

**UNIVEZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET**

Sanja I. Bajić

**MODEL ZA KOMPLEKSNO TRETIRANJE
EFEKATA PODZEMNE EKSPLOATACIJE
LEŽIŠTA MINERALNIH SIROVINA U CILJU
PODRŠKE ODLUČIVANJU**

doktorska disertacija

Beograd, 2020

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY**

Sanja I. Bajić

**COMPREHENSIVE MODELING OF
UNDERGROUND MINING IMPACTS TO
SUPPORT DECISION MAKING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

Mentor:

Dr Branko Gluščević, vanredni profesor

Uža naučna oblast: Podzemna eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Vesna Ristić Vakanjac, redovni profesor

Uža naučna oblast: Hidrogeologija

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Radoje Pantović, redovni profesor

Uža naučna oblast: Rudarstvo i geologija

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Koristim ovu priliku da izrazim svoju zahvalnost i poštovanje svima koji su, na bilo koji način, doprineli da ova disertacija bude što kvalitetnije urađena.

Iskazala bih zahvalnost svom mentoru dr Branku Gluščeviću i dr Dragoljubu Bajiću koji su svojim savetima i zalaganjem doprineli kvalitetu i izradi ovog rada. Takođe, zahvalnost bih iskazala i članovima komisije: dr Vesni Ristić Vakanjac i dr Radoju Pantoviću.

Zahvaljujem se i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja za sufinansiranje naučnih skupova. Posebno želim da se zahvalim dr Radetu Tokaliću, rukovodiocu projekta „Izučavanje mogućnosti valorizacije peostalih rezervi uglja u cilju obezbeđenja stabilnosti energetskeg sektora Republike Srbije“, na kome sam angažovana.

SAŽETAK

Metode podzemne eksploatacije obuhvataju sve tehnološke faze na pripremi i otkopavanju dela bloka ili celog ležišta. Otkopavanje se odvija prema tehnološkom procesu koji najčešće obuhvata: bušenje, miniranje, usitnjavanje rude, provetravanje, utovar i izvoz rude. Pored navedenih mogu biti potrebne i operacije zasipavanja ili zarušavanja otkopa (u zavisnosti od metode otkopavanja). U zavisnosti od oblika ležišta, njegove veličine, uslova zaleganja, fizičko-mehaničkih svojstava rude i pratećih stena, hidroloških prilika, osetljivosti površine na rudarske radove, mineraloško-hemijskog sastava rude, načina raspodele minerala i vrednosti sirovine zavisiće koja metoda otkopavanja će se koristiti prilikom eksploatacije određenog ležišta. Veličina rudnog tela je često odlučujući faktor, jer odražava količinu rudnih rezervi.

Rudno ležište "Borska reka" predstavlja najveće rudno telo u borskom ležištu rude bakra i predmet je mnogobrojnih analiza i studija više od tri decenije. Samim tim što zaleže na velikoj dubini i sadržaj bakra u rudi je dosta mali izbor metode otkopavanja čini se kao ne tako jednostavan zadatak. Mnogi stručnjaci razmatrali su mogućnosti i načine ekonomične i bezbedne eksploatacije ovog ležišta. U tim analizama pored optimalnog načina otvaranja ležišta tražena su i optimalna rešenja metoda otkopavanja kojom bi se dobili pozitivni rezultati, a to znači odrediti što ekonomičniju metodu otkopavanja koja bi omogućila ekonomski isplativo otkopavanje rude. Takođe prednost se daje visokoproduktivnim i visokokapacitativnim metoda otkopavanja. Ovaj rudnik predstavlja eksperimentalno područje na kojem su primenjeni razvijeni naučni metodološki postupci.

U radu je prikazan postupak rešavanja problema iz oblasti podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina prilikom vrednovanja i izbora optimalne metode otkopavanja primenom fazi višekriterijumske optimizacije. Primena fazi logike prilikom donošenja odluka u višekriterijumskoj optimizaciji je naročito pogodna za korišćenje u slučajevima kada se ne raspolaže dovoljnim brojem informacija o sistemu koji se izučava, kao i kada se daje na značaju iskustvu i znanju eksperta. U skadu sa određenim jasnim ciljem, višekriterijumsko odlučivanje (eng. Multiple-criteria decision-making - MCDM) primenjeno je kako bi se rešio problem rangiranja određenih metoda otkopavanja u odnosu na skup analiziranih kriterijuma, kao i izbor optimalnog rešenja.

Analizirane metode otkopavanja ležišta mineralnih sirovina predstavljaju moguća alternativna rešenja. S druge strane, definisani su i analizirani različiti kriterijumi i podkriterijumi koji utiču na izbor optimalne odluke. Izvršeno je međusobno ocenjivanje analiziranih kriterijuma, podkriterijuma kao i ocenjivanje alternativnih rešenja u odnosu na postavljene kriterijume. Matematičkim optimizacionim proračunima, doneta je konačna odluka o optimalnoj metodi podzemnog otkopavanja rudnika.

Ključne reči: višekriterijumsko odlučivanje, fazi logika, podzemna eksploatacija, metode otkopavanja podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, znanje eksperta

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Podzemna eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

UDK: 004.43:005.1:311:005.3

330.34: 338.45:502/504:004

517.5:519.2/.87.628.54

622:622.172:658.286

622:007.5:622.23.05

658.5(043.3)

ABSTRACT

Underground mining methods include the preparation and excavation of part of the block or the whole ore deposit. Ore excavation is carried out according to a technological process that usually includes: drilling, blasting, shredding of ore, ventilation, loading and export of ore. In addition to the above also may be required operations backfill or caving stope (depends on the excavation mining method). Mining methods depend on the shape, size and depth of the ore body, physical and mechanical properties of the ore and accompanying rocks, hydrologic conditions, sensitivity of ground surface to mining, mineral and chemical composition of the ore, mineral distribution, and value of ore. Consequently, all these characteristics are important and need to be taken into account when a decision is made about the optimal mining method. The ore body size is often the decisive factor, because it reflects ore reserves.

Ore body "Borska reka" represents the largest ore body in the copper ore deposit and has been the subject of numerous analyzes and studies for more than three decades. Therefore which lies at great depth and the copper content of the ore is quite a small mining methods selection seems like a not so easy task. Many experts have considered the possibilities and ways of economical and safe exploitation of this ore body. In these analyzes, in addition to the optimal way of opening the ore body, optimal solutions of the underground mining method were sought, which would produce positive results, and this means determining the most economical mining method of excavation that would enable the ore to be economically profitable. An advantage is also given highly productive and high-productivity mining methods.

The paper proposes a problem-solving approach in the area of underground mining, related to the evaluation and selection of the optimal mining method, employing fuzzy multiple-criteria optimization.

The application of fuzzy logic to decision-making in multiple-criteria optimization is particularly useful in cases where not enough information is available about a given system, and where expert knowledge and experience are an important aspect. With a straightforward objective, multiple-criteria decision-making (MCDM) is used to rank various mining methods relative to a set of criteria and to select the optimal solution.

The considered mining methods represent possible alternatives. In addition, various criteria and subcriteria that influence the selection of the best available solution are defined and analyzed. The final decision concerning the selection of the optimal mining method is made based on mathematical optimization calculations.

Key words: multiple-criteria decision making, underground mines, mining methods, expert knowledge

Scientific discipline: Mining Engineering

Particular area of study: Underground exploitation of the mineral deposits

UDC: 004.43:005.1:311:005.3

330.34: 338.45:502/504:004

517.5:519.2/.87.628.54

622:622.172:658.286

622:007.5:622.23.05

658.5(043.3)

SADRŽAJ

I.	UVODNA RAZMATRANJA.....	1
II.	TEORIJSKI DEO.....	6
1.	Podzemna eksploatacija i metode otkopavanja.....	6
1.1.	Metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i okolnih stena	10
1.1.1.	Metode podetažnog zarušavanja moćnih ležišta strmijeg zaleganja.....	10
1.1.2.	Metode podetažnog zarušavanja položenih ležišta.....	12
1.1.3.	Metoda podetažnog zarušavanja magaziniranjem rude.....	12
1.1.4.	Metode blokovnog samozarušavanja.....	13
1.1.5.	Metode prinudnog blokovnog zarušavanja.....	15
1.2.	Metode otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora i sistemi zasipavanja.....	15
1.2.1.	Zasipni materijal i dobijanje zasipnog materijala.....	17
1.3.	Magazinske metode otkopavanja.....	20
1.4.	Metode otvorenih otkopa.....	22
1.4.1.	Metode frontalnog otkopavanja.....	22
1.4.2.	Komorno-stubne metode otkopavanja.....	22
1.4.3.	Podetažne metode otkopavanja.....	24
1.5.	VCR metoda otkopavanja.....	25
2.	Primena višekriterijumske optimizacije u rudarstvu.....	29
2.1.	Primena heuristike prilikom rešavanja kompleksnih problema.....	29
2.2.	Pregled dosadašnjih istraživanja.....	34
2.3.	Metode višekriterijumske optimizacije za izbor metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina.....	38
2.3.1.	Višekriterijumska optimizacija.....	38
2.3.2.	Metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP).....	42
2.3.3.	VIKOR metoda odlučivanja.....	51
III	EKSPERIMENTALNI DEO I PRIKAZ REZULTATA.....	55
1.	Izbor i karakteristike eksperimentalnog područja istraživanja rudnog tela Borska reka.....	55
1.1.	Geološke karakteristike šireg područja ležišta „Borska reka“.....	55
1.2.	Geološke karakteristike i opis rudnog tela.....	57
1.3.	Mineralni sastav rudnog tela.....	58
1.4.	Geneza ležišta.....	58
1.5.	Hidrološke i hidrogeološke karakteristike rudnog tela.....	59
2.	Analiza i diskusija rezultata dobijenih primenom metoda FAHP i VIKOR.....	61
2.1.	Određivanje kriterijuma koji utiču na izbor metode otkopavanja.....	63
2.2.	Ocenjivanje kriterijuma, podkriterijuma i alternativa kao i vektora težinskih prioriteta.....	71
2.3.	Postupak primene agregacije.....	80
2.4.	Proračun fazi matrice odluke i fazi matrice performansi.....	81
2.5.	Proračun konačnih vrednosti ocena alternativa, defazifikacija i izbor optimalne metode.....	82
2.6.	Rezultati dobijeni proračunom VIKOR metode višekriterijumske optimizacije.....	83

2.7. Prikaz određivanja optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta bakra “Borska reka” korišćenjem “Fuzzy-GWCS2” aplikacije prilikom primene FAHP metode.....	88
2.8. Prikaz određivanja optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta bakra “Borska reka” korišćenjem “Fuzzy-GWCS2” aplikacije prilikom primene metode VIKOR.....	92
IV ZAKLJUČAK.....	95
LITERATURA	98

I. UVODNA RAZMATRANJA

Predmet istraživanja doktorske disertacije. Ekonomski razvoj i ukupni napredak društva zahteva stalno povećanje proizvodnje pri čemu je rudarstvo uvek bilo među prioritetnim granama. Stalno se postavljaju sve složeniji zadaci, koji se karakterišu potrebom ostvarivanja povećane proizvodnje u sve nepovoljnijim uslovima eksploatacije. Istovremeno uvek je naglašeno da treba ostvarivati optimalnu proizvodnju. Unapređenje i optimizacija tehnološkog procesa podzemne eksploatacije mineralnih sirovina zahteva kvantitativna geološka i rudarska istraživanja. Pri izučavanju i rešavanju ovog zadatka koristi se skup matematičkih metoda koja su zastupljena kod rešavanja tehničko-ekonomskih, često veoma složenih zadataka.

Današnji razvoj, usled angažovanja obimnih investicionih sredstava, zahteva veliku odgovornost, a istovremeno i rizike, koji se mogu kod nepotpunih analiza ili nedovoljno obuhvaćenih uticajnih faktora pri donošenju konačnog rešenja, veoma negativno odraziti na očekivani pozitivan bilans budućeg poslovanja. Radi smanjenja ili potpunog eliminisanja rizika pri novim ulaganjima, koja su po pravilu velika potrebno je predhodno izvršiti kompleksna istraživanja i izučavanja. Potrebno je izabrati one tehnološke postupke koji daju najbolje ekonomske efekte u dužem vremenskom periodu.

Prilikom rešavanja realnih problema, a u cilju donošenja kvalitetne odluke, neophodno je uzeti u obzir veliki broj često složenih parametara. Iz tih razloga razvoj modeliranja procesa odlučivanja poslednjih godina beleži značajan rast, a među njima su se izdvojili modeli višekriterijumske optimizacije kao korisni za rešavanje kompleksnih i konfliktnih pojava. Modeli višekriterijumske optimizacije olakšavaju donosiocima odluke pronalaženje optimalnog rešenja u situacijama u kojima postoji mnoštvo raznorodnih kriterijuma, koji često mogu biti i međusobno suprotstavljeni.

Višekriterijumska analiza (VKA) predstavlja naučnu disciplinu koja privlači veliku pažnju istraživača pri rešavanju realnih problema odlučivanja. Ona ima široku primenu prilikom vrednovanja, ocenjivanja i rangiranja alternativa u različitim oblastima istraživanja. Specifično za VKA je to da predstavlja multidisciplinarnu oblast koja uključuje: operaciona istraživanja, matematiku, ekonomiju, teoriju odlučivanja i informacione sisteme.

VKA predstavlja pod-disciplinu ili ogranak operacionih istraživanja, a suštinski se bavi projektovanjem matematičkih i računarskih modela koji služe kao podrška za evaluaciju konačnog skupa alternativa u prostoru skupa kriterijuma od strane jednog ili više donosilaca odluke. Pošto ovaj pristup analizira veliki broj najčešće suprotstavljenih kriterijuma, njegov primarni cilj je da razvije metodologiju koja će omogućiti agregaciju skupa kriterijuma na osnovu subjektivnih preferencija donosilaca odluke. Postizanje pomenutog cilja zahteva, najčešće, primenu složenih procedura i metodologija.

Metode VKA su dizajnirane tako da određuju poredak alternativna na osnovu nekoliko odabranih kriterijuma. One omogućavaju komparaciju kako kvantitativnih tako i kvalitativnih kriterijuma, a ujedno u analizu uključuju i kriterijume koji su iskazani različitim jedinicama mere. Među brojnim metodama VKA koje su razvijene za rešavanje realnih problema izdvojile su se metode: AHP (eng. *Analytic hierarchy process*), TOPSIS (eng. *Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*), PROMETHEE (eng. *Performance Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), ELECTRE (eng. *ELimination and Choice Expressing the REality*) i VIKOR (*VlšeKriterijumska Optimizacija i Kompromisno Rešenje*), jer su se pokazale kao korisni alati pri modelovanju problema u različitim oblastima primene. U okviru ove doktorske disertacije naglasak će biti na primeni FAHP-a i VIKOR metode za rešavanje problema rangiranja alternativa.

Metoda AHP je predstavljena je od strane Saaty (1980) kao tehnika za rangiranje alternativa u procesu odlučivanja. Glavna prednost ove metode je ta što adekvatno tretira nematerijalne

(kvalitativne) informacije koje su prisutne gotovo u svakom problemu odlučivanja. Tiantaphylloy & Lin (1996) i Duran & Aguilo (2007) su sumirali osnovne prednosti AHP metode, kao što su: merenje konzistentnosti procena donosilaca odluke, projektovanje kritičnih aspekata problema u hijerarhijsku strukturu, upotreba komparativnih matrica kojima donosioci odluke određuju prioritete težine kriterijuma, mogućnost kombinovanja sa ostalim tehnikama VKA i jednostavna primena.

Metodu VIKOR razvio je Serafim Opricović, kao efikasan način gde se donosiocu odluke predlažu alternative koje predstavljaju kompromis između želja i mogućnosti, ili kompromis između različitih interesa učesnika u odlučivanju. Kompromisno rešenje je moguće rešenje, i predstavlja kompromis za međusobno napravljene ustupke između alternativa. Metoda je razvijena za multikriterijumsku optimizaciju složenih sistema, sa fokusom na rangiranje u uslovima protivrečnih kriterijuma.

Ipak, ove metode su često u literaturi izložene kritici jer ne uzimaju u obzir činjenicu da su ljudske procene često nejasne i neprecizne. One ne obezbeđuju zadovoljavajuće rezultate u situacijama koje se mogu okarakterisati kao neodređene / neizvesne. Mnogi realni problemi odlučivanja upravo uključuju faktor neizvesnosti. Takođe, većina ljudskih procena se ne mogu uvek precizno iskazati. Sem toga, kriterijumi su često subjektivne i kvalitativne prirode, što negativno utiče na donosiocima odluke u smislu iskazivanja sopstvenih preferencija numeričkim vrednostima i kasnijeg poređenja procena. Upravo pomenuti uslovi su naveli istraživače da predlože Fazi višekriterijumsko odlučivanje - FVKO (eng. *Fuzzy Multi Criteria Decision Making – FMCDM*).

Fazi višekriterijumski pristup se zasniva na fazi logici, tj. teoriji fazi skupova (Zadeh, 1965.), koja predstavlja efikasan način da se matematički predstave neizvesne i neprecizne ljudske procene. FVKO omogućava poređenje značaja kriterijuma i rangiranje alternativa, na taj način što se kriterijumi procenjuju na osnovu fazi lingvističkih promenljivih. Koncept lingvističkih promenljivih je veoma koristan u radu sa problemima koji su po prirodi komplekni, odnosno koji su loše definisani i ne mogu se lako opisati konvencionalnim kvalitativnim izrazima.

FAHP (eng. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) je tehnika bazirana na AHP metodi i fazi logici (Zadeh, 1965), a implementira se korišćenjem trougaonih fazi brojeva.

Metode VKA se često međusobno kombinuju, osim toga svojstvena im je i kombinacija sa fazi metodama. Naime, svaka od metoda ima svoje prednosti i nedostatke u smislu potenciranja jednih i marginalizovanja drugih faktora koji utiču na iskazivanje preferencija donosioca odluka. Kombinovanjem više metoda pokušava se preciznije odrediti realan odnos uticaja pojedinih parametara na ukupan učinak.

Cilj istraživanja doktorske disertacije. Osnovni cilj istraživanja je razvoj kombinovanog modela VKA koji podržava modelovanje interakcije između atributa, upravljanje nejasnim / nepreciznim ocenama donosilaca odluke o odnosima među atributima, kao i rangiranje alternativa. U okviru disertacije od interesa je proveriti da li se kombinovanjem klasičnih i fazi višekriterijumskih metoda može kreirati hibridni model koji će iskoristiti sve prednosti pojedinačnih metoda i dati pouzdanije rezultate. Takođe, razmotriće se i mogućnost uvođenja logičkih interakcija i uslovljenosti između atributa odlučivanja. Na taj način donosiocima odluka je značajno olakšano predstavljanje subjektivnih procena, jer im je omogućeno da postave lingvističke zahteve i logičke međuzavisnosti između atributa pre nego se uvedu numeričke vrednosti. Predloženi modeli su testirani kao podrška procesima rangiranja različitih varijantnih rešenja prilikom otkopavanja rudnika.

Polazne hipoteze u istraživanju. Eksploatacija mineralnih resursa ima razne i višestruke efekte na ekonomiju, životnu sredinu i društvo u celini. Pri donošenju odluka vezanih za pokretanje i

realizaciju određenih projekata u ovoj oblasti, treba uzeti u obzir ne samo ekonomske pokazatelje nego i društvene i ekološke zahteve, što se jedino može postići formulisanjem i primenom odgovarajućeg matematičkog modela kompromisnog programiranja.

Glavna hipoteza biće potkrepljena pomoćnim hipotezama koje bi bile:

Ekonomski, ekološki i društveni zahtevi vezani za eksploataciju mineralnih resursa imaju određenu meru međusobnog neslaganja. Iz tog razloga potrebno je definisati takav matematički model koji rezultira kompromisno rešenje i doprinosi prevazilaženju navedenog nedostatka i iznalaženju optimalnog izbora koji će zadovoljiti međusobno sukobljene interese.

Od nekoliko predloženih varijanti, u zavisnosti od tehničkih, proizvodnih, ekonomskih, ekoloških, pa i socijalnih, zakonskih i političkih kriterijuma, pomoću metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa odabrace se najoptimalniji sistem za izbor optimalne metode otkopavanja podzemnog rudnika i primena na eksperimentalnom području.

Da bi se odabrala optimalna metoda otkopavanja koja daje najveću proizvodnju uz najviše korisne komponente u najkraćem vremenu, uz najmanji utrošak energije i materijala razmatraće se visoko kapacitativne i visoko produktivne metode otkopavanja. Prilikom izrade doktorske disertacije primenom metodologije višekriterijumskog odlučivanja na eksperimentalnom području rudnika bakra „Borska reka“ doneće se odluka o optimalnoj metodi otkopavanja.

Zaključno, polazna hipoteza u istraživanju odnosi se na mogućnost donošenja rešenja problema u uslovima gde treba uvažiti postojanje više rešenja, najčešće suprotstavljenih kriterijuma, pri čemu je rešenje predstavljeno izborom jedne od niza alternativa tj. optimalnom metodom otkopavanja podzemnog rudnika bakra.

Naučne metode istraživanja. Istraživanjem primene različitih metoda višekriterijumske optimizacije u različitim naučnim disciplinama (ekonomija, građevinarstvo, geo-nauke, medicina, id.), a u pogledu postavljanja prioriteta i donošenja odluke, klasične metode kao što su VIKOR, PROMETHEE, ELECTRA, STEM, SEMOPS, PROTRADE, TOPSIS su našle široku primenu. Takođe, sve češće se primenjuju i relativno „mlade“ metode kao što AHP i fuzzy-AHP (FAHP).

Analitičko hijerarhijski proces je veoma moćna i fleksibilna metoda koja se koristi za postavljanje prioriteta i donošenja najbolje odluke, uzimajući u obzir i kvalitativne i kvantitativne pokazatelje. Metodu analitičko hijerarhijskog procesa (AHP metoda) je razvio Thoomas Saaty početkom 70-ih godina XX veka. Ova metoda predstavlja jednu od mlađih koje se koriste poslednjih godina u procesu višekriterijumskog odlučivanja kod kompleksnih problema, tj. za izbor neke od alternativa koji imaju različitu važnost. Širok spektar primene AHP metode kao npr. u odlučivanju, evaluaciji, alokaciji resursa, planiranju i razvoju, industriji, inženjerstvu, politici, obrazovanju pokazuje da je ona danas jedna od najprihvatljivijih metoda višekriterijumske optimizacije.

U doktorskoj disertaciji biće testirane i primenjene klasične metode VIKOR i FAHP. S druge strane, opšte je poznato da je u mnogim slučajevima veliki broj elemenata-kriterijuma i podkriterijuma kod kreiranja matrica za donošenje odluka neizvestan, pa donosioci odluka nisu u mogućnosti da odrede tačne numeričke vrednosti za poređenje odluka. Kako bi postali rešivi ovakvi problemi, specifični po nedovoljno izvesnim, neodređenim ili subjektivno procenjenim parametrima, potrebno je koristiti matematičke metode koje mogu na zadovoljavajući način da tretiraju neizvesnost, neodređenost ili subjektivnost. Ovako posmatrano, fazi logika se pokazuje kao naučno zasnovan pristup, koji koristi iskustvo i intuiciju stručnjaka. Na taj način, biće primenjena metoda FAHP kojom će se omogućiti ocenjivanje i analiza pojedinih kriterijuma i podkriterijuma

korišćenjem FAHP skala vrednovanja, kao i metod VIKOR korišćenjem Satijeve skala (Bajić at al. 2020).

Prilikom donošenja optimalnog rešenja razvijen je model u okviru ove doktorske disertacije, koji se primenjuje u donošenju odluke pri izboru optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji mineralnih sirovina, kako bi rudarski proces eksploatacije rude mogao nesmetano da se vrši.

Očekivani naučni doprinos. Ključni doprinos doktorske disertacije biće unapređenje sistema odlučivanja, razvojem kombinovanih modela, u situacijama kada se atributi odlučivanja ne mogu precizno odrediti i kada između njih postoje izvesne uslovljenosti i logičke interakcije.

Istovremeno, naučni doprinos rada ogleda se i u:

- analizi postojećih pojedinačnih i kombinovanih fazi više kriterijumskih modela koji se koriste za rešavanje problema odlučivanja;
- identifikovanju najbitnijih nedostataka u postojećim više kriterijumskim modelima;
- utvrđivanju metodologija kojima se identifikovani nedostaci mogu prevazići;
- razvoju originalnih hibridnih modela koji kombinuju metode višekriterijumskog odlučivanja u fazi okruženju, kao i kreiranju modela koji uključuje logičke interakcije između atributa odlučivanja;
- primeni predloženih hibridnih višekriterijumskih modela u ostalim domenima istraživanja.

Konkretno unapređenje sistema odlučivanja predstavljeno je izborom najpovoljnije varijante izbora metode otkopavanja rudnika sa podzemnom eksploatacijom.

Primenom naučnih metoda u rešavanju problema opisanih u predhodnom delu teksta očekuje se bitan napredak i postizanje sistematičnosti naučnog saznanja u oblasti rudarstva s obzirom da je metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa „mlada“ i tek se širi njena primena u svim oblastima.

Struktura doktorske disertacije. Doktorska disertacija se sastoji iz četiri dela.

Faza I - Identifikovanje predmeta istraživanja u realnim poslovnim sistemima. Osnovni zadatak je definisanje polaznog problema odlučivanja, što podrazumieva određivanje relevantnih alternativa za donošenje odluke. U okviru ove faze korišćena je metoda deskripcije, kako bi se detaljno opisao predmet istraživanja. Potom se pristupilo analitičko-sintetičkoj metodi, gde se predmet istraživanja razlaže na sastavne delove i struktuiru u hijerarhijsko stablo.

Faza II - Analiza postojećih metoda VKA za rešavanje predmeta istraživanja. Ključni zadatak je identifikovanje klasičnih i fazi metoda VKA koje se u literaturi koriste za rešavanje problema odlučivanja. Takođe, od interesa je utvrditi i mogućnosti njihovog kombinovanja, kako bi se postigli pouzdaniji rezultati. U okviru ove faze od opštih naučnih metoda korišćena je metoda analize, kao i komparativna metoda kojom se omogućava upoređivanje metoda VKA.

Faza III - Izbor klasičnih i fazi metoda VKA za rešavanje predmeta istraživanja. Na osnovu analize VKA metoda iz prethodne faze, moguće je utvrditi koje su se tehnike u literaturi izdvojile kao pogodne za rešavanje predmetnog problema odlučivanja. Razmatrani su kako klasični tako i fazi VKA pristupi. Od opštih naučnih metoda u okviru ove faze korištene su analitičko-sintetička i komparativna, dok su od konkretnih naučnih metoda primenjene FAHP i VIKOR.

Faza IV – Kombinovanje klasičnih i fazi metoda VKA za rešavanje predmeta istraživanja. Osnovni zadatak je razmotriti mogućnosti kombinovanja metoda VKA i teorije fazu skupova, kako bi se

nadomestili nedostaci pojedinih metoda. Od konkretnih naučnih metoda u okviru ove faze predstavljene su sledeće metode: FAHP i VIKOR.

Faza V – Evaluacija dobijenih rezultata. Osnovni zadatak je komparacija rezultata istraživanja dobijenih kombinovanjem metoda VKA. Opšte metode koje će se koristiti u okviru ove faze su: metoda komparacije, metoda merenja rezultata i zaključivanje.

Prilikom proračuna za obe date metode višekriterijumske optimizacije za izbor optimalne metode podzemnog otkopavanja ležišta bakra korišćena je kvalitativna ocena, odnosno skala vrednovanja za opis poređenja parova elemenata kriterijuma, podkriterijuma i alternativa. Kod izučavanja kompleksnih sistema kao što su ležišta ruda, korišćenje heurističkog pristupa odnosno znanje eksperta, intuicija i iskustvo su od velikog značaja zbog geologije, fizičko-mehaničkih osobina stena kao i zbog hidrogeoloških uslova ležišta.

II. TEORIJSKI DEO

U ovom delu prikazane su osnovne metode koje se koriste prilikom otkopavanja neslojevitih ležišta u podzemnoj eksploataciji na konkretnom primeru ležišta bakra „Borska reka“ kao i naučna metodologija koja je primenjena u ovoj doktorskoj disertaciji.

1. Podzemna eksploatacija i metode otkopavanja

Glušćević (1974) ističe da proces podzemne eksploatacije rudnih ležišta obuhvata tri osnovne faze i to: otvaranje, pripremu i otkopavanje.

Otvaranje ima za cilj da se podzemnim prostorijama poveže površina sa ležištem ili njegovim delovima i na taj način omogući transport i izvoz korisne sirovine, materijala, opreme i ljudi, a isto tako da se omogući provetravanje i odvodnjavanje podzemnih radova.

Priprema obuhvata izradu podzemnih prostorija u samom ležištu, odnosno u pratećim stenama kojima se ležište ili delovi ležišta pripremaju za otkopavanje.

Otkopavanje je način dobijanja korisne sirovine iz ležišta ili njegovih delova u većim količinama pomoću raznih metoda otkopavanja.

Način otvaranja i otkopavanja ležišta zavisi od oblika ležišta, njegove veličine, uslova zaleganja, fizičko-mehaničkih svojstava rude i pratećih stena, hidroloških prilika, osetljivosti površine na rudarske radove, mineraloško-hemijskog sastava rude, načina raspodele minerala i vrednosti sirovine. Rudna tela nepravilnog oblika obično se moraju otkopavati nekom metodom sa zasipavanjem, a veličina rudnog tela je često odlučujući faktor, jer odražava količinu rudnih rezervi. Pored veličine veliki značaj ima i moćnost, tj. debljina rudnog tela. Od uslova zaleganja presudni su dubina ležišta ispod površine, nagibni ugao, karakter kontakta i tektonske prilike. Na većim dubinama treba izbegavati metode otvorenih otkopa sa ostavljanjem sigurnosnih stubova, a treba primeniti metode sa zasipavanjem.

Genčić (1973) navodi da se kod podzemnog otkopavanja ležišta mineralnih sirovina razlikuju metode otkopavanja neslojevitih i slojevitih ležišta.

Torbica & Petrović (1997) ističu da u zavisnosti od načina rada otkopavanje može da bude:

- Etažno, kada se sve radne operacije (bušenje i miniranje, utovar, podgrađivanje itd.) obavljaju u okviru etaže u otvorenom otkopu. Etažnom otkopavanju pripada i otkopavanje sa magaziniranjem rude, bez obzira što se utovar rude vrši na dnu bloka, zbog dominantnog ušesća radnih operacija i prisustva ljudi u otvorenom otkopu.
- Podetažno, kada se sve radne operacije obavljaju u podetažnom hodniku.
- Blokovsko, kada se sve radne operacije obavljaju u okviru bloka, bušenje najčešće sa vrha bloka iz nadseka, a utovar uvek na dnu bloka. Blokovskom otkopavanju pripada i slučaj kada se ruda dezintegriše bušenjem i miniranjem iz podetaže, a utovar obavlja na dnu bloka.

Glušćević (1974) & Genčić (1973) navode da kod podzemne eksploatacije rudnih ležišta i izbora metode otkopavanja i njenih konstruktivnih parametara, pored izučavanja i poznavanja prirodnih uslova težišta je potrebno da se ispuni niz tehničko-ekonomskih uslova:

- Sigurnost i zdravi uslovi rada,
- Niski gubici rude odnosno metala,
- Obezbeđenje potrebnog kapaciteta proizvodnje, i
- Niski troškovi proizvodnje.

U toku otkopavanja se izvode sledeće operacije: bušenje, miniranje, usitnjavanje, propuštanje, utovar i prevoz rude, a pored toga, mogu da se izvode i operacije osiguranja, zasipavanja ili zarušavanja otkopa. Budući da se kod rudnih ležišta proces otkopavanja može odvijati na razne načine, postoji veliki broj metoda.

Sve metode otkopavanja mogu se grupisati u nekoliko osnovnih grupa. Razni autori vršili su grupisanje po obliku i veličini, a neki po padu i veličini i sl. Sve ove klasifikacije imaju niz nedostataka jer se pri izlaganju pojedinih metoda često ponavlja ista materija. Iz tih razloga danas u svetu postoje dve do tri klasifikacije koje se zasnivaju na principu održavanja otkopa u toku i posle otkopavanja, ili održavanje otkopa za vreme otkopavanja, a zatim zarušavanja otkopanih prostora, usled čega dolazi do sleganja površine.

U ovom slučaju data je klasifikacija koja je izvršena po uzoru na rusku stručnu literaturu. U tabeli 1 su dati pregledi glavnih grupa i podgrupa.

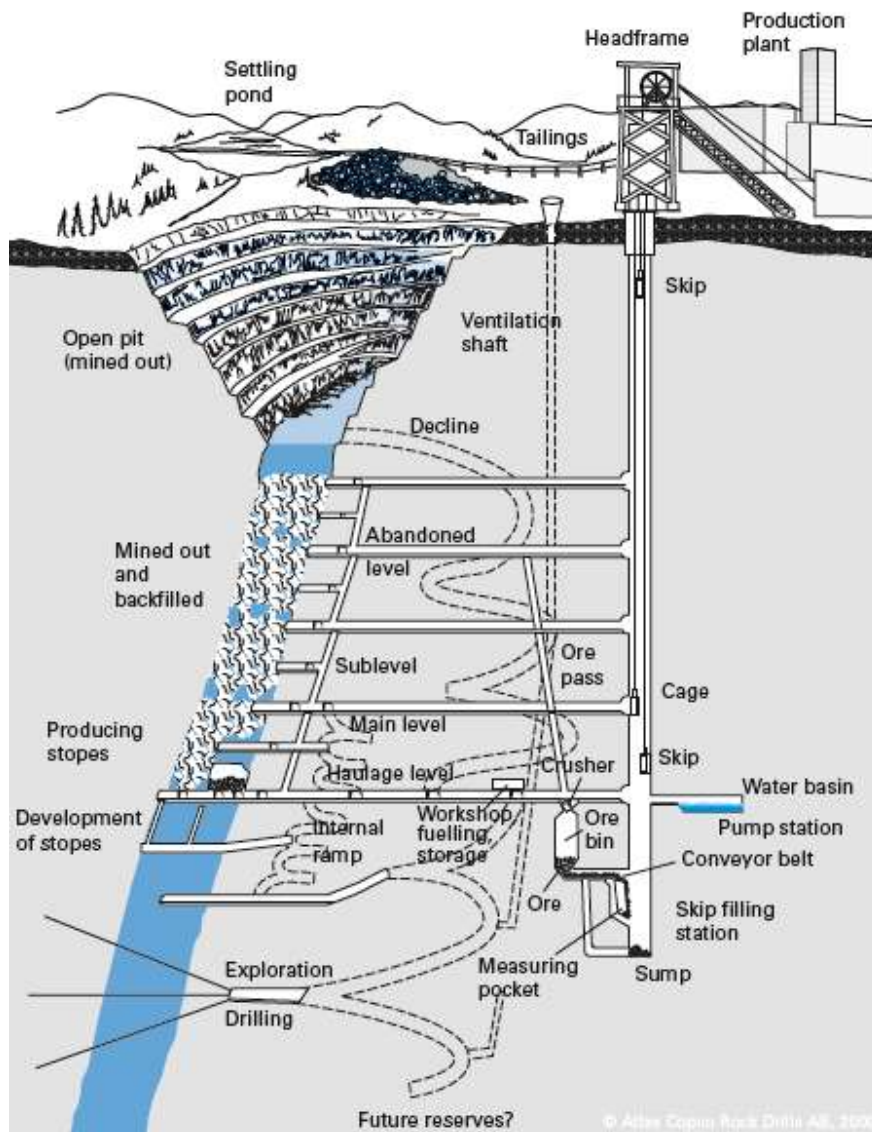
Tabela 1. Klasifikacija metoda otkopavanja

Grupa	Naziv grupe	Naziv podgrupe
I	Metode otvorenih otkopa	Metode frontalnog otkopavanja, Metode stepenastog otkopavanja, Metode otkopavanja obrnutim stepenicama, Komorno stubne metode, Podetažne metode otkopavanja po pružanju ležišta, Podetažne metode otkopavanja poprečno na pružanje ležišta, Podetažne metode otkopavanja za ležišta sa blažim padom
II	Magazinske metode otkopavanja	Magazinske metode otkopavanja po pružanju ležišta, Magazinske metode otkopavanja poprečno na pružanje ležišta
III	Metode sa zasipavanjem otkopanih prostora	Metode krovnog smernog otkopavanja u horizontalnim etažama, Metode krovnog otkopavanja poprečno na pružanje ležišta u horizontalnim etažama, Metode otkopavanja samozasipavanjem, Metode krovnog smernog otkopavanja u kosim etažama, Metode krovnog poprečnog otkopavanja u kosim etažama, Metoda otkopavanja u kosim etažama putujućim zasipom
IV	Metode otkopavanja sa podgrađivanjem i zasipavanjem otkopanih prostora	Metode otkopavanja u horizontalnim etažama po pravcu pružanja, Metode otkopavanja u horizontalnim etažama

		poprečno na pružanje ležišta proširenim hodnicima, Metode otkopavanja kvadratnim slogovima u horizontalnim etažama, Metode otkopavanja kvadratnim slogovima poprečno na pružanje u blokovima, Metode otkopavanja u horizontalnim etažama na dole primenom veštačkog krova od betona
V	Metode otkopavanja podgrađivanjem otvorenih otkopa	Metode otkopavanja u horizontalnim etažama, Metode frontalnog otkopavanja, Metode otkopavanja po padu ležišta
VI	Metode otkopavanja sa obrušavanjem krovinskih stena	Metode otkopavanja zarušavanjem neposredne krovine, Metode otkopavanja zarušavanjem krovine u etažama, Metode krovnog zarušavanja sa frontalnim otkopavanjem
VII	Metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i jalovih stena	Metode podetažnog zarušavanja, Metode blokovskog samozarušavanja, Metode prinudnog blokovnog zarušavanja
VIII	Kombinovane metode	Kombinovane metode otkopavanja komora podetažnim metodama, a sigurnosnih stubova miniranjem dubokih bušotina, Kombinovane metode otkopavanja komora magazinskim metodama, a sigurnosnih stubova metodama zarušavanja, Kombinovane metode otkopavanja komora zasipavanjem, a sigurnosnih stubova raznim metodama

Na kraju, najuspešnija metoda će biti ona koja daje najveću proizvodnju uz najviše korisne komponente u najkraćem vremenu, uz najmanji utrošak energije i materijala, pri potpunoj sigurnosti za zaposlene, a bez nepovoljnih posledica za dalji razvoj rudnika.

Industrijska svetska kompanija Atlas Copco (2007) za proizvodnju rudarske opreme dala je prikaz postupka osnovne infrastrukture funkcionisanja nekog podzemnog rudnika (slika 1). Rudarske metode koje se koriste u podzemnoj eksploataciji su prilagođene stenskim uslovima, obliku, dimenzijama, čvrstoći i stabilnosti rudnog tela. Da bi se eksploatacija uspešno obavljala potrebna je infrastruktura za pristup radnim mestima, proizvodnju i transport rude, ventilacija, odvodnjavanje, kao i održavanje opreme. Prevoz ljudi, rude i otpada se obavlja preko vertikalnih hodnika. Hodnik formira pristup raznim podzemnim horizontima. Hodnici i rampe povezuju otkope sa vertikalnim otvorima koji služe za prenos rude u bunke za rudu, zatim centralne sipke za transport rude šinama ili nekim drugim načinom, kao i stanice za kretanje rudara. Izminirana ruda se tovari iz otkopnog nivoa preko centralne sipke do etaže za prevoz rude, zatim do drobilice. Drobljena ruda se zatim skladišti u bunker pre nego što se prebacuje transporterom do dozera za punjenje skipa u skip za prevoz rude, odakle se podiže na površinu. Ventilacija je neophodna za uklanjanje štetnih gasova i prašine od eksplozije, izduvnih gasova iz dizel-motora mašina i za obezbeđivanje svežeg vazduha za rudare. To se obično obezbeđuje preko ventilacionih hodnika. Ventilatori visokog pritiska na površinu izvlače izduvne gasove.



Slika 1. Osnovna infrastruktura potrebna za tipičan podzemni rudnik (Atlas Copco, 2007)
 Legenda: (settling pond-taložnik; tailings-jalovina; headframe-izvozni toranj; production plant-flotacija; open pit (mined out)-površinski kop (otkopani); mined out and backfilled-otkopani i zapunjeni otkop; producing stopes-otkopni nivo; development of stopes-pripremljene etaže (nivoi); ventilation shaft-ventilaciono okno; decline-spiralni niskop; skip-skip za prevoz rude; cage-minski lift za transport rudara; abandoned level-stari rad; sublevel-etaža; main level-glavna etaža; haulage level-izvozna etaža; ore pass-centralna rudna sipka; crusher-drobilica; internal ramp-rampa; workshop, fuelling, storage-radionica, magacin stanica za skladištenje goriva; ore bin-bunker za rudu koja čeka otpremu; ore-ruda; water basin-glavni vodosabirnik; pump station-crpna stanica; conveyor belt-pokretna traka; skip filling station-utovarno mesto; sump-vodosabirnik (odakle se pumpa sav materijal u glavni vodosabirnik pa na površinu); exploration drilling -istražno bušenje; measuring pocket-rudni džep; future reserves-buduće rezerve;

U prethodnom periodu izvedeno je više tehno-ekonomskih analiza i naučno-istraživačkih studija o mogućnostima eksploatacije rude iz rudnog tela „Borska Reka“ Objavljen je veliki broj naučnih radova na temu izbora metode otkopavanja kao i nekoliko doktorskih disertacija. Za eksploataciju

ležišta "Borska Reka" razmatrane su visoko kapacitativne i visoko produktivne metode otkopavanja, koje bi omogućile ekonomski isplativo otkopavanje rude sa malim sadržajem metala.

U ovoj doktorskoj disertaciji biće razmatrane neke od klasifikovanih metoda, od kojih će na kraju biti izabrana optimalna. S obzirom da rudno telo „Borska reka“ pripada grupi siromašnih rudnih tela sa niskim sadržajem bakra, kao i zbog dubine zaleganja na kojoj se nalazi i postojanja objekata na površini terena iznad rudnog tela, opredelila sam se za proučavanje 5 primenljivih vrsta metoda, kao mogućih za otkopavanje jednog ovakvog ležišta.

1.1. Metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i okolnih stena

Glušćević (1974), Torbica & Petrović (1997) navode da se osnovna karakteristika ovih metoda sastoji u tome što se jedan odsek ili blok iznad pripremnih radova zarušava bušenjem i miniranjem, ili pod dejstvom sopstvene težine i težine više ležećih masa. Zarušena ruda se ispušta kroz pripremljene otvore, usled čega dolazi do zarušavanja više ležećih jalovih stena, koje se sležu zajedno sa rudom.

Ove metode spadaju u visoko produktivne, ali su karakteristične po većim gubicima odnosno malom iskorišćenju rude iz ležišta i većem osiromašenju rude. Takođe, dolazi do velikog ugrožavanja životne sredine, velika su investiciona ulaganja za izmeštanje objekata i infrastrukture na površini terena, veliki je obim fizičkog razaranja okolnog masiva ili su ove metode potpuno neprimenjive zbog opasnosti od provala akumuliranih voda. Otkopavanjem ležišta metodama sa zarušavanjem, uništava se veliki obim komunalne, saobraćajne i industrijske infrastrukture na površini terena, naselja, deo jamske infrastrukture i posebno se remete tokovi površinskih i podzemnih voda koji imaju značajan uticaj na efekte i bezbednost eksploatacije. Iz tih razloga ove metode se primenjuju za manje vredne rude, koje nisu sklone većoj oksidaciji, samozapaljenju i lepljivosti. U cilju manjeg osiromašenja rude, poželjno je da se ruda drobi u manjim, a jalovina, u krupnijim komadima.

Pojedine metode i varijante iz ove grupe razlikuju se međusobno po visini i površini zarušenog masiva, kao i po načinu ispuštanja, odnosno točenja izdrobljene rude. U ovu grupu spadaju sledeće metode:

- Metode podetažnog zarušavanja, u koje spadaju: metode podetažnog zarušavanja moćnih ležišta strmijeg zaleganja, metode podetažnog zarušavanja užih ležišta, metode podetažnog zarušavanja položenih ležišta i metoda podetažnog zarušavanja magazioniranjem rude,
- Metode blokovnog samozarušavanja,
- Metode prinudnog blokovnog zarušavanja.

1.1.1 Metode podetažnog zarušavanja moćnih ležišta strmijeg zaleganja

Metode podetažnog zarušavanja razvile su se iz metoda krovnog zarušavanja, sa ciljem da se poveća produktivnost metode i da se snize troškovi otkopavanja.

Kod nas se najviše primenjuje „Švedska varijanta” podetažnog otkopavanja sa zarušavanjem, koja se sastoji u sledećem postupku: jednostavna je, sa manjim obimom pripremnih radova, a kojom se postižu veliki otkopni učinci. Metoda se razvila u švedskim rudnicima magnetita. Ova varijanta može se primenjivati za sve tipove ležišta moćnosti preko 2- 3 m. Kod ležišta manje moćnosti ugao zaleganja treba da je jako strm, a kod moćnih ležišta ugao zaleganja može da bude blaži. Ruda može da bude srednje i veće čvrstoće, što je i poželjno, jer pripremljene radove ne treba podgrađivati.

Ova metoda se uglavnom primenjuje za otkopavanje manje vredne rude koja nije sklona većoj oksidaciji, samozapaljenju i lepljivosti. Spada u visokoproduktivne metode otkopavanja sa većim gubicima i većim osiromašenjem rude. Otkopavanje se vrši odozgo naniže. Priprema za otkopavanje se sastoji od izrade podetažnih hodnika na svakoj podetaži. Na svakoj podetaži se izrađuju otkopni hodnici koji su međusobno paralelni i koji se nalaze na određenom rastojanju, jedan od drugog. Pri tome, otkopni hodnici niže podetaže uvek se lociraju tako da u vertikalnom preseku budu tačno između otkopnih hodnika sa više etaže, odnosno da sa nalaze međusobno raspoređeni u vidu polja na šahovskoj tabli.

Tehnologija otkopavanja je zasnovana na klasičnim bušačko-minerskim radovima sa utovarom, transportom i izvozom rude sa otkopa. Za bušenje minskih bušotina u otkopnim hodnicima primenjuju se specijalna bušača kola, koja buše dugačke minske bušotine odozdo naviše u lepezastom rasporedu, neposredno iz podetažnih hodnika. Utovar odminirane (oborene) rude i transport iz otkopnog hodnika obavlja se dizel utovaračima. Utovarom rude iz otkopa stvara se prazan otkopan prostor u koji se zarušavaju stenske mase koje se nalaze iznad rudnog tela. Rudna okna povezuju podetažne nivoe sa glavnim izvoznim horizontom. Iz rudnih okana ruda se istače preko vibrododavača na transportne trake kojima se dalje izvozi do izvoznog okna, a preko njega dalje na površinu.

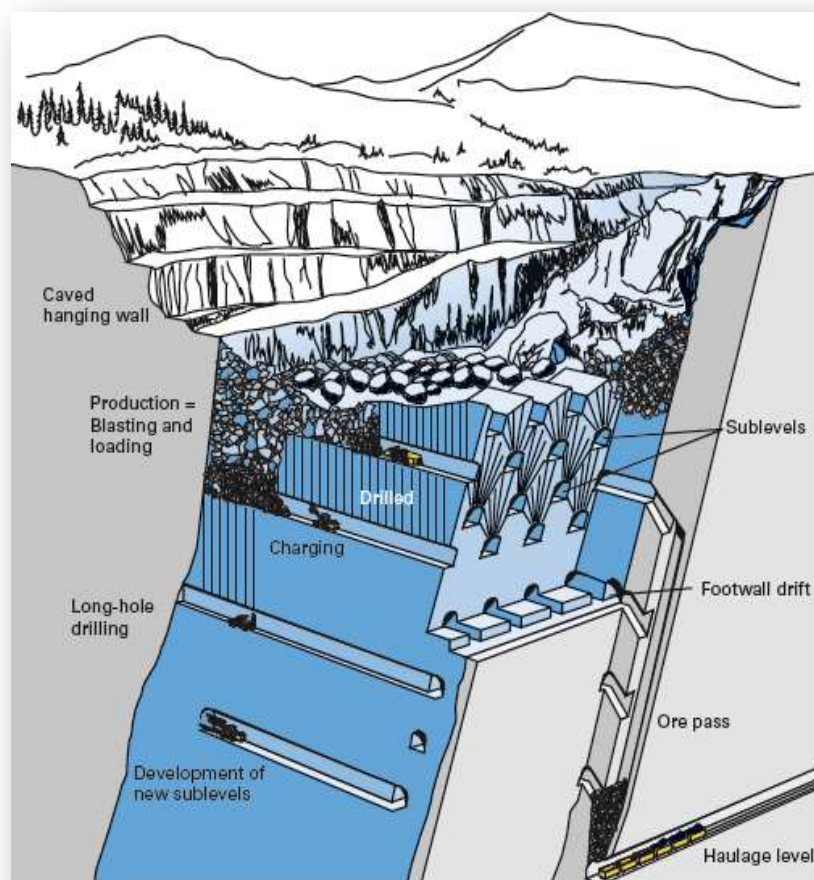
Tehnološke operacije bušenja, miniranja, utovara, transporta i izvoza rude, ponavljaju se, kako je dinamikom otkopavanja predviđeno. Provetravanje podetaža se obavlja protočno pri čemu se sveža vazдушna struja uvodi preko servisnog okna i servisnog niskopa, pa preko podetaža do otkopnih hodnika. Otkopni hodnici se provetravaju separatno preko jamskih ventilatora za separatno provetravanje. Istrošena vazдушna struja se izvodi napolje preko ventilacionih okana sa kojima su povezane sve podetaže. Odvodnjavanje otkopa je gravitaciono, pri čemu se voda spušta do najnižeg nivoa preko podetaža, servisnog niskopa i dalje do pumpnih stanica. Pumpne stanice preko cevovoda izbacuju otpadnu vodu napolje kroz servisno i delom kroz izvozno okno. Na slici 2 je dat prikaz metode podetažnog zarušavanja rude.

Kod ove varijante podetažnog zarušavanja rude, iskorišćenje rude iz bloka i osiromašenje su u funkcionalnoj zavisnosti. Ukoliko se iz rudnog bloka zahteva veće iskorišćenje rudne mase, utoliko će biti veće osiromašenje i obrnuto, tj. ukoliko se zahteva manje osiromašenje, utoliko će biti veći gubici rudne mase. Kod vrednih i bogatijih ruda iskorišćenje treba da bude veće pa će i osiromašenje biti veće, dok kod siromašnih ruda osiromašenje mora da bude manje, jer je sadržaj korisne komponente nizak pa bi se većim osiromašenjem još više umanjio, što bi se negativno odrazilo na ekonomičnost.

Iskorišćenje rude kod ovih metoda kreće se u granicama od 70-95%, a osiromašenje od 5- 30%. Stepen iskorišćenja i osiromašenja rude zavisi od pravilno izabranih parametara metode.

U rudnicima magnetita u Švedskoj, kao i u ostalim zemljama, pa i kod nas, poslednjih godina posvećuje se velika pažnja iznalaženju optimalnih parametara metode u cilju postizanja što većeg iskorišćenja i što manjeg osiromašenja rude, što je doprinelo da se ove metode u praksi sve više primenjuju, jer se postižu veliki učinci i niski troškovi proizvodnje.

Kod metoda podetažnog zarušavanja užih ležišta odnosno ležišta moćnosti od 2 m pa do 10 i 15 m sa strmim zaleganjem isto tako mogu se otkopavati po švedskoj varijanti.



Slika 2. Način otkopavanja primenim metode podetažnog zarušavanja (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (sublevels-podetaže; caved hanging wall-krovina; production = blasting and loading-proizvodnja = miniranje i utovar rude; charging-punjenje; drilled-bušenje; long-hole drilling-dubokih bušotina; development of new sublevel-razvijanje nove podetaže; footwall drift-sipka; ore pass-glavna sipka; haulage level- etaža za izvoz rude

1.1.2. Metode podetažnog zarušavanja položenih ležišta

Horizontalna ili blago nagnuta pločasta ili uslojena ležišta veće moćnosti, sa siromašnom imanje vrednom rudom, mogu se isto tako otkopavati po švedskoj varijanti. S obzirom na horizontalni ili blagi nagib ležišta, visinska razlika između podetaža treba da iznosi od 5- 7 m. Kod ovoga načina otkopavanja, pri osiromašenju od 5-10%, iskorišćenje rude kreće se u granicama od 70-85%, što je zavisno od moćnosti ležišta. Kod moćnijih ležišta biće proporcionalno manji gubici rude, koji se većim delom javljaju u padini ležišta. Horizontalna i blago nagnuta ležišta moćnosti 8-15 m, gde se mogu formirati 2-3 podetaže, takođe je moguće otkopavati ovom metodom, ali će gubici rude biti veći, a biće i veći obim radova u jalovini.

1.1.3. Metoda podetažnog zarušavanja magaziniranjem rude

Dok se kod švedske varijante podetažnog zarušavanja miniranje rude vrši redom uskim pojasevima iz svakog otkopnog hodnika, posle čega se vrši utovar minirane rude, kod metode podetažnog

zarušavanja sa magazioniranjem rude, miniranje se istovremeno vrši u dve podetaže razne visinske razlike. Najpre se u višoj podetaži sa više redova lepezastih bušotina vrši masovno miniranje rudnog masiva veće visine, a zatim počinje u donjoj podetaži postepeno miniranje rudnog masiva manje visine.

Primenom ove metode smanjuje se obim pripremnih radova, povećava se visina zarušene rude i kapacitet proizvodnje, a dobija se i bolja granulacija rude. Iskorišćenje rude iznosi od 80-85%, pri osiromašenju od 10-15%.

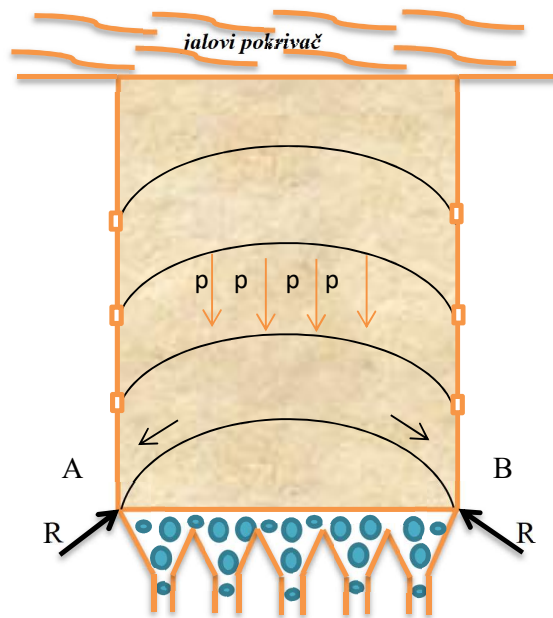
Prednosti metoda podetažnog zarušavanja su: postižu se veliki otkopni učinci, veliki kapacitet proizvodnje, niski troškovi proizvodnje, sigurnost pri radu, jer se radovi izvode iz otkopnih hodnika, nizak je utrošak potrošnog materijala (eksploziva, građe i dr.).

Nedostaci metoda se ogledaju u većem obimu pripremnih radova kod male visine podetaža, veći su gubici i veće je osiromašenje rude, postoji opasnost od zagrevanja rude i od požara kod ruda sklonih samozapaljenju, takođe slaba je ventilacija ukoliko se ne primenjuje dodatno provetravanje cevnim ventilatorima.

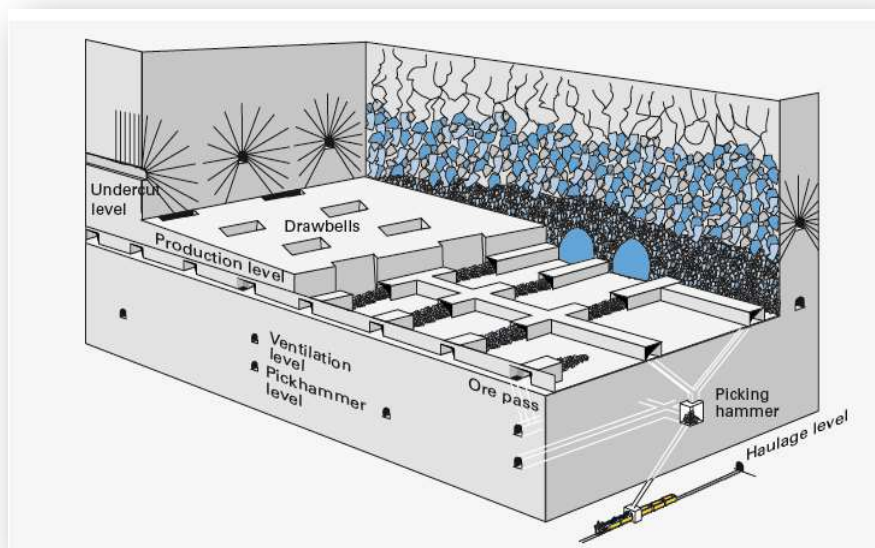
1.1.4. Metode blokovnog samozarušavanja

Metode blokovnog samozarušavanja su se razvile iz metode podetažnog zarušavanja. Cilj je da se poveća blok rude iznad pripremnih radova, pri čemu se za zarušavanje bloka rude koristi pritisak višeležećih masa, sopstvena težina rude i sila gravitacije. Prilikom korišćenja ove prirodne sile, smanjuje se utrošak rada na bušenju i utovaru rude sa jedne strane, a sa druge strane, utrošak eksploziva, građe i drugog materijala, kao i količina pripremnih radova po toni proizvedene rude. Metode blokovnog samozarušavanja primenjuju se za ležišta velikog prostranstva po dužini, širini i visini, horizontalnog, položenog i strmog zaleganja, sa srednje čvrstom i čvrstom rudom, koja je ispresecana u više pravaca prirodnim pukotinama i prslinama.

Rudni masiv se deli na blokove, koji se po celoj površini podsecaju, usled čega dolazi do samozarušavanja bloka. Ruda ne sme biti lepljiva, ili da se sasvim sitno drobi, i ne sme da je podložna oksidaciji i samozapaljenju. Jalovina nad rudom treba da se drobi u veće komade od rude, jer će u tom slučaju biti manje osiromašenje, a poželjno je da je jalovina mineralizovana. Iznad krova prostorije stvara se prirodan svod, koji prenosi pritisak višeležećih masa na bokove prostorije. Masa koja se nalazi unutar svoda gubi čvrstoću i usled sopstvene težine pada u prazan prostor. Najveća naprezanja nastaju na ivičnim zonama prirodnog svoda i prenose se na oslonce duž bočnih ivica otvorene prostorije u tačkama *A* i *B*, u kojima se javlja reakcija *R*. Kad otpočne zarušavanje rude iz krova prostorije, zarušenu rudu treba izvlačiti, jer ona zauzima veći prostor od kompaktne rude, pa je potrebno obezbediti dovoljno prostora da bi se nastavilo zarušavanje. U procesu nastavka zarušavanja svod se premešta naviše, odnosno moraju se oslabiti ivice bloka po vertikali. Ivice bloka oslabe se podetažnim hodnicima, a zatim na bočnim ivicama, pod dejstvom sopstvene težine i pritiska višeležećih masa, i na taj način masa nastavlja da se zarušava. Zarušenu rudu treba i dalje stalno izvlačiti preko unapred pripremljenih levkastih sipki. Na slici 3 je prikazano šematski kako dolazi do samozarušavanja jednog bloka, a na slici 4 je dat prikaz metode metode blokovskog samozarušavanja.



Slika 3. Šematski prikaz početka samozarušavanja jednog bloka



Slika 4. Prikaz metode otkopavanja blokovskog zarušavanja (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (undercut level-podetaža; production level-nivo proizvodnje; drawbells-otkopi; ventilation level-ventilacioni nivo; pickhammer level- otkopni nivo; ore pass-sipka za rudu; picking hammer- bušaći čekić; haulage level- izvozna etaža)

Prednosti metoda podetažnog zarušavanja: postižu se veliki otkopni učinci, veliki kapacitet proizvodnje, niski troškovi proizvodnje, odnosno najekonomičnije su od svih podzemnih metoda otkopavanja, vrlo velika sigurnost pri radu, jer se radovi izvode iz otkopnih hodnika, nizak je utrošak potrošnog materijala (eksploziva, građe i dr.). Kao i predhodne metode, i ove imaju određene nedostatke prilikom primene: veći je obim pripremnih radova kod male visine podetaža, veći su gubici i veće je osiromašenje rude, postoji opasnost od zagrevanja rude i od požara kod ruda

sklonih samozapaljenju, slaba je ventilacija ukoliko se ne primenjuje dodatno provetravanje cevnim ventilatorima.

1.1.5. Metode prinudnog blokavnog zarušavanja

Ove metode karakteristične su po tome što se rudna masa posredstvom bušenja i miniranja zarušava po celoj visini bloka, odnosno horizonta, a zatim se oborena ruda dejstvom sile gravitacije, preko levkastih sipki, ispušta na horizont skreperovanja ili na izvozni horizont. Istovremeno sa rudom sleže se i krovna jalovina. Takođe ima mnogo sličnosti sa predhodnom, sa razlikom u tome što se kod metode prinudnog blokavnog zarušavanja rudna masa u bloku zarušava pod dejstvom miniranja rudne mase, a ne pod dejstvom pritiska višeležećih masa.

Metode se primenjuju za horizontalna i blago nagnuta ležišta moćnosti ne manje od 25-30 m, a za ležišta sa uglom padanja oko 70^0 , minimalne moćnosti 20-25 m. Kod ležišta manje moćnosti i sa uglom manjim od 70^0 , može doći do većih gubitaka rude koja se zadržava na podinskom boku pa su potrebni dodatni pripremni radovi radi izvlačenja rude. Ovo utiče na ekonomičnost metode pa su zato ove metode ekonomičnije za moćna ležišta. Primena je moguća i za siromašnije i manje vredne rude, jer gubici iznose oko 20%, a i više. Iz svega izloženog vidi se da se ove metode mogu primeniti za razne rudarsko - geološke uslove, zbog čega imaju široku primenu za razne tipove većih ležišta.

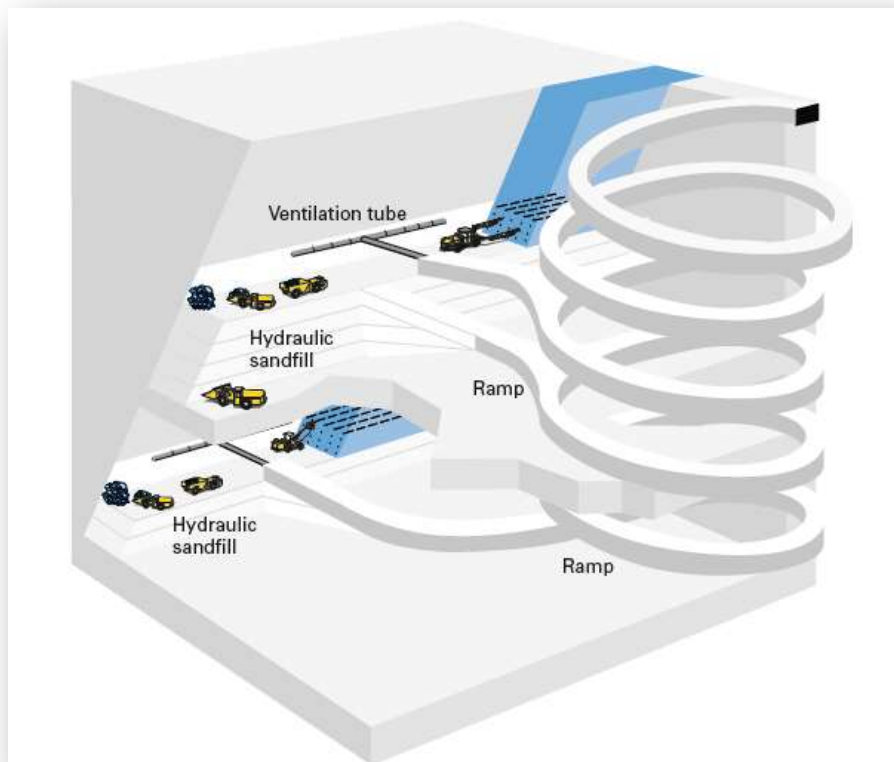
1.2 Metode otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora i sistemi zasipavanja

Ove metode su dobile naziv po tome što se prazni prostori iz kojih je povadena ruda ispunjavaju jalovim materijalom koji se naziva zasip (Glušćević, 1974). Uloga zasipa je da spreči obrušavanje bokova ležišta, odnosno da se zaštite objekti na površini od obrušavanja i da služi kao stajalište za izvođenje raznih operacija u toku otkopavanja. Takođe služi i kao sigurnost radnika i omogućava odgovarajuću ventilaciju. Ponekad se prazni prostori zasipavaju sa ciljem da se zaštiti površina od obrušavanja, ili radi efikasnijeg otkopavanja sigurnosnih stubova.

Princip rada kod ovih metoda sastoji se u tome da se izvesni deo rudnog tela otkopa u vodoravnim oresecima tj. ruda se bušenjem, a zatim miniranjem obori na zasip i potovari, a potom se otkopani deo popunjava zasipom. Između zasipa i rudnog masiva ostaje otvoren radni prostor visine oko 2 m, a ređe 1-1,5 m ili više od 2 m, ili se otkop u potpunosti do krova popunjava zasipom. Operacije bušenja, miniranja, utovara rude i zasipavanja ponavljaju se i otkopavanje napreduje od nižeg ka višem delu ležišta. Na slici 5 je dat prikaz metode sa zasipavanjem otkopanih prostora.

Metode sa zasipavanjem mogu se podeliti u dve grupe:

- Metode gde zasip služi kao permanentno sredstvo osiguranja bokova, a otkopi se samo na slabijim delovima osiguravaju raznom vrstom podgrade,
- Metode gde zasip isto tako služi kao sredstvo osiguranja bokova, a otkopi se u celosti osiguravaju podgradom u vidu raspirača, okvira, kvadratnih slogova ukrasnih drvenih stubova. Podgrada većim delom ostaje zakopana u zasipu.



Slika 5. Prikaz metode otkopavanja sa zasipavanjem (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (ventilacion tube-podzemni hodnik za ventilaciju; hydraulic sandfill-hidraulični zasip; ramp-rampa)

Ove obe grupe metoda primenjuju se za sve oblike ležišta, sa pravilnim i nepravilnim konturama, a padni ugao treba da iznosi najmanje oko 40-45°. Prva grupa primenjuje se za ležišta sa slabijim bokovima a čvršćom rudom, a druga grupa sa slabijim bokovima a trošnijom i manje otpornom rudom. Iz tih razloga se otkopi većih i manjih dimenzija stalno podgrađuju, a kad se potovari ruda, otkopi se odmah zasipavaju.

I kod jedne i kod druge grupe metoda, kod moćnijih ležišta sa većim površinama, primenjuju se i sigurnosni stubovi. Za ležišta koja duboko zaležu i gde se javljaju veći pritisci isključivo se primenjuju metode sa zasipavanjem otkopa.

Ove metode spadaju u najskuplje pa se zato primenjuju za ležišta sa visokim sadržajem metala i rude koje imaju veću vrednost.

Metodama sa zapunjavanjem praznih prostora pasta zasipom postiže se otkopavanje bez manifestacija na površini terena i ugrožavanja rudničke infrastrukture. Otkopavanjem sa zasipavanjem pastama koje očvršćavaju posle ugradnje, u kratkom periodu i sa relativno malim ulaganjima obezbeđuje se stabilna proizvodnja. Iskorišćenje u rudnoj supstanci je veliko i kreće se u granicama od 95-98%. Primenom raznih mehaničkih sredstava u toku otvaranja, pripreme i otkopavanja, ove metode se mogu primeniti i za siromašnije i manje vredne rude. Otkopavanje se može vršiti selektivno i masovno, što je zavisno od vrste rude, sadržaja metala, vrednosti rude i od sistema otkopavanja.

Otkopavanje rude metodama sa ostavljanjem praznih prostora, karakteristike - obezbeđuje visoke kapacitete i produktivnost bez osiromašenja rude. Visoki gubici rude u sigurnosnim stubovima i pločama, statička nesigurnost i ugroženost stabilnosti celoga sistema. Podgrađivanjem otkopa gubi se ekonomičnost a problem se ne rešava trajno. Ostavljanje praznih prostora velika je opasnost za rad rudnika i sigurnost zaposlenih radnika. Nedostaci ovih metoda rešavaju se naknadnim zapunjavanjem otkopa očvršćujućim zasipom. Zasipavanjem otkopa, obezbeđuje se stabilnost sistema i omogućava otkopavanje stubova formiranih u prvoj fazi i postiže visoko iskorišćenje rude iz ležišta.

1.2.1. Zasipni materijal i dobijanje zasipnog materijala

Miljković et al. (2012) navode da se za postizanje potpunog iskorišćenja ležišta, bez osiromašenja rude, uz očuvanje zemljine površine od deformacija, primenjuju otkopne metode sa zapunjavanjem otkopanih prostora bez ostavljanja zaštitnih stubova ili sa naknadnim dobijanjem zaštitnih stubova. Iz tog razloga se vrši zapunjavanje otkopa zasipom potrebne čvrstoće i određenih karakteristika:

- Suvog zasipa od lomljenog stenskog materijala pratećih stena ležišta ili dopremljenog sa zemljine površine (sa dodatkom vezivnog sredstva ili bez dodatka);
- Pneumatskog zasipa od drobljenog stenskog materijala, peska, pepela sa dodatkom vezivnih sredstava ili injektiranja vezivnim sredstvima već ugrađene zasipne mase;
- Hidrauličkog zasipa od hidrociklirane flotacione jalovine, pepela iz termoelektrana ili peskova sa dodatkom vezivnih materijala ili bez njih.
- Specijalnog zasipa od ledenih blokova, eksponirajućih masa, vode koja se zamrzava ili kombinovano, izgradnjom veštačkih stubova od kamenih ili betonskih blokova i zapunjavanjem praznih prostora između njih flotacionom jalovinom.

Odlaganje otpadnih stena predstavlja izazov zbog velike količine i zagađenja. Vetrovi mogu širiti prašinu i mikro čestice, a kiša može stvoriti iscedak iz teških i toksičnih elemenata koji se nalaze u otpadnim stenama i zagađuju hidrološku i hidrogeološku sredinu. Otkopi nastali primenom metoda podzemne eksploatacije otkopavanja rudnika mogu izazvati opasnosti kao što je nestabilnost terena. Rušenje stvorenih otkopa je jedan od glavnih faktora zbog nasilnog pucanja stene i potencijalnog propadanja zemljišta (Sheshpari, 2015).

Popunjavanje praznih otkopnih prostorija može se opisati kao tehnologija transporta komponenti koje formiraju zasip, kao što su kamen, šljunak, zemlja, čvrst industrijski otpad korišćenjem radne snage, gravitacijske ili mašinske opreme za popunjavanje podzemnih iskopanih praznina. Zasipni materijal se obično proizvodi od otpadnih stena drobljenjem, prosejavanjem i mešanjem mašinskom opremom.

Zasipni materijal se u otkopane prostorije doprema u suvom ili mokrom stanju, a ispunjavanje se obavlja ručno, mehaničkim sredstvima, pneumatski i hidraulično. Dobijanje zasipnog materijala vrši se iz podzemnih radova ili sa površine. Iz podzemnih radova materijal se dobija iz jalovih bokova ležišta, prebiranjem jalovine, zatim iz istražnih i pripemnih radova u jalovini, ili iz specijalnih podzemnih otkopa u jalovini. Sa površine, kao zasipni materijal, koristi se jalovina flotacije ili separacije, šljaka visokih peći i električne centrale, zatim razne stene u blizini rudnika, kao što su: škrljci, mekši krečnjaci, laporci i sl., kao i razni nanosi (pesak, šljunak, les i dr.) (Glušćević, 1974).

Zasipni materijal treba da odgovara određenim tehničko-ekonomskim uslovima. Kada se posmatraju tehnički uslovi, materijal treba da je inertan i da ne sadrži više od 8-15% pirita i oko 4% piritina. Takođe materijal ne treba da je previše abrazivan, specijalno kod pneumatskog i

hidrauličnog transporta, što utiče na habanje cevovoda i zasipnih mašina. Granulometrijski sastav mora biti određen, jer od granulometrijskog sastava, tvrdoće, čvrstoće i forme komada, kao i načina ugrađivanja, zavisi zbijenost materijala.

Prilikom popunjavanja otkopnih prostorija suvim zasipom, vlažnost ne bi smela da premašuje 10% iz razloga što veća vlažnost doprinosi lepljenje materijala pa samim tim otežava transport i ugrađivanje materijala, pogotovu ako su to škriljci. Pojedini komadi ne treba da premašuju 150-200 mm, a sadržaj gline da nije veći od 15%.

Princip pneumatskog zasipavanja sastoji se u potiskivanju granuliranog materijala komprimovanim vazduhom, kroz cevi preko zasipne mašine. Mešavina jalovine i komprimiranog vazduha u mašini za zasipavanje, potiskuje se u cevovode u kojima se mešavina kreće velikom brzinom, od 30-50 m/sek, čime se postiže zbijanje materijala u otkopu.

Pneumatsko zasipavanje primenjuje se za metode otkopavanja gde je potrebno u celosti zasuti otkope do krova.

Za pneumatsko zasipavanje materijal ne sme biti previše abrazivan i treba da ima sledeći granulometrijski sastav: udeo komada od 15-40 mm - od 75- 80%, a od 0,5-15 mm - od 20-25%. Povećanje sitnijeg materijala i prašine znatno povećava potrošnju komprimiranog vazduha. Količina glinastih materija ne sme da iznosi više od 10%.

Hidraulično zasipavanje je jedna od tehnologija punjenja koja koristi vodu kao transportno sredstvo za prenošenje hidrauličnih materijala za punjenje kao što su otpadni materijali, vodena hidrofilna šljaka, pesak... Od hidrauličnog zasipavanja, najpogodniji materijal je krupnozrnasti pesak ili ciklonirana jalovina flotacije, odnosno separacije. U zavisnosti od vrste materijala, odnos čvrste mase prema količini vode za pesak iznosi 1 : 0,75 ili 1 : 1, a za krupniji materijal od 1 : 1,5 do 1 : 3,5. Ako se primenjuje granulirana šljaka koja se lako transportuje vodom i cevima, radi bolje zbijenosti zasipa, preporučuje se dodavanje 10-15% peščano glinastog materijala.

U ekonomskom pogledu, potrebno je da troškovi dobijanja, transporta i ugrađivanja materijala budu što niži, što se postiže primenom mehaničkih sredstava.

Dobijanje materijala se vrši na više načina. Materijal, dobijen iz podzemnih radova je obično različitog petrografskog i granulometrijskog sastava, pa se primenjuje za suvo zasipavanje. Kod ležišta sa mešavinom siromašne i bogate rude i dodacima jalovine, gde se vrši selektivno otkopavanje, odabrana jalovina i siromašna ruda ostavlja se u otkopima za popunjavanje otkopa. Uglavnom količina te jalovine nije dovoljna, pa je za popunjavanje otkopa potrebno dopremiti zasip i iz drugih mesta, kao npr. iz jalovih bokova, istražnih i pripremljenih radova u jalovini, ili sa površine.

Zasipni materijal za manja rudna tela i uske žile se može dobiti iz jalovih bokova. Kod vrlo strmih ležišta i iz podinskog boka, u jalovom boku krovine izrađuju se strmi uskopi koji se proširuju ukoliko je to bezbedno. Uskopi se izrađuju na određenim odstojanjima da se zaspe otkopana etaža. Za narednu višu etažu sledeći uskopi se izrađuju između prethodnih. Kod manjih rudnih tela, umesto uskopa, mogu se izrađivati hodnici u jalovim bokovima. Ukoliko se uskopi ili hodnici izrađuju u trošnijim stenama, ovi načini dobijanja zasipnog materijala iz bokova mogu da stvaraju poteškoće u radu. Takođe i ako se postavljaju na kraćim odstojanjima. Vremenom, prazni prostori počinju da se zarušavaju, usled čega u višim etažama može doći do većih pritisaka i teškoća u daljem radu. U takvim okolnostima zasip treba obezbeđivati iz drugih izvora.

Kod jako uskih žila (od 0,2-0,8 m) i manjih rudnih tela, za dobijanje zasipa je potrebno manje materijala pa se proces zasipavanja, utovara i prevoza rude, obavlja obično ručno, bilo malim vagonetima ili ručnim kolicima.

Podzemno dobijanje zasipnog materijala vrši se formiranjem otkopa u jalovini. Sistem otkopavanja treba da bude što jednostavniji i jeftiniji, lokacija ovih otkopa u jalovini treba da bude u blizini rudnih tela radi kraćeg transporta materijala, ali na dovoljnoj udaljenosti od otkopa u rudi, da ne bi došlo do njihovog zarušavanja. U mekšim materijalima, koji se sami od sebe ruše na većim rasponima primenjuje se metod podsecanja veće površine uskopima, a još jedan način podzemnog dobijanja materijala za zasip može se postići podetažnim otkopavanjem dugačkim lepezastim bušotinama.

Površinsko dobijanje zasipnog negranulisanog materijala za suvo zasipavanje otkopa se vrši etažnim ili levkastim sistemom. Najpogodniji materijal za suvo zasipavanje otkopa predstavljaju škriljci, filiti, mekši peščari, laporci, tufovi i slične trošnije stene. Levkasti sistem dobijanja zasipnog materijala sastoji se u tome što se oko uskopa koji izbija na površinu, postepenim bušenjem i miniranjem oko uskopa formira kop u obliku levka. Materijal direktno pada u uskop na dnu kojeg se nalazi rešetka gde se razbijaju veći blokovi.

Najveća prednost levkastog načina dobijanja zasipnog materijala je u niskim troškovima proizvodnje. Jedan od većih nedostataka ovog sistema je opasnost od zarušavanja kosina levka, kao i mogućnost blokiranja uskopa većim blokovima, što sve skupa stvara velike poteškoće i opasnost u radu. U zimskim mesecima, za vreme kiša i snega, materijal se raskvasi, što se negativno odražava na kapacitet zasipavanja otkopa pogotovo ako materijal ima glinastih primesa. Površinske vode mogu se odvesti izradom kanala oko levka, a za vreme većih kiša, uskopi se moraju isprazniti da se materijal ne bi raskvasio. U takvim slučajevima miniranje se obavlja više puta u toku smene i kroz uskop se propuštaju manje količine materijala koji se odmah odvozi.

Za veće količine zasipnog materijala, bilo za suvo, pneumatsko ili hidrauličko zasipavanje, najprikladniji je površinski način dobijanja materijala etažama.

Suvi zasip se u jamu doprema gravitaciono, preko glavnih zasipnih uskopa. Pored ovog načina propuštanja materijala, on se propušta kroz cevi koje se ugrađuju u okna i uskope, ili bušotine većeg prečnika. Za ovaj način dopremanja, materijal mora da ima određeni granulometrijski sastav i primenjuje se za mehaničko, pneumatsko i hidraulično zasipavanje.

Popunjavanje praznih otkopa suvim zasipom je ekonomična metoda zasipavanja koja se primenjuje u mnogim slučajevima u podzemnom otkopavanju rudnika. Ovom metodom se smanjuje otpad na površini i povećava se upotreba zemljišta na površini, smanjuje se zagađenje životne sredine prenošenjem otpadnih stena na dublje nivoe iz kontakta sa kišom, povećava se stabilnost minirane površine i smanjuje se propadanje zemlje i pucanje stene zbog promene oblika rudnog tela (Sheshpari, 2015).

Gravitaciono zasipavanje se primenjuje za ležišta manje moćnosti, sa otkopavanjem u kosim etažama, kod magazinskih i podetažnih metoda. Prednosti ovog načina zasipavanja su što se ne troši električna energija i potrebno je vrlo malo fizičkog rada. Od mehaničkih sredstava za suvo zasipavanje otkopa najviše se primenjuju skreperi ili samohodni vagoneti.

Hidraulično zasipavanje ima velike prednosti nad ostalim vidovima zasipavanja. Potvrđeno je da se za transport pulpe koriste već postojeće saobraćajnice, koristi se otpadna jalovina flotacije, ovaj zasip ima najveću zapreminu i čvrstoću od svih ostalih vrsta zasipa (pogotovo sa dodatkom manjih količina vezivnog materijala). Takođe se postiže najmanji gubitak sitnih frakcija korisnih minerala koji propadaju u šupljine suvog zasipa, povećava se sigurnost rada jer kontrolu zasipavanja vrši

mali broj radnika sa sigurnih mesta i povećava se produktivnost otkopavanja, zbog brzine zasipavanja. Pored brojnih prednost, ovaj način zasipavanja ima i neke nedostatke. Kao najbitniji izdvaja se povećanje troškova odvodnjavanja jame, zatim povećava se vlažnost jamske atmosfere, kao i sitne čestice koje nosi voda se talože u kanalima i taložnicima koje treba čistiti.

Metode otkopavanja sa hidrozasipavanjem flotacionom jalovinom imaju malu produktivnost i nisku ekonomičnost. Troškovi transporta i ugradnje zasipa sa odvodnjavanjem su veliki. Kod rudnika obojenih metala sve se više u svetu i kod nas za zasipavanje otkopa koristi flotaciona jalovina (Torbica & Petrović, 1997).

Radi postizanja veće čvrstoće i nosivosti zasipa, potrebno mu je dodavati vezivnu komponentu. U te svrhe primenjuju se specijalne vrste zasipa. Svaki zasipni materijal, koji treba da očvrstne i da postane monolitan masiv, treba da sadrži sledeće komponente: osnovni zasipni materijal, vezujući materijal, koji će vezivati osnovni materijali vodu koja sa vezujućom komponentnom omogućuje vezivanje čestica osnovnog materijala. Kao osnovni zasipni materijal obično se primenjuje jalovina flotacije, zatim prirodni pesak i sitan šljunak, drobljeni krečnjak i ostali slični materijali, dok se kao vezujuća komponentna za stvrđjavanje zasipa najviše primenjuju: otpadni materijali sagorevanja (šljaka visokih peći, kotlavske šljake i pepeo i jalovina flotacije koja sadrži pirita i pirocina), građevinski vezujući materijali (cement, kreč i gips).

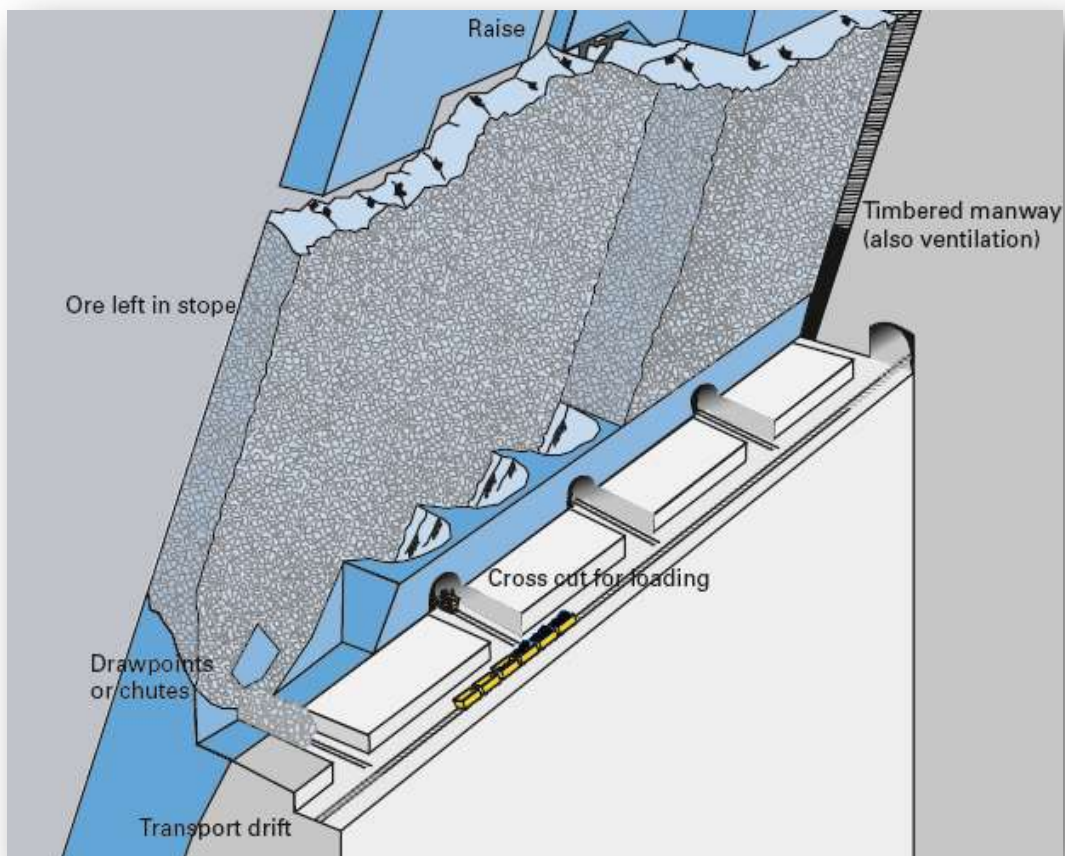
1.3. Magazinske metode otkopavanja

Gluščević (1974) u svom udžbeniku navodi da se kod magazinskih metoda minirana ruda postepeno akumulira u otkopu, počevši od nižeg ka višem horizontu. Pošto minirana ruda zauzima veću zapreminu od kompaktne rude, nakon svakog miniranja je potrebno da se iz otkopa izvlači oko 30-40% minirane rude, pri čemu ispod krova otkopa treba da ostane radni prostor visine oko 2 m. Minirana ruda donekle održava bokove i služi kao podloga za rad u otkopu, a posle završetka otkopavanja, kad se ceo otkop isprazni, prostor ostaje otvoren i održava se sigurnosnim stubovima. Ako se sigurnosni stubovi masovno otkopavaju, prazni prostori se zarušavaju i popunjavaju jalovim stenama. Ponekad se otkopi posle izvlačenja rude ispunjavaju jalovim materijalom, a sigurnosni stubovi otkopavaju po nekim drugim metodama otkopavanja.

Magazinske metode se primenjuju za žilna i sočivasta ležišta sa strmim padom, ne manjim od 60°, sa čvrstom rudom i čvrstim bokovima. Kontakt između rude i bokova treba da je oštar i da se ruda lako odvaja od bokova. U tom slučaju će osiromašenje biti manje, u suprotnom, osiromašenje će biti veće. Važno je napomenuti da rude koje sadrže glinasti materijal se ne mogu otkopavati magazinskim metodama zbog lepljivosti rude, stvaranja svodova i poteškoća kod ispuštanja rude iz otkopa. Takođe ove metode nalaze primenu za ležišta strmog pada, sa čvrstom rudom i bokovima. Otkopi se ispunjavaju miniranom rudom, koja se po završetku otkopavanja ispušta. Održavanje bokova vrši se sigurnosnim stubovima, koji se raspoređuju na određenim odstojanjima. Magazionirana ruda služi kao sredstvo održavanja bokova među stubovima, a ujedno služi kao stajalište, ukoliko se radovi izvode u magazinu. U toku otkopavanja slabije partije krovinskog boka mogu se osiguravati sidrima.

Iskorišćenje rudne mase kod magazinskih metoda zavisi od većeg broja faktora, kao što su, ugao nagiba ležišta, visina horizonta, moćnost sigurnosnih stubova, način njihovog odkopavanja i sl. Kod užih ležišta ukupno iskorišćenje je veće i kreće se od 90-95%, a kod moćnijih ležišta, od 80-90%. Osiromašenje uglavnom zavisi od moćnosti ležišta i karaktera kontakta. Kod jako uskih žila, od 0,2-0,7 m, gde je zbog minimalne širine otkopa potrebno uzimati i bočnu jalovinu, osiromašenje može da iznosi preko 50-80%, i u tom slučaju se vrši odabiranje i deponovanje jalovine u otkopima u posebnim bunkerima, ili se vrši odabiranje spolja, ili se cela masa daje u proces prerade.

U primeni su magazinske metode sa razvrstavanjem otkopa po pravcu pružanja ležišta i magazinske metode sa razvrstavanjem otkopa poprečno na pravac pružanja ležišta. Na slici 6 je prikazan način otkopavanja magazinskom metodom.



Slika 6. Način eksploatacije rude primenom magazinske metode otkopavanja (Atlas Copco, 2007)
 Legenda: (raise- uskop; ore left in stope-ostavljena ruda u otkopu; timbered manway-podgrađen prolazni hodnik; drawpoints or chutes-levkaste sipke ; cross cut for roading-prečni hodnici ; transport drift-transportni hodnik

Kod magazinskih metoda rad je potrebno tako organizovati da se jedna grupa otkopa nalazi u fazi pripreme, jedna u fazi otkopavanja i delimičnog ispuštanja rude iz magazina, a treća grupa otkopa, u fazi potpunog ispuštanja rude. Minirana ruda ne sme dugo da stoju u magazinima, jer može da dođe do formiranja svodova i zaglavljivanja, zbog toga ruda mora da je stalno u pokretu i duži zastoji nisu poželjni.

Ove metode otkopavanja imaju niz prednosti: manji je obim pripremnih radova, visoki su učinci na otkopavanju i niski troškovi proizvodnje, za utovar rude koristi se gravitacija, rad je siguran jer se može vršiti kontrola krova i bokova a ventilacija je vrlo dobra. Takođe je moguće obezbediti stalnu proizvodnju s obzirom da se u magazinima nalaze velike rezerve minirane rude. Pored navedenih prednosti postoje i određeni nedostaci. Oglledaju se u dužem vremenu do postupka proizvodnje, vezuju se veća finansijska sredstva u magaziniranoj rudi i kod uskih žila osiromašenje rude je veće.

1.4. Metode otvorenih otkopa

Metode otvorenih otkopa podrazumevaju:

- Metode frontalnog otkopavanja,
- Metode stepenastog otkopavanja, koje se ređe primenjuju, jer ih je moguće zameniti savremenijim i sigurnijim metodama,
- Metode otkopavanja obrnutim stepenicama, koje se retko primenjuju zbog velikog broja nedostataka, kao npr.: ispod radilišta se nalaze veliki otvoreni prostori koji predstavljaju stalnu opasnost za radnike, potrošnja građe je dosta velika, a troši se dosta vremena za postavljanje i odstranjivanje patosa, pa su i učinci dosta niski.,
- Komorno-stubne metode otkopavanja i
- Podetažne metode otkopavanja.

U nastavku teksta dat je prikaz metoda otvorenih otkopa koje se često koriste pri podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina.

1.4.1. Metode frontalnog otkopavanja

Ove metode su dobile naziv po načinu otkopavanja koji se obavlja širokim frontom po celoj moćnosti kod ležišta srednje moćnosti od krovine do podine rudnog tela, a kod veće moćnosti u više stepenica. U zavisnosti od veličine, ležište može biti podeljeno u otkopne blokove ili kompletno može biti jedan blok. Ove metode se primenjuju za horizontalna i blago nagnuta ležita pločastog i sočivastog oblika, moćnosti do 3 ili 4 m, a kod više-manje horizontalnih ležišta, do moćnosti 20 i 30 m. Najviše se primenjuju za ležišta gde se pored bogatije rude javlja vrlo siromašna ruda ili sa jalovim uključenjima. U tom slučaju se ostavljaju neregularni sigurnosni stubovi od siromašne rude ili jalovih uključenja. Sigurnosni stubovi su uglavnom kružnog ili eliptičnog preseka, a ostavljaju se na odstojanjima od 10-20 m (Glušević, 1974).

Horizontalna ležišta se otvaraju oknima koja se lociraju na jednom kraju ležišta, odakle se otpočinje otkopavanje. Kod ove metode nema pripreme. Kod manje prostranih ležišta otkopi napreduju celom širinom prostranstva ležišta, a kod ležišta većeg prostranstva, širina fronta u pojedinoj sekciji iznosi nekoliko desetina metara. Horizontalna rudna tela moćnosti do 4 i 5 m, pa i više, otkopavaju se celom visinom, a moćnija, sa jednom ili više stepenica. Utovar rude obavlja se raznim mehaničkim sredstvima kao što su: utovarne lopate manjeg i većeg kapaciteta ili bageri, što je zavisno od moćnosti ležišta i kapaciteta proizvodnje.

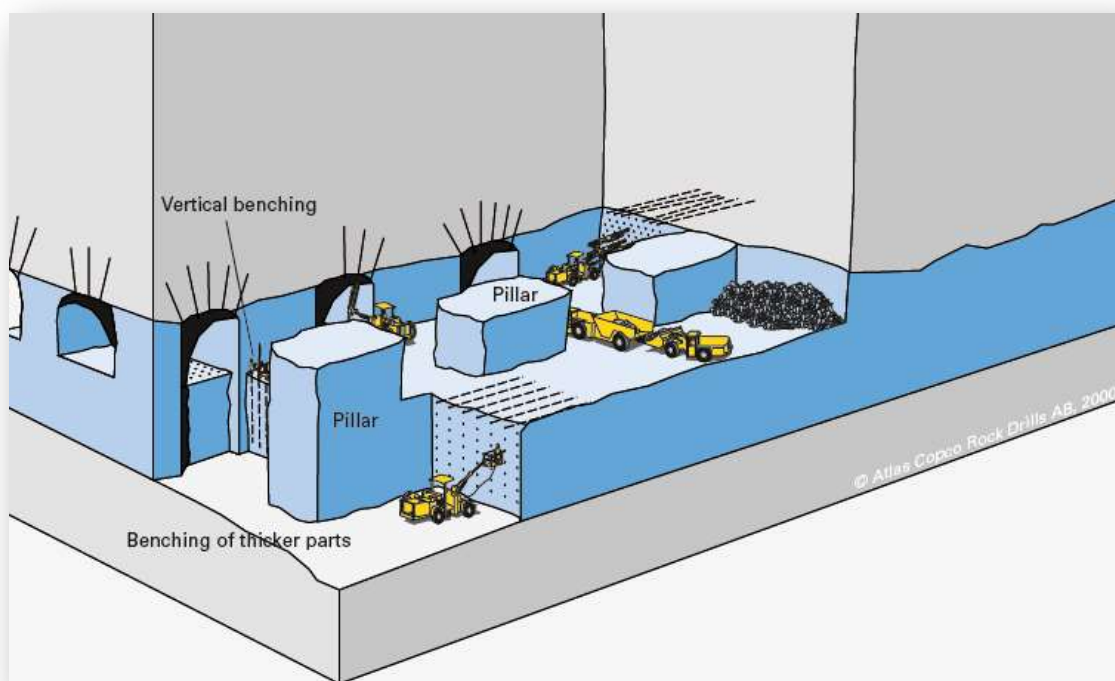
Nagnuta ležišta se pripremaju izradom izvoznih hodnika u rudi po pravcu pružanja. Otkopavanje počinje od uskopa iz kojeg se najpre radi jedan kratki hodnik. Bušenje minskih bušotina vrši se celim frontom, ili u dve do tri sekcije po pravcu pružanja. Minirana ruda se zatim prevlači skreperom preko utovarnog mosta direktno u vagonete.

1.4.2. Komorno- stubne metode otkopavanja

Ove metode se primenjuju za otkopavanje horizontalnih i nagnutih ležišta do 30°, a najviše 40°, većeg prostranstva, moćnosti od 2-30 m i više. Otkopi imaju oblik pravilnih međusobno paralelnih komora između kojih se ostavljaju sistematski sigurnosni stubovi. Ruda i okolne stene treba da su čvrste i postojeane kako bi komore mogle imati veći raspon. U sigurnosnim stubovima ostaje od 15 - 30% rude, a u pojedinim metodama i do 50%, radi čega se ove metode primenjuju za manje vredne rude sa niskim sadržajem metala, kao i za ležišta nemetala kao što su: soli, fosforiti, uljni škriljci i sl.

Ukoliko treba zaštititi površinu od zarušavanja, zbog objekata na površini ili zbog sprečavanja prodora vode iz viših vodonosnih slojeva sigurnosni stubovi imaju ulogu sredstva za osiguranje. Tada u sigurnosnim stubovima ostaje do 50% rudnih rezervi. Ako se radi o vrednijim rudama, a površina može da se zarušava, sigurnosni stubovi se kod manje moćnih ležišta delimično mogu otkopavati.

Širina komora se kreće obično u granicama od 5-6 m i 15-30 m, a sigurnosni stubovi od 2-5 m i do 10-15 m. Bušenje minskih bušotina se izvodi, lakšim, srednjim i teškim bušaćim čekićima i garniturama sa više čekića. Utovar i transport rude se isto tako izvodi raznim utovarno transportnim sredstvima, što je zavisno od veličine i visine komora i rudarsko-geoloških karakteristika ležišta. Slika 7 prikazuje metodu otkopavanja u moćnom horizontalnom ležištu. Ruda se otkopava tako što se pod krov komore preko cele širine radi zasek određene visine, pa se donji deo ležišta minira kao jedna stepenica. Ruda se bagerom s lopatom volumena tovari u velika jamska vozila, kojima se prevozi do izvoznog okna. Slična se metoda primenjuje i za otkopavanje nagnutih ležišta, samo što se ruda skreperima prevlaci do sipki.



Slika 7. Prikaz Komorno- stubne metode otkopavanja (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (vertikal benching-gornja etaža; pillar-stub; benching of thicker parts-donja etaža)

I ove metode imaju svoje prednosti. Pored toga što spadaju u grupu visokoproduktivnih metoda, takođe primenom savremene mehanizacije na bušenju, utovaru i transportu, postižu se veliki učinci. Značaj se pridaje i jednostavnosti izvođenja radova, nizak koeficijent pripreme, veliki kapacitet proizvodnje, skoro potpuno odsustvo primene drvene građe, a vrlo niska potrošnja ostalih sredstava osiguranja i niski troškovi proizvodnje. Njihova negativna strana se ogleda u sledećem: značajniji gubici rude u sigurnosnim stubovima, donekle veća opasnost po ljude u otvorenim prostorijama, koja se može smanjiti sistematskim osiguranjem krova komora visećom podgradom.

1.4.3. Podetažne metode otkopavanja

Podetažne metode otkopavanja se primenjuju za ležišta žilnog, sočivastog i pločastog oblika sa strmim padom, preko 60°, moćnosti preko 1 do 30 m i više. Kod ove metode stubovi su znatno viši. Kada rudno telo po padu premašuje visinu jednog otkopa, onda se ostavlja krovna ploča pa se ispod nje formira novi otkop. Podrazumeva se da stubovi na različitim nivoima moraju biti tačno jedan ispod drugog. Ruda se otkopava odozgo na dole.

Bušenje i miniranje se izvodi iz podetažnih hodnika tako da radnici ne ulaze u otvorene prostore, a ruda gravitaciono pada u unapred pripremljene levkaste sipke. Ove metode se takođe primenjuju i za ležišta sa blažim padom. U ovom slučaju rudu treba prevlačiti skreperima (mašine za kopanje i transport otkopanog materijala) pa radnici s vremena na vreme treba da ulaze u otvorene prostore, ili se zbog izvlačenja rude rade dopunski pripremnii radovi u podinskoj jalovini. U zavisnosti od nagibnog ugla, oblika i moćnosti ležišta, primenjuju se razne varijante: podetažno otkopavanje po pružanju ležišta, kada otkopi imaju oblik komora, a ležišta su moćnosti do 25 m, dok su kod ležišta preko 25 m u primeni metode podetažnog otkopavanje poprečno na pružanje ležišta.

Ukoliko bokovi ležišta nisu dovoljno čvrsti i odronjavaju se, u tom slučaju dolazi do osiromašenja.

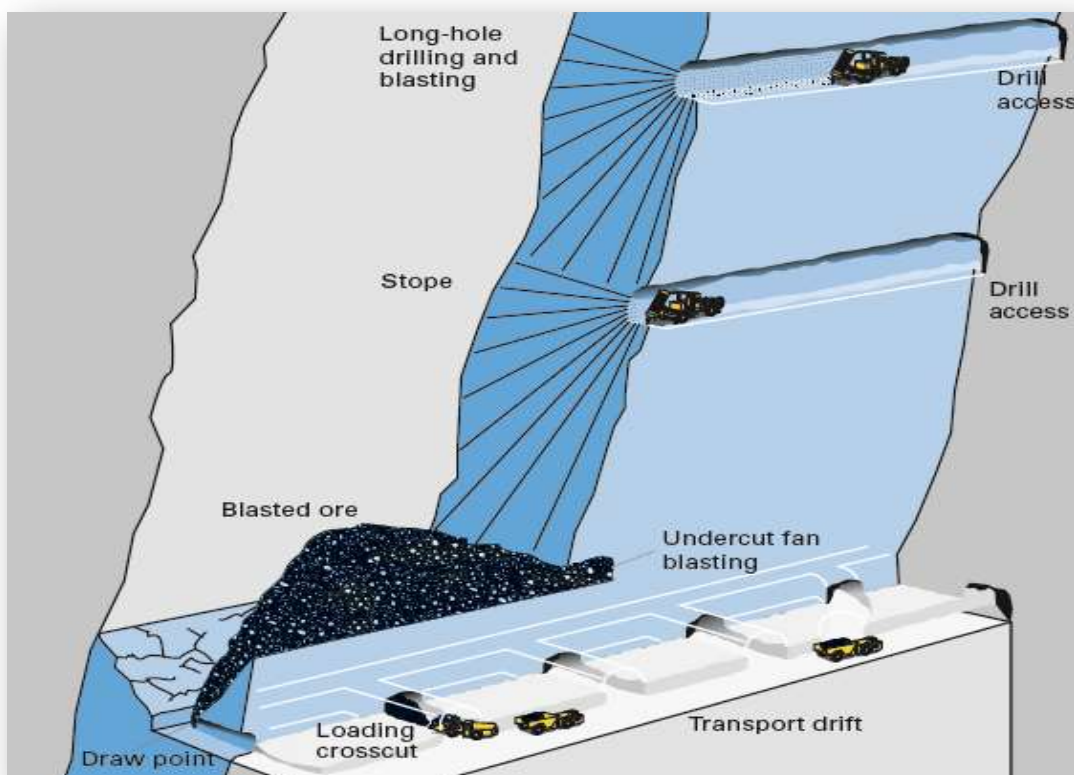
Visinska razlika među horizontima je od velikog značaja kod ovih i drugih metoda gde se ostavljaju sigurnosni stubovi, sigurnosne ploče i horizontski stubovi. Ukoliko je visina veća, utoliko će procentualno manje rude ostati u sigurnosnim stubovima i veća količina rude će se dobiti u primarnoj fazi otkopavanja.

U zavisnosti od moćnosti ležišta i primenjene varijante otkopavanja, u sigurnosnim stubovima, pločama i horizontskim stubovima, ostaje oko 15 - 50% rudne mase. Iz tih razloga ove se metode primenjuju za manje vredne rude. Ukoliko se otkopi zasipavaju i sigurnosni stubovi naknadno otkopavaju, ili se veći deo rude iz sigurnosnih stubova i ploča naknadno dobiva masovnim miniranjem, ove metode se mogu primeniti i za vrednije rude.

Pripretni radovi kod ovih metoda su dosta obimni, pa i pored toga troškovi proizvodnje su vrlo niski. Na slici 8 dat je prikaz podetažne metode otkopavanja.

Kod podetažnih metoda otkopavanja poprečno na pružanje ležišta princip je isti kao i kod predhodno opisane metode, s tom razlikom što su prostorije pripreme poprečno orijentisane, a izvozni hodnici se rade po pravcu pružanja u podinskom boku.

Metode otvorenih otkopa spadaju u visokoproduktivne metode jer se postižu veliki učinci kako na bušenju tako i na otkopavanju rude. Takođe, potrošnja eksploziva i eksplozivnih materijala je srazmerno mala, a vrlo je mala i potrošnja građe. Troškovi otkopavanja su niski, a uslovi ventilacije zadovoljavajući. Pored pozitivnih stvari, ove metode imaju i neke nedostatke. Obim pripremnih radova je veliki, kod moćnijih ležišta veći su gubici u rudnoj masi i veće je osiromašenje pri otkopavanju sigurnosnih stubova, ukoliko se otkopi ne zasipavaju, a kod čvrstih i vrlo čvrstih ruda veći je obim sekundarnog miniranja.



Slika 8. Prikaz podetažne metode otkopavanja (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (long-hole drilling and blasting-bušenje i miniranje bušotina; drill access-pristup bušenju; stope-otkop; blasted ore-izminirana ruda; undercut fan blasting- lepezasto miniranje; draw point-utovarno mesto; loading crosscut-utovarni poprečni hodnik; transport drift- transportni hodnik;)

1.5. VCR metoda otkopavanja

Torbica & Petrović (1997) u priručniku za nastavu objasnili su opšte karakteristike VCR metode otkopavanja (Vertical Crater Retreat), koju je ustanovio je i patentirao Livingston (1973). Ova metoda otkopavanja predstavlja varijantu metode otvorenih otkopa, pri čemu se otkopavanje vrši od dna otkopnog bloka prema njegovom vrhu, sa napredovanjem u horizontalnim odsecima. Horizontalni odseci ostvaruju se miniranjem, odnosno iniciranjem pseudosferičnih (kraternih) minskih punjenja, koja su smeštena pri samom dnu dugačkih vertikalnih minskih bušotina velikog prečnika. Primena ove metode je najčešća u slučajevima kada se vrši otkopavanje rudnih ležišta koja se nalaze u okruženju čvrstog i kompaktnog stenskog masiva. Međutim, ako postoji potreba za dodatnim održavanjem stabilnosti potencijalno nestabilnih bokova otkopa, otkopavanje može da se vrši po navedenom principu VCR metode otkopavanja, pri čemu se vrši magaziniranje oborene rude sa ciljem zaštite nestabilnih bokova otkopa od zarušavanja. VCR metoda otkopavanja zahteva manji obim pripremnih radova pa je njena produktivnost veća a troškovi eksploatacije su manji. Zbog toga se ova metoda otkopavanja primenjuje ne samo za sekundarno otkopavanje sigurnosnih stubova već i za otkopavanje rudnih ležišta.

VCR metoda otkopavanja predstavlja varijantu metode otkopavanja sa magaziniranjem oborene rude. Može da se izdvoji i kao posebna metoda otkopavanja - metoda blokovskog otkopavanja sa vertikalnim napredovanjem na gore.

Kada je u pitanju nagib, VCR metodom mogu da se otkopavaju nagnuta, strma i vertikalna rudna ležišta.

Kada je u pitanju oblik rudnog ležišta (rudnog tela), primena VCR metode otkopavanja je moguća ukoliko oblik i prostranost rudnog ležišta dozvoljavaju da se oformi otkopni blok značajne visine, više od 50 m (vertikalno rastojanje od nivoa istakanja do nivoa bušenja minskih bušotina).

Kao najvažniji uslov po pitanju fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva, potrebno je da ruda bude dovoljno kompaktna i čvrsta da ne bi dolazilo do oštećenja izbušenih minskih bušotina, kako tokom bušenja narednih minskih bušotina tako i tokom miniranja. Ukoliko nakon otkopavanja i istakanja rude mogućnost zarušavanja praznog otkopanog bloka, na bilo koji način ugrožava dalji nastavak eksploatacije rudnog ležišta, postoji mogućnost da se izvrši njegovo naknadno zasipavanje.

Otkopavanje rudnih ležišta (rudnih tela) VCR metodom najčešće se vrši primenom jedne od sledeće dve varijante:

- VCR metode otkopavanja sa ostavljanjem otvorenih otkopa i
- VCR metode otkopavanja sa magaziniranjem rude.

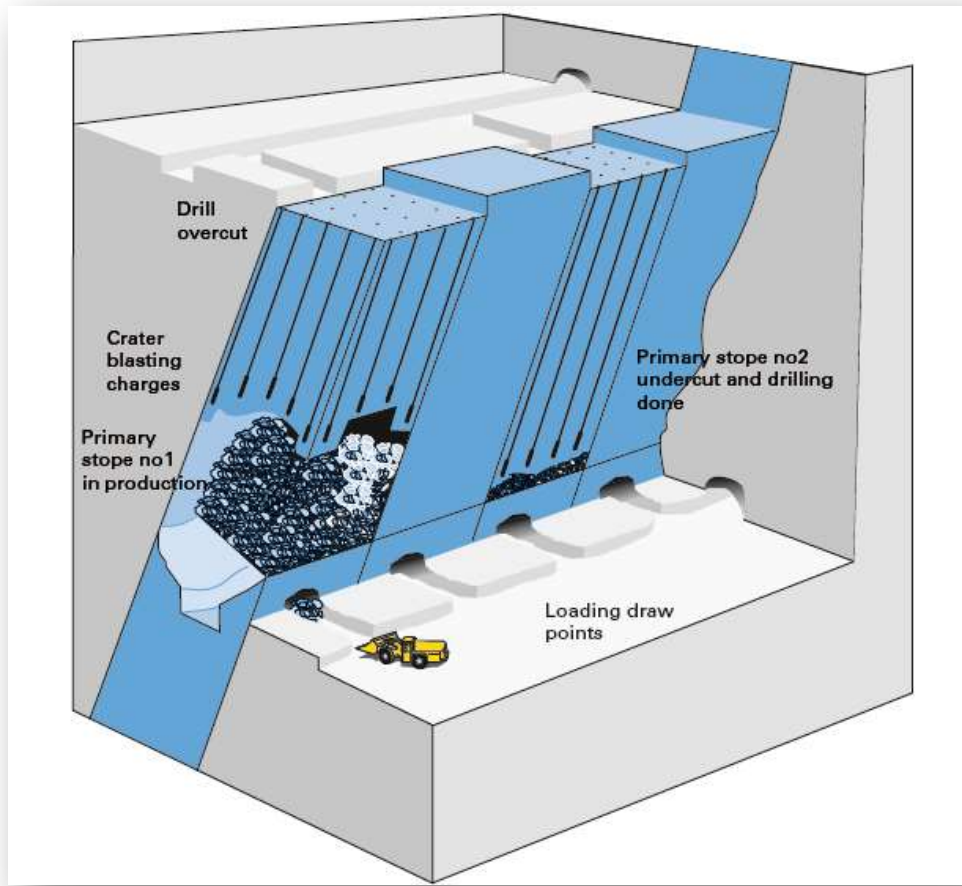
Izbor varijante VCR metode otkopavanja, koja će biti primenjena u konkretnom slučaju, zavisi prvenstveno od fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva.

Na slici 9 prikazana je varijanta VCR metode otkopavanja. Otkopavanje prikazanog bloka rude obe varijante VCR metode vrši se na isti način. Jedinu specifičnost varijante VCR metode otkopavanja sa magaziniranjem rude predstavlja to što se tokom otkopavanja između krova otkopa i oborene rude zadržava približno jednaka visinska razlika, koja obezbeđuje zaštitu bokova otkopa od zarušavanja. To znači da se u svim utovarnim hodnicima vrši utovar i odvoz jednakih količina magazinirane rude.

Obzirom da se može upravljati utovarno-transportnom mehanizacijom iz utovarnog hodnika pomoću uređaja za daljinsku kontrolu, praktično je obezbeđena sigurnost zaposlenih prilikom izvođenja radova na otkopavanju.

Izbor vrste eksploziva miniranja, koji će biti primenjeni prilikom otkopavanja ležišta (rudnog tela) VCR metodom, imaju primarni uticaj na produktivnost metode otkopavanja, kao i na direktne troškove otkopavanja.

Uglavnom se koriste pseudosferična eksplozivna punjenja ANFO smeša ili emulzionih eksploziva. Na osnovu iskustvenih podataka ustanovljeno je da se primenom emulzionih eksploziva, koji se odlikuju velikom gustinom i velikom količnom energije eksplozije, postižu najbolji rezultati.



Slika 9. Prikaz VCR metode podzemnog otkopavanja ležišta (Atlas Copco, 2007)

Legenda: (crater blasting charges-pseudosferična eksplozivna punjenja; drill overcut-izbušeni nadsek; ore remains in the sope-oborena ruda, magazinirana; loading draw points-utovarni hodnik; primary stope no 1 in production-primarni otkop u proizvodnji primary stope no 2-undercut and drilling done-primarni otkop u pripremi)

Prilikom otkopavanja ležišta (rudnih tela) VCR metodom koriste se dugačke minske bušotine velikog prečnika. Vertikalne ili kose minske bušotine se buše iz prostora zaseka, na dole, do probušenja otkopnog bloka, odnosno dok se bušotinom ne ostvari kontakt sa nivoom podsecanja. U zavisnosti od nagiba otkopnog bloka (ležišta ili rudnog tela) se određuju nagibi minskih bušotina, koji se tokom bušenja neprekidno kontrolišu. Tačnost bušenja minskih bušotina predstavlja bitan uslov za uspešno otkopavanje bloka rude VCR metodom. Od tačnosti bušenja direktno zavisi iskorišćenje rude u otkopnom bloku, stepen osiromašenja i granulacija odminirane rude, kao i stabilnost otkopanog prostora.

Prilikom otkopavanja VCR metodom po pravilu se koristi visokoproduktivna mehanizovana oprema za bušenje minskih bušotina.

Nakon završenog otkopavanja jednog bloka i istakanja rude iz otkopa vrši se ukoliko je potrebno, zasipavanje praznog, otkopanog prostora, da bi se sprečilo njegovo naknadno zarušavanje. Kada postoji opasnost da bi se zarušavanjem praznog, otkopanog prostora, na bilo koji način ugrozilo nastavak eksploatacije rudnog ležišta ili susednih rudnih tela, vrši se zasipavanje. Zasipavanje praznih, otkopanih prostora se vrši ugradnjom suvog zasipa ili hidro-zasipa. Pre početka

otkopavanja narednog otkopnog bloka potrebno je da se izvrši zasipavanje prethodno otkopanog bloka. Za zasipavanje otkopanog bloka rude koristi se zasipni materijal sa dodatkom izvesne količine cementa. Dodatak cementa zasipnom materijalu ima funkciju da se postigne veća čvrstoća zasipa, kao i da se smanji osiromašenje rude prilikom otkopavanja narednog bloka. U nastavku su prikazane najznačajnije prednosti i nedostaci VCR metode otkopavanja.

Prednosti se ogledaju u sledećim činjenicama: veliki kapacitet proizvodnje, srazmerno mali obim pripremnih radova, mogućnost promene (povećanja) dinamike otkopavanja, mogućnost visokog stepena mehanizovanosti, visoka vrednost koeficijenta iskorišćenja rude, niska vrednost koeficijenta osiromašenja rude, stabilnost konstruktivnih elemenata otkopa tokom otkopavanja, kao i sigurnost radnika prilikom izvođenja radova na otkopavanju. Pored pozitivnih stvari i ove metode imaju i neke nedostatke, kao što su: realna potreba za obimnim i detaljnim planiranjem otkopa, veliki obim radova na bušenju minskih bušotina pre početka otkopavanja, relativno visoki zahtevi po pitanju tačnosti bušenja dugačkih minskih bušotina, mogućnost ograničenja kapaciteta proizvodnje usled potrebe za magaziniranjem rude, kao i relativno dugotrajani i obimni radovi da bi se ostvarili maksimalni efekti primene metode.

2. Primena višekriterijumske optimizacije u rudarstvu

Izbor najpognije metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji nije nimalo jednostavan proces, jer zahteva rad sa velikom količinom informacija o karakteristikama pojedinih metoda otkopavanja, a vrlo često postoji nekoliko mogućih rešenja za konkretnu primenu. Metode VKO su se pokazale kao veoma korisne za rangiranje alternativa, naročito u slučajevima, kada treba istovremeno razmotriti više kompleksnih kriterijuma.

2.1. Primena heuristike prilikom rešavanja kompleksnih problema

Bereš & Bereš (2014). definišu u svom radu „Heureka” kao ”našao sam, pronašao sam”, dok pojam heuristika potiče od starogrčke reči heuriskein, što znači umetnost pronalaženja novog načina (pravila) u rešavanju problema. U poslednjim decenijama došlo je do naglog razvoja heurističkih metoda za rešavanje raznih optimizacionih problema.

Heuristički prilaz problemu je empirijska pretraga ili optimizacioni metod koji obično rešava probleme, ali nema nikakav dokaz koji bi matematičari i fizičari prihvatili. Niko ne zna da li će uvek dati najbolji odgovor (rešenje problema).

Pod heurističkim modelovanjem podrazumeva se stvaranje takvog modela koji ima heurističko značenje i reprezentuje više originala u jednom te istom modelu, odnosno taj model omogućuje pronalaženje novih znanja i razvija stvaralaštvo zahtevajući od subjekata izvesnu samostalnost, uz uvažavanje nivoa predznanja svakog subjekta u svom domenu ponaosob (u ovom slučaju izbor metode podzemnog otkopavanja ležišta bakra, korišćenjem kvalitativnih ocena-odnosno lingvističkih varijabli za opis poređenja parova elemenata kriterijuma, podkriterijuma i alternativa i u FAHP i u klasičnoj metodi, kao što je VIKOR).

Zbog geologije, fizičko-mehaničkih osobina stena kao i zbog hidrogeoloških uslova ležište predstavlja kompleksan rudarski sistem pa se samim tim rešavanje problema ogleda u primeni heurističkog pristupa i postavljenih zadataka odnosnu u znanju eksperta, intuiciji, procenama i iskustvu.

Heuristički model veoma malo determiniše radnje u toku rešavanja problema, tako da ostavlja subjektu – članu tima mogućnost pronalaženja jednog ili svih mogućih rešenja zavisno od predznanja, stepena samostalnosti i njegovih stvaralačkih sposobnosti. Ovakav pristup rešavanju problema omogućuje svakom subjektu da postigne svoj maksimum. Postavljanje problema heurističkom strategijom znači da je subjekat stavljen u položaj da primenom starog iskustva u novim situacijama, poznata znanja dovodi u novu situaciju (funkciju) i da otkriva nove puteve kreativnog rešavanja problema.

Donošenje odluke je problem koji se pojavljuje u svakoj delatnosti. U kontekstu višekriterijumske optimizacije problem odlučivanja najčešće se posmatra kao problem u kojem se donosilac odluke mora opredeliti za jednu od alternativa, uzimajući u obzir sve relevantne faktore, odnosno kriterijume. Kako su kriterijumi po pravilu konfliktni, izbor donosioca odluke neće biti optimalno rešenje u tradicionalnom smislu, već će biti reč o zadovoljavajućem rešenju od kojeg u datoj situaciji ne postoji bolje, a to su heurističke metode, u našem slučaju primenjene u izboru metoda otkopavanja u podzemnoj eksploataciji kroz rešavanje problema i donošenje odluka. Na slici 10 je dat prikaz problemske situacije – heuristički algoritam, a na slici 11 je dat prikaz odnosa između rešavanja problema i odlučivanja.

Prema jednoj podeli, heurističke metode se dele na:

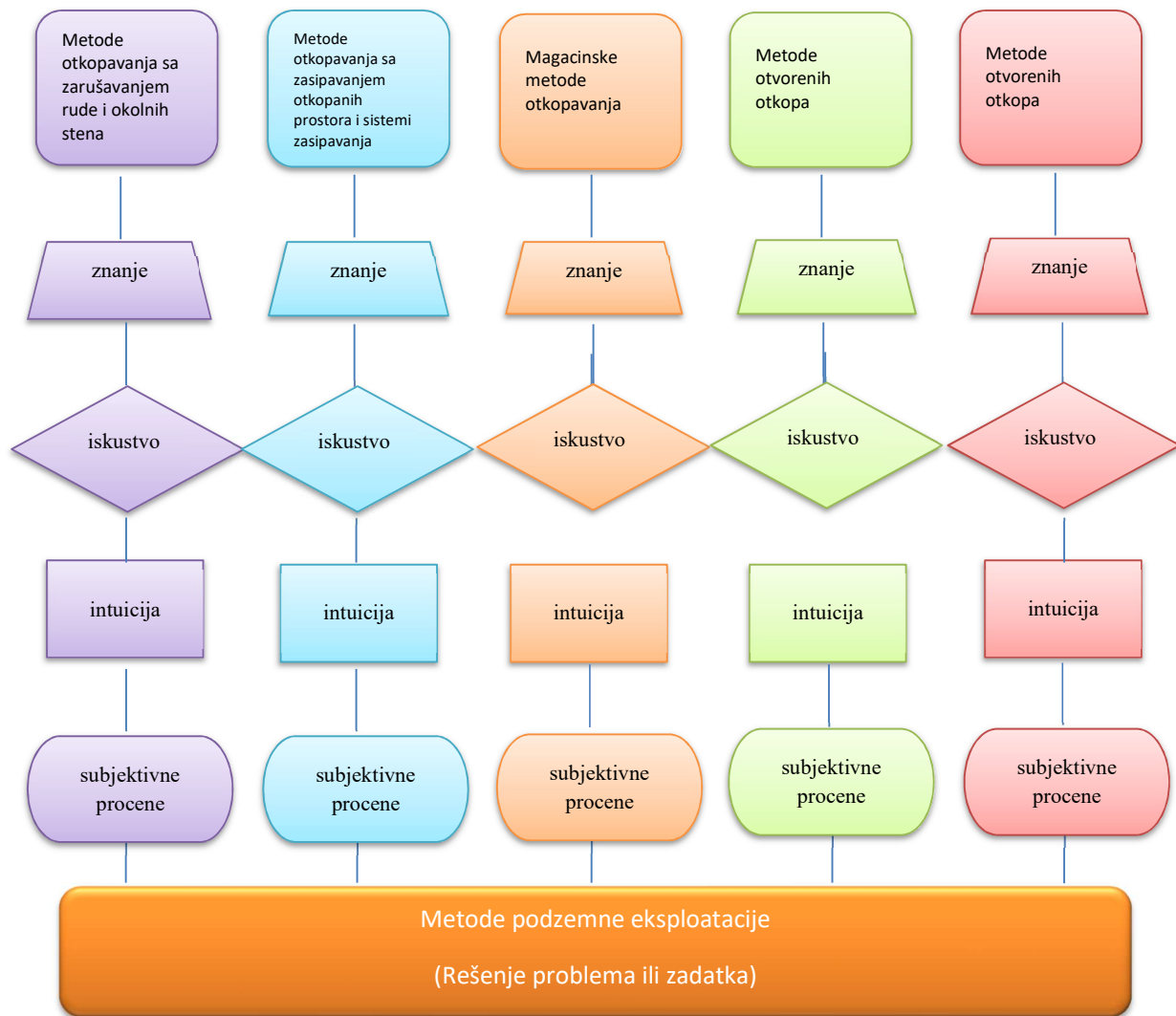
- dekompozicione metode (eng. decomposition methods) razlažu polazni problem na manje podprobleme koje je lakše rešiti, a pritom se vodi računa o činjenici da svi podproblemi pripadaju istoj klasi polaznog problema;
- induktivne metode (eng. inductive methods) generalizuju manje, ili jednostavnije verzije problema. Tehnike koje se mogu primeniti na ove verzije, mogu da se primene i na ceo problem;
- redukcione metode (eng. reduction methods) vrše identifikaciju atributa dobrih rešenja problema i uvode ih u optimizacioni proces u formi granica problema. Cilj je da se ograniči prostor potencijalnih rešenja simplifikacijom polaznog problema. Pritom se javlja rizik izostavljanja optimalnih rešenja početnog problema;
- konstruktivne metode (eng. constructive methods) grade rešenje od početka, po principu "korak po korak". U ovu grupu spadaju uglavnom deterministički algoritmi, koji se baziraju na najboljem izboru u svakoj iteraciji, i koriste se uglavnom za rešavanje standardnih problema kombinatorne optimizacije i
- metode lokalne pretrage (eng. local search methods) počinju proces pretrage tako što generišu dopustivo rešenje problema koje pokušavaju da poprave u iterativnom procesu. U svakom koraku ove procedure jedno rešenje se pomera ka drugom koje ima bolju vrednost funkcije cilja.

Osim navedenih metoda, značajne su i sledeće: heuristike matematičkog programiranja, kao i heuristike bazirane na podeli dopustivog skupa, restrikciji dopustivog skupa i na relaksaciji.

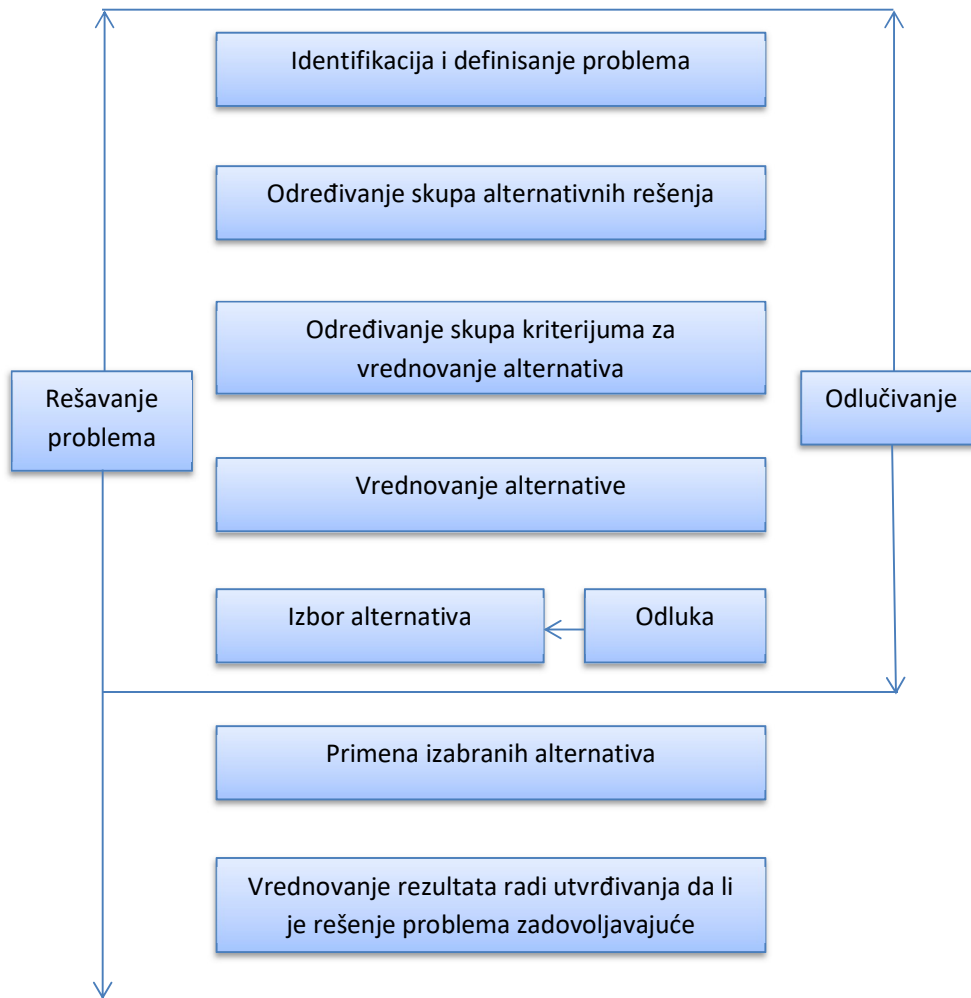
Heuristike matematičkog programiranja počinju proces optimizacije matematičkom formulacijom modela problema koji se optimizuje, a zatim pokušavaju da taj problem reše približnim, tj. aproksimativnim metodama. Cela oblast matematičkog programiranja može da se podeli na linearno, nelinearno, diskretno i stohastičko programiranje i na teoriju igara. Zajednička osobina svih navedenih metoda je da one traže tačku u datom vektorskom prostoru koja zadovoljava neka (ili sva) ograničenja, a u kojoj funkcija koja se optimizuje dostiže ekstremnu vrednost. Heuristike bazirane na dopustivom skupu prvo dele dopustivi skup na više podskupova, a zatim delimičnom pretragom svakog od podskupova pronalaze najbolje rešenje. Heurističko rešenje je ono kod kojeg je funkcija cilja najbolja.

Metode restrikcije dopustivog skupa izvode pretragu tako što eliminišu određene podskupove iz dopustivog skupa restrikcijom, čime se prostor pretrage sužava. To omogućava da se novi zadatak lakše rešava.

Heuristike koje koriste relaksaciju funkcionišu po suprotnom principu od metoda restrikcija. One proširuju dopustivi skup, ali tako da se omogući jednostavnije rešavanje novog problema. Od svih prikazanih heurističkih metoda, konstruktivne i metode lokalne pretrage često su primenljivane u metaheurističkim algoritmima.



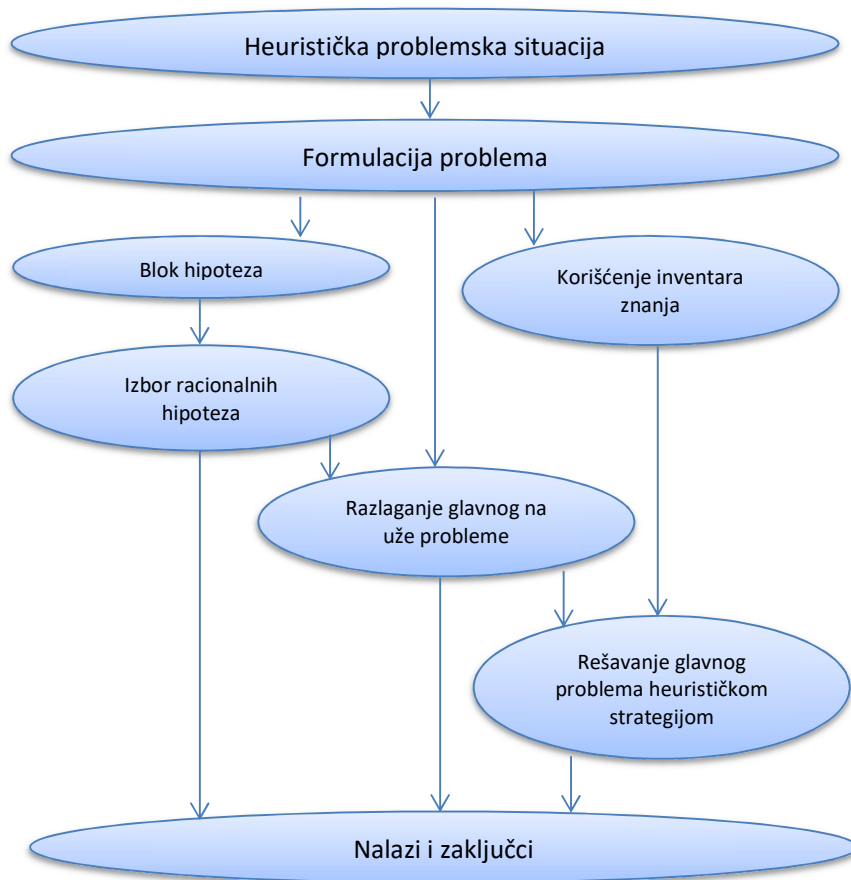
Slika 10. Problemska situacija – heuristički algoritam



Slika 11. Odnos između rešavanja problema i odlučivanja

Proces donošenja odluke obuhvata sledeće aktivnosti: analizu problema i definiciju ciljeva, analizu rizika, razradu strategija, razradu modela i simulaciju ponašanja i donošenje odluke i njeno prenošenje na subjekte; primenu heurističkih tehnika na rešavanju kombinatornih problema u izboru metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji; primenu heurističkih metoda usmerenu na dva pravca: 1. na rešavanje složenih problema koji se mogu predstaviti u kvantitativnom obliku, ali su toliko složeni da njihovo rešenje nije moguće naći pomoću strogih analitičkih tehnika i 2. na probleme koji se ne mogu predstaviti matematičkim modelom, jer su promenljive u modelu kvantitativne prirode.

Cilj heurističke metode jeste da omogući nalaženje prihvatljivih rešenja složenih problema koji ne mogu da se reše pomoću klasičnih metoda. Pojam rešavanje problema označava razumevanje događaja i transformaciju znanja u odgovarajuće akcije. Rešavanje problema može da se ostvari primenom *heurističkih metoda* (rešavanje problema sa aspekta upravljanja podacima). Na slici 12 je dat šematski prikaz rešavanja problema heurističkom strategijom.



Slika 12. Rešavanje problema heurističkom strategijom

Baćanin (2015) ističe da za razliku od egzaktnih metoda optimizacije koje garantuju pronalaženje optimalnog rešenja, heuristički algoritmi pokušavaju da pronađu što bolje rešenje, ali ne mogu da garantuju da je pronađeno rešenje i optimalno.

Heuristike se koriste za rešavanje konkretnih i specifičnih problema tako što koriste individualna svojstva samih problema pri njihovom rešavanju. Međutim, pored osnovnog razloga korišćenja heuristika (nemogućnost egzaktnih metoda da pronađu optimalno rešenje u razumnom vremenskom periodu), postoje i dodatni razlozi, kao što su:

- za dati problem ne postoji metoda koja može da ga reši na optimalni način;
- iako je raspoloživa egzaktna metoda za dati problem, ona ne može da se primeni na raspoloživom hardveru;
- heurističke metode su fleksibilnije od egzaktnih metoda, tako što omogućavaju modeliranje dodatnih karakteristika realnog problema i
- heuristička metoda se često koristi kao deo globalne procedure pretrage koja garantuje pronalaženje optimalnog rešenja datog problema.

Generalno, dobar heuristički algoritam treba da poseduje određena svojstva, gde rešenje treba da se generiše u razumnom vremenskom periodu, takođe heuristika treba da proizvede rešenje koje je blisko optimalnom sa velikom verovatnoćom i verovatnoća dobijanja lošeg rešenja bi trebala da bude minimalna.

S obzirom da se heurističke metode međusobno razlikuju, jako je teško da se da njihova potpuna klasifikacija. Zbog toga se u literaturi nailazi na veliki broj podela ovih metoda.

2.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Pregledom i analizom različitih radova pokazalo se da su mnogi autori upotrebili MCDM tehnike za definisanje optimalne metode eksploatacije ležišta mineralnih resursa različitog tipa.

Özfiat (2012) ističe da izbor metode otkopavanja podzemnih rudnika ima presudni značaj na produktivnost rudnika uglja Amasra. Autor je postupkom FAHP vršio procenu korišćenja određene mehanizacije u rudniku uglja Amasra, kako bi se povećala proizvodnja a smanjio broj radnika i samim tim došlo bi do smanjenja broja nesreća.

B. B. Chander at al. (2018) su predložili tehniku donošenja odluke u postupku odabira optimalne metode podzemnog otkopavanja rudnika boksita. Koristeći AHP metode i VIKOR metode višekriterijumske optimizacije dobili su rezultate koji su pokazali da je optimalna metoda za ovaj rudnik metoda otkopavanja sa zasipavanjem.

Popović at al. (2018); Popović at al. (2019) ističu značaj izbora metode eksploatacije rudnog ležišta, jer neadekvatnom odlukom može doći do toga da proces eksploatacije bude praćen mnogim teškoćama. Pravilnim izborom metode ostvaruje se veći profit, postiže se zadovoljavajući stepen iskorišćenosti metala koji se nalazi u ležištu a obezbeđuje se i sigurna radna sredina za rudare. Oni su u svom radu definisanjem različitih tipova kriterijuma (fizičke i mehaničke karakteristike ležišta, ekonomski faktori, tehnički faktori i proizvodni faktori) primenom metode višekriterijumskog odlučivanja (VKO) zasnovali izbor metode eksploatacije ležišta rude bakra. Cilj je bio ukazivanje na prednosti primene Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment -PIPRECIA metode. Relativne težine kriterijuma ukazale su na to da tehnički i proizvodni pokazatelji imaju najveći značaj, dok je najmanji značaj dat ekonomskim pokazateljima.

Bogdanovic at al. (2012) su upotrebili kombinaciju AHP i PROMETHEE metoda za izbor najprikladnije metode rudarstva u rudniku podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina „Čoka Marin“ u Srbiji. Za rešavanje ovog problema uključili su pet mogućih metoda rudarstva i jedanaest kriterijuma, za njihovu procenu. Kriterijumi su tačno izabrani kako bi obuhvatili najvažnije parametre koji utiču na izbor metoda rudarstva, kao što su geološka i geotehnička svojstva, ekonomski i geografski faktori. AHP su koristili za analizu strukture problema izbora metode rudarstva i za određivanje težine kriterijuma, a PROMETHEE za dobijanje konačnog rangiranja i izradu analize osetljivosti. Rezultate koje su dobili su pokazali da se predložena integrisana metoda podetažnog otkopavanja sa zarušavanjem može uspešno koristiti u rešavanju problema rudarskog inženjerstva.

Ataei at al. (2008) su u svom radu primenili AHP za izbor optimalne metode rudarstva u rudniku boksita Jajarm u Iranu. Proučavali su 6 alternativa koje su bile moguće i odgovarajuće za ovaj rudnik i 13 kriterijuma i utvrdili da debljina ležišta predstavlja najvažniji faktor kriterijuma za odabir odgovarajuće metode. Na osnovu dobijenih rezultata odabrana je metoda sa zasipavanjem. Takođe, za isti rudnik Naghadehi at al. (2009) su za izbor metode eksploatacije predložili kombinaciju metode FAHP i AHP. FAHP su koristili za određivanje težine kriterijuma, a AHP za rangiranje metoda. Na osnovu dobijenih rezultata odabrali su takođe metodu sa zasipavanjem kao optimalnu metodu za već pomenuti rudnik.

Yazdani-Chamzini at al. (2012) su prikazali model izbora optimalne metode rudarstva u rudniku Angouran, koji je jedan od glavnih proizvođača cinka u Iranu. Oni su izvršili procenu izvodljivih

alternativa kako bi izabrali optimalnu metodu. Razvili su model zasnovan na FAHP i FTOPSIS. FAHP su koristili da bi dobili ocenu težine kriterijuma dok je FTOPSIS korišten za određivanje prioriteta izvodljivih alternativa. Proučavali su 6 alternativa i dali su 22 odgovarajuća kriterijuma. Izabrali su alternativu sa rezultatom ocenjenim kao najviši, odnosno metodu otkopavanja sa zasipavanjem.

Asadi Ooriad et al. (2018) su kroz TOPSIS model kao primenjenu metodu za donošenje odluka sa više kriterijuma izabrali optimalnu metodu rudarstva u rudniku uglja Tazareh u Iranu. Na osnovu ocenjenih kriterijuma kao najpogodniju metodu odabrali su metodu otkopavanja sa zarušavanjem (otkopavanje širokim čelom).

Ataei et al. (2008b) u svom radu ističu da na proces donošenja odluka pri odabiru optimalne metode rudarstva utiče mnogo faktora. Oni su da bi došli do najidealnijeg rešenja primenili TOPSIS za izbor optimalne metode eksploatacije u rudniku Jajarm u Iranu. Tom prilikom su definisali 13 kriterijuma (geološki, geotehnički, geografski i ekonomski) i 6 alternativnih metoda rudarstva. Na osnovu dobijenih rezultata zaključili su da je metoda za zasipavanjem pogodna za otkopavanje.

Javanshirgivi & Safari (2017) su opisali proces odabira metode otkopavanja u rudniku Kamar Mahdi u Iranu pomoću metoda višekriterijumskog odlučivanja zbog nekoliko faktora. Kroz donošenje odluka sa više kriterijuma analizira se struktura problema. Međutim, multikriterijumsko odlučivanje (MCDM) se često kritikuje zbog nemogućnosti da se nosi sa nesigurnim i nepreciznim problemima. Zbog toga su u radu predložili fuzzy odlučivanje i primenom fuzzy TOPSIS metode odabrali optimalnu metodu. Model je zasnovan na 14 kriterijuma i 4 alternative. Nakon rangiranja alternativa, metoda magazinskog otkopavanja je predložena kao optimalna metoda.

Gelvez & Aldana (2014) su u svom radu dali primenu AHP i ENTROPY tehnike za određivanje težine kriterijuma prilikom odabira metode za otkopavanje ležišta uglja, koje se nalazi na zapadnoj strani Cerro Tasajero, Norte de Santander, u Kolumbiji. Zatim su koristili VIKOR metodu kojom su predstavili kompromisno rešenje. Uzeli su u obzir 19 kriterijuma i 9 alternativa: metoda otvorenih otkopa, metoda podetažnog otkopavanja, metoda podetažnog otkopavanja sa zarušavanjem, otkopavanje širokim čelom, komorno stubna metoda, magazinska metoda otkopavanja, metoda sa zasipavanjem, metoda otvorenih otkopa sa podgrađivanjem. Za ovo ležište odabrali su metodu otkopavanja širokom čelom.

Alpay & Yavuz (2007) su u radu razvili sistem podrške odlučivanju za odabir metode podzemne eksploatacije ležišta hromita Karaburum u Eskişehiru. Koristili su analitički hijerarhijski proces (AHP), za pronalaženje prihvatljivih alternativnih rešenja. Oni navode da su bezbednost na radu u toku podzemnih radova, povećanje produktivnosti i eliminisanje proizvodnih troškova i gubitaka osnovni i jedni od bitnijih kriterijuma. Povećanje broja kriterijuma čini problem složenijim i težim za postizanje rešenja, ali povećava ispravnost donete odluke.

Yavuz (2015) je u svom radu opisao sledeće dve slične MADM metode: Analitičko hijerarhijski proces i odlučivanje o nejasnim višestrukim atributima, Obe metode je primenio za izbor optimalnog podzemnog načina iskopavanja rudnika lignita koji se nalazi u Istanbulu. Na kraju procesa odlučivanja, za svaku metodu je primenio postupak analize osetljivosti.

Balusa & Gorai (2018) su izvršili poređenje prilikom istraživanja izbora metoda rudarstva, koristeći pet multikriterijumskih modela za donošenje odluka (TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, PROMETHEE II i WPM). U svom radu koristili su AHP tehniku za određivanje težine efektivnih kriterijuma. Pomenute metode su koristili za rudnik uranijuma Tummalapalle u Indiji. Rezultati su pokazali da odabrane metode rudarstva nisu bile ujednačene. U razmatranje su uzeli 8 kriterijuma i 7 alternativa. Rezultati su pokazali da su tri modela (ELECTRE, TOPSIS, i PROMETHEE II)

pokazala komorno stubnu metodu kao najpovoljniju, dok model VIKOR daje kompromisno rešenje, odnosno komorna stubna metoda ima isti prioritet kao i metoda sa zasipavanjem. Po WPM metodi metoda sa zasipavanjem je na prvo mesto kao optimalna dok je komorno stubna na drugom mestu.

Ovi autori takođe su u svom drugom radu Balusa & Gorai (2019) prilikom odlučivanja o izboru metoda rudarstva koristili fazi analitički hijerarhijski proces (FAHP) i analizirali alternative i kriterijume za odabir odgovarajuće metode podzemnog otkopavanja rudarstva. Predložili su model koji razmatra 16 kriterijuma i 7 alternativa. Model se sastoji od tri sloja, prvog koji predstavlja kriterijume, odnosno faktore koji utiču na otkopavanje rudnika, drugog sa podkriterijumima (kategorizacija faktora) i treći sloj predstavlja alternative, odnosno metode podzemnog otkopavanja ležišta. Rezultati su pokazali da bi predloženi model FAHP mogao da se koristi za izbor metode rudarstva. Balusa & Gorai (2018b) su takođe razvili multikriterijumski model donošenja odluka koristeći nejasno-analitički hijerarhijski proces (FAHP) za izbor odgovarajuće metode podzemnog iskopavanja metala. Validacija modela je izvršena korišćenjem podataka o ležištima rude dva rudnika u Indiji. Rezultatima je ustanovljeno da su usvojene metode otkopavanja i odgovarajuće predviđene metode otkopavanja u oba slučaja iste.

Liu et al. (2010) su uzimajući u obzir geološke, tehnološke, ekonomske i bezbednosne faktore i deset glavnih faktora koji utiču na izbor metoda rudarstva izradili sveobuhvatan sistem indeksa procene izbora metoda rudarstva. Odabrali su šest reprezentativnih metoda rudarstva, u kombinaciji sa rudarskim tehničkim uslovima rudnika zlata Xinli u Sanshandao. Optimalni model odabira podzemnog načina iskopavanja utvrđen je na osnovu neodređene teorije merenja. Tokom procesa selekcije, indeksi težine faktora komparativno su određeni pomoću teorije entropije, što izbegava nedostatak poteškoća u raspodeli težine tolikog broja faktora. Zatim su dobili rezultate u skladu sa veličinama nesigurnih stepena superiornosti. Prema rezultatima evaluacije neodređenog modela optimizacije merenja, metoda sa zasipavanjem je odabrana kao optimalna, koja može pružiti novi način za efikasan izbor podzemnog načina otkopavanja ovog rudnika.

Petrović et al. (2015) su tokom istraživanja o rudnom telu "Borska reka" prikazali pored blokovskih metoda sa zarušavanjem rude i pratećih stena i mogućnost primene metode podetažnog i komornog otkopavanja sa zapunjavanjem otkopanog prostora, s obzirom da ovo rudno telo zaleže na velikoj dubini i iznad samog ležišta nalaze se delovi naselja, kao i saobraćajni objekti bitni za region. Geološki uslovi u kojima se javlja ležište, nizak sadržaj bakra u rudi i objekti na površini terena dodatno usložnjavaju proces usvajanja optimalne metode otkopavanja ovog rudnog rela.

Štrbac & Milićević (2006) navode da su mnogi stručnjaci razmatrali mogućnosti za profitabilno kopanje rudnog tela zbog poteškoća oko mogućnosti iskopavanja, jer na površini iznad rudnog tela postoji nekoliko objekata. Takođe, cena bakra je izuzetno niska. Oni su dali pregled tih istraživanja, fokusiran na razmatranje metoda podzemnog otkopavanja rudarstva. U radu dali obrazloženje primenljivosti metoda sa zarušavanjem, kao profitabilnu.

Petrović et al. (2012) su u svom radu dali analizu predloženih metoda primenljivih za rudno telo "Borska Reka" u Boru. Rudno telo "Borska Reka", kao najveće u borskom ležištu rude bakra, više od tri decenije je predmet mnogobrojnih analiza i studija. Obzirom da rudno telo zaleže na velikoj dubini i da je sadržaj bakra u rudi dosta mali prilično je teško odrediti izbor metode otkopavanja ovog rudnog tela. Važno je istaći da uvođenjem ovog rudnog ležišta u eksploataciju, vek Borske jame bi se produžio za još najmanje sto godina. Iz tog razloga oni su analizirali mogućnosti i tražili rešenja optimalnog načina otvaranja i metode otkopavanja kojom bi se dobili pozitivni ekonomski pokazatelji. Metode koje su razmetrane pripadaju grupi metoda sa zarušavanjem rude i okolne stenske mase. Takođe, analizirana je i mogućnost primene metoda sa zapunjavanjem otkopanog prostora zbog očuvanja površine terena i objekata koji se nalaze iznad samog rudnog tela. Analiza je rađena i za primenu metode blokovskog samoobrušavanja. Autori ovog rada takođe tvrde da iskustvo u primeni blokovske metode samoobrušavanja u svetu kao i raspoloživi podaci idu u prilog

moгуćnosti primene metode u ležištu. Analizom je dokazano da se ovom metodom i načinom može proizvoditi najjeftiniji bakar i moguće je ekonomski isplativo dobijanje rude bakra iz najvećeg rudnog tela u borskom ležištu.

Milićević et al. (2012) govore o problemima prilikom primene metode podetažnog zarušavanja (švedska varijanta) u jami Bor. Što se tiče primene ove metode otkopavanja u rudnim telima u borskoj jami, kao najčešći problemi se javljaju značajno smanjenje iskorišćenja rude, ali i povećanje njenog osiromašenja. Sve ovo ima negativne ekonomske posledice na ukupnu ekonomičnost eksploatacije ležišta.

Milićević (2007) govori o tome da se drastično smanjila proizvodnja iz svih ležišta bakra u Srbiji, što izaziva veoma nepovoljne ekonomske posledice. S obzirom da se ništa ne čini za poboljšanje stanja u proizvodnji, a ni pripremi za buduću proizvodnju ruda bakra, potrebna su veća investiciona ulaganja. O preliminarnim razmatranjima potrebnih investicionih ulaganja za oživljavanje proizvodnje rude, autor je dao mišljenja. Ističe da je budućnost podzemne eksploatacije ruda bakra u Borskom ležištu veliko rudno telo „Borska reka“, koje se karakteriše velikom dubinom zaleganja i relativno siromašnom rudom. To su bili osnovni razlozi da u ovom rudnom telu nije otkopavanje počelo mnogo ranije, budući da se istraživanja mogućnosti ekonomske eksploatacije sprovode već skoro tri decenije. Ekonomska istraživanja su vršena u većem broju slučajeva, međutim nije utvrđena mogućnost ekonomske eksploatacije, jer je cena bakra bila na znatno nižem nivou od današnje. Sada se situacija promenila i cene metala su izuzetno visoke na svetskom tržištu, pa daju nadu da se podzemna eksploatacija u Borskom ležištu može na ekonomičan način izvoditi. Za proračun pripremljenih radova korišćeni su određeni parametri i dobijeni rezultati troškova koji pokazuju da se realni iznos potrebnih sredstava za revitalizaciju proizvodnje u jami rudnika bakra Bor nalazi u granicama dobijenih. U toku višegodišnjih studijskih istraživanja razmatrana je mogućnost primene različitih metoda otkopavanja. S obzirom da je ruda u rudnom telu veoma siromašna, potrebno primeniti metode otkopavanja sa nižim troškovima dobijanja rude. Kao pogodna izdvaja se metoda otkopavanja sa zarušavanjem rude. Međutim, iz razloga što se na površini nalaze objekti, u obzir su uzimane i metode otkopavanja sa zapunjavanjem otkopa, odnosno sa očuvanjem površine. Ove metode se nažalost karakterišu visokim troškovima otkopavanja. Kao rezultat istraživanja došlo se do opredeljenja na primenu metoda otkopavanja sa zarušavanjem rude, a najveća pažnja posvećena je metodama blokovskog prinudnog zarušavanja.

S druge strane, neki autori su primenom MCDM modela rešavali i problem odvodnjavanja rudnika, koji predstavlja paralelan proces prilikom eksploatacije rude. Bajić et al. (2017) su prikazali primer izbora optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu Buvač” (Bosna i Hercegovina) primenom metoda meke optimizacije i fazi optimizacije (VIKOR i FAHP). Za isto istražno područje, Polomčić et al. (2018) su izvršili matematičke optimizacione proračune primenom fazi dinamičke TOPSIS metode.

Kabwe (2017) navodi da je izbor odgovarajuće metode otkopavanja osnova podzemne eksploatacije, prvenstveno na tržištu sa smanjenjem cene metala. Ono što je posebno važno, ostvarljiva metoda rudarstva povećava sigurnost zaposlenih i efikasnost proizvodnje. U ovom radu autor je primenio tehniku ocenjivanja i rangiranja alternativa i dve metode višekriterijumske optimizacije, AHP i FAHP metode. Ove metode su korištene za izbor optimalnog podzemnog načina otkopavanja gornjeg rudnog tela u rudniku Nchanga u Zambiji. Po rezultatima tehnike numeričkog rangiranja metode sa zasipavanjem se smatraju odgovarajućim načinom otkopavanja, dok su metode višekriterijumske optimizacije tačno definisale optimalnu metodu rudarstva. I po AHP i FAHP metodama smatra se da je podetažna metoda sa zarušavanjem optimalna za navedeno rudno telo.

Mikaeil et al. (2009) ističu da je odabir odgovarajuće metode rudarstva složen zadatak koji zahteva razmatranje mnogih tehničkih, ekonomskih, političkih, društvenih i istorijskih faktora. Cilj je razvoj

hijerarhijskog modela za izbor optimalne metode rudarstva uz korišćenje efikasnih i glvnih kriterijuma, a istovremeno uzimajući u obzir subjektivne procene donosioca odluka. Predloženi pristup je zasnovan na kombinaciji metode FAHP i metode TOPSIS. FAHP se koristi za određivanje težina kriterijuma od strane donosioca odluka, a zatim se metodom TOPSIS vrši rangiranje. Predloženi postupak se primenjuje za rudnik boksita Jajarm u Iranu. Konačno, upotrebom ovih metoda i odgovarajućim proračunima, konvencionalna metoda sa zapunjavanjem odabrana je kao optimalna metoda podzemnog iskopavanja.

Yavuz & Alpay (2003) navode da izbor metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji utiče velikim delom na troškove. U svom radu predstavili su osmišljen sistem višekriterijumskog odlučivanja za odabir optimalne metode otkopavanja. Ovaj sistem podrške odlučivanju koisti analitički hijerarhijski proces (AHP), što je jedna od metoda za donošenje odluke u okruženju sa više kriterijuma.

Ataei at al. (2013) su u svojoj studiji razvili Monte Karlo analitičko hejerarhijski proces (MAHP) za izbor optimalne metode rudarstva, koristeći pritom efikasne i glavne kriterijuma i istovremeno uzimajući u obzir subjektivne procene donosioca odluka. Oni su predložili kombinaciju Monte Karlo simulacije sa konvencionalnim analitičkim hijerarhijskim procesom (AHP), za ocenjivanje i rangiranje alternativa. Predloženi model su primenili za rudnik boksita Jararm u Iranu i na kraju su rangirali i dobili najprikladniju rudarsku metodu za ovaj rudnik.

Karadogan at al. (2008) navode da se donošenje odluka može definisti kao proces u kome se bira najbolja alternativa, kako bi se postigao cilj i uglavnom uključuje neizvesnost. Inženjeri često koriste svoju intuiciju i iskustvo prilikom donošenja odluka. U svom radu su predstavili model za odabir metode podzemnog otkopavanja, zasnovan na teoriji nejasnih skupova za rudnik lignita u mestu Çiftalan, koji se nalazi blizu Istanbula. Fizički parametri kao što su geologija i geotehnička svojstva, zatim ekonomski faktori, kao i ekološki faktori utvrđeni su terenskim i laboratorijskim ispitivanjima zajedno sa određivanjem ostalih kvalitativnih promenljivih. Primenom neodređenih skupova na ove parametre, uzimajući u obzir određene metode otkopavanja određuje se optimalna metoda podzemnog otkopavanja. Kao najprikladnija određena je komorno stubna metoda sa zarušavanjem.

2.3. Metode višekriterijumske optimizacije za izbor metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina

Poslednjih godina mnogi naučnici širom sveta su uveli mnoge nove teorije i metode u izboru metoda otkopavanja prilikom podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, koje uglavnom uključuju metod analize sive korelacije, analitički hijerarhijski proces (AHP), TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR i druge metode višekriterijumskog odlučivanja.

2.3.1. Višekriterijumska optimizacija

Ako pođemo od pretpostavke da za većinu odluka u konkretnim situacijama može važiti napred definisana varijanta procesa donošenja odluka pri razlaganju jedne odluke na njene delove, kao i da je odluke potrebno donositi na osnovu argumenata, može se konstatovati da matematički modeli i optimizacione metode imaju značajnu, a u nekim slučajevima i nezamenjivu ulogu u najbitnijim fazama ovog procesa. Problem upravljanja nekim sistemom često se ukazuje kao nerešiv, međutim daljim izučavanjem često se ustanovi da rešenje postoji, pa čak i da ima više mogućih rešenja. Tada se nailazi na problem određivanja „najboljeg“ rešenja, tj. optimizacije tog sistema.

Višekriterijumski pristup predstavlja način da se što realnije opiše svaki konkretan problem. Zadatak optimizacije je da se izvrši izbor najbolje varijante, odnosno najboljeg rešenja iz niza mogućih tj. povoljnih varijanti za usvojene kriterijume. Najbolja varijanta se naziva optimalno rešenje optimizacionog zadatka i predstavlja kompromis između želje, tj. kriterijuma, i mogućnosti, tj. ograničenja. Optimizacija se vrši primenom različitih metoda, u zavisnosti od tipa relacija u matematičkom modelu, kriterijumske funkcije i ograničenja (Nikolić & Borović, 1996).

Sama reč „optimum“ je sinonim za maksimalno dobro ili minimalno loše (Opricović, 1992). Za opisivanje i postizanje onog najboljeg, ukoliko je poznato kako da se meri i razlikuje šta je dobro, a šta loše, bavi se teorija optimizacije ili teorija odlučivanja. Proces odlučivanja sadrži tri opšta koraka, a to su:

- upoznavanje sistema,
- određivanje mere efektivnosti i
- optimizacija.

Pored toga što je teorija optimizacije numerički postupak za određivanje optimuma, ona se bavi i onim problemima koji nisu kompletno matematički formulisani.

Optimizacioni modeli pomažu u procesu odlučivanja tako što omogućuju ekspertu da poveže sve podatke i relacije u datoj situaciji, a rezultat toga treba da omogući izbor dobre, tj. optimalne alternative, pri tom da savada sve kompleksnosti zadatka. Primenom optimizacionih metoda ekspert dobija informacije koje ukazuju na posledice i uticaje izabrane odluke.

Primena metode optimizacije polazi od realnog problema koji treba rešavati. Optimizacioni modeli koriste prilaz „diskretnih modela“ kada se umesto izrade sveobuhvatnog matematičkog modela projektuju varijantna rešenja (Opricović, 1992).

Petković (2016) navodi da se prilikom rešavanja problema VKO definišu ciljevi, biraju kriterijumi kojima se meri dostizanje ciljeva, vrši se specifikacija alternativa, transformišu se performanse alternativa prema različitim kriterijumima tako da imaju istu metriku, dodeljuju se težinski koeficijenti kriterijumima kako bi im se odredila relativna značajnost, bira se odgovarajuća metoda VKO za rangiranje alternativa i na kraju se određuje najbolja alternativa, odnosno bira se optimalna metoda za odgovarajuću oblast.

Tokom procesa rešavanja problema VKO pristupa se prepoznavanju, odnosno identifikaciji samog problema odlučivanja. Identifikacija problema odlučivanja se odnosi na prikupljanje i klasifikaciju podataka, zatim se pristupa obradi podataka i na kraju interpretaciji prikupljenih i obrađenih podataka, što je bitan preduslov za pravilnu identifikaciju problema. U fazi identifikacije prvi korak je prikupljanje relevantnih podataka i informacija od strane donosioca odluka. Podaci se prikupljaju iz većeg broja izvora. Glavni cilj je izdvajanje najznačajnijih i najrelevantnijih podataka i informacija koje su od presudnog značaja za dati problem odlučivanja. Suština ove faze je prikupiti i obraditi podatke tako da se omogući formiranje modela odlučivanja.

Nakon identifikacije problema proces rešavanja ovog problema se izvodi u nekoliko etapa.

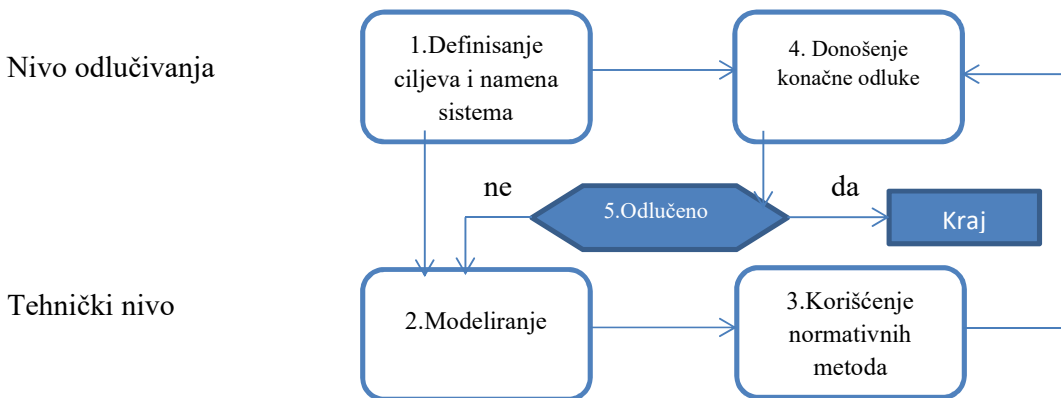
Opricović (1998) u svojoj knjizi ističe da je rešavanje zadatka višekriterijumske optimizacije složen proces dolaženja do konačnog rešenja i obuhvata sledeće radnje:

- proučavanje problema, i definisaje ciljeva, kojom podzemnom metodom otkopavati ležište,
- proučavanje sistema i kreiranje alternativa, koje sve metode dolaze u obzir definisanje kriterijuma,

- ocenjivanje alternativnih rešenja,
- primena metode VIKOR ili neke druge,
- optimizacija - izbor optimalne varijante,
- analiza preferentne stabilnosti,
- predlog konačnog rešenja i konačni projekat i implementacija.

Na slici 13 su prikazani nivoi (proces) na kojima se odvija višekriterijumska optimizacija. Na nivou odlučivanja je „donosilac odluke“, a na tehničkom nivou je „tehnički ekspert“ ili “rešavatelj problema”, najčešće inženjer. Osnovni koraci odnosno faze u optimizaciji su:

- definisanje ciljeva namena sistema i identifikacija načina postizanja željenih ciljeva,
- formalni odnosno matematički opis sistema i definisanje načina vrednovanja i kriterijuma,
- korišćenje postojećih normativnih metoda,
- usvajanje konačnog rešenja odnosno donošenje konačne odluke.



Slika 13. Šematski prikaz procesa optimizacije

Na nivou odlučivanja glavnu ulogu ima “donosilac odluke”. Tehnički nivo predlaže donosiocu odluke skup dobrih odluka (alternativnih rešenja), a da pri tom olakša donošenje konačne odluke. To podrazumeva da predložena rešenja budu jasno, kratko i precizno obrazložena, kao i da njihov broj bude relativno mali. U interaktivnom procesu između ova dva nivoa dolazi do modifikacije predloženih rešenja i uglavnom proces konvergira na konačnom rešenju.

Postupak rešavanja zadataka višekriterijumskog odlučivanja zavisi od “intenziteta konfliktnosti” kriterijuma. Nakon što se prouči postojeći problem višekriterijumske optimizacije, daje se opis i precizna formulacija problema, a zatim se izvršavaju potrebne aktivnosti, koje su prikazane u nastavku teksta.

Rao (2007) navodi da je definisanje problema prvi i najvažniji korak pri izboru materijala primenom VKO. Od toga kako se definiše problem, zavisi mogućnost njegovog rešavanja i krajnji ishod. Definisanje problema je složen zadatak koji uključuje sledeće aktivnosti:

- definisanje skupa kriterijuma za evaluaciju alternativa,
- definisanje diskretnog skupa alternativa (materijala), odnosno mogućih izbora,
- na osnovu definisanih kriterijuma i alternativa formira se matrica odlučivanja koja predstavlja osnovu za evaluaciju alternativa.

Drugi korak prikazuje definisanje preferencije u pogledu značajnosti izabranih kriterijuma od strane donosioca odluke. Ove preferencije su izražene preko težinskih koeficijenata koji se kreću u intervalu od 0 do 1, pri čemu manja vrednost težinskog koeficijenta znači manju relativnu značajnost kriterijuma i obrnuto. Treba napomenuti da je suma svih težinskih koeficijenata kriterijuma jednaka 1.

Treći korak predstavlja izbor metode rešavanja i određivanje zbirne funkcije u procesu izbora materijala primenom VKO. Donosilac odluke ima na raspolaganju veliki broj metoda za VKO. Izbor određene metode nije jednostavan zadatak i zavisi od konkretnog problema odlučivanja koji se rešava i ciljeva koje je postavio donosilac odluke. Što je metoda jednostavnija, to je bolje, međutim, složeni problemi odlučivanja mogu zahtevati primenu složenih metoda. Matematičkim modelom, koji je karakterističan za svaku metodu, određuje se agregatna funkcija, tzv. pravilo odlučivanja koje pokazuje ukupnu ocenu alternative, koristeći podatke iz inicijalne matrice odlučivanja, kao i preferencije donosioca odluke, izražene kroz težinske koeficijente kriterijuma. Na osnovu ovih funkcija, moguće je izvršiti kompletno rangiranje alternativa.

U četvrtom koraku postupkom analize osetljivosti može se utvrditi stabilnost dobijenog rešenja, odnosno rangiranja alternativa. U ovom koraku, donosilac odluke može analizirati da li se sa promenom vrednosti težinskih koeficijenata kriterijuma dolazi do značajne promene u rangovima alternativa. Ukoliko je donosilac odluke potpuno siguran u vezi sa značajnošću kriterijuma, onda se ovaj korak može izostaviti.

Poslednji korak je izbor najbolje alternative, tj. "optimalne" alternative. Izbor je jednostavan kada neka alternativa, prema funkciji agregacije, dominira nad ostalim. Međutim, takve situacije su relativno retke, pa se u određenim situacijama kao rešenje problema VKO mogu predložiti dve ili više alternativa. Nakon izbora konačnog rešenja, izabrano rešenje se realizuje, a efekti njegove primene se prate i analiziraju, (Nikolić & Borović, 1996).

Alternativa predstavlja jedan mogući rezultat promena, i može ih biti više od dve. Generisanje odnosno stvaranje alternativa polazi od glavnog cilja i namene sistema koji ostaje isti za sve alternative, a menjaju se vrednosti određenih varijabli sistema: x_1, x_2, x_N . Jedna kombinacija vrednosti vektora x predstavlja jednu alternativu a_j . Generisanje alternativa se može vršiti analizama pomoću matematičkih modela. Konačno rešenje je jedna od alternativa iz formiranog skupa.

Kriterijumske funkcije se definišu za merenje i vrednovanje:

- ekonomskih pokazatelja sistema (npr. troškovi: investicioni, eksploatacioni, troškovi otkopavanja ako je tema vezana za rudarstvo),
- trošenje resursa (voda, zemljište, energija, materijali...),
- uticaja na okolinu (ljudi, voda, vazduh, zemljište, ambijent...),
- efekata i proizvoda sistema (obezbeđivanje dobara, usluge).

Vrednovanje alternativa se vrši prema svim kriterijumima posebno. Vrednosti kriterijumskih funkcija se uglavnom izražavaju u vidu kvantitativnih ekonomskih pokazatelja, kvantitativnih tehničkih pokazatelja i kvalitativnih pokazatelja.

Ekonomski pokazatelji se odnose na troškove izgradnje i rada sistema. Kao kriterijumske funkcije za vrednovanje alternativa koriste se:

- investicioni troškovi (koštanje materijala, radne snage, mehanizacije, zauzetog zemljišta i druga finansijska opterećenja),
- godišnji troškovi rada i održavanja sistema (radna snaga, sirovine, zamena opreme i materijala),

- benefit kao finansijska kategorija (socijalni efekti, zaštita ljudi).

Kvantitativni tehnički pokazatelji se vrednuju tehničkim ili statističkim analizama ili merenjima. Ovakvim kriterijumskim funkcijama se vrednuju:

- iskorišćeni resursi ili materijali (zemljište (ha), energija (kWh), čelik (t), beton (m³),
- vreme trajanja pojedinih procesa (u satima, danima itd),
- promena kvaliteta vazduha ili vode u odnosu na sadašnje stanje (u %),
- promena zaposlenosti (broj radnih mesta).

Kvalitativnim pokazateljima vrednuju se alternative za one efekte za koje ne postoje mogućnosti da se to uradi ekonomskim ili tehničkim analizama. Ovde spadaju:

- uticaj na ljudsko zdravlje,
- uticaj na istorijske spomenike,
- uticaj na biljni i životinjski svet,
- uticaj na ambijentalnu vrednost okoline,
- zadovoljstvo ili udobnost korisnika sistema.

Vrednovanje ovakvih efekata se vrši subjektivno, od strane odgovarajućih eksperata, davanjem ocena ili bodova u okviru skale vrednovanja za datu kriterijumsku funkciju.

Prilikom vrednovanja i optimizacije metoda otkopavanja u podzemnoj eksploataciji l. m. s., odlučeno je da se koristi metoda višekriterijumsko iterativno kompromisno rangiranje (VIKOR), stoga će primeni ove metode biti posvećena posebna pažnja, kao FAHP metoda.

Donošenje odluke kod izbora najbolje alternative kompleksan proces gde ključnu stvar predstavlja korišćenje logike, znanja, intuicije i iskustva eksperta.

2.3.2. Metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP)

Kada je potrebno postaviti prioritete i doneti najbolju odluku, uzimajući u obzir kvalitativne i kvantitativne pokazatelje, analitičko hijerarhijski proces (AHP) predstavlja veoma moćnu i fleksibilnu metodu. Međutim, iako je metoda AHP veoma praktična u rukovanju sa kvalitativnim i kvantitativnim kriterijuma kod višekriterijumske optimizacije i donošenja odluke, postoji i dalje nejasnoća i neodređenost, pa kod mnogih problema pri odlučivanju može doći do nepreciznih odluka eksperta (Bouyssou et al., 2000).

Metoda FAHP se može predstaviti kao naprednija analitička metoda u odnosu na metodu AHP. Predstavlja kombinaciju klasične AHP metode (Saaty, 1980) i teorije fazi skupova (Zadeh, 1965), a implementira se korišćenjem trougaonih fazi brojeva (Chang, 1996). Modifikacija metode AHP u FAHP se sastoji u tome da je relativan odnos važnosti kriterijuma optimalnosti opisan lingvističkim iskazima, koje određuju eksperti, a modeliraju se fazi brojevima, odnosno, fazi brojevima su opisani elementi matrice parova upoređenja relativnog odnosa važnosti kriterijuma optimalnosti.

Bajić (2015) navodi da je bitan faktor koji čini da se standardne metode kod donošenja odluka u rudarstvu manje primenjuju je prilično česta nedovoljna raspoloživost podataka. Doprinos metoda koje su bazirane na fazi logici u nauci kod odlučivanja sastoji se u sposobnosti fokusiranja na prevazilaženje takvih nedostataka. Primenom metode fazi optimizacije - fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP), ukazano je na njene vidove korišćenja kao kvalitativne tehnike koja

se zasniva na prosuđivanju, tj. ocenjivanju i iskustvu donosilaca odluka u vrednovanju informacije, da bi se došlo do najbolje odluke između više alternativa.

Metode višekriterijumskog odlučivanja su se pokazale kao korisni alati pri rešavanju problema u različitim oblastima, tako da su istraživači razvili različite metodologije i obrazložili u svojim radovima (Van Laarhoeven & Pedrycz, 1983; Buckley, 1985; Boender et al., 1989; Chen, 1996; Chang, 1996; Lee et al., 2005; Lee, 2009). Oni su unapredili metodu AHP i dokazali da se metoda FAHP, koja podrazumeva korišćenje koncepta fazi logike i hijerarhijske strukturne analize, relativno bolje nosi sa problemom selekcije i daje bolji rezultat kod donošenja odluke. Jedan od prvih implementiranih FAHP pristupa je primenjen od strane Van Laarhoven-a & Pedrycz-a (1983) u kome su fazi vrednosti opisane pomoću funkcije pripadnosti trougaonih fazi brojeva. Buckley (1985) je inicirao da se trapeziodnim fazi brojevima izražava procena donosioca odluke u vezi alternativa u odnosu na svaki atribut. Boender et al. (1989) su predstavili modifikaciju fazi višekriterijumske metode predložene od strane Van Laarhoven & Pedrycz (1983). Noviji pristup u metodi FAHP postavio je Chang (1996) primenom trougaonih fazi brojeva i FAHP skale za poređenje parova.

Metodologija FAHP našla je široku primenu. Guo Q. et al. (2019) su za određivanje težina indeksa evaluacije koristili FAHP prilikom procene stabilnosti gradilišta iznad napuštenog rudnika uglja, koji ugrožava bezbednost rada brze pruge. Pipatprapa et al. (2016) su koristili modeliranje strukturalnih jednačina (SEM) i postupak FAHP da bi istražili faktore koji su pogodni za procenu ekoloških performansi prehrambene industrije. Lee A.H.I. et al. (2015) su postupkom FAHP-a predložili model odlučivanja za izbor najprikladnijeg mesta frontalnog solarnog postrojenja, s obzirom da je potražnja za električnom energijom, iscrpljivanje fosilnih goriva i porast svesti o životnoj sredini postalo neophodno za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Saaty (1980) & Saaty (1991) navode da metodologija bazirana na fazi analitičko hijerarhijskom procesu omogućava da se donese efikasna odluka i olakša rešavanje problema neizvesnosti i neodređenosti u tom procesu, posebno kada su u pitanju složeni problemi sa brojnim neodređenostima, kao što je slučaj sa sistemima ležišta mineralnih sirovina. Ove sisteme prate određene neizvesnosti i neodređenosti, u prvom smislu prilikom izučavanja geologije rudnika, koja je izuzetno specifična i kompleksna, a zatim i njegove geometrije i određenih fizičkih pokazatelja i parametara koji se odnose na rudu i okolne stenske mase, a ogleda se često u neraspodaganju dovoljnog obima informacija. Prve korake kod razvoja ove metode načinio je Chang (1996), dok je Deng (1999) izvršio modifikaciju. Takođe, primenu fazi optimizacije u rudničkoj hidrogeologiji predstavili su Bajić et al. (2017).

FAHP se sastoji od izvođenja lokalnih prioriteta iz fazi prioriternih odnosa, koji su kasnije združeni da formiraju globalne pokazatelje. Pomoću metode FAHP mogu se sračunati fazi prioriteti na osnovu aritmetičkih operacija koje važe za trougaone fazi brojeve. Da bi se koristile fazi aritmetičke operacije, moraju se poštovati pravila vezana za funkcije pripadnosti. Kod metode FAHP, poređenje alternativa se vrši tako što se formiraju parovi koji se porede. Kriterijumi za selekciju se utvrđuju i porede sa podkriterijumima, a zatim se za isti nivo po značaju za svaki kriterijum vrši proračun procesa prema napravljenoj hijerarhijskoj strukturi. U poređenju fazi parova, donosioc odluke ispituje dve alternative razmatranjem jednog kriterijuma i ukazuje na prednost. Na primer, ako se posmatra opšta hijerarhija zasnovana na tri nivoa (cilj-kriterijumi-alternative) sa M kriterijuma i N alternativa, tada se na nivou kriterijuma isti porede u parovima u odnosu na cilj, a na nivou alternativa iste se međusobno porede u odnosu na svaki kriterijum posebno. Rezultati poređenja se, kao brojevi iz FAHP skale, unose u odgovarajuće matrice na osnovu kojih se računaju lokalni vektori prioriteta, tj. težinski koeficijenti elemenata koji su poređeni. Kako je već navedeno, poređenja parova se vrše korišćenjem skale za poređenje koja dodeljuje numeričke vrednosti.

Standardna skala, tzv. skala relativne važnosti, koja se koristi za AHP kreće se od 1 do 9 i pokazuje važnost od „iste-jednake važnosti“ do „ekstremne važnosti“.

Postoji više FAHP skala, ali najbliža originalnoj Satijevoj skali je fazifikovana Satijeva skala koju je predložio Zhu et al. (1999) i Lamata (2004) prikazana u tabeli 2. Slična prethodnoj skali je FAHP skala koju su predložili Cheng (1996) & Deng (1999) prikazana u tabeli 3. Još jedan primer FAHP skale dali su Tolga et al. (2005). U doktorskoj disertaciji korišće se tabele koje su date u nastavku teksta.

Tabela 2. FAHP skala (Zhu et al., 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 umerena	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
umerena	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
umerena 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 3. Fazifikovana skala (Cheng, 1996; Deng, 1999)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	AHP skala	FAHP skala
		Trougaoni fazi broj ($0.5 \leq \alpha \leq 2$)
jednaka	1	(1, 1, 1+ α)
slaba	3	(3- α , 3, 3+ α)
jaka	5	(5- α , 5, 5+ α)
dokazana dominantnost	7	(7- α , 7, 7+ α)
apsolutna dominantnost	9	(9- α , 9, 9)
međuvrednosti	2, 4, 6, 8	(x-1, x, x+1) x=2, 4, 6, 8

Za prvo predstavljanje metode po kojoj se vrši optimizacija putem fazi analitičko hijerarhijskog procesa je zaslužan Chang (1996). Ova metoda je predstavljena pomoću trougaonih fazi brojeva i FAHP skale, na primeru selekcije kandidata za zapošljavanje prema različitim kriterijumima.

Deng (1999) je usavršio i razvio Chang-ovu (1996) metodu višekriterijumskog odlučivanja. Korišćenjem trougaonih fazi brojeva i AHP metode, razvijen je FAHP model u okviru ove doktorske disertacije, koji se primenjuje u donošenju odluke prilikom izbora optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji. U nastavku teksta, za potrebe doktorata korišće se ova metoda kojom je prikazan postupak rešavanja problema.

Bajić (2015) navodi da fazi višekriterijumska analiza koju je predstavio Deng obuhvata nekoliko faza:

- određivanje važnosti kriterijuma i performansi alternativa,
- procene (ocenjivanje) u vezi sa svim kriterijumima za svaku alternativu bazirano na principu agregacije,
- rangiranje alternativa na osnovu ocenjivanja poštujući princip agregacije.

FAHP analiza (Deng, 1999) se vrši prema sledećim koracima:

a) Na početku se razmatra problem, koji se odnosi na izbor metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji, a zatim se postavljaju alternativna rešenja i kriterijumi/podkriterijumi koji utiču na izbor optimalne alternative. Kriterijumi su svrstani u sledeće grupe: tehnički, proizvodni i ekonomski. Svaka grupa kriterijuma ima definisane podkriterijume.

b) U daljem procesu vrši ocenjivanje i poređenje parova za kriterijume (jednačina 1), podkriterijume (jednačina 2) i alternativna rešenja (jednačina 3) korišćenjem FAHP skale (tabela 2):

Nakon definisanja kriterijuma koji utiču na izbor optimalne alternative sledi definisanje hijerarhije u metodi FAHP koje se vrši u dve faze: hijerarhijsko strukturiranje problema i procenu i sintezu (razvoj hijerarhije).

U procesu hijerarhijskog strukturiranja problema potrebno je iskustvo i znanje eksperta o datom problemu koji se razmatra. Nije retko da dva eksperta jedan isti problem strukturiraju različito, pa tada hijerarhija postaje komplikovana. Zbog ovakvog projektovanja hijerarhije, neophodan je timski pristup, kako bi se ostvario konsenzus u procesu odlučivanja. U ovoj fazi se vrši:

- identifikacija nivoa i elemenata,
- definisanje elemenata i
- formulacija pitanja.

U fazi identifikacije nivoa i elemenata se postavlja pitanje: „Da li je i koliko je jedan element bolji od drugog kod poređenja parova u matrici?“? Ukoliko ekspert ima teškoće da odgovori na formulisana pitanja, tada moraju da se modifikuju elementi i nivoi, da ne bi došlo do loše selekcije alternativa i kriterijuma optimalnosti. Faktori u procesu odlučivanja koji se tretiraju u metodi FAHP su: definisanje kriterijuma optimalnosti koji su u skladu sa definisanim ciljem i definisanje podkriterijuma.

U fazi procene i sinteze ekspert na osnovu raspoloživih informacija određuje relativne odnose važnosti svakog para razmatranih elemenata u matrici: kriterijuma optimalnosti/podkriterijuma unutar svakog kriterijuma i podkriterijuma optimalnosti/alternativa, gde odgovara na pitanja da li je i koliko je jedan element bolji od drugog, pri razmatranju para elemenata u smislu jedne osobine, a zanemarivanjem ostalih osobina. Vrednost relativnog odnosa važnosti elemenata procenjuje se pomoću skale mera - FAHP skale (tabele 2 i 3). Prednost ove metode je što omogućava ekspertu da napravi procenu na jednom hijerarhijskom nivou za razmatrani par elemenata nezavisno od ostalih hijerarhijskih nivoa.

Prvo se pravi matrica kriterijuma u odnosu na cilj, zatim matrica u kojoj se ocenjuju podkriterijumi, pa matrica u kojoj se ocenjuju alternative i, na kraju, matrica odluke i matrica performansi iz koje se na kraju defazifikacijom dobijaju konačne vrednosti „težina“ alternativa, čiji je zbir jednak broju 1.

Ocenjivanje kriterijuma

Postupak rangiranja počinje određivanjem važnosti kriterijuma u odnosu na cilj, tj. u odnosu na postavljeni problem. Pomoću FAHP skale matrica procene kriterijuma se definiše:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gde je: $a_{ij} = 1$ za sve $i = j$, ($i, j = 1, 2, \dots, m$) i $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$

Ocenjivanje podkriterijuma

Sedeći korak je ocenjivanje podkriterijuma, pa se za zadati kriterijum C_j , koji se sastoji od k_j podkriterijuma je utvrđuje relativan značaj podkriterijuma u zavisnosti od kriterijuma. Na osnovu toga, matrica procene se definiše na sledeći način:

$$A_j = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k_j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_j1} & a_{k_j2} & \dots & a_{k_jk_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gde se zadati kriterijum C_j sastoji od k_j podkriterijuma

Ocenjivanje alternativa

U sledećem koraku, ocenjivanje alternativa se vrši tako što se porede parovi od N alternativa u odnosu na svaki od K podkriterijuma. Tako dobijamo ukupno K matrica koja izgleda ovako:

$$Y_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gde je $k = 1, 2, \dots, K$.

c) Vrši se postepeno određivanje vrednosti težina (vektora težinskih prioriteta) za sve matrice iz koraka **b**) korišćenjem fazi stepene analize (Chang, 1996) ili preko fazi aritmetike, odnosno korišćenjem principa proširenja (Zadeh, 1975). Korišćenjem fazi stepene analize, prema definisanim matricama iz koraka **a**), vrednosti težinskih prioriteta se definišu pomoću obrazca za određivanje fazi sintetičkog stepena za matrice kriterijuma (Chang, 1996):

Vrednost fazi sintetičkog stepena

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 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 za svaki element skupa G (Chang, 1992 & Chang, 1995). Tako se formira m vrednosti stepenih analiza za svaki element skupa X :

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

gde 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 vrednosti fazi sintetičkog stepena (za i elemenata) računaju na sledeći način:

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

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

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

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

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n s_i, \sum_{i=1}^n d_i \right), \text{ gde je: } M_{g_i}^j (j = 1, 2, \dots, n)$$

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

Na kraju, vrednost fazi sintetičkog stepena se izražava kao:

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

Na osnovu toga, proračunavaju se i vrednosti težinskih prioriteta:

$$w_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \otimes \left[\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a_{kl} \right]^{-1} \quad (4)$$

gde je $i = 1, 2, \dots, m$

Svi dobijeni vektori težinskih prioriteta - w_i se mogu normalizovati fazi aritmetikom ili principom proširenja koji je opisan u nastavku teksta. Ovaj princip ima prednost, jer se njegovim korišćenjem smanjuje neizvesnost (Deng, 1999).

Princip proširenja koga je definisao Zadeh (1975) je značajan po tome što se njime mogu proširiti matematički koncepti koji se koriste u radu sa klasičnim skupovima na fazi skupove (Kaufmann & Gupta, 1985).

Posmatra se funkcija f kojom se univerzalni skup U preslikava na Z :

$$f: U \rightarrow Z, z = f(u), u \in U, z \in Z$$

gde je Z domen funkcije preslikavanja f , a U je kodomen funkcije f .

Na univerzalnom skupu U , definiše se i fazi skup A . Funkcijom f se fazi skup A preslikava na fazi skup B ($f: A \rightarrow B$), koji je definisan na kodomenu Z . U osnovnom slučaju, pretpostavlja se da je $z \in Z$ skalarna funkcija više promenljivih, pa se princip proširenja definiše na sledeći način: ako je U Dekartov proizvod (D) običnih skupova $U = u_1 \times u_2 \times \dots \times u_n$ i na svakom običnom skupu U_d ($d = \overline{1, D}$) je definisan fazi skup A_d ($d = \overline{1, D}$), preslikavanjem funkcije $f: U \rightarrow Z$ kada je z skalarna funkcija više promenljivih u , tj. $z = f(u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D)$ dobija se fazi skup B :

$$B = \{z, \mu_B(z) \mid z = f(u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D), (u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D) \in U\}$$

Vrednost funkcije pripadnosti fazi skupa B dobija se na sledeći način:

$$\mu_B(z) = \begin{cases} \sup \min(\mu_{A_1}, \dots, \mu_{A_D}) & f^{-1}(z) \neq \emptyset \\ 0 & f^{-1}(z) = \emptyset \end{cases}$$

Kada se različite vrednosti $u \in U$ preslikavaju u samo jednu vrednost $z \in Z$ ($D=1$), tada princip proširenja glasi:

$$\mu_B(z) = \begin{cases} \sup \mu_A(u) & f^{-1}(z) \neq \emptyset \\ 0 & f^{-1}(z) = \emptyset \end{cases}$$

Za matrice podkriterijuma vektori težinskih prioriteta podkriterijuma u odnosu na posmatrani kriterijum računaju se, takođe, preko fazi stepene analize (Chang, 1996).

Konačne vrednosti težine podkriterijuma se izvode na osnovu principa agregacije na ta dva nivoa: množenjem vektora težinskih prioriteta podkriterijuma sa odgovarajućim vektorima težinskih prioriteta kriterijuma:

$$w'_j = \left(\sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \otimes \left[\sum_{i=1}^{k_j} \sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \right]^{-1} \right) \otimes w_j \quad (5)$$

gde je $j = 1, 2, \dots, m$; $p = 1, 2, \dots, k_j$

Drugim načinom napisano, a uzimajući u obzir princip agregacije, težine podkriterijuma sa ukupnom „dužinom K “ mogu se predstaviti kao:

$$W = (w_1^1, w_1^2, \dots, w_1^{k_1}; w_2^1, w_2^2, \dots, w_2^{k_2}; \dots; w_j^1, w_j^2, \dots, w_j^{k_j}; \dots; w_m^1, w_m^2, \dots, w_m^{k_m}) \quad (6)$$

i pojednostavljeno:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_K) \quad (7)$$

Kod matrica alternativa sledi korak u kom se ponovo vrši fazi stepena analiza (Chang, 1996), a određivanje ocene performansi alternativa $V_i (i=1,2,\dots,N)$ u odnosu na j podkriterijuma ($j=1,2,\dots,K$) se izračunava na sledeći način:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^K a_{ik} \otimes \left[\sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \right]^{-1}$$

gde su $i=1,2,\dots,N$; $j=1,2,\dots,K$.

d) Sledeći korak se odnosi na primenu princip agregacije iz razloga svođenja dva nivoa hijerarhije (kriterijumski i podkriterijumski nivoi) na jedan nivo:

$$K = \sum_{j=1}^m k_j \quad (8)$$

gde su C_1, C_2, \dots, C_m skup od m kriterijuma i gde svaki ima podkriterijume; k_j - broj podkriterijuma u odnosu na j -ti kriterijum.

Kriterijumi ne moraju uvek imati podkriterijume. Po ovom principu kriterijumi i podkriterijumi se objedinjuju pomeranjem kriterijuma na nivo podkriterijuma, a tada „nestaje“ jedan nivo.

e) Nakon što je definisana i proračunata matrica kriterijuma, podkriterijuma i alternativa i izračunati su vektori težinskih prioriteta vrši se proračun fazi matrica odluke i fazi matrica performansi. Fazi matrica odluke dobija se na osnovu proračuna fazi stepene analize iz koraka **c)** za alternative:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Fazi matricom performansi se predstavlja ukupan učinak svake alternative kroz sve podkriterijume, a dobija se množenjem svih vektora težinskih prioriteta podkriterijuma sa elementima matrice odluke:

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} \otimes W_1 & x_{12} \otimes W_2 & \dots & x_{1K} \otimes W_K \\ x_{21} \otimes W_1 & x_{22} \otimes W_2 & \dots & x_{2K} \otimes W_K \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} \otimes W_1 & x_{N2} \otimes W_2 & \dots & x_{NK} \otimes W_K \end{bmatrix} \quad (10)$$

f) Vrši se računanje konačnih vrednosti alternativa u vidu trougaonog fazi broja:

$$F_i = \sum_{j=1}^K x_{ij} \otimes W_j \quad (11)$$

U sledećem koraku pristupa se defazifikaciji i rangiranju alternativa, koji je opisan u nastavku.

g) Krajnji korak predstavlja defazifikacija (Van Broekhoven, 2004), koja se vrši metodom korišćenja trougaonih fazi brojeva, rangiranju alternativa i uporedo analiza osetljivosti (Liou &

Wang, 1992; Kwang & Lee, 1999). Optimalnu alternativu čini alternativa sa najvećim težinskim koeficijentom, čiji je zbir jednak jedinici, kada se saberu težine svih alternativa:

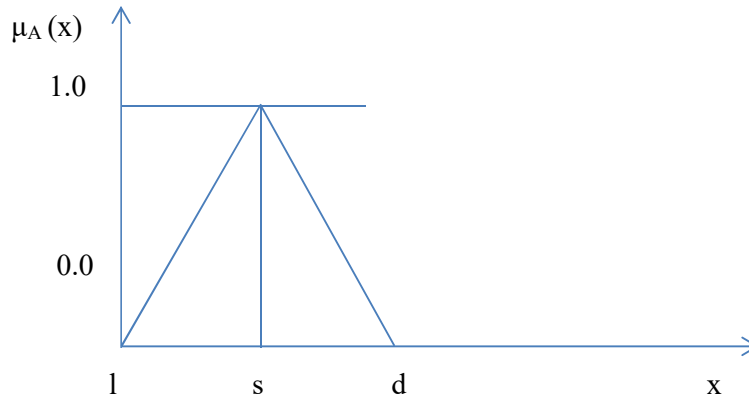
$$\text{defuzzy}(A) = \frac{(d-l)+(s-l)}{3} + l \quad (12)$$

Trougaoni fazi brojevi

Trougaoni fazi brojevi se izražavaju u obliku $A = (l, s, d)$. Parametri l, s, d predstavljaju najmanju, najperspektivniju i najveću moguću vrednost koja opisuje neki fazi događaj, respektivno. Funkcija pripadnosti x se može prikazati ovako:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{s-l} & \forall x \in [l, s] \\ \frac{d-x}{d-s} & \forall x \in [s, d] \\ 0 & \forall x \notin [l, d] \text{ tj. } \forall x \in (-\infty, l] \cup [d, \infty) \\ 1 & x = l \end{cases}$$

l, s i d su realni brojevi koji zadovoljavaju uslov: $l > 0$ i $l \leq s \leq d$. Kada je $d-l=0$, vrednost s nije fazi broj, a ako je $d-s=s-l$, trougaoni fazi broj je simetričan.



Slika 14 Trougaoni fuzzy broj

Njegov α -odsečak se definiše na sledeći način:

$$A_\alpha = [l + \alpha(s-l), d + \alpha(s-d)] \quad \alpha \in [0,1]$$

Analiza osetljivosti (Liou & Wang, 1992; Kwang & Lee, 1999) se sprovodi uvođenjem optimizacionog indeksa λ , računa se vrednost „ukupnog integrala“ - I , kojim se izražava stav eksperta prema riziku „0“ za pesimistički stav eksperta, „1“ za optimistički stav, a „0.5“ se koristi kao umerena vrednost):

$$I = \frac{(d\lambda + s + (1-\lambda)l)}{2}, \quad \lambda \in [0,1] \quad (13)$$

gde su: l, s i d elementi trougaonog fazi broja, slika.

Za opisane matematičke optimizacione proračune, napravljena je namenska aplikacija „FUZZY-GWCS2“, čiju bazu čini Microsoft Excel program. Aplikacija ima za cilj jasniji pregled rezultata, kao i mogućnost lakog praćenja promena u krajnjim proračunima prilikom analize osetljivosti.

2.3.3. VIKOR metoda odlučivanja

VIKOR metoda (višekriterijumska optimizacija i kompromisno rešenje) se koristi za višekriterijumsku optimizaciju ili višekriterijumsko odlučivanje. Ovu metodu je razvio Serafim Opricović (1998), za potrebe rešavanja problema u odlučivanju prilikom rangiranja alternativa sa konfliktnim i raznorodnim kriterijuma koji utiču na donošenje odluke. Metoda se bazira na pretpostavci da je kompromis prihvatljiv za rešavanje konflikta, a donosilac odluke želi rešenje koje je najbliže idealnom, pri tom su alternative vrednovane prema svim postavljenim kriterijumima. Razvijena je na takvim osnovama da se donosiocu odluke predlažu alternative koje predstavljaju kompromis između želja i mogućnosti ili kompromis između različitih interesa učesnika u odlučivanju. Ovde želje predstavljaju kriterijume, a mogućnosti ograničenja. Kompromisno rešenje je rešenje koje je najbliže idealnom slučaju. Bazira se na određivanju užeg skupa mogućih rešenja koja se po vrednostima približavaju idealnoj tački, tj. referentnoj tački u prostoru kriterijumskih funkcija.

U višekriterijumskom donošenju odluka VIKOR ima veliki značaj, posebno u situaciji u kojoj donosilac odluke nije u stanju ili ne zna izraziti svoje težinske koeficijente za pojedine kriterijume na početku dizajna matrice odlučivanja. Kompromisno rešenje koje se dobije je prihvaćeno od strane donosioca odluke, jer pruža maksimalnu korisnost i minimalno individualno „žaljenje“ (Stojanović, 2016).

Jemcov (2008) Redosled različitih alternativa se određuje višekriterijumskim rangiranjem koje su vrednovane po n kriterijuma (f_1, f_2, \dots, f_n). Ona alternativa koja je „najbliža“ optimalnom rešenju predstavlja kompromisno rešenje.

Chang (2010) je prvi razvio Modifikovanu VIKOR metodu, da bi se izbegle numeričke poteškoće u rešavanju problema, koje se javljaju kod prvobitne VIKOR metode. Kasnije, Jahan i saradnici (2011) su razvili Sveobuhvatnu VIKOR metodu, koja pored modifikovane VIKOR metode ima inoviranu metodu normalizacije, tako da se i ciljani kriterijumi mogu uzeti u razmatranje. U produžetku je detaljno opisana procedura Sveobuhvatne VIKOR metode.

Petković (2016) **Korak 1.** Odrediti cilj i identifikovati relevantne kriterijume za evaluaciju alternativa.

Korak 2. Na osnovu dostupnih informacija o alternativama postaviti matricu odlučivanja, prema jednačini:

$$X = [x_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

gde x_{ij} predstavlja performansu i -te alternative u odnosu na j -ti kriterijum; m je broj alternativa, a n ukupan broj kriterijuma.

Korak 3. Odrediti najpovoljnije vrednosti za sve kriterijume (najveća vrednost kod maksimizacionog, najmanja kod minimizacionog ili ciljana vrednost za kriterijum j :

$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_j, \dots, T_n\}$ = najpoželjniji element x_{ij} ili ciljana vrednost za kriterijum j

gde x_{ij} predstavlja performansu i -te alternative u odnosu na j -ti kriterijum; m je broj alternativa, a n ukupan broj kriterijuma.

Korak 4. Odrediti relativnu značajnost kriterijuma, tj. vrednosti težinskih koeficijenata kriterijuma pri čemu važi:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (15)$$

Opricović (1998) navodi da težine kriterijuma nemaju jasno ekonomsko značenje, već predstavljaju mere za uvođenje relativne značajnosti kriterijuma. Zadavanje vrednosti težina kriterijuma je poseban problem u višekriterijumskoj optimizaciji i njegovo rešavanje zavisi od strukture preferencije donosioca odluke i načina njenog iskazivanja i formulisanja.

Korak 5. Odrediti vrednost težine v , da bi se odredila kompromisna rang lista. V treba da zavisi od broja kriterijuma (n): $v = 0.5$ za $n \leq 4$, $v = 0.6$ za $5 \leq n \leq 10$, $v = 0.7$ za $n \geq 11$. Vrednost v zavisi prvenstveno od postupaka donošenja konačne odluke, za odlučivanje “većinom glasova” usvaja se $v = 0.9$ ili $v = 1.0$. U slučaju nezavisnih odlučioaca uzima se $v = 0$. U programskom paketu VIKOR vrednost v je zadana ($v = 0.5$).

Korak 6. Izračunati vrednosti metrika S_j i R_j . Jemcov (2008) navodi da polazeći od transformisane funkcije kompromisnog programiranja i uvodeći težinske faktore w_i (relativna značajnost) kriterijumskih funkcija, formiraju se mere odstupanja od idealne tačke, u zavisnosti od parametra

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i = \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (16)$$

($p = 0$)

$$R_j = \max \left(w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right) \quad (17)$$

($p = \infty$)

pri čemu se relacije odnose na j -tu varijantu, a u njima su f_i^* i f_i^- - maksimalna i minimalna vrednost kriterijumske funkcije po svim varijantama, respektivno:

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \text{ i } f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

S_j predstavlja meru odstupanja, kojom se izražava zahtev za maksimizaciju grupne korisnosti, R_j predstavlja meru odstupanja, kojom se izražava zahtev za minimizaciju maksimalnog rastojanja alternative od idealne.

Korak 7. Izračunati vrednosti ukupnog indeksa rangiranja alternativa.

Rangiranjem pomoću uvedenih mera S_j i R_j svaka alternativa zauzima određeno mesto na listama $s(a_j)$ i $r(a_j)$. Dobijene liste se razlikuju, pa se traži postupak vrednovanja alternativa prema jedinstvenom kriterijumu. Kao nova mera rangiranja usvaja se veličina Q_j koja predstavlja linearnu kombinaciju kriterijumskih funkcija S_j i R_j , tako da se zadatak svodi na dvokriterijumski:

$$Q_j = v \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (18)$$

gde su: $S^* = \min_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^- = \max_j R_j$,

S^* i R^* su najbolje granice metrika S_j i R_j , a S^- i R^- su najgore granice metrika S_j i R_j , v - težina strategija zadovoljenja većine kriterijuma. Vrednost parametra v nalazi se u intervalu $[0, 1]$, a najčešće se uzima da je $v = 0,5$. Ukoliko je $v > 0,5$ prednost se daje zadovoljenju većine kriterijuma (mera S_j), pri čemu postoji mogućnost da je izabrana alternativa veoma loša po nekom od njih. Ukoliko se ne dopušta nezadovoljenje bilo kog kriterijuma, usvaja se vrednost $v < 0,5$.

Izračunavanjem vrednosti Q_j za svaku alternativu određuje se treća nezavisna rang-lista alternativa, koja se zove kompromisna rang-lista. Iz jednačine sledi da je veličina Q_j linearna kombinacija metrika S_j i R_j , što znači da se kompromisna rang-lista može smatrati linearnom kombinacijom rang-lista dobijenih na osnovu metrika S_j i R_j .

Relacija za meru Q_j može se napisati i u sledećem obliku:

$$Q_j = vQS_j + (1 - v)QR_j \quad (19)$$

Korak 8. Izvršiti tri rangiranja alternativa na osnovu vrednosti S_j , R_j i Q_j . Najbolja alternativa, rangirana prema kompromisnoj rang-listi je ona koja ima najmanju vrednost Q_j .

Korak 9. Predložiti, kao kompromisno rešenje, alternativu $A^{(1)}$, koja je najbolje rangirana prema kompromisnoj rang-listi (najmanja vrednost za Q_j), ako su ispunjena sledeća dva uslova:

1. "dovoljna prednost" nad alternativom sa sledeće pozicije. Dakle, alternativa $A^{(1)}$ ima dovoljnu prednost nad alternativom sa sledeće pozicije $A^{(2)}$, ako je ispunjen uslov:

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq 1/m - 1,$$

gde je m broj alternativa.

2. "dovoljna stabilnost" prve pozicije alternative. Alternativa $A^{(1)}$ na kompromisnoj rang-listi ima "dovoljno stabilnu" poziciju ako ima prvu poziciju na rang-listi prema S_j ili prema R_j ili prema Q za $v = 0,5$.

Ukoliko nije ispunjen neki od uslova, predlaže se skup kompromisnih rešenja i to:

- Ukoliko prva varijanta (alternativa) sa kompromisne rang-liste ne ispunjava oba uslova U1 i U2 smatra se da ona nije "dovoljno" bolja od varijante sa druge pozicije, predlaže se skup kompromisnih rešenja dobijen primenom VIKOR metode, koji obuhvata prvu varijantu kao i varijantu iza nje. Skup rešenja se sastoji od alternativa $A^{(1)}$, $A^{(2)}$, ..., $A^{(p)}$. Alternativa $A^{(p)}$ se određuje na osnovu relacije:

$$Q(A^{(p)}) - Q(A^{(1)}) \approx 1/m - 1$$

- Ako prva varijanta ne ispunjava samo uslov dovoljne stabilnosti U2 onda u skup kompromisnih rešenja ulazi samo druga sa kompromisne liste.
- Ako prva varijanta ne ispunjava uslov dovoljne prednosti U1 tada se skupu kompromisnih rešenja pridružuju sve varijante sa kompromisne rang-liste do one

koja ispunjava uslov da prva alternativa ima dovoljnu prednost nad tom alternativom.

Opricović (1998) ističe da je posebna pažnja prilikom optimizacije alternativnih rešenja posvećena analizi stabilnosti rešenja, odnosno određivanju intervala težine različitih kriterijuma u kojima je predloženo rešenje stabilno. Težine kriterijumskih funkcija w_i zadaje sam donosilac odluke u toku procesa rangiranja varijanti. Ove vrednosti moguće je menjati u zavisnosti od toga koliko želimo da istaknemo značaj pojedinog kriterijuma za donošenje konačne odluke. Tako težine uz i -tu kriterijumsku funkciju mogu imati veću ili manju vrednost u odnosu na početnu vrednost w_i . Nova vrednost težine izražava se kao:

$$w'_i = qw_i, \text{ gde je } q \text{ nova promenljiva, } 0 \leq q \leq 1.$$

Promenom jedne težine (w_i) menjaju se ostale težine, pa sledi da je:

$$\sum_{k=1}^n w'_k = 1$$

ali se zadržava početni odnos ostalih težina:

$$w'_k = rw_k, k \neq i, k = 1 \dots, n$$

Funkcija $r(q)$ može se odrediti iz sledeće relacije:

$$qw_i + r \sum_{k \neq i} w_k = 1$$

u sledećoj formi:

$$r = (1 - qw_i) / (1 - w_i), \text{ promenljiva } q \text{ može da varira u intervalu: } 0 \leq q \leq 1/w_i.$$

Primenom metode VIKOR ra različite vrednosti promenljive q određuje se interval $q_1 \leq q \leq q_2$, u kome kompromisno rešenje predstavlja alternativa određena sa početnim vrednostima težina. Ovaj interval određuje "interval stabilnosti" za težinu i -tog kriterijuma, prema izrazu:

$$q_1 w_i \leq w_i \leq q_2 w_i$$

Faktor relativnog povećanja (ili smanjivanja) težine i -tog kriterijuma ima sledeći interval stabilnosti:

$$s_1 \leq s \leq s_2$$

$$\text{gde je: } s_1 = q_1 / r_1, s_2 = q_2 / r_2$$

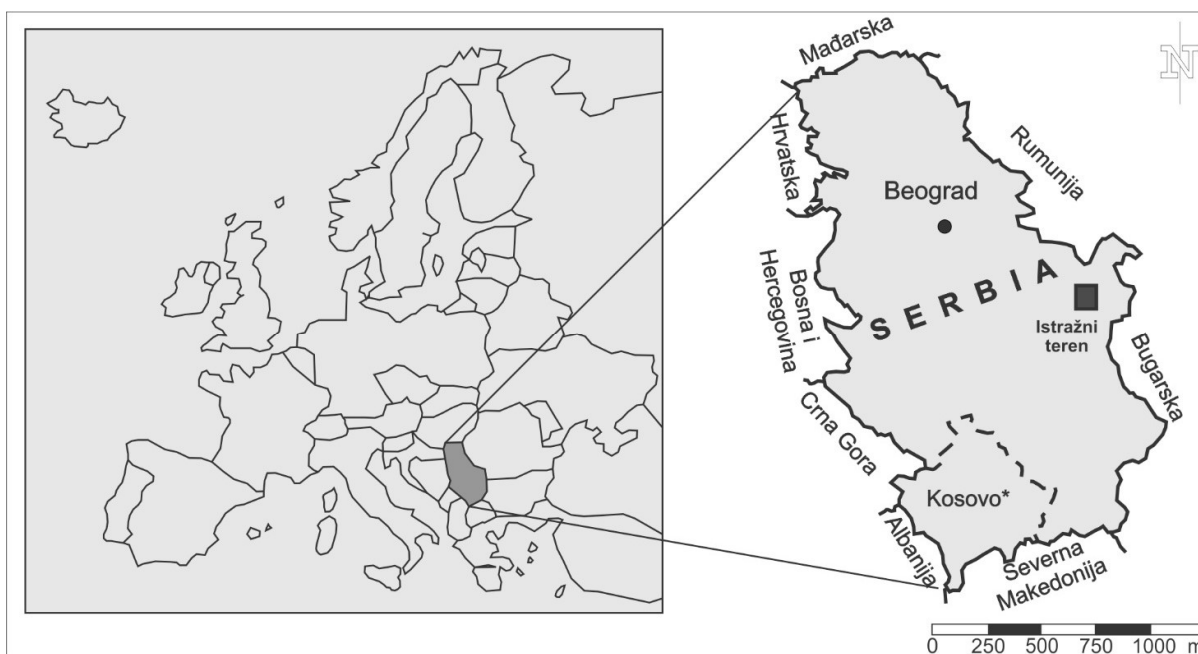
Kompromisno rešenje dobijeno sa početnim vrednostima težina biće izmenjeno ako se početna vrednost težine w_j poveća za s_2 ili većom vrednošću, odnosno ukoliko se smanji faktorom s_1 ili manjom vrednošću.

III. EKSPERIMENTALNI DEO I PRIKAZ REZULTATA

U cilju utvrđivanja optimalne varijante otkopavanja podzemnog rudnika bakra „Borska reka“ u narednom tekstu prikazani su proračuni koji su izvršeni korišćenjem MCDM modela. Ceo postupak je postupno odrađen prema koracima koji su opisani u predhom poglavlju za metodu FAHP i VIKOR i predstavljeni su konačni rezultati.

1. Izbor i karakteristike eksperimentalnog područja istraživanja rudnog tela Borska reka

Metodologija FAHP i VIKOR pri donošenju odluke o optimalnoj metodi otkopavanja podzemnih rudnih ležišta je primenjena na realno istražno područje. Istražni teren obuhvata rudno ležišta bakra „Borska reka“ u istočnoj Srbiji (slika 15).



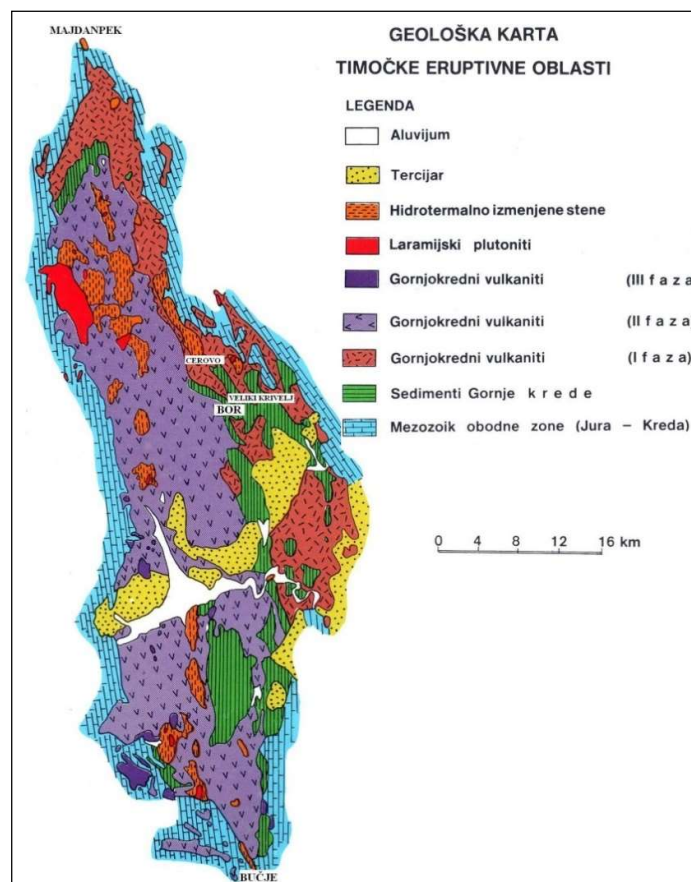
Slika 15. Geografski položaj područja istraživanja: rudnik „Borska reka“

Osnovna karakteristika borskog ležišta je prisustvo više desetina rudnih tela različitih razmera, geneze i strukturno-teksturnog tipa orudnjenja, nastalih u periodu gornja kreda-paleogen, u složenim procesima strukturno-geološkog uobličavanja Timočkog magmatskog kompleksa.

Eksploatacija ležišta Bor, od početka prošlog veka, zahvatila je 26 rudnih tela – jamski i površinskim kopom. Pri tome je dobijeno ukupno 146.270.000 t rude bakra iz koje je estrakovano 2.437.000 tona metala bakra, 139.140 kg zlata i 415.000 kg srebra. Takođe je otkopano i 436.200.000 tona jalovih masa (otkrivke i pratećih stena).

1.1. Geološke karakteristike šireg područja ležišta „Borska reka“

Borsko rudno polje i ležište bakra „Borska reka“ u okviru regionalnih metalogenetskih jedinica pripada borskoj zoni koja se prostorno poklapa sa timočkim magmatskim kompleksom, što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Geološka karta Timočke eruptivne oblasti

Borska metalogenetska zona je sastavni deo Karpatobalkanske metalogenetske provincije, koja se iz Rumunije i Majdanpeka na severu, preko istočne Srbije nastavlja, do Bugarske granice na jugoistoku, i dalje u Bugarsko Srednjejorđe, pri čemu postoji prekid između Bučja i Donje Nevlje-Borova.

Na severu oko Majdanpeka ova zona se polako sužava i gubi (zatvara) u paleozojskim škriljcima, dok se na području južno od Bučja (zapadno od Tupižnice) vulkanske i vulkanoklastične stene smenjuju sedimentnim stenama sa ugljem i podređenim učešćem vulkanoklastita. Prema zapadu ova zona je ograničena kućajsko-homoljsko-rtanjjskim karbonatnim kompleksom a na istoku krečnjačkim sedimentima Malog i Velikog Krša, Rgotskog Kamena i Tupižnice.

Tereni timočkog magmatskog kompleksa se odlikuju složenom geološkom građom (slika 4). U obodnim delovima veliko rasprostranjenje imaju paleozojske i mezozojske formacije. U bazi mezozojskih sedimenata i na zapadnom i na istočnom obodu se nalazi složena serija paleozojskih škriljaca (uglavnom silurske starosti), mestimično isprobijanih hercinskim granitoidnim stenama. Preko paleozojskih stena transgresivno leže lijaski i dogerski konglomerati i peščari (Kučaj, Beljanica, Veliki Krš, Stol), koji naviše postepeno prelaze u seriju jursko krednih krečnjaka).

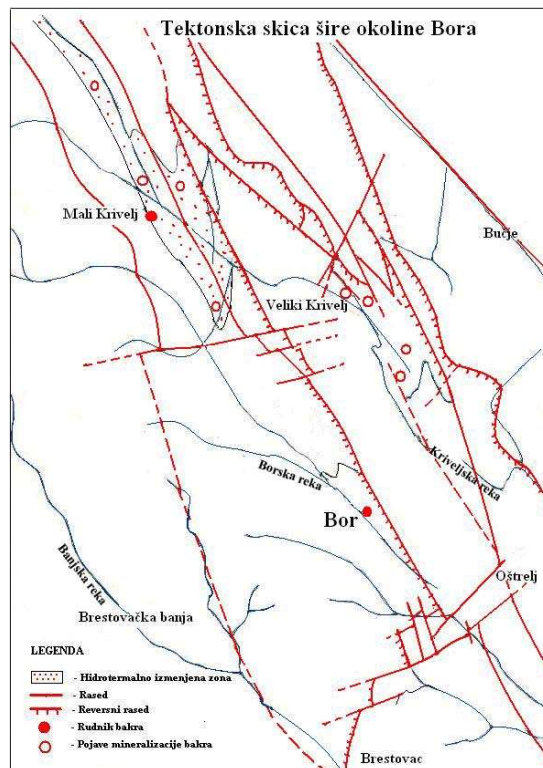
Stene od kojih je izgrađeno Borsko ležište su:

- vulkaniti i vulkanoklastiti timočtske asocijacije, zastupljeni su u sledećim varijetetima: hornblenda-andeziti, hornblenda-biotit-andeziti (timociti), hornblenda-daciti, hornblenda-biotit daciti i hornblenda-andeziti sa piroksenom, kao i piroklastiti nabrojanih varijeteta;
- kvarediorit porfiriti;

- hidrotermalno izmenjeni vulkaniti i vulkanoklastiti;
- peliti sa tufovima i tufitima;
- konglomerati i peščari;
- kvartarni aluvijalni nanosi i tehnogena nagomilanja.

1.2. Geološke karakteristike i opis rudnog tela

Ležište bakra Borska reka je sastavni deo Timočkog magmatskog kompleksa i nalazi se u krajnjim severozapadnim delovima grada Bora, ispod doline Borske reke u sastavu aktivnog rudnika Jame. (slika17). Smešteno je u intenzivno izmenjenim andezitima i njihovim piroklastitima. Relativno je jednostavne građe. Na osnovu rezultata dobijenih istražnim bušenjem i izradom rudarskih istražnih radova, kao i izvedenim laboratorijskim ispitivanjima uzoraka izdvajaju se dve različite zone stena koje učestvuju u geološkoj građi ležišta.



Slika 17. Tektionska skica šire okoline Bora

Površinska zona izgrađena je od stena pelitske serije koju čine peliti, tufovi, tufiti, laporci i breče i koje su zastupljene u zapadnom delu ležišta. Ispod njih se nalaze hornblenda biotitski andeziti, ređe daciti i njihovi vulkanoklastiti koji su relativno sveži i samo manjim delom slabo izmenjeni descendentnim procesima (zeolitizacija, hloritizacija, kalcitizacija) i imaju očuvanu porfirsku strukturu. U dubljim nivoima prevlađuju u odnosu na pelite, koji u pripovršinskom delu imaju znatno veće rasprostranjenje.

Drugu zonu čine intenzivno hidrotermalno izmenjene stene andezitskog sastava, koje se nalaze ispod prve zone i prostiru se do „borskog raseda" koji ih razdvaja od borskih konglomerata. Granica između hidrotermalno izmenjenih stena i konglomerata je tektonska. Ova zona izmenjenih stena predstavlja nastavak borske hidrotermalno izmenjene zone koja se pruža prema severozapadu i nalazi se duboko ispod površine terena. Hidrotermalno izmenjenu zonu čine potpuno izmenjeni (silifikovani, kaolinisani, sulfatisani, piritisani, epidotisani i zeolitisani) hornblenda-biotit andeziti i

njihovi vulkanoklastični ekvivalenti. U okviru same zone izmenjenih stena gornji deo nije mineralizovan izuzev neposredne krovine rudnog tela gde je sadržaj bakra vrlo nizak. Donji deo izmenjene zone, koji naleže na konglomerate predstavlja rudno telo, odnosno ležište Borska reka. U konturama rudnog tela silifikacija i sulfatizacija su nešto jače izražene.

Orudnjenje pripada porfirskom tipu mineralizacije sa impregnacijama, žilicama, žicama i nagomilanjima pirita, halkopirita, ređe halkozina, kovelina, bornita i retkim pojavama enargita i molibdenita.

Podinu rudnog tela čine borski konglomeati. Izgrađeni su od odlomaka različuitih stena kao što su kristalasti škrljci, kvarciti, graniti, gabrovi, andeziti, laporci, peščari, mermerisani krečnjaci i dr.

Dosadašnjim istraživanjem je konstantovano da rudno telo „Borska reka“ pripada grupi vrlo velikih ležišta sa nešto povišenim srednjim sadržajem bakra. Njegov pravac pružanja je SZ-JI, a zaleže prema zapadu, odnosno, jugozapadu pod uglom 45° - 55° generalno. Maksimalna dužina rudnog tela je 1.410 m, a maksimalna širina 635 m koja je izmerena na istom nivou, a prosečna je oko 360 m. Od površine do povratne konture rudnog tela u konturi graničnog sadržaja 0.3% Cu, prosečna dubina je oko 620 m. Debljina orudnjenja u pojedinim bušotinama je veća od 600 m. (prividna debljina), a prosečna iznosi preko 300 m. Generalno gledano, prosečna krajnja dubina rudnog tela od površine terena je oko 920 m, to je podinska kontura rudnog tela. Iz navedenih podataka se vidi da se rudno telo nalazi duboko ispod površine terena. Dubina mu se povećava u pravcu zaleganja. Po pružanju rudnog tela dubina se povećava u pravcu severozapada.

Ovo rudno telo ima nepravilan oblik i podseća na deformisanu spljoštenu oborenu kupu sa bazisom prema jugistoku a vrhom ka severozapadu.

Podinu rudnog tela čine borski konglomerati. Unutar rudnog tela evidentne su brojne pukotine i prsline. One su uglavnom ispunjene produktima alteracije i sulfidnim mineralima.

1.3. Mineralni sastav rudnog tela

Na osnovu rezultata koji su dobijeni rudno mikroskopskim ispitivanjima rude iz rudnog tela, kod ležišta „Borska reka“ utvrđeni su sledeći rudni minerali: halkopirit, kovelin, halkozin, bornit, rutil, hematit, magnetit, sfalerit, galenit, tetraedrit, tenantit, digenit, kubanit i samorodno zlato.

Najzastupljeniji rudni mineral je pirit, a od minerala bakra dominira halkopirit, u manjoj meri su zastupljeni kovelin, halkozin i bornit, dok su pojave enargita i molibdenita veoma retke. Ovaj odnos bakrovih minerala nije isti za celo ležište, pošto se u pojedinim delovima rudnog tela kovelin, halkozin i bornit javljaju u većim količinama i primiču se halkopiritu, ali veoma retko mogu biti dominantni. Česte su pojave rutila, magnetita i hematita, kao i sfalerita i galenita, a pojave tetraedrita tenantita, digenita, kubanita i samorodnog zlata su veoma retke i sporadične.

Ostali minerali, koji se sporadično javljaju u rudi rudnog tela Borska reka nemaju praktični značaj. Od nerudnih minerala kvarc je dominantan, a prisutni su i kalcit, anhidrit, gips, zeolit, retko i barit.

1.4. Geneza ležišta

Ako se rudno telo posmatra sa površine terena me se uočiti određena zonalnost u rasporedu i u intezitetu hidrotermalnih izmena. U odnosu na rudno telo ka površinomogu se izdvojiti četiri zone:

Prva zona se nalazi uz samu površinu terena. U višim delovima predstavljena je blago zatalasanim stenama pelitske serije ispod kojih se nalaze neizmenjene vulkanoklastične stene timocitske asocijacije.

Druga zona se karakteriše hidrotermalnim izmenama slabijeg stepena i najčešća pojava mineralna asocijacija ove zone je: hlorit - kalcit - zeolit - gips, a mogu biti prisutni još i epidot i kaolin ali u manjoj meri.

U trećoj zoni je najčešća mineralna asocijacija kaolin - kvarc - pirit. U višim delovima ove zone u većoj meri može biti prisutan i hlorit, zeolit i epidot. U ovoj zoni u manjoj meri je prisutna bakrova mineralizacija, ali uglavnom koncentracije ovih minerala nisu ekonomski značajne.

U četvrtoj zoni je smešten najveći deo rudnog tela. Najčešća mineralna asocijacija ove zone je: kvarc - pirit - anhidrit - minerali bakra. U ovoj zoni mogu se naći još i sericit i pirofilit, dok se kaolin i hlorit javljaju u podređenim količinama.

1.5. Hidrološke i hidrogeološke karakteristike rudnog tela

Različiti tipovi stena se različito ponašaju prema podzemnim vodama. Neizmenjene vulkanske stene su dosta ispucale stene u kojima postoji mogućnost akumuliranja podzemnih voda a koje mogu znatno uticati na odvodnjenost rudarskih radova.

Od površine terena pa do dubine od oko 400 m konstantovan je veliki broj otvorenih (zjapećih) pukotina koje su ponekad delimično zapunjene kalcitom i zeolitom. U dubljim delovima pukotine su uglavnom stisnute i zapunjene su sekundarnim produktima koji smanjuju njihovu vodopropusnost. Krute ispucale vulkanske stene do dubine oko 400 m predstavljaju dobro vodopropusne stene u kojima je u okviru brojnih sistema pukotina i prslina formiran pukotinski tip izdani.

Hidrogeološkim istraživanjem u neposrednoj okolini ležišta Borska reka konstatovano je prisustvo podzemnih voda u okviru pukotinskog tipa izdani formiranog u okviru brojnih sistema prslina i pukotina.

U zoni uticaja fizičko - hemijskog raspadanja stenskih masa izdan često ima karakter zbijeno ili zbijeno-pukotinske izdani. Podzemne vode u okviru ovog dela izdani se prihranjuju uglavnom na račun atmosferskih padavina, usled izražene morfologije terena. Izdan se drenira putem izvora. Deo voda se drenira putem difuznog isticanja direktno u Borsku reku i njene pritoke. Karakter ispucalosti i morfologije terena ne pružaju mogućnost za akumulaciju većih količina podzemnih voda u okviru pukotinskog tipa izdani iznad lokalnog erozionog bazisa. Deo pukotinske izdani ispod lokalnog erozionog bazisa formirana je u okviru većih pukotina i razloma koji dosta duboko i strmo zaležu i koji su dobro vodopropusni (lokalna ispucalost). Podzemne vode u ovom delu izdani se prihranjuju na račun površinskih voda iz Borske reke i njenih pritoka duž sistema dobro vodopropusnih pukotina, prslina i raseda. Izdan se prihranjuje i infiltracijom podzemnih voda iz dela izdani iznad lokalnog erozionog bazisa.

Posebnu ulogu u odvodnjenosti rudnog tela ima Borski rased koji razdvaja seriju borskih konglomerata, od hidrotermalno izmenjenih i orudnjenih vulkanskih stena. U zoni ležišta Bor, Borski rased je predstavljen vodonepropusnom milonitskom zonom debljine i do 10 m. Milonitska (rasedna zona) ima ulogu hidrogeološkog izolatora. Na mestima gde je rudarskim radovima presečena pomenuta zona dolazi do priliva podzemnih voda.

Dosadašnjim hidrogeološkim istraživanjima može se zaključiti da su glavni prilivi podzemnih voda vezani za pukotinski tip izdani u borskim konglomeratima, u zoni kontakta sa milonitskom zonom

borskog raseda, prema izmenjenim i orudnjenim vulkanskim stenama. Ukupna izdašnost podzemnih voda koje ističu u vidu izvora i mlazeva iz borskih konglomerata iznosi oko 0,45-0,5l/s, sa temperaturom 21,8^o. Svi pomenuti podaci ukazuju na to da, u okviru većih tektonskih zona mogu biti akumulirane znatne količine podzemnih voda, koje kao takve mogu, u velikoj meri, uticati na prilive u rudarske radove, bez obzira što je njihovo prisustvo konstatovano u znatno plićim nivoima u odnosu na samo rudno telo. Razradom rudnog tela treba očekivati povećanu infiltraciju podzemnih voda iz plićih nivoa (nadrudni deo) u rudarske radove.

Jedan od najbitnijih veštačkih faktora, koji utiče na ovodnjenost je sam proces razrade i eksploatacije rudnog tela, pri čemu dolazi do presecanja litoloških članova različitih filtracionih karakteristika, presecanja raseda, pukotina i prslina, usled čega može doći do aktiviranja mnogih neaktivnih pukotina i prslina, i ostvarivanja hidrauličke veze između površinskih i podzemnih voda.

U hidrografskom pogledu u okolini Bora najznačajniji prirodni tokovi su: Borska reka i Kriveljska reka (koja nastaje od Crvene reke, Valja Mare i Cerove reke). Pomenute reke pripadaju slivu Timoka.

Početak eksploatacije rude bakra u Boru vezan je za otkopavanje delova ležišta koji su bili na višim kotama od kote korita Borske reke. Potkopima, koji su išli iz doline reke, ležište je u to vreme gravitacijski odvodnjavano, tako da je Borska reka služila kao dren koji je sakupljao rudničke vode iz ležišta. Intenziviranjem eksploatacije i produbljivanjem površinskog kopa, rudarski radovi sišli su ispod nivoa Borske reke, tako da je ona tunelom izmeštena u sliv Kriveljske reke.

Teren u slivu se odlikuje blago zatalasanim reljefom sa nadmorskim visinama 400-600m, koji je ispresecan pritokama Borske reke. Zadnjih godina, reljef u slivu Borske reke znatno je izmenjen usled odlaganja rudne jalovine, i stvaranjem depresije (Stari površinski kop u Boru). Ovako velika depresija stvorila je uslove za gravitiranje površinskih voda u pravcu ležišta Bor, što direktno utiče na ovodnjenost kako ležišta Bor tako i rudnog tela Borska reka, na račun površinskih i atmosferskih voda. Pomenute vode slivaju se u područje kopa, a preko njega u podzemne rudarske radove. Odlaganjem jalovine u kop, posebno po obodu kopa potpuno ili delimično su uništeni manji vodotokovi, čime je povećana površina sa koje atmosferske padavine gravitiraju u područje kopa. Prirodno oticanje i dreniranje terena onemogućeno je stvaranjem velikih jalovišta i deponija šljake, kao i postojanjem industrijskih postrojenja po obodu kopa koji ispuštaju velike količine industrijske vode.

2. Analiza i diskusija rezultata dobijenih primenom metoda FAHP i VIKOR

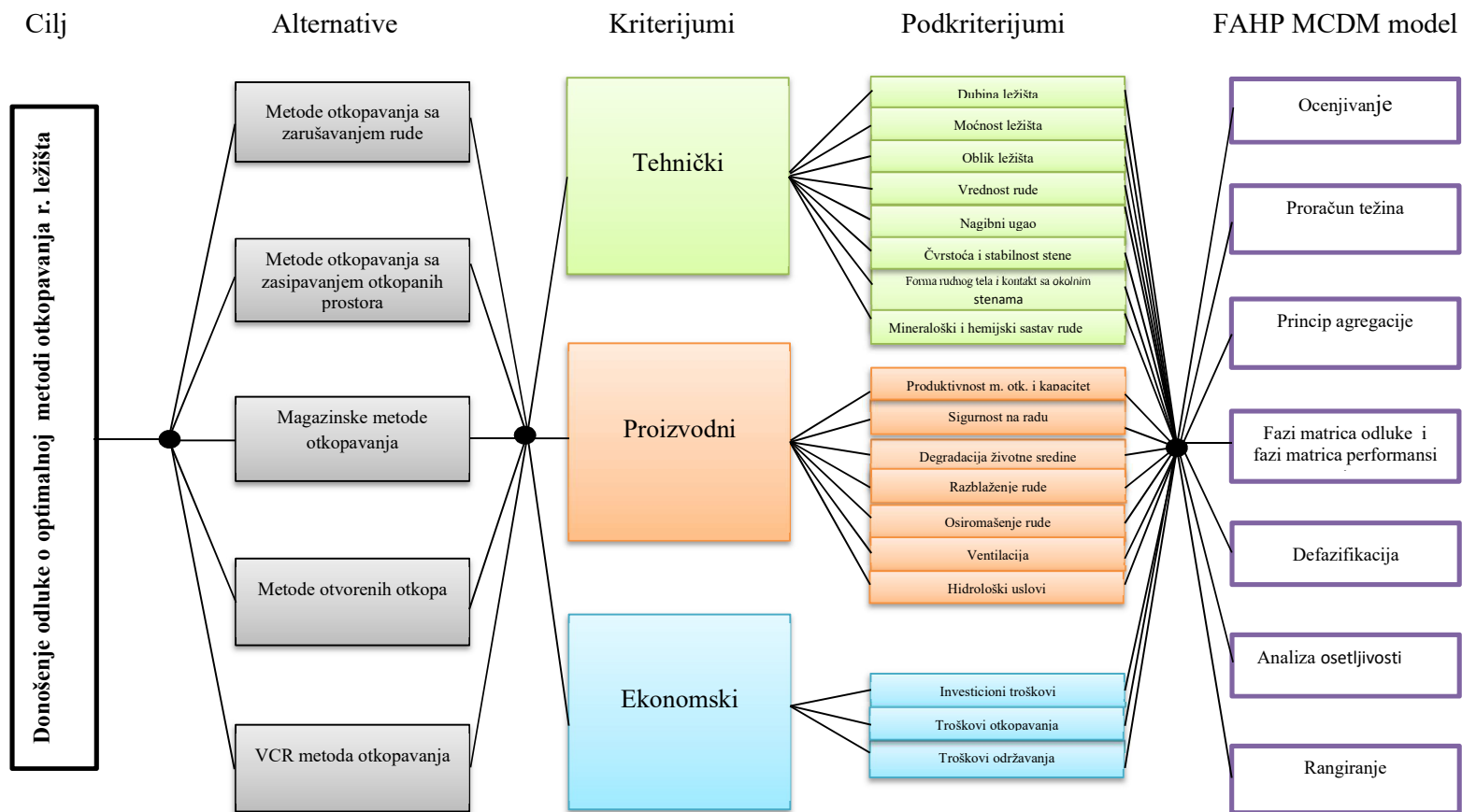
Izbor metoda podzemne eksploatacije pomoću FAHP omogućava da se donese efikasna odluka i olakša rešavanje problema neizvesnosti i neodređenosti u tom procesu, posebno kada je u pitanju složeni problem sa brojnim neodređenostima, kao što je slučaj sa podzemnim ležištem bakra "Borska Reka". Geološki sistem ležištem bakra "Borska Reka" prate neizvesnosti i neodređenosti, u prvom smislu prilikom izučavanja i određivanja svih litostratigrafskih jedinica. Ovo ležište bakra je izuzetno specifično i kompleksno sa pojavama brojnih minerala. S druge strane, njegova geometrija i određeni fizički pokazatelji i parametri koji se odnose na rudu i okolne stenske mase prati problem u neraspolaganju dovoljnog obima informacija.

Ključnu ulogu kod donošenja odluke o izboru metoda podzemne eksploatacije i kako bi se vršila održiva eksploatacija rude, igra definisanje tima stručnjaka i "eksploatacija" njihovog znanja i iskustva. Ovakav timski rad dovodi rudnik u stanje da je moguće tehnički, ekonomski isplativo i pre svega bezbedno vršiti otkopavanje i eksploataciju rude bakra.

Uspešan izbor metode podzemne eksploatacije zahteva veliku količinu znanja koje se odnosi na geologiju ležišta mineralnih sirovina. Zbog velikog zaleganja rudnika, bitnu ulogu ima i znanje, a pre svega iskustvo prilikom istražnog bušenja. Za specifičnosti bakarnih ležišta i analizu minerala i njihovih fizičkih parametara, ključno znanje prenose petrolozi, mineraolozi i geohemičari. Analizu priliva voda u rudnik, odnosno zaštitom rudnika od podzemnih voda bave se hidrogeolozi. Tehničku i ekonomsku analizu opravdanosti eksploatacije rude vrše eksperti iz oblasti ekonomske geologije i menadžmenta rudnih ležišta. Kada se na taj način primeni znanje geologa, definišu se pomenute karakteristike rudnog ležišta. S druge strane, eksperti iz oblasti rudarstva na osnovu tih činjenica stiču sliku o potencijalnim metodama otkopavanja u podzemnoj eksploataciji, odnosno vrši se definisanje alternativnih rešenja. Dalje, inženjeri i eksperti sintetišu prikupljeni obim podataka i informacija o rudniku i vrše definisanje i ocenjivanje kriterijuma koji utiču na izbor metode podzemne eksploatacije. Kvalitet identifikacije uslova koji vladaju u rudniku, kao i znanje i iskustvo eksperata direktno utiču na izbor optimalne metode.

Prilikom ocenjivanja težina kriterijuma i donošenja odluke o optimalnom rešenju vrednosti težinskih faktora su određeni na osnovu subjektivnog mišljenja, rangiranjem informacija po prioritetu i značaju. Kod ovakvog pristupa donosilac odluke daje svoje mišljenje o značaju kriterijuma za dati proces odlučivanja u skladu sa svojim sistemom preferentnosti.

U narednom tekstu prikazani su proračuni koji su izvršeni korišćenjem višekriterijumskog modela, odnosno algoritma predloženog na slici 18, da bi se utvrdila optimalna varijanta otkopavanja i eksploatacije podzemnog rudnog ležišta barka „Borska reka“. Bajić et al. (2020) ceo postupak je postupno odrađen, prema navedenim koracima (*a-g*) opisanim u predhodnom poglavlju, u namenski napravljenoj aplikaciji „FUZZY-GWCS2“, a donošenje odluke je sprovedeno korišćenjem metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP).



Slika 18. Algoritam za višekriterijumsko odlučivanje pri izboru optimalne metode otkopavanja

2.1. Određivanje kriterijuma koji utiču na izbor metode otkopavanja

Problem u vezi sa ležištem bakra „ Borska reka“ je odabrati odgovarajuću metodu eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Prema koraku **a**), razmotreni su postavljeni problem - izbor optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji i cilj - otkopavanje i eksploatacija podzemnog rudnog ležišta. Zatim su definisani kriterijumi i podkriterijumi koji utiču na izbor optimalne alternative. Na osnovu istražene literature vezane za izbor metoda u podzemnoj eksploataciji i najznačajnijih faktora koji utiču na izbor pogodne metode (Ataei et al. 2008a; Yazdani-Chamzini 2012) izdvojena su tri kriterijuma:

- tehnički,
- proizvodni i
- ekonomski.

Dati kriterijumi se dele na podkriterijume, a u ovom slučaju definisano je osamnaest podkriterijuma, prikazano u tabeli 2. Iz razloga da se radi o različitim tipovima kriterijuma, koji su u suprotnosti jedni sa drugima, primena metoda višekriterijumskog odlučivanja (VKO) u procesu njihove prioritizacije je sasvim logična i opravdana.

S druge strane, definisano je pet različitih alternativa, odnosno pet različitih metoda otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, Prema tome, sistem metoda otkopavanja podzemnih rudnih ležišta se sastoji od sledećih:

- alternativa 1 – metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i okolnih stena,
- alternativa 2 – metode otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora,
- alternativa 3 – magazinske metode otkopavanja,
- alternativa 4 – metode otvorenih otkopa i
- alternativa 5 – VCR metoda otkopavanja.

Iz razloga da se radi o različitim tipovima kriterijuma, koji su u suprotnosti jedni sa drugima, primena metoda višekriterijumskog odlučivanja (VKO) u procesu njihove prioritizacije je sasvim logična i opravdana. Način otkopavanja ležišta zavisi od njegovog oblika, veličine, uslova zaleganja, fizičko-mehaničkih svojstava rude i pratećih stena, hidroloških prilika, osetljivosti površine na rudarske radove, mineraloško-hemijskog sastava rude, načina raspodele minerala i vrednosti sirovine. Prema tome, sve ove karakteristike su od izuzetnog značaja i treba ih uzeti u obzir prilikom donošenja odluka o optimalnoj metodi otkopavanja.

U ovoj doktorskoj disertaciji kriterijumi su definisani na osnovu određenih karakteristika rudnog ležišta i metoda podzemnog otkopavanja koje su odabrane kao potencijalne. Predstavljen je operativni model koji uključuje kombinaciju tehničkih, proizvodnih i ekonomskih kriterijuma za izbor optimalne metode otkopavanja rudnika bakra. Pregled kriterijuma i podkriterijuma je dat u tabeli 4.

Prilikom ocenjivanja težina kriterijuma i donošenja odluke o optimalnom rešenju vrednosti težinskih faktora su određeni na osnovu subjektivnog mišljenja, rangiranjem informacija po prioritetu i značaju. Kod ovakvog pristupa donosilac odluke daje svoje mišljenje o značaju kriterijuma za dati proces odlučivanja u skladu sa svojim sistemom preferentnosti.

Tabela 4. Pregled kriterijuma i podkriterijuma

Kriterijum	Oznaka	Podkriterijum	Oznaka
Tehnički	T	Dubina ležišta	T ₁
		Moćnost ležišta	T ₂
		Oblik ležišta	T ₃
		Vrednost rude	T ₄
		Nagibni ugao	T ₅
		Čvrstoća i stabilnost stena	T ₆
		Forma rudnih tela i kontakt sa okolnim stenama	T ₇
		Mineraloški i hemijski sastav rude	T ₈
Proizvodni	P	Produktivnost metode otkopavanja i kapacitet proizvodnje	P ₁
		Sigurnost na radu	P ₂
		Degradacija životne sredine	P ₃
		Razblaženje rude	P ₄
		Osiromašenje rude	P ₅
		Ventilacija	P ₆
		Hidrološki uslovi	P ₇
Ekonomski	E	Investicioni troškovi	E ₁
		Troškovi otkopavanja	E ₂
		Troškovi održavanja	E ₃

Tehnički kriterijumi predstavljaju jednu od tri grupe kriterijuma i obuhvataju geološke uslove ležišta kao što su dubina i moćnost ležišta, oblik ležišta odnosno slojeva kao i njihovo pružanje i pad. Takođe važnu ulogu imaju i fizičko-mehaničke karakteristike rude i okolnih stena, kao i mineraloški i hemijski sastav rude.

Proizvodni kriterijumi predstavljaju bitne uslove koji se moraju uzeti u obzir prilikom ocenjivanja i donošenja odluke u odabiru optimalne metode otkopavanja za dato ležište. Kod izbora metode otkopavanja mora da se vodi računa o sigurnosti zaposlenih, da se obezbedi sigurnost od požara u jami, provale podzemnih i površinskih voda, kao i da se obezbedi dobro provetravanje u podzemnim rudničkim prostorijama. Obezbeđivanje odgovarajućeg kapaciteta proizvodnje po obimu i kvalitetu ima velikog uticaja na cenu proizvoda, u ovom slučaju- otkopane rude, kao i na obezbeđenje celokupnog plana proizvodnje. Sa niskim troškovima proizvodnje postiže se veći ekonomski efekat rudnika. Niži troškovi proizvodnje (otkopavanja) ostvaruju se ukoliko se po jedinici proizvoda (toni otkopane rude) utroši manje materijala i radne snage. Radna snaga u podzemnoj eksploataciji čini jedan od značajnijih troškova proizvodnje, zbog čega je potrebno da se pri izboru tehnološkog procesa rada nastoji da se proizvodni procesi što više mehanizuju i da mehanizacija bude u što većoj meri iskorišćena (Torbica & Petrović, 1997).

Ekonomski kriterijumi obuhvataju troškove rudarstva kao što su investicioni troškovi, troškovi otkopavanja i troškovi održavanja. Procena ovih troškova je neophodna za izbor metoda podzemnog otkopavanja rudnika. Investicioni troškovi definišu se kao iznos investicije koji je potreban pre nego što rudnik počne da donosi prihod. To su troškovi izrada prostorija otvaranja, troškovi opreme za otkopavanje kao i opreme za provetravanje i odvodnjavanje. Ulaganja u nabavku rudarske mehanizacije pri otvaranju podzemnog kopa, predstavlja najveći investicioni izdatak.

Troškovi otkopavanja obuhvataju sve troškove: materijala potrebnih za izradu pripremnih prostorija, potrošnih materijala, spravljanje i distribucija pasta zasipa u jami, radne snage na eksploataciji rude, odvodnjavanja i provetravanja.

Održavanje predstavlja stalnu kontrola nad svim sredstvima za rad, kao i vršenje određenih popravki i preventivnih radnji, čiji je cilj, stalno, funkcionalno osposobljavanje i čuvanje proizvodne opreme, postrojenja i drugih mašina i uređaja. Sredstva se tokom vremena troše i smanjuje im se radna sposobnost kao i podložna su kvarovima, lomovima i oštećenjima, pa se pojavljuju prekidi u radu. To uzrokuje pojavu troškova zbog zamene i popravke delova, ali i troškove zbog zastoja u procesu proizvodnje (Jovančić, 2014).

Dubina ležišta

Javanshirgiv & Safari (2017); Gluščević (1974); Genčić (1973); Đorđević (2018); Torbica & Petrović (1997) definišu karakteristike rudnih tela, koja mogu biti locirana blizu površine i biti prekrivena drugim stenama ili tlom. U mnogim rudnicima podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina se ruda za eksploataciju nalazi na dubini od nekoliko metara ili čak i 100 metara. Ostala rudna tela se mogu nalaziti i na stotine pa čak i hiljade metara ispod površine. Za ovakva rudna ležišta mogu se primenjivati samo neke metode otkopavanja, s obzirom na njihovu dubinu zaleganja.

Dubina zaleganja ležišta preko 1000 i 1500 m, može da ima znatnog uticaja na izbor metode otkopavanja, jer se na velikim dubinama javlja problem povećanih pritisaka i povećane temperature. Metode otvorenih otkopa sa ostavljanjem sigurnosnih stubova se obično primenjuju do dubine od 600-700 m. Zbog veće čvrstoće krovinskih stena i velikih pritisaka, dolazi do nenadanih podzemnih udara i do eksplozivnog prskanja sigurnosnih stubova koji se nalaze u prenapregnutom stanju, što stvara poteškoće i probleme u izvođenju radova bez zasipa. Na većim dubinama treba izbegavati rad sa otvorenim otkopima i primenjivati metode sa zasipavanjem, a takođe treba vršiti i plansko otkopavanje.

Moćnost ležišta

Debljina ležišta ima veoma važnu ulogu u stabilnosti i može sprečiti da određena oprema efikasno funkcioniše ili metode rudarstva mogu biti neefikasne. Debljina ležišta se klasifikuje na sledeći način: veoma tanka ležišta < 3 m, tanka 3-10m, srednja 10–30m i debela ležišta > 30 m.

Kod rudnih tela moćnosti preko 20 m otkopi, odnosno blokovi se razvrstavaju poprečno na pravac pružanja. Isto tako kod rudnih tela koja imaju moćnost do 20 m i ako rudno telo ima strm pad, u vrlo pogodnim uslovima, otkopava se celom širinom po pravcu pružanja. Rudna tela moćnosti od 2 do 5 m otkopavaju se po pravcu pružanja. Tanka rudna tela moćnosti od 0,8 do 2 m, otkopavaju se po pravcu pružanja. U toku otkopavanja ne treba uzimati deo jalovih bokova, ali u toku izvođenja pripremnih radova, potrebno je radi širine hodnika delimično uzimati i deo jalovih bokova. Kod vrlo tankih rudnih tela moćnosti ispod 0,8 m prilikom otkopavanja i izvođenja pripremnih radova, mora se delimično uzimati i deo jalovih bokova.

Za uža ležišta mogu se primeniti samo izvesne metode otkopavanja, dok se za moćnija ležišta mogu primeniti sve metode otkopavanja. Ležišta malih dimenzija se ne mogu otkopavati visokomehanizovanim tehnološkim procesima, zbog visokih ulaganja u otkopnu mehanizaciju i prateću opremu i kratkog vremena eksploatacije koji negativno utiču na ekonomiku proizvodnje.

Oblik ležišta

Oblik ležišta zavisi od načina postanka i geološke građe terena. Veoma je važan parametar koji treba uzeti u obzir, jer direktno utiče na izbor metode otkopavanja. Prema karakteristikama oblika, rudna ležišta se razvrstavaju u tri grupe:

- masivna, koja mogu imati bilo kog oblika, a ruda se često distribuira u niskim koncentracijama, na širokom području u različitim horizontalnim i vertikalnim ekstenzijama. Masivan oblik je promenljiv i nije pogodan za određene metode rudarstva.
- tabelaran, čiji je sediment ravan i tanak i ima širok horizontalan obim.
- kolonijalan, koji je u obliku sočiva, lista, vene...

Takođe ležišta se po svom obliku u prirodi javljaju kao slojevita, neslojevita i u obliku rasipa. Slojevita ležišta se javljaju u obliku naslaga, pa imaju više-manje pravilan pravac prostiranja i padanja, ustaljenu moćnost, kao i ravnomernu rasprostranjenost korisnog minerala. U slojevita ležišta ubrajamo sva ležišta ugljeva, soli, fosforita, glina, dolomita, gipsa i dr.

Neslojevita ležišta karakteristična su po raznim nepravilnim oblicima, pa prema tome imaju više-manje nepostojan pravac prostiranja i padanja, kao i uglavnom neravnomerno rasprostranjen korisni mineral. U neslojevita ležišta spadaju sva metalična ležišta sa izuzetkom nekih ležišta gvožđa i mangana. Isto tako veći deo nemetalčnih mineralnih sirovina javlja se u prirodi neslojevito.

Rasipna ležišta su tvorevine voda, mora, ledenika i vetra, a u njima nalazimo korisne minerale i metale kao što su: zlato, platina, kasiterit, volframit, cirkon, granat i dr.

Rudna tela nepravilnog oblika obično se moraju otkopavati nekom metodom sa zasipavanjem, a veličina je rudnog tela često odlučujući faktor, jer odražava količinu rudnih rezervi. (Javanshirgiv & Safari, 2017).

Vrednost rude

U odnosu na sadržaj ili po vrednosti metala u rudi, dele se na bogate, srednje i siromašne ili niskoprocenatne. Ova raspodela ruda po vrednosti, odnosno po sadržaju metala, nema neki stalni odnos, jer to zavisi od uslova eksploatacije, složenosti tehnološke prerade, napretka tehnike, tržišta i niza drugih faktora. Pre par decenija bakarne rude sa sadržajem od 1,5-2,0 % Cu smatrane su za siromašne rude, a danas se siromašne bakarne rude smatraju sa sadržajem od 0,5-0,8% Cu. Vrednost rude često može imati značajan uticaj na izbor metode otkopavanja. Ako se radi o vrednoj rudi, često se daje prednost manje efektivnoj metodi koja daje znatno veće iskornćenje rudne mase nego nekoj efektivnoj metodi sa većim gubicima rudne mase.

Ako ruda ima veliku vrednost, potrebno je izabrati metodu kojom će se postići što manji gubici. Ako je ruda siromašna, gubici mogu biti veći, ali osiromašenje rude mora da bude što manje. Normalni ili dozvoljeni gubici za visokovredne rude treba da iznose od 3-5%. Za rude srednje vrednosti, gubici treba da se kreću u granicama od 10- 15%. Za niskoprocenatne rude, čija je vrednost mala, otkopavanje se vrši masovnim metodama, kod kojih normalni ili dozvoljeni gubici iznose od 15 - 20%, a ponekad i do 30%.

Nagibni ugao

Uslovi zaleganja ležišta označavaju nagibni ugao, karakter kontakta i tektonske prilike ležišta. Prema uglu nagiba, rudna ležišta možemo razvrstati na horizontalna $< 20^{\circ}$, nagnuta $20^{\circ} - 55^{\circ}$ i

rudna tela strmog nagiba $> 55^{\circ}$, a po moćnosti na mala rudna tela < 10 m, velika 30 - 100 m i veoma velika > 100 m. Nagibni ugao nije stalna veličina i on se kod većine rudnih tela menja, pogotovu kod nepravilnih. Nagibni ugao ležišta ima značaja za korišćenje sile gravitacije za otpremu rude sa otkopa. Kod užih ležišta nagibni ugao treba da iznosi preko 60° , a kod moćnijih ležišta nagibni ugao nema bitnog uticaja u pogledu korišćenja sile gravitacije za dopremu rude sa otkopa.

Fizičko-mehaničke karakteristike rude i okolnih stena

Od fizičko- mehaničkih karakteristika najvažnija su ***čvrstoća i stabilnost stena***. Čvrstoća rudnih stena predstavlja sposobnost masiva da se odupire zarušavanju određeni vremenski period. Obično zavisi od tvrdoće stene. Po stabilnosti tj. sposobnosti održavanja jamskih prostorija na određenom rasponu i na određenoj površini stene se klasifikuju u pet grupa:

- *vrlo nestabilne stene*, koje onemogućuju izradu prostorija bez primene podgrade. To su rastresene i sipke mase na kakve se retko nailazi u rudnim ležištima.
- *nestabilne stene*, koje omogućuju izradu prostorija manjeg raspona, ali se u toku napredovanja mora podgrađivati.
- *stene srednje stabilnosti*, koje dozvoljavaju izradu prostorija i većeg raspona i na većoj površini, ali s podgrađivanjem ukoliko prostorija ostaje duže otvorena.
- *stabilne stene*, koje omogućuju izradu prostorija većeg raspona i veće površine, s podgrađivanjem samo na nekim mestima.
- *vrlo stabilne stene*, koje omogućuju izradu prostorija velikog raspona i velikim površinama koje mogu ostati otvorene i godinama bez podgrade i zarušavanja.

Rudna ležišta se najčešće nalaze u stenskim masama treće i četvrte grupe, tj. u srednjostabilnim i stabilnim stenama.

Takođe su bitni pravci pružanja i padanja pukotina i prslina, slojevne ravni i tektonske ravni, jer od njih zavisi orijentacija prostorija i način bušenja. Fizičko-mehaničke karakteristike imaju velikog značaja za izbor metode otkopavanja, jer od njih zavisi raspon otkopa, način osiguranja, izbor odgovarajuće opreme za bušenje i utovar rude, dimenzije sigurnosnih stubova i sl.

Forma rudnih tela i kontakt sa okolnim stenama

Karakter kontakta između rude i jalovih bokova ima znatnog uticaja na metode otkopavanja. Kontakt može da bude jasno izražen, a može biti i nejasan, može da bude pravilan ili nepravilan, srašćen ili razdvojen u obliku pukotina ispunjenih nekom mekšom masom, npr. glinom. Rudna tela sa jasnim kontaktom i više-manje pravilna rudna tela omogućuju primenu bilo koje metode, ukoliko su ispunjeni ostali uslovi koji odgovaraju za dotičnu metodu otkopavanja. Ako prateće stene sadrže izvestan procenat metala, prednost će imati masovne metode sa zarušavanjem rude i pratećih stena. Kod rudnih tela koja imaju nepravilan oblik i gde kontakt nije jasan, isključuje se primena nekih metoda, kao magazinskih ili podetažnih, ili se stvaraju poteškoće u toku rada i dodatni troškovi na pripremi. Za nepravilna rudna tela mogu se primeniti metode sa zasipavanjem praznih prostora, ili metode sa krovnim zarušavanjem jalovih stena.

Mineraloški i hemijski sastav rude

Po hemijsko-mineraloškom sastavu rude se dele na:

- rude samorodnih metala kao što su ležišta samorodnog zlata,
- sulfidne rude sa sulfidima obojenih i retkih metala (CuFeS_2 , PbS , ZnS , Sb_2S_3 , MoS_2 i dr.),

- oksidne rude, kao što su oksidi, karbonati u sulfati crnih, obojenih i retkih metala (Fe_2O_3 , MnO_2 , PbCO_3 , CuO , SnO_2 , PbSO_4 , CaMoO_4),
- silikame rude sa retkim i rasejanim elementima kao što su: cirkon - ZrSiO_4 , beril - $\text{BeAl}_2\text{SiO}_6$ i dr.

Mineraloško-hemijski sastav je značajan zbog prisustva piritita i pirotina. Rude bakarnog piritita sadržajem od preko 40% sumpora i druge sulfidne rude sa većim sadržajem piritita i pirotina, podležu oksidaciji, samozapaljenju i lepljivosti. Ako se te rude ostave duže u izdroljenom stanju, u dodiru sa vazduhom i vlagom podležu oksidaciji i zagrevanju, a takođe se smanjuje i iskorišćenje metala. Do zagrevanja ovih ruda može doći kod masovnog zarušavanja i ispuštanja rude, jer se kod tog procesa stvaraju velike sile trenja. Takođe do zagrevanja može doći ako stubovi usled velikih pritisaka počnu da se drobe. Neravnomerna raspodela rudnih minerala, sa većim jalovim partijama, ometa normalan tok otkopavanja. Zbog svega navedenog kod ruda koje sadrže veće količine piritita i pirotina manja se prednost daje magazinskim i masovnim metodama sa zarušavanjem, a relativno veća prednost nekoj od metoda sa zasipavanjem. Pored navedenih poteškoća, rude sa većom količinom piritita i pirotina, ako duže stoje izložene vazdušnoj struji i vlazi, oksidiraju, stvaraju poteškoće u procesu flotacije i smanjuju iskorišćenje metala.

Produktivnost metode otkopavanja i kapacitet proizvodnje

Produktivnost metode otkopavanja se najčešće izražava koeficijentom intenziteta proizvodnje, koji predstavlja odnos proizvodnje rude u jednom bloku u toku godine prema jedinici površine otkopavanja. Produktivnost metode otkopavanja, takođe definišemo i kao brzinu (potrebним vremenom) otkopavanja pojedinih otkopnih blokova ili delova ležišta, a kapacitet ležišta zavisi od mogućnosti otkopavanja aktivnih površina koje se istovremeno nalaze u fazi otkopavanja.

Produktivnost metode otkopavanja ima veliki značaj u ekonomici jednog rudnika, obzirom da se većom produktivnošću metode otkopavanja postiže veći kapacitet proizvodnje.

Metode otkopavanja kod kojih se istovremeno može otkopavati cela rudna površina ili rudna površina na više horizonata, mogu imati veliku opštu produktivnost odnosno kapacitet, a pri tome intenzitet same metode koja se primenjuje može biti nizak. Obrnuto, ako se otkopavanje obavlja samo na jednom delu rudne površine, ili na celoj površini, primenjena metoda može da ima veliki intenzitet, a opšta produktivnost ili kapacitet rudnika mogu biti niski. Međutim, kod velikih površina ležišta primenjuju se visokoproduktivne (masovne) metode velikog intenziteta, pa je ujedno i kapacitet rudnika veliki iako se otkopavanje obavlja samo na jednom delu rudne površine.

Primena mehanizacije na otkopavanju, transportu i ostalim fazama tehnološkog procesa rada, znatno povećava intenzitet otkopavanja, pa neke manje produktivne metode mogu mehanizovanim radom povećati intenzivnost. Bolje korišćenje radnog vremena, veći broj radnih dana u godini i trosmenski rad, povećavaju opštu produktivnost.

Obično je u početku eksploatacije kapacitet proizvodnje manji, a sa povećavanjem rudnih rezervi povećava se i kapacitet proizvodnje, pogotovu jer sa dubinom opada sadržaj metala.

Sigurnost na radu

Sam proces nastanka rudnika zasnovan je na proceni rizika. Bezbednost mora biti najvažnija prilikom planiranja rudnika i dalje eksploatacije. Štaviše, loši sigurnosni učinci uvek negativno

utiču na ekonomičnost rada. Ljudski život može biti ugrožen, i, prosto eksploatacija rude se nikada ne sme izvoditi tamo gde se to ne može izvesti na sigurno.

Sigurnost na radu je širok pojam koji se odnosi na upravljanje opasnostima koje nastaju prilikom rudarskih aktivnosti, posebno u podzemnoj eksploataciji. Zbog toga je sprovođenje mera i smanjenje rizika po zdravlje i sigurnost radnika jedan od najbitnijih faktora koji moraju biti ispunjeni. Sigurnost na radu kod svake metode otkopavanja predstavlja glavne uslove, koji moraju da budu ispunjeni. Ne sme da se dozvoli da zbog ekonomičnosti rada metoda postane opasna po život i rad ljudi i da se dovede u pitanje sigurnost rudničkih instalacija.. Kod izbora metode otkopavanja mora postojati sigurnost da primena određene metode neće prouzrokovati požar, „provalu” podzemnih i površinskih voda, zarušavanja nadzemnih i podzemnih zidova rudnika i objekata u rudniku i da neće ugroziti rudarske aktivnosti i rudare.

Za obezbeđenje zdravih uslova pri radu potrebno je da se obezbedi dobro provetravanje, t.j. dovođenje svežeg vazduha i odvođenje štetnih gasova i prašine, dobro osvetljenje pri radu, dobri i sigurni prilazi do radnih mesta, zatim da se radne operacije izvode primenom mehanizacije radi oslobađanja radnika od teškog fizičkog rada, kao i da se preduzimaju ostale higijensko zaštitne mere.

Degradacija životne sredine

Jedna od najznačajnijih posledica eksploatacije ležišta mineralnih sirovina na životnu sredinu je deformacija površine terena u obliku sleganja u slučaju primene određenih metoda otkopavanja u podzemnoj eksploataciji. Degradacija podrazumeva oštećenje zemljišta kojim se smanjuju površine a istovremeno se menja i kvalitet i plodnost zemljišta, koje nastaje usled izvođenja radova u podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, primenom određenih metoda otkopavanja. Time se narušava prirodna celina. Takođe se odnosi na stabilnost terena na površini iznad otkopa, odnosno postavlja se pitanje da li dolazi do deformacija – sleganja terena.

Razblaženje rude

Razblaženje rude predstavlja smanjenje sadržaja korisnih komponenti u masi iskopane rude u odnosu na sadržaj korisnih komponenti u telu rude pre iskopavanja. Rudno telo može biti kontinuirano, ali može u sebi sadržati otpadne stene ili niskokvalitetni materijal koji nema komercijalnu vrednost, ali se mora eksploatisati zajedno sa rudom. Kada se izvlači neekonomičan materijal, pomešan sa rudom, to se naziva razblaženje rude i ima za posledicu smanjenje stepena (ocene) rude koja se vadi za preradu. Vrlo nepravilna geometrija većine ležišta mineralnih sirovina doprinosi komplikovanijem radu rudnika. Što je veći stepen nepravilnosti, to je teže izvući ceo resurs bez razblaženja. Retko je izvodljivo potpuno izbeći razređenje rude otpadom ili niskokvalitetnim materijalom. Često postoji kompromis između ovog aspekta i ekonomije rudarstva.

Osiromašenje rude

Osiromašenje rude prilikom eksploatacije rudnog ležišta predstavlja odnos količine jalovine koja je dospela u rovnu rudu prema ukupnoj količini rovne rude. Definiše se ga i kao smanjenje sadržaja metala u proizvedenoj rovnoj rudi, u odnosu na sadržaj metala u rudnom bloku. Osiromašenje rude zavisi od metode otkopavanja, od organizacije rada i načina izvođenja radova, kao i od zaleganja ležišta i fizičko-mehaničkih svojstava rude i bokova.

Osiromašenje rude do kojeg dolazi usled mešanja jalovine sa proizvedenom rudom, povećava troškove proizvodnje po toni rude. Ovo povećanje troškova dolazi zbog toga što se troši više sredstava (materijala, radne snage, energije i dr.) za dobijanje, transport i preradu jalovine u flotaciji, koja često smanjuje iskorišćenje metala u procesu prerade.

Metode sa zarušavanjem otkopanih prostora i magazinske metode karakteristične su po većem osiromašenju. Isto tako i metode sa zasipavanjem praznih prostora kod kojih se utovar rude vrši mehaničkim sredstvima neposredno sa zasipa (skreperima ili utovarnim lopatama), imaju veće osiromašenje. Metode sa zasipavanjem praznih prostora i metode otvorenih otkopa, u odnosu na ostale metode, po pravilu imaju manje osiromašenje.

Kod metoda otkopavanja kod kojih se ostavljaju sigurnosni stubovi, prilikom sekundarnog otkopavanja, neminovno dolazi do osiromašenja rude, jer u rudu dolazi bočna jalovina ili jalovina iz krova. U ležištima sa slabim bokovima, nejasnim kontaktom između rude i jalovine, nepravilnim konturama i sl., primenom bilo koje metode dolazi do većeg osiromašenja.

Moćnost ležišta takođe utiče na stepen osiromašenja i ukoliko je ležište uže, utoliko je osiromašenje veće. Može se reći da je moćnost u obrnutoj proporciji sa osiromašenjem. Osiromašenje se kreće u granicama od 0-30%, a ponekad i više.

Ventilacija

Ventilacija je jedan od najbitnijih faktora zbog obezbeđenja zdravih uslova pri radu. Potrebno je obezbediti dobro provetravanje, tj. dovođenje svežeg vazduha u dovoljnim količinama za normalan rad i odvođenje rudničkog vazduha tj. štetnih gasova i prašine. Ventilacija je primarna metoda čišćenja opasnih gasova i prašine koji nastaju usled radova pri podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, kao što su bušenje i miniranje, od dizel opreme (ugljen monoksid) ili gasova koji potiču od stena (npr. gas radona). Takođe, ventilacija se koristi za upravljanje temperature u podzemnim prostorijama za radnike. U dubokim, toplim rudnicima koristi se za hlađenje radnog mesta, međutim na veoma hladnim mestima vazduh se zagreva malo iznad smrzavanja pre nego što uđe u rudnik.

Hidrološki uslovi

Od hidroloških prilika treba poznavati količine i svojstva podzemne vode, a naročito njen uticaj na stene sa "plastičnim svojstvima" kao što su gline i. Prisustvo vodonosnih stena i stajaćih vode maksimalno umanjuju primenu metoda sa zarušavanjem. U takvim okolnostima potrebno je proučiti hidrološko-geološke karakteristike terena, postojanje većih poremećaja i sl. Radi obezbeđenja površine od zarušavanja i prodora vode u jamu, potrebno je primeniti metode sa hidraulično-cementnim zasipavanjem praznih prostora, ili metode sa ostavljanjem stalnih sigurnosnih stubova. Te se metode moraju primeniti i onda kada se iznad ležišta nalaze važni objekti. Ukoliko se na površini iznad ležišta nalaze važni objekti, kao železnička pruga, glavni put, akvadukti i sl., isključuje se primena metoda sa zarušavanjem. Ponekad je ekonomičnije izvršiti premeštanje tih objekata, devijaciju železnice ili puta, i primeniti neku visoko produktivnu metodu nego metodu sa zasipavanjem, koju bi u tom slučaju morali primeniti.

Troškovi rudarstva

Investicioni troškovi se definišu kao iznos investicije potreban pre nego što rudnik počne da donosi prihod. Ovde spadaju istraživanja, priprema, otvaranje...

- Troškovi izrada prostorija otvaranja (ventilacioni hodnici, rudna okna, odvodni hodnici, transportni hodnici, vodosabirnik, pumpna komora, istovarne stanice...),
- Postrojenje za spravljanje i distribuciju pasta zasipa,
- Oprema za otkopavanje (mašine za bušenje minskih bušotina, mašine za punjenje eksplozivne smeše, jamski dizel kamioni, ventilator za separatno provetravanje,

- vozilo za dopremu eksploziva, vozilo za dopremu materijala, vozilo za prevoz ljudi...),
- Oprema na drobljenju i transportu (čeljusna drobilica, trakasti transporter),
- Oprema za provetravanje (ventilator),
- Oprema za odvodnjavanje.

Troškovi otkopavanja

- Troškovi materijala za izradu pripremnih prostorija u koje spadaju:
- Troškovi Potrošnih materijala i energija za otkopavanje. Kod metoda gde se izvode bušački i minerski radovi potrošnja je veća. U ove troškove se uključuje glavni potrošni materijal, kao što s: eksplozivna ANFO smeša, nonel detonatori, nonel cevčice, nonel konektori, krune za bušenje, bušaće šipke, dizel gorivo, ulje i mazivo, gume za utovarnu opremu, gume za transportnu opremu, čelik, čelična užad, limovi, mazivo, nafta, cement i električna energija. Normativ električne energije prikazuje potrošnju električne energije po toni rude i po odeljenjima rudnika,
- Troškovi spravljanja i distribucije pasta zasipa u jami (cement, voda, električna energija),
- Troškovi na drobljenju, transportu trakastim transporterima i izvozu rude (ulje i maziva, električna energija, tehnološka voda),
- Troškovi radne snage na eksploataciji rude (na opštim poslovima, izradi jamskih prostorija u ležištu, otkopavanju rude, eksploataciji rude, prilikom transporta i izvoza drobljene rude, prilikom ventilacije, odvodnjavanja, jamskog mašinskog održavanja...). Radna snaga u podzemnoj eksploataciji čini jedan od značajnijih troškova proizvodnje, zbog čega je potrebno da se pri izboru tehnološkog procesa rada nastoji da se proizvodni procesi što više mehanizuju i da mehanizacija bude u što većoj meri iskorišćena. Odnosno potrebno je da se sprovede efikasna organizacija rada. Na sniženje troškova proizvodnje utiče i stepen osiromašenja rude, jer se, kod većeg osiromašenja na višak jalovine, koja se dobija prilikom eksploatacije, bez potrebe angažuje brojnija radna snaga i troši više energije i materijala.
- Troškovi glavnog provetravanja, odvodnjavanja i servisiranja.

Sa niskim troškovima proizvodnje postiže se veći ekonomski efekat rudnika. Niži troškovi proizvodnje (otkopavanja) se ostvaruju ukoliko se po jedinici proizvoda (toni otkopane rude) utroši manje materijala i radne snage.

Troškovi održavanja uključuju troškove održavanja mašina, opreme, postojećih objekata i postrojenja, instalacija, amortizacije rudnika, troškovi održavanja rudnog blaga, troškovi upravne režije...

Razmatranjem svih predhodnih činjenica i s obzirom da ležište bakra „Borska reka“ pripada grupi rudnih tela sa relativno povišenim sadržajem bakra, kao i zbog dubine zaleganja na kojoj se nalazi i postojanja objekata na površini terena iznad rudnog tela, u radu je opravdano navedeno 5 primenljivih vrsta metoda, kao mogućih za otkopavanje jednog ovakvog ležišta. Za eksploataciju ležišta "Borska Reka" razmatrane su visoko kapacitativne i visoko produktivne metode otkopavanja, koje bi omogućile ekonomski isplativo otkopavanje rude sa malim sadržajem metala.

2.2. Ocenjivanje kriterijuma, podkriterijuma i alternativa kao i vektora težinskih prioriteta

Prema koracima *b)* i *c)* pristupa se ocenjivanju kriterijuma, podkriterijuma i alternativa definisanih na primeru za ležište bakra „Borska reka“, takođe se određuju njihove težine u vidu fuzzy broja

(Bajić et al. 2020). Ocenjivanje je vršeno redom za kriterijume prema jednačini 1, za podkriterijume prema jednačini 2 i za alternativna rešenja prema jednačini 3. Ocenjivanja su vršena tako što se porede parovi elemenata (kriterijumi, podkriterijumi, alternative) korišćenjem lingvističkih varijabli i njenih numeričkih vrednosti prema FAHP skalama vrednovanja (tabele 2 i 3). Elementi su međusobno definisani kao: „istog značaja“, „umereno važniji“, „strogo važniji“, „vrlo strogo važniji“, „dokazano važniji“ i „ekstremno važniji“. U tabeli 5, na osnovu poređenja, prikazane su ocene u vidu fuzzy broja za kriterijume i određena je njihova važnost. S druge strane, korišćenjem jednačina 4-7, izračunate su i težine pomoću tzv. fazi stepene analize.

Tabela 5. Ocenjivanje kriterijuma proračun težina

	Tehnički kriterijum (T)			Proizvodni kriterijum (P)			Ekonomski kriterijum (E)			Težine		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
T	1	1	1	0.33	0.5	1	1	2	3	0.155	0.333	0.715
P	1	2	3	1	1	1	1	2	3	0.2	0.476	1.001
E	0.33	0.5	1	0.33	0.5	1	1	1	1	0.111	0.190	0.429

Analizirajući uticaj na odluku vezanu za izbor odgovarajuće metode podzemnog otkopavanja ležišta, prilikom ocenjivanja manja prednost je data kriterijumima iz grupe ekonomskih kriterijuma, dok tehnički i proizvodni kriterijumi imaju veći značaj.

Nakon toga, izvršeno je ocenjivanje podkriterijuma. S obzirom da je svaki kriterijum raščlanjen na veći broj podkriterijuma (tabela 4), u ovoj fazi je određen relativni značaj svih podkriterijuma koji pripadaju odgovarajućoj grupi u zavisnosti od svakog kriterijuma. U tabelama 6 i 7 date su međusobne ocene vezane za podkriterijume, a prikazane su i proračunate relativne težine podkriterijuma koji pripadaju grupi tehničkih pokazatelja.

Tabela 6. Ocenjivanje tehničkih podkriterijuma

	T ₁			T ₂			T ₃			T ₄		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
T ₁	1	1	1	3	4	5	7	8	9	1	3	5
T ₂	0.2	0.25	0.33	1	1	1	7	9	9	1	2	3
T ₃	0.11	0.125	0.14	0.11	0.11	0.14	1	1	1	1	2	3
T ₄	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1	0.33	0.5	1	1	1	1
T ₅	0.2	0.25	0.33	0.14	0.2	0.33	3	5	7	0.14	0.166	0.2
T ₆	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1	7	8	9	0.11	0.14	0.2
T ₇	0.11	0.14	0.2	0.11	0.14	0.2	7	8	9	0.11	0.14	0.2
T ₈	0.14	0.2	0.33	0.33	0.5	1	3	5	7	0.2	0.33	1
	T ₅			T ₆			T ₇			T ₈		
T ₁	3	4	5	1	2	3	5	7	9	3	5	7
T ₂	3	5	7	1	3	5	5	7	9	1	2	3
T ₃	0.14	0.2	0.33	0.11	0.125	0.14	0.11	0.125	0.14	0.14	0.2	0.33
T ₄	5	6	7	5	7	9	5	7	9	1	3	5
T ₅	1	1	1	0.14	0.2	0.33	1	3	5	0.14	0.2	0.33
T ₆	3	5	7	1	1	1	7	9	9	1	2	3
T ₇	0.2	0.33	1	0.11	0.11	0.14	1	1	1	0.2	0.25	0.33
T ₈	3	5	7	0.33	0.5	1	3	4	5	1	1	1

Tabela 7. Vrednosti proračunatih vektora težina tehničkih podkriterijuma

	Težine		
	fazi broj		
T ₁	0.119	0.219	0.403
T ₂	0.095	0.188	0.342
T ₃	0.013	0.025	0.048
T ₄	0.088	0.163	0.312
T ₅	0.028	0.064	0.133
T ₆	0.097	0.167	0.286
T ₇	0.044	0.065	0.111
T ₈	0.054	0.106	0.214

Elementi T₁ – T₈ iz tabele predstavljaju:

- T₁ – dubina ležišta,
- T₂ – moćnost ležišta,
- T₃ – oblik ležišta,
- T₄ – vrednost rude,
- T₅ – nagibni ugao,
- T₆ – čvrstoća i stabilnost stena,
- T₇ – forma rudnih tela i kontakt sa okolnim stenama i
- T₈ – mineraloški i hemijski sastav rude.

Među podkriterijuma koji se odnose na tehničke pokazatelje, značajnije su se izdvojili podkriterijum T₁ – dubina ležišta i T₂ – moćnost ležišta, kojima je data manja prednost u odnosu na ostale podkriterijume na osnovu FAHP skale.

U tabeli 8 prikazano je međusobno ocenjivanje podkriterijuma koji pripadaju grupi proizvodnih pokazatelja, kao i rezultati relativnih težina svakog podkriterijuma u vidu fuzzy broja.

Tabela 8. Ocenjivanje proizvodnih podkriterijuma i vrednosti proračunatih vektora težina podkriterijuma

	P ₁			P ₂			P ₃			P ₄		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
P ₁	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1
P ₂	3	4	5	1	1	1	3	4	5	3	5	7
P ₃	1	3	5	0.2	0.25	0.33	1	1	1	1	3	5
P ₄	1	2	3	0.14	0.2	0.33	0.2	0.33	1	1	1	1
P ₅	0.2	0.33	1	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1	1	3	5
P ₆	1	2	3	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1	3	4	5
P ₇	0.2	0.25	0.33	0.2	0.25	0.33	0.33	0.5	1	0.33	0.5	1
	P ₅			P ₆			P ₇			Težine		
P ₁	1	3	5	0.33	0.5	1	3	4	5	0.052	0.112	0.318
P ₂	1	3	5	1	2	3	3	4	5	0.128	0.300	0.688
P ₃	1	2	3	1	3	5	1	2	3	0.053	0.186	0.495
P ₄	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33	1	2	3	0.032	0.079	0.214
P ₅	1	1	1	0.2	0.33	1	1	2	3	0.033	0.097	0.288
P ₆	1	3	5	1	1	1	1	3	5	0.064	0.180	0.466
P ₇	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1	1	1	1	0.022	0.043	0.125

Elementi $P_1 - P_7$ iz tabele predstavljaju:

- P_1 – produktivnost metode otkopavanja i kapacitet proizvodnje,
- P_2 – sigurnost na radu,
- P_3 – degradacija životne sredine,
- P_4 – razblaženje rude,
- P_5 – osiromašenje rude,
- P_6 – ventilacija i
- P_7 – hidrološki uslovi

Od podkriterijuma koji se odnose na proizvodne pokazatelje, manja prednost u odnosu na ostale podkriterijume na osnovu FAHP skale je data sledećim: podkriterijum P_2 – sigurnost na radu, P_3 – degradacija životne sredine, kao i P_6 – ventilacija.

U tabeli 9 prikazano je međusobno ocenjivanje podkriterijuma koji pripadaju grupi ekonomskih pokazatelja. Uporedo, date su i vrednosti proračunatih relativnih težina u vidu trougaonog fuzzy broja.

Tabela 9. Ocenjivanje ekonomskih podkriterijuma

	E ₁			E ₂			E ₃			Težine		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
E ₁	1	1	1	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1	0.080	0.150	0.446
E ₂	1	2	3	1	1	1	1	3	5	0.158	0.493	1.337
E ₃	1	3	5	0.2	0.33	1	1	1	1	0.116	0.356	1.040

Elementi $E_1 - E_3$ iz tabele predstavljaju troškove u rudarstvu:

- E_1 – investicioni troškovi,
- E_2 – troškovi otkopavanja i
- E_3 – troškovi održavanja

Kod podkriterijuma koji obuhvataju ekonomske pokazatelje malo veću važnost pokazuje podkriterijum E_2 – troškovi otkopavanja. Ovih podkriterijuma ima najmanje ako se uporede sa brojem podkriterijuma izgrupe tehničkih i proizvodnih pokazatelja.

U sledećoj fazi, izvršeno je ocenjivanje alternativa, tako što se porede parovi od pet alternativa u odnosu na svaki podkriterijum. Na taj način dobijeno je ukupno 18 poređenja, čiji su rezultati prikazani u tabelama 10, 19 i 27. Takođe su date i vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za svaki podkriterijum (tabele 11-18, 20-26 i 28-30). Određivanje težina izvršeno takođe pomoću fazi stepene analize (Chang, 1996), primenom jednačina 4-7.

Tabela 10. Ocenjivanje alternativa za tehničke podkriterijume

T ₁	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
A ₁	1	1	1	0.2	0.33	1	0.2	0.33	1	1	2	3	0.2	0.33	1
A ₂	1	3	5	1	1	1	1	2	3	7	9	9	3	4	5
A ₃	1	3	5	0.33	0.5	1	1	1	1	5	6	7	1	3	5
A ₄	0.33	0.5	1	0.11	0.11	0.14	0.14	0.166	0.2	1	1	1	0.14	0.2	0.33
A ₅	1	3	5	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	3	5	7	1	1	1
T ₂	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	7	9	9	3	4	5	1	3	5	1	2	3
A ₂	0.11	0.11	0.14	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33
A ₃	0.2	0.25	0.33	3	4	5	1	1	1	1	3	5	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.2	0.33	1	1	3	5	0.2	0.33	1	1	1	1	0.2	0.33	1
A ₅	0.33	0.5	1	3	4	5	3	4	5	1	3	5	1	1	1
T ₃	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	1	3	5	3	4	5	7	9	9	3	4	5
A ₂	0.2	0.33	1	1	1	1	1	3	5	3	5	7	1	3	5
A ₃	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	1	1	1	1	3	5	0.33	0.5	1
A ₄	0.11	0.11	0.14	0.14	0.2	0.33	0.2	0.33	1	1	1	1	0.2	0.25	0.33
A ₅	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	1	2	3	3	4	5	1	1	1
T ₄	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	3	5	7	1	3	5	3	4	5	0.33	0.5	1
A ₂	0.14	0.2	0.33	1	1	1	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1	0.11	0.11	0.14
A ₃	0.2	0.33	1	1	3	5	1	1	1	1	3	5	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.2	0.25	0.33	1	2	3	0.2	0.33	1	1	1	1	0.14	0.2	0.33
A ₅	1	2	3	7	9	9	3	4	5	3	5	7	1	1	1
T ₅	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	1	3	5	7	9	9	5	6	7	1	2	3
A ₂	0.2	0.33	1	1	1	1	3	4	5	1	3	5	1	3	5
A ₃	0.11	0.11	0.14	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.14	0.166	0.2	0.2	0.33	1	1	3	5	1	1	1	0.2	0.25	0.33
A ₅	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1	3	4	5	3	4	5	1	1	1
T ₆	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.2	0.33	1	1	3	5	3	4	5	0.2	0.33	1
A ₂	1	3	5	1	1	1	3	5	7	7	9	9	1	2	3
A ₃	0.2	0.33	1	0.14	0.2	0.33	1	1	1	1	3	5	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.2	0.25	0.33	0.11	0.11	0.14	0.2	0.33	1	1	1	1	0.2	0.25	0.33
A ₅	1	3	5	0.33	0.5	1	3	4	5	3	4	5	1	1	1
T ₇	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	0.11	0.11	0.14	0.33	0.5	1
A ₂	3	4	5	1	1	1	1	2	3	0.33	0.5	1	3	4	5
A ₃	1	3	5	0.33	0.5	1	1	1	1	0.2	0.33	1	1	3	5
A ₄	7	9	9	1	2	3	1	3	5	1	1	1	3	5	7
A ₅	1	2	3	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1	0.14	0.2	0.33	1	1	1
T ₈	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.14	0.166	0.2	1	3	5	0.2	0.25	0.33	0.2	0.33	1
A ₂	5	6	7	1	1	1	7	9	9	1	2	3	1	3	5
A ₃	0.2	0.33	1	0.11	0.11	0.14	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.2	0.25	0.33
A ₄	3	4	5	0.33	0.5	1	3	4	5	1	1	1	1	3	5
A ₅	1	3	5	0.2	0.33	1	3	4	5	0.2	0.33	1	1	1	1

Tabela 11. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_1

T ₁	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.039	0.083	0.225
A ₂	0.197	0.395	0.740
A ₃	0.126	0.281	0.612
A ₄	0.026	0.041	0.086
A ₅	0.082	0.199	0.461

Tabela 12. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_2

T ₂	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.205	0.405	0.741
A ₂	0.027	0.041	0.090
A ₃	0.085	0.181	0.375
A ₄	0.041	0.106	0.290
A ₅	0.131	0.266	0.547

Tabela 13. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_3

T ₃	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.229	0.438	0.807
A ₂	0.094	0.257	0.613
A ₃	0.042	0.106	0.268
A ₄	0.025	0.039	0.090
A ₅	0.082	0.158	0.333

Tabela 14. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_4

T ₄	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.127	0.281	0.612
A ₂	0.027	0.044	0.111
A ₃	0.052	0.158	0.397
A ₄	0.039	0.078	0.182
A ₅	0.229	0.437	0.805

Tabela 15. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_5

T ₅	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.229	0.430	0.758
A ₂	0.095	0.232	0.515
A ₃	0.026	0.039	0.085
A ₄	0.039	0.097	0.228
A ₅	0.115	0.201	0.394

Tabela 16. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_6

T_6	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.082	0.181	0.419
A ₂	0.198	0.417	0.807
A ₃	0.039	0.099	0.247
A ₄	0.026	0.040	0.090
A ₅	0.127	0.261	0.548

Tabela 17. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_7

T_7	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.029	0.048	0.118
A ₂	0.134	0.254	0.513
A ₃	0.057	0.173	0.444
A ₄	0.209	0.441	0.855
A ₅	0.041	0.083	0.193

Tabela 18. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za T_8

T_8	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.039	0.097	0.228
A ₂	0.229	0.430	0.758
A ₃	0.026	0.039	0.085
A ₄	0.127	0.256	0.515
A ₅	0.082	0.177	0.394

Tabela 19. Ocenjivanje alternativa za proizvodne podkriterijume

P_1	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
A ₁	1	1	1	3	4	5	1	3	5	3	4	5	0.33	0.5	1
A ₂	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.33	0.5	1	0.11	0.11	0.14
A ₃	0.2	0.33	1	3	4	5	1	1	1	1	3	5	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.2	0.25	0.33	1	2	3	0.2	0.33	1	1	1	1	0.14	0.2	0.33
A ₅	1	2	3	7	9	9	3	4	5	3	5	7	1	1	1
P_2	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	1	3	5	3	5	7	5	6	7	0.2	0.33	1
A ₂	0.2	0.33	1	1	1	1	1	3	5	3	4	5	0.2	0.25	0.33
A ₃	0.14	0.2	0.33	0.2	0.33	1	1	1	1	1	2	3	0.14	0.166	0.2
A ₄	0.14	0.166	0.2	0.2	0.25	0.33	0.33	0.5	1	1	1	1	0.1	0.11	0.14
A ₅	1	3	5	3	4	5	5	6	7	7	9	9	1	1	1
P_3	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.11	0.11	0.14	0.2	0.25	0.33	0.14	0.2	0.33	0.33	0.5	1
A ₂	7	9	9	1	1	1	3	4	5	1	2	3	5	6	7
A ₃	3	4	5	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.33	0.5	1	1	2	3
A ₄	3	5	7	0.33	0.5	1	1	2	3	1	1	1	3	4	5
A ₅	1	2	3	0.14	0.166	0.2	0.33	0.5	1	0.2	0.25	0.33	1	1	1
P_4	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.14	0.166	0.2	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1
A ₂	5	6	7	1	1	1	3	4	5	7	9	9	1	3	5
A ₃	1	3	5	0.2	0.25	0.33	1	1	1	3	4	5	0.2	0.33	1
A ₄	1	2	3	0.11	0.11	0.14	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.14	0.2	0.33
A ₅	1	3	5	0.2	0.33	1	1	3	5	3	5	7	1	1	1
P_5	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		

A ₁	1	1	1	0.11	0.11	0.14	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33	0.14	0.2	0.33
A ₂	7	9	9	1	1	1	5	6	7	1	3	5	1	2	3
A ₃	1	3	5	0.14	0.166	0.2	1	1	1	0.33	0.5	1	0.2	0.33	1
A ₄	3	4	5	0.2	0.33	1	1	2	3	1	1	1	0.2	0.33	1
A ₅	3	5	7	0.33	0.5	1	1	3	5	1	3	5	1	1	1
P₆	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.11	0.11	0.14	0.14	0.2	0.33	0.33	0.5	1
A ₂	3	4	5	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.2	0.25	0.33	1	2	3
A ₃	7	9	9	3	4	5	1	1	1	1	3	5	5	6	7
A ₄	3	5	7	3	4	5	0.2	0.33	1	1	1	1	3	4	5
A ₅	1	2	3	0.33	0.5	1	0.14	0.166	0.2	0.2	0.25	0.33	1	1	1
P₇	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	0.11	0.11	0.14	0.2	0.25	0.33	0.14	0.166	0.2	0.2	0.33	1
A ₂	7	9	9	1	1	1	3	4	5	1	3	5	5	6	7
A ₃	3	4	5	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.2	0.33	1	1	3	5
A ₄	5	6	7	0.2	0.33	1	1	3	5	1	1	1	3	4	5
A ₅	1	3	5	0.14	0.166	0.2	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33	1	1	1

Tabela 20. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₁

P ₁	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.132	0.260	0.513
A ₂	0.029	0.044	0.084
A ₃	0.086	0.179	0.372
A ₄	0.040	0.078	0.171
A ₅	0.239	0.438	0.755

Tabela 21. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₂

P ₂	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.149	0.291	0.569
A ₂	0.078	0.163	0.334
A ₃	0.036	0.070	0.150
A ₄	0.026	0.038	0.072
A ₅	0.248	0.437	0.732

Tabela 22. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₃

P ₃	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.029	0.042	0.079
A ₂	0.280	0.456	0.708
A ₃	0.091	0.160	0.292
A ₄	0.137	0.259	0.481
A ₅	0.044	0.081	0.156

Tabela 23. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₄

P ₄	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.028	0.046	0.127
A ₂	0.252	0.462	0.820
A ₃	0.080	0.172	0.374
A ₄	0.036	0.071	0.146
A ₅	0.092	0.247	0.577

Tabela 24. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₅

P ₅	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.025	0.039	0.090
A ₂	0.227	0.437	0.805
A ₃	0.040	0.104	0.264
A ₄	0.082	0.159	0.354
A ₅	0.096	0.260	0.612

Tabela 25. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₆

P ₆	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.028	0.040	0.075
A ₂	0.084	0.147	0.260
A ₃	0.265	0.452	0.728
A ₄	0.159	0.282	0.513
A ₅	0.042	0.077	0.149

Tabela 26. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za P₇

P ₇	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.024	0.035	0.072
A ₂	0.248	0.438	0.734
A ₃	0.079	0.163	0.335
A ₄	0.149	0.273	0.516
A ₅	0.037	0.090	0.204

Tabela 27. Ocenjivanje alternativa za ekonomske podkriterijume

E ₁	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
	fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj			fazi broj		
A ₁	1	1	1	1	2	3	0.2	0.33	1	0.14	0.166	0.2	0.2	0.33	1
A ₂	0.33	0.5	1	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.11	0.11	0.14	0.2	0.25	0.33
A ₃	1	3	5	3	4	5	1	1	1	0.2	0.33	1	1	3	5
A ₄	5	6	7	7	9	9	1	3	5	1	1	1	3	4	5
A ₅	1	3	5	3	4	5	0.2	0.33	1	0.2	0.25	0.33	1	1	1
E ₂	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	3	4	5	1	3	5	1	3	5	0.2	0.33	1

A ₂	0.2	0.25	0.33	1	1	1	0.2	0.25	0.33	1	2	3	0.11	0.11	0.14
A ₃	0.2	0.33	1	3	4	5	1	1	1	1	2	3	0.2	0.25	0.33
A ₄	0.2	0.33	1	0.33	0.5	1	0.33	0.5	1	1	1	1	0.14	0.166	0.2
A ₅	1	3	5	7	9	9	3	4	5	5	6	7	1	1	1
E₃	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			A ₅		
A ₁	1	1	1	7	9	9	3	4	5	5	6	7	1	2	3
A ₂	0.11	0.11	0.14	1	1	1	0.2	0.25	0.33	0.33	0.5	1	0.14	0.2	0.33
A ₃	0.2	0.25	0.33	3	4	5	1	1	1	1	3	5	0.2	0.33	1
A ₄	0.14	0.166	0.2	1	2	3	0.2	0.33	1	1	1	1	0.2	0.25	0.33
A ₅	0.33	0.5	1	3	5	7	1	3	5	3	4	5	1	1	1

Tabela 28. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za E₁

E ₁	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.039	0.078	0.188
A ₂	0.028	0.043	0.085
A ₃	0.095	0.232	0.515
A ₄	0.260	0.471	0.818
A ₅	0.082	0.175	0.374

Tabela 29. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za E₂

E ₂	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.098	0.236	0.513
A ₂	0.039	0.075	0.145
A ₃	0.085	0.158	0.312
A ₄	0.031	0.052	0.127
A ₅	0.268	0.479	0.815

Tabela 30. Vrednosti proračunatih vektora težina alternativa za E₃

E ₃	Težine		
	fazi broj		
A ₁	0.263	0.441	0.713
A ₂	0.027	0.041	0.080
A ₃	0.083	0.172	0.352
A ₄	0.039	0.075	0.157
A ₅	0.129	0.270	0.542

2.3 Postupak primene agregacije

Dalje, prema koraku *d*), u tabeli 31 su prikazani rezultati proračunatih konačnih vrednosti težina podkriterijuma, primenom principa agregacije, shodno jednačini 8. U ovom koraku izvršena je operacija množenja trougaonih fazi brojeva, a vrši se tako što se množe težine kriterijuma sa težinama svojih podkriterijuma, sračunatih u predhodnom koraku (*c*). Na ovaj način, nestaje jedan nivo u hijerarhiji „kriterijumi-podkriterijumi-alternative“.

Tabela 31. Konačne vrednosti težina podkriterijuma

Podkriterijum	Težina	Fazi broj		
T ₁	W ₁	0.018	0.073	0.288
T ₂	W ₂	0.015	0.063	0.245
T ₃	W ₃	0.002	0.008	0.034
T ₄	W ₄	0.013	0.054	0.223
T ₅	W ₅	0.004	0.021	0.095
T ₆	W ₆	0.015	0.056	0.204
T ₇	W ₇	0.007	0.021	0.079
T ₈	W ₈	0.008	0.035	0.153
P ₁	W ₉	0.010	0.053	0.318
P ₂	W ₁₀	0.025	0.143	0.689
P ₃	W ₁₁	0.010	0.088	0.496
P ₄	W ₁₂	0.006	0.038	0.214
P ₅	W ₁₃	0.006	0.046	0.289
P ₆	W ₁₄	0.013	0.086	0.467
P ₇	W ₁₅	0.004	0.020	0.126
E ₁	W ₁₆	0.009	0.028	0.191
E ₂	W ₁₇	0.017	0.094	0.574
E ₃	W ₁₈	0.013	0.068	0.446

2.4. Proračun fazi matrice odluke i fazi matrice performansi

Prema jednačinama opisanih u koraku *e*), postupkom fazi stepene analize za svih 5 alternativa proračunata je fazi matrica odluke (jednačina 9), a zatim je proračunata i fazi matrica performansi (jednačina 10), koja predstavlja ukupni učinak svake alternative kroz sve podkriterijume. Nastaje kao rezultat množenja svih težina podkriterijuma sa elementima matrice odluke (tabela 32).

Tabela 32. Proračunate vrednosti elemenata matrice performansi

Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj			
W ₁	A ₁	0.000728	0.006069	0.065084	W ₁₀	A ₁	0.003817	0.041651	0.392601	
	A ₂	0.003641	0.028898	0.213848		A ₂	0.002021	0.023312	0.230513	
	A ₃	0.002333	0.020533	0.176657		A ₃	0.000928	0.010042	0.103385	
	A ₄	0.000482	0.003005	0.024825		A ₄	0.000666	0.005505	0.049916	
	A ₅	0.001512	0.014571	0.133237		A ₅	0.006362	0.062491	0.504773	
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj			
	A ₁	0.003029	0.025452	0.181489		W ₁₁	A ₁	0.000311	0.003785	0.039362
	A ₂	0.000398	0.002599	0.022094			A ₂	0.002971	0.040417	0.351445
	A ₃	0.001258	0.011386	0.092007			A ₃	0.000966	0.014238	0.145217
	A ₄	0.000606	0.006684	0.071018			A ₄	0.001456	0.022964	0.238982
A ₅	0.001941	0.016745	0.134144	A ₅	0.000467		0.007194	0.07774		
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj			
	A ₁	0.00048	0.003662	0.027639		W ₁₂	A ₁	0.000178	0.001774	0.027396
	A ₂	0.000198	0.00215	0.021005			A ₂	0.001614	0.017546	0.176119
	A ₃	8.74E-05	0.000886	0.009209			A ₃	0.000513	0.006545	0.080428
	A ₄	5.28E-05	0.00033	0.003096			A ₄	0.000233	0.002716	0.03131
A ₅	0.000173	0.001322	0.01142	A ₅	0.000589		0.009406	0.123936		
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj			
	A ₁	0.001751	0.015312	0.136508		W ₁₃	A ₁	0.000168	0.001832	0.026059
	A ₂	0.000374	0.002427	0.024931			A ₂	0.001527	0.020354	0.232674
	A ₃	0.000715	0.008597	0.088586			A ₃	0.000272	0.004842	0.076317
	A ₄	0.000534	0.004287	0.040665			A ₄	0.00055	0.007424	0.102377
A ₅	0.003152	0.023818	0.179616	A ₅	0.000644		0.012116	0.176832		
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj			

W ₅	A ₁	0.001019	0.009255	0.072218	W ₁₄	A ₁	0.000358	0.003486	0.035279
	A ₂	0.000421	0.004993	0.049108		A ₂	0.001086	0.012693	0.121712
	A ₃	0.000116	0.000855	0.008088		A ₃	0.00342	0.038926	0.34019
	A ₄	0.000172	0.002092	0.021752		A ₄	0.002052	0.024253	0.239393
	A ₅	0.000511	0.004332	0.037553		A ₅	0.000537	0.006628	0.069676
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj		
W ₆	A ₁	0.001248	0.010096	0.085902	W ₁₅	A ₁	0.000107	0.000732	0.009131
	A ₂	0.003004	0.023315	0.165196		A ₂	0.001098	0.009068	0.092337
	A ₃	0.000587	0.005572	0.050616		A ₃	0.000349	0.003383	0.042167
	A ₄	0.000395	0.002262	0.018502		A ₄	0.000659	0.00565	0.064978
	A ₅	0.001925	0.014572	0.112333		A ₅	0.000164	0.001871	0.025752
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj		
W ₇	A ₁	0.000202	0.00105	0.009398	W ₁₆	A ₁	0.000346	0.002245	0.035966
	A ₂	0.000913	0.005516	0.040626		A ₂	0.000251	0.001238	0.016243
	A ₃	0.000387	0.003756	0.03521		A ₃	0.000846	0.006649	0.098616
	A ₄	0.001425	0.009593	0.067711		A ₄	0.002319	0.013498	0.156626
	A ₅	0.000278	0.001813	0.01533		A ₅	0.000737	0.005035	0.071526
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj		
W ₈	A ₁	0.000329	0.003452	0.03495	W ₁₇	A ₁	0.001711	0.022177	0.294687
	A ₂	0.001945	0.015274	0.116035		A ₂	0.000693	0.007066	0.083206
	A ₃	0.000222	0.001411	0.012996		A ₃	0.00149	0.014837	0.179066
	A ₄	0.00108	0.009092	0.078904		A ₄	0.000552	0.004886	0.072805
	A ₅	0.0007	0.006299	0.060338		A ₅	0.004691	0.045019	0.468033
Težine	Alt.	Fazi broj			Težine	Alt.	Fazi broj		
W ₉	A ₁	0.001375	0.013901	0.163554	W ₁₈	A ₁	0.003369	0.029912	0.318404
	A ₂	0.000304	0.002346	0.026938		A ₂	0.000353	0.002801	0.035661
	A ₃	0.000891	0.009541	0.118625		A ₃	0.00107	0.011666	0.157037
	A ₄	0.000419	0.004204	0.054454		A ₄	0.000503	0.005093	0.070431
	A ₅	0.002475	0.023353	0.240521		A ₅	0.001651	0.018355	0.241987

2.5. Proračun konačnih vrednosti ocena alternativa, defazifikacija i izbor optimalne metode

Shodno krajnjim koracima *f*) i *g*), u tabelama 33 i 34 su prikazane proračunate konačne vrednosti svih pet alternativa u vidu trougaonog fazi broja, dobijene operacijom sabiranja fuzzy brojeva, odnosno elementa fazi matrica performansi, prema jednačini 11. Zatim date su konačne vrednosti težina alternativa u vidu ne fazi broja, dobijene defazifikacijom prema jednačini 12. Nakon toga, urađena je i analiza osetljivosti preko jednačine 13 i izvršeno je konačno rangiranje alternativa. Defazifikacijom su dobijene težine alternativa u vidu „normalnog“, odnosno realnog broja. Najbolja ocena je predstavljena najvišom vrednošću težine alternative. Iz priloženih rezultata optimalnu varijantu metode podzemnog otkopavanja čini alternativa broj 5, na drugom mestu se nalazi alternativa broj 2, zatim alternativa broj 1, sledeća je alternativa broj 3 i kao najnepovoljnije rešenje je alternativa broj 4.

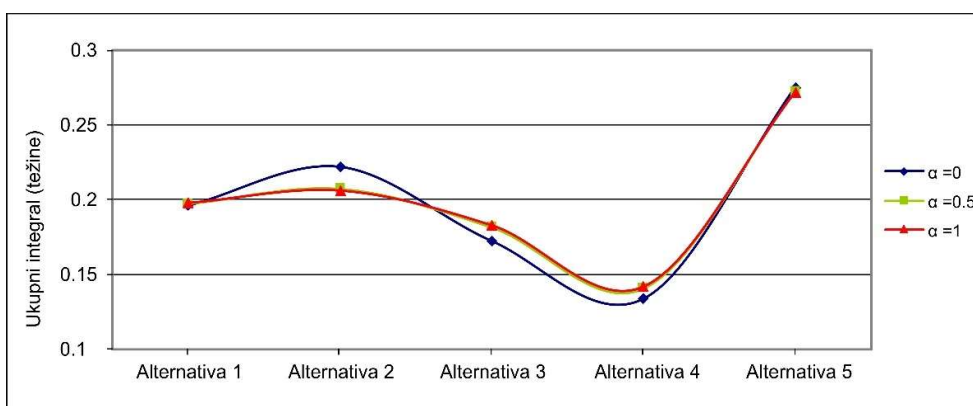
Tabela 33. Rangiranje i izbor optimalne alternative

FAZI BROJ					REALNI BROJ	RANGIRANJ	OPTIMALNO REŠENJE
	L	S	D			E	
A ₁	0.020	0.196	1.955		0.198	3	0.271
A ₂	0.023	0.222	2.019		0.205	2	
A ₃	0.016	0.173	1.814		0.183	4	
A ₄	0.014	0.133	1.407		0.142	5	
A ₅	0.028	0.275	2.684		0.271	1	
OPTIMALNA ALTERNATIVA					A ₅		

Tabela 34. Analiza osetljivosti

Alternative	$\alpha=0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$
A ₁	0.1962	0.1975	0.1977
A ₂	0.2220	0.2074	0.2059
A ₃	0.1724	0.1817	0.1826
A ₄	0.1339	0.1409	0.1416
A ₅	0.2752	0.2722	0.2719

Na slici 19 je prikazan ukupni integral za umereni, pesimistički i optimistički stav eksperta, odnosno težine alternativa u odnosu na vrednosti parametra optimizacionog indeksa. Uzimajući u obzir optimistički stav ($\alpha=1$) donosioca odluke, težine alternativa se menjaju u jako malom opsegu u odnosu na pesimistički ($\alpha=0$) i umereni ($\alpha=0.5$) stav eksperta. Prosečno za sve alternative, prema analizi osetljivosti, razlike u težinama variraju u opsegu od 0.1-0.73% za vrednost optimizacionog indeksa od 0.5, a s druge strane, u opsegu od 0.75-7.8 % za vrednost optimizacionog indeksa od 0.



Slika 19. Ukupna integralna vrednost za umereni, pesimistički i optimistički stav eksperta

Prema MCDA modelu, za ležište bakra „Borska reka“ predložena je VCR metoda (alternativa 5) kao optimalna za otkopavanje tog podzemnog rudnog ležišta. Ova metoda zahteva manji obim pripremnih radova pa je njena produktivnost veća, a troškovi eksploatacije su manji. Takođe, postoji još niz prednosti ove metode, kao što su visoka vrednost koeficijenta iskorišćenja rude, niska vrednost koeficijenta osiromašenja rude, kao i velika sigurnost radnika prilikom izvođenja radova na otkopavanju, što je jedan od najznačajnijih faktora koji je izdvojen prilikom ocenjivanja u radu. Iz tog razloga primena ove metode za dato ležište bakra ispunjava uslove optimalne metode otkopavanja.

Ovakvim postupkom, ne završava se analiza problema eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Za planirani budući period eksploatacije bakra, formiraju se strategije podrške odlučivanja. Ovakve strategije omogućuju preuzimanje pune profesionalne odgovornosti menadžment tima za poboljšanje razvojnih planova. Na osnovu toga, definišu se dodatne aktivnosti koje se sprovode u budućnosti tokom eksploatacije, čime se omogućuje efikasnost i visoka produktivnost. Isto tako, to se odnosi i na primeni najnovijih tehnoloških dostignuća koji obezbeđuju bezbednost na radu u rudniku. S jedne strane, implementacija rešenja i predanost menadžment tima doprinosi održivost razvoja celokupnog procesa i aktivnosti na rudniku, a s druge strane dugoročne i stabilne uslove u tehničkom, ekonomskom i ekološkom smislu.

2.6. Rezultati dobijeni proračunom VIKOR metode višekriterijumske optimizacije

Pored analize pomoću FAHP metode, urađena je i analiza pomoću „klasične“ metode višekriterijumske optimizacije VIKOR. Proračun je rađen prema opisanim koracima za metodu VIKOR, datim u poglavlju o metodama višekriterijumske optimizacije. Na osnovu već poznatih informacija o alternativama postavljena je matrica odlučivanja, prema koraku 2, jednačina 14. Zatim su prema koraku 3 određene najpovoljnije vrednosti za sve kriterijume (najveća vrednost kod maksimizacionog, najmanja kod minimizacionog. Za ocenjivanje alternativa u odnosu na kriterijume je korišćena fazifikovana Satijeva skala koju je predložio Zhu et al. (1999) i Lamata (2004), prikazano u tabeli 35.

Prema koraku 4, predstavljeno jednačinom 15, određena je relativna značajnost kriterijuma, tj. vrednosti težinskih koeficijenata kriterijuma pri čemu važi da je $w_i=1$, prikazano u tabeli 36. U tabeli 36 dati su rezultati kombinacije u slučaju kada nije data prednost ni jednoj kriterijumskoj funkciji.

Prema koraku 5 određene su vrednost težine v . S obzirom da je broj kriterijuma u ovom slučaju $n = 18$, a vrednost težine v zavisi od broja kriterijuma, usvajamo $v = 0.7$ za $n \geq 11$.

Prema koraku 6 na osnovu jednačina 16 i 17 određuju se vrednosti metrika S_j i R_j , prikazane u tabeli 37. Prema koraku 7 u tabeli 38 prikazani su proračuni ukupnog indeksa rangiranja alternativa, kao i vrednost Q_j koja predstavlja linearnu kombinaciju metrika S_j i R_j . Q_j je dobijeno po jednačini 18. Izvršeno je rangiranje alternativa na osnovu vrednosti S_j , R_j i Q_j i dat je predlog kompromisnog rešenja. Alternativa A_5 je odabrana kao optimalna. S druge strane, prema rangiranju, redosled alternativa koje zauzimaju drugo, treće, četvrto i peto mesto je sledeći: $A_2-A_1-A_3-A_4$.

Takođe je izvršena i analiza osetljivosti rešenja, variranjem težina kriterijuma, za 4 kombinacije (tabela 39). U prvoj kombinaciji nije data prednost ni jednoj kriterijumskoj funkciji (opšti slučaj VIKOR-a). Kompromisno rešenje za donošenje konačne odluke u prvoj varijanti predstavlja: **alternativa A5**. U drugoj, trećoj i četvrtoj kombinaciji istaknuta je prednost, redom: tehničkih, proizvodnih i ekonomskih kriterijuma. Na osnovu sprovedenih proračuna prema prikazanim kombinacijama (tabela 39), alternativa A_5 predstavlja kompromisno rešenje i u tim slučajevima. Redosled ostalih alternative je isti kao i za slučaj kada se ne daje prednost ni jednoj kriterijumskoj funkciji, izuzev u slučaju kada se prednost daje ekonomskim kriterijuma, pa alternativa A_3 zauzima drugo mesto, dok alternativa A_2 prelazi na treće mesto. Na osnovu sprovedenog optimizacionog postupka metodom VIKOR, dobijeni rezultati se mogu oceniti kao jednoznačni.

Tabela 35. Kvantifikovana matrica odlučivanja i maksimumi i minimumi po kriterijumima

Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18
A ₁	3	9	9	7	9	5	1	3	7	7	1	3	1	1	1	3	7	9
A ₂	9	1	7	1	5	9	7	9	1	5	9	9	9	5	9	1	1	1
A ₃	7	5	3	5	1	3	5	1	5	3	5	5	3	9	5	7	5	5
A ₄	1	3	1	3	3	1	9	7	3	1	7	1	5	7	7	9	3	3
A ₅	5	7	5	9	7	7	3	5	9	9	3	7	7	3	3	5	9	7
Extr	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
f*	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
f̂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Tabela 36. Međuvrednosti $(f_{imax} - f_{ij}) / (f_{imax} - f_{imin}) * w_i$

Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18
A ₁	0.75	0	0	0.25	0	0.5	1	0.75	0.25	0.25	1	0.75	1	1	1	0.75	0.25	0
A ₂	0	1	0.25	1	0.5	0	0.25	0	1	0.5	0	0	0	0.5	0	1	1	1
A ₃	0.25	0.5	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75	0	0.5	0.25	0.5	0.5
A ₄	1	0.75	1	0.75	0.75	1	0	0.25	0.75	1	0.25	1	0.5	0.25	0.25	0	0.75	0.75
A ₅	0.5	0.25	0.5	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0	0	0.75	0.25	0.25	0.75	0.75	0.5	0	0.25

Tabela 37. Vrednosti S_j i R_j

Varijanta	S_j	R_j
A ₁	9.5	1
A ₂	8	1
A ₃	10	1
A ₄	11	1
A ₅	6.5	0.75

Tabela 38. Međurezultati (QS_j i QR_j) i rangiranje alternativa (Q_j)

	$(S_j - \min S_j) / (\max S_j - \min S_j)$	$(R_j - \min R_j) / (\max R_j - \min R_j)$	Q_j	$v = 0.7$
A ₁	0.666667	1	0.766667	
A ₂	0.333333	1	0.533333	
A ₃	0.777778	1	0.844444	
A ₄	1	1	1	
A ₅	0	0	0	

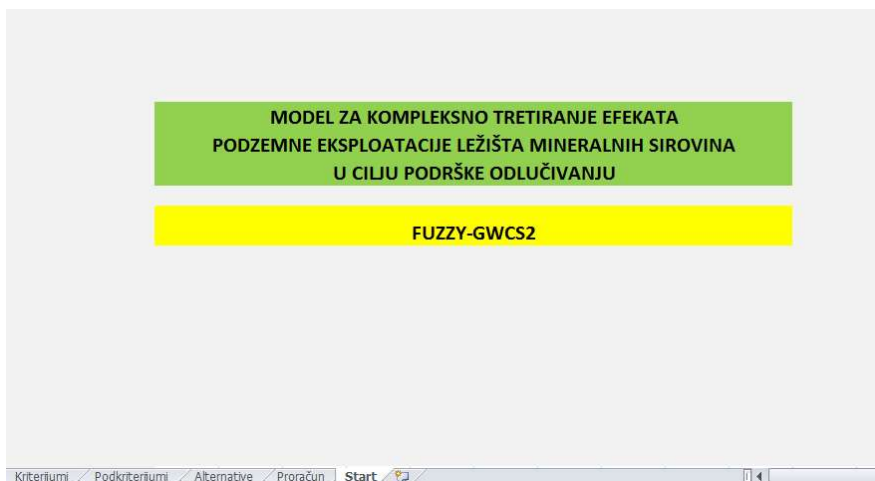
Tabela 39. Prikaz rezultata za različite koeficijente za sve 4 varijante

Varijanta	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	E ₁	E ₂	E ₃	Kompromisno rešenje	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A ₅ , A ₂ , A ₁ , A ₃ , A ₄
2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A ₅ , A ₂ , A ₁ , A ₃ , A ₄
3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	A ₅ , A ₂ , A ₁ , A ₃ , A ₄
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	A ₅ , A ₃ , A ₁ , A ₂ , A ₄

2.7. Prikaz određivanja optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta bakra “Borska reka” korišćenjem “Fuzzy-GWCS2” aplikacije prilikom primene FAHP metode

Fazi optimizacija, metodom fazi analitičkog fajerarhijskog procesa (FAHP), i određivanje optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji rudnika ležišta bakra “Borska reka” urađeni su u aplikaciji “Fuzzy-GWCS2”, specijalno napravljenoj za te namene. Aplikacija je rađena kao druga verzija već postojeće aplikacije verzije 1 “Fuzzy-GWCS” koja se odnosi na određivanje optimalne alternative sistema odbrane od podzemnih voda površinskog kopa “Buvač” Bajić (2015). Na slikama 20-26 su predstavljeni “prozori” aplikacije.

Na slici 20 predstavljen je osnovni “prozor” aplikacije “Fuzzy-GWCS2”, gde se u donjem delu vide ocenjivanja ostalih prozora: kriterijuma, podkriterijuma, alternativa i proračuni konačnih rešenja.



Slika 20. Prozor “Start” aplikacije “Fuzzy-GWCS2”

U aplikaciji “Fuzzy-GWCS2” ulazne elemente predstavljaju numeričke vrednosti lingvističkih varijabli, definisane FAHP skalom. Na slici 20 prikazane su tabele kriterijuma u bojama. Tehnički kriterijumi su predstavljeni plavom bojom, proizvodni ljubičastom bojom i ekonomski kriterijumi žutom bojom. U desnom delu, obeleženom crvenom bojom date su proračunate vrednosti vektora težinskih prioriteta tih kriterijuma.

	Tehnički			Proizvodni			Ekonomski			Suma matrice			Težine			
Tehnički	1	1	1	0.33	0.5	1	1	2	3	2.33	3.5	5	0.155333	0.333333	0.715338	
Proizvodni	1	2	3	1	1	1	1	2	3	3	5	7	0.2	0.47619	1.001431	
Ekonomski	0.33	0.5	1	0.33	0.5	1	1	1	1	1.66	2	3	0.110667	0.190476	0.229185	
										Suma	6.99	10.5	15			
										Obrnuta S	15	10.5	6.99			

Slika 21. Prozor “Kriterijumi” aplikacije “Fuzzy-GWCS2”

Na slikama od 22 do 25 prikazana su ocenjivanja matrice podkriterijuma, matrice alternativa kao i vrednosti proračunatih vektora težinskih prioriteta podkriterijuma u odnosu na posmatrani kriterijum i težine alternativa, poštujući sve navedene podkriterijume.

Slika 22. Prozor “Podkriterijumi” aplikacije “Fuzzy-GWCS2”

Slika 23. Prozor “Alternative” aplikacije “Fuzzy-GWCS2” za tehničke podkriterijume

	P1	A1	A2	A3	A4	A5	Suma	Težine
A1	1	1	3	4	5	3	8,33	12,15
A2	0,2	0,25	1	1	1	0,2	1,84	7,11
A3	0,2	0,33	1	3	4	5	5,4	8,58
A4	0,2	0,25	0,33	1	2	3	2,54	3,78
A5	1	2	3	7	9	9	15	21
							33,11	47,97
							Obrnuta	62,79
								33,11
								0,13166
								0,26058
								0,51344
								0,0289
								0,04939
								0,08459
								0,086
								0,17286
								0,3774
								0,04045
								0,0788
								0,17096
								0,23889
								0,43777
								0,75006
								0,14884
								0,29127
								0,54972
								0,0788
								0,16302
								0,33454
								0,03619
								0,07022
								0,15003
								0,02597
								0,03849
								0,07244
								0,24807
								0,437
								0,7325
								0,02894
								0,04922
								0,0789
								0,28025
								0,45619
								0,70804
								0,09116
								0,1607
								0,29255
								0,43732
								0,2592
								0,48145
								0,04402
								0,0812
								0,15661
								0,02777
								0,04971
								0,11758
								0,25249
								0,46138
								0,82011
								0,0802
								0,1723
								0,37454
								0,03639
								0,07149
								0,14581
								0,09208
								0,14761
								0,57716
								0,025
								0,03894
								0,09019
								0,21727
								0,43708
								0,60515
								0,04045
								0,10398
								0,26409
								0,08182
								0,15943
								0,35427
								0,03991
								0,26017
								0,61192
								0,01762
								0,04095
								0,07157
								0,08439
								0,14762
								0,26073
								0,26567
								0,4527
								0,72874
								0,1594
								0,28205
								0,51283
								0,04173
								0,07708
								0,14926
								0,02408
								0,03834
								0,07257
								0,24807
								0,438
								0,7339
								0,0788
								0,16339
								0,33515
								0,14884
								0,27289
								0,51644
								0,03706
								0,09039
								0,26468
								1,26
								1,856
								1,67
								1,7
								2,06
								2,8
								17
								22
								25
								5,33
								7,75
								10,33
								8,33
								12,5
								17
								23
								27
								2,67
								3,916
								5,53
								35,31
								48,226
								60,66
								60,66
								48,226
								35,31
								1,87
								2,388
								4,2
								17
								23
								27
								5,4
								8,58
								12,33
								2,45
								3,56
								4,9
								6,2
								12,93
								19
								32,92
								49,796
								67,33
								1,65
								2,09
								2,8
								15
								21
								25
								2,67
								4,996
								8,2
								5,4
								7,66
								11
								6,33
								12,5
								19
								31,05
								48,046
								66
								66
								48,046
								31,05
								1,78
								2,06
								2,8
								5,4
								7,5
								9,66
								17
								23
								27
								10,2
								14,33
								19
								2,67
								3,916
								5,53
								37,05
								50,806
								63,99
								63,99
								50,806
								37,05
								1,65
								1,856
								1,67
								17
								23
								27
								5,4
								8,58
								12,33

FUZZY BROJ		REALNI BROJ		OPT REŠ
L	S	D	A1	A2
0.02052	0.19584	1.95563	2.01407	0.19783
0.02281	0.22202	2.01969	2.08609	0.20485
0.01645	0.17367	1.81442	1.86682	0.18336
0.01416	0.13354	1.40774	1.44754	0.14217
0.02851	0.27494	2.68475	2.76689	0.27176
Suma			10.1814	

REALNI BROJ					
Analiza osetljivosti			RANGIRANJE		
0	0.5	1	alfa=0	alfa=0.5	alfa=1
A1	0.10818	0.59196	1.07574	0.33826	0.33757
A2	0.12241	0.62163	1.12085	0.22208	0.20948
A3	0.09506	0.54455	0.99404	0.17245	0.18175
A4	0.07385	0.42224	0.77064	0.13397	0.14093
A5	0.15172	0.81578	1.47994	0.27525	0.27228
Sume	0.55123	2.99617	5.44111	1	1
SUMA=			1	1	1

W1	T1	A1	0.00073	0.00607	0.06508
W1	T2	A2	0.00364	0.0289	0.21385
	T3	A3	0.00233	0.02053	0.17666
	T4	A4	0.00048	0.00301	0.02482
	T5	A5	0.00151	0.01457	0.13324
	T6	A1	0.00303	0.02545	0.18149
W2	T7	A2	0.0004	0.0026	0.02209
	T8	A3	0.00126	0.01139	0.09201
	T9	A4	0.00061	0.00668	0.07102
	T10	A5	0.00184	0.01178	0.13434
	T11	A1	0.00048	0.00366	0.02764
W3	T12	A2	0.0002	0.00215	0.02101
	T13	A3	8.7E-05	0.00089	0.00921
	T14	A4	5.3E-05	0.00033	0.0031
	T15	A5	0.00017	0.00132	0.01142
	T16	A1	0.00175	0.01531	0.13651
W4	T17	A2	0.00037	0.00243	0.02493
	T18	A3	0.00071	0.0086	0.08859
	T19	A4	0.00053	0.00429	0.04066
	T20	A5	0.00035	0.02382	0.17962
	T21	A1	0.00102	0.00926	0.07222
W5	T22	A2	0.00042	0.00499	0.04911
	T23	A3	0.00012	0.00085	0.00809
	T24	A4	0.00017	0.00209	0.02175
	T25	A5	0.00051	0.00433	0.03755
	T26	A1	0.00125	0.0101	0.0859
W6	T27	A2	0.003	0.02332	0.1652
	T28	A3	0.00059	0.00557	0.05062
	T29	A4	0.0004	0.00226	0.0185
	T30	A5	0.00158	0.01457	0.11333
	T31	A1	0.0002	0.00105	0.0094
W7	T32	A2	0.00091	0.00552	0.04063
	T33	A3	0.00039	0.00376	0.03521
W8	T34	A4	0.00142	0.00959	0.06771
	T35	A5	0.00028	0.00381	0.03583
	T36	A1	0.00033	0.00345	0.03495
	T37	A2	0.00195	0.01527	0.11694
	T38	A3	0.00022	0.00141	0.013
W9	T39	A4	0.00108	0.00909	0.0789
	T40	A5	0.0007	0.0063	0.06938
	T41	A1	0.00137	0.0139	0.16355
	T42	A2	0.0003	0.00235	0.02694
	T43	A3	0.00089	0.00954	0.11862
W10	T44	A4	0.00042	0.0042	0.05445
	T45	A5	0.00248	0.02335	0.24952
	T46	A1	0.00382	0.04165	0.3926
	T47	A2	0.00202	0.02331	0.23051
	T48	A3	0.00093	0.01004	0.10339
W11	T49	A4	0.00067	0.0055	0.04992
	T50	A5	0.00036	0.06249	0.50477
	T51	A1	0.00031	0.00378	0.03936
	T52	A2	0.00297	0.04042	0.35144
	T53	A3	0.00097	0.01424	0.14522
W12	T54	A4	0.00146	0.02296	0.23898
	T55	A5	0.00047	0.00719	0.07724
	T56	A1	0.00018	0.00177	0.0274
	T57	A2	0.00161	0.01755	0.17612
	T58	A3	0.00051	0.00655	0.08043
W13	T59	A4	0.00023	0.00272	0.03131
	T60	A5	0.00059	0.00941	0.12394
	T61	A1	0.00017	0.00183	0.02606
	T62	A2	0.00153	0.02035	0.23267
	T63	A3	0.00017	0.00183	0.02606
W14	T64	A4	0.00027	0.00484	0.07632
	T65	A5	0.00055	0.00742	0.10238
	T66	A1	0.00036	0.00349	0.03528
	T67	A2	0.00109	0.01269	0.12171
	T68	A3	0.00342	0.03893	0.34019
W15	T69	A4	0.00205	0.02425	0.23939
	T70	A5	0.00054	0.00663	0.06968
	T71	A1	0.00011	0.00073	0.00913
	T72	A2	0.0011	0.00907	0.09234
	T73	A3	0.00035	0.00338	0.04217
W16	T74	A4	0.00066	0.00565	0.06498
	T75	A5	0.00016	0.00187	0.02575
	T76	A1	0.00035	0.00225	0.03597
	T77	A2	0.00025	0.00124	0.01624
	T78	A3	0.00085	0.00665	0.09862
W17	T79	A4	0.00232	0.0135	0.15663
	T80	A5	0.00076	0.00594	0.07165
	T81	A1	0.00171	0.02218	0.29469
	T82	A2	0.00069	0.00707	0.08321
	T83	A3	0.00149	0.01484	0.17907
W18	T84	A4	0.00055	0.00489	0.07281
	T85	A5	0.00469	0.04502	0.46803
	T86	A1	0.00337	0.02991	0.3184
	T87	A2	0.00035	0.0028	0.03566
	T88	A3	0.00107	0.01167	0.15704
W18	T89	A4	0.0005	0.00509	0.07043
	T90	A5	0.00165	0.01835	0.24199

W7	T32	A1	0.0002	0.00105	0.0094
	T33	A2	0.00091	0.00552	0.04063
	T34	A3	0.00039	0.00376	0.03521
	T35	A4	0.00142	0.00959	0.06771
	T36	A5	0.00028	0.00381	0.03583
W8	T37	A1	0.00033	0.00345	0.03495
	T38	A2	0.00195	0.01527	0.11694
	T39	A3	0.00022	0.00141	0.013
	T40	A4	0.00108	0.00909	0.0789
	T41	A5	0.0007	0.0063	0.06938
W9	T42	A1	0.00137	0.0139	0.16355
	T43	A2	0.0003	0.00235	0.02694
	T44	A3	0.00089	0.00954	0.11862
	T45	A4	0.00042	0.0042	0.05445
	T46	A5	0.00248	0.02335	0.24952
W10	T47	A1	0.00382	0.04165	0.3926
	T48	A2	0.00202	0.02331	0.23051
	T49	A3	0.00093	0.01004	0.10339
	T50	A4	0.00067	0.0055	0.04992
	T51	A5	0.00036	0.06249	0.50477
W11	T52	A1	0.00031	0.00378	0.03936
	T53	A2	0.00297	0.04042	0.35144
	T54	A3	0.00097	0.01424	0.14522
	T55	A4	0.00146	0.02296	0.23898
	T56	A5	0.00047	0.00719	0.07724
W12	T57	A1	0.00018	0.00177	0.0274
	T58	A2	0.00161	0.01755	0.17612
	T59	A3	0.00051	0.00655	0.08043
	T60	A4	0.00023	0.00272	0.03131
	T61	A5	0.00059	0.00941	0.12394
W13	T62	A1	0.00017	0.00183	0.02606
	T63	A2	0.00153	0.02035	0.23267

W13	T64	A3	0.00017	0.00183	0.02606
	T65	A4	0.00027	0.00484	0.07632
	T66	A5	0.00055	0.00742	0.10238
	T67	A1	0.00036	0.00349	0.03528
	T68	A2	0.00109	0.01269	0.12171
W14	T69	A3	0.00342	0.03893	0.34019
	T70	A4	0.00205	0.02425	0.23939
	T71	A5	0.00054	0.00663	0.06968
	T72	A1	0.00011	0.00073	0.00913
	T73	A2	0.0011	0.00907	0.09234
W15	T74	A3	0.00035	0.00338	0.04217
	T75	A4	0.00066	0.00565	0.06498
	T76	A5	0.00016	0.00187	0.02575
	T77	A1	0.00035	0.00225	0.03597
	T78	A2	0.00025	0.00124	0.01624
W16	T79	A3	0.00085	0.00665	0.09862
	T80	A4	0.00232	0.0135	0.15663
	T81	A5	0.00076	0.00594	0.07165
	T82	A1	0.00171	0.02218	0.29469
	T83	A2	0.00069	0.00707	0.08321
W17	T84	A3	0.00149	0.01484	0.17907
	T85	A4	0.00055	0.00489	0.07281
	T86	A5	0.00469	0.04502	0.46803
	T87	A1	0.00337	0.02991	0.3184
	T88	A2	0.00035	0.0028	0.03566
W18	T89	A3	0.00107	0.01167	0.15704
	T90	A4	0.0005	0.00509	0.07043
	T91	A5	0.00165	0.01835	0.24199

Slika 26. Prozor "Proračun" aplikacije "Fuzzy-GWCS2"

2.8.Prikaz određivanja optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta bakra “Borska reka” korišćenjem “Fuzzy-GWCS2” aplikacije prilikom primene metode VIKOR

Metodom VIKOR određivanje optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji rudnika ležišta bakra “Borska reka” urađeni su u aplikaciji “Fuzzy-GWCS2”, specijalno napravljenoj za te namene. Na slikama 27 - 31 su predstavljeni “prozori” aplikacije.

Na slici 27 prikazane su tabele matrice odlučivanja, najpovoljnije i najnepovoljnije vrednosti za sve funkcije kriterijume u bojama. Ocenjivanje alternativa u odnosu na kriterijume prikazano je roze bojom, dok su vrednosti svih funkcija kriterijuma (najveća vrednost kod maksimizacionog, najmanja kod minimizacionog) predstavljeni plavom bojom. Ljubičastom bojom je prikazana osnovna kriterijumska funkcija: $(f_{imax} - f_{ij}) / (f_{imax} - f_{imin})$.

Na osnovu relativne značajnosti kriterijuma, na slikama 28-31 žutom bojom predstavljene su kombinacije redom: u slučaju kada nije data prednost ni jednoj kriterijumskoj funkciji, kada je data prednost tehničkim kriterijumima, kada je data prednost proizvodnim kriterijumima i na kraju ekonomskim. Vrednosti metrika S_j i R_j za sve 4 kombinacije predstavljeni su plavom bojom. Proračuni ukupnog indeksa rangiranja alternativa, sortiranjem vrednosti S , R i Q po opadajućem redosledu, kao i vrednosti Q_j prikazani su crvenom bojom. Za proračun vrednosti Q_j usvajana je vrednost $v = 0.7$. Predlog kompromisnog rešenja je alternativa koja je rangirana kao najbolja prema vrednosti mere Q (minimalna vrednost).

Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18
A1	3	9	9	7	9	5	1	3	7	7	1	3	1	1	1	3	7	9
A2	9	1	7	1	5	9	7	9	1	5	9	9	9	5	9	1	1	1
A3	7	5	3	5	1	3	5	1	5	3	5	5	3	9	5	7	5	5
A4	1	3	1	3	3	1	9	7	3	1	7	1	5	7	7	9	3	3
A5	5	7	5	9	7	7	3	5	9	9	3	7	7	3	3	5	9	7
extr	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
najbolja f+	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
najlošija f-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
d proračun																		
Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18
A1	0.75	0	0	0.25	0	0.5	1	0.75	0.25	0.25	1	0.75	1	1	1	0.75	0.25	0
A2	0	1	0.25	1	0.5	0	0.25	0	1	0.5	0	0	0	0.5	0	1	1	1
A3	0.25	0.5	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	0.5	0.75	0.5	0.75	0	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5
A4	1	0.75	1	0.75	0.75	1	0	0.25	0.75	1	0.25	1	0.5	0.25	0	0.75	0.75	0.75
A5	0.5	0.25	0.5	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0	0.75	0.25	0.25	0.75	0.75	0.5	0	0.25	0.25
w*d																		
Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18

Slika 27. Prozor “Proračun” Matrica odlučivanja i maksimumi i minimumi po kriterijumima aplikacije “Fuzzy-GWCS2”

Varijanta	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	S_j	R_j
A1	0.75	0	0	0.25	0	0.5	1	0.75	0.25	0.25	1	0.75	1	1	1	0.75	0.25	0	9.5	1
A2	0	1	0.25	1	0.5	0	0.25	0	1	0.5	0	0	0.5	0	1	1	1	1	9	1
A3	0.25	0.5	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75	0	0.5	0.25	0.5	0.5	10	1
A4	1	0.75	1	0.75	0.75	1	0	0.25	0.75	1	0.25	1	0.5	0.25	0.25	0	0.75	0.75	11	1
A5	0.5	0.25	0.5	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0	0	0.75	0.25	0.25	0.75	0.75	0.5	0	0.25	8.5	0.75

S^*	6.5	Q25	Q75	Q1
S^-	11	0.9987	1	0.9987
R^+	0.75	0.3333	1	0.5333
R^-	1	0.7778	1	0.6444
v	0.7	1	1	1

Slika 28. Prozor "Proračun" Metrike S_j i R_j i vrednosti ukupnog indeksa rangiranja alternativa i vrednosti Q_j aplikacije "Fuzzy-GWCS2" u slučaju kada nije data prednost ni jednoj kriterijumskoj funkciji

Varijanta	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	S_j	R_j
A1	1.5	0	0	0.5	0	1	2	1.5	0.25	1	0.75	1	1	1	1	0.75	0.25	0	12.75	2
A2	0	2	0.5	2	1	0	0.5	0	1	0.5	0	0	0	0.5	0	1	1	1	11	2
A3	0.5	1	1.5	1	2	1.5	1	2	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75	0	0.5	0.25	0.5	0.5	15.25	2
A4	2	1.5	2	1.5	1.5	2	0	0.5	0.75	1	0.25	1	0.5	0.25	0.25	0	0.75	0.75	16.5	2
A5	1	0.5	1	0	0.5	0.5	1.5	1	0	0	0.75	0.25	0.25	0.75	0.75	0.5	0	0.25	9.5	1.5

S^*	9.5	Q25	Q75	Q1
S^-	16.5	0.4483	1	0.533
R^+	15	0.2343	1	0.45
R^-	2	0.9214	1	0.875
v	0.7	1	1	1

Slika 29. Prozor "Proračun" Metrike S_j i R_j i vrednosti ukupnog indeksa rangiranja alternativa i vrednosti Q_j aplikacije "Fuzzy-GWCS2" u slučaju kada je data prednost tehničkim kriterijumima

Varijanta	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	S_j	R_j
A1	0.75	0	0	0.25	0	0.5	1	0.75	0.5	0.5	2	1.5	2	2	2	0.75	0.25	0	14.75	2
A2	0	1	0.25	1	0.5	0	0.25	0	2	1	0	0	0	1	0	1	1	1	10	2
A3	0.25	0.5	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	1	1.5	1	1	1.5	0	1	0.25	0.5	0.5	13.5	1.5
A4	1	0.75	1	0.75	0.75	1	0	0.25	1.5	2	0.5	2	1	0.5	0.5	0	0.75	0.75	15	2
A5	0.5	0.25	0.5	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0	0	1.5	0.5	0.5	1.5	1.5	0.5	0	0.25	9.25	1.5

S^*	9.25	Q25	Q75	Q1
S^-	15	0.8593	1	0.9639
R^+	15	0.3304	1	0.2315
R^-	2	0.9381	1	0.8761
v	0.7	1	1	1

Slika 30. Prozor "Proračun" Metrike S_j i R_j i vrednosti ukupnog indeksa rangiranja alternativa i vrednosti Q_j aplikacije "Fuzzy-GWCS2" u slučaju kada je data prednost proizvodnim kriterijumima

Varijanta	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18	S _j	R _j	S ⁺	S ⁻	R ⁺	R ⁻	v	Q _j	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
A1	0.75	0	0	0.25	0	0.5	1	0.75	0.25	0.25	1	0.75	1	1	1	15	0.5	0	10.5	1.5	7.25	12.5	0.68	0.68	0.7	0.68	0.68	0.68	0.68	
A2	0	1	0.25	1	0.5	0	0.25	0	1	0.5	0	0	0	0.5	0	2	2	2	11	2	1	1	0.7143	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
A3	0.25	0.5	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75	0	0.5	0.5	1	1	11.25	1	2	2	0.7619	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
A4	1	0.75	1	0.75	0.75	1	0	0.25	0.75	1	0.25	1	0.5	0.25	0.25	0	1.5	1.5	12.5	1.5	0.7	0.7	1	1	0.5	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
A5	0.5	0.25	0.5	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0	0	0.75	0.25	0.25	0.75	0.75	1	0	0.5	7.25	1	7.25	7.25	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 31. Prozor "Proračun" Metrike S_j i R_j i vrednosti ukupnog indeksa rangiranja alternativa i vrednosti Q_j aplikacije "Fuzzy-GWCS2" u slučaju kada je data prednost ekonomskim kriterijumima

IV. ZAKLJUČAK

Metode podzemne eksploatacije obuhvataju sve tehnološke faze na pripremi i otkopavanju određenog ležišta. Donošenje odluke o optimalnoj metodi otkovanja u podzemnim rudnicima predstavlja niz međusobno povezanih tehnoloških procesa gde efikasnost celokupnog procesa zavisi od efikasnosti svakog od procesa pojedinačno. To znači da treba voditi računa o velikom broju uticajnih faktora, počev od karakteristika ležišta. Pored izučavanja karakteristika ležišta potrebno je voditi računa o sigurnosti radnika prilikom eksploatacije rudnika, doprineti da su gubici rude niski, obezbediti potreban kapacitet proizvodnje, kao i da su troškovi proizvodnje niski. Sa tim u vezi, se može reći da donošenje odluke vezane za određivanje metode otkopavanja nije nimalo jednostavno.

Ležište bakra „Borska reka“ predstavlja eksperimentalno područje prilikom izrade ove doktorske disertacije. Na ovom primeru razmatrane su polazne hipoteze, kao i primena metodologije u cilju izbora optimalne metode otkopavanja prilikom podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina.

S obzirom da se kod rudnih ležišta proces otkopavanja može odvijati na razne načine, postoji veliki broj metoda. O mogućnostima eksploatacije rude iz rudnog tela „Borska Reka“ razmatrane su visoko kapacitivne i visoko produktivne metode otkopavanja. Kako rudno telo „Borska reka“ spada u rudna tela sa niskim sadržajem bakra, kao i da se nalazi na određenoj dubini zaleganja proučavano je 5 primenljivih vrsta metoda podzemnog otkopavanja: metode otkopavanja sa zarušavanjem rude, metode otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora, magazinske metode otkopavanja, metode otvorenih otkopa i VCR metoda.

U cilju što efikasnijeg funkcionisanja procesa, u poslednje vreme se primenjuju razne metode višekriterijumske optimizacije koje služe za pojednostavljenje procesa odlučivanja. Neke od takvih metoda su i FAHP, kao i VIKOR metoda koje su pogodna za razumevanje nepreciznih i nepotpunih podataka kao i za otkrivanje međusobnih odnosa između tih podataka.

U ovoj doktorskoj disertaciji pokazano je da je korišćenje metoda FAHP i VIKOR od izuzetnog značaja za upotrebu u rudarstvu, s obzirom da su kriterijumi koji su korišćeni u potpunosti zasnovani na subjektivnim mišljenjima i iskustvima eksperata (rudara i geologa) koja predstavljaju veoma bitnu činjenicu prilikom podzemne eksploatacije rudnika.

Generalno gledano, jedan od faktora koji ograničava primenu klasičnih metoda kod donošenja odluka u rudarstvu prilikom odabira optimalne metode za otkopavanje rudnika je česta nedovoljna raspoloživost podataka. Rudnike, kao kompleksne geološke sisteme, tokom eksploatacije karakteriše stalna dinamičnost u smislu širenja rudnika u prostoru – i po dimenzijama u planu i po dubini, odnosno u profilu. Zbog ovakvih činjenica, ceo proces rudarskih aktivnosti zahteva stalno prilagođavanje novonastalim uslovima tokom otkopavanja i eksploataciji rude. Doprinos metoda baziranih na fazi logici u nauci kod odlučivanja sastoji se u sposobnosti fokusiranja na prevazilaženju neizvesnosti koje se javljaju prilikom odabira metode za eksploataciju rude.

S druge strane, u odnosu na druge metode u kojima je uključena primena fazi pristupa, metoda FAHP se posebno odlikuje određenim specifičnim činjenicama, koje su uslovile prednost primene ove metode prilikom odabira optimalne alternative za izbor metoda otkopavanja podzemne eksploatacije. Zbog velike dubine zaleganja ležišta mineralnih sirovina, kao i nepreciznih podataka koji su karakteristični za takve geološke sisteme, a koji se ogledaju u nemogućnosti tačnog definisanja svih fizičkih, mehaničkih i geoloških uslova u tom sistemu, ceo proces otkopavanja i eksploatacije rudnika zahteva konstantno “učenje” i prevazilaženje problema koji se javljaju tokom aktivnosti na rudniku. Metoda FAHP se karakteriše po tome da se svaki problem rešava po hijerarhijski, postupno, do postizanja postavljenog cilja. S druge strane, metoda FAHP se karakteriše

stalnim “procesom” učenja, zatim diskusiji eksperata i procenjivanju prioriteta prilikom rešavanja problema.

Samim tim, primenom FAHP metode, ukazano je na njene vidove korišćenja kao kvalitativne tehnike koja se zasniva na prosuđivanju, tj. ocenjivanju i iskustvu donosilaca odluka u vrednovanju informacije, da bi se došlo do optimalne odluke između više postavljenih podzemnih metoda otkopavanja.

Kod klasične metode, kao što je VIKOR za izbor optimalne metode otkopavanja korišćeno je kvalitativno ocenjivanje za opis poređenja parova elemenata kriterijuma, podkriterijuma i alternativa, odnosno pomoću lingvističkih varijabli a što se ogleda u heurističkom pristupu (znanju eksperta, intuiciji, procenama i iskustvu).

Primenjeni algoritam za rešavanje složenih rudarskih problema, ogleda se u sledećem:

- postavljeni su i detaljno analizirani faktori koji utiču na izbor optimalne metode otkopavanja u podzemnoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina. Predloženi su sledeći kriterijumi i njihovi podkriterijumi: tehnički (dubina ležišta, moćnost ležišta, oblik ležišta, vrednost rude, nagibni ugao, čvrstoća i stabilnost stena, forma rudnih tela i kontakt sa okolnim stenama i mineraloški i hemijski sastav rude), proizvodni (produktivnost metode otkopavanja i kapacitet proizvodnje, sigurnost na radu, degradacija životne sredine, razblaženje rude, osiromašenje rude, ventilacija i hidrološki uslovi) i ekonomski (investicioni troškovi, troškovi otkopavanja i troškovi održavanja). Treba posebno istaći da se ovi kriterijumi sa podkriterijumima mogu smatrati univerzalnim i da se mogu primeniti i na ostalim rudnicima u praksi prilikom podzemne eksploatacije rude.
- tokom ocenjivanja kriterijuma, podkriterijuma i alternativa pomoću metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa i VIKOR metode doneta je konačna odluka o optimalnoj metodi otkopavanja u podzemnoj eksploataciji rudnika. Posebno je za te svrhe kreirana aplikacija „Fuzzy-GWCS2”. S obzirom da značaj kriterijuma nije isti, određeni su težinske koeficijente koji pokazuju koliku ulogu ima svaki od kriterijuma prilikom izbora. Takođe, ovakvim postupkom je u rudarstvu - podzemnoj eksploataciji rude, implementirana fazi logika u višekriterijumskoj optimizaciji. S jedne strane, cilj primene fazi pristupa je donošenje odluke prilikom rešavanja problema gde postoji više rešenja, pri čemu se analizom svih postavljenih faktora dobija optimalno rešenje. S druge strane, intuicija i iskustvo eksperata itekako igraju bitnu ulogu prilikom analize rudnog sistema i metoda otkopavanja rudnika u podzemnoj eksploataciji, a korišćenje fazi logike u matematičkim proračunima omogućuje takav heuristički pristup rešavanju problema.

Na osnovu dobijenih rešenja koja su predložena metodom višekriterijumskog odlučivanja (FAHP i VIKOR) se može zaključiti da je u oba slučaja za izbor metode podzemnog otkopavanja ležišta bakra “Borska reka” došlo do poklapanja, odnosno do iste optimalne alternative A₅ (VCR metoda otkopavanja).

Prikazanim multidisciplinarnim pristupom koji povezuje rudarstvo sa fazi optimizacijom, odnosno logikom i višekriterijumskim odlučivanjem, doprinosi se kvalitetnom i održivom upravljanju problematikom otkopavanja podzemnih rudnika metodama otkopavanja.

Primenom naučnih metoda višekriterijumske optimizacije u rešavanju problema izbora optimalne metode otkopavanja podzemnih rudnika, očekuje se bitan napredak i postizanje sistematičnosti

naučnog saznanja u oblasti rudarstva s obzirom da je metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa „mlada“ i tek se širi njena primena u svim oblastima.

I na kraju treba napomenuti da bi dalja istraživanja u primeni metoda višekriterijumske optimizacije u oblasti rudarstva trebalo da se kreću u pravcu kreiranja softverskog paketa koji bi služio kao podrška, kako prilikom ovakvih ili sličnih izbora, tako i prilikom traženja zavisnosti između atributa.

LITERATURA

Aplay S. & Yavuz M. (2007). A Decision Support System for Underground Mining Method Selection. 20th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, vol 4570. Springer, Berlin, Heidelberg pp. 334–343.

Asadi Ooriad 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, pp. 45-53, DOI: 10.17794/rgn.2018.1.6.

Ataei M., Jamshidi M., Sereshki F. & Jalali S. M. E. (2008a). Mining method selection by AHP approach. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 741-749.

Ataei M., Sereshki F., Jamshidi M., & Jalali, S. M. E. (2008b). Suitable mining method for Golbini No. 8 deposit in Jajarm (Iran) using TOPSIS method. Mining Technology, pp. 1-5.

Ataei M., Shahsavany H. & Mikaeil R. (2013). Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method. International Journal of Mining Science and Technology. 23 (4), pp. 573-578.

Atlas Copco (2007), Mining methods in underground mining, pp. 33-40.

Baćanin Džakula V. N. (2015). Unapređenje hibridizacijom metaheuristika inteligencije brojeva za rešavanje problema globalne optimizacije. Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Doktorska disertacija.

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

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.

Balusa B. C. & Gorai A. K. (2018a). A Comparative Study of Various Multi-criteria Decision-Making Models in Underground Mining Method Selection. Journal of The Institution of Engineers (India), DOI: <https://doi.org/10.1007/s40033-018-0169-0>.

Balusa B. C. & Gorai A. K. (2018b). Design of a multi-criteria decision making model using fuzzy-AHP for selection of appropriate underground metal mining method. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 9 (4), pp. 259-301, DOI: 10.1504/IJMME.2018.097425.

Balusa B. C. & Gorai A. K. (2019). Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision making model in selection of underground metal mining method. Journal of Sustainable Mining, pp. 8-17.

- Bereš J. P. & Bereš K. P. (2014). Heuristika i operaciona istraživanja u funkciji edukacije subjekata sistema civilne odbrane za vanredne situacije. *Vojnotehnički glasnik/Military technical courier*, LXII (3), pp. 152 -164.
- Bogdanovic, D., Nikolic, D., & Ilic, I. (2012). Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 84 (1), pp. 219-233.
- Boender, C. G. E., De Graan J. G. & Lootsma, F. A. (1989). Multiple-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 133–143.
- Bouyssou D., Marchant T., Pirlot M., Perny P., Tsoukias A. & Vincke P. (2000). *Evaluation Models, A Critical Perspective*, pp. 274, Boston: Kluwer.
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 233–247.
- Chander, B.B., Gorai A.K. & Jayantu S. (2018). Design of Decision-Making Techniques Using Improved AHP and VIKOR for Selection of Underground Mining Method. *Recent Findings in Intelligent Computing Techniques*, pp 495-504, https://doi.org/10.1007/978-981-10-8636-6_52.
- Chang D.Y. (1992). Extent analysis and synthetic decision. In *Optimization Techniques and Applications*, pp. 352. Singapore, World Scientific.
- Chang D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, pp. 649-655.
- Chang C. L. (2010). A modified VIKOR method for multiple criteria analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 168 (1-4), pp. 339–344.
- Chen, S. M. (1996). Forecasting enrollments based on fuzzy time series. *Fuzzy Sets and Systems*, 81(3), pp. 311–319.
- Deng H. (1999). Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, pp. 215-231.
- Dorđević M. (2018). Zagađivanje i zaštita vazduha, vode i zemljišta. Univerzitet u Beogradu, Filološki fakultet, pp. 465-474, DOI: 10.5937/vojdelo1807465D.
- Gelvez J. I. R. & Aldana F. A. C. (2014). Mining method selection methodology by multiple criteria decision analysis – case study in Colombian coal mining. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Washington D.C., U.S.A.
- Genčić B. (1973). Tehnološki procesi podzemne eksploatacije slojevitih ležišta. Knjige I, II i III, Otvaranje, priprema i metode otkopavanja, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd.
- Glušćević B. (1974). Otvaranje i metode podzemnog otkopavanja rudnih ležišta. Univerzitet u Beogradu.
- 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*, <https://doi.org/10.3390/su11195163>.
- Jahan A., Mustapha F., Ismail M.Y., Sapuan S.M. & Bahraminasab M. (2011). A comprehensive VIKOR method for material selection, *Materials and Design* 32(3), pp. 1215-1221.

Javanshirgiv M. & Safari, M. (2017). The selection of an underground mining method using the Fuzzy TOPSIS method: a case study in the Kamar Mahdi II fluorine mine, Iran. *Mining Science*, vol. 24, pp. 161-181.

Jemcov R. I. (2008). Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerim iz Srbije Univerzitet u Beogradu. Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Doktorska disertacija, pp. 349-353.

Jovančić P. (2014). Održavanje rudarskih mašina. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp.1-13.

Kabwe E. (2017). Optimal mining method selection for Nchanga's Upper Orebody using analytic hierarchy process and Yager's method. *Mining Technology*, 126 (3), pp. 151-162.

Karadogan A., Kahriman A. & Ozer U. (2008). Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Johannesburg. 108 (2), pp. 73-79, ISSN 2411-9717.

Kaufmann A. & Gupta M.M. (1985). *Introduction to Fuzzy Arithmetic*, pp 384, New York: Van Nostrand Reinhold.

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) pp. 677-685.

Lamata M.T. (2004). Ranking of alternatives with ordered weighted averaging operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 19, pp. 473-482, DOI: <https://doi.org/10.1002/int.20002>.

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 (3-4), pp. 351-361.

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), pp. 2879-2893.

Lee A.H.I., Kang H.-Y., Lin C.-Y. & Shen, K.-C. (2015). An Integrated Decision-Making Model for the Location of a PV Solar Plant, *Sustainability*, pp. 13522-13541, <https://doi.org/10.3390/su71013522>.

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

Liu, A., Dong, L. & Dong, L. J. (2010). Optimization model of unascertained measurement for underground mining method selection and its application. *Journal of Central South University of Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 17 (4), pp 744-749.

Mikaeil R., Naghadehi M. Z., Ataei M., Khalokakaie R. (2009). A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method. *Faculty of mining, petroleum and geophysics, Shahrood University of technology, Iran*, 54 (2), pp. 349-368.

Milićević Ž., Milić V. & Svrkota I. (2012). Problemi pri primeni metode podetažnog zarušavanja u jami Bor. Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Rudarski radovi, br. 4 pp. 283-292, YU ISSN: 1451-0162.

Milićević Ž. (2007). Potrebna investiciona ulaganja za revitalizaciju podzemne eksploatacije u jami Bor. Komitet za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina Resavica RTB Bor Institut za bakar Bor, Rudarski radovi, br. 1 pp.76-82, YU ISSN: 1451-0162.

Miljković M., Stanojlović R. & Sokolović J. (2012). Sigurnosne i deformacione karakteristike zasipnih materijala u rudnicima. Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Rudarski radovi, br. 2 pp. 13-20, YU ISSN: 1451-0162.

Naghadehi M. Z., Mikaeil R. & Ataei M. (2009). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. Expert Systems with Applications, pp. 8218-8226.

Nikolić I. & Borović S. (1996). Višekriterijumska optimizacija – metode, primena u logistici, softver. Centar vojnih škola Vojske Jugoslavije, Beograd, pp. 15-17.

Okubo S. & Yamatomi J. (2013). Underground mining methods and equipment, CIVIL ENGINEERING, 2.

Opricović S. (1992). Optimizacija sistema. Nauka i Građevinski fakultet, Beograd.

Opricović S. (1998). Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu. Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, pp. 142-158, ISBN 86-80049-82-4.

Özfirat M. K. (2012). A fuzzy method for selecting underground coal mining method considering mechanization criteria. Journal of Mining Science, 48 (3), pp 533–544, <https://doi.org/10.1134/S1062739148030173>.

Petković Lj. D. (2016). Izbor biomaterijala - višekriterijumska analiza i razvoj sistema za podršku odlučivanju. Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Doktorska disertacija.

Petrović D., Svrkota I., Stojadinović S., Milić V., Pantović R. & Milićević Ž. (2012). Rudno telo „Borska Reka“, budućnost eksploatacije u borskoj jami. Podzemna eksploatacija 21, Rudarsko – geološki fakultet Beograd, pp. 1-7, YU ISSN03542904.

Petrović D., Milić V., Svrkota I., Stojadinović S. & Denić M. (2015). Possibility of application of backfill methods with cementing fill in ore body “Borska reka“. Underground mining engineering 27, University of Belgrade – Faculty of mining and geology, pp. 1-10, YU ISSN03542904.

Pipatprapa A., Huang H.-H & Huang C.-H (2016). A Novel Environmental Performance Evaluation of Thailand's Food Industry Using Structural Equation Modeling and Fuzzy Analytic Hierarchy Techniques. Sustainability, <https://doi.org/10.3390/su8030246>.

Polomčić D., Gligorić Z., Bajić D., Gligorić M. & Negovanović M. (2019). Multi-criteria fuzzy-stochastic diffusion model of groundwater control system selection. Symmetry, 11(5), DOI: 10.3390/sym11050705.

Popović G., Milanović D. & Mihajlović D. (2018). Prioritizacija kriterijuma za izbor metode eksploatacije bakra, 8. Međunarodni simpozijum o upravljanju prirodnim resursima, Zaječar, Srbija, 19 maj, pp. 250-256. Fakultet za Menadžment, Zaječar.

- Popović G., Đorđević B. & Milanović D. (2019). Multiple Criteria Approach in the Mining Method Selection. 47.(4), pp. 47-62, DOI:10.5937/industrija47-24128.
- Rao, R.V. (2007) Decision Making in the Manufacturing Environment, Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods, Springer-Verlag.
- Saaty T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill, New York, NY.
- Saaty T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48(1), pp. 9-26.
- Sheshpari M. (2015). A Review of Underground Mine Backfilling Methods with Emphasis On Cemented Paste Backfill.EJGE, Vol. 20, No 13, pp. 5183-5208.
- Štrbac D. & Milićević Ž. (2006). Review of the Previously Considered Mining Solutions for the ore body „Borska Reka“. RMZ Materials and Geoenvironment, 53, (1), pp. 121-142.
- Stojanović S. (2016). Razvoj modela za evaluaciju internet informacionih resursa primenom metoda višekriterijskog odlučivanja. Univerzitet „Džon Nežbit“ u Beogradu, Fakultet za menadžment Zaječar, Doktorska disertacija, pp. 52-55.
- 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.
- Torbica S. & Petrović N. (1997). Metode i tehnologija podzemne eksploatacije neslojevitih ležišta. Priručnik u nastavi, Rudarsko – geološki fakultet Beograd, ISBN 86-7352-010-X.
- Van Laarhoven P.J.M. & Pedreyz W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy Sets and Systems, 11, pp. 229-241.
- Van Broekhoven E. (2004). A comparison of three methods for computing the center of gravity defuzzification. Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems, 3(3), pp. 1537-1542, DOI: 10.1109/FUZZY.2004.1375403.
- Yavuz M. (2015). The application of the analytic hierarchy process (AHP) and Yager's method in underground mining method selection problem. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 29 (6), pp. 453-475, <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.895218>.
- Yavuz M. & Alpay Ş. (2003). Guideline for DSS System for Underground Mining Method Selection. International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET pp. 347-349, ISBN 975-395-605-3.
- Yazdani-Chamzini, A., Yakchali, S. H. & Zavadskas, E. K. (2012). Using a integrated MCDM model for mining method selection in presence of uncertainty. Economic Research, pp. 869-904.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and control, 8 (3), pp. 338-353.
- Zadeh L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, 8 (3), pp. 199-249, [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).
- 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, [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00331-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00331-2).

Biografski podaci:

Sanja Bajić rođena je 15. aprila 1986. godine u Kikindi. Srednju školu, gimnazija (opšti smer) "Dušan Vasiljev", je završila u Kikindi 2005. god. Polazi na studije od oktobra 2005. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer inženjerstvo zaštite životne sredine, a diplomirala je, 05. oktobra 2009. godine, sa prosečnom ocenom 8,04 (skala od 6 do 10) i stekla zvanje Diplomirani inženjer zaštite životne sredine.

Oktobra 2009. godine upisala je master studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, naučna oblast zaštita životne sredine. Diplomirala je 25.02.2011 sa ocenom 10 (skala 6-10), sa opštim uspehom 9.11 (skala 6-10) i stekla zvanje Master - inženjer zaštite životne sredine.

Oktobra 2011. godine upisala je doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, naučna oblast, rudarsko inženjerstvo.

Stipendista je Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja republike Srbije od marta 2012. godine do marta 2016. godine.

Od marta 2016. god. zaposlena je kao istraživač-pripravnik na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod nazivom: Izučavanje mogućnosti valorizacije preostalih rezervi uglja u cilju obezbeđenja stabilnosti energetskeg sektora Republike Srbije.

Na doktorskim akademskim studijama predviđenim akreditovanim programom ispunila je sve obaveze, obzirom da je položila sve ispite (15) sa prosečnom ocenom 9.33 i ostvarila 155 ESPB.

Učestvovala je na nekoliko domaćih i međunarodnih naučnih konferencija i simpozijuma i kao autor i koautor objavila je 21 rad na domaćim i međunarodnim naučnim i stručnim skupovima.

Od januara 2020. godine stiče zvanje istraživač-saradnik.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime: **Sanja Bajić**

broj indeksa: **R 702/11**

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Model za kompleksno tretiranje efekata podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina u cilju podrške odlučivanju

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, 04.04.2020. god.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: **Sanja Bajić**

Broj indeksa: **R 702/11**

Studijski program: **Rudarsko inženjerstvo**

Naslov rada: **Model za kompleksno tretiranje efekata podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina u cilju podrške odlučivanju**

Mentor: **Prof. dr Branko Gluščević**

Izjavlju jem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, 04.04.2020. god.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Model za kompleksno tretiranje efekata podzemne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina u cilju podrške odlučivanju

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis autora

U Beogradu, 04.04.2020. god.

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

