

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Jelena M. Ignjatović

**STOHAŠTIČKI MODEL ZA UPRAVLJANJE  
KVALITETOM PRI RADU DISKONTINUALNOG  
SISTEMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Jelena M. Ignjatović

**STOCHASTIC MODEL FOR QUALITY  
MANAGEMENT IN THE OPERATION OF  
TRUCK - SHOVEL SYSTEMS IN SURFACE  
MINING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

**Mentor:**

dr Dejan Stevanović, vanredni profesor  
Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

**Članovi komisije:**

dr Tomislav Šubaranović, redovni profesor  
Uža naučna oblast: Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

dr Mirjana Banković, docent  
Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

dr Daniel Kržanović, viši naučni saradnik  
Uža naučna oblast: Tehničko-tehnološke nauke-Rudarstvo  
Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

*Posvećeno Irini, Kalini i Ivoni*

*Dijamanti se ne nalaze na površini; do njih se stiže radom, upornošću i čvrstim karakterom. Želim vam da uvek pronađete tu unutrašnju snagu i da sijate najsajnije, bez obzira na to koliko je teren težak.*

*Budite svoje, budite radoznale i uvek gradite sopstvene puteve.*

## **Zahvalnica**

Izradu ove doktorske disertacije ne bih mogla da ostvarim bez podrške, pomoći i razumevanja ljudi koji su me pratili tokom ovog dugog i zahtevnog puta.

Najpre izražavam iskrenu zahvalnost svom mentoru na stručnoj pomoći, korisnim sugestijama, strpljenju i podršci tokom svih faza izrade ove disertacije. Njegovo znanje, iskustvo i usmerenja bili su od izuzetnog značaja za oblikovanje istraživačkog pristupa i konačnu realizaciju rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj porodici na безусловnoj ljubavi, strpljenju, razumevanju i podršci tokom svih godina školovanja i rada. Njihova vera u mene bila je moja najveća snaga i oslonac u trenucima kada je bilo najteže. Ova disertacija pripada i njima.

Zahvaljujem se svojim prijateljima koji su bili uz mene tokom ovog dugog i zahtevnog puta. Njihova podrška i ohrabrenje pomogli su mi da istrajem.

Veliku zahvalnost upućujem i kolegama i saradnicima na razumevanju, profesionalnoj podršci i pomoći u usklađivanju poslovnih obaveza sa radom na disertaciji.

Na kraju, posebnu zahvalnost dugujem svojoj strini, koja me je podržavala i verovala u mene na način koji nikada neću zaboraviti.

## **Stohastički model za upravljanje kvalitetom pri radu diskontinualnog sistema na površinskim kopovima**

### **Sažetak**

Upravljanje kvalitetom rude predstavlja jedan od ključnih zadataka u procesu površinske eksploatacije, jer neposredno utiče na stabilnost proizvodnje i usaglašenost sirovine sa zahtevima prerade i ukupnu vrednost projekta. U uslovima rada diskontinualnog sistema na površinskim kopovima ovaj problem dobija poseban značaj, budući da je neophodno istovremeno uskladiti geološke karakteristike i potencijal ležišta, proizvodni kapacitet i karakteristike opreme, raspoloživost aktivnih radilišta (kopova) sa kvalitetom zahtevanim od strane prerade. Poseban izazov javlja se na nivou kratkoročnog, odnosno smenskog planiranja, gde dugoročno definisani ciljevi moraju biti prevedeni u tehnički izvodljiva i kvalitativno prihvatljiva operativna rešenja. U ovoj disertaciji razvijen je stohastički model operativnog planiranja zasnovan na primeni genetskog algoritma, sa ciljem optimizacije eksploatacije po smenama u uslovima višestrukih tehnoloških i kvalitativnih ograničenja. Model obuhvata realne uslove rada rudarskog sistema, povezujući smenski kapacitet, ograničen broj istovremeno aktivnih površinskih kopova (radilišta) i zahteve u pogledu kvaliteta rude. Funkcija cilja formulisana je tako da minimizuje odstupanja od ciljanog kvaliteta uz istovremeno racionalno korišćenje raspoloživih rezervi. Predloženi model testiran je na studiji slučaja, a dobijeni nalazi potvrđuju da razvijeni pristup može da obezbedi stabilnije i ravnomernije operativno planiranje, kao i efikasnije usklađivanje kratkoročnih odluka sa dugoročnim ciljevima eksploatacije. Model je implementiran u Excel/Visual Basic for Applications (VBA) okruženju, čime je omogućena njegova praktična primena u uslovima svakodnevnog inženjerskog rada.

**Ključne reči:** stohastički modeli, genetski algoritam, površinska eksploatacija, kontrola kvaliteta, operativno planiranje, upravljanje kvalitetom, diskontinualni sistem

### **Naučna oblast:**

Rudarsko inženjerstvo

### **Uža naučna oblast:**

Projektovanje i planiranje površinskih kopova

**UDK: 622.015:519.214(043.3)**

## **Stochastic model for quality management in the operation of truck - shovel systems in surface mining**

### **Abstract**

Ore quality management represents one of the key tasks in the open-pit mining process, as it directly affects production stability and the compliance of raw material with processing plant quality requirements and the total project value. Under the operating conditions of a truck-shovel system in open-pit mines, this problem becomes particularly important, as it is necessary to simultaneously reconcile the geological characteristics and potential of the deposit, production capacity, equipment characteristics, and the availability of active locations (pits) while satisfying the quality requirements of the processing plant. A particular challenge arises at the short-term planning level, that is, shift planning, where long-term defined objectives must be translated into technically feasible and qualitatively acceptable operational solutions. This dissertation develops a stochastic operational planning model based on the application of a genetic algorithm, with the aim of optimizing shift-by-shift mining under multiple technological and quality-related constraints. The model reflects realistic operating conditions of the mining system by integrating shift capacity, a limited number of simultaneously active open pits (locations), and ore quality requirements. The objective function is formulated to minimize deviations from the target quality while simultaneously ensuring the rational utilization of available reserves. The proposed model was tested through a case study, and the obtained findings confirm that the developed approach can provide more stable and uniform operational planning, as well as a more efficient alignment of short-term decisions with long-term mining objectives. The model was implemented in the Excel/Visual Basic for Applications (VBA) environment, which enables its practical application in everyday engineering practice.

**Keywords:** stochastic model, genetic algorithm, open-pit mining, quality control, operational planning, quality management, truck-shovel system

### **Scientific field:**

Mining Engineering

### **Scientific Subfield:**

Open Pit Planning and Design

**UDC: 622.015:519.214(043.3)**

## Sadržaj

1	Uvod.....	1
1.1	Značaj i cilj istraživanja .....	4
1.2	Polazne hipoteze .....	5
1.3	Očekivani naučni doprinos.....	6
1.4	Metodologija istraživanja.....	7
1.5	Sistematizacija disertacije sa kratkim opisom poglavlja.....	8
2	Pregled literature .....	10
3	Teorijske osnove problema .....	20
3.1	Upravljanje kvalitetom.....	23
3.2	Utovarno-transportna mehanizacija na površinskim kopovima.....	26
3.2.1	Diskontinualni sistemi eksploatacije.....	28
3.3	Osnovni matematički modeli u rudarstvu .....	47
3.3.1	Deterministički modeli.....	49
3.3.2	Stohastički modeli.....	52
3.4	Genetski algoritmi.....	55
3.5	Proces planiranja u rudarstvu.....	59
3.5.1	Uloga operativnog planiranja.....	62
4	Razvoj i matematička formulacija modela.....	65
4.1	Struktura genoma .....	69
4.2	Operativna ograničenja i odabir skupa aktivnih površinskih kopova.....	69
4.3	Funkcija cilja.....	73
5	Studija slučaja i primena stohastičkog modela .....	76
6	Rezultati istraživanja.....	83
6.1	Rezultati manuelnog plana.....	83
6.2	Rezultati stohastičkog algoritma .....	85
6.3	Poređenje modela.....	90
7	Ograničenja modela i pravci daljeg istraživanja .....	93
8	Zaključak.....	95
	Literatura.....	98

## Spisak slika:

Slika 1-1 Konceptualna šema modela za upravljanje kvalitetom .....	3
Slika 1-2 Struktura disertacije.....	9
Slika 3-1 Ilustrovani prikaz površinskog kopa .....	21
Slika 3-2 Organizaciona šema rudnika .....	22
Slika 3-3 Podela utovarno-transportnih sistema .....	27
Slika 3-4 Rad bagera i transportnog sredstva u okviru utovarno-transportnog sistema na površinskom kopu. ....	29
Slika 3-5 Prikaz procesa kopanja sa hidrauličnim i sa užetnim bagerom kašikarom .....	32
Slika 3-6 Radni parametri bagera kašikara .....	37
Slika 3-7 Hidraulični bager .....	38
Slika 3-8 Bager dreglajn .....	39
Slika 3-9 Radni parametri bagera dreglajna.....	39
Slika 3-10 a-tegljači sa poluprikolicom, b-tegljač sa prikolicom, v-damper .....	41
Slika 3-11 Način određivanja širina puta.....	42
Slika 3-12 Blok model ležišta .....	48
Slika 3-13 Blok model ležišta-rudni blokovi, označeni prema kvalitetu.....	48
Slika 3-14 Algoritam simuliranog kaljenja .....	54
Slika 3-15 Dijagram toka genetskog algoritma.....	56
Slika 3-16 Završna kontura površinskog kopa.....	60
Slika 3-17 Završna kontura sa rudnim blokovima označenim prema kvalitetu.....	60
Slika 3-18 Faze planiranja rudarskih operacija.....	63
Slika 4-1 Dijagram toka genetskog algoritma za optimalno planiranje eksploatacije po smenama diskontinualnim sistemom .....	67
Slika 5-1 Lokacija osam površinskih kopova limonitne rude.....	77
Slika 5-2 3D model površinskih kopova limonitne rude .....	78
Slika 6-1 Koraci pri razvijanju manualnog plana .....	83
Slika 6-2 Distribucija sadržaja Fe kroz 1.000 smena.....	86
Slika 6-3 Distribucija sadržaja Fe kroz 1.000 smena.....	86
Slika 6-4 Distribucija sadržaja SiO <sub>2</sub> kroz 1.000 smena .....	87
Slika 6-5 Distribucija sadržaja SiO <sub>2</sub> kroz 1.000 smena .....	87

## Spisak tabela:

Tabela 3-1 Uslovi primene kamionskog transporta .....	41
Tabela 4-1 Penali korišćeni u genetskom algoritmu .....	75
Tabela 5-1 Prosečne vrednosti Fe i SiO <sub>2</sub> po površinskom kopu.....	79
Tabela 5-2 Vrednosti korišćenih parametara .....	81
Tabela 5-3 Uticaj broja generacija na brzinu genetskog algoritma .....	82
Tabela 6-1 Neusaglašene smene plana generisanog uz pomoć stohastičkog algoritma .....	88
Tabela 6-2 Distribucija svakog pojedinačnog površinskog kopa unutar GA plana.....	89
Tabela 6-3 Poređenje manuelnog i plana generisanog genetskim algoritmom .....	90
Tabela 6-4 Distribucija otkopanih masa i performanse kvaliteta za scenarije uvećanog kapaciteta .....	91

# 1 Uvod

Površinska eksploatacija podrazumeva skup tehnoloških operacija na koje utiče širok spektar faktora, uključujući geološke, tehničke, ekonomske, ekološke i socijalne uslove. Ovakvo kompleksno okruženje čini proces planiranja teškim i izazovnim. Zbog takve složenosti, planiranje rudarskih operacija ne može se posmatrati kao statičan zadatak raspodele rezervi, već kao proces stalnog usklađivanja proizvodnih ciljeva sa realnim ograničenjima sistema. Osnovni zahtevi koji se pri tome postavljaju odnose se na racionalno korišćenje mineralnih rezervi, ostvarenje planiranog kapaciteta proizvodnje i održavanje kvaliteta rude u granicama prihvatljivim za dalju preradu.

Upravljanje kvalitetom ne može se svesti samo na proveru gotovog proizvoda, jer se kvalitet sirovine u najvećoj meri oblikuje kroz odluke donete tokom eksploatacije i mešanja materijala. Stabilan kvalitet je posledica planskog vođenja procesa mešanja rude i pravilnog izbora parametara koji se u datom trenutku smatraju prioritetnim. Složenost upravljanja kvalitetom raste sa brojem parametara koje je potrebno istovremeno zadovoljiti zbog toga ono postaje važan deo operativnog odlučivanja [1].

Uloga planiranja u procesu upravljanja kvalitetom na površinskim kopovima predstavlja prvu i kritičnu fazu procesa kontrole kvaliteta (engl. *grade control*) [2]. Proces upravljanja kvalitetom najracionalnije je sprovoditi direktno na kopu, budući da se u toj fazi eksploatacije, kroz pravovremeni izbor radilišta, selektivno otkopavanje i odgovarajuće usmeravanje transporta, obezbeđuje usaglašenost sirovine sa zahtevima prerade uz minimalne naknadne korekcije. Takođe, proces najčešće prevazilazi samu optimizaciju redosleda otkopavanja; on podrazumeva niz postupaka mešanja koji se sprovode u tri faze: selektivno otkopavanje na samom kopu, kontrola kvaliteta tokom transporta materijala (rude) i mešanje na deponijama ili drobilicama pre ulaska u postrojenje za preradu [3,4]. Na tom nivou odlučivanja, kvalitet rude prestaje da bude samo geološka karakteristika ležišta i postaje operativna kategorija koja neposredno utiče na stabilnost proizvodnje, iskorišćenje u preradi i ukupnu ekonomsku efikasnost rudarskog sistema.

Efikasna implementacija procedura mešanja rude u ranoj fazi planiranja može značajno smanjiti ili čak eliminisati potrebu za naknadnom manipulacijom materijalom, čime se direktno redukuje tehnološka složenost procesa i troškovi. Diskontinualni sistemi su naročito pogodni za selektivno otkopavanje i mešanje rude, jer omogućavaju efikasno razdvajanje materijala sa različitim karakteristikama kvaliteta. Shodno tome, oni se smatraju preferiranim pristupom za ležišta sa složenom geološkom građom [5]. U ležištima sa promenljivim sadržajem korisnih komponenti i prisustvom štetnih primesa, ovakvi sistemi omogućavaju bolje razdvajanje materijala različitog kvaliteta i efikasnije formiranje mešavine koja odgovara zahtevima prerade i ostaju primarno rešenje [4–7].

Upravljanje kvalitetom rude predstavlja temelj savremenog planiranja površinskih kopova, budući da promene u koncentracijama korisnih komponenti i štetnih primesa direktno utiču na stepen iskorišćenja u preradi, energetska efikasnost i ukupnu stabilnost tehnološkog procesa. Savremeni pristupi ne tretiraju kvalitet kao pojedinačni atribut, već kao multidimenzionalni skup parametara koji kolektivno definišu ponašanje rude tokom prerade [8,9].

Sušтина upravljanja kvalitetom nije u tome da se povremeno postigne visoka vrednost korisne komponente, već da se promenljivost rude drži pod kontrolom kako bi se izbegla odstupanja koja remete rad postrojenja i smanjuju pouzdanost proizvodnje [8]. Mešanjem visokokvalitetne rude sa partijama čiji je sadržaj ispod graničnog (koje bi se u suprotnom klasifikovale kao jalovina), mogu se povećati ukupne eksploatacione rezerve [10].

Literatura o planiranju na površinskim kopovima naglašava da je upravljanje kvalitetom kompleksno, jer operativni rudarski plan mora istovremeno zadovoljiti proizvodne ciljeve, kapacitete, tehnološka ograničenja i obezbediti stabilan kvalitet za postrojenje za preradu. Složenost rudarskih operacija zahteva niz diskretnih odluka, pri čemu svaka doneta odluka menja preostale rezerve i buduću fleksibilnost sistema. S obzirom na to da kvalitet rude može značajno uticati na dinamiku proizvodnje, ističe se potreba za primenom stohastičkih modela u planiranju rudarskih operacija [2]. Štaviše, kombinacija prostorne zavisnosti, vremenske dinamike i diskretnosti predstavlja snažan motiv za primenu metaheurističkih pristupa [11].

Dugoročno planiranje definiše opšti pravac rudarskih operacija (granice kopa, godišnje količine rude i jalovine, metode eksploatacije i dinamiku rudarskih radova). Međutim, tek na operativnom nivou postaje jasno da li se ovi planovi zaista mogu realizovati sa raspoloživom opremom i u okviru zadatih ograničenja kvaliteta [2,12–14]. U praksi, dugoročni plan koji deluje finansijski isplativo i atraktivno često postaje vrlo izazovan onog momenta kada se razloži na mesečne, nedeljne i smenske planove rada. Ograničenja koja se javljaju kao tipična za rudarske radove su: otežan pristup površinskim kopovima, ograničenja u pogledu broja i rasporeda otkopne i utovarne opreme, kao i varijacije u kvalitetu rude [13,15–17].

Upravo na operativnom nivou dolazi do najizraženijeg sudara između planiranog i ostvarivog. Umesto tretiranja planiranja proizvodnje kao izolovanog procesa, neophodno je usvojiti integrisani pristup koji, kroz dvofazni model optimizacije, vrši simultanu sinhronizaciju operativnog rasporeda mehanizacije i rasporeda radne snage [18]. Pored toga, noviji integrisani modeli optimizacije su pokazali da kombinovanje planiranja proizvodnje sa detaljnim planiranjem ruta transporta može dodatno smanjiti operativnu varijabilnost i značajno sniziti jedinične troškove otkopavanja [19].

Uprkos svom značaju, operativno planiranje je u savremenoj literaturi često potisnuto u podređenu ulogu i tretirano isključivo kao podrška dugoročnim odlukama, umesto da bude nezavistan fokus naučnog istraživanja. Sve je izraženija potreba da se operativno planiranje posmatra kao podjednako važan istraživački problem i kao proces kroz koji se dugoročni plan kontinuirano validira i, po potrebi, koriguje. Ovo se može postići korišćenjem optimizacionih i stohastičkih modela sposobnih da generišu više scenarija proizvodnje i kvaliteta [2,11,15–17].

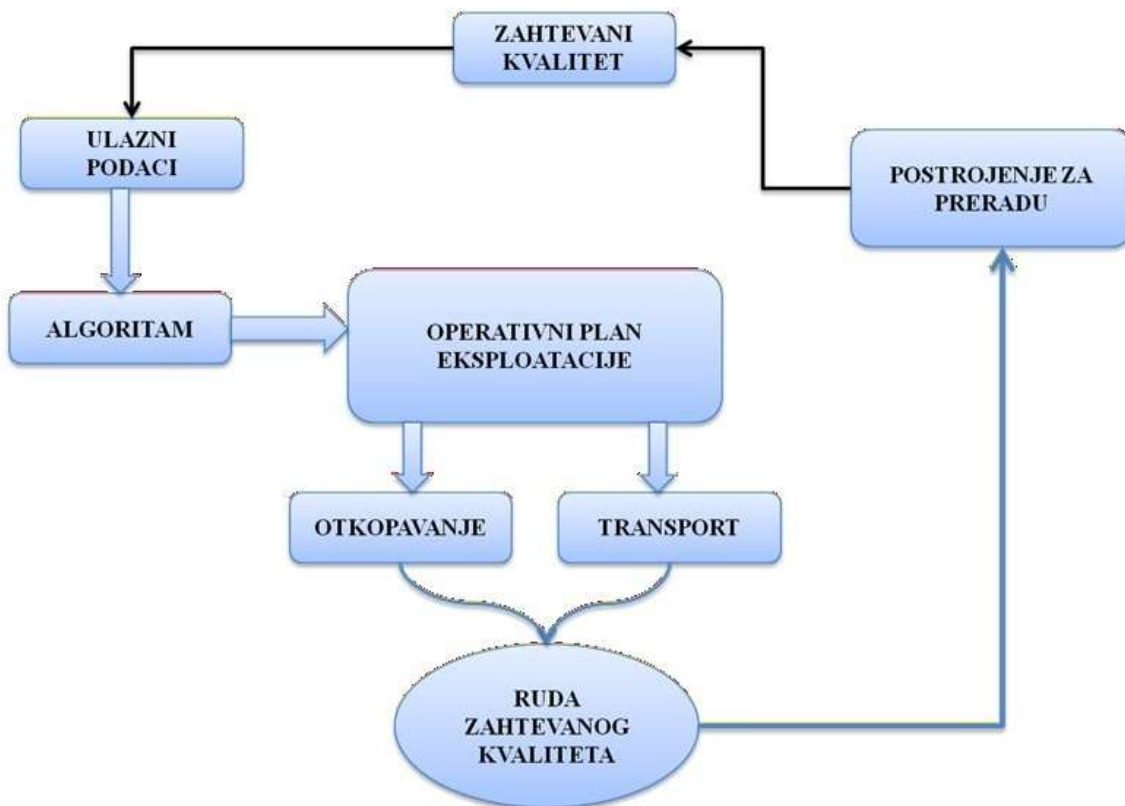
U operativnom planiranju, upravljanje kvalitetom je naročito zahtevno zbog uporednog otkopavanja blokova iz različitih delova ležišta sa heterogenim sadržajima. Napravljani planovi proizvodnje moraju ne samo da zadovolje zahteve prerade, već i da ostanu dosledni dugoročnim strateškim ciljevima upravljanja rezervama [14]. Preferiraju se fleksibilni heuristički pristupi, pošto se operativno planiranje često predstavlja kao dobar zadatak za višekriterijumsku optimizaciju [2,11]. Operativno planiranje deluje kao vitalna spona između dugoročnih strateških ciljeva i planiranja po smenama, gde se specifični detalji moraju precizirati kako bi se istovremeno ispunili planirani proizvodni kapaciteti i ograničenja kvaliteta [12].

Zbog diskretne prirode problema, vremenske dinamike sistema i potrebe da se istovremeno zadovolji više ciljeva, sve veći značaj dobijaju heuristički i metaheuristički pristupi. Među njima, genetski algoritmi zauzimaju posebno mesto, jer omogućavaju modelovanje kombinatornih i višekriterijumskih problema kroz evolutivno pretraživanje prostora rešenja. Oni pripadaju klasi evolucionih algoritama i predstavljaju savremeni optimizacioni pristup inspirisan biološkim principima prirodne selekcije i genetike [20,21]. Za razliku od klasičnih optimizacionih modela, genetski algoritmi mogu da obrađuju diskretne, kombinatorne i višekriterijumske strukture rešenja, što ih čini superiornim optimizacionim alatom za modeliranje izuzetno složenih rudarskih procesa.

Polazeći od navedenih činjenica, u ovoj disertaciji razmatra se upravljanje kvalitetom rude kroz operativno planiranje rada diskontinualnog sistema na površinskim kopovima. Predmet istraživanja je razvoj stohastičkog modela zasnovanog na genetskom algoritmu, namenjenog

planiranju eksploatacije po smenama u uslovima višestrukih tehnoloških i kvalitativnih ograničenja. Model integriše kapacitet proizvodnje po smeni, broj istovremeno aktivnih površinskih kopova i zahteve kvaliteta rude, definisane kroz ciljani opseg sadržaja gvožđa i maksimalno dozvoljeni sadržaj silicijum-dioksida.

Na slici 1-1 je prikazana konceptualna šema upravljanja kvalitetom u diskontinualnom sistemu.



Slika 1-1 Konceptualna šema modela za upravljanje kvalitetom

Prikazana šema predstavlja konceptualni tok istraživanja razvijenog u disertaciji, u kome su upravljanje kvalitetom rude i operativno planiranje objedinjeni u jedinstven sistem odlučivanja. Polaznu osnovu čine ulazni podaci, koji obuhvataju kvalitativne i kvantitativne karakteristike rude, raspoloživost aktivnih kopova i tehničke parametre diskontinualnog sistema. U ulazne podatke spadaju i kvalitativni zahtevi koje postavlja postrojenje za preradu. Ovi podaci se ubacuju u algoritam i na osnovu njih on formira operativni plan otkopavanja, kojim se definišu odluke o angažovanju radilišta i realizaciji proizvodnje na nivou smene.

Tako formiran plan neposredno usmerava proces eksploatacije i transporta kamionima, odnosno ključne operacije diskontinualnog sistema koje određuju stvarni tok materijala od kopa ka postrojenju za preradu. U šemi je posebno naglašeno da zahtevani kvalitet nije slučajni izlaz procesa, već rezultat planskog usklađivanja otkopavanja i transporta sa unapred definisanim uslovima kvaliteta koje postavlja postrojenje za preradu. Na taj način kvalitet postaje upravljačka kategorija u okviru operativnog planiranja.

Sušтина ovakvog koncepta jeste da se između proizvodnog sistema i postrojenja za preradu uspostavlja funkcionalna veza. Prerada definiše granice prihvatljivog kvaliteta, dok stohastički model traži takvu kombinaciju eksploatacionih odluka koja omogućava ispunjenje tih zahteva uz istovremeno poštovanje proizvodnih i tehničkih ograničenja. Zbog toga šema jasno ilustruje ideju disertacije, odnosno da se upravljanje kvalitetom rude u uslovima rada diskontinualnog sistema ostvaruje kroz sam proces planiranja, eksploatacije i transporta, a ne tek nakon završetka proizvodnog ciklusa.

Prethodno objavljeni rad [22] predstavlja jednu od razvojnih faza istraživanja sprovedenog u okviru ove disertacije. Za potrebe doktorske disertacije metodologija je proširena tako da obuhvati celovit pregled literature, formalizaciju problema, detaljniji opis algoritamske implementacije i širu evaluaciju praktične primenljivosti modela.

Njegova primena prikazana je na studiji slučaja koja obuhvata osam površinskih kopova limonitne rude i planski horizont od 1.000 smena, pri čemu se dobijena rešenja porede sa planom zasnovanim na inženjerskoj proceni i iskustvu.

## 1.1 Značaj i cilj istraživanja

U rudarskim sistemima gde se diskontinualna mehanizacija primenjuje radi ispunjenja strogih tehnoloških i metalurških zahteva, strateški izbor i raspored utovarno-otkopne mehanizacije imaju presudan uticaj na kvalitet finalnog proizvoda. Eksploatacija se u realnim uslovima vrši duž više otkopnih frontova različitih geoloških karakteristika. Kroz smanjenje ili povećanje kapaciteta u nekom kratkom vremenskom intervalu, može se upravljati kvalitetom na samom površinskom kopu. Koliko rude će se otkopati sa kog radilišta zavisi od geoloških i tehnoloških karakteristika, ali i zahtevanih parametara.

Tehnološki i operativni značaj utemeljen je u činjenici da je predmet analize diskontinualni sistem eksploatacije, u kome fleksibilnost utovara i transporta omogućava selektivnije otkopavanje i veći stepen kontrole kvaliteta rude [4–7,10]. U uslovima kada se eksploatacija odvija na više prostorno odvojenih kopova, a kvalitet rude varira između pojedinih radnih frontova, odluke o tome sa kojih će se lokacija materijal otkopavati i u kom obimu direktno određuju mogućnost formiranja kvalitativno prihvatljive mešavine za preradu [2,8,9]. Zbog toga upravljanje kvalitetom rude u takvom sistemu ne predstavlja naknadnu korekciju proizvodnje, već sastavni deo svih faza, a pogotovo operativnog planiranja.

Iako dugoročni planovi određuju granice kopa, dinamiku radova i okvirne količine rude i jalovine, tek se na operativnom nivou pokazuje da li je takve planove moguće dosledno realizovati uz raspoloživu mehanizaciju, u zadatim uslovima rada i uz istovremeno poštovanje zahteva kvaliteta rude [2,12–14]. U praksi, upravo kratkoročno planiranje predstavlja ključnu sponu između geološkog modela, proizvodnih zahteva i tehnoloških mogućnosti sistema, zbog čega ono ne može biti svedeno na jednostavnu razradu dugoročnog plana, već mora biti tretirano kao poseban optimizacioni problem [11,15–19,23,24].

S obzirom da rudarski sistemi funkcionišu u uslovima izražene promenljivosti i neizvesnosti, javlja se potreba za modelima koji su sposobni da obuhvate operativnu dinamiku proizvodnje, kvalitativna ograničenja i međuzavisnost odluka u okviru jednog fleksibilnog optimizacionog postupka. U tom kontekstu, primena metaheurističkih metoda, a posebno stohastičkog pristupa, pokazuje se kao metodološki opravdana, jer omogućava rešavanje složenih kombinatornih problema sa većim brojem tehnoloških i kvalitativnih ograničenja [20,21,25–29].

Iako su u literaturi razvijeni brojni modeli za planiranje površinske eksploatacije, manji je broj istraživanja koja u jedinstvenom okviru povezuju operativno planiranje po smenama, ograničenja diskontinualnog sistema i upravljanje kvalitetom rude na nivou više aktivnih kopova [8,9,11,15–17]. U disertaciji se razmatra simultana optimizacija eksploatacije sistemom bager-kamion većeg broja manjih i međusobno lokacijski odvojenih površinskih kopova, uz striktno poštovanje zahteva prerade u pogledu sadržaja korisnih i štetnih komponenti. Zbog toga ovo istraživanje ima i teorijski i praktični značaj, jer doprinosi razvoju modela koji su bliži stvarnim uslovima rada rudarskih sistema.

Osnovni cilj istraživanja jeste razvoj stohastičkog modela za upravljanje kvalitetom, zasnovanog na primeni genetskog algoritma, koji će kroz definisanje parametara rada diskontinualnog sistema, omogućiti zahtevani kvalitet rude uz istovremeno ostvarivanje drugih zadatih ograničenja (kapacitet, broj aktivnih radilišta,...). Formirani model treba da posluži kao alat za podršku odlučivanju u uslovima rada diskontinualnog sistema, gde su količina, kvalitet i raspoloživost eksploatacionih resursa međusobno uslovljeni. Uvođenjem modela u proces odlučivanja, smanjuje se uticaj subjektivnih stavova inženjera.

Model treba da identifikuje i kvantifikuje parametre koji su od značaja za upravljanje kvalitetom pri radu diskontinualnog sistema, da matematički definiše ograničenja vezana za zahteve kvaliteta i kapaciteta, i osobina ležišta i da ih poveže u jedinstveni algoritam. Krajnji ishod primene modela je generisanje optimalnog plana otkopavanja (šema rada diskontinualnog sistema) koji će uvažiti zahtevani kvalitet prerade.

Bitan aspekt istraživanja jeste i komparativna analiza tj. dokaz da primena stohastičkog modela, konkretno genetskog algoritma, može da obezbedi kvalitetnija i operativno stabilnija rešenja u odnosu na manuelno formiran plan eksploatacije zasnovan na inženjerskoj proceni i iskustvu. Na taj način se omogućava ne samo teorijska validacija razvijenog modela, već i procena njegove praktične vrednosti u realnim uslovima rudarskog sistema.

Kroz ovaj model se pokazuje da li se upravljanje kvalitetom rude može uspešno integrisati u operativno planiranje eksploatacije, tako da kvalitet ne bude posmatran kao posledica rudarskih odluka, već kao optimizacioni uslov radi koga se te odluke donose. Time se doprinosi disertaciji ogleđa u uspostavljanju modela koji povezuje zahteve proizvodnje, tehnološka ograničenja i kvalitet mineralne sirovine u jedinstven sistem optimizacije, prilagođen uslovima rada diskontinualnog sistema na površinskim kopovima.

## **1.2 Polazne hipoteze**

Polazeći od teorijskih osnova problema, pregleda relevantne literature i definisanog predmeta istraživanja, u disertaciji se postavlja osnovna hipoteza:

Razvojem i primenom stohastičkog modela optimizacije moguće je formirati operativni plan rada diskontinualne mehanizacije na površinskom kopu, kojim se, u uslovima definisanih tehnoloških, kapacitivnih i organizacionih ograničenja, garantuje postizanje zahtevanog kvaliteta rude namenjene daljoj preradi. Navedeno implicira da generisani operativni plan mora biti istovremeno tehnički izvodljiv, proizvodno održiv i usklađen sa zadatim kvalitativnim zahtevima.

U tom smislu, istraživanje je zasnovano na činjenici da se istovremenom eksploatacijom duž više radilišta (ležišta) različitog kvaliteta diskontinualnom tehnologijom na smenskom nivou može uticati na kvalitet finalne mešavine rude koja odgovara strogim zahtevima prerade. Kroz istraživanje se vidi da se operativno planiranje predstavlja kao samostalan optimizacioni problem u kome se istovremeno prepliću proizvodni, transportni i kvalitativni zahtevi.

Pored osnovne hipoteze, u disertaciji se postavljaju i pomoćne hipoteze koje omogućavaju precizniju proveru razvijenog modela.

Prva pomoćna hipoteza polazi od pretpostavke da je moguće formirati operativni plan po smenama kojim se, uz poštovanje ograničenja kapaciteta i broja istovremeno aktivnih kopova, obezbeđuje veća vrednost projekta kroz smanjenje tehnološke složenosti sistema eksploatacije, smanjenje troškova i potencijalno povećanje rezervi.

Druga pomoćna hipoteza zasniva se na pretpostavci da model zasnovan na genetskom algoritmu omogućava viši stepen usaglašenosti kvaliteta rude sa zadatim granicama u odnosu na manuelno formiran plan eksploatacije.

Na taj način hipoteze omogućavaju da se doprinos rada sagleda ne samo kroz opšti uspeh optimizacije, već i kroz proveru tehničke izvodljivosti, kvaliteta rešenja, operativne stabilnosti i potencijala za širu primenu modela

### **1.3 Očekivani naučni doprinos**

Predviđeni naučni doprinos ovog istraživanja proističe iz uspostavljanja potpuno novog metodološkog pristupa za upravljanje kvalitetom rude pri radu diskontinualnog sistema na površinskim kopovima, pri čemu su u jedinstven optimizacioni okvir objedinjeni zahtevi proizvodnog kapaciteta, raspoloživost aktivnih kopova i ograničenja kvaliteta rude.

Posebna vrednost istraživanja proizlazi iz činjenice da se problem razmatra na nivou smene, odnosno na planskom nivou na kome se strateški ciljevi eksploatacije proveravaju kroz realne mogućnosti angažovanja opreme i stvarne kvalitativne karakteristike materijala.

Doprinos se ogleda u razvoju stohastičkog modela zasnovanog na genetskom algoritmu, prilagođenog uslovima rada više manjih i međusobno udaljenih površinskih kopova limonitne rude. U odnosu na pristupe koje kvalitativne parametre posmatraju kao sekundarno ograničenje ili naknadni kriterijum kontrole, u ovom istraživanju kvalitet rude je ugrađen u samu logiku modela, kroz istovremeno praćenje ciljanog opsega sadržaja gvožđa (Fe) i maksimalno dozvoljenog sadržaja silicijum-dioksida ( $\text{SiO}_2$ ). Povezano je operativno planiranje, upravljanje kvalitetom i angažovanje utovarno-transportne opreme u jedinstven sistem odlučivanja.

Takođe, značajan doprinos ogleda se i u činjenici da su kroz razvoj modela identifikovan skup ograničenja i svi uticajni parametri kao i njihove dinamičke interakcije u vremenu i prostoru. U opštem smilu prepoznavanje i definisanje prirode, kao i uticaja navedenih parametara i ograničenja, predstavlja takođe naučni doprinos koji može poslužiti kao dobra osnova za dalje unapređenje konkretnog istraživanja i skupa problema iz oblasti površinske eksploatacije.

Ne treba zanemariti ni praktičan značaj razvijenog modela, koji se može svesti na razvoj alata sposobnog da rudarskim inženjerima pruži mogućnost da na kvalitetniji, brži i lakši način formiraju adekvatne operativne planove. Model u velikoj meri eliminiše subjektivne greške nastale u procesu planiranja i lak je za primenu jer je razvijen u okruženju široko zastupljene platforme Excel /Visual Basic for Applications (VBA).

Model je verifikovan na realnoj studiji slučaja i time je omogućena procena primenljivosti razvijenog pristupa u uslovima bliskim svakodnevnoj rudarskoj praksi, kao i poređenje dobijenih rezultata sa planom zasnovanim na inženjerskoj proceni i iskustvu.

## 1.4 Metodologija istraživanja

U ovoj disertaciji primenjena je metodologija istraživanja koja objedinjuje analizu literature, definisanje rudarskog problema, matematičko modelovanje, razvoj optimizacionog algoritma i verifikaciju modela na realnoj studiji slučaja.

Metodološki pristup zasniva se na kombinaciji teorijskog i primenjenog istraživanja. Teorijski deo obuhvata analizu relevantne naučne i stručne literature iz oblasti upravljanja kvalitetom rude, utovarno-transportnih sistema planiranja površinskih kopova, stohastičkog planiranja i primene genetskih algoritama u rudarskom inženjerstvu.

Na osnovu sprovedene analize literature definisan je istraživački okvir, identifikovan je istraživački jaz i postavljene su osnove za razvoj sopstvenog modela. Posebna pažnja posvećena je radovima koji razmatraju upravljanje kvalitetom, kratkoročno planiranje, i optimizaciju rudarskih operacija u uslovima neizvesnosti, jer upravo ti pravci predstavljaju teorijsku osnovu razvijenog pristupa.

Polazna osnova istraživanja jeste činjenica da se može uticati na kvalitet rude koja ulazi u postrojenje za preradu samo uz pomoć metode otkopavanja i transporta pri radu diskontinualnog sistema. Vremenski horizont koji se posmatra za upravljanje kvalitetom je na nivou smene i u skladu sa tim je usmeravano istraživanje. U primenjenom delu istraživanja problem je formulisan kao zadatak rada diskontinualnog sistema u cilj upravljanja kvalitetom po smenama, sa ciljem da se u svakom planskom periodu obezbedi traženi kapacitet proizvodnje i istovremeno održi kvalitet rude u zadatim granicama. Model je razvijen za diskontinualni sistem eksploatacije, u kome odluke o redosledu i obimu otkopavanja direktno utiču na konačni kvalitet mešavine rude. U tom smislu, definisani su ključni elementi modela: planski horizont, skup aktivnih površinskih kopova, raspoložive rezerve, kapacitet smene, kao i kvalitativna ograničenja izražena kroz ciljani opseg sadržaja gvožđa i maksimalno dozvoljeni sadržaj silicijum-dioksida. Na taj način je istraživački problem preveden u formalnu optimizacionu strukturu pogodnu za algoritamsko rešavanje.

Za rešavanje tako formulisanog problema izabran je genetski algoritam, kao metaheuristički pristup pogodan za diskretne, kombinatorne i višekriterijumske probleme [20,21,25,26]. Razlog za izbor ovog pristupa nalazi se u činjenici da operativno planiranje na površinskim kopovima uključuje veliki broj međusobno zavisnih odluka, pri čemu klasične egzaktne metode često postaju teško primenljive usled rasta dimenzionalnosti problema i složenosti ograničenja [11,24].

U okviru ovog istraživanja razvijen je stohastički genetski algoritam, u kome su proizvodna i kvalitativna ograničenja objedinjena unutar funkcije cilja, a proces optimizacije usmeren ka pronalaženju planskih rešenja koja obezbeđuju stabilnost kvaliteta rude i racionalno korišćenje raspoloživih rezervi.

Razvoj modela obuhvatio je više međusobno povezanih koraka. Najpre je izvršena priprema i analiza ulaznih podataka o raspoloživim rezervama i kvalitativnim karakteristikama rude po površinskim kopovima. Nakon toga je definisana matematička struktura modela. Posebna pažnja posvećena je formiranju funkcije cilja, koja je koncipirana tako da penalizuje odstupanja od zadatih granica kvaliteta i istovremeno favorizuje planska rešenja koja obezbeđuju kontinuitet proizvodnje i uravnoteženo korišćenje rezervi. Zatim je razvijena algoritamska implementacija modela u Excel/VBA okruženju, što je omogućilo praktičnu primenu modela u uslovima bliskim inženjerskoj praksi. Predloženo rešenje, zasnovano na primeni genetskog algoritma, omogućava održavanje parametara kvaliteta unutar projektovanih granica putem precizne optimizacije sekvence otkopavanja.

Empirijska provera razvijenog modela izvršena je na studiji slučaja koja obuhvata osam površinskih kopova limonitne rude i planski period od 1.000 operativnih smena. Dobijeni rezultati

stohastičkog algoritma upoređeni su sa manuelno formiranim operativnim planom zasnovanim na inženjerskoj proceni i iskustvu. Takav komparativni pristup omogućio je procenu praktične vrednosti razvijenog modela sa aspekta stabilnosti kvaliteta rude, stepena iskorišćenja kapaciteta i racionalnog korišćenja rezervi.

Verifikacija razvijenog modela izvršena je kroz više međusobno povezanih kriterijuma. Kao prvi kriterijum posmatrana je mogućnost ostvarivanja projektovanog kapaciteta po svakoj pojedinačnoj smeni. Kao drugi kriterijum analiziran je stepen usaglašenosti dobijene mešavine rude sa zadatim granicama kvaliteta, izraženim kroz ciljani opseg sadržaja gvožđa i maksimalno dozvoljeni sadržaj silicijum-dioksida. Treći kriterijum odnosio se na poštovanje operativnih ograničenja, pre svega broja istovremeno aktivnih površinskih kopova i kontinuiteta njihove eksploatacije. Četvrti kriterijum obuhvatio je racionalnost korišćenja raspoloživih rezervi, odnosno raspodelu eksploatacije po kopovima u okviru planskog horizonta. Konačno, praktična vrednost modela proverena je poređenjem sa manuelno formiranim planom, čime je omogućena procena njegove primenljivosti sa aspekta kvaliteta, stabilnosti i potrebnog inženjerskog angažovanja.

Primenjena metodologija omogućila je da se problemi operativnog planiranja i upravljanja kvalitetom rude sagledaju kao jedinstven istraživački zadatak, u kome se geološki podaci, tehnološka ograničenja i optimizacioni postupci povezuju u funkcionalan model odlučivanja. Time je obezbeđena osnova za razvoj i testiranje stohastičkog genetskog algoritma kao alata za podršku kratkoročnom planiranju na površinskim kopovima.

Delovi metodološkog okvira i deo rezultata predstavljeni u ovoj disertaciji oslanjaju se na prethodno objavljen rad autorke disertacije Ignjatović et al. [22]. U disertaciji je taj pristup proširen, sistematizovan i postavljen u širi naučni okvir doktorskog istraživanja.

## **1.5 Sistematizacija disertacije sa kratkim opisom poglavlja**

Disertacija je organizovana u osam poglavlja, koja su međusobno logički povezana i prate tok istraživanja od definisanja problema do izvođenja zaključaka.

U prvom poglavlju dat je uvod u problematiku istraživanja, sa posebnim osvrtom na značaj diskontinualnih sistema, upravljanja kvalitetom, kao i operativnog planiranja na površinskim kopovima. U okviru ovog poglavlja definisani su predmet i cilj istraživanja, data polazna hipoteza, prikazan je metodološki pristup i istaknut je naučni značaj i ciljevi disertacije.

Drugo poglavlje obuhvata pregled relevantne naučne i stručne literature iz oblasti upravljanja kvalitetom, utovarno-transportnih sistema, planiranja površinskih kopova, operativnog planiranja, stohastičkog modelovanja i primene genetskih algoritama u rudarskom inženjerstvu. Na osnovu analizirane literature identifikovan je istraživački jaz i postavljen teorijski okvir za razvoj sopstvenog modela.

U trećem poglavlju prikazane su teorijske osnove problema koji se razmatra u disertaciji. Posebna pažnja posvećena je karakteristikama utovarno-transportnih sistema, značaju upravljanja kvalitetom rude, stohastičkim modelima koji su primenjivani u rudarskim operacijama, osnovnim principima primene genetskih algoritama u rešavanju složenih optimizacionih problema kao i ulozi operativnog planiranja u površinskoj eksploataciji. Ovo poglavlje predstavlja konceptualnu osnovu za formalizaciju modela razvijenog u daljem toku disertacije.

Četvrto poglavlje posvećeno je razvoju i matematičkoj formulaciji modela. U njemu su definisani elementi istraživačkog problema, promenljive odlučivanja, ograničenja i funkcija cilja, kao i način na koji su proizvodni zahtevi i zahtevi kvaliteta rude integrisani u jedinstven optimizacioni okvir.

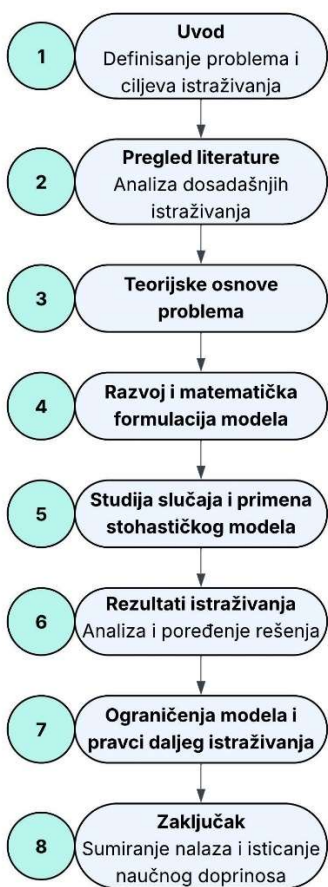
U petom poglavlju prikazana je studija slučaja i primena razvijenog stohastičkog modela na realan rudarski sistem. Opisani su ulazni podaci, karakteristike posmatranih površinskih kopova, planski horizont, ograničenja sistema i način implementacije modela u konkretnim uslovima eksploatacije. Na taj način obezbeđena je osnova za proveru funkcionalnosti i praktične primenljivosti razvijenog pristupa.

Šesto poglavlje obuhvata rezultate istraživanja i njihovu diskusiju. U ovom delu rada analizirani su rezultati dobijeni primenom razvijenog modela, izvršeno je poređenje sa referentnim planom i razmotren je stepen usaglašenosti dobijenih rešenja sa zahtevima kapaciteta i kvaliteta rude. Diskusija rezultata usmerena je na ocenu efikasnosti modela, njegovih prednosti u odnosu na konvencionalne pristupe i značaja za operativno odlučivanje u rudarskoj praksi.

U sedmom poglavlju razmatraju se ograničenja razvijenog modela i daju se preporuke za njegov dalji razvoj. Analiziraju se pretpostavke na kojima je model zasnovan, njegova primenljivost u različitim uslovima eksploatacije i mogućnosti unapređenja kroz dodatno uključivanje novih parametara, scenarija i optimizacionih pristupa.

U osmom poglavlju dati su zaključci proistekli iz sprovedenog istraživanja. Sumirani su najvažniji nalazi, a istaknuti su naučni i praktični doprinosi disertacije.

Na slici 1-2 prikazan je kratak vizuelni prikaz pregleda strukture disertacije.



Slika 1-2 Struktura disertacije

## 2 Pregled literature

Osnovni cilj poglavlja je kritička analiza dosadašnjih dostignuća i identifikacija istraživačkog prostora u domenu upravljanja kvalitetom na kompleksnim ležištima, gde konvencionalne metode često ne uspeavaju da pomire stroge zahteve prerade sa varijabilnošću realnog proizvodnog okruženja. Takođe, kroz istraživanja koja se bave radom diskontinualnih sistema na površinskim kopovima, analiziraju se matematički modeli koji naglašavaju značaj planiranja u ukupnom procesu upravljanja kvalitetom, sa posebnim apostrofiranjem mogućnosti i potencijalnih prednosti stohastičkog pristupa.

Hartman i Mutmansky [30] polaze od toga da razvoj rudarstva prati razvoj civilizacije, naglašavajući da mineralne sirovine od praistorije do savremenog doba predstavljaju jednu od osnovnih materijalnih osnova društvenog i tehnološkog razvoja. Dym et al. [31] ukazuju da rudarska istorija prevazilazi uske granice tehničke discipline i da predstavlja relevantno polje za razumevanje šireg odnosa između prirodnih resursa, nauke, tehnologije i društvenog razvoja. Vujić [32] prikazuje istorijski kontinuitet razvoja rudarstva na prostoru Srbije, od praistorijskih tragova eksploatacije, preko rimskog i srednjovekovnog perioda, do modernog institucionalnog i tehnološkog razvoja rudarske delatnosti.

Yamatomi i Okubo [33] sistematizuju osnovne metode površinske eksploatacije i pokazuju da se izbor između površinskih i podzemnih metoda zasniva na tehničkim, ekonomskim i ekološkim kriterijumima, pri čemu površinski kopovi imaju posebnu važnost u velikim proizvodnim sistemima. Ignjatović [34] u nastavnim materijalima iz oblasti površinske eksploatacije ukazuje da rudarska proizvodnja predstavlja osnovu sirovinskog i energetskog snabdevanja savremene industrije, pri čemu ovaj vid otkopavanja materijala zauzima dominantno mesto u ukupnoj svetskoj proizvodnji mineralnih sirovina.

Upravljanje kvalitetom rude i kvalitativna ograničenja mešavine iste predstavljaju poseban istraživački tok, koji je za ovu disertaciju od centralnog značaja. Upravljanje kvalitetom rude u savremenoj površinskoj eksploataciji ne može se svesti samo na proveru prosečnog sadržaja korisne komponente u godišnjem ili mesečnom planu. Vargas et al. [12] među ranijim su autorima koji kratkoročno planiranje eksplicitno povezuju sa neizvesnošću i ograničenjima mešanja rude, pri čemu pokazuju da se kvalitet rude mora uzeti u obzir i uključiti direktno u model odlučivanja, a ne tretirati kao korekciju plana.

Ignjatović et al. [1] u svojoj knjizi o upravljanju kvalitetom ukazuju da se kvalitet uglja ne treba posmatrati samo kroz završnu kontrolu posle isporuke, već da mora uzeti u obzir aktivnosti koje povezuju planiranje eksploatacije, selektivno otkopavanje, mešanje i kontrolu izlaznog materijala. Autori posebno naglašavaju da je cilj mešanja održavanje rude u opsegu koji odgovara tehnološkim zahtevima, a ne samo dostizanje jedne fiksne ciljane vrednosti kvaliteta. Posebno je značajno i njihovo zapažanje da sa povećanjem broja parametara za usklađivanje, upravljanje kvalitetom postaje složenije. Proces odlučivanja u tom slučaju podrazumeva određivanje prioriteta među tim zahtevima.. Na osnovu takvog pristupa može se zaključiti da upravljanje kvalitetom predstavlja sastavni deo planiranja i vođenja proizvodnje, a ne samo naknadnu korekciju.

Verly [35] je pokazao da je uspeh upravljanja kvalitetom u velikoj meri određen sposobnošću da se smanji pogrešna klasifikacija rude i jalovine, pri čemu je uloga modela procene i simulacije važna, ali ne može zameniti kvalitetno organizovane postupke odlučivanja na nivou svakodnevne proizvodnje. Slično, Vasylichuk i Deutsch [36] razvili su integrisani pristup unapređenja upravljanja kvalitetom na površinskim kopovima, u kome se klasifikacija materijala povezuje sa neizvesnošću kvaliteta, kretanjem odminiranog materijala i optimizacijom granica površinskog kopa.

Novija literatura pokazuje da se kvalitet rude mora posmatrati kroz širi kontekst. Pored sadržaja metala ili korisne komponente, značaj i uticaj na kvalitet imaju i granulometrijski sastav, vlažnost, mineraloški sastav, tvrdoća i abrazivnost, jer promenljivost ovih parametara utiče na stabilnost prerade, energetska efikasnost i habanje opreme. Iz tog razloga upravljanje kvalitetom nije samo geološko ili laboratorijsko pitanje, već složen zadatak koji povezuje eksploataciju i preradu kroz čitav lanac odlučivanja. Novi pravci istraživanja se u velikoj meri oslonjanju na obradu podataka, mašinsko učenje i podršku odlučivanju u realnom vremenu. Saavedra et al. [8] u novijem radu ukazuju da je mešanje rude ključno za obezbeđenje stalnog snabdevanja postrojenja za preradu ali i za ublažavanje posledica prirodne varijabilnosti rude. Xiang et al. [37] razvijaju višeciljni model optimizacije mešanja rude za polimetalne površinske kopove, pri čemu koriste NSGA-II i pokazuju da se kvalitet, iskorišćenje resursa i stabilnost procesa mogu posmatrati kao simultani ciljevi optimizacije.

Dharmadhikari et al. [38] ovaj pravac dalje otvaraju ka primeni mašinskog učenja u proceni sadržaja rude i optimizaciji mešavine, naglašavajući rastući značaj upravljanja na osnovu podataka u upravljanju kvalitetom. Khan i Edward [39] na studiji slučaja iz Ansteel Mining Corporation prikazuju primenu mašinskog učenja u proceni sadržaja rude, što dodatno potvrđuje potrebu da se operacije kontrole kvaliteta povere dinamičnijem i informatički podržanom odlučivanju.

U kontekstu razvoja geometalurškog modeliranja, Ortiz et al. [40] naglašavaju da tradicionalni pristupi često ne uspevaju da obuhvate uticaj nesigurnosti ulaznih podataka na krajnje performanse projekta. Njihovo istraživanje ukazuje na to da ograničeno uzorkovanje i nepotpuni modeli mogu dovesti do suboptimalnih operativnih odluka posebno ako su praćeni prirodnom varijabilnosti rude. Za uspešnost projekta je jako bitno da se primene metode zajedničke optimizacije ovih parametara. Autori zaključuju da je za postizanje održivih ekonomskih i ekoloških rezultata neophodan dalji razvoj naprednih optimizacionih rutina, čime se ukazuje na značajan prostor za unapređenje i u akademskim istraživanjima i u industrijskoj praksi.

Jamshidi i Osanloo [41] pokazali su da uključivanje više odredišta i zahteva mešavine rude u planiranje heterogenih ležišta može povećati ekonomsku vrednost plana. Levinson i Dimitrakopoulos [42] pokazali su da se rizik neusaglašenosti između dugoročnog i kratkoročnog plana može smanjiti povezivanjem planskih horizonata kroz stohastičko programiranje, posebno kada je neizvesnost kvaliteta materijala značajan izvor operativnog rizika.

Shiryayeva et al. [43] pokazuju da hibridni inteligentni algoritmi mogu omogućiti prilagođenu optimizaciju procesa pod promenljivim ulaznim uslovima u oblasti prerade. Jin et al. [44] i Tang et al. [45] u svojim radovima pokazali su da se tehnološka pogodnost limonitnih ruda za dalju preradu može značajno unaprediti postupcima koji obezbeđuju faznu transformaciju minerala gvožđa i poboljšanje njihovih magnetnih svojstava. Na ovaj način je istaknut značaj poštovanja zahteva kvaliteta koje postavlja prerada. Kada se ovi pravci posmatraju zajedno sa radovima o mešanju rude Saavedre et al. [8], kao i sa radovima orijentisanim na mašinsko učenje Dharmadhikari et al. [38] i Khan i Edward [39] postaje jasno da savremena istraživanja sve više teže ka dinamičkim, podacima podržanim i adaptivnim modelima upravljanja kvalitetom i proizvodnjom.

Metodološki je jednostavnije da se problemi kvaliteta, rasporeda opreme i kratkoročnog plana posmatraju odvojeno, ali takav pristup ne podržava realne uslove rudarskih sistema. De Carvalho i Dimitrakopoulos [46] pokazali su da simultano donošenje odluka o lokaciji na kojoj će bager otkopavati rudu i kontroli kvaliteta daje veću kratkoročnu vrednost plana, jer bolje koristi međuzavisnost između radnih frontova, kvaliteta materijala i lokacije prerade. Isti autori [47] u svom drugom radu razvili su adaptivni pristup u kome se kratkoročni plan, rasporeda rudarske mehanizacije i krajnje odredište materijala ažuriraju na osnovu novih operativnih i kvalitativnih podataka, čime je planiranje približeno konceptu upravljanja u realnom vremenu.

Dimitrakopoulos u svom radu [48], pokazuje da tradicionalni deterministički pristupi proizvode jedinstvena i često pristrasna rešenja, jer ne odražavaju dovoljno geološku i operativnu neizvesnost. Godoy i Dimitrakopoulos [49] predstavljaju pristup optimizaciji planiranja proizvodnje zasnovan na efikasnom upravljanju otkopavanja jalovine i neizvesnošću sadržaja rude. Pokazali su da neizvesnost kvaliteta rude menja procenu optimalnog redosleda rudarskih operacija.

Simonović [50] daje značajan doprinos proučavanju rudarske mehanizacije posebno sa stanovišta tehničkih karakteristika. Ignjatović [51] u svom udžbeniku sistematično prikazuje osnovne delove, funkcije i proračune otkopne mehanizacije čime obezbeđuje važnu teorijsku i inženjersku osnovu za razumevanje opreme u površinskoj eksploataciji. Mikić et al. [52] u svom radu govore o kamionskom transportu kao jednom od ključnih elemenata diskontinualnog sistema, pri čemu akcenat stavljaju na suzbijanju prašine pri transportu rude.

Sa aspekta proučavanja diskontinualnih sistema i njihovih osnovnih principa rada, jako bitna literatura jeste i rad Malbašić et al [53] koji doprinosi boljem sagledavanju funkcionalnosti ovih sistema. Ignjatović et al. [54] i Borović [55] u svojim knjigama su dali opsežan i sadržajno vredan pregled rudarske mehanizacije koja se koristi na površinskim kopovima. Ovakvi izvori imaju poseban značaj jer omogućavaju sagledavanje tehničkih i eksploatacionih karakteristika opreme u okviru rudarskih sistema. Time se stvara važna osnova za razumevanje uslova u kojima se donose odluke o angažovanju opreme, izboru aktivnih radilišta, dinamici otkopavanja i usklađivanju proizvodnih procesa sa tehničkim mogućnostima sistema. Jovančić et al. [56] naglašavaju da upravljanje imovinom i proaktivni nadzor u održavanju rudarske opreme imaju neposredan uticaj na pouzdanost sistema, a samim tim i na realnu ostvarivost kratkoročnih planova.

Za precizno modelovanje utovarno-transportnih operacija u okviru diskontinualnih rudarskih sistema, neophodno je osloniti se na fundamentalne tehničke i eksploatacione karakteristike mehanizacije. Ignjatović [57] u svom univerzitetskom udžbeniku pruža sveobuhvatnu analizu mašina za površinsku eksploataciju, detaljno obrađujući kinematske parametre, vremena radnih ciklusa i kapacitivna ograničenja bagera i kamiona. Savremena rudarska praksa iziskuje visoku sinergiju između rudarskog planiranja i efikasne primene teške mehanizacije na terenu, o čemu svedoče i aktuelni industrijski izveštaji [58].

Banković [4] u doktorskoj disertaciji razvija integralni pristup optimizaciji utovarno-transportnih mehanizacije sa ciljem vršenja rudarskih operacija, čime jasno potvrđuje da transportni sistem ne može biti tretiran odvojeno pri planiranju proizvodnje.

Detaljno sagledavanje fizičkih i tehnoloških zakonitosti koje vladaju na površinskim kopovima predstavlja glavni preduslov za razvoj bilo kakvog matematičkog ili stohastičkog optimizacionog modela. Sveobuhvatnu sistematizaciju ovih principa dao je Pavlović [59] u svom udžbeniku posvećenom tehnologiji površinskog otkopavanja. Autor je definisao prostorno-vremensku dinamiku razvoja rudarskih radova, postavljajući jasne inženjerske granice koje se odnose na geometriju radnih i završnih kosina, minimalne radne širine etaža i tehnološku sinhronizaciju rudarske mehanizacije.

Alarie i Gamache [60] dali su pregled strategija koje se koriste za raspored flote kamiona u površinskim kopovima i pokazali da izbor adekvatne strategije direktno utiče na iskorišćenje opreme, vreme čekanja i celokupnu produktivnost sistema. Dindarloo et al. [6] uvode stohastički simulacioni okvir za izbor i dimenzionisanje kamiona i bagera, polazeći od toga da su utovar, transport, istovar i povratak diskretni procesi sa izraženom slučajnom varijabilnošću.

Awuah-Offei et al. [61] proširuju ovu grupu istraživanja na energetska efikasnost utovarno-transportnog sistema pod neizvesnošću, čime pokazuju da operativno planiranje ne utiče samo na količinu i trošak, već i na energetska performansa sistema. Ozdemir i Kumral [62] pristupaju problemu sa stanovišta minimizacije operativnih troškova proizvodnje, dok Elevli i Elevli [63]

pokazuju da se pokazatelj ukupne efektivnosti opreme (OEE) može uspešno primeniti na procenu efektivnosti rudarske mehanizacije, naročito kamiona i bagera. Identifikuju se uzroci vremenskih gubitaka u radu bagera i kamiona i uvodi se procedura za njihovo evidentiranje.

Pored klasičnih bager-kamion sistema, literatura razmatra i alternativne transportne koncepte. Nehring et al. [7] upoređuju strateške pristupe planiranju sistema drobljenja i transporta unutar površinskog kopa sa klasičnim bager-kamion varijantama. Na taj način oni su pokazali da izbor transportne opreme menja ne samo troškove, već i način na koji se planira eksploatacija kroz životni vek površinskog kopa. Shamsi i Nehring [64] pokazali su da se izbor između klasičnog bager-kamion sistema i polumobilnog drobilnog postrojenja ne može svesti na opšte tehničko opredeljenje, već zavisi od dubine prelaza, organizacije faza eksploatacije i ukupnih diskontovanih troškova kroz životni vek kopa.

Long et al. [65] ukazuju da savremena automatizacija u rudarstvu obuhvata širok spektar tehnoloških rešenja, od automatizovane opreme do integrisanog upravljanja operacijama, pri čemu se kao osnovni efekti izdvajaju unapređenje bezbednosti i efikasnosti proizvodnje. Codoceo-Contreras et al. [66] ističu da se uticaj automatizacije u rudarstvu ne iscrpljuje u tehničkom unapređenju sistema, već doprinosi i promenama na nivou ljudskog rada, organizacije i odnosa rudarske industrije prema lokalnim zajednicama.

Matsimbe [67] je na primeru kamenoloma Njuli razmatrao optimizaciju produktivnosti diskontinualnog sistema primenom teorije redova čekanja, pri čemu je analizirao odnos između broja kamiona, iskorišćenja bagera, vremena zastoja i troškova sistema. Rezultati istraživanja pokazali su da povećanje broja kamiona poboljšava iskorišćenje utovarne jedinice i proizvodni učinak, ali istovremeno povećava čekanje i smanjuje iskorišćenje kamionske flote, zbog čega optimalno rešenje mora biti zasnovano na kompromisu između produktivnosti i troškova.

Planiranje površinskih kopova predstavlja složen proces u kome se geološke karakteristike ležišta, tehničko-tehnološka ograničenja, kapaciteti opreme i zahtevi kvaliteta moraju uskladiti u jedinstven sistem odlučivanja. Klasična rudarska literatura, kao što su Hartman i Mutmanky [30], Darling [5], kao i Hustrulid et al. [10], postavila je temelje za razumevanje projektovanja i planiranje površinske eksploatacije, ukazujući da se uspešnost rudarskih operacija ne može sagledati samo kroz količinu rudnih rezervi, već i kroz mogućnost da se eksploatacija ležišta organizuje kao tehnički izvodljiv i ekonomski opravdan proces. U tom okviru, Kloppers et al. [13] dodatno ističu da različiti nivoi planiranja i donošenja odluka, od strateških do taktičkih, moraju biti međusobno usaglašeni kako bi se obezbedila usklađenost rudarskih operacija. Gholamnejad et al. [14] taj pristup dopunjuju praktičnim modelom dugoročnog planiranja zasnovanim na celobrojnom linearnom programiranju, pokazujući da čak i na višim planskim nivoima operativna ograničenja, poput broja aktivnih etaža, mogu imati značajan uticaj na kvalitet dobijenog rasporeda eksploatacije.

U savremenoj literaturi, kratkoročno planiranje površinskih kopova sve jasnije se izdvaja kao samostalan optimizacioni problem. Blom et al. [68] u svom radu pokazuju da je kratkoročno planiranje, uprkos velikom praktičnom značaju, znatno manje istraženo od srednjoročnog i dugoročnog, iako upravo na ovom nivou dolazi do najizraženijeg sudaranja proizvodnih zahteva, raspoloživosti opreme, geometrijskih ograničenja i potreba za stabilnim kvalitetom rude. Slično potvrđuju i Malundamene et al. [11], koji u novijem pregledu sistematizuju savremene optimizacione pristupe za kratkoročno planiranje i ukazuju da izbor metode najviše zavisi od toga koliko detaljno model obuhvata specifičnosti rudarskih operacija. To znači da kvalitet rude mora biti ugrađen u sam operativni plan, a ne podržavati ga samo preko dugoročnih ciljeva.

U opsežnoj analizi razvoja pristupa dugoročnom planiranju eksploatacionih radova na površinskim kopovima, Osanloo et al. [69] ističu da, uprkos teorijskoj pouzdanosti ranih egzaktnih algoritama, njihova praktična primena na viševremenske probleme velikih razmera ostaje izuzetno

ograničena. Autori naglašavaju da eksponencijalni rast broja blokova u 3D modelima ležišta neminovno dovodi do računskog zagušenja pri korišćenju klasičnog linearnog i celobrojnog programiranja. Kao odgovor na ovaj izazov, studija prepoznaje metaheurističke tehnike kao najperspektivniji pravac za rešavanje kompleksnih problema raspoređivanja proizvodnje, s obzirom na njihovu sposobnost da u prihvatljivom vremenu generišu robusne planove koji poštuju stroga prostorna i tehnološka ograničenja celokupnog rudarskog sistema.

Silva Júnior et al. [70] razmatrali su problem kratkoročnog planiranja jedne radne smene na površinskom kopu, kojim su pokazali da se operativni plan može formirati kroz simultano odlučivanje o aktivnim frontovima eksploatacije, rasporedu kamionske flote, rutama transporta i količinama materijala upućenim ka različitim odredištima. Posebna vrednost njihovog pristupa ogleda se u činjenici da je omogućeno da jednom vozilu da bude pridruženo više mogućih ruta. Optimizacioni zadatak je formulisan tako da odredi koji front radova treba otkopavati, koliko kamiona angažovati i koje količine materijala usmeriti ka pojedinim odredištima, uz zadovoljenje proizvodnih i kvalitativnih ciljeva.

U domenu operativnog upravljanja kvalitetom rude na površinskim kopovima, Knyazkin et al. [71] ističu važnost optimizacije prikupljanja i obrade velikih količina podataka (engl. *big data*) na nivou samih tehnoloških procesa, poput utovara i transporta. Ova studija demonstrira kako promena zapremine kao što je prelazak sa pojedinačne kašike bagera na pun kapacitet kamiona, direktno utiče na pouzdanost operativnih podataka. Autori zaključuju da je za efikasno upravljanje rudarskim sistemima neophodno uspostaviti optimalnu diskretnost uzorkovanja u realnom vremenu, čime se smanjuje rizik od isporuke neadekvatnog materijala postrojenjima za preradu i poboljšava ukupna kontrola toka materijala.

Seifi et al. [18] razmatraju problem smenskog raspoređivanja sa simultanom dodelom opreme i osoblja, pokazujući da je u rudarskom okruženju neophodno zajednički planirati i opremu i ljudske resurse. Taj pristup je važan jer pokazuje da operativni plan nije samo sekvenca otkopavanja, već i raspodela raspoloživih sredstava rada u okviru jedne smene.

Pitanje operativnog planiranja u radu diskontinualnih sistema dobija dodatnu složenost jer kvalitet rude koji ulazi u preradu ne zavisi isključivo od geoloških karakteristika ležišta nego i od odluke koji će kopovi biti aktivni, koja će oprema biti angažovana, koji je redosled otkopavanja materijala i ka kom odredištu se ruda upućuje. Ponašanje diskontinualnih sistema se menja u zavisnosti od vremena utovara i istovara, brzine kretanja kamiona, da li čeka u redu ili ne, koja je oprema raspoloživa i same organizacije transporta. Upravo zbog te operativne promenljivosti upravljanje kvalitetom u diskontinualnim sistemima ne može biti izdvojeno od problema rasporeda i angažovanja mehanizacije. Zhang et al. [72] razvili su pristup koji kombinuje matematičke modele sa simulacijom diskretnih događaja u cilju dobijanja najefikasnije kombinacije bagera i kamiona. Oni jasno pokazuju da da isključivo oslanjanje na statičke matematičke modele često previda dinamičku i stohastičku prirodu transportnih sistema. Uvođenjem simulacionog okruženja za evaluaciju različitih scenarija, uspeali su da povećaju dnevnu proizvodnju i profitabilnost za skoro 4%. Ovim se potvrđuje da se savremeni pristupi planiranju moraju oslanjati na hibridne metode kako bi se osigurala primenljivost tehničkih rešenja u realnim rudarskim uslovima.

Moradi-Afrapoli et al. [73] ukazali su da modeli rasporeda kamiona u površinskim kopovima često nedovoljno obuhvataju međuzavisnost kamionske flote, utovarnih jedinica i zahtevanih kapaciteta, kao i uticaj neizvesnosti ulaznih parametara, zbog čega predlažu model zasnovan na fuzzy linearnom programiranju koji daje poboljšanja u proizvodnji i iskorišćenju flote. Ercelebi i Bascetin [74] razvili su dvostepeni pristup optimizaciji diskontinualnog sistema, u kome se teorija zatvorenih mreža čekanja koristi za određivanje optimalnog broja kamiona po bageru, a linearno programiranje za definisanje optimalnih transportnih puteva i rasporeda kamiona. Na studiji slučaja pokazali su da

takav pristup može obezbediti traženi obim rada uz racionalnije korišćenje flote i niže jedinične troškove transporta.

Al Habib et al. [75,76] govore o kratkoročnom planiranju i IPCC sistemima i dodatno ukazuju da je integracija transportnog sistema sa kratkoročnim planiranjem njegovog rada i raspoređivanja još uvek nedovoljno razvijena, naročito kada se zahteva istovremeno razmatranje rasporeda i usklađivanja eksploatacije i transportnog sistema. U tom kontekstu, Otto i Lindeque [23] pokazuju da kratkoročno planiranje može neposredno doprineti rastu produktivnosti površinskog kopa kroz bolje usklađivanje aktivnosti duž celog lanca rudarskih operacija.

Eivazy i Askari-Nasab [77] pokazali su da se kratkoročno planiranje na površinskim kopovima može uspešno formalizovati višedestacionim MILP modelom koji, pored proizvodnih ciljeva, obuhvata odluke vezane za deponije, rampe, pravac eksploatacije i tehnička ograničenja, čime se kratkoročni plan približava realnim uslovima rada kopa.

Al Habib et al. [76] u novijem radu razvijaju okvir za kratkoročno planiranje površinskih kopova uz Monte Carlo simulaciju transporta u prisustvu polumobilnog drobilnog postrojenja, čime dodatno pomeraju fokus ka proceni stvarnog ponašanja transportne opreme pod neizvesnošću.

Matematičko modelovanje kratkoročnog planiranja razvijano je u više pravaca. L'Heureux et al. [24] razvili su mešoviti celobrojni model za kratkoročno planiranje u površinskim kopovima, kojim se eksplicitno definišu radne sekvence i raspored opreme, što potvrđuje da je reč o problemu koji zahteva strogu formalizaciju tehnoloških ograničenja. Manríquez et al. [16] taj pravac dalje razvijaju kroz višeciljni pristup koji pored sekvenciranja uključuje i raspodelu bagera po radnim frontovima i lokacijama deponija, pri čemu se istovremeno prati produktivnost, usklađenost sa planom i kvalitet iskopane rude.

U analizi optimizacionih tehnika za planiranje proizvodnje, Newman et al. [78] ističu kritičan nesklad između teorijskih matematičkih modela i njihove praktične primenjivosti na složenim površinskim kopovima. Tradicionalni deterministički modeli često zahtevaju nedopustivo dugo vreme procesiranja za rešavanje problema strateškog planiranja. Prepoznajući ova ograničenja, autori afirmišu upotrebu metaheuristike kao neophodan pravac razvoja. Njihov rad potvrđuje da su napredni optimizacioni algoritmi najadekvatniji alat za prevazilaženje nelinearnih problema, poput strogih zahteva za mešanjem rude (engl. *blending*) i dinamike proizvodnje, omogućavajući time maksimizaciju neto sadašnje vrednosti projekta u razumnom računskom vremenu.

Navarro Torres et al. [17] predlažu integraciju optimizacije i simulacije za kratkoročno planiranje, pokazujući da je kombinovanje matematičkog modela sa diskretnom simulacijom posebno korisno kada je potrebno proceniti svakodnevno ponašanje utovarno-transportnog sistema. Xu et al. [19] kroz integrisanu optimizaciju planiranja proizvodnje i transportnih ruta dokazuju da se razdvojeno rešavanje ova dva problema često završava suboptimalnim rešenjima.

Značajan doprinos operativnom, kratkoročnom planiranju dali su i Manríquez et al. [16] u svom razvijenom radu o optimizaciji. Prepoznajući nedostatke tradicionalnih modela koji zanemaruju prostornu dinamiku mehanizacije i međusobni konflikt proizvodnih zadataka, autori su formulisali kompleksan MILP model koji simultano rešava problem planiranje proizvodnje i pomeranja bagera duž fronta radova i deponija.

Maleki et al. [9] na primeru ležišta gvožđa kombinuju više izvora geološke neizvesnosti pri formiranju blok modela i zatim pored stohastičko i determinističko planiranje proizvodnje, potvrđujući da uključivanje neizvesnosti može promeniti i strukturu samog plana, a ne samo procenu rizika. Both i Dimitrakopoulos [15] ovaj pristup dodatno unapređuju zajedničkom stohastičkom optimizacijom kratkoročnog planiranja i upravljanja transportnom flotom, pri čemu istovremeno

razmatraju raspored eksploatacije, premeštanja bagera, raspoređivanje flote kamiona i transport materijala.

Potakey i Ortiz [79] ističu značajna ograničenja tradicionalnih tehnika, poput običnog kriginga i metode inverzne udaljenosti (engl. *IDW-Inverse Distance Weighting*). Autori kroz komparativnu analizu pokazuju da simulacioni pristupi omogućavaju daleko preciznije rezultate po pitanju razdvajanje rude od jalovine, prvenstveno jer uspešno povezuju prostorne nesigurnosti sa procesom donošenja odluka. Ovo ukazuje na rastući potencijal algoritama mašinskog učenja u ovoj oblasti, naglašavajući da primena savremenih modela može dodatno smanjiti stopu pogrešne kategorizacije otkopanog materijala, čime se direktno štiti ekonomska vrednost rudarskih projekata.

Mahboob i Genc [80] u radu o mašinskom učenju za procenu mineralnih resursa pokazuju da pristupi mašinskog učenja sve češće prevazilaze tradicionalne geostatističke metode u pojedinim zadacima procene kvaliteta i resursa, naročito kada je reč o velikim i heterogenim skupovima podataka. Anvari i Benndorf [81] u pregledu razvoja koncepta upravljanja rudarskim operacijama u realnom vremenu (engl. *real-time mining*) tokom poslednje decenije ističu ulogu senzora, kontinuiranog prikupljanja podataka i adaptivnog odlučivanja.

U domenu karakterizacije rudnih ležišta, Tiu et al. [82] ističu da se inherentna heterogenost kompleksnih polimetaličnih ruda ne može adekvatno opisati oslanjanjem isključivo na tradicionalne geološke parametre. U ovoj studiji autori su demonstrirali da je razumevanje prostorne varijabilnosti materijala preduslov za smanjenje operativnih rizika, čime se stvara neophodna osnova za stabilizaciju metalurških performansi unutar postrojenja za preradu.

Razumevanje ograničenja konvencionalnih metoda procene značajno je usmerilo razvoj geostatističkog modeliranja. U svom fundamentalnom radu, Journel [83] je postavio matematički okvir za generisanje modela koji zadržavaju stvarnu prostornu arhitekturu rudnih ležišta. Ove teorijska zapažanja koja je on postavio dobili su svoju punu praktičnu primenu u radovima koji su usledili. U domenu integracije geološke nesigurnosti u dizajniranje površinskih kopova, Dimitrakopoulos [84] je demonstrirao da tradicionalne metode prostorne interpolacije generišu nerealan izglađene blok modele koji maskiraju ekstremne fluktuacije u kvalitetu rude. Njegova studija pokazuje da optimizacija kopa zasnovana na takvim determinističkim ulazima sistematski potencijuje ekonomske potencijale i skriva operativne rizike. Pristup primene algoritma, ne samo da omogućava adekvatnu ocenu finansijskog rizika, već često rezultira i osetnim povećanjem projektovane neto sadašnje vrednosti kroz identifikaciju širih i isplativijih konačnih granica eksploatacije.

Fundamentalni značaj ostvarili su Lerchs i Grossmann [85] formalizujući problem određivanja konačne konture kopa (engl. *Ultimate Pit Limit - UPL*). Njihov inovativni pristup dokazao je da se granica koja donosi najveći nediskontovani profit može egzaktno izračunati bez pribegavanja aproksimacijama. Ovaj algoritam postao je apsolutni industrijski standard jer nepogrešivo razdvaja ekonomski isplativu rudu od jalovine na bazi zadanih prostornih parametara. Njegov najveći doprinos leži u matematičkoj garanciji globalnog optimuma, čime je eliminisana subjektivnost u dugoročnom dizajniranju površinskih kopova.

Razumevanje matematičke pozadine prostornog planiranja rudnika značajno je unapređeno radom Picarda [86]. Analizirajući problem Lerchs-Grossmann algoritma, autor je prvi matematički demonstrirao da je zadatak pronalazanja optimalne konture kopa ekvivalentan problemu pronalaska maksimalnog zatvorenja u usmerenom grafu. Ova studija je od velikog značaja jer je povezala rudarsko inženjerstvo sa problemima mrežnog protoka, dokazujući da se završna kontura kopa može odrediti sa apsolutnom matematičkom izvesnošću, bez potrebe za oslanjanjem na heurističke aproksimacije pri rešavanju prostornih ograničenja.

Uprkos teorijskoj pouzdanosti ranih modela grafova, njihova primena na složene rudarske sisteme bila je ograničena raspoloživom računarskom snagom. Caccetta i Giannini [87] prevazišli su ovu prepreku razvojem efikasnijih algoritamskih procedura za obradu velikih skupova podataka u blok modelima. Integracijom specifičnih metoda diskretne matematike za redukciju broja čvorova i grana unutar grafa, njihovo istraživanje je omogućilo prelazak Lerchs-Grossmann algoritma iz sfere teorijskih modela u svakodnevnu softversku industrijsku praksu. Ovaj rad je praktično omogućio kompjuterizovano dizajniranje višemilionskih blok modela ležišta u operativno prihvatljivom vremenu.

Iako je Lerchs-Grossmannov algoritam teorijski besprekoran, eksponencijalni rast broja blokova u savremenim ležištima nametnuo je potrebu za računski efikasnijim rešenjima. Hochbaum i Chen [88] napravili su ključnu modernizaciju ovog procesa prevodeći problem maksimalnog zatvorenja grafa u domen tehnika mrežnog protoka. Autori su drastično redukovali vreme obrađivanja ogromnih skupova podataka. Pored značajnog smanjenja utrošenog vremena, njihova metodologija omogućava fleksibilnije uvođenje operativnih faza eksploatacije (engl. *pushbacks*), čime se premošćava razlika između statičnog dizajna konačne konture i dinamičkih zahteva razvoja rudarskog projekta.

U okviru poglavlja knjige o površinskoj eksploataciji, Whittle [89] postavlja industrijski standard za implementaciju kompjuterizovanih metoda optimizacije u rudarskom planiranju. Autor detaljno objašnjava proces prevođenja kompleksnih matematičkih modela, prevashodno zasnovanih na teoriji grafova, u pragmatične alate za donošenje strateških inženjerskih odluka. Centralni doprinos ovog poglavlja leži u detaljnoj razradi parametara (iterativno skaliranje ekonomskih ulaznih vrednosti, poput cena metala) radi generisanja serije ugnježenih kopova (engl. *nested pit shells*).

Analizirajući deceniju primene komercijalnih optimizacionih softvera u rudarskoj praksi, Whittle [90] ističe neophodnost integrisanja vremenske vrednosti novca u rane faze projektovanja površinskih kopova. Njegova studija detaljno objašnjava razliku između prostornog definisanja završne konture kopa i kreiranja izvodljivog dugoročnog plana proizvodnje. Definisujući granične okvire kroz koncepte operativnog „najboljeg“ i „najgoreg“ scenarija eksploatacije rude, rad pruža inženjerima alat za ocenu neto sadašnje vrednosti projekta pre početka same eksploatacije.

Veliki doprinos u matematičkoj formalizaciji planiranja površinskih kopova dao je Johnson [91], koji je prvi osmislio dugoročno raspoređivanje proizvodnje kao masivni model linearnog programiranja. Njegova studija je značajna jer je uspešno prevela kompleksna fizička i tehnološka ograničenja rudnika u sistem linearnih jednačina. Iako tehnička ograničenja računara tog vremena nisu dozvoljavala rešavanje modela za ležišta industrijskih razmera bez rigoroznih aproksimacija, ovaj rad je uspostavio matematički okvir na kojem se temelje sve kasnije egzaktne metode optimizacije u rudarstvu.

Suočen sa računskom neizvodljivošću rešavanja masivnih viševremenskih modela u jednom koraku, Dagdelen [92] je u optimizaciju rudarskih sistema uveo metodu Lagranžove relaksacije. Njegov pristup se zasnivao na uključivanju operativnih ograničenja direktno u funkciju cilja putem kaznenih parametara. Ovakav pristup omogućio je da se složeni dugoročni plan svede na rešavanje niza znatno jednostavnijih prostornih problema određivanja konture kopa.

Caccetta i Hill [93] razvili su pristupe zasnovane na mešovitom celobrojnem programiranju (MILP). Njihova istraživanja su se fokusirala na prilagođavanje algoritama grananja i odsecanja (engl. *branch and cut*) specifičnoj topologiji rudarskih blok modela. Identifikacijom i ranom eliminacijom onih promenljivih koje ne vode ka optimalnom rešenju, ovi autori su značajno redukovali prostor pretrage. Njihovi rezultati su potvrdili da se pametnim struktuiranjem podataka mogu rešavati znatno veći skupovi rudarskih blokova u poređenju sa tradicionalnim LP metodama, čime su postavljeni novi standardi u komercijalnom softverskom planiranju.

Pošto su prisutni veliki računski limiti u konvencionalnom matematičkom programiranju, Ramazan [94] u svojoj doktorskoj disertaciji po prvi put uvodi koncept fundamentalnog stabla. Kreirao je linearni algoritam koji je sposoban da automatski identifikuje i grupiše zavisne blokove. Prelazak sa teorijskog u primenljiv alat je demonstriran u radu Ramazan et al. [95]. Analizirajući masivne studije slučaja, autori su pokazali kako se integracijom ovog algoritma unutar mešovitog celobrojnog programiranja (MILP) uspešno prevazilazi problem nemogućnosti rešavanja velikih rudarskih matrica. Njihov pristup obezbeđuje generisanje praktično izvodljivih, dugoročnih rasporeda otkopavanja u operativno prihvatljivom vremenu. U svom radu [96] Ramazan je dodatno unapredio matematičku formulaciju, obezbeđujući još veću računarsku efikasnost pri rešavanju NP-teških problema. Nova verzija algoritma eliminiše nepotrebne iteracije.

Bitan preokret u rešavanju kompleksnih kombinatornih problema predstavlja studija Kirkpatricka et al. [97]. Oni su prvi demonstrirali kako se principi statističke mehanike i Metropolisov kriterijum mogu prevesti u računarski algoritam za inženjersku optimizaciju. Uvođenjem stohastičkog mehanizma koji svesno dozvoljava privremena pogoršanja vrednosti funkcije cilja radi izbegavanja lokalnih optimuma, njihovo istraživanje je postavilo temelje za razvoj celokupne moderne metaheuristike. Nezavisno Černý [98] je formalizovao identičan termodinamički pristup, primenjujući ga uspešno na rešavanje klasičnog, NP-teškog problema trgovačkog putnika (engl. *Traveling Salesman Problem*). Njegov rad je empirijski i matematički dokazao da pažljivo kontrolisan raspored smanjenja „temperature“ unutar optimizacionog modela direktno utiče na algoritam da izoluje globalno optimalne konfiguracije, čak i u sistemima sa izuzetno visokim stepenom nelinearnosti.

Kumral i Dowd [99] su formulisali sveobuhvatan četvorostepeni model koji logički povezuje geostatističke simulacije za modeliranje nesigurnosti, determinističko definisanje granica kopa linearnim programiranjem, i konačno, višekriterijumsku stohastičku optimizaciju vremena otkopavanja. Fokuserajući se na eksploataciju gvožđa, gde je kontrola kvaliteta i mešanja materijala od apsolutne važnosti za metalurška postrojenja, oni su demonstrirali kako simulirano kaljenje uspešno prevazilazi lokalne minimume u koje upadaju tradicionalne heurističke metode. Njihovo istraživanje je empirijski potvrdilo da se primenom algoritama zasnovanih na termodinamičkim principima direktno smanjuju potencijalni penalni troškovi i operativni rizici, obezbeđujući visoku usaglašenost u kvalitetu iskopane mase tokom celokupnog radnog veka rudnika

Značajan doprinos tranziciji sa determinističkog na stohastičko sagledavanje rudarskih projekata dali su Askari Nasab i Szymanski [100]. Prepoznajući da klasični optimizacioni algoritmi generišu sekvence otkopavanja zasnovane na fiksiranim, idealizovanim ulaznim parametrima, razvili su pristup zasnovan na Monte Karlo simulaciji radi kvantifikacije operativnog rizika. Kroz kreiranje višestrukih jednako verovatnih scenarija, ova studija je omogućila dinamičko modeliranje rudarskih operacija pod uslovima kontinuirane geološke i ekonomske nesigurnosti. Rezultati ovog istraživanja jasno demonstriraju da uvođenje simulacija verovatnoće omogućava inženjerima da testiraju robusnost već generisanih dugoročnih planova, precizno identifikujući verovatnoću devijacije ostvarenog novčanog toka u odnosu na projektovanu neto sadašnju vrednost. Ovaj rad je suštinski potvrdio da vrednovanje rudarskog projekta nije potpuno ukoliko se ne utvrdi njegova osetljivost na stohastičke varijacije u ležištu i na tržištu.

Genetski algoritmi i šire evolutivne metode zauzimaju posebno mesto u optimizaciji rudarskih sistema, jer omogućavaju rešavanje problema velikih dimenzija i složene kombinatorne strukture. Teorijsku osnovu ovog pristupa postavljaju Holland [20], Goldberg [21], Deb [25] i Mitchell [26]. Holland [20] uvodi adaptivne sisteme zasnovane na principima evolucije, Goldberg [21] sistematizuje genetske algoritme kao alate za pretraživanje i optimizaciju, Deb [25] razvija koncept višeciljne optimizacije evolutivnim algoritmima, dok Mitchell [26] pruža pregled fundamentalnih principa i praktičnih aspekata primene genetskih algoritama. Osnovna premisa ovih algoritama je

„preživljavanje najprilagođenijih“, gde se skup potencijalnih rešenja (populacija) postepeno unapređuje kroz iterativne procese slične biološkoj evoluciji. Prema Paulinasu i Ušinskasu [101] proces optimizacije je nelinearan i stohastički, što omogućava efikasno uzorkovanje veoma velikih prostora rešenja koji bi inače bili nepretraživi.

U rudarskom kontekstu, Alipour et al. [3] u radu iz 2017. razmatraju genetski algoritam za raspoređivanje proizvodnje u površinskom kopu, naglašavajući da je problem NP-težak i da egzaktne modeli u realnim uslovima brzo postaju računski ograničeni. U njihovom kasnijem radu iz 2020. isti autori [27] daju detaljnije razrađen model i studiju slučaja, čime potvrđuju praktičnu primenljivost GA pristupa u planiranju površinskih kopova.

Cetin i Dowd [28] koriste genetske algoritme za optimizaciju višestrukih graničnih sadržaja, najpre u ranijem radu iz 2002, a zatim i u kasnijem radu iz 2016. [29] kroz poređenje sa metodom pretrage po mreži (engl. *grid search method*) i dinamičkim programiranjem. Iako se ovi radovi ne bave neposredno kratkoročnim planiranjem po smenama, oni su metodološki veoma važni, jer pokazuju da je evolutivni pristup prikladan za rudarske probleme sa velikim prostorom rešenja i više međuzavisnih kriterijuma.

U domaćoj literaturi, Doderović [102] kroz hibridni model za optimizaciju projektovanja i lokacije odlagališta jalovine pokazuju da kombinovanje simulacije, genetskog algoritma, heuristike i višekriterijskog odlučivanja može dati kvalitetna rešenja i u drugim segmentima planiranja površinske eksploatacije. Ovim se ukazuje da se savremena rudarska optimizacija sve više razvija ka hibridnim i integrisanim modelima, u kojima se klasični matematički pristupi kombinuju sa heuristikama, simulacijom i analitičkim alatima. Stevanović [2] u doktorskoj disertaciji jasno polazi od potrebe za stohastičkim modelima u planiranju površinskih kopova, uz poseban naglasak na planiranje i kontrolu kvaliteta uglja, čime postavlja važnu osnovu za dalje modele koji povezuju neizvesnost, operativno planiranje i kvalitet.

Sistematsko sagledavanje prezentovane literature upućuje na zaključak da je znatno manji broj radova koji se bave obezbeđenjem uslova kvaliteta na nivou operativnog plana sposobnog da sve ove elemente poveže u jedinstven operativni model odlučivanja na nivou smene, naročito u uslovima diskontinualnog sistema i istovremenog angažovanja više prostorno razdvojenih kopova. Tek kada se kvalitet uključi u odluke o izboru aktivnih kopova, obimu eksploatacije, rasporedu utovarno-transportne mehanizacije i usmeravanju materijala na preradu, moguće je govoriti o stvarnom upravljanju kvalitetom na nivou smene.

Upravo se u tom segmentu uočava istraživački jaz na koji se ova disertacija oslanja. Predmetno istraživanje polazi od stanovišta da se kvalitet rude ne sme tretirati kao naknadna kontrolna veličina, već kao jedan od osnovnih parametara na osnovu kojih se formira operativni plan. Zbog toga je razvijen stohastički model zasnovan na genetskom algoritmu, i radu diskontinualnog sistema kojim se u jedinstvenom okviru povezuju kapacitet proizvodnje, broj aktivnih kopova i zahtevi kvaliteta rude, čime se doprinosi približavanju teorijskih modela realnim uslovima rudarske prakse.

Iako su osnovni elementi pristupa prethodno prikazani u radu autorke Ignjatović et al. [22], tek se u ovoj disertaciji kroz sistematičan pregled literature jasno određuje mesto razvijenog modela u okviru savremenih istraživanja kratkoročnog planiranja i upravljanja kvalitetom u površinskoj eksploataciji.

### 3 Teorijske osnove problema

Rudarstvo predstavlja primarnu privrednu granu čiji je osnovni zadatak ekstrakcija mineralnih sirovina iz zemljine kore radi njihovog daljeg preobražaja u proizvode od vitalnog značaja za razvoj tehnološkog društva. Rudnik je iskop napravljen u zemlji radi ekstrakcije minerala, dok je rudarstvo aktivnost, zanimanje i industrija koja se bavi eksploatacijom [30]. Rudarstvo spada među najstarije ljudske proizvodne delatnosti i predstavlja jednu od osnova materijalnog razvoja civilizacije. Njegov istorijski tok tesno je povezan sa razvojem društva, tehnologije i privrede, što se vidi i kroz činjenicu da su pojedine epohe ljudske istorije imenovane upravo prema dominantnim mineralnim sirovinama i njihovoj preradi. U tom smislu, razvoj rudarstva nije moguće posmatrati samo kao tehnički napredak u dobijanju mineralnih sirovina, već i kao deo šireg procesa oblikovanja ekonomskih i tehnoloških osnova savremenog društva [30].

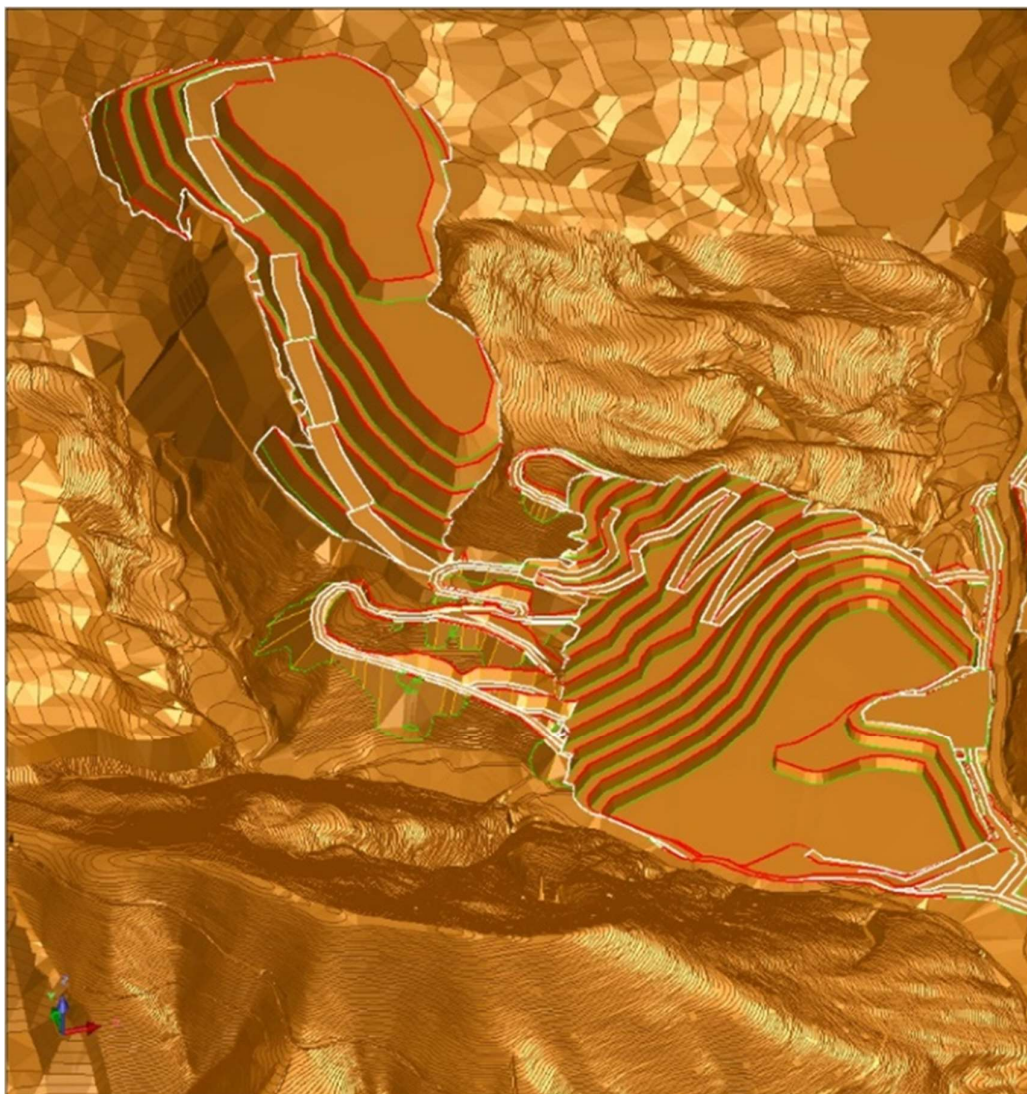
Od svojih najranijih oblika, zasnovanih na jednostavnom ručnom izdvajanju korisnih mineralnih supstanci, rudarstvo se postepeno razvilo u složen industrijski sistem koji obuhvata istraživanje ležišta, izbor metode eksploatacije, primenu specijalizovane mehanizacije, planiranje proizvodnje i upravljanje tehničkim i ekonomskim parametrima rada. Istorijski razvoj rudarstva zato se može tumačiti kao prelaz od lokalne i zanatske aktivnosti ka visoko organizovanoj industrijskoj grani, u kojoj izbor tehnološkog rešenja neposredno utiče na produktivnost, troškove, bezbednost rada i iskorišćenje rezervi [30]. Rudarska aktivnost na prostoru Srbije prisutna još od praistorije, da je znatno unapređena u rimskom periodu. Imala je širi razvojni značaj, jer je podsticala tehnološko unapređenje, izgradnju infrastrukture, razvoj obrazovnih i naučnih institucija i ukupno jačanje privredne osnove zemlje [32]. Rudarska proizvodnja predstavlja jednu od osnovnih sirovinskih i energetskih osnova savremene industrije. Njena uloga ogleda se u obezbeđivanju mineralnih sirovina za različite grane privrede, pri čemu goriva imaju ključan značaj za energetiku, metalne rude za metaluršku industriju, a hemijske sirovine za hemijsku industriju i druge proizvodne sektore [34].

Savremeni značaj rudarstva ogleda se u tome što ono obezbeđuje sirovinsku i energetsku osnovu za funkcionisanje drugih privrednih grana. Mineralne sirovine ostaju neophodne za energetiku, metalurgiju, građevinarstvo, hemijsku industriju, saobraćajnu infrastrukturu i proizvodne procese u najširem smislu, pa se uloga rudarstva ne iscrpljuje u samom iskopavanju, već se nastavlja kroz čitav industrijski lanac vrednosti. Upravo zbog toga rudarstvo zadržava strateški značaj i u savremenim uslovima, iako se njegova tehnologija, organizacija i regulatorni okvir neprekidno menjaju [30,31].

Korisne mineralne sirovine mogu se eksploatisati površinskim, podzemnim ili podvodnim putem, u zavisnosti od položaja, oblika i uslova zaleganja ležišta. Dobijanje čvrstih mineralnih sirovina vezano je za ona ležišta čiji geološki potencijal odlikuje visoka, komercijalno isplativa koncentracija korisnih komponenti. Rudarstvo se često pogrešno interpretira kao isključivo mehanički proces vađenja sirovina, dok je u stvarnosti to visoko sofisticirana disciplina balansiranja između prirodnih ograničenja i tehničkih mogućnosti. Svaki rudarski projekat je jedinstven eksperiment u realnom prostoru i vremenu, gde inženjerska intuicija, potkrepljena egzaktnim proračunima, pokušava da predvidi ponašanje stenske mase i osigura stabilnost proizvodnje.

Izbor između površinske i podzemne eksploatacije vrši na osnovu tehničkih, ekonomskih i ekoloških kriterijuma, pri čemu je površinska eksploatacija naročito pogodna za velika ležišta i velike obime proizvodnje [33]. U savremenom rudarstvu površinska eksploatacija ima dominantno mesto u odnosu na podzemnu, jer omogućava visok stepen mehanizacije, velike proizvodne kapacitete i niže troškove eksploatacije po jedinici korisne sirovine. Zbog toga se najveći deo svetske proizvodnje mineralnih sirovina ostvaruje upravo primenom površinskog načina eksploatacije [34].

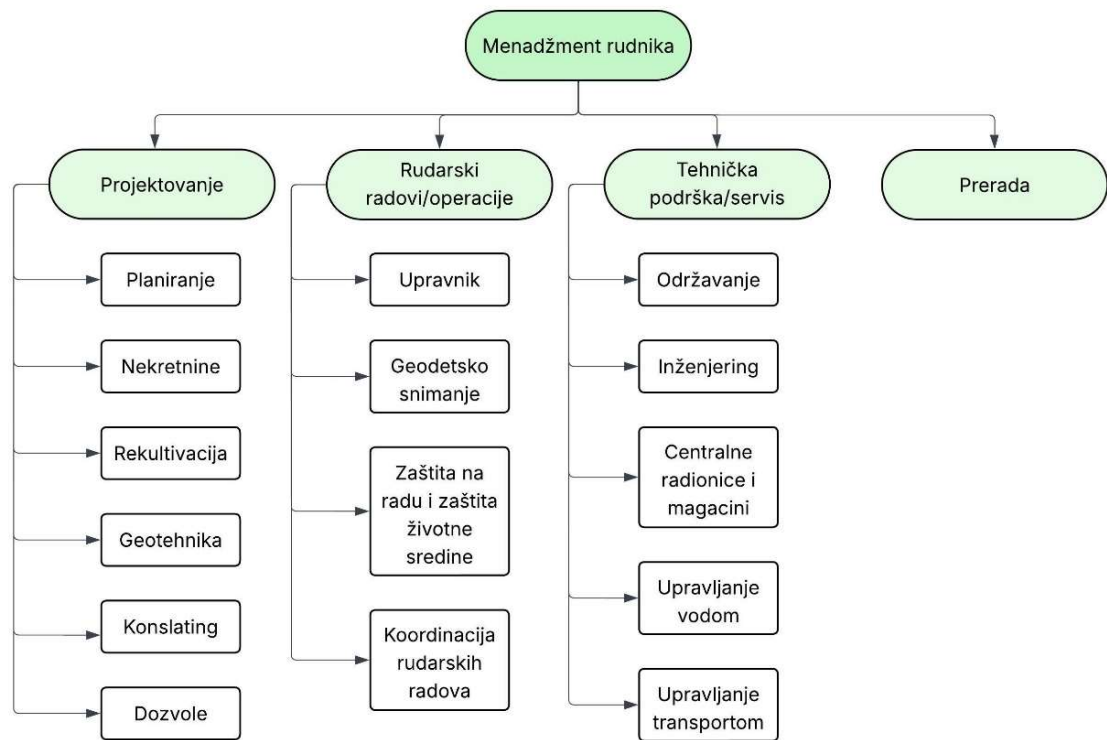
Na slici 3-1 je prikazana ilustracija površinskog kopa.



*Slika 3-1 Ilustrovani prikaz površinskog kopa*

Na ilustraciji je prikazana osnovna geometrija površinskog kopa sa karakterističnim elementima eksploatacije i služi kao šematski prikaz kako izgleda organizacija radova u površinskoj eksploataciji. Osnovni elementi prikazani na slici 3-1 su: etaža je radni nivo u kopu, a vertikalno rastojanje između dve susedne etaže predstavlja njenu visinu; rampa je kosi put unutar zone eksploatacije kojim se kreću kamioni i mehanizacija između nižih i viših delova ležišta i na kraju transportni put je saobraćajnica namenjena transportu rude i jalovine. Na slici 3-1 se takođe vidi i izgled spoljašnjeg odlagališta.

Slika 3-2 prezentuje generalnu organizacionu šemu rudnika [56].



Slika 3-2 Organizaciona šema rudnika, preuzeto iz [56]

Rudarsko inženjerstvo je praksa primene inženjerskih principa na razvoj, planiranje, rad, zatvaranje i rekultivaciju rudnika [30]. Ova organizaciona šema najbolje ilustruje da je rudarski sistem strogo kontrolisan lanac uzastopnih operacija. Primarne operacije direktno diktiraju tempo proizvodnje, dok pomoćni procesi čine neophodnu infrastrukturu koja taj tempo održava. Posmatrajući ovaj dijagram kroz prizmu upravljanja kvalitetom, ključna tačka fokusa je faza utovara i transporta. Utovar je trenutak u kojem se vrši selekcija, a transport faza u kojoj se realizuje mešanje rude. Efikasnost rudarskog sistema ne meri se samo snagom pojedinačnih mašina, već nivoom njihove integracije u jedinstven tehnološki niz koji mora funkcionisati bez prekida.

Istraživanja u ovoj disertaciji pokazuju da se upravo u ovim cikličnim krugovima krije najveći prostor za primenu stohastičkih modela, jer svaki novi utovar kamiona predstavlja priliku da se finalni kvalitet sirovine približi zahtevanom.

Zbog prirode rudarstva, oprema je izložena ekstremnim fizičkim opterećenjima i zahteva raspoloživost od 24 sata dnevno. Postizanje pouzdanog rada podrazumeva kompleksno balansiranje između projektovanog kapaciteta, životnog veka mašina i operativnih troškova. Svaki nesklad u ovim parametrima direktno ugrožava ekonomsku stabilnost projekta [10,56].

Izazov modernog inženjerstva u uslovima ekonomske nestabilnosti nije samo u nabavci nove opreme, već u maksimizaciji performansi i produženju životnog ciklusa već angažovanih sredstava kroz inteligentno servisiranje.

Zbog mogućnosti korišćenja mehanizacije velikog kapaciteta i niže cene koštanja po toni iskopanog materijala, površinska eksploatacija ostaje dominantan metod dobijanja čvrstih mineralnih sirovina u svetskim okvirima. U SAD se oko 85% svih minerala (izuzev nafte i gasa) dobija površinskim metodama eksploatacije [30].

### 3.1 Upravljanje kvalitetom

Upravljanje kvalitetom u rudarstvu prevazilazi okvire puke kontrole hemijskog sastava; to je dinamički proces optimizacije koji počinje još na radilištu. Ne može se svesti samo na sadržaj korisne komponente, jer ekonomsku vrednost i tehnološku pogodnost rude određuje širi skup njenih svojstava kao što su i mineraloški sastav, granulometrijski sastav, vlažnost, tvrdoća, abrazivnost i drugi faktori koji utiču na ponašanje materijala u otkopavanju, transportu i preradi. Odluke koje određuju kvalitet buduće rude se donose mnogo ranije, već na nivou klasifikacije materijala, definisanja granica površinskog kopa i izbora konačnog odredišta otkopane korisne mineralne sirovine. U tom smislu, kvalitet rude predstavlja operativnu kategoriju koja se oblikuje kroz sekvencu tehničkih odluka, a ne samo kroz naknadnu analizu uzoraka.

Polazeći od takvog shvatanja, upravljanje kvalitetom u rudarstvu može se razumeti kao plansko usmeravanje eksploatacije i transporta materijala sa ciljem da se kvalitet rude održi u granicama koje odgovaraju zahtevima prerade i da proizvodnja bude ekonomski isplativa. Posebno se naglašava da upravljanje kvalitetom mora da započne već u fazi planiranja i da traje tokom čitavog procesa eksploatacije, homogenizacije, mešanja i transporta, a ne da ostane svedeno na završnu proveru finalnog proizvoda [1,8].

Istraživanja ukazuju da na činjenicu da upravljanje kvalitetom mora biti uključeno u sam proces planiranja i vođenja eksploatacije, jer se upravo u toj fazi određuju izvori materijala, redosled otkopavanja, mogućnosti selektivnog zahvatanja i uslovi za mešanje uglja različitih karakteristika. U tom smislu, kvalitet nije samo prirodna osobina ležišta, već i posledica operativnih odluka koje se donose tokom proizvodnog procesa [1].

Zasnivanje upravljanja kvalitetom samo na jednom parametru čini odlučivanje dosta jednostavnim. Ali kada se u proces odlučivanja uvede više različitih parametara koje je potrebno istovremeno uskladiti, potrebno je rangirati ih po prioritetu [1]. Upravljanje kvalitetom treba posmatrati kao proces u kome se zahtevani kvalitet sirovine postiže planskim usklađivanjem materijala, načina njegovog mešanja i kontrole promenljivosti osnovnih parametara. Ujednačavanjem kvaliteta oscilacije treba da budu svedene na prihvatljiv nivo. Pojam homogenizacije rude u rudarskim sistemima obuhvata tehničko-tehnološke i organizacione postupke kojima se promenljiv kvalitet svodi na prihvatljiv nivo u okviru integrisanog proizvodnog lanca. Smislen je samo kada se uključi u širi koncept racionalnog iskorišćenja ležišta, odnosno kada omogućava zajedničku eksploataciju delova ležišta različitog kvaliteta uz istovremeno uvažavanje ekonomskog efekta proizvodnje [1].

Efikasnost se ne procenjuje se samo prema ostvarenju prosečne vrednosti nekog parametra, već i prema stepenu smanjenja varijabilnosti kvaliteta [1]. Upravljanje kvalitetom može biti jako jednostavno ako se zasniva na jednom vodećem parametru. Kada se uvede više uslova koje je potrebno istovremeno zadovoljiti, upravljanje kvalitetom postaje znatno zahtevniji postupak. U takvim slučajevima odlučivanje dobija višekriterijumski karakter, jer se između pojedinih zahteva kvaliteta moraju uspostaviti prioriteti [1].

Minimizovanje pogrešne klasifikacije rude i jalovine jedno je od ključnih pitanja u postupku upravljanja kvalitetom, pri čemu vrednost naprednijih modela ne proizlazi samo iz boljeg matematičkog opisa neizvesnosti, već i iz njihove sposobnosti da podrže kvalitetnije svakodnevne

odluke na kopu [35]. Unapređenje postupka upravljanja kvalitetom zahteva istovremeno razmatranje neizvesnosti kvaliteta, kretanja miniranog materijala i optimizacije granica otkopavanja, jer se tek njihovim povezivanjem mogu smanjiti gubici rude i razblaženje [36]. Dodatno je naglašeno da je povezivanje kratkoročnih i dugoročnih planova od suštinskog značaja za očuvanje usaglašenosti između strateških ciljeva i operativne izvodljivosti, naročito u uslovima neizvesnosti kvaliteta rudarskog materijala [42].

Povezanost diskontinualnih sistema i operativnog planiranja naročito dolazi do izražaja u uslovima kada se, pored kapaciteta proizvodnje, mora obezbediti i odgovarajući kvalitet rude. U diskontinualnim sistemima, svaka transportna jedinica nosi određeni nivo nesigurnosti, pa se proces mešanja rude mora planirati sa visokim stepenom predostrožnosti kako bi se osigurao stabilan ulazni parametar za dalju preradu, čime se direktno štiti tehnološki integritet celog rudnika.

Postizanje stabilnog kvaliteta sirovine iz heterogenog prirodnog ležišta predstavlja vrhunac rudarskog planiranja. To je proces u kojem inženjer mora istovremeno biti i strateg i analitičar, koristeći fleksibilnost diskontinualnih sistema da usaglasi geološku promenljivost sa strogim zahtevima prerade. Kvalitet se ne kontroliše samo na kraju procesa, on se projektuje i stvara na samom radilištu, kroz svaku utovarenu kašiku bagera.

Pored proizvodnih i transportnih ograničenja, operativno planiranje na površinskim kopovima sve češće uključuje i zahteve kvaliteta i kontrole transporta materijala. Razmatran je problem planiranja jedne radne smene u površinskom kopu tako što se istovremeno odlučuje koji će front biti aktivan, kako će kamioni biti raspoređeni po transportnim rutama i koje će količine materijala biti upućene ka pojedinim odredištima, uz istovremeno zadovoljenje ciljeva proizvodnje, hemijskog sastava i granulometrijskih parametara. Ovaj pristup je značajan jer pokazuje da se na operativnom nivou više ne može planirati samo koliko će rude biti otkopano, već se moraju uzeti u obzir i njen kvalitet i odredište, što kratkoročno planiranje direktno približava funkciji upravljanja procesom prerade [70].

Zbog toga operativni plan u diskontinualnim sistemima mora istovremeno definisati koliko će se materijala otkopavati, sa kojih lokacija, kojim redosledom i uz kakvo angažovanje transportne opreme, kako bi se zadovoljili i proizvodni i kvalitativni zahtevi. Na taj način operativno planiranje postaje centralni mehanizam upravljanja radom diskontinualnog sistema, jer povezuje tehnološke mogućnosti opreme sa ciljevima eksploatacije i prerade.

Sa stanovišta eksploatacije, kvalitet rude predstavlja meru pogodnosti materijala za ekonomično i tehnološki prihvatljivo iskorišćenje, pri čemu njegov značaj proizlazi ne samo iz sadržaja korisne komponente, već i iz promenljivosti osobina koje utiču na preradu i vrednost proizvoda [8].

Upravljanje kvalitetom rude na površinskim kopovima podrazumeva i stalno usklađivanje između geološkog modela, stvarnog stanja na kopu i zahteva prerade. Razlike između projektovanog i stvarno otkopanog kvaliteta mogu nastati kao posledica lokalne heterogenosti ležišta, razblaženja rude jalovinom, ograničene selektivnosti pri otkopavanju i promena u organizaciji transporta. Zbog toga kvalitet ne treba posmatrati kao unapred zadatu veličinu, već kao rezultat niza međusobno povezanih odluka koje počinju izborom aktivnog fronta radova, a završavaju se usmeravanjem materijala ka odgovarajućem odredištu. U tom smislu, efikasno upravljanje kvalitetom zahteva da operativni plan bude dovoljno osetljiv na promene u strukturi ležišta i dovoljno fleksibilan da omogući blagovremenu korekciju odluka u toku proizvodnje.

Poseban značaj upravljanja kvalitetom dolazi do izražaja kada se u plan uključi više mogućih odredišta rude i kada se eksplicitno razmatra neizvesnost kvaliteta i količine. Pokazano je da u heterogenim ležištima mešanje rude ne služi samo postizanju ciljanog kvaliteta, već i formiranju više komercijalno i tehnološki različitih proizvoda, pri čemu uključivanje više odredišta može značajno

povećati ekonomsku vrednost plana. Ovi rezultati istovremeno ukazuju da nominalno optimizovan plan nije nužno i pouzdan plan, jer se njegova ostvarivost menja kada se uzme u obzir neizvesnost otkopanih masa [41].

Upravljanje kvalitetom nema za cilj samo dostizanje prosečne ciljne vrednosti, već i smanjenje promenljivosti kvaliteta kroz vreme. U praksi je često važnije obezbediti stabilan i predvidiv ulaz u postrojenje nego povremeno ostvariti visoke pojedinačne vrednosti sadržaja korisne komponente. Stabilan kvalitet u preradi najčešće ne postiže izborom jednog idealnog izvora rude, već planskim kombinovanjem materijala različitih svojstava [8].

Takođe, kratkoročno planiranje je nivo na kojem se zapravo sprovodi kontrola sadržaja korisne komponente (engl. *grade control*): specifikacije kvaliteta moraju biti ispunjene sa visokom učestalošću, uz ograničenu fleksibilnost mešanja i pod neizvesnošću sastava materijala, što znači da problem postaje upravljanje varijabilnošću, a ne samo postizanje prosečnih ciljeva. U tom kontekstu, ishodi kratkoročnog planiranja, zavise od povezanosti plana eksploatacije i ponašanja utovarno-transportne opreme, te je zajednička optimizacija planiranja proizvodnje i upravljanja transportom neophodna kako bi se postigli pouzdani kapaciteti i performanse kvaliteta kada se neizvesnost eksplicitno uzme u obzir [15]. Ovo opravdava kratkoročno planiranje kao nezavisan sloj optimizacije, i kao problem upravljanja manjim vremenskim horizontom, koji dopunjuje dugoročno planiranje tako što strateške ciljeve prevodi u izvodljive operativne odluke usklađene sa zahtevima kvaliteta.

Noviji pravci dodatno pomeraju upravljanje kvalitetom u smeru ka integrisanim i adaptivnim modelima. Kratkoročna vrednost plana povećava se kada se odluke o raspoređivanju otkopne mehanizacije i upravljanja kvalitetom donose simultano, a ne sukcesivno, jer se time bolje koristi međuzavisnosti između kvaliteta materijala, granice otkopavanja i rasporeda opreme. Isti autori uvode i pristup kojim se istovremeno ažuriraju kratkoročni plan, raspored rudarske mehanizacije i krajnjeg odredišta materijala na osnovu novih informacija o kvalitetu rude, pri čemu senzorski i operativni podaci omogućavaju brže reagovanje sistema. Ovakav razvoj literature pokazuje da upravljanje kvalitetom u savremenom rudarstvu sve manje predstavlja statičan postupak kontrole. Upravo u tom okviru operativno planiranje na nivou smene dobija poseban značaj, jer predstavlja najkraći vremenski horizont na kome je moguće istovremeno upravljati i kapacitetom i varijabilnošću kvaliteta [46,47].

Kako bi se odgovorilo na velike varijacije u kvalitetu mineralnih ležišta, nedavne studije su predložile hibridne inteligentne sisteme upravljanja koji integrišu prediktivno modelovanje sa adaptacijom procesa; međutim, sinhronizacija sekvenci eksploatacije na nivou smene putem genetskih algoritama ostaje kritična, ali nedovoljno istražena komponenta ovog integrisanog lanca vrednosti „od rudnika do prerade“ [43]. Dok se novija istraživanja fokusiraju na optimizaciju planiranja proizvodnje i transportnih sistema koristeći Monte Karlo simulacije za upravljanje kapacitetom transporta, ovaj GA model proširuje logiku na kontrolu kvaliteta na nivou smene za više marginalnih kopova [76].

Da bi planiranje proizvodnje na površinskim kopovima bilo primenjivo u praksi, model mora uvažiti i dinamičke aspekte operativne kontrole na samom radnom prostoru. Efikasno praćenje varijabilnosti kvaliteta rude uslovljeno je i dinamikom operativnog uzorkovanja na nivou osnovne mehanizacije. Zbog toga je prilikom formulisanja funkcije cilja u okviru genetskog algoritma neophodno integrisati ograničenja koja se odnose na minimalne operativne zapremine rude obuhvaćene mešanjem. Uključivanje ovih parametara osigurava da generisana rešenja ne samo matematički maksimizuju neto sadašnju vrednost projekta, već i garantuju da će planirani tok eksploatacije ostati stabilan i unutar zahtevanih tehnoloških granica, čak i pri izraženim dnevnim fluktuacijama u kvalitetu iskopanog materijala [71].

Poseban izazov u upravljanju kvalitetom predstavlja činjenica da se odluke donose u uslovima ograničenog vremena i nepotpunih informacija. Na nivou smene nije dovoljno znati samo prosečan sadržaj korisne komponente po kopu, već je neophodno proceniti kako će se konkretna kombinacija lokacija, količina i transportnih tura odraziti na kvalitet ukupne mešavine. Upravo zbog toga operativno upravljanje kvalitetom zahteva modele koji mogu da prevedu geološku promenljivost u niz praktičnih odluka o otkopavanju i transportu. Takav pristup omogućava da se smanji odstupanje od ciljnog kvaliteta, ograniči potreba za naknadnim korekcijama u preradi i poveća pouzdanost proizvodnog sistema u celini. Pristup razvijen u ovoj disertaciji istovremeno upravlja nivoima Fe i SiO<sub>2</sub> i stabilnošću kvaliteta, uz ispunjavanje strogog proizvodnog kapaciteta po smeni.

### 3.2 Utovarno-transportna mehanizacija na površinskim kopovima

Sistem površinske eksploatacije predstavlja funkcionalno povezan skup rudarskih radova koji obuhvata pripremu materijala za otkopavanje, otkopavanje, transport i odlaganje otkrivke, kao i otkopavanje, transport, pretovar i skladištenje korisne mineralne sirovine. Njegova osnovna svrha jeste da obezbedi plansku, bezbednu i tehnički izvodljivu eksploataciju ležišta, uz racionalno korišćenje raspoloživih rezervi [34].

Za potrebe operativnog planiranja posebno je važno istaći da se transportni sistem ne može posmatrati odvojeno od rudarskog plana. Izbor odgovarajućeg transportnog sistema zavisi od većeg broja međusobno povezanih faktora. Najvažniji među njima su geometrija kopa, dubina eksploatacije, raspored radnih frontova, broj transportnih relacija, fizičko-mehaničke osobine materijala, potreban kapacitet, dužina transportnih puteva, raspoloživost prostora za infrastrukturu, kao i odnos investicionih i operativnih troškova.

Dodatno, u operativnom smislu, važni su i pouzdanost opreme, mogućnost održavanja sistema, osetljivost na zastoje i sposobnost da se transport prilagodi promenama u planu proizvodnje. Upravo zato savremeni pristupi sve češće povezuju izbor i dimenzionisanje transportnog sistema sa simulacijom, optimizacijom i analizom scenarija, umesto sa statičkim tehnno-ekonomskim poređenjem [4]. Stohastička simulacija može značajno unaprediti izbor i dimenzionisanje diskontinualnog sistema, jer obuhvata promenljivost vremena rada i slučajne promene koji u realnim situacijama bitno utiču na ostvarivi kapacitet [6].

Klasifikacija sistema površinske eksploatacije najčešće se vrši na osnovu ključnih inženjerskih i eksploatacionih kriterijuma [34]:

- po stepenu tehnološke i dinamičke zavisnosti između faza otvaranja ležišta, uklanjanja otkrivke i same eksploatacije mineralne sirovine;
- po načinu prostornog širenja fronta radova u odnosu na projektovane završne konture;
- po načinu i logistici radova vezanih za odlaganje otkrivke;
- po pristupu premeštanju otkrivke, koji je direktno uslovljen vrstom, strukturom i kapacitetom angažovane rudarske mehanizacije.

Prema načinu premeštanja otkopane otkrivke i vrsti korišćene opreme sistemi se dele na: beztransportno-otkopne, utovarno-transportne i transportno-odlagališne.

Prema toku materijala i tehnološke koncepcije kopa, utovarno-transportni sistemi se dele na [4]:

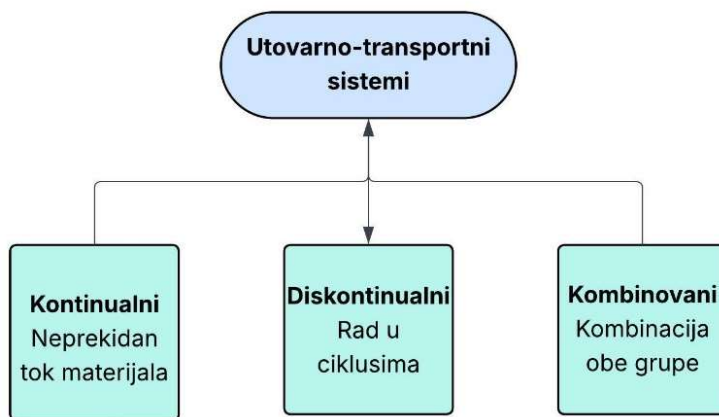
- Kontinualne sisteme
- Diskontinualne sisteme
- Kombinovane sisteme

Kontinualni sistemi karakterišu neprekidan tok materijala, pri čemu se otkopavanje, transport i odlaganje odvijaju kao funkcionalno povezan proces. U domaćoj literaturi se navodi da su sistemi sa kontinuiranim dejstvom oni koji podrazumevaju takvu organizaciju površinskog otkopavanja u kojoj se tok iskopanog materijala odvija kao neprekidan tehnološki proces, za razliku od diskontinualnih sistema, kod kojih se otkopavanje i transport odvijaju ciklično [4]. Takvi sistemi se najčešće sastoje od kontinualne otkopne mašine (rotorni bager), transporter sa trakom i odlagača ili deponijske mašine. Posebno su pogodni za velike proizvodne kapacitete i za materijale kod kojih nije neophodna prethodna priprema bušenjem i miniranjem. U istom izvoru ističe se i da kontinualni sistemi imaju naročito značajnu ulogu u srpskim površinskim ugljenim basenima, gde predstavljaju dominantno tehnološko rešenje u eksploataciji lignita [4].

Dok kontinualni sistemi obezbeđuju neprekidan protok materijala, diskontinualni sistemi se oslanjaju na ciklični rad različite opreme za utovar, transport i skladištenje. Kombinovani sistemi predstavljaju kombinaciju obe grupe. Bez obzira na tip, ključ uspeha leži u međusobnoj usklađenosti kapaciteta i resursa svih karika u lancu [30].

Izbor između kontinualnih i diskontinualnih sistema nije samo tehničko pitanje, već strateška odluka koja definiše ekonomski okvir rudnika. Dok kontinualni sistemi nude masovnost, diskontinualni sistemi omogućavaju hiruršku preciznost u eksploataciji, što je od presudnog značaja kod ležišta sa kompleksnom morfologijom i izraženom varijabilnošću kvaliteta. Metoda otkopavanja obuhvata detalje procedure, rasporeda i opreme koja se koristi u rudniku, a taj izbor je određen geološkim, fizičkim, ekološkim i ekonomskim okolnostima [30].

Klasifikacija sistema za utovar i transport, posmatrana kroz prizmu toka materijala vizuelno je predstavljena na slici 3-3.



Slika 3-3 Podela utovarno-transportnih sistema

Utovarno-transportni sistemi koji su angažovani na površinskim kopovima predstavljaju jednu od ključnih tehničko-tehnoloških osnova rudarske proizvodnje, jer povezuju mesto otkopavanja sa drobilničnim postrojenjima, deponijama, unutrašnjim i spoljašnjim odlagalištima, pri čemu neposredno utiču na kapacitet, troškove i stabilnost rada celog sistema. Njihov značaj proizlazi iz činjenice da se na površinskim kopovima istovremeno javlja više transportnih relacija i više odredišta materijala, zbog čega izbor sistema ne predstavlja izolovanu odluku, već sastavni deo planiranja eksploatacije. U klasičnoj literaturi o projektovanju i planiranju površinskih kopova ovaj problem se posmatra kao jedno od centralnih pitanja tehničke organizacije proizvodnje, dok savremeniji radovi dodatno naglašavaju potrebu da se transportne odluke povežu sa optimizacijom i operativnim upravljanjem [4,10].

### 3.2.1 Diskontinualni sistemi eksploatacije

Diskontinualni sistemi eksploatacije imaju neposredan značaj za operativno planiranje, jer se upravo u okviru njih planske odluke najizraženije prelamaju kroz raspoloživost opreme, trajanje transportnih ciklusa i izbor aktivnih radnih frontova. Promena jednog elementa sistema neposredno utiče na ostvarivost planiranog kapaciteta i stabilnost proizvodnje u celini. Upravo zato diskontinualni sistemi zahtevaju operativno planiranje koje je dovoljno detaljno da obuhvati cikličnu prirodu rada, ali i dovoljno fleksibilno da odgovori na promene koje nastaju tokom eksploatacije.

Diskontinualni sistemi se primenjuju prvenstveno kroz vezu bager-kamion (engl. *truck-shovel*). Karakterišu se po radu sa prekidima i po ciklusima, gde se transport materijala vrši u diskretnim jedinicama. Glavna prednost ovih sistema je njihova visoka fleksibilnost, mogućnost selektivnog otkopavanja i relativno niski početni investicioni troškovi u poređenju sa fiksnom infrastrukturom [10,30]. Međutim, kod diskontinualnih sistema kamionski transport predstavlja jednu od najznačajnijih stavki ukupnih operativnih troškova, zbog čega efikasan raspored kamiona ima neposredan uticaj na ekonomiku rada površinskog kopa [74].

Sa stanovišta planiranja, ciklus diskontinualnog sistema može se predstaviti kroz četiri osnovne faze: utovar na bageru, kretanje natovarenog kamiona, istovar na odredištu i povratak praznog kamiona, pri čemu ukupno trajanje ciklusa uključuje i vremena čekanja na utovaru i istovaru [74].

U operativnom smislu, princip rada bager-kamion sistema zasniva se na tome da jedna utovarna jedinica opslužuje određeni broj kamiona, pri čemu svako odstupanje između stope pristizanja kamiona i stope opsluživanja direktno utiče na iskorišćenje bagera, iskorišćenje kamionske flote i ostvarivi proizvodni učinak. Zbog toga se ovaj sistem ne može pouzdano oceniti samo na osnovu kapaciteta opreme, već zahteva analizu ciklusnog vremena i zastoja u sistemu [67].

Izrazita tehnološka fleksibilnost diskontinualnih sistema čini ih superiornim rešenjem u uslovima gde je neophodno precizno upravljanje kvalitetom mineralne sirovine. Mogućnost istovremenog rada na prostorno udaljenim radilištima omogućava inženjerima da, kroz selektivno otkopavanje i taktičko kombinovanje transportnih tura, postignu kvalitetnu mešavinu rude koja je kod krutih, kontinualnih sistema često neizvodljiva.

Efikasnost sistema kamion-bager direktno je uslovljena minimizacijom vremena čekanja i optimizacijom ciklusa vožnje. U diskontinualnim sistemima, transportni troškovi čine dominantan deo operativnih rashoda, zbog čega svako poboljšanje u sinhronizaciji utovara i prevoza do krajnjeg odredišta linearno utiče na profitabilnost projekta [60].

Njihova ekonomska efikasnost je snažno uslovljena dužinom transporta i trajanjem ciklusa vožnje, pa sa porastom dubine kopa i rastojanja prevoza dolazi do povećanja potrebnog broja kamiona i rasta operativnih troškova [64,73]. Efikasnost sistema zavisi i od varijabilnosti vremena utovara,

vožnje, istovara i povratka, koja u realnim uslovima rada dovodi ili do formiranja redova čekanja kamiona ili do praznog hoda utovarne jedinice [67,74]. Određivanje optimalnog broja kamiona po utovarnoj jedinici predstavlja problem kompromisa između troška praznog hoda bagera i troška angažovanja dodatnih kamiona, pa se ekonomski najpovoljnije rešenje postiže u tački u kojoj je jedinični trošak premeštanja materijala minimalan [74].

Upravljanje diskontinualnim sistemom eksploatacije ne svodi se samo na izbor angažovane opreme, već podrazumeva i stalno usklađivanje radnih frontova, transportnih pravaca i raspoloživih kapaciteta u okviru promenljivih uslova rada. U takvim sistemima operativna stabilnost plana zavisi od sposobnosti da se blagovremeno reaguje na promene.

Najrasprostranjeniji sistem u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina je bager–kamion sistem. Njegova ključna prednost je velika prilagodljivost različitim uslovima rada, što omogućava njegovu široku primenu. U okviru ovog diskontinualnog sistema najčešće se koriste mašine poput bagera kašikara, hidrauličnih bagera, skrepera, utovarivača i buldožera.

### **Bageri**

Bageri predstavljaju samohodne mašine namenjene za izvođenje osnovnih tehnoloških operacija pri otkopavanju stenskih i rastresitih masa. Njihova osnovna funkcija obuhvata iskopavanje, zahvatanje, prenos, transport na relativno kratkim rastojanjima i utovar otkopanog materijala, bez obzira na to da li se iskopava jalovina ili korisna mineralna sirovina (slika 3-4) [58]. Kod određenih tehnoloških sistema površinske eksploatacije, bageri se koriste i za transport materijala na veće udaljenosti, uz njegovo odlaganje na spoljašnja ili unutrašnja odlagališta, odnosno u prethodno otkopani prostor površinskog kopa [57].



*Slika 3-4 Rad bagera i transportnog sredstva u okviru utovarno-transportnog sistema na površinskom kopu., preuzeto sa [58]*

Pored ove osnovne rudarske namene, posebno mesto zauzimaju bageri iz široke grupe univerzalnih i poluuniverzalnih mašina sa jednim radnim organom. Njihova konstruktivna i funkcionalna osobenost ogleda se u mogućnosti zamene radnih organa, čime se znatno proširuje oblast njihove primene. Na taj način, ove mašine mogu biti prilagođene ne samo za zemljane i otkopne radove, već i za izvođenje specifičnih operacija, kao što su pobijanje šipova, uklanjanje panjeva, manipulacija teretom i drugi pomoćni ili specijalizovani radovi [57].

Bageri se, prema broju radnih organa i načinu ostvarivanja radnog procesa, dele na dve osnovne grupe: bagere sa jednim radnim organom, odnosno sa kašikom, koji rade po principu prekidnog ili cikličnog dejstva, i bagere sa više radnih organa, najčešće sa vedricama, koji ostvaruju neprekidno, kontinuirano radno dejstvo [57].

Suštinska odlika bagera sa jednim radnim organom jeste ciklični karakter rada, pri čemu se tehnološke operacije odvijaju po tačno utvrđenom redosledu. Taj ciklus obuhvata zahvatanje i punjenje kašike materijalom na otkopnom čelu, zatim rotaciju gornje strukture bagera sa teretom ka mestu istovara, potom istovar mase i na kraju povratno okretanje prazne opreme na startnu tačku otkopavanja. Na taj način, rad ovih bagera zasniva se na ponavljanju jasno definisanih radnih faza [57].

Sa konstruktivnog i funkcionalnog aspekta, bager se sastoji od više međusobno povezanih sistema i sklopova. Njegovu osnovu čine radni, izvršni i pogonski uređaji, koji neposredno omogućavaju realizaciju tehnoloških operacija. Pored njih, značajnu ulogu imaju i prenosni mehanizmi, preko kojih se ostvaruje veza između pogonskog sistema i radnog uređaja, uz odgovarajuću transformaciju kretanja, brzina i sila. Takođe, sastavni deo bagera predstavlja i transportni uređaj, čija je funkcija da obezbedi tehnološka pomeranja mašine tokom rada, kao i njen transport na veća rastojanja. Celokupan sistem oslonjen je na noseću metalnu konstrukciju, dok se upravljanje i usklađivanje rada pojedinih agregata i mehanizama ostvaruje putem sistema upravljanja i automatizacije [57].

Radni uređaj bagera obuhvata radni organ i izvršne mehanizme. Kao primarni element u kontaktu sa stenskom masom, radni organ (kašika) vrši direktno otkopavanje materijala na otkopnom čelu, dok sva neophodna kretanja obezbeđuje preko sistema izvršnih mehanizama bagera. Na taj način se omogućava ostvarivanje osnovne funkcije bagera: zahvatanje, odvajanje i premeštanje materijala [57].

Prenosni mehanizam ima zadatak da prenese energiju i kretanje od pogonskog motora do mehanizama za izvršenje funkcija, uz istovremenu transformaciju vrste kretanja, kao i odgovarajuće prilagođavanje brzine, sile delovanja i momenata. Njegova uloga je od ključnog značaja za efikasno i pouzdano funkcionisanje celokupnog radnog sistema bagera [57].

Bageri se mogu klasifikovati prema više kriterijuma, pri čemu se u stručnoj i naučnoj literaturi najčešće izdvajaju sledeći osnovi podele: prema nameni, vrsti radnog organa, zapremini kašike, stepenu zaokretanja, načinu kretanja, kinematskim karakteristikama, vrsti pogonskog uređaja i sistemu upravljanja. Ovakva klasifikacija omogućava potpunije sagledavanje konstruktivnih, funkcionalnih i eksploatacionih osobina bagera, kao i njihove primene u različitim rudarskim i građevinskim uslovima [57].

Prema nameni, bageri se dele na univerzalne, poluuniverzalne i specijalne. Univerzalni bageri odlikuju se širokim spektrom primene i mogućnošću izvođenja različitih vrsta radova uz korišćenje odgovarajućih radnih organa. Poluuniverzalni bageri imaju nešto užu oblast primene, ali i dalje zadržavaju određeni stepen prilagodljivosti različitim radnim uslovima. Specijalni bageri konstruisani su za obavljanje tačno određenih, specifičnih tehnoloških operacija, zbog čega su njihova konstrukcija i radne karakteristike usko prilagođene posebnoj nameni [57].

Prema vrsti radnog organa, razlikuju se bageri sa čvrsto vezanim i bageri sa gipko vezanim radnim elementima. U prvu grupu spadaju bageri kod kojih je radni organ kruto povezan sa izvršnim mehanizmima, kao što su bager sa čeonom ili visinskom kašikom, bager sa obrnutom ili dubinskom kašikom, kao i bager sa kašikom za struganje. Ovi bageri se najčešće koriste u uslovima gde je potrebno precizno vođenje radnog organa i ostvarivanje direktnog mehaničkog dejstva na radnu sredinu. Drugu grupu čine bageri sa gibko vezanim radnim elementima, kod kojih je radni organ povezan pomoću užadi ili drugih elastičnih elemenata. U ovu kategoriju ubrajaju se bageri sa povlačnom, odnosno dreglajnskom kašikom, bageri sa kašikom grabilicom ili grejferom, kao i mašine opremljene kukom za dizanje i premeštanje tereta, odnosno kranovi. Njihova prednost ogleda se u većem radijusu zahvata i mogućnosti rada u specifičnim uslovima eksploatacije [57].

Prema zapremini kašike, bageri se razvrstavaju na mašine sa vrlo malom, malom, srednjom i velikom zapreminom kašike. U grupu bagera sa vrlo malom zapreminom spadaju oni čija je zapremina kašike do 0,3 m<sup>3</sup>. Bageri sa malom zapreminom imaju kašiku kapaciteta od 0,3 do 2,0 m<sup>3</sup>, dok srednju grupu čine bageri sa zapreminom kašike od 2,0 do 6,0 m<sup>3</sup>. U kategoriju velikih bagera svrstavaju se mašine sa zapreminom kašike većom od 6,0 m<sup>3</sup>, pri čemu savremena rudarska praksa poznaje bagere čija zapremina dostiže i do 168 m<sup>3</sup>. Ovaj kriterijum klasifikacije neposredno je povezan sa kapacitetom mašine i obimom proizvodnje koji se može ostvariti u datim radnim uslovima [57].

Prema stepenu okretanja, bageri mogu biti delimično okretni i potpuno okretni. Kod delimično okretnih bagera ugao okretanja gornje platforme sa bagerskom kašikom u horizontalnoj ravni je limitiran, najčešće u opsegu od 180° do 270°. Nasuprot tome, potpuno okretni bageri omogućavaju punu rotaciju gornje gradnje za 360°, što im daje veću operativnu fleksibilnost i šire mogućnosti primene [57].

Prema tipu transportnog uređaja, razlikuje se više vrsta bagera. Bageri na pneumaticima koriste se uglavnom kod univerzalnih mašina manjeg kapaciteta i manje snage, gde je značajna pokretljivost i brzina premeštanja. Bageri na gusenicama predstavljaju najrasprostranjeniji tip, zbog dobre stabilnosti, povoljnog rasporeda opterećenja na tlo i mogućnosti rada u različitim terenskim uslovima. Bageri sa koračajućim transportnim uređajem imaju naročito značajnu primenu kod dreglajna srednjeg i velikog kapaciteta, posebno u površinskoj eksploataciji. Šinski bageri imaju ograničenu i specifičnu primenu, najčešće u radovima koji se izvode duž železničkih pruga. Ploveći bageri namenjeni su za rad u vodenoj sredini, odnosno za otkopavanje materijala ispod nivoa vode, pa se koriste u posebnim uslovima eksploatacije i hidrotehničkim radovima [57].

Prema sistemu upravljanja, bageri se dele na one sa mehaničkim, električnim, hidrauličnim, pneumatskim i kombinovanim upravljanjem. Ova podela zasniva se na načinu prenošenja upravljačkih komandi i ostvarivanja radnih kretanja mašine [57].

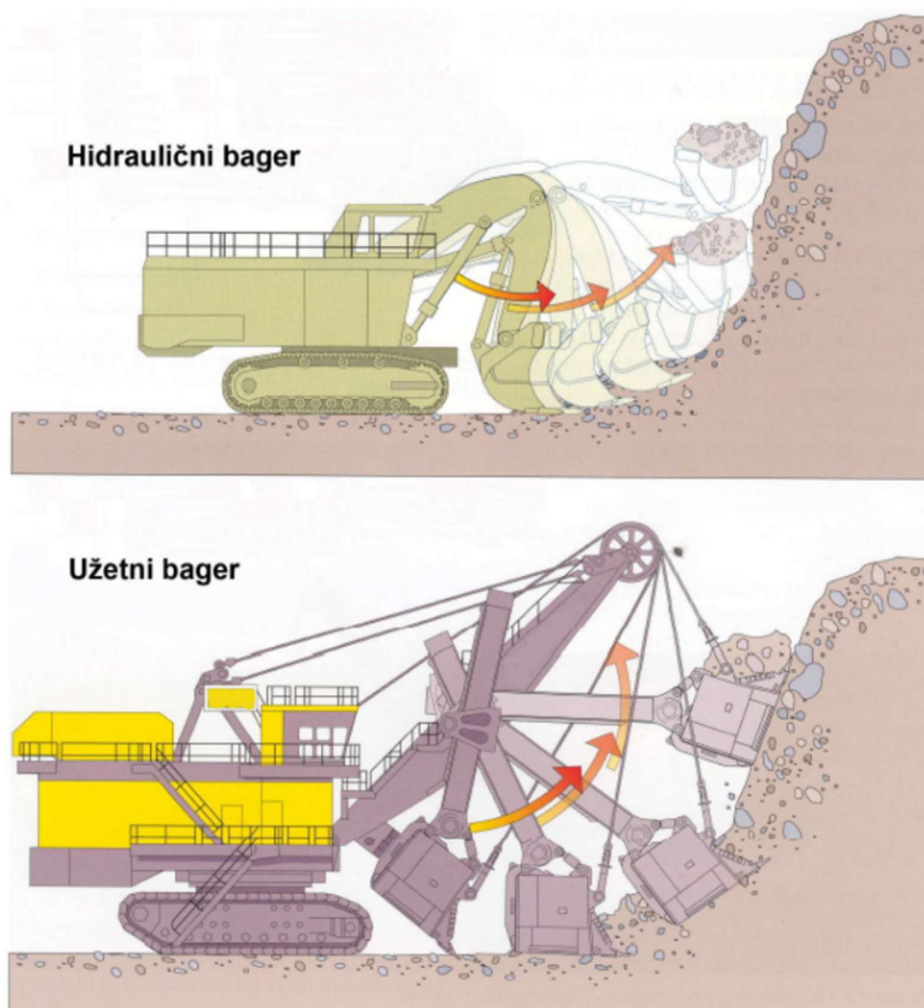
### **Radni organ kod bagera koji imaju jedan radni element**

Bageri sa čvrsto vezanim radnim elementom predstavljaju grupu mašina kod kojih je radni organ kruto povezan sa ostalim delovima radnog uređaja, što omogućava precizno vođenje kašike i efikasno izvođenje različitih otkopnih operacija. Ovoj grupi pripadaju bager sa normalnom ili visinskom kašikom, u praksi često nazivan bager kašikar, zatim bager sa obrnutom ili dubinskom kašikom, kao i bager sa kašikom za struganje, poznat i kao bager strug [59].

Bager sa normalnom, odnosno visinskom kašikom, koristi se za radnje kao što su otkopavanje i utovar materijala u transportna sredstva, kao i za direktno odlaganje jalovine u prostor za to namenjen. Može raditi i u neizminiranom i u prethodno izminiranom materijalu. Konstruktivno je namenjen prvenstveno za otkopavanje materijala iznad nivoa stajanja na kome se nalazi, zbog čega je pogodan za visinski rad. Iako može zahvatati materijal i ispod tog nivoa, dubina otkopavanja je mala i nema veći tehnološki značaj. Radni ciklus ovog bagera sastoji se od kopanja mineralne

sirovine, okretanja ka mestu istovara, pražnjenja kašike i vraćanja u početni položaj, a u određenim situacijama može obuhvatiti i fazu pozicioniranja [59].

Na slici 3-5 je prikazan proces kopanja hidrauličnog i užetnog bagera [57].



Slika 3-5 Prikaz procesa kopanja sa hidrauličnim i sa užetnim bagerom kašikarom, preuzeto iz [57]

### Kapacitet bagera

Kapacitet bagera koji ima jedan radni element može se odrediti proračunom, hronometrijskim praćenjem rada ili na osnovu opažanja i usvojenih normi, zasnovanih na prethodnim merenjima [57].

Na njegovu vrednost utiče veliki broj mašinsko-tehničkih, geomehaničkih, tehnoloških i organizacionih faktora. Najvažniji među njima su konstruktivne i kinematičke karakteristike bagera, kao što su zapremina kašike, brzine radnih kretanja, tip transportnog uređaja, kao i čvrstoća, trajnost i pouzdanost glavnih sklopova. Značajan uticaj imaju i fizičko-mehaničke osobine materijala koji se otkopava, pre svega otpor pri kopanju, rastresitost i prisustvo pukotina u masivu. Pored toga, važni su i usklađenost radnih parametara bagera sa uslovima na radilištu, kao i ukupna organizacija rada na otkopu [57].

Konstruktivni i kinematički parametri određeni su samom konstrukcijom mašine i za dati tip uglavnom su nepromenljivi, dok ostali faktori zavise od konkretnih eksploatacionih uslova. U zavisnosti od stepena uticaja ovih činilaca razlikuju se teoretski, tehnički i eksploatacioni kapacitet bagera [59].

Teoretski kapacitet bagera sa jednim radnim organom predstavlja idealizovani pokazatelj njegove proizvodnosti i određuje se na osnovu zapremine kašike i projektovanog broja ciklusa u minuti, pri nominalnim uslovima rada. Ovakvo definisanje polazi od pretpostavke da bager radi neprekidno, bez operativnih zastoja i odstupanja u režimu opterećenja, pa se dobijena vrednost može tumačiti kao teorijski učinak ostvaren u toku jednog časa rada [57].

Pošto se prilikom kopanja kašika ispunjava rastresitim materijalom, kapacitet se iskazuje u kubnim metrima rastresite mase materijala na čas. U proračunu se, radi pojednostavljenja, usvaja da su i koeficijent punjenja kašike i koeficijent rastresitosti jednaki jedinici. Kako ove pretpostavke ne odgovaraju stvarnim uslovima eksploatacije, teoretski kapacitet treba posmatrati kao uslovnu i idealnu veličinu, čija je osnovna svrha da omogući poređenje tehničkih karakteristika i potencijalne proizvodnosti različitih konstrukcijskih rešenja bagera [57].

U tom smislu, teoretski kapacitet se može izraziti sledećom relacijom [57]:

$$Q_{\{teor\}} = 60 \cdot q \cdot n_t \quad (1)$$

pri čemu je:

$q$  - geometrijska zapremina kašike, izražena u kubnim metrima

$n_t$  - računski broj ciklusa u minuti

Računski broj ciklusa u minuti predstavlja važan pokazatelj radne sposobnosti bagera i određuje se za standardizovane uslove rada, pri karakterističnim uglovima okretanja i nominalnim opterećenjima. Njegova vrednost zavisi od ukupnog trajanja jednog radnog ciklusa, koji uključuje kopanje, okretanje pune kašike, istovar i povratak prazne kašike u položaj za novi zahvat [57].

$$n_t = \frac{60}{t_c} \quad (2)$$

gde je:

$t_c$  – trajanje ciklusa

$$t_c = t_k + t_o + t_i + t'_o \quad (3)$$

gde je:

$t_k$  – vreme kopanja, sec

$t_o$  – vreme okretanja pune kašike, sec

$t_i$  – vreme istovara kašike, sec

$t'_o$  – vreme okretanja prazne kašike, sec

Pojedine faze ciklusa određuju se na osnovu kinematičkih i dinamičkih parametara bagera. Vreme kopanja ( $t_k$ ) zavisi od puta i brzine zahvatanja, vreme okretanja od uslova kružnog kretanja gornje gradnje, dok je vreme istovara povezano sa visinom pražnjenja kašike. Zbir ovih vremena određuje trajanje celog ciklusa, a samim tim i broj ciklusa koji bager može da ostvari u jedinici vremena.

$$t_k = \frac{l_k}{v_k} \quad (4)$$

gde je:

$l_k$  – put kopanja, m

$v_k$  – brzina kopanja, m/sec

Vreme okretanja [57]:

$$t_o = \frac{w_{max}^2 J (1.37 + i_0^2)}{b_k + N_{max} \cdot 1.36 \eta_0^2} + \frac{\beta_{sr}}{w_{max}} \quad (5)$$

gde je:

$w$  – maksimalna ugaona brzina, rad/s

$J$  – inercioni moment obrtnih delova, kgm<sup>2</sup>

$\eta$  – koeficijent korisnog dejstva uređaja za kružno kretanje – 0,85

$b_k$  – koeficijent koji karakteriše višemotorne i jednomotorne bagere (za višemotorne bagere  $b_k = 275$ , za jednomotorne  $b_k = 175$ )

$N_{max}$  – maksimalna snaga motora za kružno kretanje, kW

$\beta_{sr}$  – ugao zaokretanja kašike, tj. srednji ugao pri pražnjenju kašike, rad

Zatim vreme istovara [57]:

$$h_k = \frac{g \cdot t^2}{2} \quad (6)$$

$$t_i = \sqrt{\frac{2 \cdot h_k}{g}} \quad (7)$$

gde je:

$h_k$  - visina kašike u trenutku pražnjenja, m

$g$  - ubrzanje zemljine teže, m/s<sup>2</sup>

Tehnički kapacitet bagera se objašnjava kao maksimalni ostvarivi učinak mašine u realnijim radnim uslovima i iskazuje se u kubnim metrima čvrste mase po času rada. Za razliku od teoretskog kapaciteta, koji se zasniva na idealizovanim pretpostavkama, tehnički kapacitet obuhvata osobine materijala koji se eksploatiše, kao i konkretne uslove rada na radilištu. Na taj način, on daje realniju sliku proizvodnih mogućnosti bagera i omogućava procenu stepena njegovog stvarnog iskorišćenja [59].

Proračun tehničkog kapaciteta zasniva se na korekciji teorijskog učinka preko koeficijenta punjenja kašike i koeficijenta rastresitosti materijala. Koeficijent punjenja izražava stepen iskorišćenja geometrijske zapremine kašike, odnosno odnos stvarno zahvaćene količine rastresitog materijala i nominalne zapremine kašike. Koeficijent rastresitosti uzima u obzir promenu zapremine materijala nakon otkopavanja i predstavlja odnos zapremine rastresite mase u kašici i zapremine istog materijala u čvrstom stanju. Uključivanjem ovih korektivnih faktora dobija se pokazatelj koji verodostojnije odražava tehničke mogućnosti bagera u datim eksploatacionim uslovima [59].

Obrazac za proračun tehničkog kapaciteta je [57]:

$$Q_{\{te\}} = 60 \cdot q \cdot n \cdot \frac{K_p}{K_r}, m^3\check{c}m/h \quad (8)$$

gde je:

- $K_p$  – koeficijent punjenja kašike materijalom predstavlja pokazatelj stepena popunjenosti kašike rastresitim materijalom i određuje se kao odnos zapremine materijala zahvaćenog u kašici i njene geometrijske zapremine
- $K_r$  – koeficijent rastresitosti materijala u bagerskoj kašici definiše se kao odnos zapremine materijala u rastresitom stanju, sadržanog u istoj i zapremine čvrste mase tog materijala

Eksploatacioni kapacitet bagera predstavlja pokazatelj proizvodnosti mašine u realnim uslovima rada, pri čemu se, pored karakteristika otkopavanog materijala i tehničko-tehnoloških parametara radilišta, uzima u obzir i stvarni stepen vremenskog iskorišćenja mašine. Za razliku od tehničkog kapaciteta, eksploatacioni kapacitet obuhvata uticaj organizacionih, tehnoloških i operativnih zastoja, zbog čega verodostojnije odražava stvarne proizvodne mogućnosti bagera u procesu eksploatacije [59].

Njegovo određivanje zasniva se na korekciji radnog učinka faktorima koji opisuju punjenje kašike, rastresitost materijala i vremensko iskorišćenje raspoloživog fonda vremena. Na taj način, eksploatacioni kapacitet ne predstavlja idealizovan ili maksimalno moguć učinak, već realno ostvarivu proizvodnost u konkretnim uslovima rada na otkopu [59].

Ovaj kapacitet može se određivati za različite vremenske intervale, kao što su smena, dan, mesec, kvartal ili godina. U praksi se najčešće računa za duže vremenske periode, naročito na godišnjem nivou, jer koeficijent vremenskog iskorišćenja u kraćim intervalima ne daje dovoljno reprezentativnu sliku ukupne radne efikasnosti mašine [59].

Koeficijent vremenskog iskorišćenja definiše se kao odnos efektivnog ili radnog vremena i ukupnog raspoloživog kalendarskog vremena posmatranog perioda. Njegova vrednost se često izražava i u procentima, čime se omogućava jasnije sagledavanje stepena iskorišćenja mašine u toku eksploatacije [59].

Obrazac za određivanje eksploatacionog kapaciteta je [57]:

$$Q_{ek} = 60 n_t \frac{K_p}{K_r} \eta_T T_k \text{ m}^3 \text{ č.m./} T_k \quad (9)$$

Koeficijent vremenskog iskorišćenja je [57]:

$$\eta_T = \frac{T_b}{T_k} \text{ ili } \frac{T_{ef}}{T_k} \quad (10)$$

Vremensko iskorišćenje izražava se često u procentima u odnosu na kalendarsko vreme pa shodno tome je [57]:

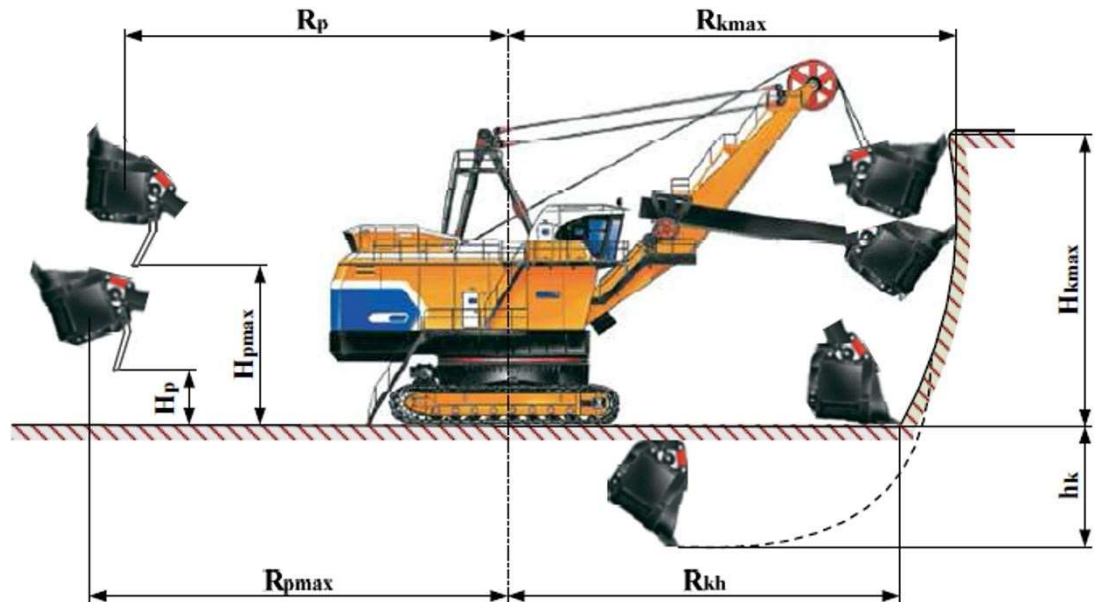
$$\eta_T = \frac{T_{ef}}{T_k} \cdot 100\% T_k \quad (11)$$

### **Bageri kašikari**

Bageri kašikari su zapravo užetni bageri koji se najviše koriste u rudarstvu, posebno za rad u mekim i rastresitim stenama gde nije potrebno prethodno razbijanje materijala. Postoje različite vrste ovih bagera u zavisnosti od namene, veličine i kapaciteta, pa se tako razlikuju bageri za utovar i oni za direktno prebacivanje materijala [51].

Njihovu konstrukciju čine obrtna platforma sa kabinom i pogonskim mehanizmima, sistem za kretanje (gusenični ili točkaši) i radni deo koji uključuje kašiku i strelu. Proizvode se sa različitim zapreminama kašike, od 2 do 130 m<sup>3</sup>, i mogu imati električni ili dizel pogon. Spadaju u cikličnu, odnosno diskontinualnu mehanizaciju i najčešće se koriste u bager-kamion sistemu za kopanje i utovar materijala. Veliki bageri kašikari koriste se za direktno prebacivanje otkrivke bez transporta. Mogu raditi u bloku, frontu ili useku, pri čemu najveći učinak postižu radom u bloku [51].

Slika 3-6 prikazuje radne parametre bagera kašikara [51].



Slika 3-6 Radni parametri bagera kašikara, preuzeto od [51]

Radius kopanja je horizontalno rastojanje od ose okretanja bagera do vrha zuba kašike tokom kopanja. Postoje maksimalni radius kopanja ( $R_{kmax}$ ), kada su ručke potpuno ispružene, i radius kopanja na planiranoj ravni ( $R_{kh}$ ) [51].

Radius pražnjenja ( $R_p$ ) je horizontalno rastojanje od ose okretanja bagera do ose kašike tokom istovara. Razlikuju se radius pražnjenja pri maksimalnoj visini ( $R_{pvm}$ ) i maksimalni radius pražnjenja ( $R_{pmax}$ ), kada su ručke potpuno ispružene i u horizontalnom položaju [51].

Visina kopanja ( $H_k$ ) jeste vertikalno rastojanje od nivoa na kojem stoji bager do vrha zuba kašike pri kopanju. Njena maksimalna vrednost ( $H_{kmax}$ ) javlja se kada su ručke najviše podignute [51].

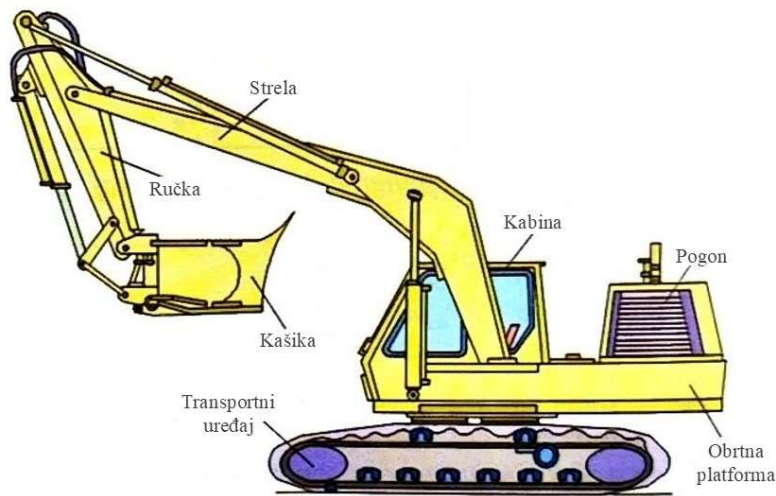
Visina pražnjenja ( $H_p$ ) je vertikalno rastojanje od nivoa terena do donje ivice kašike pri istovaru. Maksimalna visina pražnjenja ( $H_{pmax}$ ) postiže se kada su ručke i kašika maksimalno podignute [51].

### Hidraulični bageri

Hidraulični bageri su mašine čija je osnovna namena iskop i utovar mineralnih sirovina. Pored toga, mogu se koristiti i za izvođenje različitih pomoćnih operacija, kao što su podizanje tereta, radovi pri montaži, planiranje terena i drugi prateći poslovi u procesu eksploatacije [54].

Njihova značajna prednost ogleda se u mogućnosti prilagođavanja različitim radnim uslovima putem zamene radnih alata. U zavisnosti od zahteva radnog procesa, mogu biti opremljeni različitim tipovima kašika za rad visinski ili za rad dubinski, kukom za dizanje tereta, kao i alatima poput pikamera. Na taj način, hidraulični bageri predstavljaju višenamenske mašine koje omogućavaju efikasno izvođenje različitih operacija u eksploataciji mineralnih sirovina [54].

Na narednoj slici, 3-7 je prikazan je hidraulični bager i osnovni njegovi delovi [50].



Slika 3-7 Hidraulični bager, preuzeto iz [50]

Hidraulični bageri se mogu podeliti prema nekoliko osnovnih stvari. Prvo, razlikuju se po načinu kretanja, pa mogu biti na gusenicama ili na točkovima. Zatim, deli se i prema tome koliko im se platforma okreće, neki se ne okreću, neki delimično, a neki potpuno [54].

Takođe, razlikuju se po vrsti motora koji koriste, odnosno imaju li motor sa unutrašnjim sagorevanjem ili elektromotor. Bitna podela je i po veličini kašike, koja može biti mala, srednja ili velika [54].

Još jedan kriterijum je pritisak u hidrauličnom sistemu koji može biti nizak, srednji ili visok. Na kraju, bageri se razlikuju i po konstrukciji radnog dela, odnosno kakvu opremu imaju (različite vrste kašika ili teleskopsku opremu) [54].

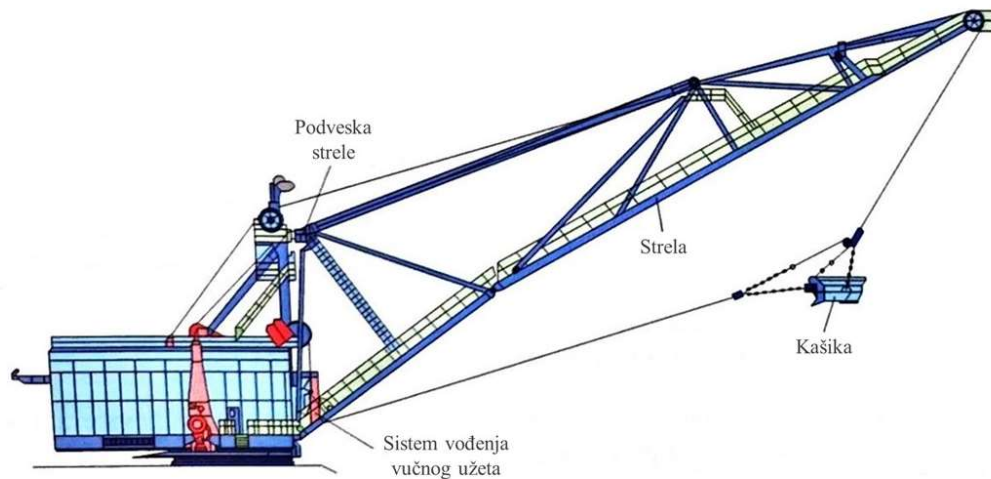
### **Dreglajni**

Bageri dreglajni su bageri sa gibko (elastično) vezanim radnim elementom. Bageri dreglajni su posebna vrsta bagera koji se uglavnom koriste za otkopavanje stenskog materijala i njegovo prebacivanje u već iskopani prostor, dok se ređe koriste za utovar u transportna sredstva. Nazivaju se i bageri sa vučom radnog organa, jer se kašika u materijal uvlači pomoću užadi [51].

Njihova glavna specifičnost je radni organ—kašika je okačena na strelu pomoću užadi, za razliku od klasičnih kašikara. Strela može biti veoma duga, čak do 125 metara, a zapremina kašike i do 140 m<sup>3</sup>. Mogu se kretati pomoću gusenica ili koračajućeg mehanizma [51].

Dreglajni na gusenicama obično imaju kraću strelu i manju kašiku, pa se često koriste za pomoćne radove na površinskim kopovima. Sa kašikama zapremine 4–10 m<sup>3</sup> mogu utovarati mekši materijal u transportna sredstva [51].

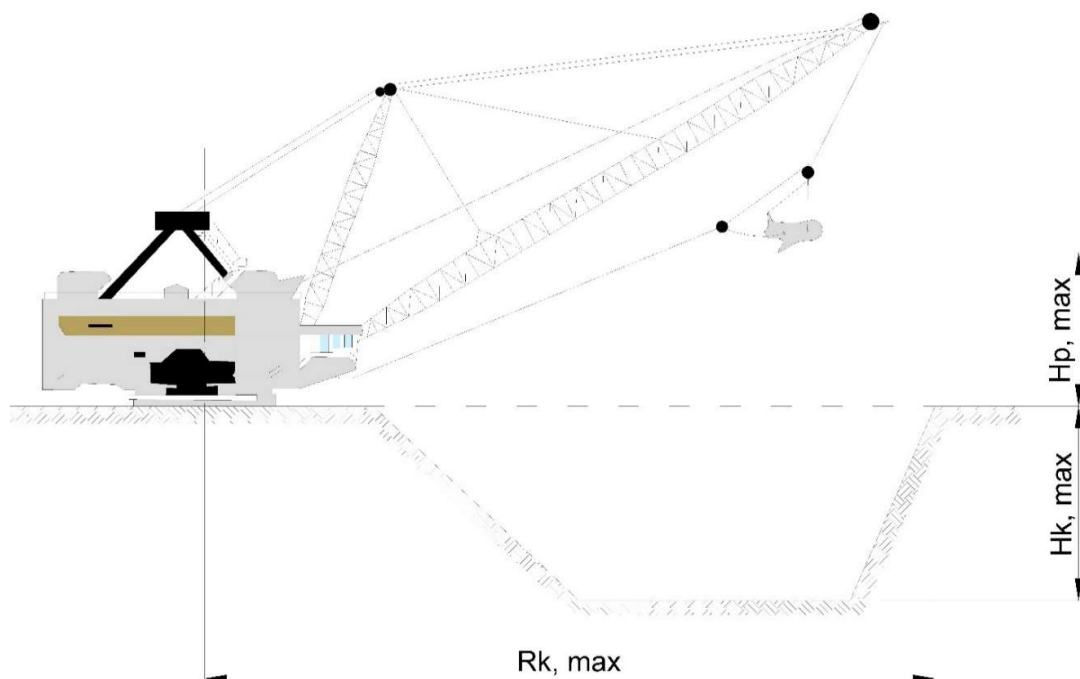
Na slici 3-8 se vidi radni organ bagera dreglajna. [54]



Slika 3-8 Bager dreglajn, preuzeto iz [54]

Najčešće se koriste za dubinsko kopanje, odnosno za iskop ispod nivoa na kome se bager nalazi, naročito u blokovima i usecima. Njihova primena u bestranspornim tehnologijama je ekonomična i efikasna, posebno u složenim geološkim i čak vodom zasićenim uslovima, što im je velika prednost. Najviše se koriste za skidanje otkrivke uglja, izgradnju puteva i luka, kao i za prebacivanje velikih količina stenskog materijala [51].

Radni parametri ovog bagera su prikazani na slici 3-9 [51].



Slika 3-9 Radni parametri bagera dreglajna, preuzeto iz [51]

Na šemi su označeni radni parametri pri čemu je  $H_{k,max}$  je maksimalna dubina kopanja;  $H_{p,max}$  se odnosi na maksimalnu visinu pražnjenja dok je  $R_{k,max}$  maksimalni radijus kopanja.

### **Kamioni**

Kamioni su transportna sredstva u sistemu bager–kamion, odnosno teretna motorna vozila namenjena za prevoz materijala i robe na kraće i duže udaljenosti. Imaju najširu primenu u odnosu na druga transportna sredstva, kako u rudarstvu, tako i u građevinarstvu, trgovini, poljoprivredi i drumskom saobraćaju. Najčešće se izrađuju kao vozila na točkovima sa dizel pogonom, ali mogu koristiti i druge vrste pogona, poput električnog, trolejskog ili kombinovanog.

Eksploatacija i otkopavanje zahtevaju veliki broj vozila koja će prevoziti otkopani materijal, kao što su ruda i jalovina, od mesta iskopavanja do predviđene lokacije. Efikasnost vozila zavisi od puteva, nagiba, nosivosti i kvaliteta, što utiče na trajanje ciklusa, habanje i potrošnju goriva, a samim tim i na produktivnost i profitabilnost [52].

Tokom poslednjih decenija kamioni-damperi su unapređeni, pa njihova nosivost raste sa 20 tona na preko 350 tona. Kamionskim transportom se prevoze sve vrste eksploatisanih mineralnih sirovina, od mekih i rastresitih do veoma čvrstih i teških stenskih materijala [52].

Damperi imaju brojne prednosti, mogu raditi samostalno ili u kombinaciji sa drugim transportnim sredstvima, a njihova nosivost danas prelazi 300 tona kod dampera i 500 tona kod tegljača [52].

Na osnovu prakse, kamionski transport se može primeniti u sledećim uslovima: u početnoj fazi otvaranja površinskih kopova radi bržeg otvaranja, pri selektivnom otkopavanju, kod kraćeg veka eksploatacije, u brdovitim terenima, kod manjih ležišta sa složenom konfiguracijom, za transport na kraćim i dužim relacijama, kao i kod dubokih površinskih kopova sa vrlo strmim ležištima u kombinaciji sa drugim transportnim sredstvima. Osnovni cilj organizacije transporta je upravljanje utovarno-transportnom mehanizacijom tako da se maksimalno iskoristi njen kapacitet, uz obezbeđivanje optimalnog i nesmetanog rada [55].

Primena kamiona ima brojne prednosti: velike manevarske sposobnosti zbog malog radijusa okretanja, mogućnost savladavanja nagiba puteva do 15 %, nezavisnost od izvora energije, fleksibilnost rada na privremenim i višespratnim putevima, niža ulaganja u puteve u odnosu na pruge, brža izrada useka, povećanje učinka bagera za 20–30 %, primena buldozerskog odlaganja otkrivke i to što kvar jednog kamiona ne zaustavlja ceo transport [55].

Međutim, postoje i nedostaci: visoki troškovi transporta, zavisnost od vremenskih uslova, značajni troškovi održavanja, potreba za većim brojem radnika, složena organizacija posla i zagađivanje okoline (gasovi, buka, prašina) [55].

Prilikom izbora kamiona važno je poznati njegove konstruktivne karakteristike – snagu i tip motora, način pražnjenja, kapacitet, tip točkova i pogona – kao i uslove primene: vrstu materijala (čvrst, mekan, rastresit, abrazivan), karakteristike puteva, dužinu relacija i manevarske mogućnosti.

Slika 3-10 prikazuje neke vrste kamiona koji se koriste na površinskim kopovima [53].



Slika 3-10 a-tegljači sa poluprikolicom, b-tegljač sa prikolicom, v-damper, preuzeto iz [53]

U okviru eksploatacije na malim i srednje velikim površinskim kopovima, kamionski transport ima široku primenu zbog svoje izražene mobilnosti, kao i zbog energetske i tehnološke nezavisnosti u odnosu na druge transportne sisteme. Poseban značaj ima u uslovima složene topografije terena i promenljivih geoloških karakteristika ležišta, gde obezbeđuje visok nivo operativne efikasnosti. Suština njegove primene zasniva se na transportovanju iskopanog materijala sa radilišta do mesta istresanja putem odgovarajuće putne infrastrukture.

Načelni uslovi za primenu kamionskog transporta iskazani su u Tabeli 3-1 [59].

Tabela 3-1 Uslovi primene kamionskog transporta, preuzeto iz [59]

<b>Pokazatelji</b>	<b>nosivost 10 t</b>	<b>nosivost 20 t</b>	<b>nosivost 30 t</b>	<b>nosivost 60 t</b>
Racionalna dužina transporta, (km)	1,5 - 2	3 - 3,5	do 5	6 - 7
Godišnji kapacitet površinskog kopa, (miliona m <sup>3</sup> /god)	2 - 3	do 10	do 20	do 60
Minimalni radijus okretanja, (m)	10 - 15	15 - 20	20 - 35	20 - 55
Racionalna zapremina kašike bagera, (m <sup>3</sup> )	2 - 2,5	2 - 3	4 - 5	5
Karakteristike materijala	meki, polučvrsti	meki, čvrsti	teške stene i rude	teške stene i rude

Sa stanovišta organizacije transporta na površinskim kopovima, kamionski putevi se razvrstavaju na stalne i privremene. Stalni putevi formiraju se duž terena, u usecima i na transportnim etažnim ravnima završne kosine kopa, dok privremene saobraćajnice obuhvataju etažne puteve unutar kopa i na odlagalištima.

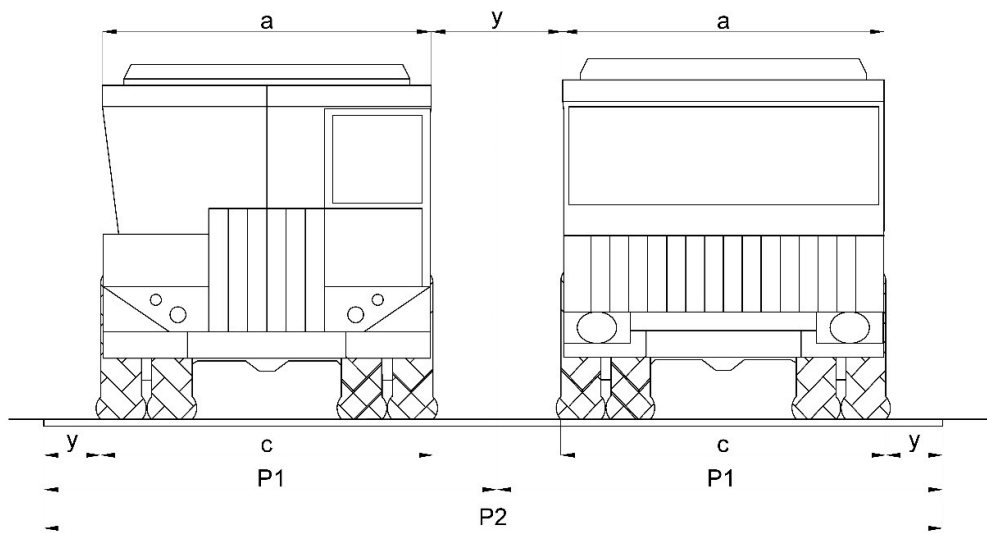
Tehnološke karakteristike puta određuju dozvoljene uslove eksploatacije transportnih sredstava, pre svega projektovanu brzinu kretanja kamiona, na osnovu koje se definišu elementi trase i konstrukcija puta. Pored toga, one uslovljavaju masu i gabaritne dimenzije vozila koja mogu saobraćati datom saobraćajnicom, kapacitet prevoza izražen količinom materijala transportovanog u jedinici vremena, kao i intenzitet saobraćaja, odnosno broj kamiona koji u određenom vremenskom intervalu prolazi karakterističnim poprečnim presekom puta.

Osnovne geometrijske i eksploatacione parametre puta čine širina kolovoza, radijusi horizontalnih krivina, uzdužni nagibi i minimalna rastojanja potrebna za bezbednu vidljivost puta i vozila. Za razliku od stalnih puteva, privremeni etažni putevi se najčešće izvode bez donjeg stroja, pri čemu se njihova izrada obavlja buldožerima, uz mogućnost primene šljunčanog nasipa ili betonskih ploča u uslovima mekog podinskog materijala [59].

Trasa puta u planu mora biti oblikovana tako da obezbedi propisanu brzinu i sigurno odvijanje kretanja kamiona. Takva trasa sastoji se od pravih deonica koje se međusobno povezuju odgovarajućim horizontalnim krivinama. U procesu projektovanja neophodno je definisati osnovne geometrijske karakteristike krivina, dok se kod serpentskih rešenja trasa prilagođava terenskim uslovima radi postizanja zahtevanog nagiba i povoljnih eksploatacionih uslova [59].

Podužni profil puta predstavlja vertikalni prikaz trase, čije projektovanje mora omogućiti nesmetano i bezbedno kretanje kamiona predviđenom brzinom. Promene nagiba duž trase povezuju se vertikalnim krivinama, pri čemu se posebna pažnja posvećuje obezbeđenju potrebne preglednosti. Vrednosti uzdužnih nagiba određuju se na osnovu tehno-ekonomske analize, s obzirom na to da povećanje nagiba neposredno utiče na porast transportnih troškova, pri čemu se kao granična vrednost razmatra nagib od 12% [59].

Na slici 3-11 je prezentovano kako se određuje širina transportnog puta [59].



Slika 3-11 Način određivanja širina puta, preuzeto iz [59]

Širina puta ( $P$ ) uslovljena je dimenzijom kamiona ( $a$ ), odnosno njihovim osnovnim gabaritima (rastojanje spoljnjih stranica guma,  $c$ ), kao i brzinom kretanja, intenzitetom saobraćaja i funkcionalnom namenom saobraćajnice. Pri njenom određivanju neophodno je predvideti i odgovarajuća sigurnosna rastojanja, kako između vozila i ivice puta ( $y$ ), tako i između kamiona pri njihovom mimoilaženju ( $x$ ).

Formule za računanje širine puta [59]:

Za jednosmerni saobraćaj:

$$P1 = a + 2y \quad (12)$$

Za dvosmerni saobraćaj:

$$P2 = 2(a + y) + x \quad (13)$$

Približne vrednosti:

$$\begin{aligned} y &= 0,5 \cdot m \\ x &= 0,5 + 0,005v \end{aligned} \quad (14)$$

gde je:

$P1$  – širina puta za jednosmerni saobraćaj

$P2$  – širina puta za dvosmerni saobraćaj

$a$  – širina kamiona, odnosno rastojanje između spoljnjih stranica guma

$y$  – sigurnosno rastojanje od spoljne strane gume do ivice puta

$x$  – sigurnosno rastojanje između kamiona pri mimoilaženju

$v$  – brzina kretanja kamiona (km/h)

Savremeni rudarski kamioni odlikuju se veoma velikom nosivošću, koja može premašiti 300 t, pri čemu se koeficijent tare kreće u opsegu od 0,6 do 0,8. Njihove radne performanse omogućavaju postizanje brzina do 70 km/h, kao i savladavanje uzdužnih nagiba do 15%. U eksploataciji se primenjuju različita konstruktivna rešenja, uključujući dvoosovinske kamione sa zadnjim istresanjem, ali i poluprikolične kamione velike zapremine, kod kojih se pražnjenje ostvaruje otvaranjem dna sanduka ili bočnim istresanjem [59].

Organizacija prilaza kamiona mestu utovara zavisi od vrste radilišta, širine bloka, kao i od režima kretanja kamiona i bagera. Zbog izražene manevarske sposobnosti kamiona moguće je primeniti veći broj različitih šema prilaza i utovara. Kretanje kamiona po etaži može biti organizovano duž čitavog radnog fronta ili samo njegovim delom, dok se pri manevrisanju mora obezbediti takav

međusobni položaj kamiona i bagera da putanja kašike tokom utovara ne prelazi preko kabine vozila [59].

Naizmenični dvostrani utovar primenjuje se u uslovima širokih useka, pri radu bagera u blokovima većih dimenzija, kao i u radu po frontu. Potrebni broj kamiona, po pravilu, određuje se pojedinačno za svaki bager. Ukupan broj transportnih jedinica na površinskom kopu definiše se tako da omogući siguran i kontinualan rad svih bagera, uz ravnomerno i usklađeno pristizanje kamiona na radilište[59].

Vreme ciklusa kamiona obuhvata ukupno trajanje svih operacija koje učestvuju u transportnom procesu, odnosno vreme utovara, vožnje opterećenog vozila, istresanja materijala, povratne vožnje praznog kamiona i vreme potrebno za manevrisanje. Na osnovu ovih komponenti određuje se ukupno trajanje jednog radnog ciklusa transportne jedinice.

Vreme ciklusa kamiona iznosi:

$$T_c = t_u + t_{vp} + t_i + t_p + t_m \quad (15)$$

gde je:

$t_u$  - vreme utovara kamiona,

Vreme utovara zavisi od zapremine sanduka kamiona, karakteristika utovarnog sredstva i trajanja ciklusa utovara, odnosno od međusobnog odnosa kapaciteta kamiona i bagera. Ukupno vreme kretanja kamiona određuje se posebno za vožnju punog i praznog vozila, pri čemu se u obračun uključuje i korekcionni koeficijent kojim se uzimaju u obzir promene brzine tokom kretanja [59].

$$t_u = (Vk * t_c) / (60 * V * k_p/k_r) \quad (16)$$

gde je:

$Vk$  - zapremina sanduka kamiona, (m<sup>3</sup>),

$t_c$  - vreme ciklusa utovara, (min),

$V$  - zapremina kašike bagera, (m<sup>3</sup>),

$t_{vp}$  - vreme vožnje punog kamiona, (min),

$t_i$  - vreme istresanja ( $t_i = 1 - 3$  min),

$t_p$  - vreme vožnje praznog kamiona,

$t_m$  - vreme manevrisanja kamiona, (min).

Ukupno vreme vožnje punog i praznog kamiona iznosi:

$$t_{vp} + t_p = k_b \left( 60 \frac{L_{vp}}{v_{vp}} + 60 \frac{L_p}{v_p} \right), \min \quad (17)$$

gde je:

$k_b$  - koeficijent koji obuhvata promene brzina kamiona ( $k_b = 1,1$ ),  
 $L_{vp}, L_p$  - rastojanja vožnji punog i praznog kamiona, (km),  
 $v_{vp}, v_p$  - brzine vožnje punog i praznog kamiona.

Na osnovu trajanja ciklusa i korisne nosivosti kamiona određuje se tehnički kapacitet, izražen količinom materijala koja se može prevesti u jedinici vremena. Uvođenjem koeficijenata koji opisuju stvarno iskorišćenje nosivosti i raspoloživog radnog vremena dobija se eksploatacioni smenski kapacitet kamiona [59].

Tehnički kapacitet kamiona iznosi:

$$Q_{tk} = \frac{q \cdot k_q \cdot 60}{T_c}, t/h \quad (18)$$

$k_q$  - koeficijent iskorišćenja nosivosti kamiona ( $q$ ) koji predstavlja odnos masa prevezenog materijala i materijala koji se može transportovati potpuno ispunjenim sanducima kamiona.

Eksploatacioni smenski kapacitet kamiona je:

$$Q_{ek} = Q_{tk} \cdot T \cdot k_v \quad (19)$$

gde je:

$T$  - vreme trajanja smene (h),

$k_v$  - koeficijent iskorišćenja smenskog vremena rada kamiona.

Potreban broj kamiona za opsluživanje jednog bagera određuje se odnosom ukupnog vremena ciklusa i vremena utovara, pri čemu je cilj da se obezbedi kontinualan i usklađen rad utovarno-transportnog sistema bez zastoja u procesu eksploatacije [59].

Potreban broj kamiona za opsluživanje jednog bagera određuje se odnosom ukupnog vremena ciklusa i vremena utovara, pri čemu je cilj da se obezbedi kontinualan i usklađen rad utovarno-transportnog sistema bez zastoja u procesu eksploatacije [59].

Potreban broj kamiona za rad jednog bagera iznosi:

$$N = \frac{T_c}{t_u} = 1 + \frac{(t_{vp} + t_i + t_p + t_m)}{t_u} \quad (20)$$

Broj kamiona potreban za ostvarenje planiranog dnevnog kapaciteta površinskog kopa određuje se na osnovu odnosa između zahtevanog dnevnog učinka i eksploatacionog smenskog kapaciteta pojedinačnog kamiona, uz uvažavanje koeficijenta neravnomernosti rada i broja smena u toku dana. Ukupan broj kamiona na kopu dobija se korekcijom potrebnog broja kamiona koeficijentom ispravnosti, koji izražava odnos raspoloživih i ukupno angažovanih vozila [59].

Broj kamiona potrebnih za realizaciju dnevnog kapaciteta površinskog kopa ( $Q_d$ ) je:

$$N_d = \frac{k_n \cdot Q_d}{Q_{ek} \cdot n} \quad (21)$$

gde je:

$k_n$  - koeficijent neravnomernosti rada ( $k_n = 1,1 - 1,2$ ),

$n$  - broj smena na dan

Ukupni broj kamiona na površinskom kopu je:

$$Nu = \frac{N_d}{k_i} \quad (22)$$

gde je:

$k_i$  - koeficijent ispravnosti kamiona i predstavlja odnos broja ispravnih prema ukupnom broju kamiona ( $k_i = 0,7 - 0,9$ ).

Propusna sposobnost puta predstavlja broj kamiona koji može proći kroz određeni poprečni presek saobraćajnice u jedinici vremena. Ovaj pokazatelj zavisi od brzine kretanja vozila, broja saobraćajnih pravaca, uslova na putu i kvaliteta kolovozne konstrukcije, kao i od sigurnosnog rastojanja između uzastopnih kamiona. Na horizontalnim deonicama navedeno rastojanje određuje se u funkciji brzine kretanja vozila [59].

$$Ns = \frac{60}{t_k} = 1000 v m \frac{k_k}{s} \quad (23)$$

gde je:

$t_k$  - interval vremena između prolaza kamiona, (min),

$v$  - brzina kamiona, (km/h),

$m$  - broj pravaca vožnje,

$k_k$  - koeficijent neravnomernosti kretanja kamiona ( $k_k = 0,5-0,8$ ),

$s$  - sigurnosno rastojanje između kamiona koje nije manje od 50 m, a za horizontalne deonice se može dobiti iz izraza:

$$s = v + 0,4v^2 + 6 \quad (24)$$

Savremeni razvoj kamionskog transporta usmeren je ka povećanju nosivosti vozila, unapređenju njihove pouzdanosti i smanjenju potrošnje goriva, uz istovremeno efikasnije korišćenje raspoloživih energetskih resursa. Veća pouzdanost sistema postiže se usavršavanjem konstrukcionih karakteristika kamiona, kao i poboljšanjem kvaliteta transportnih puteva. Precizniji proračuni potrebnog broja kamiona i ukupnog kapaciteta transportnog sistema ostvaruju se primenom teorije redova čekanja i savremenih metoda kompjuterske obrade podataka [59].

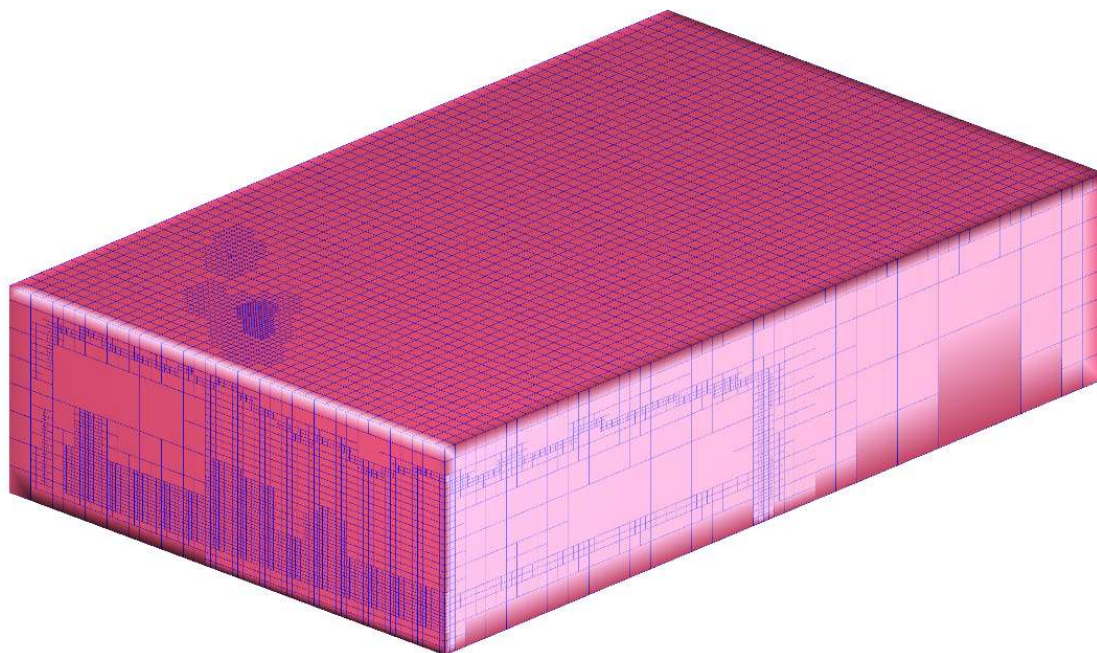
### **3.3 Osnovni matematički modeli u rudarstvu**

Razvoj operacionih istraživanja u rudarstvu omogućio je da se projektovanje granica kopa, plan eksploatacije i planiranje proizvodnje više ne posmatraju kao odvojeni tehnički zadaci, već kao međusobno povezani problemi koje je potrebno rešavati na zajedničkoj matematičkoj osnovi. U toj evoluciji posebno mesto imaju blokovski modeli ležišta, grafovski algoritmi, linearno i celobrojno programiranje, kao i novije stohastičke i metaheurističke metode sa posebnim osvrtom na genetske algoritme. U tekstu koji sledi biće analiziran koncept blok modela, kao i njegov značaj za procese upravljanja kvalitetom sirovine u diskontinualnim sistemima. Fokus izlaganja usmeren je i na definisanje osnovnih matematičkih modela čijom se primenom omogućava efikasna kontrola i praćenje ovih procesa.

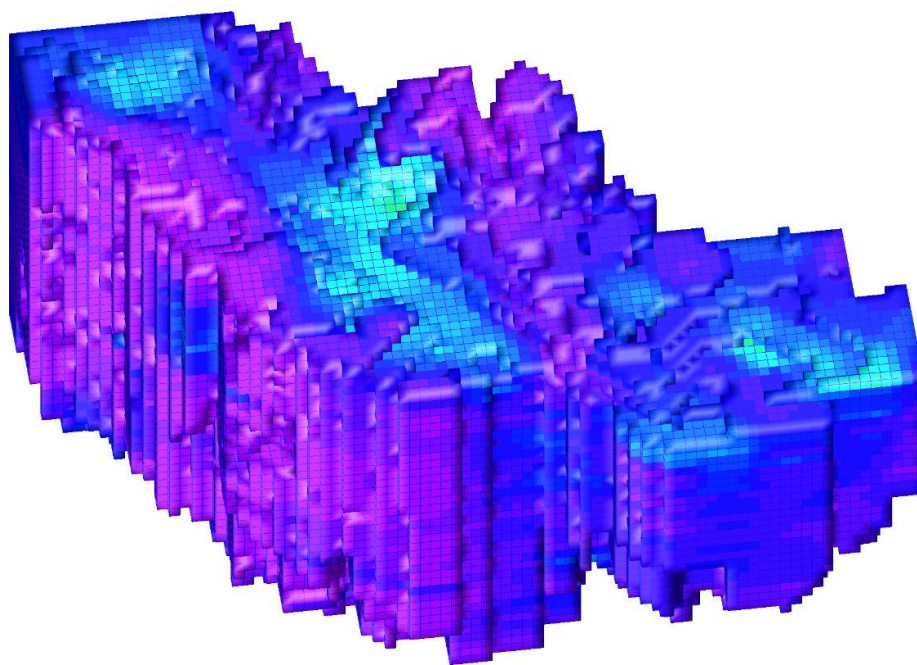
#### **Blok model i geostatistička osnova planiranja**

Gotovo svi savremeni pristupi optimizaciji površinskih kopova polaze od blok modela, jer on omogućava da se ležište predstavi kao skup malih prostornih jedinica kojima se dodeljuju tonaža, sadržaj korisne komponente, troškovi i ekonomska vrednost. Takva diskretizacija čini ležište pogodnim za računarsku obradu i kasniju optimizaciju. Vrednosti blokova najčešće se dobijaju geostatističkom procenom, a kada je potrebno uvažiti neizvesnost, koriste se uslovne simulacije koje ne daju samo jednu „najverovatniju” sliku ležišta, već više podjednako mogućih realizacija prostorne raspodele kvaliteta. Na taj način blok model postaje osnova i za determinističko i za stohastičko planiranje.

Prikaz blok modela ležišta nalazi se na slikama 3-12 i 3-13.



*Slika 3-12 Blok model ležišta*



*Slika 3-13 Blok model ležišta-rudni blokovi, označeni prema kvalitetu*

Razumevanje ograničenja tradicionalnih metoda procene, značajno je uticalo na razvoj geostatističkog modeliranja.

Adekvatna procena geološke nesigurnosti predstavlja osnovni korak u savremenom rudarskom planiranju. Iako su konvencionalne metode interpolacije, poput kriginga, nezaobilazne za globalnu procenu resursa, njihova tendencija ka izgladivanju prostorne varijanse stvara statične modele koji maskiraju ekstremne promene u kvalitetu materijala [83]. Generisanje optimalnog plana eksploatacije zahteva matematički okvir koji je otporan na prostornu nesigurnost ležišta rude. Konvencionalni pristup, koji podrazumeva optimizaciju isključivo jednog, izgladenog geološkog blok modela, često rezultira planovima koji gube operativnu opravdanost pri suočavanju sa stvarnom situacijom na terenu. Da bi se izbeglo generisanje matematički idealnih, ali operativno neizvodljivih planova proizvodnje, neophodno je uvažiti inherentnu stohastičku prirodu rudnih ležišta. Isključivo oslanjanje na prosečne procenjene vrednosti unutar blok modela dovodi do donošenja suboptimalnih strateških odluka [84]. Kako bi se prevazišao ovaj problem, neophodna je implementacija uslovnih simulacija koje verno reprodukuju in-situ varijabilnost ležišta.

Generisanje skupa jednako verovatnih modela rudnog tela putem uslovne simulacije stvara neophodnu platformu za stohastičku optimizaciju eksploatacije. Umesto traženja optimalnog rasporeda za jedan, idealizovan model, fokus se pomera na traženje robusnog operativnog plana [84]. U ovom kontekstu, integracija simuliranih geoloških scenarija unutar funkcije cilja naprednih metaheurističkih metoda, kao što su genetski algoritmi, omogućava evaluaciju proizvodnih ciklusa pod različitim uslovima nesigurnosti. Takav pristup osigurava da rezultujući plan proizvodnje bude operativno izvodljiv i otporan na dnevne devijacije u kvalitetu iskopane rude.

Osnovna teškoća kod viševremenskog planiranja nije samo veliki broj blokova, već i to što su osnovne planske promenljive međusobno zavisne. Granični sadržaj, ekonomska vrednost blokova, krajnja granica kopa, raspored faza, proizvodni kapacitet i životni vek rudnika utiču jedni na druge kružno, pa fiksiranje samo jednog dela problema često vodi do rešenja koje jeste izvodljivo, ali nije zaista optimalno. Zbog toga je u literaturi naglašeno da kvalitetno planiranje zahteva istovremeno razmatranje geometrijskih, ekonomskih i proizvodnih ograničenja, a ne njihovo sukcesivno i izolovano rešavanje [69].

### **3.3.1 Deterministički modeli**

#### **Teorija grafova**

Teorija grafova predstavlja samu osnovu modernog kompjuterskog planiranja u rudarstvu. Prevođenje geološkog prostora u matematički graf omogućilo je inženjerima da problem pronalaženja najisplativijeg dela ležišta reše sa apsolutnom matematičkom preciznošću.

U teoriji grafova, blokovi se predstavljaju kao čvorovi. Grane povezuju dva čvora. Usmerene grane predstavljaju lukove. Više spojenih lukova se naziva putanjom, a zatvorena putanja je kolo. Proces se zasniva na prevođenju trodimenzionalnog geološkog blok modela u usmereni graf, gde se svaki pojedinačni rudarski blok reprezentuje kao čvor [2].

Dok algoritmi zasnovani na teoriji grafova savršeno i efikasno rešavaju prostorni problem finalne granice kopa, oni ne poseduju mehanizme za savladavanje vremenske kompleksnosti i stohastičke prirode proizvodnog procesa. Unutar tog strogo definisanog prostora, primena genetskih algoritama postaje neophodna za pretraživanje mogućih sekvenci eksploatacije. Evolutivni pristup jedini omogućava dinamičko raspoređivanje proizvodnje koje maksimizuje neto sadašnju vrednost, istovremeno zadovoljavajući nelinearna tehnološka ograničenja, poput varijabilnih kapaciteta mehanizacije i strogih uslova usrednjavanja rude.

## Lerchs-Grossmann algoritam

Lerchs-Grossmann algoritam [85] predstavlja jedan od najuticajnijih postupaka za određivanje optimalne završne konture kopa i postavio je temelje za dizajniranje površinskih kopova uz pomoć kompjutera. Njegova osnovna uloga ogleda se u rešavanju prostornog problema određivanja završne konture kopa (engl. *Ultimate Pit Limit-UPL*). U praktičnom smislu, algoritam identifikuje skup blokova čije uključivanje u kop maksimizuje ukupnu vrednost, a istovremeno poštuje geometrijska ograničenja.

Matematička formulacija ovog algoritma oslanja se na teoriju grafova. Trodimenzionalni blok model ležišta prevodi se u usmereni graf, gde svaki blok predstavlja jedan čvor. Ekonomska vrednost bloka (koja je pozitivna ukoliko prihod od prodaje rude premašuje troškove eksploatacije i prerade, a negativna ukoliko je u pitanju jalovina) dodeljuje se kao masa tom čvoru. Ograničenja uslovljena maksimalno dozvoljenim uglom nagiba kosine kopa radi stabilnosti terena, modeliraju se putem usmerenih grana koje povezuju blok sa onim blokovima iznad njega koji moraju biti prethodno otkopani.

Iako su Lerchs i Grossmann postavili osnovne principe, ključni matematički dokaz koji je omogućio rigoroznu analizu ovog problema dao je Picard [86]. On je matematički dokazao da se problem pronalaska optimalne konture kopa svodi na problem pronalaska maksimalnog težinskog zatvorenja grafa (engl. *maximum weight closure problem*). Zahvaljujući ovoj formulaciji teorijski je garantovano pronalaženje apsolutnog globalnog optimuma bez opasnosti od zaglavljivanja u lokalnim optimumima [86].

Ali kako je rasla rezolucija geoloških blok modela, primena originalnog LG algoritma je postala računski neizvodiva. Značajan iskorak u praktičnoj, softverskoj implementaciji algoritma ostvarili su Caccetta i Giannini [87]. Njihov rad je rezultirao optimizacijom pretrage unutar usmerenih grafova, omogućivši brzu identifikaciju i eliminaciju onih grana koje ne doprinose pozitivnoj vrednosti kopa. Uvođenjem ovih modifikacija, algoritam je postao sposoban da obradi masivne geološke blok modele u prihvatljivom vremenu intervalu, čime je LG metoda postala industrijski standard i osnova za većinu komercijalnih softvera za dizajniranje rudnika [87].

Međutim, iako LG algoritam bez greške rešava prostorni problem konture kopa, on je u potpunosti statičan. Ne nudi rešenje za viševremensko planiranje proizvodnje. Upravo ovde do izražaja dolaze metaheurističke metode. Konačna kontura definisana LG algoritmom služi isključivo kao geometrijski okvir unutar kojeg operiše genetski algoritam, preuzimajući zadatak dinamičkog pronalaženja optimalne sekvence otkopavanja koja će maksimizovati neto sadašnju vrednost uz poštovanje strogih operativnih i tehnoloških ograničenja.

## Whittle algoritam za optimizaciju

Iako Lerchs-Grossmann algoritam nudi matematičko rešenje za završnu konturu kopa, njegova praktična primena u dugoročnom planiranju ostaje ograničena jer ne daje odgovor na pitanje kojim redosledom treba otkopavati ležište. Ovaj nedostatak prevaziđen je razvojem Whittle metodologije, koja je LG algoritam uvrstila u širi strateški okvir [89,90]. Centralni doprinos ovog pristupa ogleda se u uvođenju faktora prihoda parametra koji omogućava sistemsko i kontrolisano prilagođavanje cena metala ili operativnih troškova unutar ekonomskog blok modela.

Whittle pristup je u praksi postao dominantan zato što povezuje optimizaciju krajnje konture sa analizom niza ugnježdenih školjki kopova dobijenih promenom faktora prihoda ili ekonomskih parametara [2,89,90]. Generisanje ugnježdenih školjki kopova stvara osnovu za prelazak sa prostornog na vremensko planiranje proizvodnje. Grupisanjem ovih školjki, inženjeri definišu operativne faze rudarskih operacija. Prema Whittle [90], nakon definisanja faza, moguće je evaluirati različite strateške scenarije same eksploatacije. Softverski paket tipično analizira krajnosti poput

„najboljeg scenarija“ i „najgoreg scenarija“. Pronalaženje balansa između ovih scenarija omogućava identifikaciju onog redosleda otkopavanja koji maksimizuje neto sadašnju vrednost (NPV) rudarskog projekta [2,90].

Za razliku od bazičnog pristupa koji podrazumeva jednu statičnu optimizaciju, ova metodologija zahteva iterativno izvršavanje algoritma uz sistemsko variranje cena korisne komponente. Krajnji rezultat ovog procesa je veliki broj kontura, od kojih svaka maksimizuje nediskontovanu neto sadašnju vrednost za tačno određeni cenovni scenario. Kako bi se prevazišao problem eksponencijalnog rasta vremena procesiranja pri višestrukim iteracijama, Whittle je primenio efikasnu strategiju sužavanja prostora pretrage. Procedura se inicijalno pokreće za maksimalnu projektovanu cenu, čime se fiksira apsolutna spoljna granica površinskog kopa. Odmah nakon toga, algoritam se izvršava za minimalnu cenu kako bi se izolovalo najdublje, najprofitabilnije jezgro ležišta. U svim narednim proračunima za prelazne vrednosti cena, algoritam automatski eliminiše iz razmatranja blokove koji se nalaze izvan najveće i unutar najmanje konture. Umesto da za svaki novi cenovni faktor generiše usmereni graf od nule, softver zadržava formiranu strukturu stabla iz prethodne iteracije. To se čuva i koristi kao početno stanje za sledeći korak, pri čemu sistem vrši isključivo preračunavanje novih ekonomskih težina unutar blokova, čime se drastično smanjuje opterećenje računarskih resursa [89,90].

### **Metode linearnog programiranja**

Pokušaji da se viševremensko raspoređivanje proizvodnje na površinskim kopovima reši analitičkim putem započeti su formulacijom problema u domenu linearnog programiranja (LP). Matematički okvir koji je postavio Johnson [91] poslužio je kao osnova za modeliranje rudarskih operacija, gde se cilj maksimizacije neto sadašnje vrednosti postavlja uz stroga ograničenja kapaciteta mehanizacije i zahtevanog kvaliteta rude. Njegov model predstavlja jedan od prvih sistemskih pokušaja da se planiranje proizvodnje na površinskom kopu formuliše kao višeperiodni optimizacioni problem. Ipak, direktna primena LP modela na realne blok modele pokazala se neizvodljivom. Da bi se ovo prevazišlo, Dagdelen [92] je implementirao tehnike Lagranžove relaksacije, nastojeći da kompleksni viševremenski problem razloži na seriju nezavisnih prostornih optimizacija.

Dalji razvoj računarskih resursa omogućio je prelazak na mešovito celobrojno programiranje (engl. *Mixed Integer Linear Programming - MILP*) [93] i rezultirala su naprednim „*branch-and-cut*“ algoritmima koji efikasnije pretražuju prostor rešenja eliminišući neperspektivne grane unutar matematičkog stabla. Rani modeli matematičkog programiranja redovno su nailazili na prepreku u vidu kompjuterskog zagušenja, ali kasnija istraživanja su pokazala vidljiv napredak u domenu njihove praktične primenljivosti.

Specifičnim preoblikovanjem jednačina može razviti operativno primenljiv model celobrojnog linearnog programiranja (ILP) za dugoročno planiranje površinskih kopova [14]. Ipak direktna primena ILP-a na savremene modele ležišta visoke rezolucije i dalje najčešće zahteva neku formu agregacije blokova (ukrupnjavanja podataka). Shodno tome, za postizanje najvišeg nivoa rezolucije u planiranju, gde se operativne odluke i nelinearna stohastička ograničenja modeliraju na nivou pojedinačnog bloka, integracija metaheurističkih metoda, kakav je i razvijeni genetski algoritam, ostaje tehnološki neophodan korak koji prevazilazi limite klasičnih determinističkih jednačina.

### **Algoritam fundamentalnog stabla**

U nastojanju da se prevaziđe računsko zagušenje, razvijene su tehnike pametne agregacije rudarskih blokova. Jedan od najznačajnijih iskoraka predstavlja algoritam fundamentalnog stabla, čije je teorijske osnove i matematičku formulaciju prvi postavio Ramazan [94]. Fundamentalno stablo se definiše kao najmanja moguća logička kombinacija rudnih i jalovinskih blokova koja istovremeno zadovoljava dva uslova: njeno ukupno otkopavanje generiše pozitivnu (ili nultu) ekonomsku vrednost, i striktno poštuje geomehanička ograničenja ugla nagiba kosine kopa. Suština ovog koncepta leži u tome da se formirano stablo ne može dalje podeliti na manje celine koje bi takođe ispunjavale ova dva nezavisna uslova [95].

Grupisanjem stotina pojedinačnih rudarskih blokova u ovakve nedeljive jedinice, dimenzionalnost problema se drastično smanjuje. Umesto da optimizacioni softver donosi odluku o otkopavanju svakog mikrolokacijskog bloka zasebno, proces pretrage se svodi na binarne odluke o ekstrakciji celokupnih stabala. Implementacija ovakvog preprocesiranja omogućava da se masivni blok modeli integrišu za znatno kraće vreme procesiranja računara, a da se pritom ne kompromituje globalna optimalnost konačnog rešenja. [96].

### **3.3.2 Stohastički modeli**

Rudarski sistemi funkcionišu u uslovima izražene prirodne i operativne promenljivosti, zbog čega se planiranje eksploatacije retko može zasnivati na potpuno izvesnim i unapred poznatim parametrima. Glavni izvori ovih nesigurnosti su primarno geološke prirode, poput prostorne varijabilnosti kvaliteta i količine korisne komponente u ležištu, ali obuhvataju i ekonomske fluktuacije na tržištu, kao i operativna i tehničko-tehnološka ograničenja mehanizacije [2,49]. Zbog toga deterministički modeli, iako korisni za formalizaciju problema i analizu osnovnih odnosa, često nisu dovoljni da verno opišu stvarne uslove rada rudarskih sistema.

Oslanjanje isključivo na statičke determinističke modele za procenu kapaciteta mehanizacije često dovodi do precenjivanja realnih proizvodnih mogućnosti. Operativni ciklusi bagera i kamiona podložni su stalnim promenama usled varijacije različitih faktora kao što su: uslovi na putu, fragmentacija materijala, kao i nepredvidivi zastoji i kvarovi opreme. Ove promene direktno utiču na smanjenje efikasnosti sistema. Radi toga je važno da se pri razvoju optimizacionih modela implementiraju mehanizmi koji će tretirati transportne kapacitete kao stohastičke promenljive [72]. Na ovaj način se osigurava da planovi dobijeni ovim modelima budu operativno izvodljivi i otporni na dnevne promene u radu mehanizacije. Upravo iz te potrebe razvijaju se stohastički modeli, čija je osnovna prednost u tome što omogućavaju da se neizvesnost ne posmatra kao spoljašnje odstupanje od plana, već kao sastavni deo procesa odlučivanja

Prelazak sa tradicionalnih na stohastičke modele predstavlja samu osnovu za moderno upravljanje rizicima u rudarstvu. Tradicionalni deterministički modeli često mogu da maskiraju stvarnu prirodnu varijabilnost i da dovedu do nerealnih, previše optimističnih planova proizvodnje. Stohastičko modeliranje (najčešće kroz geostatičke simulacije) rešava ovaj problem generisanjem više jednako verovatnih scenarija. Umesto jedne fiksne vrednosti, za svaki blok u modelu dobija se raspodela verovatnoće. Na ovaj način, inženjeri mogu da testiraju kako će se celokupan geometalurški proces ponašati u najgorem, najboljem i najverovatnijem scenariju, o da izmere rizik pre nego što uopšte pošalju rudarsku mehanizaciju na radilište [40]. Uvođenje stohastičkih parametara u proces optimizacije površinskih kopova drastično povećava matematičku i računarsku složenost celokupnog sistema.

## **Monte Carlo metoda**

Da bi se kvantifikovao operativni i finansijski rizik u dugoročnom planiranju, neophodno je nadograditi determinističke heurističke modele i preći na stohastičko sagledavanje rudarskih sistema. Metoda Monte Karlo simulacije predstavlja standardni inženjerski alat za evaluaciju rudarskih projekata pod uslovima izražene nesigurnosti. Umesto oslanjanja na jednu, statičnu prosečnu vrednost, ova tehnika generiše stotine ili hiljade jednako verovatnih scenarija, čime se efikasno modelira varijabilnost sadržaja korisne komponente u blok modelu, kao i fluktuacija tržišnih cena. Na taj način, svaki potencijalni raspored otkopavanja može biti testiran kroz širok spektar različitih ishoda, čime se precizno mapira verovatnoća ostvarivanja željene neto sadašnje vrednosti [100].

Ipak, ključno metodološko ograničenje Monte Karlo metode leži u činjenici da ona predstavlja isključivo alat za evaluaciju, a ne za optimizaciju. Ona može sa visokom pouzdanošću proceniti rizik i kvalitet već postojećeg plana proizvodnje, ali ne poseduje matematički mehanizam koji bi samostalno pretražio prostor rešenja i pronašao onaj najoptimalniji. Stohastički principi ocenjivanja, poput onih u Monte Karlo simulacijama, integrišu se kao mehanizam za evaluaciju rešenja, dok se sam kompleksan zadatak pretraživanja masivnog broja mogućih sekvenci proizvodnje prepušta naprednim populacionim metodama, primarno genetskim algoritmima

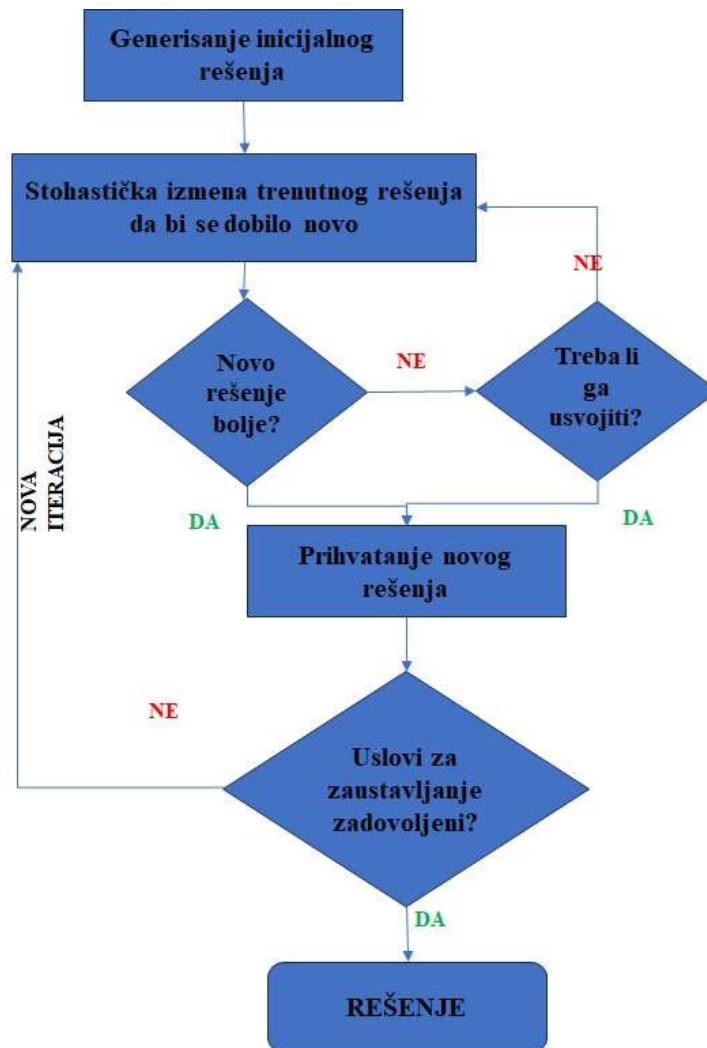
Integracija i zajednička optimizacija svih faza rudarskog procesa (od osobina samog ležišta do finalne prerade i upravljanja rudarskim otpadom) za smanjenje ekoloških i društvenih rizika, kao i za postizanje maksimalnog profita. Uspešnost ovakvog pristupa direktno zavisi od sposobnosti da se u modele za donošenje odluka adekvatno kvantifikuju i integrišu nesigurnosti koje su prirodno prisutne usled složene građe rudnih ležišta i nekompletnih podataka o ponašanju materijala[40].

## **Simulirano kaljenje**

Simulirano kaljenje je metaheuristička metoda inspirisana termodinamičkim procesom kontrolisanog hlađenja. Teorijske osnove ovog pristupa nezavisno su formulisali Kirkpatrick i saradnici kao i Černý pronalazeći inspiraciju u procesima iz statističke mehanike [97,98]. Matematika algoritma direktno oponaša termodinamički proces kontrolisanog hlađenja materijala u metalurgiji, gde se postepeno snižavanje temperature koristi za stabilizaciju atoma u stanje sa minimalnom energijom.

U kontekstu optimizacije proizvodnje, glavna prednost simuliranog kaljenja leži u njegovoj sposobnosti da izbegne zaglavljivanje u lokalnim optimumima. Za razliku od standardnih heuristika koje uvek prihvataju samo strogo bolja rešenja, SA algoritam inkorporira probabilistički mehanizam koji mu, sa određenom verovatnoćom, dozvoljava da prihvati i trenutno „lošiji“ plan [97]. Ova verovatnoća je visoka u početnim iteracijama, omogućavajući široko pretraživanje prostora rešenja, dok se sa progresijom algoritma i takozvanim „hlađenjem“ ta verovatnoća eksponencijalno smanjuje, fokusirajući pretragu ka globalnom optimumu [98].

Na slici 3-14 je prikazan princip rada algoritma simuliranog kaljenja [2].



Slika 3-14 Algoritam simuliranog kaljenja, preuzeto iz [2]

Optimizacija započinje definisanjem početnog, najčešće proizvoljnog plana proizvodnje, koji se zatim podvrgava nasumičnoj modifikaciji radi generisanja novog, susednog rešenja. Evaluacija kvaliteta ovog novog stanja vrši se dvostepeno: ukoliko modifikovano rešenje rezultira boljom vrednošću funkcije cilja, sistem je bezuslovno prihvata kao novo. Međutim, suštinski mehanizam ovog algoritma, dizajniran isključivo za izbegavanje zaglavljivanja u lokalnim optimumima, i aktivira se ukoliko je novogenerisano rešenje inferiorno u odnosu na prethodno. U takvim situacijama, algoritam sa određenom verovatnoćom usvaja operativno „lošiji“ plan, pri čemu ta verovatnoća usvajanja opada kako optimizacija odmiče, simulirajući termodinamičko hlađenje. Bez obzira na to da li je novo rešenje usvojeno zbog svog kvaliteta ili na bazi verovatnoće, ono postaje polazna osnova za narednu iteraciju, a celokupan ciklus evaluacije i mutacije se ciklično sprovodi sve dok se ne dostigne unapred definisani uslov zaustavljanja, nakon čega model ispisuje finalni, najkvalitetniji pronađeni plan eksploatacije.

U rudarstvu je simulirano kaljenje dobilo poseban značaj kada je počelo da se koristi za planiranje pod geološkom neizvesnošću. Suština tih modela nije da se optimizacija zasniva na jednom prosečnom modelu ležišta, već na više jednako verovatnih realizacija dobijenih simulacijom. Godoy i Dimitrakopoulos su pokazali da se na taj način može formirati raspored eksploatacije koji je otporniji na odstupanja u količini rude, jalovine i metala [49].

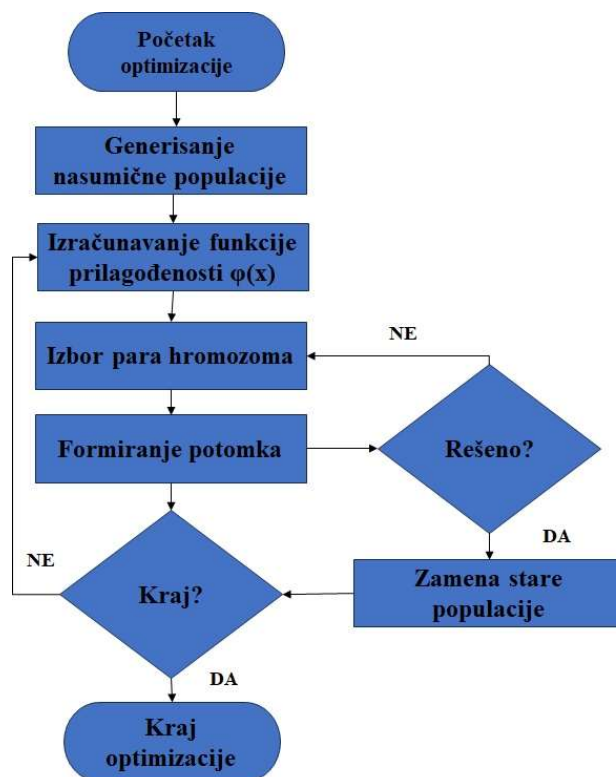
U oblasti višekriterijumske optimizacije površinskih kopova, pristup zasnovan na simuliranom kaljenju omogućava izuzetno precizno rešavanje teških tehnoloških zahteva. Prema istraživanju koje su sprovedli Kumral i Dowd, ovaj algoritam se pokazao kao superioran alat za fino podešavanje i unapređenje sub-optimalnih rudarskih planova [99]. Njihova metodologija se oslanja na definisanje složene funkcije cilja koja simultano minimizuje odstupanja od zahtevane proizvodne tonaže, penale i treoškove nastale usled neadekvatnog kvaliteta rude, kao i samu varijansu korisne komponente. Optimizacija planiranja proizvodnje sprovodi se u dve faze: Lagranžova parametrizacija, koja daje početno suboptimalno rešenje, i višeciljno simulirano kaljenje, koje dodatno poboljšava taj plan. Ovakav mehanizam prihvatanja rešenja, vođen specifičnim matematičkim rasporedom hlađenja, dokazano unapređuje kvalitet rudarskog plana proizvodnje, rezultirajući stabilnijim dotokom rude i značajno smanjenom fluktuacijom štetnih primesa u odnosu na klasične determinističke pristupe. Pristup je demonstriran na ležištu rude gvožđa u Zapadnoj Australiji.

### 3.4 Genetski algoritmi

Dok deterministički modeli beleže izvanredne rezultate u definisanju strateških granica kopa, njihov kapacitet drastično opada prelaskom na kratkoročno, operativno planiranje. Uključivanjem izrazito nelinearnih i diskretnih parametara (poput rasporeda utovarno-transportne mehanizacije na više radilišta istovremeno i strogih višekriterijumskih zahteva za mešanje rude), problem poprima kompleksnu strukturu koja neminovno dovodi do računskog zagušenja tradicionalnih softvera.

Prepoznajući ovaj fundamentalni jaz između matematičke teorije i rudarske prakse, eksplicitno se afirmiše metaheuristika kao najperspektivniji pravac daljeg razvoja. Analiza potvrđuje da evolutivni pristupi, uključujući genetske algoritme, danas ne predstavljaju samo alternativu, već dominantan inženjerski alat [78]. Genetski algoritmi vrše paralelnu pretragu iz više tačaka istovremeno, što značajno smanjuje rizik od zaglavljivanja u lokalnim optimumima. Upravo ova robusnost i sposobnost adaptacije čine ih univerzalnim alatom u različitim oblastima, od obrade slika do kompleksnog industrijskog planiranja i raspoređivanja [101]. Oni jedini poseduju stohastičku sposobnost da u operativno prihvatljivom vremenu evaluiraju stotine hiljada prostorno-logističkih scenarija, generišući planove koji su apsolutno sprovodljivi u uslovima diskontinualne eksploatacije.

Na slici 3-15 je prikazan osnovni princip rada genetskog algoritma.[101].



Slika 3-15 Dijagram toka genetskog algoritma, preuzeto iz [101]

Proces optimizacije prikazan na slici 3-15 ilustruje iterativnu prirodu genetskog algoritma. Algoritam započinje fazom inicijalizacije u kojoj se generiše početna nasumična populacija rešenja, nakon čega se za svaku jedinku izračunava funkcija prilagođenosti (engl. *fitness*). Evolutivni ciklus se odvija kroz selekciju parova hromozoma i formiranje potomstva primenom genetskih operatora, sve dok se ne ispuni uslov za kreiranje nove generacije. Nakon što se izvrši potpuna zamena stare populacije novom, algoritam proverava opšte uslove zaustavljanja (poput konvergencije rešenja ili dostizanja maksimalnog broja generacija) pre nego što se proces finalizuje i dobije optimalno rešenje.

Planiranje i organizacija rudarskih operacija predstavljaju osnovu tehničke izvodljivosti i ekonomske održivosti rudarskog projekta tokom celog njegovog životnog veka [30].

Konvencionalni pristupi proceni rezervi, optimizaciji planiranja rudnika i predviđanju proizvodnje rezultiraju pojedinačnim, i često pristrasnim, prognozama [48]. Dosadašnji pristup planiranju rudnika često se oslanjao na determinističke modele koji koriste usrednjene vrednosti, što dovodi do pristrasnih prognoza. Glavni problem leži u nelinearnom širenju grešaka kroz ceo rudarski lanac, od procene ležišta do finalne proizvodnje [48].

Prelazak sa klasičnih determinističkih modela na tehnike veštačke inteligencije i metaheuristike predstavlja neophodan iskorak u savremenom dugoročnom planiranju rudarskih operacija. Integracija brojnih operativnih ograničenja, od maksimalnih kapaciteta mehanizacije do zahtevanog kvaliteta rude za preradu, transformiše raspoređivanje blokova u NP-težak problem koji standardne metode ne mogu da prevaziđu. Zbog toga se implementacija evolutivnih metoda, poput genetskog algoritma, nameće kao logičan i jedini održiv metodološki izbor. Ovakav algoritamski okvir direktno prevazilazi probleme vezane za dimenzionalnost koji su karakteristični za velike

površinske kopove, osiguravajući približavanje ekonomski najispravnijim rešenjima bez kompromitovanja operativne izvodljivosti na terenu [69].

Savremeno rudarstvo se nalazi na prekretnici gde digitalni alati i algoritmi preuzimaju ulogu ključnih faktora stabilnosti. Više nije dovoljno samo iskopati rudu; imperativ je to učiniti na način koji je ekološki odgovoran i ekonomski precizan. U takvim uslovima, digitalne tehnologije, senzorski sistemi i analitika podataka postaju važan oslonac za kontinuirano praćenje procesa i adaptivno upravljanje rudarskim operacijama. Primena podataka u realnom vremenu omogućava ranije uočavanje odstupanja u radu sistema, racionalnije korišćenje opreme i brže donošenje operativnih odluka, što direktno doprinosi stabilnosti proizvodnje i efikasnijem korišćenju resursa. [81].

Istovremeno, savremeni razvoj rudarske tehnike usmeren je ka sve većem stepenu automatizacije i autonomije opreme, pri čemu se posebna pažnja posvećuje unapređenju bezbednosti, produktivnosti i pouzdanosti rada [65,66].

Tradicionalno oslanjanje na fiksne, determinističke proračune u rudarstvu često zanemaruje nepredvidivost prirodne sredine. Uvođenje stohastičkih modela u planiranje proizvodnje predstavlja neophodan iskorak ka realnijem sagledavanju operativnih rizika. Prihvatanjem verovatnoće kao sastavnog dela rudarskog ciklusa, omogućava se kreiranje robusnih planova koji su otporni na fluktuacije u kvalitetu rude i nepredviđene zastoje u radu opreme.

Zbog enormnog broja mogućih kombinacija pri sekvenciranju otkopavanja na više kopova, klasične metode optimizacije postaju neefikasne. Genetski algoritmi, imitirajući prirodnu evoluciju, omogućavaju brzo pronalaženje skoro optimalnih rešenja u kompleksnom prostoru pretrage, balansirajući između maksimalnog NPV-a i strogih ograničenja kvaliteta [21].

Nedavni napredak u industriji ističe sve značajniju ulogu mašinskog učenja u povećanju preciznosti procene kvaliteta rude i efikasnosti operacija mešanja iste [38]. Novija istraživanja ukazuju na efikasnost multikriterijumskih evolucionih algoritama, kao što je NSGA-II, u rešavanju problema koordinacije kontrole kvaliteta i obima proizvodnje u kompleksnim uslovima površinske eksploatacije [37]. Integracija naprednih algoritama optimizacije u svakodnevno operativno upravljanje transformiše rudnik iz statičnog sistema u inteligentnu sredinu vođenu podacima. U takvom okruženju, fokus inženjera se pomera sa pukog praćenja fizičkog obima proizvodnje ka sofisticiranom balansiranju između maksimalnog iskorišćenja resursa i minimizacije ekološkog otiska, što rudarstvo postavlja u sam vrh modernih industrijskih disciplina.

Procena kvaliteta (sadržaja korisne komponente) zasnovana na mašinskom učenju sada značajno nadmašuje konvencionalne geostatističke metode, od faze istraživanja pa sve do faze eksploatacije [80]. Pomak ka kolaborativnoj optimizaciji dodatno je potvrđen nedavnim implementacijama, gde su algoritmi mašinskog učenja integrisani sa podacima sa senzora na rudarskoj opremi u realnom vremenu, kako bi se sinhronizovala procena kvaliteta rude sa alokacijom resursa [39].

Iako se ovi pristupi fokusiraju na predvidljivost kvaliteta rude zasnovanu na podacima (engl. *data-driven*), i dalje postoji kritičan jaz u prevođenju ovih uvida iz realnog vremena u dugoročne planove proizvodnje na nivou smene. Ovo istraživanje rešava tu potrebu uvođenjem stohastičkog genetskog algoritma koji funkcioniše kao optimizacioni mehanizam, sposoban da balansira dinamičke ulazne parametre varijabilnosti kvaliteta i kapaciteta opreme tokom sveobuhvatnog vremenskog okvira od 1.000 smena.

Genetski algoritmi (GA) pripadaju klasi evolucionih algoritama i predstavljaju savremeni optimizacioni pristup inspirisan biološkim principima prirodne selekcije i genetike [20,21]. Njihov osnovni mehanizam zasniva se na evoluciji populacije potencijalnih rešenja kroz generacije naslednika, primenom genetskih operatora kao što su selekcija, ukrštanje i mutacija. Selekcija

favorizuje kvalitetnije jedinke, ukrštanje kombinuje karakteristike roditeljskih rešenja, dok mutacija uvodi nasumične promene u genetsku reprezentaciju. Kroz ovaj iterativni proces, algoritam progresivno poboljšava vrednost funkcije cilja (engl. *fitness function*) [25,26].

Za razliku od klasičnih optimizacionih modela, genetski algoritmi mogu da obrađuju diskretne, kombinatorne i višekriterijumske strukture rešenja, što ih čini odgovarajućim za kompleksne sisteme kakvi su rudarske operacije. Problemi operativnog planiranja otkopavanja blokova široko su prepoznati kao NP-teški (engl. *NP-hard*). U savremenoj praksi, metaheuristički pristupi, uključujući genetske algoritme, sve se češće koriste kao efikasna alternativa klasičnim matematičkim metodama [3].

Nekolicina autora naglašava da su heuristički algoritmi, uključujući GA, od suštinske važnosti jer klasične metode optimizacije često ne uspevaju da odgovore dovoljno brzo na dinamičku prirodu rudarskih operacija. Primećeno je da precizno pozicioniranje diskontinualnog sistema, u kombinaciji sa strateškim izborom lokacija za eksploataciju, značajno utiče na stabilnost kvaliteta rude i ukupnu operativnu efikasnost [60,62]. Ova istraživanja ukazuju na to da genetski algoritmi mogu efikasno upravljati kompleksnošću zahteva eksploatacije i prerade, formirajući rasporede operacija koji najbolje zadovoljavaju ciljane zahteve kvaliteta.

Prilikom formulisanja optimizacionih modela za dugoročno raspoređivanje proizvodnje, neophodno je prevazići ograničenja konvencionalnih blok modela koji vrednost materijala definišu isključivo kroz analitički sadržaj korisne komponente. Stvarna ekonomska isplativost iskopane rude strogo je uslovljena njenim ponašanjem tokom tehnološkog procesa prerade, što zahteva eksplicitnu primenu geometalurškog zoniranja. Prema tome, kako bi primenjeni genetski algoritam generisao istinski robustan plan proizvodnje, ulazni parametri funkcije cilja moraju obuhvatiti ponašanje specifičnih geometalurških domena [82].

Genetski algoritmi su pokazali visoku efikasnost u situacijama gde su kvalitet rude i ekonomski pokazatelji suštinski povezani tokom procesa planiranja rudnika. Istraživanja u ovoj oblasti utvrdila su da se sekvence otkopavanja blokova mogu direktno kodirati unutar hromozoma, dok funkcija cilja integriše ekonomske efekte, ograničenja kapaciteta i kriterijume kvaliteta [27]. Koristeći genetske algoritme za određivanje optimalnih sekvenci graničnih vrednosti tokom celokupnog veka eksploatacije rudnika pojedine studije su prikazale uticaj ovakvog pristupa na optimizaciju graničnog sadržaja (engl. *cut-off grade*). Cilj ovih modela je maksimizacija neto sadašnje vrednosti (NPV) uz istovremeno osiguravanje zahteva postrojenja za preradu u pogledu kvaliteta mineralne sirovine [28,29].

Kao što je već zapaženo, industrija se okreće ka sistemima zatvorene petlje (engl. *closed-loop*) koji integrišu senzorne podatke visoke rezolucije sa adaptivnim tehnikama optimizacije [81]. Dok se monitoring u realnom vremenu fokusira na širu tehnološku infrastrukturu, ovaj GA model pruža specifičan i pristupačan okvir za optimizaciju na nivou smene, osiguravajući sinhronizaciju proizvodnog kapaciteta i stabilnosti kvaliteta.

Primena stohastičkog genetskog algoritma (GA) u ovoj disertaciji neophodna je zbog ogromne kombinatorne složenosti operativnog plana od 1.000 smena, koji predstavlja prostor rešenja koji je funkcionalno beskonačan. U takvim uslovima, stohastičke metaheuristike nude značajne prednosti u odnosu na determinističke metode omogućavajući efikasnije istraživanje (eksploraciju) potencijalnih sekvenci eksploatacije.

Faktori kao što su stohastički generisani geološki modeli [48,49] i probabilistička analiza pouzdanosti i raspoloživosti opreme [63] predstavljaju značajne i nezavisne istraživačke domene. Iako su ovi elementi ključni, fokus ove disertacije je na optimizaciji eksploatacije na nivou smene.

### 3.5 Proces planiranja u rudarstvu

Planiranje u rudarstvu je strateški alat koji direktno određuje granicu između ekonomskog uspeha i potpunog promašaja projekta. U industriji gde su početna ulaganja ogromna, a povrat investicije traje godinama, planiranje služi kao štit protiv neizvesnosti. Ono nam omogućava da prepoznamo kritične tačke u proizvodnom procesu pre nego što se one pojave na terenu. Planiranje rudarskih operacija je suštinski deo rudarstva, jer određuje tehničku izvodljivost i ekonomsku održivost celokupnog poduhvata tokom njegovog životnog veka [30].

Jedna od ključnih otežavajućih okolnosti jeste činjenica da je rudno telo „nevidljiv“ i promenljiv resurs. Čak i uz najsavremenije metode istraživanja, unutrašnja arhitektura ležišta uvek zadržava određeni nivo neizvesnosti. Zbog toga planiranje rudnika ne sme biti statičan dokument, već živ proces koji se kontinuirano koriguje kako se front radova pomera, pretvarajući nepoznanice iz geološkog modela u opipljive tehničke podatke.

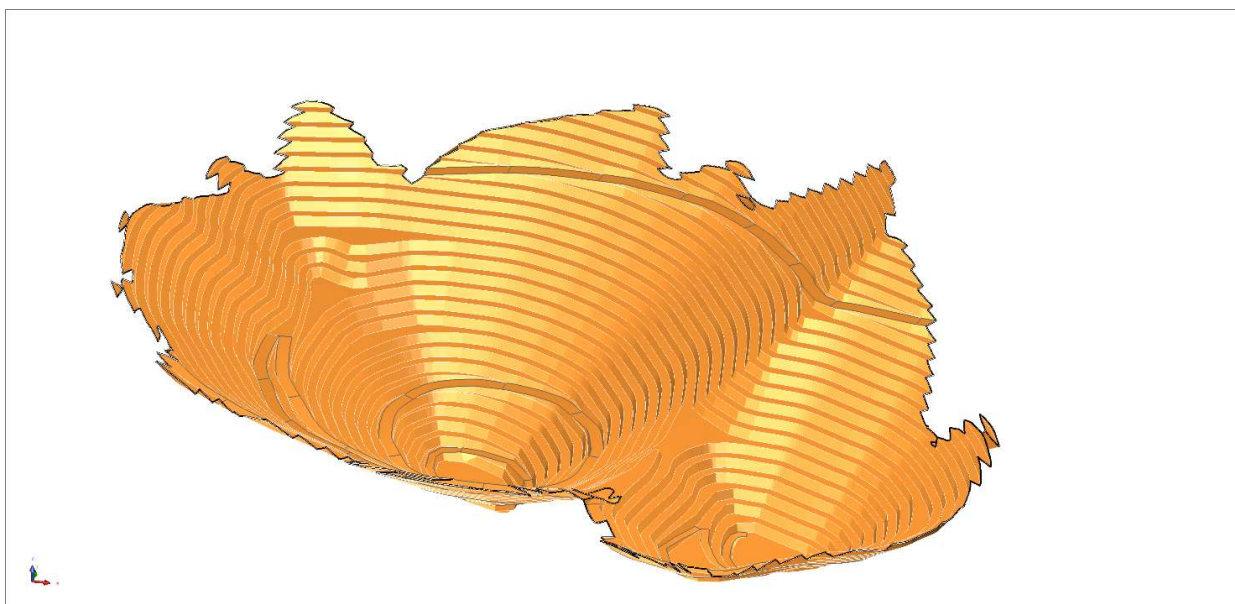
Planiranje površinskih kopova predstavlja fundamentalnu fazu u razvoju i vođenju rudarskih projekata, čiji je primarni zadatak obezbeđivanje uslova za efikasnu i rentabilnu proizvodnju [10]. Iako su ciljevi planiranja primarno ekonomski motivisani, oni neretko obuhvataju i šire socijalne i ekološke aspekte. Zbog izražene kompleksnosti ovakvih sistema, uspeh projekta zahteva blisku saradnju glavnog inženjera planiranja sa stručnjacima iz različitih tehnoloških disciplina. Ovakav multidisciplinarni pristup je neophodan kako bi se sprečilo donošenje odluka koje favorizuju kratkoročne, lokalne ciljeve na štetu ukupne vrednosti i dugoročne održivosti projekta [90].

U zavisnosti od vremenskog horizonta, detaljnosti analiza i stepena pouzdanosti ulaznih informacija, proces planiranja se u rudarskoj praksi generalno klasifikuje u na sledeće nivoe [2].

- Strateško (dugoročno) planiranje
- Srednjoročno planiranje
- Kratkoročno ili operativno planiranje

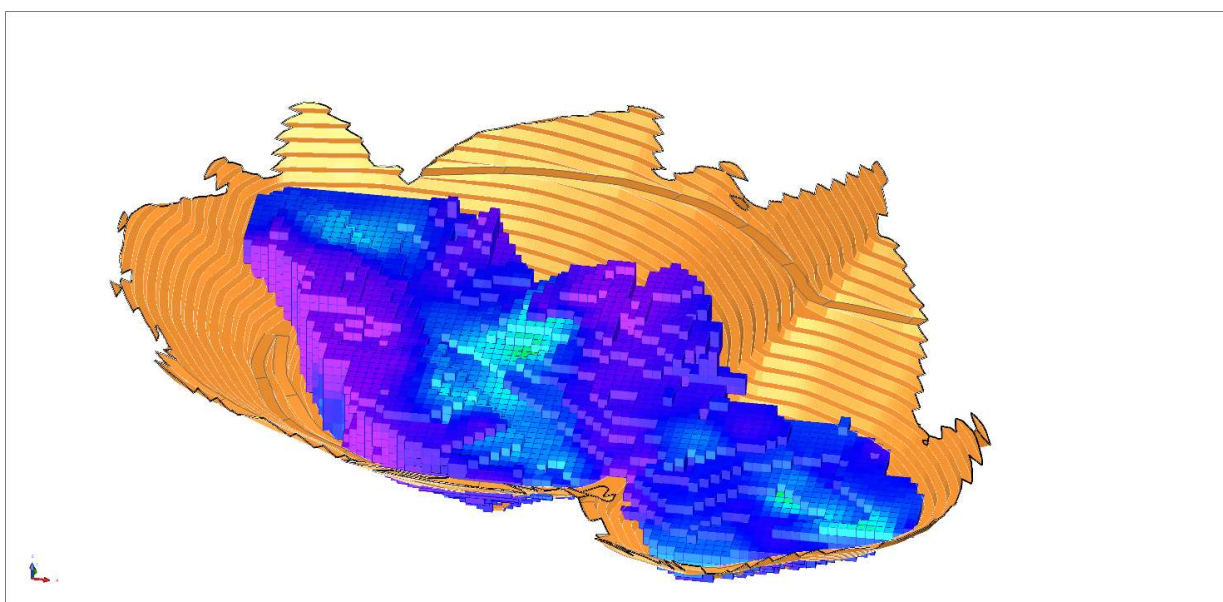
Nivo dugoročnog (strateškog) planiranja ima za cilj definisanje fundamentalnih pravaca razvoja projekta. Fokusiran je na uspostavljanje ključnih parametara kao što su granični sadržaj korisne komponente (engl. *cut-off grade*), završne konture površinskog kopa (odnosno definisanje eksploatacionih rezervi), globalni redosled otkopavanja, izbor rudarske opreme i definisanje veka trajanja rudnika. S obzirom na to da se sprovodi u ranim fazama projekta (poput izrade konceptualnih studija), karakteriše ga najniži nivo pouzdanosti ulaznih podataka, zbog čega se ne zahteva visoka razrada detalja [2].

Modelovana završna kontura površinskog kopa prikazana je na slici 3-16.



*Slika 3-16 Završna kontura površinskog kopa*

Slika 3-17 prikazuje model završne konture površinskog kopa na kojoj su rudni blokovi označeni prema svojim kvalitativnim svojstvima.



*Slika 3-17 Završna kontura sa rudnim blokovima označenim prema kvalitetu*

Celokupna stenska masa je softverski diskretizovana, odnosno podeljena na pravilne trodimenzionalne geometrijske blokove. Različite boje blokova vizuelno prikazuju prostornu distribuciju kvaliteta rude. Zelenkaste zone u sredini predstavljaju rudu najvećeg kvaliteta, dok plave i ljubičaste predstavljaju siromašniju rudu i materijal blizu graničnog sadržaja (engl. *cut-off-grade*).

Dugoročno planiranje na površinskim kopovima predstavlja složen proces donošenja odluka koji se u osnovi oslanja na podelu ukupnih rudnih rezervi na veće prostorno-vremenske celine. Ove celine, u inženjerskoj praksi poznate kao faze razvoja kopa (engl. *pushbacks*), čine sam temelj strateškog planiranja [2]. Njihova primarna svrha je da definišu globalni redosled otkopavanja kojim se maksimizuje celokupna ekonomska vrednost projekta, uz istovremeno osiguravanje poštovanja svih fizičkih ograničenja, zahtevanog kvaliteta i raspoloživih kapaciteta.

Treba naglasiti da je definisanje faza razvoja (engl. *pushbacks*) ključan korak pre svega pri planiranju kopova sa diskontinualnom tehnologijom eksploatacije. Kod sistema koji koriste kontinualnu mehanizaciju, podela na ovakve faze nema toliki značaj. Osnovni razlog leži u smanjenoj manevarskoj sposobnosti kontinualne opreme. Zbog te ograničene mobilnosti, front radova kod ovakvih sistema se mora razvijati strogo pravilno i linearno, što se u praksi svodi na jednostavno paralelno ili radijalno napredovanje radova [2].

Kako je definisanje faza razvoja neophodno za dugoročno vođenje rudnika, ovaj proces se u praksi suočava sa značajnim izazovima jer je rudarsko okruženje jako dinamično. U realnim uslovima eksploatacije neminovno dolazi do pojave ekscenčnih situacija i nepredviđenih odstupanja od usvojene dinamike radova.

Srednjoročni planovi obično pokrivaju vremenski horizont od nekoliko godina (najčešće do 5 godina, sa detaljnijom razradom za prvu godinu) i služe kao most između globalnih strateških ciljeva i konkretne proizvodnje. U ovoj fazi, zahvaljujući većoj količini dostupnih terenskih podataka, pouzdanost parametara je viša. To omogućava preispitivanje, detaljniju razradu, pa čak i korekciju određenih strateških odluka, a sve u cilju maksimizacije ekonomskih efekata i unapređenja proizvodnih scenarija [2].

Zadatak kratkoročnog planiranja je operativna razrada taktika neophodnih za ispunjenje ciljeva definisanih srednjoročnim planom. Primarni fokus je na obezbeđivanju kontinuirane isporuke zahtevanih količina i propisanog kvaliteta sirovine postrojenjima za preradu. Kratkoročni planovi precizno definišu aktivne radne zone, alokaciju rudarske mehanizacije, dinamiku kretanja masa (ruda, jalovina, privremena odlagališta) i strategije homogenizacije. Kritično je da inženjeri u ovoj fazi ostanu dosledni dugoročnim ciljevima i izbegnu praksu selektivnog otkopavanja najbogatijih partija ležišta što donosi brzi profit, ali dugoročno sterilise rezerve i skraćuje vek rudnika. Operativno planiranje predstavlja najdetaljniji nivo koji reguliše proizvodnju na dnevnom, smenskom ili nedeljnom nivou, u okvirima postavljenim kratkoročnim planom. Ono podrazumeva direktno upravljanje dnevnom operativom, rešavanje trenutnih zastoja i usklađivanje proizvodnje sa specifičnim, trenutnim uslovima u radnoj sredini [2,18]

Prevođenje dugoročnih strateških ciljeva u izvodljive kratkoročne planove proizvodnje predstavlja jedan od najkompleksnijih izazova u rudarskom inženjerstvu. Na operativnom nivou, inženjeri se svakodnevno suočavaju sa neophodnošću balansiranja između međusobno konfliktnih ciljeva, kao što su maksimizacija iskorišćenja postrojenja za preradu i striktno ispunjavanje planova za uklanjanje jalovine. Kako bi se prevazišla ograničenja jedno-kriterijumske optimizacije, predložena je primena hijerarhijskog metoda unutar mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP) [16]. Ovaj pristup omogućava donosiocima odluka da dodele prioritete različitim ciljevima i sekvencijalno ih optimizuju, garantujući da fokus na jedan operativni aspekt neće trajno ugroziti druge bitne operacije [16]. Pored višekriterijumske analize, ovaj model direktno integriše pomeranje utovarne mehanizacije, optimizujući kretanje bagera između radnih etaža i deponija, čime se matematički raspoređuje prevode u sprovedljive rudarske planove.

### 3.5.1 Uloga operativnog planiranja

Za razliku od strateškog planiranja, koje teži da eksploatacija bude ekonomski opravdana kroz duži vremenski period, operativno planiranje je usmereno na usklađivanje dnevnih, nedeljnih ili smenskih aktivnosti sa raspoloživom mehanizacijom, dostupnosti rudarskih lokacija i trenutnim uslovima proizvodnje. Na tom nivou posebno dolaze do izražaja ograničenja koja su u dugoročnom planiranju često idealizovana, kao što su broj istovremeno aktivnih lokacija, kretanje i raspored utovarne opreme, raspoloživost kamionske flote, ograničenja odlagališta, kao i realna operativna odstupanja u ciklusima rada. Pokazano je da upravo kratkoročni modeli moraju eksplicitno da obuhvate raspored eksploatacije, kapacitete opreme i fizičku izvodljivost radova, što potvrđuje da operativno planiranje ne može biti svedeno na prosto razlaganje dugoročnog plana [24,77].

Savremeni razvoj operativnog planiranja ide i u pravcu sve jače integracije proizvodnih i logističkih odluka. Operativno planiranje u površinskoj eksploataciji predstavlja nivo odlučivanja na kome se dugoročni i srednjoročni ciljevi prevode u konkretne, tehnički izvodljive proizvodne zadatke. Njegova osnovna uloga nije samo vremenska razrada viših planskih horizonata, već i provera da li se projektovani kapacitet, redosled eksploatacije i zahtevi kvaliteta zaista mogu ostvariti u uslovima rada realnog rudarskog sistema. Zbog toga se operativno planiranje u literaturi posmatra kao poseban optimizacioni problem, sa većom prostornom i vremenskom detaljnošću nego kod dugoročnog planiranja, ali i sa drugačijom strukturom ograničenja i ciljeva [24,68,77].

Efikasno upravljanje proizvodnjom na površinskim kopovima u velikoj meri zavisi od pouzdanosti kratkoročnih modela za kontrolu kvaliteta budući da operativne greške pri klasifikaciji materijala na rudu i jalovinu direktno narušavaju isplativost celokupnog procesa eksploatacije. Za prevazilaženje ovih izazova i adekvatnu minimizaciju rizika, umesto oslanjanja isključivo na konvencionalne determinističke metode, preporučuje se primena stohastičkih pristupa koji eksplicitno kvantifikuju prostorne nesigurnosti ležišta. Takav pristup postavlja pouzdane temelje za kasniju integraciju sa naprednim optimizacionim algoritmima radi donošenja robusnih i ekonomski opravdanih odluka o planiranju [79].

Da bi se strateški i operativni planovi eksploatacije mogli uspešno realizovati u praksi, neophodno je osigurati njihovu usklađenost sa stvarnim kapacitetima transportnog sistema rudnika. Optimalna konfiguracija na relaciji bager-kamion direktno uslovljava operativne troškove i dinamiku uklanjanja otkrivke i rude [72]. Radi toga, prilikom formiranja funkcije cilja za dugoročno i kratkoročno planiranje, transportni kapaciteti ne smeju biti tretirani samo kao idealizovane konstante, već kao ograničavajući faktori čija se dinamička interakcija treba uvažiti kako ne bi došlo do generisanja matematički optimalnih, ali operativno neizvodljivih planova.

U strukturi operativnih troškova rudnika, transport materijala redovno zauzima najznačajniji udeo. Upravljanje ovim segmentom zahteva precizno rešavanje logističkih problema, posebno u uslovima gde se ruda doprema sa više različitih radilišta do centralnog mesta prerade. Optimizacija transportnih ruta i vremena ciklusa nije samo pitanje ekonomičnosti, već i ključni faktor u kontroli emisije štetnih gasova i potrošnje energije, što rudarstvo povezuje sa savremenim principima energetske efikasnosti.

Svaki ciklus kamiona je zasebna operativna ćelija čija efikasnost kumulativno određuje uspeh celog sistema. Optimizacija ovih kretanja zahteva duboko razumevanje prostornih relacija na kopu, gde se kroz pravilno usmeravanje mehanizacije postiže najvažniji cilj, neprekidan protok materijala uz minimalne energetske gubitke.

Svaki minut koji kamion provede u mestu ili svaki kubik jalovine koji je nepotrebno pomeren predstavlja direktan gubitak. Značaj preciznog planiranja ogleda se u maksimalnoj sinhronizaciji diskontinualnih sistema; ono osigurava da svaki bager i svaki kamion rade u svom optimalnom

režimu. Bez temeljnog plana, oprema se izlaže nepotrebnim naprezanjima, što dramatično skraćuje njen radni vek i povećava operativne troškove održavanja.

Operativna efikasnost diskontinualnog sistema nije statična kategorija; ona je duboko uslovljena stohastičkom prirodom vremena ciklusa, gde varijacije u vremenu utovara i transporta direktno utiču na energetske intenzitet procesa [61]. Na operativnom nivou kvalitet rude postaje rezultat izbora aktivnih radilišta, redosleda otkopavanja i usmeravanja materijala, pa se zato ne može odvojiti od kratkoročnog planiranja proizvodnje [46,68].

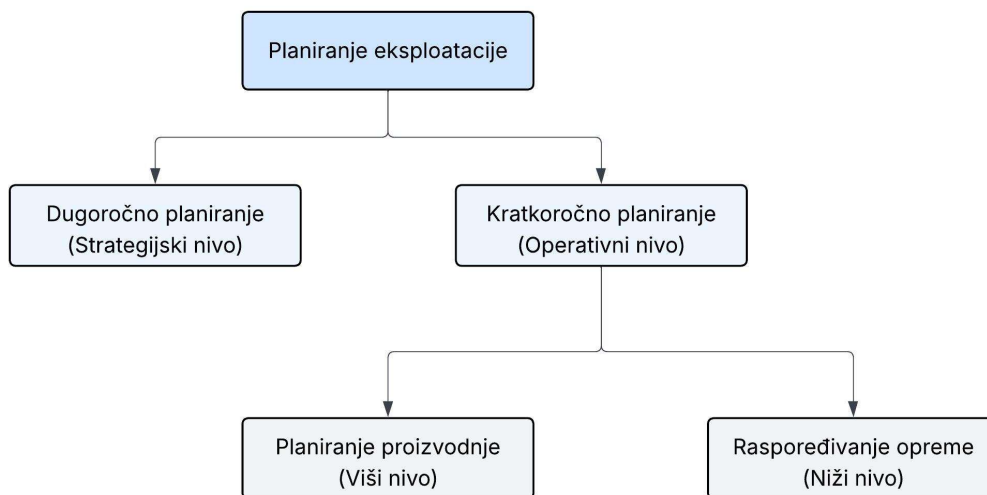
U rudarstvu, vreme je najskuplji resurs; stoga se pouzdanost opreme mora posmatrati kroz prizmu prevencije zastoja koji po pravilu generišu troškove daleko veće od same cene rezervnih delova. Zastoji nisu samo tehnički problem, već primarni ekonomski rizik. Troškovi samog održavanja često su neznatni u poređenju sa gubicima prouzrokovanim zbog neostvarene proizvodnje. U kriznim periodima, prioritet postaje produžetak radnog veka postojeće opreme i optimizacija servisiranja, što zahteva inovativne pristupe u upravljanju performansama [56,60]

Analiza neizvesnosti pokazuje da čak i male promene u brzini kamiona i vremenu utovara, kada se kumuliraju kroz hiljade ciklusa, mogu dovesti do značajnih odstupanja u planiranim operativnim troškovima [61].

Planirati ne znači predvideti budućnost, već se pripremiti za nju tako da nas nijedna varijabla na površinskom kopu ne zatekne nespremne.

Noviji pristupi planiranju površinskih kopova ukazuju na to da se značajno povećanje produktivnosti postiže samo kada se kratkoročno planiranje sprovodi putem detaljnog plana koji je transparentan i dostupan svima koji učestvuju u procesu. Ovakav tip planiranja, u kombinaciji sa redovnim praćenjem napredovanja (dnevnom, nedeljnim...), smanjuje operativnu varijabilnost, poboljšava stepen iskorišćenja opreme i povećava produktivnost transportnog sistema, uz istovremeno smanjenje jediničnih troškova otkopavanja [23].

Prethodna istraživanja su formulisala modele za kratkoročno planiranje na nivou odminiranih blokova, uz istovremeno uvažavanje geometrijskih ograničenja, kapaciteta opreme i zahtevanog redosleda operacija. Ovim se pokazuje da se dugoročno planiranje može efikasno povezati sa operativnim planiranjem i raspoređivanjem opreme [24], što se može uočiti na slici 3-18 [75].



Slika 3-18 Faze planiranja rudarskih operacija, preuzeto od [75]

Čak i kada je dugoročni plan površinskog kopa optimalan na strateškom nivou, kratkoročno planiranje (smena/dan/nedelja) zahteva nezavisnu optimizaciju jer ono operiše za drugačije nivoe odlučivanja. Kao što je naglašeno, kratkoročnim horizontom dominiraju odluke o operativnoj izvodljivosti, odabir ograničenog broja istovremeno aktivnih rudarskih lokacija, dodela diskretnih masa u jedinicama kapaciteta kamiona i ispunjavanje ograničenja opreme i proizvodnje koja su obično agregirana ili ublažena u dugoročnim modelima pa prosto raščlanjivanje dugoročnih ciljeva u praksi može biti neizvodljivo ili suboptimalno [68].

Iz navedenih činjenica proizilazi da je operativno planiranje centralni mehanizam za usklađivanje dugoročnih ciljeva eksploatacije sa svakodnevnim zahtevima proizvodnje. Njegov značaj posebno dolazi do izražaja kod diskontinualnih sistema, gde planske odluke moraju istovremeno obuhvatiti izbor više različitih kriterijuma. Upravo zato savremeni razvoj ove oblasti ide ka integrisanim i stohastičkim modelima, u kojima se kratkoročni plan ne tretira kao administrativni dokument, već kao aktivan alat za upravljanje proizvodnjom, logistikom i rizikom u realnom vremenu [19,23,68].

Nedavni napredak u integrisanom planiranju rudarskih operacija uveo je optimizacione okvire za sinhronizaciju planiranja proizvodnje sa logistikom, kao što je planiranje ruta transporta pod ograničenjima kapaciteta saobraćajnica [19].

Dok se ovi modeli fokusiraju na minimizaciju troškova transporta kod velikih ležišta, i dalje postoji značajan istraživački jaz u rešavanju kolaboracije optimizacije kontrole kvaliteta na nivou smene i proizvodnog kapaciteta za operacije na više malih površinskih kopovima. Ova disertacija popunjava taj jaz fokusirajući se na usklađenost marginalnih ležišta limonita, gde genetski algoritam (GA) služi kao alat za podršku odlučivanju radi balansiranja strogih ciljeva sadržaja Fe i SiO<sub>2</sub> sa fiksnim kapacitetom od 2.000 t po smeni.

## 4 Razvoj i matematička formulacija modela

Optimizacioni model razvijen u ovoj disertaciji napravljen je sa ciljem da napravi most između teorijske metaheuristike i svakodnevne rudarske prakse. Iako se za rešavanje složenih problema stohastičke optimizacije u akademskim krugovima primarno koriste softverska rešenja visokih performansi kao što je MATLAB [102], Excel/VBA je svesno implementiran u strukturu ovog modela. Ovakva odluka je doneta zbog velike potrebe za primenom u industriji: inženjerima na površinskim kopovima se na ovaj način obezbeđuje moćan alat za planiranje bez potrebe za nabavkom skupih softverskih licenci ili savladavanjem novih programskih jezika. Ovaj pragmatičan pristup omogućava da se napredni optimizacioni proračuni obavljaju u interfejsu koji je već postao standard u upravljanju rudarskim podacima, a nema dodatnih troškova pribavljanja licence.

Problem generisanja operativnog rudarskog plana karakteriše ekstremna dimenzionalnost, gde broj potencijalnih kombinacija za raspoređivanje mehanizacije po radnim blokovima eksponencijalno raste, poprimajući sa računarskog aspekta praktično beskonačne razmere. U takvim uslovima primena stohastičkog algoritma pokazuje prednosti u odnosu na determinističke metode (što je i premisa koja se dokazuje u ovoj disertaciji). Priroda samog genetskog algoritma je stohastička tj. generisan plan otkopavanja se bazira na slučajnom izboru i za svaki novi generisan plan će (zbog promenjenih istih optimizacionih kriterijuma i funkcije cilja) po pravilu imati sličnosti, ali praktično nikad neće biti u potpunosti isti.

Radi efikasnog sagledavanja problema raspoređivanja opreme i pravljenja optimalnog operativnog plana eksploatacije, GA se oslanja strukturirani evolucionni proces koji obuhvata sledeće elemente:

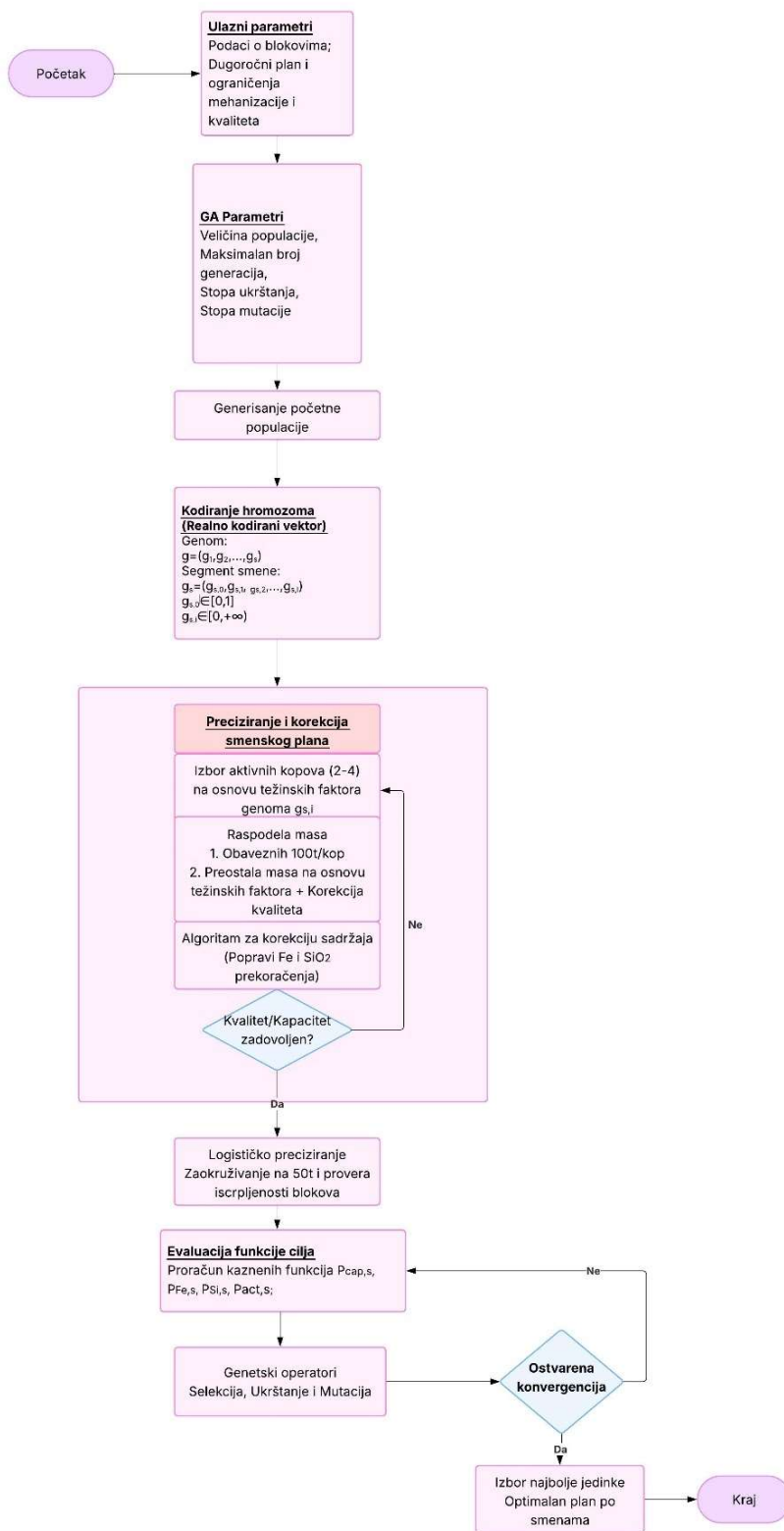
- **Početna populacija:** Algoritam startuje formiranjem početnog skupa potencijalnih rešenja (hromozomi). Svaka jedinka u ovom skupu predstavlja jedan celovit, potencijalni plan proizvodnje. Prioritet je obezbeđenje raznolikosti početne populacije da bi se proširio prostor pretrage i povećao broj rudarskih strategija.
- **Hromozom:** Vektor sa realnim kodiranjem predstavlja rešenje odnosno, kompletan plan proizvodnje za sve smene. Svaki smenski segment  $g_s$  upravlja izborom aktivnog kopa i raspodelom masa putem težinskih koeficijenata poželjnosti.
- **Funkcija cilja:** Evaluacija jedinke se vrši kroz strogu funkciju cilja. Funkcija cilja je u ovoj disertaciji predstavljena kao smanjenje ukupnih penala, odnosno odstupanja od postavljenih ciljeva. Vrednost funkcije cilja određuje „kvalitet“ rešenja odnosno jedinke sa nižom kaznenom vrednošću tretiraju se kao superiorne.
- **Selekcija:** Operatori selekcije oponašaju prirodni odabir, dajući prednost jedinkama sa najboljim vrednostima prilagođenosti. Oni će delovati kao roditelji za naredne generacije. Na ovaj način osigurava se preživljavanje onih sekvenci otkopavanja koje najbolje balansiraju operativna ograničenja, te se njihov genetski materijal prenosi u sledeću iteraciju.
- **Ukrštanje:** Kao primarni pokretač konvergencije, ovaj operator razmenjuje genetske informacije između dva uspešna roditeljska plana, sintetišući novo potomstvo. Cilj je da se kombinovanjem optimalnih segmenata iz različitih planova generiše još kvalitetniji raspored proizvodnje.

- **Mutacija:** Da bi se izbeglo zaglavljivanje algoritma u lokalnim optimumima (tzv. prevremena konvergencija), mutacija indukuje nasumične izmene u genotipu pojedinačnih rešenja. Ovaj korak je esencijalni mehanizam za neprekidno istraživanje novih, do tada neevaluiranih operativnih scenarija. Time se održava genetski diverzitet i omogućava algoritmu da istraži potencijalna nova rešenja.

Proces optimizacije se sprovodi kroz nekoliko međusobno povezanih faza:

- **Ulazni podaci i parametrizacija:** Algoritam započinje svoj rad učitavanjem primarnih podataka o blokovima, uključujući masu i očekivane sadržaje gvožđa (Fe) i silicijum-dioksida (SiO<sub>2</sub>). u isto vreme se zadaju i ograničenja rudarske mehanizacije kao i ograničenja koja je postavila prerada. Da bi se vršila kontrola evolucione pretrage, definišu se parametri samog genetskog algoritma (GA) (veličina populacije, maksimalni broj generacija i stope ukrštanja i mutacije).
- **Generisanje početne populacije:** Nasumično se generiše skup potencijalnih rešenja (hromozoma). Na taj način se predstavljaju predstavili početni planovi proizvodnje. Svaka jedinka prolazi kroz proces dekodiranja u kojem se geni sa realnim kodiranjem prevode u specifične proizvodne zadatke.
- **Preciziranje i korekcija smenskog plana:** Vršiti se da bi se osigurala operativna izvodljivost svakog generisanog plana. Masa rude koja je otkopava se dodatno diskretizuje tokom faze logističkog preciziranja radi održavanja operativne konzistentnosti. Zatim se uvodi ograničenje broja aktivnih površinskih kopova, osiguravajući da taj broj ostane unutar operativno izvodljivog opsega (između 2 i 4 aktivna kopa). Pored toga, sprovodi se algoritam za korekciju sadržaja kako bi se otklonila potencijalna odstupanja za Fe i SiO<sub>2</sub> pre finalne provere. Finalnom proverom se eliminišu lokacije sa masom manjom od minimalne korisne nosivosti kamiona (odnosno lokacije na kojima je ruda praktično iscrpljena).
- **Evaluacija funkcije cilja:** Svaki precizirani plan se ocenjuje putem višekomponentne funkcije cilja. Vrednost prilagođenosti (engl. *fitness*) određuje se proračunom kumulativnih kazni za odstupanja u kapacitetu smene, kvalitetu rude i broju aktivnih površinskih kopova
- **Genetski operatori i evolucija:** Za izbor najprilagođenijih jedinki za reprodukciju koristi se turnirska selekcija. Ovi roditelji prolaze kroz proces ukrštanja i mutacije kako bi stvorili potomstvo za narednu generaciju, olakšavajući istovremeno istraživanje prostora pretrage (engl. *exploration*) i eksploataciju visokokvalitetnih rešenja (engl. *exploitation*).
- **Konvergencija i izlazni rezultati:** Ciklus se ponavlja dok se ne ispune kriterijumi konvergencije ili dok se ne dostigne maksimalni broj generacija. Algoritam na kraju bira najbolju jedinku, dajući optimalni plan proizvodnje po smenama kao izlazni rezultat.

Celokupna računska procedura i logički redosled razvijenog GA modela ilustrirani su na dijagramu prikazanim na slici 4-1.



Slika 4-1 Dijagram toka genetskog algoritma za optimalno planiranje eksploatacije po smenama diskontinualnim sistemom

Imajući u vidu teorijske osnove prethodnog poglavlja, jasno je da kratkoročno planiranje na površinskim kopovima predstavlja izrazito nelinearan, višekriterijumski problem. Donošenje odluka o pravcima razvoja rudarskih radova neraskidivo je povezano sa promenama u kvalitetu rude i prostornom distribucijom utovarno-transportne opreme. Upravo zbog toga, formalizacija modela mora obuhvatiti i kapacitivna i kvalitativna ograničenja, kao i dinamiku eksploatacije u okviru planskog horizonta. Na toj osnovi, u narednom poglavlju razvija se matematički model kojim se problem prevodi u optimizacionu strukturu pogodnu za rešavanje primenom genetskog algoritma.

Osnovna ideja modela razvijena u ovom poglavlju delimično je prethodno prikazana u radu [22]. U odnosu na taj rad, ovde je model predstavljen u proširenom obliku.

Model koristi nekoliko osnovnih varijabli i jednačina kako bi predstavio proces operativnog planiranja rudarstva.

Za svaki površinski kop  $i$  (lokaciju na kojoj se otkopavanje obavlja), ukupne rezerve su definisane kao ukupna masa rude, koja predstavlja sumu masa svih blokova obuhvaćenih optimalnom konturom kopa.

Ukupne rezerve na početku planskog perioda ( $RemTotal_{i,s}$ ) ( $s=1$ ) definisane su kao:

$$RemTotal_{i,s} = \sum_{b \in blocks(i)} Ton_b \quad (25)$$

Gde je:

$i$ -indeks površinskog kopa, gde je  $i=1, \dots, I$

$b$ -indeks bloka unutar površinskog kopa

$Ton_b$ -masa bloka  $b$

$blocks(i)$ -skup svih blokova koji pripadaju površinskom kopu  $i$

$RemTotal_{i,s}$ -ukupna preostala masa u površinskom kopu  $i$  (koja je jednaka sumi svih  $Ton_b$  na početku planskog perioda)

U cilju dinamičkog praćenja raspoloživosti ležišta, stanje rezervi se ažurira na kraju svake smene  $s$ , oduzimanjem stvarne mase iskopane tokom tog smenskog intervala.

$$RemTotal_{i,s+1} = RemTotal_{i,s} - t_{i,s}^{snap} \quad (26)$$

Gde je:

$t_{i,s}^{snap}$ -stvarna masa iskopana u smeni  $s$ , diskretizovana na kamionske jedinice (50 t)

$RemTotal_{i,s+1}$ -preostala masa rude u kopu  $i$ , na početku naredne smene

## 4.1 Struktura genoma

Genom je dizajniran kao realno-kodirani niz (sekvenca) koji upravlja odabirom i distribucijom otkopavanja rude kroz smene. Za svaku smenu  $s \in \{1, 2, \dots, S\}$  i svaki kop  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$  definisan je specifičan segment genoma:

$$g_s = (g_{s,0}, g_{s,1}, g_{s,2}, \dots, g_{s,I}) \quad (27)$$

Gde je:

$g_{s,0} \in [0,1]$ -globalni gen koji utiče na ukupni intenzitet eksploatacije za datu smenu

$g_{s,i} \in [0, \infty)$ -je varijabla koja izražava „poželjnost“ kopa  $i$  u smeni  $s$  (veća vrednost ove varijable povećava verovatnoću da će genetski algoritam uključiti taj kop u set aktivnih kopova, dok niža vrednost ukazuje na to da se kop smatra manje korisnim za postizanje ciljeva u toj specifičnoj smeni)

## 4.2 Operativna ograničenja i odabir skupa aktivnih površinskih kopova

U svakom vremenskom intervalu (smeni  $s$ ), bira se skup aktivnih površinskih kopova  $A_s \subseteq \{1..I\}$ .

S obzirom na tehničko-organizacionu logistiku diskontinualnih sistema transporta, nametnuta su stroga ograničenja:

$$MinOpenPits \leq |A_s| \leq MaxOpenPits \quad (28)$$

Ili

$$2 \leq |A_s| \leq 4 \quad (29)$$

Ovaj opseg direktno kontroliše operativnu složenost. Iako bi neograničen broj otvorenih radilišta olakšao pronalaženje idealne mešavine rude, logistika u realnim uslovima diktira suzbijanje preterane disperzije opreme. Donja granica od dva kopa sprečava visoki rizik zavisnosti proizvodnje od samo jednog izvora (gde kvar na jednoj etaži zaustavlja čitav sistem), dok gornja granica od četiri radilišta osigurava upravljivost celokupne flote mehanizacije

Sistem poseduje ugrađen mehanizam za prepoznavanje iscrpljenosti. Površinski kop  $i$  se automatski isključuje iz aktivnog skupa  $A_s$  ako ispunjava sledeće kriterijume “provere iscrpljenosti” (engl. *depletion check*):

- Preostala ukupna masa je manja od 50 t (što predstavlja nosivost kamiona)
- Preostala ukupna masa je približno nula.

Ovo pravilo „nosivosti kamiona“ osigurava da se kop smatra iscrpljenim ako ne može da podrži barem jedan pun kamion (50 t). Implementacijom ovog ograničenja, model sprečava genetski

algoritam da eksploatiše zanemarljive količine rude (mikro-količine) koje bi u suprotnom narušile logistički integritet i celobrojnu logiku operativnog plana

Dodavanje novog površinskog kopa u aktivni skup vrši se na osnovu genomskih težina  $g_{s,i}$  kroz heuristički proces u dva koraka:

- Obavezno minimalno proširenje: Ako je broj aktivnih kopova manji od minimalno zahtevanog ( $|A_s| < MinOpenPits$ ), algoritam automatski dodaje otkop sa najvećom vrednošću  $g_{s,i}$  sve dok se ne ispuni minimalni operativni uslov.
- Kvalitativno proširenje: Dodatni kopovi se dodaju u aktivni skup samo ako genetski algoritam (GA) proceni da njihovo uključivanje poboljšava ili ukupni kapacitet smene ili opšti kvalitet sadržaja rude.

Za svaki aktivni kop  $i \in A_s$  u smeni  $s$ , maksimalna dostupna masa ( $Cap_{i,s}$ ) se definiše kao:

$$Cap_{i,s} = \min (RemTotal_{i,s}, PerShiftCap_i) \quad (30)$$

Gde je:

$RemTotal_{i,s}$ - preostala masa rude u kopu  $i$ ,

$PerShiftCap_i$ - maksimalna dozvoljena masa po smeni za specifični kop, definisana kao

$$PerShiftCap_i = \begin{cases} 350 \text{ t,} & \text{if } i \in \{Kop\_5, Kop\_6\} \\ +\infty, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (31)$$

Specifično ograničenje proizvodnog limita od 350 t po smeni za Kop\_5 i Kop\_6 zasnovano je na hemijskim osobinama ova dva kopa. Geološko blok modeliranje otkrilo je da se Kop\_5 i Kop\_6 nalaze u zonama sa visokom koncentracijom SiO<sub>2</sub>, znatno viši od maksimalno zahtevanog kvaliteta od 11%. Iz inženjerske perspektive, ovo ograničenje od 350 t (što predstavlja približno 17,5% od ukupnog kapaciteta smene od 2.000 t) deluje kao kvalitativno ograničenje. Na ovaj način, model garantuje da preostalih 82,5% obima proizvodnje poreklom iz kopova sa nižim sadržajem silicijum-dioksida obezbedi dovoljan efekat razblaživanja kako bi se finalna mešavina održala unutar zahtevanih granica kvaliteta.

Kako bi se osiguralo da svaka aktivna lokacija opravdava angažovanje mehanizacije, dodeljuje se početna obavezna masa ( $t_{i,s}^{(0)}$ ).

$$t_{i,s}^{(0)} = \begin{cases} \min(MinPerDep, Cap_{i,s}), & \text{zavisno od dostupnosti} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (32)$$

Gde je:

$t_{i,s}^{(0)}$  - početna obavezna masa

$MinPerDep$ - minimalna operativna masa po kopu.

Ovo osigurava da svaki aktivni površinski kop doprinosi kapacitetu smene u dovoljnoj meri kako bi se održala operativna sigurnost.

Preostali kapacitet smene ( $\Delta_s$ ) koji predstavlja masu dostupnu za dalju distribuciju među aktivnim površinskim kopovima, izračunava se kao:

$$\Delta_s = Capacity - \sum_{i \in A_s} t_{i,s}^{(0)} \quad (33)$$

Pojedinačni slobodni kapacitet ( $slack_{i,s}$ ) za svaki kop  $i$ , koji sprečava prekoračenje specifičnih ograničenja otkopa, definisan je kao:

$$slack_{i,s} = \max(0, Cap_{i,s} - t_{i,s}^{(0)}) \quad (34)$$

Kako bi se eksploatacija uskladila sa ciljanim sadržajem gvožđa, uvodi se kvalitativni faktor poželjnosti ( $bias_{i,s}$ ):

$$bias_{i,s} = \frac{1}{1 + |Fe_{i,s}^{cur} - 48,5|} \quad (35)$$

Gde je:

$Fe_{i,s}^{cur}$  - sadržaj gvožđa u bloku koji se trenutno otkopava. Ovaj faktor dostiže svoju maksimalnu vrednost kada je sadržaj gvožđa u bloku savršeno poravnat sa idealnom ciljanom vrednosti od 48,5%.

Ciljna vrednost od 48,5% definisana je kao aritmetička sredina zahtevanog opsega gvožđa (47–50%). Centriranjem faktora poželjnosti (engl. *bias factor*) na ovu vrednost, model kreira „atraktor kvaliteta“ koji prioritet daje kopovima čiji je sadržaj najbliži idealnom, čime se obezbeđuje sigurnost od inherentne geološke varijabilnosti limonitne rude.

Konačna efektivna težina ( $w_{i,s}$ ), koja modifikuje genomsku težinu na osnovu trenutnog kvaliteta rude, izračunava se kao

$$w_{i,s} = \max(0, 0001, g_{s,i} \cdot (0,6 + 0,4 \cdot bias_{i,s})) \quad (36)$$

Konstanta od 0,6 (60%) osigurava da genetski algoritam zadrži svoju istraživačku prirodu i sposobnost globalne pretrage na osnovu evoluiranog genoma, dok umnožak 0,4 (40%) obezbeđuje dovoljan heuristički pritisak u korist onih kopova koji doprinose trenutno ciljanom kvalitetu.

Ova formula integriše dva efekta:

- Genomska poželjnost: Predstavljena varijablom  $g_{s,i}$  koju genetski algoritam razvija (evoluiru) kako bi poboljšao ukupnu prilagođenost (engl. *fitness*) modela.
- Kvalitativna korisnost: Modifikovana pomoću multiplikatora  $(0,6 + 0,4 \cdot bias_i)$  koji “pomera” genomsku težinu u korist onih kopova koji trenutno doprinose ciljanom kvalitetu.

Ukupna masa dodeljena kopu  $i$  u smeni  $s$  određuje se kombinovanjem obavezne minimalne mase i proporcionalno raspodeljenog preostalog kapaciteta.

$$t_{i,s} = t_{i,s}^{(0)} + \Delta_s \cdot \frac{w_{i,s}}{\sum_{k \in A_s} w_{k,s}} \quad (37)$$

Ova raspodela podleže sledećem ograničenju kapaciteta:

$$t_{i,s} \leq slack_{i,s} + t_{i,s}^{(0)} \quad (38)$$

Ovo osigurava da dodeljena masa ne premašuje raspoložive rezerve u kopu, niti da narušava maksimalna ograničenja kapaciteta smene.

Kako bi se osiguralo da finalna mešavina striktno odgovara strogim zahtevima postrojenja za preradu, model implementira heurističku petlju za korekciju kvaliteta. Ukoliko simulirani parametri smenske mešavine izađu izvan tehnološki tolerantnih okvira, algoritam automatski inicira redistribuciju masa među trenutno aktivnim radilištima, rukovodeći se sledećim korektivnim mehanizmima:

- Prekoračenje silicijuma ( $SiO_2$ ) U slučaju probijanja gornje granice  $SiO_2$  ( $Si > SiMax$ ), model prebacuje eksploataciju sa kopa sa najvećim sadržajem  $SiO_2$  na onaj sa najmanjim sadržajem  $SiO_2$  unutar aktivnog skupa.
- Suficit gvožđa (Fe): Ako sadržaj gvožđa premaši gornji limit tolerancije gvožđa ( $Fe > FeMax$ ), eksploatacija se premešta sa kopa sa najvišim sadržajem Fe na onaj sa najnižim sadržajem Fe.
- Deficit gvožđa (Fe): Nauprot tome, ako sadržaj gvožđa padne ispod tehnološkog minimuma ( $Fe < FeMin$ ), eksploatacija se pomera sa kopa sa najnižim sadržajem Fe na onaj sa najvišim sadržajem Fe.

Uvažavajući realne parametre transportne mehanizacije, odnosno nominalnu korisnu nosivost kamiona koja iznosi 50 tona, izračunata teorijska masa podleže obaveznoj diskretizaciji. Ovaj logistički korak osigurava da operativni plan bude apsolutno sprovodljiv na terenu:

$$t_{i,s}^{snap} \in 50Z \quad (39)$$

$$MinPerDep \leq t_{i,s}^{snap} \leq Cap_{i,s}$$

Procedura usklađivanja zaokružuje teorijsku masu na najbliži priraštaj od 50 tona. Nakon toga, ukupna suma smene se iterativno prilagođava u koracima od po 50 tona kako bi se što preciznije uskladila sa ciljanim kapacitetom (2.000 t).

Na kraju ovog ciklusa primenjuje se „pravilo iscrpljenosti“: ukoliko preostala masa u ležištu padne ispod praga jednog kamionskog tovara (50 t), lokacija se tretira kao potpuno iscrpljena i trajno se uklanja iz matrice planiranja za sve buduće smene.

Za svaku smenu  $s$  proces eksploatacije rude se izvršava sekvencijalnim otkopavanjem blokova iz aktivnih otkopa  $i \in A_s$ . Ovaj proces se nastavlja sve dok stvarna iskopana masa ne odgovara planiranoj masi  $t_{i,s}^{snap}$ . koja je diskretizovana u jedinice kamionskog tovara.

Ukupna masa iskopana tokom smene  $s$  ( $U_s$ ) izračunava se kao zbir svih pojedinačnih eksploatacija iz otkopa:

$$U_s = \sum_{i \in A_s} t_{i,s}^{snap} \quad (40)$$

Kvantifikacija uspešnosti, odnosno prilagođenosti (engl. *fitness*) svakog generisanog proizvodnog scenarija, vrši se posredstvom višekomponentne funkcije cilja. Ova funkcija kvantifikuje odstupanje simuliranih rezultata od ciljanih operativnih i kvalitativnih zahteva.

### 4.3 Funkcija cilja

Funkcija cilja  $F(g)$  je definisana kao:

$$F(g) = \sum_{s=1}^{shifts} P_s + P_{cov} \quad (41)$$

Gde je:

$g$ - genom rešenja,  $g=(g_1, g_2, \dots, g_s)$

$P_s$ - ukupna kaznena funkcija za smenu  $s$ : izračunava se kao zbir pojedinačnih kazni za kvalitet i kapacitet.

$P_{cov}$ - globalni penal za pokrivenost: Ova kazna osigurava da se u dugoročni plan eksploatacije integriše maksimalni broj dostupnih kopova.

Penal za kapacitet ( $P_{cap,s}$ ) izračunava se za svaku smenu kako bi se sankcionisalo bilo kakvo odstupanje od ciljane mase rude

$$P_{cap,s} = W_{cap} \cdot (Capacity - U_s)^2 \quad (42)$$

Gde je:

$U_s$ -ukupna masa rude otkopana u smeni  $s$  (t)

$Capacity$ -ciljani smenski kapacitet (2.000 t)

$W_{cap}$  -težinski koeficijent za odstupanje od kapaciteta.

Penal za kvalitet gvožđa ( $Fe$ ) aktivira se ukoliko prosečni sadržaj u smeni ( $Fe_s$ ) padne izvan dozvoljenog opsega:

Ako  $Fe_s < FeMin$ , onda

$$P_{Fe,s} = W_{Fe,hard} + W_{Fe,soft} \cdot (FeMin - Fe_s)^2 \quad (43)$$

Ako  $Fe_s > FeMax$ , onda

$$P_{Fe,s} = W_{Fe,har} + W_{Fe,soft} \cdot (Fe_s - FeMax)^2 \quad (44)$$

Gde je:

$W_{Fe,hard}$ - predstavlja „čvrsti“ fiksni penal koji se primenjuje odmah čim dođe do narušavanja granica dozvoljenog opsega

$W_{Fe,soft}$ - predstavlja kvadratni „meki“ penal koji raste srazmerno povećanju samog odstupanja.

Radi dodatnog poboljšanja kvaliteta, uveden je penal za centriranje gvožđa ( $P_{FeCtr,s}$ ) kako bi se stimulisali rezultati koji su blizu idealne ciljne vrednosti ( $Fe_{target}=48,5\%$ ).

$$P_{FeCtr,s} = W_{Fe,center} \cdot (Fe_s - Fe_{target})^2 \quad (45)$$

Slično tome, za komponentu silicijuma ( $SiO_2$ ) primenjuje se penal ( $P_{Si,s}$ ) ukoliko sadržaj premaši maksimalnu dozvoljenu vrednost ( $Si_s > SiMax$ ):

$$P_{Si,s} = W_{Si,hard} + W_{Si,soft} \cdot (Si_s - SiMax + 0.001)^2 \quad (46)$$

Kako bi se sprečilo preveliko oslanjanje rešenja na samo jedan kop i održala operativna stabilnost, primenjuje se kazna za aktivni skup kopova ( $P_{act,s}$ ):

$$P_{act,s} = \begin{cases} W_{active}, & \text{if } |A_s| < MinOpenPits \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (47)$$

Gde je  $|A_s|$ -broj aktivnih površinskih kopova u smeni  $s$ .

Ukupni penal po smeni ( $P_s$ ) definisana je kao zbir svih gore navedenih pojedinačnih kaznenih komponenti:

$$P_s = P_{cap,s} + P_{Fe,s} + P_{FeCtr,s} + P_{Si,s} + P_{act,s} \quad (48)$$

Globalni penal za pokrivenost kopova ( $P_{cov}$ ) obezbeđuje korišćenje maksimalnog mogućeg broja dostupnih kopova tokom čitavog planskog perioda.

$$P_{cov} = W_{coverage} \cdot N_{unused} \quad (49)$$

Gde je:

$W_{coverage}$ - težinski koeficijent dodeljen cilju pokrivenosti kopova;

$N_{unused}$ -broj kopova koji nijednog trenutka nisu bili uključeni u plan proizvodnje.

Penali su određeni na osnovu rangiranja prioriteta i predstavljeni su u tabeli 4-1.

Tabela 4-1 Penali korišćeni u genetskom algoritmu

Kategorija penala	Parametar	Težina	Proces odlučivanja
Strogo ograničenje	SiO <sub>2</sub> sadržaj i broj aktivnih površinskih kopova	5,0x10 <sup>6</sup>	Najviši prioritet: Sprečavanje eksploatacije tehnološki neupotrebljive rude i operativnih zastoja.
	Fe sadržaj	4,0x10 <sup>6</sup>	Visok prioritet: Obezbeđuje ispunjenje zahteva prerade
Globalna ograničenja	Zastupljenost kopova	1,0x10 <sup>6</sup>	Obezbeđuje da se svi planirani kopovi otkopaju u toku vremenskog horizonta
Fina podešavanja	Centriranje sadržaja Fe	4,0x10 <sup>4</sup>	Vodi sadržaj prema ciljanom (48,5%)
Operativna ograničenja	Odstupanje kapaciteta	1,5x10 <sup>3</sup>	Nizak sadržaj: kvalitet je veći prioritet

I ponovo naglasiti da se funkcija cilja ( $F(g)$ ) računa kao:

$$F(g) = \sum_{s=1}^{shifts} P_s + P_{cov} \quad (50)$$

Gde je:

$g$ - genom rešenja,  $g=(g_1, g_2, \dots, g_s)$

$P_s$ - ukupna kaznena funkcija za smenu  $s$ : izračunava se kao zbir pojedinačnih kazni za kvalitet i kapacitet.

$P_{cov}$ - globalni penal za pokrivenost: Ovaj penal osigurava da se u dugoročni plan eksploatacije integriše maksimalni broj dostupnih kopova.

## 5 Studija slučaja i primena stohastičkog modela

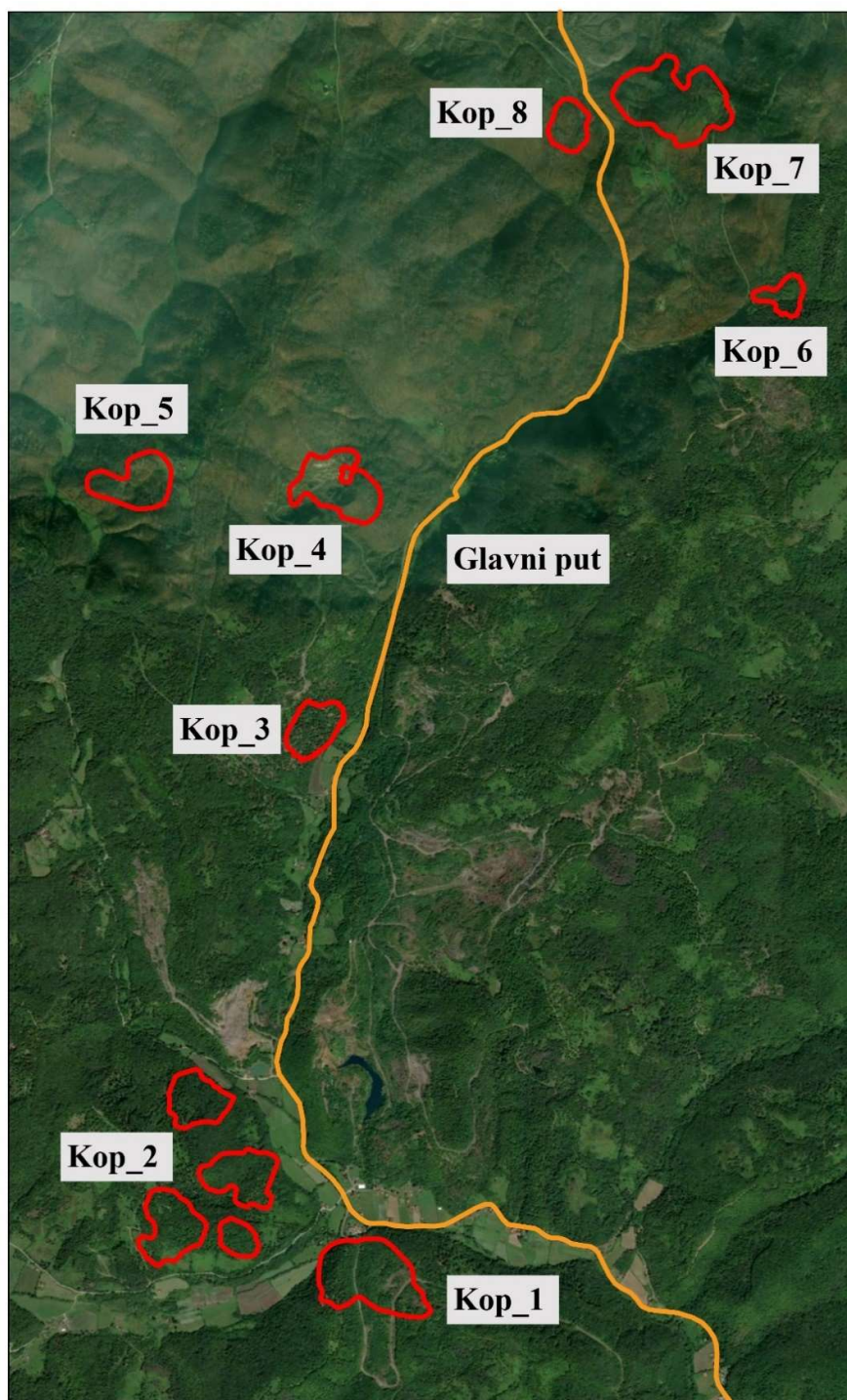
Validacija razijenog modela sprovedena je kroz detaljnu studiju slučaja koja obuhvata aoperativno planiranje na nivou radnih smeni, pri fiksnim kapacitetom od 2.000 t/smena. Fokus istraživanja su osam površinskih kopova limonitne rude malog kapaciteta. Kopovi se nalaze u Bosni i Hercegovini, južno od naselja Ljubija. Zbog strogih logističkih ograničenja angažovane mehanizacije, optimizacioni model operiše unutar zadatog okvira koji dozvoljava istovremenu eksploataciju na najmanje dva, a najviše četiri radilišta.

I pored tehnoloških ograničenja, limonitne rude imaju značajan resursni potencijal, naročito u uslovima smanjenja raspoloživosti visokokvalitetnih ruda gvožđa. Zbog toga se u novijoj literaturi sve više pažnje posvećuje razvoju postupaka kojima se limonitne rude mogu efikasnije uključiti u proizvodne tokove [44,45].

S obzirom na ograničene rezerve, relativno nizak kvalitet rude i neophodna ulaganja u mehanizaciju i infrastrukturu, eksploatacija bilo kog kopa pojedinačno ne bi bila ekonomski održiva. Međutim, pošto su kopovi locirani na relativno malom prostoru (približno 3 x 5 km), njihova sinhronizovana eksploatacija pokazala bi značajan ekonomski potencijal.

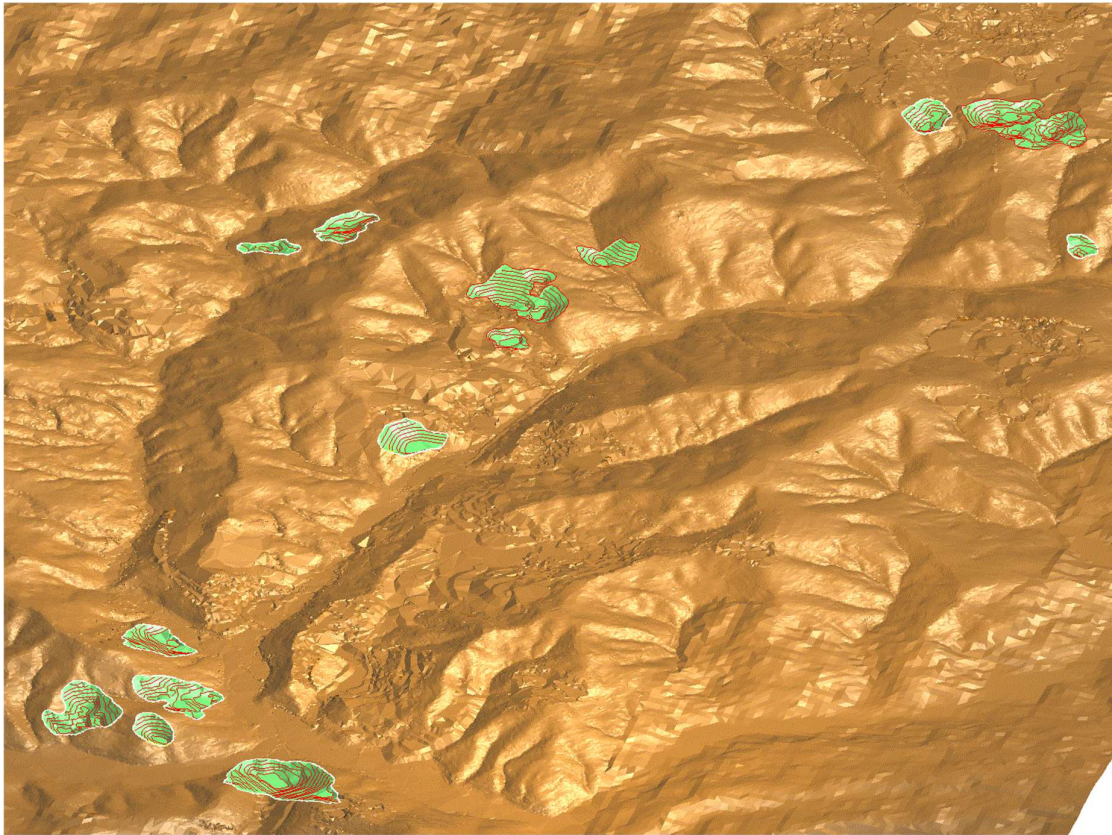
Razvoj ovog optimizacionog modela započet je tokom formalne Studije izvodljivosti za ležišta limonita u regionu Ljubije. Uvidom u dotadašnju operativnu praksu, konstatovano je da se kratkoročno planiranje oslanjalo isključivo na manuelni rad inženjera i njihovo empirijsko iskustvo. Iako je ovakav pristup zasnovan na domenskoj ekspertizi, on se pokazao kao izrazito neefikasan za procesuiranje stotina hiljada mogućih kombinacija potrebnih za izradu dugoročnog plana od 1.000 smena. Ovaj manuelni proces, iako zasnovan na stručnosti, pokazao se kao vremenski zahtevan i ograničen u svojoj sposobnosti da evaluiira ogroman prostor rešenja za plan od 1.000 smena. Shodno tome, manuelno generisan plan je u ovoj studiji usvojen kao referentna osnova (tzv. *baseline scenario*) za komparativnu analizu sa rezultatima genetskog algoritma, čime se direktno demonstrira praktična superiornost metaheurističke podrške odlučivanju u realnim industrijskim uslovima.

Slika 5-1 prikazuje lokacije površinskih kopova limonitne rude.



*Slika 5-1 Lokacija osam površinskih kopova limonitne rude*

3D model površinskih kopova limonitne rude prikazan je na slici 5-2.



*Slika 5-2 3D model površinskih kopova limonitne rude*

Ova ležišta odlikuju mala prostorna rasprostranjenost, izražen lokalni diskontinuitet i visoka promjenljivost sadržaja rude, kao i složeni litološki kontakti sa čestim prisustvom unutrašnje jalovine. Shodno tome, projektovano je osam pojedinačnih kopova i uspostavljen je dugoročni godišnji plan proizvodnje kako bi se ispunili strogi zahtevi u pogledu kvaliteta i kapaciteta.

Generisani godišnji planovi jedva zadovoljavaju kvalitativne kriterijume; konkretno, sadržaj gvožđa (Fe) varira blizu minimalnog zahtevanog praga (47-50%), dok sadržaj silicijum-dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) ostaje blizu maksimalno dozvoljenih granica ( $\leq 11\%$ ). Iako ovi rezultati ukazuju na izvodljivost eksploatacije na nivou godišnjih ciljeva, oni takođe naglašavaju da će postizanje zahtevanih standarda kvaliteta na smenskom i dnevnom operativnom nivou biti izuzetno izazovno.

U tabeli 5-1 je prikazan prosečan kvalitet rude po površinskom kopu.

Tabela 5-1 Prosečne vrednosti Fe i SiO<sub>2</sub> po površinskom kopu

Površinski kop	Fe,%	SiO <sub>2</sub> ,%
Kop_1	51,10	10,27
Kop_2	48,46	8,19
Kop_3	48,81	11,79
Kop_4	51,31	7,30
Kop_5	45,37	15,51
Kop_6	44,65	14,10
Kop_7	46,09	9,73
Kop_8	47,05	10,53

Deponija se ne tretira samo kao skladišni prostor, već kao aktivan element upravljanja kvalitetom, jer omogućava dodatno mešanje, korekciju varijabilnosti i formiranje stabilnijeg izlaznog toka prema potrošaču [1]. Konvencionalno rešenje ovog problema podrazumevalo bi uvođenje deponije za mešanje i upravljanje kvalitetom. Međutim, nekoliko faktora čini ovaj pristup nepovoljnim:

- **Nedostatak odgovarajuće lokacije:** Ne postoji prostor dovoljno veliki za smeštaj proračunate zapremine deponije.
- **Dodatni troškovi:** Povećani troškovi povezani sa dvostrukom manipulacijom materijalom (odlaganje na deponiju i ponovni utovar).
- **Tehnološka složenost:** Značajno povećanje kompleksnosti celokupnog tehnološkog procesa. Stoga je primarni fokus bio na ostvarenju sledećih ciljeva:
  - **Kreiranje izvodljivog operativnog plana:** Razvoj plana proizvodnje po smenama koji osigurava zadata ograničenja i potvrđuje postavke dugoročnog plana.
  - **Eliminacija deponije:** Minimizacija zapremine ili potpuno eliminisanje deponije iz tehnološkog procesa kroz optimizovano otkopavanje.

Iz tih razloga, postavljen je specifičan inženjerski cilj: kreiranje plana proizvodnje koji obezbeđuje usklađenost sa standardima kvaliteta isključivo kroz optimizovanu sekvencu otkopavanja sa samih radilišta, čime se potreba za deponijom potpuno eliminiše.

Postrojenje za preradu zahteva da otkopana ruda održava sadržaj gvožđa (Fe) unutar opsega od 47–50%, uz sadržaj silicijum-dioksida (SiO<sub>2</sub>) ispod 11%. Poštovanje zahteva prerade podrazumeva da se već na nivou rudarskog planiranja vodi računa o stabilnosti kvaliteta rude, sadržaju štetnih primesa i pogodnosti materijala za tehnološki tretman, jer upravo ovi faktori određuju da li će se iz eksploatacije rude moći dobiti koncentrat zadovoljavajućeg kvaliteta i iskorišćenja. Na taj način prerada postaje važan korektivni okvir za definisanje rudarskih ciljeva, a zahtevi prerade jedan od ključnih oslonaca upravljanja kvalitetom rude [44,45].

Diskontinualni sistem ima za cilj ispunjenje ovih zahteva u svakoj pojedinačnoj smeni; u slučajevima kada to nije izvodljivo, broj nezadovoljavajućih smena mora biti minimiziran kako bi se smanjio potreban kapacitet deponije.

Cilj razvijenog modela je generisanje operativnog plana otkopavanja za posmatrane površinske kopove tokom perioda od 1.000 smena (jednogodišnja proizvodnja), uz simultanu optimizaciju više kriterijuma: pridržavanje ciljanog proizvodnog kapaciteta, održavanje kvaliteta rude unutar specifikovanih granica za maksimalan broj smena, obezbeđivanje racionalnog iskorišćenja rezervi za svaki površinski kop i pružanje stabilne operativne dinamike u skladu sa ograničenjima diskontinualnog sistema.

Rad modela uslovljen je dugoročnim strateškim planom koji predviđa ukupnu proizvodnju od 2.000.000 tona u prvoj godini (1.000 smena).

Dugoročnim planom predviđeno je otkopavanje sledećih masa po površinskim kopovima:

- Kop\_2: 658.700 t
- Kop\_3: 449.400 t
- Kop\_4: 163.500 t
- Kop\_7: 529.650 t
- Kop\_8: 198.750 t

Planirana je eksploatacija ovih pet površinskih kopova, jer se javila potreba za potpunim iscrpljivanjem rezervi u kopu Kop\_8.

Razvijeni model integriše sledeće operativne uslove i ograničenja kako bi se osigurala izvodljivost i efikasnost plana proizvodnje:

- **Vremenska kontrola kvaliteta:** Kvalitet isporučene rude mora ostati unutar unapred definisanih granica postrojenja za preradu tokom maksimalnog mogućeg broja smena. Umesto jednostavnog fokusiranja na dugoročne prosečne sadržaje, model penalizuje pojedinačne smene koje odstupaju od specifikovanog opsega, uspostavljajući na taj način rigoroznu kontrolu kvaliteta kroz vreme.
- **Proizvodni kapacitet:** Utvrđen je obavezni kapacitet otkopavanja i transporta od 2.000 t/smena. Ovo ograničenje odražava ugovorne obaveze i zahteve postrojenja za preradu, uz uvažavanje operativnih limita diskontinualnog sistema. Svako odstupanje od ovog ciljanog kapaciteta rezultira kaznom unutar funkcije cilja.
- **Operativna složenost:** Da bi se maksimizovalo iskorišćenje opreme i osigurao stabilan kvalitet rude, tokom bilo koje smene mora biti aktivno najmanje dva, a najviše četiri površinska kopa. U praksi se preferira održavanje ograničenog broja aktivnih lokacija radi pojednostavljenja organizacione logistike. Donja granica sprečava zavisnost od jednog izvora rude, dok gornja granica ograničava operativnu složenost plana.
- **Logistička diskretizacija:** S obzirom na korisnu nosivost kamiona od 50 t, potencijalna masa otkopana iz kopa tretira se kao celobrojni umnožak kapaciteta kamiona (tj.  $n \times 50 t$ ). Vrednost  $n$  je ograničena između 2 i 40, sa gornjom granicom definisanom maksimalnim kapacitetom od 2.000 t.
- **Minimalni prag otkopavanja:** Iz svakog aktivnog kopa se po smeni mora otkopati najmanje 100 t kako bi se izbegle zanemarljive količine koje angažuju kapacitete opreme bez značajnog doprinosa finalnoj mešavini rude. Ovo pravilo je zasnovano na operativnom iskustvu, osiguravajući da svaki aktivni površinski kop opravda angažovanje diskontinualnog sistema.

U tabeli 5-2 su iskazane vrednosti korišćenih parametara.

Tabela 5-2 Vrednosti korišćenih parametara

<b>Parametar</b>	<b>Vrednost</b>
<b>Smenski kapacitet</b>	2.000 t
<b>Nosivost kamiona</b>	50 t
<b>Broj smena</b>	1.000
<b>Aktivni površinski kop, min.</b>	2
<b>Aktivni površinski kop, max.</b>	4
<b>Fe sadržaj</b>	47-50%
<b>SiO<sub>2</sub> sadržaj</b>	≤ 11 %
<b>Veličina populacije</b>	36
<b>Broj generacija</b>	100
<b>Elitne jedinke</b>	4
<b>Stopa ukrštanja</b>	0,9
<b>Etopa mutacije</b>	0,06
<b>Broj scenarija</b>	3

Model planiranja proizvodnje ograničen je tehničkim i fizičkim limitima rudarskog sistema. Proizvodni kapacitet po smeni postavljen je na 2.000 t, što odražava maksimum primarne jedinice za preradu, dok nosivost kamiona od 50 t definiše kapacitet transportne jedinice. Vremenski horizont planiranja obuhvata 1.000 smena, što predstavlja period od jedne proizvodne godine. Radi osiguranja operativne stabilnosti i efikasne iskorišćenosti opreme, broj istovremeno aktivnih površinskih kopova ograničen je na minimum 2 i maksimum 4.

U pogledu kvaliteta rude, proces mešanja mora održavati sadržaj gvožđa (Fe) između 47% i 50%, uz nivoe silicijum-dioksida (SiO<sub>2</sub>) ispod 11%, kako bi se zadovoljili zahtevi postrojenja za preradu.

Da bi model efikasno pretražio prostor rešenja i konvergirao ka optimumu, izvršeno je fino podešavanje evolutivnih parametara. Veličina populacije (36) i maksimalni broj generacija (100) definisani su nakon niza testiranja stabilnosti u Excel/VBA okruženju. Da bi se sprečio gubitak superiornih rešenja, implementiran je elitizam sa očuvanjem 4 najbolje jedinke. Stopa ukrštanja (0,9) i stopa mutacije (0,06) usvojene su radi održavanja idealnog balansa između brze konvergencije (eksploatacije) i sprečavanja zaglavljivanja u lokalnim optimumima (eksploracije)

Analiza je izvršena variranjem broja generacija uz održavanje konstantne veličine populacije (36). Rezultati pokazuju da broj neusaglašenih smena dostiže stabilan plato pri 100 generacija. Nakon ove tačke, povećanje broja generacija rezultiralo je zanemarljivim poboljšanjem usaglašenosti smena, uz značajno povećanje računarskog opterećenja. Rezultati su priloženi u tabeli 5-3.

*Tabela 5-3 Uticaj broja generacija na brzinu genetskog algoritma*

<b>Broj generacija</b>	<b>Smene lošeg kvaliteta</b>	<b>Procenat uspešnosti, %</b>	<b>Vreme, min</b>
<b>10</b>	57	94,3	8
<b>50</b>	32	96,8	11
<b>80</b>	24	97,6	13
<b>100</b>	19	98,1	16
<b>120</b>	18	98,2	21

## 6 Rezultati istraživanja

Rezultati dobijeni primenom razvijenog stohastičkog genetskog algoritma prezentovani su u ovom poglavlju. Algoritam je sproveden na studiji slučaja koja obuhvata osam površinskih kopova limonitne rude tokom planiranog perioda od 1.000 smena. Primarni cilj ove analize je procena uspešnosti modela da osigura:

- **Stabilan kvalitet rude:** održavanje sadržaja Fe i SiO<sub>2</sub> unutar zahtevanih granica.
- **Iskorišćenje kapaciteta:** postizanje punog iskorišćenja predviđenog kapaciteta smene.
- **Upravljanje rezervama:** obezbeđivanje racionalnog korišćenja rezervi na površinskim kopovima operativnim uslovima diskontinualnog sistema.

Kako bi se pružila sveobuhvatnija evaluacija performansi predloženog modela, neophodno ga je uporediti sa alternativnim pristupima planiranju koji bi se realno primenjivali u praksi. U tu svrhu, napravljena su i analizirana dva različita plana eksploatacije za isti skup površinskih kopova i isti vremenski okvir: manuelni plan zasnovan na inženjerskoj proceni i plan generisan razvijenim genetskim algoritmom. I manuelni i GA generisani operativni planovi razvijeni su u strogoj usklađenosti sa utvrđenim dugoročnim strateškim planom. Upoređivanjem rezultata, doprinos predloženog modela može se kvantitativno proceniti.

### 6.1 Rezultati manuelnog plana

Proces manuelnog planiranja analiziran je iz perspektive rudarskog inženjera.

Na osnovu ovih podataka i dugoročnog plana, implementirana je strategija odabira koja je rezultovala planom sa kapacitetom od 2.000 t po smeni. Eksploatacija se vrši na svih pet zahtevanih kopova u periodu od jedne godine.

Razvoj manuelnog plana u osnovi predstavlja heuristički pristup. U velikoj meri se oslanja na inženjersko iskustvo trenutno primenjivano u praksi na lokalitetu iz Studije izvodljivosti i zahteva duboko razumevanje geološkog blok modela. Sam manuelni proces smenskog planiranja, može se grubo podeliti u četiri koraka (slika 6-1).



Slika 6-1 Koraci pri razvijanju manuelnog plana

Da bi se na ovaj način razvio kratkoročni plan na smenskom nivou neophodno je da se inženjer (planer) detaljno upozna sa specifičnostima svakog dela ležišta čije otkopavanje je planirano u okviru godišnjeg plana. Ovo podrazumeva poznavanje ne samo prosečnih kvalitativnih parametara (u ovom slučaju Fe sadržaj, SiO<sub>2</sub> nivo) za razmatrane delove ležišta koja su obuhvaćena godišnjim planom otkopavanja, već i prepoznavanje diskretnijih delova (pojedinačne grupacije rudnih blokova) sa karakterističnim parametrima ležišta koji potencijalno mogu da utiču na performanse modela. Ova aktivnost u najvećoj meri će zavisiti od složenosti ležišta i iskustva inženjera i u datom primeru zahtevala je vreme od 5 radnih dana.

Sem kvalitativnih parametara neophodno je i detaljno se upoznati sa strukturom rudnih blokova, odnosno položajem grupacija blokova sa specifičnim osobinama da značajno utiču na zahtevane uslove smenskog plana (npr. grupacija blokova sa značajno visokim ili značajno niskim sadržajem). Ovo upoznavanje relevantnih geoloških svojstva, zavisi od složenosti ležišta i iskustva inženjera i u datom primeru je zahtevalo vreme od 5 radnih dana.

Nakon upoznavanja kvalitativnih i strukturnih karakteristika posebno zanimljivih partije blokova, stvara se preliminarni (grubi) plan rasporeda otkopavanja za vremenski raspon širi od smenskog nivo (npr. plan po kome će se partija posebno kvalitetnih blokova, otkopavati sa dve različite partije manje povoljnih karakteristika tokom perioda od tri meseca). Grupisanjem različitih blokova kroz šire vremenske periode (mesece) formira se grubi (engl. *draft*) plan koji pokriva razmatranu godinu. Ovi planovi se verifikuju i iterativnim postupcima poboljšavaju do nivoa da zadovoljavaju generalne uslove kvaliteta. Kreiranje ovih grubih planova zavisi od stepena složenosti i iskustva inženjera i u datom primeru je zahtevalo vreme od 7 radnih dana.

Daljom diskretizacijom postojećih grubih (engl. *draft*) planova kreiraju se dnevni, a na osnovu njih smenski planovi. Da bi se održao zahtevani kvalitet, uz manuelno praćenje otkopavanja pojedinačnih blokova kroz 1.000 smena, izračunato je da bi inženjer trošio približno 7 minuta po smeni na unos podataka i ponovno proračunavanje. To rezultira kumulativnim utroškom rada od 20 radnih dana za samo jedan godišnji scenario. Ovako visoka radna intenzivnost često primorava planere da usvajaju pojednostavljene, statične planove kojima nedostaje preciznost neophodna za kompleksnu kontrolu kvaliteta.

Shodno tome, u analiziranom primeru, 154 smene od ukupno 1.000 odstupale su od ciljanih zahteva kvaliteta, što predstavlja stopu neusaglašenosti od 15,4 %.

Važno je napomenuti da ovaj procenjeni obim posla predstavlja najbolji mogući scenario, zasnovan na pretpostavci nepromenjivih operativnih uslova, konkretno, da nema neočekivanih fluktuacija u kvalitetu rude unutar ležišta ili poremećaja u organizaciji rada. U svakodnevnom rudarskom okruženju, svako značajno odstupanje u geološkim karakteristikama ili operativnim ograničenjima zahtevalo bi potpunu reevaluaciju parametara planiranja i manuelno preračunavanje operativnog plana. Shodno tome, stvarno potrebno vreme bi verovatno značajno premašilo ovu procenu, što dodatno naglašava neefikasnost manuelnog pristupa u poređenju sa dinamičkom prilagodljivošću genetskog algoritma.

Manuelni pristup nije transparentno niti ponovljivo optimizaciono rešenje; on suštinski zavisi od iskustva konkretnog planera.

## 6.2 Rezultati stohastičkog algoritma

Operativni plan proizvodnje generisan genetskim algoritmom (GA) obezbeđuje raspodelu po smenama za isti vremenski period od 1.000 smena i ciljani kapacitet od 2.000 t po smeni, pridržavajući se operativnog ograničenja od 2 do 4 istovremeno aktivna površinska kopa. Algoritam uvodi novo ležište samo kada je postojeće iscrpljeno ili kada se zahtevani kvalitet rude više ne može održati sa preostalim aktivnim kopovima.

U generisanom operativnom planu, ciljani kapacitet smene je dosledno ispunjen kroz sve smene, dok je broj aktivnih površinskih kopova varirao dinamički. Genetski algoritam je generisao plan koji koristi samo dva aktivna kopa (Kop\_2 i Kop\_3) tokom prvih 28 smena. Nakon toga se uvodi treći aktivni površinski kop (Kop\_7). U 73. smeni, Kop\_8 se dodaje aktivnom skupu i eksploatiše se do svog potpunog iscrpljenja u 494. smeni. Iscrpljenje površinskog kopa Kop\_8 je u potpunosti u skladu sa zadatim dugoročnim planom. Budući da se stabilan kvalitet može osigurati sa trenutnom konfiguracijom, algoritam nastavlja eksploataciju na tri preostala aktivna kopa do 624. smene, kada se uvodi Kop\_4. Od te smene pa do kraja proizvodne godine, rudarske operacije se odvijaju istovremeno na ove četiri aktivne lokacije. Operativni plan generisan genetskim algoritmom za period od 1.000 smena uspeo je da striktno prati zahteve dugoročnog plana.

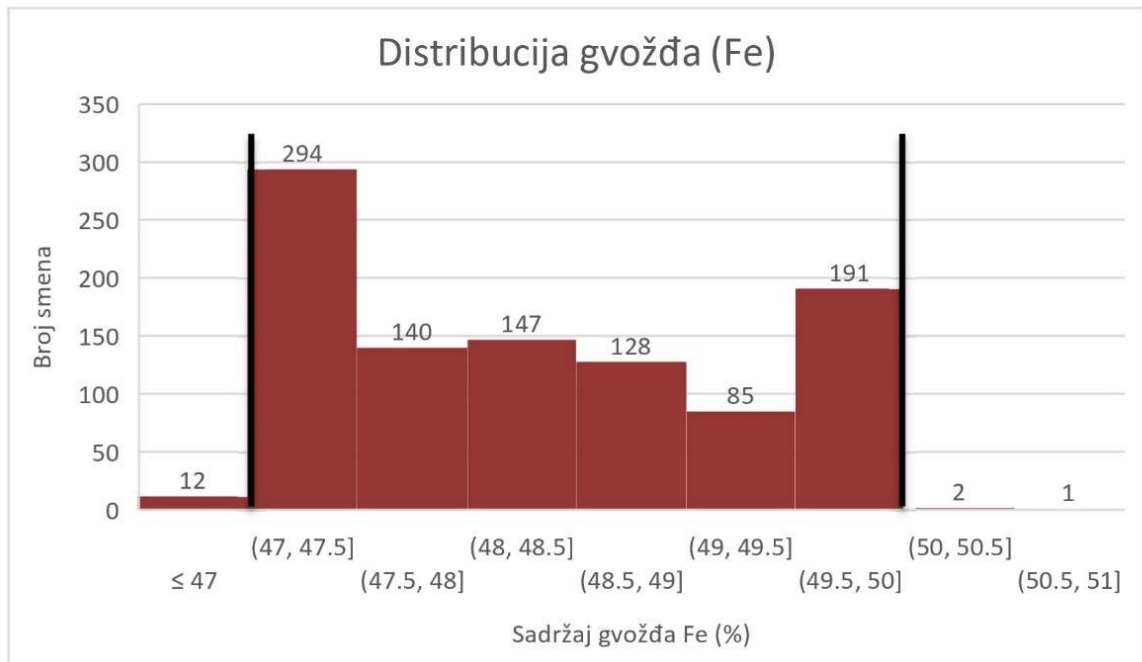
Raspodela ukupnog proizvodnog kapaciteta od 2.000.000 t za godinu za pet korišćenih površinskih kopova je sledeća:

- Kop\_2  $\approx$  32,94%
- Kop\_3  $\approx$  22,47%
- Kop\_4  $\approx$  8,17%
- Kop\_7  $\approx$  26,48%
- Kop\_8  $\approx$  9,94%

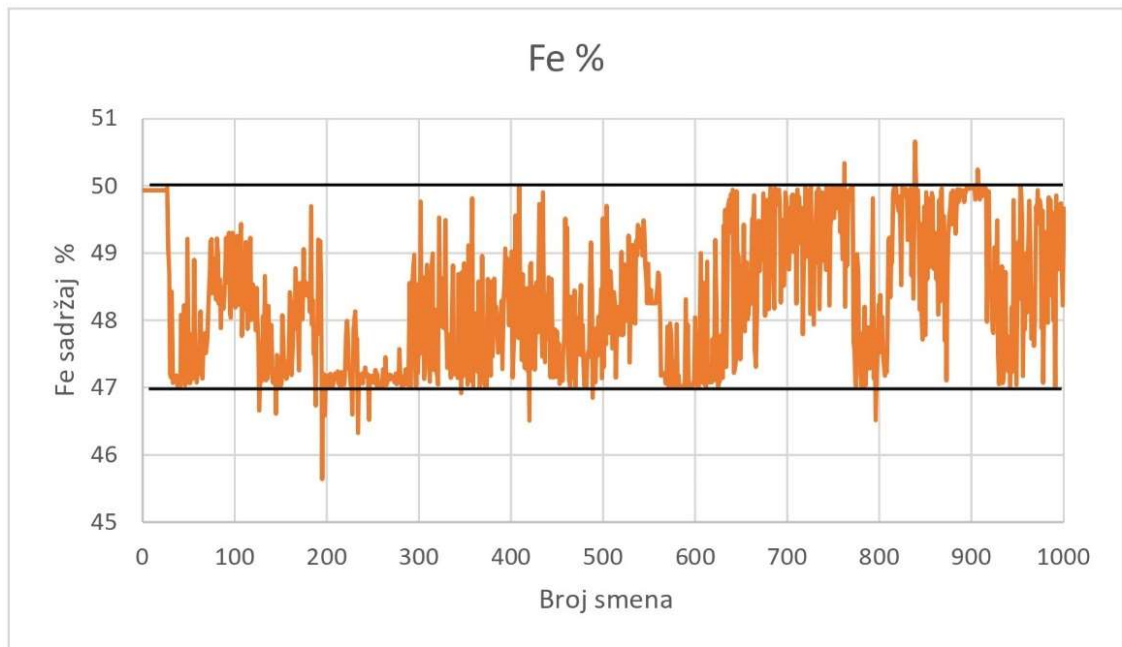
Rezultati ukazuju na to da genetski algoritam uspešno održava sadržaj gvožđa i silicijum-dioksida unutar zahtevanih granica u ogromnoj većini smena, i samim tim minimizira potrebu za naknadnim mešanjem rude na deponiji.

Operativni planovi po smenama izvršavaju se unutar ograničenja prethodno definisanog dugoročnog strateškog plana. Iako godišnji plan održava usaglašenost sa ciljanim sadržajima Fe i SiO<sub>2</sub>, postizanje istog nivoa stabilnosti na diskretnom nivou zasnovanom na smenama zavisi od geološke i prostorne izvodljivosti. U određenim operativnim prozorima, istovremeno zadovoljenje svih ograničenja je funkcionalno nemoguće.

Slike 6-2 i 6-3 ilustruju distribuciju sadržaja gvožđa (Fe) kroz 1.000 simuliranih smena.

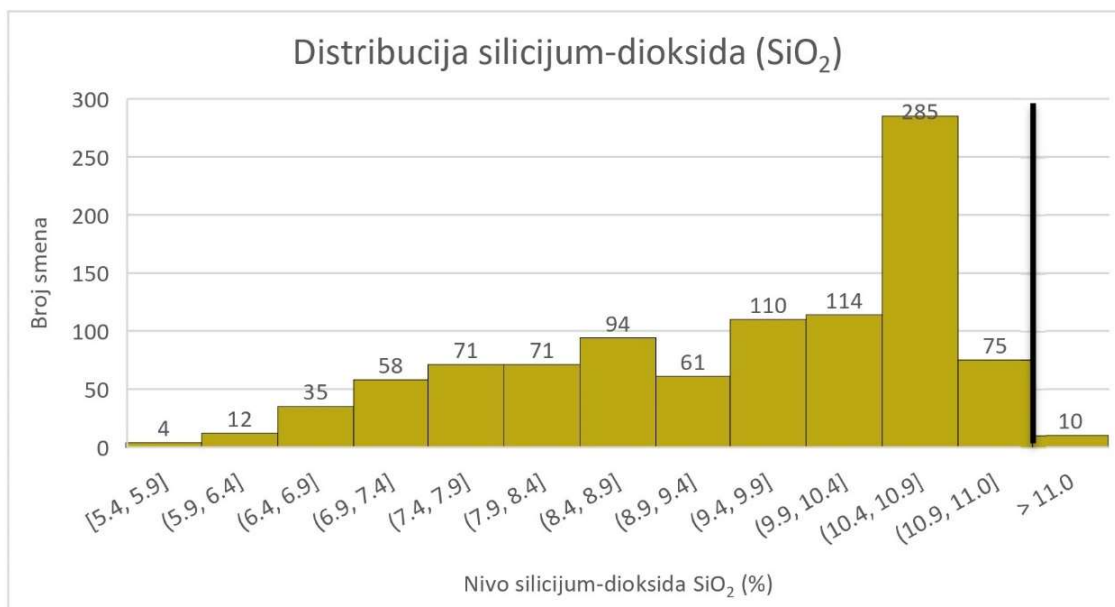


Slika 6-2 Distribucija sadržaja Fe kroz 1.000 smena. Vertikalne linije na 47% i 50% predstavljaju operativne granice kvaliteta

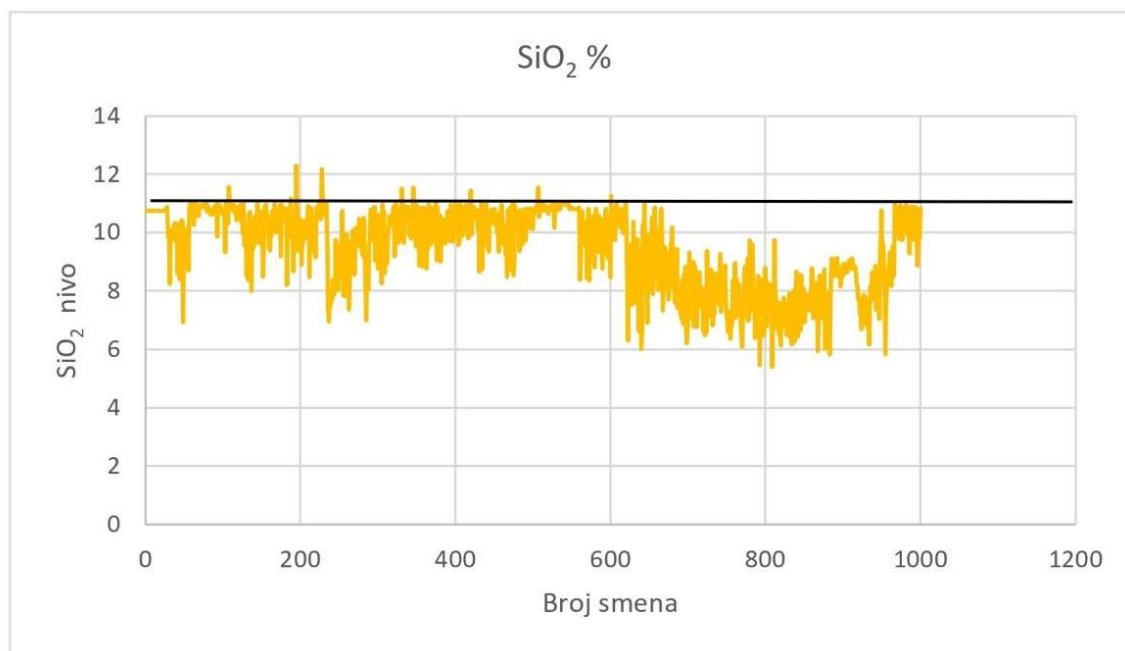


Slika 6-3 Distribucija sadržaja Fe kroz 1.000 smena. Horizontalne linije na 47% i 50% predstavljaju operativne granice kvaliteta

Slike 6-4 i 6-5 ilustruju distribuciju sadržaja silicijum-dioksida ( $SiO_2$ ) kroz 1.000 simuliranih smena.



Slika 6-4 Distribucija sadržaja  $SiO_2$  kroz 1.000 smena. Vertikalna linija označava maksimalno dozvoljeni prag od 11%.



Slika 6-5 Distribucija sadržaja  $SiO_2$  kroz 1.000 smena. Horizontalna linija označava maksimalno dozvoljeni prag od 11%.

Detaljna analiza distribucije otkriva da je ukupno 19 od 1.000 smena odstupalo od zahtevanih parametara kvaliteta. Iako su zabeležena pojedinačna odstupanja za sadržaj gvožđa (15 smena) i sadržaj silicijum-dioksida (10 smena), preklapanje u određenim slučajevima ukazuje na istovremeno kršenje oba kriterijuma, što rezultira konsolidovanim ukupnim brojem od 19 neusaglašenih smena.

U Tabeli 6-1 su prikazane smene u kojima nisu ispoštovani zahtevi po pitanju kvaliteta.

Tabela 6-1 Neusaglašene smene plana generisanog uz pomoć stohastičkog algoritma

R.br.	Smena	Kapacitet (t)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
1	108	2.000	47,767	11,553
2	127	2.000	46,656	10,99
3	145	2.000	46,613	11,005
4	188	2.000	46,734	11,161
5	195	2000	45,643	12,291
6	198	2.000	45,586	9,539
7	228	2.000	46,6	12,166
8	234	2.000	46,325	10,99
9	246	2.000	46,523	9,75
10	331	2.000	47,292	11,494
11	346	2.000	46,919	11,54
12	420	2.000	46,513	11,439
13	489	2.000	46,85	10,719
14	507	2.000	47,95	11,551
15	601	2.000	47,105	11,252
16	762	2.000	50,334	7,087
17	796	2.000	46,514	6,88
18	839	2.000	50,66	7,007
19	907	2.000	50,24	8,741
<b>Fe neusaglašeno</b>			<b>15</b>	
<b>SiO<sub>2</sub> neusaglašeno</b>			<b>10</b>	

Analiza tabele neusaglašenih smena pokazuje da su odstupanja od zahtevanih kvalitativnih granica u posmatranim smenama uglavnom umerena i bez izraženih ekstremnih vrednosti. Odstupanje sadržaja gvožđa (Fe) registrovano u 15 smena, a odstupanje sadržaja silicijum-dioksida (SiO<sub>2</sub>) u 10 smena. Zbog istovremenog odstupanje oba kvalitativna parametra u 6 smena, ukupna neusaglašenost je 19 smena, odnosno 1,9% za ceo plan generisan genetskim algoritmom.

Posmatrano po parametru Fe, većina neusaglašenosti odnosi se na vrednosti ispod donje granice, dok su samo 3 smene zabeležene sa vrednostima iznad gornje granice od 50%. Odstupanje Fe od dozvoljenog opsega kreće se u proseku oko 0,52 procentna poena. To ukazuje da su

neusaglašenosti Fe u najvećem broju slučajeva bile bliske graničnim vrednostima, a ne posledica značajnog narušavanja kvaliteta rude.

Kod parametra SiO<sub>2</sub> prekoračenje se kreće u proseku od oko 0,55 procentnih poena. Važno je istaći da se u više slučajeva radi o vrlo malim prekoračenjima, praktično graničnim vrednostima, što potvrđuje da neusaglašenost nije bila izražena u meri koja bi ukazivala na ozbiljno odstupanje od zahteva procesa prerade.

Ukupno posmatrano, dobijeni rezultati pokazuju da su neusaglašene smene uglavnom karakterisane manjim do umerenim odstupanjima od zahtevanog kvaliteta, pri čemu najveći broj vrednosti ostaje u neposrednoj blizini definisanih granica za preradu. Ovakav rezultat je značajan, jer pokazuje da čak i u smenama koje formalno ne ispunjavaju sve zadate kriterijume, kvalitet rude nije značajno udaljen od propisanih zahteva. Registrovane neusaglašenosti ne ukazuju na ozbiljnu destabilizaciju sistema, već pre na ograničena i operativno korektivna odstupanja, što potvrđuje dobru usaglašenost planskog rešenja sa tehnološkim zahtevima prerade.

U analiziranom scenariju, stopa neusaglašenosti od 1,9% (19 smena) proizilazi iz obaveznog otkopavanja blokova niskog kvaliteta čija je prostorna lokacija diktirala njihovo uklanjanje tokom specifičnih perioda radi održavanja sekvence otkopavanja. Primarni cilj predloženog GA modela je minimizacija ovih pojava. Međutim, kao što je karakteristično za metaheurističke pristupe, algoritam identifikuje visokokvalitetna suboptimalna rešenja pre nego garantovane globalne optimume.

Tabela 6-2 prikazuje distribuciju i iskorišćenje rezervi svakog pojedinačnog kopa unutar GA plana.

*Tabela 6-2 Distribucija svakog pojedinačnog površinskog kopa unutar GA plana*

<b>Površinski kop</b>	<b>Iskorišćeno u planu (t)</b>	<b>Iskorišćenje rezervi (%)</b>
<b>Kop_2</b>	658.700	25,27
<b>Kop_3</b>	449.400	22,83
<b>Kop_4</b>	163.500	53,9
<b>Kop_7</b>	529.650	16,89
<b>Kop_8</b>	198.750	100

Operativni plan koji je generisao genetski algoritam predstavlja značajan napredak u odnosu na manuelan način planiranja. U modelu zasnovanom na GA, ciljani kapacitet je precizno ispunjen za svaku smenu, ograničenje od 2–4 aktivna površinska kopa je dosledno ispoštovano, otkopane mase su izdvojene na logističke kamionske jedinice, a raspodela mehanizacije po površinskim kopovima je optimizovana prema definisanoj funkciji cilja.

### 6.3 Poređenje modela

U posmatranom slučaju, može se napraviti jasna razlika između dva pristupa:

- **Manuelni plan:** Zasnovan na iskustvu onog koji planira. Manuelni plan pruža izvodljivu osnovu, ali bi više od 15% ukupnih smena odstupalo od zahtevanog kvaliteta. Proces manualnog planiranja oduzima mnogo vremena. Svaka operativna promena zahteva ponovno izračunavanje, što značajno povećava obim posla, ali i ukupno utrošeno vreme što potencijalno ugrožava donošenje pravovremenih odluka.
- **Plan genetskog algoritma:** Ovaj model dodatno unapređuje strategiju raspodele mehanizacije po površinskim kopovima. Kapacitet i operativna ograničenja (2–4 aktivna kopa) se strogo poštuju u svakoj smeni, što je najvažnije, odstupanja od zahtevanog kvaliteta su svedena na izuzetno nisku stopu od 1,9%.

U tabeli 6-3 je prikazano poređenje manualnog i plana generisanog genetskim algoritmom.

Tabela 6-3 Poređenje manualnog i plana generisanog genetskim algoritmom

Karakteristika	Manuelni plan	GA plan
Broj smena	1.000	1.000
Smenski kapacitet	2.000 t	2.000 t
Smene koje odstupaju od kvaliteta	154 od 1.000 smena (15,4%)	19 od 1.000 smena (1,9%)
Vremenska fleksibilnost	Veoma mala	Umereno: GA dinamički prilagođava udeo eksploatacije svakog površinskog kopa
Praćenje rezervi	Podložno ljudskoj grešci	Automatsko i precizno
Vreme utrošeno za izradu plana	Najmanje 20 radnih dana	Nekoliko minuta

Istraživačka vrednost ovog modela leži u njegovoj sposobnosti da funkcioniše kao alat za validaciju izvodljivosti dugoročnih strateških planova na nivou pojedinačnih smena. Analiza stope odstupanja od 1,9% (19 od 1.000 smena) pruža kritičan uvid u ograničenja ležišta; ovi neuspesi su rezultat lokalizovane geološke „neizvodljivosti“, gde je ruda dostupna u aktivnim blokovima matematički onemogućila postizanje ciljanog kvaliteta. Činjenica da je model postigao značajno bolji rezultat od manualnog plana, koji je pokazao 15,4% neusaglašenih smena, potvrđuje da je metaheuristički pristup superioran u rešavanju kompleksnih prostora ograničenja koje inženjer ne može da obradi u realnom vremenu.

Istovremeno, preostale neusaglašene smene ne treba tumačiti kao neuspeh modela, već kao pokazatelj realnih geoloških i prostornih ograničenja sistema. Na taj način razvijeni model ne služi samo kao alat za optimizaciju, već i kao instrument za identifikaciju onih delova planskog horizonta u kojima ni uz optimalno raspoređivanje raspoloživih resursa nije moguće potpuno zadovoljiti sve kvalitativne zahteve.

Kako bi se potvrdila robustnost i potencijal za generalizaciju predloženog stohastičkog GA modela u različitim operativnim postavkama, sproveden je dodatni test osetljivosti zasnovan na scenarijima promene obima proizvodnog kapaciteta, uz zadržavanje istog geološkog blok modela i istih ograničenja kvaliteta. Horizont planiranja fiksiran je na 1.000 smena, a evaluirana su dva kapaciteta: 3.000 t po smeni (osnovni scenario) i 2.500 t po smeni (scenario sa smanjenim kapacitetom).

Tabela 6-4 sadrži uporedni prikaz simulacije algoritima za ova dva scenarija.

*Tabela 6-4 Distribucija otkopanih masa i performanse kvaliteta za scenarije uvećanog kapaciteta*

<b>Površinski kop</b>	<b>Scenario 3.000 t/smena</b>	<b>Scenario 2.500 t/smena</b>
Kop_2	874.000 t	773.750 t
Kop_3	782.750 t	608.650 t
Kop_4	303.150 t	224.850 t
Kop_5	3.100 t.	/
Kop_7	838.250 t	694.000 t
Kop_8	198.750 t	198.750 t
<b>Neusaglašene smene</b>	26 smena	22 smene

Uprkos drastičnom povećanju brzine eksploatacije i smenskih kapaciteta, algoritam nije narušio bazne postulate dugoročnog plana. Glavni dokaz ove usklađenosti jeste ponašanje modela prema površinskom kopu Kop\_8. S obzirom na to da je strateški cilj zahtevao potpuno iscrpljivanje ovog kopa, algoritam je u oba nova scenarija uspeo da prepozna ovaj limit i u potpunosti eksploatiše navedenu rudarsku lokaciju bez prebacivanja njenih kapaciteta, dok je istovremeno uvećao povlačenje masa sa preostalih aktivnih kopova kako bi namirio povećane zahteve smene.

Najupečatljiviji dokaz adaptivne moći genetskog algoritma uočen je u najopterećenijem scenariju (3.000 t/smena). Zbog brzog tempa eksploatacije, rezerve u kopu Kop\_4 su potpuno iscrpljene u 958. smeni. Suočen sa iznenadnim gubitkom jednog od primarnih izvora kvalitetne rude u samom finišu plana proizvodnje, algoritam nije dozvolio krah sistema. Bez ikakve dodatne intervencije inženjera, model je samostalno izvršio prostornu reorganizaciju i u 997. smeni u operativni proces uveo potpuno novi površinski kop Kop\_5 (otkopavši 3.100 tona). Ovaj potez predstavlja demonstraciju vrhunske reaktivnosti metaheuristike: algoritam je svesno aktivirao novi površinski kop isključivo u trenutku kada mu je bio neophodan svež materijal za usrednjavanje mešavine rude i namirivanje preostalih obaveza do 1.000. smene. U scenariju sa umerenijim kapacitetom (2.500 t/smeni), gde Kop\_4 nije bio iscrpljen, algoritam logično nije imao potrebu za aktivacijom Kop\_5.

Sa povećanjem kapaciteta i brzine otkopavanja, raste i rizik od bržeg iscrpljivanja „najbogatijih“ rudnih blokova, što otežava posao mešanja rude. Ipak, heuristička petlja za kontrolu i korekciju sadržaja pokazala je izvanrednu stabilnost. Broj neusaglašenih smena je, očekivano, blago porastao usled većeg operativnog pritiska, dostigavši 22 smene (2,2%) u scenariju od 2.500 t/smeni i 26 smena (2,6%) u maksimalnom scenariju od 3.000 t/smeni. Ovi procenti i dalje predstavljaju zanemarljiva odstupanja od idealnog plana.

Dodatno testiranje modela u scenarijima sa različitim kapacitetima proizvodnje potvrđuje da razvijeni pristup ne zavisi od samo jedne operativne postavke, već pokazuje zadovoljavajući stepen robustnosti i u promenjenim režimima rada. Zadržavanje iste logike kodiranja rešenja, istih kvalitativnih ograničenja i istog mehanizma upravljanja aktivnim kopovima pokazuje da se suština optimizacionog postupka može primeniti i pri drugačijim vrednostima kapaciteta po smeni. Time se potvrđuje da razvijeni model nije ograničen isključivo na jedan planski scenario, već poseduje potencijal za širu primenu u uslovima promenljivih proizvodnih zahteva. Ovakvi rezultati predstavljaju važan argument u prilog generalizaciji modela, jer ukazuju da njegova efikasnost proizilazi iz same strukture optimizacionog pristupa, a ne samo iz specifičnosti jednog numeričkog primera.

## 7 Ograničenja modela i pravci daljeg istraživanja

Iako je predloženi model razvijen specifično za rešavanje izazova vezanih za kvalitet ležišta opisanih u ovoj studiji slučaja, njegova osnova je zasnovana na pretpostavci univerzalne primene u različitim geološkim okruženjima. Algoritam radi sa standardnim parametrima blok-modela, kao što su sadržaj korisne komponente, zapreminska masa i štetne komponente (npr. SiO<sub>2</sub>), bez ograničenja na specifičnu sirovinu poput gvožđa, bakra ili zlata.

Ipak, mora se priznati da u ležištima koja karakteriše ekstremna geološka složenost ili izrazito nepovoljna varijabilnost kvaliteta, formulisanje operativnog plana koji zadovoljava sva ograničenja za svaku pojedinačnu smenu može biti fizički neostvarivo. Nadalje, pošto model koristi metaheuristički pristup, on generiše rešenja koja su karakteristično suboptimalna, a ne matematički apsolutna. Shodno tome, iako model ostaje robustan alat za podršku odlučivanju, njegove performanse i rezultujuća stabilnost konvergencije neraskidivo su povezani sa prostornom i kvalitativnom složenošću ležišta koje se analizira.

Razvijeni model, iako efikasan za upravljanje kvalitetom iz smene u smenu, ima nekoliko ograničenja koja otvaraju mogućnosti za buduća istraživanja:

- **Pouzdanost opreme:** Trenutni model podrazumeva 100% raspoloživost flote bagera i kamiona. On ne uzima u obzir kvarove opreme niti srednje vreme između kvarova, što može poremetiti izvršenje plana od 1.000 smena u realnom okruženju.
- **Ekonomija transporta:** Funkcija prilagođenosti (engl. *fitness function*) fokusira se prvenstveno na proizvodni kapacitet i stabilnost sadržaja Fe i SiO<sub>2</sub>. Međutim, ona trenutno ne izračunava niti optimizuje varijabilne udaljenosti transporta ili potrošnju goriva kako kopovi postaju dublji tokom vremena.
- **Geološka osetljivost:** Optimizacija je u velikoj meri zavisna od tačnosti početnog geološkog blok-modela, svako značajnije neslaganje između procenjenih i stvarnih sadržaja može dovesti do operativne neusaglašenosti.

Radi rešavanja ovih ograničenja, predlažu se sledeća ciljana poboljšanja:

- **Multikriterijumska optimizacija:** Buduće verzije modela trebalo bi da prošire funkciju prilagođenosti u zadatak multikriterijumske optimizacije. Ovo bi omogućilo istovremenu minimizaciju odstupanja kvaliteta i minimizaciju operativnih troškova povezanih sa transportnim distancama.
- **Integracija parametara zastoja i kvarova opreme:** Uključivanje podataka o pouzdanosti opreme u proces planiranja omogućilo bi modelu da generiše robusnije planove koji uzimaju u obzir potencijalne prekide uzrokovane održavanjem.
- **Dinamička adaptacija ograničenja:** Implementacija funkcije koja omogućava modelu da dinamički prilagođava broj aktivnih lokacija otkopavanja ili kapacitete smena na osnovu tržišnih zahteva ili promena u floti u realnom vremenu.

U budućim fazama istraživanja, model se može proširiti kako bi optimizovao ekonomske kriterijume, uzeo u obzir zastoje opreme i prilagodio se promenama na tržištu uporedo sa kontrolom kvaliteta i operativnim ograničenjima. Buduće verzije modela trebalo bi da teže integraciji logističkih varijabli kako bi se obezbedio još sveobuhvatniji alat za podršku odlučivanju.

Funkcionalnost razvijenog modela (brza optimizacija prema zadatim kriterijumima) može, u određenim slučajevima, omogućiti uvođenje rigoroznijih zahteva u pogledu kvaliteta (prvenstveno u domenu graničnog sadržaja - *cut-off grade*), vodeći ka povećanju ukupnih rezervi. Iako je genetski algoritam pokazao značajna poboljšanja u odnosu na manuelnu operativnu polaznu osnovu, buduća istraživanja bi trebalo da istraže komparativnu efikasnost drugih tehnika optimizacije. Konkretno, poređenje trenutnog modela sa standardnim solverima za linearno programiranje (LP) ili drugim metaheuristikama, pružilo bi dublji uvid u performanse algoritma.

## 8 Zaključak

Razvijeni model predstavlja funkcionalan okvir za optimizaciju rudarskih operacija i upravljanje kvalitetom rude u uslovima realnih tehničkih, logističkih i geoloških ograničenja. Integracijom genetskog algoritma sa diskretizacijom nosivosti kamiona, model istovremeno upravlja brojem aktivnih površinskih kopova i stabilnošću kvaliteta kao efikasnošću iskorišćenja rezervi.

Ključni doprinos ovog istraživanja je realizacija dva primarna cilja:

- Kreiranje detaljnog operativnog plana koji potvrđuje izvodljivost postojećeg dugoročnog strateškog plana, osiguravajući da su teorijski ciljevi dostižni unutar operativnih limita iz smene u smenu.
- Značajno smanjenje ili potpuno eliminisanje potrebe za deponijama tako što se kvalitet osigurava tokom otkopavanja, a time se smanjuju troškovi ponovnog pretovara i pojednostavljuje tehnološki proces.

Ograničenje na maksimalno četiri istovremeno aktivna kopa po smeni, uz dinamičko uključivanje novih lokacija kako se postojeće iscrpljuju, direktno odražava operativnu logistiku na terenu. Ovakav pristup osigurava da svi površinski kopovi budu postepeno angažovani kroz veliki broj smena, bez izazivanja naglih fluktuacija u kvalitetu rude.

Model favorizuje plan koji postiže stabilnu mešavinu unutar uskog opsega kvaliteta, efikasno koristi raspoloživi kapacitet i ravnomerno raspoređuje zahteve eksploatacije po površinskim kopovima, usklađujući se sa zahtevima dugoročnog strateškog planiranja.

Nadalje, neophodno je naglasiti da je struktura algoritma suštinski fleksibilna, što omogućava uključivanje dodatnih lokalnih ili trenutnih ograničenja po potrebi. Na primer, model se može prilagoditi privremenoj nemogućnosti otkopavanja određenih blokova usled tehnoloških prepreka ili organizacionih faktora. Ova prilagodljivost pruža modelu značajnu univerzalnost i sposobnost definisanja robusnih operativnih planova za širok spektar proizvodnih scenarija.

Implementacija unutar Excel/VBA okruženja, koja obuhvata automatizovano planiranje iz smene u smenu, praćenje preostalih rezervi u kopu i monitoring optimizacije kroz dnevnik rada (RunLog) čini model transparentnim, proverljivim i lako primenljivim u inženjerskoj praksi bez potrebe za specijalizovanim, skupim softverima. Ovo rudarskim inženjerima pruža alat za podršku pri odlučivanju kako bi mogli uspešno proceniti i sagledati posledice svojih izbora na ukupnu proizvodnju, stabilnost kvaliteta i iscrpljivanje rezervi tokom vremena.

Primarna vrednost ovog razvijenog pristupa leži u njegovoj sposobnosti da premosti dva nivoa procesa planiranja koji se često posmatraju izolovano. Umesto upravljanja kvalitetom isključivo kroz godišnje proseke, model definiše specifičnosti svake smene i utvrđuje kako kombinacije aktivnih lokacija utiču na nivoe Fe i SiO<sub>2</sub>, uz pridržavanje realnih operativnih pravila. Rezultati pokazuju da je predloženi model praktično primenljiv postupak, spreman za direktnu implementaciju u realnom okruženju uz minimalna prilagođavanja.

Nadalje, pored boljih rezultata (manjih odstupanja od zahtevanog kvaliteta po smenama), praktični značaj razvijenog GA modela ogleda se u njegovoj sposobnosti da drastično smanji inženjerski napor. Dok bi manuelni pristup planiranju za 1.000 smena zahtevao više od 20 radnih dana proračuna i praćenja baze podataka, predloženi model automatizuje ove procese u roku od nekoliko minuta, osiguravajući precizno izvršenje dugoročnog plana. U slučaju ekscenih situacija ili bilo kakvog odstupanja od postojećeg rasporeda, model je sposoban da u veoma kratkom roku generiše novi, optimizovani operativni plan, čime se obezbeđuje nesmetan kontinuitet proizvodnje bez nepotrebnih zastoja.

Pored operativne efikasnosti, model doprinosi ekološkoj održivosti rudarskih operacija. Osiguravanjem visoke usklađenosti sa ciljanim kvalitetom (98,1%) i smanjenjem potrebe za ponovnim pretovarom rude na deponijama, algoritam što potencijalno vodi ka manjoj potrošnji goriva rudarske mehanizacije i smanjenju ukupnog ugljeničnog otiska procesa eksploatacije.

Naučni doprinos ove disertacije proizilazi iz razvoja originalnog stohastičkog modela za upravljanje kvalitetom pri radu diskontinualnog sistema rada na površinskim kopovima, pri čemu su u jedinstven optimizacioni okvir objedinjeni proizvodni zahtevi, ograničenja aktivnih kopova i zahtevi kvaliteta rude. Za razliku od pristupa koji navedene aspekte posmatraju odvojeno, u ovom istraživanju oni su integrisani u model koji funkcioniše na nivou smene i koji je prilagođen realnim uslovima rudarskih operacija.

Doprinos istraživanja iskazuje se i kroz to što je problem formulisan na nivou višesemske eksploatacije većeg broja manjih i međusobno udaljenih površinskih kopova, uz striktno poštovanje zahteva prerade u pogledu sadržaja korisnih i štetnih komponenti. Time je istraživački fokus usmeren na oblast koja je u dostupnoj literaturi nedovoljno zastupljena, naročito kada je reč o simultanoj optimizaciji kapaciteta i kvaliteta u okviru jednog praktično primenljivog modela.

Poseban naučni doprinos predstavlja razvoj stohastičkog genetskog algoritma u kome su kriterijumi kvaliteta i operativna ograničenja integrisani u funkciju cilja i u logiku generisanja planskih rešenja. Na taj način je omogućeno da se kvalitet rude ne tretira kao naknadna kontrolna veličina, već kao sastavni deo procesa optimizacije i odlučivanja. Ovom disertacijom prikazan je metodološki pristup kojim je upravljanje kvalitetom ugrađeno u samu strukturu operativnog plana.

Sprovedeno istraživanje i razvoj predloženog modela rezultirali su još jednim značajnim naučnim doprinosom prvenstveno kroz uspešnu identifikaciju i sistematizaciju skupa ograničenja, ključnih uticajnih parametara i njihovih složenih dinamičkih interakcija u prostornom i vremenskom domenu. Primenom genetskog algoritma i egzaktnim matematičkim povezivanjem ovih promenljivih, dokazano je da se specifični uslovi sistema mogu efikasno obuhvatiti i optimizovati. Jasno prepoznavanje prirode ovih faktora i njihovog međusobnog uticaja ne samo da je dalo odgovore na postavljena istraživačka pitanja, već predstavlja i pouzdanu osnovu za dalja naučna usavršavanja i rešavanje srodnih problema u oblasti površinske eksploatacije.

Model je i praktično validiran na realnoj studiji slučaja koja obuhvata osam površinskih kopova limonitne rude i planski horizont od 1.000 smena, čime je pokazana primenljivost razvijenog pristupa u uslovima bliskim inženjerskoj praksi. Poređenje sa manuelno formiranim planom dodatno omogućava objektivniju procenu vrednosti razvijenog modela i njegovog potencijala kao alata za podršku odlučivanju u svakodnevnom radu rudarskih inženjera.

Pored teorijskog, rad ima i izuzetan praktičan značaj. Kroz ovo istraživanje kreiran je pouzdan alat koji rudarskim inženjerima znatno olakšava i ubrzava proces donošenja odluka, omogućavajući formiranje operativnih planova znatno višeg nivoa kvaliteta. Uspešnom implementacijom modela u široko dostupnom Excel/VBA okruženju osigurana je njegova visoka primenljivost u realnim uslovima, dok je istovremeno ostvaren cilj drastičnog smanjenja i eliminacije subjektivnih grešaka koje se neminovno javljaju u tradicionalnom procesu planiranja.

Takođe, pored optimizacije proizvodnje i upravljanja kvalitetom, jedan od ključnih praktičnih doprinosa razvijenog modela jeste drastično smanjenje uticaja ljudskog faktora. Tradicionalno operativno planiranje uveliko se oslanja na iskustvo i manuelne proračune inženjera, zbog čega je neminovno podložno subjektivnim procenama i greškama. Automatizacijom procesa donošenja odluka, mogućnost subjektivne greške svodi se na apsolutni minimum. Sva tehnološka i prostorna ograničenja su egzaktno matematički definisana, a algoritam nepristrasno pronalazi najbolji raspored, garantujući da svako rešenje bude tehnički izvodljivo i optimalno. Eliminacijom ljudske pristrasnosti

proces je standardizovan i znatno ubrzan, što direktno rezultira sigurnijim poslovanjem rudarskog projekta.

Na taj način je dodatno povećana njegova upotrebna vrednost i time disertacija ne ostaje samo na nivou teorijskog doprinosa, već nudi i operativno primenljiv okvir za unapređenje kratkoročnog planiranja, kontrole kvaliteta i racionalnog korišćenja rezervi u površinskoj eksploataciji.

## Literatura

1. Ignjatović, D.; Knežević, D.; Kolonja, B.; Lilić, N.; Stanković, R. *Upravljanje Kvalitetom Uglja*; Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2007;
2. Stevanović, D. Optimizacija i Planiranje Površinskih Kopova Stohastičkim Modelima. Ph.D. Thesis, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade: Belgrade, 2015.
3. Alipour, A.; Khodaiari, A.A.; Jafari, A.; Tavakkoli-Moghaddam, R. A Genetic Algorithm Approach for Open-Pit Mine Production Scheduling. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* **2017**, *51*, 47–52, doi:10.22059/ijmge.2017.62152.
4. Banković, M. Optimizacija Utoparno-Transportnih Sistema u Funkciji Planiranja Površinskog Kopa. Ph.D. Thesis, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade: Belgrade, 2018.
5. Darling, P. *SME Mining Engineering Handbook*; 3rd ed.; SME: Littleton, CO, USA, 2011; Vol. 1;
6. Dindarloo, S.R.; Osanloo, M.; Frimpong, S. A Stochastic Simulation Framework for Truck and Shovel Selection and Sizing in Open Pit Mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2015**, *115*, 209–219.
7. Nehring, M.; Knights, P.F.; Kizil, M.S.; Hay, E. A Comparison of Strategic Mine Planning Approaches for In-Pit Crushing and Conveying, and Truck/Shovel Systems. *International journal of mining science and technology* **2018**, *28*, 205–214, doi:10.1016/j.ijmst.2017.12.026.
8. Saavedra, M.; Risso, N.; Momayez, M.; Nunes, R.; Tenorio, V.; Zhang, J. Blending Characterization for Effective Management in Mining Operations. *Minerals* **2025**, *15*, 891, doi:10.3390/min15090891.
9. Maleki, M.; Jélvez, E.; Emery, X.; Morales, N. Stochastic Open-Pit Mine Production Scheduling: A Case Study of an Iron Deposit. *Minerals* **2020**, *10*, 585, doi:10.3390/min10070585.
10. Hustrulid, W.A.; Kuchta, M.; Martin, R.K. *Open Pit Mine Planning and Design, Two Volume Set & CD-ROM Pack*; CRC Press: Boca Raton, 2013; ISBN 978-1-4822-2117-6.
11. Malundamene, M.K.; Al Habib, N.; Soulaïmani, S.; Abdessamad, K.; Askari-Nasab, H. State-of-the-Art Optimization Methods for Short-Term Mine Planning. *F1000Research* **2025**, *13*, 1107.
12. Vargas, M.; Rubio, E.; Morales, N. Optimal Open-Pit Short-Term Planning under Uncertainty and Blending Constraints. *Santiago: University of Chile, Internal Report* **2008**.
13. Kloppers, B.J.; Horn, C.J.; Visser, J.V.Z. Strategic and Tactical Requirements of a Mining Long-Term Plan. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2015**, *115*, 515–521.
14. Gholamnejad, J.; Lotfian, R.; Kasmaeeyazdi, S. A Practical, Long-Term Production Scheduling Model in Open Pit Mines Using Integer Linear Programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2020**, *120*, 665–670, doi:10.17159/2411-9717/769/2020.
15. Both, C.; Dimitrakopoulos, R. Joint Stochastic Short-Term Production Scheduling and Fleet Management Optimization for Mining Complexes. *Optimization and Engineering* **2020**, *21*, 1717–1743, doi:10.1007/s11081-020-09495-x.

16. Manríquez, F.; González, H.; Morales, N. Short-Term Open-Pit Production Scheduling Optimizing Multiple Objectives Accounting for Shovel Allocation in Stockpiles. *Optim Eng* **2022**, *24*, 681–707, doi:10.1007/s11081-021-09701-4.
17. Navarro Torres, V.F.; Mateus, G.R.; Martins, A.G.; Carneiro, W.; Chaves, L.S. Integrated Optimization and Simulation Models for Short-Term Open-Pit Mine Planning. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2020**, *120*, 617–626, doi:10.17159/2411-9717/1266/2020.
18. Seifi, C.; Schulze, M.; Zimmermann, J. A Two-Stage Solution Approach for a Shift Scheduling Problem with a Simultaneous Assignment of Machines and Workers. In *Mining goes digital*; CRC Press: London, 2019; pp. 377–385 ISBN 978-0-367-33604-2.
19. Xu, C.; Chen, G.; Lu, H.; Zhang, Q.; Liu, Z.; Bian, J. Integrated Optimization of Production Scheduling and Haulage Route Planning in Open-Pit Mines. *Mathematics* **2024**, *12*, doi:10.3390/math12132070.
20. Holland, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*; MIT Press, 1992; ISBN 978-0-262-58111-0.
21. Goldberg, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*; Addison-Wesley, 1989; Vol. 1989; ISBN 0-201-15767-5.
22. Ignjatovic, J.; Stevanovic, D.; Bankovic, M.; Markovic, P. A Genetic Algorithm Model for Short-Term Planning and Quality Management in Open-Pit Mining. *Applied Sciences* **2026**, *16*, 2642, doi:10.3390/app16062642.
23. Otto, T.J.; Lindeque, G.C. Improving Productivity at an Open-Pit Mine through Enhanced Short-Term Mine Planning. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2021**, *121*, 589–598, doi:10.17159/2411-9717/1710/2021.
24. L'Heureux, G.; Gamache, M.; Soumis, F. Mixed Integer Programming Model for Short Term Planning in Open-Pit Mines. *Mining Technology* **2013**, *122*, 101–109, doi:10.1179/1743286313Y.0000000037.
25. Deb, K. *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley, New York. In; John Wiley & Sons, 2001.
26. Mitchell, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*; MIT Press, 1998; ISBN 978-0-262-63185-3.
27. Alipour, A.; Khodaiari, A.A.; Jafari, A.; Tavakkoli-Moghaddam, R. Production Scheduling of Open-Pit Mines Using Genetic Algorithm: A Case Study. *International Journal of Management Science and Engineering Management* **2020**, *15*, 176–183, doi:10.1080/17509653.2019.1683090.
28. Cetin, E.; Dowd, P. The Use of Genetic Algorithms for Multiple Cut-off Grade Optimisation.; Littleton, CO, USA, 2002; pp. 769–779.
29. Cetin, E.; Dowd, P.A. Multiple Cut-off Grade Optimization by Genetic Algorithms and Comparison with Grid Search Method and Dynamic Programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2016**, *116*, 681–688.
30. Hartman, H.L.; Mutmanský, J.M. *Introductory Mining Engineering*; second edition.; John Wiley & Sons, 2002; ISBN 81-265-1135-4.

31. Dym, W.; Mcqueen, K.; Hamm, E.; Wakefield, A.; Figueirôa, S.; Picanço, J.; Mesquita, M. Thoughts on Mining History. *Earth Sciences History* **2012**, *31*, 315–335, doi:10.17704/eshi.31.2.p538u01t2572p850.
32. Vujić, S. The History of Serbian Mining: In Serbian Mining and Geology in the Second Half of XX Century, *Roots*. **2014**, 1–38.
33. Yamatomi, J.; Okubo, S. Surface Mining Methods and Equipment. *Civil Engineering – Surface Mining Methods and Equipment Vol. II*.
34. Ignjatović, D. *Mašine Za Površinsku Eksploataciju, Skripta Za Studente Rudarskog Odseka*; Belgrade, 2010;
35. Verly, G. Grade Control Classification of Ore and Waste: A Critical Review of Estimation and Simulation Based Procedures. *Mathematical Geology* **2005**, *37*, 451–475, doi:10.1007/s11004-005-6660-9.
36. Vasylichuk, Y.; Deutsch, C. Improved Grade Control in Open Pit Mines. *Mining Technology* **2017**, *127*, 1–8, doi:10.1080/14749009.2017.1363991.
37. Xiang, J.; Chen, J.; Zhang, A.; Zhao, X.; Zhuo, S.; Yang, S. Multi-Objective Ore Blending Optimization for Polymetallic Open-Pit Mines Based on Improved Matter-Element Extension Model and NSGA-II. *Mathematics* **2025**, *13*, doi:10.3390/math13111843.
38. Dharmadhikari, D.; Ray, A.; Shinde, B.; Raut, S. Machine Learning Applications in Ore Grade Estimation and Blending Optimization for Modern Mining. *Applied Chemical Engineering*, doi:10.59429/ace.v8i4.5790.
39. Khan, Z.; Edward, E. Machine Learning Applications in Ore Grade Estimation: A Case Study from Ansteel Mining Corporation. **2023**, doi:10.5281/zenodo.8176332.
40. Ortiz, J.M.; Avalos, S.; Riquelme, A.I.; Leuangthong, O.; Madani, N.; Frenzel, M. Uncertainty and Value: Optimising Geometallurgical Performance Along the Mining Value Chain. *Elements* **2023**, *19*, 377–383, doi:10.2138/gselements.19.6.377.
41. Jamshidi, M.; Osanloo, M. Reliability Analysis of Production Schedule in Multi-Element Deposits under Grade-Tonnage Uncertainty with Multi-Destinations for the Run of Mine Material. *International Journal of Mining Science and Technology* **2018**, *29*, doi:10.1016/j.ijmst.2018.04.016.
42. Levinson, Z.; Dimitrakopoulos, R. Connecting Planning Horizons in Mining Complexes with Reinforcement Learning and Stochastic Programming. *Resources Policy* **2023**, *86*, 104136, doi:10.1016/j.resourpol.2023.104136.
43. Shiryayeva, O.; Suleimenov, B.; Kulakova, Y. Sustainable Mineral Processing Technologies Using Hybrid Intelligent Algorithms. *Technologies* **2025**, *13*, doi:10.3390/technologies13070269.
44. Jin, J.; Zhu, X.; Li, P.; Li, Y.; Han, Y. Clean Utilization of Limonite Ore by Suspension Magnetization Roasting Technology. *Minerals* **2022**, *12*, 260, doi:10.3390/min12020260.
45. Tang, Z.; Li, P.; Gao, P.; Li, Y.; Han, Y. Minerals Phase Transformation by Hydrogen Reduction Technology: A New Approach to Recycle Iron from Refractory Limonite for Reducing Carbon Emissions. *Advanced Powder Technology* **2022**, *33*, 103870, doi:10.1016/j.apt.2022.103870.
46. de Carvalho, J. Simultaneous Shovel Allocation and Grade Control Decisions for Short-Term Production Planning of Industrial Mining Complexes – an Actor-Critic Approach. *International*

47. de Carvalho, J.P.; Dimitrakopoulos, R. Integrating Short-Term Stochastic Production Planning Updating with Mining Fleet Management in Industrial Mining Complexes: An Actor-Critic Reinforcement Learning Approach. *Appl Intell* **2023**, 53, 23179–23202, doi:10.1007/s10489-023-04774-3.
48. Dimitrakopoulos, R. Stochastic Optimization for Strategic Mine Planning: A Decade of Developments. *Journal of Mining Science* **2011**, 47, 138–150, doi:10.1134/S1062739147020018.
49. Godoy, M.C.; Dimitrakopoulos, R. Managing Risk and Waste Mining in Long-Term Production Scheduling. *Transactions, Society for Mining, Metallurgy and Exploration* **2004**, 316, 43–50.
50. Simonovic, M. *Bageri I*; Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1987;
51. Ignjatović, D. *Rudarske Mašine*; 2009;
52. Mikić, M.; Kržanović, D.; Jovanović, M. Suzbijanje Stvaranja i Podizanja Prašine Na Površinskim Kopovima Pri Kamionskom Transportu. *Inovacije i razvoj* **2009**.
53. Malbašić, V.; Stojanović, L.; Kovačević, Ž. *Diskontinualni Transport*; 2009;
54. Ignjatović, D.; Šubaranović, T.; Đenadić, S. *Mašine i Pomoćni Radovi Na Površinskim Kopovima*; Beograd, 2021;
55. Borović, R. *Kamionski Transport Na Površinskim Kopovima*; Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1995;
56. Jovančić, P.; Tanasijević, M.; Ignjatović, D. Upravljanje Imovinom i Proaktivni Sistem Nadzora Pri Održavanju Opreme u Rudnicima.; Instirut za istraživanja i projektovanja u prvrredi, 2015.
57. Ignjatović, D. *Mašine Za Površinsku Eksploataciju*; Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2013; Vol. 1;.
58. Surface Mining Equipment: A Brief Guide Available online: <https://almarwan.com/news/4190/surface-mining-equipment-brief-guide> (accessed on 22 March 2026).
59. Pavlović, V. *Tehnologija Površinskog Otkopavanja*; Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1992;
60. Alarie, S.; Gamache, M. Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* **2002**, 16, 59–76, doi:10.1076/ijsm.16.1.59.3408.
61. Awuah-Offei, K.; Osei, B.; Askari Nasab, H. *Modeling Truck-Shovel Energy Efficiency under Uncertainty*; 2011; ISBN 978-1-55195-281-9.
62. Ozdemir, B.; Kumral, M. A System-Wide Approach to Minimize the Operational Cost of Bench Production in Open-Cast Mining Operations. *Int J Coal Sci Technol* **2019**, 6, 84–94, doi:10.1007/s40789-018-0234-1.
63. Elevli, S.; Elevli, B. Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE. *Acta Montanistica Slovaca* **2010**, 15.
64. Shamsi, M.; Nehring, M. Determination of the Optimal Transition Point between a Truck and Shovel System and a Semi-Mobile in-Pit Crushing and Conveying System. *Journal of the*

- Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2021**, *121*, 497–504, doi:10.17159/2411-9717/1564/2021.
65. Long, M.; Schafrik, S.; Kolapo, P.; Agioutantis, Z.; Sottile, J. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review. *Machines* **2024**, *12*, 713, doi:10.3390/machines12100713.
  66. Codoceo-Contreras, L.; Rybak, N.; Hassall, M. Exploring the Impacts of Automation in the Mining Industry: A Systematic Review Using Natural Language Processing. *Mining Technology* **2024**, *133*, 191–213, doi:10.1177/25726668241270486.
  67. Matsimbe, J. Optimization of Shovel-Truck Productivity in Quarries. *International Journal of Research in Advent Technology* **2020**, *8*, 1–9, doi:10.32622/ijrat.810202008.
  68. Blom, M.; Pearce, A.R.; Stuckey, P.J. Short-Term Planning for Open Pit Mines: A Review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* **2019**, *33*, 318–339, doi:10.1080/17480930.2018.1448248.
  69. Osanloo, M.; Gholamnejad, J.; Karimi, B. Long-Term Open Pit Mine Production Planning: A Review of Models and Algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 3–35, doi:10.1080/17480930601118947.
  70. Silva-Júnior, A.L.; Martins, A.G.; Pantuza-Jr, G.; Cota, L.P.; Souza, M.J.F. Short-Term Planning of a Work Shift for Open-Pit Mines: A Case Study. *Cogent Engineering* **2023**, *10*, 2168172, doi:10.1080/23311916.2023.2168172.
  71. Knyazkin, E.A.; Klebanov, D.A.; Yuvakaev, R.O. New approaches to mineral quality variability evaluation using big data for operational control of ore flows in mining operations. *Journal of Mining Institute* **2025**, *275*, 145–154.
  72. Zhang, Y.; Zhao, Z.; Bi, L.; Wang, L.; Gu, Q. Determination of Truck–Shovel Configuration of Open-Pit Mine: A Simulation Method Based on Mathematical Model. *Sustainability* **2022**, *14*, 12338, doi:10.3390/su141912338.
  73. Moradi-Afrapoli, A.; Upadhyay, S.; Askari-Nasab, H. Truck Dispatching in Surface Mines - Application of Fuzzy Linear Programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2021**, *121*, 505–512, doi:10.17159/2411-9717/522/2021.
  74. Ercelebi, S.; Bascetin, A. Optimization of Shovel-Truck System for Surface Mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2009**, *109*, 433–439.
  75. Al Habib, N.; Ben-Awuah, E.; Askari-Nasaba, H. Review of Recent Developments in Short-Term Mine Planning and IPCC. *Mining Optimization Laboratory* **2022**, *1*, 138.
  76. Al Habib, N.; Badiozzamani, M.; Ben-Awuah, E.; Nasab, H.A. Short-Term Planning Optimization of Open Pit Mines with Monte-Carlo Haulage Simulation in Presence of Semi-Mobile IPCC. **2025**, doi:10.1080/17480930.2025.2583065.
  77. Eivazy, H.; Askari-Nasab, H. A Mixed Integer Linear Programming Model for Short-Term Open Pit Mine Production Scheduling. *Mining Technology* **2012**, *121*, 97–108, doi:10.1179/1743286312Y.0000000006.
  78. Newman, A.M.; Rubio, E.; Caro, R.; Weintraub, A.; Eurek, K. A Review of Operations Research in Mine Planning. *Interfaces* **2010**, *40*, 222–245, doi:10.1287/inte.1090.0492.
  79. Potakey, N.E.; Ortiz, J.M. A Review of Grade Control Methods in Open Cast Mining. *Annual Report* **2022**, 59–70.

80. Mahboob, M.; Genc, B. Review of Machine Learning-Based Mineral Resource Estimation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **2023**, *122*, 1–10, doi:10.17159/2411-9717/1250/2022.
81. Anvari, K.; Benndorf, J. Real Time Mining—A Review of Developments Within the Last Decade. *Mining* **2025**, *5*, doi:10.3390/mining5030038.
82. Tiu, G.; Ghorbani, Y.; Jansson, N.; Wanhainen, C.; Bolin, N.-J. Quantifying the Variability of a Complex Ore Using Geometallurgical Domains. *Minerals Engineering* **2023**, *203*, 108323, doi:10.1016/j.mineng.2023.108323.
83. Journel, A.C. Geostatistic for Conditional Simulation of Ore Bodies. *Economic Geology* *69*, 673–687.
84. Dimitrakopoulos, R. Conditional Simulation Algorithms for Modelling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimisation. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 173–179, doi:10.1080/09208118908944041.
85. Lerchs, H.; Grossmann, I.F. Optimum Design of Open-Pit Mines. **1965**, *58*.
86. Picard, J.-C. Maximal Closure of a Graph and Applications to Combinatorial Problems. *Management Science* **1976**, *22*, 1268–1272.
87. Caccetta, L.; Giannini, L.M. An Application of Discrete Mathematics in the Design of an Open Pit Mine. *Discrete Applied Mathematics* **1988**, *21*, 1–19, doi:10.1016/0166-218X(88)90030-3.
88. Hochbaum, D.S.; Chen, A. Performance Analysis and Best Implementations of Old and New Algorithms for the Open-Pit Mining Problem. *Operations Research* **2000**, *48*, 894–914, doi:10.1287/opre.48.6.894.12392.
89. Whittle, J. Open Pit Optimization. In *Surface Mining*; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME): Littleton, CO, 1990; pp. 470–475.
90. Whittle, J. A Decade of Open Pit Mine Planning and Optimization—The Craft of Turning Algorithms into Real Money. In Proceedings of the Proceedings of the 28th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM); 1999; pp. 15–23.
91. Johnson, T.B. Optimum Open-Pit Mine Production Scheduling. University of California, Berkeley, Ph.D. Thesis, 1969.
92. Dagdelen, K. Optimum Open Pit Mine Production Scheduling by Lagrangian Parameterization. In Proceedings of the Proceedings of the 19th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM); SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration), 1986; pp. 127–142.
93. Caccetta, L.; Hill, S.P. An Application of Branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling. *Journal of Global Optimization* **2003**, *27*, 349–365.
94. Ramazan, S. Open Pit Mine Production Scheduling: A New Mathematical Formulation and the Fundamental Tree Algorithm. Ph.D Thesis, Colorado School of Mines, 2001.
95. Ramazan, S.; Dagdelen, K.; Johnson, T.B. Fundamental Tree Algorithm in Optimising Production Scheduling for Open Pit Mine Design. *Mining Technology* **2005**, *114*, 45–54, doi:10.1179/037178405X44511.
96. Ramazan, S. The New Fundamental Tree Algorithm for Production Scheduling of Open Pit Mines. *European Journal of Operational Research* **2007**, *177*, 1153–1166, doi:10.1016/j.ejor.2005.12.035.

97. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing.
98. Černý, V. Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm. *J Optim Theory Appl* **1985**, *45*, 41–51, doi:10.1007/BF00940812.
99. Kumral, M.; Dowd, P.A. A Simulated Annealing Approach to Mine Production Scheduling. *Journal of the Operational Research Society* **2004**, doi:10.1057/palgrave.jors.2601902.
100. Askari Nasab, H.; Szymanski, J. *Modeling Open Pit Dynamics Using Monte Carlo Simulation*; 2005;
101. Paulinas, M.; Ušinskas, A. A Survey of Genetic Algorithms Applications for Image Enhancement and Segmentation. *Information Technology and Control* **2007**, *36*, 278–284.
102. Doderovic, A.; Doderovic, S.-M.; Stepanovic, S.; Bankovic, M.; Stevanovic, D. Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining. *Minerals* **2023**, *13*, doi:10.3390/min13111401.

## **Biografija**

Jelena Ignjatović rođena je 13. jula 1991. godine u Valjevu. Osnovnu školu je završila 2006. godine posle čega upisuje gimnaziju „Hiljadu trista kaplara“ u Ljigu, opšti smer. Nakon završene srednje škole, 2010. godine upisuje Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, smer rudarsko inženjerstvo, modul Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina.

Osnovne studije je završila 2014. godine odbranom završnog rada na temu „Mašine za rad na deponijama uglja i načini deponovanja i zahvatanja“. Prosečna ocena na studijama bila je 8,66.

Iste godine je upisala master akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, smer Rudarsko inženjerstvo, modul Površinska eksploatacija ležišta mineralni sirovina. Odbranom master rada na temu „Definisanje kontinualnog sistema eksploatacije II ugljenog sloja na P.K. Drmno“ završila je master studije 2015. godine sa prosečnom ocenom 9,90.

Od 2016. godine zaposlena je u preduzeću „Kaolin“ a.d. Valjevo koje se bavi eksploatacijom kvarcnog peska i kaolinske gline.

U školskoj 2017/2018. godini upisala je doktorske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu. Položila je sve ispite sa prosečnom ocenom 9,94.

U Savezu inženjera i tehničara Srbije položila je stručni ispit za obavljanje poslova pri eksploataciji mineralnih sirovina 19. februara 2019. godine.

Od marta 2021. godine radi na poziciji Glavnog rudarskog inženjera u preduzeću „Kaolin“ a.d. Valjevo. U okviru svojih profesionalnih aktivnosti učestvuje u istražnim radovima, izradi planova proizvodnje i pripreme rude, vodi računa o poštovanju propisa i izrađuje izveštaje za Ministarstvo rudarstva i energetike, kao i drugu stručnu i tehničku dokumentaciju.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Јелена Игњатовић

Број индекса P705/17

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

### Стохастички модел за управљање квалитетом при раду дисконтинуалног система на површинским коповима

---

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

**Потпис аутора**

У Београду, 31.03.2026.

---

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јелена Игњатовић

Број индекса P705/17

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Стохастички модел за управљање квалитетом при раду дисконтинуалног система на површинским коповима

Ментор др Дејан Стевановић, ванредни професор

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

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

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

**Потпис аутора**

У Београду, 31.03.2026.

---

## Изјава о коришћењу

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

---

### Стохастички модел за управљање квалитетом при раду дисконтинуалног система на површинским коповима

---

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

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

**Потпис аутора**

У Београду, 31.03.2026.

---

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

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

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

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

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

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