

# Razvoj integralnog modela za optimizaciju diskontinualnog sistema proizvodnje na površinskim kopovima nemetala

Miodrag Čelebić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Razvoj integralnog modela za optimizaciju diskontinualnog sistema proizvodnje na površinskim kopovima nemetala | Miodrag Čelebić | | 2024 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008791>

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Miodrag Ž. Čelebić

RAZVOJ INTEGRALNOG MODELA ZA  
OPTIMIZACIJU DISKONTINUALNOG SISTEMA  
PROIZVODNJE NA POVRŠINSKIM  
KOPOVIMA NEMETALA

doktorska disertacija

Beograd, 2024.



UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Miodrag Ž. Čelebić

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL  
FOR OPTIMIZING DISCONTINUOUS  
PRODUCTION SYSTEMS ON  
NON-METALLIC SURFACE MINES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

**Mentor:**

Prof. dr Božo Kolonja, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova

**Članovi komisije:**

Dr Vladimir Čebašek, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Uža naučna oblast: Mehanika stena

Dr Dejan Stevanović, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova

Dr Saša Stojadinović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Uža naučna oblast: Rudarstvo i geologija

**Datum odbrane:**

---



# **RAZVOJ INTEGRALNOG MODELA ZA OPTIMIZACIJU DISKONTINUALNOG SISTEMA PROIZVODNJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA NEMETALA**

## **Sažetak**

Izbor optimalne mehanizacije u diskontinualnom sistemu transporta je jedna od najvažnijih odluka koju treba donijeti prilikom projektovanja površinskih kopova. Pri izboru optimalne mehanizacije, uticaj ima veliki broj faktora, kako prirodnih – geoloških i ekoloških, tako i tehničkih, ekonomskih i socijalnih. Neki od njih se mogu izraziti numerički, u određenim mjernim jedinicama, a neki opisno, lingvističkim varijablama, shodno uslovima koji vladaju na rudnim ležištima, a koje karakterišu visok stepen neizvjesnosti i neodređenosti kako prilikom istraživanja, tako i tokom procesa eksploatacije rude. Iskustvo inženjera i eksperata, njihovo znanje i mišljenje, je od ključnog značaja za upravljenje procesima u rudarstvu, shodno problematici dinamičkog širenja površinskih kopova u prostoru tokom razvoja radova. U disertaciji je kreiran integralni model za optimizaciju izbora opreme diskontinualnog sistema, kojim se prevode svi kriterijumi koji utiču na izbor optimalnog rješenja u lingvističke varijable. Izborom metode višekriterijumskog odlučivanja i njenom kombinacijom sa fazi logikom, napravljen je algoritam koji tretira sve pomenute nepreciznosti i nejasnoće prisutne u različitim rudarskim procesima, a gdje je osnova iskustvo eksperata. Fazi analitički hijerarhijski proces (FAHP) je primjenjen u skladu sa trendom rješavanja problema kao što je izbor rudarske opreme i upravljanje sistemima. Cijeli algoritam je primjenjen na dvije studije slučaja (površinski kop Ugljevik Istok 1 i ležište L-29C – Bešpelj).

## **Ključne riječi**

izbor mehanizacije, tehnologija eksploatacije, diskontinualni sistem, ekspertska odlučivanje, lingvističke varijable, MCDM, FAHP

## **Naučna oblast:**

Rudarsko inženjerstvo

## **Uža naučna oblast:**

Projektovanje i planiranje površinskih kopova

## **UDK:**

622.063.8:510.644.4(043.3)



# **DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL FOR OPTIMIZING DISCONTINUOUS PRODUCTION SYSTEMS ON NON-METALLIC SURFACE MINES**

## **Abstract**

Selecting Optimal Mechanization in Discontinuous Transport Systems is one of the most crucial decisions to make during the design of surface mines. When choosing the optimal mechanization, a multitude of factors come into play, including natural (geological and ecological), technical, economic, and social aspects. Some of these factors can be expressed numerically in specific units of measurement, while others are described using linguistic variables, depending on the conditions prevailing at the mining sites. These conditions are characterized by a high degree of uncertainty and ambiguity during both exploration and ore extraction processes. The expertise and opinions of engineers and experts are essential for managing mining processes, especially considering the challenges posed by the dynamic expansion of surface mines over time. In this study, an integrated model is developed to translate all criteria influencing the selection of optimal solutions into linguistic variables. By combining the multiple-criteria decision-making method with fuzzy logic, an algorithm is created to address the aforementioned uncertainties and ambiguities present in various mining processes, leveraging expert knowledge. The Fuzzy Analytic Hierarchy Process is applied to tackle trending decision problems related to mining equipment selection and management systems. The entire algorithm is tested in a real case study involving the Ugljevik East 1 open pit mine and the ore deposit L-29C – Bešpelj.

## **Keywords**

Equipment selection, mining technology, discontinuous system, expert judgment, linguistic variables, MCDM, FAHP

## **Scientific field:**

Mining Engineering

## **Scientific subfield:**

Open Pit Planning and Design

## **UDC:**

622.063.8:510.644.4(043.3)



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. CILJ I ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA.....	2
1.2. STRUKTURA DISERTACIJE .....	3
2. PREGLED LITERATURE .....	5
3. OPIS METODE RAZVOJA MODELA.....	14
3.1. POVRŠINSKA EKSPLOATACIJA I POVRŠINSKI KOPOVI .....	14
3.1.1. KLASIFIKACIJA POVRŠINSKIH KOPOVA.....	14
3.2. SISTEMI POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE .....	16
3.2.1. DISKONTINUALNI SISTEM EKSPLOATACIJE.....	22
3.3. OPTIMIZACIJA SISTEMA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE.....	33
3.3.1. INTEGRALNI MODEL OPTIMIZACIJE .....	34
3.3.2. OPTIMIZACIJA POVRŠINSKIH KOPOVA .....	37
3.3.3. OPTIMIZACIJA SISTEMA BAGER - KAMION .....	39
3.4. PREGLED METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA.....	41
3.4.1. KLASIFIKACIJA METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA .....	41
3.5. OPŠTE FAZE METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA .....	41
3.5.1. METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA .....	42
4. RAZVOJ INTEGRALNOG MODELA ZA OPTIMIZACIJU DISKONTINUALNOG SISTEMA PROIZVODNJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA NEMETALA.....	46
4.1. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....	48
4.2. IZBOR I PREGLED EKSPERIMENTALNOG PODRUČJA ISTRAŽIVANJA .....	53
4.2.1. POVRŠINSKI KOP UGLJEVIK ISTOK 1 .....	53
4.2.2. LEŽIŠTA BOKSITA EKSPLOATACIONOG POLJA BEŠPELJ KOD JAJCA .....	62
5. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA .....	66
5.1. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJEVIK ISTOK 1 . .....	66
5.2. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA NA EKSPLOATACIONOM POLJU BEŠPELJ ...	76
6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE .....	80

LITERATURA

BIOGRAFIJA

Prilog 1. Izjava o autorstvu

Prilog 2. Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Prilog 3. Izjava o korišćenju



## SPISAK SLIKA

Slika 1.1: Struktura doktorske disertacije .....	3
Slika 2.1: Optimalan raspored kamiona prema bagerima (Ercelebi, 2009).....	6
Slika 3.1: Sistemi eksploatacije sa produbljivanjem površinskog kopa (Popović, 1984) .....	20
Slika 3.2: Sistemi eksploatacije bez produbljivanja površinskog kopa (Popović, 1984) .....	21
Slika 3.3: Generalna šema podjele sistema površinske eksploatacije .....	22
Slika 3.4: Šema uticajnih faktora i moguće mehanizacije za sistem utovarna mašina – kamion .....	24
Slika 3.5: Radni parametri bagera kašikara .....	25
Slika 3.6: Radni parametri hidrauličnog bagera kašikara sa visinskom (a) i obrnutom (b) kašikom .....	26
Slika 3.7: Radni parametri bagera dreglajna .....	28
Slika 3.8: Šema punjenja i pražnjenja skrepera (Pavlović, 1992) .....	29
Slika 3.9: Radni parametri utovarivača .....	30
Slika 3.10: Princip rada buldozera – kopanje, transport, planiranje .....	31
Slika 4.1: Algoritam optimizacije i donošenja odluka .....	49
Slika 4.2: Trougaoni fazi brojevi.....	51
Slika 4.3: Geografski položaj područja istraživanja – PK Ugljevik Istok 1 .....	53
Slika 4.4: Detaljna geološka karta ležišta uglja Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017) ...	54
Slika 4.5: Šematski stub Ugljevičke ugljonosne formacije.....	55
Slika 4.6: Viši nivoi glavnog ugljenog sloja sa povlatnim laporcima u sjeverozapadnom dijelu ležišta (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	56
Slika 4.7: Šema strukture Glavnog ugljenog sloja (GUS), (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	56
Slika 4.8: Karakterističan geološki profil ležišta Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017) .	58
Slika 4.9: Sistem eksploatacije otkrivke na PK Ugljevik Istok 1 .....	61
Slika 4.10: Sistem proizvodnje uglja na PK Ugljevik Istok 1 .....	61
Slika 4.11: Geografski položaj ležišta “L-29C” eksploatacionog polja Bešpelj.....	62
Slika 4.12: Geološka karta šireg područja ležišta L-29C - Bešpelj (Marinković i Ahac, 1979) ...	64
Slika 4.13: Ležište boksita u boksitonosnom reviru eksploatacionog polja Bešpelj kod Jajca....	65
Slika 5.1: Bager Komatsu PC3000 sa osnovnim parametrima (www.komatsu.com) .....	67
Slika 5.2: Prikaz razmatranih kamiona (belaz.by) .....	68
Slika 5.3: Prikaz osnovnog panela softvera „Talpac“ .....	69
Slika 5.4: Prikaz panela organizacije radnog vremena.....	69
Slika 5.5: Prikaz panela izvještaja optimizacije .....	70
Slika 5.6: Karakterističan geološki profil ležišta Ugljevik Istok 1 sa prikazom prisustva rasjeda (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	71
Slika 5.7: Ukupna integralna vrijednost za umjereno, pesimistično i optimistično procjenjivanje rizika stručnjaka .....	76



## SPISAK TABELA

Tabela 3.1: Pregled podjele sistema eksploatacije prema A. I. Arsentjevu (Arsentjev, 1981) ...	19
Tabela 3.2: Izbor mehanizacije u sistemu površinske eksploatacije u zavisnosti od dužine transporta .....	23
Tabela 4.1: FAHP skala (Zhu i ostali, 1999; Lamata, 2004) .....	47
Tabela 4.2: Fazifikovana skala (Cheng, 1996; Deng, 1999) .....	48
Tabela 4.3: Bilansne rezerve po slojevima u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	58
Tabela 4.4: Ukupne bilansne rezerve uglja u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	58
Tabela 4.5: Prosječan kvalitet bilansnih rezervi uglja u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017) .....	59
Tabela 4.6: Fizičko-mehanička svojstva laporaca .....	59
Tabela 4.7: Fizičko-mehanička svojstva glina i tufitičnih glina .....	60
Tabela 4.8: Fizičko-mehanička svojstva tufitičnih glinaca .....	60
Tabela 4.9: Eskploatacione rezerve L-29C .....	65
Tabela 4.10: Kvalitet boksita sa L-29C .....	65
Tabela 5.1: Osnovne karakteristike analiziranih kamiona .....	68
Tabela 5.2: Produktivnost i potreban broj kamiona .....	69
Tabela 5.3: Ukupni kapitalni troškovi nabavke kamiona .....	72
Tabela 5.4: Troškovi radne snage prema tipu kamiona .....	72
Tabela 5.5: Troškovi materijala prema tipu kamiona .....	72
Tabela 5.6: Troškovi izgradnje puta prema 1 m dužine, zavisno od tipa kamiona .....	73
Tabela 5.7: Analiza kriterijuma .....	74
Tabela 5.8: Analiza alternativa u odnosu na kriterijume .....	74
Tabela 5.9: Rangiranje i izbor optimalne metode .....	75
Tabela 5.10: Analiza kriterijuma .....	78
Tabela 5.11: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K1 .....	78
Tabela 5.12: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K2 .....	78
Tabela 5.13: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K3 .....	79
Tabela 5.14: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K4 .....	79
Tabela 5.15: Rangiranje i izbor optimalne metode .....	79



## 1. UVOD

Globalni tehnološki razvoj, proteklih decenija, doveo je do veće potražnje za metalnim, nemetalnim i energetske mineralnim sirovinama. Ovakav scenario, generalno je pratio trend pogoršanja uslova rada rudarske industrije. Razlozi za ovakve trendove su mnogobrojni ali se generalno mogu svesti na opadanje kvaliteta ležišta i poklanjanja značajno veće pažnje uticaju koje rudarstvo može imati na životnu okolinu.

Današnja eksploatacija mineralnih sirovina se najčešće izvodi na ležištima koja se karakterišu nižim sadržajima, većim prisustvom štetnih komponenti, nepovoljnom i složenom strukturom korisne komponente, velikom dubinom eksploatacije i često u oblastima sa slabo (ili praktično bez) razvijene potrebne infrastrukture. Svi ovi uslovi koji generalno karakterišu globalnu rudarsku industriju, nepovoljno utiču na troškove eksploatacije i opravdanost projekta.

Rudarska industrija, poput svih drugih tipova industrije, neizostavno generiše uticaj na životnu sredinu. Ovo je praktično karakteristika svih tipova industrija, ali je u slučaju rudarstva (pogotovo kod površinske eksploatacije) uticaj na životnu sredinu posebno uočljiv. Fizička degradacija, velikih površina lako je uočljiva od strane i stručne i šire javnosti, zbog čega su formalne norme i neformalne kritike često rigoroznije u slučaju rudarstva.

Propisane norme, dio su formalnog okvira u kome se sve aktivnosti nekoga projekta moraju odvijati. I pored iskrene i neophodne početne namjere da se u oblasti zaštite životne sredine reguliše nivo uticaja konkretnog rudarskog projekta, stalan i prije svega polički, trend poštovanja ekoloških normi i propisa često u potpunosti diskvalifikuje rudarsku aktivnost. Posljedice ovakve situacije, nisu odmah uočljive, ali su negativne i nažalost strateške, u smislu da dugoročno mogu spriječiti potencijal razvoja društva ili političke tvorevine (države, regiona, zajednice država) pa čak ta ista društva oslabiti.

Pored prirodnih (geoloških, geografskih) i ekoloških i mnogi drugi faktori (kao što su politička nestabilnost regiona gdje je rudarska aktivnost planirana ili se odvija, ekonomske tj. političke barijere tržišnog poslovanja, nedostatak kvaliteta i kvantiteta stručnog osoblja, itd.) u značajnoj mjeri otežavaju ili spriječavaju aktivnosti rudarske industrije.

U opisanom okruženju, uspjeh nijednog rudarskog projekta nije garantovan zbog čega donijete odluke u svakom stadijumu razvoja rudarskog projekta moraju biti bazirane na stručnim i iscrpnim analizama. Stalna potreba i pritisak povećanja obima proizvodnje, kao i iskustvo vodećih rudarskih kompanija upućuju na isti zaključak. Imajući u vidu navedeno, jasna je potreba da se svaki element rudarskog projekta optimizuje, kako bi se stekli uslovi da projekat ostvari svoj maksimalni ekonomski i društveni potencijal.

Opisani uslovi, povećan obim proizvodnje i tehnološki razvoj se odrazio i na unaprijeđenje tehničkih i tehnoloških mogućnosti rudarske mehanizacije.

Rudarski projekat mora definisati kompletan sistem počevši od definisanja optimalne završne konture površinskog kopa sa definisanom dinamikom eksploatacije, lokacije i kontura odlagališta, sistema eksploatacije, otkopne, transportne i odlagališne mehanizacije, transportnih trasa, pripreme mineralne sirovine i pomoćnih operacija. Za definisanje kompletnog proizvodnog procesa potrebno je optimizovati pojedine dijelove sistema i na taj način kompletan sistem.



Važno je napomenuti da bi se u opisanim uslovima poslovanja, izabralo optimalno rješenje nekog tehnološkog procesa ili njegovog dijela neophodno je razmotriti sve uticajne faktore što uključuje i one kojima do sad nije dat odgovarajući značaj.

Savremena rudarska industrija je prepoznala značaj i potencijal optimizacije svakog tehnološkog procesa, zbog čega se ova djelatnost sve više prihvata kao dio i neophodnost standardne rudarske prakse. Takođe, naučna rudarska javnost angažovana je na stalnom usavršavanju teorijskih i praktičnih aspekata optimizacionih algoritama dovodeći ih na veoma visok i nužno neophodan nivo.

Optimizacija sistema površinske eksploatacije zasniva se na algoritmima razvijenim sredinom prošlog vijeka. Deterministički pristup pri usvajanju relevantnih ulaznih parametara je osnovna osobina razijenih algoritama. Vrijednost ulaznih parametara se usvaja kao jedinstvena vrijednost nakon detaljnog analiziranja svih ulaznih uticajnih informacija.

Razvijenost informatičke podrške je jedan od najvažnijih preduslova optimizacije cjelokupnog sistema površinske eksploatacije primjenom matematičkih algoritama, a što zahtjeva razvoj kompleksnih simulacionih algoritama. Trenutni razvoj informatičke podrške ne omogućava uspješnu optimizaciju cjelokupnog sistema površinske eksploatacije nego se optimizacija sistema rješava nezavisnom optimizacijom pojedinačnih elemenata. Optimizacija pojedinačnih elemenata sistema ne obezbjeđuje optimalno rješenje cjelokupnog sistema eksploatacije ali daje rezultat dovoljno bliskim optimalnom.

Stalna potreba povećanja rudarske proizvodnje kao degradacija kvaliteta ležišta (a sa njim i povećanje koeficijenta otkrivke) doveli su do potrebe otkopavanja, utovara i transporta sve većih količina materijala. Imajući u vidu značaj koji ove tehnološke operacije (posebno u slučaju diskontinualnih sistema) imaju na tehnološke i ekonomske performanse rudarskog projekta, optimizaciji istih se pridaje velika pažnja u rudarskoj praksi. Imajući ovo u vidu, istraživanje prikazano u ovoj disertaciji, upravo je vezano za razvoj integralnog modela optimizacije utovarno-transportnog, diskontinualnog sistema. Kako će se dalje kroz tekst pokazati, razvijeni model ima mogućnost primjene pri optimizaciji drugih tehnoloških rudarskih operacija.

## **1.1. CILJ I ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA**

Proces optimizacije u rudarstvu nije vezan samo za početak izvođenja radova na površinskom kopu, kada se definiše cjelokupni sistem, nego je ništa manje važan i tokom vijeka trajanja procesa eksploatacije jer je obnavljanje mehanizacije konstantan proces. Nabavka nove mehanizacije se prilagođava tehnološkom razvoju i novim uslovima poslovanja. Npr. manja ekološka osvješćenost i niža cijena energenata će veći značaj dati kapitalnim u odnosu na operativne troškove dok uvođenje većih ekoloških standarda i povećanje cijene energenata dovodi do povećanja operativnih troškova u odnosu na kapitalne. Nedostatak odgovarajuće radne snage, a što je izražajnije poslednjih godina, ima tendenciju korištenja mehanizacije sa većim kapacitetom što može rezultirati smanjenjem broja angažovane radne snage.

Polazna hipoteza ove disertacije je da se formiranjem modela koji će omogućiti integralni pristup (odnosno obuhvatiti sve uticajne faktore čija različita priroda ne dozvoljava prostu kvantifikaciju istih) može na sveobuhvatan i unaprijeđen način izvršiti optimizacija diskontinualnog sistema eksploatacije.

Za verifikaciju navedene hipoteze, odnosno verifikaciju funkcionalnosti integralnog modela optimizacije diskontinualnog sistema (koji se u svom osnovnom obliku može svesti na bager-kamion sistem), izabran je stalno prisutan i najčešće analiziran problem izbora tipa opreme,



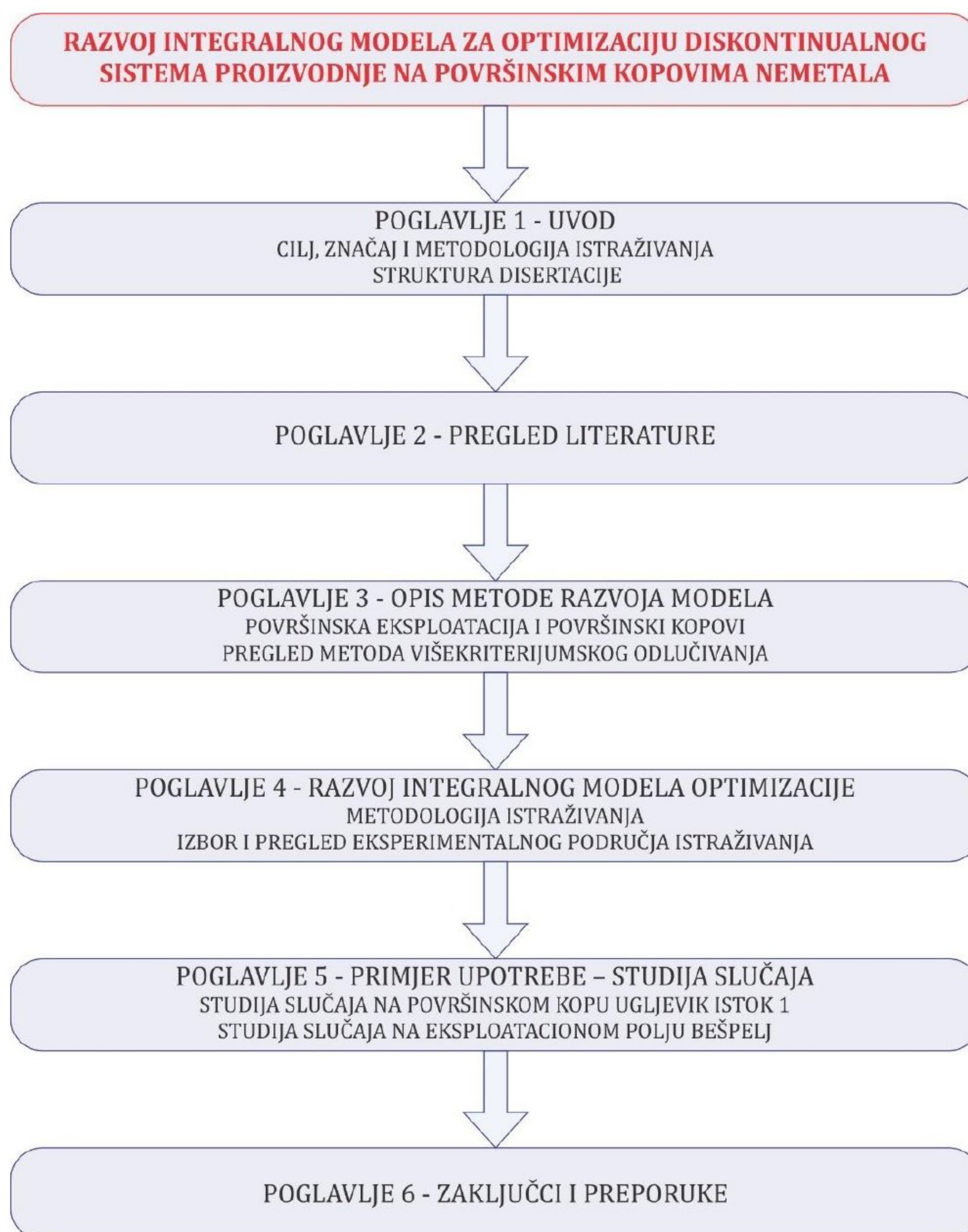
odnosno konkretno izbor optimalne transportne jedinice kao preduslova za unifikaciju transportne flote i dalje investicione procese.

Ovim modelom želi se pokazati da se metode višekriterijumskog odlučivanja u kombinaciji sa fazi logikom mogu primjeniti za potrebe integralnog sagledavanja kroz uzimanje u analizu i faktora koji se ne mogu numerički izraziti ali predstavljaju važan uticajni faktor što je i cilj disertacije “Razvoj integralnog modela za optimizaciju diskontinualnog sistema proizvodnje na površinskim kopovima nemetala”.

Model omogućava, uz kontinuirano prikupljanje uticajnih faktora tokom rudarske proizvodnje, nastavak istraživanja i optimizaciju cjelokupnog procesa kako na otkopavanju, transportu i odlaganju otkrivke tako i na eksploataciji korisne mineralne sirovine.

## 1.2. STRUKTURA DISERTACIJE

Disertacija koja je rađena prema odabranoj metodologiji je sačinjena od šest poglavlja. Struktura disertacije je grafički prikazana na slici 1.1.



Slika 1.1: Struktura doktorske disertacije



**Prvo poglavlje** daje pregled značaja predmetne problematike odnosno značaj integralne optimizacije sistema i dijelova sistema u rudarskoj proizvodnji. Ovde je prikazana polazna hipoteza kao i cilj same disertacije.

**Drugo poglavlje** daje pregled literature koja se odnosi na procese optimizacije pojedinih procesa u rudarstvu konvencionalnim metodama kao i metodama višekriterijumskog odlučivanja. Predstavljen je i razvoj upotrebe metoda višekriterijumskog odlučivanja u rudarstvu koji je poslednjih decenija značajan.

**Treće poglavlje** opisuje sam proces površinske eksploatacije sa pregledom sistema površinske eksploatacije, pregled optimizacije sistema sa posebnim osvrtom na integralnost optimizacije i pregled višekriterijumskih metoda odlučivanja.

**Četvrto poglavlje** daje opis razvijenog modela za optimizaciju uz predstavljanje metodologije istraživanja kao i opis izabranih eksperimentalnih područja na kojima je primjenjena funkcionalnost integralnog modela optimizacije. U ovom poglavlju su relativno detaljno predstavljene relevantni uslovi proizvodnje na predmetnim područjima.

**Peto poglavlje** daje pregled studije slučaja za dva primjera upotreba odnosno površinskog kopa Ugljevik Istok 1 i ležišta L-29C eksploatacionog polja Bešpelj. U studiji slučaja površinskog kopa Ugljevik Istok 1 su definisani relevantni kriterijumi koji integralno sagledavaju rudarsku proizvodnju i definisana su alternativna rješenja. Preko kriterijuma "Produktivnost" definisano je da sva alternativna rješenja zadovoljavaju uslove eksploatacije i da se može pristupiti daljoj optimizaciji. Na studiji slučaja ležišta L-29C su definisani kriterijumi za odlučivanje i alternative. Alternative su definisane na osnovu primjenjivosti metoda kako prema prirodnim uslovima ležišta tako i prema organizacionim jer se radi o malom ležištu u eksploatacionom polju sa više ležišta. U ovom poglavlju su dati i rezultati optimizacije za oba analizirana slučaja.

**Šesto poglavlje** daje zaključke koji su proizašli iz procesa istraživanja sa praktičnom upotrebljivošću i analizom potrebnih aktivnosti za nastavak daljih istraživanja za optimizaciju rudarskog, dijela ili kompletnog, procesa proizvodnje.



## 2. PREGLED LITERATURE

Rudarstvo predstavlja jednu od bazičnih industrija i u mnogim zemljama je ključni dio privrede (Ericsson i Löf, 2016; Ericsson, M., 2002). Sistemi otkopavanja i transporta na površinskim kopovima proizvode milione tona korisnog materijala, što na globalnom nivou generiše desetine milijardi tona jalovine godišnje (Kalisz, 2022). Proizvodnju ove količine materijala prate mnogi problemi (Mateus i Luis, 2019) od geoloških do geopolitičkih. U posljednje vrijeme je fokus na ekološkim pitanjima, odnosno na prelasku na čistu energiju što za cilj ima uvođenje obnovljivih energetske tehnologije (Tabelin i ostali, 2021) i definisanje strogih ograničenja pri emisiji ugljendioksida. Ova tema je obradjivana kako za ugljeve (Phengsaart i ostali, 2023), tako i za druge rude (Julapong i ostali, 2023; Tabelin i ostali, 2021).

A. Bascetin and A. Kesimal (Bascetin i Kesimal, 1999) su se u radu, "The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant" fokusirali na Yagerov metod, jedan od metoda višekriterijumskog odlučivanja u fazi okruženju. Izvršeno je istraživanje sistema transporta uglja do termoelektrane (kapaciteta 2x150 MW) koja će biti izgrađena 5 kilometara od rudnika uglja Can Ignite, koji pripada Turskom preduzeću "Turkish Coal Enterprises". Rudnik uglja se nalazi oko 79 kilometara sjeverno od grada Can u jugoistočnom dijelu provincije Canakkale, na zapadu Turske.

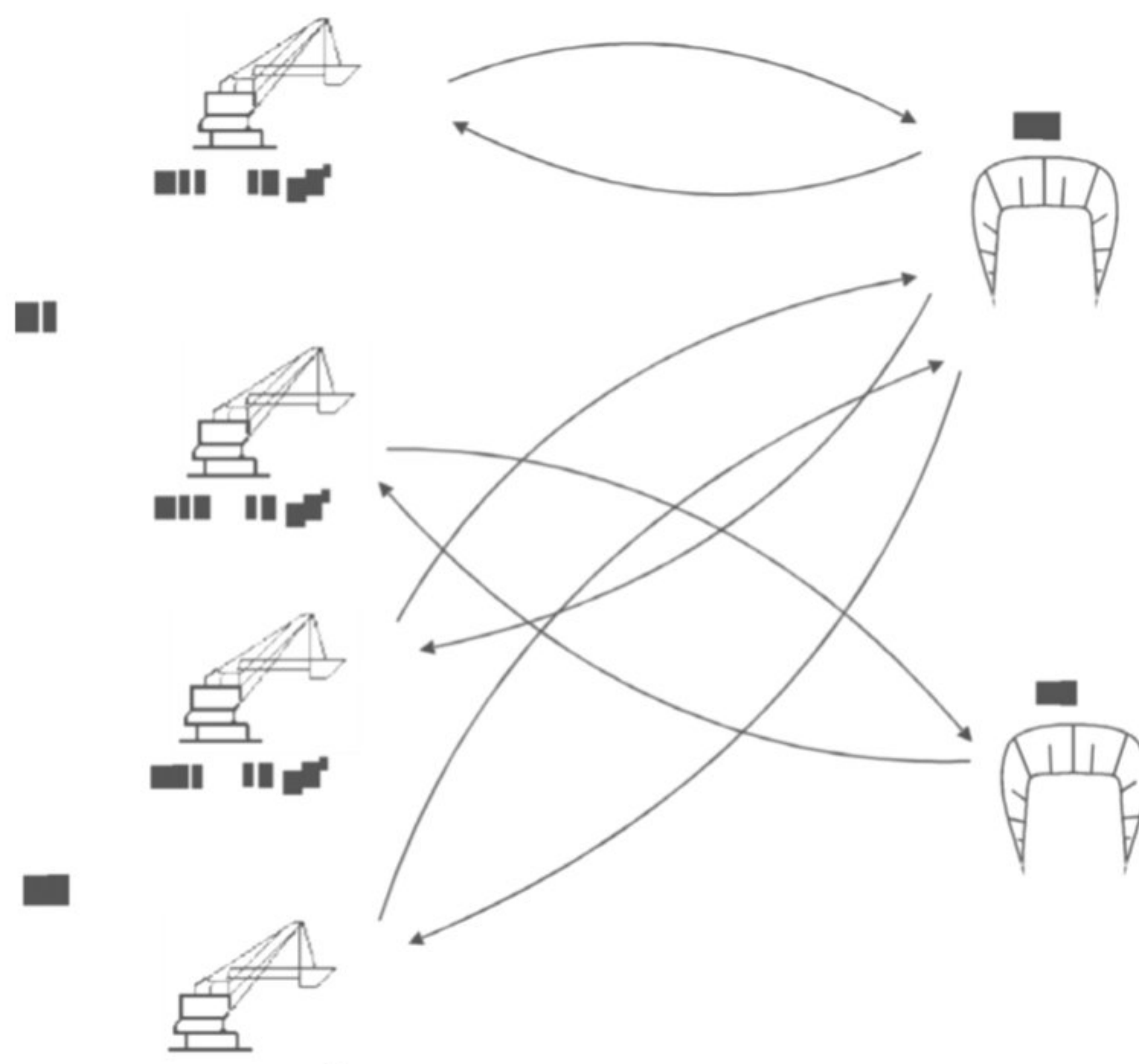
Rad (Bascetin i Kesimal, 1999) se bavio istraživanjem transporta na površinskom kopu, analizira ekonomiju transporta trakastim transporterima u odnosu na kamionski prevoz i donošenjem odluka u fazi okruženju (gdje uključuje nesigurne podatke i lingvističke promjenljive) kako bi se riješili problemi višekriterijumske optimizacije transporta. U radu je predstavljen nova metoda za dodjelu težina. Predloženi alat za podršku pruža donosiocu odluke fleksibilnost u izboru procesa važnosti koji mu najviše odgovara, a u slučaju nepotpunog znanja pruža mogućnost automatskog algoritma zasnovanog na prethodnim slučajevima (Bascetin i Kesimal, 1999).

Bascetin, (Bascetin, 2004) u radu "Technical note, An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine" se bavi izborom mehanizacije i opreme, koji predstavlja jedan od najvažnijih faktora u planiranju površinske eksploatacije i proizvodnje, jer prije svega izbor opreme utiče na ekonomske efekte proizvodnje. Sam izbor mehanizacije je kompleksan problem odlučivanja koji uključuje više osoba i kriterijuma. Proces donošenja odluka može se unaprijediti sistematičnim i logičkim pristupom procjeni prioriteta na osnovu ulaznih informacija stručnjaka iz različitih funkcionalnih oblasti. U ovom radu (Bascetin, 2004) izbor sistema za utovar i transport izvršen je pomoću modela baziranog na AHP-u. Ovim modelom utvrđeno je da je proces donošenja odluka sistematičan i da korišćenje predloženog modela može smanjiti vrijeme i napor koji potreban za izbor optimalne opreme. Iz rezultata studije slučaja može se zaključiti da je primjena AHP-a u izboru mehanizacije i sistema za utovar i transport poželjna radi unaprijeđenja procesa timskog donošenja odluka. Predloženi sistem ocjenjivanja sistema za utovar i transport pomaže donosiocima odluka da izbjegnu dugotrajna, dvostruka poređenja i odluke (Bascetin, 2004).

Ercelebi i Bascetin (Ercelebi, 2009) su razvili metodologiju primjenljivu za planiranje utovara i transporta u rudnicima sa površinskom eksploatacijom. Razvijena metodologija je primjenjiva za različite tipove mehanizacije za utovar i transport na nerazvijenim putevima. Metodologija ovog rada (Ercelebi, 2009) je obuhvatila nekoliko faza i to prva faza je obuhvatila određivanje optimalnog broja kamiona koji rade u sistemu sa bagerom kašikarom korištenjem modela zasnovanog na teoriji zatvorenih redova čekanja. Rezultati su jasno pokazali primjenljivost ovakvog pristupa za proučavane problema. U sljedećoj fazi, određeno je kako kamioni treba da budu raspoređeni prema bagerima, koristeći model linearnog programiranja (slika 2.1).



Dobijeni rezultati su zanimljivi i primjenjivi za planiranje operacija utovara i transporta u površinskim kopovima ili u fazi nabavke opreme (Ercelebi, 2009). Studija slučaja za istraživačku analizu optimizovanja sistema za transport otkrivke je sprovedena na površinskom kopu uglja. Površinski kop se nalazi oko 65 kilometara sjeverno od Burse na zapadu Turske, a u eksploataciji je od 1979. godine.



*Slika 2.1: Optimalan raspored kamiona prema bagerima (Ercelebi, 2009)*

Izbor opreme u rudarstvu je jedna od najvažnijih odluka koja utiče na sve procese, od projektovanja rudnika, planiranja proizvodnje kao i na ekonomske efekte eksploatacije. Projektanti prilikom planiranja rudnika obično koriste svoju intuiciju i iskustvo u donošenju odluka, iako je izbor opreme složen problem odlučivanja sa više kriterijuma. Konvencionalna AHP metoda nije sposobna da obradi nesigurnost i neodređenost koja uključuje mapiranje preferencija na tačan broj ili odnos dok model fazi AHP-a prevazilazi ovaj problem (Bazzazi i ostali, 2009). Rezultati ovog istraživanja pokazuju značajno smanjenje vremena potrošenog na izračunavanje i dobru tačnost u poređenju sa postojećim metodama.

Istraživanja su rađena na površinskom kopu Sungun koji je jedan od najvećih nalazišta bakra u Iranu, smješten na sjeverozapadu zemlje blizu granica sa Azerbejdžanom, Jermenijom i Turskom. U istraživanju, a za potrebe transporta rude, razmotrene su tri potencijalne alternative sistema transporta. Alternative su sistem utovar- kamion (A1), sistem bager-kamion (A2) i sistem bager-kamion-traka (A3) (Bazzazi i ostali, 2009-1).

Kapitalni trošak nabavke mehanizacije za površinsku eksploataciju je vrlo visok, pa svaka greška pri izboru, vrsti i kapacitetu opreme može imati nepopravljiv uticaj na ekonomski efekat, odnosno može imati negativan uticaj. Problem izbora mehanizacije je pitanje od strateškog značaja za površinsku eksploataciju nekog rudnika. Predložena metoda može se primjeniti u različitim oblastima rudarstva i drugim problemima izbora alternativa kao što su izbor metoda otkopavanja, sistema eksploatacije, izbora mehanizacije, izbor lokacije za odlaganje i sl. (Bazzazi i ostali, 2009-1).

U radu "Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach" (Bazzazi i ostali, 2009-2) analiziran je izbor opreme kao jedna od najvažnijih



odluka u rudarstvu, a koja utiče na projektovanje rudnika, planiranje proizvodnje i ekonomske parametre površinske eksploatacije. Izbor opreme je složen problem odlučivanja sa više kriterijuma, a nekad se svede na intuiciju i iskustvo u donošenju odluka rudarskih inženjera zaduženih za planiranje. Prilikom planiranja, a zbog nedostatka informacija koje su nedostupne ili nepotpune, podaci često nisu deterministički odnosno postaju neprecizni i nejasni. U ovom radu (Bazzazi i ostali, 2009-2), za izračunavanje težina atributa korištena je kombinacija analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) i metode entropije. Dobijene težine su prenete u metodu "TOPSIS", tako da najefikasnija alternativa opreme ima najbližu udaljenost do idealnog rješenja i najmanju udaljenost od negativnog idealnog rješenja u nejasnom okruženju (Bazzazi i ostali, 2009-2). Studija slučaja za ovo istraživanje, odnosno izbor optimalne opreme za utovar i transport je sprovedena na površinskom kopu Sungun u Iranu. Empirijski rezultati istraživanja pokazali su da predložene metode imaju održivi pristupi u rješavanju problema izbora opreme na površinskim kopovima (Bazzazi i ostali, 2009-2).

D. Komljenović i V. Kecojević (Komljenović i Kecojević, 2009) su u radu "Multi-attribute selection method for materials handling equipment (2009)" razvili novu metodologiju za izbor oduzimača rude na depoima (Rail-mounted boom type bucket wheel reclaimers - RMBWR) i odlagača i oduzimača rude na depoima (Rail-mounted boom type bucket wheel stacker-reclaimers - RMBWSR), a za proces izbora koristili su metode "Coefficient of Technical Level" (CTL) i "Analytic Hierarchy Process" (AHP). Zaključili su da primjenjena metodologija može pomoći donosiocima odluka u sistemima za manipulaciju materijalima da odaberu određeni tip prilikom nabavke nove opreme (Komljenović i Kecojević, 2009). RMBWR i RMBWSR igraju ključnu ulogu u manipulaciji materijalima na depoima pa je od presudnog značaja odabrati optimalan tip opreme za donosioca odluka (Komljenović i Kecojević, 2009).

Studija slučaja u radu (Komljenović i Kecojević, 2009) pokazala je korisnost predložene metodologije odnosno da predložena metodologija za izbor integriše, na strukturiran i sistematičan način, dominantne faktore kao što su troškovi, produktivnost, materijalne karakteristike, održavanje itd., a i važne nematerijalne faktore uticaja kao što su organizacija, nivo znanja, podrška proizvođača, okolina itd. Za proces izbora opreme uzeti su stvarni tipovi opreme i proizvođača, a njihove nazive zamijenjeni su oznakama kao što su Proizvođač A, Proizvođač B, itd.

A.A. Bazzazi, M. Osanloo, B. Karimi (Bazzazi, 2011) su razmatrali mjerljive i nemjerljive faktore u problemu izbora rudarske opreme i predložili novi metod višekriterijumske odluke (MCDM) koji omogućava izbor optimalne opreme koja zadovoljava potrebe donosioca odluke. Kapitalni troškovi opreme za eksploataciju na površinskim kopovima su vrlo visoki, pa svaka greška u izboru količine, vrste i kapaciteta opreme može izazvati nepopravljiv uticaj na neto sadašnju vrijednost rudarskog projekta. A.A. Bazzazi, M. Osanloo, B. Karimi (Bazzazi, 2011) su, razmatrajući mjerljive i nemjerljive faktore u problemu izbora rudarske opreme, predložili novu metodu višekriterijumske odluke (MCDM) koji omogućava izbor optimalne opreme. Studija slučaja je urađena na primjeru rudnika Sungun koji je jedno od najvećih nalazišta bakra u Iranu, a koji se nalazi na sjeverozapadu zemlje u blizini granica Azerbejdžana, Jermenije i Turske. Tehničko-ekonomske studije su pokazale da je najpogodniji način eksploatacije za ovo ležište površinska eksploatacija. Površinskom eksploatacijom može se iskopati 384 miliona tona rude sa 0,665 % bakra. Ovaj rad predstavlja novi fazi AHP model za rješavanje problema izbora opreme za površinske kopove. Svi timovi za donošenje odluka donijeli su odluku da je "bager-kamion" najbolja alternativa za ovaj rudnik. „Utovarivač-kamion” i „bager-kamion-trakasti transporter” su druge alternative koje će se uzeti u obzir pri izboru.

Ta, Ingolfsson i Doucette (Ta i ostali, 2013) predstavili su sistemi kamion-bager na površinskim rudnicima naftnih škriljaca. Modeli su formulisani sa ciljem da bi se minimizirao broj kamiona



za određeni broj bagera, uz određena ograničenja. Ovim radom je kvantifikovan nelinearni odnos između vjerovatnoće čekanja bagera (koji određuje produktivnost bagera) i broja kamiona dodijeljenih bageru putem jednostavne aproksimacije, zasnovane na teoriji redova konačnih izvora. Korištena je linearna aproksimacija, sa pretpostavkom da je svakom bageru dodijeljena jedna veličina kamiona, takođe je opisano kako se mogu uzeti u obzir kamioni različitih kapaciteta po bageru na približan način (Ta i ostali, 2013). Princip da fleksibilnost može povećati efikasnost u pogledu površinske eksploatacije znači imati kamione različitih kapaciteta. Fleksibilnost se može iskoristiti kako bi se smanjio ukupan broj kamiona i bolje uskladio konačni kapacitet rudnika sa ciljanim kapacitetom. Pristup za dodjelu kombinacije različitih kamiona nekim ili svim bagerima može se koristiti kako bi se ostvarile prednosti fleksibilnosti različitih kamiona (Ta i ostali, 2013). Namjena ovog modela (Ta i ostali, 2013) rasporeda kamiona je pružanje dobrog početnog rasporeda kamiona bagerima za početak smjene i generisanje ciljnih stopa proizvodnje za svaki bager, za korištenje od strane algoritama za raspoređivanje u realnom vremenu.

Metode kompleksne nauke mogu pomoći da se bolje razumije kompleksno okruženje rudarskih preduzeća pružajući realnije razumjevanje o njemu. Prednosti, izazovi, kao i preporučeni budući istraživački radovi i primjene u rudarstvu su razmatrani u radu "An Approach for Strategic Planning and Asset Management in Mining Industry in the Context of Business and Operational Complexity" (Komljenović, 2015) u kojem se predlaže, nov, unaprijeđeni pristup okviru odlučivanja o strateškom upravljanju imovinom za rudarske kompanije posmatrajući ih kao složene prilagodljive sisteme i zasnovan je na konceptu kompleksne nauke.

U ovom radu (Komljenović, 2015) je predlažen globalni model za strateško planiranje i upravljanje imovinom u rudarstvu, koji integriše sve relevantne inženjerske, prirodne, operativne, organizacione, ekonomske, finansijske, kao i druge kvantitativne, kvalitativne i nematerijalne uticajne faktore na strukturiran i sistematičan način. Metod je osmišljen da maksimizira ukupnu performansu rudarskog preduzeća i omogući organizovanje čvrstih, održivih i otpornih organizacija koje su ekonomski održive. Može biti posebno koristan za optimizaciju nekoliko rudarskih lokacija koje pripadaju istoj kompaniji. Ovaj pristup će nesumnjivo biti koristan za rudarske kompanije koje se suočavaju sa oštrim međunarodnim konkurencijama (Komljenović, 2015).

Patterson, Kozan i Hyland (Patterson i ostali, 2016) u radu "An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions" dali su doprinos integrisanom modelu površinske eksploatacije uglja koji podržava energetske efikasne odluke, a za formulisanje integrisanog modela operativne potrošnje energije korišteno je mješovito linearno programiranje koje uključuje četiri podsistema i to: otkopavanje i transport, odlaganje, preradu i odvoz. Navedeni podsistemi su povezani na način koji odgovara šemi toka, pri čemu rješavanje integrisanog modela obezbjeđuje sinhronizaciju procesa na podsistemima i podističe time energetske efikasnosti cijelog rudnika (Patterson i ostali, 2016). Takođe efekat ovog rada je korisni pristup modeliranja, zasnovan na proizvodnom sistemu. Slučaj je primjenjen i razvijen model na rudniku na jugoistoku Queenslanda, Australija, a izvršena je analiza osjetljivosti koja je potvrdila da model proizvodi smislene rezultate i demonstrirala njegovu korisnost kao alat za podršku u odlučivanju.

Energetska efikasnost rudarskih procesa je važan problem s kojim se susreću svi rudnici a doprinosi ovog rada (Patterson i ostali, 2016) predstavljeni su kroz niz mogućnosti za rješavanje pomenutog problema. Analizirana je osjetljivost energetske efikasnosti za planirane proizvodne ciljeve, kao i kritičnost kamionske opreme za postizanje energetske efikasne operacije. Predloženo je da se ovakav vid analize osjetljivosti primjenjuje na druge rudnike za buduće planove, izradom izvještaja koje zaposleni mogu koristiti kako bi stekli uvid u to kako



njihove odluke utiču na energetska efikasnost, također i o tome koja oprema je najkritičnija za postizanje energetska efikasne operacije (Patterson i ostali, 2016). Veličina modela određena je sa dva glavna faktora - veličinom podsistema za otkopavanje i transport i dužinom perioda optimizacije. Uključivanje više stavki u vrijednost ciljne funkcije, poput mjera produktivnosti ili troškova rada bi znatno povećalo vrijednost modela omogućavajući donosiocima odluka da bolje razumiju odnos između postojećih ključnih pokazatelja performansi i energetska efikasnosti.

Ooriad, A. F., Yari M., Bagherpour R. Khoshouei M. (Ooriad i saradnici, 2018) su razvili novi model izbora metode eksploatacije primjenom fazi logike na primjeru rudnika uglja Tazareh u Iranu. Izbor metoda eksploatacije je jedan od najznačajnijih koraka u upravljanju rudarskom proizvodnjom, a zbog visokih troškova i ekoloških problema, obično nije moguće promijeniti način eksploatacije uglja nakon planiranja i početka rada. Na osnovu ovoga može se reći da u većini slučajeva izbor metoda se može smatrati nepovratnim procesom. U radu (Ooriad i saradnici, 2018) razvijen je novi model za izbor metode eksploatacije u cilju postizanja stabilnog nivoa proizvodnje i smanjenja ekoloških problema. Ovaj novi model je ilustriran njegovom implementacijom u rudniku uglja Tazareh. U tom pogledu, TOPSIS metoda se koristi kao moćna procedura za donošenje odluka sa više osobina (atributa) u fazi okruženju. Nakon implementacije predstavljenog modela u rudniku uglja Tazareh, kao najprikladniji način eksploatacije izabrana je metoda koja je u primjeni u navedenom rudniku.

Đenadić, Jovančić, Ignjatović, Miletić i Janković (Đenadić i ostali, 2019) radu "Analiza primjene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidruličnih bagera na površinskim kopovima uglja" primjenili su različite višekriterijumske metode za analizu postojećih podataka o radu hidruličnih bagera. Pri čemu navedene metode pružaju mogućnost upoređivanja parametara čije numeričke vrijednosti nisu međusobno mjerljive. Primjenjene metode pružaju jednostavnu mogućnost analize osjetljivosti prema određenom kriterijumu, koja se može jednostavno ispitati promjenama njihovih težina funkcija preferencija. Na osnovu izvršenih analiza različitih metoda, može se zaključiti da je metoda koja daje najpotpuniji rezultat, tj. metoda čiji se rezultat u najvećoj mjeri može dalje tumačiti AHP metoda, jer ona daje ocjenu alternativa prema svakom od razmatranih kriterijuma (Đenadić i ostali, 2019).

Branimir Farkaš i Ana Hrastov (Farkaš i Hrastov, 2021) su u radu "Multi-Criteria Analysis for the Selection of the Optimal Mining Design Solution—A Case Study on Quarry Tambura" su primjenili metode PROMETHEE II i AHP prilikom izbora optimalne završne konture kamenoloma. Studija slučaja je rađena na kamenolomu "Tambura" koji se nalazi u Hrvatskoj, na južnom dijelu Istarskog poluostrva i dio je administrativnog područja Fažane. Na kamenolomu "Tambura" se eksploatiše tehnički građevinski kamen – površinska eksploatacija.

U ovom radu (Farkaš i Hrastov, 2021) implementacijom MCDM metoda optimalna završna kontura kamenoloma je izabrana na osnovu 22 različita kriterijuma iz tri konačne konture kamenoloma. Odabrani model nije samo finansijski održiv, već također ima najmanji uticaj na životnu sredinu. Modeli su prvo analizirani korišćenjem metoda analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP), a zatim su izlazni rezultati dodatno analizirani metodom PROMETHEE II. nakon čega je izabrana optimalana kontura kamenoloma "Tambura" (Farkaš i Hrastov, 2021).

Korišćenjem višekriterijumske analize, Model 3 je izabran kao optimalan model jer ispunjava sve navedene kriterijume iako bi primjena Modela 1 ili Modela 2 omogućila veću eksploataciju tehničkog građevinskog kamena, a samim tim i veći profit, ova dva modela ne ispunjavaju kriterijum rješavanja pravnih imovinskih odnosa (Farkaš i Hrastov, 2021). Analizom strukture, odnosno udjelom svakog kriterijuma za svaki od modela, a zatim kumulativnim prikazivanjem



tih podataka, može se primjetiti da izbor optimalnog modela završne konture uglavnom zavisi od pravnih imovinskih odnosa (Farkaš i Hrastov, 2021).

K. Urošević, Z. Gligorić, I. Miljanović, Č. Beljić i M. Gligorić (Urošević i ostali, 2021) su u radu “Novel Methods in Multiple Criteria Decision-Making Process (MCRAT and RAPS)—Application in the Mining Industry (2021)” su primjenom višekriterijuskog odlučivanja razvili nove dvije metode i to MCRAT (multiple criteria ranking by alternative trace) i RAPS (ranking alternatives by perimeter similarity) koje se koriste se definisanje bušačkih i minerskih parametara.

U radu (Urošević i ostali, 2021) je razmatran hipotetički rudnik dacita, sa godišnjim kapacitetom od 300.000 tona dacita različitih frakcija. U radu (Urošević i ostali, 2021) su razmatrali tri prečnika bušenja bušotina (76, 89 i 106 mm), maksimalnu veličinu odminiranog komada od 850 mm, eksplozivno punjenje od TNT-a i amonijum nitrata, ugao nagiba etaže od 75° i visinu etaže od 15 m. Na osnovu zadatih parametara autori (Urošević i ostali, 2021) su razvili 12 alternativa opisanih geometrijskim parametrima bušenja i miniranja. U svakom procesu izbora, alternativa A3 je bila optimalno rješenje u ovom konkretnom primjeru. Alternativa sa prečnikom bušotine od 76 mm, dužinom bušotine od 16,3 m, dužinom čepa od 3 m, linijom najmanjeg otpora od 3 m, razmakom između bušotina od 3 m i probušenjem od 0,76 m odabrana je kao optimalna za miniranje dacita sa datom geometrijom (Urošević i ostali, 2021).

A. Doderović, S-M. Doderović, S. Stepanović, M. Banković i D. Stevanović (Doderović i ostali, 2023) su u radu “Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design (2023)” su razvili hibridni model za rješavanje složenih problema vezanih za formiranje odlagališta, a ovaj hibridni model kombinuje različite matematičke modele prilagođene pojedinim aspektima definisanog problema.

Razvijeni model (Doderović i ostali, 2023) koristi sledeće matematičke metode:

- Nasumični izbor (Monte Carlo simulacija) — za simulaciju geometrije potencijalnih rješenja;
- Genetski algoritam — za optimizaciju rješenja;
- Višekriterijusko donošenje odluka — AHP metoda — za definisanje vrijednosti promjenljivih;
- Heuristička metoda — za ekspertsku interpretaciju i finalizaciju rješenja.

Funkcionisanje modela sprovedeno je na primjeru površinskog kopa Buvač. Površinski kop Buvač se nalazi u gradu Prijedoru u sjeverozapadnom dijelu Bosne i Hercegovine, u entitetu Republika Srpska. Model ima sposobnost da uključi različite faktore (kao što su ekološki i tehnološki) u proces odlaganja jalovine i definisanja optimalnog rješenja sa potencijalom za poboljšanje ukupne efikasnosti rudarskih projekata, odnosno predstavljeni hibridni model može ponuditi i rangirati veliki broj rješenja u vezi sa projektovanjem odlagališta (Doderović i ostali, 2023). U studiji slučaja generisano je 2250 različitih kontura odlagališta i od ukupno je dobijenih 110 razmatranih optimizovanih varijanti dobijeno je 15 optimizovanih rješenja. U posljednjem koraku, korišteno je 15 najboljih rješenja u analizi, a usvojeno je rješenje sa najboljom vrijednošću ciljne funkcije i kreirana je konačna kontura odlagališta. Funkcionalnost predstavljenog modela je jedinstvena i predstavlja novost i doprinos praksi i nauci u oblasti rudarstva (Doderović i ostali, 2023).

Bodziony, P., Kasztelewicz, Z. i Sawicki, P. su u radu “The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks” (Bodziony i ostali, 2016) sproveli razvoj metode evaluacije za proces odabira kamiona za transport u specifičnim uslovima eksploatacije na površinskim kopovima. Metodologija rada je zasnovana na principima višekriterijuske podrške



odlučivanju koristeći jednu od metoda rangiranja - ELECTRE III. Primjenjena metodologija je omogućila rangiranje alternativnih rješenja na razmatranom skupu kamiona. Autori su predstavili praktičnu primenu metoda odlučivanja sa višestrukim kriterijumima (MCDA) i jednog od ovih metoda - ELECTRE III, kako bi riješili problem procjene i selekcije kamiona za transport u specifičnim radnim uslovima površinskim kopovima.

Autori rada Multi-Criteria System's Design Methodology for Selecting Open Pits Dump Trucks (Rakhmangulov i ostali 2024) su razvili univerzalni sistem kriterijuma za izbor modela kamiona za transport jalovine na površinskim kopovima. Predloženi sistema leži u složenom razmatranju svih poznatih faktora i kriterijuma za izbor kamiona kao i alokaciji četiri grupe kriterijuma: tehničko-tehnoloških, ekoloških, ekonomskih i organizacionih. Grupe kriterijuma i specifične kriterijume u svakoj grupi rangirali su prema stepenu važnosti korištenjem metode višekriterijumskog odlučivanja - FUCOM (Full Consistency Method). U ovom radu su predstavili univerzalni sistem kriterijuma za izbor modela kamiona u uslovima površinskih kopova. Autori su analizirali prakse trinaest površinskih kopova i rezultate pedeset naučnih studija što im je omogućilo da zaključe da danas ne postoji sistematičan pristup rješavanju problema izbora modela kamiona za transport na površinskim kopovima u uslovima neophodnosti razmatranja mnoštva međusobno povezanih faktora.

Istraživanjem (Rahimdel i Bagherpour, 2018) u radu "Haulage system selection for open pit mines using fuzzy MCDM and the view on energy saving" predložen je najbolji sistem transporta razmatrajući sisteme koji koriste fiksnu drobilicu, polumobilnu drobilicu i mobilno postrojenje za drobljenje u analizi sa 10 kriterijuma. Kao studija slučaja korišten je rudnik titanijuma u Kahnuju koji se nalazi na udaljenosti od 25 km od grada Kahnuja u pokrajini Kerman, Iran. Koristili su DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Mode) i TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity Ideal Solution) sa teorijom fazi skupova. Sisteme transporta su klasifikovali na osnovu njihove potrošnje energije. Rezultati su pokazali da je polumobilni sistem najpogodniji sistem transporta (prema uštedi energije) za analizirani rudnik (Rahimdel i Bagherpour, 2018).

U radu "Research on Selection and Matching of Truck-Shovel in Oversized Open-Pit Mines" (Xu i ostali, 2023) su analizirali opremu na velikim površinskim kopovima gdje se zahtjevaju velike investicije, a godišnji troškovi poslovanja su visoki. Razuman izbor i odgovarajuće kombinacije kamiona i bagerima imaju izražen uticaj na ekonomske efekte rada rudnika. Postavili su metodu optimizacije izbora kamiona i bagera za velike površinske kopove i razvili softverski sistem za uparivanje kamiona i bagerima kako bi riješili problem selekcije i kombinovanja kamiona i bagera na velikim površinskim kopovima. Korištenjem dobijene metode, razvijen je softverski sistem kombinovanja kamiona i bagera koristeći programski jezik C#, koji automatski može izračunati potrebnu količinu opreme i potrošnju materijala (Xu i ostali, 2023).

Poslednjih decenija primjećen je rast upotrebe fazi teorije u rudarstvu, odnosno primjena sistema zasnovanih na toj teoriji sa ciljem definisanja optimalnih rješenja pri optimizaciji metoda, sistema i opreme u rudarstvu.

Osnovna osobina fazi logike je da ima dvostruko značenje odnosno označava logički sistem kao proširenje "dvovalentne" logike u užem smislu, dok označava sinonim za teoriju fazi skupova odnosno teoriju koja povezuje klase objekata sa granicama skupa koje nisu toliko oštre u širem smislu (Klir i Yuan, 1995).

Trovrijednosnu logiku odnosno uvođenje treće vrijednosti koja se nalazi između dvije krajnje vrijednosti odnosno između tačnog i netačnog uveo je Lukasiewicz (Lukasiewicz, 1920) koji je uveo i logičke operatore: negacija, slaba konjunkcija, slaba disjunkcija, implikacija,



ekvivalencija, jaka konjunkcija i jaka disjunkcija. Lukasiewicz (Lukasiewicz, 1920) je pristup je primjenjen na matematičkom predstavljanju osnovnih nejasnoća, kao što su visok, star i vruće.

Prve osnove Fazi logike je postavio L. A. Zadeh (Zadeh, 1965) koji je definisao da je Fazi skup vrsta objekata sa kontinuumom stepena pripadnosti. Takav skup karakteriše funkcija pripadnosti (karakteristika) koja svakom objektu dodjeljuje stepen pripadnosti u rasponu od nula do jedan. Na takve skupove se proširuju pojmovi inkluzije, unije, presjeka, dopune, relacije, konveksnosti itd. i utvrđuju se različita svojstva ovih pojmova u kontekstu uspostavljenih Fazi skupova. Konkretno, dokazana je teorema razdvajanja za konveksne Fazi skupove bez zahtjeva da Fazi skupovi budu razdovjeni.

„Lingvističku (fazi) promenljivu“ uveo je Zadeh (Zadeh, 1975) što predstavlja lingvistički iskaz koji opisuje vrijednost neizvjesnosti. Na ovaj način se sa promjenjivom čije su dozvoljene vrednosti riječi prirodnog jezika, a ne brojevi, definiše lingvistička ili fazi promenljiva. Dubois i Prade (Dubois & Prade, 1998) su lingvističke iskaze u pristupu „soft računarstva“ nazvali lingvističke promjenjive.

U radu “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP” autora Chang, D.-Y.-a (Chang, 1996) predstavljen je novi pristup obradi fazi AHP-a korištenjem trougaonih fazi brojeva za skalu poređenja fazi AHP-a i primjenom metode analize opsega za sintetičku vrijednost opsega  $S_i$  za skalu poređenja. Primjena principa upoređivanja fazi brojeva, odnosno,  $V(M_1 \geq M_2) = 1$  ako i samo ako  $m_1 \geq m_2$ ,  $V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_1}(d)$ , vektori težine u odnosu na svaki element u okviru određenog kriterijuma predstavljeni su sa  $d(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $k \neq i$ . Ovaj rad uvodi inovativan pristup za rad sa fazi AHP-om, koristeći trougaone fazi brojeve za parno poređenje u okviru fazi AHP-a i primjenjujući metodu analize opsega za sintetičku vrijednost opsega  $S_i$  u parnoj uporedbi. Ovaj pristup koristi princip upoređivanja fazi brojeva kako bi predstavio vektore težine u odnosu na svaki element pod određenim kriterijumom (Chang, 1996).

U radu autora K. Zhü-a (Zhü, 2014) kritički se osvrnuo na primjenu fazi brojeva u AHP metodi, kasnije je objavio više radova i unio pometnju, postavio interesantna pitanja i problematizovao određene sfere. K. Zhü-ove (Zhü, (2014) primjedbe su bile sledeće:

- fazi AHP krši glavnu logiku teorije fazi skupova,
- aritmetička operacija fazi AHP krši osnovna načela AHP-a, uključujući uzajamne aksiome i operativno pravilo doslednosti,
- tabele ocenjivanja u fazi AHP-u su upitne u odnosu na originalnu Satijevu skalu od 1 do 9,
- nemoguće je sprovesti kvalitetnu evaulaciju rezultata

Tvrđenje K. Zhü-a (Zhü, 2014), u kojima se kritički osvrnuo na primjenu fazi brojeva u AHP metodi, su negirane mnogobrojnim naučnim radovima. Michele Fedrizzi i Jana Krejčí (Fedrizzi i Krejčí, 2015) su negirali iznjete teze K. Zhü-a (Zhü, 2014) u radu “A Note on the Paper “Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Fallacy of the Popular Methods” (Fedrizzi i Krejčí, 2015).

F. Sitorus, Jan J. Cilliers, P. R. Brito-Parada (Sitorus i ostali, 2018) su dali pregled literature u kojima je primjenjena višekriterijumska analiza odlučivanja (MCDM) u rudarstvu i pripremi mineralnih sirovina koja je u širokoj primjeni. F. Sitorus, Jan J. Cilliers, P. R. Brito-Parada (Sitorus i ostali, 2018) su u ovom radu dali sveobuhvatan pregled primjene i trendova metoda MCDM za problem izbora (tj. određivanja najbolje opcije iz skupa) u rudarstvu i pripremi mineralnih sirovina, a odabrali su 90 članaka objavljenih između 1999. i 2017. godine. Osim toga, u okviru istraživanja, identifikovani su različiti tipovi problema izbora. Rezultati pokazuju da postoje dvije faze rasta primjene metoda MCDM za problem izbora u rudarstvu i pripremi



mineralnih sirovina. Prva faza, od 1999. do 2007. godine, pokazuje vrlo nizak broj objavljenih radova, sa umjerenim povećanjem do kraja, dok druga faza, od 2007. do 2017. godine, pokazuje značajan porast broja objavljenih članaka. Pregled takođe pokazuje da je najčešće obrađeni problem izbor metoda eksploatacije, dok je analitički hijerarhijski proces (AHP) bio najčešće korišćena metoda MCDM.

Razmatran je i porast primjene hibridnih metoda. F. Sitorus, Jan J. Cilliers, P. R. Brito-Parada (Sitorus i ostali, 2018) su definisali dva glavna problema u primjeni FAHP za izabrani problem u rudarstvu i pripremi mineralnih sirovina, a to su izračunavanje nedosljednosti upoređivanja fazi matrice u paru (FPCM) i pojava promjene ranga. Ovo istraživanje pokazuje da se primjena MCDM metoda za izbor problema u rudarstvu i pripremi mineralnih sirovina, kako individualnih tako i hibridnih metoda, povećala u poslednjih petnaest godina (Sitorus i ostali, 2018).



### **3. OPIS METODE RAZVOJA MODELA**

U ovom poglavlju je opisan osnovni koncept površinske eksploataciji, sistema površinske eksploatacije, fazi logike i metoda višekriterijumskog odlučivanja koje se mogu primjeniti u optimizaciji sistema proizvodnje na površinskim kopovima.

Rudarstvo je jedna od najstarijih i najvažnijih privrednih grana koja se bavi eksploatacijom mineralnih sirovina bilo da su one u čvrstom, tečnom ili gasovitom agregatnom stanju, odnosno da se vrši eksploatacija metaličnih, nemetaličnih i energetskih mineralnih resursa koji su od strateškog značaja. Riječ rudarstvo nas vezuje za površinsku i podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina, koja od ova dva načina će biti primjenjena na konkretnom primjeru, zavisi prije svega od prirodnih karakteristika razmatranog ležišta, kao i tehničkih, ekonomskih i ekoloških faktora.

Navedeni uticajni faktori su razlogom u tolikom obimu navedeni, jer svi se oni razmatraju kod izbora kako načina otkopavanja, tako i izbora metode, sistema otkopavanja i optimizacije posebno površinskih kopova. Rudarstvo i radni procesi koji se izvode prilikom otkopavanja, pripreme i prerade rude imaju veliki uticaj na okolinu, odnosno često dolazi do degradacije zemljišta i promjene reljefa, zato je vrlo bitno da se pridržava svih zakona i propisa kako iz oblasti rudarstva i geologije, tako iz oblasti zaštite životine sredine.

#### **3.1. POVRŠINSKA EKSPLOATACIJA I POVRŠINSKI KOPOVI**

Površinska eksploatacija se primjenjuje u onim slučajevima kada rudno tijelo, odnosno ležište mineralnih sirovina ne zaliježe duboko u zemljinu koru, odnosno za plića rudna tijela, a jedan od faktora koji nam to određuje je granični koeficijent otkrivke.

Skup svih procesa koji se izvode sa površine terena prilikom otkopavanja predstavlja površinsku eksploataciju, a rudarski objekat koji se tada formira, bilo da je brdskog ili dubinskog, tipa naziva se površinski kop.

Prilikom formiranja površinskog kopa postoje određena ograničenja, odnosno na osnovu proračunatih rezervi mineralnih sirovina, odnosno u granicama istražnog područja i područja obuhvaćenih bilansnim rezervama vrši se formiranje površinskog kopa.

##### **3.1.1. KLASIFIKACIJA POVRŠINSKIH KOPOVA**

Postoje različiti kriterijumi na osnovu kojih se vrši klasifikacija površinskih kopova i to:

- prema vrsti mineralne sirovine,
- prema obliku,
- reljefu (morfologiji),
- nagibu,
- dimenzijama,
- prema položaju u odnosu na topografiju terena i sl.

Prema obliku površinski kopovi se mogu podijeliti na sljedeće grupe:

- izometrijski grupa: razvijena više ili manje jednako u svim pravcima,
- slojevita grupa: razvijena u dva pravca (pružanje i pad) s relativno ujednačenom debljinom,
- stubna grupa: razvijena u jednom smjeru koji je nesrazmjeno veći od ostalih dimenzija,



- nepravilna ili masivna tijela promijenjivih dimenzija u svim smjerovima (masivna rudna tijela, sočiva, žice, žile).

Prema reljefu odnosno morfologiji površinski kopovi se dijele na:

- ravničarski tip,
- kosinski tip,
- brdski tip i
- brežuljkasti tip.

Prema nagibu ležišta površinski kopovi se mogu podijeliti na:

- horizontalna ili blago nagnuta ležišta: nagib  $< 10^\circ$ ,
- kosa ležišta: nagib od  $10^\circ$  do  $25^\circ$ ,
- strma ležišta: nagib  $> 25^\circ$ ,
- prevrnuta ležišta: kada je podina zarotirana  $> 90^\circ$ .

Klasifikacija površinskih kopova prema dimenzijama (površina, granična dubina, ukupne mase, vijek trajanja rudnika):

- vrlo mali površinski kopovi (do  $0,4 \text{ km}^2$ , do 40 m, do 10 mil.  $\text{m}^3$ , do 10 god.),
- mali površinski kopovi (do  $2,0 \text{ km}^2$ , do 100 m, 10-100 mil.  $\text{m}^3$ , 10-20 god.),
- srednji površinski kopovi (do  $6,0 \text{ km}^2$ , do 200 m, 100-500 mil.  $\text{m}^3$ , 20-30 god.),
- veliki površinski kopovi (do  $20,0 \text{ km}^2$ , do 250 m, 500-2000 mil.  $\text{m}^3$ , 30-60 god.),
- i vrlo veliki površinski kopovi (do  $40,0 \text{ km}^2$ , do 1000 m, 2000-10000 mil.  $\text{m}^3$ , 60-100 god.).

Prema položaju u odnosu na topografiju terena površinski kopovi se mogu podijeliti na:

- plitki površinski kopovi: najviše za ležišta horizontalnog zalijeganja većina kopova pijeska, šljunka i lignita, krečnjaka i ostalog građevinskog materijala (dubina 10-60 m),
- dubinski površinski kopovi: otkopavaju se strma i kosa ležišta, najveći dio ležišta metala, nemetala i uglja,
- visinski površinski kopovi: ležišta metala, nemetala, najčešće ukrasnog i tehničkog kamena, ponekad uglja kao i hemijskih elemenata,
- visinsko-dubinski površinski kopovi: razvijaju se na ležištima složene topografije (ležišta metala, nemetala, hemijskih sirovina, arhitektonsko i tehničko-građevnog kamena) i
- podvodni površinski kopovi: - takvim se kopovima eksploatišu ležišta pod vodom, tj. na dnu mora, jezera, rijeka i sl.

Svi navedeni tipovi površinskih kopova imaju i svoje prednosti i nedostatke, neki od njih su sledeći:

- plitki kopovi zbog svoje male dubine su najekonomičniji jer se otkopava puna debljina korisne sirovine, a u otkopanom prostoru formira se unutrašnje odlagalište,
- dubinski površinski kopovi su najkompliciraniji i za projektovanje i za eksploataciju jer se sva masa koja se otkopava i rude i jalovine mora izvlačiti na osnovni nivo.

Visinski površinski kopovi se odlikuju time što postoji mogućnost primjene gravitacionog transporta prilikom spuštanja otkrivke i rude pri otkopavanju.



## 3.2. SISTEMI POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

Sistem eksploatacije je određen redoslijed otkopavanja otkrivke, dobijanja i pomoćnih radova koji obezbjeđuje planirani kapacitet površinskog kopa i puno iskorištenje opreme, a sistem eksploatacije čine dva osnovna proizvodna procesa i to skidanje otkrivke i dobijanje rude, koji se sastoji iz sledećih radnih operacija: bušenja, miniranja, otkopavanja, utovara i transporta (Popović, 1984). Pored navedenih operacija rad na otkrivci uključuje i radni proces odlaganja dok rad na dobijanju rude često završava deponovanjem mineralne sirovine.

Struktura kompleksne mehanizacije i sistem eksploatacije su međusobno uslovljeni i povezani. Osnovne karakteristike strukture kompleksne mehanizacije su vrsta, tipovi i kapaciteti osnovne i pomoćne opreme, te usklađenost i broj u pojedinim proizvodnim i radnim procesima.

Sistem eksploatacije karakterišu njegovi parametri (Popović, 1984):

- broj, visina etaža i ugao nagiba njegovih kosina,
- konstrukcija (odnosno geometrija) kopa (širina i dužina zahvata),
- dužina fronta radova na otkrivci i otkopavanju rude,
- širine radnih i transportnih površina,
- ugao nagiba radne kosine površinskog kopa,
- širine obrušavanja miniranog materijala i dr.

Dok su glavni elementi sistema eksploatacije:

- radne etaže, zahvati,
- radne površine,
- otkopni usjeci,
- unutrašnja odlagališta i dr.

Pokazatelji sistema eksploatacije su pravac i dinamika napredovanja rudarskih radova u planu i dubini površinskih kopova, kapacitet, gubici i osiromašenja prilikom otkopavanja. Osnovni sadržaj tehnologije površinske eksploatacije je kompleksna mehanizacija, dok je sistem eksploatacije njen aktivni oblik koji obezbjeđuje siguran i produktivan rad opreme na svim procesima (osnovnim i pomoćnim). Pored izabrane opreme, na izbor sistema eksploatacije utiču i prirodne karakteristike ležišta, kao što su oblik, moćnost, zalijeganje, kao i uslovi radne sredine prije svega lokacijski (Popović, 1984).

Jedna od najstarijih i do danas aktuelnih klasifikacija sistema eksploatacija zasnovana je na pravcu premještanja otkrivke u odlagalište koju je predložio E.F.Šeško (Šeško, 1957)

Prema E.F. Šešku sistemi eksploatacije se dijele u četiri grupe, a koje se mogu podijeliti u sisteme eksploatacije i to:

1. Sa poprečnim premještanjem otkrivke u odlagalište
  - sa neposrednim prebacivanjem otkrivke,
  - sa višekratnim prebacivanjem otkrivke,
  - sa prečnim transportom otkrivke mostovima ili odlagačima.
2. Sa uzdužnim premještanjem otkrivke
  - sa transportom otkrivke na unutrašnja odlagališta,
  - sa transportom otkrivke na vanjska,
  - sa transportom na unutrašnja i na vanjska odlagališta.
3. Sa poprečnim i uzdužnim premještanjem otkrivke u odlagalište
  - sa djelimičnim transportom otkrivke na unutrašnja ili vanjska odlagališta,



- sa djelimičnim prebacivanjem otkrivke na unutrašnje odlagalište.
4. Sa neznatnim obimom otkrivke, kada način premještanja otkrivke nema bitnog značaja.

Druga klasifikacija se takođe bazira na načinu premještanja otkrivke u odlagalište i tipu primjenjene mehanizacije, pa se može smatrati novijom verzijom prve klasifikacije. Klasifikaciju sistema površinske eksploatacije izvršio je N.V. Meljnikov (Meljnikov, 1979) to:

1. Bestransportni (bageri kašikari i dreglajni sa produženom katarkom, bez transportnih sredstava)
  - a) jednostavni i
  - b) sa ponovnim prebacivanjem otkrivke na odlagalište
2. Sa prečnim transportom otkrivke (kontinualni bageri, transportni mostovi i konzolni odlagači)
3. Specijalni (užetni bageri, skreperi na točkovima, hidromonitori i pumpe, bez transportnih sredstava)
4. Transportni (bageri svih vrsta i tipova, sredstva željezničkog i kamionskog transporta)
  - a) sa unutrašnjim odlagalištima i
  - b) sa vanjskim odlagalištima.
5. Kombinovani (bageri svih vrsta za gornje etaže i produženom katarkom za donje etaže, mostovi odlagači, željeznički i kamionski transport).

Podjela je takođe izvršena (Meljnikov, 1979) na:

- Zavisne - kod kojih se ostvaruje čvrsta zavisnost između uklanjanja otkrivke, dobijanja rude i rudarsko-pripremnih radova u pogledu njihovog redoslijeda izvođenja u vremenu i prostoru (rezerve mineralnih sirovina su veoma ograničene najviše 15-45 dana, a rudarski radovi se izvode strogo po kalendarskom planu).
- Poluzavisne - kod kojih su uklanjanje otkrivke, dobijanje rude i rudarsko-pripremnih radovi povezani bez čvrste zavisnosti u vremenu (kod ovih sistema eksploatacije otvorene i pripremljene rezerve mineralnih sirovina mogu biti znatne za period od 3-6 mjeseci, dok se izvođenje rudarskih radova reguliše kalendarskih planom.)
- Nezavisne - kod kojih se uklanjanje otkrivke, dobijanje rude i rudarsko-pripremnih radovi izvode praktično nezavisno jedni od drugih (rezerve su neograničene po organizaciji radova).

Sisteme eksploatacije na horizontalnim i blago nagnutim ležištima u periodu eksploatacije karakterišu samo položaji i redoslijed radova na otkrivci, dobijanju rude, izmjene dužine frontova ili visine pojedinih etaža i dimenzija radnih površina, a takvi sistemi se nazivaju sistemi eksploatacije bez produbljavanja (Popović, 1984).

Kod eksploatacije kosih i strmih ležišta, rudarsko-pripremnih radova (otvaranje i priprema etaža) vode se, kako u periodu izgradnje, tako i u periodu eksploatacije radi stvaranja novih frontova na uklanjanju otkrivke i dobijanja rude. Prema tome sisteme eksploatacije na kosim i strmim ležištima karakterišu položaji i redoslijed otkrivke, dobijanja rude i rudarsko-



pripremnih radova kao kontinualne procese, a takvi sistemi se nazivaju sistemi eksploatacije sa produbljanjem (Popović, 1984).

Određeni redoslijed izvođenja pripremnih radova, uklanjanja otkrivke i dobijanja rude, sistem površinske eksploatacije u prvom redu se karakteriše pravcem napredovanja rudarskih radova u planu i profilu površinskog kopa, a i lokacijama odlagališta, a na bazi ovih elemenata noviju klasifikaciju je predložio V.V. Rževski (Rževski, 1980) i to:

Po pravcu napredovanja rudarskih radova u planu razlikuju se:

- uzdužni sistemi eksploatacije kod kojih se jednokosinski (jednokrillni) ili dvokosinski (dvokrillni) front otkrivke i dobijanja rude premješta paralelno dužoj osi površinskog kopa (paralelno pružanju).
- poprečni sistemi eksploatacije kod kojih se jednokosinski (jednokrillni) ili dvokosinski (dvokrillni) front otkrivke i dobijanja rude premješta paralelno kraćoj osi površinskog kopa (paralelno pružanju).
- lepezasti sistemi eksploatacije kod kojih se front uklanjanja otkrivke i dobijanja rude premješta po lepezi s centralnom ili nestacionarnim obrtnim tačkama.
- kružni sistemi eksploatacije kod kojih radna zona obuhvata cijeli obim površinskog kopa, a eksploatacija se vodi kružnim pojasom od centra prema granicama ili obrnuto.

Proračuni i verifikacija sistema eksploatacije sastoje se u utvrđivanju kvantitativnih zavisnosti između osnih dimenzija ležišta, površinskog kopa, parametrima elemenata sistema eksploatacije, parametrima i razmještanjem opreme i kapacitetom površinskog kopa.

Proračuni sistema eksploatacije se izvode sa slijedećim ciljevima:

- utvrditi maksimalni mogući kapacitet površinskog kopa po prirodnim i tehničkim uslovima na konkretnom primjeru,
- obezbjediti planiranu proizvodnju mineralne sirovine na aktivnom površinskom kopu i
- postići na datom površinskom kopu najmanju cijenu koštanja skidanja otkrivke i dobijanja rude.

A.I. Arsentjev (Arsentjev, 1981) je izvršio klasifikaciju sistema eksploatacije na dvije osnovne grupe:

- sisteme eksploatacije sa produbljanjem površinskog kopa (slika 3.1) i
- sisteme eksploatacije bez produbljanja površinskog kopa (slika 3.2).

Ova podjela je izvršena prema ležištima tako da za kosa i strma ležišta dolaze u obzir sistemi eksploatacije sa produbljanjem, dok za horizontalna i blago nagnuta ležišta sistemi bez produbljanja.

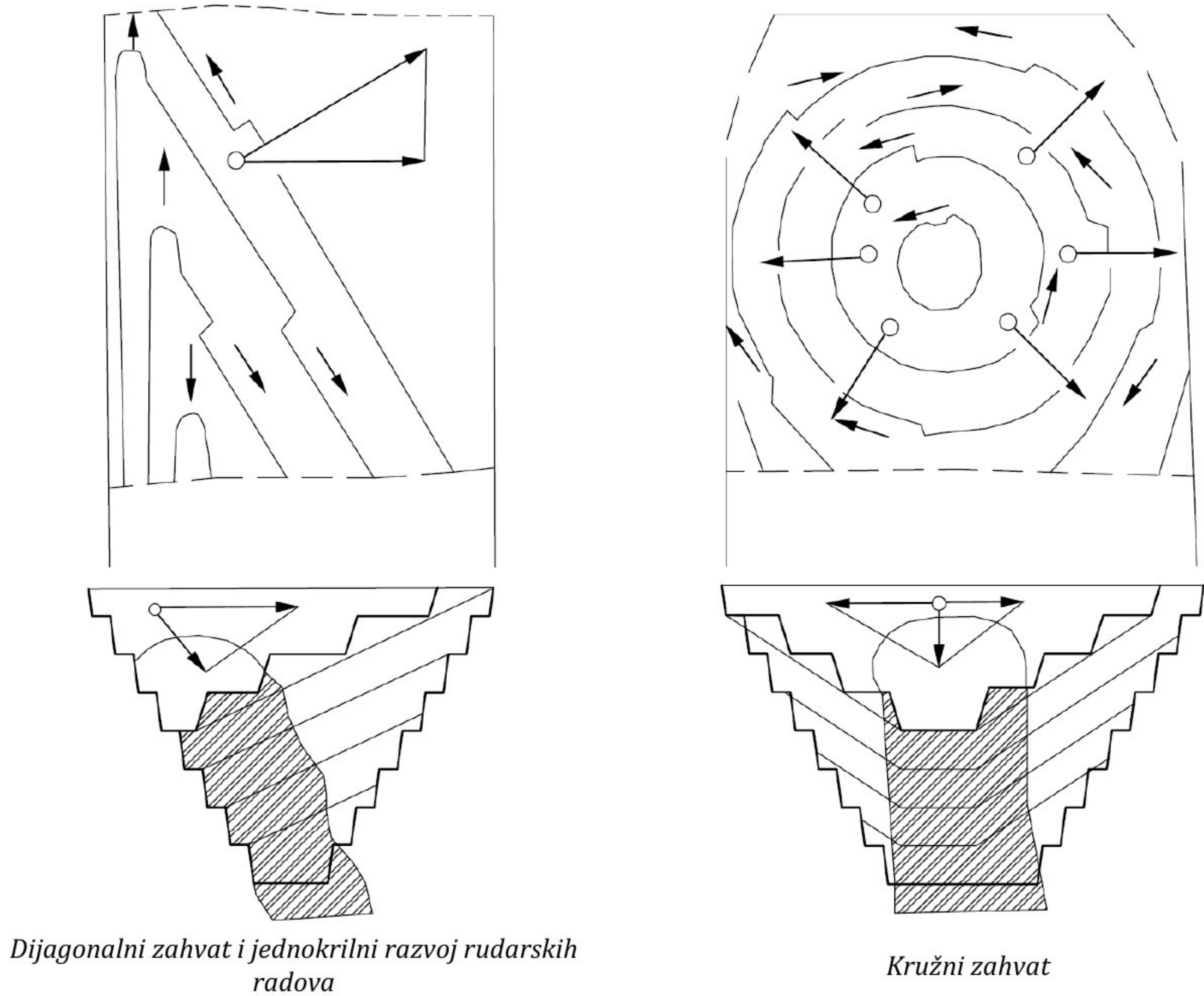
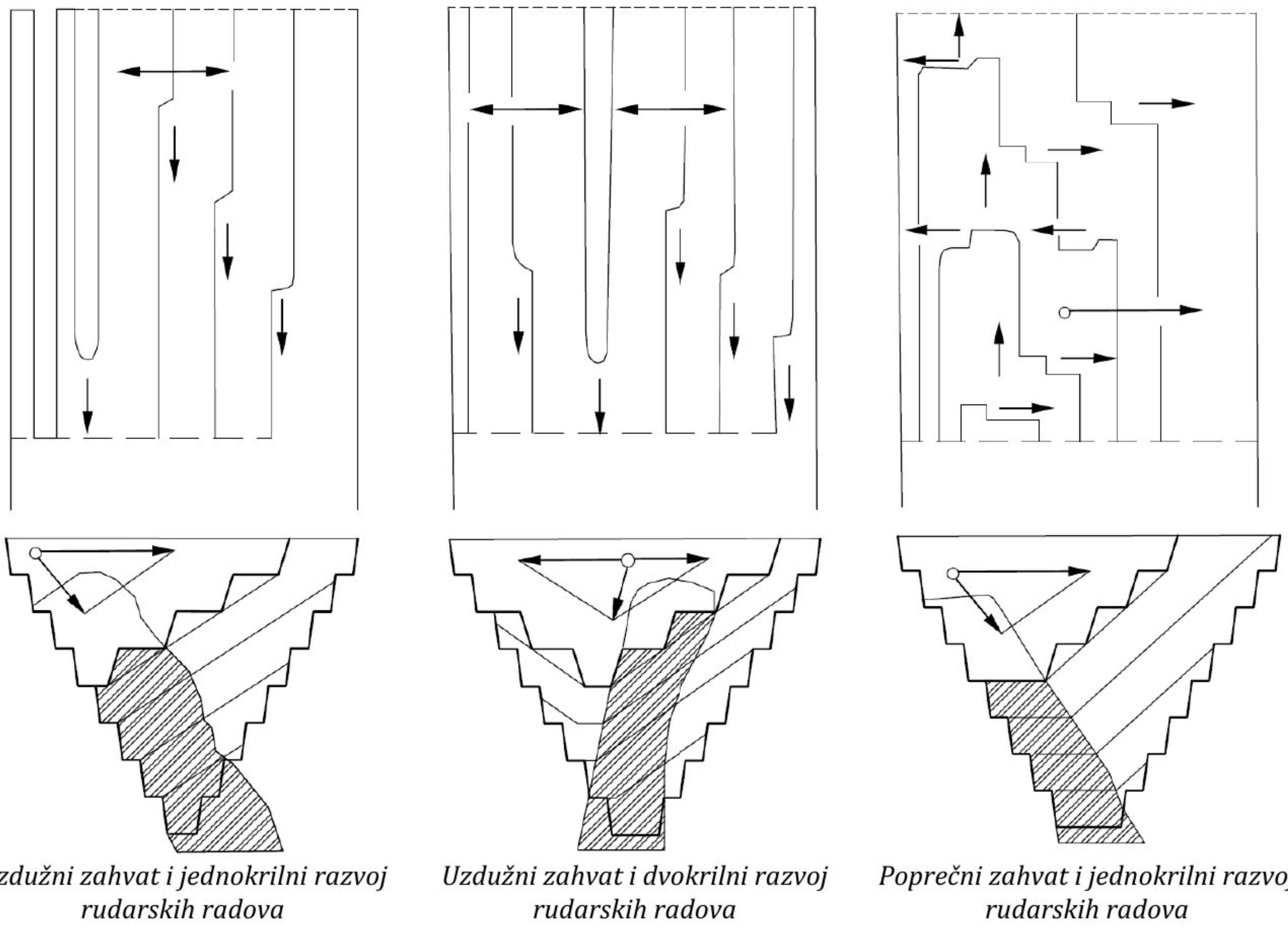
Po A. I. Arsentjevu (Arsentjev, 1981) sistem eksploatacije je način formiranja radne zone u prostoru i vremenu koga karakteriše proporcionalnost (usklađenost) razvoja rudarskih radova na etažama, konstrukcija otkopa i pravci njihovog napredovanja. Podjela sistema eksploatacije prema A. I. Arsentjevu data je u tabeli 3.1.



Tabela 3.1: Pregled podjele sistema eksploatacije prema A. I. Arsentjevu (Arsentjev, 1981)

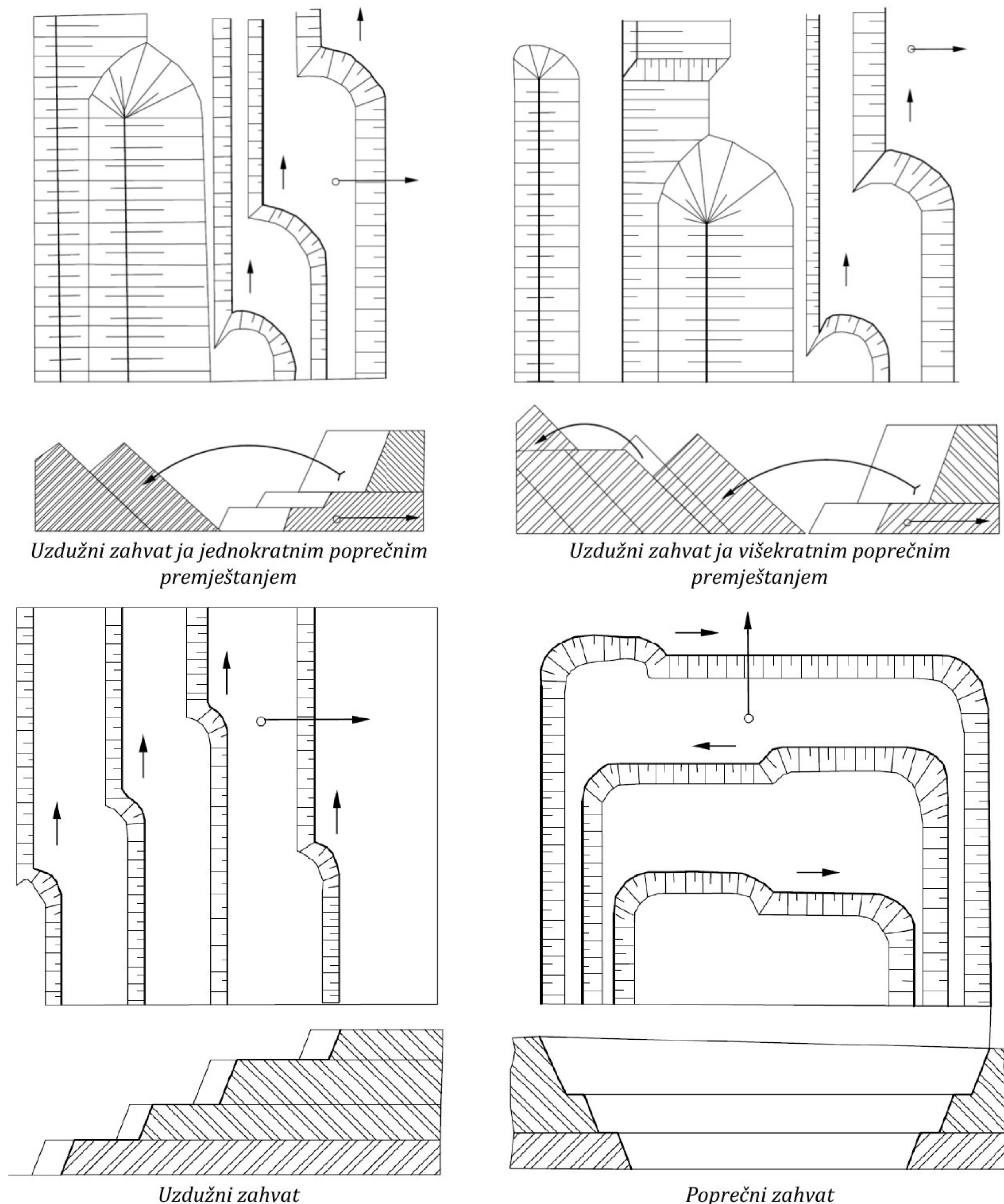
Etaže	Obrada etaže (kopanje)	Pravac napredovanja otkopa (zahvata)	Napredovanje fronta rudarških radova	Odlagališta	Stanje otkopa
Sistemi eksploatacije s produbljivanjem površinskog kopa (slika 3.1)					
Horizontalne Kose Kombinacije horizontalnih i kosih	Zahvatima Tankim strmim slojevima Tankim blagim slojevima	Zahvatima, slojevima: - uzdužnim - poprečnim - dijagonalnim - radijalnim - kružnim - kombinovanim	Jednokrilno (jednostrano): - od podine - od krovine - od čela PK  Dvokrilno (dvostrano) - od podine - od krovine - od sredine ležišta prema čelima PK Višekrilno (višestrano)	Unutrašnja  Vanjska	Suv  Potopljen
Sistemi eksploatacije bez produbljivanja površinskog kopa (slika 3.2)					
Horizontalne Kose Kombinacija horizontalnih i kosih	Zahvatima Tankim strmin slojevima Tankim blagim slojevima Tankim horizontalnim slojevima	Zahvatima slojevima - uzdužnim - poprečnim - dijagonalnim - radijalnim - kružnim - kombinovanim	Jednokrilno (jednostrano): - paralelno - lepezasto  Dvokrilno (dvostrano): - paralelno - lepezasto  Višekrilno (višestrano): - po usponu - po padu	Unutrašnja: - neposredno prebacivanje - ponovno prebacivanje - konzolnim odlagačima - transportnim mostom - uzdužnim transportom  Vanjska	Suv  Potopljen





*Slika 3.1: Sistemi eksploatacije sa produbljivanjem površinskog kopa (Popović, 1984)*



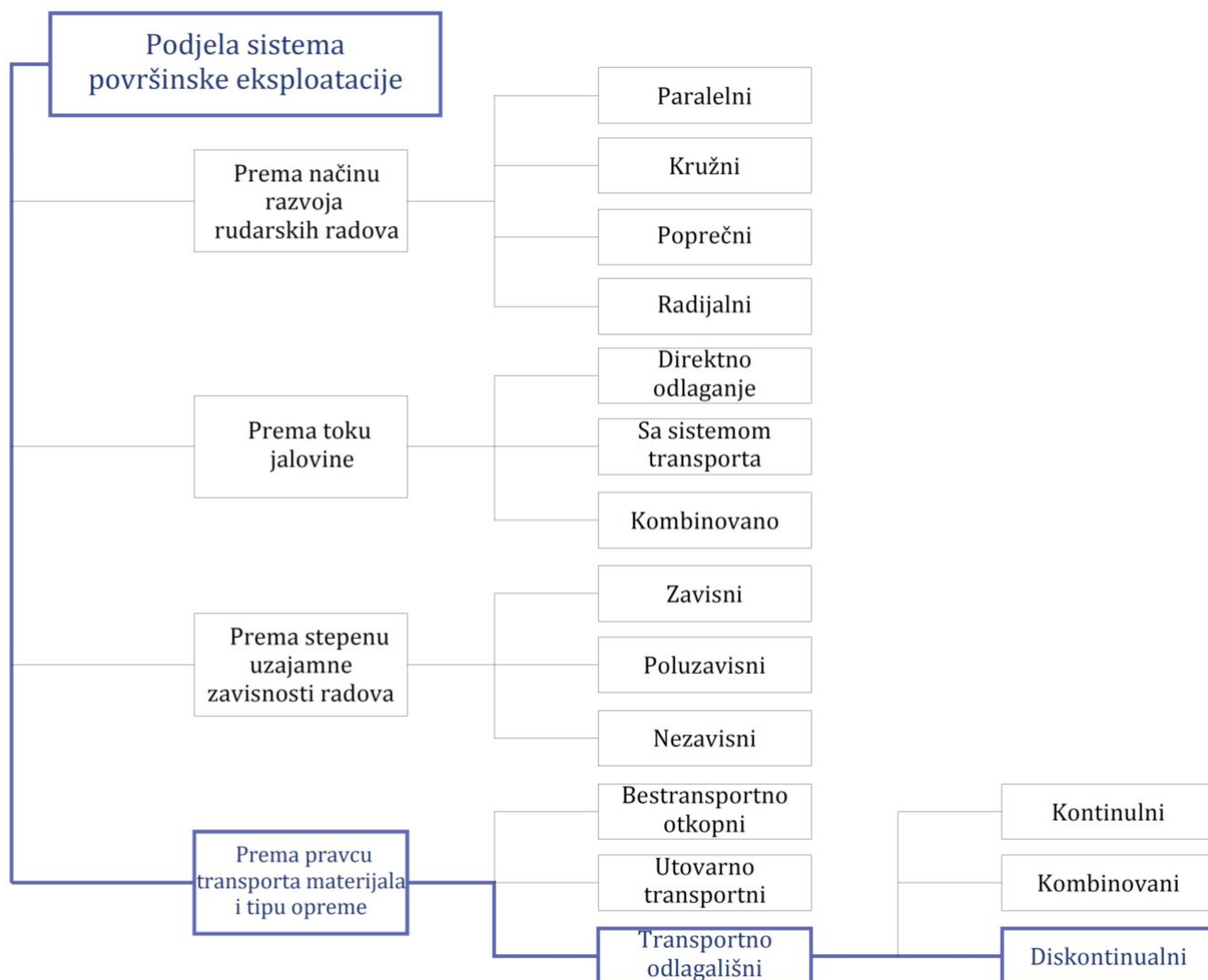


*Slika 3.2: Sistemi eksploatacije bez produbljivanja površinskog kopa (Popović, 1984)*

Na osnovu navedenih podjela može se zaključiti da se sistemi mogu podijeliti na osnovu: napredovanja u odnosu na konturu kopa, načinu odlaganja jalovine, stepenu zavisnosti i vrsti transporta što je definisano od strane Ignjatovića, D. (Ignjatović, D., 2012). Prema ovome može se dati generalna šema podjele sistema površinske eksploatacije, a koja je prikazana na slici 3.3. Na ovoj šemi je data pozicija sistema koji je predmet ovog istraživanja odnosno prema pravcu transporta materijala i tipu opreme, transportno odlagališni, diskontinualni sistem. Ova podjela odnosno podjela na kontinualne, diskontinualne i kombinovane sisteme transporta se smatra najčešće korištenom podjelom sistema eksploatacije na površinskom kopovima.



U doktoratu posebno je naglašen sistem površinske eksploatacije prema pravcu transporta materijala, transportni odnosno diskontinualni sistem kako je šematski prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3: Generalna šema podjele sistema površinske eksploatacije

### 3.2.1. DISKONTINUALNI SISTEM EKSPLOATACIJE

Prilikom definisanja sistema površinske eksploatacije je veoma bitno uzeti sve uticajne faktore u razmatranje, praktično je vrlo teško, skoro pa nemoguće definisati takav sistem eksploatacije koji će zadovoljiti sve postavljene uslove u potpunosti, tj. bitno je da taj izbor predstavlja optimalno rješenje u pogledu uticajnih faktora po postavljenoj hijerarhiji, značaju.

Najširu primjenu u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina ima diskontinualni sistem eksploatacije, zbog svojih specifičnosti koje su mu i omogućile tako široku primjenu u različitim uslovima eksploatacije. Dosadašnja iskustva pokazuju i dokazauju da se diskontinualni sistemi eksploatacije mogu koristiti za gotovo sve tipove mineralnih sirovina koje se eksploatišu na površinskim kopovima (Banković, M., 2018). Takođe, jedna činjenica koja pokazuje široku primjenu diskontinualnih sistema eksploatacije, je to da se primjenjuje i pri eksploataciji uglja, sljedeće lokacije su u pitanju (Sjeverna Amerika, Australija, Kanada, Južnoafrička Republika itd.) (Banković, M., 2018).



Prilikom definisanja sistema eksploatacije, a posebno mehanizacije i opreme koja će biti primjenjivana koriste se različiti parametri za izbor, a posebno se vodi računa o sljedećem: vrsti mineralne sirovine koja se eksploatiše, dužini transporta i potrebnom kapacitetu sistema.

Dovoljna su samo ova tri navedena kriterijuma kako bi se zaključile određene prednosti i nedostaci izbora određenog tipa mehanizacije za utovar i transport.

Npr. kapacitet proizvodnje se po pravilu određuje prije izbora opreme, a praktičan pristup bi bio da se na osnovu transportnih dužina pristupa preliminarnom usvajanju mehanizacije i opreme. U tabeli 3.2 data je preporuka za izbor mehanizacije u zavisnosti od dužine transporta.

*Tabela 3.2: Izbor mehanizacije u sistemu površinske eksploatacije u zavisnosti od dužine transporta*

Dužina transporta	Mehanizacija	Upotreba
< 100 metara	dozer (gusjenice ili na točkovima) ili skreper	<p>prilagođen je otkopavanju i transportu rastresitog materijala na kraćim rastojanjima, mogućnost i riperovanja</p> <p>Nemogućnost utovarne funkcije za obe mašine</p> <p>Ne može se primjenjivati u čvrstom stijenskom materijalu</p>
od 100 m do 300 m	Bager dreglajn	<p>mogućnost samostalnog otkopavanja i transporta uz niske operativne troškove rada,</p> <p>za veće dužine do 300 metara neophodno je uvesti tehnološku operaciju ponovnog zahvatanja materijala,</p> <p>primjena bagera dreglajna nije uslovljena osobinama stijenskog masiva jer se tvrde stijenske mase mogu prethodno tretirati miniranjem,</p> <p>najčešća primjena pri eksploataciji uglja i to na neposrednom skidanju otkrivke,</p> <p>primjena ograničena veličinom površinskog kopa i zalijeganjem ležišta (potrebna je dovoljna širina otkopnog fronta),</p> <p>pogodan za primjenu na plitkim ležištima (dubine do 50-80 m) kao otkopna mehanizacija,</p> <p>za dublja ležišta preporuka kombinacija bager-kamion sistem (neposredno otkrivanje uglja vrši dreglajnom, a ostalo bager-kamion sistem)</p>
>200-300	Utovarna mehanizacija koja podiže materijal (npr. užetni ili hidraulični bageri, utovarivači na pneumaticima) dok se transport obavlja kamionima	<p>primjer sistema eksploatacije-kombinacija navedene mehanizacije je veoma je rasprostranjena u površinskoj eksploataciji i to na kopovima velikih kapaciteta. Postoje različite alternative za ovakve primjere za otkopavanje, utovar i transport materijala, (posebno onima sa velikim kapacitetom),</p> <p>upotreba sistema sa utovarnom mehanizacijom (bager kašikar ili utovarivač) i kamionom predstavlja osnovnu i najčešće primjenjivanu metodu rada.</p>



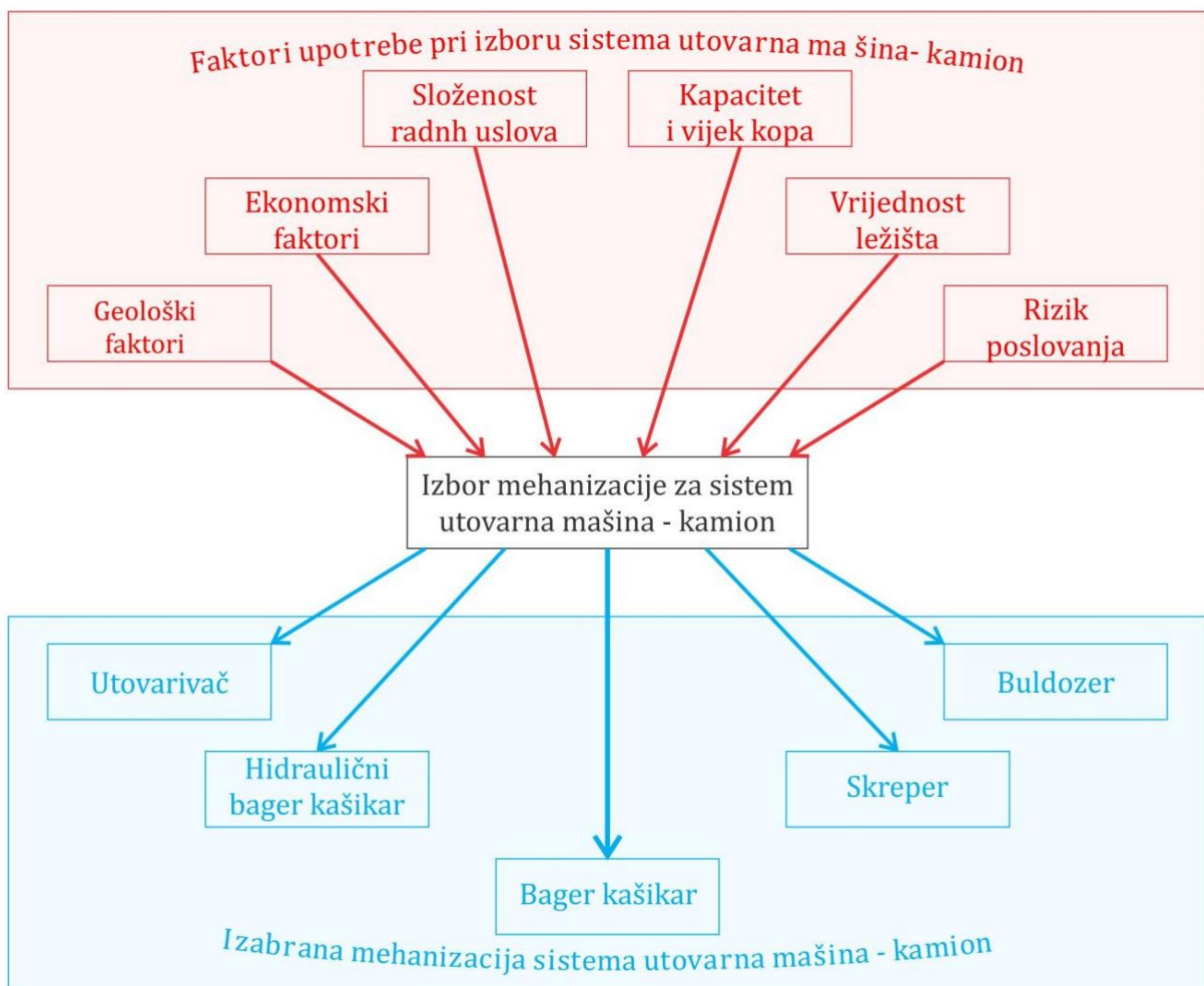
### 3.2.1.1. Sistem utovarna mašina - kamion

Najšće primjenjivani sistem eksploatacije u površinskoj eksploataciji svih vrsta mineralnih sirovina je sistem bager-kamion. Prednost ovakvog vida sistema, koja im upravo i omogućuje široku primjenu u površinskoj eksploataciji je značajna fleksibilnost sistema.

Mehanizacija koja se najčeće primjenjuje za diskontinualni sistem je sljedeća:

- bager kašikar,
- hidraulični bager kašikar,
- skreper,
- utovarivač i
- buldozer.

Faktori mogućnosti upotreba i definisanja optimalnog sistema utovarna mašina – kamiona su mnogobrojni, a kao najvažniji faktori ocjene su faktori koji su prikazani na šemi datoj na slici 3.4.



Slika 3.4: Šema uticajnih faktora i moguće mehanizacije za sistem utovarna mašina – kamion

#### Bageri kašikari

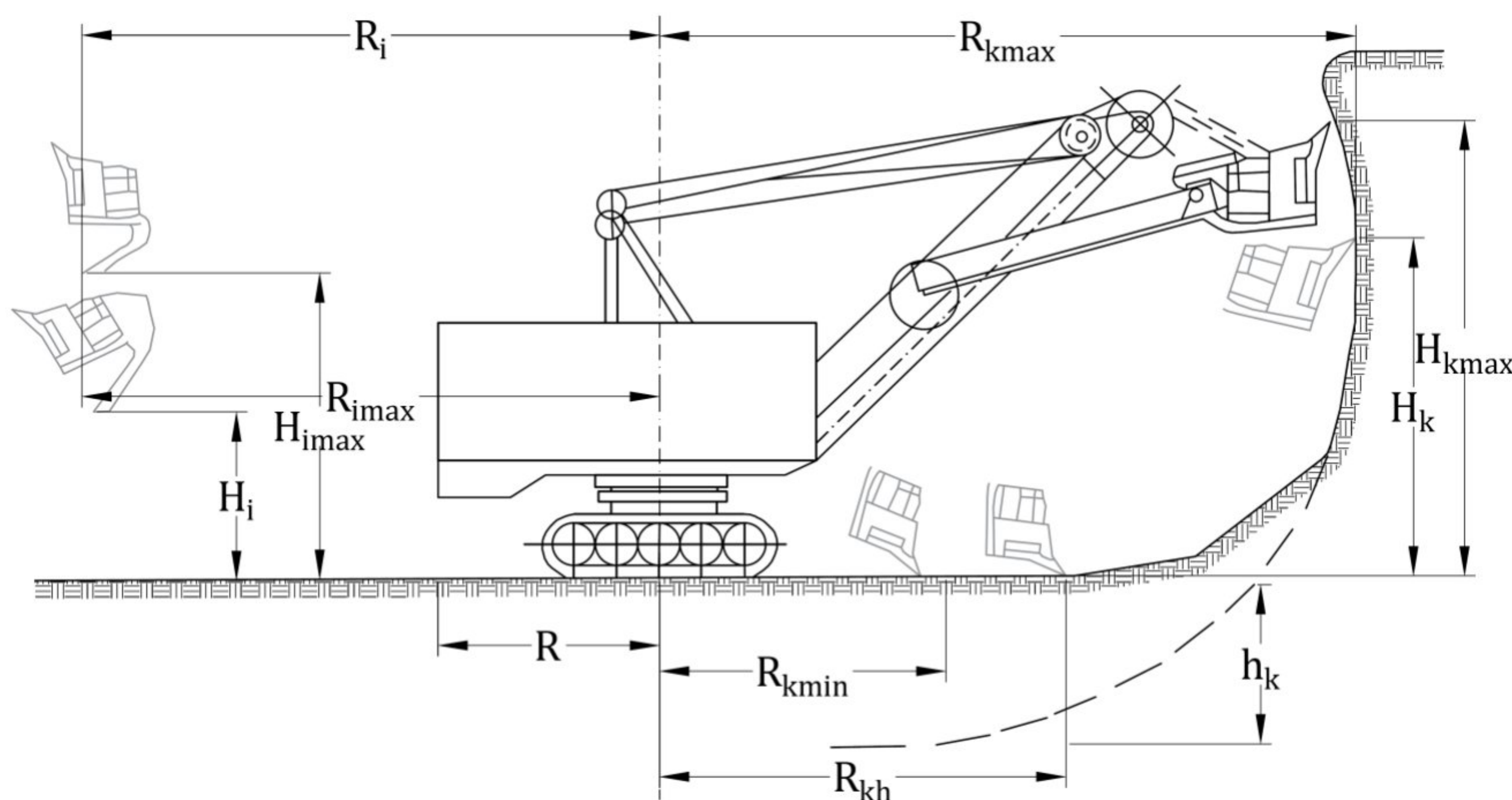
Pod pojmom bageri kašikari podrazumjevaju se užetni bageri kašikari. To su bageri koji imaju široku primjenu u različitim oblastima, a najviše u rudarstvu i to rudarsko-tehničkim



poslovima, a posebno u meškim i rastresitim stijenama bez potrebe za prethodnom dezintegracijom i rastresanjem. U zavisnosti od namjene postoje različiti užetni bageri u pogledu veličine, snage i kapaciteta. Prema navedenom kriterijumu uslova primjene razlikujemo užetne bagere za utovar i užetne bagere za direktno prebacivanje stijenskog materijala (otkrivke).

Konstrukcija bagera kašikara je sljedeća: obrtna platforma (na kojoj se nalazi kabina rukovaca, motor za okretanje, sistem prenosa, motor za vučno uže, bubanj za namotavanje užeta itd), mehanizam za kretanja (gusjenični ili na točkovima), radni organ (koga čine kašika, nosač kašike i strijela bagera). Bageri se izrađuju sa različitim kapacitetom u zavisnosti od potreba i sa širokim zapreminama kašika i to od 2 do 130 m<sup>3</sup>. Postoje bageri kašikari sa pogonskim mehanizmom na električni pogon i na dizel pogon (najčešće bageri sa zapreminom kašike od 3-4 m<sup>3</sup>). Ova grupa bagera pripada grupi ciklične mehanizacije, odnosno diskontinualna mehanizacija, služe za kopanje i utovar u transporta sredstva i najčešće rade u BK sistemu (odnosno bager-kamion sistemu).

Bageri kašikari predviđeni za direktno prebacivanje otkrivke predstavljaju velike bagere za prebacivanje u bestranspornom sistemu površinske eksploatacije. Bageri kašikari mogu da rade u bloku, frontu i usjeku, a najbolje kapacitativno iskorištenje se postiže kada radi u bloku. Radni parametri bagera kašikara prikazani su na slici 3.5.



$R_{kmax}$  - Maksimalni radijus kopanja

$R_i$  - Radijus istresanja

$R_{kmin}$  - Minimalni radijus kopanja

$R_{imax}$  - Maksimalni radijus istresanja

$R_{kh}$  - Radijus kopanja na nivou stajanja

$H_i$  - Visina istresanja

$H_k$  - Visina kopanja

$H_{imax}$  - Maksimalna visina istresanja

$H_{kmax}$  - Maksimalna visina kopanja

$R$  - Radijus okretanja zadnjeg dijela platforme

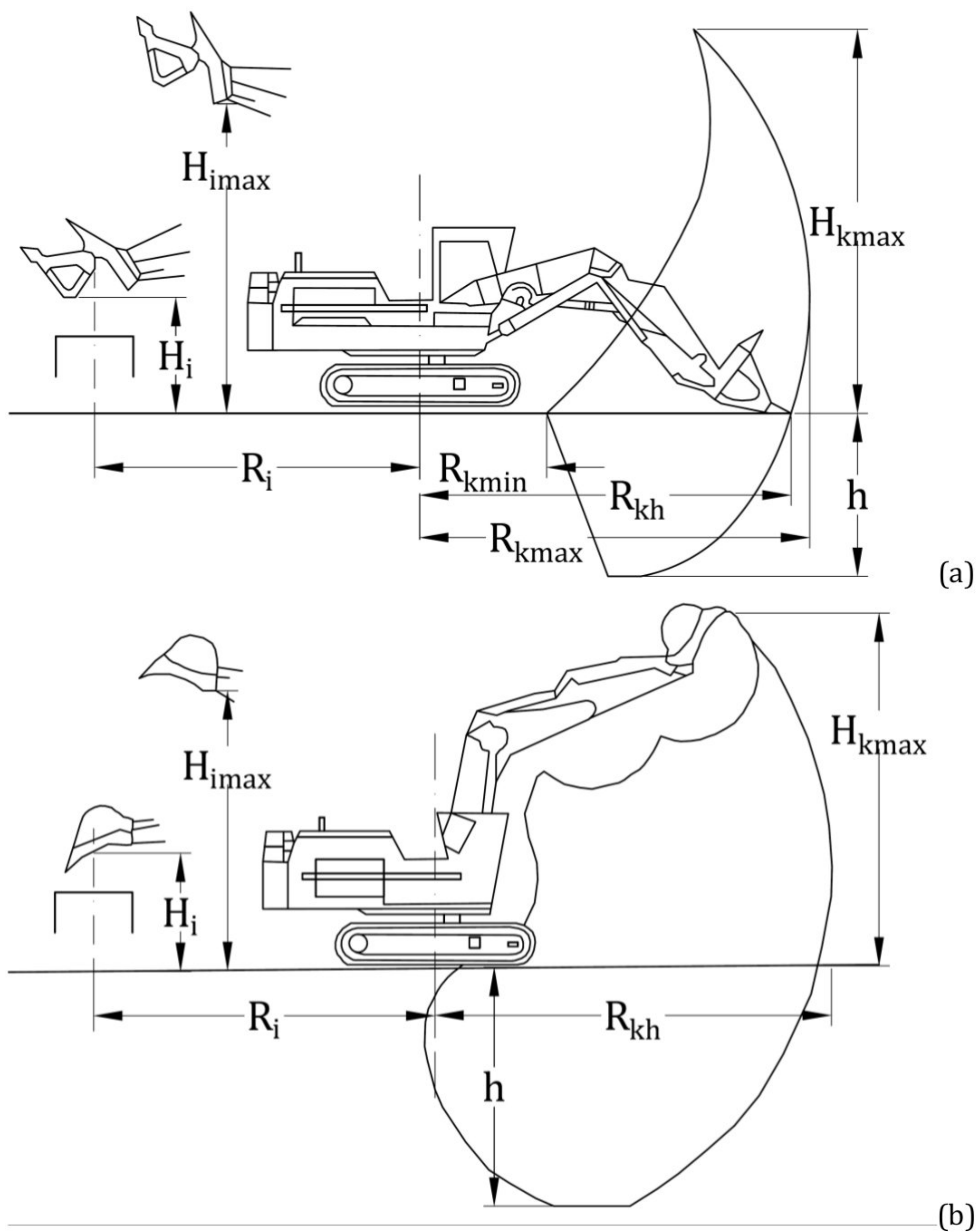
$h$  - Dubina kopanja

*Slika 3.5: Radni parametri bagera kašikara*



## Hidraulični bageri kašikari

Hidraulični bageri pripadaju grupi teške mehanizacije koja ima široku primjenu u različitim oblastima, a najveću primjenu imaju u rudarstvu i građevinarstvu. Radni parametri hidrauličnog bagera kašikara prikazani su na slici 3.6.



$R_{kh}$  - Radijus kopanja

$h$  - Dubina kopanja

$R_{k\min}$  - Minimalni radijus kopanja

$R_i$  - Radijus istresanja

$R_{k\max}$  - Radijus kopanja na nivou stajanja

$H_i$  - Visina istresanja

$R_{kh}$  - Radijus kopanja na nivou stajanja

$H_{i\max}$  - Maksimalna visina istresanja

$H_{k\max}$  - Maksimalna visina kopanja

Slika 3.6: Radni parametri hidrauličnog bagera kašikara sa visinskom (a) i obrnutom (b) kašikom



U zavisnosti od namjene i uslova primjene postoje različite veličine ovih bagera, a najveću primjenu imaju u rudarstvu i to za procese otkopavanja, utovara, selektivnog otkopavanja materijala (kao pomoćna oprema), prebacivanja materijala sa jednog mjesta na drugo. U građevinarstvu za iskopavanje temelja, kanala, utovar materijala, takođe mogu da se koriste i za rušenje objekata, jer su veoma sposobni za ovakve vidove posla.

Što se tiče konstrukcije samih bagera sastoje se od radne platforme, šasijske, transportnog mehanizma (koji mogu biti na gusjenicama ili točkovima), katarke i kašike kao radnog organa. U zavisnosti od položaja kašike, kao radnog organa, bageri se mogu koristiti za dubinski rad (sa obrnuto postavljenom kašikom) i visinski rad, tj. iznad nivele stajanja bagera. Zapremina kašike bagera se kreće u velikom rasponu i to od 2 do 30 m<sup>3</sup>.

Princip rada ovih bagera u potpunosti zavisi od hidrauličnog sistema gdje se pomoću šasijske omogućava rukovaocu bagera da pomoću sistema hidrauličnih veza upravlja bagerom, odnosno podiže i spušta kataraku i kašiku gore i dolje i na taj način obavlja procese rada.

Postoji niz prednosti ovih bagera, prije svega što postoje različite dimenzije koje mogu da se koriste u različite svrhe, mogu se transportovati kamionima sa jednog mjesta na drugo, na njih se takođe mogu postavljati različiti priključci za rad kao što su čekić, sječivo, hvataljka za podizanje i utovar, ripper i sl.

Nedostaci velikih hidrauličnih bagera su velika težina mehanizacije, tako da za njihovo kretanje treba da budu putevi dobre nosivosti, velika potrošnja goriva i to što pripadaju grupi ciklične mehanizacije tako da na sam proces otkopavanja ide samo oko 30 % vremena.

## **Dreglajni**

Bageri dreglajni predstavljaju posebnu grupu bagera koji se koriste za otkopavanje stijenskog materijala i prebacivanje u otkopani prostor, a dosta rjeđe i za utovar materijala na određena transportna sredstva. Često se nazivaju i bageri sa vučom radnog organa, zbog načina zarivanja kašike u stijenski materijal i otkopavanja na principu vuče pomoću užadi.

Ovu grupu bagera čini posebnom njihov radni organ koji se razlikuje u odnosu na bagere kašikare, tj. kašika kao organ za otkopavanja obješena je preko užadi na strijelu bagera. Specifičnosti za ovu grupu bagera su to što su dužine strijele i do 125 metara, a zapremina kašike bagera može da ide i do 140 m<sup>3</sup>. Dreglajni mogu imati gusjenični ili koračajući uređaj za kretanje.

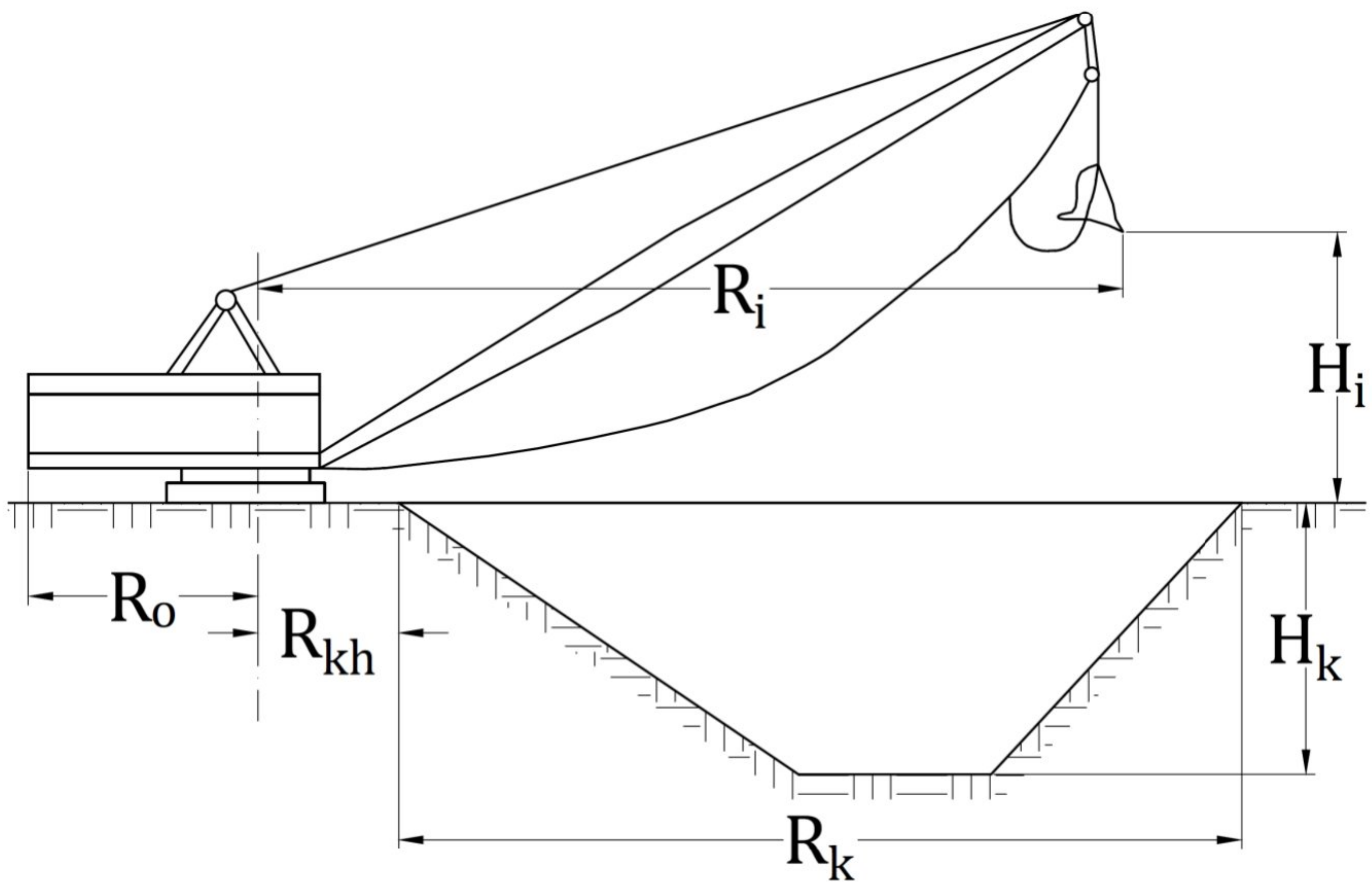
Dreglajni na gusjenicama najčešće imaju manju strijelu i manju zapreminu kašike i često se na površinskim kopovima koriste za pomoćne radove, sa ovim bagerima od 4-10 m<sup>3</sup> zapremine kašike može se vršiti utovar mekog materijala u transportna sredstva (bunkere, drobilice).

Najčešća primjena ovih bagera je za dubinski rad, odnosno otkopavanje materijala ispod nivele stajanja bagera i to za rad u bloku i usjeku.

Primjena bagera dreglajna u tehnologiji bestranspportne izrade usjeka odlikuje se niskim troškovima i efikasnim radom, posebno u složenim geološkim uslovima, čak i u zavodnjennoj sredini što je jedna od najvećih prednosti ovih bagera. Najviše se primjenjuju za skidanje otkrivke sa uglja, izgradnja puteva, luka, prebacivanje velikih količina stijenskog materijala.

Radni parametri bagera dreglajna prikazani su na slici 3.7.





$R_k$  - Radijus kopanja

$H_k$  - Dubina kopanja

$R_{kh}$  - Radijus kopanja na nivou stajanja

$H_i$  - Visina istresanja

$R_i$  - Radijus istresanja

$R$  - Radijus okretanja zadnjeg dijela platforme

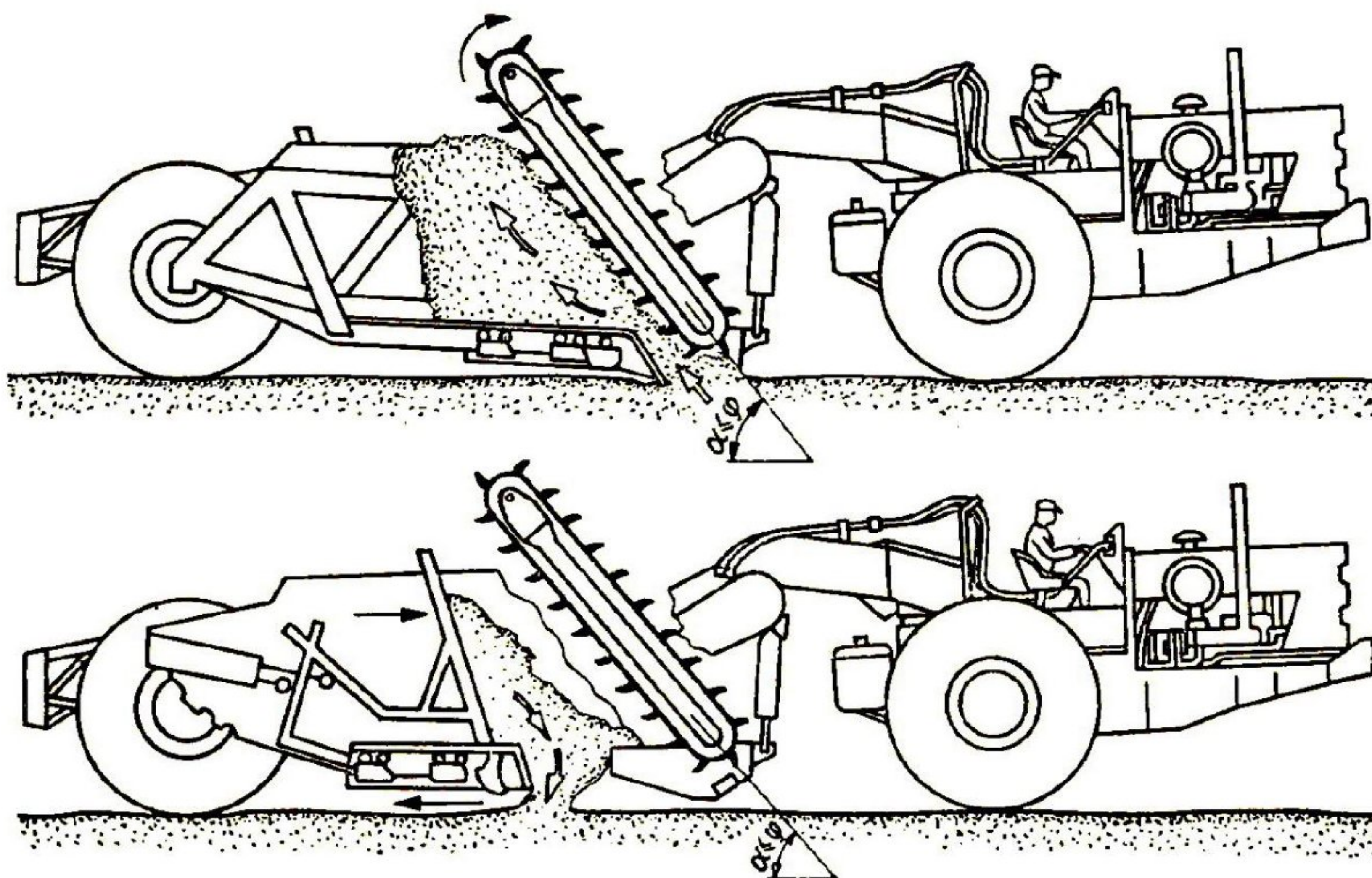
*Slika 3.7: Radni parametri bagera dreglajna*

## Skreperi

U rudarstvu, posebno površinskoj eksploataciji skreperi imaju široku primjenu i koriste se kao utovarno-transpотно-odlagališna mehanizacija. Najčešće se izrađuju skreperi na točkovima koji objedinjuju prethodno navedena tri radna procesa, a posebno u mekšim stijenskim materijalima gdje nije potrebno riperovanje pa se skreperom i počinje i završava eksploatacija.

Neke od prednosti koji odlikuju ovakav vid mehanizacije su prije svega velika mobilnost, manevarske sposobnosti, energetska nezavisnost, čine skreper veoma pogodnom mehanizacijom za primjenu na površinskim kopovima. Često se skreperi koriste i za radove na tehničkoj rekultivaciji, gdje se humusni sloj otkopava i transportuje do odlagališta. Postoje različite konstrukcije skrepera (prikolični, poluprikolični, samohodni i slično). Samohodni imaju veću zapreminu sanduka i koriste se za veća rastojanja od 5 kilometara i više. Vrlo često skreperi rade u kombinaciji sa buldozerom gdje se buldozer koristi kao gurač i opslužuje 4-5 skrepera. Šema punjenja i pražnjenja skrepera prikazana je na slici 3.8.





*Slika 3.8: Šema punjenja i pražnjenja skrepera (Pavlović, 1992)*

## Utovarivači

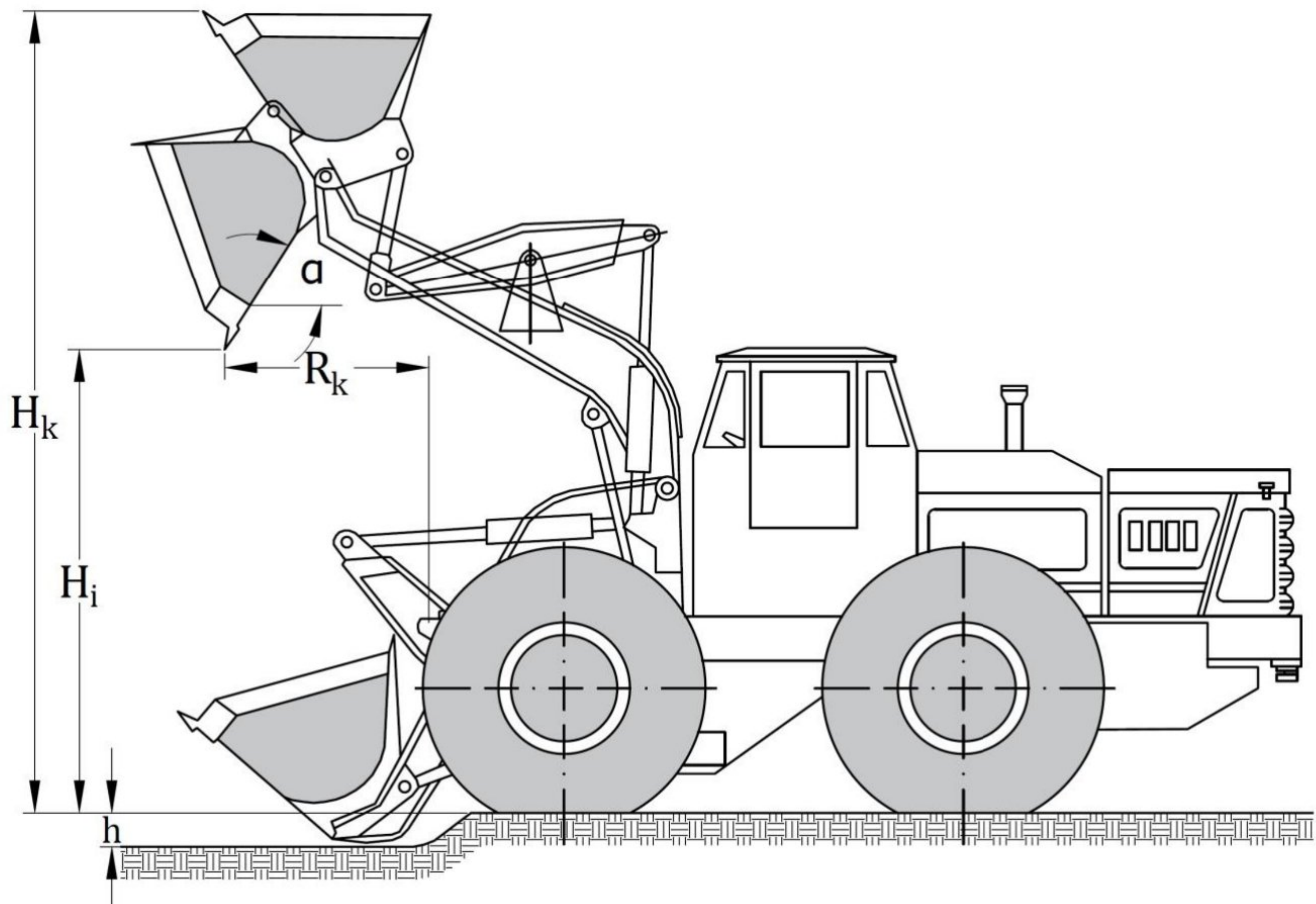
Utovarivači predstavljaju mehanizaciju koja ima veoma široku i rasprostranjenu primjenu u mnogim oblastima primjene, prije svega rudarstvu, građevinarstvu, putogradnji, planiranju i ravnanju površina i sl. U rudarstvu, posebno površinskoj eksploataciji utovarivači predstavljaju utovarno-transportnu mehanizaciju, odnosno služe za utovar najčešće prethodno odminiranog ili na drugi način dezintegriranog stijenskog materijala u kamione, bunkere, drobilice, na depoe i sl. Imaju široku primjenu pri eksploataciji svih vrsta mineralnih sirovina i to metaličnih, nemetalčnih i energetskih (ugljeva prvenstveno).

Najčešće se izrađuju utovarivači na točkovima, ali mogu i na gusjenicama koji su predviđeni za rad u mekom, blatnjavom i glinovitom materijalu. Postoje različiti tipovi i kapaciteti utovarivača sa zapreminom kašike od 2,5 do 33 m<sup>3</sup>, savremeni utovarivači odlikuju se sigurnim i jednostavnim hidrauličnim mehanizmom radnog organa. Velika primjena utovarivača na površinskim kopovima posljedica je velike prednosti utovarivača u odnosu na bagere kašikare, prije svega masa im je znatno manja, eksploatacioni troškovi do četiri puta manji u odnosu na kašikare iste zapremine kašike, njihova velika mobilnost omogućuje im primjenu i na složenim eksploatacionim uslovima.

Jedan od glavnih nedostaka utovarivača je mala sila kopanja i mala visina kopanja, služe kao osnovna mehanizacija za utovar na površinskim kopovima, a i kao transportna, do maksimalno 1000 metara transportne dužine. Tehnologija rada utovarivača je da se koristi kao otkopno-utovarna, utovarno-transportna i pomoćna mehanizacija. Zahvaljujući velikoj mobilnosti utovarivača, a posebno kada se kombinuju u cikličnom sistemu, odnosno u kombinaciji sa kamionima jedan utovarivač može da ima front radova na više etaža. Takođe se mogu primjenjivati i za selektivno otkopavanje, njihovom primjenom umjesto bagera moguće je da se svaka etaža podijeli na podetaže, a svaki blok na manje blokove (posebno značajno u pogledu gubitaka i osiromešanja rude jer se na taj način svodi na minimum). Vrlo često mogu da se koriste i za prebacivanje sa više etaže na nižu, materijala, koji se dalje transportuje gravitaciono i sl.



Radni parametri utovarivača prikazani su na slici 3.9.



$H_i$  – visina istresanja

$H_k$  - Visina kopanja

$R_k$  - Radijus kopanja

$h$  – Dubina kopanja kopanja

$\alpha$  – Ugao istresanja

*Slika 3.9: Radni parametri utovarivača*

## Buldozeri

Buldozeri su veoma važna mehanizacija na svakom površinskom kopu, jer se primjenjuje kao glavna i pomoćna mehanizacija u samom proizvodnom procesu eksploatacije. Buldozer kao otkopno-transportna mašina služi kao osnovna mehanizacija na manjim površinskim kopovima za otkrivku i eksploataciju rude.

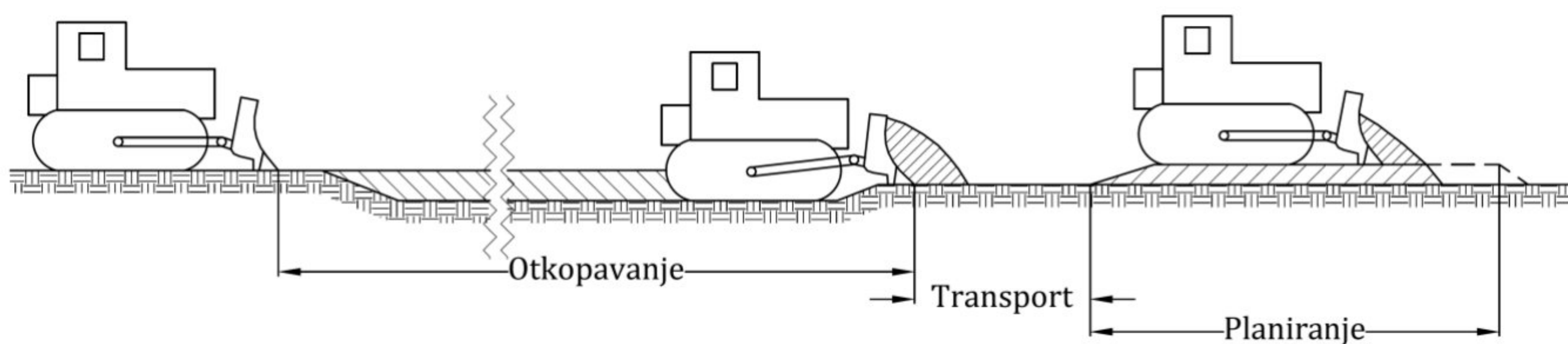
Neke od prednosti koji odlikuju ovakav vid mehanizacije su prije svega velika mobilnost, manevarske sposobnosti, energetska nezavisnost koje ih čine veoma pogodnom mehanizacijom za primjenu na površinskim kopovima.

Prema tipu mehanizma transporta razlikuju se buldozeri na gusjenicama i na točkovima (mogu biti zglobovi). Osnovni radni organ buldozera je plug (koji može biti različitog oblika u zavisnosti od namjene da li se materijal otkopava, transportuje ili planira). Podizanje i spuštanje radnog organa, odnosno pluga vrši se pomoću odgovarajućih hidrauličnih uređaja, takođe na buldozere se često postavljaju i riperi kao radni organi za prethodno usitnjavanje stijenskog materijala.

Kopanje pomoću pluga buldozera odlikuje se veoma malom dubinom (zariva se u tlo otprilike 20-50 cm). Buldozeri se odlikuju velikom vučnom silom (posebno buldozeri na gusjenicama koji se mogu koristiti u otežanim uslovima rada glinovitom i mekom tlu).



Najčešća primjena buldzera je guranje stijenskog materijala (transportom) duž cijelog fronta radova kao osnovna mehanizacija. Međutim, najčešća primjena buldozera je kao pomoćna mehanizacija i to za skidanje otkrivke, naguravanje materijala, ravnanje puteva, nivelisanje etaža posebno na odlagalištima i sl. Princip rada buldozera je prikazan na slici 3.10.



*Slika 3.10: Princip rada buldozera – kopanje, transport, planiranje*

## Kamioni

Kamioni predstavljaju transportno sredstvo u sistemu bager - kamion odnosno teretno motorno vozilo namjenjeno za prevoz materijala, robe, stvari na duže ili kraće dionice.

Kamioni kao transportno sredstvo imaju najširu primjenu u odnosu na ostala transportna sredstva u rudarstva kao i u građevinarstva, trgovine, poljoprivrede, u drumskom saobraćaju i dr.

Kamioni se uglavnom izrađuju kao točkaši i to na dizel pogon, ali postoji mogućnost i na druge pogone (elektro i trolni pogon), kao i kombinovani vid pogona.

U zavisnosti od uslova primjene i namjene kamiona kao transportnih sredstava postoje i različite klasifikacija kamiona, a neka gruba podjela po kojoj kamioni i nose naziv su sljedeći:

- Kiper je kamion koji se koristi u najčešće u građevinske svrhe, kao i rudarstvu (površinskoj i podzemnoj eksploataciji) iza kabine vozila se nalazi sanduk (korpa), kao radni organ, koji je pričvršćen na njegov zadnji dio kamiona i po potrebi se može podići (kipati) (u smjeru ose kamiona ili u smjeru okomitom na osu kamiona) kako bi se iz nje ispraznio teret. Upravo odatle i potiče njihov naziv koji dolazi od njemačke riječi "kippen", koja znači "nagnuti".
- Cisterna je kamion koji služi za prevoz tekućih materijala kao što su: naftini derivati, voda i ostalo.
- Kamion kran je kamion koji na sebi ima kran (hvataljku, ruku) i samim tim ima mogućnost utovara i istovara terena koji vozi.
- Šleper ili tegljač je takav tip kamiona koji za sobom vuče jednu ili više prikolica, a najčešće se koristi za prevoz veće količine robe i na duže relacije. Takođe, naziv ovog kamiona potiče od njemačke riječi "schleppen", što znači "vući".
- Labudica je poluprikolica koja na sebi vozi (nosi) teret, mehanizaciju ili tešku opremu koji su izvan normiranih gabarita i služe vangabaritni prevoz u pravilu one koji nisu namjenjeni za samostalno kretanje cestom.

Kamionski transport u rudarstvu ima veliku primjenu kako u površinskoj, tako i u podzemnoj eksploataciji i pri eksploataciji svih vrsta ležišta mineralnih sirovina (čvrstih, mekih, rastresitih, teških, kompaktnih). Sama konstrukcija kamiona, kao univerzalnih transportnih sredstava je takva da im omogućava primjenu u svim tehničko-eksploatacionim uslovima. Primjena kamiona u površinskoj i podzemnoj eksploataciji je cikličnom, odnosno diskontinualnom sistemu eksploatacije (bager-kamion sistem) ili pri kombinovanom transportu.



Kamioni damperi (samoistresaći) služe kao osnovno transportno sredstvo u površinskoj eksploataciji otkrivke i rude, najčešće rade u serijskom cikličnom sistemu transporta, a često mogu da se i kombinuju sa drugim transportnim sredstvima.

Primjena kamiona odlikuje se nizom prednosti, kao što su:

- velike manevarske sposobnosti zbog malog radijusa okretanja,
- mogućnost savladavanja velikih nagiba puteva (od 10,12 pa i do 15 %),
- potpuna nezavisnost od izvora energije,
- mogućnost korištenja nestacionarnih i privremenih puteva (čime je omogućena veća fleksibilnost u pogledu razvoja fronta radova, mogućnost rada na više etaža i sl.),
- manja specifična investiciona ulaganja u puteve za 1,2 do 1,5 puta u odnosu npr. na pruge,
- brža i jednostavnija izrada usjeka (samim tim skraćuje i vrijeme otvaranja),
- povećanje učinka bagera za 20-30% u odnosu na željeznički transport,
- primjena buldozerskog odlaganja otkrivke,
- kvar na jednom kamionu ne izaziva zastoje transporta i ne utiče na sistem eksploatacije,

Pored niza navedenih prednosti postoje i određeni nedostaci kamionskog transporta:

- veoma skup vid transporta,
- zavisnost efektivnosti rada i kapaciteta transporta od klimatskih prilika (kiše, snijega),
- znatni troškovi održavanja i remonta,
- angažovanje velikog broja radnika,
- složena organizacija posla,
- zagađivanje radne i životne sredine (ispuštanje štetnih gasova, stvaranje buke, podizanje prašine is l.)

Prilikom izbora tipa kamiona, njegovog kapaciteta (nosivosti) veoma je bitno poznavati njegove konstruktivne karakteristike kao što su snaga i tip motora, način pražnjenja, kapacitet, vrstu točkova i pogona i sl.

Pored navedenog veoma je bitno poznavati i uslove primjene kamiona, prije svega o kakvoj vrsti materijala se radi (čvrstom, mekom, rastresitom, abrazivnom materijalu), specifičnosti puteva kojima će se kretati vozila, dužine relacija transporta, manevarske sposobnosti i mnoge druge.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja iz prakse kamionski transport se može primjeniti u sljedećim uslovima :

- u početnoj fazi otvaranja površinskih kopova zbog mogućnosti bržeg otvaranja,
- pri selektivnom otkopavanju,
- pri kraćem vijeku eksploatacije,
- u brdovitim terenima,
- pri eksploataciji manjih ležišta koji imaju složenu konfiguraciju terena,
- za transport na kraćim i dužim dionicama puta,
- za duboke površinske kopove pri eksploataciji vrlo strmih ležišta u kombinaciji sa drugim transportnim sredstvima.

Osnovni cilj organizacije transporta je upravljanje utovarno-transportnom mehanizacijom tako da je maksimalno iskorišten kapacitet utovarno-transportne mehanizacije uz obezbjeđivanje njihovog optimalnog i nesmetanog rada.



### 3.3. OPTIMIZACIJA SISTEMA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

Optimizacija predstavlja proces pronalaženja najboljeg mogućeg rješenja za određeni problem, razmatrajući pri tome različite uticajne parametre i ograničenja u kontekstu postizanja optimalnog rješenja, odnosno cilja. Sama optimizacija i ovakav koncept rješenja ima veoma široku primjenu u različitim oblastima, prije svega matematike, ekonomije, računarstva, inženjeringa, rudarstva i mnoga druga područja.

"Optimizacija" je proces u kojem se nešto čini što je moguće efikasnije, savršenije ili korisnije (Whittle, D., 2005). Ovaj termin se može koristiti u opštem smislu da označi proces kroz koji se ishod "optimizuje" putem prilagođavanja ulaza, struktura ili metoda ili uopšte "optimizacija" je proces "unapređivanja nečega" (Whittle, D., 2005).

Optimizovati neki proces ili sistem znači pronaći najbolje rješenje kroz postavljanje ciljeva, struktuiranje problema (uticajnih faktora i razmatranih varijantnih rješenja) i primjenu različitih metoda optimizacije (analitičke metode, metodu gradijenta, višekriterijumske metode i sl.)

U zavisnosti od vrste problema riječ optimalno predstavlja najbolje rješenje bilo najveće ili najmanje dobijene vrijednosti. Problem pronalaženja optimalnog rješenja srećemo svakodnevno u svim sferama života, kao npr. u porodici kako isplanirati dan, kako isplanirati budžet, u firmi tehnički i ekonomski problemi (plan proizvodnje, izbor računarske opreme), u rudarstvu izbor optimalnog sistema eksploatacije površinskog kopa i sl.

Teorija optimizacije se bavi razvojem modela za neku metodu optimizacije pomoću kojeg se nalazi rješenje koje u najvećoj mjeri zadovoljava unaprijed postavljene kriterijume za izbor optimalnog rješenja.

Jedan od najvažnijih koraka prilikom optimizacije je pravilno postaviti uticajne kriterijume, odnosno sve promjenjive u tom modelu, kao i njihove međuzavisnosti i korelacije odnosno da se ispravno postavi funkcija cilja za postizanje najboljeg rješenja.

Pri čemu su sve promjenjive koje treba odrediti u nekom modelu obično uslovljene međusobnim relacijama i ograničenjima ili zajedničkim nazivom skup ograničenja.

Značajnu klasu zadataka optimizacije čine problemi optimalnog upravljanja sistemima. Ovi zadaci uključuju određivanje upravljanja kao funkcije vremena, gdje je cilj prevesti posmatrani sistem iz početnog u željeno stanje tokom određenog vremenskog intervala. Ključni aspekt ovih zadataka je postizanje ekstremne vrijednosti odabranog kriterijuma, što čini rješenje optimalnim.

Upravljanje se odnosi na manipulaciju ulazima ili parametrima sistema kako bi se postiglo željeno ponašanje. U kontekstu optimalnog upravljanja, zadaci traže takve upravljačke funkcije koje će optimizovati odabrani kriterijum. Ovaj kriterijum može biti usmjeren na postizanje maksimalne ili minimalne vrijednosti u toku određenog procesa.

Bitno je napomenuti da rješenja ovih problema optimalnog upravljanja ne predstavljaju pojedinačne brojeve, već funkcije vremena. Cilj je pronaći funkciju upravljanja koja će obezbjediti ekstremnu vrijednost kriterijumske funkcije, uzimajući u obzir sve relevantne ograničavajuće faktore problema.



Optimalno rješenje između svih mogućih rješenja koja zadovoljavaju ograničenja problema je ono koje maksimizira ili minimizira vrijednost višekriterijumske funkcije, u zavisnosti od postavljenih ciljeva.

Optimalno rješenje ne mora uvijek biti jedinstveno, odnosno može postojati više rješenja koja daju rezultat sa istom optimalnom (najvećom, najmanjom) vrijednošću kriterijuma. Da bismo razumjeli kada je rješenje optimalno, korisno je i neophodno identifikovati uslove koje rješenje mora zadovoljiti, dok druga prihvatljiva rješenja mogu, ali ne moraju zadovoljiti te postavljene uslove. Upravo takvi postavljeni uslovi predstavljeni su kao potrebni uslovi za optimalnost.

Dovoljan uslov za optimalnost je onaj čije zadovoljenje garantuje da je posmatrano rješenje optimalno. Međutim, ako posmatrano rješenje ne zadovoljava dovoljni uslov za optimalnost, to ne znači nužno da rješenje mora biti neoptimalno.

### **3.3.1. INTEGRALNI MODEL OPTIMIZACIJE**

Integralni model optimizacije tehnoloških procesa površinske eksploatacije se sastoji od:

- definisanje optimalne konture površinskog kopa,
- definisanje optimalnog sistema eksploatacije
- definisanje faza razvoja površinskog kopa,
- definisanje dinamike eksploatacije i
- definisanje optimalnog graničnog sadržaja odnosno kvaliteta mineralne sirovine.

Integralni pristup optimizaciji podrazumjeva holistički ili sveobuhvatan pristup rješavanju problema optimizacije. Umjesto da se fokusira samo na pojedinačne dijelove problema ili optimizuje svaki dio nezavisno, integralni pristup sagledava problem u cjelini i traži optimalno rješenje koje uzima u obzir sve relevantne faktore, ograničenja i interakcije među njima.

Ovakav pristup može uključivati kombinovanje različitih metoda, tehnika i alata kako bi se postiglo najbolje moguće rješenje. Integralni pristup optimizaciji često se koristi u složenim problemima kao što su izbor optimalnih rješenja pri eksploataciji ili optimizacija proizvodnih procesa.

Integralni model obično kombinuje različite tehnike i algoritme kako bi se sagledao problem u cjelini i pronašlo optimalno rješenje koje zadovoljava zadate ciljeve i ograničenja. Integralni modeli optimizacije često se koriste u složenim sistemima i procesima, kao što su logistika, proizvodnja, transport, planiranje resursa i druge oblasti gdje postoji potreba za efikasnim donošenjem odluka na osnovu različitih faktora. Ovi modeli mogu biti vrlo kompleksni i zahtijevaju napredne matematičke metode i računarske algoritme kako bi se implementirali i rešili. Međutim, kada se pravilno primjene, integralni modeli optimizacije mogu doprinjeti poboljšanju efikasnosti, produktivnosti i profitabilnosti sistema ili procesa.

Integralni model optimizacije proizvodnje na površinskom kopovima obuhvata više kriterijuma različite prirode odnosno:

- geološki kriterijumi.
- tehnološki kriterijumi,
- ekonomski kriterijumi,
- ekološki kriterijumi,
- zakonodavni kriterijumi.



**Geološki kriterijumi** su ključni u rudarstvu jer omogućavaju procjenu i identifikaciju mineralnih resursa u zemljištu. Evo nekoliko osnovnih geoloških kriterijuma koji su važni u rudarstvu:

- Karakteristike ležišta. U karakteristike ležišta spadaju tip ležišta, veličina, oblik, dubina, kontinuitet, mineralni sastav, kvalitet mineralne sirovine, koncentracija i raspodjela mineralizacije. Ove karakteristike pomažu u određivanju ekonomske isplativosti eksploatacije.
- Geološka struktura. Geološka struktura obuhvata litologiju ležišta, nastanak stijena i tektonika. Razumjevanje geološke strukture pomaže u identifikaciji položaja mineralne sirovine.
- Geohemijske karakteristike. Geohemijske karakteristike uključuju analizu hemijskog sastava ležišta radi procjene prisustva i raspodjele određenih elemenata i minerala.
- Geotehničke karakteristike. Geotehničke karakteristike obuhvataju stabilnost stijena ležišta i okolnih stijena i druge faktore koji mogu uticati na stabilnost i izvodljivost eksploatacije.
- Geografski faktori. Geografski faktori uključuje topografiju, klimu, hidrologiju i druge geografske faktore koji mogu uticati na eksploataciju i ekonomsku isplativost rudarstva na određenoj lokaciji.

Navedeni geološki kriterijumi su od suštinskog značaja za planiranje i izvođenje rudarskih operacija kako bi se osiguralo efikasno iskorišćenje mineralnih sirovine uz minimalne troškove i rizike.

**Tehnološki kriterijumi** u rudarstvu se odnose na specifične standarde, karakteristike ili zahtjeve koji se primjenjuju na opremu, procese i procedure kako bi se osigurala efikasna i bezbjedna eksploatacija rudnih resursa. Ovi kriterijumi igraju ključnu ulogu u projektovanju, planiranju i implementaciji rudarskih operacija. Evo nekoliko primjera tehnoloških kriterijuma u rudarstvu:

- Efikasnost opreme. Tehnološki kriterijumi mogu uključivati performanse opreme za rudarstvo, kao što su brzina bušenja, kapacitet utovara, pouzdanost i održivost.
- Bezbjednost. Bezbjednost je od suštinskog značaja u rudarstvu, pa se tehnološki kriterijumi odnose na sigurnosne standarde opreme i procedura, kao i na mjere zaštite od opasnosti kao što su gasovi, prašina, klizišta i druge nepogode.
- Ekološka održivost. Rudarske operacije moraju da se usklade sa ekološkim standardima i propisima. Tehnološki kriterijumi obuhvataju mere za smanjenje uticaja rudarskih aktivnosti na životnu sredinu, kao što su upravljanje otpadom, rekultivacija zemljišta i zaštita voda.
- Produktivnost. Tehnološki kriterijumi uključuju i faktore koji utiču na produktivnost rudarskih operacija, kao što su optimizacija procesa, smanjenje zastoja, efikasno upravljanje radnom snagom i pravovremeno održavanje opreme.
- Tehnološka inovacija. Rudarstvo je podložno tehnološkim inovacijama koje mogu poboljšati efikasnost, bezbjednost i održivost operacija. Tehnološki kriterijumi podstiču primjenu inovativnih tehnologija i praksi u rudarstvu.

Ovo su samo neki od ključnih tehnoloških kriterijuma koji se primjenjuju u rudarstvu kako bi se obezbjedila uspješna i odgovorna eksploatacija rudnih resursa.

**Ekonomski kriterijumi** u rudarstvu obuhvataju različite faktore i metrike koji se koriste za procjenu finansijske isplativosti, profitabilnosti i održivosti rudarskih projekata. Ovi kriterijumi



su ključni za donošenje odluka o ulaganju, planiranje proizvodnje i upravljanje rudarskim operacijama. Evo nekoliko važnih ekonomskih kriterijuma u rudarstvu:

- Troškovi proizvodnje. Troškovi proizvodnje uključuju sve direktne i indirektne troškove koji su potrebni za eksploataciju rudnih resursa, uključujući troškove opreme, rada, održavanja, energije i upravljanja.
- Cijena proizvoda: Cijena koja se može postići za rudni proizvod ima veliki uticaj na ekonomsku isplativost rudarskog projekta. Rudarske kompanije moraju pažljivo procjeniti trenutne i buduće cijene na tržištu kako bi donosile odluke o investicijama.
- Profitabilnost. Profitabilnost se ocjenjuje kroz različite finansijske pokazatelje kao što su neto prihod, neto dobit i bruto marža. Rudarski projekti treba da ostvare dovoljan profit kako bi bili održivi i privukli investitore.
- Očekivani povrat ulaganja: Očekivani povrat ulaganja je ključni ekonomski pokazatelj koji mjeri efikasnost investicije u rudarskom projektu. Rudarske kompanije procjenjuju očekivani povrat ulaganja kako bi procjenile rizike i potencijalnu isplativost projekta.
- Troškovi kapitala. Troškovi kapitala predstavljaju kamate i druge troškove finansiranja koji se odnose na finansijske resurse potrebne za pokretanje i održavanje rudarskih operacija. Niži troškovi kapitala mogu poboljšati profitabilnost projekta.
- Održivost. Održivi razvoj je sve važnija tema u rudarstvu, pa ekonomski kriterijumi takođe uzimaju u obzir ekološke i društvene faktore. Rudarske kompanije sve više obraćaju pažnju na principe održivosti u svojim operacijama radi dugoročne profitabilnosti i društvene odgovornosti.

Gore pomenuti ekonomski kriterijumi igraju ključnu ulogu u planiranju i upravljanju rudarskim projektima, pomažući kompanijama da donose informisane odluke i ostvare uspješne rezultate.

**Ekološki kriterijumi** u rudarstvu su ključni za očuvanje prirodnog okruženja i minimiziranje negativnih uticaja rudarskih aktivnosti na ekosisteme, vodu, vazduh i zemljište. Ovi kriterijumi se primjenjuju kako bi se osiguralo da rudarske operacije budu održive i da se poštuju zakonski propisi i standardi za zaštitu životne sredine. Evo nekoliko važnih ekoloških kriterijuma u rudarstvu:

- Zaštita vode. Rudarske operacije mogu značajno uticati na kvalitet vode putem ispuštanja otpadnih voda, otpadnih materijala i hemikalija. Ekološki kriterijumi uključuju mjere za spriječavanje kontaminacije vodenih tokova i podzemnih voda, kao i tretman i reciklažu otpadnih voda.
- Rekultivacija i obnova zemljišta. Nakon završetka eksploatacije, rudarska područja treba rekultivisati i obnoviti kako bi se povratila biološka raznovrsnost, obnovila plodnost zemljišta i minimizirali negativni ekološki efekti. To može uključivati sadnju drveća, revitalizaciju vegetacije i obnovu prirodnih staništa.
- Kontrola emisija u vazduh. Rudarske operacije mogu proizvesti emisije prašine, gasova i drugih zagađivača koji mogu imati štetne efekte na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Ekološki kriterijumi obuhvataju primjenu mjera za kontrolu emisija, kao što su upotreba filtera, prečišćavanje vazduha i monitoring kvaliteta vazduha.
- Zaštita biodiverziteta. Rudarske operacije mogu narušiti prirodna staništa i ugroziti biodiverzitet, posebno ako se vrše u ekološki osjetljivim područjima. Ekološki kriterijumi u rudarstvu uključuju procjenu uticaja na biodiverzitet, identifikaciju ugroženih vrsta i primjenu mjera za zaštitu i očuvanje prirodne flore i faune.
- Održivost resursa. Rudarske kompanije treba da upravljaju rudnim resursima na održiv način kako bi se spriječila prekomjerna eksploatacija i iscrpljivanje prirodnih resursa. Ekološki kriterijumi podstiču efikasnu upotrebu resursa, reciklažu materijala i smanjenje otpada.



- Monitoring i izvještavanje. Kontinuirano praćenje uticaja rudarskih operacija na životnu sredinu i redovno izvještavanje o rezultatima monitoringa su ključni za osiguranje usklađenosti sa ekološkim propisima i identifikaciju potencijalnih problema. Ekološki kriterijumi obuhvataju uspostavljanje sistema monitoringa i transparentno izvještavanje o uticaju rudarskih aktivnosti.

Navedeni ekološki kriterijumi su važni za održavanje ravnoteže između rudarskih aktivnosti i zaštite životne sredine, omogućavajući rudarskim kompanijama da ostvare uspjeh uz minimalne negativne efekte na ekosisteme i lokalne zajednice.

**Zakonodavni kriterijumi** u rudarstvu obuhvataju širok spektar propisa i regulativa koje su usmjerene na regulisanje rudarskih aktivnosti u cilju zaštite životne sredine, zdravlja i bezbjednosti radnika, očuvanja resursa, prava lokalnih zajednica i ostalih relevantnih aspekata. Ovi zakoni mogu varirati od zemlje do zemlje, ali obično obuhvataju sledeće:

- Regulisanje rudarskih aktivnosti. Zakoni o rudarstvu definišu procedure i uslove za dobijanje dozvola za istraživanje, eksploataciju i upravljanje rudarskim resursima.
- Zaštita životne sredine. Propisi koji se odnose na rudarstvo često sadrže odredbe o zaštiti voda, vazduha, zemljišta i biodiverziteta od negativnih uticaja rudarskih aktivnosti.
- Bezbednost i zdravlje na radu. Zakoni o rudarstvu definišu standarde i procedure za obezbeđivanje bezbednih uslova rada u rudnicima, uključujući mjere za sprečavanje nesreća i profesionalnih oboljenja.
- Prava lokalnih zajednica. Propisi mogu uključivati zahtjeve za konsultacije sa lokalnim zajednicama i obeštećenje za eventualne negativne uticaje rudarskih aktivnosti na njihove živote i okolinu.
- Restriktivne mere. Zakoni mogu uključivati ograničenja ili zabrane za eksploataciju određenih rudarskih resursa u zaštićenim područjima ili u cilju očuvanja specifičnih ekosistema.
- Poreska regulativa. Propisi mogu obuhvatiti i poreske mjere i takse koje se odnose na rudarske kompanije, kao i na prihode koje one ostvaruju od eksploatacije resursa.

Ovi zakonodavni kriterijumi imaju za cilj da balansiraju interese rudarske industrije sa zahtjevima zaštite životne sredine, ljudskih prava i održivog razvoja. Njihova primjena i sprovođenje su od vitalnog značaja za integritet rudarskih operacija i dobrobit zajednica koje su njima pogođene.

### 3.3.2. OPTIMIZACIJA POVRŠINSKIH KOPOVA

Prilikom optimizacije površinskih kopova, sama optimizacija uključuje istovremeno odlučivanje uključujući dinamičku optimizaciju kroz vrijeme i prostor, pri tome uzimajući sve uticajne faktore prije svega prirodne karakteristike rudnog tijela, oblika, veličine, zalijeganje.

Optimizacija procesa površinskih kopova uključuje dinamičko djelovanje u prostoru i vremenu među više faktora, kao što su vijek eksploatacije, kapacitet, dinamika otkopavanja i sl. što još više otežava samu optimizaciju. Još kad se uzme u obzir vrijeme kao faktor, koje predstavlja dugotrajni faktor. Ova optimizacija se vrši kako bi se poboljšala sposobnost i efikasnost računanja bez zanemarivanja optimalnog kapaciteta proizvodnje. Istovremeno, uzimajući maksimalnu neto sadašnju vrijednost kao ciljnu funkciju kako bi se kontrolisao rast i nagla fluktuacija kapaciteta proizvodnje.



Cilj optimizacije uopšte rudarskog procesa je maksimizacija ekonomske vrijednosti cijelokupnog rudarskog projekta. Da bi se maksimizirala ekonomska vrijednost, potrebno je istovremeno optimizovati redosljed produbljavanja i širenja rudnika, kao i lokacije deponovanja i odlaganja materijala u različite procesne tokove.

Jedan od ciljeva optimizacije površinskih kopova prilikom projektovanja rudnika je određivanje površine koju će obuhvatiti taj rudnik, koja sa ekonomskog aspekta predstavlja najprofitabilnije površine i ta površina služi kao osnova za dalje projektovanje svih elemenata površinskog kopa.

Od 1960-ih godina datiraju optimizacija, optimizacija i simulacija, a posebnu primjenu imaju pri planiranju i razvoju rudnika, kratkoročnom i dugoročnom planiranju proizvodnje, izboru opreme i sl. kako u površinskoj tako i u podzemnoj eksploataciji.

Optimizacija rudnika predstavlja jedan od ključnih problema za efikasne, efektivne i profitabilne rudarske procese. U upotrebi je termin otvorena optimizacija površinskih kopova, pri čemu taj proces obuhvata sistematsko ispitivanje i poboljšanje razvoja, planiranja i širenja površinskog kopa, s ciljem maksimizacije proizvodnje, minimiziranja troškova i smanjenja rizika. Ključni elementi otvorene optimizacije rudnika su:

- Proračun rezervi mineralnih sirovina. Proces obuhvata određivanje količine i kvaliteta rude u ležištu, kao i procjenu vrijednosti minerala. Ove informacije se koriste za određivanje izvodljivosti rudnika i donošenje informisanih odluka o načinu eksploatacije, planiranju i tehnološkim i radnima procesima buduće eksploatacije, kao i pripreme i prerade.
- Geologija. Razumjevanje geologije ležišta mineralnih sirovina je ključno za otvorenu optimizaciju rudnika. Geologija predstavlja osnov za sve, prije svega o kakvom ležištu se radi, vrsti mineralne sirovine, uslovima radne sredine, lokaciji infrastrukture i metode koje se koriste za eksploataciju i preradu minerala. Podaci o geologiji se koriste za identifikaciju potencijalnih opasnosti i razvoj strategija za smanjenje rizika.
- Geotehnička analiza. Geotehnička analiza obuhvata proučavanje fizičkih i mehaničkih osobina rude, stijenske mase, okolnih stijana, kao i zemljišta, i kako oni mogu uticati na stabilnost prilikom eksploatacije, bezbjednost radnika i efikasnost rudarskih operacija.
- Projektovanje rudnika. Uzima u obzir sve prethodno navedeno od geoloških i geotehničkih osobina, kao i sa ekonomskom i operativnog pogleda ograničenja pri planiranju. Pored navedenog takođe mora razmotriti logistiku eksploatacije, prerade mineralne sirovine i uslova infrastrukture.
- Planiranje. Planiranje je proces određivanja redoslijeda i elemenata rudarskih operacija u površinskoj eksploataciji. Planiranje mora uzeti u obzir geologiju, geotehničke osobine, projektovanje rudnika, kao i ekonomska i operativna ograničenja rudnika. Cilj planiranja je optimizacija proizvodnje i minimiziranje troškova.
- Optimizacija. Optimizacija je proces poboljšanja razvoja, planiranja i eksploatacije rudnika sa površinskom eksploatacijom. Optimizacija predstavlja jedan kontinualan proces koji uključuje redovne preglede i monitoring procesa. Cilj optimizacije je poboljšanje efikasnosti i profitabilnosti rudnika.

Otvorena optimizacija rudnika je složen proces koji zahtjeva sveobuhvatno razumjevanje ležišta, rudarskih metoda otkopavanja, sistema eksploatacija, svih uticajnih faktora kao i ekonomskih i operativnih ograničenja pri eksploataciji. Proces obuhvata integraciju geologije, geotehničke analize, razvoj rudnika, planiranja i optimizacije kako bi se postigao najbolji mogući rezultat za konkretan primjer rudnika. Implementacijom uticajnih parametara u



otvorenoj optimizaciji, rudarske kompanije mogu maksimizirati proizvodnju, minimizirati troškove i smanjiti rizik, što dovodi do efikasnijih i profitabilnijih rudarskih procesa.

Ako istraživači smatraju da je moguća primjena površinske eksploatacije na nekom primjeru ležišta, moraju odrediti način eksploatacije, razvoj i plan operacija pri otkopavanju. Pri čemu se to planiranje zasniva prvo na preliminarnoj analizi koja se sastoji od (1) modela ležišta rude u kojem se ležište diskretizuje u mrežu blokova, pri čemu svaki blok predstavlja zapreminu materijala i odgovarajuće mineralne osobine; (2) vrijednost svakog bloka, koja se određuje poređenjem tržišnih cijena rude sa troškovima, i (3) geometrijskog modela ležišta.

Nakon rješavanja problema projektovanja površinskog kopa, planiranje proizvodnje koristi diskretizovani model ležišta mineralnih sirovina, tj. model bloka. Osnovna pretpostavka ovakvog pristupa je da se može odrediti politika granice, tj. optimalne granice i konture površinskog kopa kako bi se maksimizovala neto sadašnja vrijednost uz poštovanje svih kriterijuma, naročito projektovanog kapaciteta.

Projektovanje i planiranje površinskog kopa je proces donošenja odluka, a koji vodi ka realnom planu za profitabilno iskorištavanje mineralnih sirovina, pri čemu planiranje može uzeti u obzir širok spektar vremenskih okvira u razmatranje, od veoma kratkih rokova npr. smjenskih do vremena od par godina ili cijelog vijeka eksploatacije. Ovo se prije svega odnosi na dugoročnu perspektivu i stvaranje dugovoročne vrijednosti sa ciljem maksimizacije vrijednosti, što prije svega uključuje sve aspekte rudnika da su dobro urađeni od proračuna rezervi, izbora metode otkopavanja, sistema eksploatacije, elemenata površinskog kopa i sl. Takođe vrlo je bitno o kakvoj vrsti mineralne sirovine se radi, koje su količine rude, koji su troškovi, kakvi su planovi, kako se ponaša površinski kop pod uticajem seizmičkih uticaja i drugih vremenskih prilika, dugoročni planovi za 30 godina i sl.

Iz gore navedenog se vidi da bi se sve ispravno isplaniralo neophodno je da u ovoj oblasti, tim za planiranje mora dobro poznavati tematiku iz matematike i inženjeringa, prati berzu i tržište i potkovan je znanjem iz ekonomije, kao i da poznaje uticaj na životinu sredinu, rizike i neizvjesnosti.

J.-C. Picard i B. T. Smith (Picard i Smith 2004) su opisali problem projektovanja površinskog kopa kao problem izbora konačne konture čiji je ukupni profit, odnosno zbir profita svih blokova u konturi, maksimalan među svim mogućim konturama.

H. Lerchs i I. F. Grossmann (Lerchs i Grossmann, 1965) su napravili prvi pokušaj rješavanja ovog problema gdje su napomenuli da maksimalna profitna kontura površinskog kopa odgovara maksimalnom zatvaranju u grafu.

### **3.3.3. OPTIMIZACIJA SISTEMA BAGER - KAMION**

U toku pokretanja proizvodnje na površinskim kopovima, optimizacija cjelokupnog sistema može definisati projekat kao isplativ ili neisplativ. Iz ovog razloga neophodno je izvršiti optimizaciju svake tehnološke faze i to pri definisanju završne konture površinskog kopa (Farkaš i Hrastov, 2021), metoda eksploatacije (Ooriad i ostali, 2018; Bajić i ostali, 2020), sistema transporta na površinskim kopovima (Bazzazi i ostali, 2011; Bascetin i Kesimal, 1999; Bascetin, 2004), transportne mehanizacije (Komljenovic i Kecojevic, 2009; Bazzazi i ostali, 2009), bušačko-minerskih parametara (Urošević i ostali, 2021) itd.

Otkopavanje materijala na površinskim kopovima može se vršiti kontinualnom i diskontinualnom opremom, kao i njihovom kombinacijom. Koja od navedenih metoda će biti korištena zavisi od velikog broja faktora (Namin i ostali, 2023). Kada su u pitanju diskontinualni



sistemi otkopavanja njih najčešće čine bager kašikar i određen broj kamiona koji transportuju materijal (Zhang i ostali, 2022). Zbog visokih kapaciteta, izvanredne fleksibilnosti, a pri relativno niskim operativnim i kapitalnim troškovima, bageri i kamioni kao sistem su najrasprostranjenija metoda utovara i transporta materijala na površinskim kopovima (Dindarloo i ostali). Veliku pažnju privlače faktori koji utiču na performanse rada bagera (Wulandari i ostali, 2021), naročito na vrijeme ciklusa bagerske kašike (Dey i ostali, 2022; Manyele, 2017). Najčešće su korišćeni električni užetni bageri kašikari (Guo i ostali, 2023) zbog svoje kompaktnosti i velikog opsega kapaciteta i visine otkopne etaže. Kao otkopna mašina se često koristi i dreglajn (Seervi i ostali, 2023; Zhang i ostali, 2023), a njegova primjena je naročito uočljiva na površinskim kopovima uglja (Zhou i ostali, 2007; Mei, 2011). Glavna osobina dreglajna je da može da radi samostalno (sa prebacivanjem materijala) ili u kombinaciji sa damperima kao transportnim sredstvom.

Jedan od većih problema prilikom optimizacije sistema u rudarstvu je nemogućnost uzimanje u razmatranje i kriterijuma koji se ne mogu izraziti numerički, u određenim mjernim jedinicama, odnosno mogu se izraziti lingvističkim varijablama ali i utvrditi međusobni uticaj. Da bi se integralno uzeli u razmatranje kriterijumi koji se mogu izraziti numerički i kriterijumi koji se ne mogu izraziti numerički, kao najpogodnija mogućnost, mogu se upotrijebiti metode višekriterijumskog odlučivanja u kombinaciji sa fazi logikom.

Konstantan problem koji je prisutan u rudarskoj praksi je optimizacija sistema bager - kamion, koja podrazumjeva pravilan odabir bagera i kamiona za postojeće uslove (Bazzazi i ostali, 2011; Mohtasham i ostali, 2021). Optimizacija može značiti da se za date uslove rada biraju i bager i kamioni, zatim da se za konkretan bager biraju kamioni i broj kamiona u floti ili da se za više bagera i više tipova kamiona pravi optimalna organizacija rada (Krzyzanowska, 2007). Prilikom izbora kamiona potrebno je usvojiti broj kašika kojim bager puni kamion. Prema istraživanjima optimalan broj iznosi od 3-6 bagreskih kašika (Kirmanli i Ercelebi, 2009). Odnos kapaciteta bagera i kamiona se definiše kao stepen usaglašenosti (match factor) (Krzyzanowska, 2007) koji treba da bude u odgovarajućem opsegu.

Posebno mjesto u optimizaciji bager - kamion sistema zauzima izbor kamiona za transport u funkciji optimizacije rada sistema. Optimizacija odabira kamiona bi mogla da se podjeli na nekoliko faza, od kojih bi prva bila izbor modela kamiona za određene uslove rada (Bodziony i ostali, 2016; Rakhmangulov i ostali, 2024). Izbor veličine kamiona direktno utiče na širinu puteva i u manjoj mjeri na njihovu dužinu zbog različitih minimalnih radijusa okretanja. Nakon toga bi slijedio odabir broja kamiona (Mohtasham i ostali, 2022), i njihova preraspodjela (Mohtasham i ostali, 2021), kao i definisanje optimalne rute kretanja kamiona od utovara do istovarnog mjesta (Choi i ostali, 2009; Choi i ostali, 2015). Transportni sistemi se mogu porediti i prema potrošnji, pa se i način na koji smanjiti potrošnju energije može uključiti u definisanje opreme (Rahimdel i Bagherpour, 2018).

Primarni cilj optimizacije kod izbora opreme je postizanje zahtjevanog kapaciteta što omogućava oprema određenih karakteristika i gabarita. Pored toga ciljevi su još i sigurnost pri radu, zaštita životne sredine i ekonomska isplativost (Dindarloo i ostali, 2015). Ukupni troškovi su jedan od bitnih parametara pri izboru opreme, ako se uzme u obzir da operativni troškovi utovarno-transportnih sistema čine 60% ukupnih troškova na površinskom kopu (Ercelebi i Bascetin, 2009). Ukoliko se isti kapacitet proizvodnje može ostvariti primjenom različitih tipova utovarno transportnih sistema, optimizacija se svodi na minimiziranje troškova.

Izbor utovarno transportne mehanizacije se uglavnom svodio na iskustvene metode, naročito ako na površinskom kopu već postoje neki modeli bagera i kamiona koji su u radu. Međutim, sa



razvojem raznovrsnije opreme, potrebno je usavršiti i metode izbora mehanizacije (Xu i ostali, 2023).

### **3.4. PREGLED METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA**

U ovom poglavlju je data osnovna klasifikacija metoda višekriterijumskog odlučivanja, opisane faze višekriterijumskog odlučivanja kao i opisan razvoj najrelevantnijih metoda višekriterijumskog odlučivanja.

#### **3.4.1. KLASIFIKACIJA METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA**

Metoda višekriterijumskog odlučivanja mogu se klasifikovati u dvije kategorije (Hwang i Yoon, 1981).

##### **Metoda donošenja odluka sa više atributa (MADM)**

MADM se uglavnom primjenjuje za probleme izbora i uvijek je povezan sa ograničenim brojem alternativa i rangiranja preferencija (tj. prostor odluke je diskretan).

Konačan broj predloženih alternativa se procjenjuju u odnosu na različite težinske attribute i rangiranje preferencija je dobijeni koji opisuje učinke svake alternative u cilju u pregleda atributa.

##### **Višeciljno odlučivanje (MODM)**

MODM se generalno koristi za projektovanje ili planiranje, gdje je broj alternativa beskonačan (tj prostor odlučivanja je kontinualan). Cilj MODM-a je izbor optimalne alternative uzimajući u obzir razne interakcije u okviru datih ograničenja. Postizanjem zadovoljavajućih nivoa nekoliko ciljeva, dobija se najbolja alternativa.

U pogledu vrste podataka i informacija koje metoda koristi, Kahraman (Kahraman, 2008) je klasifikovao MCDM kao što:

- Precizne MCDM metode koje se koriste kada su sve relevantne informacije i podaci u potpunosti dostupni i oni su precizni, pa donosilac odluka ima dovoljno znanja o okolnostima odluke.
- Fazi MCDM (FMCDM) koje se koriste kada neke ili sve informacije i podaci nisu jasno definisani. Ovo može biti zbog toga što se ne mogu definisati, nepotpune ili nedostižne informacije, ili zbog nepoznavanja (Chen i ostali, 1992).

### **3.5. OPŠTE FAZE METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA**

Generalno, proces donošenja odluka za rješavanje problema MCDM uključuje tri faze (Dodgson i ostali, 2009; Keeney, 1982; Roy, 1996; Tsoukis, 2007), i to:

1. Izrada strukture problema. Ova faza treba da planira vrstu radnji koje treba preduzeti za svaku od sledećih aktivnosti (Keeney, 1982):
  - identifikovanje donosioca odluka;
  - definisanje cilja (eva);
  - analiziranje izvodljivih alternativa koje će biti evaluirane;
  - utvrđivanje kriterijuma za procjenu posljedica alternative.



Gore navedene aktivnosti u ovoj fazi su slične među svim MCDM metodama (Dodgson i ostali, 2009) i daju informacije koje se zatim koriste kao osnova za određivanje koja od metoda MCDM može da se primjeni (Roy, 1996; Tsoukis, 2007) ili da se razvije nova metoda za rješavanje problema.

2. Definisane i primjena MCDM metode. Da bi se kontrolisala primjenljivost MCDM metoda na problem, MCDM metoda ne bi trebala biti izabrana prije nego što je definiše problem (Roy, 1996; Tsoukis, 2007).

Ova faza sadrži sledeće aktivnosti:

- dodavanje težinskih važnosti svakog kriterijuma u odnosu na cilj;
- dodavanje preferencija svake alternative u pogledu kriterijuma;
- izračunavanje ukupnih težina alternativa;
- rangiranje svih izvodljivih alternativa na osnovu ukupnih ponderisanih rezultata.

Razlike između MCDM metoda leže u ovoj drugoj fazi (Dodgson i ostali, 2009).

3. Definisane konačne preporuke. Što je veći ukupni težinski rezultat, to će alternativa biti preferirana (Keeney, 1982). Dobijene rezultate treba dalje ispitati izvođenjem analize osjetljivosti koja se može koristiti da odgovori na pitanja „šta ako“ donosilac odluka mora posjedovati (Dodgson i ostali, 2009; Keeney, 1982).

### **3.5.1. METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA**

Tokom godina, brojne MCDM metode su predložene u literaturi; ove metode su različite po tipu istraživanja kojima se žele baviti, vrsti problema, teorijskoj pozadini, i vrstu dobijenih ishoda (Sitorus i ostali, 2018). Ne postoji posebna MCDM metoda koja se može primjeniti na sve vrste problema, budući da su metode definisane za specifične slučajeve, sa njima povezanim prednostima i ograničenjima (Sitorus i ostali, 2018).

U ovom poglavlju predstavljen je kratak opis najrelevantnijih metoda za problem izbora metodologije i njihove primjeni.

#### **3.5.1.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)**

“Analytic Hierarchy Process” (AHP), koji je prvobitno dizajnirao Saaty (Saaty, 1980), pruža sistematski proces za uključivanje faktora kao što su kao logika, iskustvo ili znanje, emocija i osjećaj optimizacije u metodologiji donošenja odluka. Konceptijski AHP metoda je postavljena na poređenju parova alternativa, poredi se svaka sa svakom alternativa.

Ova metoda pojednostavljuje složeni problem sa više kriterijuma u hijerarhijsko struktuiranje problema po Saaty-u Vargas-u (Saaty i Vargas, 2001), hijerarhija je definisana kao reprezentativna od kompleksnog problema u strukturi na više nivoa gdje je prvi nivo cilj/podcilj/mogućnost, zatim podnivoi, kriterijumi i podkriterijumi, pa sve do posljednjeg nivoa gdje su alternative. Ovim pristupom, složeni problem se može dekonstruisati u dijelove i prikazani u formi hijerarhije tako da će problem izgledati strukturiranije i sistematičnije.

AHP metoda se sastoji od četiri glavne faze (Saaty, 1987).

1. Razvoj hijerarhijskog modela problema. U modelu je cilj na vrhu strukture, kriterijumi i podkriterijumi na srednjim nivoima, a alternative, na dnu
2. Na svim nivoima hijerarhijske strukture, u parovima se međusobno porede elementi nivoa. Preferencije donosioca odluke izražavaju pomoću Saaty-jeve skale relativne važnosti;



3. Na osnovu procjena relativnih važnosti elemenata hijerarhijskih nivoa, izračunavaju se lokalni prioriteti (težine) kriterijuma, podkriterijuma i alternativa, koji se zatim sintetiziraju u ukupne prioritete alternativa. Ukupni prioritet alternative izračunava se sabiranjem njenih lokalnih prioriteta ponderisanjem sa težinama elemenata višeg nivoa;
4. Izvodi se analiza osjetljivosti.

„The Analytic Network Process“ (ANP) je generalizovana AHP metoda, koja se bavi zavisnostima (Saaty, 2008-2). Mnogi problemi MCDM iz stvarnog života se mogu uključiti u interakciju i zavisnost između različitih kriterijuma, kao i između različitih podkriterijuma u vidu unutrašnje i spoljašnje zavisnosti, ili u oblik povratnih informacija od alternativa do kriterijuma (Saaty, 2008-2). ANP metoda omogućava modeliranje svih interakcija, zavisnosti i povratne informacije između gore navedenih elemenata u mreži (Saaty, 2004, 2008-1).

ANP metoda se sastoji od četiri glavne faze (Saaty, 2008-1).

1. Strukturiranje modela u mrežu.
2. Poređenje u paru na svakom klasteru s obzirom na njihovu važnost. Uporedno rasuđivanje među kriterijumima klastera takođe se mora ispitati u paru.
3. Razvijanje matrica prema mreži koja odražava odnos između dva klastera u sistemu.
4. Sinteza redosljeda preferencija alternativa koje se postižu iz normalizovane super matrice.

### **3.5.1.2. ELECTRE grupa (Elimination Et Choix Traduisant la Realit)**

ELECTRE je prvobitno nastala 1960-ih (Benaïoun et al., 1966; Roy, 1968) kao odgovor na ograničenja postojećih metoda odlučivanja za rješavanje problema izbora. ELECTRE je orijentisana ka rješavanju problema multiatributnog odlučivanja, tako što se evaluacija mogućih (alternativnih) odluka izvodi poređenjem atributa.

Od uvođenja metode primjenjeno je osam daljih varijacija za rješavanje MCDM problema i to ELECTRE I, IS, Iv, II, III, IV, III-H i Tri. Sve ove metode su razvijene na isti osnovni koncept, ali se razlikuju u svojim fazama.

Svaka od metoda grupe ELECTRE ima svoje specifičnosti funkciju u odnosu na vrstu problema.

ELECTRE I (Roy, 1968) je prvobitno razvijen za rješavanje problem izbora.

Uvođenjem praga ravnodušnosti i veta u ELECTRE I, razvijeni su ELECTRE IS (Roy i Bouissou, 1993) i ELECTRE Iv (Figueira i ostali, 2005).

ELECTRE II (Roy i Bertier, 1971), koji predstavlja ažuriranu verziju originala, dizajniran je da prevaziđe problem rangiranja.

ELECTRE III (Roy, 1978), koji se može smatrati nejasnim odnosom nadmašivanja, razvijen je da bi se riješio problem rangiranja.

ELECTRE IV (Roy & Hugonnard, 1982), koji je varijanta ELECTRE III, razvijen je da se bavi situacijama u kojima se ne uvode težinski kriterijumi.

Kada se donosioci odluka suočavaju sa problemom sa hijerarhijskom strukturom kriterijuma, ELECTRE-III-H (Corrente i ostali, 2013; Del Vasto-Terrientes i ostali, 2015) razvijen je kako bi pomogao u definisanju modela lokalnih preferencija na svakom nivou hijerarhije.



ELECTRE Tri (Yu, 1992), ELECTRE Tri-C, (Almeida-Dias i ostali, 2010) i ELECTRE Tri-nC (Almeida- Dias i ostali, 2012), koje su najnovije metode grupe ELECTRE, razvijene su da prevaziđu problem raspodjele.

### **3.5.1.3. PROMETHEE (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluation)**

Grupa metoda PROMETHEE, koju je prvobitno predložio Brans (Brans, 1982), je još jedan metod koji prevazilazi rangiranje. za konačan skup alternativa koje treba rangirati i izabrati. Originalna metoda je dodatno proširena Brans-a i Vincke-a (Brans i Vincke, 1985). Konačan skup unaprijed određenih alternativa se ocjenjuje prema više kriterijuma. Svaki nezavisni kriterijum je težinski i treba izabrati odgovarajuću funkciju preferenciju. Prednost funkcija opisuje razliku između evaluacija alternative u odnosu na drugu i stepen preferencije (Brans i ostali, 1986).

Od njegovog uvođenja primjenjeno je šest metoda razvijenih u okviru PROMETHEE grupe rješavanje MCDM problema. Slično grupi ELECTRE, svaka od PROMETHEE metoda ima specifičnu ulogu u odnosu na vrstu problema.

PROMETHEE I (Brans, 1982) je prvobitno dizajniran za djelimično rangiranje alternativa.

PROMETHEE II (Brans i ostali, 1984, 1986; Brans i Vincke, 1985) je razvijen da obezbjedi kompletno rangiranje alternativa.

PROSA (PROMETHEE for Sustainability Assessment) (Ziemba i ostali, 2017), odnosno proširenje metode PROMETHEE II, je metoda razvijena za dobijanje nižeg stepena kriterijumske kompenzacije.

PROMETHEE III (Brans i ostali, 1984) je razvijen da pojača indiferentnost u cilju rangiranja alternative zasnovane na intervalima koji se preklapaju.

PROMETHEE IV (Brans i ostali, 1984) je dizajniran za potpuno ili djelimično rangiranje alternativa kada je skup održivih rješenja neprekidan.

PROMETHEE V (Brans i Mareschal, 1992.) razvijen je za kontinuirani problem korišćenjem ograničenja kako bi se maksimizirao ukupni tok prekoračenja alternativa.

PROMETHEE VI (Brans i Mareschal, 1995.) omogućava uključivanje preferencija donosioca odluka, što znači da ova metoda dozvoljava varijacije u težinama kriterijuma.

### **3.5.1.4. TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution).**

TOPSIS, koji je prvobitno razvijen od strane Hwang-a i Yoon-a (Hwang i Yoon,1981), još je jedna poznata metoda višekriterijumskog odlučivanja (MCDM) koja procjenjuje performanse alternativa na osnovu udaljenosti od idealnog rješenja.

Hwang-a i Yoon-a (Hwang i Yoon,1981) predložili su šest glavnih faza za primjenu TOPSIS-a i to:

1. razvija se i normalizuje matrica odlučivanja,
2. konstruiše se ponderisana normalizovana matrica odlučivanja,
3. određuju se pozitivna i negativna idealna rješenja,
4. izračunavaju se mjere separacije za svaku alternativu,



5. izračunava se relativna blizina idealnom rješenju,
6. alternative se rangiraju od najbolje ka najlošijoj prema blizini idealnom rješenju.

#### **3.5.1.5. VIKOR (Više kriterijumska optimizacija i kompromisno rješenje)**

Metoda VIKOR, koja je prvi put predložena od strane Opricovića (Opricović, 1998), prvobitno je dizajnirana za suočavanje sa problemima rangiranja i izbora. Ideja VIKOR metode je odrediti najbolju alternativu, koja predstavlja kompromisno rješenje, među izvodljivim alternativama uzimajući u obzir konfliktne kriterijume na osnovu blizine idealnom rješenju, a kompromisno rješenje je ono sa najbližom udaljenosti od idealnog rješenja. Detaljan opis postupka korišćenog u VIKOR metodama izložen je u radu Opricovića i Tzeng-a (Opricović i Tzeng, 2004).

#### **3.5.1.6. WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment)**

Metoda WASPAS, koja je kreirana od strane Zavadskas-a i saradnika (Zavadskas i ostali, 2012), predložena je za rješavanje problema rangiranja i izbora u uslovima sukobljenih višekriterijumskih odluka. Ova metoda je konstruisana na osnovu kombinacije težinskog modela zbira (WSM) i težinskog modela proizvoda (WPM) kako bi se povećala preciznost rangiranja.

#### **3.5.1.7. Hibridne metode višekriterijumskog odlučivanja (Hybrid MCDM)**

Korištenje samo jedne MCDM metode često nije dovoljno da se prevaziđu stvarni problemi donošenja odluka. Integracija dvije ili više MCDM metoda, iskorištavajući prednosti svake od njih, često pomaže donosiocu odluka da dobije pouzdanije rezultate. Belton i Stewart (Belton i Stewart, 2002) predlažu da pri integraciji MCDM metoda treba identifikovati zajedničke tačke između metodologija i razlikovati snage svake metode. Različite hibridne MCDM metode primjenjene su u različitim oblastima (Mardani i ostali, 2015-1,2; Zavadskas i ostali, 2016a). U ovom istraživanju (Mardani i ostali, 2015-1,2; Zavadskas i ostali, 2016a) identifikovane su tri vrste hibridnih MCDM metoda: integrisana MCDM metoda sa teorijom nejasnih skupova (FST), integrisana MCDM metoda sa drugom MCDM metodom/ama, i integrisana MCDM metoda sa drugom metodologijom/ama.

Jedno od poboljšanja tehnika je kombinacija preciznih MCDM metoda sa teorijom nejasnih skupova (FST). U situacijama kada donosilac odluka suočava sa nesigurnošću, teško je koristiti precizne MCDM metode kako bi se tačno ocjenila relativna važnost kriterijuma i podkriterijuma, kao i performanse alternativa u odnosu na određeni kriterijum. Ova teškoća nastaje jer se ocjena može izraziti samo korištenjem lingvističkog izraza umjesto preciznih ili stvarnih vrijednosti (Sitorus i ostali, 2018).

Dalji razvoj preciznih MCDM metoda je potreban kako bi se riješila ova poteškoća. FST je uveden u oblast MCDM od strane Bellman-a i Zadeh-a (Bellman i Zadeh, 1970) i Zimerman-a (Zimerman, 1978) i široko je primjenjen u nekim oblastima (Kahraman, 2008; Kahraman i ostali, 2015). Od uvođenja FST u MCDM (FMCDM), veliki broj FMCDM metoda primjenjen je i razvijen kako bi se riješili različiti problemi, sa obećavajućim rezultatima. Primjeri takvih FMCDM metoda koje se mogu pronaći u literaturi uključuju fazi AHP (FAHP) (Kahraman, 2008), fazi TOPSIS (FTOPSIS) (Kahraman, 2008), Yager-ovu metodu (Yager i Basson, 1975; Yager, 1977, 1978), fazi ELECTRE (Kumar, 2017), fazi PROMETHEE (Ziemba, 2018), integracija fazi DEMATEL-a, fazi ANP-a i fazi VIKOR-a (Tadi i ostali, 2014), i integracija FAHP-a i fazi MOORA-e (Akkaya i ostali, 2015).



## **4. RAZVOJ INTEGRALNOG MODELA ZA OPTIMIZACIJU DISKONTINUALNOG SISTEMA PROIZVODNJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA NEMETALA**

Za donošenje najbolje odluke i postavljanje prioriteta, pri čemu je potrebno uzeti sve pokazatelje u obzir i kvalitativne i kvantitativne, tu je metoda analitičko hijerarhijskog procesa (AHP) neprevaziđena. I pored toga, iako AHP metoda ima široku primjenu i praktična je pri višekriterijumskoj optimizaciji, postoje nejasnoće i neodređenosti, pa prema Bouyssou-u (Bouyssou i ostalima, 2000) pri rješavanju takvih problema može doći do nepreciznih odluka donosioca odluka.

Naprednija metoda u odnosu na AHP je metod fazi AHP (FAHP), koja ujedno i predstavlja napredniji analitički model, odnosno kombinaciju klasične AHP metode i teorije fazi skupova, odnosno po Saaty-u (Saaty, 1980) i Zadeh-u (Zadeh, 1965). Ova metoda funkcionira primjenom trouganih fazi brojeva po Chang-u (Chang, 1996). Suština modifikacije ove dvije metode je relativan odnos važnosti kriterijuma optimalnosti koji se opisuje pomoću lingvističkih iskaza, a modeliraju se fazi brojevima koji ujedno predstavljaju elemente matrice parova poređenja relativnog odnosa važnosti kriterijuma optimalnosti.

Po Bajiću (Bajić 2015) jedan od bitnih faktora prilikom primjene ovakvih metoda u rudarstvu da problem često stvara nedovoljna raspoloživost podataka. Takvi nedostaci se prevazilaze metodama koje su bazirane na fazi logici. Samom primjenom FAHP ukazano je na kvalitativne tehnike koje se zasnivaju na prosuđivanju, tj. ocjenjivanju i iskustvu donosioca odluka u vrijednovanju kako bi se dobila najbolja alternative od njih više.

Metode višekriterijumskog odlučivanja imaju široku primjenu u svim oblastima i mnogi autori su ih primjenjivali i razvijali u svojim radovima (Van Laarhoven i Pedrycz, 1983; Buckley, 1985; Boender i ostali, 1989; Chen, 1996; Chang, 1996; Lee i ostali., 2005; Lee, 2009). Pomenuti autori su unaprijedili AHP metodu, kao i dokazali da metoda FAHP koja koristi koncept fazi logike i analizu hijerarhijske strukture pri problemu selekcije i daje bolje rezultate u pogledu donošenja odluke. FAHP metodu je prvi primjenio Van Laarhoven i Pedrycz (Van Laarhoven i Pedrycz, 1983) pri čemu je fazi vrijednosti opisao pomoću funkcija pripadnosti trouganih fazi brojeva, dok je Buckley (Buckley, 1985) insistirao da se trapezoidnim fazi brojevima izražava procjena donosica odluke u vezi alternative u odnosu na svaki kriterijum. Boender i ostali (Boender i ostali, 1989) su predstavili modifikaciju metoda koje su predložene od strane Van Laarhoven-a i Pedrycz-a (Van Laarhoven i Pedrycz, 1983). Novija verzija i novi pristup u metodi FAHP predložen je od strane Chang-a (Chang, 1996) primjenom trouganih fazi brojeva i skale za poređenje parova.

Predstavljena metodologija FAHP ima široku primjenu što su (Guo i ostali, 2019) za određivanje težina indeksa evaluacije koristili FAHP prilikom procjene stabilnosti radova na građevini iznad napuštenog rudnika uglja, a koji predstavlja opasnost i ugrožava bezbjednost rada brze pruge.

Po Saaty-u (Saaty, 1980; Saaty, 1990) metodologija koja je bazirana na fazi AHP pruža mogućnost da se donese ispravna odluka i olakša rješavanje problema u pogledu neizvjesnosti i neodređenosti nekog procesa, a ovo se posebno odnosi kada su u pitanju složeni problem sa znatnim neodređenostima, kao što su sistemi ležišta mineralnih sirovina. Ovakve sisteme prate određene neizvjesnosti i neodređenosti, to se posebno ogleda u izučavanju geologije nekog terena, koja zna da bude veoma specifična i kompleksna, kao i određivanje oblika, pružanja, pada i granica rudnog tijela prema okolnoj stijeni, kao i određivanje prirodnih karakteristika i parametara kako rude, tako i okolne stijenske mase. Često je uzrok tome neposjedovanje



dovoljne količine informacija. Prve korake za razvoj ove metode predložio je Chang (Chang, 1996), dok je Deng (Deng, 1999) izvršio dodatnu modifikaciju.

S. Bajić, D. Bajić, B. Gluščević i V. Ristić Vakanjac (Bajić i ostali, 2020) su predstavili primjenu fazi optimizacije u rudničkoj hidrogeologiji.

Sama metoda FAHP se sastoji od sljedećeg:

- izvođenja lokalnih prioriteta iz fazi prioriternih odnosa, a koji kasnije kao kompletirani predstavljaju globalne pokazatelje. Pomoću ove metode moguće je da se odrede fazi prioriteta na osnovu aritmetičkih operacija koji isključivo važe za trougaone fazi brojeve, pri čemu da bi se koristile ove operacije neophodno je poštovani pravila vezana za funkcije pripadnosti.
- poređenje alternative se vrši tako što se prvo formiraju parovi koji se porede.
- kriterijumi za izbor se utvrđuju i porede sa podkriterijuma, a zatim se za isti nivo po značaju za svaki kriterijum vrši proračun procesa prema prethodno postavljenoj hijerarhijskoj strukturi,
- pri poređenju donosilac odluke ispituje dvije alternative razmatranjem jednog kriterijuma i pri tome ukazuje na prednost, npr. ako se razmatra neka hijerhija zasnovana tri opšta nivoa i to (cilj-kriterijumi-alternative) sa M kriterijuma i N alternative, tada se na nivou kriterijuma isti porede u pravcima u odnosu na prvi nivo, odnosno na cilj, a na nivou alternative iste se međusobno porede u odnosu na svaki kriterijum posebno.
- dobijeni rezultati poređenja, kao brojevi iz FAHP skale i time dobijaju numeričke vijednosti, a zatim se unose u odgovarajuće matrice na osnovu kojih se računaju težinski koeficijenti elemenata.

AHP koristi skalu relativne važnosti, koja se kreće od 1 do 9 i pokazuje važnosti od „iste - jednake važnost” pa do „ekstremne važnosti”. Za FAHP postoji više skala, ali najbliža i najpribližnija Satijevoj skali je samo fazifikovana Satijeva skala predložena od Zhu-a i ostalih (Zhu i ostali 1999) i Lamata (Lamata, 2004) koju si prikazane u tabeli 4.1. Takođe slično navedenoj skali su predložili Cheng (Cheng, 1996) i Deng (Deng, 1999), a prikazano je u tabeli 4.2.

Tabela 4.1: FAHP skala (Zhu i ostali, 1999; Lamata, 2004)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	AHP skala	FAHP skala	
		Trougaoni fazi broj	Recipročni trougaoni fazi broj
jednaka	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
jednaka do umjerena	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
umjerena	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
umjerena do jaka	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
jaka	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
jaka do veoma jaka	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
veoma jaka	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
veoma jaka do izuzetno jaka	8	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)
izuzetno jaka	9	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)



Tabela 4.2: Fazifikovana skala (Cheng, 1996; Deng, 1999)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	AHP skala	FAHP skala
		Trougaoni fazi broj ( $0,5 \leq a \leq 2$ )
jednaka	1	(1, 1, 1+a)
slaba	3	(3-a, 3, 3+a)
jaka	5	(5-a, 5, 5+a)
dokazana dominantnost	7	(7-a, 7, 7+a)
apsolutna dominantnost	9	(9-a, 9, 9)
međuvrijednosti	2, 4, 6, 8	(x-1, x, x+1) X=2, 4, 6, 8

Prvi koji je predstavio ovu metodu, odnosno metodu po kojoj se vrši optimizacija uz pomoć fazi analitičkog hijerarhijskog procesa je bio Chang (Chang, 1996) i to uz pomoć trougaonih fazi brojeva i FAHP skale, a za primjer je koristio izbor radnika za zapošljavanje prema različitim postavljenim kriterijumima. Deng (Deng, 1999) je još razvio i unaprijedio Chang-ovu metodu.

Za potrebe izrade doktorske disertacije primjenom ove metode razvijen je i FAHP model, koji se upravo i primjenjuje za donošenje odluke i optimalnog izbora i u daljem tekstu je dat prikaz postupka rješavanja tog problema.

Bajić (Bajić, 2015) je naveo da fazi višekriterijumska analiza koju je predstavio Deng obuhvata nekoliko faza i to prvo određivanje važnosti kriterijuma i performansi alternative, zatim zasnovano na principu agregacije procjena za sve kriterijume i za svaku alternative i na kraju rangiranje alternative na osnovu procjene a pri tom poštujući princip agregacije.

Nakon što se definišu kriterijumi koji su bitni za izbor optimalne alternative, vrši se definisanje hijerarhijskog modela u metodi FAHP i to u dvije faze: hijerarhijsko strukturirane problema i procjenu i sintezu.

Veoma je bitno naglasiti da u samom procesu postavljanja hijerarhijskog modela potrebno je iskustvu i znanje onog ko vrši sam process odlučivanja o datom problemu koji se razmatra, pa se često dešava da dva ili više ljudi isti problem strukturiraju različito, što zna dodatno da problem zakomplikuje. I vrlo je bitan timski pristup u procesu odlučivanja kroz procese identifikacije niova i elemenata, definisanje elemenata i formulacija pitanja.

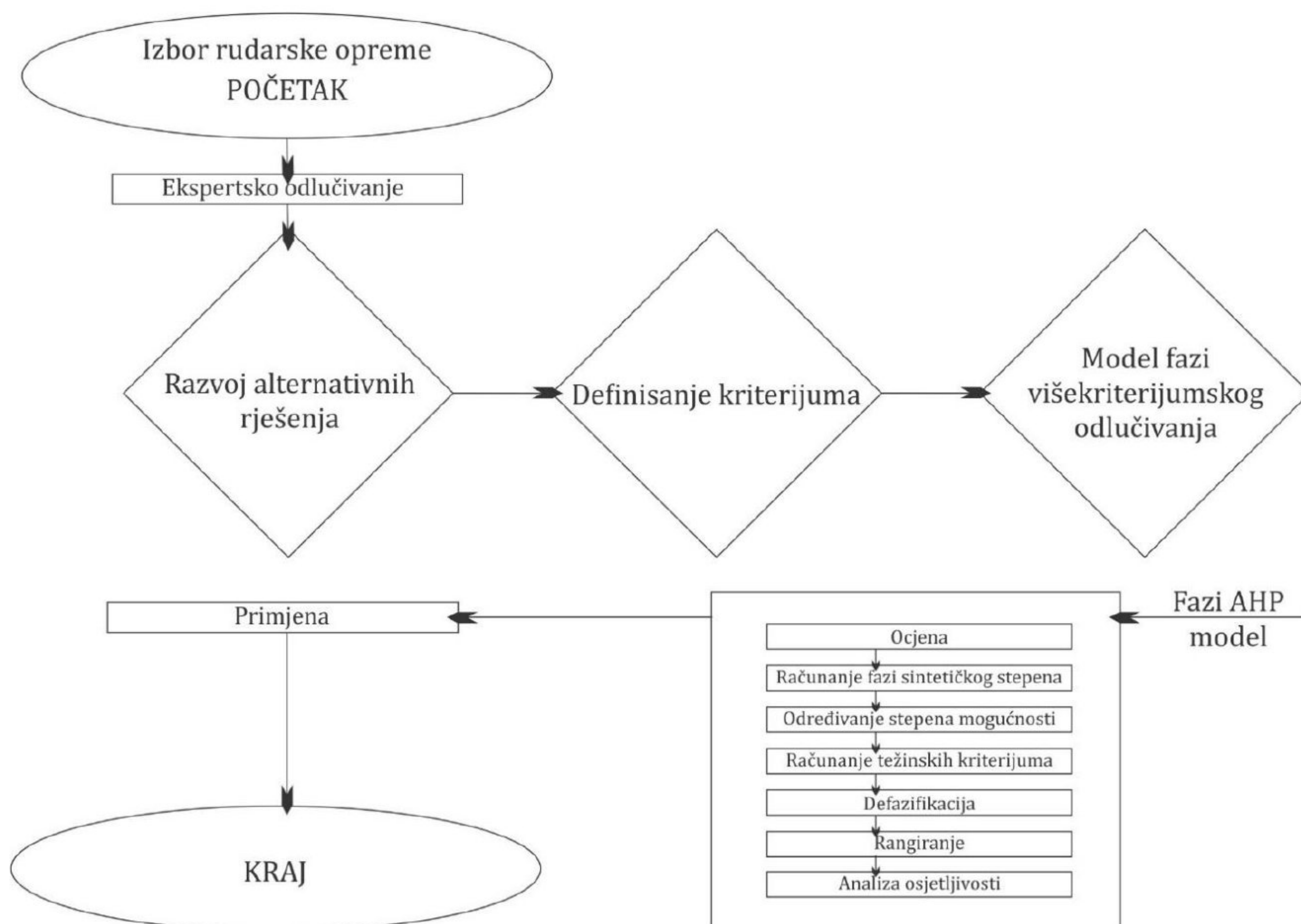
#### 4.1. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Chang i Deng (Chang, 1996, Deng, 1999) su predstavili fazi pristup za rješavanje problema kvalitativne višekriterijumske analize na primjerima problema selekcije tendera, kao i za selekciju kandidata za zapošljavanje prema različitim kriterijumima. Inspiracijom tih radova, za potrebe rješavanja složenih problema u rudarstvu, kao što je projektovanje optimalne mehanizacije, sistema bager – kamion, kreiran je algoritam koji se sastoji iz tri faze, generalno.

U prvoj fazi vrši se analiza uslova kojom se omogućava adekvatno formiranje tipa/vrste mehanizacije - kamiona (alternativnih rešenja) za upravljanje transpotrom kao i analiza efekata. U drugoj fazi postavljaju se i detaljno analiziraju faktori koji utiču na izbor optimalnog tipa kamiona sistema bager - kamion. Izdvojeni su sledeći faktori, koji se mogu smatrati univerzalnim: uslovi radne sredine i karakteristike ležišta, kapitalni troškovi, operativni



troškovi, složenost organizacije rada i putna infrastruktura. U trećoj fazi vrši se ocjenjivanje kriterijuma i alternativa pomoću metode fazi optimizacije i donosi se konačna odluka o optimalnom tipu kamiona sistema bager - kamion. Prema trećoj fazi, da bi se lakše vršili kompleksni matematički proračuni vezani za određivanje optimalnog rešenja i analiza osjetljivosti, korišćena je namjenska aplikacija FUZZY-GWCS® (Bajić, 2016; Bajić i ostali 2017). Matematički optimizacioni proračuni su vršeni prema metodi fazi analitičko hijerarhijskog procesa (fuzzy-AHP) koju je predstavio Chang (Chang, 1996). Postupak matematičke optimizacije i donošenja odluke je dalje opisan, a prema algoritmu prikazanom na slici 4.1.



Slika 4.1: Algoritam optimizacije i donošenja odluka

Kod istraživanja površinskih kopova, eksperti se suočavaju sa problemima različite prirode, kako geološke, tako i upravljanjem različitim rudarskim radovima i procesima. Uspješno kreiranje i projektovanje alternativa zahtjeva veliku količinu znanja iz različitih naučnih disciplina: geologije, hidrogeologije/odvodnjavanja, mehanike stijena, izrade drenažnih objekata, metoda eksploatacije, sistema transporta, mehanizacije i procesima upravljanja u rudarstvu. Zbog navedenih činjenica, eksperti sprovode različite vrste analiza faktora na površinskim kopovima s ciljem potpunog definisanja njihovih karakteristika. Kvalitetno izvedena analiza svih faktora koji vladaju na prostoru površinskog kopa, direktno utiče na efikasnost projektovanja sistema upravljanja transportom u rudarstvu.

Nakon analize eksperstkih mišljenja kreiraju se alternativna rješenja i definišu kriterijumi koji imaju uticaja na izbor optimalnog rješenja.

Proces se nastavlja kreiranjem modela fazi višekriterijumskog odlučivanja, odnosno fazi AHP modela. To podrazumjeva dugačak proces od više koraka i matematičkih postupaka koji se ponavljaju shodno postavljenoj hijerarhiji. Kreiraju se matrice i ocjenjuju kriterijumi međusobno, kao i kriterijumi u odnosu na alternativna rešenja. Za te svrhe se koristi skala



relativne važnosti (Saaty, 1990), odnosno tzv. fazifikovana skala (Chang, 1996; Deng, 1999; Tolga i ostali, 2005), gdje postoji veza između numeričkih vrijednosti trougaonih fazi brojeva i lingvističkih varijabli. Ocjenjivanje svakog elementa u matrici služi za formulaciju pitanja ekspertu koji analizira problem: „Da li je i koliko je jedan kriterijum važniji od drugog kod poređenja parova u matrici”?

Dalje slijedi proces određivanja vrijednosti fazi sintetičkog stepena, koji se dalje opisuje. Neka je  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  skup na koji se vrši analiza, a  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  ciljni skup. Za sve elemente skupa  $X$  se vrši stepena analiza (eng. „extent analysis“) za svaki element skupa  $G$  (Chang, 1992). Na taj način formira se  $m$  vrijednosti stepenih analiza za svaki element skupa  $X$ :

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

gdje su svi  $M_{g_i}^j, j = 1, 2, \dots, m$  trougaoni fazi brojevi.

Neka sa  $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$  budu označene stepene analize za elemente tih skupova za  $m$ . U tom slučaju se vrijednosti fazi sintetičkog stepena (za  $i$  elemenata) računaju na način:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1},$$

dok se u slučaju razmatranja trougaonih fazi brojeva oblika  $M = (l, s, d)$  računaju na način:

$$(M_1 = (l_1, s_1, d_1), M_2 = (l_2, s_2, d_2) \dots):$$

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m s_j, \sum_{j=1}^m d_j \right)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left( \sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n s_i, \sum_{i=1}^n d_i \right),$$

gdje je:  $M_{g_i}^j (j = 1, 2, \dots, n)$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n d_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right)$$

Konačno, vrijednost fazi sintetičkog stepena se izražava kao:

$$S_i = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m s_j, \sum_{j=1}^m d_j \right) \otimes \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n d_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right)$$



Nakon toga, vrši se određivanje stepena mogućnosti (eng. „degree of possibility“). Prvi zadatak fazi analitičkog hijerarhijskog procesa bio je pravljenje odluke o relativnoj važnosti za svaki par faktora iste hijerarhije. Koristeći trougaone fazi brojeve, poređenjem udvojenih parova (elemenata), formira se fazi matrica:  $A = (a_{ij})_{n \times m}$  gdje je  $a_{ij} = (l_{ij}, s_{ij}, d_{ij})$ , što zadovoljava uslov :

$$l_{ij} = \frac{1}{l_{ji}}, s_{ij} = \frac{1}{s_{ji}}, d_{ij} = \frac{1}{d_{ji}}$$

Posljednji korak FAHP analize predstavlja određivanje vektora težinskih prioriteta za svaki kriterijum, a za to je potrebno razmotriti princip poređenja fazi brojeva, tj. operacija „min“ i „max“ strategije. Na osnovu prethodnog, u narednom koraku određuje se stepen mogućnosti dva trougaona fazi broja, koristeći princip poređenja fazi brojeva, na način kako je dalje opisano.

Ako se porede dva trougaona fazi broja  $M_1 \geq M_2$ , stepen mogućnosti je definisan na način:

$$V(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$$

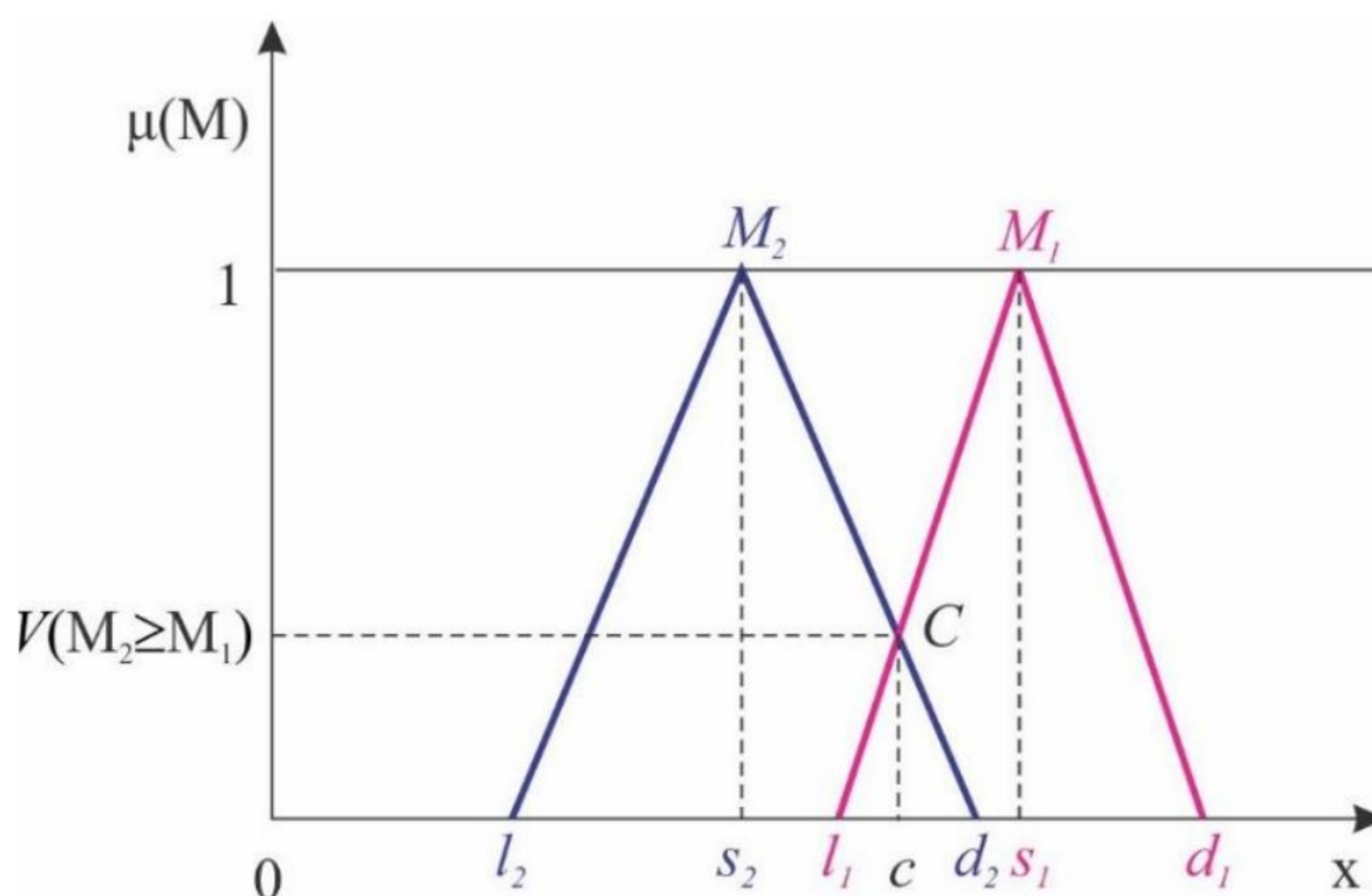
Kada parovi  $(x, y)$  postoje, takvi da je  $x \geq y$  i  $\mu_{M_1}(x) = \mu_{M_2}(y) = 1$ , onda je  $V(M_1 \geq M_2) = 1$ .

Kako su  $M_1$  i  $M_2$  konveksni trougaoni fazi brojevi slijedi:

$$V(M_1 \geq M_2) = 1 \text{ if } s_1 \geq s_2$$

$$V(M_2 \geq M_1) = 1 = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_1}(c)$$

gdje je  $c$  ordinata najvišeg presjeka u tački  $C$  između funkcija pripadnosti  $\mu_{M_1}$  i  $\mu_{M_2}$  (slika 4.2).



Slika 4.2: Trougaoni fazi brojevi



Konačno, stepen mogućnosti za trougaone fazi brojeve  $M_1 = (l_1, s_1, d_1)$  i  $M_2 = (l_2, s_2, d_2)$ , ekvivalentno se može izraziti na način (tačka C):

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = d_{M_2}(c) = \begin{cases} 1, & \text{if } s_2 \geq s_1 \\ 0, & \text{if } l_1 \geq d_2 \\ \frac{l_1 - d_2}{(s_2 - d_2) - (s_1 - l_1)}, & \text{ostalo} \end{cases}$$

Da bi se uporedili  $M_1$  i  $M_2$  trougaoni fazi brojevi potrebne su obe vrijednosti, tj. i  $V(M_1 \geq M_2)$  i  $V(M_2 \geq M_1)$ .

Stepen mogućnosti za konveksni trougaoni fazi broj da bude veći od  $k$  konveksnog fazi broja  $M_i$ , gdje je  $i = 1, 2, \dots, k$  može se definisati kao:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \wedge (M \geq M_2) \wedge \dots \wedge (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i)$$

Na osnovu prikazanog, dobija se izraz:

$$c'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad k \neq i$$

Dalje, slijedi proces određivanja vektora težinskih prioriteta, a definišu se na način:

$$W' = (c'(A_1), c'(A_2), \dots, c'(A_n))^T \text{ gdje je } A_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

Poslije njihove normalizacije, dobija se normalizovani težinski vektor prioriteta:

$$W = (c(A_1), c(A_2), \dots, c(A_n))^T$$

gdje vrijednost  $W$  predstavlja defazifikovan, klasičan, ne-fazi broj.

Kako je već pomenuto na početku, opisane matematičke operacije se izvode za poređenje kriterijuma međusobno, kao i za poređenje alternativa za svaki kriterijum posebno. Na taj način se formiraju matrice i određuju vektori težinskih prioriteta poštujući opisanu proceduru.

Pri samom kraju matematičkih optimizacionih operacija, računaju se konačne težine alternativa, koje se dobijaju aditivnom agregacijom, odnosno množenjem vektora težinskih prioriteta dobijenih iz matrice kriterijuma i vektora težinskih prioriteta sračunatih pri analizi alternativa u odnosu na sve kriterijume. Alternativa sa najvećom vrijednosti vektora težinskih prioriteta predstavlja optimalnu alternativu.

S druge strane, može se sprovesti analiza osjetljivosti, uvođenjem optimizacionog indeksa  $\lambda$  i računanjem vrijednosti „ukupnog integrala“ -  $I$  (eng. „the total integral value“) dobijaju se vrijednosti težina alternativa koje izražavaju stav eksperta prema riziku (Liou i Wang, 1992; Kwang i Lee, 1999):



$$I = \frac{(d\lambda + s + (1-\lambda)l)}{2}, \quad \lambda \in [0,1]$$

Elementi  $l$ ,  $s$  i  $d$  iz prethodnog izraza čine parametre trougaonog fazi broja (slika 4.2.). Kada je u pitanju optimizacioni indeks, njegova veća vrijednost ukazuje na veći stepen optimizma, a kako ističu pomenuti naučnici obično se za proračune uzimaju sledeće vrijednosti: „0“ za pesimistički stav eksperta, „1“ za optimistički stav, a „0.5“ se koristi kao umjerena vrijednost.

Konačno, eksperti sublimiraju cijelu sprovedenu analizu, razvijenu prema algoritmu. Time se dobija višegodišnji plan upravljanja transportnim sistemom u rudarstvu. Ako se uspješno implementira, proces eksploatacije rude i ostali procesi upravljanja na rudniku se sistematizuju i pojednostavljaju. Cijeli algoritam je primjenjen na studiji slučaja – površinski kop Ugljevik Istok 1 i ležištu L-29C eksploatacionog polja Bešpelj.

## 4.2. IZBOR I PREGLED EKSPERIMENTALNOG PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

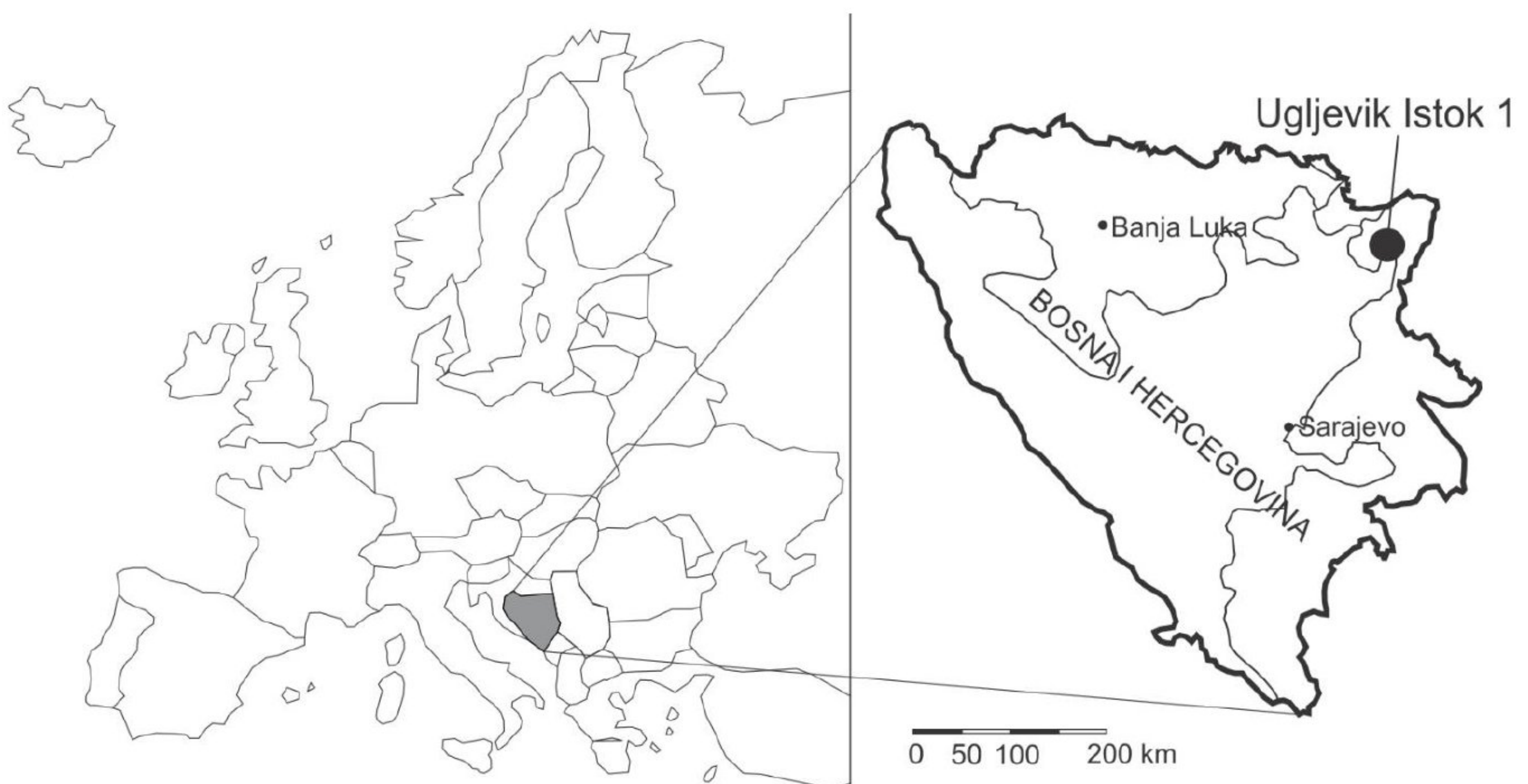
U ovom poglavlju doktorske disertacije prikazana su izabrana područja na kojima su obavljena istraživanja u cilju lakšeg sagledavanja i razumjevanja integralnog modela za optimizaciju diskontinualnog sistema proizvodnje na površinskim kopovima.

Za eksperimentalna područja izabrana su:

- Površinski kop Ugljevik Istok 1, Republika Srpska, BiH.
- Ležište boksita L-29C eksploatacionog polja Bešpelj kod Jajca, FBiH BiH.

### 4.2.1. POVRŠINSKI KOP UGLJEVIK ISTOK 1

Područje istraživanja (površinski kop Ugljevik Istok 1) se nalazi u sjeveroistočnom dijelu Bosne i Hercegovine. Na površinskom kopu Ugljevik Istok 1 vrši se eksploatacija uglja za potrebe termoelektrane Ugljevik. Geografski položaj područja istraživanja – PK Ugljevik Istok 1 prikazan je na slici 4.3.

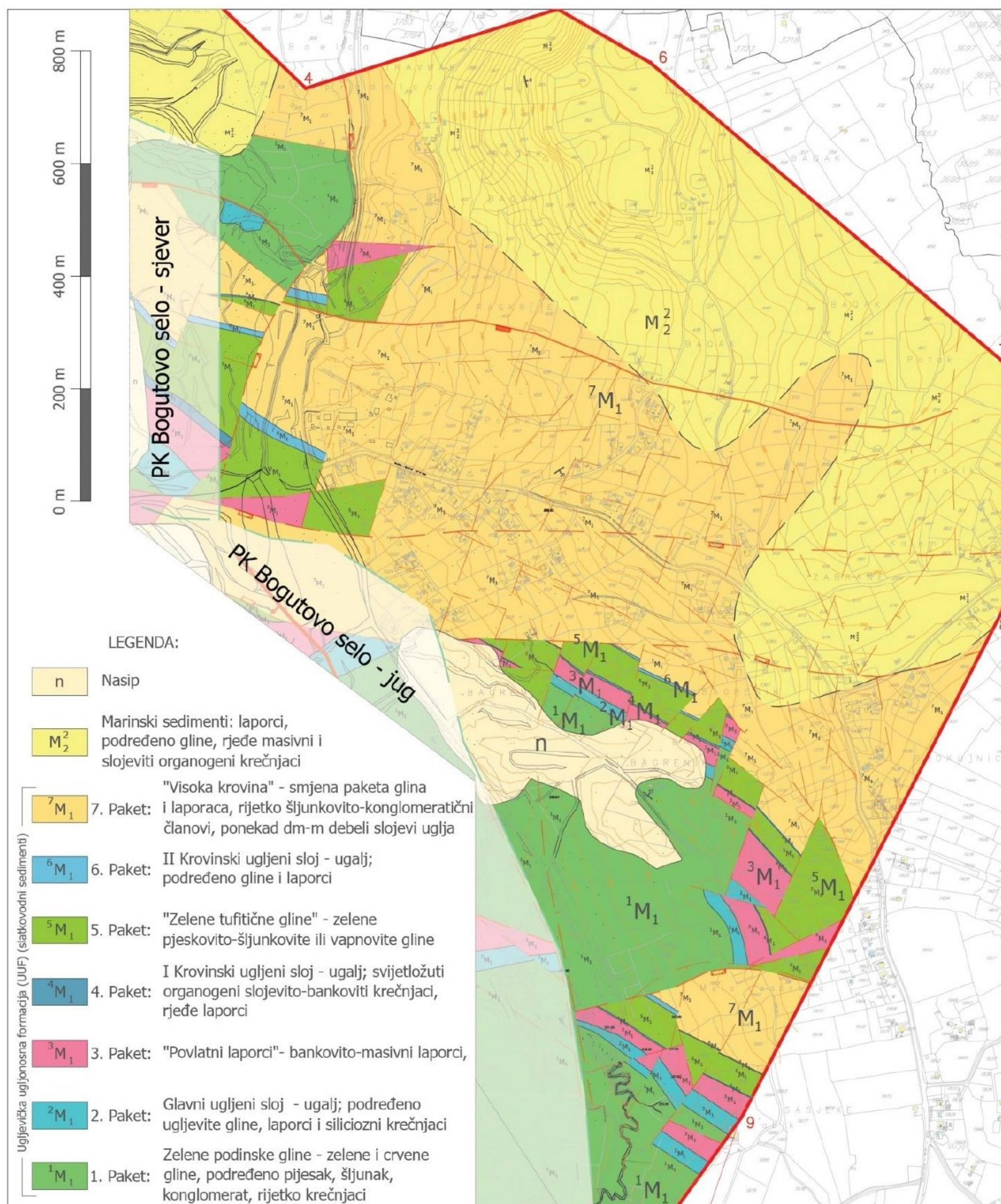


Slika 4.3: Geografski položaj područja istraživanja – PK Ugljevik Istok 1



#### 4.2.1.1. Uslovi eksploatacije na površinskom kopu Ugljevik Istok 1

Ležište uglja Ugljevik Istok 1 predstavlja približno središnji dio genetski i depoziciono jedinstvenog Ugljevičkog ugljonosnog basena. Na ležištu je razvijeno pet ugljenih slojeva: podinski (glavni), I krovinski, II krovinski, a na pojedinim dijelovima III i IV krovinski ugljeni sloj. Slojevi zaliježu prema sjeveru-sjeveroistoku pod uglom od oko 20°. Ugalj je mrkog i mrkolignitskog tipa crne, crnosive rijetko do smeđe boje, veoma rijetko drvenast.



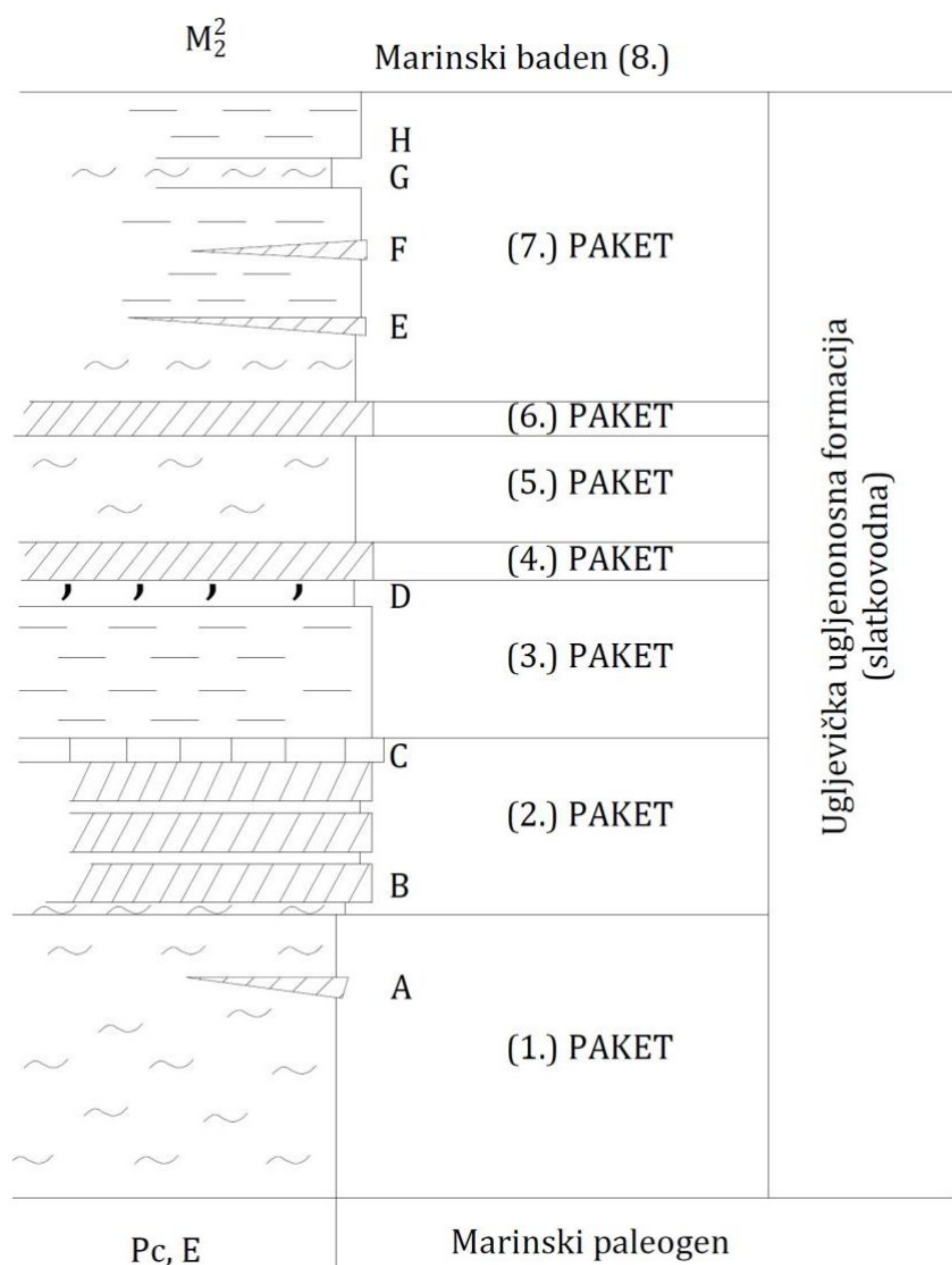
Slika 4.4: Detaljna geološka karta ležišta uglja Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017)



Na osnovu litološkog sastava, paleontološkog materijala i superpozicionih odnosa, utvrđeno je da u građi basena i ležišta učestvuju naslage paleocen-eocena, kompleks slatkovodnih ugljunosnih sedimenata donjeg miocena i marinski sedimenti tortonske starosti (slika 4.4) (Milošević, A. i ostali, 2017). *Paleocen-eocenski sedimenti (Pc,E)* nisu registrovani na površini već predstavljaju paleoreljef preko koga su istaloženi donjomiocenski slatkovodni jezerski sedimenti. U nižim nivoima jedinice alterniraju crni laporci, glinci i pločasti pješčari, a u višim dolaze pločasti pješčari, alevroliti i laporci sa flišnim karakteristikama.

*Slatkovodne ugljunosne tvorevine (M<sub>1</sub>)*, u stubu smještene između paleogene marinske podine i, takođe, marinske badenske krovine, tretiraju se pod nazivom "Ugljevička ugljunosna formacija (UUF)", koja se sastoji od sedam paketa (slika 4.5).

Prvi paket „Zelene podinske gline” (<sup>1</sup>M<sub>1</sub>) je heterogenog litološkog sastava, pa se pored pjeskovitih zelenih i mjestimično crvenih glina pojavljuju pijeskovi, rijede pješčari, trošni konglomerati i svijetlo žuti klastični krečnjaci. Jedna od karakteristika paketa je i relativno česta pojava karbonatnih konkrecija. U gornjem dijelu, u zelenim glinama, rijetko dolazi sloj uglja debljine do 2,50 m, što se tretira kao „član A” u prvom paketu Ugljevičke ugljunosne formacije. Debljina ovog paketa nije precizno utvrđena jer je mali broj bušotina probušio ovu, često tektonski redukovanu jedinicu. Analogijom sa drugim ležištima Ugljevičke ugljunosne formacije, cijeni se da on u punom razvoju dostiže debljinu i do 100 metara.



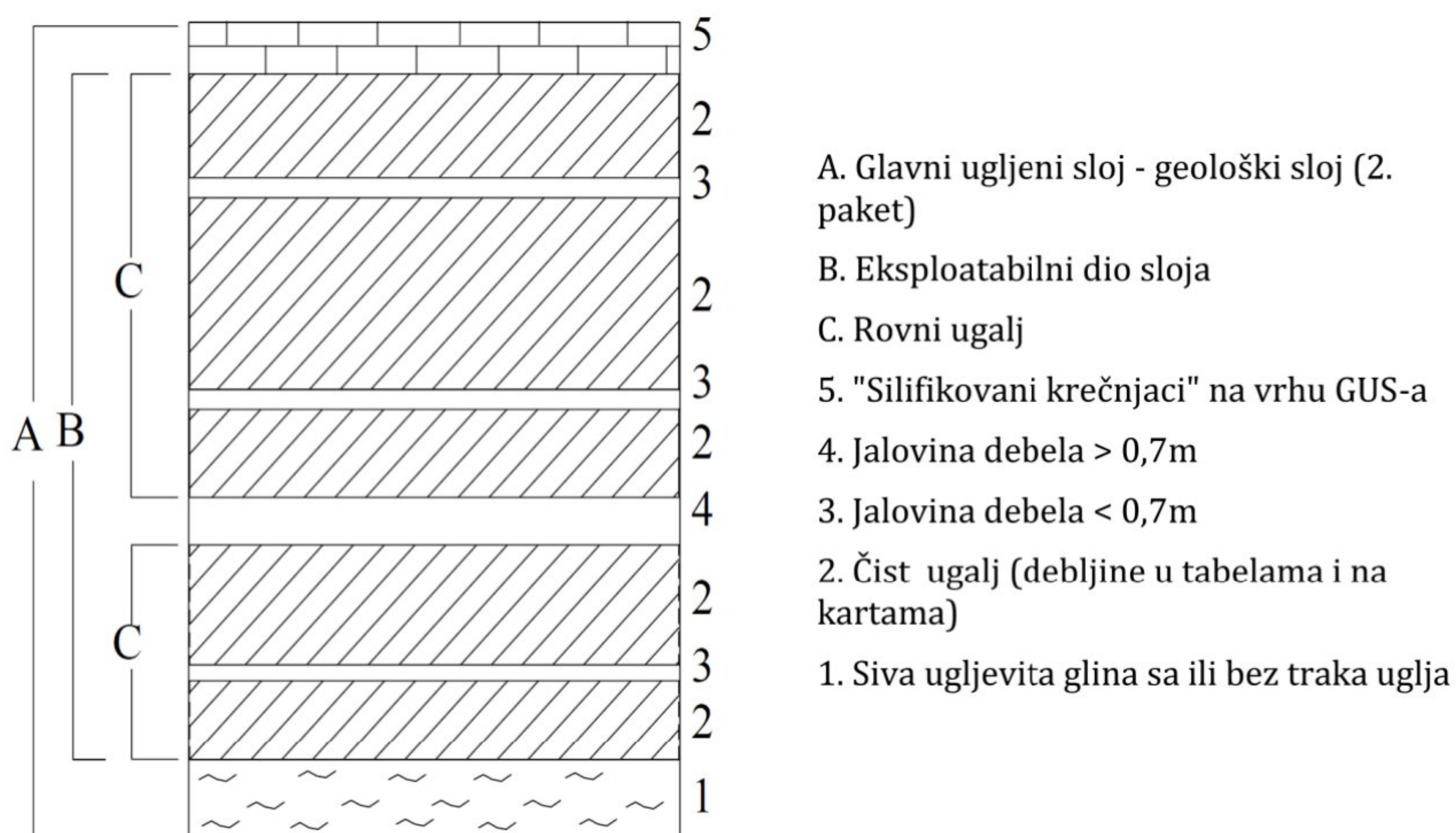
Slika 4.5: Šematski stub Ugljevičke ugljunosne formacije





Slika 4.6: Viši nivoi glavnog ugljenog sloja sa povlatnim laporcima u sjeverozapadnom dijelu ležišta (Milošević, A. i ostali, 2017)

Drugi paket „Glavni ugljeni sloj” ( $^2M_1$ ) (na slici 4.6 prikazan je rad pri eksploataciji glavnog ugljenog sloja) leži konkordantno na crvenim i zelenim podinskim glinama. Predstavlja drugu fazu sedimentacije u slatkovodnoj donjomiocenskoj seriji sedimenata koju karakteriše postojanje povoljnih klimatskih, paleoflorističkih i ekoloških uslova za formiranje ugljeva. Riječ je o najproduktivnijem dijelu ležišta pa je ugljeni sloj zbog svog ekonomskog značaja nazvan i glavnim. Pored dominantnog uglja u paketu se sa njim smjenjuju ugljevite gline i laporci (oba člana su dm - debljina), zatim sive ugljevite gline neposredno ispod uglja i krečnjaci u vidu završnog sloja paketa. Šema strukture glavnog ugljenog sloja (GUS) data je na slici 4.7.



Slika 4.7: Šema strukture Glavnog ugljenog sloja (GUS), (Milošević, A. i ostali, 2017)



U neposrednoj podini uglja veoma često su zastupljene sive i tamnosive gline sa ili bez traka i ploča uglja debljine više decimetara do nekoliko metara. Glavni ugljeni sloj se često završava slojem (rijetko bankom debljine ispod 1,0 m) gustog svijetložutog do tamnosivog (ugljevito) silicioznog (laporovito) krečnjaka do karbonatno laporovito rožnaca, tzv. „član C” (slika 4.5).

Na istočnom dijelu ležišta ovaj paket je predstavljen ugljenim slojem sa neproduktivnim „jalovim” proslojcima laporovitih i ugljevitih glina, zatim žutosmeđim i tamnosivim fosiliziranim laporcima sa trakama uglja i slojem silifikovanog krečnjaka do karbonatno laporovito rožnaca. Ako se izuzmu česte tektonske redukcije, maksimalna debljina glavnog ugljenog sloja iznosi 27,20 metara, sa 24,20 rovnog i 21,00 m čistog uglja. Proslojci jalovine su najčešće decimetarske debljine. Generalno gledano, glavni ugljeni sloj i čitava serija slatkovodnih sedimenata pada prema sjever-sjeveroistoku pod uglom od 20°.

Treći paket „povlatni laporci” ( $^3M_1$ ) je monotonog sastava pa se slojevi laporca izdvajaju po povećanom sadržaju pjeskovite komponente ili po nagomilavanju sitnih krhotina ljuštura mekušaca. Sivi do sivozeleni laporci, mjestimično više glinovite ili karbonatne komponente, imaju oštar planarni kontakt sa glavnim ugljenim slojem na kome neposredno leže. Često se ovaj paket završava pjeskovitim fosilifernim laporcima, koji, takođe, predstavljaju reporni karakterističan segment jedinice (tzv. „član D”), čija je debljina najčešće ispod 2,5 m (slika 4.5). Debljina ovog paketa rijetko prelazi 40 m, a najčešće je promjenljiva i varira od 15 do 30 m.

Četvrti paket „I krovinski ugljeni sloj” ( $^4M_1$ ) je izgrađen od smjene slojeva uglja i svijetložutih organogenih krečnjaka, rjeđe laporaca sa većim sadržajem karbonatne komponente, sa veoma promjenljivim učešćem uglja i karbonata. Sedimentološki jedinica je oštro odvojena od prethodne, na kojoj konkordantno leži. Debljina sedimenata ovog paketa najčešće ne prelazi 10 m. Unutar I krovinskog sloja uglja registrovani su jalovi proslojci sivih laporovitih glina, žutosmeđih i sivih pjeskovitih i glinovitih laporaca i blijedožutog krečnjaka.

Peti paket „zelene tufitične gline” ( $^5M_1$ ) je u osnovi izgrađen od svijetlo do tamnozelenih glina, uz mjestimično povećanu karbonatnu komponentu, pjeskovitost i/ili šljunkovitost, kada dobija karakter relativno čvrste konsolidovane stijene. Na terenu se tufogeni karakter rjeđe uočava, ponekad i preko cm-dm proslojaka svijetlo do tamnosmeđih glina tipa bentonitskih. Maksimalna debljina ovog paketa od 36,40 m evidentirana je na istočnom dijelu ležišta. Debljina paketa, koji zbog tektonskih pokreta često izostaje, je redukovana pa rijetko prelazi 25 m.

Šesti paket „II krovinski ugljeni sloj” ( $^6M_1$ ) izgrađuju slojevi uglja koji se smjenjuju sa ugljevitim glinama i ugljevitim laporcima do mjere kada paket više ne predstavlja ekonomski značajnu jedinicu. Paket drugog krovinskog sloja sa najčešćom debljinom od 2 do 2,5 m nema kontinuirano rasprostranjenje.

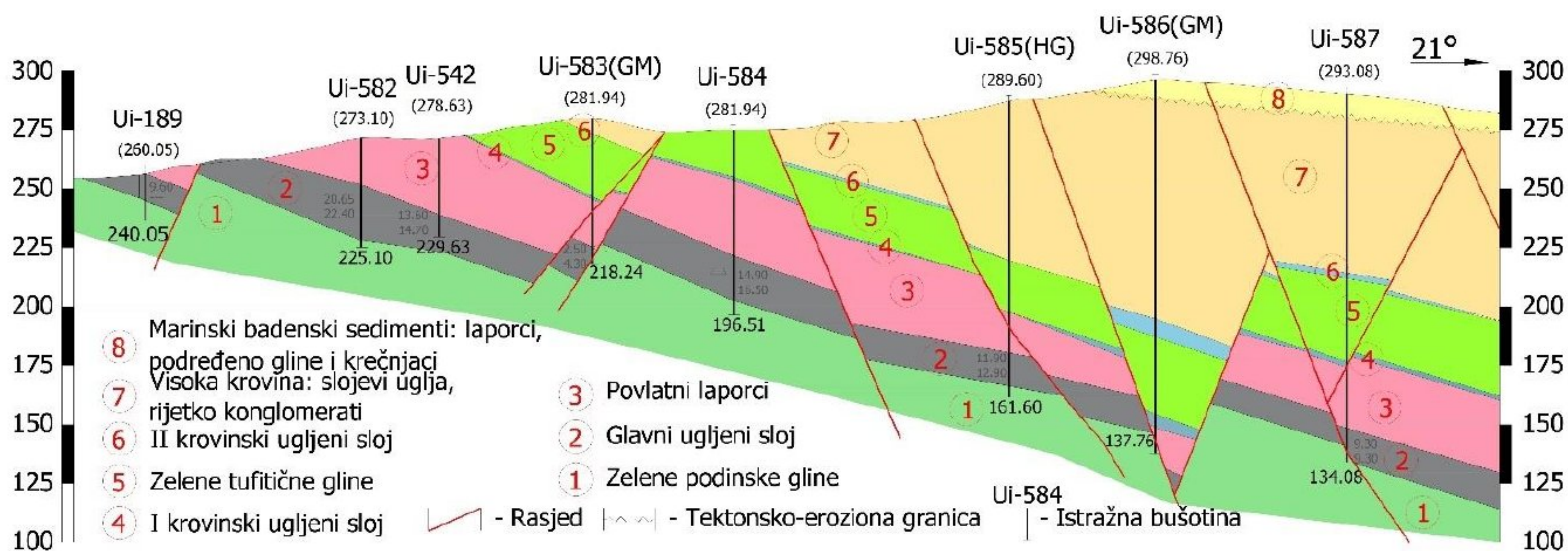
Sedmi paket „laporci i gline (±ugalj)-visoka krovina” ( $^7M_1$ ) je najzastupljeniji na centralnom i sjevernom dijelu ležišta. Ova završna jedinica ugljonosne formacije, koja počinje glinama, nema uvijek potpuno jasnu granicu sa prethodnim paketom u podini. Pored raznobojnih glina dolaze svijetložuti do smeđi, rjeđe sivi laporci. Ova dva člana se smjenjuju uz različitu zastupljenost.

U ovom paketu mjestimično se pojavljuju dva ugljena sloja, uz u njima interstratifikovane gline ili laporce, obilježena kao „član E” i „član F”. U gornjem dijelu paketa, veoma rijetko dolaze, još jedan ili dva ugljena sloja - „član G” i „član H” (slika 4.5). Svi ugljeni slojevi sedmog paketa su, osim lokalno, uglavnom bez ekonomskog značaja. Tako su, pored laporaca, glinovitih laporaca, laporovitih glina, uglja, ugljevitih glina, sitnozrnih do krupnozrnih pjeskova, lokalno nešto izražajnije razvijeni treći i četvrti krovni ugljeni sloj. Najčešća debljina trećeg ugljenog sloja ne



prelazi 1 m, a četvrtog se kreće od 0,4 do 2,4 m. Maksimalna debljina ovog paketa od 142,90 m ustanovljena je u zoni tektonskog rova.

Geološka građa ležišta sa sa izdvojenim paketima ugljenosne formacije, njenom podinom i krovinom je prikazana na karakterističnom profilu (slika 4.8).



Slika 4.8: Karakterističan geološki profil ležišta Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017)

Na osnovu podataka iz Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu rezervi uglja u ležištima „Bogutovo Selo i Ugljevik Istok 1” (Milošević, A. i dr., 2017) utvrđene su geološke rezerve uglja na ležištu Ugljevik Istok 1 date u tabelama 4.3 i 4.4. Prosječan kvalitet bilansnih rezervi uglja ležišta Ugljevik Istok 1 dat je u tabeli 4.5.

Tabela 4.3: Bilansne rezerve po slojevima u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017)

Kategorija rezervi	GLAVNI UGLJENI SLOJ		PRVI KROVINSKI UGLJENI SLOJ		DRUGI KROVINSKI UGLJENI SLOJ	
	ČIST (t)	ROVNI (t)	ČIST (t)	ROVNI (t)	ČIST (t)	ROVNI (t)
A	-	-	-	-	-	-
B	16.979.892	19.086.451	1.635.477	2.129.739	953.137	1.057.611
C <sub>1</sub>	6.545.474	7.390.350	887.136	1.062.253	321.393	330.294
BILANSNE A+B+C <sub>1</sub>	23.525.366	26.476.801	2.522.614	3.191.992	1.274.530	1.387.905
C <sub>2</sub>	8.008.115		398.918		433.558	

Tabela 4.4: Ukupne bilansne rezerve uglja u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017)

Kategorija rezervi	GLAVNI+I+II KROVINSKI UGLJENI SLOJ (t)	
	ČIST	ROVNI
A	0	0
B	19.568.506	22.273.801
C <sub>1</sub>	7.754.004	8.782.897
BILANSNE A+B+C <sub>1</sub>	27.322.510	31.056.698
C <sub>2</sub>	8.840.591	



Tabela 4.5: Prosječan kvalitet bilansnih rezervi uglja u ležištu Ugljevik Istok 1 (Milošević, A. i ostali, 2017)

Revir		Bilansne rezerve	Ukupna vlaga	Pepeo	Sagorljive materije	Ispaljive materije	Koks	C-fiks	Suk	GTV	DTV
		m <sup>3</sup>	%	%	%	%	%	%	%	kJ/kg	kJ/kg
UI-1	ČIST	27.681.780	32,90	18,22	46,87	29,74	36,78	18,46	5,10	13.085	11.916
	ROVNI	31.897.021	33,06	21,77	45,89	28,88	36,07	16,95	3,67	12.201	11.040

Jedan od važnijih uticajnih faktora na proces eksploatacije su inženjersko-geološke karakteristike, tako i na primjeru ležišta uglja ležišta Ugljevik Istok 1. Sa tog aspekta treba imati u vidu da je teren uslovno stabilan i podložan procesima klizanja. Imajući taj podatak u vidu da je cijeli eksploatacioni prostor uslovno povoljan ili čak nepovoljan sa inženjersko-geološkog aspekta, navedene nestabilnosti i klizišta do sada nisu predstavljala u značajnijoj mjeri predstavljala prilikom eksploatacije uglja. Za regulaciju ovakvih problema u najvećoj mjeri se koristi adekvatna priprema i preventivne mjere prije samog početka eksploatacije uglja na lokacijama koje su podložne klizanju.

Podinu glavnog ugljenog sloja čini paket sedimenata, poznat i izdvojen kao paket "Zelenih podinskih glina". „Zelene podinske gline" predstavljaju inženjersko-geološki kompleks stijena litološki veoma heterogen, anizotropan, a unutar navedenog kompleksa pojedini litološki članovi pokazuju različite vrijednosti parametara fizičko-mehaničkih svojstava. Takve vrijednosti je i za očekivati kada se posmatrana generalno, odnosno po vertikali i bočno da se smjenjuju glinoviti sedimenti (gline i glinoviti laporci) sa pijeskovima, pješčarima i krečnjacima. Takva heterogenost odražava se na ukupno ponašanje terena kojeg izgrađuju. Kompleks počinje konglomeratima koji bočno prelaze u šljunkovite gline preko kojih se talože glinoviti pješčari, zelene i crvene pjeskovite gline i gline, laporci i krečnjaci. Debljina ovih naslaga je neujednačena, često tektonski redukovana i mali broj bušotina je prošao kroz ovaj kompleks, ali se računa prema dosadašnjim rezultatima geoloških istraživanja na 50m debljine. Fizičko-mehanička svojstva za pojedine litološke članove kompleksa su data u tabelama 4.6, 4.7 i 4.8.

Tabela 4.6: Fizičko-mehanička svojstva laporaca

$\gamma = 20.6 \text{ kN/m}^3$	$I_c = 1,08$
$W_L = 38,66\%$ ,	$C = 90,61 \text{ kN/m}^2$ ,
$W_p = 18,37\%$ ,	$\varphi = 22^\circ 9'$ ,
$I_p = 20,29\%$ ,	$M_s = 7.143 - 10.958 \text{ kN/m}^2$ .



Tabela 4.7: Fizičko-mehanička svojstva glina i tufitičnih glina

$\gamma = 19,48-22,20 \text{ kN/m}^3$ ( $\gamma_{sr} = 21 \text{ kN/m}^3$ ),	$I_c = 0,91-1,25$
$W_L = 42,48-169,05 \%$ ,	$C = 85,61-190,07 \text{ kN/m}^2$ ( $C_{sr} = 128 \text{ kN/m}^2$ ),
$W_p = 14,27-20,05\%$ ,	$\varphi = 9^\circ 1'-21^\circ 21'$ ( $\varphi_{sr} = 13^\circ 29'$ ),
$I_p = 28,21-149,01\%$ ,	$M_s = 7.691-18.182 \text{ kN/m}^2$ .

Tabela 4.8: Fizičko-mehanička svojstva tufitičnih glinaca

$\gamma = 22,6 \text{ kN/m}^3$ ,	$I_c = 0,66$
$W_L = 31,48\%$ ,	$C = 207,78 \text{ kN/m}^2$ ,
$W_p = 14,84\%$ ,	$\varphi = 20^\circ 32'$ ,
$I_p = 16,63\%$ ,	$M_s = 18.182-50.000 \text{ kN/m}^2$ .

#### 4.2.1.2. Opis proizvodnog procesa na površinskom kopu Ugljevik Istok 1

Tehnologija eksploatacije je diskontinualna (bager-kamion), a osnovna oprema su bageri kašikari zapremine kašike od 7 do 16 m<sup>3</sup> i kamioni nosivosti od 90 do 130 t. Formiraju se unutrašnja i vanjska odlagališta, a planiranje odloženih masa se vrši dozerima.

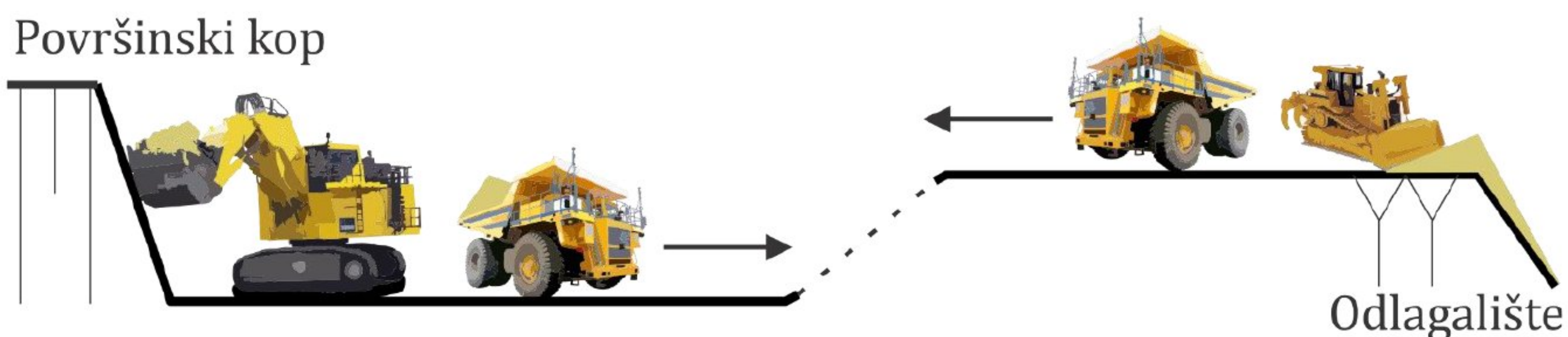
Organizacija rada je takva da se transport uglja unutar kopa (od etaže do primarne drobilice, polustacionarne, locirana unutar konture kopa) vrši kamionski, a od primarne drobilice do sekundarne, koja je locirana unutar platoa industrijskog kruga, vrši se transporterom sa trakama, takođe i dalje ka termoelektrani. Širina transportera kojim se odvija transport od primarne do sekundarne drobilice je 1000 mm, a od sekundarne drobilice do termoelektrane je 1400 mm.

Proizvodni proces na otkrivci podrazumijeva otkopavanje, utovar, transport i odlaganje.

Na osnovu dosadašnjih iskustava na izvođenju radova na otkrivci na PK "Bogutovo Selo", u čijem produžetku se nalazi PK Ugljevik Istok 1, dokazano je da se mase predviđene za otkopavanje, mogu direktno otkopati hidrauličnim bagerima kašikarima. Hidraulični bageri za otkopavanje otkrivke su bageri KOMATSU PC 3000 sa zapreminom kašike 14-16 m<sup>3</sup>., dok se transport otkrivke se vrši kamionima damperima BELAZ 75145 nosivosti 120 t i BELAZ 75135 nosivosti 130 t, na vanjska i unutrašnja odlagališta. Sistem eksploatacije otkrivke na PK Ugljevik Istok 1 šematski je prikazan na slici 4.9.

Otkrivka se odlaže na vanjska i unutrašnja odlagališta (otkopani prostor) koji se vrši planiranjem masa na odlagališnim etažama pomoću buldozera. Na vanjskim odlagalištima koja se odnose na zapunjavanje otkopanih prostora revira PK "Bogutovo Selo" tehnološki proces odlaganja odgovara formiranju unutrašnjih odlagališta. Širina dvosmjernih saobraćajnica iznosi 20,0 m sa maksimalnim uzdužnim usponom 5-7 % i poprečnim nagibima trase 3-5 %.



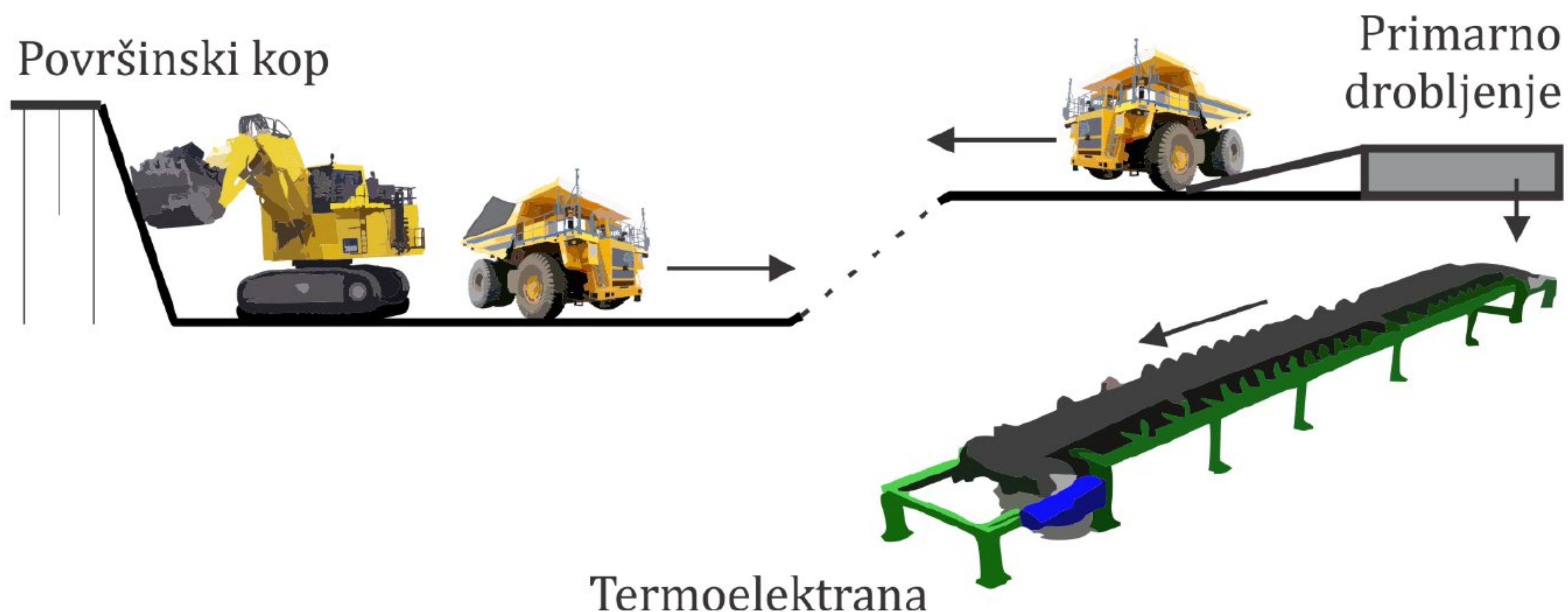


Slika 4.9: Sistem eksploatacije otkrivke na PK Ugljevik Istok 1

Proizvodni proces na uglju podrazumijeva sljedeće tehnološke operacije:

- otkopavanja,
- utovara,
- transporta,
- pripreme i
- otpreme.

Kako je već navedeno usvojen je sistem otkopavanja i utovara sa hidrauličnim bagerima kašikarima, a transport kamionima nosivosti oko 90 t. Hidraulični bageri na otkopavanju i utovaru uglja su Komatsu PC 1250 zapremine kašike  $V_k = 7 \text{ m}^3$  i Liebherr ER 974 B zapremine kašike  $V_k = 7,5 \text{ m}^3$ . Kamioni za diskontinualni dio transporta su BELAZ 75570 nosivosti 90 t – 1 komad, CAT 777D nosivosti 90,5 t -4 komada i četiri kamiona tipa BELAZ 75581 nosivosti 90 t (Malbašić, V. i ostali, 2023). Sistem proizvodnje uglja na PK Ugljevik Istok 1 prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10: Sistem proizvodnje uglja na PK Ugljevik Istok 1

Polumobilno primarno drobilično postrojenje MinPro SB 1518, (kapacitet  $Q=1000 \text{ t/h}$ ) priprema ugalj za kontinuirani dio transporta nestacionarnim transporterima sa trakom širine  $B=1000 \text{ mm}$ , dužine  $L=2 \times 650 \text{ m}$  (transporteri T-1 i T-2), do sekundarnog postrojenja za drobljenje uglja PHB 1826 MVD kapaciteta do  $Q=1200 \text{ t/h}$ , nakon kojeg se vrši transport uglja transporterom sa trakom širine  $B=1400 \text{ mm}$  do TE Ugljevik (Malbašić, V. i ostali, 2023).

Projektovana visina etaže, obzirom na konstruktivne parametre mehanizacije koja će raditi na otkopavanju i utovaru uglja, je 10 m. Pri čemu se pokazalo do sada da je selektivno otkopavanje jalovih proslojaka u glavnom ugljenom sloju najuspješnije izvoditi u podetažama visine 5 m.



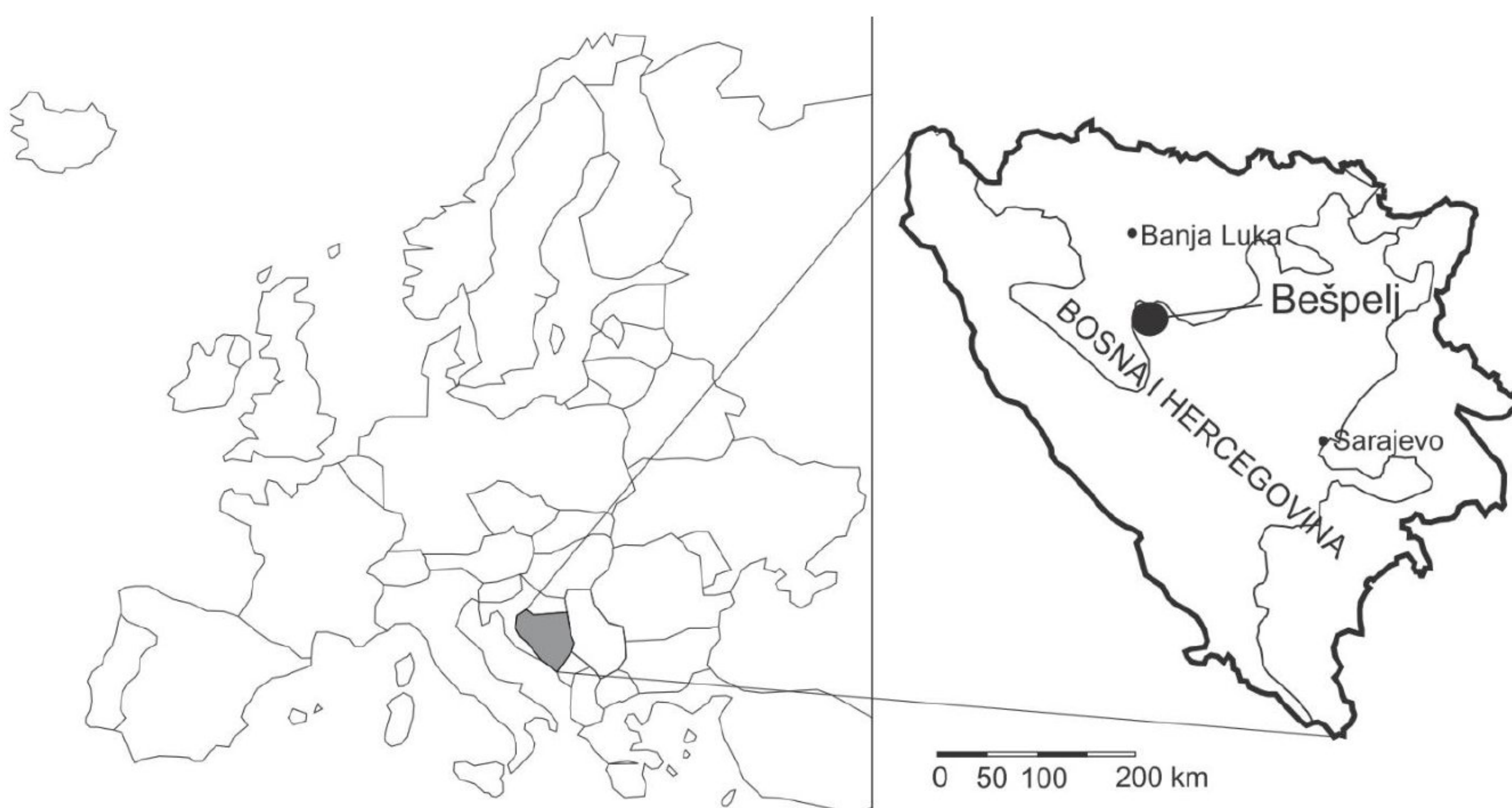
Jedan dio otkopanog uglja se transportuje do depoa „BMS” (sistema za obogaćivanje uglja) gdje se vrši izdvajanje određenih asortimana uglja od jalovine na postrojenju Parnabi - “Parnaby”.

“Parnaby” postrojenje BMS (Bream Mineral Separation) se koristi za čišćenje uglja iz krovinskih slojeva ležišta. Tehnološki postupak rada postrojenja zasnovan je na gravitacionoj metodi čišćenja uglja u autogenoj suspenziji koja se stvara od čestica gline, uglja i jalovine (Malbašić, V. i ostali, 2023).

Kapacitet eksploatacije ( $1,8 \times 10^6$  t/god.) i definisane rezerve uglja obezbijavaju eksploataciju za narednih 20 godina. Pored navedenih količina uglja na površinskom kopu Ugljevik Istok 1, neophodno je godišnje otkopati i  $23 \times 10^6$  tona jalovine.

#### 4.2.2. LEŽIŠTA BOKSITA EKSPLOACIONOG POLJA BEŠPELJ KOD JAJCA

Ležišta boksita nalaze se u eksploatacionom polju "Bešpelj" rudnika boksita Jajce. Smještene su na prostranoj kraškoj zaravni, na desnoj obali kanjona rijeke Vrbas i udaljena oko 10 km vazdušne linije sjeverno od Jajca (slika 4.11).



Slika 4.11: Geografski položaj ležišta “L-29C” eksploatacionog polja Bešpelj

##### 4.2.2.1. Uslovi eksploatacije ležišta “L-29C” eksploatacionog polja Bešpelj

Geološki odnosi u području Bešpelja prikazani su na geološkoj karti 1:100 000 (slika 4.12). Na karti je kredni karbonatni kompleks koji predstavlja podinu boksita rasčlanjen na tri litostratigrafske jedinice. Najstariju i najnižu jedinicu u stubu debelu oko 500 metara čine dobro uslojeni pločasti do bankoviti krečnjaci svjetlosive boje sa sočivima dolomita ( $K_1^{1-3}$ ). Preko opisanih karbonatnih sedimenata dolaze pločasti dobro uslojeni krečnjaci svijetlosive do tamnosive boje debljine oko 450 metara ( $K_1^{3-5}$ ). Neposrednu podinu ležištima boksita čine različiti tipovi alb-cenomanskih plitkovodnih krečnjaka ( $K_{1,2}$ ). Boja ovih dobrouslojenih krečnjaka sa slojevima debljine 5 cm do 1 m je bijela, ružičasta do svijetlosiva. Debljina ovog stratigrafskog člana doseže do 500 metara.

Na opisanoj neposrednoj podini zastupljena su ležišta boksita (slika 4.12). U mineralnom sastavu prevladavaju bemitski boksiti ali dolaze i druge primjese kao hidrargilit, dijaspor. Vrlo

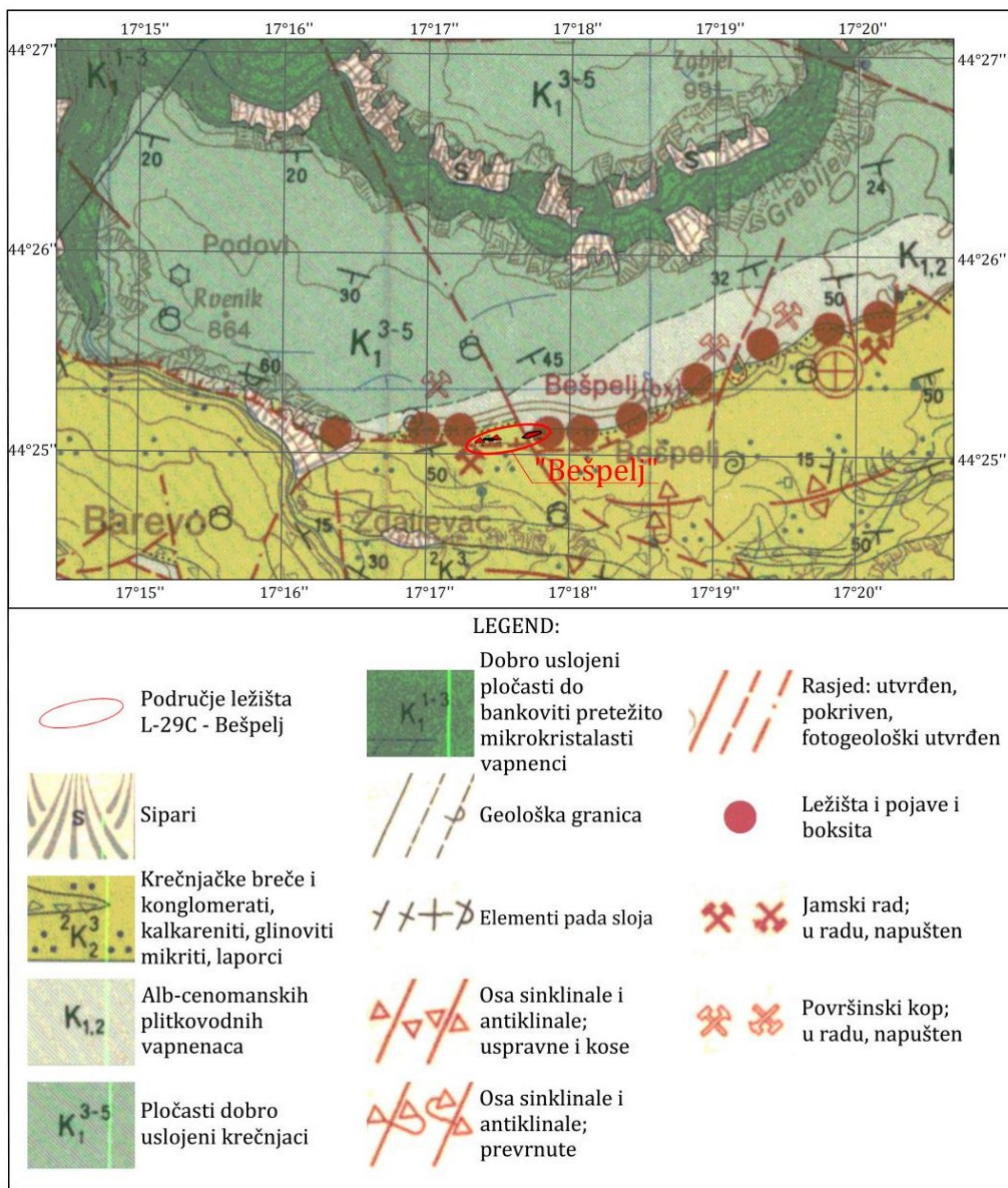


su kvalitetni sa sadržajem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , u prosjeku od 50-65 %, a sadržaj  $\text{SiO}_2$  varira u rasponu od 1-5 %.

Neposredna krovina predstavljena je kalkarenitima, brečama, laporima i glinovitim krečnjacima ( $^2\text{K}_2^3$ ), a u debelom dalje klastičnom krovinskom slijedu izdvojeni su i laporci, breče, kalkareniti i pjeskoviti krečnjaci (fliš), Naslage su intenzivno borane i izrasjedane, a debljina im može dosezati i preko 1000 metara.

Osnovna karakteristika svih boksitnih ležišta je da su istaložena na krečnjacima alb-cenomana. Oni su za vrijeme dugotrajne emerzije (kopnene faze) pod uticajem spoljašnjih geoloških faktora bili okršeni, odnosno u njima su stvorena raznovrsna paleoudubljena u koja je deponovan material za boksit. Gornjokredna transgresija istaložila je preko ležišta boksita heterogenu seriju karbonatnih klastita. U bazalnom dijelu to su glinoviti krečnjaci, kalkareniti, karbonatne breče i konglobreče, te mjestimično sačuvani rudistni grebeni. U višim dijelovima stuba preovladjuju laporci i kalkareniti najčešće nastali turbiditnim mehanizmima sedimentacije. Takva je sedimentacija trajala do srednjeg eocena. Intenzivni tektonski pokreti od eocena do danas cijelo su boksitonosno područje Bešpelja značajno strukturno poremetili pa se neka od ležišta nalaze u prevrnutom položaju.





Slika 4.12: Geološka karta šireg područja ležišta L-29C - Bešpelj (Marinković i Ahac, 1979)

Jedno od od ležišta (rudnih tijela) koje se nalazi na području Bešpelja (slika 4.13) se nalazi u vertikalnom položaju, odnosno u takvom je položaju i kontaktna površina podine i krovine u neposrednom okruženju ležišta. Kontaktna površina se pruža približno istok -zapad što odgovara i pružanju strukture Bešpelja. Rezultati proračuna eksploatacionih rezervi boksita na ležištu L-29C, prikazani su u tabeli 4.9, a kvalitet u tabeli 4.10.





*Slika 4.13: Ležište boksita u boksitosnom reviru eksploatacionog polja Bešpelj kod Jajca.*

*Tabela 4.9: Eskploatacione rezerve L-29C*

Kategorija rezervi (t)		Ukupno A+B (t)	Eksploatacioni gubici	Eksploaticione rezerve (t)		Ukupno (t)
A	B			A	B	
15.516	25.458	40.974	20 %	12.413	20.366	32.779

*Tabela 4.10: Kvalitet boksita sa L-29C*

Analiza	Vrijednost %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,66
SiO <sub>2</sub>	2,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,77
TiO <sub>2</sub>	2,60
CaO	0,05
gubitak žarenjem	28,83



## 5. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja za ovu disertaciju kao studije slučaja izabrane su dvije lokacije i to:

1. Površinski kop Ugljevik Istok 1, kod Ugljevika, RS, BiH i
2. Ležište L-29C, eksploatacionog polja Bešpelj kod Jajca, FBiH, BiH.

Kao osnovna eksperimentalno istraživanje korištena je studija slučaja na površinskom kopu Ugljevik Istok 1 gdje su detaljno analizirani uslovi eksploatacije i trenutno stanje sistema eksploatacije iz čega su proistekli podaci za formiranje kriterijuma i alternativa neophodnih za uspješno sprovođenje procesa optimizacije.

Na drugoj studiji slučaja odnosno na ležištu L-29C eksploatacionog polja Bešpelj analizirani su uslovi eksploatacije na konkretnom slučaju malog ležišta sa kratkim vijekom eksploataciji i na osnovu toga definisani kriterijumi i alternative prilagođene uslovima eksploatacije na cijelom eksploatacionom polju Bešpelj koje se sastoji od niza manjih ležišta na kojima se primjenjuje površinska i podzemna eksploatacija.

### 5.1. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJEVIK ISTOK 1

Područje istraživanja – površinski kop Ugljevik Istok 1 se nalazi u sjeveroistočnom dijelu Bosne i Hercegovine. Na površinskom kopu Ugljevik Istok 1 vrši se eksploatacija uglja za potrebe termoelektrane Ugljevik.

Kapacitet eksploatacije ( $1,8 \times 10^6$  t/god.) i definisane rezerve uglja obezbjeđuju eksploataciju za narednih 20 godina. Pored navedenih količina uglja na površinskom kopu Ugljevik Istok 1, neophodno je godišnje otkopati i  $23 \times 10^6$  tona jalovine.

Sistem eksploatacije na površinskom kopu sastoji se iz:

1. otkopavanja, transporta i odlaganja jalovine i
2. otkopavanja, transporta, drobljenja i deponovanja uglja kod termoelektrane.

Utovar i transport jalovine vrši se sa 5 bagera, tipa Komatsu PC 3000 (zapremine kašike  $16 \text{ m}^3$ ) i sa tri tipa kamiona. Svi kamioni su od istog proizvođača Belaz ali su različitih tehnoloških karakteristika i to Belaz 75581 (payload capacity 90t), Belaz 75145 (110 t) and Belaz 75135 (136 t).

Eksploatacija uglja je tehnološki složenija i pored utovara i transporta podrazumjeva i drobljenje uglja kao i transport transporterima sa gumenom trakom do termoelektrane, a što je detaljnije opisano u poglavlju 4.2.1.2. Eksploatacija uglja se vrši sa tri bagera, od čega dva bagera Komatsu PC 1250 SP i jedan bager Liebherr R974B, dok se transport vrši kamionima tipa Belaz nosivosti 90 t.





Parametar	PC 3000
Zapremina kašike	16 m <sup>3</sup>
Vrsta pogona	elektromotor
Snaga motora	900 kW
Ulazni napon	6 kV
Radni pritisak	31 MPa

*Slika 5.1: Bager Komatsu PC3000 sa osnovnim parametrima (www.komatsu.com)*

Trenutno se transport jalovine izvodi sa tri različita tipa kamiona. Ovakva situacija nije optimalna, jer heterogeni sastav transportne flote, zbog različitih karakteristika pojedinačnih tipova kamiona (različite nosivosti, brzine kretanja, vremena utovara, potrebnih dimenzija radnih prostora, itd) negativno utiče na produktivnost cjelokupnog sistema. Takođe poznato je da standardizacija tipa kamiona igra ključnu ulogu u smanjenju troškovi održavanja (Dziubak i ostali, 2021). Imajući navedeno u vidu u ovome radu je izvršena optimizacija tipa kamiona za transport jalovine. Obzirom na pozitivna iskustva u dosadašnjem radu, kao i na činjenicu da je na površinskom kopu Ugljevik Istok 1, trenutno prisutno 5 bagera tipa Komatsu PC3000, analiza se svela na izbor optimalnog tipa kamiona dok tip bagera nije razmatran. Bager Komatsu PC3000 sa osnovnim parametrima prikazan je na slici 5.1.

U razmatranju optimalnog tipa kamiona u obzir su uzeta tri postojeća tipa kamiona, trenutno aktivna na transportu jalovine na površinskom kopu i to Belaz 75581 (nosivost 90 t), Belaz 75145 (110 t) i Belaz 75135 (136 t), ali je u razmatranje uzet i kamion tipa Belaz 7517 nešto veće nosivosti (160 t). Na slici 5.2 su prikazani razmatrani kamioni (belaz.by). Obzirom na iskustva u dosadašnjem radu, kao i na postojeću infrastrukturu po pitanju održavanja, popravke i upravljanja vozilima, svi razmatrani kamioni su od proizvođača Belaz. Takođe, raspon nosivosti analiziranih kamiona (od 90 t do 160 t) usklađen je sa veličinom kopa, osobinama ležišta i potrebnim godišnjim kapacitetima na utovaru i transportu jalovine (22,3x10<sup>6</sup> t/god.). Osnovne karakteristike analiziranih kamiona date su u tabeli 5.1.

Kako bi se definisalo optimalno rješenje iz skupa analiziranih kamiona, analizirane su performanse kamiona po više kriterijuma i to prema: produktivnost, uslovi radne sredine i karakteristike ležišta, kapitalni troškovi, operativni troškovi, složenost organizacije rada, putna infrastruktura. Važno je napomenuti da isti kriterijumi neće imati jednak uticaj na nekom drugom kopu, odnosno da su konkretni kriterijumi i njihov uticaj jedinstvena karakteristika svakog kopa. U tom smislu razmatrani kriterijumi kao i njihov uticaj u skladu su sa konkretnim uslovima na površinskom kopu Ugljevik Istok 1. Uticajni kriterijumi od važnosti za optimizaciju i izbor tipa kamiona, su ukratko opisani u tekstu koji slijedi.





Belaz 75581 (90 t)



Belaz 7513 (110 t)



Belaz 7513R (136 t)



Belaz 7517 (160 t)

*Slika 5.2: Prikaz razmatranih kamiona (belaz.by)*

*Tabela 5.1: Osnovne karakteristike analiziranih kamiona*

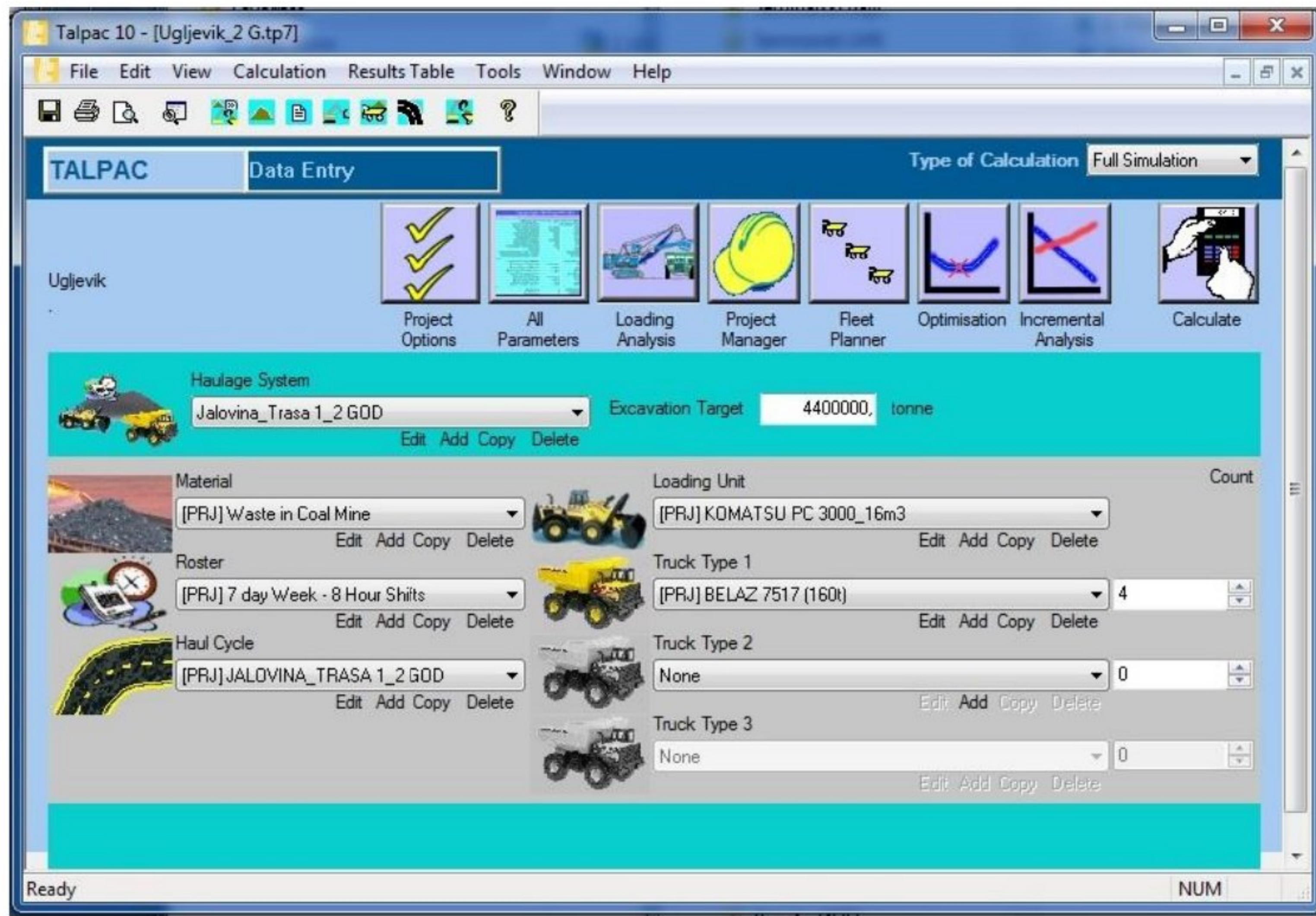
Tip kamiona	Nosivost (t)	Masa kamiona (t)	Zapremina korpe sa kupom 2:1 (m <sup>3</sup> )	Snaga motora (kW)	Maksimalna brzina (km/h)	Širina kamiona (m)	Radijus krivine (m)
Belaz 75581	90	164	53,3	895	60	5,36	11
Belaz 7513	110	210	67	1194	64	6,4	13
Belaz 7513R	136	243	80	1194	50	6,4	13
Belaz 7517	160	294	96,5	1492	65,6	6,9	14

**Produktivnost** je kriterijum koji podrazumjeva mogućnost svakog od analiziranih tipova kamiona da ispuni zadate godišnje kapacitete na transportu jalovine. Za potrebe analize, u programskom paketu Talpac – 3D (Talpac-3D, RPM Global, 2023), simuliran je rad sistema (bager PC3000) sa svakim od razmatrana 4 tipa kamiona. Rezultati simulacije su pokazali da je planirane ciljeve proizvodnje moguće izvršiti sa svakim od četiri tipa kamiona, stim što je broj potrebnih kamiona promjenljiv u zavisnosti od veličine kamiona (tabela 5.2). Na slikama 5.3, 5.4 i 5.5 prikazani su paneli optimizacije u softveru „Talpac“ za jedan od optimizovanih kamiona. Na slici 5.3 prikazan je osnovni panel softvera „Talpac“, na slici 5.4 prikazan je panel za unos organizacije rada, a na slici 5.5 prikazan je panel izvještaja optimizacije rada sistema bagera Komatsu PC3000 i jednog od kamiona (136 t).

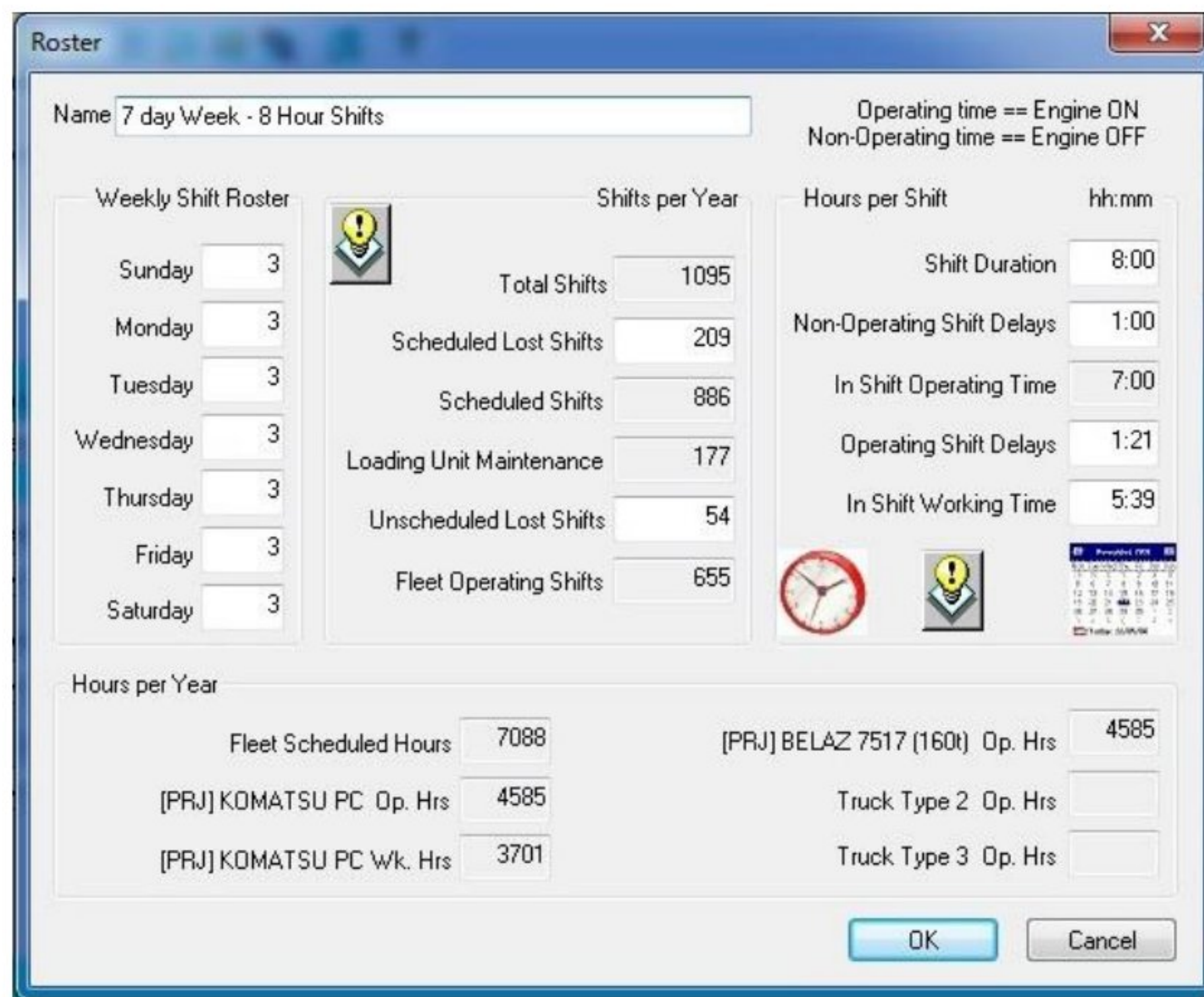


Tabela 5.2: Produktivnost i potreban broj kamiona

Tip kamiona	Nosivost (t)	Snaga motora (kW)	Proizvodnja po operativnom satu (t/h)	Potreban broj kamiona
Belaz 75581	90	895	137	29
Belaz 7513	110	1194	151	27
Belaz 7513R	136	1194	172	25
Belaz 7517	160	1492	244	19



Slika 5.3: Prikaz osnovnog panela softvera „Talpac“



Slika 5.4: Prikaz panela organizacije radnog vremena

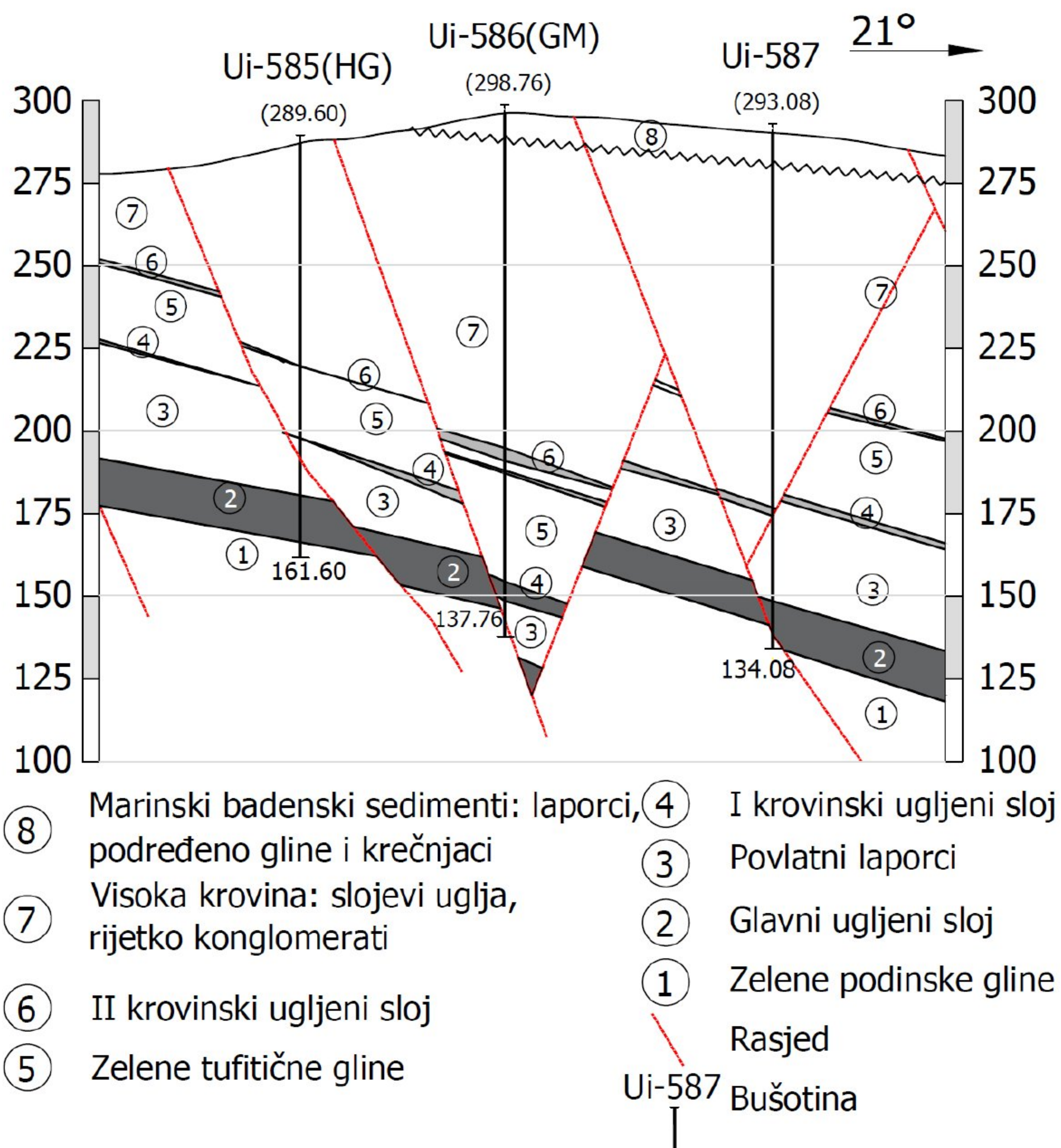


Production Summary - Full Simulation			
Haulage System: Jalovina_Trasa 1_2 GOD		Haul Cycle: [PRJ] JALOVINA_TRASA 1_2 GOD	
Material: [PRJ] Waste in Coal Mine		Roster: [PRJ] 7 day Week - 12 Hour Shifts	
<b>Loader</b>		[PRJ] KOMATSU PC 3000_16m3	
Availability	%	80,00	
Bucket Fill Factor		0,90	
Average Bucket Load Volume	cu.metres	13,72	
Average Payload	tonne	21,95	
Operating Hours per Year	OpHr/Year	5.628,00	Op. hrs factored by availability
Average Operating Shifts per Year	shifts/Year	536,00	Shifts factored by availability
Average Bucket Cycle Time	min	1,00	
Production per Operating Hour	tonne	1.171,41	
Production per Loader Operating Shift	tonne	12.300	Max. prod. based on 100% avail.
Production per Year	tonne	6.592.679	Avg. production factored by avail.
Wait Time per Operating Hour	min	1,73	
<b>Truck</b>		[PRJ] BELAZ 7517 (160t)	
Availability	%	100,00	
Payload in Template	tonne	148,46	
Operating Hours per Year	OpHr/Year	5.628,00	
Average Payload	tonne	151,05	
Production per Operating Hour	tonne	292,85	
Production per Loader Operating Shift	tonne	3.075	
Production per Year	tonne	1.648.170	
Queue Time at Loader	min/ Cycle	3,81	
Spot Time at loader	min/ Cycle	0,40	
Average Loading Time	min/ Cycle	5,88	
Travel Time	min/ Cycle	18,63	
Spot Time at Dump	min/ Cycle	0,30	
Average Dump Time	min/ Cycle	0,20	
Average Cycle Time	min/ Cycle	29,22	
Fleet Size		4	
Average No. of Bucket Passes		6,88	
<b>Haulage System</b>			
Production per Year	tonne/Year	6.592.679	
Discounted Capital Cost	\$/tonne	0,00	<b>Loading Methodology</b>
Discounted Operating Cost	\$/tonne	0,00	Single Sided
Discounted Average Cost	\$/tonne	0,00	Full Truck
Excavation Target	tonne	4.400.000,00	Average for 150 Shifts
Time to move Excavation Target	Days	243,77	
Loader Hrs to move Target	Op. Hours.	3.756	
Total Truck Hrs to move Target	Op. Hours.	15.025	
Total cost to move Target	\$	0	
<p>Productivity estimates allow for insufficient time at the end of the shift to complete another cycle.  Time for the first bucket pass coincides with the truck queuing and maneuvering times.  This simulation is based on data provided by the equipment manufacturer.  Equipment data should be checked to ensure it is valid for this site.</p>			

Slika 5.5: Prikaz panela izvještaja optimizacije

**Uslovi radne sredine i karakteristike ležišta** kao što su tip ležišta, dubina i ugao zaleganja ležišta, inženjersko-geološke karakteristike ležišta, imaju značajan uticaj na izbor odgovarajućeg tipa i veličine osnovne rudarske opreme. I pored toga što je fokus ovoga rada vezan za izbor optimalnog kamiona za transport jalovine, uslovi eksploatacije u ležištu u velikoj mjeri su određeni strukturom prisutnih ugljenih slojeva. U tom smislu važno je napomenuti da je geološka struktura ležištu uglja Ugljevik Istok 1, u velikoj mjeri kontrolisana prisustvom mnogobrojnih rasjeda (slika 5.6) što je čini izuzetno složenom (strmo zaleganje ugljenog sloja, velika raslojenost, gubitak kontinuiteta) (Milošević, A. i ostali, 2017). Ovakva struktura u značajnoj mjeri otežava proces eksploatacije sa aspekta stabilnosti i nosivosti tla, ali i potrebe za selektivnim otkopavanjem. Selektivno otkopavanje uglja i jalovine duž zona koje su zbog prisustva rasjeda, često malih površina i na taj način favorizuju opremu manjih gabarita, dok sa druge strane neophodnost otkopavanja velikih količina jalovine (odnosno visok koeficijent otkrivke) favorizuje visoko kapacitativnu opemu (Aykul i ostali, 2007).





Slika 5.6: Karakterističan geološki profil ležišta Ugljevik Istok 1 sa prikazom prisustva rasjeda (Milošević, A. i ostali, 2017)

**Kapitalni troškovi** odnosno cijena nabavke opreme, je veoma bitan faktor koji se razmatra tokom procesa planiranja i koji za cilj ima uravnotežavanja investicija sa očekivanom produktivnošću rudarske opreme. Velike investicije, kao što je nabavka kamiona velikih gabarita i nosivosti, često iziskuje uzimanje nepovoljnih kredita od banaka i u značajnoj mjeri negativno utiče na ekonomičnost projekta. Sa druge strane, kamioni manje nosivosti će imati manju nabavnu cijenu ali podržavaju i manju kapacitativnost, što iziskuje navaku većeg broja jedinica. Na ovaj način, kamioni manjih gabarita i nosivosti često mogu generisati veće kapitalne troškove. Efikasno upravljanje kapitalnim troškovima uz dostizanje odgovarajućeg nivoa produktivnosti i pouzdanosti opreme, od suštinskog je značaja za optimizaciju finansijskog učinka. Procjena kapitalnih troškova nabavke opreme, generalno se zasniva na definisanju zahtjeva kupca i analize tržišta proizvođača (Lizotte, 1988). U tabeli 5.3 date su pojedinačne cijene svakog kamiona kao i ukupni kapitalni troškovi potrebni za njihovu nabavku.



Tabela 5.3: Ukupni kapitalni troškovi nabavke kamiona

Tip kamiona	Nosivost (t)	Jedinična cijena (€)	Potreban broj kamiona	Ukupan kapitalni trošak kamiona (€)
Belaz 75581	90	1.270.000	29	36.830.000
Belaz 7513	110	1.400.000	27	37.800.000
Belaz 7513R	136	1.600.000	25	40.000.000
Belaz 7517	160	1.770.000	19	33.630.000

**Operativni troškovi** imaju jedan od najznačajnijih uticaja na profitabilnost, održivost i efikasnost rudarskih operacija. Operativni troškovi obuhvataju troškove angažovanja radne snage, troškove koji nastaju tokom rada opreme u procesu proizvodnje, kao i troškove održavanja opreme. Pomenuti troškovi nastaju tokom životnog vijeka rada opreme i u velikoj mjeri zavise od veličine opreme, broja angažovanih jedinica, obima korišćenja i kvaliteta održavanja. Procjena operativnih troškova zasnovana je na bazi iskustvenih podataka sa površinskog kopa Ugljevik Istok 1 kao i procjenama proizvođača opreme (Belaz, 2024).

U tabeli 5.4 dati su ukupni troškovi angažovanja radne snage prema tipu i potrebnom broju kamiona. Na osnovu podataka sa površinskog kopa, bruto troškovi angažovanja pojedinačnog vozača kamiona, procjenjeni su na 2.000 evra mjesečno. Troškovi radne snage, dati u tabeli 5.4, favorizuju upotrebu većih kamiona, jer su oni produktivniji zbog čega je neophodno angažovati manji broj kamiona odnosno potreban je manji broj vozača.

Tabela 5.4: Troškovi radne snage prema tipu kamiona

Tip kamiona	Nosivost (t)	Potreban broj kamiona	Potreban broj rukovaoca	Godišnji trošak radne snage (€/year)
Belaz 75581	90	29	145	3.480.000
Belaz 7513	110	27	135	3.240.000
Belaz 7513R	136	25	125	3.000.000
Belaz 7517	160	19	95	2.280.000

U tabeli 5.5. dati su ukupni troškovi materijala prema tipu kamiona. Troškovi su sračunati prema toni jalovine, a onda su pomnoženi sa ukupnim, planiranim godišnjim kapacitetom na jalovini ( $23 \times 10^6$  t) kako bi se dobili ukupni godišnji troškovi materijala.

Tabela 5.5: Troškovi materijala prema tipu kamiona

Tip kamiona	Nosivost (t)	Snaga motora (kW)	Gorivo (€/t)	Mazivo (€/t)	Gume (€/t)	Ukupno (€/t)	Ukupno godišnje (€/year)
Belaz 75581	90	895	0,520	0,026	0,016	0,562	12.917.000
Belaz 7513	110	1194	0,661	0,033	0,020	0,714	16.420.000
Belaz 7513R	136	1194	0,580	0,029	0,017	0,627	14.415.000
Belaz 7517	160	1492	0,511	0,026	0,015	0,552	12.698.000

**Složenost organizacije rada** u značajnoj mjeri raste usljed povećanja broja jedinica angažovanih na transportu otkopanog materijala. Veliki broj transportnih jedinica negativno utiče na kompleksnost i organizaciju rada, odnosno u ovim slučajevima može doći do pada



produktivnosti opreme usljed stvaranja uskih grla i zastoja, kao i usljed dodatnih gubitaka prilikom manavrisanja na mjestima utovara i istovara. Složena organizacija rada iziskuje značajniju logističku podršku, otežava proces održavanja a takođe otežava i proces upravljanja podacima i troškovima (Alarie i Gamache, 2002). Obzirom da složenost raste sa brojem kamiona, ovaj kriterijum favorizuje upotrebu većih kamiona. Sa druge strane, veći broj manjih jedinica (kamiona), povećava fleksibilnost procesa, što posebno ima značaja kada su u pitanju dinamička usklađenja pri napredovanju otkopnih frontova na uglju i jalovini neposredno iznad uglja, duž strukturno složenih zona, ograničene površine.

**Putna infrastruktura** je faktor koji po mnogo čemu utiče na izbor odgovarajućeg tipa i veličine kamiona. Kamioni veće nosivosti će, u skladu sa svojom konstrukcijom i gabaritima, zahtjevati puteve većih širina i sa većim radijusima krivina, a takođe i veću nosivost podloge puta. Izvođenje ovakvih puteva generiše veće troškove, koji rastu usljed nabavke kvalitetnijeg materijala kao i usljed većeg angažovanja pomoćne opreme na izradi i održavanju puteva. Putna infrastruktura i tip kamiona moraju biti međsobno usklađeni, odnosno moraju odgovarati jedno drugom u cilju povećanja produktivnosti opreme i minimiziranju rizika koji se javljaju u procesu proizvodnje (Thompson, 2010). U tabeli 5.6 date su potrebne širine puta kao i troškovi po metru dužnom puta, zavisno od tipa kamiona.

*Tabela 5.6: Troškovi izgradnje puta prema 1 m dužine, zavisno od tipa kamiona*

Tip kamiona	Nosivost (t)	Širina kamiona (m)	Širina puta (m)	Troškovi izgradnje 1 m' puta (€/m')
Belaz 75581	90	5,36	16,1	242
Belaz 7513	110	6,4	19,2	288
Belaz 7513R	136	6,4	19,2	288
Belaz 7517	160	6,9	20,7	311

Na osnovu izloženog izvršena je optimizacija izbora najpovoljnijeg kamiona u odnosu postojeći bager Komatsu PC3000. Optimizacija je rađena metodom višekriterijumskog odlučivanja. Za metodu je izabrana fazi AHP metoda ("fazi Analytic Hierarchy Process" - (FAHP)). Korištena metoda FAHP je detaljno opisana u poglavlju 4.1.

Kako je već navedeno, raspon nosivosti kamiona koji su analizirani u optimizaciji (90 t-160 t) usklađen je sa veličinom kopa, osobinama ležišta i potrebnim godišnjim kapacitetom na utovaru i transportu jalovine, a odluka da se razmatraju kamioni proizvođača Belaz je opravdana iskustvom u dosadašnjem radu, kao i postojećom infrastrukturom po pitanju održavanja, popravke i upravljanja vozilima. Na osnovu ovoga određene su alternative kako slijedi:

1. Belaz 75581 (A1),
2. Belaz 7513 (A2),
3. Belaz7513R (A3),
4. Belaz 7517 (A4).

Optimalno rješenje, iz skupa analiziranih kamiona, dobijeno je analiziranjem performansi bager - kamion sistema po više kriterijuma i to prema:

1. Produktivnost,
2. Putna infrastruktura (K1),



3. Složenost organizacije rada (K2),
4. Uslovi radne sredine i karakteristike ležišta (K3),
5. Operativni troškovi (K4),
6. Kapitalni troškovi (K5).

Kriterijum produktivnost je analiziran sa ciljem da se utvrdi mogućnost korištenja svih tipova kamiona na transportu jalovine. Analiza, primjenom softvera Talpac (Talpac-3D, RPM Global, 2023), je pokazala da svi razmatrani tipovi kamiona tehnički mogu da ostvare zadani obim transporta jalovine. Nakon definisanja produktivnosti za svaki tip kamiona pristupilo se optimizaciji analiziranjem preostalih pet kriterijuma.

Za razmatrane kriterijume na površinskom kopu Ugljevik Istok 1 definisan je njihov uticaj u skladu sa konkretnim uslovima. Kriterijumi nemaju jednak međusobni uticaj na nekom drugom površinskom kopu, odnosno konkretni kriterijumi i njihov uticaj su jedinstvena karakteristika svakog površinskog kopa.

Na osnovu definisanih kriterijuma i alternativa primjenjena je opisana metodologija fuzzy optimizacije. Proračuni su izvršeni u namjenski napravljenom programu „FUZZY-GWCS“ (Bajić i ostali, 2017), a ulazne elemente predstavljaju numeričke vrednosti lingvističkih varijabli. U tabeli 5.7 prikazane su vrijednosti matrica kriterijuma, a zatim i proračunate vrijednosti njihovih vektora težinskih prioriteta.

*Tabela 5.7: Analiza kriterijuma*

Kriterijum	K1			K2			K3			K4			K5			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
K1	1	1	1	1	2	3	2	3	4	4	5	6	5	6	7	0,215	0,348	0,550
K2	0,33	0,50	1	1	1	1	1	2	3	4	5	6	5	6	7	0,187	0,297	0,472
K3	0,25	0,33	0,50	0,33	0,50	1	1	1	1	3	4	5	4	5	6	0,142	0,222	0,354
K4	0,17	0,20	0,25	0,17	0,20	0,25	0,20	0,25	0,33	1	1	1	2	3	4	0,059	0,095	0,153
K5	0,14	0,17	0,20	0,14	0,17	0,20	0,17	0,20	0,25	0,20	0,33	0,50	1	1	1	0,028	0,038	0,056

U tabeli 5.8 date su ocjene alternativa u odnosu na svaki kriterijum. Takođe, prikazane su i vrijednosti težinskih prioriteta.

*Tabela 5.8: Analiza alternativa u odnosu na kriterijume*

Kriterijum	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
K1															
A1	1	1	1	0,25	0,33	0,50	0,25	0,33	0,50	0,17	0,20	0,25	0,057	0,081	0,130
A2	2	3	4	1	1	1	1	1	1	0,33	0,50	1	0,148	0,241	0,404
A3	2	3	4	1	1	1	1	1	1	0,33	0,50	1	0,148	0,241	0,404
A4	4	5	6	1	2	3	1	2	3	1	1	1	0,239	0,437	0,750



Kriterijum	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
K2															
A1	1	1	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	0,342	0,494	0,711
A2	0,25	0,33	0,50	1	1	1	2	3	4	5	6	7	0,202	0,300	0,445
A3	0,17	0,20	0,25	0,25	0,33	0,50	1	1	1	3	4	5	0,108	0,161	0,240
A4	0,11	0,13	0,14	0,14	0,17	0,20	0,20	0,25	0,33	1	1	1	0,035	0,045	0,059
K3															
A1	1	1	1	0,20	0,25	0,33	0,17	0,20	0,25	0,13	0,14	0,17	0,037	0,048	0,064
A2	3	4	5	1	1	1	0,25	0,33	0,50	0,17	0,20	0,25	0,111	0,166	0,249
A3	4	5	6	2	3	4	1	1	1	0,20	0,25	0,33	0,181	0,277	0,418
A4	6	7	8	4	5	6	3	4	5	1	1	1	0,352	0,509	0,738
K4															
A1	1	1	1	0,14	0,17	0,20	0,20	0,25	0,33	1	2	3	0,061	0,108	0,180
A2	5	6	7	1	1	1	3	4	5	5	6	7	0,365	0,538	0,793
A3	3	4	5	0,20	0,25	0,33	1	1	1	3	4	5	0,188	0,293	0,449
A4	0,33	0,50	1	0,14	0,17	0,20	0,20	0,25	0,33	1	1	1	0,044	0,061	0,100
K5															
A1	1	1	1	0,33	0,50	1	0,20	0,25	0,33	3	4	5	0,127	0,200	0,329
A2	1	2	3	1	1	1	0,20	0,25	0,33	3	4	5	0,146	0,253	0,418
A3	3	4	5	3	4	5	1	1	1	4	5	6	0,309	0,488	0,762
A4	0,20	0,25	0,33	0,20	0,25	0,33	0,17	0,20	0,25	1	1	1	0,044	0,059	0,086

U narednom koraku su proračunate konačne vrijednosti svih alternativa u vidu trougaonog fazi broja, zatim konačne vrijednosti „težina“ alternativa u vidu ne-fazi broja kao i vrijednosti optimizacionog indeksa i prikazane su u tabeli 5.9.

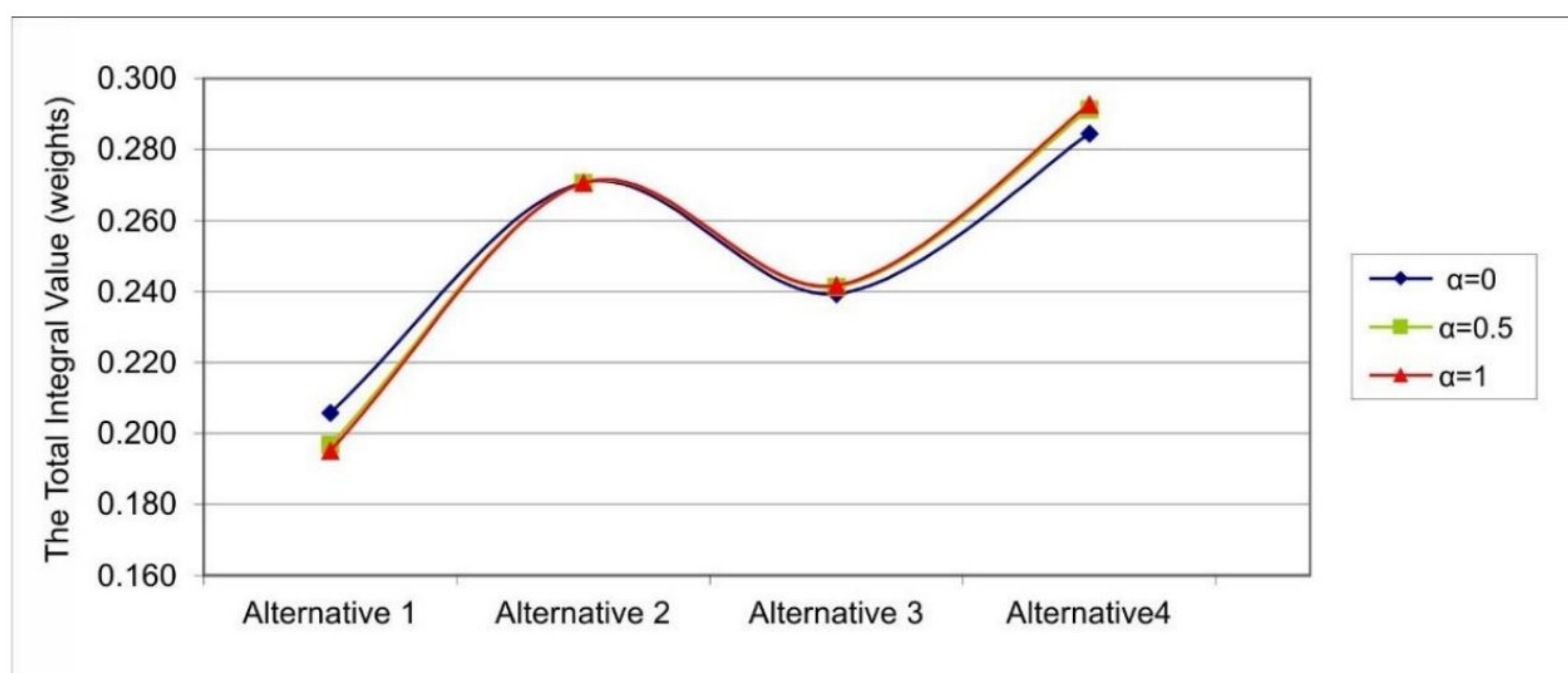
Tabela 5.9: Rangiranje i izbor optimalne metode

	FUZZY BROJ			VREDNOST VEKTORA TEŽINSKOG PRIORITETA	FINALNO RANGIRANJE	ANALIZA OSETLJIVOSTI		
	L	S	D			$\alpha=0,0$	$\alpha=0,5$	$\alpha=1,0$
A1	0,014	0,068	0,340	0,194	4	0,206	0,197	0,195
A2	0,017	0,090	0,476	0,271	2	0,271	0,271	0,271
A3	0,015	0,080	0,426	0,242	3	0,239	0,241	0,242
A4	0,017	0,096	0,517	0,294	1	0,284	0,291	0,293



Na slici 5.7 je prikazana ukupna integralna vrijednost za umjereno, pesimistično i optimistično procjenjivanje rizika stručnjaka, odnosno težine alternativa u odnosu na vrijednosti parametra optimizacionog indeksa. Uzimajući u obzir optimistički stav ( $\alpha=1$ ) donosioca odluke, težine alternativa se mijenjaju u jako malom opsegu u odnosu na pesimistički ( $\alpha=0$ ) i umjereni ( $\alpha=0,5$ ) stav eksperta. Prosječno za sve alternative, prema analizi osjetljivosti, razlike u težinama variraju u opsegu od 0,00-1,03 % za vrijednost optimizacionog indeksa od 0,5, a sa druge strane, u opsegu od 0,00-5,64 % za vrijednost optimizacionog indeksa od 0.

Na osnovu interpretiranih rezultata analize može se zaključiti da je „najbolja“ ocjena predstavljena najvišom vrijednosti „težine“ alternative. Zaključno, za optimalnu varijantu, tj. optimalni sistem transporta i optimalne mehanizacije predlaže se alternativa broj 4 (kamion Belaz 7517 – nosivosti 160 t). Na drugom mjestu nalazi se alternativa broj 2, a kao najnepovoljnije rješenje je alternativa pod brojem 1.



*Slika 5.7: Ukupna integralna vrijednost za umjereno, pesimistično i optimistično procjenjivanje rizika stručnjaka*

Izbor najpovoljnijeg kamiona za rad u sistemu sa postojećim bagerom Komatsu PC3000, analiza uslova radne sredine sa definisanjem alternativa i kriterijuma, opis metodologije i prikaz dobijenih rezultata je predstavljen u naučnom radu „Development of integrated model for open-pit mine discontinuous haulage system optimization“ i preuzet u doktorskoj disertaciji, a koji je rađen za potrebe iste.

## **5.2. PRIMJER UPOTREBE – STUDIJA SLUČAJA NA EKSPLOATACIONOM POLJU BEŠPELJ**

Primjenjivost modela optimizacije je upotrijebljena i u eksploatacionom polju Bešpelj kod Jajaca – BiH. U ovom eksploatacionom polju se vrši eksploatacija boksita. Eksploataciono polje Bešpelj se sastoji od niza manjih ležišta boksita: L-20, L-24, L-25, L-26, L-27, L-29C, L-34 i L-35. Eksploataciono polje se nalazi u centralnom dijelu Bosne i Hercegovine, odnosno pripada entitetu Federacija Bosne i Hercegovine.

Na upravljanje u rudarstvu metalnih i nemetalnih mineralnih sirovina, generalno, utiču kriterijumi tehničko, ekonomske, ekološko, sigurnosne priorode. Prvo i osnovno pitanje koje se javlja prilikom planiranja eksploatacije rudnih ležišta je: koje metode su adekvatne za otkopavanje rudnika i koja od tih metoda je optimalna? Zbog neizvjesnosti, neodređenosti i nepreciznosti koje su postale sinonim prilikom geoloških istraživanja rudnih ležišta, sve više se daje na značaju iskustvima eksperta, kao i subjektivnim procjenama inženjera. Kako je prirodan



jezik koji koriste rudari i geolozi najpogodniji za izražavanje znanja i mišljenja pa je testirana metodologija fazi optimizacije koja koristi lingvističke varijable. Njima se, dodjeljivanjem numeričkih vrijednosti iz relativne skale važnosti, ocjenjuju pomenuti kriterijumi, a zatim vrše matematički proračuni i donosi odluka o optimalnom alternativnom rješenju otkopavanja u rudniku. Cijeli ovaj postupak čini integralni sistem upravljanja na rudnicima, koji u budućnosti doprinosi održivosti proizvodnje. Prikazana je studija slučaja gdje je primjenjen pomenuti model.

Eksploatacija ležišta eksploatacionog polja Bešpelj se vrši, u zavisnosti od položaja rudnih tijela, površinskom ili podzemnom eksploatacijom, a u nekim slučajevima ležište se eksploatiše dijelom površinskom, a dijelom podzemnom eksploatacijom.

Na ovom primjeru razmatrana je mogućnost primjene metode pri izboru sistema eksploatacije u slučajevima potrebe formiranja integralnog modela, odnosno kada je prilikom izbora metode potrebno uzeti u obzir mnoge faktore od kojih se neki ne mogu izraziti vrijednosnim jedinicama.

U slučaju ležišta boksita eksploatacionog polja Bešpelj radi se o malim ležištima kraćeg vijeka eksploatacije, u nekim slučajevima i od nekoliko godina, što uslovljava moguće alternative odabira jer je neophodno moguću metodu otkopavanja prilagoditi mogućnostima primjene i postojećim metodama koje se primjenjuju na drugim ležištima na kojima Investitor vrši eksploataciju. Prilagođavanje kriterijuma metodama koje se primjenjuju je neophodno zbog postojanja opreme i mehanizacije, a i ništa manje bitno postojećem broju obučenih radnika na primjeni pojedinih metoda.

Na osnovu ovoga neophodno je formirati intergralni model u kojem će se moći porediti faktori koji se mogu izraziti vrijednosnim jedinicama i faktori koji se ne mogu izraziti vrijednosnim jedinicama. Ovako formiranim modelom neophodno je uzeti u obzir prirodne, eksploatacione kao i organizacione faktore važne za izbor optimalne metode – alternative.

Prirodni uslovi su bili preduslov za izbor optimalne metode otkopavanja. Ležište boksita L-29C, ima moćnost od 0,3 pa do 34 m i više, nepravilnih kontura prema okolnoj stijeni, sa uslovno stabilnom (nestabilnom) rudom i stabilnom podinom i krovinom, uglom zalijeganja skoro vertikalnim, odnosno preko 80°. Ležište se nalazi plitko u odnosu na površinu terena, dubine oko 100 m, sa dosta kvalitetnom rudom boksita. Na osnovu prirodnih uslova optimizacije, kao prvi korak, razmatrana je mogućnost primjene površinske ili podzemne eksploatacije. U prvom koraku izvršena je analiza veličine ležišta (rezerve), vrijednosti ležišta, položaja ležišta, osobina rude i okolnih stijena nakon čega je zaključeno da se na eksploataciji ležišta L-29C ne može rentabilno primjeniti površinska eksploatacija. Sledeći korak je bio definisanje metoda otkopavanja odnosno definisanje– alternativa. Razmatrane alternative su slijedeće:

- A1- Magacinska metoda otkopavanja,
- A2- Metoda podetažnog otkopavanja
- A3- Metoda podetažnog otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora i
- A4- Komorno-stubna metoda etažnog otkopavanja.

Za slučaj ležišta boksita L-29 C kao kriterijumi su razmatrani:

- K1 - troškovi eksploatacije,
- K2 - sigurnost i zdravi uslovi pri radu,
- K3 - iskorištavanje rudnih rezervi prilikom otkopavanja i
- K4 - koeficijent osiromašenja rude pri otkopavanju.



Na osnovu definisanih kriterijuma i alternativa primjenjena je opisana metodologija fazi optimizacije. Proračuni su izvršeni u namjenski napravljenom programu „FUZZY-GWCS“ (Bajić i ostali, 2017), a ulazne elemente predstavljaju numeričke vrijednosti lingvističkih varijabli.

U tabeli 5.10 prikazane su vrijednosti matrica kriterijuma, a zatim i proračunate vrijednosti njihovih vektora težinskih prioriteta.

Tabela 5.10: Analiza kriterijuma

Kriterijum	K1			K2			K3			K4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
K1	1	1	1	4	5	6	4	5	6	6	7	8	0,375	0,538	0,774
K2	0,17	0,2	0,25	1	1	1	2	3	4	4	5	6	0,179	0,275	0,415
K3	0,17	0,2	0,25	0,25	0,33	0,5	1	1	1	2	3	4	0,085	0,135	0,212
K4	0,13	0,14	0,17	0,17	0,2	0,25	0,25	0,33	0,5	1	1	1	0,038	0,051	0,071

U tabelama 5.11, 5.12, 5.13 i 5.14 date su ocjene alternativa u odnosu na svaki kriterijum. Takođe, prikazane su i vrijednosti težinskih prioriteta.

Tabela 5.11: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K1

Kriterijum K1	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
A1	1	1	1	0,33	0,5	1	0,25	0,3	0,5	1	2	3	0,086	0,176	0,372
A2	1	2	3	1	1	1	1	2	3	1	2	3	0,134	0,324	0,677
A3	2	3	4	0,33	0,5	1	1	1	1	3	4	5	0,212	0,394	0,744
A4	0,33	0,5	1	0,33	0,5	1	0,2	0,25	0,3	1	1	1	0,062	0,104	0,225

Tabela 5.12: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K2

Kriterijum K2	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
A1	1	1	1	0,33	0,5	1	0,25	0,3	0,5	1	2	3	0,085	0,165	0,332
A2	1	2	3	1	1	1	3	4	5	2	3	4	0,231	0,435	0,786
A3	2	3	4	0,2	0,25	0,33	1	1	1	2	3	4	0,171	0,315	0,564
A4	0,25	0,3	0,5	0,25	0,3	0,5	0,25	0,3	0,5	1	1	1	0,057	0,082	0,151



Tabela 5.13: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K3

Kriterijum K3	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
	1	1	1	0,33	0,5	1	0,25	0,3	0,5	0,3	0,5	1	0,061	0,098	0,210
A2	1	2	3	1	1	1	1	2	3	0,2	0,25	0,33	0,102	0,225	0,440
A3	2	3	4	0,33	0,5	1	1	1	1	0,2	0,25	0,33	0,113	0,203	0,381
A4	1	2	3	3	4	5	3	4	5	1	1	1	0,256	0,472	0,841

Tabela 5.14: Analiza alternativa u odnosu na kriterijum K4

Kriterijum K4	A1			A2			A3			A4			Vrijednosti težinskih koeficijenata		
	1	1	1	1	2	3	0,25	0,3	0,5	1	2	3	0,114	0,267	0,581
A2	0,33	0,5	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	0,116	0,277	0,620
A3	2	3	4	0,33	0,5	1	1	1	1	0,3	0,5	1	0,128	0,252	0,542
A4	0,33	0,5	1	0,33	0,5	1	1	2	3	1	1	1	0,093	0,202	0,465

U narednom koraku proračunate su konačne vrijednosti svih alternativa u vidu trougaonog fazi broja, zatim konačne vrijednosti „težina“ alternativa u vidu ne-fazi broja kao i vrijednosti optimizacionog indeksa i prikazane su u tabeli 25.

Tabela 5.15: Rangiranje i izbor optimalne metode

	FAZI BROJ			VRIJEDNOST VEKTORA TEŽINSKOG PRIORITETA	FINALNO RANGIRANJE
	L	S	D		
A1	0,008	0,055	0,366	0,176	3
<b>A2</b>	<b>0,016</b>	<b>0,113</b>	<b>0,706</b>	<b>0,342</b>	<b>1</b>
A3	0,019	0,113	0,664	0,325	2
A4	0,009	0,051	0,320	0,155	4

Na osnovu interpretiranih rezultata analize može se zaključiti da je „najbolja“ ocjena predstavljena najvišom vrijednosti „težine“ alternative. Zaključno, za optimalnu varijantu, tj. optimalnu metodu otkopavanja za razmatrano ležište predlaže se alternativa broj 2 (metoda podetažnog otkopavanja). Na drugom mjestu nalazi se alternativa broj 3, a kao najnepovoljnije rješenje je alternativa pod brojem 4.

Rezultati analize izbora metode otkopavanja ležišta boksita L-29C u eksploatacionom polju Bešpelj kod Jajca prikazani su u naučnom radu „Development of integrated fuzzy model for mine management optimization“ (Čelebić i ostali, 2023).



## 6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Rudarstvo kao bazična industrija, sa preduslovom postojanja mineralnih sirovina, može biti pokretač razvoja mnogih zemalja. Povećana potražnja za metalnim, nemetalnim i energetskim mineralnim sirovinama, opadanje kvaliteta ležišta i pojačana zaštita životne sredine su glavne osobine savremene rudarske proizvodnje.

Smanjenje kvaliteta ležišta zahtjeva eksploataciju veće količine mineralne sirovine za postizanje jednakih efekata proizvodnje kako količine metala tako i energetske vrijednosti. Ako se na ovo doda i povećana tržišna potražnja može se zaključiti da se uslovi eksploatacije mineralnih sirovina usložnjavaju.

Jedna od većih negativnih posljedica jeste povećanje kontura kao i samo produbljavanje površinskih kopova. Povećanje završnih kontura površinskih kopova ima za cilj zahvatanje većih količina mineralne sirovine sa slabijim kvalitetom. Veći zahvati mineralne sirovine imaju za posljedicu povećanje koeficijenta otkrivke odnosno povećanje radova na otkopavanju, transportu i odlaganju jalovine.

Za postizanje većeg obima proizvodnje neophodno je izvršiti prilagođavanje postojećih sistema eksploatacije novim uslovima što se obezbjeđuje optimizacijom kako dijela tako i cijelog procesa proizvodnje. Jedan od najkorištenijih sistema eksploatacije je transportni sistem uz korištenje utovarne jedinice – bagera i transportne jedinice – kamiona. Intenzivan razvoj rudarske mehanizacije za otkopavanje, transport i odlaganje i veći obim radova na eksploataciji (na svjetskom nivou se radi o količini jalovine od više desetina milijardi tona) aktuelizovali su optimizaciju diskontinualnih sistema eksploatacije, a samim tim i optimizaciju sistema bager-kamion.

Od mnogobrojne mehanizacije, kako po veličini tako i po proizvođaču, veoma važno je odabrati optimalni tip mehanizacije jer rudarska proizvodnja pored ostvarenih prihoda nosi i velike troškove kako kapitalne tako i operativne. Kako kapitalni i operativni troškovi mehanizacije značajno (operativni troškovi utovarno-transportnih sistema čine 60% ukupnih troškova na površinskom kopu (Ercelebi i Bascetin, 2009)) učestvuju u troškovima eksploatacije sama optimizacija mehanizacije predstavlja jedan od najznačajnijih procesa pri donošenju odluke pri izboru, kako na početku tako i pri obnovi i unifikaciji tokom cijelog vijeka.

Izbor optimalne mehanizacije u diskontinualnom sistemu transporta je jedan od kompleksnijih zadataka rudarskog inženjerstva. Za donošenje ove odluke neophodno je što pouzdanije poznavanje svih potrebnih parametara proizvodnje na površinskom kopu. Prikupljanje potrebnih parametara proizvodnje predstavljaju dodatni trošak i veoma često se zanemaruje, a što dovodi do toga da se zbog nedostatka adekvatnih informacija pristupi optimizaciji koja ne obuhvata sve relevantne faktore. Veoma često se prilikom optimizacije uzimaju najvažniji faktori kao što su kapitalni i operativni troškovi uz zanemarivanje ostalih faktora koji, manjim ali i ne beznačajnim obimom, utiču na izbor optimalnog rješenja. Prilikom optimizacije neophodno je uzeti u obzir zakonsku regulativu kojoj podliježe predmetni površinski kop i standarde, kako lokalne tako i svjetske.

U ovom radu su analizirani uslovi za određivanje optimalnog kamiona za rad sa unaprijed definisanom utovarnom jedinicom (bagerom). Izbor kriterijuma koji su korišteni u modelu optimizacije definisan je na osnovu karakteristika ležišta, uslova radne sredine, putne infrastrukture, složenosti organizacije rada, operativnih troškova i kapitalnih troškova.



Primjenom FAHP metode za optimizaciju formiran je integralni model sposoban da optimizuje izbor optimalne mehanizacije u diskontinualnom sistemu transporta. Model podrazumeva definisanje kriterijuma od značaja za razmatranu tehnološku operaciju utovara i transporta, kao i alternativa, čime se formiraju uslovi za dalje proračune iz kojih se dobijaju varijantna, a zatim i optimalno rješenje. Prilikom definisanja kriterijuma neophodno je uzeti u obzir faktore različite prirode kao što su geološki kriterijumi, tehnološki, ekonomski, ekološki i zakonodavni.

Proces eksploatacije na površinskim kopovima se razlikuju u zavisnosti od tipa mineralne sirovine, geoloških karakteristika ležišta, geografskih karakteristika ležišta i okolnog područja i političkih i socijalnih prilika lokalne sredine i karakteristična su i u nekoj mjeri i jedinstvena za svaki površinski kop. Na osnovu navedenog, prilikom definisanja kriterijuma neophodno je uzeti u obzir sve relevantne kriterijume uz prilagođavanje uticaja pojedinačnih faktora na konkretan površinski kop.

Ovaj model se ogleda u objedinjavanju različitih faktora (kriterijuma), odnosno faktora koji se mogu izraziti numerički i faktora koji se izražavaju opisno, odnosno lingvističkim varijablama. Metoda FAHP se karakteriše po tome da se svaki problem rješava postupno, do postizanja cilja, bazirana na iskustvu eksperata i procjenjivanju prioriteta prilikom rješavanja problema.

Na osnovu izvršene optimizacije izbora kamiona za potrebe rada sistema bager - kamiona na površinskom kopu Ugljevik Istok 1, a na osnovu definisanog integralnog modela optimizacije, može se zaključiti da je alternativa A4 (kamion Belaz 7517 – 160 t) optimalna. Na osnovu dobijenog rezultata može se zaključiti da je potrebno, prilikom nabavke novih kamiona, vršiti nabavku većih kamiona za rad na transportu otkrivke, u odnosu na tip kamiona koji se koristi za eksploataciju uglja.

Ovaj model se pokazao izuzetno efikasan pri izboru tipa kamiona prilikom optimizacije sistema bager-kamion i može naći odličnu primjenu na mnogobrojnim površinskim kopovima na kojima treba da se bira tip kamiona ili gdje se već primjenjuje sistem bager - kamion, a u slučajevima gdje je neophodno integralno sagledavanje odnosno kada je potrebno obuhvatiti što veći broj uticajnih faktora koji se ne mogu izraziti numerički za proces poređenja. Na konkretnom primjeru, gdje je obrađena studija slučaja, model se može iskoristiti za dokazivanje optimalne alternative pri obnovi kamionske flote ili pri planskom unificiranju veličine kamiona na eksploataciji otkrivke.

Primjena dobijenog modela ima mnogo prednosti ali u velikoj mjeri zavisi od parametara koji se izučavaju na površinskom kopu. Iz ovog razloga neophodno je kontinuirano praćenje proizvodnje i evidentiranje informacija koje se mogu koristiti pri formiranju kriterijuma ocjene na konkretnom površinskom kopu ili primjeniti pri optimizaciji sistema bager-kamion kod novih površinskih kopova sa sličnim radnim uslovima. Razvijeni model je univerzalan u smislu da se može primjeniti i na svim površinskim kopovima gdje se primjenjuje sistem bager - kamion uz korekciju odnosa kriterijuma ocjene za konkretan slučaj.

U disertaciji je obrađeno i ležište boksita L-29C eksploatacionog polja Bešpelj kao studija slučaja u kojem je analogijom primjenjenog modela iz studije slučaja – površinski kop Ugljevik Istok 1 obrađena integralna optimizacija izbora metode eksploatacije. Pošto je poznato da ne postoje dva ista ležišta tako i izbor metode eksploatacije mora biti prilagođen konkretnom ležištu. Pored tehničkih parametara primjenjivosti metode eksploatacije i prirodnih uslova ležišta koja ograničavaju primjenu nekih od metoda neophodno je uzeti u obzir i podatke o trenutno korištenoj metodi i mehanizaciji Investitora koji radi na drugim ležištima jer je u konkretnom slučaju riječ o malim ležištima čiji je vijek eksploatacije kratak. Prilikom prelaska na novo ležište veoma je važno, ukoliko je tehnički moguće, iskoristiti postojeću mehanizaciju i



primjeniti korištene metode jer se u zadnje vrijeme pojavljuje jedan ograničavajući faktor, a to je postojanje kvalifikovane radne snage kao i radne snage koja se uopšte može angažovati na poslovima u rudarstvu.

Na osnovu iznesenog može se zaključiti da je neophodno vršiti kontinuirana praćenja kompletne rudarske proizvodnje i sistematično čuvanje podataka kako bi se u narednom periodu moglo pristupiti formulisanju novih faktora i njihovih odnosa za buduća istraživanja u cilju optimizacije cjelokupne proizvodnje.



## LITERATURA

Akkaya, G., Turanolu, B., Özta, S., (2015), An integrated fuzzy AHP and fuzzy MOORA approach to the problem of industrial engineering sector choosing, *Expert Systems with Applications*, 42, 24, 9565–9573. DOI:10.1016/j.eswa.2015.07.061

Alarie, S., Gamache, M., (2002), Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16, 1, 59-76. DOI:10.1076/ijsm.16.1.59.3408 [CrossRef]

Almeida-Dias, J., Figueira, J. R., Roy, B., (2010), Electre Tri-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions, *European Journal of Operational Research*, 204, 3, 565–580. DOI:10.1016/j.ejor.2009.10.018

Almeida-Dias, J., Figueira, J. R., Roy, B., (2012), A multiple criteria sorting method where each category is characterized by several reference actions: The Electre Tri-nC method. *European Journal of Operational Research*, 217, 3, 567–579. DOI:10.1016/j.ejor.2011.09.047

Arsentjev A. I. (1981): Вскрытие и системы разработки карьерных полей „Недра“, Москва.

Aykul, H., Yalcin, E., Ediz, I.G., Dixon-Hardy, D.W., Akcakoca, H., (2007), Equipment selection for high selective excavation surface coal mining, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 195–210.

Bajić D. (2015). Fazi optimizacija u hidrodinamičkoj analizi za potrebe projektovanja Sistema odbrane od podzemnih voda. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet. Doktorska disertacija.

Bajić D., (2016) Fuzzy optimization in the hydrodynamic analysis for the purposes of groundwater control system design, Doctoral dissertation, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 296 pp. [CrossRef]

Bajić D., Polomčić D., Ratković J., (2017), Multi-criteria decision analysis for the purposes of groundwater control system design, *Water Resources Management*, 31, 15, 4759-4784. DOI:10.1007/s11269-017-1777-4 [CrossRef]

Bajić S., Bajić D., Gluščević B., Ristić Vakanjac V., (2020), Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Underground Mining Method Selection, *Symmetry*, 12, 2, 192. DOI:10.3390/sym12020192 [CrossRef]

Bajić, S., Bajić, D., Gluščević, B., Ristić Vakanjac, V., (2020), Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Underground Mining Method Selection, *Symmetry*, 12, 2, 192. DOI:10.3390/sym12020192

Bajić. D., Polomčić. D., (2014), Fuzzy optimization in hydrodynamic analysis of groundwater control systems: Case study of the pumping station “Bezdan 1”, Serbia, *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*, 75, 103-110. DOI:10.2298/GABP1475103B

Banković, M., (2018), Optimizacija utovarno-transportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.



Bascetin, A., (2004), Technical note, An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine, *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 113, 3. DOI:10.1179/037178404225004968

Bascetin, A., Kesimal, A., (1999), The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13, 3, 97–101. DOI:10.1080/09208119908944224

Bazzazi A.A., Osanloo, M., Karimi, B., (2009-1), Selecting the Suitable Loading-Haulage Equipment in Open Pit Mines by Fuzzy AHP method

Bazzazi, A.A., Osanloo, M., Karimi, B., (2009-2) Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach, *Archives of Mining Sciences*, 54, 301-320.

Bazzazi, A.A.; Osanloo, M.; Karimi, B., (2011), A new fuzzy multi criteria decision making model for open pit mines equipment selection, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 28, 3, 279–300. DOI:10.1142/S0217595911003247

Bazzazi, A.A.; Osanloo, M.; Karimi, B., (2011), A new fuzzy multi criteria decision making model for open pit mines equipment selection, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2011, 28, 03, 279-300. DOI:10.1142/S0217595911003247 [CrossRef]

Belaz technical characteristics of mining dump trucks, (2024), Available at <https://belaz.by/en/products/products-belaz/dumpers/>. [CrossRef]

Bellman, R. E., Zadeh, L. A., (1970), Decision Making Fuzzy Environment. *Management Science*, 17, 4, 141–164. DOI:10.1287/mnsc.17.4.B141

Belton, V., Stewart, T. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis An Integrated Approach*. DOI:10.1007/978-1-4615-1495-4

Benayoun, R., Roy, B., Sussman, N., (1966), ELECTRE: Une methode pour guider le choix en presence de points de vue multiples. Report SEMA-METRA International, Direction Scientifique.

Bodziony, P.; Kasztelewicz, Z.; Sawicki, P., (2016), The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks, *Archives of Mining Sciences*, 61, 2, 223-243. DOI:10.1515/amsc-2016-0017 [CrossRef]

Boender, C. G. E., De Graan J. G., Lootsma, F. A., (1989), Multiple-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons, *Fuzzy Sets and Systems*, 29, 2, 133–143. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(89\)90187-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(89)90187-5)

Bouyssou D., Marchant T., Pirlot M., Perry P., Tsoukias A., Vincke P. (2000). *Evaluation Models, A Critical Perspective*, 274, Boston: Kluwer.

Brans, J. P., (1982), *Lingenierie de la Decision. Elaboration DinstrumentsDaide a la Decision, Methode PROMETHEE* In: Nadeau, R., Landry, M. (Eds.), *Laide a la Decision: Nature, Instruments et Perspectives Davenir*, 1982, 183-214.

Brans, J. P., Vincke, P., (1985), A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*, 31, 6, 647–656. DOI:10.1287/mnsc.31.6.647



- Brans, J., & Mareschal, B. (1992). PROMETHEE V MCDM problems with segmentation constraints. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 30, 1992.
- Brans, J., & Mareschal, B. (1995), The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems, *Journal of Decision Systems*, 4, 3, 213–223. DOI:10.1080/12460125.1995.10511652
- Brans, J., Vincke, P., Mareschal, B., (1986), How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method, *European Journal of Operational Research*, 24, 2, 228–238. DOI:10.1016/0377-2217(86)90044-5
- Brans, J-P., Mareschal, B., Vincke, P., (1984), “PROMETHEE: A new Family of Outranking Methods in MCDM,” In: Brans, J. P. Ed., *Operational Research’84 (IFORS’84)*, 477-490.
- Buckley, J. J., (1985), Fuzzy hierarchical analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, 17, 3, 233–247. DOI:10.1016/0165-0114(85)90090-9
- Chang D.Y. (1992), Extent analysis and synthetic decision, In *Optimization Techniques and Applications*, 1, 352 pp. Singapore: World Scientific.
- Chang, D.-Y., (1996), Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95, 3, 649-655. DOI:10.1016/0377-2217(95)00300-2
- Chang, D.-Y., (1996), Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP(Article), *European Journal of Operational Research*, 95, 3, 649-655. DOI:10.1016/0377-2217(95)00300-2
- Chen, S. M., (1996), Forecasting enrollments based on fuzzy time series, *Fuzzy Sets and Systems*, 81, 3, 311–319. DOI:10.1016/0165-0114(95)00220-0
- Chen, S.-J., Hwang, C.-L., Hwang, F. P., (1992), Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods. In: *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 375. DOI:10.1007/978-3-642-46768-4\_5
- Chen, S.J., Hwang, C.L. (1992). Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods. In: *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 375. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4_5)
- Choi, Y. S.; Park, H. D.; Sunwoo, C., (2015), Multi-Criteria Evaluation and Least Cost Path Analysis for Optimal Haulage Routing in Open-Pit Mines. Seoul National University, South Korea.
- Choi, Y.; Park, H.D.; Sunwoo, C.; Clarke, K.C., (2009), Multi-criteria evaluation and least-cost path analysis for optimal haulage routing of dump trucks in large scale open-pit mines, *International Journal of Geographical Information Science*, 23, 12, 1541-1567. DOI:10.1080/13658810802385245 [CrossRef]
- Corrente, S., Greco, S., Sowiski, R., (2013), Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE, *Omega*, 41, 5, 820–846. DOI:10.1016/j.omega.2012.10.009
- Čelebić, M.; Bajić, S.; Bajić, D.; Stevanović, D.; Torbica, D.; Malbašić, V., (2023), Development of integrated fuzzy model for mine management optimization. *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 76, 9, 1413-1420. DOI:10.7546/CRABS.2023.09.12



Del Vasto-Terrientes, L., Valls, A., Slowinski, R., Zielniewicz, P., (2015), ELECTRE-III-H: An outranking-based decision aiding method for hierarchically structured criteria, *Expert Systems with Applications*, 42, 11, 4910–4926. DOI:10.1016/j.eswa.2015.02.016

Deng H., (1999), Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning*, 21, 215-231. DOI:10.1109/FUZZY.1999.793038 [CrossRef]

Deng H., (1999), Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning*, 21, 3, 215-231. DOI:10.1016/S0888-613X(99)00025-0

Dey, S.; Mandal, S. K.; Bhar, C., (2022), Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation-A case study, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122, 10, 597-606. DOI:10.17159/2411-9717/1075/2022 [CrossRef]

Dindarloo, S.R.; Osanloo, M.; Frimpong, S., (2015), A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115, 3, 209-219. [CrossRef]

Doderovic, A., Doderovic S-M., Stepanovic, S., Bankovic, M, Stevanovic, D., (2023), Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining, *Minerals*, 13, 11. 1401. DOI:10.3390/min13111401

Dodgson, J. S., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L.D. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*, Department for Communities and Local Government: London, 165.

Dubois D. & Prade H. (1998). *Soft computing, fuzzy logic, and artificial intelligence. Soft computing*, 2, 7-11. DOI:10.1007/s005000050025

Dziubak, T., Wysocki, T., Dziubak, S., (2021), Selection of vehicles for fleet of transport company on the basis of observation of their operational reliability, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 23, 1, 184-194. DOI:10.17531/ein.2021.1.19 [CrossRef]

Đenadić, S., Jovančić, P., Ignjatović D., Miletić, M., Janković, I., (2019), Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidruličnih bagera na površinskim kopovima uglja *TEHNIKA – RUDARSTVO, GEOLOGIJA I METALURGIJA*, 70, 3., DOI:10.5937/tehnika1903369D

Ercelebi, S. G.; Bascetin, A., (2009), Optimization of shovel-truck system for surface mining, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109, 7, 433-439. [CrossRef]

Ercelebi, S.G., Bascetin, A., (2009), Optimization of shovel-truck system for surface mining, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109, 7, 433-439.

Ericsson, M., Löf, O., (2019), Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32, 223–250; DOI:10.1007/s13563-019-00191-6 [CrossRef]

Farkaš, B., Hrastov, A., (2021), Multi-Criteria Analysis for the Selection of the Optimal Mining Design Solution—A Case Study on Quarry “Tambura”, *Energies*, 14, 11, 3200. DOI:10.3390/en14113200



Fedrizzi, M., Krejčí, J., (2015), A Note on the Paper “Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Fallacy of the Popular Methods”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 23, 06, 965–970. DOI:10.1142/s0218488515500440

Figueira, J., Mousseau, V., Roy, B., (2005), ELECTRE Methods. In J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys International Series in Operations Research & Management Science book section 133-153*. Springer New York.

Guo Q., Guo G., Li Y., Lei W., Zhao X., (2019), Stability Evaluation of an Expressway Construction Site above an Abandoned Coal Mine Based on the Overlay and Index Method, *Sustainability*, 11, 19, 5163. DOI:10.3390/su11195163.

Guo, C.; Wu, J.; Feng, Y.; Wang, X.; Wang, Y., (2023), Mining Electric Shovel Working Device Configuration Synthesis and Performance Analysis, *Actuators*, 2023, 12, 8, 317. DOI:10.3390/act12080317 [CrossRef]

<https://www.komatsu.com/en/products/excavators/surface-mining-excavators/pc3000-11/>

Hwang, C.-L., Yoon, K., (1981), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. New York: Springer-Verlag.

Ignjatović, D., (2012), *Mašine za površinsku eksploataciju - Skipta za studete IV godine Rudarskog odseka*, Beograd, Rudarsko geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu.

Julapong, P., Numprasanthai, A., Tangwattananukul, L., Juntarasakul, O., Srichonphaisarn, P., Aikawa, K., Park, I., Ito, M., Tabelin, C.B., Phengsaart, T., (2023), Rare Earth Elements Recovery from Primary and Secondary Resources Using Flotation: A Systematic Review, *Applied Sciences*, 13, 14, 8364. DOI:10.3390/app13148364 [CrossRef]

Kahraman, C., (2008), *Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments*. New York: Springer 2008th edition, 605.

Kahraman, C., Onar, S. C., Oztaysi, B., (2015), Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8, 4, 637–666. DOI:10.1080/18756891.2015.1046325.

Kalisz, S., Kibort, K., Mioduska, J., Lieder, M., Małachowska, A., (2022), Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review, *Journal of Environmental Management*, 304, 114239. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.114239 [CrossRef]

Keeney, R. L. (1982). *Decision Analysis: An Overview*. *Operations Research*, 30, 5, 803–838.

Kirmanli, C.; Ercelebi, S.G., (2009), An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109, 12, 727-738. [CrossRef]

Klir G.J. i Yuan B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Application*, 592. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc.

Komljenovic, D.; Kecojevic, V., (2009), Multi-attribute selection method for materials handling equipment, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 4, 2, 151-173. DOI:10.1504/IJISE.2009.022370 [CrossRef]



Komljenović, D., Abdulnour, G., Popović, N., (2015), An Approach for Strategic Planning and Asset Management in Mining Industry in the Context of Business and Operational Complexity, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 6, 4, 338–360, DOI: 10.1504/IJMME.2015.073047

Krzyzanowska, J., (2007), The impact of mixed fleet hauling on mining operations at Venetia mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 215-224. [CrossRef]

Kumar, P., Singh, R. K., Kharab, K., (2017), A comparative analysis of operational performance of Cellular Mobile Telephone Service Providers in the Delhi working area using an approach of fuzzy ELECTRE, *Applied Soft Computing*, 59, 438–447. DOI:10.1016/j.asoc.2017.06.019.

Kwang H.C., Lee H.J., (1999), A method for ranking fuzzy numbers and its application to decision making, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 7, 6, 677-685. DOI:10.1109/91.811235

Kwang H.C., Lee H.J., (1999), A method for ranking fuzzy numbers and its application to decision making, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 7, 6, 677-685. DOI:10.1109/91.811235 [CrossRef]

Lamata M.T.; (2004), Ranking of alternatives with ordered weighted averaging operators, *International Journal of Intelligent Systems*, 19, 5, 473-482, DOI:10.1002/int.20002.

Lee, A. H. I., (2009), A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits opportunities, costs and risks. *Expert Systems with Applications*, 36, 2, 2879–2893. DOI:10.1016/j.eswa.2008.01.045

Lee, A. H. I., Kang, H. Y., Wang, W. P., (2005), Analysis of priority mix planning for semiconductor fabrication under uncertainty, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 351–361. DOI:10.1007/s00170-004-2369-z

Lerchs, H., Grossmann, I. F., (1965), Optimum Design of Open-Pit Mines, *Transactions, Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. LXVIII, pp. 17–24.

Liou T.S., Wang M.J.J., (1992), Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*, 50, 3, 247-256.

Lizotte, Y., (1988), Economic and Technical Relations Between Open Pit Design and Equipment Selection, *Mine Planning and Equipment Selection*. Singhal (Ed.). Balkema. Rotterdam.

Łukasiewicz J. (1920). O logice trójwartościowej (in Polish). *Ruch filozoficzny* 5,170–171, 1920. Reprinted In L. Borkowski (Ed.), 1970, On three-valued logic, *Selected works by Jan Łukasiewicz*. Amsterdam: North-Holland, 87-88.

Malbašić, V. i ostali, (2020), Studija dugoročne eksploatacije uglja na ležištu „Bogutovo Selo“ - „Ugljevik Istok 1“, Univerzitet u Banjoj Luci O.J. Rudarski fakultet Prijedor i DMD consulting d.o.o. Bijeljina.

Malbašić, V. i ostali, (2023), Tehnički rudarski projekat otkrivke i eksploatacije uglja na P.K. „Ugljevik Istok 1“ – za period 2023-2027. godina, Univerzitet u Banjoj Luci O.J. Rudarski Fakultet Prijedor.

Manyele, S., (2017), Investigation of Excavator Performance Factors in an Open-Pit Mine Using Loading Cycle Time, *Engineering*, 9, 7, 599-624. DOI:10.4236/eng.2017.97038 [CrossRef]



Mardani, A., Jusoh, A., MD Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., Valipour, A., (2015-1), Multiple criteria decision-making techniques and their applications - a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research - Ekonomska Istraživanja*, 28, 1, 516–571. DOI:10.1080/1331677x.2015.1075139.

Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E. K., (2015-2), Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications Twodecades review from 1994 to 2014, *Expert Systems with Applications*, 42, 8, 4126–4148. DOI:10.1016/j.eswa.2015.01.003

Marinković, R., Ahac, A., (1979), Osnovna Geološka karta SFRJ – List Jajce 1:100000, "Geoinženjering" - Institut za geoinženjering Sarajevo.

Mateus, A., Luis, M., (2019), Challenges and opportunities for a successful mining industry in the future, *Boletín Geológico y Minero*, 2019, 130, 99-121; DOI:10.21701/bolgeomin.130.1.007 [CrossRef]

Mei, X. R., (2011), Equipment Selection Optimization System of Draglines and it's Applications in Opencast Coalmine in China, *Advanced Materials Research*, 201, 1253-1257

Meljnikov N.V. и сарадници (1979): Теория и практика открытых разработок. Изд-во „Недра“.

Milošević, A., Cvijić, R., Ivanković, B., Jokanović, P., (2017),. Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu rezervi uglja u ležištima "Bogutovo Selo i Ugljevik Istok 1" kod Ugljevika sa stanjem na dan 31.12.2015. godine, IBIS-INŽENJERING d.o.o. Banjaluka, TEHNIČKI INSTITUT d.o.o. Bijeljina, GIM GEOTEHNIKA d.o.o. Banjaluka i RUDARSKI INSTITUT d.o.o. Prijedor.

Mohtasham, M.; Mirzaei-Nasirabad, H.; Alizadeh, B., (2021), Optimization of truck-shovel allocation in open-pit mines under uncertainty: a chance-constrained goal programming approach, *Mining Technology*, 130, 2, 81-100. DOI:10.1080/25726668.2021.1916170 [CrossRef]

Mohtasham, M.; Mirzaei-Nasirabad, H.; Askari-Nasab, H.; Alizadeh, B., (2022), Multi-stage optimization framework for the real-time truck decision problem in open-pit mines: a case study on Sungun copper mine, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2022, 36, 7, 461-491. DOI:10.1080/17480930.2022.2067709 [CrossRef]

Namin, F. S., Ghasemzadeh, H., Aghajari, A. M., (2023), A comprehensive approach to selecting mine transportation system using AHP and FUZZY-TOPSIS, *Decision Making and Analysis*, 1, 1, 23-39. DOI:10.55976/dma.12023117323-39 [CrossRef]

Ooriad, A. F., Yari M., Bagherpour R., Khoshouei M., (2018), The development of a novel Model for Mining Method Selection in a Fuzzy Environment; Case study: Tazareh Coal Mine, Semnan Province, Iran, *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 33, 1, 45-53. DOI:10.17794/rgn.2018.1.6

Opricovic, S., (1998), Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems, PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 302.

Opricovic, S., Tzeng, G.-H., (2004), Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European Journal of Operational Research*, 156, 2, 445–455. DOI:10.1016/S0377-2217(03)00020-1



Patterson S.R., Kozan E., Hyland P., (2016), An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions, *International Journal of Production Research*, Volume 54, Issue 14, 1-15, DOI:10.1080/00207543.2015.1117150

Pavlović. V., (1992), *Tehnologija površinskog otkopavanja*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet Beograd

Phengsaart, T., Srichonphaisan, P., Kertbundit, C., Soonthornwiphat, N., Sinthugoot, S., Phumkokrux, N., Juntarasakul, O., Maneeintr, K., Numprasanthai, A., Park, I., Tabelin, C.B., Hiroyoshi, N., Ito, M., (2023), Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review. *Heliyon*, 9, 2, e13083. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e13083 [CrossRef]

Picard, J.-C., Smith, B. T., (2004), Parametric Maximum Flows and the Calculation of Optimal Intermediate Contours in Open Pit Mine Design, *INFOR Journal*, Vol. 42, No. 2, pp. 143–153. DOI:10.1080/03155986.2004.11732697

Popović, N., (1984), *Naučne osnove projektovanja površinskih kopova*, NIRO “ZENICA” – NIŠRO “OSLOBODENJE”, Sarajevo, 1984.

Rahimdel, M. J.; Bagherpour, R., (2018), Haulage system selection for open pit mines using fuzzy MCDM and the view on energy saving, *Neural Computing and Applications*, 29, 187-199. DOI:10.1007/s00521-016-2562-7 [CrossRef]

Rakhmangulov, A.; Burmistrov, K.; Osintsev, N., (2024), Multi-Criteria System’s Design Methodology for Selecting Open Pits Dump Trucks, *Sustainability*, 2024, 16, 2, 863. DOI:10.3390/su16020863 [CrossRef]

Roy, B. (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (La methode ELECTRE), *Revue Francaise D Informatique de Recherche Operationnelle*, 2, 8, 57–75. DOI:10.1051/ro/196802V100571

Roy, B. (1978). ELECTRE III: Un algorithme de classements fond sur une representation floue des preferences en prsence de critres multiples, *Cahiers du Centre d’Etudes de Recherche Operationnelle*, 20, 1, 3–24.

Roy, B., (1996), Comparing Actions and Modeling Consequences, In: *Multicriteria Methodology for Decision Aiding, Nonconvex Optimization and Its Applications*, 12. DOI:10.1007/978-1-4757-2500-1\_8

Roy, B., Bertier, P., (1971), *La methode ELECTRE II. Note de travail 142. SEMA-METRA. Metra-International.*

Roy, B., Bouyssou, D., (1993), *Aide multicritre la dcision: Mthodes et cas*, Economica, Paris, France.

Roy, B., Hugonnard, J., (1982), Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method, *Transportation Research Part A: General*, 16, 4, 301–312. DOI:10.1016/0191-2607(82)90057-7

Rževski V.V., ( 1980), *Технология и комплексная механизация открытых горных работ*. Изд-во „Недра“.



- Saaty T.L., (1990), How to make a decision: The analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Research*, 48, 1, 9-26. DOI:10.1016/0377-2217(90)90057-I
- Saaty, R. W., (1987), The AHP and how it is used, *Mathematical Modelling*, 9, 3-5, 161–176. DOI:10.1016/0270-0255(87)90473-8
- Saaty, T. L., (2004), Fundamentals of the Analytic Network Process - Dependence and Feedback in Decision-Making with a Single Network, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 129–157. DOI:10.1007/s11518-006-0158-y
- Saaty, T. L., (2008-1), The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes: Applications to Decisions under Risk. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 1, 1, 122–196. DOI:10.29020/nybg.ejpam.v1i1.6
- Saaty, T. L., (2008-2), The Analytic Network Process, *Iranian Journal of Operations Research*, 1, 1, 1–27.
- Saaty, T. L., Vargas, L. G., (2001), *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Springer Science+Business Media New York. DOI:10.1007/978-1-4614-3597-6
- Saaty, T., (1980), *The analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill International Book New York, 287.
- Seervi, V.; Kishore, N.; Verma, A. K., (2023), Critical Analysis of Tandem Dragline Performance in Open Cast Coal Mines-A Case Study. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104, 391-402. DOI:10.1007/s40033-022-00393-3 [CrossRef]
- Seervi, V.; Singh, N.; Kishore, N.; Verma, R., (2023), Breakdown and Productivity Prediction of Dragline using Machine Learning Algorithms, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2023, 70, 9, 476-483. DOI:10.18311/jmmf/2022/32098 [CrossRef]
- Sitorus, F., Cilliers, J. J., Brito-Parada, P. R., (2018), Multi-Criteria Decision Making for the Choice Problem in Mining and Mineral Processing: Applications and Trends, *Expert Systems with Applications*, 121, 393-417. DOI:10.1016/j.eswa.2018.12.001
- Šeško E. F. (1957): *Открытая разработка месторождений полезных ископаемых*. Углетехиздат.
- Ta, C.H., Ingolfsson A., Doucette J., (2013), A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities, *European Journal of Operational Research*, 231, 3. DOI:10.1016/j.ejor.2013.06.016
- Tabelin, C. B., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., Yoo, K., Ito, M., Hiroyoshi, N., (2021), Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues, *Resources Conservation and Recycling*, 170, 105610. DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105610 [CrossRef]
- Tabelin, C.B., Dallas, J.A., Casanova, S., Pelech, T.M., Bournival, G., Saydam, S., Canbulat, I., (2021), Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives, *Minerals Engineering*, 163, 106743. DOI:10.1016/j.mineng.2020.106743 [CrossRef]



- Tadi, S., Zeevi, S., Krstić, M., (2014), A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy VIKOR for city logistics concept selection. *Expert Systems with Applications*, 41, 18, 8112–8128. DOI:10.1016/j.eswa.2014.07.021
- Talpac-3D, RPM Global, (2023), available at <https://rpmglobal.com/product/talpac-3d/>. [CrossRef]
- Talpac-3D, RPM Global, (2023), Available at <https://rpmglobal.com/product/talpac-3d/>
- Thompson, R., (2010), Mine Haul Road Design and Management Best Practices for Safe and Cost-Efficient Truck Haulage. In *Proceedings of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration Annual Meeting & Exhibit*, Phoenix, AZ, USA, 28 February–3 March 2010; Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME): Littleton, CO, USA, 2010; pp. 1–10.
- Tolga E., Demircan M. & Kahraman C. (2005). Operating system selection using fuzzy replacement analysis and analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 97 (1), pp. 89-117, DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.07.001.
- Tsoukis, A., (2007), On the concept of decision aiding process: an operational perspective, *Annals of Operations Research*, 154, 3–27. DOI:10.1007/s10479-007-0187-z
- Urošević, K, Gligorić Z., Miljanović, I., Beljić, Č., Gligorić, M., (2021), Novel Methods in Multiple Criteria Decision-Making Process (MCRAT and RAPS)—Application in the Mining Industry, *Mathematics*, 9, 16, 1980. DOI:10.3390/math9161980
- Van Laarhoven P.J.M., Pedrcyz W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 1-3, 229-241. DOI:10.1016/S0165-0114(83)80082-7
- Walser, G., (2002), Economic impact of world mining (IAEA-CSP--10/P), International Atomic Energy Agency (IAEA). [CrossRef]
- Whittle, D., Whittle, J., Wharton, C., Hall, G. (2005), Whittle, J., Whittle Strategic Mine Planning, 8 th Edition.
- Wulandari, V.S.; Herdyanti, M.K.; Hartami, P.N., (2021), Technical analysis of shovel working time towards inter-burden production achievement in open-pit coal mine, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882. DOI:10.1088/1755-1315/882/1/012055 [CrossRef]
- Xu, H.; Liu, F.; Liao, J.; Liu, T., (2023), Research on Selection and Matching of Truck-Shovel in Oversized Open-Pit Mines, *Applied Sciences*, 2023, 13, 6, 3851. DOI:10.3390/app13063851 [CrossRef]
- Yager, R. R., (1977), Multiple objective decision-making using fuzzy sets, *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, 4, 375–382. DOI:10.1016/S0020-7373(77)80008-4
- Yager, R. R., (1978), Fuzzy Decision Making Including Unequal Objectives, *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 87–95. DOI:10.1016/0165-0114(78)90010-6
- Yager, R., Basson, D., (1975), Decision Making with Fuzzy Sets, *Decision Sciences*, 6, 3, 590–600. DOI:10.1111/j.1540-5915.1975.tb01046.x



- Yu, W., (1992), ELECTRE TRI: Aspects Méthodologiques et Guide d'Utilisation. Document du LAMSADE, 74, Université de Paris - Dauphine, avril.
- Zadeh L.A., (1965), Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 3, 338-353. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zadeh L.A., (1975), The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1, *Information sciences*, 8, 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., (2012), Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 122, 6, 3–6. DOI:10.5755/j01.eee.122.6.1810
- Zavadskas, E., Antucheviciene, J., Turskis, Z., Adeli, H., (2016a), Hybrid multiple-criteria decision-making methods: A review of applications in engineering. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 23, 1, 1–20. DOI:10.24200/sci.2016.2093
- Zhang, Y. D.; Yang, Y. H.; Li, K. M., (2003), System simulation for dragline selection in open cast mines. *Proceeding of Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 79-82. [CrossRef]
- Zhang, Y.; Zhao, Z.; Bi, L.; Wang, L.; Gu, Q., (2022), Determination of Truck–Shovel Configuration of Open-Pit Mine: A Simulation Method Based on Mathematical Model, *Sustainability*, 14, 19, 12338. <https://doi.org/10.3390/su141912338> [CrossRef]
- Zhou, W.; Cai, Q.; Chen, S., (2007), Study on Dragline-Bulldozer Operation with Variations in Coal Seam Thickness. *Journal of China University of Mining and Technology*, 17, 4, 464-466. DOI:10.1016/S1006-1266(07)60126-6 [CrossRef]
- Zhu K., Jing Y., Chang D., (1999), A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, pp. 450-456. DOI:10.1016/S0377-2217(98)00331-2.
- Zhü, K., (2014), Fuzzy analytic hierarchy process: Fallacy of the popular methods. *European Journal of Operational Research*, 236(1), 209–217. DOI:10.1016/j.ejor.2013.10.034)
- Ziemba, P., (2018), NEAT F-PROMETHEE A new fuzzy multiple criteria decision making method based on the adjustment of mapping trapezoidal fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*, 110, 363–380. DOI:10.1016/j.eswa.2018.06.008.
- Ziemba, P., Wtrbski, J., Zioo, M., Karczmarczyk, A., (2017), Using the PROSA Method in Offshore Wind Farm Location Problems. *Energies*, 10. DOI10.3390/en10111755.
- Zimmermann, H., (1978), Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 45–55. DOI:10.1016/0165-0114(78)90031-3



## BIOGRAFIJA

Miodrag Čelebić, dipl. inž. rudarstva rođen je 15. novembra 1981. u Livnu, Bosna i Hercegovina. Nakon završene srednje Mašinske škole u Prijedoru upisao je Tehnološki fakultet, Rudarski odsjek u Prijedoru Univerzitetu u Banjoj Luci gdje je 2007. godine stekao zvanje diplomirani inženjer rudarstva, a tema diplomskog rada je bila „Verifikacija kontinualnog sistema transporta otkrivke na površinskom kopu Buvač“. Drugi ciklus studija na studijskom programu Rudarsko i geološko inženjerstvo na Rudarskom fakultetu u Prijedoru Univerziteta u Banjoj Luci završio je 2014. godine i stekao zvanje magistar rudarstva sa temom završnog rada „Analiza tehno-ekonomske opravdanosti izbora tehnologije i načina eksploatacije jalovine na PK Buvač“.

Nakon diplomiranja radio je na Rudarskom institutu u Prijedoru kao projektant (2007-2012), u Sloga a.d. Kozarska Dubica kao tehnički rukovodilac površinskog kopa „Maglajci“ (2009-2012), a od 2010. godine radi na Rudarskom fakultetu u Prijedoru Univerziteta u Banjoj Luci u zvanju asistenta i višeg asistenta.

Objavio je, samostalno ili kao koautor, na domaćim i međunarodnim simpozijumima i časopisima više naučnih radova i učestvovao u izradi, kao autor ili saradnik, više stručnih radova koji se odnose na projekte i elaborate iz oblasti rudarstva i geologije.



## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Миодраг Челебић

Број индекса R716/18

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој интегралног модела за оптимизацију дисконтинуалног система производње на површинским коповима неметала

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

### Потпис аутора

У Београду, 29.03.2024. године

Миодраг Челебић



## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Миодраг Челебић

Број индекса R716/18

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Развој интегралног модела за оптимизацију

дисконтинуалног система производње на површинским

коповима неметала

Ментор Проф. др Божо Колоња, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

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

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 29.03.2024. године

Миодраг Челебић



## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Развој интегралног модела за оптимизацију дисконтинуалног система производње на површинским коповима неметала

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

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

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

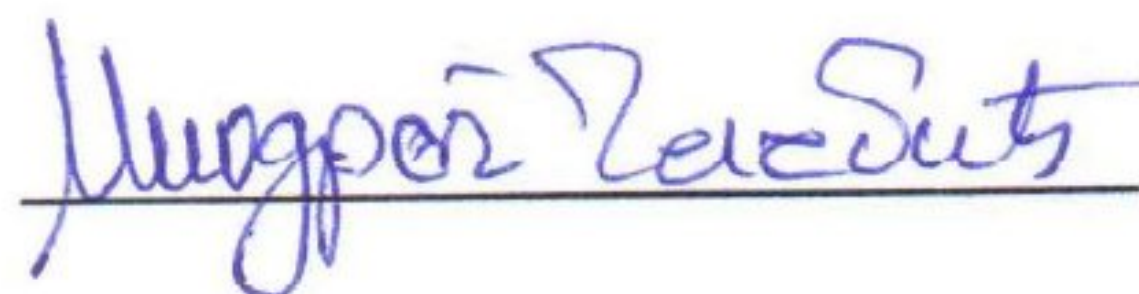
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

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

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 29.03.2024. године





1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.