme i održavanja dominantni troškovi, a slijede ih troškovi transporta jalovine kamionom. Daljnjom analizom ustanovljeno je da su troškovi utovara blokova a-gk utovarivačem troškovi koji najmanje opterećuju jediničnu cijenu pridobivanja blokova a-gk, a slijede ih troškovi utovara jalovine utovarivačem.

Tablica 50 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije

Podzemni kop	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Vrsta troška	**Jedinična cijena pridobivanja bloka a-gk (MJ/m3 bloka a-gk)**											
Rezanje lančanom sjekačicom	8,72	8,04	8,20	8,56	8,68	8,85	8,97	9,18	9,27	9,38	9,47	9,76
Odlamanje (kalanje) blokova	7,98	7,79	7,96	8,35	8,48	8,66	8,79	9,02	9,11	9,23	9,33	9,64
Utovar blokova a-gk utovarivačem	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Utovar jalovine utovarivačem	0,71	0,68	0,71	0,77	0,78	0,81	0,83	0,86	0,88	0,89	0,91	0,95
Transport blokova a-gk kamionom	0,87	1,89	2,90	3,92	4,94	5,96	6,98	8,00	9,02	10,04	11,06	12,08
Transport jalovine kamionom	4,32	5,98	8,07	10,76	13,12	15,71	18,28	21,32	23,97	26,83	29,69	33,68
Rad zaposlenika (nadnice)	12,39	12,67	13,55	14,88	15,76	16,76	17,68	18,85	19,73	20,70	21,65	23,11
Mehanizacija, oprema i održavanje	13,11	14,88	15,51	16,63	17,32	18,12	18,86	19,84	20,52	21,30	22,04	23,30
Investicijski i završni radovi	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Državne naknade	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Vjetrenje ventilatorom	0,00	2,36	2,42	2,55	2,59	2,65	2,69	2,76	2,79	2,82	2,86	2,95
Ukupno	**72,57**	**78,78**	**83,81**	**90,90**	**96,16**	**101,99**	**107,56**	**114,32**	**119,76**	**125,68**	**131,49**	**139,95**



Slika 68 – Opterećenje jedinične cijene pridobivanja bloka a-gk po završnoj konturi podzemnog kopa



Slika 69 – Kumulativno opterećenje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije

Sukladno podjeli troškova površinske eksploatacije napravljena je podjela troškova podzemne eksploatacije (Tablica 51).

Tablica 51 – Podjela troškova podzemne eksploatacije

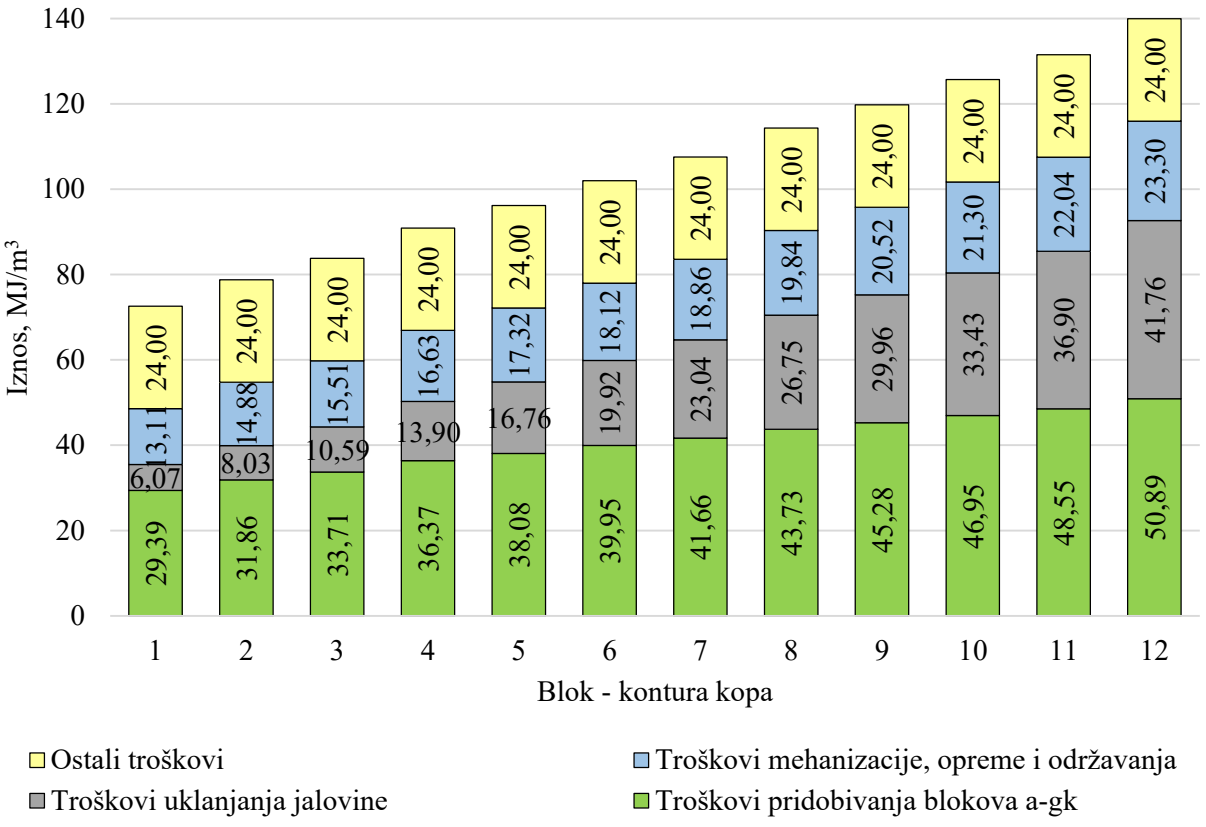
Troškovi pridobivanja blokova a-gk	**Troškovi uklanjanja jalovine**	**Troškovi mehanizacije**	**Ostali troškovi**
rezanje lančanom sjekačicom	utovar jalovine utovarivačem	mehanizacija, oprema i održavanje	investicijski i završni radovi
odlamanje (kalanje) blokova	transport jalovine kamionom	-	državne naknade
utovar blokova a-gk utovarivačem	rad zaposlenika (nadnice) na uklanjanju jalovine	-	-
transport blokova a-gk kamionom	-	-	-
rad zaposlenika (nadnice) na pridobivanju blokova a-gk	-	-	-
vjetrenje ventilatorom	-	-	-

Grupiranjem troškova podzemne eksploatacije prikazani su troškovi koji se javljaju tijekom eksploatacije sloja a-gk odnosno pridobivanja blokova a-gk. Grupirani troškovi uklanjanja jalovine predstavljaju troškove koji se javljaju uslijed volumena jalovine koja se javlja tijekom podzemne eksploatacije. Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja predstavljaju troškove vezane isključivo za mehanizaciju, opremu, održavanje i rezervne dijelove, a grupa ostalih troškova predstavlja troškove vezane za zakonske okvire, pripremne radove, istraživanje itd.

Iznosi grupiranih troškova podzemne eksploatacije prikazani su tablično (Tablica 52), a za jednostavniju analizu napravljen je i njihov grafički prikaz (Slika 70).

Tablica 52 – Vrijednosti grupiranih troškova podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	Troškovi pridobivanja blokova a-gk, MJ/m³	Troškovi uklanjanja jalovine, MJ/m³	Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja, MJ/m³	Ostali troškovi, MJ/m³	UKUPNO, MJ/m³
1	29,39	6,07	13,11	24,00	72,57
2	31,86	8,03	14,88	24,00	78,78
3	33,71	10,59	15,51	24,00	83,81
4	36,37	13,90	16,63	24,00	90,90
5	38,08	16,76	17,32	24,00	96,16
6	39,95	19,92	18,12	24,00	101,99
7	41,66	23,04	18,86	24,00	107,56
8	43,73	26,75	19,84	24,00	114,32
9	45,28	29,96	20,52	24,00	119,76
10	46,95	33,43	21,30	24,00	125,68
11	48,55	36,90	22,04	24,00	131,49
12	50,89	41,76	23,30	24,00	139,95



Slika 70 – Grupirani troškovi podzemne eksploatacije

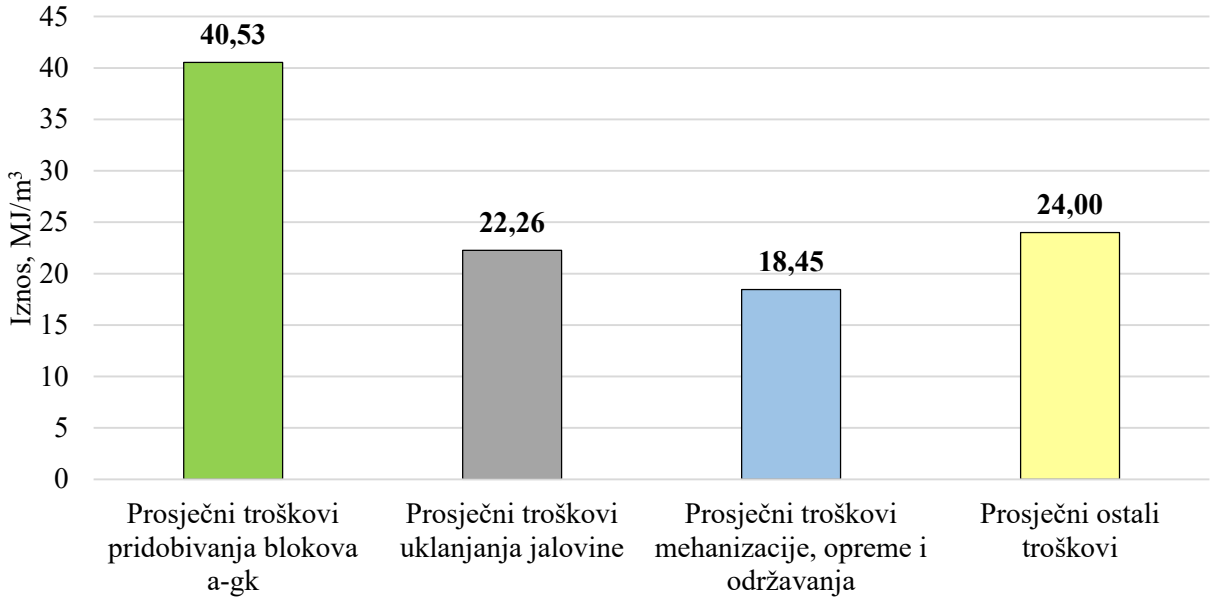
Analizom grupiranih troškova podzemne eksploatacije uočava se da su za blok 1 troškovi pridobivanja blokova a-gk dominantni troškovi u iznosu od 29,39 MJ/m^3. Razvojem ostalih završnih kontura podzemne eksploatacije troškovi pridobivanja blokova a-gk konstantno se povećavaju te za 12. konturu podzemne eksploatacije iznose 50,89 MJ/m^3. Ukupan iznos promjene odnosno povećanja troškova pridobivanja blokova a-gk od 1. do 12. konture iznosi 21,49 MJ/m^3.

Troškovi uklanjanja jalovine predstavljaju troškove s najmanjim iznosom za prvu konturu podzemnog kopa te iznose 6,07 MJ/m^3. Razvojem ostalih kontura podzemne eksploatacije troškovi uklanjanja jalovine povećavaju se te za zadnju 12. konturu iznose 41,76 MJ/m^3. Promjena troškova uklanjanja jalovine očituje se u povećanju troškova od 1. do 12. konture u iznosu od 35,70 MJ/m^3.

Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja za prvu konturu podzemne eksploatacije iznose 13,11 MJ/m^3 te su time treći troškovi po veličini. Analizom ostalih kontura podzemne eksploatacije vidljivo je da troškovi mehanizacije, opreme i održavanja konstantno rastu te za 12. konturu iznose 23,20 MJ/m^3. Promjena troškova mehanizacije, opreme i održavanja u obliku povećanja troškova od 1. do 12. konture iznosi 10,20 MJ/m^3.

Ostali su troškovi za sve konture podzemne eksploatacije isti te iznose 24,00 MJ/m^3.

Iznos troškova pridobivanja blokova a-gk za sve konture podzemne eksploatacije prosječno iznosi 40,53 MJ/m^3 dok prosječan iznos troškova uklanjanja jalovine za sve konture iznosi 22,26 MJ/m^3, prosječan iznos troškova strojeva, opreme i održavanja iznose 18,45 MJ/m^3, ostali troškovi iznose 24,00 MJ/m^3 (Slika 71).

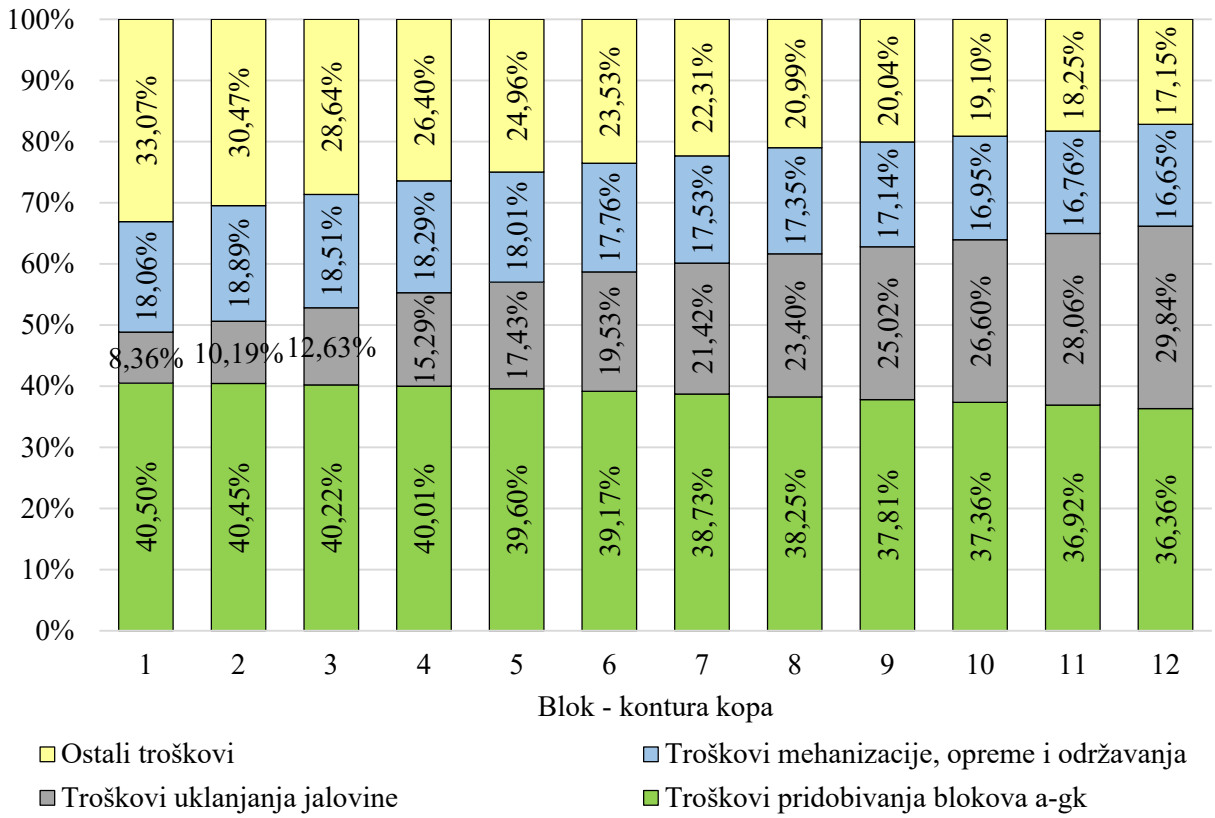


Slika 71 – Iznos prosječnih troškova završnih kontura podzemne eksploatacije

Dodatna analiza troškova podzemne eksploatacije napravljena je analizirajući postotne udjele troškova (Tablica 53 i Slika 72).

Tablica 53 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	**Troškovi pridobivanja blokova a-gk, MJ/m^3**	**Troškovi uklanjanja jalovine, MJ/m^3**	**Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja, MJ/m^3**	**Ostali troškovi, MJ/m^3**
1	40,50 %	8,36 %	18,06 %	33,07 %
2	40,45 %	10,19 %	18,89 %	30,47 %
3	40,22 %	12,63 %	18,51 %	28,64 %
4	40,01 %	15,29 %	18,29 %	26,40 %
5	39,60 %	17,43 %	18,01 %	24,96 %
6	39,17 %	19,53 %	17,76 %	23,53 %
7	38,73 %	21,42 %	17,53 %	22,31 %
8	38,25 %	23,40 %	17,35 %	20,99 %
9	37,81 %	25,02 %	17,14 %	20,04 %
10	37,36 %	26,60 %	16,95 %	19,10 %
11	36,92 %	28,06 %	16,76 %	18,25 %
12	36,36 %	29,84 %	16,65 %	17,15 %



Slika 72 – Udjeli grupiranih troškova u ukupnim troškovima podzemne eksploatacije

Udio troškova pridobivanja blokova a-gk za prvu završnu konturu podzemne eksploatacije iznosi 40,50 % ukupnih troškova. Analizom ostalih završnih kontura podzemne eksploatacije uočava se konstantno smanjenje udjela troškova pridobivanja blokova a-gk te za 12. konturu oni iznose 36,36 %. Smanjenje troškova pridobivanja blokova a-gk od 1. do 12. završne konture podzemne eksploatacije iznosi 4,14 %.

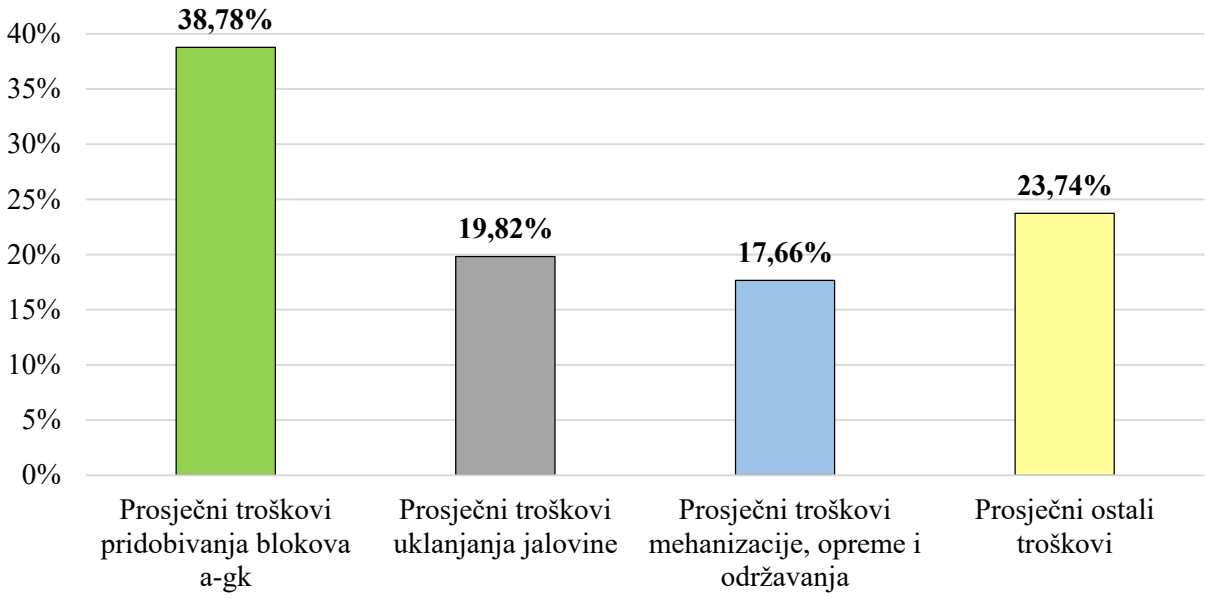
Troškovi vezani za uklanjanje jalovine za prvu konturu iznose 8,36 % ukupnih troškova te su oni najmanje zastupljeni u ukupnim troškovima. Analizom ostalih završnih kontura podzemne eksploatacije uočava se konstantno povećanje udjela troškova uklanjanja jalovine te tako za konturu 12 u ukupnim troškovima sudjeluju s 29,84 %. Promjena udjela troškova uklanjanja jalovine od 1. do 12. završne konture očituje se u povećanju od 21,48 % u ukupnim troškovima.

Troškovi mehanizacije, opreme i održavanja za prvu konturu podzemne eksploatacije iznose 18,06 % od ukupnih troškova te se oni tijekom svih analiziranih završnih kontura podzemne eksploatacije blago smanjuju u ukupnom udjelu troškova, a za završnu konturu 12 iznose

16,65 %. Promjena udjela odnosno smanjenje troškova mehanizacije, opreme i održavanja od 1. do 12. konture iznosi 1,41 %.

Udio ostalih troškova u ukupnih troškovima podzemne eksploatacije za prvu završnu konturu podzemne eksploatacije iznosi 33,07 % što predstavlja drugi po važnosti udio u ukupnim troškovima. Analizom ostalih završnih kontura uočava se konstantno smanjenje udjela ostalih troškova te tako za konturu 12 oni iznose 17,15 % u ukupnim troškovima. Ostali se troškovi od 1. do 12. završne konture smanjuju za iznos od 15,92 %.

Općenito gledano prosječan udio troškova pridobivanja blokova a-gk za sve konture podzemne eksploatacije iznosi 38,78 %, prosječan udio troškova uklanjanja jalovine za sve konture iznosi 21,33 %, prosječan udio troškova mehanizacije, opreme i održavanja iznosi 17,66 %. a prosječan udio ostalih troškova iznosi 23,74 % (Slika 73).



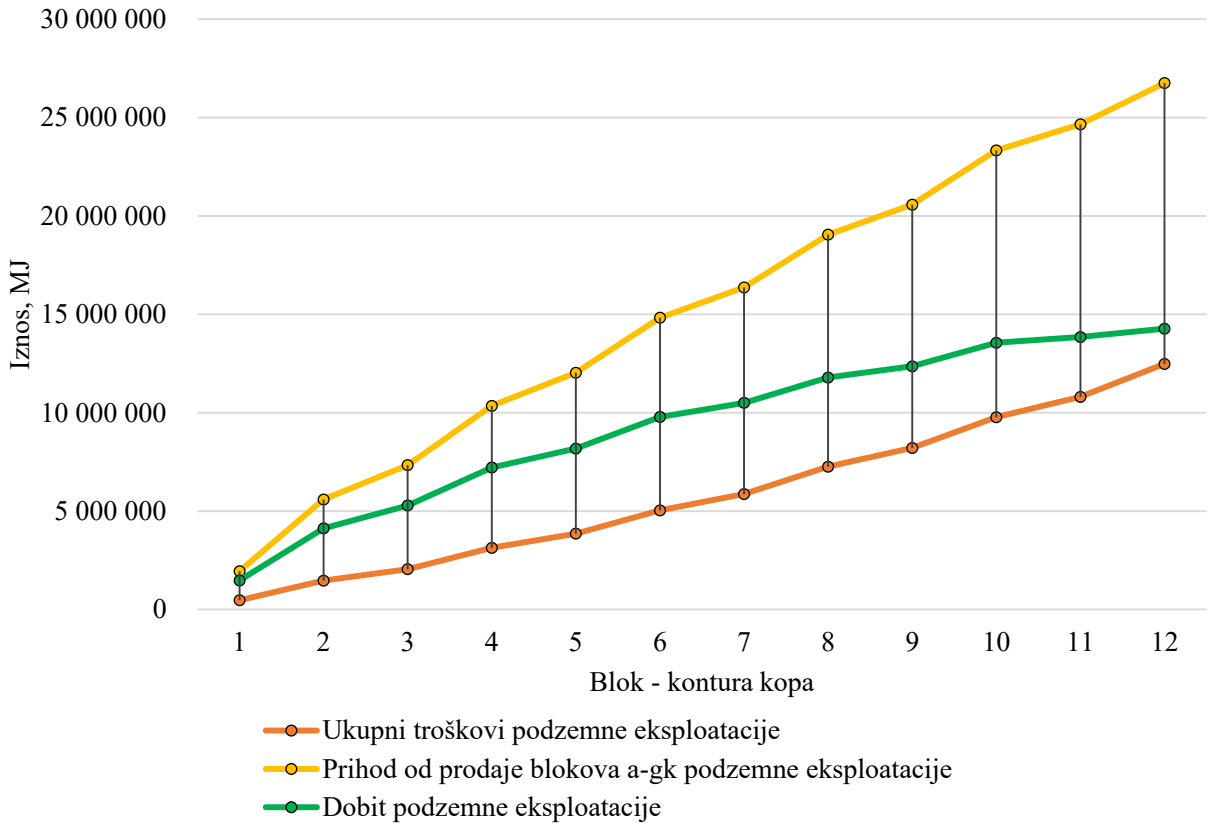
Slika 73 – Udio prosječnih troškova završnih kontura podzemne eksploatacije

6.2.2.3. Prihod i dobit podzemne eksploatacije

Analiza rezultata ekonomskih vrijednosti podzemne eksploatacije napravljena je temeljem prihoda od prodaje blokova a-gk te ukupne dobiti podzemne eksploatacije (Tablica 54 i Slika 74). Izračun ukupnog prihoda (P_2) podzemne eksploatacije izračunat je korištenjem izraza (10), ukupni troškovi (T_2) dobiveni su korištenjem izraza (11), a ukupna dobit (profit) (D_2) podzemne eksploatacije dobivena je korištenjem izraza (29).

Tablica 54 – Prihod i dobit podzemne eksploatacije

Blok – kontura podzemnog kopa	Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk podzemnom eksploatacijom	Ukupni troškovi podzemne eksploatacije	Prihod od prodaje blokova a-gk podzemne eksploatacije	Dobit podzemne eksploatacije
	MJ/m^3	MJ	MJ	MJ
	(Ce)	(T) = (E) x (Ce)	(P) = (E) x (CT)	(D) = (P) - (T)
1	72,57	471 638	1 949 788	1 478 150
2	78,78	1 468 403	5 591 983	4 123 580
3	83,81	2 049 955	7 338 286	5 288 330
4	90,90	3 136 756	10 351 846	7 215 090
5	96,16	3 858 146	12 037 024	8 178 878
6	101,99	5 041 461	14 829 601	9 788 141
7	107,56	5 869 571	16 371 357	10 501 786
8	114,32	7 260 598	19 052 765	11 792 168
9	119,76	8 214 432	20 576 662	12 362 230
10	125,68	9 775 501	23 334 180	13 558 679
11	131,49	10 808 834	24 660 049	13 851 215
12	139,95	12 481 655	26 755 007	14 273 352



Slika 74 – Troškovi, prihod i dobit podzemne eksploatacije

Iz analize ukupnih troškova, dobiti i prihoda podzemne eksploatacije (Slika 74) za blok 1 uočava se da je prihod od prodaje a-gk neznatno veći od dobiti podzemne eksploatacije, no situacija se mijenja već na bloku 2 kada prihod odmiče od ukupnih troškova podzemne eksploatacije te je time i dobit veća. Prihod od prodaje a-gk svih analiziranih blokova pokazuje konstantan relativno linearan rast, a manje promjene javljaju se uslijed ostavljanja potpornih stupova prilikom podzemne eksploatacije.

Ukupni troškovi podzemne eksploatacije isto tako pokazuju relativno linearan do blago eksponencijalan rast, no u odnosu na prihod od prodaje blokova a-gk rast je znatno blaži. Krivulja troškova pokazuje konstantan rast, a između blokova 10 i 12 počinje imati veći nagib što upućuje na povećanje troškova podzemne eksploatacije odnosno smanjenje dobiti.

Dobit podzemne eksploatacije od bloka 1 do 2 pokazuje najveći rast te se nakon bloka 2 krivulja dobiti podzemne eksploatacije ustaljuje te dobit podzemne eksploatacije raste. Rast krivulje dobiti podzemne eksploatacije počinje se mijenjati te ona pokazuje trend smanjenja između blokova 10 i 12 podzemne eksploatacije te se pretpostavlja da će krenuti prema negativnom trendu.

7. DISKUSIJA REZULTATA MODELA KOPOVA

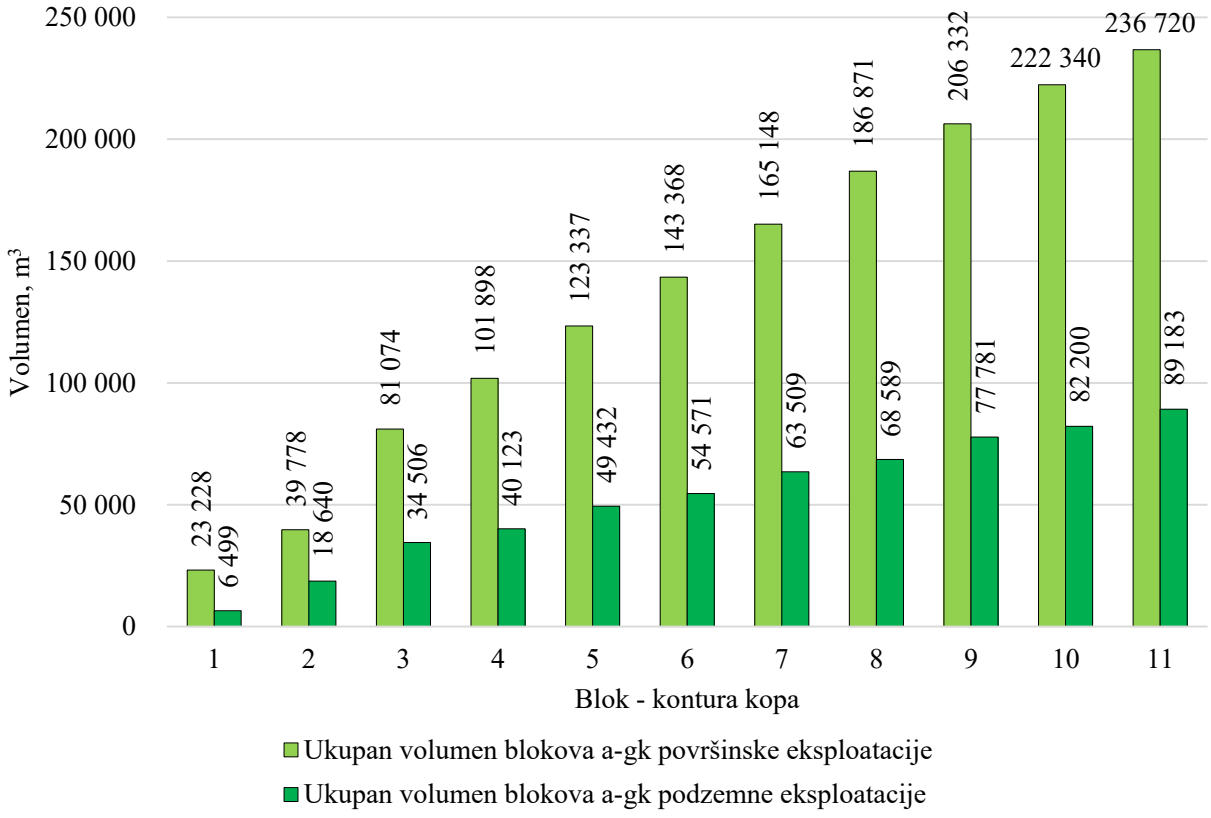
Analizom rezultata završnih kontura kopova obuhvaćen je volumen blokova a-gk, ekonomske vrijednosti troškova, prihoda i dobiti površinske i podzemne eksploatacije te jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk.

7.1. ANALIZA VOLUMENA BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Analiza volumena blokova a-gk, koju je moguće dobiti površinskom i podzemnom eksploatacijom, napravljena je komparacijom ukupnih volumena blokova površinske eksploatacije (Tablica 17) i ukupnih volumena blokova podzemne eksploatacije (Tablica 23).

Komparativnom analizom ukupnog volumena blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije (

Slika 75) vidljivo je da je volumen blokova koji je moguće dobiti površinskim načinom eksploatacije znatno veći u odnosu na volumen blokova a-gk koji je moguće dobiti podzemnim načinom eksploatacije. Razlog tome je specifičnost svake od metoda koje su primijenjene pri optimizaciji eksploatacije blokova a-gk. Površinskom eksploatacijom dobiven je veći volumen blokova a-gk s obzirom na to da se vade dijelovi ležišta koji su u kosinama površinskog kopa što je nužno s obzirom na specifičnost metode eksploatacije. Podzemnom eksploatacijom vade se isključivo dijelovi ležišta unutar pravilne geometrijske forme (duljine, širine i visine) bez kosina s ostavljanjem zaštitne ploče.

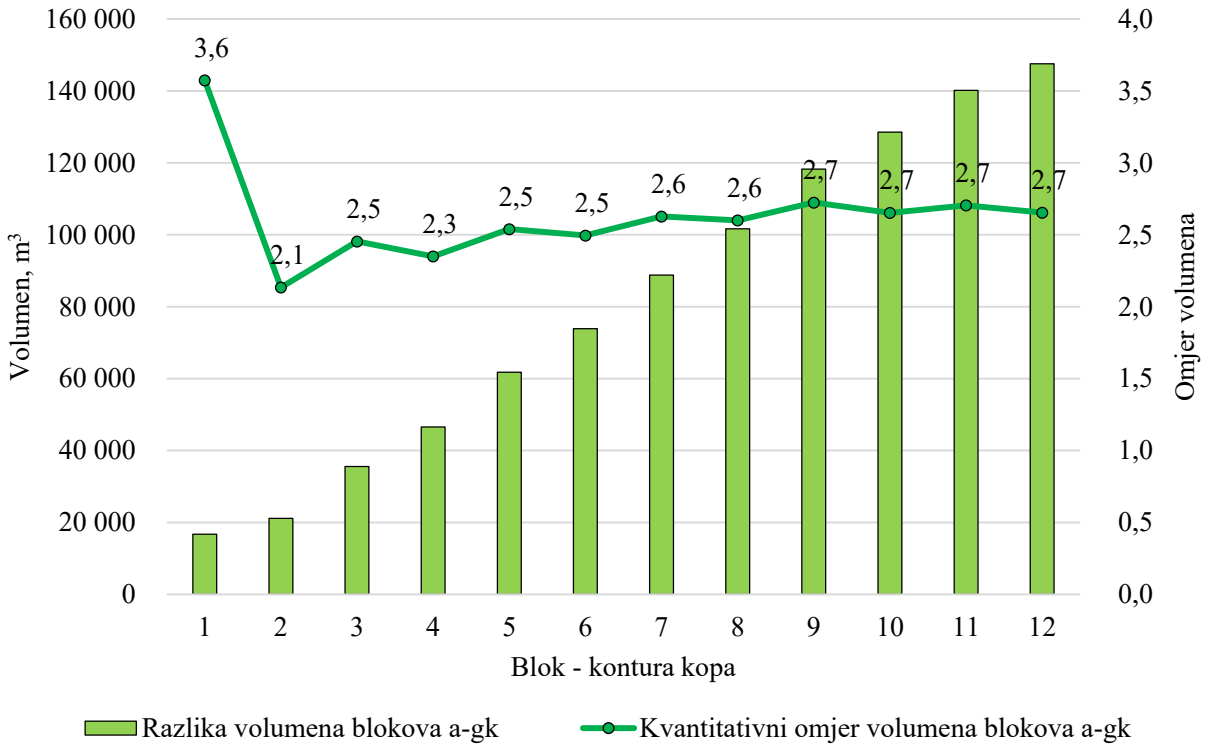


Slika 75 – Kvantitativni odnos volumena blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije

Razlika ukupnog volumena blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije za blok 1 iznosi 16 729 m^3, a omjer volumena blokova a-gk iznosi 3,6 puta što predstavlja i najveći omjer odnosa volumena blokova a-gk (Tablica 55). Nastavkom eksploatacije blokova 2 do 12 omjer volumena a-gk površinske i podzemne eksploatacije prosječno iznosi 2,5 puta s time da je između blokova 9 i 12 omjer konstantan u iznosu od 2,7 (Slika 76).

Tablica 55 – Kvantitativni odnos volumena blokova površinske i podzemne eksploatacije

Blok – kontura površinskog kopa	Razlika volumena blokova površinske i podzemne eksploatacije, m^3	Kvantitativni odnos površinske i podzemne eksploatacije
1	16 729	3,6
2	21 138	2,1
3	35 561	2,5
4	46 567	2,3
5	61 774	2,5
6	73 905	2,5
7	88 797	2,6
8	101 639	2,6
9	118 282	2,7
10	128 551	2,7
11	140 140	2,7
12	147 536	2,7

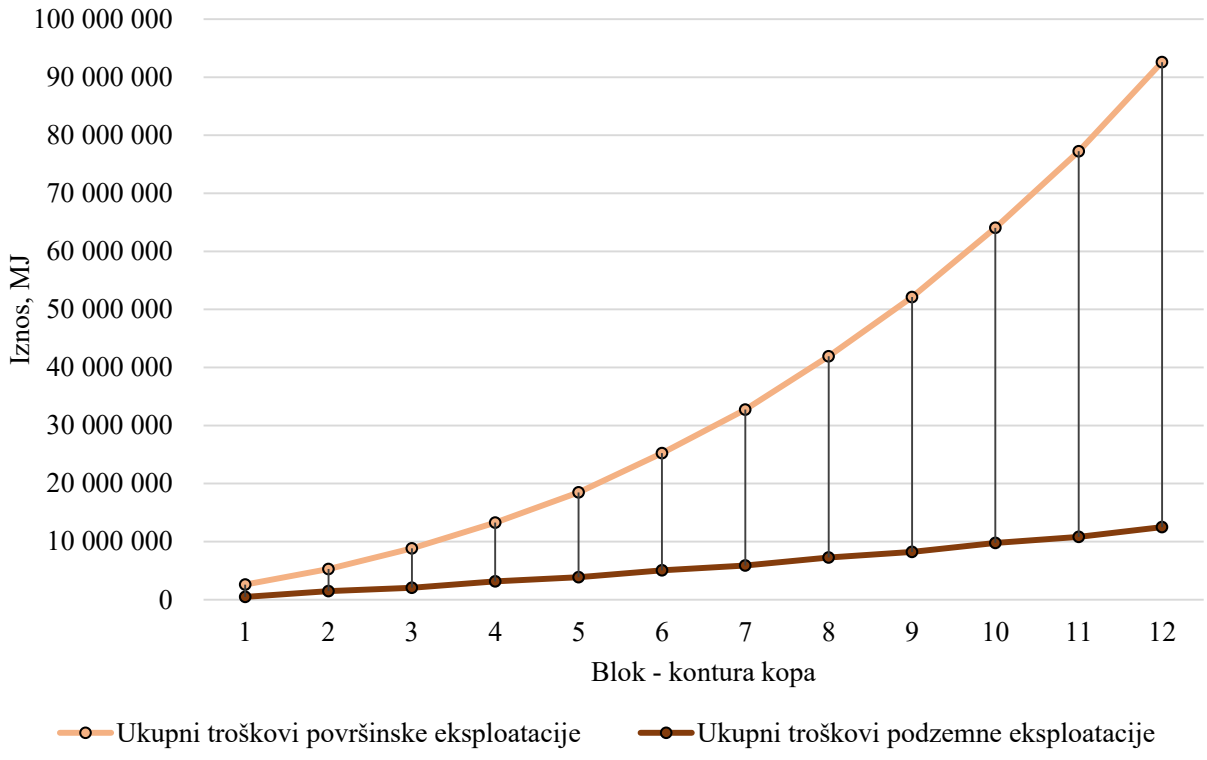


Slika 76 – Kvantitativni odnos volumena blokova površinske i podzemne eksploatacije

7.2. ANALIZA TROŠKOVA POVRŠINSKE I PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Analiza troškova površinske i podzemne eksploatacije napravljena je komparacijom ukupnih troškova površinske eksploatacije (Tablica 45) i ukupnih troškova podzemne eksploatacije (Tablica 54).

Analizom ukupnih troškova površinske i podzemne eksploatacije (Slika 77) vidljivo je da su ukupni troškovi površinske eksploatacije od početka (od bloka 1) veći u odnosu na ukupne troškove podzemne eksploatacije te tako razlika ukupnih troškova za blok 1 iznosi 2 110 449 MJ. Napretkom otkopavanja blokova uočava se sve veća razlika ukupnih troškova površinske i podzemne eksploatacije te tako za kop 12 razlika iznosi 80 106 965 MJ. Dodatno, može se zaključiti da ukupni troškovi površinske eksploatacije rastu eksponencijalno dok se ukupni troškovi podzemne eksploatacije povećavaju gotovo linearno. Razlog povećanja ukupnih troškova površinske eksploatacije povećanje je udjela troškova transporta površinske otkrivke što je uvjetovano ležištem dok se troškovi podzemne eksploatacije odnose na dominantne troškove podzemne eksploatacije – mehanizacija, oprema i održavanje te transport jalovine kamionom.

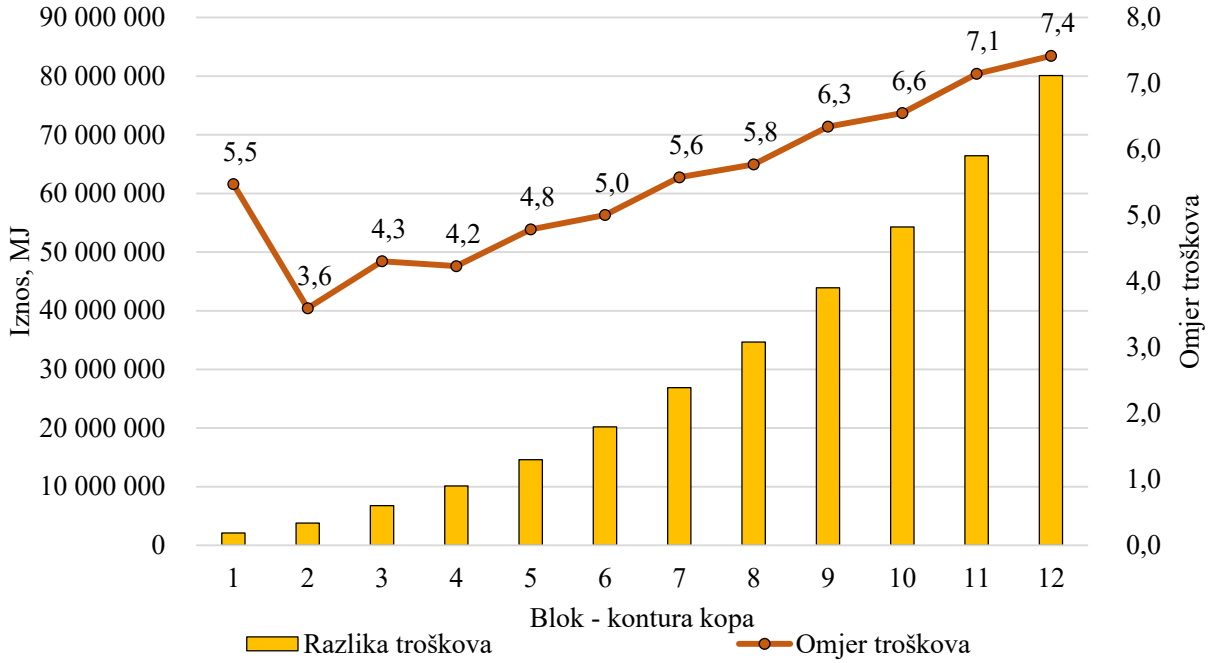


Slika 77 – Ukupni troškovi površinske i podzemne eksploatacije

Razlike troškova površinske i podzemne eksploatacije povećavaju se za svaki analizirani blok optimizacije eksploatacije (Tablica 56). Ako se razlika troškova sagleda u omjerima, ona prosječno iznosi 5,5 s time da se općenito gledano relativno linearno povećava od bloka 2 do 12 (Slika 78).

Tablica 56 – Razlika i omjer troškova površinske i podzemne eksploatacije

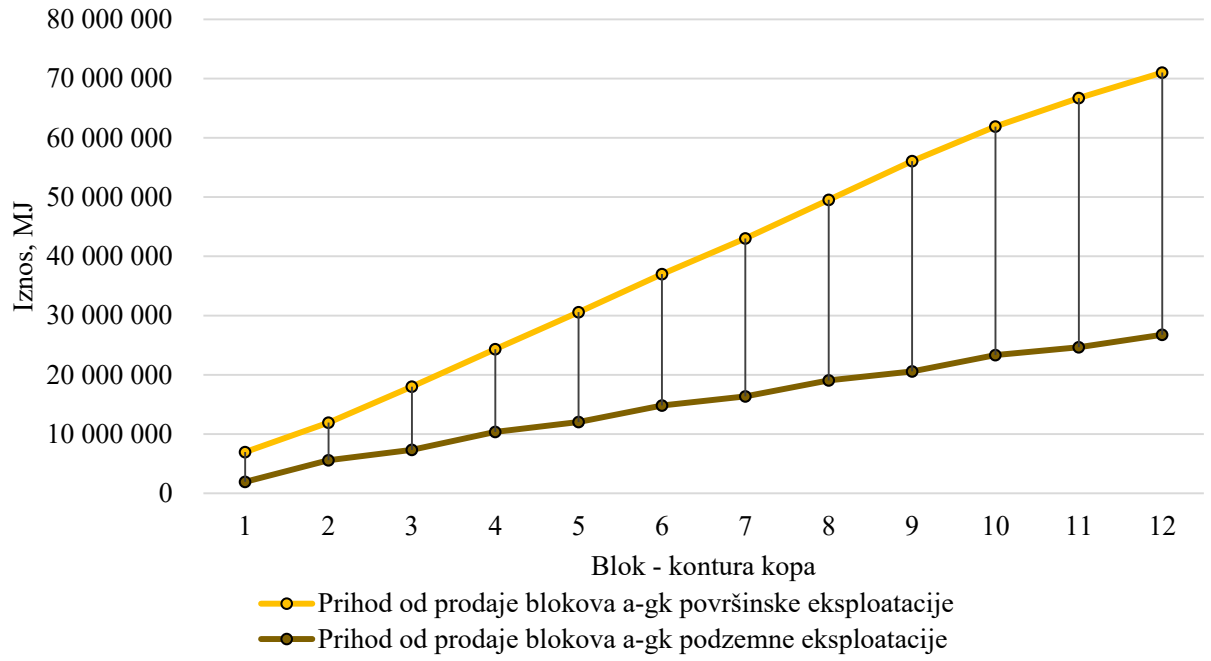
Blok – kontura kopa	**Razlika ukupnih troškova površinske i podzemne eksploatacije, MJ**	**Omjer troškova površinske i podzemne eksploatacije**
1	2 110 449	5,5
2	3 808 375	3,6
3	6 777 868	4,3
4	10 138 403	4,2
5	14 617 295	4,8
6	20 203 371	5,0
7	26 872 836	5,6
8	34 659 743	5,8
9	43 918 193	6,3
10	54 277 829	6,6
11	66 431 758	7,1
12	80 106 965	7,4



Slika 78 – Razlika i odnosi troškova površinske i podzemne eksploatacije

7.3. ANALIZA PRIHODA POVRŠINSKE I PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Analiza prihoda površinske i podzemne eksploatacije napravljena je komparacijom prihoda površinskih kopova (Tablica 49) i podzemnih kopova (Tablica 54).



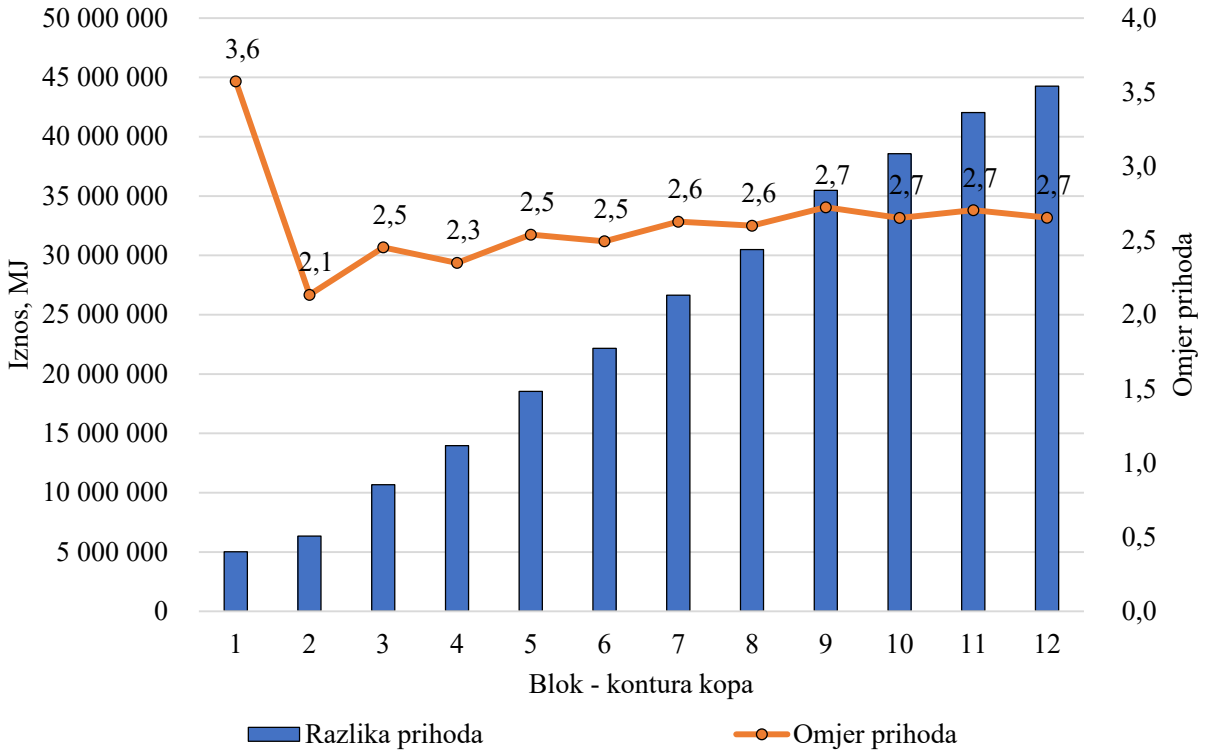
Slika 79 – Prihod od prodaje blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije

Analizom ukupnih prihoda od prodaje blokova a-gk (Slika 79) već kod bloka 1 uočava se znatno veći prihod od prodaje blokova dobivenih površinskom eksploatacijom u iznosu od 6 968 477 MJ naprema prihodu ostvarenom podzemnom eksploatacijom u iznosu od 1 949 788 MJ što predstavlja razliku od 5 018 689 MJ. Razlog leži u volumenu a-gk koji se pridobiva površinskom eksploatacijom s obzirom na to da se eksploatiraju i dijelovi ležišta u kosinama površinskog kopa što nije slučaj kod podzemne eksploatacije.

Prihod površinske eksploatacije je 3,6 puta veći u odnosu na prihod ostvaren podzemnom eksploatacijom za blok 1. Nastavkom eksploatacije, od bloka 2 do 12, uočava se povećavanje prihoda površinske i podzemne eksploatacije te je tako prihod površinske eksploatacije u prosjeku 2,6 puta veći od prihoda podzemne eksploatacije između blokova 1 i 12 (Tablica 57) s time da je između blokova 9 i 12 omjer konstantan u iznosu od 2,7 (Slika 80).

Tablica 57 – Razlika i omjer prihoda površinske i podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	**Razlika prihoda površinske i podzemne eksploatacije, MJ**	**Omjer prihoda površinske i podzemne eksploatacije**
1	5 018 689	3,6
2	6 341 329	2,1
3	10 668 361	2,5
4	13 970 210	2,3
5	18 532 313	2,5
6	22 171 387	2,5
7	26 639 190	2,6
8	30 491 716	2,6
9	35 484 602	2,7
10	38 565 283	2,7
11	42 041 969	2,7
12	44 260 843	2,7

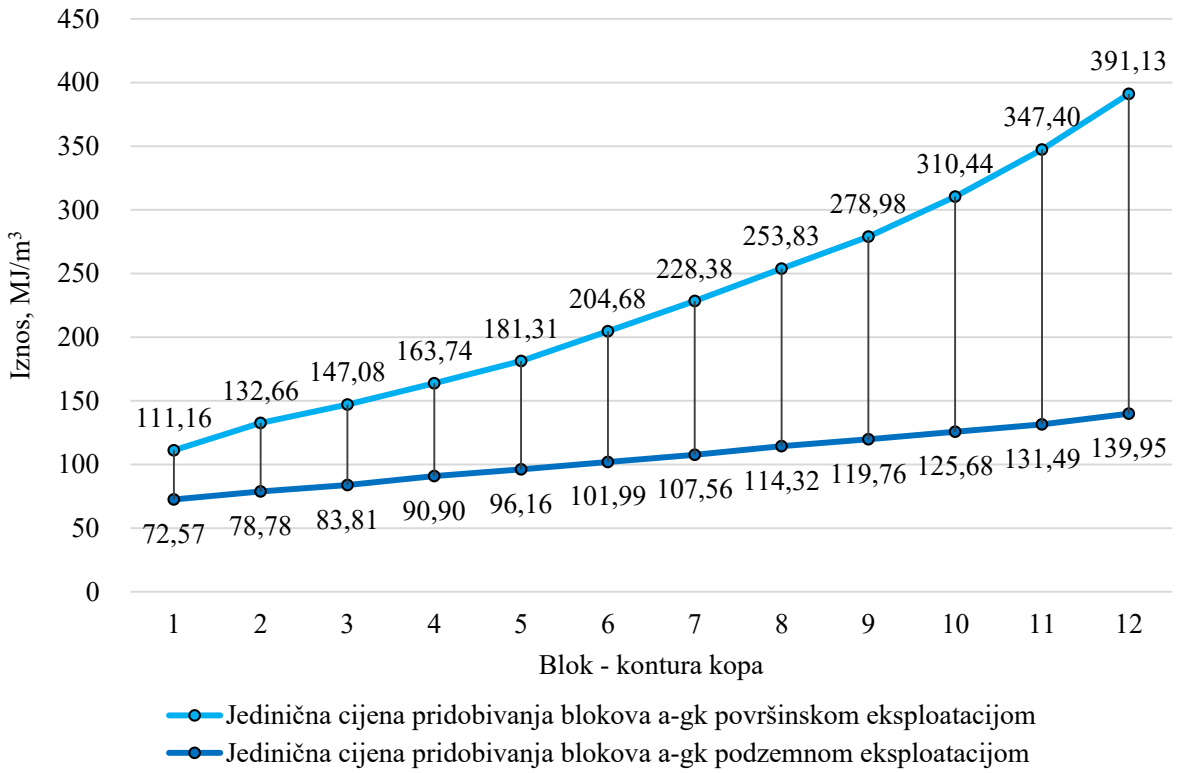


Slika 80 – Razlika i omjer prihoda površinske i podzemne eksploatacije

7.4. ANALIZA JEDINIČNE CIJENE PRIDOBIVANJA BLOKOVA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA POVRŠINSKE I PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Analiza jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk napravljena je komparacijom jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinskih kopova (Tablica 45) i podzemnih kopova (Tablica 50).

Analizom jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk (Slika 81) vidljivo je da je jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk dobivenih podzemnom eksploatacijom manja u odnosu na površinsku eksploataciju za sve blokove optimizacije eksploatacije. Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk za podzemnu eksploataciju blago linearno raste dok jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk za površinsku eksploataciju raste gotovo eksponencijalno. S razvojem završnih kontura kopova, odnosno od bloka 1 do 12, povećava se razlika jediničnih cijena pridobivanja blokova a-gk.

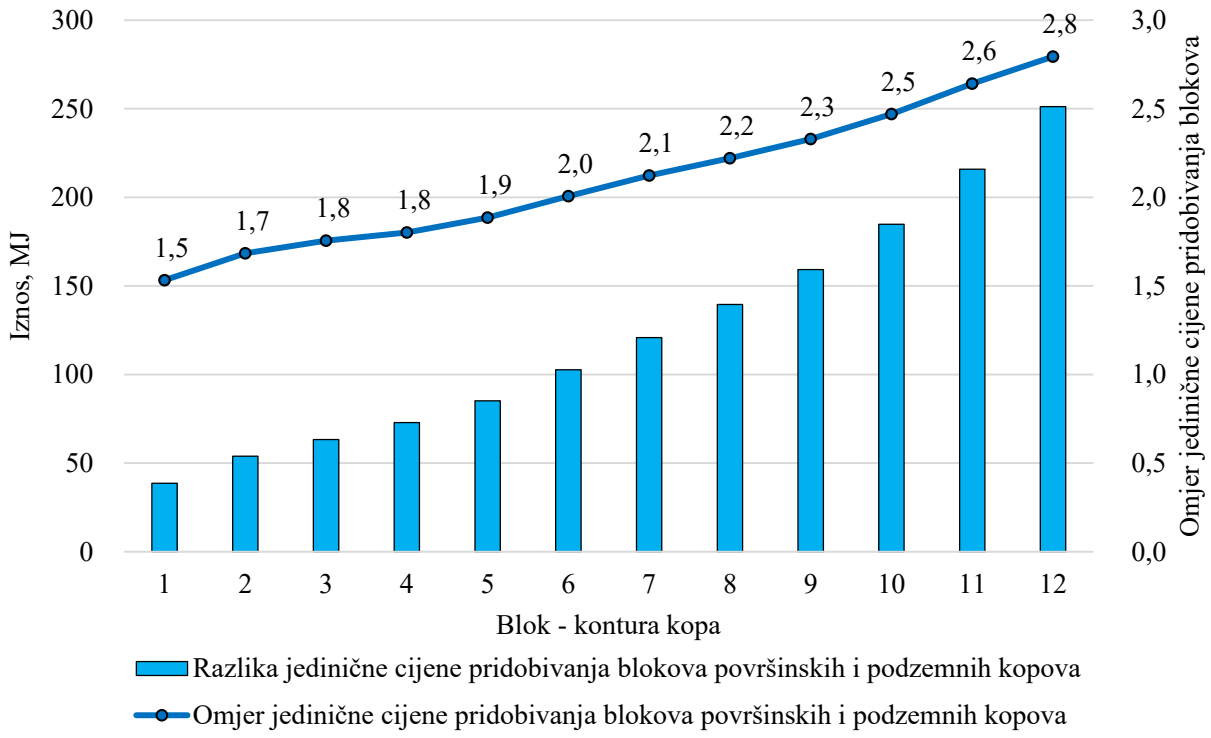


Slika 81 – Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk

Za blok 1 razlika jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk iznosi 38,59 MJ (Tablica 58 i Slika 82). Iz analize daljnjih promjena jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uočava se konstantno povećanje razlike jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk između površinske i podzemne eksploatacije. Razlog konstantnog povećanja razlike između jediničnih cijena pridobivanja blokova a-gk upućuje na konstantno povećanje troškova odnosno smanjuje se prihod od prodaje blokova a-gk. Razlika minimalne prodajne cijene blokova a-gk od bloka optimizacije eksploatacije 1 do bloka 12 prosječno iznosi 123,98 MJ. Omjer jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije konstantno se relativno linearno povećava od bloka 1 do 12, a prosječno iznosi 2,1.

Tablica 58 – Odnos i omjer jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	Odnos jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije, MJ/m^3	Omjer jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije
1	38,59	1,5
2	53,88	1,7
3	63,27	1,8
4	72,84	1,8
5	85,16	1,9
6	102,69	2,0
7	120,82	2,1
8	139,51	2,2
9	159,21	2,3
10	184,76	2,5
11	215,90	2,6
12	251,18	2,8

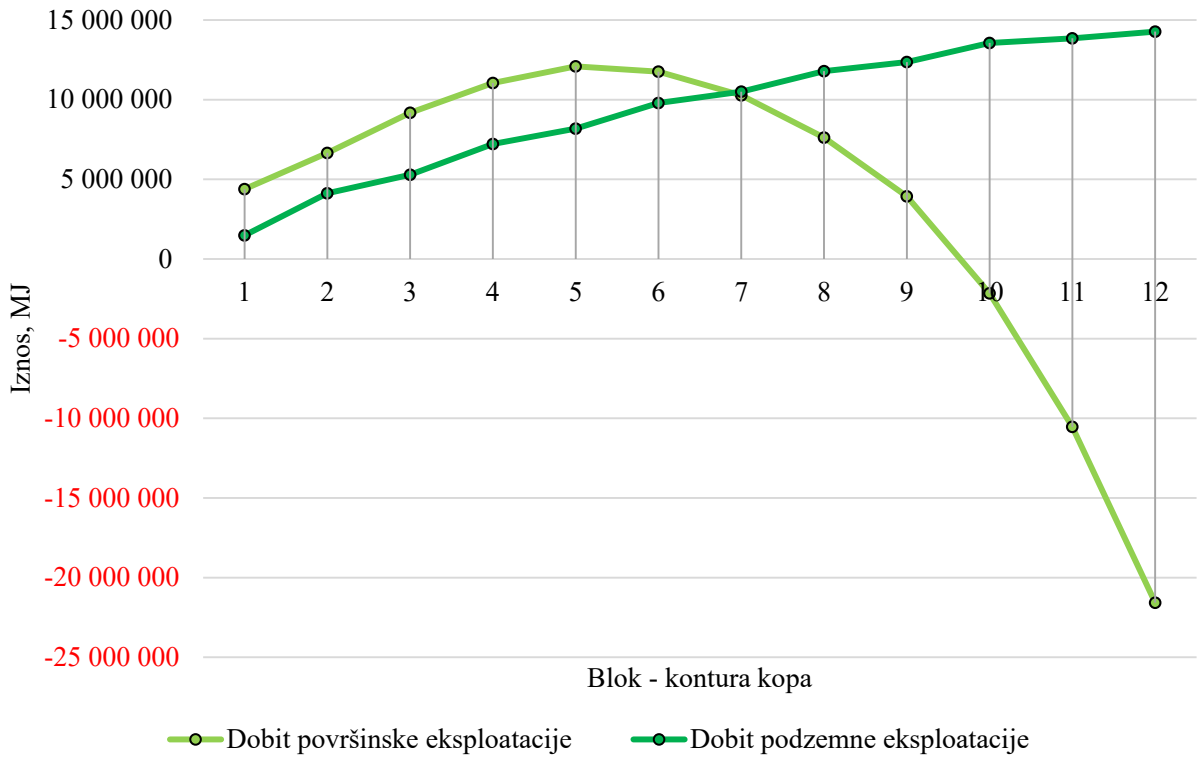


Slika 82 – Razlika i odnos jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinskih i podzemnih kopova

7.5. ANALIZA DOBITI POVRŠINSKE I PODZEMNE EKSPLOATACIJE

Analiza dobiti površinske i podzemne eksploatacije napravljena je komparacijom dobiti površinske eksploatacije (Tablica 49) i dobiti podzemne eksploatacije (Tablica 54).

Iz rezultata komparativne analize dobiti površinske i podzemne eksploatacije (Slika 83) vidljiv je porast krivulje dobiti podzemne eksploatacije kod svih blokova odnosno završnih kontura podzemnih kopova. Krivulja dobiti podzemne eksploatacije između blokova optimizacije eksploatacije 10 i 12 počinje stagnirati pa je pretpostavka da će poprimiti negativni trend te da je vrhunac rasta upravo kontura 12. Dobit površinske eksploatacije u počecima pokazuje rast te se očitava od bloka 1 do 5, a nakon bloka 5 krivulja dobiti površinske eksploatacije poprima negativan trend. Između blokova 9 i 10 krivulja površinske eksploatacije prelazi u negativno područje te se javlja gubitak poslovanja. Izjednačavanje dobiti površinske i podzemne eksploatacije javlja se između blokova optimizacije 6 i 7 što ukazuje da je potrebno razmotriti kojim će se načinom eksploatacije nastaviti eksploatirati ležište.



Slika 83 – Dobit od prodaje blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije

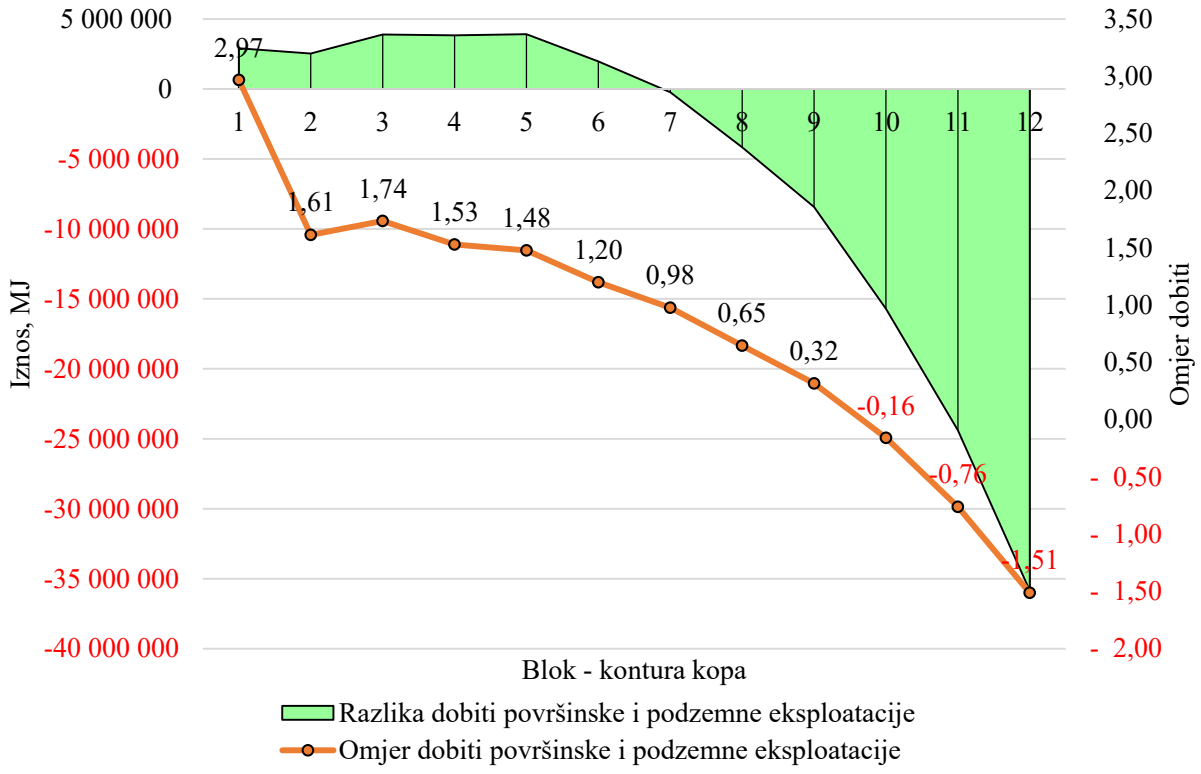
Sukladno iznesenom napravljena je dodatna analiza razlike i omjera dobiti površinske i podzemne eksploatacije (Tablica 59 i Slika 84) kako bi se potvrdile iznesene činjenice analize dobiti površinske i podzemne eksploatacije.

Analizom razlika dobiti površinske i podzemne eksploatacije može se uočiti da je razlika dobiti pozitivna za blok 6 te negativna za blok 7 što potvrđuje da se optimalna kontura prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju nalazi između blokova optimizacije eksploatacije 6 i 7.

Omjeri dobiti površinske i podzemne eksploatacije koji su veći od 1 označavaju omjer u kojem je površinska eksploatacija pozitivna, a omjeri koji su manji od 1 označavaju omjer u kojem je površinska eksploatacija negativna u odnosu na podzemnu eksploataciju. Iz omjera dobiti moguće je utvrditi kojoj završnoj konturi je optimalna kontura prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju bliže pozicionirana. Ako je omjer dobiti bliži 1, toliko je optimalna kontura bliže promatranoj konturi. Tako je optimalna kontura prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju bliže završnoj konturi 7 s obzirom na to da je omjer za 6 konturu 1,20 te za 7 konturu 0,98 (Tablica 59 i Slika 84).

Tablica 59 – Razlika i omjer dobiti površinske i podzemne eksploatacije

Blok – kontura kopa	**Razlika dobiti površinske i podzemne eksploatacije (MJ)**	**Omjer dobiti površinske i podzemne eksploatacije**
1	2 908 240	2,97
2	2 532 954	1,61
3	3 890 493	1,74
4	3 831 807	1,53
5	3 915 018	1,48
6	1 968 016	1,20
7	- 233 646	0,98
8	-4 168 027	0,65
9	-8 433 591	0,32
10	-15 712 546	- 0,16
11	-24 389 789	- 0,76
12	-35 846 122	- 1,51



Slika 84 – Razlika i omjer dobiti površinske i podzemne eksploatacije

8. ZAKLJUČAK

Jedan je od izazova eksploatacije a-gk prilagođavanje načina eksploatacije ležišnim uvjetima te je tako isto ležište moguće eksploatirati površinskim, podzemnim ali i kombiniranim načinom eksploatacije. S obzirom na to da su oba načina eksploatacije različiti po metodi eksploatacije te da na svaku utječu tehno-ekonomski faktori u različitom iznosu, nužno je točno definirati kada je potrebno prijeći iz površinskog u podzemni način eksploatacije ako to zahtijevaju ležišni uvjeti.

U cilju određivanja optimalnog načina eksploatacije a-gk prema mjestu izvođenja rudarskih radova izdvojen je dio ležišta odnosno model istraživanja te su određeni blokovi modela optimizacije eksploatacije na kojima je provedena analiza oba načina eksploatacije, tj. na njima je utvrđivana optimalna kontura prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju temeljem definirane metode optimizacije eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena.

Kako bi se dokazala ili opovrgnula hipoteza da optimalni način eksploatacije ležišta arhitektonsko-građevnog kamena ovisi o utjecaju tehno-ekonomskih faktora, na mjesto izvođenja rudarskih radova projektirane su ukupno 24 završne konture površinskih i podzemnih kopova te je napravljena analiza tehno-ekonomskih faktora koji utječu na položaj optimalne konture eksploatacije.

Analizom volumena stijene koju je moguće pridobiti svakim od načina eksploatacije istog dijela ležišta odnosno bloka modela optimizacije eksploatacije dobiveni su prvi odnosi načina eksploatacije. Tako se može zaključiti da je volumen stijenske mase dobiven površinskom eksploatacijom i do nekoliko puta veći u odnosu na volumen stijenske mase dobiven podzemnom eksploatacijom idući od bloka optimizacije 1 do 12. Razlog tome je što se površinskom eksploatacijom eksploatiraju i dijelovi ležišta koji se nalaze iznad blokova modela optimizacije eksploatacije što nije slučaj kod podzemne eksploatacije. Pridobiveni volumen blokova a-gk površinske eksploatacije manji je u odnosu na ukupni volumen jalovine za sve blokove optimizacije površinske eksploatacije te se konstantno povećava udio jalovine i smanjuje se udio blokova kako se eksploatiraju blokovi većih oznaka. Odnosi volumena blokova a-gk i jalovine kod podzemne eksploatacije isti su kao i za površinsku eksploataciju s time da je omjer volumen blokova i jalovine manji u odnosu na omjer kod površinske eksploatacije.

Korištenjem koeficijenata iskorištenja iz ukupnog volumena produktivnih slojeva a-gk dobiven je volumen blokova a-gk koji je moguće plasirati na tržište. Ukupni volumen blokova

dobiven podzemnom eksploatacijom znatno je manji u odnosu na ukupni volumen blokova dobiven površinskom eksploatacijom, a omjer prosječno iznosi 2,6.

Za svaki od načina eksploatacije određen je udio utjecaja tehno-ekonomskih faktora koji utječu na optimalnu konturu prelaska iz površinskog u podzemni način eksploatacije što je i jedan od postavljenih ciljeva doktorskog rada.

Troškovi površinske eksploatacije generalno su podijeljeni na četiri grupe troškova i to na troškove pridobivanja blokova a-gk (bušenje bušotina bušilicom, rezanje dijamantnom žičnom pilom i lančanom sjekačicom, utovar blokova a-gk utovarivačem, transport blokova a-gk kamionom, rad zaposlenika na pridobivanju blokova a-gk), troškove uklanjanja jalovine (uklanjanje i utovar otkrivke bagerom, transport otkrivke kamionom, utovar jalovine iz sloja a-gk i podine bagerom, transport jalovine iz sloja a-gk i podine kamionom, rad zaposlenika na uklanjanju jalovine), troškove mehanizacije (mehanizacija, oprema i održavanje) i ostale troškove (investicijski i završni radovi te državne naknade). Analizom troškova površinske eksploatacije ustanovljeno je da su troškovi transporta otkrivke kamionom oni koji najviše utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk, a prate ih troškovi mehanizacije, opreme i održavanja. U kumulativnom pogledu troškovi transporta otkrivke kamionom i troškovi mehanizacije, opreme i održavanja utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk u iznosu od 40 %, a na preostali dio jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk od 60 % utječu svi ostali troškovi površinske eksploatacije. Troškovi uklanjanja jalovine troškovi su koji najviše utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk, a s napretkom eksploatacije konstantno se povećavaju od konture 1 do 12 površinske eksploatacije.

Troškovi podzemne eksploatacije obuhvaćaju troškove koji se odnose na troškove eksploatacije sloja kojima je obuhvaćena eksploatacija svih dijelova ležišta kroz koje su postavljeni blokovi optimizacije eksploatacije. Troškovi podzemne eksploatacije generalno su podijeljeni na četiri grupe troškova i to na troškove pridobivanja blokova a-gk (rezanje lančanom sjekačicom, odlamanje (kalanje) blokova, utovar blokova a-gk utovarivačem, transport blokova a-gk kamionom, rad zaposlenika na pridobivanju blokova a-gk, vjetrenje ventilatorom), troškove uklanjanja jalovine (utovar jalovine utovarivačem, transport jalovine kamionom, rad zaposlenika na uklanjanju jalovine), troškove mehanizacije (mehanizacija, oprema i održavanje) i ostale troškove (investicijski i završni radovi te državne naknade). Analizom troškova podzemne eksploatacije ustanovljeno je da su troškovi mehanizacije, opreme i održavanja oni koji najviše utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja

blokova a-gk, a prate ih troškovi transporta jalovine kamionom. U kumulativnom pogledu troškovi mehanizacije, opreme i održavanja i transporta jalovine kamionom utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk u iznosu od 34 %, a na preostali dio jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk od 66 % utječu svi ostali troškovi podzemne eksploatacije. Ukupni troškovi podzemne eksploatacije pokazuju trend povećanja te se pretpostavlja da će se izjednačiti s prihodom podzemne eksploatacije te će tada podzemna eksploatacija postati neprofitabilna. Troškovi pridobivanja blokova troškovi su koji najviše utječu na formiranje jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk, a s napretkom eksploatacije konstantno se povećavaju od bloka 1 do 12.

Omjer troškova površinske i podzemne eksploatacije za sve blokove optimizacije eksploatacije prosječno iznosi 5,5.

Prihod površinske eksploatacije tijekom eksploatacije svih blokova optimizacije približno linearno raste, no iz generalnog nagiba krivulje prihoda zaključuje se da ona polagano počinje stagnirati između blokova 10 i 12 te se pretpostavlja da kreće prema negativnom trendu uslijed smanjenja volumena blokova pridobivenih površinskom eksploatacijom. Prihod podzemne eksploatacije pokazuje relativno nepravilan linearan trend povećanja za sve blokove optimizacije eksploatacije. Komparativnom analizom prihoda površinske i podzemne eksploatacije može se zaključiti da je prihod površinske eksploatacije u prosjeku 2,6 puta veći od prihoda podzemne eksploatacije između blokova 1 i 12.

Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk predstavlja cijenu eksploatacije koja je dobivena formiranjem uslijed utjecaja tehno-ekonomskih faktora, a ujedno predstavlja i minimalnu prodajnu cijenu blokova a-gk koju je potrebno postići u tržišnim uvjetima. Prodaja blokova a-gk ispod jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk uzrokovalo bi gubitke u poslovanju. Komparativnom analizom jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk površinske i podzemne eksploatacije zaključuje se da se jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk konstantno povećava od bloka 1 za koji iznosi 1,5 pa sve do bloka 12 za koji iznosi 2,8. Jedinična cijena pridobivanja blokova a-gk površinske eksploatacije u prosjeku je 2,1 puta veća od jedinične cijene pridobivanja blokova a-gk podzemne eksploatacije između blokova 1 i 12.

Dobit površinske i podzemne eksploatacije uvjetovana je ukupnim volumenom i tržišnom cijenom komercijalnih blokova a-gk te ukupnim troškovima eksploatacije. Dobit površinske eksploatacije nakon rasta do bloka optimizacije eksploatacije 5 počinje opadati te je negativna između blokova 10 i 12. Dobit površinske eksploatacije jednaka je nuli između bloka 9 i 10

u trenutku presijecanja krivulja troškova i prihoda tj. izjednačavaju se vrijednosti prihoda i troškova površinske eksploatacije. Dobit površinske eksploatacije opterećena je najviše pojedinačnim troškovima vezanim za uklanjanje, utovar i odvoz površinske otkrivke. S druge strane dobit podzemne eksploatacije relativno linearno raste s obzirom na to da se eksploatiraju samo dijelovi ležišta određeni blokovima modela optimizacije eksploatacije, no iz općenitog nagiba krivulje vidljiv je početak stagnacije rasta te je pretpostavka da će se krivulja dobiti u narednim blokovima optimizacije početi kretati silaznom putanjom. Komparativnom analizom dobiti površinske i podzemne eksploatacije zaključuje se da se obje izjednačavaju između blokova 6 i 7 odnosno da je od bloka 1 do 6 površinska eksploatacija više profitabilna u odnosu na podzemnu eksploataciju. Promjenom metode eksploatacije iz površinske u podzemnu kod bloka 7 odnosno nastavkom podzemne eksploatacije blokova 7 do 12 osigurat će se povećanje dobiti. Drugim riječima, kombiniranim načinom eksploatacije ležišta osigurat će se dobit u svim blokovima optimizacije eksploatacije.

Analizom razlike i omjera dobiti očito je da je razlika dobiti za blok 6 pozitivna te da je za blok 7 negativna što potvrđuje da se prijelaz iz površinske u podzemnu eksploataciju mora dogoditi između blokova 6 i 7. Drugim riječima, optimalna kontura prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju nalazi se između blokova optimizacije eksploatacije 6 i 7. Iz analize odnosa dobiti površinske i podzemne eksploatacije može se utvrditi kojoj je konturi odnosno bloku optimizacije eksploatacije optimalna kontura bliže pozicionirana. Može se zaključiti da se optimalna kontura nalazi bliže bloku 7 s obzirom na to da razlika dobiti za blok 7 iznosi 0,98, a za blok 6 iznosi 1,20 (optimalna kontura bliže je onoj konturi u kojoj je omjer dobiti bliže broju 1).

Originalan znanstveni doprinos ovog doktorskog rada ogleda se u sljedećem:

- Razvijena je nova metodologija komparativne analize eksploatacije ležišta arhitektonsko-građevnog kamena određivanja optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju.
- Nova metoda akceptira oba načina eksploatacije istodobno.
- Razvijen je algoritam odabira načina eksploatacije.
- Nova metoda sagledava utjecaj i udio utjecaja tehno-ekonomskih faktora na položaj optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju.
- Klasificirani su tehno-ekonomski faktori prema udjelu utjecaja na eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena.
- Određena je ovisnost optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju o tehno-ekonomskim faktorima.

Prijedlog daljnjih istraživanja:

- Preciznije definirati konturu prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju provedbom istraživanja koja bi detaljnije odredila poziciju optimalne konture prelaska iz površinske u podzemnu eksploataciju.
- Primijeniti novu metodologiju na druga ležišta a-gk s ciljem njihova dokazivanja u različitim ležišnim uvjetima.
- Kreirati softversko rješenje kojim bi se nova metodologija mogla efikasno, brzo, jednostavno i precizno primjenjivati ovisno o ležišnim uvjetima.

9. LITERATURA

Abdollahisharif, J., Bakhtavar, E. & Shahriar, K. (2008): Open-Pit to Underground Mining - Where Is the Optimum Transition Depth? In Proceedings of the 21st WMC & Expo 2008, Sobczyk, and Kicki, eds. (Taylor & Francis Group, London, UK), 189–196.

Abdollahisharif, J., Bakhtavar, E. & Anemangely, M. (2012): Optimal cut-off grade determination based on variable capacities in open-pit mining. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 112, 1065–1069.

Alejano, L.R., García-Bastante, F., Taboada, J. & Migliazza, R. (2012): Design of room & pillar exploitations of non-expensive minerals and ornamental rocks in Spain. In Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Q. Qian, and Y. Zhou, eds. 1453–1456.

Arvantides, N. & Heldal, T. (2015): State-of-the-art: ornamental stone quarrying in Europe.

ASHRAE (1993): Handbook of Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating & Air Conditioning Engineers (ASHRAE)).

Bakhtavar, E. & Shahriar, K. (2007): Optimal ultimate pit depth considering an underground alternative. In Proceedings of the 4th AACHEN International Mining Symposia-High Performance Mine Production, Aachen, Germany, 277–287.

Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Oraee, K. (2008a): An approach towards ascertaining open-pit to underground transition depth. Journal of Applied Sciences 8 (23), 4445–4449.

Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Oraee, K. (2008b): A model for determining optimal transition depth over from open-pit to underground mining. In Proceedings of the 5th International Conference on Mass Mining, 393–400.

Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Oraee, K. (2009a): Mining method selection and optimization of transition from open pit to underground in combined mining. Archives of Mining Sciences 54, 481–493.

Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Oraee, K. (2009b): Transition from open-pit to underground as a new optimization challenge in mining engineering. Journal of Mining Science 45, 485–494.

Bakhtavar, E., Shahriar, K., Oraee, K. & Flett, P. (2010): Economico-Mathematical Analysis of Transition from Open-Pit to Underground Mining. In SME Annual Meeting and Exhibit 2010, (Phoenix, Arizona, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)), 150.

Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Mirhassani, A. (2012): Optimization of the transition from open-pit to underground operation in combined mining using (0-1) integer programming. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 112, 1059–1064.

Bastante, F.G., Taboada, J. & Ordóñez, C. (2004): Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. Engineering Geology 73, 93–103.

Beall, C. (1990): Selecting a safety factor for stone. Aberdeen Group, Boston.

Bentley Systems Inc. (2016a): Power InRoads V8i SS4.

Bentley Systems Inc. (2016b): gINT.

Bentley Systems Inc. (2016c): gINT Civil Tools.

Bojčetić, Ž., Galić, I., Dragičević, I., Farkaš, B. & Pavičić, I. (2016): Glavni rudarski projekt eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju "Crvene stijene." 199.

Brady, B.H.G. & Brown, E.T. (2005): Rock mechanics for underground mining (New York: Kluwer academic publishers).

Camus, J.P. (1992): Open pit optimization considering an underground alternative. In 23rd International APCOM Symposium, (Society for Mining, Metallurgy & Exploration), 435–441.

Careddu, N., Siotto, G. & Tuveri, A. (2010): Evolution of a marble quarry: from open cast to underground exploitation. In Global Stone Congress, 2–5.

Carli, C. De & Lemos, P.R. de (2015): Project optimization. Rem: Revista Escola de Minas 68, 97–102.

Caterpillar (2014): Block Handler 988 K (Caterpillar).

Chen, J., Desheng, G. & Jianxiong, L. (2003): Optimization principle of combined surface and underground mining and its applications. Journal of Central South University of Technology 10, 222–225.

Cotman, I. (1996): Probna podzemna eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena u kamenolomu "Kanfanar", Istra. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik 8, pp 81-89.

Cotman, I. (2001): Podzemna eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena u Istri. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišta u Zagrebu.

Cotman, I. & Vujec, S. (1998): Planiranje i početna iskustva podzemnog otkopavanja arhitektonsko-građevnog kamena u Istri. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik 10, 63–72.

Darling, P. (2011): Mining Engineering Handbook (3rd Edition) (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)).

Dragičević, I., Galić, I., Pavičić, I. & Deljak, G. (2015): Elaborat o rezervama arhitektonsko-građevnog kamena u istražnom prostoru "Crvene stijene." 78.

Dunda, S., Kujundžić, T., Globan, M. & Matošin, V. (2003): Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena (Zagreb, Hrvatska: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu).

Esterhuizen, G.S. (2006): An evaluation of the strength of slender pillars. Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration 320, 69–76.

Esterhuizen, E., Dolinar, D.R. & Ellenberger, J.L. (2010): Roof span design for underground

stone mines. In Proceedings of the 29th International Conference on Ground Control in Mining, T. Barczak, ed. (Morgantown, West Virginia), 318–324.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. & Ellenberger, J.L. (2008): Pillar strength and design methodology for stone mines. In Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown WV: West Virginia University, 241–253.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L. & Prosser, L.J. (2011a): Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines (Pittsburgh, PA: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)).

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. & Ellenberger, J.L. (2011b): Pillar strength in underground stone mines in the United States. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48, 42–50.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. & Ellenberger, J.L. (2011c): Pillar and roof Span Design in Stone Mines. Department Of Health And Human Services, NIOSH 75.

Fantini (2016): Tunnel Chain Saw Machine GU 70-R-XC.

Farkaš, B. (2016): Proračun potrebnih količina zraka pri vjetrenju podzemnog kopa arhitektonsko-građevnog kamena Crvene stijene. 40.

Finch, A. & Deeper, G. (2012): Open pit to underground. International Mining Magazine 8, 88–90.

Galić, I. (2001): Projektiranje u rudarstvu uz primjenu namjenskih programa. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Galić, I., Janković, B. & Mrakovčić, I. (2009): An another way for open pit mine design optimization--floating slopes method. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik 21, 103–111.

Galić, I., Vidić, D. & Farkaš, B. (2015): Numerical modelling of the influence of coefficient of utilization on the exploitation profitability of dimension stone deposit. In Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition International Mining Congress and Exhibition, K.G. Mehtap, Ö. Önel, H. Başarir, M. Karadeniz, and E. Torun Bilgiç, eds. (Antalya, Turkey: TMMOB Maden Muhendisleri Odasi, Selanik Cad. 19/4 Kizilay, Ankara), 1111–1118.

González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M.I., Menéndez-Díaz, A. & Álvarez-Vigil, A.E. (2006): A Comparative Analysis of Pillar Design Methods and its Application to Marble Mines. Rock Mechanics and Rock Engineering 39, 421–444.

Google (2016): Ortofoto snimak.

Grau, R.H., Krog, R.B. & Robertson, S.B. (2006): Maximizing the ventilation of large-opening mines. In 11th US/North American Mine Ventilation Symposium 2006, J.M. Mutmansky, and R. V Ramani, eds. (Pennsylvania, USA: Taylor & Francis), 53–59.

Guerreiro, H.J.P. (2000): Exploração subterrânea de mármores: aspectos geotécnicos. Universidade Técnica De Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Hartman, H.L., Mutmansky, J.M., Ramani, R. V. & Wang, Y.J. (1997): Mine ventilation and air conditioning (John Wiley & Sons).

Howie, P.A. & Eggert, R.G. (2001): Cost estimating for underground mines. In Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, W.A. Hustrulid, and R.L. Bullock, eds. (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME)), 49–79.

Iannacchione, A.T., Marshall, T.E., Burke, L., Melville, R. & Litsenberger, J. (2003): Safer mine layouts for underground stone mines subjected to excessive levels of horizontal stress. Mining Engineering 55, 25–31.

Korfmann Lufttechnik GmbH (2013): Product catalogue: Ventilating and Exhausting Systems. 84.

Kortnik, J. (2015): Stability assessment of the high safety pillars in Slovenian natural stone mines. Archives of Mining Sciences 60, 403–417.

de la Vergne, J. (2014): Hard Rock Miner's Handbook (Stantec Consulting Ltd., 10160 – 112 Street, Edmonton, Alberta, Canada).

Lunder, P.J. (1994): Hard rock pillar strength estimation—an applied approach. University of British Columbia.

MacNeil, J. & Dimitrakopoulos, R. (2014): A stochastic optimisation formulation for the transition from open pit to underground mining within the context of a mining complex. In Orebody Modeling and Strategic Mine Planning Symposium 2014, (Perth, Australia), 363–368.

Marchetti, D., Avanzi, G.D., Sciarra, N., Calista, M. & Piaggi, L. (2012): Pillar sizing and stability analysis by numerical modeling for underground stone quarrying. In EUROCK 2012 - ISRM International Symposium, Stockholm, Sweden, (Stockholm, Sweden),.

Mašić, M. (2015a): Izvještaj o određivanju kvalitete arhitektonsko-građevnog kamena "Orso Grigio" (Medo sivi) u području Crvenih stijena kod Jajca (Zagreb, Hrvatska: Cemtra d.o.o.).

Mašić, M. (2015b): Izvještaj o određivanju kvalitete arhitektonsko-građevnog kamena "Orso Rosso" (Medo crveni) u području Crvenih stijena kod Jajca (Zagreb, Hrvatska: Cemtra d.o.o.).

Microsoft (2016): Excel.

Nilsson, D.S. (1982): Open Pit or Underground Mining. In Underground Mining Methods Handbook, (AIME, New York), 70–87.

Nilsson, D.S. (1992): Surface vs. Underground Methods. In SME Mining Engineering Handbook, (AIME, New York), 2058–2068.

Nilsson, D.S. (1997): Optimal Final Pit Depth: Once again. Journal of Mining Engineering 1, 71–72.

NN (2009): Pravilnik o graničnim vrijednostima izloženosti opasnim tvarima pri radu i o biološkim graničnim vrijednostima (Hrvatska).

NN (2015): Pravilnik o mjerama za sprečavanje emisije plinovitih onečišćivača i onečišćivača u obliku čestica iz motora s unutrašnjim izgaranjem koji se ugrađuju u necestovne pokretne strojeve TPV 401 (izdanje 02) (Hrvatska).

Oggeri, C., Oreste, P., Valentino, D. & Fornaro, M. (2001): Going underground in quarrying: Technical perspectives for marble in Portugal. In Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey - IMCET2001, (Ankara), 19–22.

Opoku, S. & Musingwini, C. (2013): Stochastic modelling of the open pit to underground transition interface for gold mines. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 27, 407–424.

Pareja, L.D. (2000): Deep Underground Hard-Rock Mining - Issues, Strategies, and Alternatives. Queen's University Kingston, Ontario, Canada.

Perić, M. (2007): Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina (Zagreb, Hrvatska: INA Industrija nafte d.d.).

Popović, N. (1984): Naučne osnove projektovanja površinskih kopova (Univerzitet u Tuzli, Rudarsko-geološki institut i fakultet).

Prelec, Z. (2009): Gorivo i izgaranje. In Energetski Uređaji, (Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet), 13–16.

Roberts, B., Elkington, T., van Olden, K. & Maulen, M. (2013): Optimising combined open pit and underground strategic plan. Mining Technology 122, 94–100.

Segalini, A., Ferrero, A.M., d'Attoli, M. & Migliazza, M. (2006): Stability analysis of fractured rock mass excavations in ornamental stone quarries by means of 3D numerical modelling. In Golden Rocks 2006, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), (Golden, Colorado),.

Shahriar, K., Kazem, O. & Ezzeddin, B. (2007): Effective factors investigation in choice between surface and underground mining. In VII-Th International Scientific Conference SGEM2007, (Sofia, Bulgaria), 239–245.

SL (1978): Pravilnik o tehničkim normativima za strojeve s dizelskim motorima koji se upotrebljavaju pri podzemnim rudarskim radovima u nemetanskim jamama.

SL (1986): Pravilnik o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina.

SL (1991): Pravilnik o tehničkim normativima za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina, metala i nemetala.

Smith, M.R. (1999): Stone: Building stone, rock fill and armourstone in construction (London: Geological Society of London).

Soderberg, A. & Rausch, D.O. (1968): Surface Mining. In Surface Mining, E.P. Pfleider, ed. (AIME), 142–143.

Tatiya, R.R. (2013): Surface and Underground Excavations, 2nd Edition: Methods,

Techniques and Equipment (Taylor & Francis Group, London, UK).

Teply, E. (1990): Rudnička mehanizacija (Zagreb, Hrvatska: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu).

Vidić, D., Galić, I. & Farkaš, B. (2012): The profitability of dimension stone deposit exploitation in relation to the coefficient of utilization. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik 25, 123–130.

Visser, W.F. & Ding, B. (2007): Optimization of the Transition from Open Pit to Underground Mining. In Proceedings of the 4th AACHEN International Mining Symposia: High Performance Mine Production, 131–148.

Voća, N. (2002): Agrarni modeli proizvodnje biodizelskog goriva. Agronomski fakultet u Zagrebu, Zagreb.

Young, H.D., Freedman, R.A. & Ford, A.L. (2012): University physics with modern physics (Addison-Wesley, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA, 94111).

10. ŽIVOTOPIS

Branimir Farkaš rođen je 1. listopada 1979. godine u Zagrebu gdje završava osnovnu i srednju školu. Studij rudarstva na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu upisuje 1998. godine, smjer eksploatacija mineralnih sirovina na kojem 2006. godine brani diplomski rad pod nazivom *Modeliranje boksitonosnog područja Vlasinje* s konceptom novih istraživačkih radova.

Od 2007. godine zaposlen je u tvrtki Produkt d.o.o. kao voditelj sektora za rudarstvo.

Od 2010. godine zaposlen je kao asistent na Zavodu za rudarstvo i geotehniku Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na kojem iste godine upisuje poslijediplomski studij rudarstva.

Položio je Stručni ispit za obavljanje određenih poslova u rudarstvu – površinska eksploatacija 2012. godine.

Tijekom svog rada bio je suradnik na znanstvenim projektima Masovnije korištenje geoprostornih podataka u nastavi i znanosti pomoću fakultetskog WEBGIS sustava razvijenog unutar slobodnog i otvorenog programskog okruženja (2013. – 2014.) i Utjecaj nesaniranih kopova na okoliš i mogućnosti sanacije i prenamjene (2016. – 2017.).

Objavio je kao koautor četiri znanstvena rada, dva stručna rada te je koautor skripte primijenjene u nastavi na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu. Sudjelovao je na sedam stručnih konferencija te na raznim stručnim radionicama. Autor je i koautor preko 40 stručnih projekata iz područja rudarstva te je pomagao pri izradi više od 30 diplomskih i preddiplomskih radova.

Član je Udruge hrvatskih rudarskih inženjera (UHRI).

Popis objavljenih znanstvenih radova:

Antoljak, D., Galić, Ivo & **Farkaš, B.** (2011): Influence of horizontal blast holes on drilling and blasting costs of "Čelina" quarry near Sirač. U: Medved, M. & Vulić, M. (ur.): 4th Balkan Mining Congress, 18 – 20. 10. 2011. Ljubljana, Slovenija.

Galić, I., **Farkaš, B.** & Vidić, D. (2014): Arhitektonsko-građevni kamen u Hercegovini – jučer, danas, sutra. Rudarsko-geološki glasnik, 18, 93 – 105, Mostar, Bosna i Hercegovina.

Galić, I., Vidić, D. & **Farkaš, B.** (2015): Numerical modelling of the influence of coefficient of utilization on the exploitation profitability of dimension stone deposit. U: Gülsün Kiliç, Mehtap ; Önel, Öznur ; Başarir, Hakan ; Karadeniz, Mehmet ; Torun Bilgiç, Elif. (ur.): Proceedings of the 24th international mining congress and exhibition of Turkey, 14 – 17. 04. 2015., 1111 – 1118, Antalya, Turska.

Vidić, D., Galić, I. & **Farkaš, B.** (2012): The profitability of dimension stone deposit exploitation in relation to the coefficient of utilization. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 25, 123 – 130, Zagreb.